

中等专业学校试用教材

钢铁热处理

北京汽车工业学校 怀柔分校 安正昆 主编

ZHONGDENG
ZHUANYE
XUEXIAO
JIAOCAI



机械工业出版社

中等专业学校试用教材

钢 铁 热 处 理

北京汽车工业学校 怀柔分校 安正昆 主编



机械工业出版社

本书主要内容包括钢的一般加热、冷却转变,珠光体、马氏体、贝氏体、过冷奥氏体的转变。并交叉讲解了与之相应的钢的退火、正火、淬火、回火及淬火缺陷与防止。重点论述了常用的热处理方法,如表面淬火、钢的化学热处理、铸铁热处理及具有发展前途的特种热处理(强韧化、形变、真空热处理和高能密度加热表面强化)等。每章后附有思考题。

所用名词术语及工艺过程控制的有关章节,采用了国家标准及专业标准,还介绍了相应部分的国际标准。

本书为中专教材,亦可做为厂办及业余中专教材,还可供从事金属材料及热处理工作的工程技术人员阅读。

钢 铁 热 处 理

北京汽车工业学校 怀柔分校 安正昆 主编

责任编辑:常燕宾 版式设计:胡金瑛
封面设计:郭景云 责任校对:熊天荣

责任印制:王国光

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ 印张 21·字数 518 千字

1990年6月北京第一版·1990年6月北京第一次印刷

印数 0,001—2,300·定价:3.75元

ISBN 7-111-02068-5/TG·529(课)

前 言

本教材为机电类中等专业学校金属热处理专业试用教材，是根据1985年机电部审定并颁发的中专热处理专业《钢铁热处理》教学大纲编写的。

本教材是中专热处理专业的一门重要专业理论课教材，着重讲解钢铁热处理过程中的相变原理和基本工艺方法，阐明热处理工艺对钢铁组织和性能的影响规律。为学生进一步扩大和深化热处理工艺知识打下基础。

本教材在内容和体系上做了较大调整和改革。采用相变原理与工艺方法交叉讲解的方法，使难点分散，重点突出；有选择地反映近年来热处理技术的新成就；着力培养学生独立工作的能力。

本教材在名词术语、定义及工艺过程控制的叙述上，均以我国有关热处理工艺的国家标准和专业标准为依据。

全书共分十九章，每章最后均附有思考题，以提高学生运用所学知识解决实际问题的能力。

本书由安正昆主编，洪家麓协编。绪论、第一至第十二章由安正昆编写，第十三至第十九章由洪家麓编写；吴建平主审并提供了部分思考题，陈文珠也提供了部分思考题。

山东机械工业学校陈文珠、沈阳机电学校黄丽荣、戚墅堰铁路学校罗广思、浙江机械工业学校王佩伟等参加了编写提纲讨论会和本教材审稿会议，提出了许多宝贵意见，在此深表谢意。

本书还得到西安交通大学、上海交通大学、浙江大学、华中理工大学、陕西机械学院、北京科技大学、北京航空航天大学、北京钢铁研究院、北京机电研究所、上海工艺研究所、上海工具厂、上海热处理厂、北京内燃机厂、长春第一汽车制造厂、湖北第二汽车制造厂等单位的支持和帮助，提供了许多宝贵的资料和图片，在此表示衷心感谢。

