



材料失效分析

Failure Analysis of Materials

主讲教师：杨振国

单 位：材料科学系

办 公 室：先进材料楼 407室

联系方式：zgyang@fudan.edu.cn
65642523 (O)

课程基本信息



教学团队：杨振国、方晓生、蒋益明、江素华

课程类型：专业选修课（36学时）

课程代码： MATE130025.01

课程内容： 理论 (18学时) + 应用 (18学时)

课程网址： <http://jpkc.fudan.edu.cn/s/348/t/710/>

成绩评定： 平时成绩 + 读书报告 + PPT介绍
(30%) (30%) (40%)

第一章 材料失效分析概论



1.1 失效分析概述

1.2 失效分析的基本概念

1.3 失效分析的基本内容

1.4 失效分析学科的发展历程

1.5 失效分析工作者的应有素质

1.1 失效分析概述

1.1.1 基本状况

失效问题时时刻刻在发生，遍及各行各业。

据估算，各国每年因失效造成的经济损失占该国GDP的 2~4%。我国2012年、2013年、2014年的GDP分别为519322亿元、568845亿元， 636463亿元，以4% 估算，其损失值分别高达 20772亿元 (2012)、22753 亿元 (2013)、25451亿元 (2014) 。因此，失效分析的社会效益重大，经济效益巨大。

1.1.2 主要特点

失效分析是一门面向工程实际、面向未来的学科，它有二个基本特点：

- (1) 综合性：涉及许多学科和技术门类，学科交叉；
- (2) 经济性：与国民经济发展紧密相联，应用广泛。

1.1 失效分析概况

1.1.3 基本作用

- 失效分析是综合运用材料基础知识和其他分析方法开展事故调查与分析的，因而是一门发展中的交叉性的综合性学科。它的作用和意义主要有：
 - (1) 防止或减少同类事故的再发生，保障社会稳定；
 - (2) 明确事故的责任，维护用户的正当权益；
 - (3) 吸取经验教训，提高产品质量和可靠性；
 - (4) 通过逆向工程分析，为经济索赔提供技术依据；
 - (5) 促进材料科学的技术进步，为设计开发新材料和改进已有材料的性能从理论上指明方向。

1.2 失效分析的基本概念

1.2.1 失效的定义

- 《新华词典》的定义*

丧失功效或效力。 * 《新华词典》：p757, 1982

- 国标GB3187-82 《可靠性基本名词术语及定义》的定义

失效：产品丧失规定的功能，对可修复产品通常称为故障。

- 《材料大辞典》的定义*

失效，又称复合材料的破坏，指复合材料在经过某些物理、化学过程后（如载荷作用、材料老化、温度和湿度变化等）发生了尺寸、形状、性能的变化而丧失了规定的功能。

*师昌绪主编，材料大辞典，化学工业出版社，1994，p851

1.2 失效分析的基本概念

● 《美国金属学会手册》的定义*

按照 《ASM Handbook 》 的定义，服役的任何结构件出现以下三种状态之一时即为失效：

- (1) 完全不能修复时；
- (2) 仍可以使用，但不能满意地达到规定的功能时；
- (3) 受到严重损伤而不能继续安全可靠地使用时。

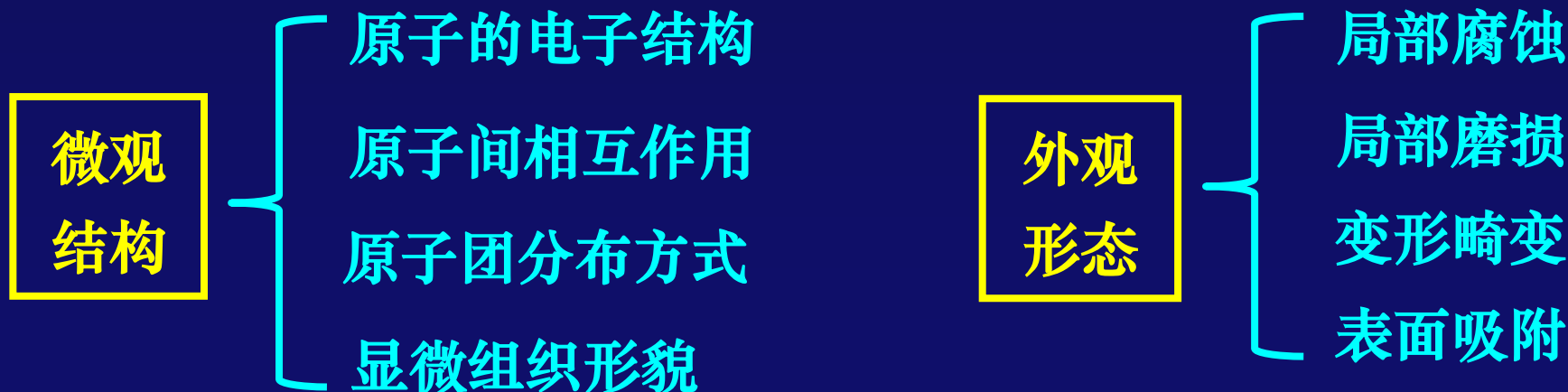
* ASM Handbook, Vol.11: Failure Analysis and Prevention (10th Ed.), ASM International, 2002, p2884

