

图8-9 示出恒定 a_c 值下 K_{ISCC} 与 σ_s 之间的线性关系。若 $\sigma_s = 980\text{MPa}$ (100kgf/mm^2), $K_{ISCC} = 2058\text{N/mm}^{3/2}$, 代入上式得到 $a_c = 0.88\text{mm}$; 这个 $K_{ISCC} - \sigma_s$ 数据便是图8-9中的X点, 这种图解法对于工程估算是很方便的。

表 8-6 Φ^2 随椭圆形状的变化

a/c	Φ^2	a/c	Φ^2	a/c	Φ^2
0.00(浅长裂纹)	1.00	0.50	1.46	1.00(半圆裂纹)	2.46
0.25	1.14	0.75	1.89		

当 a_c 等于常数时, 例如图8-9中0.5mm, 代入式(8-38), 得

$$K_{ISCC} = \sqrt{2.5} \sigma_s \quad (8-39)$$

K_{ISCC} 与 σ_s 之间具有如图8-9中的线性关系: σ_s 愈高, 能容许的 a_c 值愈小, 反而愈不安全。

此外, 设计还规定了材料和工艺, 因此说, 设计对失效起了主导作用。

(2) 材料——腐蚀发生在材料的表面, 对腐蚀失效分析时, 材料的耐蚀性是一个基础问题。材料也包括涂层材料, 要从技术和经济两方面选择最佳的防护技术, 这些技术也包括耐蚀材料和防护涂层的对比。

(3) 工艺——良好的材料需要合适的工艺来保证。例如, 对于造船工业来说, 引入了焊接工艺来提高生产率, 但也引入了脆断问题; 与此相对应, 对于奥氏体不锈钢, 应用了焊接工艺, 也迎来了晶间腐蚀问题。

(4) 使用——用户对于设备及其工作环境的正确监护, 可延年益寿, 抵制腐蚀失效。

上面, 我们曾按“职责”将失效问题划分为设计、材料、工艺和使用; 为了全面管理腐蚀以及其他失效, 应如图8-10所示, 综合考虑: 设计是主导, 材料是基础, 工艺是保证, 使用是监护。

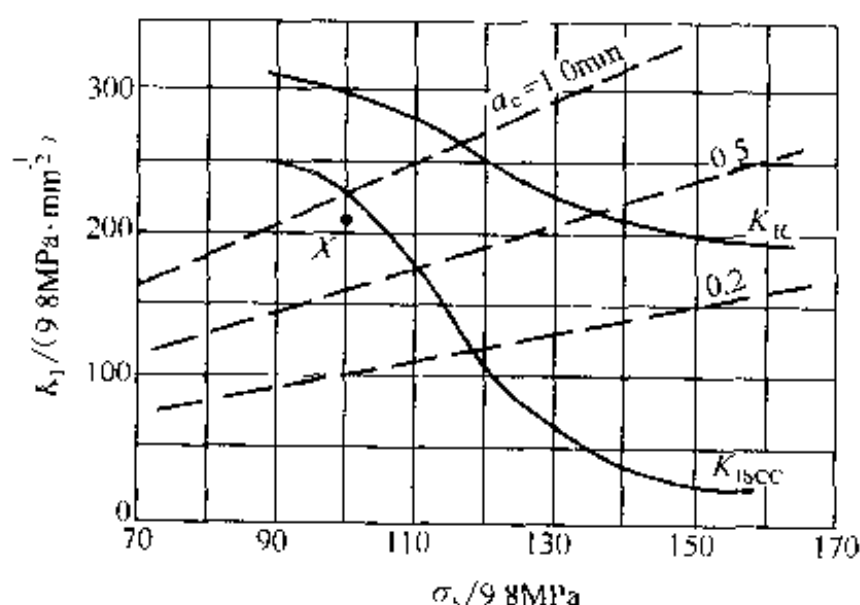


图 8-9 40CrNiMo 钢 K_{IC} 及 K_{ISCC} 与 σ_s 之间的关系(虚线为 a_c 线)

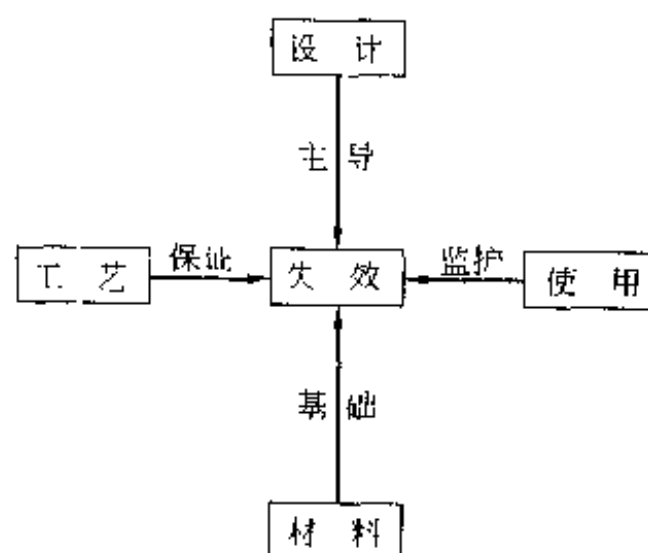


图 8-10 全面管理腐蚀失效

8.6 结 语

腐蚀是一个复杂问题, 讨论它的经济和管理问题, 更增加它的难度。本章尝试运用第1章之首的第3警句的“三易”原则, 简易地论述本章中各种变易现象中不易的规律; 体系如图8-11所示, 说明如下。

(1) 经济形式在变化, 并涌现许多新名词, 如知识经济、新经济、信息经济、生物经济等。在私有财产制度存在的社会, 人们追求利益的心理不会改变, 经济学的基本规律不会改

变，第 8.1、8.2 两节介绍了两个基本规律。

(2) 经济体制是一切经济活动的大环境，是这些变化的外因。第 8.3 节论述我国经济体制的转变历程，以及有关的经济增长方式的比较。

(3) 第 8.4 节介绍腐蚀经济损失的国外估算方法；第 8.5 节从管理机构和腐蚀失效分析两方面，讨论腐蚀管理。

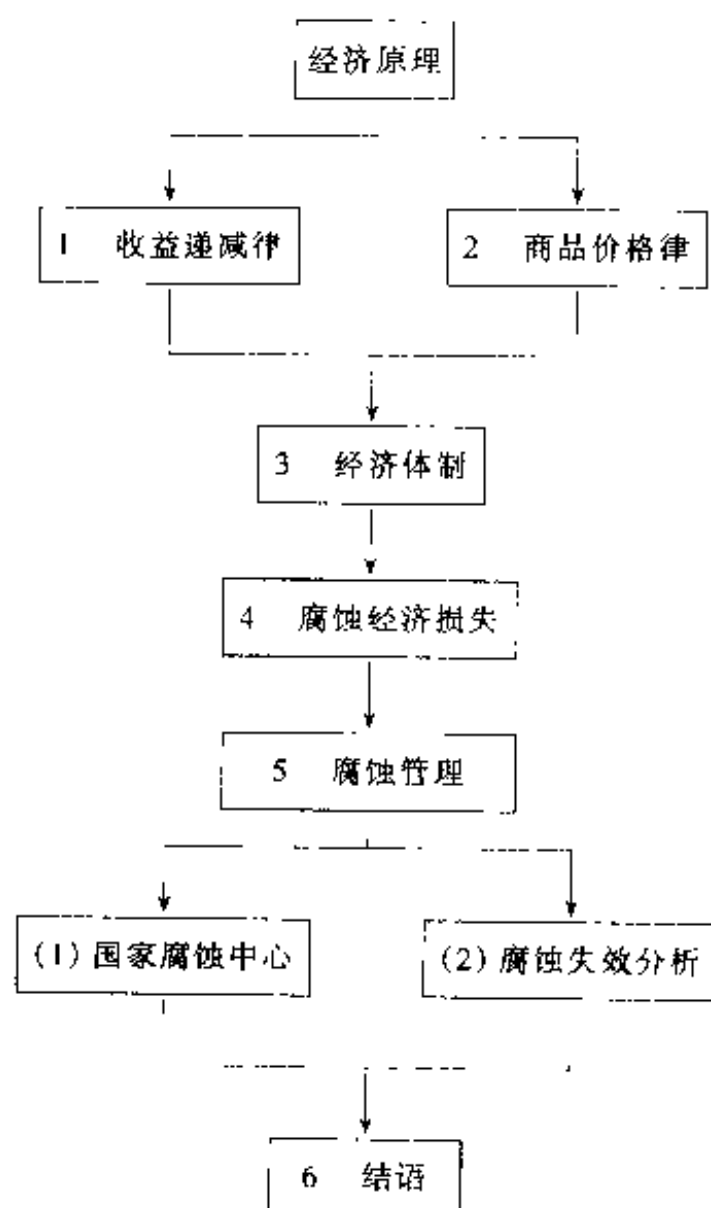


图 8-11 第 8 章结构图

参 考 文 献

- [8-1] 肖纪美. 材料学工作者学习宏观事物的思考. 世界科技研究与发展. 1995, 17 (4): 4~8
- [8-2] 肖纪美. 十五年大局和两个热门话题. 世界科技研究与发展. 1998, 20 (2): 57~62
- [8-3] 肖纪美. 材料的应用与发展. 宇航出版社, 1988. 400~420

第9章 腐蚀科研和教育

科教兴国。

科研是发展科技的一种主要手段。科研是“科学学”的主要内容，它既是一种技巧，也是一种艺术。在科学发展史中，科研既自觉又不自觉地受着哲学的影响和支配；而科研成果的反馈，又影响了哲学的发展。因此，科研是一个宏观问题；腐蚀科研是宏观腐蚀学中的一个问题（参见第1章中图1-9）。

腐蚀科技需要腐蚀科技人员去推广、应用、发展和更新；腐蚀科技人才又需采用多种方式去培育。腐蚀教育也是一个宏观问题（图1-9）。

艾文思（U.R. Evans）（1889—1980年）是一位杰出的腐蚀科学家，20世纪从20年代初以来，毕生和独身地从事腐蚀科学的研究和教育。他的学生霍尔（T.P. Hoar）在英国皇家学会报告^[9-7]中引了两段妙语。艾文思由于人们不重视金属腐蚀这门科学，温和地发了一点牢骚：

“腐蚀被认为是污秽（dirty）的学科。” (9-1)

由于人们敬重他在腐蚀科研和教育的贡献，令他喜悦地得到这样的回答：

“但是，你却使它（腐蚀科学）成为高尚的。” (9-2)

看来，热爱自己的专业，并不是污秽的，而应是高尚的。

对于包括腐蚀在内的材料问题，本章将首先讨论科研类型、选题、方法、管理和人才培养五个问题，主要参考了著者近年来的观点（文献〔1-1〕p.445~479；〔1-6〕p.259~278；〔9-1〕）。然后，依据著者的学术经历，在第9.6节的“治学方法——学海拾贝”，论述与科研教育有关的、我极力推崇的“类比与交叉”（〔9-2，9-3〕）。

9.1 科研类型

俗话说：“研究研究”，主要是认真分析问题，有时用作不负责任的推托之词。《辞源》谓：

“研究是穷究事理。” (9-3)

英文将研究叫 research，其中 search 是“探索”，re-是“反复”，那么，“反复探索”构成研究。目前在国内外将研究与开发（development）并称为科学研究，简写为 R&D。

对科学研究的分类，可以明确科学研究这个概念的外延，即具有科学研究所反映特有属性的具体类型。为了明确概念，定义和分类（或划分）是十分必要的，当然也是较困难的。因此，对于科学研究要尝试进行分类，只有这样，才能明确概念和要求，制定政策和采取措施。

美国科学基金会（NSF）及联合国教科文组织（UNESCO）对于科学研究分为基础研究（basic research）、应用研究（applied research）及发展或开发（development）三类，定义如下。

“基础研究——是没有特定的商业目的而进行的，为了使科学知识进展的原始

性研究。它可以是提出单位现在或将来感兴趣的领域。” (9-4)

“应用研究——是为了特定产品或工艺而进行的，发现新科学知识的研究。” (9-5)

“开发——是将研究结果或其他的一般科学知识转移到产品或工艺所遇到的非常规问题所涉及的一系列技术活动。” (9-6)

若采用这些定义，则它们的共性是一个“新”字：“原始性”当然是崭新；“非常规”也有新意。因此，有些“科研”，只是常规的检验，既不是研究，也称不上发展。这三类研究的主要区别在于应用：基础研究没有特定的商业目的，或只是现在或将来感兴趣的领域；应用研究却是针对特定产品或工艺；发展则进一步将成果转移而进行物化，创造经济效益。

从技术发展史来看，不是取消哪一种科研，而是依据国家的经济条件和长远利益，确定合适的比例，这就需要国家制定政策，予以保证。关于理论联系实际的问题，可以有多种方式：进行如定义(9-4)所规定的基础研究，若有意识地注意可能的实际应用，就可能有实用的效益；若进行如定义(9-5)及定义(9-6)所示的应用研究及开发工作，若有科学判断力，则可抽出需要解决的基础理论问题；依靠专家和系统工程，剖题而进行各类科学研究，有可能形成理论与实际密切结合的整体。

我国将基础研究和应用研究的基础部分（即应用基础研究）并称为“基础性研究”。

腐蚀科研大体上可分为两类。

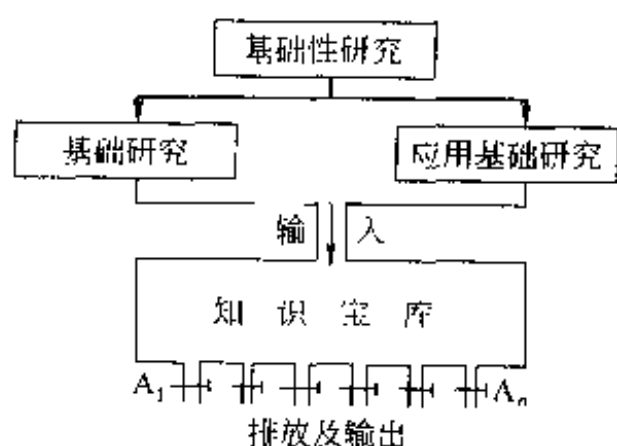


图 9-1 基础性研究

(1) 基础性研究——如图 9-1 所示，它包括电化学及金属物理方面的基础研究以及腐蚀科学方面的应用基础研究。研究成果输入知识宝库贮存，然后打开阀门 A_1, \dots, A_n ，排放（废弃部分）及输出知识。应该强调，知识是信息，它别于物质和能量，物质是守恒的，能量是守恒的，或者物质与能量 ($\Delta E = C^2 \Delta m$) 之和是守恒的，但是，信息只有一小部分报废和更新，但绝不守恒，取之不尽，用之不竭。对比 20 世纪 40 年代与 80 年代的教科书或专著，基础部分很少报废。

(2) 应用与开发——应用及开发现有的腐蚀科学技术，尽量降低腐蚀的经济损失。正如第八章第三节所指出那样，应用和开发经济上最佳的腐蚀控制技术。

9.2 科研选题

提出一个问题往往比解决一个问题更重要，科研选题若不合适，则或者出不了成果，或者成果只是低水平的重复，意义不大。因此，科研选题是十分关键的。在下面，借用生物学、军事学、经济学、固体物理学中的著名原理，提出几点基础性科研选题的看法。

(1) 生存竞争，适者生存——将达尔文的进化论应用于科研选题，需要说明“适”、“竞争”和“生存力”三点。

“适”就是要符合社会的选原则，即国家的科学技术方针：经济建设必须依靠科学技术，科学技术必须面向经济建设。科研选题必须深刻而全面理解和符合这个方针。

任何“竞争”，都有一个规则。我国的科研竞赛，各有自己的跑道，在自己的跑道上奋力前进。

科研的“生存力”，主要是比贡献，摆实力。应该记住，学科的界限从来是模糊的，学

科的领域从来是在变化的。若能站得高，则看得远，当强大实力队在上战场竞赛时，弱小的力量可在学科的边缘形核而壮大。美国的“硅谷”成长是一个很好的实例。这便是科研的战略，也是科研的艺术。

(2) 加强协调，继续生存——人类社会，既有竞争，才能前进，又要协调，才能维持强大的生存力。吃“大锅饭”，是社会结构中很落后的关系。赫胥黎从生物进化论得出这样的看法：一个否定生存斗争这种天性的人类社会，必然要从外部遭到毁灭；一个被这种天性统治的社会，必然要从内部遭到毁灭 (8-23)。竞争与协调，从来是人类社会需要解决的大问题。科研协调有各种含义，既有学科之间的协作，相互启发借鉴；也有科研队伍内部的协调，扬长避短；也有科研队伍之间的协作，增强集团竞争力和生存力。为了保持良好的协作的关系，必须有合作的伦理道德。

(3) 明确科研类型，选题选人——孙子兵法谋攻篇指出：“知彼知己者，百战不殆。”科研选题时，知彼者，了解题目的类型和难度；知己者，了解自己队伍的能力。只有这样，才能百战而不败。

(4) 收益递减律的借鉴——如图 9-1 所示的、表示投入-产出关系的、经济学中的收益递减律，当 $d^2g/dx^2 < 0$ ，则边际收入 dg/dx 便会递减。科研有效益问题，也就是经济问题。经济就是计算和选择，因此，科研选题时，可以借用经济学中的收益递减律。

以材料科学中位错理论为例，自从 1934 年 Taylor、Orowan、Polanyi 分别独立地提出位错假说，1955~1956 年 Hirsh 等人利用电子显微镜在薄晶体中观察到了位错及其运动以来，位错的研究一直很活跃。但是，到了 20 世纪 70 年代以后，这种活跃的势头已经大为减弱。这种现象可用收益递减律来说明：位错周围的弹性问题已经基本解决，并进入教科书；而位错中心的问题难度大，既需要运用量子力学，又要求大容量的计算机，从事这方面科研工作，投资大，收益少；此外，还有不少的新兴工作，吸引了有才华的科学家。

科技工作者自选科研课题以及科技管理人员组织科研课题时，都应该自觉地注意收益递减律的作用。

(5) 形核理论的启示——在科研过程中，不管是实验观测或理论分析，都是复杂的思维过程。在这些过程中，人脑中形成新概念和新理论，可从固体物理中的形核理论受到启示，这对科研选题，是很有参考意义的。

图 9-2 中 OA 是溶解度线。温度为 T_1 时，成分为 C_1 的 1 号合金及成分为 C_2 的 2 号合金均为单相 α 。温度为 T_2 时，2 号合金仍为 α ，而 1 号合金则有过饱和度 ΔC 及过冷度 ΔT ，应有新相 β 析出。形核理论导出初期的形核速度 I 为：

$$I = A \exp\left(-\frac{\Delta G^* + Q}{RT}\right) \quad (9-7)$$

$$\Delta G^* = K_1 - \frac{\gamma_{\alpha\beta}^3}{(\Delta G_v + \Delta G_s)^2} \quad (9-8)$$

$$\Delta G_v = K_2(\Delta T) \text{ 或 } K_3(\Delta C) \quad (9-9)$$

$$\Delta G_s = K_4 \delta^2 \quad (9-10)$$

式中， ΔG^* 是形核功； Q 是溶质原子的扩散激活能； T 是绝对温度； $\gamma_{\alpha\beta}$ 是 α/β 的相界面能； R 是气体常数； ΔG_v 是对应于 ΔC 或 ΔT 的单位体积体系的化学自由焓变化，为负值，是析出过程的推动能量，它正比于 ΔT 或 ΔC ； ΔG_s 是弹性应变能，为正值，它正比于原子尺寸不吻合度 δ 的平方，它与 $\gamma_{\alpha\beta}$ 都是析出过程的阻止能量； A 、 K_1 至 K_4 都是比例系数。

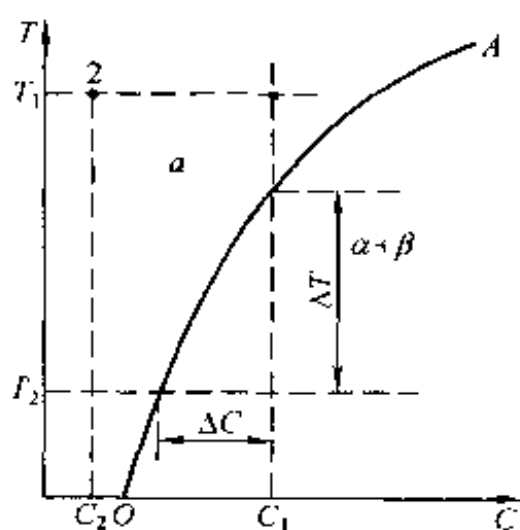


图 9-2 二元系相图

若将脑中析出新概念和新理论的过程类比于上述的均匀形核理论，则图 9-2 中的 C 便是知识量，因而得出几点看法。

① 析出的必要和首要条件是系统处于过饱和状态，因此，博学和广泛地搜集资料，才能增加 C ；冷静的思考，降温可增加 ΔT ，轻松的环境，降压与降温一样可增加 ΔC 。

② 相界面能 $\gamma_{\alpha\beta}$ 以三次方的关系影响形核功 ΔG^* ，而 ΔG^* 又以指数关系影响形核速度；弹性应变能 ΔG_s 为正值，抵消了负值 ΔG_v 的一部分，也以 $(\Delta G_s + \Delta G_v)^2$ 的关系增加 ΔG^* ；不吻合度 δ 不仅以平方的关系增大 ΔG_s ，也以类似的关系增大 $\gamma_{\alpha\beta}$ 。由此可以看出和理解，与传统概念（母相 α ）析出吻合度很差的概念和理论（新相 β ）是多么的困难；科学史中

这种重大事例并不罕见。

但是，依据非均匀形核理论，振动和刺激影响了起伏，有助于形核。最有效形核的地点是界面，完全润湿的界面可以使 $\Delta G^* = 0$ ，非常有效地促进了形核。这个道理也很简单，依靠已有界面的支持，即与之交叉学科的支持，较易形核。

上述分析提供了一个很重要的选题启示，寻求学科的结合，在界面上易于孕育出新概念和新理论。材料科学中的金属学，开始时，典范地结合了冶金学和机械学，在发展中，又不断地与物理、力学和化学结合，分别形成金属物理、金属力学和金属化学。当前，以材料为整体，与系统学、经济学、未来学、科学学等的结合，在界面上正孕育而形成宏观材料学^[1-5]。

图 4-1 所示的断裂学科的三个分支——断裂力学、断裂物理、断裂化学，也是在学科的交叉地带形成的。金属腐蚀学是在电化学与金属学的交叉地带形成；而金属应力腐蚀断裂问题的研究又需注入力学，金属学、电化学和力学这三个学科的交叉将提供丰盛的科研课题。这些交叉地带正是维纳（Wiener）在《控制论》所指的**最大收获**的领域。

对于腐蚀学领域科研的选题，更要在“可持续发展”战略的高度去思考。

9.3 科研方法

9.3.1 学习与科研

首先要区分学习与科研。如图 9-3 所示，将一个事物置于个人的判断，若属“未知”，再置于科学界进行判断，若仍属“未知”，才有必要进行科研，否则通过学习，就能达到“已知”。因此，发现与发明的参考点是科学界整体，不是个人，进行科研之前，要进行文献检索，将本应“学习”的事，变为“科研”，这是一种很大的浪费。

科研需要用各种推理方法。在下面，先比较演绎法和归纳法；然后，重点地论述具有创造性思维的假说法，最后，对于科研水平提出一些看法。

9.3.2 推理方法

第7章图7-3曾示出三种思维形式——概念、判断和推理之间的关系；(7-4)至(7-6)分别给出它们的定义。推理有演绎和归纳两种方法，它们之间的比较如表9-1所示，由于它们有着这些特性，因而有各种定义：

“演绎推理就是前提与结论之间有必然性联系的推理。” (9-11)

“归纳推理就是前提与结论之间有或然性联系的推理。” (9-12)

“演绎推理就是前提与结论之间有蕴涵关系的推理。” (9-13)

“归纳推理一般说是由个别的事物或现象推出该类事物或现象的普遍性规律的推理。” (9-14)

表 9-1 演绎法和归纳法的比较

方 法	演 绎 法	归 纳 法
前提与结论之间联系	必然联系	或然联系
认识发展过程	一般到特殊	特殊到一般
结论判断范围	没有超过前提	超过前提

图 9-4 进一步比较了演绎法和归纳法。几何学、热力学、形式逻辑中三段证法等，典型地运用了演绎法，从公理出发，借助于定义，导出定理，再从定理出发，可演绎出一大片命题。只要是前提真实，而且形式正确，则演绎出的结论具有必然性。

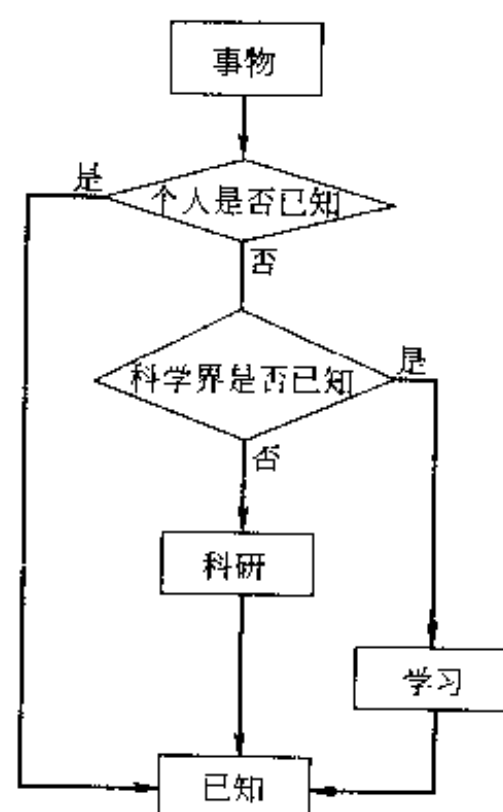


图 9-3 学习与科研

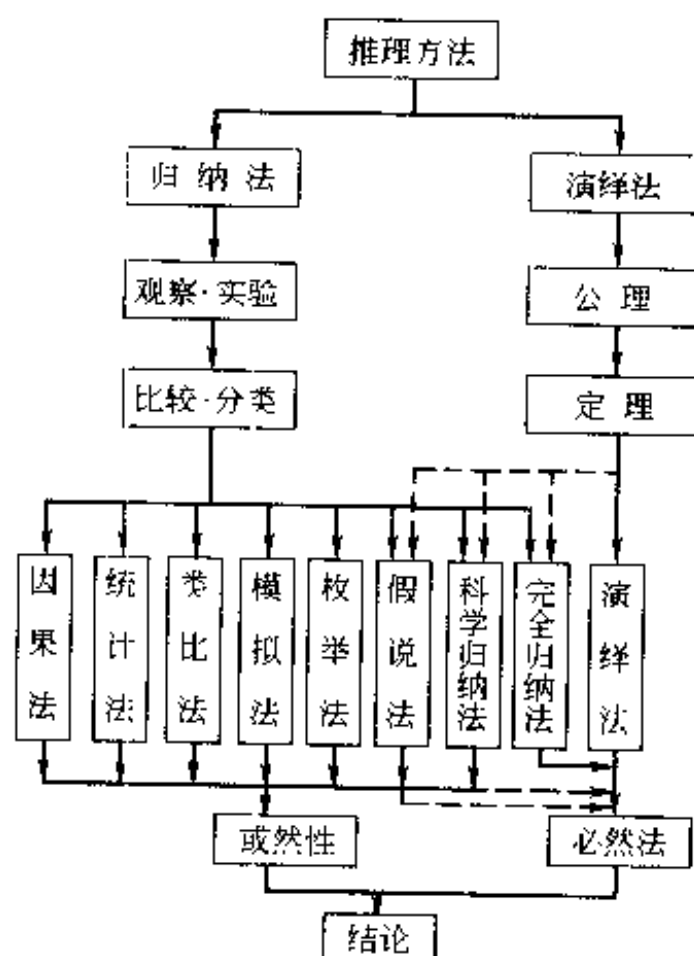


图 9-4 演绎法和归纳法的比较

枚举法是一种归纳法，若完全枚举了，便是完全归纳法。例如，实数 A 与 B 之间的比较只有三种关系： $A > B$ ， $A = B$ ， $A < B$ ，若三种情况下都能证明某个命题，则采用的方法是完全归纳法，结论具有必然性，它是一种演绎法。用枚举法归纳出的规律，若又能用已有的理论进行解释，则是科学归纳法，所获结论也可具有必然性；假说法虽然是一种归纳法，但从假说推出结论，要用到演绎推理和其他的科学原理，所获结论也可具有必然性；图 9-4 用虚线表示这两种方法与演绎法之间的关系。

归纳法首先通过观察与实验，掌握资料；然后采用不同的方法整理资料——比较和分类、分析和综合；最后对于整理后的事实——一些经验规律进行科学的解释。解释可以导致新发现，是一种创造性的思维。科技人员的解释能力反映了他们的科技水平。因为所谓解释，就是要将新观察到的事实或新提出的设想，与过去已广泛接受的事实或设想联系起来，对于过去，若一无所知或所知甚少，则解释能力是很低的。正如图 9-2 所示的那样，只有 C

大的博学之士采用正确的方法才能沉淀出新的概念。

9.3.3 假说法

人们通常说,进行科研要有一个“想法”,或者是“工作假说”,或简称为“假说”(hypothesis)。假说不一定全是假,译名不妥,易于误会;它实质上是思维开始时所提出的想法或建议,“想法”较“假说”为佳,从俗,以后仍用假说。

恩格斯有一句名言:

“只要自然科学在思维着,它的发展形式就是假说。” (9-15)

对于假说,采用如下的定义:

“根据已有知识,人们对于所研究的事物或现象作出初步的解释,这就是假说。” (9-16)

从图 9-5 可以看出假说法在发现中的关键作用:演绎法只能“发展发现”,因为研究结果不会超过前提;而归纳法通过所提出的假说,通过验证后,可以获得新发现。当然,从新发现导出的结果,也就是假说法导出的结果,需要从两方面反复验证,才能得到广泛承认:

(1) 归纳验证——从大量的事实,进行考核;

(2) 演绎验证——以假说为大前提,其他的判断为小前提,导出新的结论,然后搜集事实或进行控制条件下的实验,进行考核。

想法或假说是很重要的,目前各国的实验和工艺水平都比较接近,因而在未验证之前,

想法也保密,否则在竞争中将会落后。各种工作中的“智囊团”的出谋划策作用,是值得十分重视的。

图 9-5 所示的提出假说的各种方法中,类比、近似、统计、破绽法属于理性推理的方法;而机遇和直觉则属于非理性的方法。各种方法的讨论参见文献 [1-1] 第八章。对于直觉和机遇,介绍如下。

一种突如其来的颖悟或理解,叫做直觉。直觉是脑内下意识活动,有时会出现在睡眠之中。产生直觉典型条件是:对问题进行了一段时间专注的研究,并渴求得到解答;当放下这项工作之后,在其他的场合,常常会冒出一一种使人感到喜悦的获得解答的思路。文献中列出一些史例,例如,爱因斯坦说他有关时间与空间深奥概括是在病床上想到的;亥姆霍兹说,巧妙的设想往往是在一夜酣睡之后的早上,或是当天气晴朗缓步攀登树木葱茏的小山时,达尔文关于进化变异的趋向,是在坐马车的途中想起来的……。

新概念和新知识有时起源于研究过程中某种意外的观察或机遇现象;例如,伦琴发现 X 射线, Richet 发现生物诱导的敏感作用,

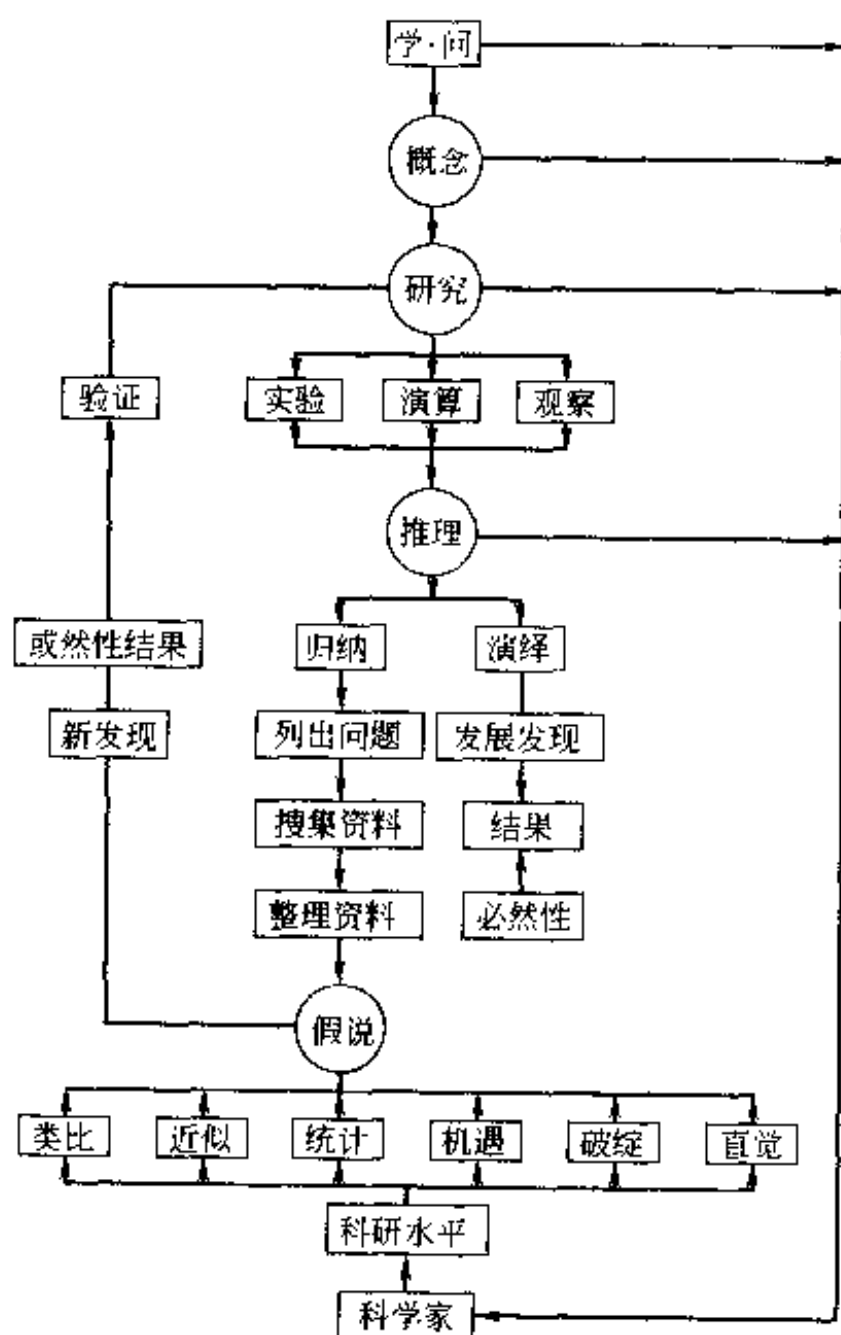


图 9-5 发明和发现思维图

Durham 发现抗血清, Wilm 意外地发现铝合金的时效硬化, ……。

直觉和机遇都是非理性的方法, 能够有所发现, 需要几个先决条件:

(1) 长时间的思索和追求——机遇偏爱有准备的头脑; 她只垂青那些懂得怎样追求她的人, 因此, 要留意意外之事;

(2) 直觉和机遇是一种刺激或振动的促进形核, 为了获得足够的知识过饱和度 (参见图 9-1), 学习、降温 and 降压都是有幫助的。

9.3.4 科研水平

对提高科学研究人员的水平, 特别是从事基础研究和应用基础研究的水平, 提出几点看法。

(1) 科学家的品质——最基本的两条品格是对科学的热爱和难以满足的好奇心。聪明、勤奋和坚韧不拔的精神, 都是科研成功所需的其他条件。如图 9-5 所示: 要“学以聚之, 问以辩之”(易·乾), 形成“学问”; 要学点逻辑, 做到概念清楚、判断恰当、推理正确、结论有用; 善于综合运用各种研究方法, 临机应变。

(2) 科研的战略——较长期的科研计划和设想是战略问题。一个是选人, 另一个是选题。对于基础研究, 主要是支持人; 对于应用研究和开发, 支持的是项目。选题可参考本章第 2 节, 值得特别强调的是式 (9-7) 的界面形核, 当甲学科与乙学科结合时, 甲学科中一些普通的概念、原理或技术, 应用到乙学科, 可能是非常新奇而有效。腐蚀学从本质上讲, 是一门交叉的边缘学科, 不要放弃或忽视“移植”方法。依据选题的“适者生存”的原则, 适当的时候要战略转移。

(3) 科研的战术——《孙子》的兵法十三篇对科研的战术, 具有十分有益的作用。对于科研工作, 要有充分准备, 集中兵力发动进攻, 占领阵地, 必要时, 要迂回作战, 或暂时搁置难题, 先扫清外围问题。对于成果, 要跟踪线索, 扩大收获; 对于发现和发明, 要善于运用系统法和各种假说法。

(4) 科研战斗——必须有攀登科学技术高峰的拼搏精神和毅力。成功时的最大报酬是作出新发现时感到的激动, 也要准备将会遇到的痛苦的失败。开尔文 (Kelvin) 写道:

“我坚持奋战五十五年, 致力于科学的发展。用一个字可以道出我最艰辛的工作特点, 这个字就是失败。”

(9-17)

一个人的创造力也许由于对一个问题的长期接触而衰退。恢复战斗力的一个措施就是更换领域, 这不是“逃兵”, 而是不自觉地在领域的界面上形成新的概念, 保持敏锐的头脑, 作出更多的贡献。

9.4 科 研 管 理

科研管理的内容很多, 可归纳为事、物、财、人、信息五类: 事即课题的始终; 物即设备; 财包括经费和经济效益; 人包括选用和评价; 信息包括获得、存贮和利用。这些科研管理的内容都是为了科研的目的或效益; 科研成果的评价也必须首先针对这种目的和效益。科研管理的目的除开评价科研效益之外, 还要积极地提高科研的效率。

9.4.1 科研效益

如图 9-6 所示, 前面讨论的三种科研类型有不同的效益, 不能强求一致。

(1) 开发——是科研与生产之间的桥梁, 其成果应有明显的经济效益, 在这类科研的全过程, 应交替地有技术评价和经济评价, 依据这些评价结果作出决策: 确定课题, 选择或变

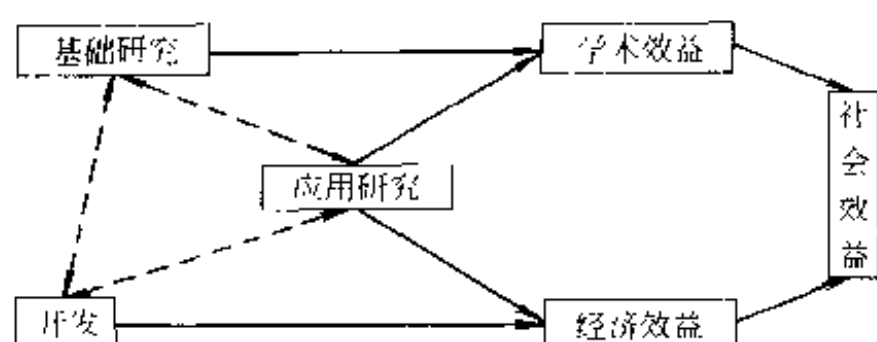


图 9-6 科学研究的效益 (----→信息流动方向)

动技术路线以及最后的成果评定。应该指出，发展工作所获经济效益也包括了基础研究和应用研究的贡献，从这个角度讲，这两类研究有间接的经济效益。

(2) 应用研究——具有明确的应用目标，它的经济效益需要开发工作的肯定和证实，因而只能预测。由于应用研究具有“发现新科学知识”的特点 [定义 (9-5)]，因而它具有导致技术上的突破以及开辟新工业领域的学术效益。

(3) 基础研究——主要的效益是学术效益，它丰富了人类科学知识的宝库，应用研究和开发工作从这种宝库 (图 9-1) 汲取营养。因此基础研究的经济效益是潜在的，难以估量的。

由于这三类科研工作有不同的目标和效益，评价时有不同的判据和方式，不能雷同。

第一节提到，腐蚀科研分为基础性科研及应用开发两类，即将图 9-6 中应用研究分为两类，即应用基础研究及应用研究。因此，应依据类型，按应取得的效益评价。

9.4.2 科研效率

效率有时间的概念，速率的概念，如何加速科研效益的获得，是科研管理的目标。科研成果必须有新意，因而科研是具有创造性的劳动，在正确选题 (参见本章第二节) 之后，对于不同类型的课题如何适当管理，特别是处理好人际关系和信息流动，是提高科研效率的重要方面。分述一些观点如下。

(1) 开发工作应加强管理、立项及分阶段地进行技术评价和经济评价，依据评价结果进行调整。应用研究在立项时应注意应用背景及前景的分析和论证，技术路线是否可行和是否具有新意；进行时注意阶段成果或进展情况的检查。基础研究则支持人，而不是具体管理项目；只要人选恰当，就可以放心，因为科学家对他所从事的工作总比管理人员知道的更清楚。过多地干预影响创造性；更重要的是，为他们准备良好的工作环境——物质的和精神的。

(2) 科研组负责人或学术带头人除开道德品质端正及具备一定学术威望之外，要具备组织才能。对于基础研究和应用研究更应挑选想像力丰富的人，因为这些人足智多谋，更富启发性。一个研究集体应该集中共同的目标集中研究，而每个成员又要相对独立。青年的独创精神和拼搏精力与成熟科学家的丰富经历相结合，是十分有益的。

(3) 竞争与协调是人类社会需要解决的、在各行各业中的共性问题。科研组内以及科研组之间当然都有竞争与协调问题。大的科研项目特别要强调协调，而科研中的各种竞争必须是公平的，并有一定的竞争规则。

(4) 在信息爆炸的当代，信息的搜集、整理、贮存和调用是十分重要的。正如图 9-2 所指出的那样，科研与学习是有区别的，发现和发明的参考点是科学界整体，不是个人。文献检索是必需的，但有一定的滞后性；参加国内和国际的学术会议以及国内及国际的学术访问，可以弥补这种滞后性。

9.5 人才培养

9.5.1 概念

首先，阐明“人才”与“培养”两个概念。

9.5.1.1 人才

并不是所有知识分子都是人才，正如不是所有物质都是材料一样。借用材料定义〔第1章(1-1)〕的方法，可对“中国人才”定义如下：

“中国的人才 是能为中国社会高效地作出有用贡献的知识分子。” (9-18)

因此，人才≠知识分子，正如材料≠物质一样。人才“属”于知识分子，上面知识分子前的定语便是“种差”，这便是“属+种差”〔第7章(7-9)〕的定义方法。从这个种差，便求出“中国人才”的判据，即据以判断“知识分子”是否“中国人才”：

(1) 德——为中国社会，是为什么人作出贡献；

(2) 才——有能力作出贡献，当然是愈多愈佳；“有用”是好；高效既有时间的概念，要快，又有经济的要求，要省；即多快好省地作出贡献。当然，也有跨国的人才、人类的人才等。

认为有知识的人便是知识分子，这个含义就包含大量自学成才的人。

奈斯比特在《大趋势》一书中指出：“在工业社会里，战略资源是资本”，在信息社会里，“战略资源已是信息”。美国在20世纪70年代所新开创的一千九百万新工作职位中，约有90%是属于知识工业。

若承认脑力劳动也是劳动，那么劳动创造价值也包括脑力劳动创造价值，也就从理论上承认邓小平同志提出的“科学技术是生产力”的马克思主义的判断。

在封建社会，人们凭地位和特权享受社会财富；在资本主义社会，资本家借资本而享受劳动的社会成果；在社会主义社会，按劳取酬，知识分子的劳动成果愈来愈重要，他们的社会地位将逐渐提高。

人们在谈论着，工业后的社会是信息社会知识社会。知识与信息，目前混为一谈，交互使用。我们曾采用(1-1)的定义，区分了物质与材料；我们可以用如下的定义区分能量与能源；

“自然界中的能量，可为人类经济地利用的，叫做能源”。 (9-19)

对于知识与信息，不妨采用如下的定义区分：

“人类社会中的有用知识，需要利用和传递的，叫做信息”。 (9-20)