由于编者水平有限，缺点和错误在所难免，敬希同行及读者批评指正。

编者

目 录

绪论	1	§ 6-1 贝氏体组织形态、结构和性能	95
第一章 钢的加热转变与加热规范	5	§ 6-2 贝氏体转变特点	102
✓ § 1-1 奥氏体形成	5	§ 6-3 贝氏体转变机理简介	105
§ 1-2 奥氏体形成动力学	12	§ 6-4 影响贝氏体转变的因素与应用	107
§ 1-3 奥氏体晶粒长大及其控制	16	§ 6-5 贝氏体淬火	109
§ 1-4 钢的加热规范	21	思考题	111
§ 1-5 加热缺陷及其防止和校正	26	第七章 钢的过冷奥氏体转变图	112
思考题	33	§ 7-1 过冷奥氏体等温转变图	112
第二章 钢的冷却转变	34	§ 7-2 过冷奥氏体连续冷却转变图	120
✓ § 2-1 钢冷却的概述	34	§ 7-3 两类过冷奥氏体转变图的比较和应 用	126
§ 2-2 钢冷却时转变产物的特 点	37	思考题	130
思考题	39	第八章 钢的淬火	131
第三章 珠光体转变	40	§ 8-1 淬火概述	131
✓ § 3-1 珠光体的组织形态、本质和性 能	40	§ 8-2 淬火工艺	132
§ 3-2 珠光体形成过程	43	§ 8-3 冷处理	138
§ 3-3 珠光体转变动力学	48	§ 8-4 钢的淬透性	140
§ 3-4 亚共析钢和过共析钢冷却时的转 变	52	§ 8-5 淬火介质	150
§ 3-5 相变析出	57	思考题	156
思考题	59	第九章 淬火应力与淬火缺陷	158
第四章 钢的退火和正火	60	§ 9-1 淬火内应力	158
✓ § 4-1 钢的退火	60	§ 9-2 淬火变形	161
§ 4-2 钢的正火	68	§ 9-3 淬火开裂	163
§ 4-3 退火和正火的选用原则	69	§ 9-4 防止淬火变形和开裂的途径	165
思考题	70	§ 9-5 其它淬火缺陷和防止	166
第五章 马氏体转变	71	思考题	168
✓ § 5-1 马氏体组织形态、晶体结构和性 能	71	第十章 钢的回火转变和回火工艺	169
§ 5-2 马氏体转变特点	81	§ 10-1 淬火钢回火时的组织转变	169
§ 5-3 马氏体转变机理简介	86	§ 10-2 回火组织形态	173
§ 5-4 影响 M_s 点的因素	89	§ 10-3 淬火钢回火时机械性能的变化	175
§ 5-5 奥氏体的稳定化	91	§ 10-4 过冷奥氏体分解产物的回火转变和 性能变化	181
思考题	93	§ 10-5 钢的回火工艺	184
第六章 贝氏体转变和贝氏体淬火	95	§ 10-6 钢的时效概述	188
		思考题	190
		第十一章 表面淬火	197

§ 11-1 感应加热表面淬火	191	§ 15-5 渗氮后的质量检查和常见缺陷及防止	282
§ 11-2 火焰表面淬火	212	思考题	284
§ 11-3 其他表面淬火方法 五温淬火	218	第十六章 钢的碳氮共渗	285
思考题	218	§ 16-1 碳氮共渗的特点和分类	285
第十二章 特种热处理工艺	219	§ 16-2 气体碳氮共渗	285
§ 12-1 强韧化热处理工艺	219	§ 16-3 液体碳氮共渗	292
§ 12-2 形变热处理	222	§ 16-4 氮碳共渗(低温碳氮共渗)	293
§ 12-3 真空热处理	227	思考题	296
§ 12-4 高能密度加热表面强化	231	第十七章 其他化学热处理	297
思考题	234	§ 17-1 钢的渗硼	297
第十三章 钢的化学热处理基础	235	§ 17-2 低温电解渗硼	301
§ 13-1 化学热处理的分类及特点	235	§ 17-3 钢的渗金属	302
§ 13-2 化学热处理基本过程	236	§ 17-4 多元共渗和复合热处理	306
思考题	243	§ 17-5 表面覆层合金化	308
第十四章 钢的渗碳	244	思考题	311
§ 14-1 气体渗碳工艺	244	第十八章 铸铁热处理基础	312
§ 14-2 其他渗碳工艺	256	§ 18-1 铸铁热处理特点	312
§ 14-3 渗碳后的热处理	259	§ 18-2 铸铁加热时的组织转变	313
§ 14-4 渗碳件的质量检验及常见缺陷	261	§ 18-3 铸铁冷却时的组织转变	314
思考题	263	思考题	317
第十五章 钢的渗氮	264	第十九章 铸铁热处理工艺	318
§ 15-1 渗氮的特点和分类	264	§ 19-1 灰铸铁热处理	318
§ 15-2 铁氮状态图和渗氮层组织	264	§ 19-2 球墨铸铁热处理	320
§ 15-3 气体渗氮工艺	269	思考题	331
§ 15-4 离子渗氮	276		