1.2 失效分析的基本概念

● 失效的新定义*

失效 (failure) 是指产品因**微观结构或外观形态**发生变化而不能满意地达到规定的功能。

根据其严重性，失效可称为事件 (incident)、事故 (accident) 或 故障 (fault)。



* 杨振国, 论失效分析的本质及其内在关系, 理化检验-物理分册: 2013年全国失效分析学术会议专辑 (大会特邀报告), 2013, **49** (S2): 1-3

1.2 失效分析的基本概念

1.2.2 失效分析的内容

失效分析是为失效的构件查明原因并采取预防措施所进行的一切技术活动。它相当于材料诊断学，运用各种分析仪器和方法，对断口（缺陷）进行综合分析，查明失效原因，并采取措施防止同类失效的再发生，故一般涉及五项内容：

- (1) 判定失效模式 (failure mode)
- (2) 界定失效缺陷 (failure defect)
- (3) 鉴定失效机理 (failure mechanism)
- (4) 确定失效起因 (failure cause)
- (5) 提出解决对策 (countermeasure)

1.2 失效分析的基本概念

1.2.3 失效分析的相互关系

● 失效分析是确定构件的失效模式、失效缺陷、失效机理与失效起因之间的相互关系。

◆ 失效模式

失效模式是指构件失效后的外观表现形式，即可观察到的、可测量的失效的宏观特征。比如：脆性断裂、疲劳开裂、接触磨损等。

根据构件失效的外观特征，失效模式应有**五种**：

- (1) 断裂 (fracture)
- (2) 腐蚀 (corrosion)
- (3) 磨损 (wear)
- (4) 畸变 (distortion)
- (5) 衰减 (attenuation): 微结构随时间、环境等因素渐变劣化

1.2 失效分析的基本概念



◆ 失效缺陷

失效缺陷是导致构件损伤或损坏的实际缺陷。
比如：裂纹、腐蚀坑、磨损带、分层等。

◆ 失效机理

失效机理是致使构件失效所发生的物理、化学的变化过程，即失效的微观机制。比如：腐蚀模式下的电偶腐蚀、缝隙腐蚀、晶界腐蚀、点蚀等。

◆ 失效起因

失效起因是促使失效机理起作用的主要因素。
比如：超载、疲劳载荷、电极电位差、微动摩擦等。

1.2 失效分析的基本概念



- 泰坦尼克号的失效模式、机理、缺陷与起因的关系
泰坦尼克号是20世纪初世界上最大的豪华游轮。

它长260m、宽28m、高51m、吨位46328t，可载客3000多人，总耗资7500万英镑。船体结构的设计采用了双壳层和十六个相互隔离的水密舱等安全措施，因而当时被认为是一艘“永不沉没的”巨轮。

它的处女航是在1912年4月10日从英国南安普顿出发前往纽约的，航速为22节，但4月14日晚11:40分在北大西洋与一块漂浮的大冰山相撞，由于船体左侧六个前仓壳体破裂进水，2小时47分后就沉没了。

