

历年金属学试题（含答案）

二 00 二年试题：

一. 名词解释（20 分，每个 2.5 分）

- (1) 点阵畸变 (2) 柏氏矢量 (3) 相图 (4) 过冷度
(5) 形变织构 (6) 二次再结晶 (7) 滑移系 (8) 孪生

二. 画出立方晶系中 (111) 面、(435) 面。写出立方晶系空间点阵特征。（10 分）

三. 铸锭的一般组织可分为哪几个区域？写出其名称。并简述影响铸锭结晶组织的因素。（10 分）

四. 画图并简述形变过程中位错增殖的机制。（10 分）

五. 写出菲克第一定律的数学表达式，并说明其意义。简述影响扩散的因素。（10 分）

六. 简述形变金属在退火过程中显微组织、存储能及其力学性能和物理性能的变化。（10 分）

七. 简述固态相变与液态相变的相同点与不同点。（10 分）

八. 画出铁碳相图，标明相图中各特征点的温度与成分，写出相图中包晶反应、共晶反应与共析反应的表达式。（10 分）

九. 分析再过程中行核和长大与凝固过程中的行核和长大有何不同点。（10 分）

十. 分析含碳量 0.12% 的铁碳合金的结晶过程。（10 分）（单考生做）

十一. 简述铸锭的宏观偏析。（10 分）（单考生做）

十二. 简述金属晶体中缺陷的类型。（10 分）（单考生做）

答案：

- 一，1，点阵畸变：在局部范围，原子偏离其正常的点阵位置，造成点阵畸变。
2，柏氏矢量：描述位错特征的一个重要矢量，它集中反映了位错区域内畸变总量的大小和方向，也是位错扫过后晶体相对滑动的量。
3，相图：描述各相平衡存在条件或共存关系的图解，也可称为平衡时热力学参量的几何轨迹。
4，过冷度：相变过程中冷却到相变点以下某个温度后发生转变，平衡相变温度与该实际转变温度之差称过冷度。
5，形变织构：多晶形变过程中出现的晶体学取向择优的现象。
6，二次再结晶：再结晶结束后正常长大被抑制而发生的少数晶粒异常长大的现象。
7，滑移系：晶体中一个滑移面及该面上的一个滑移方向的组合称一个滑移系。
8，孪生：晶体受力后，以产生孪晶的方式进行的切变过程。

二，立方晶系中 (111) 面、(435) 面图略。立方晶系空间点阵特征是点阵参数有如下关系： $a=b=c$ ， $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$ 。也可用具有哪类对称元素表示，若有四个三次转轴，则对应立方点阵。

三，分为三晶区：激冷区、柱状晶区、中心等轴晶区。

影响铸锭结晶组织的因素：1，液体过冷度，越小越好。2，凝固温度范围，越大越好，有利于枝晶的破碎。3，温度梯度，越小越有利于等轴晶。4，合金熔点低，温度梯度小。5，搅拌或加孕育剂。

四，frank-read 源机制，图略见课本。滑移面上一个在 A, B 两点被钉扎的位错 AB，在应力作用下弓出（状态 2），弓出到 3 状态时，下方相邻部分反号相吸，并局部合并，完成一次增殖过程放出一位错环（状态 4）。在应力作用下，继续重复前面 1-4 过程。

五，一维下， $J = -D \frac{dc}{dx}$ ；J：扩散流量，单位时间通过单位面积扩散的物质质量，D：扩散系数， $\frac{dc}{dx}$ ：浓度梯度， $\frac{dc}{dx}$ ：其意义为物质扩散量与该物质的浓度梯度成正比，方向相反。

影响扩散的因素：1，温度，满足 $D = D_0 e^{-\frac{Q}{RT}}$ 的关系，T 升高，D 增加。2，界面表面及位错，是扩散的快速通道。3，第三组元，可对二元扩散有不同影响，如 Mo、W 降低 C 在 γ -Fe 中的扩散系数，Co、Si 加速 C 扩散，Mn 影响不大。4，晶体结构，低对称性的晶体结构中，存在扩散的各向异性，如六方结构晶体，平行与垂直于基面的扩散系数不同。5，熔点，同一合金系中，同一温度下熔点高的合金中扩散慢，熔点低的扩散快。

