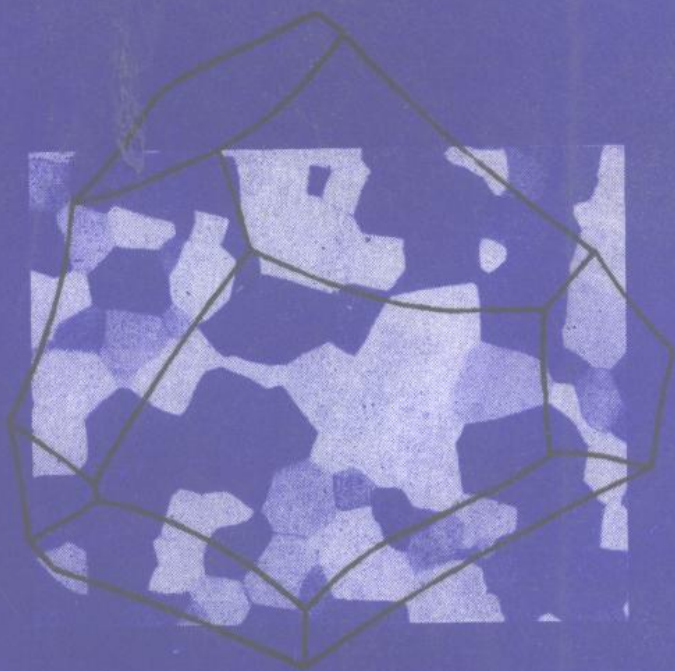


# 金属的再结晶 与晶粒长大

毛卫民 赵新兵 著



冶金工业出版社

75.12  
/49

# 金属的再结晶与 晶粒长大

毛卫民 赵新兵 著

SK592/02

冶金工业出版社

1994

(京) 新登字036号

**图书在版编目 (CIP) 数据**

金属的再结晶与晶粒长大/毛卫民, 赵新兵著, —北京: 冶金工业出版社, 1994. 6

ISBN 7-5024-1439-8

I. 金… II. ①毛…②赵… III. ①金属-再结晶②金属-晶体生长 IV. TG111.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (94) 第02473号

出版人 卿启云 (北京沙滩嵩祝院北巷39号, 邮编100009)

河北三河灵山印刷厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销

1994年6月第1版, 1994年6月第1次印刷

850mm×1168mm 1/32; 印张: 11.25千字; 291页; 1-1160册

14.20元



## 内 容 简 介

再结晶与晶粒长大是金属材料十分重要的物理冶金过程。本书论述了金属多晶体再结晶与晶粒长大的基本过程，较为系统地阐述了相关的基本理论。另外，本书还对本世纪80年代以来世界材料科学领域在再结晶与晶粒长大方面的最新研究成果和实际应用作了一定的介绍。

本书可供从事铸造、金属材料和金属加工等专业的科技人员进行相关科研、技术改造或技术更新时阅读，亦可作为大专院校相关专业教师及大学生、研究生的教学参考书。

ISBN 7-5024-1439-8

TG·176 定价14.20元



# 引 言

一切经热加工或冷加工后再加热的金属材料内部都会出现再结晶过程，一切金属多晶体的加热过程都包含晶粒长大过程。而再结晶或晶粒长大过程都对应着金属材料化学、物理、力学等各种性能的一系列变化。因此，再结晶与晶粒长大过程及其原理在金属材料生产，如热加工、变形热处理、再结晶退火、合金的回火、合金的脱溶、粉末冶金等各种工艺过程中得到了广泛的应用。正是由于再结晶与晶粒长大对于工业材料性能的重要作用，世界各国在该领域内的科研工作十分活跃，并不断取得新的成果。同时，这些成果又以非常快的速度转化为生产力，应用于各种金属材料的生产之中。例如，新一代冲压及超深冲钢板、超塑性合金、优质硅钢板、半导体薄膜、电容器铝箔、钛合金、抗蠕变钨丝等产品的出现或日趋成熟就是建立在这些科研成果基础之上的。