船上共有2208人，仅705人获救，1503人葬生海底，这是迄今为止世界上发生的最大的海事事故。

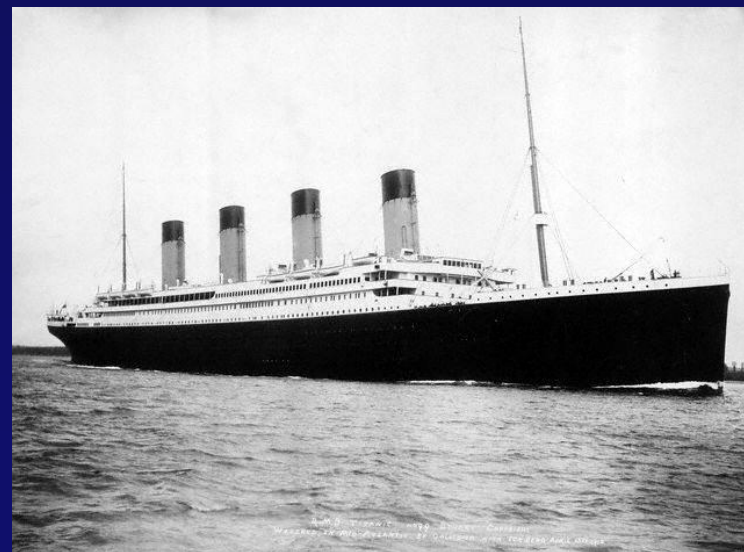
● 泰坦尼克号沉没过程解析



(a) 航行路线



(b) 出发时



(c) 航行中

图1-1 泰坦尼克号处女航路线图

失事地点



(a) 冰山撞击地点



(b) 船体沉没断裂情景

图1-2 泰坦尼克号沉没过程

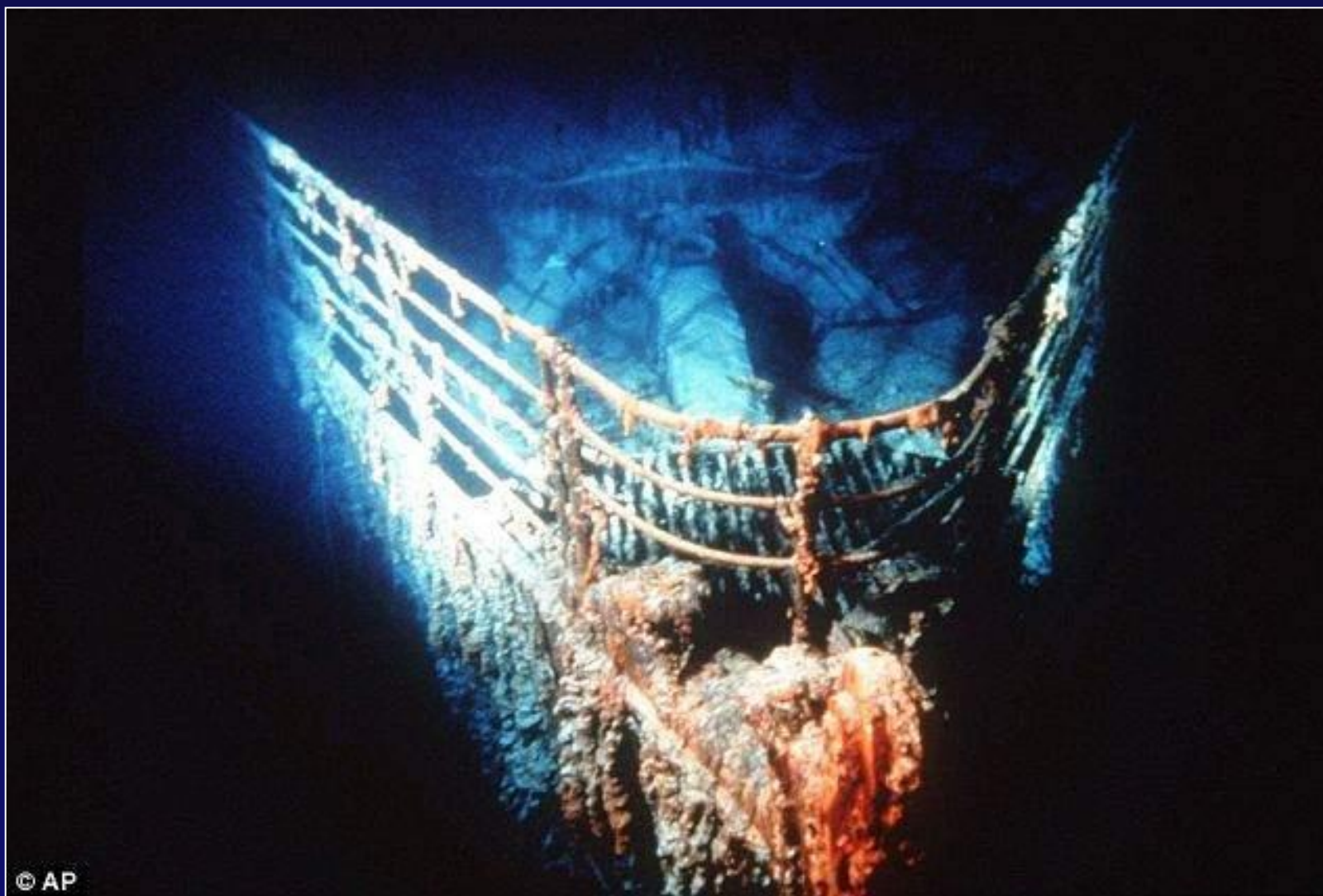
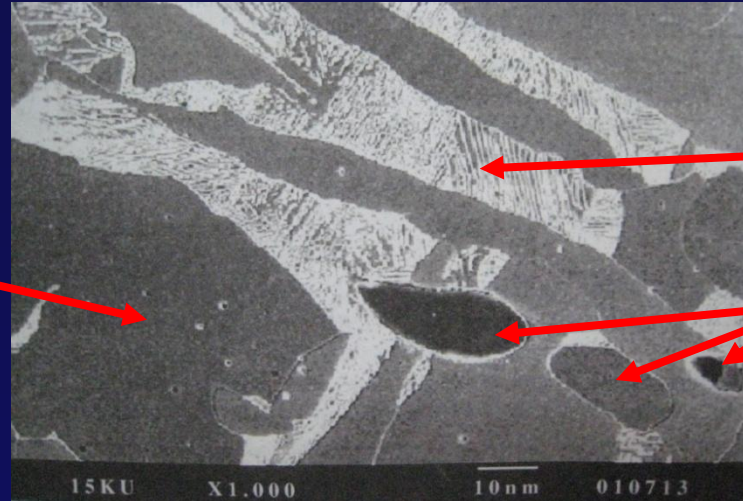


