



教育部高等学校  
材料科学与工程教学指导委员会规划教材

● 丛书主编 黄伯云

# 合金固态相变

主 编 赵乃勤  
副主编 杨志刚 冯运莉  
主 审 田民波

Solid Phase Transformations  
in Alloys



中南大学出版社  
www.csupress.com.cn



教育部高等学校  
材料科学与工程教学指导委员会规划教材

● 丛书主编 黄伯云

内容简介

# 合金固态相变



主 编 赵乃勤  
副主编 杨志刚 冯运莉  
主 审 田民波

Solid Phase Transformations  
in Alloys



中南大学出版社  
www.csupress.com.cn

---

图书在版编目(CIP)数据

合金固态相变/赵乃勤主编. —长沙:中南大学出版社,2008. 8  
ISBN 978-7-81105-695-2

I. 合... II. 赵... III. 金属-固体-相变 IV. TG111.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 109746 号

---

合金固态相变

主编 赵乃勤

- 
- 责任编辑 周兴武  
 责任印制 汤庶平  
 出版发行 中南大学出版社  
社址:长沙市麓山南路 邮编:410083  
发行科电话:0731-8876770 传真:0731-8710482
- 印 装 长沙市华中印刷厂
- 
- 开 本 787×960 1/16  印张 22.5  字数 477 千字  
 版 次 2008 年 9 月第 1 版  2008 年 9 月第 1 次印刷  
 书 号 ISBN 978-7-81105-695-2  
 定 价 40.00 元
- 

图书出现印装问题,请与出版社调换

# 内 容 简 介

---

本书为教育部高等学校材料科学与工程教学指导委员会规划教材，根据教育部高等学校材料科学与工程教学指导委员会本课程“教学基本要求”编写。

合金固态相变是金属材料及相关专业的必修内容，对于掌握金属材料成分—工艺—组织—性能之间的相互关系极为重要。本书共分9章，从固态相变晶体学、热力学、动力学及其影响因素等方面论述了合金固态相变的一般规律和特点。着重介绍了钢在加热过程中的相变(奥氏体转变)，冷却过程中的高温转变(珠光体转变)、中温转变(贝氏体转变)、低温转变(马氏体转变)，以及钢在淬火后的回火转变；同时，针对目前有色金属和合金的应用领域不断扩大的发展趋势，对这些典型合金的时效和脱溶沉淀进行了概要介绍；为了使学生更好地全面地了解固态相变的相关知识，本书还介绍了实现固态相变的热处理工艺和研究固态相变的方法手段。本书根据固态相变的最新研究进展，补充了新的研究成果。通过本书的学习，可了解合金固态相变的一般规律，学会运用基本理论和专业知识进行合金固态相变分析的基本思路和方法。

本书可作为材料科学与工程专业(金属材料方向)，材料加工专业本科生教材，也可供冶金、机械等行业的研究生和工程技术人员参考。

# 教育部高等学校材料科学与工程教学指导委员会规划教材

## 编 审 委 员 会

### 主 任

黄伯云(教育部高等学校材料科学与工程教学指导委员会主任委员、中国工程院院士、中南大学教授、博士生导师)

### 副主任

姜茂发(分指委\*主任委员、东北大学教授、博士生导师)

吕 庆(分指委副主任委员、河北理工大学教授、博士生导师)

张新明(分指委副主任委员、中南大学教授、博士生导师)

陈延峰(材料与材化分指委\*\*副主任委员、南京大学教授、博士生导师)

李越生(材料与材化分指委副主任委员、复旦大学教授、博士生导师)

汪明朴(教育部高等学校材料科学与工程教学指导委员会秘书长、中南大学教授、博士生导师)

### 委 员

(以姓氏笔画为序)

于旭光(分指委委员、石家庄铁道学院教授)

韦 春(桂林工学院教授、博士生导师)

王 敏(分指委委员、上海交通大学教授、博士生导师)

介万奇(分指委委员、西北工业大学教授、博士生导师)

水中和(武汉理工大学教授、博士生导师)

孙 军(分指委委员、西安交通大学教授、博士生导师)

刘 庆(重庆大学教授、博士生导师)

刘心宇(分指委委员、桂林电子工业学院教授、博士生导师)

刘 颖(分指委委员、北京理工大学教授、博士生导师)