与世界发达国家相比，我国在这一领域的科研和生产能力及水平尚有不少差距。随着科技成果和生产技术的不断更新，我国现有的一些相关的专业书籍已显得比较陈旧，很有必要在新的起点上对金属的再结晶与晶粒长大作一个较为系统的阐述，并应包括80年代以来最新的理论成果和生产技术。基于这一认识，作者根据近几年来在这个领域内从事研究工作的经验和体会，参考了一些书刊资料，编撰本书以奉献给广大读者。作者希望本书能够对我国金属再结晶与晶粒长大领域在更新知识和开阔视野方面起到一点促进作用，也希望能够借助本书给初步涉及这个领域的读者提供一个方便的入门途径。

鉴于作者在上述领域的理论与实践方面的局限性，因而在本书的编写过程中难免有不妥之处，恳请有关专家及广大读者提出

宝贵意见。

本书第一至第六章由北京科技大学毛卫民编写，第七至第十一章由浙江大学赵新兵编写，第十二章由两人共同编写。在本书的编写过程中曾受到北京科技大学余永宁教授多方认真的指导与帮助。浙江大学王启东教授对本书给予了热情的支持。北京科技大学王开平同志参与了本书编写过程中大量的事务性工作。在此本书作者向上述各位同志表示衷心的感谢。本书作者也愿借此机会感谢国家教委《跨世纪优秀人才计划》基金的资助。

作 者

1993年3月

# 目 录

## 第一章 金属的再结晶行为

|                    |      |
|--------------------|------|
| 第一节 概 述            | (1)  |
| 一、历史的回顾            | (1)  |
| 二、金属的结构状态          | (3)  |
| 第二节 金属晶体的缺陷        | (4)  |
| 一、热力学平衡及缺陷         | (4)  |
| 二、金属的位错            | (6)  |
| 三、晶界               | (11) |
| 第三节 冷变形金属          | (14) |
| 一、冷变形金属的组织结构       | (14) |
| 二、影响冷变形金属组织结构的因素   | (20) |
| 三、变形织构             | (22) |
| 四、变形组织的不稳定性及其热激活过程 | (27) |
| 第四节 金属再结晶的基本过程     | (29) |
| 一、再结晶的概念           | (29) |
| 二、再结晶的驱动力          | (31) |
| 参考文献               | (34) |

## 第二章 初次再结晶

|              |      |
|--------------|------|
| 第一节 回 复      | (36) |
| 一、回复现象       | (36) |
| 二、储存能状态的变化   | (38) |
| 三、回复的位错机制    | (40) |
| 四、多边形化及亚晶的生成 | (43) |
| 五、回复动力学      | (43) |

|                    |      |
|--------------------|------|
| <b>第二节 形核过程</b>    | (47) |
| 一、经典形核理论           | (47) |
| 二、晶界形核 (应变诱发晶界移动)  | (48) |
| 三、亚晶生长             | (50) |
| 四、孪生形核             | (52) |
| 五、位错塞积区形核          | (53) |
| 六、总结               | (56) |
| <b>第三节 初次再结晶过程</b> | (56) |
| 一、晶界的迁移            | (57) |
| 二、初次再结晶动力学         | (59) |
| 三、再结晶时间和再结晶晶粒尺寸    | (61) |
| 四、退火孪晶             | (63) |
| 五、再结晶图             | (66) |
| 参考文献               | (68) |

### 第三章 合金的再结晶

|                        |       |
|------------------------|-------|
| <b>第一节 单相固溶体的再结晶</b>   | (70)  |
| 一、固溶体再结晶的一般规律          | (70)  |
| 二、固溶体晶界迁移理论            | (74)  |
| 三、固溶体晶界迁移的实际观测         | (80)  |
| <b>第二节 两相合金的再结晶</b>    | (84)  |
| 一、非共格第二相               | (84)  |
| 二、共格第二相                | (92)  |
| 三、大体积第二相               | (93)  |
| <b>第三节 与合金相变有关的再结晶</b> | (94)  |
| 一、伴随析出行为的再结晶过程         | (94)  |
| 二、与相变行为同时进行的再结晶过程      | (98)  |
| 三、以相变为主的再结晶过程          | (99)  |
| 参考文献                   | (101) |