图1-3 沉没在北大西洋海底的泰坦尼克号船头

● 泰坦尼克号船板备用件的性能检验

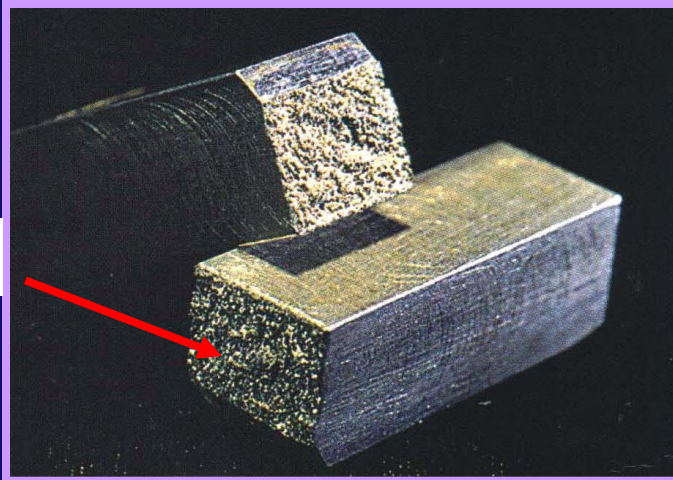


珠光体组织（白色）

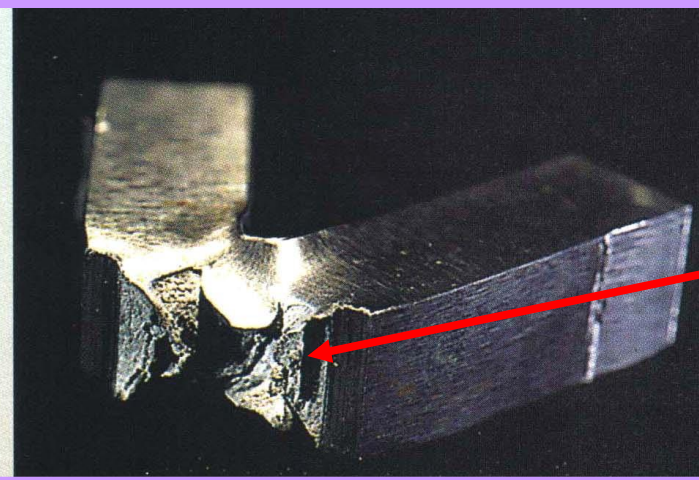
铁素体组织（灰色）

MnS夹杂物（黑色）

(a) 泰坦尼克船板的金相组织



脆断形貌



延断形貌

(b) 泰坦尼克船板的冲击断口 (c) 现代船板的冲击断口

图 1-4 泰坦尼克号船板的金相组织和冲击断口

1.2 失效分析的基本概念

● 事故调查结论

在对泰坦尼克号船板备用件进行性能检测后，发现有大量的MnS夹杂物，其纵横向韧脆转变温度分别为 32°C 、 56°C ，而当时的水温是 -2°C 。

可以推定，泰坦尼克号与冰山相撞时的失效特征是脆性断裂 (失效模式)，这是因为船板及铆钉中均含有大量的MnS夹杂物及其它有害的超标元素P等。船板在冰山碎块的持续碰撞作用下，脆性夹杂物处引发了许多裂纹 (失效缺陷)，这些裂纹随后发生了快速的疲劳裂纹扩展 (失效机理)，最终导致船板的断裂。

因此，泰坦尼克号的失效是由船板和铆钉中大量的MnS 夹杂物和冰山撞击力的相互作用下发生的疲劳断裂所引起的 (失效起因)。

1.3 失效分析的基本特点

1.3.1 失效分析的内在关系

从本质上讲，任何材料的失效过程都会经历从**产品**到**构件**、从**构件**到**损伤**的二个不同阶段，即“**六品**”、“**五件**”、“**四化**”。正确理解它们的本质含义及其相互关系，对开展有效的失效分析是至关重要的。

- **六品（产品）**

制品、成品、半成品、物品、次品、废品。

- **五件（构件）**

零件、部件、**组件**、元件、器件。

- **四化（损伤）**

劣化(微观)、**退化**(细观)、**脆化**(宏观)、**老化**(外观)。

1.3 失效分析的基本特点

1.3.2 失效分析的复杂性

一项事故的发生，一般不是仅由一种因素引起的，常常涉及多种因素的相互作用。例如，2011年7月23日发生在浙江的甬温线高速动车追尾相撞事故，造成**40人死亡、193人受伤的重大事件**，便是一个典型案例。这是一起由**设备故障、操作不当**等多种因素交互作用所造成的事故。