六，随退火温度的升高或时间延长，出现亚晶合并长大，再结晶晶核及长大，无位错的等轴再结晶晶粒取代长条状高位错密度的形变晶粒，然后是晶粒正常长大。储存能逐渐被释放，硬度及强度下降，伸长率上升，电阻降低，密度提高。再结晶时各种性能变化都比回复时强烈得多。

七，相同点：都是相变，由形核、长大组成。临界半径，临界形核功形式相同。转变动力学也相同。

不同之处：形核阻力中多了应变能一项，金属固态相变的临界半径及形核功增大，新相可以亚稳方式出现，存在共格，半共格界面，特定的取向关系，非均匀形核。

八，铁碳相图。略

包晶反应： $L(0.53\%C) + \delta\text{-Fe}(0.09\%C) \rightarrow \gamma\text{-Fe}(0.17\%C)$

共晶反应： $L(4.3\%C) \rightarrow \gamma\text{-Fe}(2.11\%C) + Fe_3C(6.69\%C)$

共析反应： $\gamma\text{-Fe}(0.77\%C) \rightarrow \alpha\text{-Fe}(0.02\%C) + Fe_3C(6.69\%C)$

九，凝固时形核的驱动力，是新、旧化学位差，再结晶驱动力只是形变储存能。

凝固常是均匀形核，再结晶形核在现有的形变不均匀区，如晶界附近、切变带、形变带、第二相粒子周围。凝固长大时与母相不会有取向关系，再结晶长大时可有特定取向关系。

十，含碳 0.12% 的钢，由液相冷却时，先形成铁素体，到 1495℃ 包晶温度，部分进行包晶反应；新相奥氏体在已生成的铁素体上形核并向铁素体和液相中生长。反应后是两相组织铁素体+奥氏体，图略。铁素体相对量为： $(0.17-0.12)/(0.17-0.09)=62.5\%$ 。继续冷却得到单相奥氏体。

十一，宏观偏析：正常偏析和比重偏析。

正常偏析：指按合金的分配系数先析出的含溶质低，后凝固的含溶质多。因铸锭尺寸大，由表面到中心成分不均匀，偏析出现在宏观尺度上，称宏观偏析。

反常偏析：仍遵守分配系数关系，只是形成大量枝晶后，富集溶质的液相会沿枝晶间的通道逆向回流到先凝固的铸锭表面附近，从而由表面到中心成分分布的反常。

比重偏析：是凝固时，固相与液相比重不同，而沉积或漂浮，从而造成铸锭下端与上端成分的不均匀，也是宏观尺度。

十二，按尺寸分为：点缺陷，如溶质、杂质原子、空位；线缺陷，如位错；面缺陷，如各种晶界、相界、表面等；体缺陷，如孔洞、气泡等。体缺陷对材料性能是绝对有害的。

说明:

- 1, 答案应该都是正确的, 但打字的过程中难免出现错误。
- 2, 用 word 中的公式编辑器编辑的公式可能显示不正常, 有的公式干脆就略了。
- 3, 题目中的图片都没有给出。以后可能会补上。

二 00 三年

二 00 三年试题: [20080304]

1. 名词解释 (30 分):

- (1) 刃型位错和螺型位错模型
- (2) 晶界与界面能
- (3) 同分凝固与异分凝固
- (4) 形变织构
- (5) 二次再结晶
- (6) 淬透性与淬硬性

2. 简述二元系中共晶反应、包晶反应和共析反应的特点; 并计算其各相平衡时的自由度。(12)
3. 什么是点阵参数? 正方晶系和立方晶系的空间点阵特征是什么? 画出立方晶系中(1 2 -3)的晶面。(12)
4. 凝固过程中形核和长大与再结晶过程中形核和长大主要区别是什么? 简述再结晶过程中核心的产生方式。(12)
5. 简述菲克第一定律和菲克第二定律的含义, 写出其表达式, 并标明其字母的物理含义。(12)
6. 简述晶界和晶粒大小对多晶体范性变形的作用与影响。(12)
7. 什么是一次带状组织和二次带状组织? 分析一次带状组织和二次带状组织形成的原因。(12)
8. 画出 Fe-C 相图, 标明 Fe-C 相图中各点的温度和含碳量。(12)
9. 简述固态相变的一般特点。(12) (统考生做, 单考生不做)
10. 简述凝固过程的宏观特征, 叙述凝固过程中晶体成长的机理。(12) (统考生做, 单考生不做)
11. 什么是固溶体? 影响固溶体的原因有哪些? 固溶体与其纯溶剂组元相比, 其结构、力学性能和物理性能发生了哪些变化?(12) (统考生做, 单考生不做)
12. 列举三种增加凝固过程中核心数的方法, 简要分析其增加核心数的原因。(12) (统考生做, 单考生不做)
13. 简述含碳量为 0. 25% 的钢的结晶过程和固态组织转变过程。(12) (统考生做, 单考生不做)
14. 简述连续脱溶和不连续脱溶的含义。(12) (统考生做, 单考生不做)
15. 根据缺陷相对与晶体尺寸和其影响范围的大小, 缺陷可以分为哪几类? 简述这几类缺陷的特征。(12) (统考生做, 单考生不做)