## 第四章 再结晶组织分析

|                                |       |
|--------------------------------|-------|
| <b>第一节 取向与组织</b> .....         | (103) |
| 一、晶体取向.....                    | (103) |
| 二、组织.....                      | (106) |
| <b>第二节 取向分布函数的数学原理</b> .....   | (108) |
| 一、极密度分布函数.....                 | (108) |
| 二、取向分布函数.....                  | (112) |
| 三、完整极密度分布计算取向分布函数原理.....       | (115) |
| <b>第三节 组织的表达方法与定量分析</b> .....  | (121) |
| 一、立方晶系的取向空间.....               | (121) |
| 二、取向分布函数的表达方法.....             | (123) |
| 三、组织的定量分析.....                 | (124) |
| 四、六方晶系与四方晶系的取向空间.....          | (129) |
| <b>第四节 实际金属板材中的再结晶组织</b> ..... | (131) |
| 一、铝板中的再结晶组织.....               | (131) |
| 二、铜及铜合金中的再结晶组织.....            | (137) |
| 三、钢铁材料中的再结晶组织.....             | (138) |
| 四、钛板中的再结晶组织.....               | (139) |
| 五、锡板中的再结晶组织.....               | (139) |
| <b>第五节 再结晶组织的测量</b> .....      | (142) |
| 一、极图的测量.....                   | (143) |
| 二、极图数据的整理.....                 | (143) |
| 三、测角器的结构.....                  | (148) |
| 参考文献.....                      | (152) |

## 第五章 现代再结晶理论的进展

|                         |       |
|-------------------------|-------|
| <b>第一节 定向形核理论</b> ..... | (154) |
| 一、再结晶核的生长条件.....        | (155) |
| 二、变形过程中晶体点阵结构的变化.....   | (155) |

|                                         |       |
|-----------------------------------------|-------|
| 三、与取向有关的再结晶形核·····                      | (159) |
| <b>第二节 定向形核的实际观察</b> ·····              | (160) |
| 一、冷变形过程中的过渡带·····                       | (160) |
| 二、定向形核的电镜观察·····                        | (160) |
| 三、定向形核所决定的再结晶过程·····                    | (163) |
| 四、定向形核理论的局限性·····                       | (167) |
| <b>第三节 选择生长理论</b> ·····                 | (168) |
| 一、单晶体内的选择生长·····                        | (171) |
| 二、选择生长的规律·····                          | (173) |
| 三、多晶体内的选择生长·····                        | (174) |
| 四、选择生长理论的局限性·····                       | (180) |
| <b>第四节 晶体选择生长的原子模型</b> ·····            | (184) |
| 一、面心立方金属原子跳动模型·····                     | (184) |
| 二、 $38.21^\circ < 111 >$ 取向关系的界面结构····· | (190) |
| 三、晶界的快速移动·····                          | (194) |
| 参考文献·····                               | (196) |

## 第六章 动态再结晶

|                             |       |
|-----------------------------|-------|
| <b>第一节 动态回复</b> ·····       | (197) |
| 一、动态回复的概念·····              | (197) |
| 二、动态回复机制·····               | (198) |
| 三、流变应力, 应变速度与温度的关系·····     | (199) |
| <b>第二节 动态再结晶的基本过程</b> ····· | (201) |
| 一、动态再结晶的实际观察·····           | (201) |
| 二、影响动态再结晶的因素·····           | (201) |
| 三、实际生产中的动态再结晶及晶粒尺寸·····     | (207) |
| <b>第三节 动态再结晶理论</b> ·····    | (210) |
| 一、唯象理论·····                 | (210) |
| 二、改进理论·····                 | (211) |
| 三、动态再结晶的位错机制·····           | (213) |

|           |       |
|-----------|-------|
| 参考文献..... | (216) |
|-----------|-------|