图1-5甬温段两辆高铁之间的撞车事故

1.3 失效分析的基本特点

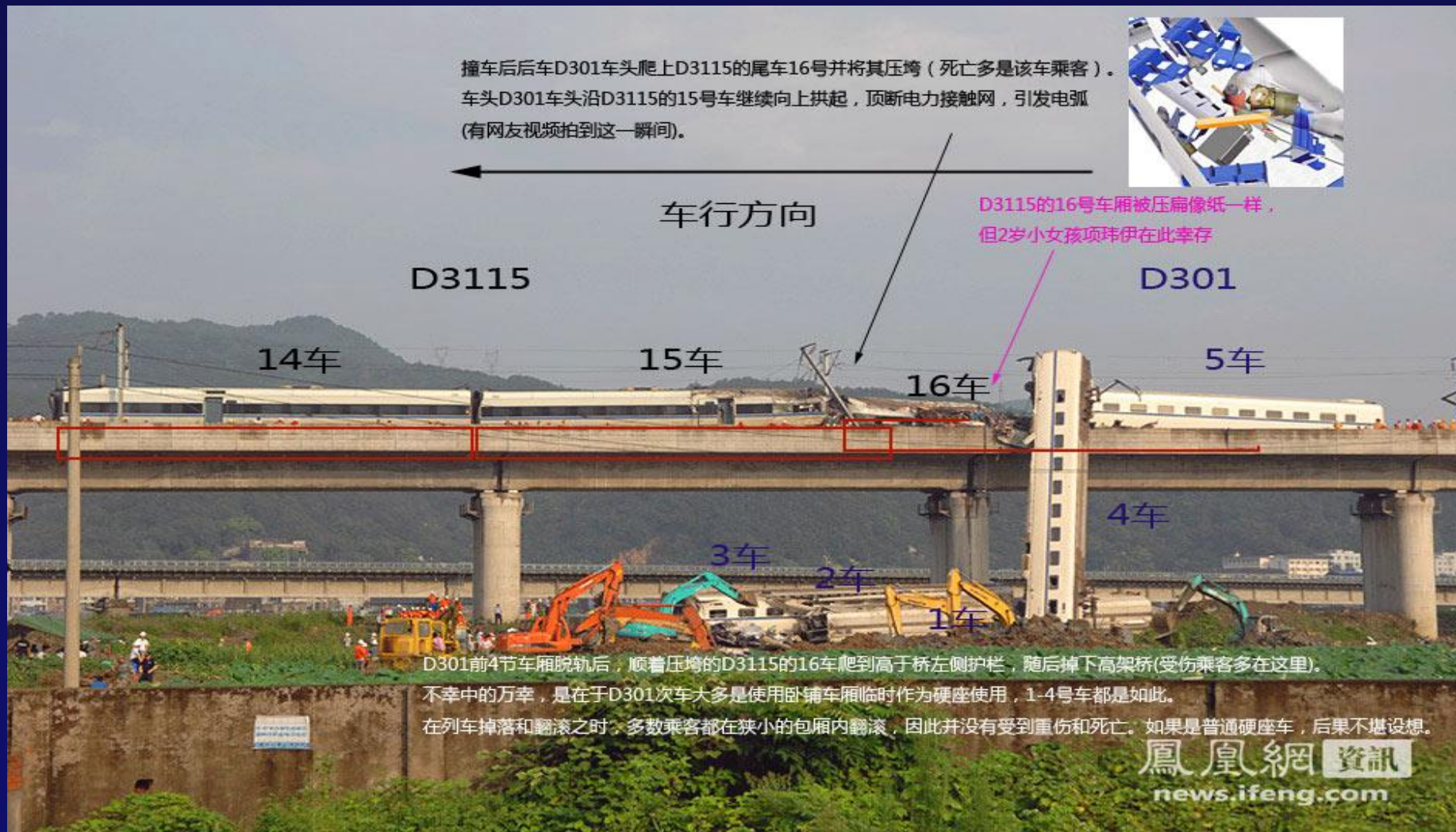


图1-6 甬温段两辆高铁相撞后的事故现场

1.3 失效分析的基本特点

1.3.3 失效分析的综合性

产品质量管理一般实行“五要素”法或“六要素”法管理：

“人、机、料、法、环”（4M1E分析法）



“人、机、料、法、环、测”（5M1E分析法）

但产品的失效分析更为复杂，分析人员不仅要有材料、工艺、结构、力学、控制、检验等专业知识，还要懂得安装、维护、运行、环境等工程知识，同时还要熟悉生产中涉及的标准、规范、规程，甚至懂得包括心理学等在内的一些管理知识。

1.3 失效分析的基本特点

● 失效的影响因素

- (1) 材料选用不适
- (2) 结构设计欠妥
- (3) 制造质量一般
- (4) 安装方式不当
- (5) 检测方式不妥
- (6) 组织性能劣化
- (7) 维护过程疏漏
- (8) 人员操作有误
- (9) 工况介质复杂
- (10) 外部环境变化
- (11) 失效机理不明
- (12) 防护措施简单
- (13) 管理制度不严