答案:

一, 1, 刃型位错和螺型位错模型: 将晶体上半部切开, 插入半个晶面, 再粘合起来; 这样, 在相当于刃端部为中心线的附近一定范围, 原子发生有规则的错动。其特点是上半部受压, 下半部受拉。这与实际晶体中的刃型位错造成的情景相同, 称刃型位错模型。同样, 将晶体

的前半部切开,以刃端为界使左右两部分沿上下发生一个原子间距的相对切变,再粘合起来,这时在已切动和未切动交界线附近,原子错动情况与真实的螺位错相似,称螺型位错模型。

2,晶界与界面能:晶界是成分结构相同的同种晶粒间的界面。界面上的原子处在断键状态,具有超额能量。平均在界面单位面积上的超额能量叫界面能。

3,同分凝固与异分凝固:凝固时不发生成分变化的称同分凝固;反之,凝固时伴随成分变化,称异分凝固。

4,形变织构:多晶形变过程中出现的晶体学取向择优现象。

二次再结晶:再结晶结束后正常长大过程被抑制而发生少数晶粒异常长大的现象。

6,淬透性与淬硬性:淬透性指合金淬成马氏体的能力,主要与临界冷却有关,大小用淬透层深度表示。而淬硬性指淬火后能达到的最高硬度。主要与钢中的碳含量有关。

二,共晶反应是:液相同时凝固出两个不同成分的固相相互配合生长,一般长成片层状。

共析与共晶相似,只是母相是固相,即一个固相同时生成另两个不同成分的固相。

包晶反应是:液相与一个固相反应生成另一个固相,新生成的固相包住原有的固相,反应需要固相中的扩散,速度较慢。

这三种反应出现时,自由度都是0,即三相成分固定,温度也固定。

三,点阵参数是描述点阵单胞几何开关的基本参数,由六个参数组成,即三个边长 a 、 b 、 c 和它们之间的三个夹角 α 、 β 、 γ 。

正文晶系的点阵参数特征是 $a \neq b \neq c$, $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ 。

立方晶系的点阵参数特征是 $a=b=c$, $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$

立方晶系中(123)的晶面特征图略。

四、凝固时形核和长大的驱动力是新、旧相化们差,再结晶器形核和长大的驱动力只是形变储存能。

凝固时的形核常为均匀形核;再结晶形核常在现有的形变不均匀区中,如晶界附近、切变带、形变带、第二相粒子周围;凝固长大时与母相不会有取向关系,再结晶长大时可能有一定的取向关系。

再结晶核心产生方式:1,原有晶界推移成核,也称应变诱导晶界迁移式形核;2,亚晶成核,即通过亚晶合并或长大形成新晶粒。

五、菲克第一定律第二定律,见课本。

六,多晶中,每个晶粒与周围相邻晶粒取向不同,滑移开始的早晚不同,滑移系数目也不同;晶粒间的协调是靠有足够的独立滑移系的开动来实现的,即某一晶粒在一特定力轴作用下,取向因子大的滑移系先开动,当相邻晶粒相接触的区域受到周围晶粒的影响而不能自己主滑移系开动进行形变时,可开动次生的、新的滑移系,以协调各种复杂的形变方式;FCC/BCC结构都有5个独立滑移系,可实现任一种方式的形变。晶界两侧滑移面不平等,晶界一方面是位错运动的障碍,造成位错塞积和强化;同时要求晶界附近多系滑移的出现,以协调晶界两侧的形变。晶粒大小对形变的影响是:晶粒细小,整个晶粒可较形变均匀,不同的滑移系组合少;晶粒粗大时,形变过程中晶内不同区域不能相互协调,要求不同的滑移系组合并开动,常常出现晶粒“碎化”,即一个大晶粒,随形变的进行“碎化”成几部分,不同部分内有不同的滑移系开动。