绪 论

金属热处理做为—门现代科学已日趋重要。为了很好地学习它，必须先了解其产生、发展和形成的过程；掌握基本概念，熟习其科学规律，以应用于生产实践。

一、热处理的基本概念

将固态金属或合金采用适当的方式进行加热、保温和冷却，以获得所需要的组织结构与性能的工艺，称为热处理。

现代热处理技术，不仅是一种工艺方法，而且是一门完整的科学；有自己的理论、方法和应用范畴。

做为机械制造基础工艺之一，热处理在工业生产中发挥着越来越显著的作用。

二、热处理在现代工业中的地位和作用

现代工业、现代农业、现代国防和现代科学技术的发展离不开金属材料，尽管非金属材料的比重越来越大，而金属材料仍然是基本材料，且其消耗量日益增多，尤以钢铁为主。机械工业中的各类工件，绝大部分是金属材料制造的，在其加工过程中，要经过铸造、锻压、焊接、切削加工、热处理等一系列工序。热处理则是担负着改进工件的组织性能（不改变形状和尺寸），充分发挥材料潜力，以提高使用寿命的重要任务。就目前机械工业生产状况而言，各类机床要经过热处理的工件约占总重量的60~70%；汽车、拖拉机中占70~80%；而轴承、各种工模具几乎100%需要热处理。可见，热处理是机械制造工艺的重要组成部分，是决定产品质量和使用寿命的关键因素，也是充分发挥材料潜力、节约使用材料的有效途径。

随着科学技术的发展，机械制造、矿山、冶金、造船、国防工业等各种工艺方法的改进，设备能力的不断提高，对于金属材料制件提出了越来越高的要求。对强韧性、耐高温、抗氧化、耐腐蚀、抗磨损等性能的要求更加严格，因而采用热处理工件的比重还将继续增加。

三、国内外金属热处理的发展概况和趋势

我国古代最先使用了金属材料，在钢铁热处理方面有许多成就。我国是世界上最早使用生铁的国家，1972年在河北藁城出土的商代铁刃青铜钺，是我国最古老的铁器之一，经分析，铁刃是陨铁，经过加热锻打。这说明早在4000年前的殷商时代已使用铁器。至3000年前春秋时期，我国已使用炼铁技术和生铁韧化方法，如1974年在洛阳灰坑出土的战国早期铁器中，分析了铁铤、铁铲，发现铁铤表面已脱碳，里层为珠光体组织，心部为白口组织；铁铲表面也已脱碳，靠近表面相当于黑心可锻铸铁组织，如图1所示。这说明那时已出现白口铁可锻化的退火方法。到了战国晚期，我国已采用百炼钢技术，即采用铸铁脱碳退火，再经反复锻打的制钢法。随之也使用了钢的淬火技术，如1974年河北易县燕下都出土的一批战国中晚期器具，分析了两把剑，一把戟，均经过淬火处理，都是马氏体组织，如图2所示。2000年前的两汉时期，我国已应用渗碳和碳氮共渗等化学热处理工艺方法。如1976年在河北满城西汉中期刘胜墓出土的刘胜佩剑及错金书刀，其心部含碳量0.05%，而表层高达0.6%以上。说明当时已使用渗碳技术。从汉代开始，我国的热处理技术已有文字记载。例如《史记·天官书》说：“火与水合为淬”；《汉书·王褒传》说：“巧冶铸干将之璞，清水淬其锋”，都是对淬火技

术的记载。

在淬火介质方面也有很大进展。如《蒲元别传》记载，蒲元在今陕西郿县为诸葛亮制刀3000把，他说：“汉中的水钝弱，不任淬；蜀水爽烈”，派人去成都取水，淬之，果然锋利，削装铁珠的竹筒，“应手虚落，若雉生雏，称绝当世，因曰神刀”。又如《北史·艺术列传》记载了五代时的方士綦母怀文用牲畜之尿或脂做淬火介质的事说：“柔铁为脊，浴以五牲之溺，淬以五牲之脂，斩甲过三十札”。《新唐书》，卷222还谈到用马血、元《格致性谈》记载用地洩(石油)、清《续广博物志》第一卷写道：“用硝盐、盐卤、人尿合成淬火介质”。