## 第七章 晶粒长大基本概念

|                        |       |
|------------------------|-------|
| 第一节 概 述.....           | (218) |
| 一、晶粒长大现象.....          | (218) |
| 二、晶粒尺寸与晶粒长大速度.....     | (219) |
| 三、晶粒长大的研究历史和研究目的.....  | (221) |
| 第二节 晶粒长大的驱动力.....      | (224) |
| 一、晶粒长大驱动力的来源.....      | (224) |
| 二、晶界的界面能.....          | (225) |
| 第三节 晶粒长大过程中的晶粒组织.....  | (229) |
| 一、完整的多晶体组织.....        | (230) |
| 二、晶粒组织中的拓扑缺陷及其运动.....  | (232) |
| 三、拓扑缺陷的运动与晶粒长大.....    | (234) |
| 第四节 晶粒长大过程中的晶界迁移率..... | (235) |
| 一、晶界迁移与晶粒长大动力学.....    | (235) |
| 二、迁移率的实验测量.....        | (236) |
| 第五节 初次再结晶和晶粒长大.....    | (239) |
| 参考文献.....              | (241) |

## 第八章 晶粒尺寸的测量与计算

|                        |       |
|------------------------|-------|
| 第一节 晶粒尺寸及晶粒尺寸分布函数..... | (242) |
| 第二节 平面低维晶粒尺寸的测量.....   | (244) |
| 一、平面测量值.....           | (244) |
| 二、晶粒尺寸测量设备.....        | (246) |
| 三、测量数据的统计处理.....       | (249) |
| 第三节 三维晶粒尺寸及其分布的计算..... | (250) |
| 一、基本原理.....            | (250) |
| 二、传统的计算方法.....         | (250) |
| 三、多面体晶粒 SDF 计算方法.....  | (255) |

|      |       |
|------|-------|
| 参考文献 | (258) |
|------|-------|

## 第九章 正常晶粒长大过程

|                      |       |
|----------------------|-------|
| 第一节 概 述              | (260) |
| 第二节 晶粒长大的动力学实验结果     | (261) |
| 第三节 正常晶粒长大过程中的晶粒尺寸分布 | (264) |
| 一、准静态尺寸分布函数          | (264) |
| 二、实验结果与理论分布的比较       | (268) |
| 第四节 阻碍正常晶粒长大的因素      | (270) |
| 一、杂质原子的阻碍作用          | (271) |
| 二、试样表面的阻碍            | (273) |
| 三、第二相粒子的阻碍           | (275) |
| 四、织构的阻碍作用            | (277) |
| 参考文献                 | (277) |

## 第十章 异常晶粒长大过程

|                       |       |
|-----------------------|-------|
| 第一节 概 述               | (279) |
| 第二节 异常晶粒长大的一般实验结果     | (281) |
| 一、显微组织的变化             | (281) |
| 二、动力学关系               | (282) |
| 三、正常晶粒长大的受阻与异常晶粒长大的发生 | (282) |
| 四、正常晶粒长大之前的异常晶粒长大     | (283) |
| 第三节 表面诱发的异常晶粒长大       | (284) |
| 第四节 粒子诱发的异常晶粒长大       | (286) |
| 第五节 织构诱发的异常晶粒长大       | (288) |
| 参考文献                  | (291) |

## 第十一章 晶粒长大过程的理论研究

|                   |       |
|-------------------|-------|
| 第一节 基本原理和研究方法     | (292) |
| 一、晶粒长大模型理论研究的基本假设 | (292) |