1.3 失效分析的基本特点

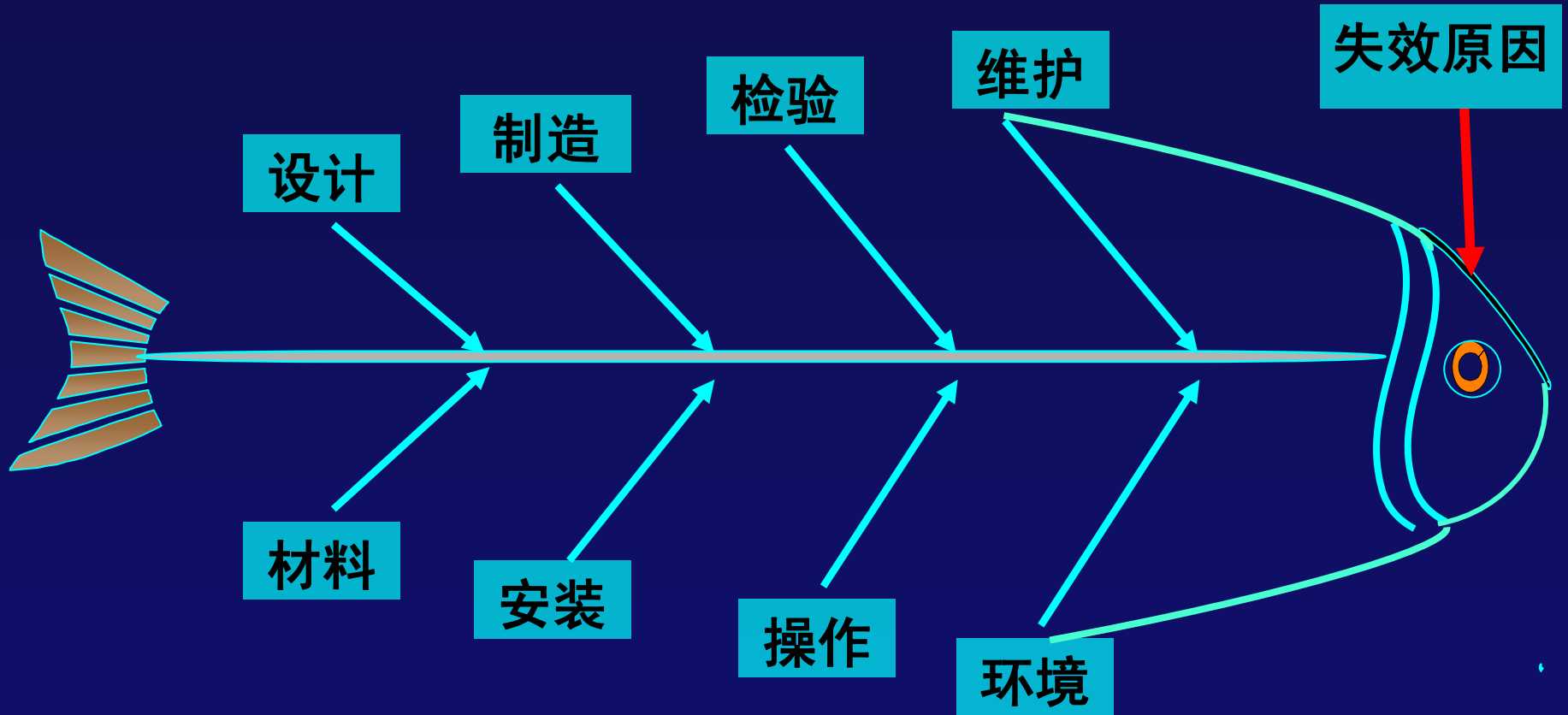
1.3. 4 失效分析的系统性

从结构完整性的考虑，一个构件失效的原因分析，从技术层面上应该涉及八个方面：

- (1) 设计 (design)
- (2) 材料 (material)
- (3) 制造 (fabrication)
- (4) 安装 (installation)
- (5) 检验 (inspection)
- (6) 操作 (operation)
- (7) 维护 (maintenance)
- (8) 环境 (environment)

1.3 失效分析的基本特点

● 失效分析的鱼骨图



- 失效分析是事后分析，最佳方法应是事前分析，
比如，FMEA (Failure Modes and Effect Analysis)、
RBI (Risk-based Inspection), etc.

1.3 失效分析的基本特点

1.3. 5 失效分析的主要步骤

- (1)现场检查：运行史、工艺流程、图纸核对、取样等；
- (2)外观检测：断口(缺陷)宏观形态及异物等的观察分析；
- (3)微观分析：断口(缺陷)的微观形貌观察和成分测定；
- (4)性能检验：力学、物理、化学等性能的试验和检测；
- (5)环境评定：工况介质、周围异物等测试和评定；
- (6)模拟试验：失效现象再现的实验验证（按需开展）；
- (7)事故结论：分析结果必须快速又正确；
- (8)解决对策：治理方案必须简单且有效。

1.4 失效分析学科的发展历程

1.4.1 失效分析的意义

如果说，社会发展史是不断与失败作斗争的历史，材料发展史则是不断与失效作斗争的历史。

失效分析的意义主要有：

- (1) 事故责任的法律认定；
- (2) 防止事故的再发生；
- (3) 提高产品的可靠性；
- (4) 促进新材料的研发。

因此，失效分析作为一门综合性学科，不仅对社会稳定和国民经济发展起保障和促进作用，而且对新材料的研发和新产品的开发有重要的工程价值和科学意义。

1.4 失效分析学科的发展历程

1.4.2 美国的失效分析发展概况

美国现有300多家研究所承担失效分析的研究工作。

- 国防、军工、核电、宇航等领域的失效分析，主要由国家级研究机构承担。比如，橡树岭国立研究所、NASA、肯尼迪中心、约翰逊中心、西南研究院等。
- 民用工业领域的失效分析，则在各大公司和大学研究机构内进行，如Amoco研究中心、MIT、西北大学等。
- 美国金属学会 (ASM) 是最早出版《失效分析手册》的权威机构，从1923年起就编辑出版《金属手册》各分卷，目前已出版 23卷。例如，10th Ed, Vol.11, 《Failure Analysis and Prevention》(2002)，ASM International 从2000年起还出版国际期刊：《Journal of Failure Analysis and Prevention》。