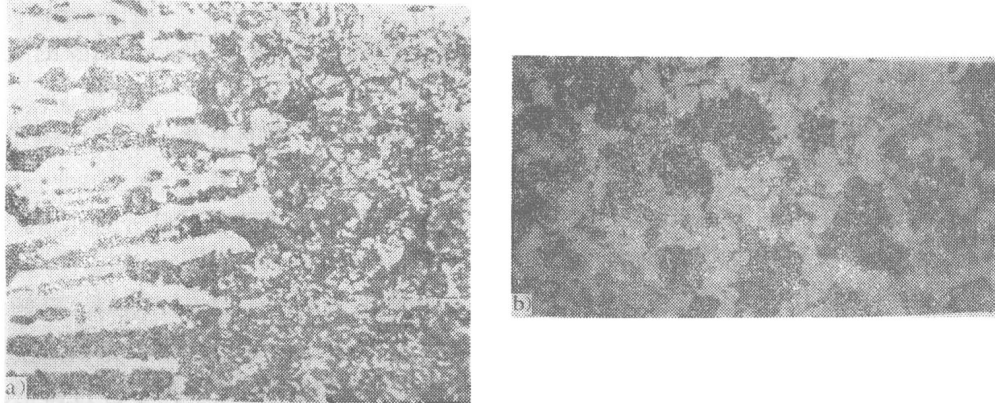


图1 洛阳出土的古代文物铁剑和铁铲的金相组织 200×

a) 铁剑金相组织 b) 铁铲金相组织

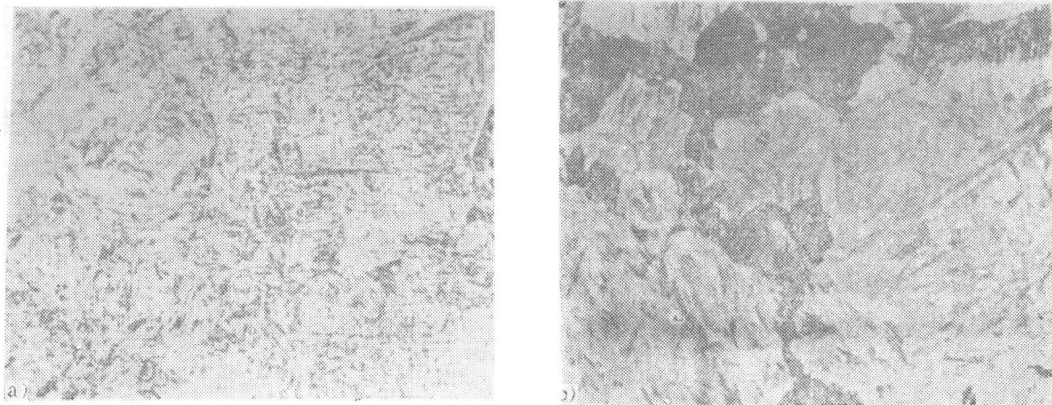


图2 河北易县燕下都出土文物剑和戟的金相组织

a) 剑的金相组织400× b) 戟的金相组织630×

到了500年前的明朝，我国的热处理技术已发展到较高水平，形成了较完整的体系。明朝科学家宋应星在《天工开物》一书中，进行了全面总结。书中第十卷“锤锻”卷中，全面记述了我国古代所采用的各种热处理技术。说到淬火，书中写道：“凡熟铁钢铁，已经炉锤，水火未济，其质未坚。乘其出火之时，入清水淬之，名曰健钢”。在介绍槌的制造过程中写道：“入火退去健性”，还专门论述了渗碳方法，描述“生铁淋口”渗碳以及用松木、火矢、豆豉混合为渗碳剂的固体渗碳等。

综上所述，我国热处理技术，历史悠久，技艺高超，是当时其他国家所不及的。但是，在长期的封建统治和近代帝国主义侵略下的旧中国，科学技术的发展受到很大阻碍。直至解放后，我国的热处理技术才获得了新生、发展和壮大。建国30余年来，我国已造就了一支从