朱 敏(分指委委员、华南理工大学教授、博士生导师)

注：\* 分指委：全称教育部高等学校金属材料工程与冶金工程专业教学指导分委员会；

\*\* 材料与材化分指委：全称教育部高等学校材料物理与材料化学专业教学指导分委员会。

曲选辉(北京科技大学教授、博士生导师)  
任慧平(教育部高职高专材料类教学指导委员会主任委员、内蒙古科技大学教授)  
关绍康(分指委委员、郑州大学教授、博士生导师)  
阮建明(中南大学教授、博士生导师)  
吴玉程(分指委委员、合肥工业大学教授、博士生导师)  
吴化(分指委委员、长春工业大学教授)  
李强(福州大学教授、博士生导师)  
李子全(分指委委员、南京航空航天大学教授、博士生导师)  
李惠琪(分指委委员、山东科技大学教授、博士生导师)  
余志明(中南大学教授、博士生导师)  
余志伟(分指委委员、东华理工学院教授)  
张平(分指委委员、装甲兵工程学院教授、博士生导师)  
张涛(分指委委员、北京航空航天大学教授、博士生导师)  
张文征(分指委委员、清华大学教授、博士生导师)  
张建新(河北工业大学教授)  
张建勋(西安交通大学教授、博士生导师)  
沈峰满(分指委秘书长、东北大学教授、博士生导师)  
杨贤金(分指委委员、天津大学教授、博士生导师)  
陈文哲(分指委委员、福建工程学院教授、博士生导师)  
陈翌庆(材物与材化分指委委员、合肥工业大学教授、博士生导师)  
赵昆渝(昆明理工大学教授、博士生导师)  
赵新兵(分指委委员、浙江大学教授、博士生导师)  
周小平(湖北工业大学教授)  
姜洪义(武汉理工大学教授、博士生导师)  
柳瑞清(江西理工大学教授)  
聂祚仁(北京工业大学教授、博士生导师)  
郭兴蓬(材物与材化分指委委员、华中科技大学教授、博士生导师)  
黄晋(分指委委员、湖北工业大学教授)  
阎殿然(分指委委员、河北工业大学教授、博士生导师)  
蒋青(分指委委员、吉林大学教授、博士生导师)  
蒋建清(分指委委员、东南大学教授、博士生导师)  
潘春旭(材物与材化分指委委员、武汉大学教授、博士生导师)  
戴光泽(分指委委员、西南交通大学教授、博士生导师)



# 总 序

---



材料是国民经济、社会进步和国家安全的物质基础与先导，材料技术已成为现代工业、国防和高技术发展的共性基础技术，是当前最重要、发展最快的科学技术领域之一。发展材料技术将促进包括新材料产业在内的我国高新技术产业的形成和发展，同时又将带动传统产业和支柱产业的改造和产品的升级换代。“十五”期间，我国材料领域在光电子材料、特种功能材料和高性能结构材料等方面取得了较大的突破，在一些重点方向迈入了国际先进行列。依据国家“十一五”规划，材料领域将立足国家重大需求，自主创新、提高核心竞争力、增强材料领域持续创新能力将成为战略重心。纳米材料与器件、信息功能材料与器件、高新能源转换与储能材料、生物医用与仿生材料、环境友好材料、重大工程及装备用关键材料、基础材料高性能化与绿色制备技术、材料设计与先进制备技术将成为材料领域研究与发展的主导方向。不难看出，这些主导方向体现了材料学科一个重要发展趋势，即材料学科正在由单纯的材料科学与工程向与众多高新科学技术领域交叉融合的方向发展。材料领域科学技术的快速进步，对担负材料科学与工程高等教育和科学研究双重任务的高等学校提出了严峻的挑战，为迎接这一挑战，高等学校不但要担负起材料科学与工程前沿领域的科学研究、知识创新任务，而且要担负起培养能适应材料科学与工程领域高速发展需求的、具有新知识结构创新型高素质人才的重任。

为适应材料领域高等教育的新形势，2006—2010年教育部高等学校材料科学与工程教学指导委员会积极组织材料类高等学校教材的建设规划工作，成立了规划教材编审委员会，编审委员会由相关学科的分教学指导委员会主任委员、委员以及全国30余所影响力和代表性的高校材料学院院长组成。编审委员会分别于2006年10月和2007年5月在湖南张家界和中南大学召开了教材建设研讨会和教材提纲审定会。经教学指导委员会和编审委员会推荐和遴选，逾百名来自全国几十所高校的具有丰富教学与科研经验的专家、学者参加了这套教材的编