|                               |              |
|-------------------------------|--------------|
| 二、晶粒长大理论模型的分类·····            | (294)        |
| 三、晶粒长大过程的随机模拟方法·····          | (294)        |
| <b>第二节 经典的晶粒长大理论模型·····</b>   | <b>(296)</b> |
| 一、诺依曼模型·····                  | (296)        |
| 二、气泡链模型·····                  | (297)        |
| 三、希勒特模型·····                  | (298)        |
| 四、各种经典 GGM 的特点及比较·····        | (299)        |
| <b>第三节 晶粒长大理论模型研究的发展·····</b> | <b>(301)</b> |
| 一、积分模型·····                   | (301)        |
| 二、AL 模型·····                  | (303)        |
| 三、邦厄模型·····                   | (304)        |
| 四、能量模型·····                   | (306)        |
| 五、小结·····                     | (309)        |
| <b>第四节 晶粒长大过程的数值模拟·····</b>   | <b>(310)</b> |
| 一、随机模拟 (MCS) 的主要结论·····       | (310)        |
| 二、基于 GGM 的数值模拟·····           | (311)        |
| 参考文献·····                     | (312)        |

## 第十二章          再结晶、晶粒长大与材料性能

|                                |              |
|--------------------------------|--------------|
| <b>第一节 晶粒尺寸与材料性能·····</b>      | <b>(314)</b> |
| 一、力学性能·····                    | (314)        |
| 二、材料的超塑性·····                  | (318)        |
| 三、材料的表面性能·····                 | (319)        |
| 四、物理性能·····                    | (312)        |
| <b>第二节 工业生产过程中的晶粒尺寸控制·····</b> | <b>(322)</b> |
| 一、凝固和铸造过程·····                 | (322)        |
| 二、变形和热处理过程·····                | (323)        |
| 三、特殊工业材料的晶粒控制·····             | (328)        |
| <b>第三节 板材织构及其控制·····</b>       | <b>(332)</b> |
| 一、超深冲钢板的织构·····                | (333)        |

|                  |       |
|------------------|-------|
| 二、变压器钢板的织构 ..... | (336) |
| 三、铝材的织构控制 .....  | (340) |
| 参考文献 .....       | (344) |

# 第一章

## 金属的再结晶行为

---

### 第一节 概 述

#### 一、历史的回顾

人类使用金属的历史，可以上溯到公元前 8000 至 9000 年左右<sup>[1,2]</sup>，那时人类已经可以把天然铜制成制品使用。公元前 4000 多年前西亚人掌握了炼铜技术。约公元前 3000 年北美洲人认识到，天然铜室温变形后会变硬，而加热后又会变软，并且根据这一现象确定了铜矛反复锻打和退火的生产工艺。对藁城和安阳出土的文物考证表明，在我国商代（公元前约 1500 至 1000 年），人们也已经能熟练地运用这一工艺制造金箔制品<sup>[3]</sup>。由此可见，冷加工和软化退火属于人类最早掌握的物理冶金工艺。但那时的人们并不能解释金属变形硬化和加热软化的原因。自从现代金相技术问世以来，人们才对金属在变形和加热过程中的变化有了逐渐深入的认识<sup>[4]</sup>。

诺居埃斯 (Noguès) 于 1858 年发现铂网在火焰上加热数天后仍具有金属特性，似乎晶体有再次结晶的现象。诺居埃斯认为加热会影响铂的分子结构。诺居埃斯的发现在当时引起了科学界的关注<sup>[5]</sup>。1881 年卡利谢尔 (Kalischer) 报导说，为了改善石墨在冷轧锌片上的附着性能，他把单面覆盖石墨的锌片略微加热后放到硫酸铜的溶液中。在侵蚀过程中，他发现锌片无石墨的一面呈