事金属材料及热处理学科的生产、教学、科研的科技队伍，拥有相当规模并有较高水平的热处理工艺装备。保护气氛、真空热处理、感应淬火、形变热处理、离子渗氮等先进工艺已在生产中逐步得到应用，开发了诸如高能密度加热、气相沉积等先进工艺方法，并在马氏体和贝氏体形态、复相组织与性能的关系、复合热处理、微机在热处理中的应用等方面研究中取得很大成果。

在国外历史上，出现热处理技术比我国要晚的多，只是到了产业革命以后，资本主义兴起，金属材料和热处理技术才迅速发展起来。特别是到了19世纪中叶，英国人索拜(H. C. Sorby)和德国人马登斯(Martens)等采用抛光腐蚀方法制样，用光学显微镜观察金属内部组织，大大推动了热处理技术的发展。与此同时，俄国人切尔诺夫(Д. К. чернов)发现了钢的临界点，以后英国人奥斯汀(O. Robert Austen)和法国人奥斯摩特(F. osmord)应用相律建立了铁-碳状态图，从而奠定了热处理的理论基础。到了1930年，美国人贝茵(E. C. Bain)研究了过冷奥氏体的等温转变，建立了钢的等温转变曲线(S曲线)，又大大推动了热处理工艺的发展，1935年美国人格罗斯曼(M. A. Grossmam)出版了《Principles of Heat Treatment》(热处理原理)，对西方热处理技术做了总结，使热处理形成了一门较完整的科学。

在以后的近一个世纪中，随着整个科学技术的发展，热处理技术也得到迅速发展，X射线和电子显微镜的出现，使人们能够从微观世界了解金属更细微的组织结构，从而搞清了各种相变的本质，将热处理理论发展到更高的水平。各种强韧化工艺如形变热处理、复相热处理、超细化处理等先进工艺得到广泛应用；化学热处理新工艺不断涌现；程序控制和微机的出现促使热处理装备的机械化、自动化程度达到了很高的水平。金属材料和热处理检测手段也日臻完善。

与国际先进水平相比，我国现代热处理技术还存在不少差距。主要是设备和工艺落后，热处理质量低下。用外国同行的一句话来说，就是“高水平的论文，落后的生产”。这就需要我国广大热处理工作者在热处理工艺装备改造更新方面下功夫，积极采用新技术、新工艺，尽快改变我国热处理生产的落后面貌。

预计今后热处理技术发展的总趋势是：由于应用了新型的先进测试手段，金属相变和强韧化机理的研究更加深入，许多科研成果如微观结构与宏观性能的关系、高能密度加热、复合化学热处理等，为人们提供了新的理论和信息，又促使人们用新的理论改革传统的工艺，研制新的材料；设计新型的热处理工艺装备。如微合金低碳高强度钢、双相钢、形状记忆合金、新型渗氮钢和工模具钢等新钢种；离子轰击、激光、电子束等超快速加热表面淬火、真空热处理、硬质化合物化学与物理气相沉积等新技术，这些都为金属热处理创造了新的技术领域；热处理设备将日益趋向高度机械化、自动化；热处理过程的微机控制、自动检测已成为控制热处理产品质量的有力手段。机械人进入热处理车间已为期不远，热处理工作者的理想一无变形、无氧化脱碳、高质量、无污染、无噪声、低能耗的热处理生产必将成为现实。

四、本课程的目的、任务和学习要求

本课程是热处理专业的一门重要专业课。主要讲授钢铁热处理基本原理和工艺方法。热处理原理是本专业的基础理论之一，学生学完《金属学》，经过教学实习之后，学习本课程。为进一步学习《合金钢及其热处理工艺》、《金相分析基础》等课程，以及为培养学生分析和解决热处理工艺技术问题的能力打下基础。学生在学完本课程之后应达到下列要求：