写工作。历经几年的努力，这套教材终于与读者见面了，它凝结了全体编写者与组织者的心血，充分体现了广大编写者对教育部“质量工程”精神的深刻体会，对当代材料领域知识结构的牢固掌握和对高等教育规律的熟练掌握，是我国材料领域高等教育工作者集体智慧的结晶。

这套教材基本涵盖了金属材料工程专业的主要课程，同时还包含了材料物理专业和材料化学专业部分专业基础课程，以及金属、无机非金属和高分子三大类材料学科的实验课程。整体看来，这套教材具有如下特色：①根据教育部高等学校教学指导委员会相关课程的“教学大纲”及“基本要求”编写；②统一规划，结构严谨，整套教材具有完整性、系统性，基础课与专业课之间的内容有机衔接；③注重基础，强调实践，体现了科学性、实用性；④编委会及作者由材料领域的院士、知名教授及专家组成，确保了教材的高质量及权威性；⑤注重创新，反映了材料科学领域的新知识、新技术、新工艺、新方法；⑥深入浅出，说理透彻，便于老师教学及学生自学。

教材的生命力在于质量，而提高质量是永恒的主题。希望教材的编审委员会及出版社能做到与时俱进，根据高等教育改革和发展的形势及材料专业技术发展的趋势，不断对教材进行修订、改进、完善，精益求精，使之更好地适应高等教育人才培养的需要，也希望他们能够一如既往地依靠业内专家，与科研、教学、产业第一线人员紧密结合，加强合作，不断开拓，出版更多的精品教材，为高等教育提供优质的教学资源和服务。

衷心希望这套教材能在我国材料高等教育中充分发挥它的作用，也期待着在这套教材的哺育下，新一代材料学子能茁壮成长，脱颖而出。

董伯云

2008年9月



# 前 言

---

本书为教育部高等学校材料科学与工程教学指导委员会规划教材。根据教学指导委员会“教材要力求体现创新性、科学性、权威性、规范性”的要求，针对材料科学与工程专业金属材料方向本科生的特点编写了本教材。

本书主要以合金中的固态相变为主线，介绍了钢在加热过程中的相变(奥氏体转变)，冷却过程中的高温转变(珠光体转变)、中温转变(贝氏体转变)、低温转变(马氏体转变)。为了使学生更好全面地了解固态相变的相关知识，本书还对实现固态相变的工艺和研究固态相变的方法进行了概要介绍。同时，针对目前有色金属和合金的应用领域不断扩大的发展趋势，对这些典型合金的相变进行了概要介绍，使本科学生在掌握了物理化学、金属学等先期课程的前提下，对合金中的固态相及其相变有一个较全面的了解；对固态相变与成分—工艺的关系及对性能的影响有一个深刻的认识，帮助学生建立成分—工艺—组织—性能相互关联、相互影响的整体概念；了解钢中相变的一般规律，特别是掌握运用基本理论和专业知识进行相变分析的思路和方法。

本书分为9章。第1, 8章由清华大学杨志刚教授编写，第2章由天津大学杜希文教授编写，第3章由天津大学师春生副教授编写，第4章由吉林大学李月英教授编写，第5章由河北理工大学冯运莉教授编写，第6章由天津大学赵乃勤教授编写，第7章由北京理工大学郑秀华教授编写，第9章由郑州大学朱世杰和孙玉峰副教授编写。全书由赵乃勤教授担任主编，杨志刚教授和冯运莉教授担任副主编。清华大学田民波教授对全书进行了审阅。