在这里，强调了“有用”、“利用”、“传递”几个概念。

9.5.1.2 培养

培养或教育，本是学校的职责和任务。但是，事物是在发展的，各行各业的知识又在迅速增长，一般是按指数函数的关系在增长：

$$N = 99.95 \exp(0.09534t) \quad (9-21)$$

式中，以1955年为100计； t 为1955年以后的年数，例如，1985年的 $t=30$ ，算出 $N=1746$ ，为1955年的17.46倍。

新陈代谢是自然和社会的普遍现象。一个人的体中细胞既有不停的死亡，又有不断的出生；一个人的知识，在稍长的时期内，必须吐故纳新，才能保持活跃的生命。面对知识老化和知识废旧率不断提高的严酷现实，活到老，学到老，存在学校毕业后的在职教育的教育问题。

材料的性能取决于它的结构，人才的才能则取决于他的知识结构；这些结构分别是在工艺过程及教育过程中形成的，而又分别需要工艺设备及教学设备来保证，由工人及教师来执行。这种对比关系如图9-7所示。

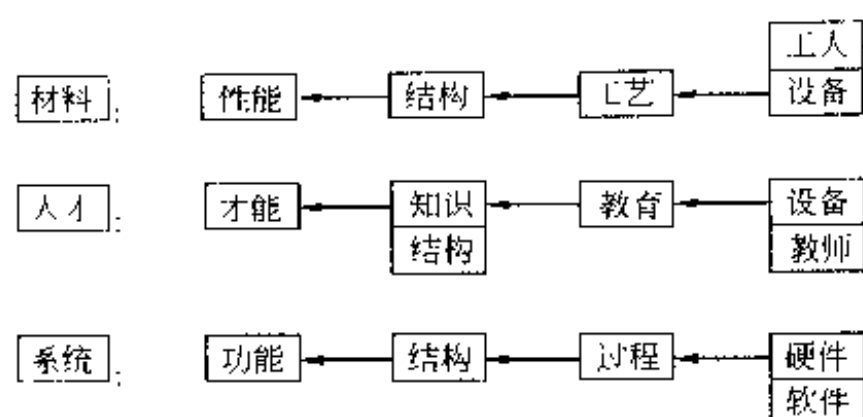


图 9-7 材料、人才、系统对比图

在下面，分“在校的”及“在职的”两方面，采用第七章第二节材料四论（性能、结构、过程、能量，参见图 1-2）的方法，论述包括腐蚀与防护在内的人才培养问题。

9.5.2 学校教育

9.5.2.1 才能论

“教育要面向现代化，面向世界，面向未来。” (9-22)

在学校培养的学生，应具备这种“三个面向”的才能。我国已经是，而且必须是开放性社会，因而要“面向世界”：通过交流，了解世界发展动向；洋为中用，充分应用人类的科学技术知识。我们搞材料的人，过去由于信息不灵，没有面向世界，而做了不少的不必要重要工作，吃了亏，教育工作也是类似情况。

现代化是一个过程，为了配合现代化的需要，我们应该培养劳动者具有现代化思维能力，在必需的基础知识上，要培养学生具有系统概念，学习分析方法，具有综合能力。在学校，不再需要培养容易落后的专家，而要培养能适应变化的通才。我们搞材料的人，在教育界将材料专业按工艺或材料的小类分的过细过窄，已开始逐渐改变。

应该记住，生产要解决“今天”的问题；科研成果在“明天”得到应用；而学生的质量将在“后天”受到考验。这里所谓的今天、明天、后天，只是时间的相对概念。因此，教育必须面向未来。埃德加·富尔在联合国教科文组织出版的《学会生存》一书中指出：

“未来的文盲不再是不识字的人，而是没有学会怎样学习的人”。 (9-23)

在学校，不仅要培养同学今后如何学习的能力，还要培养同学如何运用知识分析问题和解决问题的能力，因而就需要一套方法。

9.5.2.2 结构论

在给定的环境中，材料的性能取决于它的结构；同理，人才的才能在给定的环境中，取决于他的知识结构。

为了实现教育的三个“面向”目标，重点高校在智育方面要加强三个方面：基础、方法、外语。基础是未来的潜力；方法是为了培养能力；外语是为了面向世界。

对于金属腐蚀及防护，有些大学设置了专业，另些大学开设了课程。设置专业的系，宜围绕“电化学”及“金属学”两根支柱，加强基础教育。对一些“一看就懂”的专业课内容，可以削减；因为一方面这些内容易于陈旧而报废，另一方面，毕业后如需要，可以并且能够学懂。若基础未打好，则未来的发展受限制；毕业后再补基础，由于各方面原因，较为困难。

对于非专业学生开设这方面课程，首先应阐明这门课程的意义和重要性，然后论述“金属腐蚀与防护”最基本的内容。

对于在校学生，通过课程的设置、教学环节的安排，学习各种治学、分析、为人、处事的方法，掌握了这些方法，对于离校后从事腐蚀防护或其他工作，都是很有用的。

首先掌握一门外语，由于时间限制，宜在专业外语领域内提高水平。

9.5.2.3 过程论

如图 9-7 所示，人才的知识结构是在教育过程中形成的，为此，在客观上要注意教师和设备的配置，良师出高徒，尤为重要。

教育过程中遇到三个问题：学习的推动力、阻力及学什么。

第一，要保持学生如饥似渴的“求知欲”，这是学习的推动力。学生的求知欲是一种社会现象，当知识的价值和价格失调，即知识分子的价值高、价格低，甚至是“知识无用”的非正常条件下，学习的推动力显著降低。

第二，在学生有强烈求知欲的前提下，要在管理上，疏通渠道上，讲究学习效率和效果，注意教育心理学的应用。

第三，在学习内容上，要面向发展中的社会需要，确定“面向未来”去培养人才，因此要不断刷新课程及其内容。这就要创造教师有这种积极性的条件和社会环境。

与教育过程密切相关的两个过程是人才流动过程及人才使用过程，因为它们影响了师生的稳定性和积极性。

发展中国家以及经济上发展慢或停滞的发展国家，都出现人才外流的问题，回收较为困难。若不设法降低或减少这种流动，将降低教育过程的实际效果。物质的流动是由于化学位 (μ_i) 的下降，即

$$\sum \mu_i dn_i < 0$$

若物质从 1 处流向 2 处，流动量为 dn ，则 $dn_1 < 0$ ， $dn_2 > 0$ ，并且 $dn_1 = -dn_2$ ，故

$$\mu_1(-dn_1) + \mu_2 dn_2 < 0$$

$$\mu_2 < \mu_1 \quad (9-24)$$

即物质从高化学位处 (μ_1) 向低化学位处流动。而

$$\mu_i = \mu_0 + RT \ln(\gamma_i x_i) \quad (9-25)$$

式中， x_i 及 γ_i 分别是浓度及活度系数。降低化学位的一个途径是增加结合，从而降低 γ_i 。

俗话说：“水向低处流，人向高处走。”前者是为了降低势能，正如物质从高化学位处流向低化学位处一样，是自然过程；后者是为了改善生活，总是企求向高工资处走，是人世过程，减小这种流动的措施，一是法令限制，二是增加内聚力，都是为了降低活度系数。

另一个相关的过程是人员使用过程：其方向是符合价值准则；其途径是遵循政策，保证方向；其结果应该是人尽其才，促进社会的发展。

9.5.2.4 能量论

“知识就是力量。”力可作功，功可转化为能。从如下两方面，可以理解教育的能量问题。

(1) 贮能待放——我国古书谈到学、问、思的问题，例如《易·乾》：

“君子学以聚之，问以辩之。”

(9-26)

《论语·为政篇》

“子曰：‘学而不思则罔，思而不学则殆。’”

(9-27)

既学且问，则有学问；既学且思，既思且学，则不罔不殆。学而思，学且问，则会增加如图 9-1 中的知识浓度，在适当条件下将会沉淀出新的概念。

(2) 增加贮能的途径——在恒温恒容的关闭系统中，自由能 (F)、内能 (U)、熵 (S) 的变化 (Δ) 与温度 (T) 的关系如下：

$$\Delta F = \Delta U - T\Delta S \quad (9-28)$$

过程自发进行时， $\Delta F < 0$ ， $|\Delta F|$ 愈大，则过程的推动能量愈大；使 ΔF 愈负的途径有三：

① 教育培训，提高潜能，释放量 (ΔU) 愈大；

② 提高工作热情, 则使 T 升高;

③ 广开思路, 则 $S = k \ln W$ 中 W 增加, 从而 ΔS 增大。

9.5.3 在职教育

在校学习, 强调基础、方法和外语; 在职教育, 则应侧重实用。我们仍可从上述的才能、结构、过程、能量四方面分析在职教育, 在这里, 不再重述, 现从雇主和自学两方面提一些看法。

(1) 雇主——大学毕业生只是某个科技领域, 例如金属腐蚀与防护方面的毛坯, 还需要适应雇主企业或事业进行培训, 才能承担工作。当然, 这种培训的时间长短, 因企业或事业的特性而异。此外, 为了适应科学技术的新发展, 例如计算机技术、新表面技术、新的测试技术等, 或者为了培养新的技术领导, 选派雇员参加各种训练班或在大学里选课学习。这些是脱离或部分脱离工作岗位的学习。

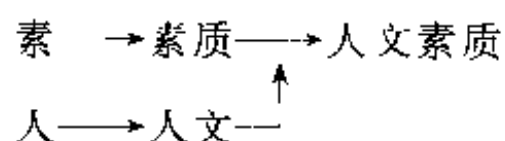
(2) 自学——为了研究和开发工作的需要, 或者为了转换工作的需要, 或者为了知识更新的要求, 雇员应勤奋学习。这时, 就需要运用在校掌握的各种方法, 学习和分析资料, 提高自己的业务水平。自我培养是终身的! 今后的文盲将是那些没有学会怎样学习的人。

9.5.4 人文素质教育^[94]

1966 年以来的“文化大革命”十年, 神州大乱, 是非不清; 1978 年拨乱反正、改革开放, 人们重新学习和思考一些问题。1996 年以来, 人文素质成了我国教育界的热门话题。在下面三小节, 分别论述概念、目的和内容、方式和方法。

9.5.4.1 概念

(1) 素质——破“人文素质教育”之题, 采用了定义和类比于材料学和心理学的方法, 由简到繁地:



首先尝试明确“人文素质”这个概念的内涵。

“素”, 《辞源》之㊸意(p.2401)中, 第㊸意为“始, 本”; 因而“素质”之㊹意(p.2403)中, 第㊹意为“本质”。《辞海》对它们有进一步的发挥: “素”的㊸意(p.1222)中, 第㊹意为“构成事物的基本成分。如元素, 因素。”对“素质”, 则释义如下(p.1222):

“素质——人的先天的解剖生理特点, 主要是感觉器官和神经系统方面的特点。

素质只是人的心理发展的生理条件, 不能决定人的心理的内容和发展水平。人的心理来源于社会实践。素质也是在社会实践中逐渐发育和成熟起来的, 某些素质上的缺陷可以通过实践和学习获得不同程度的补偿。”

(9-29)

这个释义的优点是: 既认为人的素质是人的心理现象的生理条件, 又指出它在社会实践中可以改变。不足之处是太长, 挂一而可漏多。例如, 人的素质可以“改变”, 变好也可变坏; 发育也是一种改变, 什么叫“成熟”? 不确切; 心理发展、内容、水平、条件等都属于“心理现象”; “补偿”也是人的素质的一种变化, 补偿的方法除实践和学习外, 也可采用器械, 例如, 耳不聪, 眼不明的人, 影响他或她的“聪明”素质, 可以采用助听器或眼镜来“补偿”。依据亚里士多德的“四因论”, 释迦牟尼的“诸法因缘起”、毛泽东的“矛盾论”等中外古今的哲人学说, 事物的变化都是由外因和内因引起的, 在给定的外界条件下, 这种变化的现象取决于内因。

依据上面的讨论, (9-29) 的释义可简化并改为:

“人的素质是人的先天的感觉、神经等生理特点，可以通过后天的社会实践改变。在给定的自然和社会环境中，人的心理现象取决于人的素质。” (9-30)

在下面，通过与“材料学”、“心理学”的类比，可进一步明确“人的素质”这个概念。

从释义 (9-30) 可以看出，人的素质是人的心理过程的内因，类似于材料现象 (图 1-2) 的结构 (S)。

如图 9-7 所示：人才的才能和知识结构分别类似于材料的性能和结构，可在教育过程中改变；系统的功能也相似。

如图 9-8 所示，人的素质在政治环境的作用下，在政治运动（例如文化大革命）过程中：一方面有所表现；另一方面，素质也可发生变化 ($S \rightarrow S'$)；变化的方向可好可坏，变化的性质可以是可逆的或不可逆的。这种政治运动也是一种社会实践 [参见释义 (9-30)]。

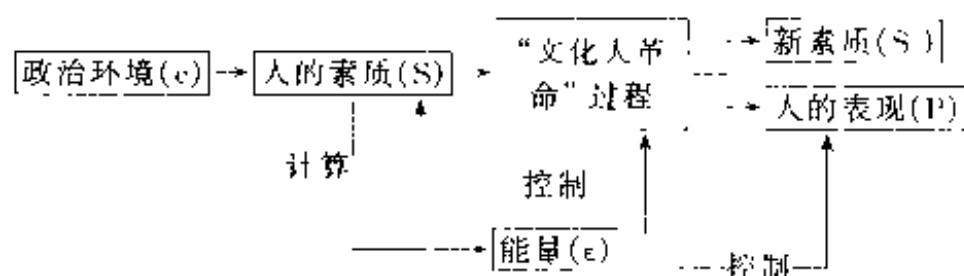


图 9-8 人的表现、素质、过程、能量及政治环境之间交互关系

人的表现是人的素质的心理过程，现在试用材料学的五因素来思考心理学内容和人的素质。

物、人、事的道理分别有物理、人理、事理；心理则是译名的误会，心理绝不是“心脏”活动的道理，心理现象不是跟心的活动，而是跟脑的活动直接联系的。若将 psychology 译为“脑理学”，未免太晚；也很奇怪，现通用心理学。

采用《普通心理学》的定义：

“心理学是研究心理现象的科学。” (9-31)

这个定义还需要进一步明确，什么是心理现象，假如我们再说：

“心理现象是心理学研究的对象。” (9-32)

这就犯了“循环定义”的错误。

心理现象包括“心理活动”和“心理特征”两大部分，分述如下。

心理活动又叫心理过程，包括：

- ① 感觉——对客观事物个别属性的反映；
- ② 知觉——对这些事物各部分和属性的整体反映；
- ③ 注意——心理活动对一定事物的指向和集中；
- ④ 记忆——认知、识记和回忆感知的事物；
- ⑤ 思维——对客观现实的概括的、间接的反映，经过思考，掌握事物不能直接感知的方面和属性，了解事物的本质和规律，包括形成概念，作出判断，进行推理；

⑥ 情绪和情感——对客观事物采取的态度；

⑦ 意志——自觉地确定目的并支配其行动以实现预定目的心理过程。

前面五个现象并称为认识过程；心理活动还有下述的情绪过程和意志过程。

心理特征指各个人的特点，包括：

- ① 能力——为了顺利地、成功地完成感知或思维活动，重要的心理前提是具备某些能力。例如，学习活动需要观察力、记忆力、概括力、理解力等。许多心理活动都要求记忆的

清晰、思想的敏捷、反应的灵活等，这些都是能力。

② 性格——是个性中鲜明表现出来的心理特征，可以区别一个人与众不同的、明显的、主要的差异，表现在行为之中。

上列两个方面都是过去心理活动的结果，贮存于个人的脑中。

类比于材料学的四论：心理过程是一大类过程；心理特征中的能力，既是能量，又是性能；而性格是完成各种心理活动的素质，也是进行心理过程的内部结构，它是有层次的，既有微观的生理组织，包括脑的结构（细胞、分子、原子等），也有宏观的“智慧结构”等。

材料是无生物，既无感情，又无意志；但可通过处理，改变内部结构，从而改变性能。人类是高等动物，在漫长的进化过程中，发展了大脑结构，改变了性格，提高了素质。在环境的刺激下，发生如图 9-7 所示的各种反应，由感觉到知觉，由注意、认知、识记，并能回忆和运用知识进行思维。一方面，这些能力是过去心理活动的广义教育所累积的；另一方面，与已具备的感情和意志结合，形成了性格。

心理活动的物质基础是包括大脑在内的各种生理组织，但环境如何通过这些生理组织而起作用，尚有待从不同结构层次深入探索。

附带指出，图 9-9 也是计算机的工作框图。

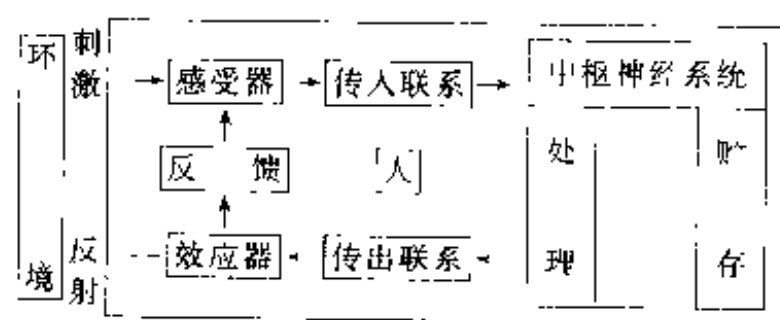


图 9-9 刺激——反射联系图

(2) 人文及人文学

“人文是指人类社会的各种文化现象。”（《辞海》p.302） (9-33)

“人文是文治和教化。……今指人类社会历史发展过程中所创造的全部物质财富和精神财富，也特指社会意识形态。”（《辞源》p.1357） (9-34)

“人文科学源出拉丁字 humanitas。广义指对社会现象和文化艺术的研究，包括哲学、经济学、政治学、史学、文艺学、伦理学、语言学等。”（《辞海》，p.304） (9-35)

王同忆主编译的《英汉辞海》，将 humanities 译为“人文学”，因为它所采取的方法有别于自然科学。

“Humanities 是关于人类及其文化的知识，如哲学、文学、艺术等有别于科学的知识。”（见 The American Heritage Dictionary of the English Language） (9-36)

在西方，也将人文科学（或人文学）叫做 Liberalarts；在上述英文字典中，释义如下：

“Liberal arts：学术的智力训练，如文学、历史、哲学及抽象科学，它们提供一般的普遍的文化知识，有别于较狭的实用的技能训练。” (9-37)

看来，人文学包括文学、艺术、历史、哲学等，而社会科学包括政治学、经济学、社会学、法学等；二者并称为文法科，或简称为文科。自然科学与工程技术则并称为理工科，或简称为理科。文理渗透是指这两大类学科之间的渗透；狭义的人文学仅指文史哲等文科，广义的人文学则包括文法科。

(3) 人文素质 基于上面对于“素质”及“人文”的理解，则“人文素质”只是人类的

一种素质，是一种共性的素质；与此对应的，有“科技素质”，在这里，“科”是指狭义的自然科学，“技”是指狭义的工程技术。

对于理工科大学，人文素质教育及科技素质教育分别是德育及智育所必须；若要德才兼备，则这两种素质教育，不可缺一。

对于文法科大学，在科技迅速发展成为第一生产力的今天，吸收科技方法和内容，走理渗入文的道路，将有利于对学生全面素质的培养。

应该强调指出，知识不恒等于能力。学习了人文方面的课程，理解这方面的知识，只是提高人文素质的一个条件；不等于说，有了这方面知识的人，他的德方面的素质就提高了。很明显的例子是，贪污蜕化变质分子，口头上仍是满口仁义道德。

9.5.4.2 目的和内容

为了提高全民族的素质，促进社会主义物质文明与精神文明，贯彻执行我国《教育法》第一条的规定，人文素质教育对于受教育者在德、智、体三方面全面发展，都将起到重要作用。

(1) 德育 首先，是爱国主义教育。为什么国家服务，是人才的首要问题。“弘扬爱国主义精神，增强民族自尊心、自信心和自豪感，使“振兴中华”成为 12 亿人的共同追求。”为此：

① 进行中国历史和中华民族优秀传统文化教育，这种文、史、哲的人文教育，使受教育者从理智上和感情上热爱中国，以振兴中华为己任。

② 爱国有理智主义和浪漫主义观点，这种意志和情感都是前述的心理活动，应该从“教育”心理学角度认真研究，改进教学内容和方式，并对有关政策提出建议。

第二，经济建设理论的学习。经济是上层建筑的基础，应该认真学习邓小平理论以及党中央制定的方针，我国的经济工作都是在这个理论的基础上和这些方针指导下进行的。

例如，我国的经济体制从计划经济逐步发展为：

“有中国特色的社会主义市场经济” (9-38)

初步反复学习之后，我认为这是一个伟大的综合。(参见第 8 章 8.3.1 节)。

第三，进行社会主义的世界观、人生观、价值观、社会公德、职业道德教育，清除文化大革命所导致的自私自利负面效应。

第四，在当代，为了实施“可持续发展”战略，从伦理角度，进行“天人合一”的教育。

(2) 智育 为了贯彻执行邓小平给北京景山学校题词：

“教育要面向现代化，面向世界，面向未来。” (9-39)

建议知识结构要加强三个方面：

① 基础——未来的潜力；

② 方法——应变的能力；

③ 外语——面向世界。

这三者，都涉及到文史哲等的人文素质教育。我赞成

“今后的大学不再培养容易落后的专家，而要培养能够适应变化情况的通才。”

(9-40)

因为：

“专家是对于愈来愈少的事物知道的愈来愈多的人。”

(9-41)

此外，大学四年，难于培养出专家；即令培养出“专家”，也极易落后，缺乏后劲。以诗述之：

人间正道是沧桑，专家落后正茫茫。
环境巨变需通才，新国异花分外香！

* * * * *

三个面向是目标：坚实基础最重要；
面向世界需外语；掌握方法傲明朝！ (9-42)

(3) 体育锻炼是健身的主要方法，而丰富多采的人文素质教育，可以陶冶人的情操，树立正确的人生观，处于高尚的精神境界，对受教育者的身心健康，也会是有益的。

9.5.4.3 方式和方法

建议如下七点。

(1) 加强大学，特别是理工科大学的人文素质教育，涉及精神文明建设的大事，学校的党政领导应该作为重要的使命来完成。大学校长是教育家，应该有足够的人文素质，认识到这种教育的重要性，完成这种重要使命。

(2) 精简陈旧、重复、繁杂的专业课程，才能在不增加学生负担的前提下，有时间安排人文素质教育的内容。

(3) 科学与技术，也含有丰富的的人文素质，专业课教师若能挖掘这方面内容，如方法论、技术史等，对提高学生的人文素质，将会起到重要的交叉渗透作用，效果可能更好。

(4) 开设人文学的选修课，如中西哲学概论、中西文学鉴赏、自然科学史、科学方法论、艺术欣赏、心理学概论、经济学概论、法学概论等。关键的问题是选择教师和精选教学内容，希能做到深入浅出，启发兴趣，引人入胜。

(5) 结合形势需要，聘请校外名流，做专题报告，使学生能在浪潮前沿思考。

(6) 加强校园的文明建设，营造育人的文化环境，可收到潜移默化的效果。一句名言，一幅名画，一首名歌，也许使人终身难忘。

(7) 组织有益于人文素质提高的社会实践活动，例如社会调查、参观访问、公益劳动、社会服务等。

9.6 治学方法——类比与交叉

9.6.1 引言

科研需要运用知识，并生产知识；教学的双方中，教者传授知识，学者学习知识；知识便是“学”，治理学识的方法很多，学者各有一套。在 [9-5] 的第 10 及第 11 章，著者分别论述了学科及学习；在科研及教学中，我极力推崇类比与交叉 [9-2, 9-3]。

我国古书《礼记，学记》云：

“良冶之子，必学为裘；良弓之子，必学为箠” (9-43)

“古之学者，比物丑（同比）类。” (9-44)

在学习方法上，推崇“类比”。

西方学者 N·维纳在《控制论》认为：

“在学科发展上，可以得到最大收获的领域是各种已经建立起来的部门之间被忽视的无人区。” (9-45)

一位数学家从动物的功能和机器的运转获得启示，在学科之间的交叉地带丰收，成为控

制论创始人之一，因而赞扬“交叉”。

“文化大革命”后的思想大解放，开始时，我似有走投无路之感。想起雨果在《笑面人》中两句话：

“儿童得到一点支离破碎的观念，就心满意足了。直到后来累积了一些经验，才开始审查人生的纠纷。” (9-46)

又忆陆游《剑南诗稿·游山西村》一警句：

“山重水复疑无路，柳暗花明又一村。” (9-47)

我欣然接受类比与交叉，在材料学 (Materialogy) 领域内耕耘，提出“断裂化学”、“宏观材料学”、“材料学的方法论”等体系，似有所获；合 (9-47) 及 (9-46)，成诗颂之：

“支离破碎曾满意，壮年反复审纠纷；
继续深入疑无路，交叉类比又一村。” (9-48)

并以对联一首，提出科研与教学的需要和希望，点出苦乐所在：

研究与发展，需创新，苦在无思路；
学习和表述，希高效，乐于有方法。 (9-49)

在下面小节，示例地从两方面——逻辑 (内涵、外延) 与过程 (发生、发展) 阐明这种治学方法的创新性和高效性。

9.6.2 概念——内涵

9.6.2.1 类比

“我们观察到两个或两类事物在许多属性上都相同，便推出它们在其他属性上也相同。这就是类比法。” (9-50)

我们也可采用含义更广的类比：

“对比两类事物，从它们的属性，特别是内部关系的属性 (即结构) 的相同或相似，获得借鉴的思维方法，叫做类比。” (9-51)

从表 9-2 中“结论的可靠性”及“创造性”来看，类比法与归纳法一样，可以认为类比是一种归纳法；但是，从推理方式来看，类比法又不同于归纳法及演绎法，可以独立而为第三种方法。

表 9-2 三种推理方法

方 法	推理方式	结论可靠性	创造性	方 法	推理方式	结论可靠性	创造性
演绎	一般 → 特殊	必然	发展发现	类比	一般 → 一般	或然	新发现
归纳	特殊 → 一般	或然	新发现		特殊 → 特殊		

表中三种推理方式 (或途径) 可示于图 9-10。材料是一种“物”；“人”也是一种物，不过是万物之灵；人与人之间、人与物之间或物与物之间构成“事”；我尝试将材料的规律 (即图 9-10 中的“物”理) 外延，从而分别对人才问题 (即“人”理) 及管理问题 (即“事”理) 的理解有所借鉴，这是一种高效的学习方法。人们认识事物，是从“不知”到“知”；认识“不知”的新事物，若能从类比中，发现它与认识者“已知”的旧事物之间的相似性，通过类比，非常有助于认识新事物。善于表述的教师、说客或演讲者，总是在揣摩听众已知的事物或已有的情意，在这个基础上发挥。我国战国时代的纵横家，非常重视揣摩术，《鬼谷子》便是一例。

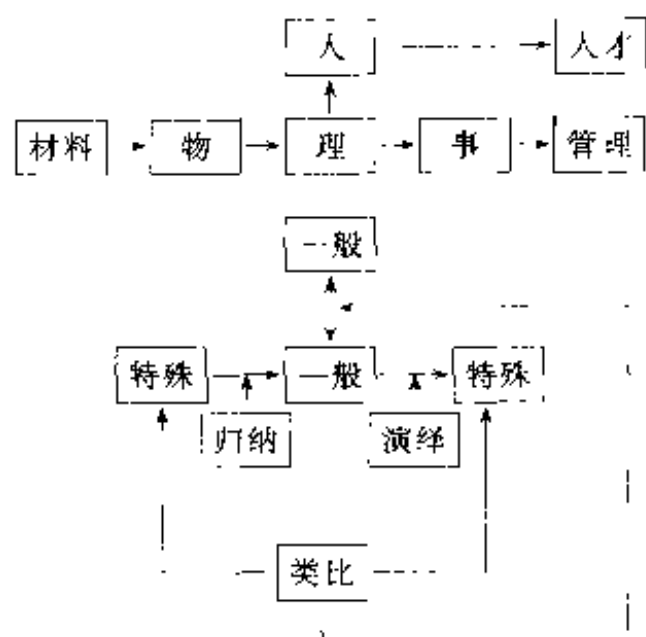


图 9-10 推理途径

为了少而精，在教学上，一般采用演绎法，如几何学、力学、热力学、统计力学、量子力学等。但是，推理的前提都是从归纳法获得的，例如几何学的公理，牛顿的力学三定律，热力学三定律，统计力学中质量守恒、能量守恒、熵值最大原理，量子力学的薛定谔方程等。门捷列夫周期表是用归纳法建立的；应用它，在化学领域，可演绎地阐明大量的问题。在本节后面将会看到，类比法在发现重要科学规律的过程中，可起重要作用。

9.6.2.2 交叉

交叉是两种概念（A 及 B）之间的一种逻辑关系，它的定义如下：

“如果有的 A 是 B，而且，有的 A 又不是 B，而且有的 B 又不是 A，那么，A 与 B 就有交叉关系，或者说，A 与 B 是交叉的。” (9-52)

若 A 与 B 表示两门科学（或学科），则图 9-11 所示的影线共同领域，叫做交叉科学（或学科）。

共同领域内可发生如下三种现象：

- (1) 渗透——物理的较均匀的混合；
- (2) 化合——两个学科之间已发生“化学变化”；
- (3) 结合——较“化合”为广的现象，它包括化合。此外，其他现象有；
- (4) 边缘——由于学科之间的界限是模糊的，因而图 9-9 (b) 所示的边缘，也稍有交叉，边缘科学也可属于交叉科学。
- (5) 感应——如图 9-11 (c) 所示，A 与 B 并未接触，通过“场”的作用而交互影响。
- (6) 综合——如图 9-11 (d) 所示，运用多种学科或科学 A、B、C、D、E 去研究共同的课题 X。
- (7) 借用——如图 9-11 (e) 所示，学科 X 借用学科 B 去研究问题。
- (8) 横展——如图 9-11 (f) 所示，用某一学科 A 去研究多种学科 W、X、Y、Z 的问题。

图 9-11 所示的各种关系中：严格地说，只有 (a)，才是交叉，渗透、化合、结合只是交叉之后发生的现象；对于交叉科学的广义来说，图中的所有关系，都蕴含在“交叉”之内。

9.6.2.3 区别与趋同

在形式逻辑中，交叉与类比分属于概念和推理。

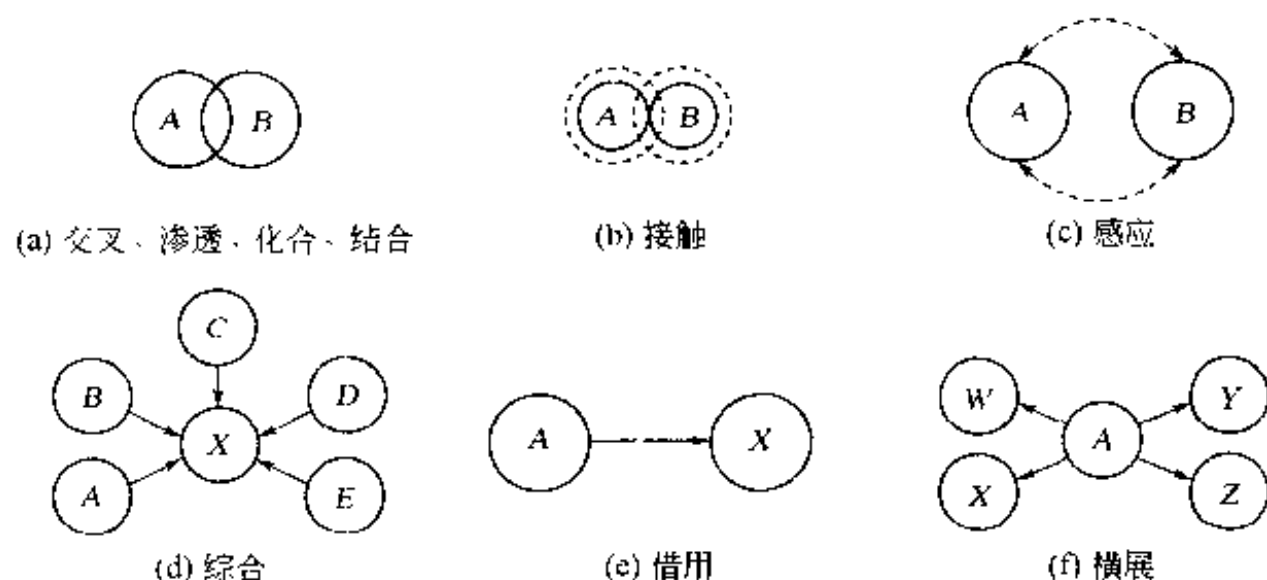


图 9-11 与概念之间交叉有关的各种关系

交叉是两种概念（A 与 B）之间的一种关系，与全同、上属、下属、全异并列而有五种关系。若概念 A 与 B 的外延分别为 a 与 b ，则：

当 $a \equiv b$ ，而所有 a 都是 b ，同时，所有的 b 都是 a ，则 A 与 B 有全同关系；

当 $a > b$ ，而所有 b 都是 a ，但是，有的 a 不是 b ，则 A 上属于 B；

当 $a < b$ ，而所有 a 都是 b ，但是，有的 b 不是 a ，则 A 下属于 B；

当有的 a 不是 b ，而且有的 a 又不是 b ，有的 b 又不是 a ，则 A 与 B 有交叉关系，或叫做部分重合关系；

当所有的 a 都不是 b ，则 A 与 B 有全异关系。

类比与演绎、归纳并列为三种推理方法，因此，交叉与类比是有区别的。但是，若将形成交叉关系的操作，也叫做交叉，则这种思维方式或推理方式与类比可以趋同：

(1) 若交叉不限于狭义的两圆相交，而包括广义的交叉，即包含相切（边缘）、感应、借用、横展等，则这种广义的交叉与类比可以趋同；

(2) 广义的交叉与类比均可孕育新的概念。

从经典意义讲：通过交叉后的混合、化合、渗透，可孕育出新的学科；而通过类比，可获启示——概念或方法，也可导致新学科；因此，类比与交叉，既有区别，也可趋同。

9.6.3 概念——外延

9.6.3.1 类比的类型

类比可划分为借鉴性和高可靠性类比两大类，分别论述如下。

(1) 借鉴性类比 (9-51) 的类比广义，包括了借鉴性类比，可帮助学习和表述，启示新的思路；可有益于创造性思维。示例说明，希能举一反三。

寓言和比喻 寓言是一种文学体裁，比喻是一种修辞学辞格，可分明喻、隐喻、借喻三种。寓言中应用了比喻技巧，进行类比：借此喻彼，借远喻近，借古喻今，借小喻大，使得一些较深的道理使听者或读者易于理解而被说服。

我国春秋战国的诸子百家广泛地采用这种类比的文体和修辞。最突出的是庄周（公元前 369 至公元前 286 年），《庄子》现存的三十三篇中，充满了寓言，用这些寓言来风趣地阐明哲理，发人深思。《战国策》汇集了战国时游说之士的纵横家们的策谋，为了说服人君，选用不少民间流行的寓言故事，阐明深刻道理。也应该引鲁迅一句话：

“战国时候谋士蜂起，不是以危言耸听，就是以美言动听，于是夸大、装腔、撒谎，层出不穷。”

(9-53)

这与市场经济体制下不法和愚笨的商人类似，推出了大量的骗人的广告，企图赚钱。接触及研究这些类比时，应该警惕，以免误入歧途。

也很奇怪，古代的外国，也有著名的寓言故事集，传诵至今。例如，公元前六世纪希腊的《伊索寓言》，借动物故事，喻人世道理。《百喻经》是印度古代佛教寓言故事集，公元五世纪南齐时，中天竺和尚译成汉文，取名《痴华鬘》，即关于愚人的寓言故事集，1926年，王品校点出版，鲁迅为它写了题记。中古时代的《天方夜谭》（或译为《一千零一夜》），是阿拉伯和亚洲一些国家如埃及、伊拉克、波斯、印度等的民间故事集，包括不少寓言。

看来，寓言和比喻既可有助于表达，也可发人深思，也许有助于发展学科。

相似和相关 物理学的发展，充满了这种类比。例如，牛顿类比了苹果落地及月亮运动，于1666年提出万有引力定律；1824年卡诺类比水通过落差而带动水车做功和需要温差带动蒸汽机，提出卡诺循环；麦克斯韦强调“物理类比”（physical analogy）的研究方法，从1856至1865年，承认“力线”的概念，提出电磁场的动力学理论；普朗克研究黑体辐射，从热到光的辐射频率（ ν ），于1900年提出能量（ ϵ ）量子化的假说（ $\epsilon = h\nu$ ），诞生了量子论；1924年德布洛伊作了一个非常勇敢的类比，提出物质波假说：

“自然爱好对称，

因此，物质与能量必须互相对称。

若（辐射）能是波动的和/或粒子的（？）

那么，物质必须是粒子的和/或波动的（？）”。 (9-54)

这个假说导致1926年薛定谔（Schrödinger）类比波动光学及经典力学，提出物质的波动方程，由于随后Born, Heisenberg, Dirac等人的补充，发展成为今天的量子力学。在实验上，Davidson-Germer于1927年发现了电子波的存在。

应该指出，德布洛伊勇敢的类比，所诱发的量子力学和电子显微术，对于现代自然科学的发展，起了重要的作用。

从表9-3可以看出一个重要现象：重大的物理学的发现者都是青年人，但不要不适当地外延到其他学科。

表 9-3 物理学的重大发现与类比交叉

年	提出人	年 龄	类比交叉的现象	定律或理论
1666	牛顿	24	天体及地上物体运动	万有引力定律
1850	克劳修斯	28	温差与落差	热力学第二定律
1856	麦克斯威	25	电与磁	电磁场理论
1868	麦克斯威	38	光与电磁	光的电磁理论
1900	普朗克	42	热与光	黑体辐射
1905	爱因斯坦	26	光量子	复活光的微粒说
1924	德布洛伊	32	物质和辐射	物质波

生物是有生命的，而材料是无生命的，这就表明它们之间差异很大，它们是区别很大的两种系统。既然都是系统，则抓住共性，即在给定的环境（ e ）中，系统的功能（ P ）取决于它的结构（ S ）；而 $S = \{E, R\}$ ， E 为“组元”的集合， R 为 E 间“关系”的集合；故 [参用 (1-9) 及 (1-13)]：

$$Pe = f(S) = f\{E, R\} \quad (9-55)$$

则各个系统（图 9-12）的规律可相互借鉴。

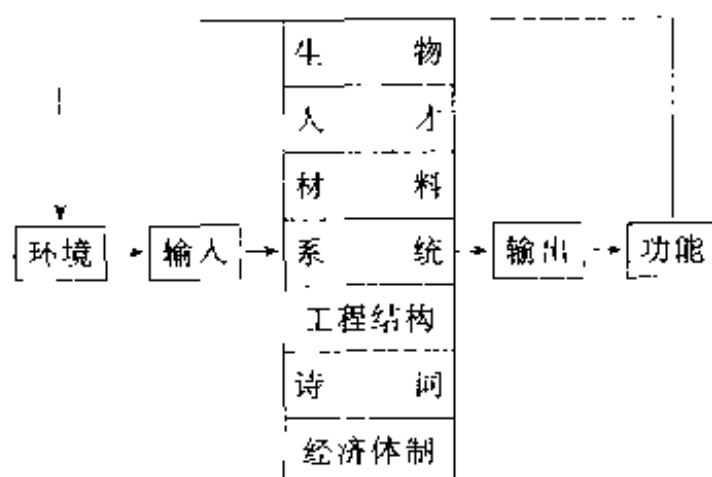


图 9-12 系统功能

聪明是指“耳聪”、“眼明”，号称万物之灵的人类在听觉和视觉方面，反而不如有些动物。例如，蝙蝠能在黑暗的洞内高速飞行，依靠回声定位系统，学习蝙蝠的这种功能，人类制造声纳和雷达。海豚能发射和接收 120 ~ 200kHz 的超声波，能发现约 3km 外的鱼类，学习海豚的这种功能，人类制作海上定位导航设备。鹰眼能在 2000 ~ 3000m 高空发现地面上的小兔，蛙眼有四类感觉细胞，苍蝇是复眼，人类模仿这些动物眼的功能，发明夜视器材，用于搜索目标，发明“电子蛙眼”，可用来识别飞机和导弹；“蝇眼”相机一次能拍摄 1000 多张照片。此外，响尾蛇对红外线很敏感，能根据温血动物身体辐射的微量热而发现它们，人们模仿这种“热眼”而制造响尾蛇导弹；狗的嗅觉比人灵敏一百万倍；鳗鱼能在 6×10^{-20} 酒精中嗅出酒精；鸟为什么能飞？鱼鳃能吸 O_2 而放出 CO_2 ；海带能富集海水中碘达 10^3 至 10^5 倍；萤火虫发光效率接近 100%……

“研究生物系统，制作模拟其卓越功能的装置的科技领域，叫做仿生学 (bionics)。” (9-56)

这个新学科已有信息仿生学、控制仿生学、化学仿生学、力学仿生学、医学仿生学、材料仿生学等分支。

在另一方面，许多无生物，例如材料、计算机等，又模仿人的机能（图 9-17）来创制智能材料、智能计算机等。这些“仿”，便是“类比”。

(2) 高可靠性的类比 类比时，不仅是特殊属性的类比，尽可能采用“关系”（即结构，参见第一章第二节）的类比。例如，表明物质扩散的菲克定律：

$$\partial c / \partial t = D \partial^2 c / \partial x^2 \quad (9-57)$$

与表明导热的付立叶定律：

$$\partial T / \partial t = \alpha \partial^2 T / \partial x^2 \quad (9-58)$$

关系相似，是相同的偏微分方程，最宜类比，在数理方法中，有相同的解法。

这种类比正是物理模拟的基础：如不同的系统可用相同的数学模型（即方程）来表示，则这个方程的解不随系统而变，因此，就可用一个系统来模拟另一个系统。由于电气系统较易进行试验和测量，一般用它来模拟其他系统，故叫做电气模拟，或简称为电模拟。

9.6.3.2 广义类比交叉的划分

可以将参加广义类比交叉的科学或学科分为如下的五大类：

① 基础自然科学 (F_i) ——当 $i = 1, 2, \dots, 7$ ，分别有数学、物理、化学、天文学、地学、生物学、力学，即俗称的数理化天地生力；

② 技术科学 (T_j) ——当 $j = 1, 2, 3, 4, 5, 6, \dots$ ，分别有系统、信息、材料、能源、航天、海洋……等科学与技术；

③ 社会科学 (S_k) ——当 $k=1, 2, 3, 4, 5, 6, 7\cdots$, 分别有政治学、经济学、社会学、法学、商学、兵学 (即军事学)、伦理学、……;

④ 人文学 (H_l) ——当 $l=1, 2, 3\cdots$, 分别有文学、历史学、哲学 (即简称的文史哲)、……;

⑤ 艺术 (A_m) ——当 $m=1, 2, 3, 4, 5, 6\cdots$, 分别有美学、音乐、绘画、书法、雕刻、戏剧、……。

可以看出, 仅是大类内的二元组合就有不少;

$C_2^7 + C_2^6 + C_2^5 + C_2^4 + C_2^3 = 21 + 15 + 21 + 3 + 15 = 75$ 。若在大类之间求二元组合, 那就更多了。在下面, 只能举一反三, 列举一些我熟悉的类比交叉, 特别是 T_3 (材料学) 与其他科学或科学的类比交叉。

(1) 大类学科内的类比交叉

① 基础自然科学 从表 9-4 可以看出, 物理学中许多重要理论, 都是从类比交叉中获得新概念而发展的, 其中德布洛伊获得的“物质波”概念的类比, 是非常勇敢的, 而所诱发的量子力学和电子显微术, 对于自然科学技术的发展, 却起了重要的作用。物理化学、化学物理、生物物理、生物化学、生物力学等, 则是大家所熟悉的交叉科学。

② 技术科学 例如信息、能源和航天材料, 分别是信息科学、能源科学和航天科学与材料科学的交叉; 材料与系统是特殊与一般的关系, 我曾类比材料与系统, 应用系统论知识分析材料问题, 将逻辑分析及系统分析并列为“材料学方法论”的两大基础。

③ 社会科学 在市场经济体制下, 经济学 (S_2) 是一门显学, 一门活跃的科学, 因而有:

(S_2-S_1) ——政治经济学;

(S_2-S_3) ——社会经济学;

(S_2-S_4) ——经济法学;

(S_2-S_7) ——经济伦理学。

经商如作战, 《孙子兵法》、《三国演义》等兵学, 曾用于经商、股市、……等, 这是 (S_5-S_6) 类比交叉。

近年来的诺贝尔经济学奖, 多授与经济学与其他学科交叉地带的成就。例如: 1997 年授予默顿和斯科尔斯, 他们应用统计理论估价股票期权交易和其他金融衍生产品; 1996 年授予维克里和米尔利斯, 他们应用非对称信息概念提出税收理论; 1995 年授予卢卡斯, 他在经济学与行为科学的交叉地带, 进行预测、工资、通货膨胀等问题的分析; 1993 年授予诺思, 他在经济史和经济学交叉地带作出贡献; 1992 年授予贝克尔, 他用经济学分析社会、犯罪、人口、教育等人类行为; 1974 年授予哈耶克, 他用信息机制和认识率, 证明计划经济的空想性。

④ 人文学科 我国的文化源头活水, 在华北有《诗经》, 在华南有《楚辞》, 它们充分而广泛地运用类比的方法。文学中“模仿与超越”, 模仿是类比, 超越则是创新。

十五岁时的王勃, 在“滕王阁序”中留下多年传诵的佳句:

“落霞与孤鹜齐飞, 秋水共长天一色。” (9-59)

据传, 是模仿庾信“华林园马射赋”中

“落花与芝盖齐飞, 杨柳共春旗一色。” (9-60)

谢榛在《四溟诗话》中评曰: “虽有所祖, 然青愈于蓝矣!”