(1) 掌握钢铁热处理相变的基本规律, 熟习钢铁热处理的各种组织形态以及和性能间的关系; 初步具备分析、解决一般热处理工艺问题的能力。

(2) 掌握钢铁热处理工艺原理和基本工艺方法, 初步具备编制碳钢工件热处理工艺规范的能力。

(3) 熟习热处理工艺实验方法, 基本掌握热处理组织鉴别和工艺实验的基本技能。

五、本课程的性质和学习方法

本课程是一门理论性和实践性都很强的课程。理论性很强是指本课程中所阐述的基本规律多是微观过程, 类似物理学中的原子结构和化学中的化学反应过程, 无法直接观察, 理论抽象不易理解, 而这些微观过程的规律又是很复杂的, 多因素的, 各因素之间又有着相互制约的复杂关系, 因此学起来会感到抽象、费解; 实践性很强是指本课程的基本理论来源于实践, 又直接应用于实践。许多微观规律, 如相变规律, 要通过实践才能了解其变化过程。各种类型的金相组织形态要通过实验才能观察到, 而各种热处理工艺方法又是直接应用于生产中的。例如热处理的“四把火”——退火、正火、淬火、回火等, 这些方法是根据工件性能的要求而直接用到生产上的。缺乏热处理实践知识的人学习本课程也是比较困难的, 故本课程安排在教学实习之后, 在初步建立起热处理的感性知识的基础上再讲授, 就是这个道理。

基于上述各点, 学习本课程时应注意如下几个方面:

(1) 在讲授的基础上, 学生要独立思考, 发挥形象思维的能力, 着力搞清各种相变的基本规律, 加深基本概念的理解和建立, 防止死记硬背。

(2) 注意理论联系实际, 既要抓住热处理工艺方法的共同规律, 又要分清每种工艺的特殊性, 并与实际的热处理生产过程联系起来, 掌握各种工艺方法影响生产质量的关键所在, 以培养自己分析和解决热处理工艺技术问题的能力。

(3) 科学实验是本门课程的基础, 占有特别重要的地位。因此学习时要给以足够重视, 有些知识, 只有通过实验才能学到手。有些基本原理也只有通过实验才能真正理解。钢铁的微观组织结构, 也只有通过实验才能建立起概念。因此在学习本课程中, 要始终注意培养自己的实验技能, 锻炼探索知识的能力。

第一章 钢的加热转变与加热规范

对工件进行任何形式的热处理，一般都要经过加热、保温、冷却的热循环过程，可见，加热是热处理的第一步工序，在绝大多数情况下，工件热处理时，首先要加热到临界点以上的温度，形成奥氏体，然后再以预定的速度冷却，得到所要求的组织和性能；所以热处理质量与加热时的转变、奥氏体晶粒度、成分、均匀程度和加热规范等有着密切关系。因此，研究奥氏体的形成规律，优选加热规范，具有重要的理论和实践意义。

本章主要讲解钢加热时由平衡组织转变为奥氏体的规律；各种因素对奥氏体形成的影响；从优化工艺的角度介绍加热规范的选择方法；对钢的非平衡组织转变为奥氏体的概念也做简要的介绍。

§ 1-1 奥 氏 体 形 成

一、钢的平衡组织加热转变与铁-碳状态图的关系。

由图1-1Fe-Fe₃C状态图可以看出，随着含碳量的增加，钢在加热前的平衡组织依次为珠光体加铁素体（亚共析钢）、珠光体（共析钢）、珠光体加渗碳体（过共析钢）。对亚共析钢来说，温度低于727℃时，原始组织不变。当温度超过727℃时，原始组织中的珠光体将转变为奥氏体，在共析温度其含碳量为0.77%；继续升温，铁素体逐渐溶入奥氏体中，使奥氏体含碳量逐渐降低，沿SG线变化。温度达A₃以上时，铁素体全部溶入奥氏体中，形成单相奥氏体组织。共析钢在727℃以下为百分之百的珠光体，加热至727℃以上，全部转变为奥氏体。过共析钢在727℃以下加热，原始组织不变，加热至727℃以上，珠光体转变为奥氏体，随着温度的升高，渗碳体逐渐溶入奥氏体中，使奥氏体含碳量逐渐增加，沿SE线变化，当温度达到A_{cm}以上时，全部形成奥氏体组织。反之，当奥氏体平衡冷却时，将发生