本书力求保持固态相变研究基础性、系统性的特征，并将最新的研究成果以简单、明了，适合本科生特点的方式献给读者。但由于水平有限，书中未能尽善尽美之处，恳请读者指正！

编者

2008年9月

## 目 录

第1章 绪 论 .....	(1)
1.1 引言 .....	(1)
1.2 合金固态相变的相关概念 .....	(4)
1.2.1 固态相变的基本概念 .....	(4)
1.2.2 固态相变中的界面 .....	(5)
1.2.3 与固态相变相关的范例 .....	(7)
1.3 固态相变的分类 .....	(9)
1.3.1 按热力学分类 .....	(10)
1.3.2 按动力学分类 .....	(11)
1.4 固态相变的一般特征 .....	(14)
1.4.1 固态相变的驱动力和阻力 .....	(14)
1.4.2 固态相变的基本特点 .....	(16)
1.5 固态相变的形核和长大 .....	(19)
1.5.1 均匀形核和非均匀形核 .....	(19)
1.5.2 形核率的计算 .....	(21)
1.5.3 扩散型相变的长大速度 .....	(22)
第2章 合金固态相变的常用研究方法 .....	(27)
2.1 物相种类分析 .....	(27)
2.1.1 物相种类分析的原理 .....	(27)
2.1.2 X射线衍射分析方法 .....	(30)
2.1.3 电子衍射方法 .....	(34)
2.2 微观组织分析 .....	(44)
2.2.1 光学显微镜(OM) .....	(44)
2.2.2 扫描电子显微镜(SEM) .....	(46)
2.2.3 透射电子显微镜(TEM) .....	(51)
2.3 相变过程的分析方法 .....	(56)
2.3.1 热分析方法 .....	(56)
2.3.2 电阻分析法 .....	(58)

2.3.3	磁性分析法	(59)
2.3.4	原位金相观察	(60)
<b>第3章</b>	<b>奥氏体与钢在加热过程中的转变</b>	<b>(63)</b>
3.1	奥氏体及其特点	(63)
3.1.1	奥氏体定义	(63)
3.1.2	奥氏体晶体结构	(63)
3.1.3	奥氏体的性能	(65)
3.2	钢的奥氏体等温转变	(66)
3.2.1	奥氏体转变热力学	(66)
3.2.2	奥氏体转变机制	(67)
3.2.3	奥氏体的转变动力学	(71)
3.2.4	奥氏体转变的影响因素	(75)
3.3	钢中奥氏体的连续加热转变	(76)
3.3.1	连续加热转变动力学图	(76)
3.3.2	连续加热转变特点	(77)
3.4	奥氏体晶粒长大及控制	(78)
3.4.1	奥氏体晶粒度	(78)
3.4.2	奥氏体晶粒长大与控制	(79)
3.5	非平衡组织加热的奥氏体转变	(85)
3.5.1	针状奥氏体与颗粒状奥氏体	(85)
3.5.2	非平衡组织加热转变的影响因素	(86)
3.5.3	组织遗传现象及控制	(88)
<b>第4章</b>	<b>钢的过冷奥氏体转变及热处理</b>	<b>(92)</b>
4.1	过冷奥氏体转变类型	(92)
4.1.1	珠光体转变	(93)
4.1.2	贝氏体转变	(94)
4.1.3	马氏体转变	(94)
4.2	过冷奥氏体等温转变	(95)
4.2.1	过冷奥氏体等温转变动力学图	(96)
4.2.2	过冷奥氏体等温转变动力学图的基本形式	(99)
4.2.3	影响过冷奥氏体等温转变的因素	(101)
4.3	过冷奥氏体连续冷却转变	(104)
4.3.1	过冷奥氏体连续冷却转变动力学图的建立	(104)

4.3.2	过冷奥氏体连续冷却转变动力学图	(105)
4.3.3	CCT图与TTT图的比较	(106)
4.3.4	钢的临界冷却速度	(107)
4.3.5	过冷奥氏体转变图的应用	(109)
4.4	常规热处理方法	(114)
4.4.1	退火	(114)
4.4.2	正火	(119)
4.4.3	退火和正火的选用	(120)
4.4.4	淬火	(121)
4.4.5	回火	(125)
4.5	热处理常用设备	(126)
4.5.1	空气与气氛电阻炉	(126)
4.5.2	热处理浴炉	(128)
<b>第5章</b>	<b>珠光体与钢在冷却时的高温转变</b>	<b>(131)</b>
5.1	珠光体组织	(131)
5.1.1	珠光体的组织形态	(131)
5.1.2	珠光体晶体学	(135)
5.2	珠光体转变过程	(136)
5.2.1	珠光体转变热力学	(136)
5.2.2	片状珠光体的形成机制	(137)
5.2.3	粒状珠光体的形成机制	(142)
5.2.4	亚(过)共析钢珠光体转变	(146)
5.3	珠光体转变动力学	(149)
5.3.1	珠光体的形核率及长大速度	(149)
5.3.2	珠光体等温转变的动力学图	(150)
5.3.3	连续冷却转变的动力学图——CCT曲线及在退火中的作用	(152)
5.3.4	珠光体转变的影响因素	(152)
5.4	珠光体的力学性能	(157)
5.4.1	共析成分珠光体的力学性能	(157)
5.4.2	亚、过共析钢的珠光体转变产物的力学性能	(159)
5.4.3	派登处理	(160)
5.5	相间析出与纳米结构	(160)
5.5.1	相间析出物的形态	(161)
5.5.2	相间析出的条件	(162)