学习作诗词，多仿名诗或词牌习作，然后可能有所超越。蘅塘退士所编《唐诗三百首》原序中称：“熟读唐诗三百首，不会吟诗也会吟”。

(2) 大类学科之间的类比交叉 若暂不计艺术 (A)，则余下四大类学科之间二元组合，共有 $C_2^4 = 6$ 种，本书以前各章节，曾有论述，现略述如下。

① (F_i-T_j) 基础自然科学 (F_i) 是技术科学 (T_j) 基础，它们之间的类比交叉不胜枚举。例如，材料科学 (T_3) 必须与数 (F_1)、理 (F_2)、化 (F_3)、力 (F_7) 密切交叉，而仿生材料及生物材料又需与生物学 (F_6) 交叉。

② (F_i-S_k) 例如，研究“社会稳定性”，是社会学 (S_3) 问题，应用统计热力学 (F_1) 公式

$$F = U - TS \quad (8-29)$$

$$S = k \ln W \quad (8-30)$$

在第 8 章第 8.3.1 节用牛顿力学公式，论述了发展的加速度。

这是属于“社会物理学”的内容，即 (F_1-S_3) 的交叉。

前面提到的 1997 年诺贝尔经济学奖的工作认为经济现象 (S_2)——股票价格变化满足布朗运动规律 (F_1)，满足高斯分布，因而将经济学的方法由哲学思辨和描述为主的方法，转变为定量表述和模型检验为主的方法，这是 (F_1-S_2) 的交叉。

③ (T_j-S_k) 上面提到的 1997 年诺贝尔经济学奖的工作也誉为“金融工程”，工程学是一门技术科学 (T_7)，那么金融工程便是 (T_7-S_2) 的交叉。时下，有许多这样的社会规划，如教育工程、再就业工程、老年人安置工程、教师住房工程，菜篮子工程，它们属于 (T_7-S_k) 的交叉。

④ (F_i-H_l) 物理学史 (F_1-H_2)、科学诗 (F_7-H_1) 属于这一类。

⑤ (T_j-H_l) 材料学方法论 (T_3-H_3)、材料诗 (T_3-H_1) 属于这一类。

⑥ (S_k-H_l) 经济学方法论 (S_2-H_3)、中国社会通史 (S_3-H_2) 属于这一类。

著者过去二十余年从事“腐蚀”及“断裂”的研究，以科技诗二首 (T_3-H_1)^[96]结束本小节。

“断裂·腐蚀”重大项目验收有感

1992 年 6 月 20 日，北京

两项目于 6 月 17~20 日验收，10 年拼战，满意验收，一席告别，有感存念。

拼战十年一瞬间，握别难语酒已残。

风华正茂何处是，中流砥柱昔青年。

无情白霜争盖顶，识途老马指因缘。

人间沧桑何其短，无私无我笑涅槃。

改革开放换观念，士农工商封建篇，

工农兵学商垫底，商品市场齐扬帆。

权势金钱白云烟，浮沉得失争挥鞭。

学问真情人间有，勤学善问苦修仙。

万里远行胜万卷，会议万次人更贤。

十年“腐蚀”我健在，人事“断裂”丝仍连。

会议有聚又有散，天下筵席何其短？

临别举酒祝安康，宁静心湖映平安。

9.6.4 交叉科学

9.6.4.1 类型

交叉科学有两个定义:

“为了研究一个共同的课题,或者为了一个特定学科的发展,运用了多种学科的理论和方法,前者形成了新的综合学科,后者促进了经典学科的新生。这些具有新意的科学,叫做交叉科学。” (9-61)

这个定义强调了多学科的结合而有新意,而对于什么学科的结合,却没有限制或侧重。另一个定义是:

“交叉科学主要是指自然科学和社会科学交叉地带或它们之间的宽阔地带生长出来的新生科学。” (9-62)

这个定义有如下三个特征:

(1) 强调新生,与(9-61)相同;

(2) 学科之间不一定交叉,不接触亦可,包括了图 9-9 的各种情况,外延较(图 9-61)为广;

(3) 不一定是、但主要是自然科学和社会科学之间的交叉或相邻地带,若只限于这个“主要”,则外延却少于(9-61)。

定义(9-61)避免了“交叉”,按照它,可将交叉科学分为二支:

(1) 综合学科——如图 9-9 所示,例如思维科学、人才学、城市科学、环境科学、信息科学、未来学等;

(2) 更新学科——更新的内容和途径很多,随着社会的需要和有关学科的发展,各门学科都在吐故纳新。

若采用定义(9-62),按照流行看法,交叉科学可有如下分支:

(1) 综合学科;

(2) 横向学科——如图 9-9 所示,例如,力学的用途很广,向外横向扩展而有断裂力学、土壤力学、结构力学、地震力学等;

(3) 边缘学科——这是狭义的交叉科学,例如,物理化学、化学物理、物理化学力学、仿生学、分子生物物理、控制论等。

9.6.4.2 发生

交叉科学出现的原因有二,分述如下。

(1) 社会发展的需要——提出许多以前未遇到的问题,例如人口问题、环境污染、资源利用、劳动保护、城市建设等,需要组织人力、运用多学科,综合地研究,从而形成许多综合学科。科学技术要面向经济建设,自然科学和技术科学工作者要参与科技决策,必然要考虑自然科学和社会科学交叉领域的问题。

为了更好地发挥科学的社会作用,必须对科学进行整体考察和全面研究,由于社会的这种需要以及科学家的社会责任感,因而出现了“科学学”。在 1964 年出版的《科学的科学》论文集中,D. 普顿斯对科学学下了一个定义:

“科学学可以称为科学、技术、医学等的历史、哲学、社会学、经济学、心理学、政治学、方法论等。” (9-63)

由于医学也是自然科学和技术,可将上述定义简化为:

“科学学研究自然科学和技术的社会科学及人文科学问题。” (9-64)

(2) 学科发展的大趋势

① 时代的特征——当代是多种概念和方法相互冲击、交流和汇合的时代，由于信息的传播和交流，既广泛而又迅速，有识、勤学、慎思之士，在这种开放系统中，借鉴于固体物理中的形核理论可以看出，知识浓度由稀而浓，达到过饱和态，在冷静轻松的环境中，便会沉淀出新的概念、方法和理论。

② 丰收地带——参见 (9-45)。

9.6.4.3 发展

前面回答了交叉科学是什么 (What) 及为什么出现 (Why) 而发生交叉科学，本小节将讨论如何 (How) 发展交叉科学。

对于前述的综合科学及交叉科学的发展方法简述如下。

(1) 综合学科——涉及到的学科面广、人众，而社会效益及经济效益也大，因此，它的发展有上下结合的问题，希望尽可能多的有权、有势、有钱、有识之士投入它的发展工作。

对于对社会和经济发展有重要甚至紧迫的作用的问题，例如环境保护、资源利用、人才培养等，一方面由政府组织各方面专家，从各个学科来研究同一的问题；另一方面由政府或企业资助各方面专家，自下而上地研究相同的问题；这样上下结合地、协力地发展综合学科。

还有些综合学科，是有识之士，长期地探索，主动地吸收有关学科的成果，从而孕育出新的综合学科，例如控制论、科学学等。

(2) 交叉科学——这类狭义交叉科学的发展，有赖于创造性思维，途径有五：

① 学术感应，类比模拟——前面介绍的德布洛伊的勇敢假定，来源于这个方法；善于运用前面介绍的各种类比法，可能有所创新；

② 宏观微观，构成分支——经济学借用自然科学中“宏观”和“微观”概念，更新而分为“宏观经济学”和“微观经济学”；将这个概念返回到材料学及腐蚀学，同样可分为宏观及微观二支；

③ 界面形核，一方推进——在学科的界面上，既易形核，又会丰收。仿生学、控制论、物理化学、化学物理等属于这个类型。图 4-1 所示的断裂学科是综合运用力学、物理学及化学而形成的边缘学科，并可分为断裂物理、断裂力学和断裂化学；

④ 组合交叉，学科更新——在科研和教学的实践历程中，我提出了若干体系；以性能为线索的高速钢、韧性体系；以学科为线索的不锈钢体系；以能量为核心的材料能量学体系；宏观材料学体系；宏观腐蚀学体系；材料学方法论体系；断裂学科体系 (图 4-1) 等。

⑤ 博学深思，直觉机遇——直觉和机遇这两种非理性方法，在科学发现中有不少实例；但是，这些方法有效的必要前提是博学深思，这样，才会有一个有准备的头脑，准备“机遇”的垂青和“直觉”的颖悟。

9.6.5 创新与实践

图 9-13 示出“创新与实践”和“各种推理方法”之间的关系：包括“学习”在内的“实践”，遭遇着复杂的人、事、物 (A)，需要运用交叉结合 (即错综) 或归纳法，总结简易规律，这是一种创新 (1)；运用所总结的简易规律或其他规律及演绎法 (a)，解释复杂现象 (B)，这是一种学习；运用已有的简易规律，采用交叉结合、类比或归

纳法，可有新的创新（2）。

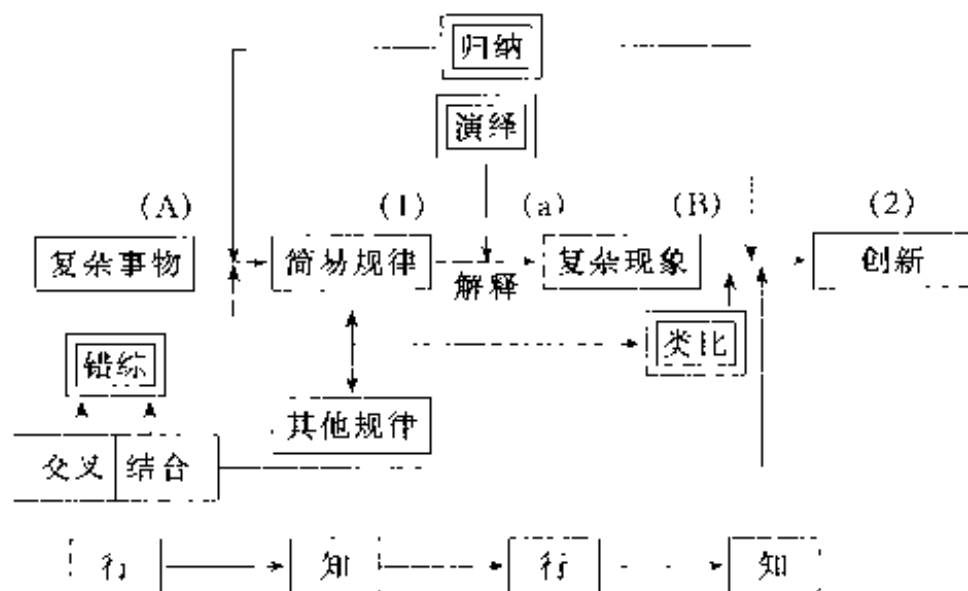


图 9-13 “创新与实践”和“推理方法”之间的关系

我 1943 年大学毕业后，在材料学领域内工作五十余年，1995 年进行如图 9-11 所示 (1) 的工作，总结了“简易材料论。”其主要结果如第 1 章 1.2 节所述；并运用它，解释或理解大量的复杂现象 (a)，有助于高效的学习和表述 (本书其他各章及参考文献 [1-3]、[9-6])。

9.6.6 小结

(1) 类比与交叉既为研究与发展提供创新的思路, 又是高效的学习和表述方法。

(2) 内涵分析可明确类比与交叉的区别和趋同；外延讨论可知它们应用的广泛。

(3) 创新与实践需应用多种思维和推理方法。

(4) 类比与交叉的基础在于博学，博学才能有所类比，有所交叉。录《礼记第卅一，中庸》共勉：

“博学之，审问之，慎思之，明辨之，笃行之。”

(5) 人生面临人、物、事、景、情、意六字，它们之间也有类比与交叉，以诗明之：

“触景因事而生情，藉诗怀旧又展新。

人物事景相通处，字里行间情意深。”

(9-65)

(6) 一个人做学问，成事业，若有不朽的立德、立功或立言(《左传》，襄公二十四年)，愿引王国维所提的，饶有风趣的三境界(均为宋词)：

“独上高楼，望尽天涯路。”（晏殊，《蝶恋花》）

“衣带渐宽终不悔，为伊消得人憔悴。”（柳永，《蝶恋花》）

“蓦然回首，那人却在，灯火阑珊处。”（辛弃疾，《青玉案·元夕》）

(9-66)

这三境界便依次是“怀大志，追求；勇献身，拼搏；终成就，喜悦。”

(7) 类比交叉的基础在于博学。人生追求真善美，我在材料界第一线追求一生，晚年提倡类比交叉，欣赏境界，鼓励学·思·问，以诗述怀：

“勤学复善问，苦思后追寻，

攀登上台阶，机遇来垂青。

哲理化情韵，真善依美撑。

殊途追境界，同皈何需分。”

(9-67)

(8) 我是湘人，作为结语，愿引楚人屈原《离骚》中一句话，作为追求的互勉：

“路漫漫其修远兮，吾将上下而求索。”

(9-68)

9.7 结 语

如图 9-14 所示, 为了实施“科教兴国”的战略, 本章前面 6 节, 依据著者教学和科研经历, 围绕“学识”二字, 进行论述:

(1) 前 4 节是“科学研究”(简称为“科研”), 论述学识的运用和生产, 包括科研的类型、选题、方法和管理;

(2) 第 9.5 节是人才培养, 涉及到学识的传授和学习, 论述了人才的概念、学校教育、在职教育和人文素质教育;

(3) 第 9.6 节是治学方法。孙中山对于“政治”, 给了一个简明的定义:

“政就是众人的事, 治就是管理, 管理众人的事便是政治。” (9-69)

仿此:

“治学是管理学识的事。” (9-70)

治学方法很多, 这一节只论述著者所推崇的创造性思维和高效的学习·表述方法——类比与交叉, 包括这个概念的内涵与外延, 区别与趋同, 实践与创新。

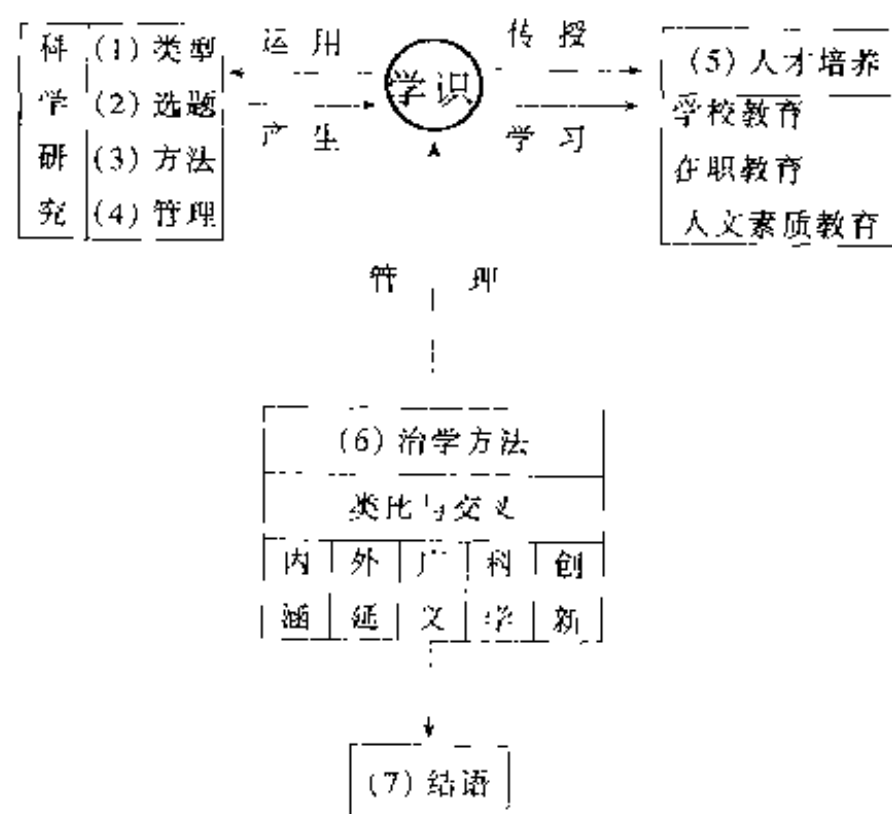


图 9-14 第 9 章的结构()内的数字为节序

参 考 文 献

- [9-1] 肖纪美. 科技研究与开发的类型与选题. 世界科技研究与发展. 1996, 18 (2): 36-39
- [9-2] 肖纪美. 类比与交叉. 世界科技研究与发展. 1995, 17 (6): 9-14
- [9-3] 肖纪美. 再论类比与交叉. 世界科技研究与发展. 1999, 21 (4): 19-23
- [9-4] 肖纪美. 人文素质教育. 世界科技研究与发展. 1996, 18 (5): 21-25
- [9-5] 肖纪美. 材料学方法论的应用—拾贝与贝雕. 冶金工业出版社, 2000
- [9-6] 肖纪美. 上心集. 广州: 广东教育出版社, 1999
- [9-7] F. P. Hoar. Proc. Roy. Soc. (A) 1976, 348: 1

第 10 章 可持续发展与生态^[10-1~10-2,8-2]

“史鉴使人明智。”(培根:论说文集)

“我国是人口众多、资源相对不足的国家,在现代化建设中必须实施可持续发展战略,……正确处理经济发展同人口、资源、环境的关系,资源开发和节约并举,把节约放在首位,提高资源利用率。”(江泽民在 1997 年十五大的工作报告)

腐蚀是材料使用过程中的一类化学环境引起的破坏现象,本章分 5 节:第 10.1 节从多方面论述材料与环境的关系;第 10.2 节讨论可持续发展法则;第 10.3、10.4 节讨论生态及广义的生态,扩展视野;第 10.5 节为结语。

10.1 材料与环境

10.1.1 历史回顾

人类从树上爬下来,开始两足直立行走,然后使用天然材料,制造工具,形成社会。开始时,对所捕获的野兽,只能“茹毛饮血”:

“昔者先王,……未有火化,食草木之实,鸟兽之肉,饮其血,茹其毛。”

(《礼·礼运》)

(10-1)

随后,传说古帝燧人氏“钻燧取火”,熟食而促人脑发达,制造及使用生产工具,积累了财富和文化,已经统治了地球,企图开发其他星球,进而统治整个宇宙。

材料为人类社会奠基划代,它是人类社会的物质基础。依据它,人类社会被划分为石器时代、青铜器时代、铁器时代等;材料与能源、信息、生物科学技术是支撑现代人类文明大厦的四大支柱^[1-1]。

材料开始只有“性能”的判据;自从人类社会采用私有财产制以后,才逐渐出现了“经济”这个判据。工业社会的辉煌发展,“人定胜天”的思想受到置疑和挑战,帝国主义侵略和掠夺,不再明目张胆,资源、能源、环境、人口等问题,已使人类步入自毁边缘,为了解救这个困境,人类社会逐渐普遍地认识到“可持续发展”(sustainable development)的必要性,我国已将它与“科教兴国”并列为今后十五年国民经济和社会发展的基本战略。为了适应这个大势所趋,1983 年著者尝试对材料增加三个战略性判据——“资源”、“能源”和“环境保护”(简称为环保)(参见第 1 章 1.1 节)。

“发展”(development)与“增长”(growth)两个概念是有区别的,联合国前秘书长吴丹于 1960 年提出:

发展 = 经济增长 + 社会变革

(10-2)

20 世纪 60 年代末以来,国际学术界普遍地同意这个观点,发展的意义较经济增长为广,还包括各种社会指标,即反映生活质量的非经济指标,如教育、健康、住房、犯罪、社会地位变化等。70 年代以来,未来学的研究结果指出经济增长与人口增长、资源消耗、环境污染等因素之间的关系,对世界的发展战略提出看法。80 年代中期,欧洲一些国家提出“可持续发展”一词;1989 年 5 月联合国环境署第 15 届理事会达成共识:

“可持续发展系指满足当前需要而又不削弱子孙后代满足其需要之能力的发展。” (10-3)

1992 年的联合国环境与发展大会以“可持续发展”为方针,通过了《21 世纪行动议程》和《里约宣言》。我国八届人大第四次会议于 1995 年 4 月通过了《国民经济和社会发展“九五”计划和 2010 年远景目标纲要》(以后简称为《纲要》),提出要认真实施可持续发展战略。

10.1.2 逻辑思考

当我们研究材料时,则材料是“系统”(s);材料是宇宙(u)的一部分,环绕材料的、宇宙的其余部分叫做“环境”(e);因此

$$u = s + e \quad (10-4)$$

英文将“环境”叫做“environment”(en + viron + ment),这个英文及中文名词,均使人们能顾名思义,做到了词以达意,也较文雅而不生硬。

研究的对象(s)可以改变,则环境(e)也随之变化。如图 10-1 所示,存在四种可能的研究对象(s),则环境随之而变:

$< s$	$< e$	注 解
1	3	2 的自然属性及社会属分别并入 3a 及 3b
2	3	天然材料及人工材料分别并入 3a 及 3b
3a	1、2、3b	
3b	1、2、3a	

注:天与地便是自然环境。

研究材料时,有如下的六种作用可包括在内:

- (A)——材料对于自然环境的影响(1→3a);
- (B)——自然环境对于材料的影响(3a→1);
- (C)——材料对于社会环境的影响(1→3b);
- (D)——社会环境对于材料的影响(3b→1);
- (E)——材料对于人类的影响(1→2);
- (F)——人类对于材料的影响(2→1)。

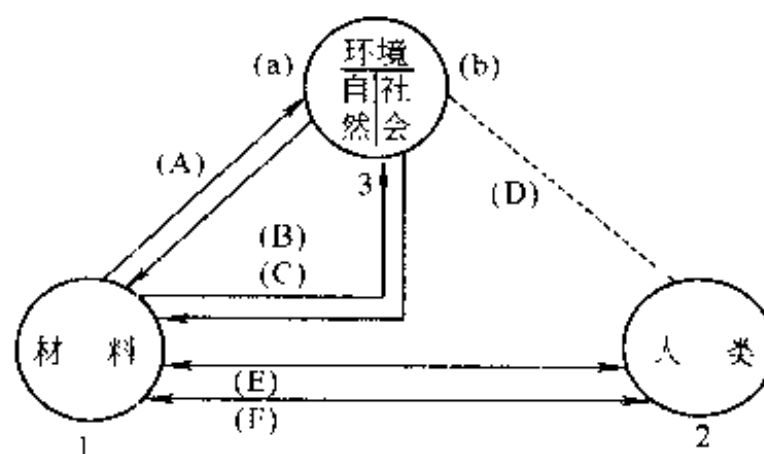


图 10-1

若将人类的自然属性及社会属性分别并入自然环境(3a)及社会环境(3b),则(E)及(F)删去,(E)并入(A)或(C),(F)并入(B)或(D)。

回顾简并后材料与环境的四种关系((A)到(D)):

① 国际政经形势和趋向,国内的有关立法和政策,经济体制和增长方式,国内的科教体制等,对材料工业有着巨大的影响,是宏观材料学研讨的内容,属于(D)。

② 过去的材料工作者侧重研究自然环境以及人类环境所导致的力、声、热、光、电、磁及化学信息对于材料的敌对破坏作用,从而理解材料的有关性能,从环境和材料结构(即分别是外因和内因)两方面进行失效分析。这些工作属于(B)或(D)。

③ 在第一节提到的、材料对于人类社会奠基划代的作用以及材料科学技术对于现代人类文明大厦的支撑作用的讨论属于(C)。

④ 近几年受到日本和我国注意的 environment conscious material,简写为 ecomaterials,可暂译为“环境意识材料”,即发展材料时,要意识到材料对于自然及社会环境的影响,它

不是一类材料，而是分析材料从生到死的生命全过程(life cycle)对自然及社会环境的影响，属于(A)。

10.1.3 系统分析

10.1.3.1 模型化

图 10-2 出示材料与环境之间关系的模型，说明如下。

(1) 《纲要》中所提的两个根本转变和两个基本战略是 1996 至 2010 年的大社会环境：其中两个根本转变可促进材料经济判据的满足①；可持续发展战略既受自然环境的限制②；又可促进材料三个战略判据的满足③；人口数量影响人均资源及能源，从这个角度考虑，我国是地大物不博；科教兴国战略影响了材料的五个判据——战略①，经济⑤，技术⑥——的满足。

(2) 材料的生产和使用环境(自然的或人为的)是材料性能涉及的变化外因⑦，材料的结构是变化的内因⑧)，由外因通过内因而起作用的辩证关系，可理解变化的结果⑨——性能 P_j ，其中 i 及 j 分别是输入和输出信息。

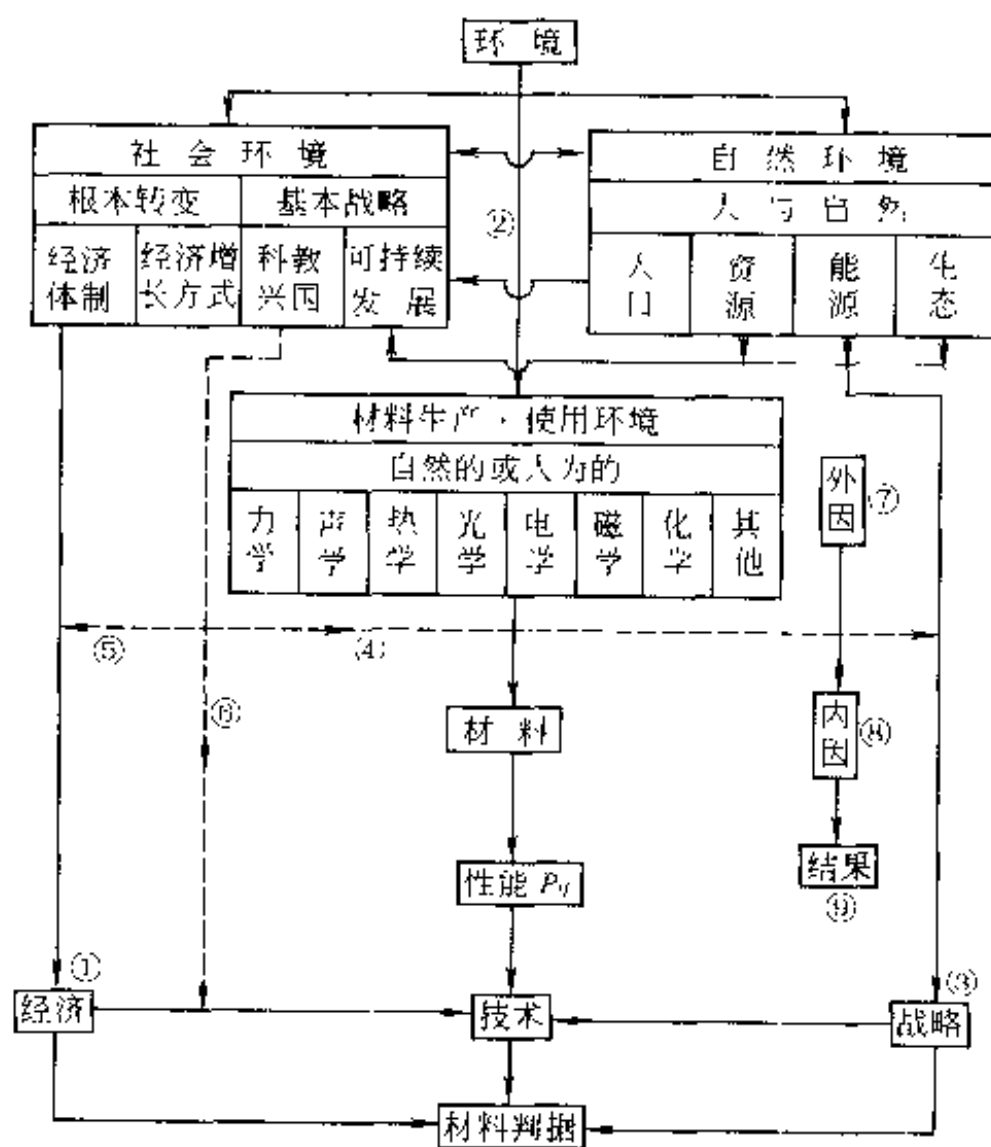


图 10-2 材料与环境^[10-1]

10.1.3.2 最优化

最优化(optimization)技术简称为优化技术(参考[10-1]第九章第四节)，可定义如下：

“系统最优化是使系统的目标函数在约束条件下达到最大或最小。” (10-5)

一般认为，最优化技术是运筹学的一个分支，因为运筹学还包括排队论、决策论、博弈论、优选法、控制论等；在另一方面，从广义来说，运筹学也是要求最优化，因此，最优化又是运筹学中的基本思路 and 主要技术。

在数学上，优化技术是在一组限制条件下寻求目标函数的极值(极大值或极小值)问题。

对于钢铁工业结构的优化的目标, 应该是提高经济效益, 即在钢铁材料的其他四个判据——资源、能源、环保、质量(包括性能)——及社会环境的限制条件下, 寻求经济效益最大的钢铁冶金工序的组合(即结构)。

对于材料(包括钢铁)的五个判据简单地说明如下。

(1) 从战略角度考虑, 特别是战时, 各个国家都需要制定材料政策, 对于资源、能源、环境保护三方面提出限制或要求, 这在优化时, 既可是限制条件(法律规定), 也会增加生产成本。例如, 废钢是电炉冶炼过程的主要原料, 西欧、美国和日本典型电炉厂的废钢成本分别占钢材总成本的 50%、40% 和 30%。每吨钢的废钢消耗量, 意大利最高, 达 650kg; 美国次之, 为 550kg; 英国在 400kg 左右; 法国、原西德和日本均超过 300kg。到 2000 年, 美国仍保持 1000 万吨/年的废钢出口量, 但是, 单是韩国的废钢需求将从 1989 年的 1000 万吨增到 2000 年的 1700 万吨, 关于我国废钢的资源尚待查明, 进口条件和价格也在变化, 因此, 资源这项判据影响生产成本, 也可是限制条件。美国转炉、平炉和电炉炼钢的能耗分别为 501.6、490.9 和 231.1 公斤标煤/吨, 我国的电能各个地区能否保证供应? 美国匹兹堡现在已是人们乐于居住的空气清洁城市, 这是由于 J.L. 厂担负不起改建符合环保要求的巨大费用, 关闭了钢铁厂。

(2) 质量技术判据, 必须符合国家标准要求; 为了保持竞争力, 应该符合国际标准, 满足“物美”而又“价廉”。

(3) 经济判据是目标函数, 必须计算, 也要算的正确。俗话说: “经济合算”, 算后方知是否经济。经济学(economics)曾译为“计学”; 《孙子》十三篇中首篇是“计篇”, 俗话说: “计算”和“算计”, 由计→算→计, 有一个如何算的方法、信息数据是否准确以及算后生计的问题。计篇第六章提到:

“多算胜, 少算不胜, 而何况于无算乎?”

(10-6)

“据冶金部经研中心对 1992 年全行业经济效益状况分析, 账面利润为 103 亿元, 按新会计制度核算利润只有 6 亿元”。103 与 6 有很大的区别, 应分析差异原因。此外, 为了降低成本提高国际竞争力, 有如下几点建议:

① 采用系统分析, 从生产过程中的物流和能流逐步分析成本, 找出串联或并联的关键环节;

② 从能流及物流中开展科学研究和技术革新, 并寻求“三废”的利用, 增加收益, 从而降低成本;

③ 按国际价格计算成本, 作为“第二本账”, 准备迎接“WTO”及“价格大放开”后的冲击和挑战。否则, 算的结果误导, 效果更坏。

10.1.3.3 系统与环境

采用式(10-4), 如图10-3所示, 系统(s)与环境(e)是灵活可变的。当 s 是材料时, 则自然环境作用于材料时, 便是图 10-1 中(B)的情况。我们曾用 P_{ij} 来表示这种作用下材料的性能([1-3]第五章 P·195-6)。当 i 及 j 分别 1, 2, 3, 4, 5, 6 及 7 时, 信息分别是力、声、热、光、电、磁及化学信息时: 若 $i=j$, 由于有反射, 吸收及传导, 共有 $7 \times 3 = 21$ 种 P_{ij} ; 若 $i \neq j$, 则有 $7 \times 6 = 42$ 种转感的 P_{ij} 。过去, 材料工作者侧重于研究 P_{ij} , 特别是环境对材料的敌对破坏作用, 如断裂、磨损、腐蚀、烧损等。人类对于环境的这种作用, 采用适应、改变、利用、学习四方面措施。

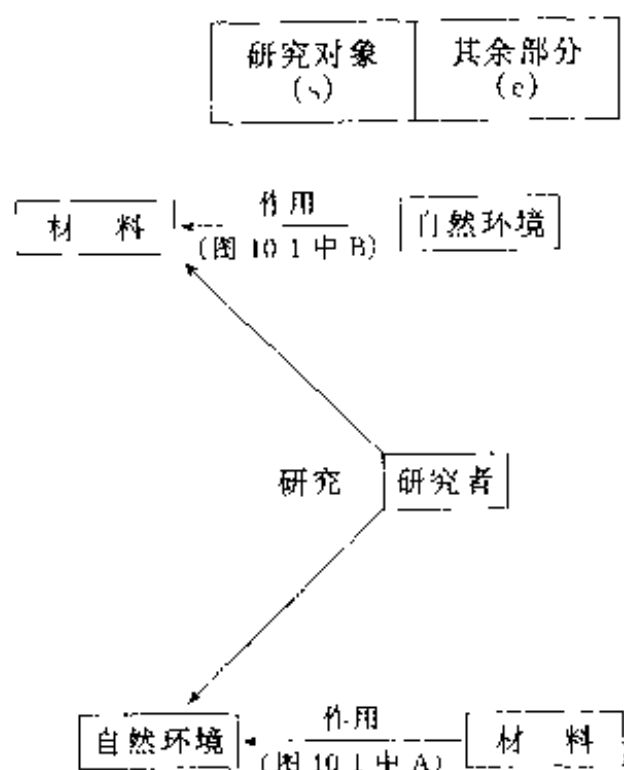


图 10-3 系统(s)及环境的相对性

为了人类及其后代的生活和生存，从生到死材料生命全过程，必须与自然环境友好协调地相处，这正是传统哲学的精华，与西方的一些掠夺哲学有异：

“天行健，君子以自强不息；

地势坤，君子以厚德载物。”《易传》

(10-7)

天与地，自然环境也。在下面两节：10.2 节从“可持续发展法则”研讨图 10-3 中下半部，即图 10-1 中(A)类问题—材料对自然环境的影响，进行战略分析，提出治理对策；第三、四节则讨论生态和广义的生态。

10.2 可持续发展法则

10.2.1 战略分析

10.2.1.1 定义

(10-3)定义了“可持续发展”，这个概念来源于生态学，所遵守的法则也简易，简单而易懂：

“若消耗量大于产生量，则这种现象不能持续(non-sustainable)发展。” (10-8)

其中，消耗有捕杀、灭绝、侵蚀、死亡、破坏……，对应的产生有再生、进化、形成、出生、再造……。物种的灭绝与再生、土壤的侵蚀与形成、人类的死亡与出生、森林的破坏与再造……，包括材料在内的自然现象和社会现象，短期内违反这个法则，后果不严重；长期违反而又不觉悟，则后果不堪设想。

以金属材料的生产为例，建国初期，为了解决“有无”问题，侧重“数量”，1958 年大跃进，期望钢的年产量翻一倍，从 535 万吨翻到 1070 万吨，不计质量而算数量。随后质量与数量并重，钢材有了“质量”一个判据。经济体制改革以来，在市场经济体制下，必须是质量与效益并重，也就是俗话讲的“物美价廉”才有竞争力，既要价廉，又要赚钱而有经济效益，必须降低成本，是“算了干”，而不是“干了算”，因此，全国的企业学习邯钢经验：

“模拟市场核算，实行成本否决。”

(10-9)

这样一来，材料就有“质量”和“经济”两个判据。

1996 年，开始实施“可持续发展”战略，材料的判据又增加三个——资源、能源、环

保, 其中能源也是一大类自然资源, 地球上这些自然资源是有限的。因此, 保护环境是实施可持续发展战略的关键, 我们不能走许多发达国家严重浪费资源和“先污染后治理”的老路, 而是要坚持环境与发展的综合决策。

符合可持续发展法则的三个判据, 可并为“环境”这一个战略性判据(图 10-2); 为了讨论的方便, 在下面, 仍分为“资源”、“能源”、“环保”三节分析。

10.2.1.2 资源

材料的资源可分为天然的和再生的两种, 天然的金属资源日枯竭, 表 10-1 列出几种重要金属的贮量, 即使全世界已探明的资源储量增加 10 倍, 而且 50% 可再生, 可维持的年代也不是很长。

表 10-1 全世界重要金属的贮量及可供采用的时间(年)

金属	贮量 /Mt	每年消耗增加 率(%)	可用时 间/年	10 倍现有贮 量 + 50% 再生, 可用时间/年	美国七十 年代再生 率(%)	金属	贮量 /Mt	每年消耗增加 率(%)	可用时 间/年	10 倍现有贮 量 + 50% 再生, 可用时间/年	美国七十 年代再生 率(%)
Fe	1×10^6	1.3	109	319	31.7	Cr	775	2.0	112	256	—
Al	1170	5.1	35	91	16.9	Mo	5.4	4.0	36	104	—
Cu	308	3.4	24	95	40.9	Ti	147	2.7	51	152	—
Zn	123	2.5	18	101	21.2						

各国资源自给自足的情况不一, 美国矿务局于 1977 年公布了各种金属依靠进口的百分数如下:

Nb	Mn	Co	Ta	Cr	Ni	W	Ti	Cu	Al
100	98	97	97	89	70	38	38	17	8

各国依据自己资源情况, 引导材料的生产和科研。例如, 在二战及朝鲜战争时期, 美国颁发了合金元素在钢中的使用政策, 促进了硼钢及钨钼系高速钢的科研和生产。战后, 取消了这些政策, 硼钢产量大降, 而钨钼系高速钢由于技术上及经济上的优越性, 代替了绝大部分的钨系高速钢。又例如, 一些国家的 18-8 型奥氏体不锈钢成分标准中, 规定 $Mn \leq 2\%$, 若内控到 $\leq 1\%$, 或 $0.3\% \sim 0.6\%$, 而又不影响其性能, 将会大量地节约锰的资源。又例如, 利用热轧后控制冷却的技术, 可重新审查现有钢种的合理性, 利用金相组织的控制来节约合金元素资源。长期(10 万至 20 万小时)使用的耐热钢, 对蠕变强度起主要作用的是固溶强化及 C-Mo、C-Mn 对, 从这个观点出发, 有可能节约多余而无用的合金元素资源。

10.2.1.3 能源

近二十余年来, 能源的供应较为紧张, 为了降低材料的成本或满足政府法令的要求, 对于材料的生产和应用, 都需要考虑能耗问题。数据库中汇集了单位质量、单位体积或单位强度的材料能耗的数据。例如, 以单位质量计算能耗, 钛合金棒、铝板及尼龙 66A100 棒分别为 200、81 及 $45\text{kW}\cdot\text{h}/\text{kg}$, 分别是 EN24NiCrMo 钢的 17.9、4.4 及 2.1 倍。

一方面, 材料生产厂为了提高竞争能力, 通过改进生产流程, 降低能耗, 从而降低成本。例如, 采用古典的霍尔(Hall)法生产 1kg 铝锭的能耗为 $43\text{kW}\cdot\text{h}$, 而美国 Alcoa 公司发展的流程, 可降低能耗三分之一。另一方面, 政府颁布政策, 迫使生产厂进行节能的研究。例如, 美国政府以法律形式规定了汽车耗油量的上限, 否则不准出厂。这就迫使汽车厂开展减轻车重和提高发动机效率以及有关材料方面的研究。

从表 10-2 的数据可以看出, 应用再生金属, 不仅可节省资源, 还可降低能耗。

表 10-2 生产金属的能耗(1.05GJ/t)

金 属	Mg	Al	Ni	Cu	Zn	钢	Pb
从矿石冶炼	358	244	144	112	65	32	27
从废金属冶炼	10	12	15	18	18	13	10

应该指出,降低能耗和材料的消耗,不仅可降低成本,增加经济效益,而且是为了满足政府法令的要求,因而能源和资源已突出为独立的判据。

10.2.1.4 环境保护

从人类历史的发展来看,资本主义国家在发展初期,资本家唯利是图,材料的生产和应用,不考虑环保问题。但是,近二十余年来,由于人民的要求,各国政府已逐渐重视这类问题。有些国家的一些企业,由于“放毒”太多,不符合政府的环保要求而被关闭。例如,曾是美国的钢都——匹兹堡,在 20 世纪 60 年代曾是空气严重污染的城市,随着近市郊 JL 钢厂的关闭,空气污染已有好转;而远市郊的美国钢铁公司于 1980 年投资 4 亿美元,进一步解决污染问题,使匹兹堡在 90 年代成为清洁大都市之一。

美国是大量生产和使用汽车的国家,一直在追求汽车的功率和速度,到 60 年代后期才重视汽车排放的尾气对人体健康的危害。1971 年制定“清洁空气法”,随后对汽车排放的尾气中所含 CO、NO_x、HC 的限制愈来愈严(表 10-3),为了满足这些要求,必须开发价廉高效的催化材料,在很短的时间内既要氧化 CO、HC 又要还原 NO_x。

表 10-3 美国及加州的汽车尾气标准(g/1.01km)

成分	美(1990)	美(1994)	加州(1993)	LEV(1994)	LEV(1997)	ULEV(1997-2000)
HC	0.41	0.25	0.25	0.125	0.075	0.040
CO	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4
NO _x	1.0	0.40	0.40	0.40	0.20	0.20

此外,含氯塑料废品的处理,含氟冷冻液的应用,氰化物在电镀液及采金工业中的应用等,都会导致严重的环境污染。

因此,材料从生产、使用到弃置的全部生命过程,需要十分重视“三废”的处理、噪声的降低、生态平衡等环境问题,否则,将遭到所在国家环境保护法的惩罚以及大自然的报复。

10.2.1.5 耐蚀材料及技术

材料的腐蚀是材料的一类失效损坏现象,上述的基于可持续发展法则对材料的思考,同样适用于耐蚀材料及技术。

(1) 采用耐蚀材料及技术,提高材料的使用寿命,显然降低了对大自然在资源和能源方面的载荷,并减少了污染。

(2) 与其他的材料及技术类似,耐蚀材料及技术的选用,同样受经济及其他技术及社会因素限制。从热力学考虑,除金、铂等少数金属外,其他金属材料的腐蚀,是自然的趋势。但是,金属材料的综合力学性能优良,又易经济地回收。氧化物为基的陶瓷材料虽耐蚀,又极易回收,但太脆;一般的塑料虽耐蚀,而又轻便,但不易降解,导致“白色污染”;可降解的塑料的成本又太昂贵,难于推广应用。因此,选用材料及技术,需综合考虑性能、经济和可持续发展;并受法律的限制,例如氰化物电解液的禁用。