1.4 失效分析学科的发展历程

1.4.3 英国的失效分析发展概况

- 英国从事失效分析的、著名的大型研究机构有：
 - 国立工程研究所 (NEL) ;
 - 国立物理研究所 (NPL) ;
 - 中央电力局 (CEGB) ;
 - 英国石油 (BP) ;
 - 英国煤气天然气公司 (BG) ;
 - 以及分布在许多高校里的失效分析研究机构。
- 1994年, 英国与欧洲结构完整性协会 (European Structural Integrity Society) 合作, 一起出版了失效分析领域第一本国际期刊及其案例研究期刊:
 - 《Engineering Failure Analysis》(1994);
 - * 《Case Studies in Engineering Failure Analysis》(2013)。

1.4 失效分析学科的发展历程

1.4.4 德国的失效分析发展概况

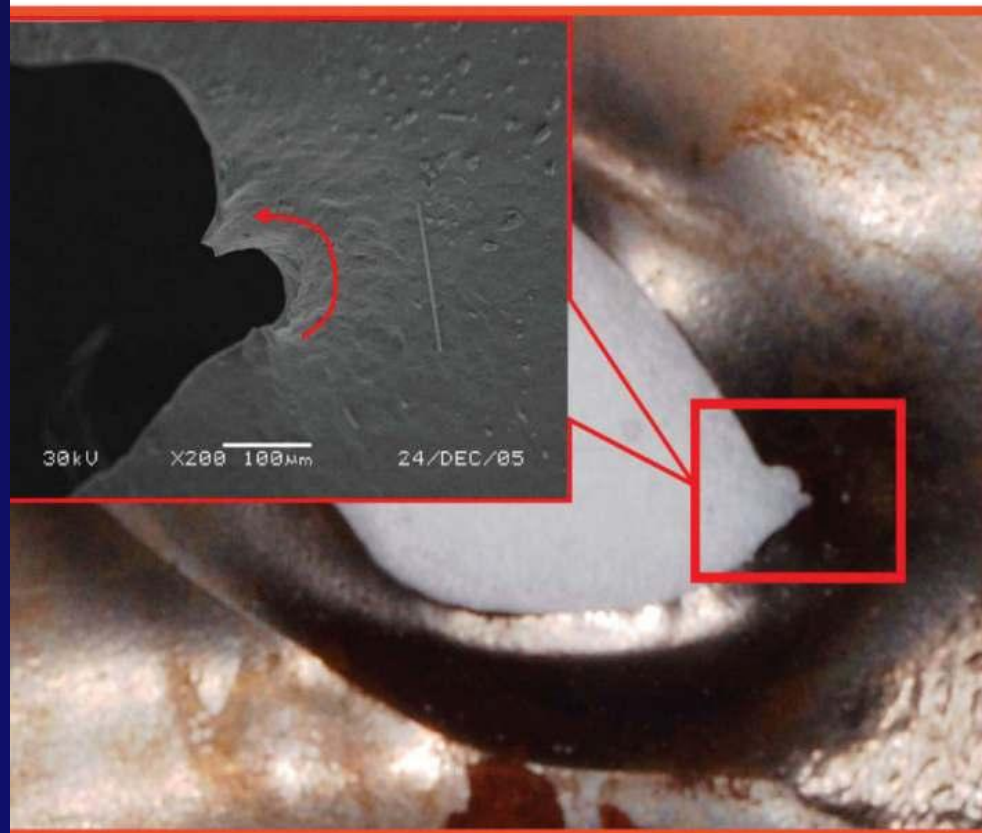
- 德国共有500多个研究机构和保险公司，专门从事失效分析的研究，是世界组织化程度最高的国家。
- 德国国家投资建设了一批材料检验中心(MPA)。国家技术监督部门(TUV)还强制规定，凡机器设备发生失效事故，必须申报备案开展失效原因分析。
- 自1949年起，德国就出版了与工业腐蚀失效密切相关的国际权威期刊：

《Materials and Corrosion》

同时出版了德文版的《机械失效》杂志等。

Materials and Corrosion

1/2012



我们的论文
刊登在该杂
志的封面上



www.matcorr.com



1.4 失效分析学科的发展历程

1.4.5 国际失效分析学术会议简介

当今国际学术界以失效分析为主题,已定期举办三种类型的失效分析会议,涵盖了结构材料和功能材料发生的不同类型的失效问题。它们分别是:

- ICEFA (International Conference on Engineering Failure Analysis) “国际工程失效分析会议”:
始于2004年,每二年一届,侧重于结构材料的失效分析。
- IPFA (International Symposium on the Physical and Failure Analysis of Integrated Circuits) “国际集成电路物理与失效分析会议”:
始于1987年,2003年起每年一届,侧重功能材料的失效分析。
- ISTFA (International Symposium for Testing and Failure Analysis) “国际测试和失效分析会议”:
始于1974年,每年一届,着重于功能材料的失效分析及测试分析方法。