5.5.3	相间析出机理	(163)
5.5.4	纳米相的一般析出及影响因素	(165)
5.5.5	析出相粒子对组织性能的影响	(167)
<b>第6章</b>	<b>马氏体与钢在冷却时的低温转变</b>	<b>(172)</b>
6.1	马氏体的晶体学	(173)
6.1.1	马氏体相变与马氏体的定义	(173)
6.1.2	马氏体的晶体结构	(174)
6.1.3	马氏体的取向关系	(175)
6.1.4	马氏体的惯习面	(176)
6.2	马氏体的组织形态	(176)
6.2.1	马氏体的类型	(176)
6.2.2	影响马氏体形态和亚结构的因素	(180)
6.3	马氏体相变分类和特点	(182)
6.3.1	非恒温性与不完全性	(182)
6.3.2	无扩散性	(183)
6.3.3	表面浮突与界面共格	(184)
6.3.4	可逆性	(185)
6.4	马氏体转变机理	(186)
6.4.1	马氏体热力学	(186)
6.4.2	马氏体转变动力学特点	(191)
6.4.3	马氏体转变形核理论	(197)
6.4.4	马氏体转变的切变机制	(200)
6.4.5	马氏体的长大	(204)
6.5	马氏体性能与影响因素	(204)
6.6	奥氏体稳定化	(207)
6.6.1	热稳定化	(207)
6.6.2	力学(机械)稳定化	(209)
6.7	马氏体相变的应用	(209)
6.7.1	钢的强化	(209)
6.7.2	材料韧化	(210)
6.7.3	利用奥氏体稳定化提高尺寸精度	(211)
6.7.4	形状记忆效应	(212)
6.7.5	其他功能应用	(214)

<b>第7章 贝氏体与钢在冷却时的中温转变</b> .....	(217)
7.1 贝氏体的分类和定义 .....	(218)
7.1.1 贝氏体的分类 .....	(218)
7.1.2 贝氏体的定义 .....	(219)
7.2 贝氏体组织结构和晶体学特征 .....	(221)
7.2.1 贝氏体的显微组织特征 .....	(221)
7.2.2 贝氏体铁素体的精细结构 .....	(226)
7.2.3 贝氏体的表面浮突 .....	(230)
7.2.4 贝氏体中的碳化物 .....	(231)
7.2.5 贝氏体相变晶体学 .....	(232)
7.3 贝氏体相变机制 .....	(233)
7.3.1 贝氏体相变的切变理论 .....	(233)
7.3.2 贝氏体相变的台阶扩散理论 .....	(237)
7.4 贝氏体相变动力学 .....	(242)
7.4.1 贝氏体等温转变动力学 .....	(242)
7.4.2 贝氏体连续冷却转变动力学 .....	(246)
7.5 贝氏体力学性能 .....	(249)
7.5.1 贝氏体的强度和硬度 .....	(249)
7.5.2 贝氏体的塑性和韧性 .....	(251)
<b>第8章 钢的回火转变</b> .....	(255)
8.1 淬火碳钢回火过程的组织变化 .....	(255)
8.1.1 马氏体中碳原子偏聚 .....	(256)
8.1.2 马氏体分解 .....	(257)
8.1.3 残余奥氏体转变 .....	(259)
8.1.4 碳化物类型变化 .....	(260)
8.1.5 碳化物聚集长大 .....	(263)
8.1.6 基体 $\alpha$ 相状态的变化 .....	(263)
8.2 合金元素对回火转变的影响 .....	(265)
8.2.1 合金元素对马氏体分解的影响 .....	(265)
8.2.2 合金元素对残余奥氏体转变的影响 .....	(266)
8.2.3 合金元素对碳化物类型变化的影响 .....	(266)
8.2.4 合金元素对碳化物聚集长大的影响 .....	(267)
8.2.5 合金元素对 $\alpha$ 相状态变化的影响 .....	(268)