现出“结晶”的现象，而事先没有加热的锌片则不会出现这种现象。他还进一步确定出，当加热温度在  $150^{\circ}\text{C}$  以上直至熔点时，都会出现这种现象。加热温度越高，晶粒尺寸越大。当时，卡利谢尔在铁中也观察到了类似的现象。他在实验室观察的基础之上首次提出了理论解释。他认为，凝固时形成的锌晶体结构在轧制过程中遭到破坏，而在加热过程中又重新获得<sup>[5]</sup>，即再次结晶。随后，大量学者开展了这方面的研究工作，并深入分析了加热温度与晶粒尺寸的关系。格拉尔德 (Grard) 于 1909 年指出，冷变形铜开始再结晶的温度与冷变形量有关。当时人们普遍认为只有在一个确定的温度以上金属才会发生再结晶，格拉尔德的发现使人们逐渐放弃了这一概念<sup>[5]</sup>。1914 年至 1915 年卡佩尔 (Chappell) 发现，承受某种小变形量的金属，由于其形核率低，再结晶过程中晶粒长得很大，因而他提出了临界变形量的概念。然后，他忽略原始晶粒度和退火时间等重要因素的影响，把金属再结晶行为归结成冷变形量、退火温度和晶粒尺寸关系的三维再结晶图。1921 年卡尔彭特尔 (Carpenter) 和埃拉姆 (Elam) 在冷变形铝的退火过程中观察到了回复现象及晶粒生长过程中晶界的移动<sup>[5]</sup>。1926 年贝克尔 (Becker) 发现，再结晶是一个生核及晶粒长大的过程，当一个稳定的晶核形成之后，它就会长入变形过的晶粒内。1927 年措赫拉尔斯基 (Czochralski) 首次对金属再结晶的研究工作作了概括性总结，并强调了变形程度对再结晶晶粒尺寸的影响<sup>[5]</sup>。这些早期的工作都是在没有高分辨率显微分析技术的情况下完成的，因而所提出的有关再结晶机制的理论以及晶体结构变化的细节（如缺陷重新排列，核的形成等），都是间接地根据宏观性能变化所作的推断。只有在现代的诸如微束 X 射线及电子显微术等精细分析技术出现之后，变形金属的细微结构及其在加热中的变化过程才得以被不断地揭示出来<sup>[6]</sup>。

再结晶是金属材料最重要的物理冶金过程之一。再结晶退火也是工业上控制和改变金属材料组织、结构和性能的重要手段。由于再结晶后的晶粒尺寸对材料性能有着直接的影响，因此早期的



研究工作多着重于分析冷变形及加热过程对再结晶晶粒尺寸的影响。随着工业技术的发展以及工业生产对金属材料性能需求的不断提高,金属材料生产中的再结晶退火工艺已远远不只局限于在传统的软化金属和保证一定晶粒尺寸方面发挥作用,它已成为实现金属材料特殊而复杂性能状态的重要手段。现代工业要求再结晶退火不仅能软化冷变形金属,保证晶粒度,而且还要实现对金属材料晶粒的形状,晶粒取向分布以及特殊各向异性性能的调整和控制。为了达到这一目的,人们必须了解金属材料再结晶过程中的各种细节以及相应的原理。由于这种原因,越来越多的研究者加入到金属再结晶的研究领域里来,以致常常说不清一些再结晶细节现象的第一发现者<sup>[6]</sup>。

本世纪40年代以来,人们对初次再结晶前的回复过程作了许多深入研究,发现了变形晶体内的多边化或亚晶的形成。同时,人们还对再结晶的形核机制和生长机制作了各种深入的探讨。近年来,人们分析研究了合金元素、杂质元素和第二相颗粒析出行为等对再结晶的影响,以及多相金属的再结晶过程。70年代以来,随着材料织构定量分析方法的成熟与发展,再结晶织构的研究领域也摆脱了传统方法的束缚,取得了突飞进展。通过对再结晶过程中晶粒取向分布变化的分析与研究,不仅使材料性能的定量计算和预告成为可能,也使得再结晶理论的研究工作受到了强有力的推动,极大地促进了人们对再结晶形核及再结晶晶粒生长过程的认识。

## 二、金属的结构状态

金属材料的晶体特征,使其在工业上有多方面的实用价值。实际应用表明,具备工业所需性能的金属材料不是完整晶体,而是具有一定缺陷的晶体。缺陷使晶体在保持高强度的同时,可以具有良好的加工成型性。热力学分析表明,完全无缺陷的完整晶体通常是不稳定的,而且人们很难使金属晶体变成完整晶体。金属材料冶炼之后的各种物理冶金过程(如凝固、冷却、变形、加热