10.2.2 治理对策

依据自己从事材料工作的体会,对材料如何与自然环境友善的协调发展,也就是自然环

境的治理对策,提出如下两方面看法。

(1) 人文社会因素 人类为了生存、生活和更舒适的生活,在材料与自然环境之间的关系方面,大致经历了适应——改变、利用——学习、保护三个阶段。开始时,使用适于生存的天然材料;对于违背自然意愿的金属等人工材料,或改变其结构,或改变其工作环境(添加缓蚀剂、施加表层压应力、电磁屏蔽、热阻挡层等),使其延年益寿。随后利用环境和耗散结构理论,开发智能材料;向大自然的木材、贝壳、竹材、蛛丝等结构学习,开发仿生材料,这是第二阶段。现在,人类面临资源和能源的高度贫乏、环境严重污染的局面,开发、生产和使用材料,必须十分重视环境的保护,使之符合可持续发展的法则。因此,建议如下对策:

① 宣传教育,提高干部及国民的人文素质——认识“先污染后治理”的错误;环境保护是实现可持续发展战略的关键是功在当代,利在千秋的大业;

② 法治——对违反环保者,一定要依法惩办。

(2) 科学技术因素——列出几个重要问题:

① 环境载荷的“寿命全程评价法”(life cycle assessment, 简称为 LCA)——对于材料的寿命全程的每一步的资源及能源消耗量和有害物质的排放量已积累了大量数据,可评价单个因素对环境载荷的影响,但仍缺少经济评价。对上述三方面因素综合评价时,权重因子和计算方法的选择,尚待协商研究;

② 从材料的可回收性(recyclability)设计材料的成分和工艺;

③ 从当代的先进工艺,评价传统材料的成分,降低对环境的载荷;

④ 开展资源的综合利用研究;

⑤ 开展洁净能源(如太阳能、废热能、垃圾发电、水能、风能等)的开发研究;

⑥ 开展高效气体转化的催化材料及传感器材料的研究;

⑦ 开发节能型建材。

10.3 生 态

在下面,依次讨论生态的概念,生态材料及广义生态。

10.3.1 概念

(1) 顾名思义 “生”是生物?生命?生育?生长?生存?生活?它们之间有密切关系,因为生物都有上列的一系列从生到死的问题。人也属于生物,也可收容在内;但“人”中先生、后生、学生、小生等,也含有“生”字,在这里,似不限于这些特殊的人。

“态”可理解为“状态”,或扩充为“性态”,即“性质”和“状态”。顾名思义,则“生态”之义为“生物的性质”。这种方法有时会引起误解;宜溯源,并尊重学术界已有的含义,再思考能否引申。

(2) 溯源及定义 《辞源》中无“生态”及其衍生词,看来,它是 1840 年以后出现的。确是如此,德国生物学家于 1866 年提出“Öcologic”,英译名为 ecology,其定义在随后的《The American Heritage Dictionary of the English Language》(1978)及《Webster's Ninth New Collegiate Dictionary》(1984)均包含“生态学”及“生态”两个意义;

“Ecology. 生态学是研究生物及其环境之间关系的科学。也叫做 Bionomics。” (10-10)

“Ecology. 生态是生物与它们环境之间的关系。” (10-11)

生态学的显著特点在于它强调生物与环境之间的相互关系,强调整体论与还原论、微观

与宏观、硬技术与软科学的融合,强调系统整体功能与自然关系的协调^[7]。

以 eco-或 ecological 组合的衍生词不少,从五本词典,可获 ecocide (生态破坏)、ecoclimate (生态气候)、ecological factor (生态因素)、ecosystem (生态系统)、ecosphere (生态圈)、ecovalue (生态价)等 24 个新词;我曾将 ECOMATERIAL 叫做“生态材料”。这些新词属于包括“环境”与“系统”的大系统问题;是大综合地观察问题,可避免一些片面性。

(3) 划分 按不同标准,可将生态学划分为若干分支,从而明确它的外延。例如:

- ① 研究对象的组织层次——个体、种群、群落、生态系统生态学;
- ② 栖息环境——海洋、草原、森林、农田、景观、工矿、城镇生态学等;
- ③ 产业——农业、工业、商业生态学等;
- ④ 交叉学科——生理、心理、进化、化学、数学、材料、经济、社会生态学等。

10.3.2 生态材料

10.3.2.1 溯源及置疑

“ECOMATERIALS”一词为日本学者取英文复合词“Environment Conscious MATERIALS”中定语的开头一、二字母 E 及 CO 组合而成。知其源,则此词可直译为“环境意识的材料”,随后在国内逐次简化为“环境意识材料”及“环境材料”。

邻国日本,人众地小,国富而天然资源不博,对自然环境十分敏感:1992 年日本科技厅(STA)组织了 23 个产、学、研单位,实施“与环境协调的材料技术—ECOMATERIALS”国家计划;1993 年 8 月 31 日至 9 月 4 日在日本阳光城举行的第三次国际先进材料会议的 K 会场,专门讨论这类材料,收集了 11 个国家的 173 篇论文,其中 142 篇来自日本,首篇报告定义了 ECOMATERIALS (以后缩写为 ECOM):

“ECOM 是使环境载荷为最小、可循环性为最大而设计的材料。” (10-12)

此风西吹,1995 年 9 月 10 日至 15 日在我国西安,由中日双方联合主持召开了“ECOM 的国际会议”,收集了 199 篇论文的详细摘要。会后,由日本科技厅选编了日、加、美、中、德、韩、法七个国家的作者 29 篇论文,出版了题为“可循环的材料设计及生态平衡的国际专题讨论会文集”,文集标题未用 ECOM;29 篇论文的标题,有三篇用 ECOM。

顾名思义最好能思义,可减少误会;其次,名不正,则言不顺。“环境材料”一词来的曲折,若返回而译为英语,则为“environment materials”。人们研究材料的行为时,则“环境”为这种变化的外因,而材料本身(结构)为变化的内因,用“外因”作“内因”的定语,是否恰当?值得商榷。可有“材料的环境”,而难于理解“环境的材料”。

ECOM 中的 ECO 也可是 Economics 的缩写,从而会误解为“经济材料”,又非定义(10-12)的本意。也可将错就错,也许歪打正着,认为 ECO 是 ecology (生态学)或 ecological 的缩写,则 ECOM 便是“生态材料”。或者感情用事,将“生态材料”叫做“绿色材料”,用“绿色”指示“生态”也较时髦,如“绿色能源”,“绿色农药”、“绿色化学”、“绿色冶金”(利用植物来富集金属)、“绿色机器”(零件易于拆卸翻新而回收的机器)等。但城市交通、机场候机室等已广泛使用“绿色通道”,“绿色”已有用处。

生态学有确切的科学含义,而绿色则较浪漫,且易误解。此外,支撑现代人类文明大厦,似应为能源、信息、材料、生物科学技术四大支柱,而不是只指前三者的三大支柱。通过能源材料、信息材料及生物材料(包括生态材料、仿生材料、人体器官材料、医疗材料等),材料科技便可分别与这三门有关的科技交叉结合了。交叉地带是学术上可以丰收的地带,而结合可孕育出新的品种。

综上所述,在 ECOMATERIALS 的三个译名——环境材料、绿色材料、生态材料——中,著者倾向于采用第三者。在下面,简论它的内涵,外延和重要的研究领域。

10.3.2.2 内涵

用“生态材料学”置换“生态学”,用“材料”置换“生物”,仿定义(10-10),可分别得到:

“生态材料学是研究材料及人类生态环境之间关系的学科。” (10-13)

“生态材料是人类主动考虑材料对人类生态影响所开发的材料。” (10-14)

生态材料学与材料生态学都是交叉科学,正如物理化学(Physical Chemistry)与化学物理(Cheical Physics)一样:它们都是相同学科的交叉,但侧重面则有所不同,物理化学是化学的分枝,而化学物理则是物理的分枝;生态材料学是材料学的分枝,“生态”是定语。

尽管材料的现代定义和判据(图 10-2)已包含了三个主要的生态学考虑——资源、能耗和环保,但正如定义(10-14)所指出的那样,要主动地去考虑,通过经济效益、法律限制以及道德教育,使材料工作者自觉地或被迫地才主动考虑材料与生态的交互作用。

定义(10-12)列出了 ECOM (生态材料)在生态方面的要求——环境载荷(environmental load)为最小、可循环性(Recyclability)为最大。以下将论述生态材料的外延以及研究领域。

10.3.2.3 外延和研究领域

当我们研究“生态材料”时,生态材料便是“系统”,这个系统特别重视它与人类生态环境之间的关系,从这种关系,可将生态材料的问题和关键课题划分为若干类。从而理解生态材料的外延。

首先,生态材料是人类采伐(天然材料)或制造的(人工材料)的,并为人类服役;而人类又是生活在太阳系中地球上;因此,在考虑生态材料与环境之间关系时,应重视如下四点:

- ① 环境应包括人所构成的社会环境,因而就有人文、政经因素对于材料的影响;
- ② 对于自然环境中的矿产资源、能源、水源等,需要考虑人口的影响,有人均参量来补充分析;
- ③ 材料生产和使用过程中所排放或弃置的固态、液态、气态废物对环境污染的影响以及这“三废”的处理和利用;
- ④ 不仅要抑制环境对材料的敌对破坏作用,还要设法利用环境对材料的有益作用,并且保护环境,使材料与环境能协调相处,尽力维持生态平衡。

其次,对于生态材料的研究,要克服忽视经济因素和社会环境影响的纯技术倾向。

第三,生态材料(ecomaterials)并不是一大类材料,只是在开发材料时,包括从设计、生产、使用、弃置、回收各个阶段,都要考虑生态问题,即对人类生存及生活环境的影响。这种影响叫做“环境载荷”(environmental load,定义(10-12)),即若所采用的地球上自然资源和能源尽可能少,并尽可能多的回收。所排放或弃置的、污染环境的废物尽可能少,则环境载荷少,这便是要主动地遵守图 10-1 所示的材料三个战略性判据——资源、能源及环保。

能源材料和信息材料可分别按照能源和信息的类型而划分材料,生态材料则不然,它提出一个应主动采用的、有益的重要概念,对现代人类来说,在一般情况下,适用于所有的材料。因此,难于采用一个标准来划分生态材料;但是,我们可从“人文社科”和“科学技术”两方面来陈述“生态材料”这个概念的外延,从而明确重要的研究领域。

(1) 人文社科问题 人文学主要包括文、史、哲;社会科学则主要包含政、经、社;现从这两方面提出六点管见,供商榷。

① 历史——学者大多重“史”。回顾在材料方面人类与自然环境之间关系的历史，是有借鉴意义的；人类为了生存、生活和更舒适的生活，这种关系大致经历三个阶段：

(i) 适应·改变——开始时，使用适于人类生存的天然材料；随后，发展违背大自然意愿的人工材料，特别是金属材料，或调整材料的成分和结构，或改变材料的工作环境，如添加缓蚀剂、施加表面层压应力、热阻挡层、电磁屏蔽等，分别改变材料工作时的化学、力学、热学、电磁学等环境，抑制材料因腐蚀、断裂、磨损、软化、熔化等原因而失效，使材料延年益寿。

(ii) 利用·学习——随后，人类聪明一些后，可使坏事变好事，利用环境的破坏作用，如利用电化学腐蚀进行抛光或精密加工，利用脆性断裂制备金属细粉，利用环境和耗散结构理论制备智能材料。向大自然的木材、竹材、贝壳、蛛丝等的结构学习，开发仿生材料。

(iii) 保护——人类面临人口的迅速膨胀、资源和能源和高度贫乏及环境的严重污染的局面，开发、生产和使用材料，必须十分重视环境的保护，使之符合可持续发展的原则。

② 哲理·伦理——中国的正统哲理是《易传》中的“自强不息”和“厚德载物”（10-7），向自然（天地）学习；在伦理上，强调勤俭顺从，以暴弃天物为可耻。西方强调个人，在“物竞天择、适者生存”的影响下，竞争并向海外掠夺，在殖民地财富的滋育下，尽情消费，浪费资源，污染环境。当代，殖民地时代一去不复返，南北国家走在一起来了。为了保护共同生活的地球，各国共同参加人类环境会议，通过《联合国人类环境宣言》和“行动计划”，在对于环境的哲理和伦理上，至少在书面上取得若干共识。在一些双边会议上，也反映了一些共识。例如，中国科学院和美国全国科学院于1997年1月16日发表了关于可持续发展的联合声明。首先，指明了重要性：

“中、美两国特别应当为应用科学技术来实现可持续发展，以便更好地为利用世界三分之一资源的目标而共同努力”。
其次，阐明各自努力的方向：（10-15）

“中国具有独特的人口及资源条件，……必须创造性地开拓自己可持续发展的道路”。（10-16）

“美国必须改变其生活方式、工业生产过程、资源消耗的种类和总量，以及所生产商品的特征和数量。”（10-17）

最后，指明两国共同面临的议题。

“可再生资源、节能、农业生产力的可持续发展和有效利用水资源，是美、中两国共同面临的一些重要议题。”（10-18）

③ 经济——《纲要》（图8-4）指出，要实现两个根本转变：经济体制从传统的计划经济体制向社会主义市场经济体制转变；经济增长方式从粗放型向集约型转变。

第一个转变使材料的“经济”判据自动地得到满足。在市场经济体制下，材料从“产品”转变为“商品”，从国家分配变为市场上竞争销售，材料这个商品，除性能好（“物美”）之外，还必须“价廉”，因此就必须有一个“经济”判据。

在表8-1中提到，“粗放型”产品的特点是“三高一低”，满足不了除性能以外的其他四个材料判据。因此，实现第二个转变，便可解决这个问题。

实施“可持续发展”这个基本战略，可充分考虑生态的要求，保证了生态材料的要求；而实施“科教兴国”这个基本战略，分别从科技和人才两方面保证我国各项事业的发展。

④ 法律——各种措施，必须有法律来保证。材料工作者也必须学习有关法律，主动遵

守, 避免无知犯法。国外一些工学院规定大学生必修法律方面课程, 可供借鉴。

⑤ 宣传教育——提高干部和国民的人文素质, 这是十分必要的。发展国家走过的“先污染后治理”道路, 是一个教训, 是一种错误; 我们要发扬“后发展”的优势, 我们不应走耗费更大的“先污染后治理”的老路。要宣传环境保护是实现可持续发展的战略的关键: 是功在当代、利在千秋的大业; 发展生态材料是这个大业的重要组成部分。

⑥ 社会效益——生态材料便是要主动地考虑材料的三个战略性判据: 资源、能源、环保, 具有重大的社会效益, 要从法律和经济两方面来保证这种效益的获得。例如, 法令禁止或限制使用某些化学元素, 违者罚款或判刑。

(2) 科学技术问题 分评价、性能、资源、能源、环境控制五方面简述生态材料的科技问题。

① 评价——关于单个因素对于环境的影响, 因时因地而异。政府用法令的形式规定使用的范围。例如, 二战期间, 美国为了节约钢中的合金元素而发展的 En 系列的合金结构钢和不含或少含钨的 M 系高速钢, 为了满足表 10-3 所示的汽车尾气标准, 必须开发价廉高效的催化材料, 在很短的时间内既要氧化 CO 和 HC, 又要还原 NO_x 。

对于材料的寿命全程的每一步的资源及能源消耗量和有害物质(气、液、固)的排放量, 已积累了大量的数据, 可评价单个因素对环境载荷的影响, 但需持续地补充经济评价, 以便“以利润为主导思想”的企业家决策。关于材料的环境载荷的“寿命全程评价法”, 则需对上述三方面因素的综合评价, 困难的问题是各个因素权重因子和计算方法的选择, 有待反复的研究和协商解决。

② 性能过剩——使用材料的工程师依据工况, 并依据经验, 采用适当的安全系数, 对材料的主要性能提出要求, 从而选择材料——标准的或新开发的。生产材料的工程师, 为了“安全”或“广告”, 所生产的材料性能, 也有“过剩”的倾向。

“信息过剩”, 或噪声高, 需要过滤; 或占据人脑的记忆单元, 需要舍弃。“性能过剩”, 也会带来其他不利的效应:

首先, 是否需要? 以结构钢为例, 一般以屈服强度(σ_s)为主要性能指标, 低合金高强度钢的 σ_s 高于碳钢, 以前者代替后者, 是否经济合算? 分析结果表明:

(i) 对于固定结构, 采用等强度判据, 则这种代替, 可节约钢材; 是否有经济效益? 还受两种钢材的价格比的影响。

(ii) 对于固定结构, 若采用等刚度判据, 则这种代替不能节约钢材, 反而增加了成本。

(iii) 对于交通运输等动态结构, 如车辆、船舶等, 则钢材的节约, 可增加运输量, 从而增加经济效益; 对于航空航天器, 重量的减小, 更为重要。

其次, 是否有坏的副作用? 仍以高强度结构钢为例。在 20 世纪 70 年代以前, 没有断裂韧性 K_{IC} 的要求; 接收传统的“强度愈高愈安全”的设计思想, 导致不少低于 σ_s 的重大脆断事故。

最后, 对于不需要的过剩性能, 增加了对环境的不必要载荷, 不符合对材料的生态要求。

③ 资源——对于材料工业来说, 狭义的资源主要指矿物资源, 也兼顾生产过程所需水源。从生态学考虑, 有四方面问题:

(i) 资源的综合利用;

(ii) 从资源的可循环性设计材料的成分和工艺;

(iii) 从当代的先进工艺, 评价传统材料的成分, 降低对环境的载荷;

(iv) 三废(气、水、垃圾)处理和回收资源的科技, 减少污染, 回收资源。

④ 能源——有三方面问题:

(i) 能源的综合利用;

(ii) 开展洁净而丰富的能源材料(如太阳能、水能、风能、核能、废热能、垃圾发电等)研究;

(iii) 开展节能和利用太阳能的少污染的生态建筑材料研究。

⑤ 环境污染控制——主要有四方面问题:

(i) 针对汽车尾气转化的高效经济的催化材料;

(ii) 输入为化学信息、输出为电或光学信息的传感器材料;

(iii) 输出为力学信息的各种致动(或起动)材料;

(iv) 各种有毒物质的感知材料。

以上③至⑤, 分别对应于材料的资源、能耗及环保三个判据, 减少环境载荷所需开展的主要科技工作。

10.4 广义的生态

10.4.1 广义

生态及生态学已在两方面而引申:

生——原意的“生”是非人类的生物, 但人也是一大类生物, 他及她与他们的生存环境之间的关系, 应该是人类最关心的生态。

环境——原意侧重于自然环境, 人类组成了社会, 人事的生态不得不包括社会(包含人文)环境。

由于上述的引申, 就出现人类生态、学校生态、金融生态、经济生态等。因此, (10-11)的定义由于引申, 可具体化为如下两点:

① 生态是人·事·物与其自然和社会环境之间的关系。 (10-19)

② 生态综合地考虑 [(人·事·物) — (自然·社会) 环境] 组成的巨系统 (10-20)

广义生态学的研究范围广泛, 研究方法通用; 是人类在 21 世纪治理西方工业革命由于掠夺自然所带来的危害的重要工具。

10.4.2 分析方法

在 10.3.2.3 节, 我们从人文社科及科学技术两方面讨论了生态材料; 在下面, 从如下四个方面分析广义的生态。

10.4.2.1 发展中认识

从发展中认识人类与自然环境之间的关系: 西方的工业社会时代, 人们信奉“人定胜天”的哲学, 即人是自然的主人和所有者, 通过自己的努力, 可以征服自然, 统治自然。我们在大跃进年代, “大炼钢铁”、“填湖造田”、“大打麻雀”等, 都是基于相同的信念。现在, 在实践中吃了亏, 才认识到, 人类只是自然链条上的一个环节, 这根链上无论哪个环节上断裂, 整个系统将会濒临崩溃。因此, 人类必须学会与大自然协调共生, 天人合一, 认识自然、尊重自然、利用自然、改造自然, 和谐共处, 这便是正确的人类与自然的关系, 赖以可持续发展的关系, 也就是可持续发展的“生态”。

人类有后代, 后代人与当代人也应该有同等的生存权和发展权。若当代人浪费自然中的

资源和能源，污染自然环境，则会严重地影响后代人的生存和发展，这是不公平的。

发达国家先进入工业社会，对于环境，是“先污染、后治理”，他们犯了错误，现在是“亡羊补牢”；我们是发展中国家，还要亦步亦趋地走他们的老路，这是愚笨而错误的。1997年1月16日中国科学院与美国全国科学院所发表的、关于可持续发展的联合声明指出：“美国必须改变其生活方式、工业生产过程、资源消耗的种类和总量，以及所生产商品的特征和数量。”

10.4.2.2 生态学的原理

归纳起来，有下列四条：

- ① 高效原理——能量的高效利用和资源的循环再生；
- ② 低污染原理——人类社会的生活和生产活动对自然环境带来尽可能低的污染；
- ③ 和谐原理——系统中各组元之间和睦共生，协同进化；
- ④ 自我调节原理——系统的演化依赖于系统内部组织结构的自调节，符合非平衡态热力学的耗散结构原理（[1-1] p.532）。

在下面，举例说明上述原理在自然环境及社会环境中的应用。

10.4.2.3 材料学和工业生态学

从材料的定义（1-1）所提出的五个判据是：资源、能源、环保、经济、性能；前面三个战略性判据便是要符合生态学的第①及第②原理。

材料工业也是一种工业，最近报道的“工业生态学”（见法国《科学与生活》1997年12月号“贸易战也是生态战”）的定义是

“工业生态学是一种通过减少原料消耗和改善生产程序以保护环境的新学科。”

(10-21)

这门学科显然是符合生态学的第①及第②原理的。这门新学科创始人之一、美国电话电报公司副总裁布拉德·艾伦比进一步说明这门学科的内涵：

“工业生态学包括各种研究，涉及到能源生产及使用、新材料、基础科学、经济科学、法律、管理、人类学和人文学科。”

(10-22)

“工业生态学应被看做是对所有工业和经济实体以及它们与自然系统的基本联系（物理、化学和生态联系）进行多学科客观研究。”

(10-23)

这门生态学科在西方受到广泛重视。

10.4.2.4 商业生态系统

穆尔首先总结工业后的新经济环境中出现的特点：

- ① 资本市场全球化，能提供现成的支持；
- ② 技术和管理知识广泛传播；
- ③ 政府对实业界的管制已减少或取消；
- ④ 有才干的人愿从事有风险的新事业。

因而对现有的企业的结构和功能提出疑问，要求更新：

- (1) 等级分明的军队的管理结构（M式），难于使众多成员积极参与；
- (2) 对众多的成员实行领导，而不是管制；
- (3) 尊重和发挥周围人的才智，共同致力于创新；
- (4) 新结构的功能是开创未来，而不是捍卫过去的企业。

针对M式结构的缺点，形成商业（或企业）生态系统（E式），这是与其他公司携手、

培育以发展为导向的协作性经济群体。它的结构(式(1-13)中组元(E)的集合和关系(R)的集合的总合):

① 组元——客户, 供应商, 主要生产厂家以及其他有关单位的人员, 包括投资者、行业协会、技术标准机构、工会、政府或半官方机构;

② 关系——互相配合、补充、帮助, 完成生产和商品的销售和售后服务。

成功的商业生态系统有英特尔、微软、通用电器等公司。例如, 英特尔公司的核心业务是微处理器的芯片, 每年耗费巨资, 鼓励客户使用于新的电脑; 开发英特网; 形成巨大的生态系统。微软公司致力于培育有关的生态系统, 如投资于 Teledesic 公司, 与康卡斯特公司联手。

看来, 人类社会, 既要有竞争, 也要协调, 这就要求发展各种社会生态系统, 如商业、教育、科研等。这种 E 式结构可从环境中吸取资源, 为了获得更多的有益合作者:

——任何有实力的重要角色, 都应进入;

——不完全控制别人, 让较多的组元主动做出贡献, 并在这些部门中投资。

10.5 结 语

本章全面地论述了材料与环境之间的关系:

(1) 材料的现代定义 是在“物美价廉”的前提下, 考虑“可持续发展”基本战略所要求的资源、能耗、环保三个判据; 而生态材料 [定义 (10-14)] 则是在这个战略指引下, 发扬“后发展的优势”, 吸收“先发展的教训”, 不是“先污染、后治理”、像暴发户那样“豪华地使用自然资源和能源、无情地污染环境”, 而是首先主动地考虑材料的成分、工艺和使用, 即“从摇篮到坟墓” (“from cradle to tomb”, 从生到灭) 全过程对环境的载荷 [定义 (10-12)], 这是现代人类为了自身长久生存的重要新概念。

(2) 图 10-2 所示的材料与自然及社会环境之间的关系, 即定义 (10-11) 所指的生态关系。

(3) 广义的“生态”是人·事·物与其自然和社会环境之间的关系; 综合地分析它们组成的巨系统。有别于传统科学所用的“还原论”方法 (包括培根的实验方法和归纳逻辑以及笛卡儿的数学方法和演绎逻辑), 生态学是“整体论科学”, 有着广泛应用的领域。

参 考 文 献

[10-1] 肖纪美, 万发荣, 环境·材料与发展, 世界科技研究与发展, 1996 (6): 25~31

[10-2] 肖纪美, 生态材料论, 世界科技研究与发展, 1998 (2), 57~62

第 4 篇 分 论

1. *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. (Common reed)
 2. *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. (Common reed)
 3. *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. (Common reed)
 4. *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. (Common reed)
 5. *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. (Common reed)
 6. *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. (Common reed)
 7. *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. (Common reed)
 8. *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. (Common reed)
 9. *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. (Common reed)
 10. *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. (Common reed)

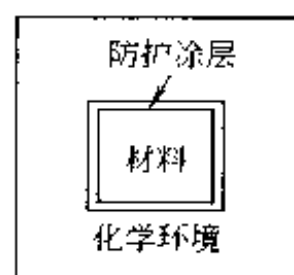
前两篇综合地论述了微观腐蚀学及宏观腐蚀学原理，若腐蚀类似于疾病，则这两篇类似于病理。本篇则应用上两篇的原理，尝试诊治腐蚀这种疾病，共分两章：第 11 章为“防护系统”，应用第 7 章 7.1 节系统分析方法，讨论防护措施；第 12 章为“防护分论”，应用第 2 篇的微观腐蚀学原理，诊治第 2 至第 5 章所讨论的四大类金属腐蚀问题。第 13 章为工业应用，示例地阐明材料或物质腐蚀的有益作用。

第 11 章 防护系统

类比于宏观医学，本章从整体上论述腐蚀的防护。

11.1 概 述

如图 11-1 所示，材料腐蚀时，材料与其周围的化学介质构成一个大系统，这些材料还加工成零部件，并组装成工程结构。从宏观考虑，诊治材料腐蚀时，要兼顾材料及环境这两方面因素。职业病是由某些职业的特殊环境引起的，这些环境包括自然环境和社会环境；长寿的人大多生活在空气新鲜、环境优美之中，无忧无虑，清静寡欲。但是，材料，特别是金属材料，却是人类耗费大自然的资源和能源制造的，并且加工及组装成工程结构，在具有腐蚀性的环境中工作，有时还承担载荷。



在我国经济改革中 [（参见第 8 章 8.3 节），1989 年初提出]

“治理经济环境，整顿经济秩序，全面深化改革。” (11-1)

图 11-1 防护系统

“经济秩序”可以理解为“经济结构”，即经济组元以及它们之间静态和动态关系 [参考第 1 章 (1-13) 关于结构的定义]。类比而理解材料腐蚀的防护措施，可分为两大方面：

(1) 治理环境——包括介质处理（干燥、脱气、脱盐）、缓蚀剂、与环境隔离的涂层（图 11-1）等；

(2) 整顿结构——结构包括宏观的“工程结构”及微观的“材料结构”，前者通过设计来整顿，后者通过材料成分及工艺的调整来改变，也可将涂层及电化学保护放在材料结构之内，因为它们分别改变了材料表面的化学成分及电子结构。这种划分如图 11-2 所示，依次在以下四节论述。

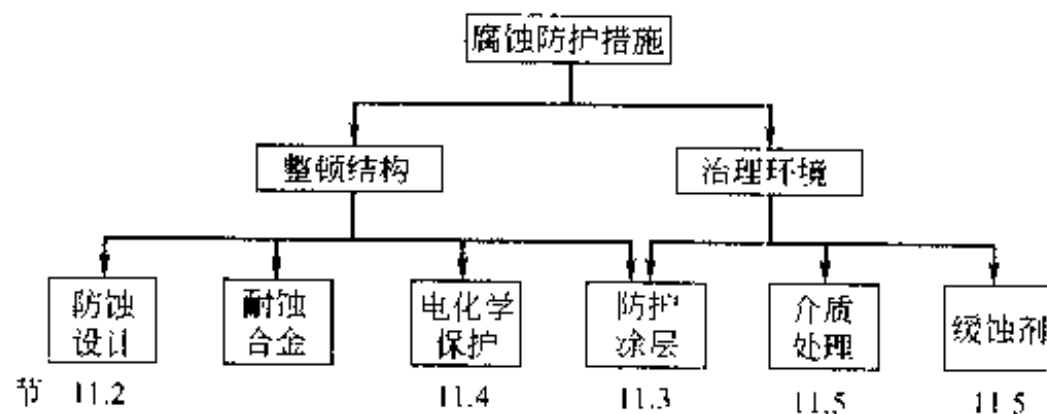


图 11-2 腐蚀防护措施的分类

上面的论述，便是腐蚀防护的方法论；在下面几节，先讨论防腐蚀设计，依次再论述防护涂层、电化学保护及环境处理。关于材料的选择则在第 12 章依据腐蚀类型分析。

11.2 防腐蚀设计

第 8 章图 8-10 曾指出，“设计”对腐蚀失效起了主导作用。文献 [11-1] 第七章分析了这个问题；文献 [11-2] 全书按通用、设备、机器制造、管道、电器技术五方面，依照元部

件系统地论述防蚀设计, 便于查阅。

防蚀设计涉及如下几方面内容:

- (1) 材料的选择;
- (2) 工艺的规定;
- (3) 零部件形状及连接方式的确定;
- (4) 防蚀方法的选择。

现分述如下。

11.2.1 选材

首先, 了解导致腐蚀的环境因素, 除开化学因素之外, 还要考虑物理因素。以工程结构接触水溶液为例, 这些因素叫做工况 (工作情况):

- (1) 化学因素——溶液的成分 (包括杂质)、pH 值、氧含量、可能发生的化学反应等;
- (2) 物理因素——溶液温度、流速、受热及散热条件、受力类型及大小等。

其次, 依据失效经验; 查阅权威性手册; 若有疑问, 向腐蚀及防护专家咨询; 确定可能发生的腐蚀类型, 从而选择材料及机械制造工艺, 并确定临时性及长久性的防蚀方法。

若对工况没有成熟的经验, 还应进行腐蚀试验, 获得必要的选材依据的可靠数据。

此外, 还要考虑材料的力学性能、工艺性能及成本、要兼顾耐用性及经济性。

11.2.2 工程结构的耐蚀设计

工程结构的零部件的形状及连接方式, 应从如下的六个方面, 考虑耐蚀设计问题 ([11-1]p.425~441; [11-2])。

(1) 结构件的形状应尽可能简单合理——形状简单的构件易于采取防蚀措施, 便于排除故障, 易于检查和维修。死角、缝隙、接头处容易使腐蚀介质聚集和浓缩, 从而易引起可避免的腐蚀, 应设法避免。

(2) 防止电偶腐蚀——将电位不同的两种金属在电解液中接触时, 将构成原电池, 导致电偶腐蚀; 电位差愈大, 则腐蚀电流愈大, 腐蚀愈快。表 11-1 列出常用金属材料在海水中的稳定电位, 电位负的金属和合金将受到严重的腐蚀。

表 11-1 金属和合金在海水中的电极稳定电位 E_H 升高的序列

金 属	E_H/V	金 属	E_H/V
镁	-1.45	镍(活态)	-0.12
镁合金	-1.20	α 黄铜(30% Zn)	-0.11
锌	-0.80	青铜(5%~10% Al)	-0.10
铝合金(10% Mg)	0.74	铜锌合金(5%~10% Zn)	-0.10
铝合金(10% Zn)	-0.70	铜	0.08
铝	0.53	铜镍合金(30% Ni)	-0.02
镉	-0.52	石墨	+0.02~0.3
杜拉铝	0.50	不锈钢 Cr13(钝态)	+0.03
铁	-0.50	镍(钝态)	+0.05
碳钢	-0.40	因科镍(11%~15% Cr, 1% Mn, 1% Fe)	+0.08
灰口铁	-0.36	Cr17 不锈钢(钝态)	+0.10
不锈钢 Cr13 和 Cr17(活态)	-0.32	Cr18Ni19 不锈钢(钝态)	+0.17
Ni-Cu 铸铁(12%~15% Ni, 5%~7% Cu)	-0.30	哈斯特合金(20% Mo, 18% Cr, 6% W, 7% Fe-Ni)	+0.17
不锈钢 Cr19Ni9(活态)	-0.30	蒙乃尔	+0.17
不锈钢 Cr18Ni12Mo2Ti(活态)	-0.30	Cr18Ni12Mo3 不锈钢(钝态)	+0.20
铅	-0.30	银	+0.12~0.2
锡	-0.25	钛	+0.15~0.2
$\alpha + \beta$ 黄铜(40% Zn)	-0.20	铂	+0.40
锰青铜(5% Mn)	-0.20		

注: 选自 [11-1] p.429。

防止或减小电偶腐蚀的措施如下:

- ① 电位不同,特别是电位差大的金属应避免直接接触;
- ② 在两种异类金属之间隔入一层不导电的有机材料;
- ③ 在两种异类金属之间隔入第三种金属,减小电位差;
- ④ 若不能避免异类金属接触时,一定要尽量降低阴极面积/阳极面积比,避免大阴极-小阳极的组合;
- ⑤ 采用耐蚀涂料涂在电偶对的贵金属部分,若仅涂在贱金属一侧,则将由于涂层有小孔时,反而出现大阴极-小阳极的严重穿孔现象;
- ⑥ 避免电解液在表面的形成,防止能吸收水分的材料接触。

(3) 设计时避免缝隙,便可避免缝隙腐蚀——铆接、销钉连接、螺栓连接、法兰盘之间连接等,都会带来缝隙,若有化学介质在缝隙内,便会产生缝隙腐蚀。一般采用焊接、涂料、适当尺寸的垫圈等措施,防止这种腐蚀。

(4) 设计时,防止湍流、涡流等造成的冲刷腐蚀——应用流体力学,从部件的设计上,避免这种流动方式。

(5) 设计时,防止温度差、通气差、溶液浓度差等导致的电位差引起的腐蚀。

(6) 设备和建筑物的位置如有选择可能,应选择自然腐蚀较低的位置,如避免海洋大气、工业排水、化工厂有害烟尘等的加速腐蚀。

11.2.3 防蚀设计备忘录

每一类工业,由于过去设计不当造成了损失,给人印象深刻,有经验的工程师记下这些教训或经验,作为备忘录留给后来者,实用价值大。例如,一位宇航及航空工业的工程师建议如下的备忘录,突出如下20个可能出现的问题领域(文献[11-3], p.94)。

- (1) 在设计开始时,就要想到腐蚀。
- (2) 考虑保护涂层所引起的尺寸容量。
- (3) 密封接头,防止水汽侵入。
- (4) 充分了解工作环境。
- (5) 使用干燥剂,降低湿度。
- (6) 部件上不放吸潮吸水物质。
- (7) 记住,“密封”不一定总是将水汽排走。
- (8) 对于电子元件应用封装保护。
- (9) 避免异类金属接触;或在它们之间隔入绝缘物质。
- (10) 记住,石墨也是一种异类金属。
- (11) 若异类金属必须接触,或用干燥剂吸收电解液,或在接触面涂保护层。
- (12) 异类金属部件(如螺钉,螺栓等)涂上底漆后再连接。
- (13) 警惕在连接处出现缝隙腐蚀。
- (14) 使用对真菌无作用的材料。
- (15) 要求保护涂层时,考虑生产流程。
- (16) 设法避免或松弛内应力。
- (17) 对热处理的高强度钢,用有机涂层来代替电镀层。
- (18) 检查并防止有石炭酸及其他腐蚀性气体的逸出。
- (19) 对电连结要特别小心。

(20) 检查设计时，总是要请教腐蚀工程师，寻求帮助。

工程师应该是很实际的，上述备忘录是教训或经验的总结。对于这些备忘录，运用第二篇微观腐蚀学的知识，可以理解。例如：从(9)到(12)，考虑了电偶腐蚀；(16)及(17)考虑了应力腐蚀和氢脆；(3)及(7)考虑了密封质量；(3)、(5)、(6)、(8)是为了干燥降水及避水；(4)及(18)考虑腐蚀性介质；(13)及(14)分别注意到缝隙腐蚀及微生物腐蚀；(2)、(15)、(17)考虑了涂层问题等等。

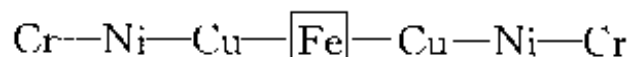
文献[11-3] (p.95~101) 分析了汽车、铁道及化工厂的防腐蚀设计问题，可供参考。

11.3 防护涂层

11.3.1 概念

金属的腐蚀破坏都是从表面开始，假如在它的表面与介质之间插入稳定的或耐蚀的物质，使金属表面不能与介质接触，金属的腐蚀便会停止。这种插入的物质叫做涂层或镀层，它类似于雨衣，人们穿了它，可以不受雨淋。

涂了或镀了层的金属，可认为是多层金属材料，例如钢的表面需要镀镍防锈，为了更好的电镀镍层，需要先行镀铜，而为了美观或抗氧化，在镍层之外又镀铬，因而形成了七层金属材料：



在这种条件下，既可认为是改变钢的表层化学结构，又可认为原有的钢的环境改变了，不再是腐蚀介质，而是Cu层。因此，如图11-2所示，防护涂层既可属于“整顿结构”，也可属于“治理环境”的腐蚀防护措施。

如图11-3所示，防护涂层可分为金属的及非金属的两大类。金属镀层既可按镀上的金属再分类，图11-3则采用工艺来分类。非金属涂层又分为无机涂层及有机涂层两类，然后再分。

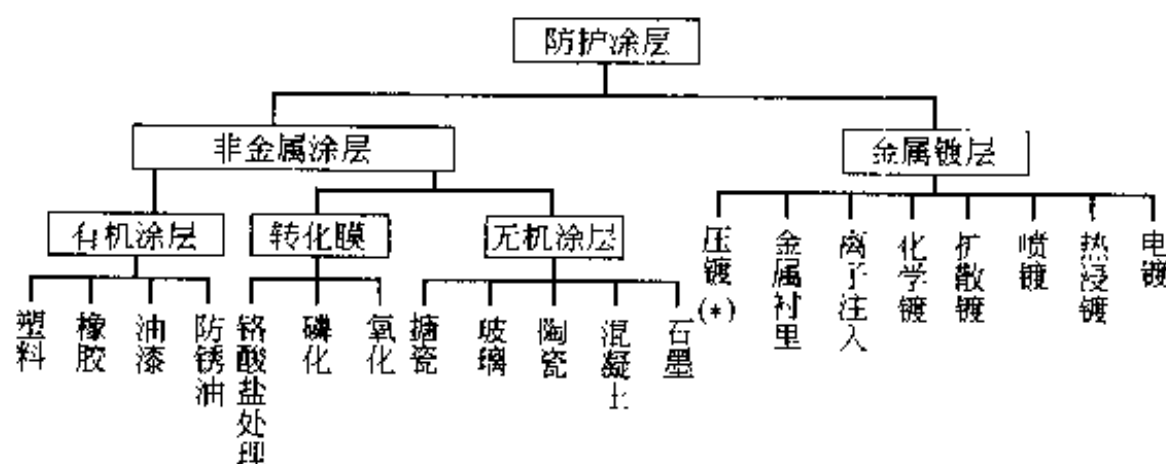


图 11-3 防护涂层的分类

* 使用压力加工的方法将不同金属（例如不锈钢板及碳钢板）结合成复合材料。

关于图11-3所示的各种防护涂层的制造工艺、涂（镀）层结构及耐蚀性，可参考文献[11-1]第三、五、六章。

11.3.2 防蚀机理

涂层（或镀层）的目的很多：美观和装饰、耐磨损、修补零件，而最重要的是防止腐蚀。

防蚀作用主要是覆盖，因此要求覆盖层完整无孔，使基体金属不与介质接触，而面临腐蚀介质的是防护层。防护层应该与基体金属能够很牢固地结合，在使用时，不应因加热或冷

却以及受力（例如震动、冲击、弯曲等）而脱层或剥落，发生了这种情况，防护层便失去了防护作用。

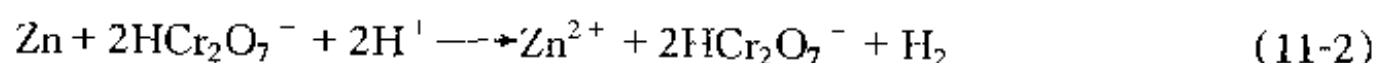
从电化学腐蚀过程考虑，金属镀层可分为阳极层和阴极层两大类，前者是包括相对于基体金属是阳极的防护层，后者防护层则是阴极。

阳极覆盖层（例如钢的表面热浸镀锌）若有孔隙，基体金属还可依靠覆盖层的牺牲溶解而受到电化学保护，这时，阳极面积大，阴极面积小，使覆盖层的腐蚀电流密度很小，从而腐蚀速度也很小。飞机使用杜拉铝压镀工业纯铝也属于这种情况，工业纯铝是阳极覆盖层。

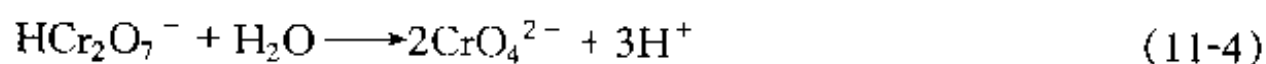
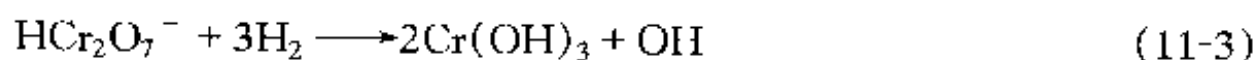
阴极覆盖层则不然，若覆盖层有孔隙，则腐蚀便集中在孔隙下暴露的基体金属小区进行。这时，由于腐蚀微电池存在大阴极-小阳极的组合，阳极的腐蚀电流密度从而腐蚀速度很高，会引起穿孔的点腐蚀破坏。因此，阴极防护层只有完整无孔时，才能覆盖地阻止腐蚀介质与基体金属接触；否则，由于发生了局部的点蚀，危害性更大。避免孔隙的办法，一是改进工艺，二是增加镀层厚度；也可在阴极镀层之外涂上有机薄膜，封闭阴极镀层孔隙。

表 11-1 曾示出常用金属材料在海水中的稳定电位，并按电位高低排了顺序。但是，这种顺序也可随介质而有所更动。例如，对于铁来说，在大多数情况下，锡是阴极（表 11-1 中 Fe 及 Sn 的 E_H 分别是 -0.50 及 $-0.25V$ ），故马口铁表面的锡是阴极覆盖层；但在有些有机酸（例如草酸和柠檬酸）中，由于锡能形成络合离子，锡是阳极。又例如，镉的标准电极电位（ E_H 为 $-0.403V$ ）略正于铁（ E_H 为 $-0.440V$ ），但是，在大多数情况下，镉镀层对于铁来说，是一种类似于锌的阳极覆盖层（表 11-1 中 Fe 与 Cd 的 E_H 分别是 -0.50 及 $-0.52V$ ）。

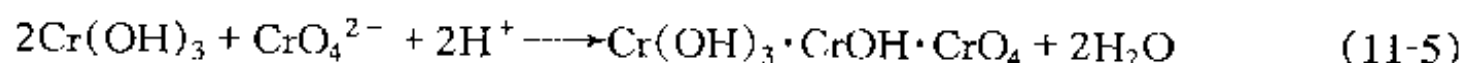
金属材料在铬酸盐溶液中（例如含 $200g/L$ 重铬酸钠和 $5\sim 6ml$ 硫酸）中处理，发生下列化学变化：



由于 pH 值上升，使氢氧化铬沉淀， CrO_4^{2-} 更稳定：



然后，在锌的表面形成碱性铬酸盐膜：



这种铬酸盐膜的防护作用：一方面是由于致密的铬酸盐膜起到覆盖隔离作用；另一方面，膜内六价铬化合物又可部分溶解，促进露出的金属表面钝化，抑制腐蚀。

镀锌层表面形成的铬酸盐钝化膜内铬含量越高，则耐大气腐蚀性越佳。实践表明，镀锌层表面钝化膜若保持在 $12mg/dm^2$ 左右，在一般情况下，放置 $5\sim 6$ 月，不会产生白锈。