8.3	淬火钢回火时力学性能的变化	(269)
8.3.1	硬度和强度的变化	(269)
8.3.2	塑性和韧性的变化	(270)
8.3.3	钢的回火脆性	(270)
8.4	非马氏体组织的回火	(274)
8.4.1	非马氏体组织的回火	(274)
8.4.2	回火产物与奥氏体直接分解产物的性能比较	(275)
8.5	回火工艺的制订及应用举例	(276)
8.5.1	回火工艺的制订	(276)
8.5.2	应用举例	(278)
<b>第9章</b>	<b>合金的脱溶沉淀与时效</b>	<b>(281)</b>
9.1	合金的时效过程	(282)
9.1.1	合金时效过程的热力学	(282)
9.1.2	时效过程	(283)
9.1.3	脱溶相的粗化	(291)
9.2	合金时效动力学及其影响因素	(293)
9.2.1	合金时效时脱溶沉淀过程的等温动力学图	(293)
9.2.2	影响合金时效动力学的因素	(294)
9.3	时效后的微观组织	(296)
9.3.1	时效过程中脱溶类型及其微观组织	(296)
9.3.2	时效过程中微观组织的变化	(300)
9.4	合金时效过程中性能的变化	(302)
9.4.1	时效硬化曲线及影响时效硬化的因素	(302)
9.4.2	时效硬化机理	(306)
9.4.3	回归现象	(311)
9.5	合金的调幅分解	(312)
9.5.1	调幅分解的热力学条件和过程	(312)
9.5.2	调幅分解的组织 and 性能	(315)
9.6	典型合金的时效相变	(315)
9.6.1	马氏体时效钢的时效	(315)
9.6.2	铝合金的类型及时效过程	(320)
9.6.3	镁合金中的相变	(326)
9.6.4	钛合金中的相变	(331)
9.6.5	铜合金中的相变	(335)
6	<b>附录 名词术语</b>	<b>(340)</b>



# 第1章 绪论

## 1.1 引言

人类文明发展的历史在某种程度上就是不断制造和使用新材料的历史。材料的作用如此重要，以至于可以按照材料的特点来划分人类历史的发展阶段，如石器时代、铁器时代、青铜器时代、钢铁时代和新材料时代等。从这些名称中，我们可以看出金属材料在人类文明发展过程中的重要性。

据考证，约一万年以前人类就开始使用自然界存在的金属材料，如金、银、铜、铅和陨铁等。公元前 3000 年左右，冶金技术出现，开始了青铜器时代。公元前 1100 年左右，炼铁技术出现，开始了铁器时代。但是直到 18 世纪末、19 世纪初，大部分金属材料还是作为农业工具、武器和装饰品等应用，数量有限。

从欧洲起源的工业革命，使金属材料的应用有了一个突飞猛进的发展。1856 年 Bessemer 发明了现代钢铁冶炼方法，使钢铁材料的大规模生产成为现实。在此后的很长一段时期内，钢铁产量成为了一个国家工业化程度的重要标志。从 1779 年英国建成世界第一座 60 m 长的铁桥开始（仍保留至今），到 1889 年世界博览会为了展示钢铁新材料所建造的法国巴黎埃菲尔铁塔，再到 19 世纪 30 年代的美国旧金山的钢制悬索金门大桥，钢铁材料从 19 世纪开始成为了社会发展中最重要结构材料之一。

随着金属材料应用的发展和研究工作的不断深入，人们注意到，材料的成分、工艺、组织结构、性能这四个基本因素对材料的应用具有重要的影响，是进行材料研究的基本对象和内容，因而称之为材料研究四要素（另一种说法是成分组织、加工工艺、材料性能、使用性能）。材料研究四要素之间相互联系，相互影响，组成一个四面体，如图 1-1 所示，称为材料研究的四面体。不同化学成分的材料，经过各种制备和加工工艺，获得不同的内部组织结构，可以在很大程度上决定材料的性能。在一些情况下，出于经济性、可获得性、可靠性等方面的考虑，材料的选材范围有限。如何在材料成分基本固定的情况下，有效地提高性能