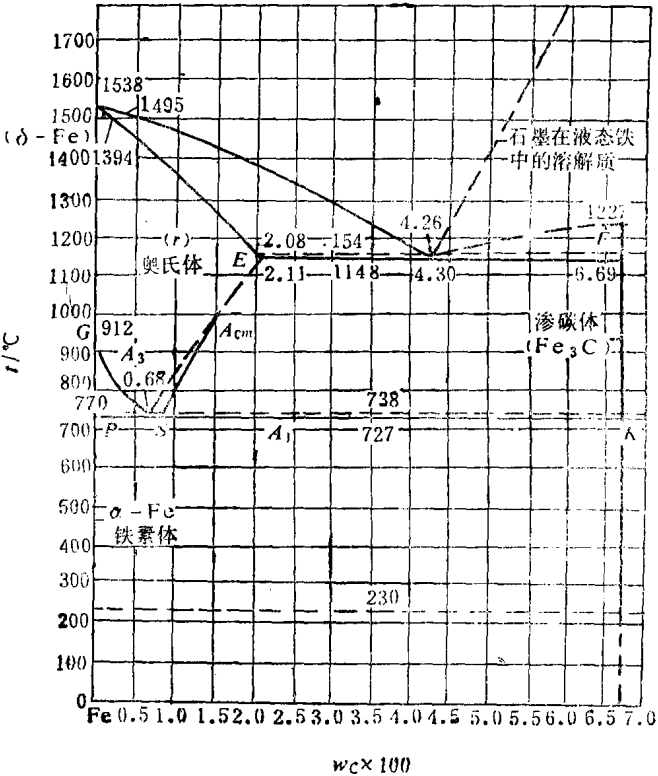


图1-1 Fe-Fe₃C状态图

-----稳定的Fe-C系 ———介稳定的Fe-Fe₃C系

相反的转变，这在金属学课程中已经讲授，此处不再重复。

任何一种含碳量的钢，在加热和冷却时，均可在Fe-Fe₃C状态图上找到其发生相变的临界点。在PSK线上的临界点称为A₁点，在SG线上的临界点称为A₃点，在SE线上的临界点称为A_{cm}点。任何含碳量的钢加热时均发生由珠光体到奥氏体的转变，冷却时则发生由奥氏体到珠光体的转变，因此搞清珠光体-奥氏体间的相变规律，其他转变过程将迎刃而解，故本章首先介绍奥氏体形成规律。

二、奥氏体形成条件

热力学定律指出，一切自发过程，都是从高自由能状态过渡到低自由能状态。钢中的奥氏体和珠光体的自由能都随温度的升高而降低，然而两者的变化率不同，如图1-2所示，奥氏体自由能随温度变化曲线的斜率大于珠光体自由能随温度变化曲线的斜率，必然在某一点相交，此点即Fe-Fe₃C状态图上的A₁点。由图可见，在A₁点温度，两相自由能相等，不能发生相变。只有高于A₁温度，例如T₁时，才出现新旧两相的自由能差，即奥氏体自由能低于珠光体自由能，这就具备了发生珠光体向奥氏体转变的条件。这是因为只有当新旧两相体积自由能差（-ΔG_V）超过新相奥氏体形成所增加的表面能ΔG_S和应变能ΔG_I之和时，奥氏体才能形成。系统自由能变化如下式

$$-\Delta G = -\Delta G_V + \Delta G_S + \Delta G_I$$

式中-ΔG即使珠光体转变为奥氏体的驱动力，

T₁-A₁的差值称为过热度。这就是说，钢在加热时，只有超过临界点A₁，在一定的过热度下，才能由珠光体转变为奥氏体。而过热度取决于加热速度，加热速度越大，过热度越大，临界点越高，自由能差值越大，转变驱动力也越大，奥氏体越容易形成。同理，亚共析钢和过共析钢加热时，只有过热到A₃和A_{cm}以上才能全部转变为奥氏体。反之，钢在冷却时，也必须在一定的过冷度下，才能由奥氏体转变为珠光体（共析钢）、铁素体加珠光体（亚共析钢）、珠光体加渗碳体（过共析钢）。过冷度取决于冷却速度，冷却速度越大，过冷度越大，临界点越低。

为了把实际加热或冷却速度下钢的临界点与平衡状态的临界点区分开来，通常把钢加热时的临界点加注“c”字（chauffage），写成Ac₁、Ac₃、Ac_{cm}。冷却时的临界点则加注“r”字（refroidissement），写成Ar₁、Ar₃、Ar_{cm}，如图1-3所示。这些实际临界点的位置是随加热或冷却速度的增加而升高或降低的。