1.4 失效分析学科的发展历程

1.4.6 中国的失效分析发展概况

- 我国从上世纪70年代起就加强了失效分析的研究。
1980年8月，中国机械工程学会材料分会成立暨全国失效分析研讨会在北京举行。
- 1986年8月，中国机械工程学会失效分析工作委员会成立，北航的钟群鹏院士任主任委员。以后曾不定期地组织召开了几次大型战略研讨会。例如，全国二十多个一级学会曾分别于1987年、1992年、1998年，联合召开了“机电装备失效分析预测预防战略研讨会”。
- 1993年，中国机械工程学会失效分析工作委员会正式更名为中国机械工程学会失效分析分会，钟群鹏院士担任首届理事长。

1.4 失效分析学科的发展历程

- 1994年7月，中国科协组建了由全国24个一级学会参加的最高权力机构“全国失效分析和预防中心”。
我国知名学者师昌绪院士、周惠久院士、肖季美院士、钟群鹏院士、李鹤林院士、徐滨士院士、柯伟院士、李依依院士、涂铭旌院士、陈蕴博院士等均积极参与，2010年国家最高科技奖获得者、著名失效分析专家师昌绪院士任名誉主任。
- 2003年4月起，中国机械工程学会失效分析分会换届，中石油的李鹤林院士任第二届理事会理事长，任职至今。
- 中国机械工程学会失效分析分会和理化检验分会经协商，从2005年起联合举办每二年一届的“全国失效分析学术会议”，每届以专刊出版会议论文集。前五届分别是：2005(广州)、2007(长沙)、2009(上海)、2011(西安)、2013(大连)，以及2015(北京、正在筹备中)。

1.5 失效分析工作者的应有素质

● 鉴于事故责任认定的重要性、复杂性和特殊性，一个失效分析工作者应该做到以下七点：

- (1) 品德高于技术：实事求是，客观公正，敬业负责；
- (2) 调查重于理论：深入现场，观察迹象，寻找旁证；
- (3) 宏微观相结合：宏观是表象，微观是本质，分析要精准；
- (4) 综合知识并重：勤学多问，理论与实践相结合；
- (5) 团队合作至上：个人知识有限，集体力量无限；
- (6) 系统完整严密：前后一致，因果一致，推论可信；
- (7) 快速正确有效：分析快速，结论正确，实施有效。

本课程的教学内容和学时安排



课程教学内容及其36学时的进度安排如下：

| | | |
|-----|--------------|-------|
| 第一章 | 材料失效分析概论 | 4 学时 |
| 第二章 | 材料断裂失效形式与机理 | 4 学时 |
| 第三章 | 材料腐蚀失效形式与机理 | 4 学时 |
| 第四章 | 材料磨损失效形式和机理 | 2 学时 |
| 第五章 | 材料表征分析方法 | 6 学时 |
| 第六章 | 重大设备与器件的失效分析 | 16 学时 |

本课程教学主要参考书



1. C. R. Brooks & A. Choudhury, **Failure Analysis of Engineering Materials (中译本)**, McGraw-Hill, 2002.1
2. 钟群鹏主编, **材料失效诊断、预测和预防**, 中南大学出版社, 2009.9
3. ASM Handbook, **Failure Analysis and Prevention (10th Ed., Vol.11)** , ASM International, 2002
4. E. S. Greenhalgh, **Failure and Fractography of Polymer Composites**, Woodhead Publishing Limited, 2009
5. Lawrence C. Wagner, **Failure Analysis of Integrated Circuits**, Kluwer Academic Publishers, 1999
6. 张 栋等编著, **失效分析**, 国防工业出版社, 2005.5
7. 杨振国编著, **印制电路板的失效分析 (培训讲义)** , 中国印制电路行业协会 (CPCA) , 上海, 2008.9
8. Z. G. Yang, Y. Gong, **Chapter 8 Failure analysis of heat exchanger tubes in petrochemical industry: microscopic analysis approach**, Handbook of materials failure analysis with case studies from oil and gas industry, Elsevier, 2015

第一章 练习题

1. 概述失效分析学科有哪些特点。
2. 失效是什么？它与事故、事件、故障有什么关系？
3. 失效分析的作用和意义是什么？
4. 失效模式有哪几种？概述失效模式、失效机理、失效缺陷、失效起因的物理含义，并举例说明它们的相互关系。
5. 简要说明材料失效分析涉及的“六品”、“五件”和“四化”的物理含义。
6. 一个结构件的失效分析，一般需要考虑哪些因素？
7. 简述一下失效分析过程中的主要步骤。
8. 一辆自行车是由许多零部件组装而成，你认为哪些最容易发生失效，它们的失效模式可能有哪些？
9. 设想一下有没有永远不会失效的材料。如有，请举例并从失效模式和失效机理出发叙述其理由。
10. 简谈国内外失效分析学科的发展状况。