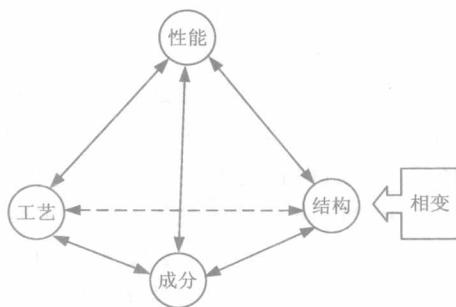


图 1-1 材料研究的四要素组成的四面体

如何在材料成分基本固定的情况下，有效地提高性能

成为材料科学与工程学科的一个重要的研究内容。其中一个重要的方法就是设法改变材料内部的组织结构从而改变其性能。在温度和压力等外部环境改变时,材料内部的原子排列方式、有序程度、局部化学成分等组织结构的变化,通常称为相变。材料的相变过程直接影响材料力学、物理、化学性能。研究和控制材料中的相变过程,从而提高材料性能,是材料科学的又一个重要的研究领域。

固态相变研究的历史是与热力学的发展密不可分的。18世纪开始,人们对热的本质的研究有了突破性的进展。1717年左右,Fahrenheit发明了水银温度计;1760年左右,Black提出了比热和潜热的概念;1843年Joule测定了热功当量;1848年Kelvin提出了绝对温度的概念;1850年Cluasisus发现热力学第一、第二定律;1855年,Fick发现了扩散定律。这些基础的理论工作为相变的研究提供了可能。

固态相变的实验研究一直是与钢铁材料联系在一起的,最早可以追溯到1864年英国的Sorby用显微镜对钢的微观组织进行观察,人们对金属材料的研究从此进入了微观的世界;1868年Tschernoff研究了钢的淬火和回火组织;大约20年后,美国的Gibbs提出了相平衡的热力学理论,奠定了相变研究的理论基础。1887年法国的Osmond利用刚问世的热电偶发现了钢冷却过程中温度的异常变化(相变潜热释放所致),随后Curie等用磁性、电阻和热膨胀等测量方法,进一步研究了相变潜热现象;1889年Arrhenius提出了热激活过程的基本公式;1896年在相变研究的历程上发生了一件具有历史意义的重大事件,那就是Austen绘制的第一幅Fe-C相图。

Austen早年曾在英国皇家造币局工作10余年。在18世纪,英国皇家造币局的地位相当于英国的国立冶金研究所(当年牛顿也曾在此工作过)。Austen主要从事贵金属的凝固、杂质、气体含量和成分偏析等方面的工作。但由于造币需要用到钢铁模具,他从1880年开始研究气体含量对钢铁淬火和回火的影响及钢铁表面的电沉积。1882年Austen到皇家矿业学院任冶金学教授,受到英国当时鼎盛一时的钢铁工业的推动和Osmond的相变临界点工作的启发,他对钢铁材料的相变进行了深入的研究,并于1897年绘出了世界上第一幅Fe-C平衡相图。它奠定了钢铁材料相变实验研究的基础。为了纪念Austen的伟大贡献,人们把钢中的高温相命名为奥氏体(Austenite)。同样,为了纪念德国冶金学家Martens的重要贡献,人们把奥氏体淬火之后得到的组织,称为马氏体(Martensite)。

1905年Nernst提出了热力学第三定律;1906年左右,Wilm偶然注意到Al合金在室温下存放几天后强度提高了70%,发现了Al合金中的析出硬化现象;1912年Laue和Bragg提出了X射线干涉理论,为金属晶体结构的研究提供了实验条件;1919年Tammann提出了晶格的概念;1921年Westgren确定了铁素体和奥氏体的晶体结构;1926年Campbell确定了马氏体的晶体结构;1930年Bain等开始研究钢的等温相变过程,观察到了后来被命名为贝氏体(Bainite)的组织。1930年西山测定了马氏体和奥氏体的一种晶体学取向关系,被称为西山关系;同时,Orowan提出了刃型位错的模型;1937—1938年Guinier和Preston一起用X射线发