11.4 电化学保护

11.4.1 概念

电化学保护分为阴极保护和阳极保护两类。

“在金属表面通入足够的阴极电流，使这种金属的阳极溶解速度减小，从而防止腐蚀的方法，叫做阴极保护。” (11-6)

依据阴极电流的来源，这种方法又分为牺牲阳极保护及外加电流保护两种。

“在金属表面通入足够的阳极电流，使这种金属电位达到并保持在钝化区内，

从而防止腐蚀的方法，叫做阳极保护。”

(11-7)

1824 年 Davy 提出阴极保护法，用牺牲阳极铁或锌来有效地阻止木船铜包皮的腐蚀，到了 20 世纪 30 年代，这种方法在工业上才开始应用，主要用于淡水、海水、土壤及碱、盐类溶液中的腐蚀。阳极保护方法是 1954 年才由 Edeleanu 提出，1958 年已开始应用，主要用性酸性介质，但不宜由于盐酸及含氯离子的溶液。

电化学保护借助于外加电源或牺牲阳极来保护金属的工程结构；这种方法临时地改变了金属表面的电子密度，从“结构”的定义 (1-13) 可知，这些电化学保护方法也临时地改变了金属材料表面的电子结构，可属于图 11-2 内的“整顿结构”的大类之中。

11.4.2 阴极保护

11.4.2.1 原理

如图 11-4 (a) 所示的腐蚀电池：在金属 (M) 中，由电子导电，电子由阳极 (A) 流向阴极 (C)；在溶液 (S) 中，由离子导电，阳离子由阳极向阴极迁移，阴离子由阴极向阳极迁移，从而构成通路。规定的电流 (I) 的方向与电子流动的方向相反，故直流电流的流动方向是：

$$C \longrightarrow M \longrightarrow A \longrightarrow S \longrightarrow C$$

图 11-4 (c) 示出的极化曲线中， E_s 及 I_s 分别是腐蚀电位及腐蚀电流。图 11-4 (b) 为阴极保护时的情况，这时，所施加电流的方向使被保护的工程结构（包括 A 与 C）为阴极，进行阴极极化，这时的电位从 E_s 向更负的方向沿 SCD 移动（图 11-4 (c)）。当金属电位极化到 E_1 ，所需的电流 I_1 ，相当于 AC 线段，其中 BC 线段的电流是外加的，AB 线段的电流则是阳极腐蚀所提供的，这时金属的腐蚀还未停止。如果使金属极化到更负的电位，达到 E_a ，则阳极腐蚀电流为零，即金属得到完全的保护。

11.4.2.2 参数

使金属达到完全保护所需的最小电流 (I_E)，叫做最小保护电流；相应的电位叫做最小保护电位，即金属上阳极的初始电位 E_a 。

实际使用的保护电位有一个范围。例如钢在海水中的保护电位在 $-0.80 \sim -0.90V$ （参比电极为银/氯化银/海水）范围内：当电位比 $-0.80V$ 更正时，达不到完全保护；而比 $-0.90V$ 更负时，则阴极上可能析氢，可能有氢脆的危险。

实际使用的保护电流密度，对应于所采用的保护电位，这要取决于图 11-4 (c) 中极化曲线的斜率，这些曲线又与被保护金属及腐蚀介质的特性、阳极的形状和大小、保护系统中电路的总电阻等因素有关。

文献 [11-1] p.8 及 p.10 列出一些金属的保护电位及最小保护电流密度，可供参考。

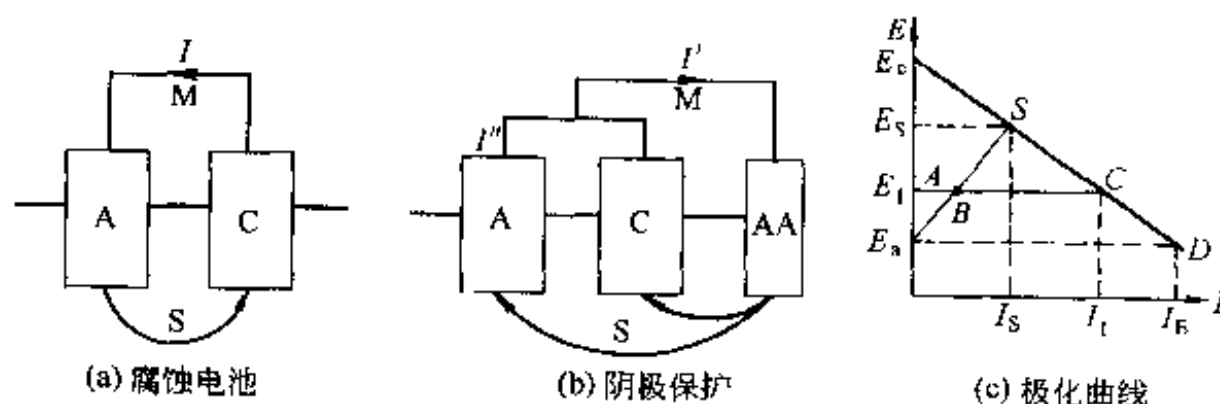


图 11-4 阴极保护及其原理示意图

I' —保护电流； I'' —腐蚀电流； $I_E - I'' = 0$ 时的 I'

保护程度 (P) 及保护效率 (Z) 分别由下列二式确定：

$$P = \frac{i_{c0} - i_a}{i_{c0}} \times 100\% \quad (11-8)$$

$$Z = \frac{i_{c0} - i_a}{i_{ap}} \times 100\% = \frac{P}{i_{ap}/i_{c0}} \times 100\% \quad (11-9)$$

式中 i_{c0} ——未加阴极保护时的腐蚀电流密度；

i_a ——施加阴极保护时的腐蚀电流密度；

i_{ap} ——阴极保护时外加的电流密度。

很明显，阳极保护时电位的负移可由下式计算：

$$\Delta E = \frac{RT}{F} 2.3 \lg \frac{i_{c0}}{i_a} \quad (11-10)$$

从图 11-4 (c) 可以看出， i_a/i_{c0} 的减小，要求 i_{ap}/i_{c0} 增加，其结果是 P 不断提高， Z 却随着下降， ΔE 也随着增加。文献 [11-1] p.11 列出这方面的计算结果，例如， i_a/i_{c0} 从 0.9 减小至 0.2， i_{ap}/i_{c0} 从 0.16 增大到 2.02， P 则从 10% 提高到 80%， Z 从 64.2 下降到 39.6%， ΔE 从 0.0027V 增至 0.0404V。

11.4.2.3 牺牲阳极

人们习惯于将不易腐蚀的黄金、白金等叫做“高贵”或“贵重” (noble) 金属，而将易腐蚀的铁、锌、铅等叫做“低贱”或“贱” (base) 金属。若从电位考虑，贵金属的电位向正方向走，标准电极电位最正的是 Au 及 Pt， E_H 分别为 +1.50 及 +1.20V，而 Ag 及 Cu 的 E_H 分别为 +0.800 及 +0.337V；贱金属 Pb、Fe 及 Zn 的 E_H 分别为 -0.126，-0.440 及 -0.763V。早在 1824 年 Davy 就提出用牺牲 Zn 及 Fe 来保护木船 Cu 包皮的海水腐蚀。

现代人用电位的高低来理解牺牲阳极，从“牺牲”和“阳极”两方面去理解。一些电位较负的金属材料，在电解液中与被保护的金属结构连接时，作为阳极而优先牺牲地溶解，释放的电子或电流使金属结构阴极极化到所需电位面达到保护的效果，这些金属材料便是牺牲阳极材料。既是材料，便要求从第 1 章 (1-1) 关于材料的定义和判据，从性能和经济两方面综合考虑，对牺牲阳极材料提出下列四方面要求。

(1) 足够负的稳定电极电位。不仅要有足够负的开路电位，即在电解液中的自然腐蚀电位，而且要有足够负的稳定的工作电位，即牺牲阳极在电解液中与阴极连接时，牺牲阳极的电位。但是，牺牲阳极的电位不宜过负，否则阴极上会析氢，可能导致氢脆。

(2) 高而稳定的电流效率 η

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{\text{实际电容量}}{\text{理论电容量}} \\ &= \frac{\text{单位牺牲阳极质量所产生的电量 (A·h/kg)}}{\text{单位牺牲阳极质量按库伦定律计算的电量 (A·h/kg)}} \end{aligned} \quad (11-11)$$

当 η 高时，表示自腐蚀电流小，可以延长牺牲阳极的使用期。

(3) 材料来源充足，价格低廉，不会导致环境污染。

(4) 制造工艺简易，并具有所要求的力学性能。

常用的牺牲阳极材料，有镁基、锌基及铝基合金三大类，表 11-2 至表 11-6 分别列出它们的成分和性能，详细讨论参考 [11-1] p.11~22。

表 11-2 镁阳极的化学成分 (%)

种 类	Al	Zn	Mn	Fe	Ni	Cu	Si	Mg
纯镁	<0.01	<0.03	<0.01	<0.002	<0.001	<0.001	<0.01	>99.95
Mg-Mn	<0.010	—	0.50~1.30	0.03	0.001	0.020	—	余量
Mg-Al-Zn-Mn	5.3~6.7	2.5~3.5	0.15~0.60	<0.003	<0.001	<0.02	<0.10	余量
Mg-Al-Zn-Mn	5.3~6.7	2.5~3.5	0.15~0.60	<0.03	<0.003	<0.05	<0.30	余量

注：选自 [11-1] p.12。

表 11-3 镁阳极的性能

性 能		纯镁, Mg-Mn	Mg-6Al-3Zn
相对密度		1.74	1.77
开路电压(SCE)/V		-1.56	-1.48
对铁的驱动电压/V		0.75	0.65
理论发生电量/(A·h·g ⁻¹)		2.20	2.21
海水中 3mA/cm ²	电流效率/%	50	55
	发生电量/(A·h·g ⁻¹)	1.10	1.22
	消耗量/(kg·A ⁻¹ ·a ⁻¹)	8.0	7.2
土壤中 0.03mA/cm ²	电流效率/%	40	50
	发生电量/(A·h·g ⁻¹)	0.88	1.11

注：选自 [11-1] p.12。

表 11-4 锌阳极的化学成分 (%)

种 类	Al	Cd	Pb	Fe	Cu	Sn	Zn
纯 锌	—	<0.002	<0.003	<0.0014	<0.001	<0.001	>99.995
Zn-Al-Cd	0.1~0.7	<0.2	<0.3	<0.02	<0.01	—	余量
Zn-Al-Cd	<0.2	0.05~0.2	<0.2	<0.0014	<0.001	—	余量
Zn-Al-Cd	0.10~0.50	0.025~0.15	<0.006	<0.005	<0.005	Si<0.125	余量

注：选自 [11-1] p.15。

表 11-5 锌阳极的性能

性 能		纯锌, 锌合金
相对密度		7.14
开路电压(SCE)/V		1.03
对铁的驱动电压/V		0.20
理论发生电量/(A·h·g ⁻¹)		0.82
海水中 3mA/cm ²	电流效率/%	95
	发生电量/(A·h·g ⁻¹)	0.78
	消耗量/(kg·A ⁻¹ ·a ⁻¹)	11.8
土壤中 0.03mA/cm ²	电流效率/%	65
	发生电量/(A·h·g ⁻¹)	0.53

注：选自 [11-1] p.15。

表 11-6 铝合金的化学成分及电化学性能

合金系	化 学 成 分/%					电位 (SCE) /mV	电流效率 /%
	Zn	Sn	In	Hg	Al		
Al-Zn-Hg	0.45	—	—	0.045	余量	-970~-1040	92~97
Al-Zn-Sn	1.5~8.0	0.07~0.20	—	—	余量	-990~-1090	84~87
Al-Zn-In	0.5~30	—	0.01~0.05	—	余量	-1040~-1140	70~90

注：选自 [11-1] p.18。

11.4.2.4 外加电流的阴极保护系统

在下面，简介这个系统所包括的四个部分：辅助阳极、阳极屏、参比电极和直流电源。

(1) 辅助阳极 与直流电源正极相连接的外加电极，叫做辅助阳极（图 11-4b 中 AA），其作用是使外加电流从它经过介质达到被保护结构，对于它的要求如下：

- ① 导电性能良好，电耗少；
- ② 排流量大，即允许电流密度高；
- ③ 具有一定的强度，耐磨损，抗冲击震动；
- ④ 易于加工和安装；
- ⑤ 易于购买到，价格低廉。

辅助阳极材料可分可溶、微溶及不溶三类（表 11-7）。

表 11-7 辅助阳极的性能

材 料	使用环境	允许电流密度/(A·dm ⁻²)	消耗率/kg·(A·a) ⁻¹
碳钢	水中、土中	—	9
铸铁	水中、土中	—	2~9
铝		0.1	2.4~4
硅铸铁	海水中	0.5	0.3~1.0
砷铸铁	淡水、土中	0.1	0.05~0.2
石墨	海水中	0.1	0.16
石墨	淡水	0.025	0.04
磁性氧化铁	海水中	4.0	约 0.1
磁性氧化铁	土中	0.1	约 0.1
铅银合金	海水中	0.3~3	0.03
镀铂钛	海水、淡水	10	0.000006
镀铂钛	土中	4	0.000006

注：选自 [11-1] p.24。

(2) 阳极屏 系统工作时，从辅助阳极排出很大的电流；在它周围的被保护结构，可能由于电位是足够的负而析出氢气，使溶液的 pH 值下降，破坏周围的涂层，降低保护效果。为了防止电流短路，扩大电流分布范围，确保保护效果，在辅助阳极周围，涂装屏蔽层，即阳极屏。对阳极屏材料，有如下六点要求：

- ① 有较高的粘附力和韧性，以防止海水的冲刷破坏；
- ② 耐海水中 Cl⁻ 及 OH⁻ 的侵蚀；
- ③ 介电性高；
- ④ 工艺性能好，施工简易；
- ⑤ 使用寿命长；
- ⑥ 易于购到，价格低廉。

目前使用的阳极屏材料有三类：

- ① 涂层——有环氧沥青、聚酰胺系涂料、氯丁橡胶、玻璃钢涂料等；
 - ② 聚氯乙烯、聚乙烯等薄板，用螺栓固定在被保护结构上，用密封胶将安装孔安装孔密封；
 - ③ 覆盖绝缘层的金属薄板，焊在被保护的結構上。
- (3) 参比电极 所采用的参比电极有如下四种：
- ① 铜/硫酸铜电极；

② 银/氯化银电极；

③ 锌电极；

④ 甘汞电极。

(4) 直流电源 直流电源有如下四种方式：

① 恒电位仪——能自动调节电流使被保护结构的电位控制在保护电位范围内；

② 整流器——用于阴极保护的用可控硅、硅、硒及氧化铜整流器等，一般在整流器的输出导线上接蓄电池组，以便停电时作为临时的直流电源使用。在整流器上常附加稳压装置，调节交流电压的变化；

③ 直流发电机——有各种功率和直流电压；

④ 太阳能电池——重量轻、使用及维修方便、可靠性高、使用寿命长、耐冲击和震动，但目前价格较贵。

11.4.3 阳极保护

11.4.3.1 原理

阳极保护就是使金属的电位处于稳定钝化区的防腐蚀方法，使金属改变电位而保持钝态的方法有如下三种。

(1) 用外电源进行阳极极化——将被保护的金属作为阳极，当阳极电流密度达到致钝电流密度（图 2-12 中 I_{\max} ）时，金属发生钝化，然后用较小的电流密度（图 2-12 中 I_p ），使金属的电位维持在钝化的范围内。

(2) 往溶液中添加氧化剂——如吹入空气、添加三价铁盐、硝酸盐、铬酸盐、重铬酸盐等，使溶液的氧化-还原电位升高，促进钝化。但是，这种方法要求氧化剂达到一定浓度，否则反而会加速腐蚀。

(3) 合金的阴极改性处理——在合金中添加少量的贵金属元素 Pd、Pt 等，由于它们起着强阴极的作用，加速阴极反应，使合金电位正移到钝化区内，从而得到保护。在溶液中添加 Pt^{4+} 、 Pd^{2+} 、 Ag^+ 、 Cu^{2+} 等，由于这些金属离子在合金表面上的还原，也有类似的作用。

参照图 2-12，阳极保护有如下三种参数：

(1) 致钝电流密度——是金属在给定环境介质中发生钝化所需的最小电流密度（图 2-12 中 I_{\max} ）；

(2) 维钝电流密度——是金属在给定环境介质中维持钝化所需的电流密度（图 2-12 中 I_p ）；

(3) 稳定钝化区的电位范围——这是钝化过渡区与过钝化区之间的电位范围，即图 2-12 中 $E_{cr} - E_F$ ，超出这个范围，则金属快速溶解。

很明显： I_{\max} 小，则易于致钝； I_p 小，则易于维钝； $|E_{cr} - E_F| \geq 50\text{mV}$ ，则便于控制。

表 11-8 示例地列出几种金属/介质系统的阳极保护参数。

表 11-8 几种金属/介质系统的阳极保护参数

金属材料	化学介质	温度/℃	$I_{\max}/(\text{A} \cdot \text{m}^{-2})$	$I_p/(\text{A} \cdot \text{m}^{-2})$	$E_{cr} - E_F/\text{mV}$
碳钢	97% H_2SO_4	49	1.55	0.155	+800(SCE)以上
	40% HNO_3	30	3000	0.26	+700 ~ +1300(SCE)
	75% H_3PO_4	27	232	23	+600 ~ +1400(SCE)
	60% NH_4NO_3	25	40	0.002	+100 ~ +900(SCE)
铬镍不锈钢	30% 草酸	沸腾	100	0.1~0.2	+100 ~ +500(Pt)
铬锰氮钼不锈钢	30% 草酸	沸腾	15	0.1~0.2	+100 ~ +500(Pt)

11.4.3.2 系统

如图 11-5 所示的硫酸贮槽的阳极保护系统中包括：

- (1) 阳极——贮槽；
- (2) 辅助阴极——铂或镀铂电极；
- (3) 参比电极；
- (4) 恒电位仪。

辅助阴极材料连接在直流电源的负极，其作用是使电源、钢槽、槽内电解液构成电路。在这种电路中，阳极面积很大，因而阳极-电解液的接触电阻是很小的；因而应尽可能增大辅助阴极面积，藉以降低电路电阻及所耗电能。所使用的辅助阴极材料有包铂阴极、哈氏合金 C、铬镍不锈钢、镍、硅铸铁、钽、铅、钼等（表 11-9）。

所使用的参比电极在腐蚀性介质中必须不易溶解，并能保持电位稳定。

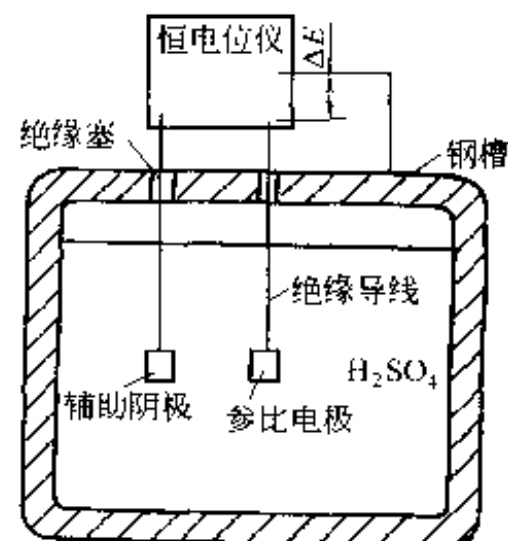


图 11-5 硫酸贮槽的阳极保护系统(文献[11-1]p.57)

表 11-9 生产现场所用的阴极材料

阴极材料	环 境	阴极材料	环 境	阴极材料	环 境
包铂黄铜	各种浓度的硫酸	钢缆	纸浆液	钼	—
铬镍钢	硫酸	1Cr18Ni19Ti	氮肥溶液、氢氧化铵	铜	—
硅铸铁	硫酸	哈氏合金 C	硫酸、肥料溶液	不锈钢 304	硫酸
钢管	纸浆液	“空气”电极	硫酸	镀镍电极	不用电的镀镍槽

11.5 治 理 环 境

11.5.1 概 说

简言之，治理环境不外去除有害的物质和加入有利的物质。

水对于金属材料及非金属材料，都有腐蚀性，去除有害的物质，首先是干燥脱水。若材料服役时必须与水或水溶液经常接触，则要考虑脱气和去盐。由于氧参加了腐蚀的阴极反应：



因而锅炉用水要求脱氧，使水中氧含量低到 10^{-9} 的数量级。

含硫的油气田中的 H_2S 需要去硫，一方面回收硫这种资源，另方面可降低硫化氢导致的应力腐蚀。天然水中含有 CO_2 及 O_2 ，可以加速碳钢的腐蚀；而天然水中又含有大量的矿物质，特别是钙盐及镁盐，如为不经过软化处理的水用于锅炉，在锅内将会有大量的 CaCO_3 沉积，这种沉积物一方面降低了导热能力，使热效应减少，另方面由于局部过热，可加速局部氧化及局部破坏。水的软化是一种脱盐作用，也是一种降低 CO_2 的脱气处理。

因此，“去除有害的物质”可以概括为“三脱”，即脱水、脱气、脱盐。“加入有利的物质”便是加入各种类型缓蚀剂。在下面，先简单而示例地介绍锅炉水的处理，然后论述缓蚀剂的原理。

11.5.2 锅炉用水的处理

进行水的软化处理时，加入的石灰使碳酸氢钙变成碳酸钙，加入的碳酸钠，使硫酸钙变成碳酸钙，若有镁盐存在，则转化为氢氧化镁。这样，可以达到脱去可溶性钙盐和镁盐的作用。也可用离子交换的方法，用水中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 离子交换树脂中 Na^+ 离子，达到脱去

Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的要求。为了控制锅炉的水腐蚀, 还要进行脱气、碱化、加缓蚀剂三种处理。

11.5.2.1 脱气

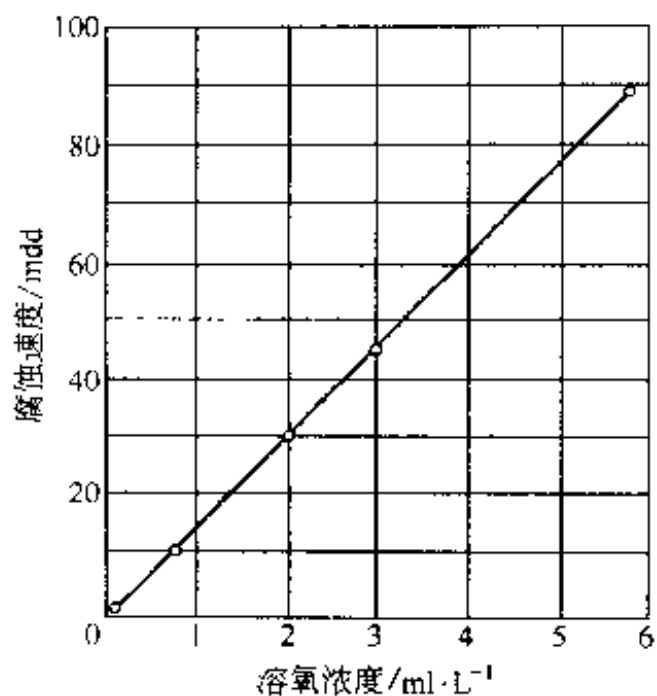
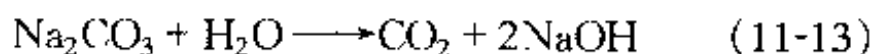


图 11-6 氧浓度对低碳钢在 165mg/kg CaCl_2 水溶液中腐蚀速度的影响
([11-4] p.94)
(25℃ 48h 试验)

由于氧气的去极化作用[式(11-12)], 如图 11-6 所示, 低碳钢的腐蚀速度随着水中氧含量的增加而线型地加快。

碳酸($\text{H}_2\text{CO}_3 \rightleftharpoons \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$)在没有氧的条件下也能腐蚀碳钢, 有氧存在时, 则腐蚀更快。虽然水软化时, 使溶于水的 CO_2 转化为不溶的碳酸钙而除去, 但是, 在锅炉工作的温度下, 溶解的 Na_2CO_3 发生如下的化学反应:



这种热的碳酸导致锅炉和冷凝器的腐蚀。腐蚀产物 FeCO_3 发生类似上式的反应, 所产生的碳酸又积累而参加腐蚀。

脱氧有物理的和化学的两种方法。常用的物理脱气法是蒸汽法: 将需要脱气的水喷出或流向大的金属表面, 而水蒸气则反向流动; 水中溶解的气体 (O_2 及 CO_2) 则蒸馏逸走, 而水也被加热。对于冷水, 可采用多级的真空处理除气, 好在对冷水的可溶氧量较高 (表 11-10), 达到这种指标还不困难。

表 11-10 钢腐蚀能容许的脱气水中的氧含量

条 件	能容许的最高氧含量/(ml·L ⁻¹)	条 件	能容许的最高氧含量/(ml·L ⁻¹)
冷水	0.2	低压锅炉	0.02
热水	0.07	高压锅炉	0.0035

注: [11-4] p.275。

工业用水的化学脱氧法可以选用 Na_2SO_3 :



反应物分子量分别为 126 及 16, 约为 8:1, 故脱 1kg 氧, 约需 8kg 亚硫酸钠。如图 11-7 所

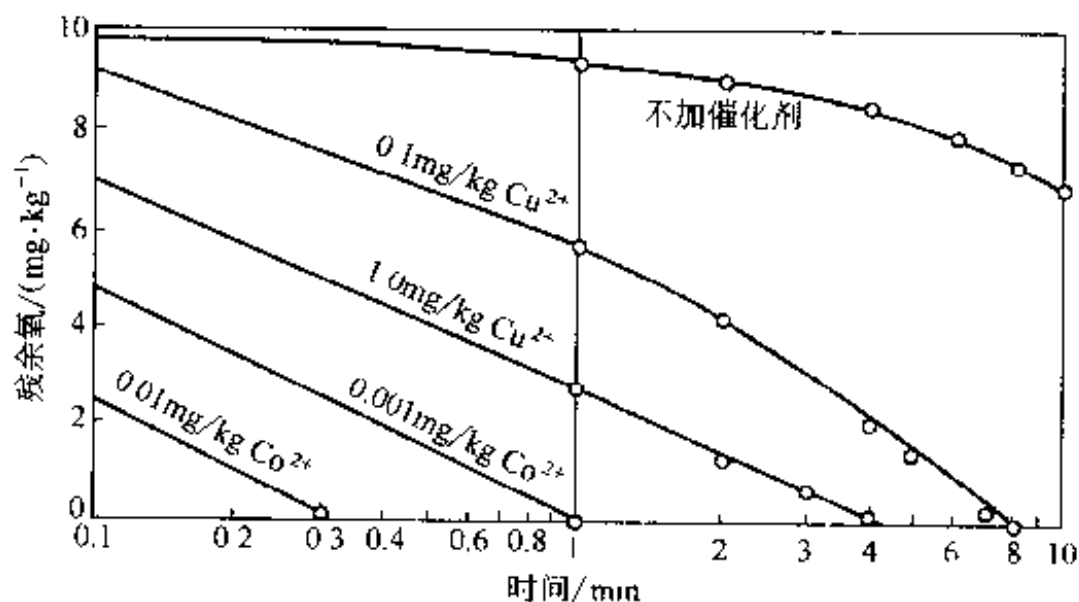


图 11-7 钴盐及铜盐对 Na_2SO_3 与水中氧反应速度的影响 ([11-4] p.273)

示, 这个反应速度较慢, 加入微量 Co^{2+} 、 Cu^{2+} 作为催化剂, 可以加快反应。经过这种处理后, 低碳钢的腐蚀速度从每年 0.20mm 降至 0.004mm。

采用联胺也可脱氧:



反应物的分子量均为 32, 故脱 1kg 氧, 只需要 1kg 联胺; 反应产物是水及气体 N_2 , NH_3 (由 N_2H_4 的分解产生), 气体逸走, 不像式 (11-14) 那样, 有 Na_2SO_4 的积累。这个反应也需采用催化剂 (活性炭、金属氧化物、 Cu^{2+} 及 Mn^{2+} 的碱性溶液) 加速。

通过上述的方法处理后, 水中氧含量可降到 5×10^{-9} 以下, 达到表 11-10 中对于高压锅炉用水的要求。

近年来, 开发出含有金属硫化物、 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 、 $\text{Mn}(\text{OH})_2$ 的离子交换树脂, 能够与氧迅速反应, 将水中氧含量从 8.8×10^{-6} 降至 2×10^{-9} ([11-4] p.275)。

11.5.2.2 碱化

图 11-8 示出水中 pH 值对于低碳钢相对腐蚀速度的影响, 对于高压锅炉的操作, 也使锅炉水碱化, 使 pH 值保持在 9.5~11.0 范围, 对于低压锅炉, 由于碱脆的趋势较小, pH 值一般提升到 11~11.5。锅炉使用的经验也指出碱化的效果: 未加碱的 513 台英国锅炉中, 29% 有锅炉管的腐蚀; 而加碱的 121 台英国锅炉中, 仅 5% 有腐蚀。

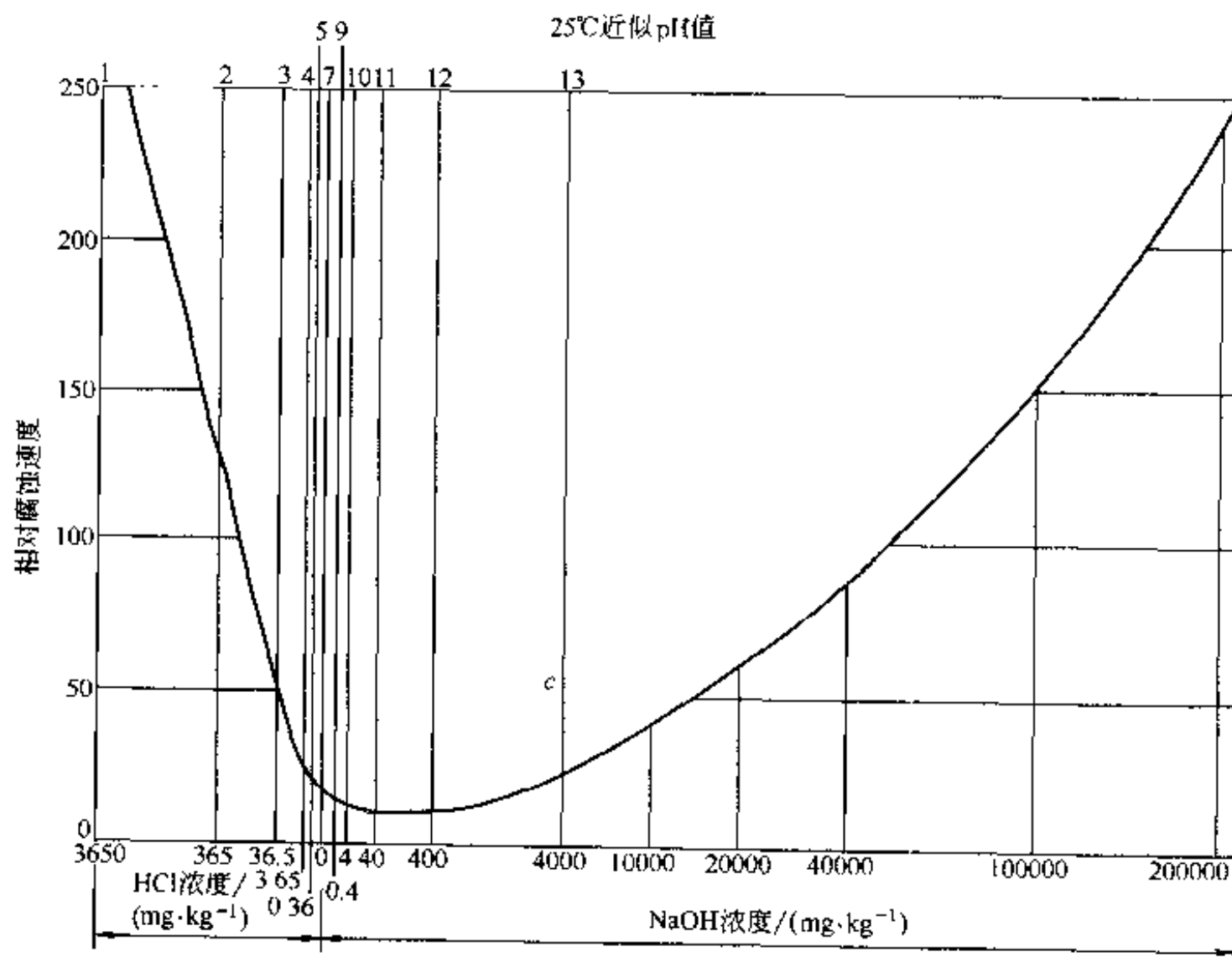


图 11-8 pH 值对铁在 310℃ 水中腐蚀的影响 ([11-4] p.284)

为了避免高 pH 值 (>13) 所导致的危害, 一般还加入缓冲液 (例如 Na_3PO_4), 使 pH 值保持在一定范围。pH 值为 10.5 及 11 时, 分别需要 30×10^{-6} 及 90×10^{-6} 磷酸盐。

11.5.2.3 加缓蚀剂

为了控制锅炉水的腐蚀, 因腐蚀类型不同而加入不同的缓蚀剂。

(1) 应力腐蚀 为了抑制碱脆, 需要保持 pH 值在一定范围。除了上面提到的磷酸钠之

外，加入相当 20% ~ 30% NaOH 碱度的 NaNO_3 也是有效的，这种方法已成功地用于火车头锅炉；也有在锅炉水中加鞣酸，用于抑制氧化。

(2) 普遍性腐蚀 为了减小溶解的 CO_2 所导致的普遍性腐蚀，可在锅炉水中加入挥发性胺类缓蚀剂，起到“中和”与“成膜”两种作用：前者有如图 11-9 所示的几种；后者有十八（烷）胺（octadecylamine），十六（烷）胺（hexadecylamine）等。

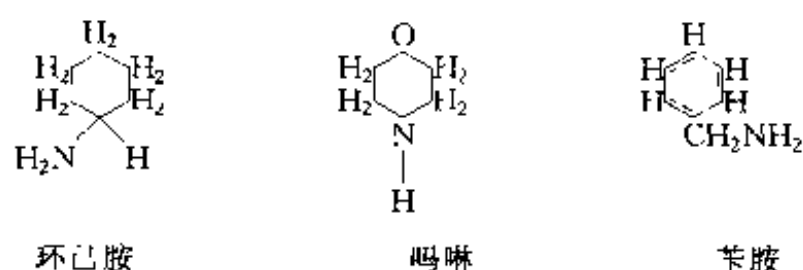


图 11-9 中和型胺类缓蚀剂结构式

11.5.3 缓蚀剂

11.5.3.1 机理

首先，运用逻辑分析方法，从定义和划分可以分别明确“缓蚀剂”这个概念的内涵和外延。对于缓蚀剂，可采用如下的定义：

“在给定的金属-腐蚀介质中，如在腐蚀介质中加入少量物质就能有效地降低这种金属的腐蚀速率，则这种物质叫做缓蚀剂”。 (11-16)

这种“发生定义”的争议较少。Uhlig 对于缓蚀剂，也采用类似上面的定义，但只是“方便地”将缓蚀剂分为钝化剂、有机缓蚀剂及气相缓蚀剂三类（文献[11-4]p.257）。Evans 也用 (11-16) 的定义，但将钝化剂与缓蚀剂并列。

可采用不同的标准划分缓蚀剂，例如，腐蚀过程、表面层结构、缓蚀剂成分、腐蚀介质特性等。在下面，分述这些划分结果及定性机理。

(1) 腐蚀过程 按照对腐蚀过程的影响，缓蚀剂分为：

- ① 阳极型缓蚀剂；
- ② 阴极型缓蚀剂；
- ③ 混合型缓蚀剂。

阳极缓蚀剂主要是由于阻滞阳极过程的进行而降低腐蚀速度。这些过程包括金属离子化及阳极面积的减少。阴极缓蚀剂可以阻滞阴极过程。这些过程包括氧的离子化、氧至阴极的扩散、氢离子的放电及阴极面积的减少。混合型缓蚀剂对于上述两种电极过程都起着阻滞作用（图 11-10）。

从电化腐蚀理论来分析，把缓蚀剂区分为阳极的及阴极的，只是相对的说法。严格地分析，没有一种缓蚀剂是只阻滞一种电极过程。因为阻滞阳极过程的缓蚀剂也引起了阴极反应动力学的改变；而阻滞阴极过程的缓蚀剂也会改变阳极反应的速度。

为了了解缓蚀作用的本质，正确地使用缓蚀剂，下面将简单地分析缓蚀剂的电化学原理。普遍性腐蚀的腐蚀电流（ I ）为：

$$I = \frac{E_c - E_a}{R}$$

而

$$E_c = E_c^0 - k_c i_c \quad (11-17)$$

$$E_a = E_a^0 + k_a i_a \quad (11-18)$$

整个系统中， I 是相同的，则

$$i_c = I/A_c \quad (11-19)$$

$$i_a = I/A_a \quad (11-20)$$

将式 (11-17) 至式 (11-20) 代入腐蚀电流计算式, 得到

$$I = \frac{E_c^0 - E_a^0}{R + \frac{k_a}{A_a} + \frac{k_c}{A_c}} \quad (11-21)$$

式中, E^0 、 R 、 k 及 A 分别为开始的电极电位、电阻、极化性能及电极面积; 而小字母 a 及 c 分别表示阳极及阴极。假定 E_c^0 及 E_a^0 不变, 依据按照腐蚀过程的分类, 有如图 11-10 所示的九种情况。

首先, 我们来分析阳极缓蚀剂对于腐蚀速度及腐蚀强度的影响, 这二者分别取决于 I 及 I/A_a 。由于在电解液中腐蚀时, R 甚小, 为了简化分析, 假定 $R=0$ 。再用小数字 1 及 2 分别指示未加入及加入缓蚀剂的情况。因此

$$I_1 = \frac{E_c^0 - E_a^0}{\frac{k_{a1}}{A_{a1}} + \frac{k_{c1}}{A_{c1}}} \quad (11-22)$$

$$I_2 = \frac{E_c^0 - E_a^0}{\frac{k_{a2}}{A_{a2}} + \frac{k_{c2}}{A_{c2}}} \quad (11-23)$$

合并式 (4-22) 及式 (4-23):

$$I_1 \left(\frac{k_{a1}}{A_{a1}} + \frac{k_{c1}}{A_{c1}} \right) = I_2 \left(\frac{k_{a2}}{A_{a2}} + \frac{k_{c2}}{A_{c2}} \right) \quad (11-24)$$

为了便于比较加入缓蚀剂前后的腐蚀强度 $\left(\frac{I_1}{A_{a1}} \right)$ 及 $\left(\frac{I_2}{A_{a2}} \right)$, 式 (11-24) 重新排列如下:

$$\left(\frac{I_2}{A_{a2}} \right) k_{a2} - \left(\frac{I_1}{A_{a1}} \right) k_{a1} = \left(\frac{I_1}{A_{c1}} \right) k_{c1} - \left(\frac{I_2}{A_{c2}} \right) k_{c2} \quad (11-25)$$

第一种情形 (图 11-10 I A), $k_{c2} = k_{c1} = 0$, 此时

$$\left(\frac{I_2}{A_{a2}} \right) / \left(\frac{I_1}{A_{a1}} \right) = \frac{k_{a1}}{k_{a2}} \quad (11-26)$$

因此不但是腐蚀速度降低 ($I_2 < I_1$); 同时腐蚀强度也减少 $\left(\frac{I_2}{A_{a2}} < \frac{I_1}{A_{a1}} \right)$ 。这是安全的阳极缓蚀剂作用。

$k_{c1} = k_{c2} = 0$ 的情况是比较少的。在一般情况下 (图 11-10 II A 及 III A), 根据式 (11-25), $(I_2/A_{a2})/(I_1/A_{a1})$ 的值如下:

$$(I_2/A_{a2})/(I_1/A_{a1}) = \frac{k_{a1}}{k_{a2}} + \frac{k_{c1}}{k_{a2}} \frac{A_{a1}}{I_1} \left[\frac{I_1}{A_{c1}} - \frac{I_2}{A_{c2}} \right] \quad (11-27)$$

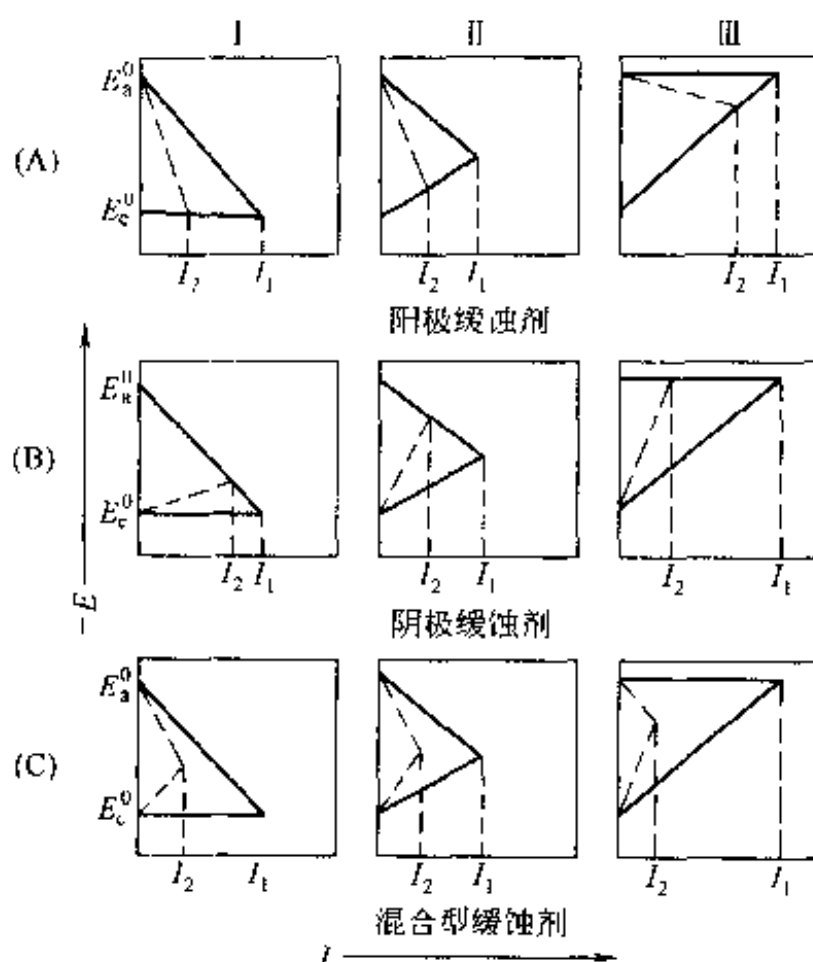


图 11-10 缓蚀剂作用机理的图解

- I 腐蚀过程主要由阳极反应所控制;
- II 腐蚀过程由二种电极反应所控制;
- III 腐蚀过程主要由阴极反应所控制;
- 没有缓蚀剂时的极化曲线;
- 加入缓蚀剂后的曲线

上式右边的第一项虽小于 1，但第二项并不等于零。因此添加缓蚀剂后的腐蚀强度是否降低，取决于上式右边的数值是否小于 1。实际上，由于 A_{a2} 很小，常常使腐蚀强度增加，这是所谓有危险性的缓蚀剂。很明显，当 $I_2 = 0$ 时，这种危险性便消失了。

其次讨论阴极缓蚀剂的影响。同样地可以运用式 (11-25) 来分析。

第一种情形 (图 11-10 I B): $k_{a1} = k_{a2}$ ，而 $I_2 < I$ ， $A_{a2} = A_{a1}$ ，腐蚀速度是缓慢地降低了；而腐蚀强度也随着降低。

第三种情形 (图 11-10 III B): 由于腐蚀是由阴极反应来控制，因此同样的 $(k_{c2} - k_{c1})$ 值，会使 I 的降低较大，而相应的腐蚀速度及强度也降低较多。