对性能的影响到遵循 hall-petch 关系 $\sigma_s = \sigma_0 + K_d d^{-1/2}$

即晶粒越细,晶界越多

晶界对运动位错阻碍越显著,提高强度幅度越大。

七,一次带状组织是凝固时形成枝晶,热轧后成带状而产生的;在CuCl浸蚀下,黑色条带是枝晶干(含溶质不),白色条带常是富集杂质的枝晶间,也称原始带状。二次带状是固态转变的产物,在硝酸酒精浸蚀下,白色带状是先共析铁素体,黑色带状是珠光体,也称显微带状组织。只有在一次带状的基础上才会产生二次带状。这些带状都与元素的偏析和夹杂物

的特殊分布有关。

八，略。

九，1，相变阻力中多了应变能一项。

2，形核方面：非均匀形核，存在特定的取向关系，常为共格或半共格界面。

3，生长方面：出现惯习现象，即有脱溶贯序；特殊/规则的组织形态，如片状、针状。

4，有亚稳相出现以减少相变阻力。

十，凝固时宏观特征是：要有一定的过冷度，会放出明显的结晶潜热。

成长机理有三种：连续式成长、二维形核及借助台阶侧向生长、借螺旋位错生长。

十一，溶质原子原子态溶入溶剂点阵中组成的单一均匀固体；溶剂的点阵类型被保留。

影响固溶度的因素有：

1，原子尺寸因素。当溶剂、溶质原子直径尺寸相对差小于 $\pm 15\%$ 时，有大的代位溶解度。

2，负电性因素。溶剂、溶质的负电性差越小溶解度越大，一般小于 $0.4 \sim 0.5$ 会有较大溶解度。

电子浓度因素。有两方面的含义：一是原子价效应，即同一溶剂金属，溶质的原子价越高，溶解度越小；二是相对价效应，即高价溶质溶入低价溶剂时的溶解度高于相反的情况。

特点是：固溶体中有点阵畸变（强度、硬度会提高）而造成点阵常数变化；出现原子偏聚或有序化，甚至形成有序固溶体。

固溶体的结构变化：点阵畸变，点阵常数变化，偏聚及短程有序，甚至形成有序固溶体。力学性能变化：硬度、强度提高，塑性下降，物理性能变化：电阻加大，导电率下降。

十二，1，提高冷却速度从而加大了过冷度。相变驱动力加大，提高了形核率。

2。加孕育剂。提供大量的非均匀形核地点，提高了形核率，降低了形核位垒。

3，机械或电磁搅拌。将枝晶振碎增加核数目或加强热满打满算能量落，提高了，形核率。

十三，如图所示。由液相先凝固出铁素体，在 1495°C 进行包晶反应，生成奥氏体；继续冷却，由生产剩余的液相再次析出奥氏体，然后变成单相奥氏体。冷至约 800°C ，从奥氏体中析出先共析铁素体，在 727°C 进行共析反应，形成珠光体，最后得到铁素体加珠光体组织。

十四，连续脱溶：随新相生成，母相成分连续的由过饱和态转变到饱和态。

不连续脱溶：也称胞状脱溶，此时在母相和新生成的 α 相间存在一个界面，跨过界面母相由过饱和和不连续地突变到饱和状态，点阵常数也不连续。

十五，有四类：

点缺陷：沿三个方向的尺寸很小，溶质原子、间隙原子、空位。

线缺陷：沿两个方向的尺寸很小，第三个方向尺寸很大，甚至可贯穿整个晶体，指位错。

面缺陷：沿一个方向上的尺寸很小，另两个方向上的尺寸很大，如晶界，相界。

体缺陷：在三个方向上的尺寸较大，但不是很大，如第二相粒子，显微空洞

二 00 四年试题

1. 简述题：（4分/小题，共40分）

（1）滑移临界分切应力（2）金属键（3）中间相（4）布喇菲点阵（5）再结晶温度（6）滑移系（7）位错（8）二次再结晶（9）偏析（10）

马氏体相变

2. 单相金属或合金各晶粒间的界面一般称之为晶界，通常晶界又分为小角度晶界和大角度晶界两大类，试问：划分为两类晶界的依据是什么？

并讨论构成小角度晶界的结构模型。(10分)