总的来说，阴极缓蚀剂不改变阳极面积，因此它们是安全的，不会使腐蚀集中在小量阳极面积而导致腐蚀强度的增加。

根据上面的讨论，我们很容易了解混合型缓蚀剂的影响。在式 (11-25) 中，为了使腐蚀强度降低：

$$(I_2/A_{a2}) - (I_1/A_{a1}) < 0 \quad (11-28)$$

在 $k_{a2} = k_{a1} = k_a$ 及 $k_{c2} = k_{c1} = k_c$ 情况下：

$$\left(\frac{I_2}{A_{a2}} - \frac{I_1}{A_{a1}} \right) = \frac{k_c}{k_a} \left(\frac{I_1}{A_{c1}} - \frac{I_2}{A_{c2}} \right) \quad (11-29)$$

k_c 值愈小， k_a 值愈大时，阳极不完全保护作用的危险性也愈小。实际上 $k_{a2} > k_{a1}$ ， $k_{c2} > k_{c1}$ ，只有 (k_{a2}/k_{a1}) 及 (k_{c2}/k_{c1}) 值愈大时，对于腐蚀强度的降低愈起着有利的影响。因为后者使式 (11-25) 的右边更易小于零；而前者可以降低 $(I_2/A_{a2})/(I_1/A_{a1})$ 的比值 (11-27)。

(2) 表面层结构 按照对金属表面层结构的影响，缓蚀剂分为：

- ① 吸附型缓蚀剂；
- ② 钝化膜型缓蚀剂；
- ③ 沉淀型缓蚀剂。

这三种类型的缓蚀剂通过改变金属表面层的结构，来降低腐蚀速度。

在表面不能成膜的金属，例如 Pt，可以用吸附理论来说明它的钝性。实验表明：在 HCl 溶液中的 Pt 表面为 6% 为氧吸附时，电位朝正向移动 0.12V，腐蚀速度降到原有的 1/10；铬的表面只要 30% 为氧吸附，便可钝化。吸附型缓蚀剂往往含有 N、O、S 等官能团的有机物质，它们可强烈地吸附在金属表面，从而阻滞金属的溶解。一些无机非氧化性的碱性盐，如 NaOH、 Na_3PO_4 、 $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$ 、 $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 等吸附在金属表面，有利于氧的吸附，从而增加耐蚀性。

钝化膜型缓蚀剂都是无机氧化剂，如图 11-11 所示，它们需要如下两个必需和充足的条件：

- (1) 从热力学考虑，氧化-还原电位必须足够的高；
- (2) 从动力学考虑，还原还必须足够的快。

满足这两个条件，才能使初始腐蚀电流大于图 11-11 中临界电流密度 (i_c) 发生钝化，然后腐蚀速度降为 i_p 。图 11-11 中直线 1 是这种缓蚀剂的浓度低于临界时的阴极极化曲线，直线 2 及直线 3 则分别对应于临界浓度及高于临界浓度时的阴极极化曲线。 CrO_4^{2-} 、 NO_2^- 、

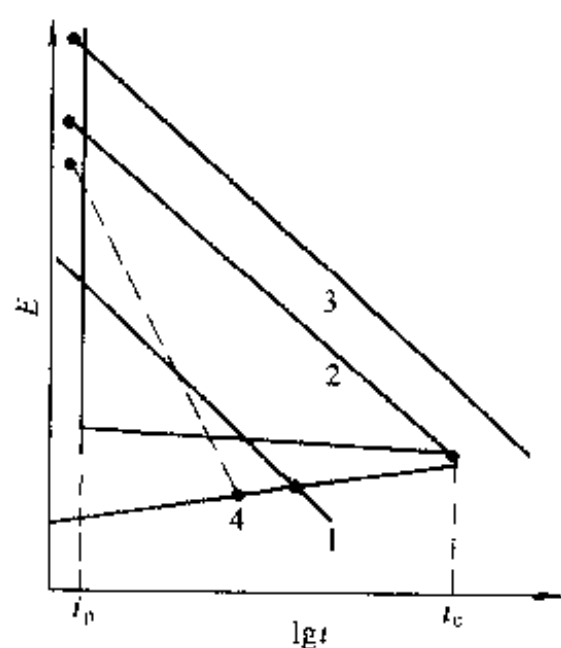


图 11-11 钝化型缓蚀剂浓度对于阴极极化曲线及腐蚀速度的影响

MoO_4^{2-} 、 WO_4^{2-} 的临界浓度在 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ 范围, 对于 Na_2CrO_4 , 10^{-3} mol/L 相当于 0.016%。升温及加入 Cl 均使这种临界浓度增加, 例如, $70 \sim 90^\circ\text{C}$ 时, CrO_4^{2-} 及 NO_2^- 的临界浓度升至 10^{-2} mol/L 。表 11-11 示出温度、Cl 及 CrO_4^{2-} 对低碳钢腐蚀速度的影响。图 11-11 的虚线 4 是还原速度慢的氧化性盐, 例如 SO_4^{2-} 、 ClO_4^- 、 NO_3^- 等, 达不到所需要的 i_c , 不是钝化型缓蚀剂。

表 11-11 铬酸盐及氯化钠浓度以及温度对低碳钢腐蚀速度的影响
(流速 37 cm/s ; 14 天试验)

$\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$		0	0.1	0.5	1.0
NaCl (%)	温度/ $^\circ\text{C}$	腐蚀速度/ $(25.4 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1})$			
0	20	0.021	0.0001	0.0001	0.0000
	75	0.036	0.014 ^①	0.0004	0.0002
	95	0.017	0.011 ^①	0.0004	0.0000
0.002	20	0.026	0.0006	0.0000	0.0000
	75	0.067	0.005 ^①	0.0002	0.0000
	95	0.021	0.017 ^②	0.005 ^②	0.0003
0.05	20	0.031	0.0012	0.0015	0.0008
	75	0.085	0.002	0.003	0.002
	95	0.023	0.007 ^②	0.005 ^②	0.002
3.5	20	0.024	0.0017	0.0016	0.0015
22.0	20	0.007	0.0009	0.0006	0.0013

① 点蚀, [11-4] p.263。

有些添加物, 如正磷酸盐、硅酸盐等, 能与钢铁的腐蚀产物 Fe^{2+} 生成沉淀物, 或完整地覆盖在金属表面, 或修补不完整的钝化膜或吸附层, 达到缓蚀的目的, 这些盐类便是沉淀型缓蚀剂。

(3) 其他的划分

- ① 按缓蚀剂成分划分为: 无机缓蚀剂; 有机缓蚀剂。
- ② 按腐蚀介质特性分为: 水溶性缓蚀剂[中性($\text{pH} = 5 \sim 9$); 酸性(pH 值 $1 \sim 4$); 碱性(pH 值 $10 \sim 12$)]; 油溶性缓蚀剂; 气相缓蚀剂。
- ③ 按金属材料划分为: 钢铁用缓蚀剂; 铜合金用缓蚀剂; ……
- ④ 按用途划分为: 酸洗用缓蚀剂; 锅炉水用缓蚀剂; 油气井用缓蚀剂; ……

11.5.3.2 应用

基于上面的讨论, 对于常用的缓蚀剂介绍如下^[11-4, 11-5]。

(1) 与阳极生成不溶性腐蚀产物的盐类 多数的钾盐与钠盐, 如其阴离子能与被蚀的金属生成难溶的化合物, 而又能在腐蚀过程开始的地方沉积粘结性很好的保护层, 因而阻滞金属离子化过程, 都是可用的阳极缓蚀剂。这类缓蚀剂也可以使氧在金属上的还原过程变得困难。属于这一类的有下面一些:

铁的缓蚀剂 NaOH , Na_2CO_3 , Na_3PO_4 , Na_2HPO_4 , $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$, Na_2SiO_3 ;

铝的缓蚀剂 Na_2S , Na_2SiO_3 , Na_2HPO_4 ;

镁的缓蚀剂 KF , Na_3PO_4 , $\text{NH}_4\text{OH} + \text{Na}_2\text{HPO}_4$, NaOH , NaAlO_2 。

(2) 具有氧化性的化合物 这些化合物可以在金属的表面形成很薄的氧化物钝化膜, 阻滞阳极过程。属于这一类的有下面一些:

铁的缓蚀剂 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$, K_2CrO_4 , NaNO_2 , NaNO_3 ;

铝的缓蚀剂 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$, K_2CrO_4 , KMnO_4 , NaNO_3 ;

镁的缓蚀剂 $K_2Cr_2O_7$, K_2CrO_4 , $KMnO_4$, $NaNO_3$, $NaNO_2$

(3) 与阴极反应产物生成难溶腐蚀产物的盐类 铁、镁、钙、钴、锡、锌、锰、铬的盐类, 可以与阴极反应产物 (例如 OH^-), 生成难溶性的沉积物, 阻滞氧到达阴极。它们都属于阴极缓蚀剂。碳酸氢钙也可以属于这一类型, 它的保护作用有赖于碳酸钙的沉积, 阻止氧与钢铁表面的接触。这种类型的阴极缓蚀剂不能完全阻止腐蚀作用的进行, 因为腐蚀产物虽厚, 但较疏松, 腐蚀作用的进行只是较为缓慢而已。

(4) 形成胶体的化合物 硅酸钠及铝酸钠对于镁及铁的缓蚀作用是由于溶液中存在着带负电荷的胶体粒子。这些粒子聚集在阳极区域, 阻止阳极过程的进行。

(5) 消除和中和腐蚀性介质的化合物 消除介质中的氧及中和介质中的 H^+ 及硫化氢, 都可以降低腐蚀率。用亚硫酸钠来处理锅炉用水, 可以除去氧; 在石油贮器、管道及钻井中加入少量的氢氧化钠、氢氧化氨或碳酸钠, 可以降低硫化氢的腐蚀。

(6) 提高氢的超电势的化合物 阻止放氢类型腐蚀作用的阴极缓蚀剂有汞、铋、砷等的化合物。由于这些金属具备较高的氢超电势, 阻止氢的逸出, 因而阻滞腐蚀的进行。硫酸中含有微量的砷可以降低铁的腐蚀率 (图 11-12); 铋能阻滞铁在盐酸中的溶解。

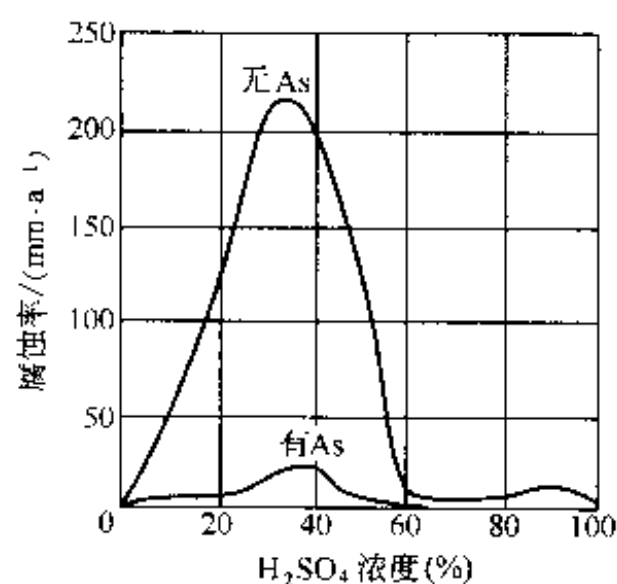


图 11-12 0.045% As 对于钢在硫酸中腐蚀率的影响
(As 用 As_2O_3 加入)

(7) 吸附型缓蚀剂 许多含有氮、硫和氧的高分子有机化合物, 能够很好地被吸附在金属的表面, 阻止电极过程的进行。这种缓蚀剂在酸性介质中最为有效。由于吸附, 提高了氢的超电势, 降低腐蚀。进行酸洗金属时, 加入这类缓蚀剂, 只防止了基体金属的腐蚀, 但不阻碍氧化皮的除去。这类物质包括碳氢化合物、醇类、酮类、醛类、蛋白质、植物碱类、胺类、脂肪族和芳香族化合物、杂环化合物等, 常用的有明胶、琼脂、磺化动物胶类、糊精等。亚硝酸钠在中性介质中的缓蚀作用, 也有用吸附的见解来解释。这种吸附膜的一面是带正电的 Na^+ , 而另一面是 NO_2^- , 因而构成了双电层。

(8) 气相缓蚀剂 许多挥发性有机化合物 (例如亚硝酸二胺丁烷、亚硝酸环己胺、亚硝酸二环己胺、碳酸基环己胺、苯甲酸莫尔弗林等) 具备很好的缓蚀作用。例如蒸汽冷凝系统中水中含有少量的莫尔弗林 (Morpholine), 随水蒸发也随水汽凝结, 可以中和冷凝水中的 CO_2 , 降低腐蚀。这类缓蚀剂使用最广的领域, 是金属制成品的包装, 防止大气腐蚀, 例如每平方英尺包装纸浸有一克有机亚硝酸盐 (Dichan), 可以使钢铁在 58~120 月内不生锈。

表 11-12 缓蚀剂对于钢在自来水中腐蚀率的影响
(试验时间: 10d)

缓 蚀 剂	失重/(mg·dm ⁻² ·d ⁻¹)		缓 蚀 剂	失重/(mg·dm ⁻² ·d ⁻¹)	
	浸入试验	水雾试验		浸入试验	水雾试验
无	179.0	416.0	0.0055% Na_2SiO_3	51.3	44.4
0.05% $Na_2Cr_2O_7$	0.62	0.78	0.01% Na_2SiO_3	25.0	26.8
0.035% Na_2SiO_3 + 0.012% $Na_2Cr_2O_7$	3.10	0.71	0.25% Na_2SiO_3	4.65	3.26
0.005% $Na_2Cr_2O_7$	12.7	11.6	0.03% Na_3PO_4	70.2	92.0
0.004% Na_2SiO_3	58.0	50.3			

(9) 阻止细菌作用的缓蚀剂 两千年前的铁器在某些潮湿地下尚能保存,这是由于这个地区是古代制革中心,土壤中的磷酸盐及单宁酸盐可能阻止细菌的作用。

适当地使用缓蚀剂,能够大大地降低钢铁的腐蚀(图 11-12,表 11-12)。但是值得一提的是,对于有危险性的阳极缓蚀剂,使用数量不足时,反会加剧局部的腐蚀强度,加速机械零件的破坏。

11.6 结 语

以上 4 节,如图 11-2 所示,依次论述了四方面防护措施;本节从方法论角度,对防护系统提出五方面共性问题。

(1) 材料的判据——材料的腐蚀与防护是材料问题。因此,应该按照“材料”有别于“物质”的定义(1-1),全面考虑材料的五个判据——资源、能源、环保、经济、性能去评价防护措施。

(2) 耐蚀性——工程结构的寿命不是无限的,在有限寿命期内,应从结构的耐蚀性、经济性、部件的修理和更换三方面综合地评价包括选材(第 12 章)在内的各项防护措施,在保证安全的前提下,做到“价廉”(经济判据)“物美”(性能判据)。

(3) 法律和伦理——在“可持续发展”战略(第 10 章 10.2 节)的指引下,要主动遵守我国政府有关资源、能源和环保的法律。这不仅是一个守法避免受罚的问题,还是一个伦理道德问题。人类只有一个地球,保护她,是全人类的责任;否则,将受到大自然无情的报复!

(4) 商业生态——人类发展到今天,不仅“生存竞争,适者生存”的原理仍适用,第 10 章第 10.4.2 节提到的商业生态学,值得考虑。人类社会,既要有竞争,也要协调;这与赫胥黎在《进化论与伦理学》(1894 年)序言中名言吻合:

“一个否定这种天性(指生存竞争)的社会,必然要从外部遭到毁灭。如果这种天性过多,我们将更是束手无策;一个被这种天性统治的社会,必然要从内部遭到毁灭。”

(11-30)

(5) 科教兴国——在这个战略的指引下,吸引和培育人才,让他们在材料学、电化学、信息科学等领域的交叉地带,吸收营养,研究和开发创新而适用的腐蚀防护科技(参见第 9 章第 9.6 节)。

参 考 文 献

- [11-1] 中国腐蚀与防护学会,金属防腐蚀手册 上海科学技术出版社,1989
- [11-2] H. E. Buhler, D. Wüstenberg, 赵克清译,合理的防腐蚀设计,北京:化学工业出版社,1990
- [11-3] ASM, Corrosion Source Book, 1984
- [11-4] H. H. Uhlig, Corrosion and Corrosion Control, An Introduction to Corrosion Science and Engineering, 2nd. Ed John Wiley and Sons, Inc., 1971
- [11-5] U. R. Evans, 赵克清译,金属腐蚀基础,北京:冶金工业出版社,1987

第12章 防护分论

分科诊断，对症下药。

本章将按金属腐蚀问题，分别讨论它们的防护。金属腐蚀有干、湿二类；第2至第4章论述了湿腐蚀；第5章则论述了干腐蚀。“普遍”是从“特殊”提炼而成，既已提炼，便是特殊的基础，或能指导特殊。因此，下面先重点论述第2章普遍性腐蚀的防护；然后讨论第3章局部腐蚀及第4章应力腐蚀的防护；最后，分析第5章高温氧化的防护。

“系统”与“环境”相依而存，上一章的防护系统侧重地讨论环境引起的防护方法，本章则倾斜于从金属材料的耐蚀性分析防护措施，即提高金属材料耐蚀性的途径。这两章是互补的。

12.1 普遍性腐蚀

本节讨论提高金属材料耐蚀性的途径，与第11章图11-2相似，从另一角度概述防护问题，然后，从电阻、阴极及阳极三方面，讨论腐蚀控制。

12.1.1 概论

腐蚀过程是多相的过程，是金属与腐蚀介质两相交互作用的结果。根据电化学腐蚀机理，腐蚀的快慢取决于腐蚀电流 I 的大小。上章导出了：

$$I = \frac{E_c^0 - E_a^0}{R + \frac{k_c}{A_c} + \frac{k_a}{A_a}} \quad (11-21)$$

因此，提高金属材料耐蚀性的途径不外是采取降低 I 的措施，也就是采取各式各样的方法，改善腐蚀系统的各项条件，使上式右面各项变动，达到降低 I 的目的。可以从下列四方面来考虑这些方法：① 介质；② 介质与金属的交界区；③ 整个腐蚀系统；④ 金属。现分述如下。

12.1.1.1 介质

最根本的办法是消除介质；其次是改造介质。后者是抑制或降低介质的腐蚀性；而前者是避免腐蚀介质。

不良的结构设计造成电解液不必要的停滞和聚集，这种情况在设计时应该避免。工程构件的经常清理及维护，可以除去停留在表面的腐蚀介质；而适当地包装以及降低大气中的湿度，也可达到同样的目的。

改造介质包括避免浓度及温度的差异、除去腐蚀活性物质与添加缓蚀剂三方面。第一方面是设计、操作和维护的问题。给水系统中的氧及二氧化碳是腐蚀活性物质，如能在进入锅炉前除去，可以降低腐蚀；这种方法是减少去极化剂 (H^+ 及 O_2)，因而改变了 E_c^0 。添加缓蚀剂的主要作用是改变极化性能 (k) 及电极的面积 (A_c 及 A_a)。

12.1.1.2 介质与金属的接触区

不同的防护层可以改变接触区的性质。它们的作用是隔离，有些是纯粹的机械隔离作

用, 增加电阻来降低腐蚀; 另一些是电化学隔离作用, 改变了腐蚀系统的 E_0^0 以及 k 、 A 等。前者包括表面处理及表面涂层, 而后者是指各种阳极性金属涂层。常用的表面处理有氧化、磷酸盐处理及铬酸盐处理三类; 隔离性的表面涂层有非金属及金属的两类。前者有油类、涂料、沥青、塑料、搪瓷等。金属涂层的保护作用可能是机械的也可能是电化学的隔离作用, 这取决于涂层与被保护金属之间的相对极性。值得强调的是: 这类方法可以使被保护金属的平均腐蚀速度降低, 但是局部腐蚀速度在有孔隙的阴极防护层情况下, 反而会增加, 造成点腐蚀的破坏。

12.1.1.3 整个腐蚀系统

被蚀的金属表面有阳极区及阴极区, 使用阴极保护的措施可以使被保护金属结构整个表面变成阴极因而受到保护。阴极保护可以利用自外界电源输入电流的方法; 也可以将负电位值较大的电极 (例如锌、镁、铝) 接入腐蚀系统。这种方法既可以保护已有腐蚀破坏的结构, 也可以用于复杂或大型结构, 在海洋结构、地下管道以及有些化工及动力工厂设备中已得到广泛的应用。

自从发展了恒电位计测定金属的钝化曲线后, Edelcanu 提出了阳极保护的措施: 将被保护的整个结构保持在钝化电位区 (参见图 11-11) 可以使结构表面处于钝态而不会腐蚀。将这种原理应用到生产中时, 还需解决以下几个工程问题。

(1) 实验室用的恒电位计对电位变化的反应虽然很灵敏, 但能通过的电流很小, 因而需从电子线路上改进恒电位器的设计, 使其一方面能保持恒电位, 另一方面又能在短时间内通过强的电流, 使整个结构迅速钝化。

(2) 当结构形状复杂时, 需要结构的每一部分都处于钝化电位; 如某些区域处于活化或过钝化区电位, 反而会急剧加速这些区域的腐蚀。

(3) 当结构为不同合金的部件构成时, 必须使每一部件都处于钝化电位区。

(4) 必须能精确计算钝化所需的电流以及维持钝态所需的电流。

(5) 惰性电极及参考电极的维护。

早期提出这些顾虑虽已解决, 但施工及应用单位的水平高低不一, 上述考虑仍需作为备忘录予以注意, 因为阳极保护不当, 反而会加速腐蚀。

很明显, 阳极保护可以扩大能钝化的合金的应用范围, 用所耗电量来代替贵重的金属材料, 并扩大了贵重金属材料的应用领域。

从加速腐蚀的角度分析, 散失电流可以引起金属建筑物地下部分、管道、铅包电缆、钢筋水泥中的钢筋的破坏; 在船坞中进行电焊时, 当一个电极接到船身, 以及不正确地在船上连接导线 (例如绝缘不良、单线系统), 也能够引起水中船身和铆钉的损坏。

减少和阻止城市内有轨电车散失电流所导致的腐蚀的途径如下。

(1) 改善铁轨的导电性——可靠的轨道接头以及轨道下敷设不良导电体的基层 (例如碎石), 可以减少散失电流。

(2) 地下管道涂上绝绝缘性涂层 (例如沥青和柏油) ——应该指出, 当绝缘层局部破坏时, 反而会增加管道局部腐蚀强度。

(3) 应用排流线——使地下金属结构接上负的回归线, 可以得到很好的效果。

12.1.1.4 金属

上面叙述的各种措施可以解决许多金属材料的腐蚀问题, 但是最根本的途径是提高金属及其合金本身的耐蚀性能。这种要求在化学工业中尤感迫切, 因为化工生产大多在腐蚀性很

强的介质中进行，有时还在高温下进行，并且设备又需要良好的导热性和力学性能；因此发展及使用适合国家资源的耐蚀合金，是解决许多腐蚀问题最迫切和必须的途径。

合金的成分以及各种工艺过程带来的组织决定了合金的耐蚀性能，这些工艺过程包括冶炼、铸造、加工及热处理，而在使用前的最后工艺过程对成分的分布、组织及性能的影响最大。

从电化学腐蚀机理来看，控制腐蚀作用的进行有电阻、阴极及阳极三个因素；从腐蚀破坏的类型来看，有普遍性、选择性及腐蚀断裂三种。本节将从腐蚀机理来分析提高金属材料本身耐蚀性的途径；下面两节再讨论选择性腐蚀及应力腐蚀问题。

12.1.2 电阻控制

寻求或创制一些合金，使它的腐蚀产物具有完善的隔离作用，这种办法是利用提高电阻(R)来降低腐蚀速度。对于这种腐蚀产物的要求如下：

- (1) 易于形成；
- (2) 不溶解于腐蚀介质；
- (3) 致密而紧附于金属表面；
- (4) 电阻较高；
- (5) 腐蚀产物的主要元素与基体金属能够形成固溶体，而所组成的合金又有很好的力学性能。

能够满足这些要求的工业纯金属有铅（在 H_2SO_4 中）、镁（在 HF 中）、钽（在 HCl 中）等。至于因加入合金元素而达到这种耐蚀性的可能性比较有限，因为在一般情况下，腐蚀产物是在合金的阴极边界上产生，而不是很均匀地生成。高硅铸铁的耐酸性便是由于这种保护作用；铝青铜及铜钢在大气中较为耐蚀，也是基于这种机理。这种方法除了提高电阻外，对阳极过程也有一定的阻滞作用，因为这种腐蚀产物也就是钝性的薄膜。

应该指出，这也是提高合金的抗氧化性能（化学腐蚀）的基本途径。高温钢中都含有铬、铝或硅，便是很好的实例。

12.1.3 阴极控制

消除或减少阴极面积(A_c)或提高阴极极化性能(k_c)都可以降低腐蚀速度。最常见的腐蚀阴极过程有放氢和吸氧，也就是 H^+ 与 O_2 的分别去极化作用。金属材料的耐蚀性能与阴极相的分量及阴极去极化作用有关。

在放氢的腐蚀过程中，提高金属材料耐蚀性能的途径有下列两方面。

(1) 消除或降低阴极面积 负电位较高的活泼金属（例如镁、铝、锌）所含的杂质通常都是阴极相，因此在冶炼时如能提高它们的纯度，便可增强它们的耐蚀性。图 12-1 及图 12-2 分别表示微量杂质对 99.992% Zn 在 0.9mol/L H_2SO_4 及 99.998% Al 在 2mol/L HCl 溶液中腐蚀速度的影响。

使用固溶处理将阴极相溶于基体，可以提高合金的耐蚀性。杜拉铝的固溶处理以及碳钢和马氏体不锈钢的淬火处理便是很好的实例。这种方法的应用是有局限性的，因为要满足力学性能的要求，常常在固溶（或淬火）后需要进行时效（或回火）处理，这种热处理又会使阴极相重新出现。

(2) 增加阴极过程的氢超电势 杂质或合金元素对锌在硫酸中腐蚀速度的影响，在 20 世纪 20 年代已经系统地研究过了。这种影响与氢的超电势有关，因此可以使用锌的汞齐化来降低锌的腐蚀速度。含锰或锌的镁合金的腐蚀速度较小，很可能是由于锰或锌的加入，增

加了镁中杂质（铁、铜、镍）上氢的超电势。低碳钢中加入少量的砷、锑或铋能够减少在酸中的腐蚀，以及锑能提高不锈钢的耐蚀性，也可能是由于同样的原因。系统地研究合金元素对于氢超电势的影响，对提高金属材料的耐酸蚀性能，可能有积极的作用。

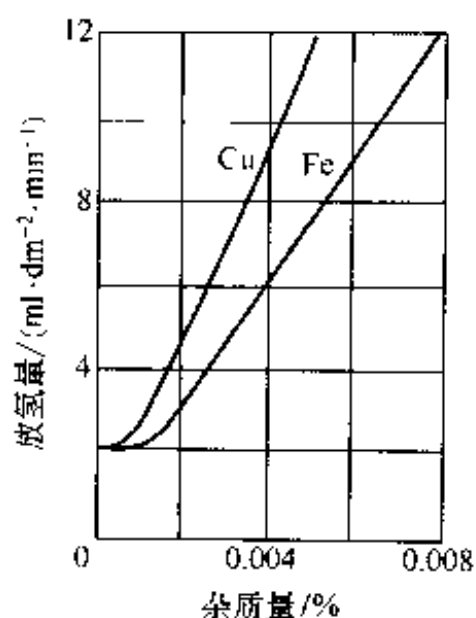


图 12-1 杂质对 99.992% Zn 在 0.9mol/L H_2SO_4 中溶解速度的影响

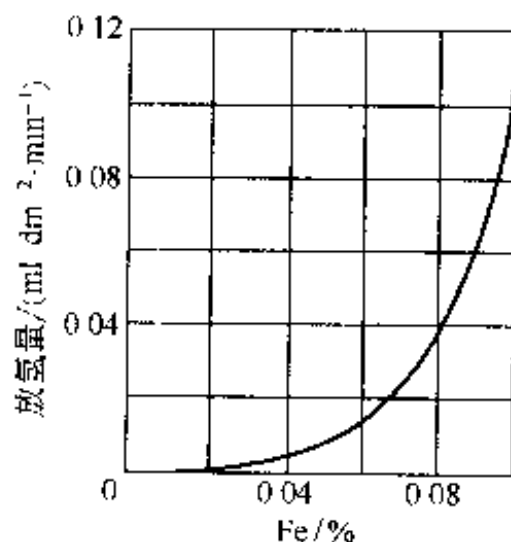


图 12-2 铁量对 99.998% Al 在 2mol/L HCl 中溶解速度的影响

在吸氧的腐蚀过程中，杂质阴极相虽然也可以加速腐蚀作用的进行，但是这种影响远较放氢的过程为小。因为氧扩散至个别阴极时，不仅是利用图 12-3 中 BCDE 的柱状范围，并且也利用了其他范围 FGDE。因此，即使是阴极的总面积不大，但实际上已将所有可利用的电解液容积都利用了（图 12-4）。在这种情况下，继续增加阴极面积（也就是杂质的分量），并不会再增加扩散强度，因而腐蚀电流便不会再有什么增加了。

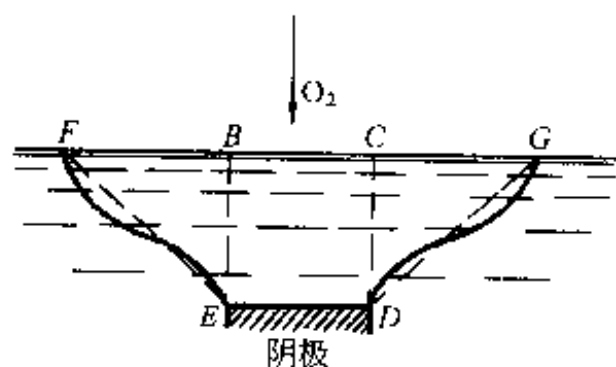


图 12-3 O_2 沿着 FGDE 扩散至阴极

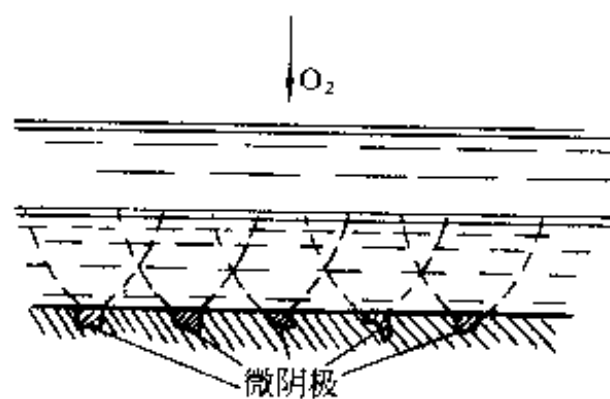


图 12-4 O_2 扩散至微阴极的途径

钢在海水中腐蚀主要是受吸氧的阴极过程控制，因此不管它们的金相组织是马氏体或珠光体、是处于退火或冷加工状态、是碳素钢、低合金钢或铸铁，平均腐蚀速度都在每年 0.13mm 左右。

12.1.4 阳极控制

阳极过程是金属的离子化，抑制这种过程是提高耐蚀性能最有效的方法。通常的途径有下列三方面。

(1) 提高合金的热力学稳定性 固溶体的电极电位与其成分的关系很复杂，到现在为止，还无法根据理论进行计算或估计。但也有许多实验数据(表 3-10)指出，在合金中加入稳定的元素，可以提高合金的稳定性；而当稳定元素的分量达到合金的 $1/8$ 、 $2/8$ 、 $4/8$ 原子分数时，合金的稳定性有一个突跃，这便是有名的 $n/8$ 定律。在工业上最明显的实例是不锈钢和高硅铸铁。值得指出， n 值是随介质的腐蚀性面变的，例如在室温的硝酸中，不锈钢

的 $n = 1$ (含 Cr 11.8%) 即已足够; 而在沸腾的硝酸中, n 则需要增加到 2 (含 Cr 23.7%)。

$n/8$ 定律只是一些实验数据的总结, 并不能解释所有合金的腐蚀现象。例如图 12-5 示出 Ti-Zr 合金在浓 H_2O_2 中的腐蚀速度与锆含量的关系为: 当腐蚀速度骤减时, 锆的含量约为 9% (质量百分数), 它的原子百分数只有 4.5% 左右。而 Pb-Hg 合金在醋酸中的腐蚀也没有耐蚀性跃迁的现象 (图 12-6)。

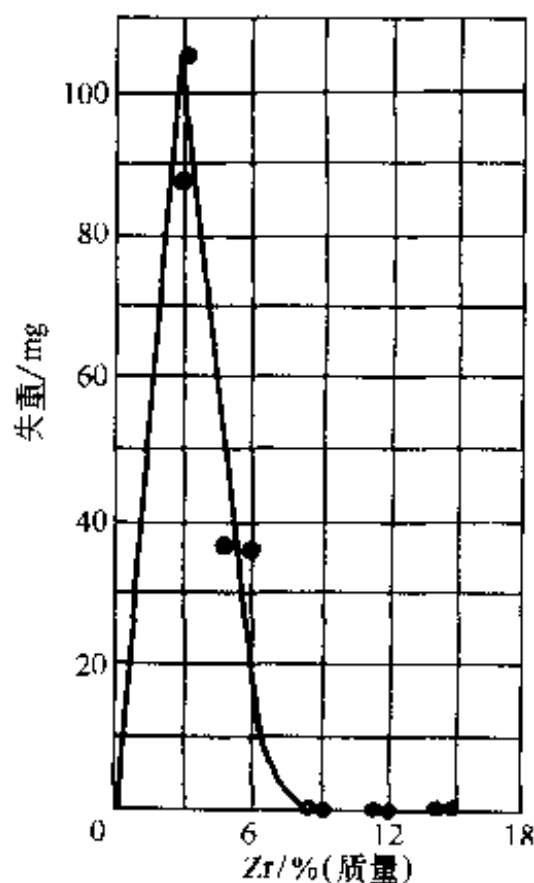


图 12-5 Ti-Zr 合金在 90% H_2O_2 中的腐蚀

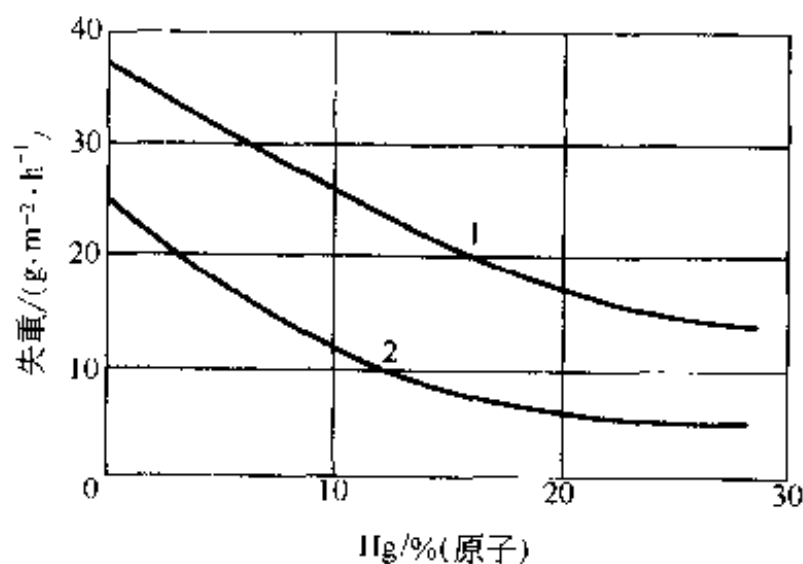


图 12-6 20°C 时 Pb-Hg 合金在醋酸中的腐蚀速度
1—96h 试验; 2—72h 试验

$n/8$ 定律还没有充分可靠的理论解释。一般都是用贵金属将贱金属包围起来因而产生保护作用来解释 (图 3-32)。在腐蚀的初期, 表面的贱金属原子被溶解; 过了一些时候, 在表面的以及邻近表面的贵金属原子可以形成连续的保护面, 使介质无法再与贱金属原子接触。

从这个论点出发, 再提出下列的补充, 可以说明更多的现象。

① 贵金属的保护作用与介质中离子的大小有关, 当这些离子较小时, 它可以穿过包围层而继续进行腐蚀。

② 当贱金属在腐蚀温度有足够的扩散时, 这种包围层的保护作用也会消失。图 12-6 的异常现象可以用这种机理解释。

无论如何, 上面的假说最多只能说明贵金属有保护作用, 而不能定量地说明 $n/8$ 定律。

在奥氏体不锈钢中加入钛、铌或钽, 可以阻止碳化铬自晶间析出, 保持晶界区仍有足够的铬量, 因而可以防止晶间腐蚀。这种措施也可以认为是保持晶界区的热力学稳定性。

(2) 加入活性阴极促进钝化 在能够钝化的合金中加入少量的活性阴极元素, 可以使阳极区更易钝化。这种措施的理论分析如图 12-7 所示, 阳极极化曲线为 ABCDEFG; 没有加入活性阴极时, 阴极极化曲线为 KBS, 因而腐蚀电流为 MB。加入活性阴极后的阴极极化曲线为 KEPL, 则腐蚀电流为 NE。如有活离子例如 Cl^- 存在时, 阳极极化曲线为 ABCPH, 并没有钝化, 故加入活性阴极后的腐蚀电流增加为 PR。

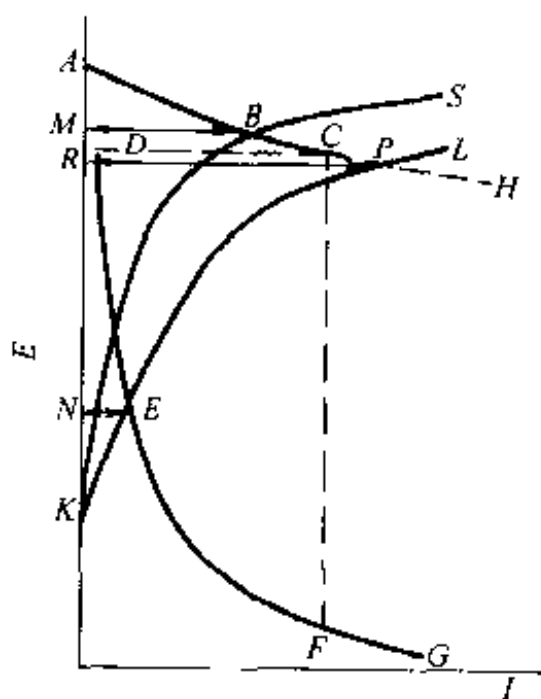


图 12-7 加入活性阴极后
不锈钢的腐蚀图解

ABCDEFG—阳极极化曲线;

KBS—阴极极化曲线;

KEP—活性阴极的极化曲线

在不锈钢中加入少量的铜或铂族元素，可以降低在硫酸中的腐蚀速度(图 12-8 及图 12-9)，这是由于这些活性阴极元素的加入促进了钝化。较近的研究结果指出，在钛中加入约 0.15% Pd，可以有效地降低在非氧化性介质中的腐蚀速度(表 12-1)，也可能是由于同样的理由。

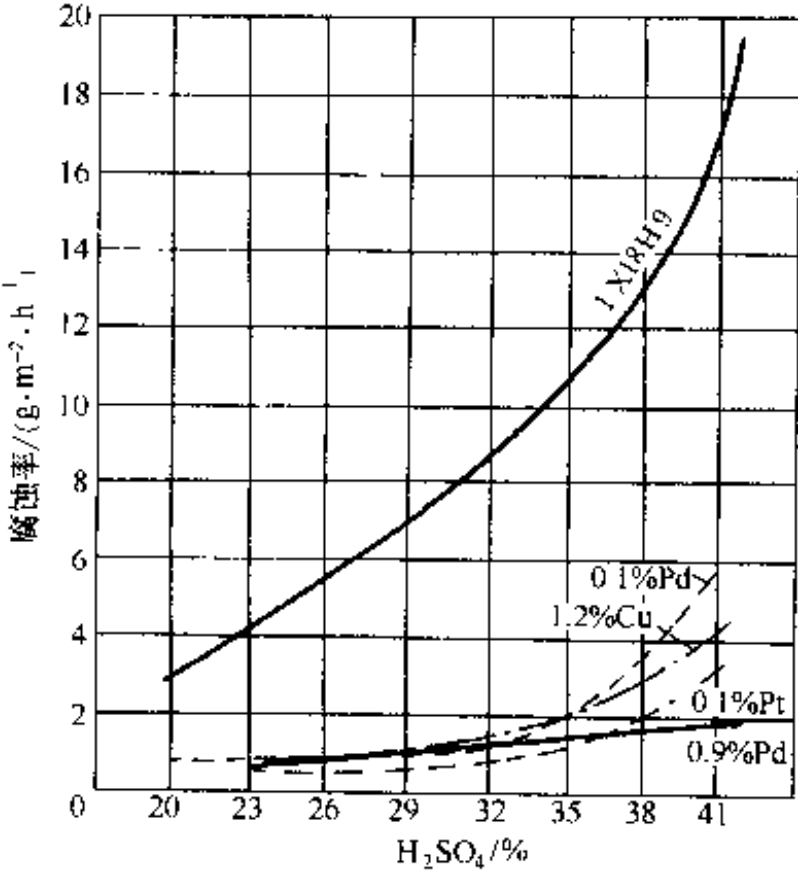


图 12-8 1X18H9 中铂、钯及铜含量对其在硫酸中腐蚀率的影响(20℃, 360h)

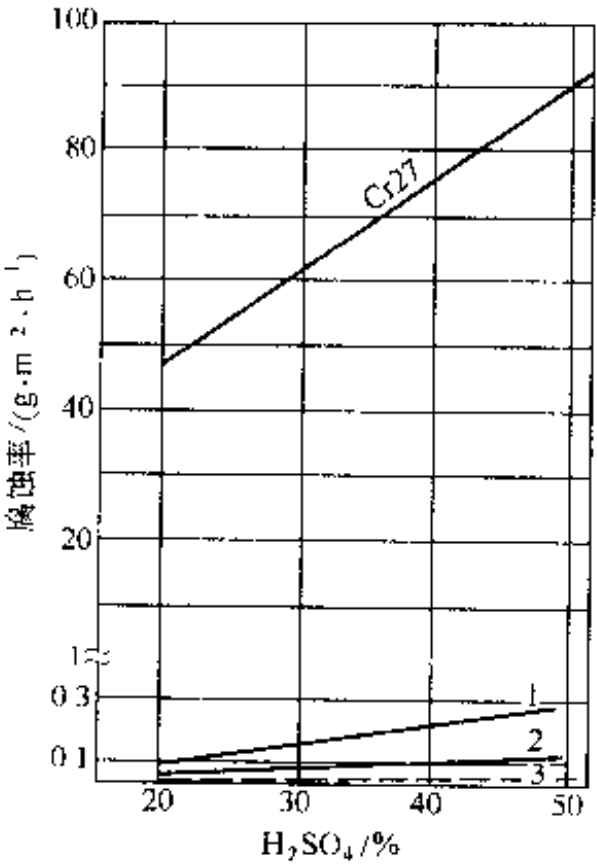


图 12-9 钯及铂含量对 Cr27 在硫酸中腐蚀率的影响(20℃, 100h)
1—0.5% Pd; 2—1% Pd; 3—0.5% Pt

灰口铁中含有石墨可以加速铁的钝化，因而降低了灰口铁的腐蚀速度。例如在 20℃ 的 10% HNO₃ 中，碳钢及灰口铁的腐蚀速度分别为 1450 及 79g/(m²·h)。在盐酸中，灰口铁无法钝化，而石墨的存在反而使灰口铁的腐蚀率较大。例如在 20℃ 的 10% HCl 中，碳钢及灰口铁的腐蚀速度分别为 1.02 及 18.9g/(m²·h)。

表 12-1 0.15% Pd 对钛在沸腾的非氧化性介质中腐蚀速度的影响^[166]

介 质	腐蚀速度/(mm·a ⁻¹)	
	工 业 纯 钛	0.15% Pd 钛 合 金
10% 氯化铝	<0.025 ^①	<0.025 ^①
25% 氯化铝	50.7 ^②	0.025 ^①
50% 柠檬酸	0.43 ^②	<0.025 ^②
50% 甲酸	3.63 ^①	0.076 ^①
5% 盐酸	28.4 ^②	0.178 ^①
1% 草酸	45.7 ^②	1.15 ^③
50% 磷酸(70℃, 通气)	10.3 ^②	1.80 ^②
10% 磷酸	11.2 ^②	3.22 ^②
5% 硫酸	48.8 ^①	0.51 ^④

① 48~65h, ② 两个 48h 试验结果平均值, ③ 三个 48h 试验结果平均值, ④ 五个 48h 试验结果平均值。

(3) 创制强化相为阳极的合金时效硬化可以提高合金的强度。如析出相为阴极相，将加速腐蚀；在晶间析出时，还会造成晶间腐蚀的危险。如析出相为阳极相，则在表面很快地被溶解，可以得到电化学均匀的表面，因而提高了合金的耐蚀性。高强度的含镁及含镁锌的铝

合金, 由于析出相分别是 Mg_3Al_2 或 Mg_5Al_8 及 $MgZn_2$, 而这些相对于铝基体来说都是阳极相, 因此耐蚀性较含高铜的杜拉铝要好。

12.2 局部腐蚀

上节从腐蚀作用的电阻、阴极及阳极过程讨论了提高金属材料耐蚀性能的途径, 这些讨论的前提是腐蚀破坏的均匀性。实际的腐蚀问题还包括成分或部位的选择性破坏以及由于应力所导致的腐蚀断裂, 这些破坏的危害性更大。因此, 面临金属材料的腐蚀问题时, 应该考虑到这些破坏的可能性。

12.2.1 缝隙腐蚀和点蚀

缝隙腐蚀、点蚀和晶间腐蚀都是部位的选择性腐蚀, 是从宏观、细观到微观的部位选择性腐蚀。

防护缝隙腐蚀, 需从工程结构设计考虑 (参考第 10 章第 10.2 节): 避免了缝隙, 便不会有缝隙腐蚀; 如不能避免缝隙, 则维护设备时, 应保持干燥, 如上述两种情况都不能避免, 则选用抗点蚀的材料, 因为缝隙内易发生点蚀, 并且危害性更大。

依靠钝性来提高耐蚀性的金属材料, 例如不锈钢、铝合金等, 由于钝化膜的局部破坏, 最易在破坏处发生点蚀。以不锈钢为例, 在第 3 章第 3.2.2 所总结的点蚀表象规律的基础上, 可以理解如下的抑制点蚀的三方面措施。

(1) 阴极保护, 使不锈钢位于较 E_R 为低的钝化区。

(2) 降低 Cl^- 及氧化剂 (例如 Fe^{3+} , O_2) 含量, 加入缓蚀剂 (例如 CN^- , NO_3^-), 降低温度。

(3) 提高不锈钢的均匀性 (例如降低夹杂含量, 避免晶间沉淀); 改进不锈钢的成分和钝化膜的结构, 提高钝化膜的稳定性。例如, 选用高铬含钼的钢号。

12.2.2 晶间腐蚀

虽然第 3 章第 3.3 节论述了广泛的已发现的晶间腐蚀现象和机理, 但贫乏论仍是工业合金经常遇到的问题。

12.2.2.1 奥氏体不锈钢

由于晶界碳化铬沉淀引起的贫铬机理是奥氏体不锈钢晶间腐蚀的主要原因, 而其他的一些看法, 也都是从碳化铬在晶界沉淀的现象出发。因此, 一切防止晶间腐蚀的措施, 都是从控制碳化物的沉淀来考虑即从沉淀碳化物的分量、部位和沉淀作用的动力学来考虑。这些措施分述如下。

(1) 降低碳量 使钢中碳含量降低到固溶度以下, 使碳化物无法沉淀; 或者比溶解度稍高, 只有微量的碳化物在晶界沉淀, 不足引起晶间腐蚀破坏的危险。如图 12-10 所示, 碳量需要降低到 0.025% 以下, 才能在最危险的敏化温度加热 1000h, 而不会有晶间腐蚀。这是 20 世纪 30 年代初已经认识到的事实, 但直到 60 年代末期以后, 由于氩氧脱碳 (AOD) 法用于生产不锈钢, 才能大量而经济地提供超低碳 ($<0.030\%$) 不锈钢。

(2) 合金元素的影响 从合金元素对于碳活度的影响, 可以理解这些元素在晶间腐蚀中所起的作用: 那些在钢中与碳结合较强的元素如铬、钼等, 可以降低碳的活度, 从而减小晶间腐蚀趋势; 那些在钢中不形成碳化物的元素如镍、硅等, 由于提高碳的活度, 则可增加晶间腐蚀趋势。图 12-11 证实了铬的有益作用以及镍的有害作用: 当镍量相同时, 不产生晶间腐蚀所能容许的碳量因铬量的升高而增加; 而当铬量相同时, 则该碳量因镍量的升高而下降。

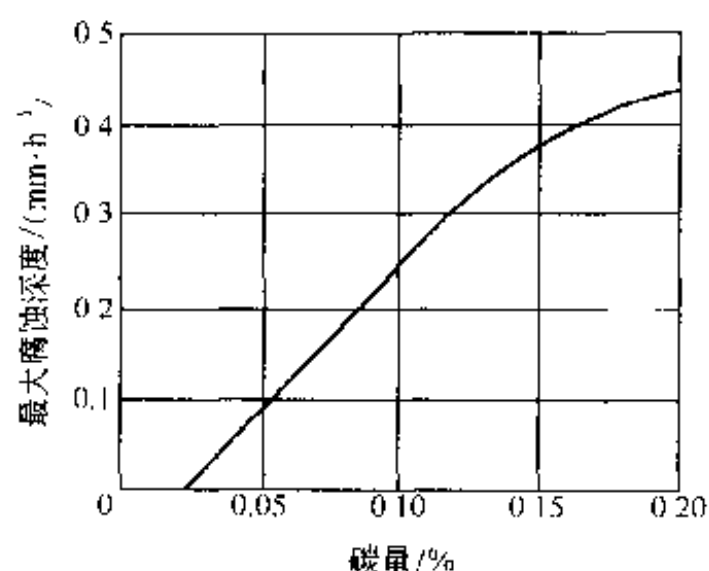


图 12-10 18-8 不锈钢中含碳量与晶间腐蚀深度的关系(敏化处理 1000h 在 $\text{CuSO}_4\text{-H}_2\text{SO}_4$ 中试验)

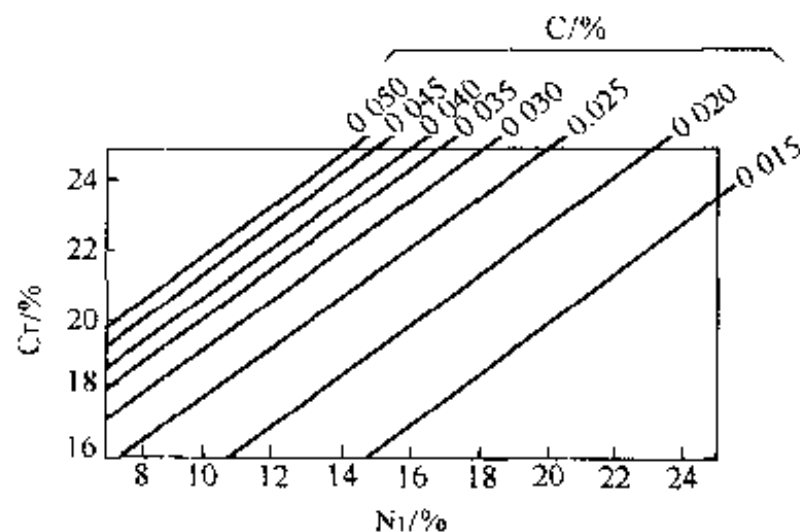


图 12-11 650℃ 敏化 1h 在 $\text{CuSO}_4\text{-H}_2\text{SO}_4$ 试验时, 不产生晶间腐蚀的铬量、镍量和碳量的关系

比较图 12-10 及图 12-11 可以看出, 不产生晶间腐蚀所能容许的碳量, 还因敏化处理而变。对于高温使用的不锈钢设备, 我们需要如图 3-11 所示的长期敏化的数据; 而对于焊后不在高温使用的设备, 从焊接工艺考虑, 希望图 3-11 中“鼻尖”时间 (t_c) 愈长愈好。在下述成分范围内: 16% ~ 25% Cr, 6.5% ~ 25% Ni, 0.005% ~ 0.05% C, 0.002% ~ 0.15% N, 0 ~ 3% Mo, ~1.3% Mn, ~0.4% Si, 用 $\text{CuSO}_4\text{-H}_2\text{SO}_4$ 法, 研究了几十种不锈钢的晶间腐蚀与成分的关系。获得 650℃ 敏化 1h 而没有晶间腐蚀的经验方程:

$$\frac{6.17}{C^{0.83}} + 13.8(\text{Cr} + 2.25\text{Mo}) - 10\text{Ni} \geq 0 \quad (12-1)$$

式中用化学符号代表这些元素的质量分数; 另方面获得了 t_c (s) 与化学成分之间关系:

$$t_c = 63.5\text{Cr} - (50.5\text{Ni} + 6820\text{C} + 1037\text{N}) - 178 \quad (12-2)$$

符号的意义同式(12-1)。加入 2.04% Mo, 使 0.030C-17.78Cr-14.37Ni-0.024N 钢的 t_c 从 ~0s 增加到 600s。

与镍比较, 锰与碳有较强的结合能力, 因而如图 12-12 所示, Cr-Mn-Ni 系不锈钢经过敏化处理后, 不发生晶间腐蚀所能容许的碳量, 要较 Cr-Ni 系不锈钢为高。但是, 在 650℃ 将敏化时间从 2h 延长到 100h, 这种优点便消失了。因此, 锰的这种作用, 只是从动力学角度推迟了晶界碳化物的析出, 而不是从热力学角度避免这种沉淀。

(3) 加入稳定碳的合金元素 要从热力学上避免晶界 Cr_{23}C_6 的沉淀, 除升降碳外, 便是在钢中加入能够形成很稳定碳化物的元素, 最常用的有钛和铌。TiC 在 γ 中的固溶度很低, 在 760℃ 已使 γ 中 C 含量降到 0.005% 以下。Ti 及 Nb 的原子量分别为 47.9 及 93.3, 作为粗略的估计, 将 γ 中的 C 全部固定为 TiC 或 NbC, 所需的 Ti 或 Nb 分别为 C 量的 3.99 及 7.78 倍。

(4) 控制碳化铬沉淀的部位和分量 降低单位晶界面积上的碳化铬沉淀量, 例如, 冷加工、细

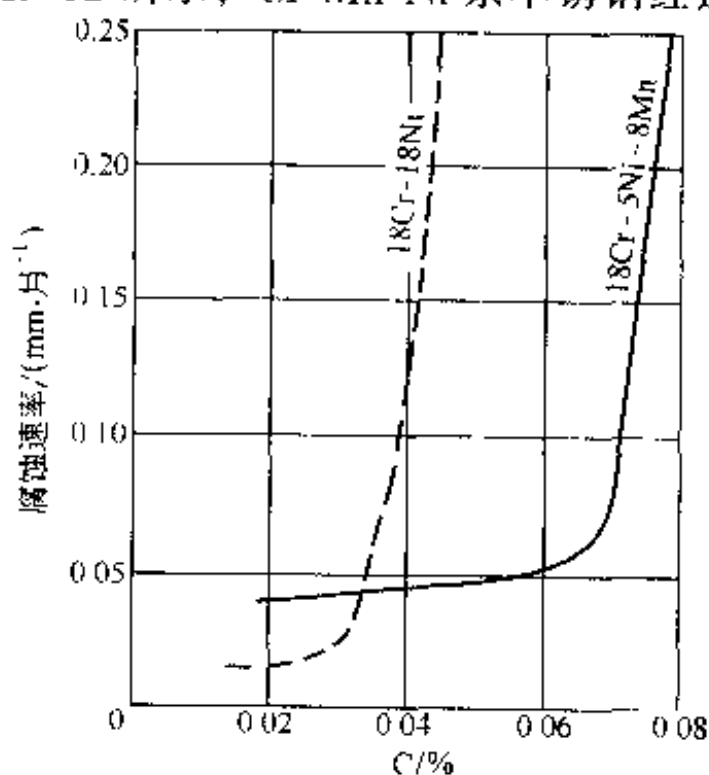


图 12-12 碳量对于两种奥氏体不锈钢在沸腾 65% HNO_3 中腐蚀速率的影响 (650℃ 加热 2h)

品、 $\gamma + \delta$ 复相组织均可降低晶间腐蚀趋势。

(5) 固溶处理 使沉淀出来的碳化铬及所引起的贫铬区加热到高温 (1050°C)，使它们全部溶解，从而可避免晶间腐蚀。但是，使用这种方法是有局限性的：处理大的结构部件较为困难；处理后仍需防止在敏化温度范围 ($550 \sim 700^{\circ}\text{C}$) 加热。

12.2.2.2 铁素体不锈钢

由于晶界碳化铬沉淀引起的贫铬机理，也是铁素体不锈钢晶间腐蚀的主要原因，而其他的一些看法也主要是与碳化物在晶界的沉淀有关。因此，在工业上行之有效的措施与防止奥氏体不锈钢晶间腐蚀的办法相似，也是三个方面：

- (1) 降低碳量和氮量到很低的含量，例如 $<0.005\% \text{C}$ ， $<0.015\% \text{N}$ ；
- (2) 在 $700 \sim 800^{\circ}\text{C}$ 短时间回火；
- (3) 加入足够的钛固定钢中的碳和氮。

冶金厂生产 Cr17 钢时，冷轧前有时加热到 900°C ，随后在 HNO_3 HF 酸洗时发生晶间腐蚀。图 12-13 提出了消除这种敏化态的热处理制度，可供参考。

18%Cr 的铁素体不锈钢与 18%Cr-8%Ni 的奥氏体不锈钢由于含镍量不同，产生貌似不同的晶间腐蚀现象，为了避免这种现象，需要采用不同的热处理工艺。图 12-14 示出 0.08C 18Cr 钢中 Ni 量对钢在 65% 沸腾 HNO_3 中腐蚀的影响：当镍量在 $0 \sim 2.5\%$ 时，需采用铁素体不锈钢一样的热处理工艺来消除晶间腐蚀；而当镍量大于 3% 时，则需采用奥氏体不锈钢那样的工艺的热处理来消除晶间腐蚀。

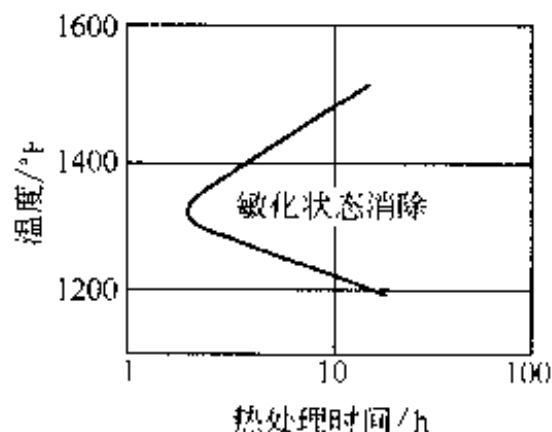


图 12-13 消除 Cr17 钢敏化态的热处理

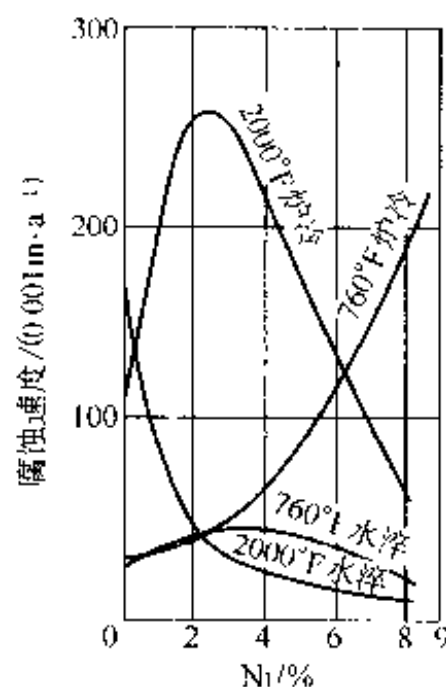


图 12-14 镍量及热处理对 Cr18 钢腐蚀速率的影响
1in = 0.0254m

12.2.3 成分选择性腐蚀

从电化学的腐蚀观点来看，金属学中的单相合金已不再是单相，这是由于单相中的组元具备不同的腐蚀行为，在腐蚀过程中，单相合金可以转变为多相的不均匀的固体，因而出现了成分的选择性腐蚀。多相合金中，各相的电极电位及极化性能不同，自然也会出现选择性腐蚀问题。假定组元电化学特性相差较大的 A-B-C... 单相合金，在某种介质中最活泼而易溶解的元素为 B，则有可能在这种介质中出现“脱 B”现象（类似黄铜的脱锌）；在多相合金中，如某种介质易于溶解或分解其中的 β 相，便有可能在这种介质中出现 β 相被选择性地腐蚀的现象（类似碳钢的氢蚀）。

12.2.3.1 黄铜的脱锌

抑制第 3 章第 3.4.2 节所讨论的黄铜的脱锌，在合金的选择上，有两条途径。

- (1) 锌量在 15% 以下的黄铜。
- (2) 含微量 As 或 Sb 的海军黄铜或铝黄铜：

70% Cu-29% Zn-1% Sn-0.05% As；

76% Cu-22% Zn-2% Al-0.05% As。

12.2.3.2 低碳钢的氢蚀

低碳钢与高温氢气接触，发生如下化学反应，即高温氢气与钢中固溶碳([C])化合生成气态甲烷：



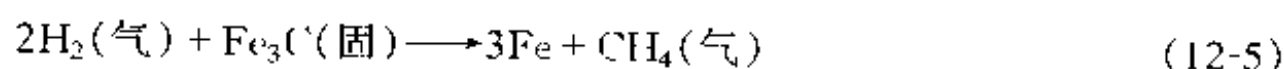
流动的氢气将反应产物 CH_4 带走，使反应继续向右进行，使钢的表面的碳量下降，发生脱碳，即成分的选择性气体腐蚀。

钢的表面碳浓度下降，驱使碳从钢的内部扩散至表面；这种扩散使 Fe_3C 周围的基体内碳低于平衡值，促使 Fe_3C 溶解：



碳再从钢的内部扩散至表面；再脱碳；碳化物再溶解；……。

合并式 (12-3) 及式 (12-4)：



这便是氢蚀的总反应。由于积累的 CH_4 在钢的内部可以产生高压，可以引起开裂，这又是一种气体介质引起的应力腐蚀开裂，防护措施见下节。

12.3 金属应力腐蚀断裂

对于金属的应力腐蚀断裂，可分“金属”、“应力”、“腐蚀”三个方面，在已知的经验规律和断裂机理的基础上，理解和选择抑制措施。

12.3.1 金属

以氢脆为断裂机理的应力腐蚀体系中，材料的屈服强度愈高，由于局部氢的富集程度愈大，则抗应力腐蚀断裂的能力愈低。图 8-9 示出 40CrNiMo 钢的 K_{IC} 及在海水中的 K_{ISCC} 随着屈服强度的提高而降低。图中虚线表明不同 a_0 值的 K_{ISCC} 和 σ_s 的关系，因此， σ_s 愈高，能容许的 a_0 值愈小，构件反而愈不安全。经验规律表明，含 H_2S 的油气田所用的钢管，为了抑制应力腐蚀断裂，硬度应控制在 HRC22 以下。

在沸腾的 42% MgCl_2 水溶液中，常用的 18% Cr-8% Ni 奥氏体不锈钢的应力腐蚀断裂敏感性最大；增镍降铬，都可降低这种敏感性。实验室采用这种溶液作为介质，只是一种加速实验；在现场，只在不良设计中，才会出现这种 Cl^- 的高度富集现象，例如，蒸汽的反复蒸发和凝聚，便会在空隙处出现这种富集。改变设计，可以避免这种情况的发生。又如，奥氏体不锈钢管的外部绝热层，在化工厂气氛中，易于吸收 Cl^- 并逐渐富集，曾预先用硅胶油涂在管的外壁上，然后再包绝缘层，成功地解决了这一问题。

低合金结构钢在热浓的 NaOH 水溶液中，可以发生应力腐蚀断裂，20 世纪 60 年代发生的几次汽轮机叶轮的断裂事故，都是由于碱在键槽处富集引起的。除改善材质提高 K_{ISCC} 外，也可不用键槽，改用整体叶轮。

12.3.2 应力

降低拉伸应力可降低应力腐蚀断裂敏感性。例如，冷加工后的黄铜件，若退火消除残余

应力, 可避免在含 H_2O 及 NH_3 气氛或含 NH_4^+ 水溶液中开裂。又如, $Cr_{23}Ni_{28}Mo_3Cu_3Ti$ 不锈钢由于焊后的残余拉应力产生了应力腐蚀断裂, 采用 $950^{\circ}C$ 加热 30min 后空冷的消除应力热处理, 可以避免这种破坏。

缺口半径影响应力集中系数, 从而可影响应力腐蚀断裂性能。图 4-4 示出 $30CrMnSiNi2$ 钢的 $K_{ISCC}(\rho)$, 随着 $\sqrt{\rho}$ 的下降而降低; 当缺口半径 $\rho \leq 0.027mm$, $K_{ISCC}(\rho)$ 便降到 K_{ISCC} 。因此, 增加构件 (例如螺栓) 的 ρ , 可以有效地提高抗应力腐蚀断裂能力。

机械加工、喷丸等工艺, 使表面处于残余压缩应力状态, 由于抵消或部分抵消了拉伸应力的作用, 对抑制应力腐蚀断裂是有益的。

12.3.3 腐蚀

在前面提到, 改进金属构件的设计, 防止腐蚀介质的富集, 是一项重要的防护措施。与此有关的, 是介质的处理, 例如, 汽轮机发电机组用水, 需要预先处理, 以降低 $NaOH$ 的含量; 核反应设备的不锈钢热交换器中, 需将水中 Cl^- 及 O_2 的含量降低到 10^{-6} 以下等。

缓蚀剂、涂层及电化学保护都可用于抑制腐蚀。但应指出, 以氢脆为断裂机理的应力腐蚀体系中, 阴极极化、阳极极化都会促进局部区域氢的析出, 使裂纹扩展速度增加、断裂时间下降 (图 12-15)。以阳极溶解为断裂机理的应力腐蚀体系则不同, 例如 α 黄铜在中性含 NH_4^+ 的水溶液中, 不仅阴极极化可降低裂纹扩展速度, 而且在阳极极化的电位较正时, 由于腐蚀在较大的表面进行, 也会降低裂纹的扩展速度 (图 12-16)。

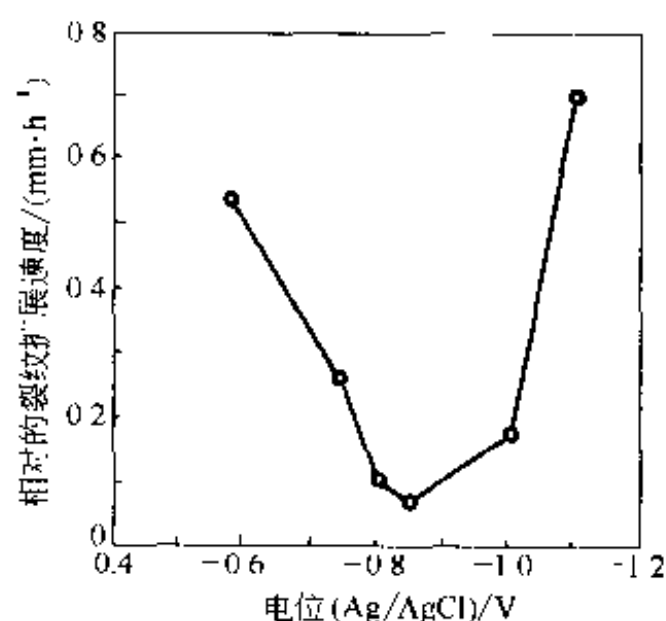


图 12-15 极化电位对 40CrNiMo 钢在 3.5% NaCl 水溶液中的裂纹扩展速度 da/dt 及断裂时间 t_f 的影响

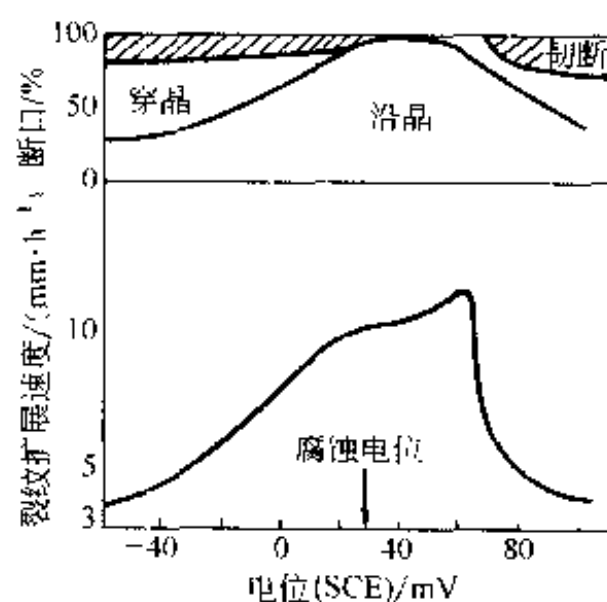


图 12-16 极化电位对 α 黄铜在中性含 NH_4^+ 水溶液中的裂纹扩展速度的影响

对于氢脆或氢致开裂, 应该首先确定起决定性的作用机理 (图 4-14), 然后对症下药, 采取相应的措施。

例如, 高温高压氢气对于结构钢的损伤——氢腐蚀, 已公认是由于式 (12-5) 反应的产物甲烷的压力引起的。当甲烷的压力超过钢的高温持久强度时, 便会引起沿晶的开裂。因此, 加入能形成稳定碳化物的合金元素, 如铬、钼、钒、铌、钨等, 它们或者固溶于 Fe_3C , 增加 Fe_3C 的稳定性, 或者形成合金碳化物, 降低 Fe_3C 的含量; 在另一方面, 这些合金元素都能有效地提高钢的高温持久强度; 因此, 合金结构钢抗氢腐蚀的能力高于碳钢。从美国石油学会 (API) 所推荐的 Nelsen 曲线图 (图 12-17) 可以看出, 操作的温度及氢压愈高, 为了长期安全工作, 则钢中所含的合金元素最愈多。

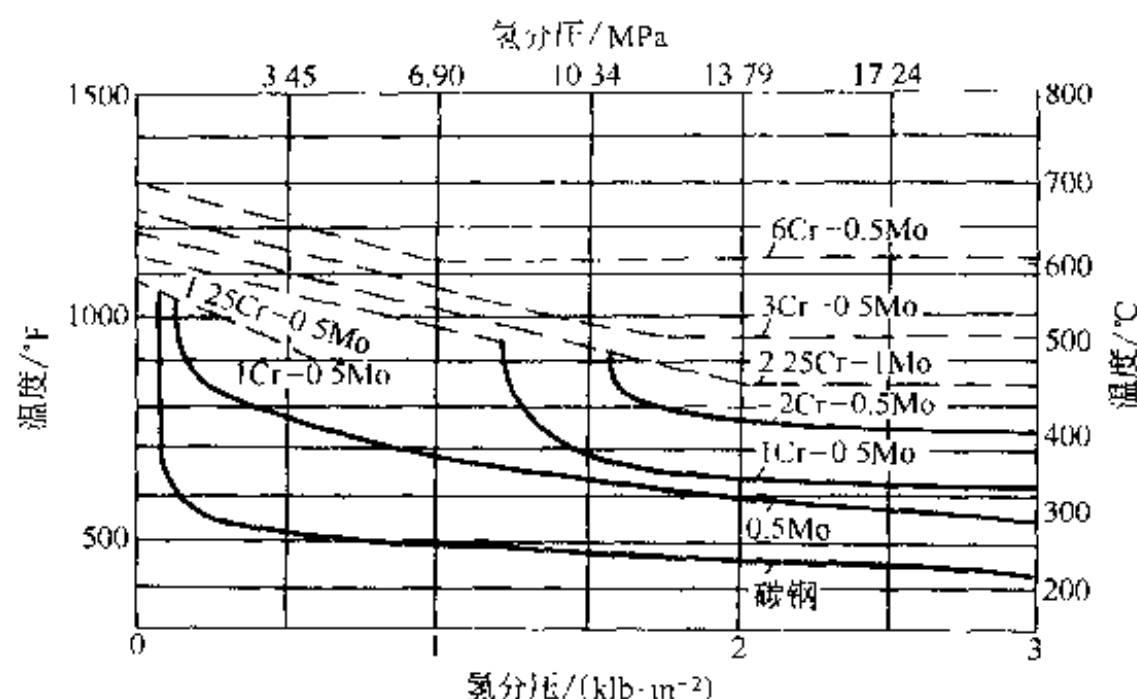


图 12-17 钢材抗氢腐蚀图——钢材处于曲线下的条件，可安全使用

$$1 \text{ lb} \cdot \text{in}^{-2} = 70.31 \text{ kgf/cm}^2 = 6.9 \text{ MPa}$$

降低或抑制内氢的措施可归纳为两个方面。

(1) 降低氢含量 冶炼时采用干料，或进一步采用真空处理或真空冶炼；焊接时采用低氢焊条；酸洗和电镀时，选用缓蚀剂及在制定工艺时，尽量降低引入的氢量。

(2) 排氢处理 合金结构钢锻件的冷却要缓慢，防止氢致开裂的“白点”；合金结构钢焊接时，一般采用焊前预热、焊后烘烤的措施，以利于排氢。对氢脆敏感的高强度钢和高合金铁素体钢，在酸洗及电镀后，必须烘烤去氢。

12.4 高温氧化

前面三节，除开氢蚀外，所讨论的都是水溶液所引起的电化学腐蚀，温度也不高，可以达到的，只是溶液的沸腾温度。本节所讨论的问题特点有二：一是高温，二是气体腐蚀介质。改变环境的措施，在极端条件下，可采用各种散热方式来降低金属结构的温度；防止这类腐蚀的主要措施是合金化及涂层，在下面，侧重论述合金化。

12.4.1 有益的合金元素

在第五章第五节讨论选择性氧化时，从七个方面考虑了抗氧化的合金元素的选择，图 5-14 至 5-19 示出各种合金元素对铁基、镍基及铜基合金氧化速度的影响。图 5-18 及图 12-18 分别示出 Cr-Al 及 Cr-Si 的复合作用。因此，工业上大量应用的高温钢及镍基高温合金都是采用 Cr、Cr-Si 及 Cr-Al 来提高材料的抗氧化性能，从表 12-2 的数据也可看出这种趋势。

表 12-2 钢与合金的最高抗氧化温度

钢或合金的类别	主要合金成分	最高抗氧化温度/℃	钢或合金的类别	主要合金成分	最高抗氧化温度/℃
碳素钢	—	500	奥氏体钢	高铬 + Al	1200
低合金钢	—	500~620	奥氏体钢	18% Cr + 8% Ni	900
珠光体耐热钢	—	500~620	奥氏体钢	25% Cr + 12% Ni	1100
马氏体钢	5%~6% Cr + Mo	600	奥氏体钢	25% Cr + 20% Ni + Si	1150
	7%~10% Cr + Si, Mo	800	铁基合金	20% Cr + 35% Ni	1050
	13% Cr	800	镍基合金	15% Cr + 60% Ni	1100
铁素体钢	17% Cr + Si	850~900	镍基合金	20% Cr + 80% Ni	1150
	27%~30% Cr	1100			

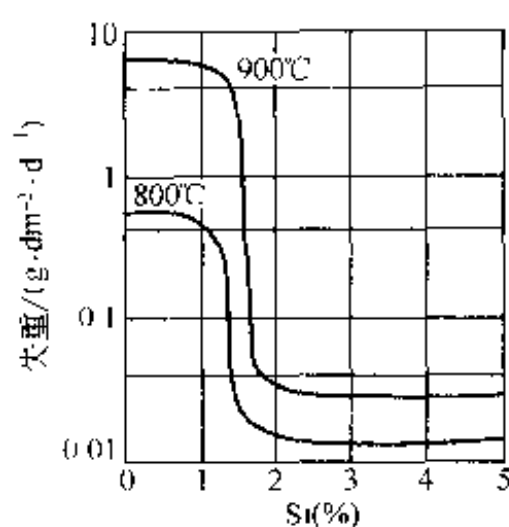


图 12-18 硅对含 6%Cr 钢氧化率的影响

在 80-20NiCr 合金及 Fe-25Cr-5Al 的电热丝中加入微量的稀土元素、钙、钪 (图 5-12) 铈等, 可以显著地提高电丝的寿命。

12.4.2 有害的合金元素

人们总是感情用事地将基体以外的化学元素, 有益的叫作合金元素, 有害的叫做杂质。耐热钢及镍基高温合金中加入钼和钒, 对高温持久强度及抗蠕变性能是有益的, 但是, 含高钼或高钒的金属材料, 却会出现第 5 章第 5.5 节所讨论的“灾难性氧化,” 迅速氧化而至破坏。这些元素便是有害的合金元素。

图 12-19 示出 Fe-Ni-Mo 及 Fe-Cr-Mo 三元系的灾难性氧化的成分范围 (影线区), 比较图 (a) 及 (b) 可以看出, Cr 更能促进灾难性氧化, 这是由于 Cr 的加入使氧化层的孔洞增加, 氧较易扩散入内, 低熔点的 MoO_3 更易形成。

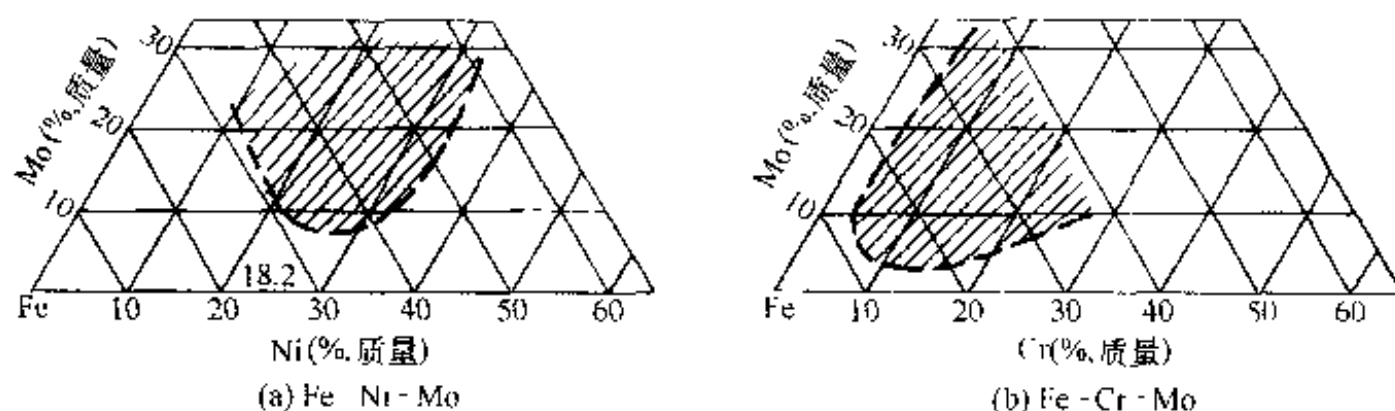


图 12-19 灾难性氧化的成分区 (影线区)

已经查明, 灾难性氧化是由于低熔点酸性氧化物 MoO_3 、 V_2O_5 、 Bi_2O_3 、 PbO_2 等引起的, 因而环境 (气相或固相) 中含有这些氧化物, 也可产生灾难性氧化。例如, 73Fe-20Cr-6Al-1Co 的电热丝的正常寿命是几百小时, 但若支撑的石棉板中含有少量的 PbO , 则几分钟便烧断。又例如, 若氧化气氛中含有 MoO_3 , 如图 12-20 所示, 当温度达到 Ag_2MoO_4 - MoO_3 的共晶温度 495°C 时, 则 Ag 的腐蚀深度迅速上升, 发生灾难性氧化。又例如, 含钒及铅的汽油, 燃烧后产生的 V_2O_5 及 PbO_2 , 可以使耐热钢及高温合金发生灾难性氧化。有些研究工作者建议, 为了抑制 V_2O_5 的腐蚀, 建议用钛或钛合金涂层。

12.4.3 其他有启发性的概念

12.4.3.1 热处理

第五章第五节所讨论的预处理及时有效处理这两种热处理, 可以显著地提高合金的抗氧化性能。

例如, 铝能显著地降低铜 (图 5-16) 及铜合金的氧化速度, 但是达不到理论上的预期效果, 即若形成 Al_2O_3 保护层, 可使抗氧化性至少提高 80000 倍, 但实际仅提高 36 倍。采用只氧化铝而不氧化铜的气氛进行预处理后, 抗氧化性能约提高 200000 倍。

此外, 对于黄铜氧化后进行时效处理, 由于 Cu_2O 为 Zn 还原 [式 (5-52)], 形成基本上全是 ZnO 的白膜, 可降低氧化速度。

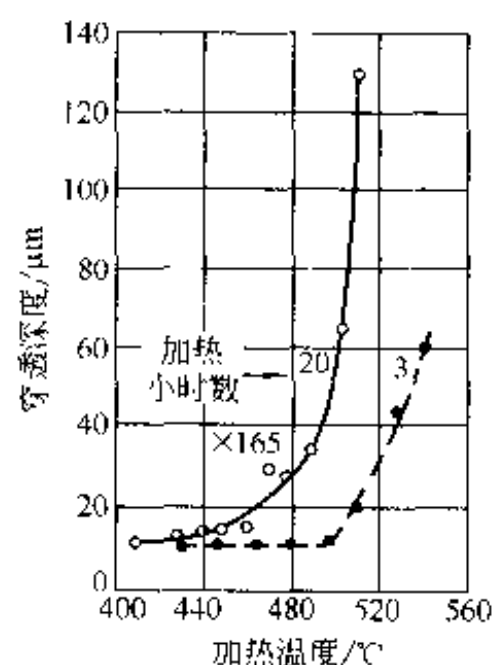


图 12-20 银在含 MoO_3 空气中氧化深度与温度的关系

12.4.3.2 简单的理论分析

哈非原子价规律（第五章第五节）对于选择二元合金的溶质，Wagner 的氧化理论（第五章第四节）对于寻求抗氧化的合金元素是有参考意义的。

关于混合气体的氧化热力学分析（第五章第一节及图 5-2）是有示范作用的。氧化与硫化所产生的硫酸盐又会导致熔盐腐蚀。硫酸盐可被氯化物还原而生成硫化物，将引起硫化物的腐蚀。

此外，高温氧化或其他气体腐蚀时，也会有局部腐蚀及应力腐蚀问题，第三章及第四章处理水溶液中这两个问题的结果和方法，也可参考。例如，钢的氢蚀既是一个成分的选择性腐蚀，也是一个氢环境引起的应力腐蚀，也是一个高温气体腐蚀问题。

12.4.4 涂层

抗氧化涂层可分为金属涂层和陶瓷涂层两大类；后者包括氧化物、氮化物、硅化物等，前者通过扩散氧化，其表面便是氧化物涂层。

金属涂层又分两类。一类是贵金属如铂、金等，主要是作为电接触材料。这种保护层由于氧化物如 PtO_2 的挥发，保护期短；例如，在钨筒上镀上 $20\mu\text{m}$ 的铂，在 1250°C 只能保护 30min。另一类是镀上钢中抗氧化有效的合金元素 Al、Cr、Si，然后扩散退火氧化，使其表面形成致密的氧化物保护层。

陶瓷涂层厚在 0.1mm 的数量级，陶瓷是稳定的复合氧化物，它们是抗氧化的。它们的主要技术问题是：热膨胀系数与基体差别很大所起的粘结不佳而致剥层问题。

现以燃气轮机为例，说明抗氧化涂层的几个实际问题。

12.4.4.1 防护系统

设计防护系统时，应考虑如图 12-21 所示的三因素。

(1) 合金基体 (A) ——力学性能、热学性能、显微组织稳定性、抗环境腐蚀能力、成本。

(2) 服役条件 (S) ——温度、应力、化学环境、寿命、成本。

(3) 防护系统 (P) ——抗环境腐蚀能力、显微组织稳定性、与基体的粘结性、工艺方法、成本。

选择 P 时，要综合考虑 A 及 S，即 $(A + S) \rightarrow P$ ；另一方面要分析 P 对 A 及 S 的影响，即 $P \rightarrow A$ 及 $P \rightarrow S$ ；还有 P 本身的若干问题。

从实用角度考虑，抗氧化涂层除开实用和可靠外，应具备如下一些特性（[12-1] p.6）：

- (1) 薄而与基体粘结牢固。
- (2) 与基体在工艺及服役过程均保持结合。
- (3) 组元向基体内扩散慢，不致在服役期稀释。
- (4) 对基体的力学性能影响不大。
- (5) 与基体的热膨胀系数及热迁移系数大致一样。
- (6) 抗蠕变断裂、热疲劳、耐腐蚀。
- (7) 在服役及停工的温度范围内不致脆断。
- (8) 在服役期，它本身及与基体接触的界面不会形成液相。

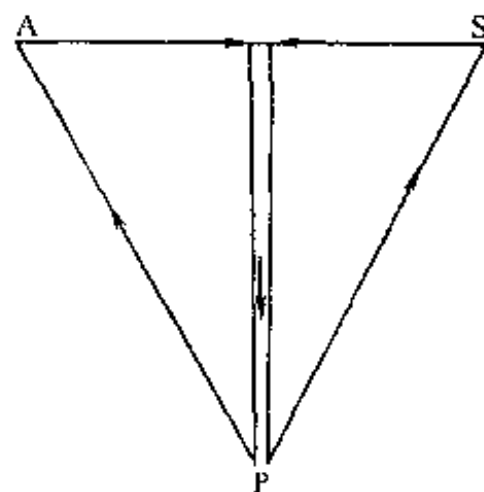


图 12-21 防护系统
P—合金基体；A—服役条件；
S—关系图

(9) 薄、匀而无宏观缺陷，易于施工及修补。

12.4.4.2 涂层分类

除开按照涂层的化学成分按照上述的金属（富 Pt、富 Cr、富 Al、富 Si）及陶瓷两大类的划分外，也可综合考虑工艺、涂层成分及防护机理，将涂层分为三类。

(1) 扩散涂层。最有用的是铝化物涂层。先从外源在基层表面镀铝，然后扩散退火，在基体表层形成 NiAl 或 CrAl，并氧化而形成致密的 Al_2O_3 保护层。此外，还有 Cr 及 Si 的扩散涂层，例如在 Mo 的表面形成 MoSi_2 涂层，并氧化而形成 SiO_2 保护层。

(2) 包覆涂层。采用热等静压（HIP）、物理或化学气相沉积（PVD）或（CVD）、喷涂等工艺将涂层包覆在基体表面。已采用的涂层有 NiCr、CoCr、NiCrSi、NiCrAl、CoCrAl、NiCrAlY、CoCrAlY、FeCrAl 等成分。

(3) 陶瓷涂层。常用的含有其他氧化物的复杂硅酸盐，这些氧化物有 ZrO_2 、 TiO_2 、 CeO_2 、 Al_2O_3 等。这种涂层本身很抗氧化，但它厚而脆，易于开裂而失去防护功能，因而只能用于燃气机的静止件，如衬层，还不能用于运动件，如叶片。

文献 [12-1] p.12~13 表 1 列出了 46 种工业用高温合金所采用的抗氧化涂层及工艺，可供参考。

参 考 文 献

- [12-1] D. Chatterji, et al. Protection of Superalloys for turbine Application. Adv. in Corrosion Science and Technology, (1976)6, 1~88

第 13 章 腐蚀的应用

坏事可变为好事。

“在科学的一个分支部门发展起来的思想方法，往往能够用来解释表面上完全不同的结果”。(爱因斯坦,《物理学的进化》, p.23)

一般说来,腐蚀是有害的,是坏事。但是,在一定条件下,坏事可变为好事;利用腐蚀,应用腐蚀,可将腐蚀转化为有利。

金属在水溶液中的腐蚀,有阳极溶解和阴极析氢。前者耗费了金属,后者导致氢致开裂、氢脆等,都是有害的。在下面两节,先依次简述氢在材料中的有益作用及科技界如何应用阳极溶解为人类服务,第 13.3 节以“腐蚀广论”十首,例述科技、社科、人文的广泛类比,相互启示。

13.1 氢对于材料的有益作用^[13-1]

氢可以引起材料的各种损伤^{[4-3]~[4-10]};但是,在许多情况下,氢对于材料的工艺和性能,却是有益的^[13-1],举例如下。

(1) 氢对材料工艺的影响:

- ① 还原气氛;
- ② 细化钛合金晶粒及其他原因,提高塑性;
- ③ 制备塑性金属粉末,例如钽,由于塑性好,难于磨成粉末,故先氢化成脆性氢化物,磨细后,再加热分解氢化物而脱氢;