3. 分别画出立方晶系晶胞内的(110)、(112)晶面和[110]、[111]晶向。(10分)

4. 讨论晶体结构和空间点阵之间的关系(10分)

5. 什么是固溶体? 讨论影响固溶体溶解度的主要因素。(10分)

6. 分析和讨论冷加工金属或合金变形后回复再结晶过程中组织和性能的变化特征。(10分)

7. 画出Fe-Fe₃C相图, 分析含碳量为1.1wt%(重量百分比)的铁碳合金从液相平衡凝固到室温时的转变过程, 画出组织转变示意图, 并计算出室

温下各组织的相对含量。(20分)

8. 分析和讨论影响金属或合金中原子扩散的主要因素。(10分)

9. 以Al-4.5%Cu合金为例, 分析过饱和固溶体的脱溶分解过程(脱溶贯序), 并讨论脱溶温度对脱溶贯序的影响。(10分)

10. 金属的固态相变与金属的结晶过程基本一样, 大多也包括形核和生长两个基本阶段, 但在固态相变过程中新、旧两相的比容不同, 使系统额

外增加了应变能以及由相界面上的原子不匹配而引起的弹性应变能, 因此固态相变在许多方面与结晶过程有着显著的差别。试分析固态相变的

一般特点。(10分)

11. 写出所附Au-Hf体系相图(图1)中的三相反应, 并划出虚线框内部分的相平衡关系局部扩大示意图。(10分)

12. 分析固态相变和回复再结晶过程的驱动力。

13. 叙述钢锭中常见的宏观组织缺陷, 消除或改善方法。

14. 叙述常见的金属晶体的内外界面。

答案:

一, 1, 滑移临界分切应力: 滑移系开动所需的最小分切应力; 它是一个定值, 与材料本身的性质有关, 与外力取向无关。

2, 金属键: 自由电子与原子核之间静电作用产生的键合力。

3, 中间相: 合金中组元之间形成的、与纯组元结构不同的相。在相图的中间区域。

4, 布拉菲点阵: 除考虑晶胞外形外, 还考虑阵点位置所构成的点阵。或: 除考虑旋转对称性外, 还考虑平移对称性, 经有心化后构成的全部阵点。

5, 再结晶温度: 形变金属在一定时间内刚好完成再结晶的最低温度。

6, 滑移系: 晶体中一个可滑移面及该面上一个滑移晶向合称一个滑移系。

7, 位错: 是晶体内的一种线缺陷, 其特点是沿一条线方向原子有规律地发生错排, 这种缺陷用一线方向和一个柏氏矢量共同描述。

8, 二次再结晶: 不规则结晶结束后, 正常长大过程被抑制而发生的少数晶粒反常长大的现象。

9, 偏析: 合金中化学成分的不均匀性。

10, 马氏体相变: 其过程遵循无扩散、切变方式的相转变。

二，依据是按界面两侧晶粒间的取向差， $<15^\circ$ 的称小角度晶界， $>15^\circ$ 的称大角度晶界。小角度晶界的结构模型是位错模型，比如对称倾转晶界用一组平等的刃位错来描述。

三，见图

四，两者之间的关系可用“空间点阵+基元=晶体结构”来描述。

空间点阵只有 14 种，基元可以是无穷多种，因而构成的具体的晶体结构也是无穷多种。

五，溶质原子以原子态溶入溶剂点阵中而组成的单一均匀固体；溶剂的点阵类型被保留。

影响固溶度的因素有：

1，原子尺寸因素。当溶剂、溶质原子直径尺寸相对差小于 15% 时，有利于大的代位固溶体溶解度；当两组元的直径相对差大于 41% 时，有利于高的间隙固溶体的溶解度。

2，负电性因素。溶剂、溶质的负电性差越小溶解度越大，一般小于 0.4~0.5 会有圈套溶解度。

3，电子浓度因素。有两方面的含义：一是原子价效应，即同一溶剂金属中，溶质原子价越高，溶解度越小；二是相对价效应，即高价溶质溶入低价溶剂时的溶解度高于相反的情况。

六，随退火温度的升高或时间延长，出现亚晶合并长大，再结晶形核及长大，无位错的等轴再结晶晶粒取代长条状高位错密度的变形晶粒，然后是晶粒正常长大。储存能逐渐释放，特别是再结晶阶段释放的最显著；硬度及强度下降，伸长率上升；电阻降低，密度提高。再结晶时各种性能变化都比回复时强烈得多。