④ 加氢使重油转化为轻油。

(2) 氢对材料性能的影响

- ① Si-20% (原子) H——利用悬挂键的太阳能电池;
- ② 加氢导致钛合金的超塑性;
- ③ 氢化物贮氢;
- ④ 铅中加 Li 及 H,由于形成氢化锂,显著地提高铅在室温的蠕变断裂强度及降低室温蠕变速率;
- ⑤ 铂中加氢,通过多次加工,可提高强度,作为纯化氢的过滤片;
- ⑥ 铁中充氢,由于 Le Chatelier 原理,可提高抗酸蚀能力;
- ⑦ 氢化物用作核反应堆中减速剂、反射器、屏蔽或控制材料;
- ⑧ 氢化物用于热能转换。

13.2 阳极溶解的有益作用

现从浸蚀(etching)、化学加工(chemical milling)及抛光(polishing)三方面简介如下。

13.2.1 浸蚀

对于金属进行化学或电化学浸蚀,可以达到如下四个目的。

(1) 显示金相组织——当金相组织中的各相硬度有显著差别时，则软相在抛光时磨去较多，在显微镜下可区别软相与硬相；否则，必须选用适当的浸蚀剂 (Etchant) 先对抛光面浸蚀，才能清晰地观察到各相组成的显微组织。

(2) 阐明晶间腐蚀的机理——第3章图3-15示出铬镍奥氏体不锈钢中奥氏体 (γ) 及 σ 相的阳极极化曲线。在 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-CuSO}_4$ 检验溶液的氧化-还原电位下，由于 σ 相比 γ 相还稍耐蚀，显示不出 σ 相在晶界形成所引起的晶间腐蚀；而在沸腾的 65% HNO_3 的强氧化介质的氧化-还原电位下， σ 相的耐蚀性远低于 γ 相，故能显示 σ 相在晶界沉淀所引起的晶间腐蚀。

(3) 塑性合金粉末的制备——应用晶间腐蚀，可以制备塑性合金的粉末。晶间腐蚀后，使晶粒之间丧失结合力，以致材料的强度几乎完全消失，经过这种腐蚀的奥氏体不锈钢样品，外表还是十分光亮，但轻轻敲击，即碎成细粉。控制晶粒度号，便可控制粉末大小：

晶粒度号	1	3	5	7	9	11	13
平均粉末直径/ μm	250	125	62	32	16	8	4

若晶粒再细，细到 $0.1\mu\text{m}$ ($\sim 100\text{nm}$)，则可获得纳米级的金属颗粒。

(4) 制备印刷电路 (溶去多余的导体) 等。

13.2.2 化学加工

与机械加工比较，对于金属材料利用阳极溶解进行化学加工，有四个优点：

- (1) 适用于表面形状复杂的构件；
- (2) 对于已成型的板状构件，只能用化学加工；
- (3) 对于加工量较小的构件，化学加工较省；
- (4) 加工后表面较光滑。

采用酸性或碱性溶液，对铝及铝合金部件进行化学加工，在工厂已是成熟的工艺。

另一种有趣的实用工艺叫“电解加工” (Electrolytic machining)，它将磨削与化学加工结合：加工的部件是阳极，金刚砂轮是阴极，在适当的电解液中通电磨削，砂粒既起到磨削作用，又起到阳极-阴极之间的电绝缘的作用。

13.2.3 抛光

抛光 (Polishing 或 Brightening) 有化学及电解抛光两种，前者不需要外加电流，而后者则需要。它们的共性是表面的突起处溶解快，逐步达到表面光滑。

13.2.3.1 化学抛光

铝合金广泛地采用化学抛光^{〔13-2〕p.618}，抛光溶液为浓酸或加入氧化剂的稀酸，常用的酸有硫酸、盐酸、硝酸、磷酸、醋酸等。表13-1列出美国最广泛使用的两种化学抛光槽的化学成分及工艺条件。

表 13-1 美国的铝合金化学抛光工艺

成分或条件	范 围	成分或条件	范 围
磷酸-硝酸		磷酸-醋酸-硝酸	
磷酸(85%)	45% - 98% (质量) ^①	磷酸(85%)	80% (体积) ^②
硝酸(60%)	0.5% - 50% (质量) ^①	醋酸(99.5%)	15% (体积) ^②
水	2% - 35% (质量) ^①	硝酸(60%)	5% (体积) ^②
温度/ $^{\circ}\text{C}$	88 - 110	温度/ $^{\circ}\text{C}$	88 - 110
时间/min	0.5 - 5	时间/min	0.5 - 5

① 指原料 (如 85% 的磷酸) 在抛光溶液中的质量分数；

② 指原料 (如 60% 的硝酸) 在抛光溶液中的体积分数。

注：文献 [13-2]，p.617。

13.2.3.2 电解抛光

电解抛光易于控制，广泛地用于各类合金，如铝合金、不锈钢、黄铜、铍青铜、锌合金、高温合金、低合金钢等。在电解抛光过程中，金属阳极溶解产物与电解液作用，在金属表面形成一层薄膜。这种膜有两种类型，即阳极溶解产物饱和的电解液粘性膜及阳极释放的气体（一般是氧），在大多数工业上采用的电解液中，如图 13-1 所示，它们同时存在。这种膜的外貌（AB）大致与金属表面的外貌（CD）平行，而与表面的微观形貌 yxwvu 无关。继续电解抛光时，金属表面的突出部分 y、w、u 较易溶解，从而趋于表面光滑。

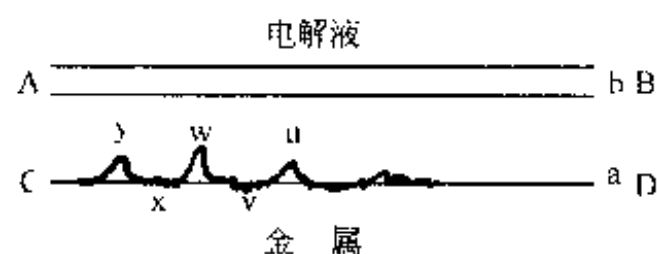


图 13-1 电解抛光过程中金属表面 CyxwvuD 及膜表面 AB

表 13-2 列出铝合金、不锈钢及铜合金的电解抛光工艺条件，供参考。

表 13-2 美国的各种合金的电解抛光工艺

合 金	电解液成分/%(质量)	温度/℃	电压/V	电流密度/(A·m ⁻²)
铝 合 金	Na ₂ CO ₃ 15	80~83	9~12	220~330
	Na ₃ PO ₄ 5			
	H ₂ O 80			
不 锈 钢	H ₂ SO ₄ 41	77~110	12	2200~3770
	H ₃ PO ₄ 45			
	H ₂ O 14			
铜 合 金	H ₂ SO ₄ 14	16~77		1080~10800
	H ₃ PO ₄ 59			
	铬酸 0.5			
	H ₂ O 36.5			

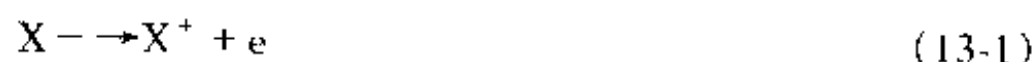
注：文献 [13-2]，p.485：618。

13.2.3.3 n-型半导体的抛光特征^[13-3]

半导体芯片在制造过程中，需要多次应用腐蚀原理进行抛光，例如，在切割过程形成的表面变形层，需要抛光去掉。

有别于金属及 p-型半导体，n-型半导体的腐蚀阳极过程较困难。

如令 X 代表金属 M 或半导体 S，则阳极过程是：



能带理论指出，金属及 p-型半导体的能带含低能的空穴（h^{*}），阳极过程释放的电子（e）极易填充这低能量的能级。n-型半导体则不然，没有低能量的能级接受这些电子，只能与已填充的能带中空穴（h^{*}）反应



而安居其位。但是，这种 h^{*} 的浓度很低，很快耗尽，需要从半导体的内部扩散至表层，才能满足式（13-1）向右进行。这种扩散限制了抛光的溶解速度仅约为 20A/m²。

理解了上述物理过程，可以采用表面层的“光激活”（photoexcitation）或加热整个芯片，增加表层 h^{*} 的浓度，从而增加抛光速度。

13.3 腐蚀广论

回到第一章第三节关于材料腐蚀的定义 (1-44), 并将“材料”改为“系统”[其定义见 (1-43)], 则系统的腐蚀定义为:

“系统腐蚀是系统受环境介质的化学作用而破坏的现象” (13-3)

13.3.1 环境介质

13.3.1.1 自然环境

人类生活在地球上, 依靠水而生活和生存。幸运地, 地球上有大片的海洋, 而在陆地上还有不少江河湖泊。但是, 正是水及水溶液, 通过腐蚀过程, 担当大自然母亲的大军, 为她讨回本来是属于她的东西——矿石^[13-5, 13-6]。

“大自然常常有这样一种倾向, 就是讨回她的儿子——人——从她那儿借去而加以安排结合的、那些不为普遍的宇宙过程所赞同的东西。” (13-4)

在材料界, 人类从大自然母亲那儿借来金属矿石, 耗费能量、制造金属, 进一步加工而成桥梁、船舶、钢轨、铜像、房屋……, 有时是赫然而成。但是, 大自然的风雨、潮汐、日照……, 日夜不停地工作, 通过腐蚀、磨损、断裂等方式, 讨回本来是属于她的东西。就是人的本身, 也是浩劫难逃。但是, 作为人类整体, 仍在与大自然斗争, 改变环境和材料的结构, 提高材料的性能, 反抗材料的失效。

大自然还存在着品类众多的细菌, 它既有助于农作物的成长; 而那些病菌, 又催促人类早点消亡。

13.3.1.2 社会环境

自从人类社会采用财产私有制并使用金钱作为交换工具之后, 人类需要金钱才能生活及更舒适地生活; 但是, 金钱又是腐蚀人类灵魂的有效“化学”介质!

权势可为人类做许多好事; 但它与金钱一样, 或通过金钱而使政经腐败!

对于经济体制, 也应类似 (13-4), 提出如下方针:

“治理经济环境, 整顿经济秩序 (即结构), 全面深化改革。” (13-5)

13.3.2 腐蚀广论^[13-4]

水及金钱是两大类腐蚀介质, 人类需要它们, 又需警惕它们。此外, 站在食物的立场上, 人类饮食也是一种腐蚀现象, 被腐蚀的是食物, 人类成了腐蚀介质。酿酒时, 食粮被腐蚀, 酶菌成了腐蚀介质。人类因受感染而生病时, 细菌成了干坏事的腐蚀介质, 而人类又一次成了被腐蚀的对象……。有感于此, 成诗十首, 广论腐蚀, 相互启迪。

腐蚀广论十首

1995年6月中旬, 北京

广思天下、地上、人间腐蚀事, 顿悟物理、事理、人理相能。若用因缘之道, 仍可延年益寿。成诗九首, 抒情达意, 明理述怀。人类及酶菌, 均生物也, 食粮可分别成长及成美酒; 腐蚀这个坏事变成好事, 为人类效劳。增加“生物腐蚀”一首, 成全了腐蚀, 纠了偏。

(一) 金属腐蚀

顽童借矿石^①, 冶炼化成宝。

巧制成器皿，人类齐叫好。
天下至柔水，攻坚谁比高^②？
慈母遣水军，讨回锈蚀入怀抱^③！

（二）政 经 腐 败

金钱如圣水，载舟覆船巧^④；
鬼谷揣摩术^⑤，仍需财货饱。
孙武兵商道^⑥，圣智用间妙^⑦。
说客间谍辈，腐败人才无节操！

（三）自 然 奇 景

盘古开天地，山川风雨雕，
有理复有情，江山何多娇！
腐蚀创奇景，游客齐赞穹。
宇宙风化事^⑧，谁是导演谁知晓^⑨？

（四）凡 人 存 亡

堕地呱呱嚎，饱食安睡好。
壮年勇拼搏，曾有几欢笑？
磨损又疲劳，腐蚀促衰老。
孺子如矿石，慈母思念回怀抱^⑩。

（五）大 厦 倾 倒

雕梁巨柱新，大厦何风骚！
虫食上梁歪，风化钢筋凋。
腐蚀又腐败，大厦易倾倒。
狠心勿忌医，延年益寿晚悲悼。

（六）医 治 预 防

宇宙与人世，共惊腐蚀妙。
世间有情人，离别悲难消。
诸法因缘起^⑪；环境慎理调。
强身优结构；延年益寿医护好。

（七）英雄尽折腰

道理互通融，人才与材料。
凡人惊奇景，出没有共道。
医防人共望，悲伤物早夭。
宇宙腐蚀事，无数英雄尽折腰^⑫。

(八) 回皈何必伤

金属腐蚀自然势，政经腐败社会殇；
自然奇景宇宙创，凡人回皈何必伤？
万年地层显沧桑，大厦自毁太匆忙，
覆巢之下无完卵，众志成城齐救亡。

(九) 诸法因缘起

相逢聚情难离别，延年益寿人共望。
佛语诸法因缘起，英雄折腰觅预防。

(十) 生物腐蚀

人类腐食壮成长，美食腐臭非人望。
酶菌食粮成美酒，李白斗酒诗豪放。
稀散宝矿何回收？细菌选冶有所望。
白色污染逞刚强，降解酶菌驰疆场。

① 人类，自然母亲之顽童，违背自然的意愿，借来矿石，冶炼金属。② “天下莫柔弱于水，而攻坚者莫之能胜。”——《老子》第71章。③ 矿石，本属于大自然慈母；她思念它，要向人类讨回。④ “君、舟也。人，水也。水能载舟，亦能覆舟。”——《贞观政要·政体篇》。⑤ 鬼谷子为苏秦、张仪之师，纵横家之祖，讲揣摩术，说服人君。⑥ 孙武著《孙子》，兵书也；后人经商，也引用。⑦ 《孙子》第十三篇“用间”，重用间谍：“非圣智不能用间，非仁义不能使间。”⑧ 地质界的风化（weathering），即岩石的“腐蚀”也。⑨ 英雄时势谁主造？千年纷争从未停。⑩ 大自然母亲思念她的儿女——矿石。⑪ “因”为关系，即系统的结构，“缘”为条件，即环境；它们分别对应于毛泽东《矛盾论》中变化的内因和外因。一切现象由“因”“缘”引起。⑫ 引自毛泽东《沁园春·雪》：“江山如此多娇，引无数英雄尽折腰。”

参 考 文 献

- [13-1] 肖纪美. 金属材料中气体元素的有益作用. 稀有金属, 1993, 17 (6): 1
- [13-2] ASM Metals Handbook, 8th Ed, Vol. 2, Heat Treating, Cleaning and Finishing, ASM, Ohio, 1964
- [13-3] Guy, AG. Introduction to Materials Science. New York: McGraw Hill, 1972
- [13-4] 肖纪美. 腐蚀广论九首. 世界科技研究与发展, 1996, 18 (1): 77~78
- [13-5] 肖纪美. 材料学与生物学的类比与交叉. 世界科技研究与发展, 1997, 19 (4): 37~41
- [13-6] 赫胥黎. 进化论与伦理学. 北京: 科学出版社, 1973

第 5 篇 结 论

（一）结论

第 14 章 结 论

结论，旧称断案。从推理的前提中推出来的判断。（《辞海》）

如第一篇引论中图 1-11 所示，结论应总结第 2、第 3 及第 4 篇关于微观腐蚀学、宏观腐蚀学及腐蚀防护的论述，然后抽象成若干体会和观点，供未来工作参考。因此，本章分为总结和体会两节。

14.1 总 结

在第 1 章引言中，从本书的命名引出五个待回答的问题：材料？材料学？腐蚀？腐蚀学？材料腐蚀学原理？第 1.1 节至第 1.3 节分别提供了答案：第 1.1 节及第 1.3 节采用定义和划分这两种逻辑方法，分别明确了“材料”及“腐蚀”这两个概念的内涵和外延；迎接学科发展的大趋势，在第 1.2 节及第 1.4 节仿效经济学的划分，分别提出“材料学”及“腐蚀学”的宏、微观分支；在第 1.5 节，释书名而提出本书的体系（图 1-11），共计五篇十四章，从引论经两个综论和分论到结论，篇内章数分别为 1、5、4、3 及 1。

第 2 篇是第一个综论，综合论述了微观腐蚀学问题，共 5 章（第 2 至第 6 章），侧重于金属材料在水溶液中的电化学腐蚀，共 3 章（第 2 至第 4 章）。

第 2 章为“电化学腐蚀”。由于这种现象很普遍，不仅在水溶液中，而且在固体电解质中，都可应用电化学理论，分析这些现象；此外，这类腐蚀现象是较为普遍而均匀的；因此，本章名为“电化学腐蚀”，实为“普遍性腐蚀”的基本原理。全章分四节：第 2.1 及第 2.2 节分别论述电化学腐蚀途径及均匀的腐蚀电池；第 2.3 节讨论了决定腐蚀速度的极化曲线；第 2.4 节分析金属材料耐蚀性的重要现象——钝化。

第 3 章为“局部腐蚀”，共分四节。第 3.1 节讨论了局部腐蚀的一个共性问题——闭塞电池中腐蚀介质特性。第 3.2 节分析了宏观的、肉眼可见的部位选择性腐蚀——缝隙腐蚀；第 3.3 节讨论微观部位的选择性腐蚀——晶间腐蚀；第 3.4 节分析成分的选择性腐蚀——黄铜脱锌，这三节的论述都是从概念到表象规律到作用机理，而防护措施在集中到第四篇的分论中。

第 4 章为“金属应力腐蚀断裂”，共分三节。第 4.1 节应用了历史、逻辑和系统分析方法，介绍这个问题的来龙去脉和问题概貌。第 4.2 节破题而论述“应力”、“腐蚀”和“金属断裂”这三个因素的影响，并提供图 4-11 及图 4-12 的 SCC 概貌图，展开了第 4.1 节图 4-2 的示意图。第 4.3 节则扼要地讨论了两种机理——阳极溶解和氢致开裂（图 4-13 及图 4-14）。

第 5 章为“高温氧化”，共分五节。第 5.1 节至第 5.3 节，分别论述高温气体腐蚀的热力学、动力学和结构学问题。第 5.4 节比较了“湿”腐蚀及“干腐蚀”的异同（图 5-13）；介绍了 Wagner 的氧化的半导体理论（图 5-9 及图 5-10）以及霍尔-普列斯的电化学推导 [式 (5-40)]，并讨论了应用这个理论来选择合金元素；从而可以理解材料科学中四个基本概念——性能、结构、过程、能量之间的关系（图 5-13）。第 5.5 节从合金化及气体环境两方

面讨论影响因素。

第6章为“非金属材料的腐蚀”，共分4节。第4.1节引言中，讨论了材料的分类，论证了非金属材料也有腐蚀。采用概说→结构→腐蚀三步方法，在第4.2至第4.4节，分别论述了三类典型非金属材料——塑料、玻璃及混凝土的腐蚀问题。

第3篇是第二个综论，综合论述了宏观腐蚀学中五个问题——方法论、经济、管理、科研、教育，并为四章（第7至第10章）。

第7章为“方法论”，是材料科学方法论（图7-1）的延伸，共分三大节。第7.1大节综论了逻辑、历史、系统、环境四种分析方法（图7-2）；第7.2大节则综论了性能、结构、过程和能量的各种分析方法；第7.3大节总结了上述四个分析方法和材料四论共八个组元之间关系（图7-17）。本章是全书的核心，适用于全书的各章（图1-11）。

第8章为“腐蚀经济和管理”，共分四节。第8.1及第8.2节分别介绍经济学的两个基本规律——收益递减律及商品价格律，以及它们在科学技术中的应用；第8.3节论述腐蚀经济损失的各种估算方法；第8.4节则示例地讨论了国家腐蚀中心及腐蚀失效分析这两个管理问题。

第9章为“腐蚀科研和教育”，共分六节。第9.1节为“科研类型”，这是科研的首要问题。明确了类型，才能目标明确、便于考核，以免鱼目混珠，浑水摸鱼。第9.2节借用生物学、军事学、经济学、物理化学中一些基本原理，对基础性科研的选题，提出了看法，期望能避免低水平的重复。第9.3节论述了科研方法，重点地阐明推理和假说，总结了发明和发现思维图（图9-4）。第9.4节从效益和效率讨论了科研管理。第9.5节从在校的及在职的两方面，论述了人才的培养；采用人才与材料对比的方法（图9-5及定义（9-10）），从才能、结构、过程、能量四方面提出人才的在校培养的观点。第9.6节较详细地论述了“类比与交叉”的治学方法。

第10章为“可持续发展与生态”。分四节，分别论述了四个问题：材料与环境，可持续发展法则，生态及广义的生态。

第4篇为分论，共3章。第11章及12章为“防护篇”，是应用前两篇综论的“病理”，对症下药地开“处方”。第11章为“防护系统”，先从治理环境及整理结构两方面对防护措施进行分类（图11-1及图11-2），在以下四节，依次地论述了防腐蚀设计、防护涂层、电化学保护、治理环境四个问题。第12章为“防护分论”，从12.1到第12.4节，依次讨论了从第2章到第5章腐蚀的防护措施。

第13章为“腐蚀的应用”：第13.1及第13.3节示例地简述腐蚀在工业的应用，分别讨论氢及阳极溶解；第13.3节以诗十首广论人文、社科及科技中腐蚀现象。

本章除总结外，在第13.2.1~13.2.5节分五个方面提出十四点体会。

14.2 体 会

第一著者有着这样的认识：

“一个人是非常渺小的，他或她一生中所经历的轨迹，只是在各种社会力及自然力的作用下刻画出来的。当个人回忆他或她的经历，不免有些惊奇，而在当时，却是奋斗或挣扎。”

(14-1)

人们认识问题之后，总会有些体会；而认识问题或从特殊到一般，或从一般到特殊，总是二者相结合。因此，各个时代和地区的哲学思想，总是在不同程度上影响不同层次的科

学、技术和技术科学。

第一著者 1943 年大学毕业, 1948~1957 年在美国学习和工作, 曾从事发展不锈钢的系统研究工作及腐蚀学的应用研究。1957 年回国后, 一直从事包括腐蚀在内的材料学方面的教学、科研、咨询、服务、规划方面工作。在金属腐蚀领域内, 先后从事铬锰氮奥氏体不锈钢、晶间腐蚀、应力腐蚀、氢致开裂等方面的研究; 在国家科委于 1958、1960 及 1981 年举办的腐蚀学习班上担任教师, 整理前两次讲义, 修改和补充, 于 1962 年出版了《腐蚀金属学》^[14-1]; 在校, 讲授“局部腐蚀”、“应力腐蚀”等课程; 整理科研和学习心得, 于 1983 年出版了《不锈钢的金属学问题》^[14-2]; 与张文奇、石声泰同志合作, 于 1987 年出版了共同主编的《金属腐蚀手册》^[14-3]; 在 1988 年出版的卫星广播的电视教育教材《材料的应用与发展》^[14-4], 包括了腐蚀内容; 1990 年出版的《应力作用下的金属腐蚀》^[14-5] 和 1994 年出版的《腐蚀总论》^[14-6] 是《腐蚀与防护全书》的两个分册; 参加国家科委冶金新材料组和腐蚀科学组、中国腐蚀与防护学会、各种腐蚀失效分析工作。

上述的业务实践影响了我对腐蚀的认识。更重要的是, 1957 年回国以后所受到的历史唯物主义和辩证唯物主义的教育, 指导了我的业务实践。1957 年以来各个时期, 时而强调实践, 时而突出理论, 在各种浪潮中学习, 特别是 1978 年科学春天以来, 有条件学习各种学说及基础知识, 特别是逻辑学、系统论, 以及西洋及古代中国哲学, 有助于我建立《合金能量学》^[14-7] 及《材料科学与工程的方法论》^[14-8] 体系。

在腐蚀领域内的上述业务实践以及回国后在哲学上所受到的教育和影响, 决定了我的认识和体会。总的体会有:

(1) 方法论是分析腐蚀问题的重要工具, 图 7-1 示出的材料学方法论的核心——四分析及四论也适用于材料微观和宏观问题的分析;

(2) 腐蚀经济是宏观腐蚀学的核心, 从材料的判据出发, 必须十分重视腐蚀问题的经济分析。

14.2.1 历史分析

在第 7 章第 7.1.2 节, 回顾不锈钢的发展历程, 展望未来, 提出如下五点体会。

(1) 科学的发生和发展, 一开始就是由生产决定的。

(2) 正确理解不锈钢中金属学问题认识运动的发展, 是非常重要的。

(3) 外因是变化的条件, 内因是变化的根据, 外因通过内因而起作用。

(4) 应用基础科学的进展, 学科的渗透和交织, 推动了人们对于不锈钢金属学问题的认识。

(5) 对于具体的情况, 应该进行具体的分析。冲破束缚, 继续前进。这是从动态的历史分析所得到的体会, 达到历史分析的目的 [定义 (7-24) 及 (7-25)]。

14.2.2 逻辑分析

相对于历史分析, 逻辑分析是一种静态分析。本书运用了这种分析方法, 尝试达到: 概念明确, 判断恰当, 推理正确, 结论有用。运用之后, 有如下三点体会。

(1) 确切的定义对于学科的发展起着重要的导向作用。定义就是要揭示概念所反映事物的特有属性——内涵, 抓住这种特有属性的定义, 就能揭示事物的本质, 推动关于这个事物的学科的发展。例如, 从材料的定义 (1-1) 可引出现代材料的五个判据, 扩大了材料学应有的范围, 不仅要研究材料的“性能”以及解决性能的有关问题——结构、工艺和设备 (图 1-1), 而且要分析经济、资源、能源、环保问题。用类比法将材料的定义引申到中国人才的

定义 (9-18), 提出了德与才的判据。例如, 对于应力腐蚀开裂, 采用发生定义, 即事物发生过程中的情况作为“种差”的定义 (4-3), 就避免了用机理来定义的限制。又例如, 关于材料结构的定义 (7-45), 与系统结构的定义 (1-12 或 1-13) 是符合的, 这就扩大了“结构”的内涵。采用定量的确切定义, 对于学科的发展有时会起着革命的意义。例如 (7-20) 关于熵的定量定义, 使热学起着革命性的发展: 这个定义表明熵是状态函数, 故可由全微分 dS 表达, 藉助于热力学两个定律以及 H 、 G 、 F 的定义, 演绎出一大片热力学关系, 故熵的希腊文原义为“发展” ($\epsilon\gamma\tau\rho\omega\pi\eta$)。

(2) 从静态及动态考虑, 需要充分认识到概念的稳定性和变化性, 我们应该是定义, 不唯定义, 重在客观事实。不承认概念在交流信息时的稳定性, 便会造成混乱; 由于客观存在的事实在改变, 在发展, 那么概念以及确定概念内涵的定义也应随着改变。因而 Metallurgy 原为冶金学, 现又增加了金属学的含义。又例如, 对于“腐蚀”一词, 在物质、医学及人品三方面, 就分别有 (1-40)、(1-38) 及 (1-39) 的定义; 即令是物质 (或材料) 的腐蚀, 本书引入了 (1-37)、(1-40)、(1-42)、(6-36) 四个定义, 对比如表 14-1 所示。

表 14-1 物质及材料腐蚀的四个定义对比

定 义	材 料	介 质	变 化	破 坏
(1-37)	金属	(化学介质) ^①	化学变化及电化学变化	—
(1-40)	物质	(化学介质) ^①	化学反应或电化学反应	破坏
(1-42)	材料	环境介质	化学、电化学、物理作用	破坏
(6-36)	材料	环境	化学、电化学或物理作用	化学破坏

① 隐含的。

表中定义 (1-42) 的内涵太广, 若物理作用引起的任何破坏也叫做“腐蚀”, 那么“断裂”、“磨损”也应叫做腐蚀, 未免太广; (6-36) 的内涵考虑了非金属材料由于物理环境 (例如辐照) 引起化学键的断开的化学破坏, 也划为腐蚀。

(3) 只要自然科学在思维着, 它的发展形式就是假说。如图 9-4 所示, 演绎法只能发展发现, 因为研究结果不会超过前提, 而归纳法却可获得新发现; 归纳法需要运用各种理性的和非理性方法提出假说 (更恰当的命名是想法)。

14.2.3 环境分析

一分为二地对待环境和治理环境, 是控制事物的一种途径。

材料的腐蚀是腐蚀环境引起的, 因此, 如图 11-2 所示, 治理腐蚀环境与整顿各类结构并列为两大类的腐蚀防护措施。这种治理是看到环境的有害方面。

在第 13 章第 13.1、13.2 节还分别罗列了氢和阳极溶解的许多有利方面。此外, 没有岩石的腐蚀 (地质学叫做风化), 便没有土壤和农业, 也不会有溶洞, 长江三峡等旅游资源; 而材料的生产工艺正是控制外界条件 (即环境) 来改变材料的, 人才的教育过程也是要控制教育环境。

对于环境, 要一分为二地对待, 防止有害的, 应用有利的。

14.2.4 系统分析

材料的系统分析包括了性能、结构、过程、能量四个方面的分析。

材料的腐蚀是材料耐蚀性能的一种表现, 是材料在化学环境的作用下所表现的行为 (参见 [1-7] 性能的定义); 也是材料的结构的一种化学或电化学变化, 这种变化过程便是腐蚀过程; 能量对于结构稳定性、过程的进行以及性能的表现都有重要的影响。

图 5-13 示出材料问题中性能、结构、过程、能量这四要素之间的关系，第七章第二节分别从方法论角度论述了这四个概念。第二及第五章分别处理水溶液的普遍性腐蚀及干气体的高温氧化，都是分析在一定环境条件下的性能，都采用了热力学、动力学及结构学的方法，分别讨论了能量、过程及结构问题。

14.2.5 类比、应用和交叉

(1) 类比是一种创造性思维方法。科学上许多重要发现，借助了类比法。例如，惠更斯比较了光和声这两类现象，发现它们具有一系列相同的属性，如直线传播、反射、干涉等，从已知声的波动性，推论光也有波动性这个重要概念。又例如，德布洛伊对比了物质和辐照，提出了微观粒子具有波动性及两象性的大胆而重要的假说，并得到了随后的实验验证。

类比法不仅比较事物属性之间的相似，更应比较事物关系 [即 (1-12) 中的关系，(1-13) 中的 R]，即事物的结构相似性，然后用模拟法来研究问题。物有物理，事有事理，人有人理，若研究的对象是系统，则系统论的概念和方法可用于研究物、事和人。类比于材料，在 (9-18) 对中国的人才下了定义，并类比于材料论，在第 9 章第 9.5.2 节分析了在校培养人才（包括腐蚀与防护人才）的才能、知识结构、过程和能量四个问题。

图 9-1 曾类比合金的沉淀，讨论新概念的析出。

本书未讨论“液态金属腐蚀”及“熔盐腐蚀”，由于它们是化学腐蚀，类比于第 6 章的非金属材料的腐蚀，金属材料的这两类腐蚀主要是溶解，对于氧化性熔盐，还有第 5 章所讨论的高温氧化问题；当然也可发生沿晶溶解及成分的选择性溶解等局部性腐蚀（第 3 章）；若有应力存在，才可发生第 4 章讨论的应力腐蚀；也可用第 2 章所论述的水溶液中普遍性电化学腐蚀原理，来分析熔盐的电化学腐蚀。

善于应用类比法，不仅要求博学，还要求学而问，学且思，即博学、善问、深思：

易乾：“君子学以聚之，问以辩之。” (14-2)

论语为政篇 2.15：“学而不思则罔，思而不学则殆。” (14-3)

(2) 本书的两篇综论讲“病理”，而第四篇分论讲“处方”，是应用。孔子讲授“礼、乐、射、御、书、数”六门课，很重视学与用的结合，因此，在论语学而篇 1.1 开门见山就提出：

“子曰：‘学而时习之，不亦说乎？’” (14-4)

朱熹的论语集注把“时”解为“时常”、“习”解为“温习”，时常温习，可以温故而知新，感到喜悦（说）。杨伯峻译注^[14-9]将“习”解为“演习”、“实习”，因为乐、射、御等尤其非演习、实习不可，“时”用作副词，即“在一定的時候”、“在适当的時候”等，这样，杨伯峻译为：

“学了，然后按一定的时间去实习它，不也高兴吗？” (14-5)

似更合理。孔子这种实践与理论相结合的教育方法值得后世参考，本书的“病理”与“处方”，便是参考这种思想的表述方式。

(3) 参加解决材料腐蚀问题的实践，加深对材料腐蚀的认识。科学实验和研究是人类的一种社会实践形式，实践结果使人们对所研究的问题有所认识，这些认识记录在科学论文和专著之中。后人进行类似问题（例如材料的腐蚀）的研究时，首先，必须学习，通过学而思 (14-3)、学且问 (14-2)，从而经过逻辑中总结的概念、判断和推理的阶段，获得初步的理性认识。

上述的理性认识是从间接经验获得的，然而真正亲知的是天下实践着的人，这种“知”

是从直接经验通过科学的抽象得到的。

一个人的知识，不外上述的间接经验的和直接经验的两部分。有了这种理性认识还不够，还需要投入参加材料腐蚀问题的实践，毛泽东在《实践论》中指出：

“马克思主义的哲学认为十分重要的问题，不在于懂得了客观世界的规律性，因而能够解释世界，而在于拿了这种对于客观规律性的认识去能动地改造世界。”

(14-6)

因此，参加对解决材料腐蚀问题的实践，不仅能控制这种现象，抑制有害的，利用有益的；而且在实践中检验、纠正、发展和加深对材料腐蚀的认识，这是再实践-再认识的又一次循环。

(4) 在丰收的交叉地带去耕耘开拓。金属腐蚀学是在金属学及化学（包括电化学）的交叉地带形成的；本书提出的材料腐蚀学的两个分支——微观腐蚀学及宏观腐蚀学（图 1-2 及图 1-4）则是在更多的自然科学与社会科学的交叉地带中发展的，这是一个有丰收希望的领域^[14-10]。

我相信：

“人的生命在于新陈代谢；机构的效率需要吐故纳新；学科的发展在于交叉结合。”

(14-7)

参 考 文 献

- [14-1] 肖纪美. 金属材料的腐蚀问题——腐蚀金属学. 北京：中国工业出版社，1962
- [14-2] 肖纪美. 不锈钢的金属学问题. 北京：冶金工业出版社，1983
- [14-3] 张文奇，石声泰，肖纪美主编. 金属腐蚀手册. 上海：上海科技出版社，1987
- [14-4] 肖纪美. 材料的应用与发展. 北京：宇航出版社，1988，1990，1992
- [14-5] 肖纪美. 应用作用下的金属腐蚀. 北京：化学工业出版社，1990
- [14-6] 肖纪美. 腐蚀总论. 北京：化学工业出版社，1994
- [14-7] 肖纪美. 合金能量学. 上海：上海科技出版社，1985
- [14-8] 肖纪美. 材料学方法论. 北京：冶金工业出版社，1994
- [14-9] 杨伯骏. 论语译注. 北京：中华书局，1980
- [14-10] 维纳. 郝季仁译. 控制论. 北京：1962

[G e n e r a l I n f o r m a t i o n]

书名 = 材料腐蚀学原理

作者 =

页数 = 2 8 2

S S 号 = 1 1 0 6 8 1 5 5

出版日期 =

引论
第 1 章

1 . 1	材料	
1 . 2	材料学	
	1 . 2 . 1	材料问题
	1 . 2 . 2	学科分支
1 . 3	腐蚀	
	1 . 3 . 1	定义
	1 . 3 . 2	划分
1 . 4	腐蚀学	
	1 . 4 . 1	微观腐蚀学
	1 . 4 . 2	宏观腐蚀学
1 . 5	材料腐蚀学原理	
	1 . 5 . 1	书名
	1 . 5 . 2	结构

参考文献

第 2 篇

综论 (一)
第 2 章

	(一) 微观腐蚀学	
	电化学腐蚀——普遍性腐蚀	
2 . 1	电化学腐蚀途径	
2 . 2	均匀的电化学腐蚀	
	2 . 2 . 1	腐蚀电池
	2 . 2 . 2	腐蚀微电池
2 . 3	腐蚀电流密度	
	2 . 3 . 1	腐蚀金属电极的极化曲线
	2 . 3 . 2	极化电阻
	2 . 3 . 3	弱极化曲线
	2 . 3 . 4	强极化曲线
2 . 4	钝化	
	2 . 4 . 1	钝化膜
	2 . 4 . 2	能钝化的金属的阳极溶解曲线
	2 . 4 . 3	能钝化的金属电极的表观阳极极化曲线

参考文献

第 3 章

	局部腐蚀	
3 . 1	闭塞电池	
3 . 2	缝隙腐蚀和点蚀	
	3 . 2 . 1	缝隙腐蚀
	3 . 2 . 2	点蚀
3 . 3	晶间腐蚀	
	3 . 3 . 1	碳化铬沉淀引起的晶间腐蚀
	3 . 3 . 2	相沉淀引起的晶间腐蚀
	3 . 3 . 3	晶间腐蚀的实验方法
	3 . 3 . 4	M C 沉淀引起的晶间腐蚀
	3 . 3 . 5	晶界吸附引起的晶间腐蚀
	3 . 3 . 6	铁素体不锈钢的晶间腐蚀
	3 . 3 . 7	晶间腐蚀理论
	3 . 3 . 8	小结
3 . 4	成分选择性腐蚀	
	3 . 4 . 1	概论
	3 . 4 . 2	黄铜的脱锌

参考文献

第 4 章

	金属应力腐蚀断裂	
4 . 1	分析方法	
	4 . 1 . 1	历史分析
	4 . 1 . 2	逻辑分析
	4 . 1 . 3	系统分析

	4 . 2	主要因素	
	4 . 2 . 1	应力——力学因素	
	4 . 2 . 2	腐蚀——电化学因素	
	4 . 2 . 3	金属断裂——金属学因素	
	4 . 3	作用机理	
	4 . 3 . 1	阳极溶解机理	
	4 . 3 . 2	氢致开裂机理	
	参考文献		
第 5 章	高温氧化		
	5 . 1	氧化热力学	
	5 . 2	氧化动力学	
	5 . 2 . 1	恒温动力学曲线	
	5 . 2 . 2	温度影响	
	5 . 3	氧化膜结构和特性	
	5 . 3 . 1	氧化物的状态和特性	
	5 . 3 . 2	氧化膜的电子结构和电性	
	5 . 3 . 3	氧化膜内应力和力性	
	5 . 3 . 4	多层氧化膜和化学变化	
	5 . 4	氧化理论	
	5 . 5	影响因素	
	5 . 5 . 1	合金化	
	5 . 5 . 2	气体环境	
	参考文献		
第 6 章	非金属材料的腐蚀		
	6 . 1	引言	
	6 . 2	塑料	
	6 . 2 . 1	概述	
	6 . 2 . 2	结构	
	6 . 2 . 3	腐蚀	
	6 . 3	玻璃	
	6 . 3 . 1	概述	
	6 . 3 . 2	结构	
	6 . 3 . 3	腐蚀	
	6 . 4	混凝土	
	6 . 4 . 1	概述	
	6 . 4 . 2	结构	
	6 . 4 . 3	腐蚀	
	参考文献		
第 3 篇	综论 (二) 宏观腐蚀学		
第 7 章	方法论		
	7 . 1	分析方法	
	7 . 1 . 1	逻辑分析	
	7 . 1 . 2	历史分析	
	7 . 1 . 3	系统分析	
	7 . 1 . 4	环境分析	
	7 . 2	材料四论	
	7 . 2 . 1	性能论	
	7 . 2 . 2	结构论	
	7 . 2 . 3	过程论	
	7 . 2 . 4	能量论	
	7 . 3	结语	
	参考文献		
第 8 章	腐蚀经济和管理		
	8 . 1	收益递减律	
	8 . 1 . 1	表述	
	8 . 1 . 2	产出函数	
	8 . 1 . 3	科学技术是第一生产力	
	8 . 2	商品价格律	
	8 . 2 . 1	供需平衡	
	8 . 2 . 2	供需弹性	

	8 . 3	经济体制	
	8 . 3 . 1	类型与改革	
	8 . 3 . 2	经济增长方式	
	8 . 4	腐蚀经济损失	
	8 . 4 . 1	尤里格的估算	
	8 . 4 . 2	霍尔报告	
	8 . 4 . 3	N B S / B C L 模型	
	8 . 5	腐蚀管理	
	8 . 5 . 1	国家腐蚀中心	
	8 . 5 . 2	腐蚀失效分析	
	8 . 6	结语	
	参考文献		
第 9 章		腐蚀科研和教育	
	9 . 1	科研类型	
	9 . 2	科研选题	
	9 . 3	科研方法	
	9 . 3 . 1	学习与科研	
	9 . 3 . 2	推理方法	
	9 . 3 . 3	假说法	
	9 . 3 . 4	科研水平	
	9 . 4	科研管理	
	9 . 4 . 1	科研效益	
	9 . 4 . 2	科研效率	
	9 . 5	人才培养	
	9 . 5 . 1	概念	
	9 . 5 . 2	学校教育	
	9 . 5 . 3	在职教育	
	9 . 5 . 4	人文素质教育	
	9 . 6	治学方法——类比与交叉	
	9 . 6 . 1	引言	
	9 . 6 . 2	概念——内涵	
	9 . 6 . 3	概念——外延	
	9 . 6 . 4	交叉科学	
	9 . 6 . 5	创新与实践	
	9 . 6 . 6	小结	
	9 . 7	结语	
	参考文献		
第 1 0 章		可持续发展与生态	
	1 0 . 1	材料与环境	
	1 0 . 1 . 1	历史回顾	
	1 0 . 1 . 2	逻辑思考	
	1 0 . 1 . 3	系统分析	
	1 0 . 2	可持续发展法则	
	1 0 . 2 . 1	战略分析	
	1 0 . 2 . 2	治理对策	
	1 0 . 3	生态	
	1 0 . 3 . 1	概念	
	1 0 . 3 . 2	生态材料	
	1 0 . 4	广义的生态	
	1 0 . 4 . 1	广义	
	1 0 . 4 . 2	分析方法	
	1 0 . 5	结语	
	参考文献		
第 4 篇	分论		
	第 1 1 章	防护系统	
	1 1 . 1	概述	
	1 1 . 2	防腐蚀设计	
	1 1 . 2 . 1	选材	
	1 1 . 2 . 2	工程结构的耐蚀设计	
	1 1 . 2 . 3	防蚀设计备忘录	

1 1 . 3	防护涂层	
1 1 . 3 . 1	概念	
1 1 . 3 . 2	防蚀机理	
1 1 . 4	电化学保护	
1 1 . 4 . 1	概念	
1 1 . 4 . 2	阴极保护	
1 1 . 4 . 3	阳极保护	
1 1 . 5	治理环境	
1 1 . 5 . 1	概说	
1 1 . 5 . 2	锅炉用水的处理	
1 1 . 5 . 3	缓蚀剂	
1 1 . 6	结语	
	参考文献	
第 1 2 章	防护分论	
1 2 . 1	普遍性腐蚀	
1 2 . 1 . 1	概论	
1 2 . 1 . 2	电阻控制	
1 2 . 1 . 3	阴极控制	
1 2 . 1 . 4	阳极控制	
1 2 . 2	局部腐蚀	
1 2 . 2 . 1	缝隙腐蚀和点蚀	
1 2 . 2 . 2	晶间腐蚀	
1 2 . 2 . 3	成分选择性腐蚀	
1 2 . 3	金属应力腐蚀断裂	
1 2 . 3 . 1	金属	
1 2 . 3 . 2	应力	
1 2 . 3 . 3	腐蚀	
1 2 . 4	高温氧化	
1 2 . 4 . 1	有益的合金元素	
1 2 . 4 . 2	有害的合金元素	
1 2 . 4 . 3	其他有启发性的概念	
1 2 . 4 . 4	涂层	
	参考文献	
第 1 3 章	腐蚀的应用	
1 3 . 1	氢对于材料的有益作用	
1 3 . 2	阳极溶解的有益作用	
1 3 . 2 . 1	浸蚀	
1 3 . 2 . 2	化学加工	
1 3 . 2 . 3	抛光	
1 3 . 3	腐蚀广论	
1 3 . 3 . 1	环境介质	
1 3 . 3 . 2	腐蚀广论	
	参考文献	
第 5 篇	结论	
第 1 4 章	结论	
1 4 . 1	总结	
1 4 . 2	体会	
1 4 . 2 . 1	历史分析	
1 4 . 2 . 2	逻辑分析	
1 4 . 2 . 3	环境分析	
1 4 . 2 . 4	系统分析	
1 4 . 2 . 5	类比、应用和交叉	
	参考文献	