七，铁碳相图略。

1. 1% 的钢由液相冷却时先进入 L+ γ 奥氏体两相区，形成枝晶或等轴状 γ 奥氏体，然后进入奥氏体单相区；继续冷却到 $\sim 760^\circ\text{C}$ 剩余的奥氏体转变为珠光体，最后的组织是珠光体+网状二次渗碳体，如图所示

珠光体的相对含量： $(6.67-1.1)/(6.67-0.77)=94.4\%$

网状渗碳体相对含量： $(1.1-0.77)/(6.67-0.77)=5.6\%$

影响扩散的因素有：

1，温度；2，界面、表面及位错；3，第三组元；4，晶体结构；5，熔点：同一合金系中，同一温度下熔点高的合金扩散慢，熔点低的扩散快。

九，Al-4.5%Cu 合金固溶处理后，在最佳时效温度 $\sim 150^\circ\text{C}$ 时效，会出现脱溶贯序：

过饱和固溶体 \rightarrow GP 区 $\rightarrow \theta'' \rightarrow \theta' \rightarrow \theta$

其中 GP 区是铜原子富集区： θ'' 、 θ' 是四方结构亚稳相，圆盘状，沿基体的 $\{100\}$ 面析出，具有共格/半共格界面，与基体存在特定的取向关系； θ 是四方结构稳定相，不规则形状。

提高时效温度，脱溶加快，但过饱和度减少，相变驱动力减少，可能导致直接析出平衡相，时效强化能力减弱；时效温度过低则情况相反，达到最佳性能的时间过长。

十，1，相变阻力中多了应变能一项。

2，形核方面：非均匀形核为主：具有特定的取向关系；相界面常为共格或半共格的。

3，生长方面：具有惯习现象，有特定的组织形态，如片状、针状。

4，有亚稳相。

十一， $\text{L}+\text{Au}_5\text{Hf} \rightarrow \text{FCC}(\text{Au})$

$\text{L}+\text{Au}_4\text{Hf} \rightarrow \text{Au}_5\text{Hf}$

$\text{L}+\text{Au}_3\text{Hf} \rightarrow \text{Au}_4\text{Hf}$

$\text{L}+\text{Au}_2\text{Hf} \rightarrow \text{Au}_3\text{Hf}$

$\text{L} \rightarrow \text{Au}_2\text{Hf} + \beta\text{-AuHf}$

$\text{Au}_2\text{Hf} + \beta\text{-AuHf} \rightarrow \text{Au}_{10}\text{Hf}_7$

$\beta\text{-AuHf} \rightarrow \text{Au}_{10}\text{Hf}_7 + \alpha\text{-AuHf}$

$\text{L} \rightarrow \beta\text{-AuHf} + \text{AuHf}_2$

$\beta\text{-AuHf} + \text{AuHf}_2 \rightarrow \alpha\text{-AuHf}$

$\text{L} \rightarrow \text{AuHf}_2 + \text{BCC}(\text{Hf})$

$\text{BCC}(\text{Hf}) \rightarrow \text{AuHf}_2 + \text{HCP}(\text{Hf})$

十二，固态相变的驱动力是新、旧两相间的自由能差，回复再结晶的驱动力是形变储存能。

十三，宏观缺陷有：宏观偏析（如正常偏析、反常偏析、毕生偏析）和带状组织以及缩孔、疏松、气泡等。严格来讲，也包括三晶区的组织不均匀性。

宏观缺陷（化学不均匀性、物理不均匀性和组织不均匀性）往往是相互联系的，一般希望尽可能多而细的中心等轴晶，可采用加孕育剂、加大冷速、这样，与柱状晶/枝状晶区相伴随的宏观偏析和缩孔、气泡也就明显改善。

十四，它们包括晶界、相界、表面、孪晶界、层错。

晶界是同种晶粒之间的交界面；相界是结构、成分不同的相间的交界面；表面是晶体与大气或外界接触的界面；孪晶界是发生孪生后产生的新界面，是特殊的大角晶界，可是共格的或半共格的；低能层错是单相晶体内因堆垛顺序反常变化后出现的新界面，也是低能界面，与孪晶界能量相近。