一般热处理手册上列出的实际临界点数据，多是在30~50℃/h的加热或冷却速度下测定的。

三、奥氏体结构、组织形态和性质

X射线结构分析表明，奥氏体是碳在γ-Fe中的间隙固溶体，以A表示，其中铁原子按面心立方点阵排列，碳原子位于面心立方点阵中心或棱的中间，即八面体的间隙处，如图1-4所示。

如果碳原子全部充满空隙，则其原子浓度为50%。按重量百分数计，则为20%，但实际

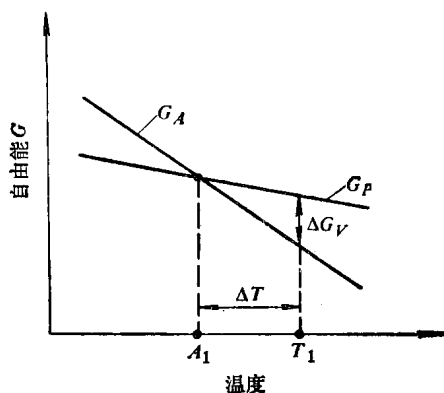


图1-2 珠光体和奥氏体自由能随温度变化示意图

上，奥氏体最高含碳量只能达到2.11%。这是因为 γ -Fe的点阵常数为3.64 Å，最大空隙的半径约0.52 Å，而碳原子半径为0.77 Å。当一个碳原子占据一个空隙后，必然引起点阵畸变，使周围的空隙缩小，难以溶入碳原子。所以碳原子在奥氏体点阵中，最多只能占据10%的晶体空隙位置，大约2~3个 γ -Fe晶胞中才有一个碳原子。奥氏体中碳的分布是不均匀的，存在浓度起伏。

氮、氢、氧、硼等元素的原子也可以溶入奥氏体中，形成间隙固溶体。它们和碳一样，均使奥氏体晶体点阵发生畸变，引起点阵常数增大。其它合金元素如Mn、Si、Cr、Ni、Co等则形成置换固溶体，也会引起点阵畸变，改变点阵常数。奥氏体点阵常数的改变和点阵畸变的程度，取决于溶质的原子半径、点阵类型及其在溶剂奥氏体中的浓度。

一般情况下，由平衡组织转变的奥氏体，在显微镜下为颗粒状或晶界平直、晶内有孪晶线的多边形等轴晶粒，如图1-5所示。

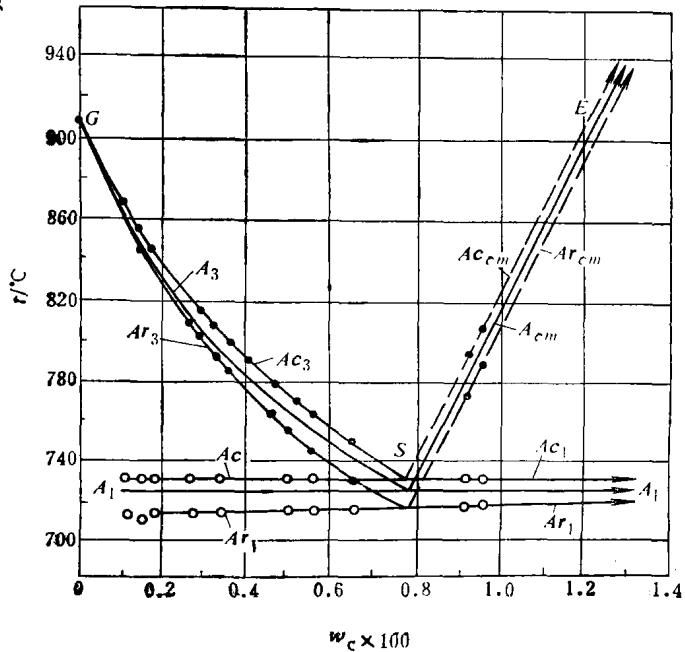


图1-3 加热和冷却速度为0.125°C/min时， A_1 、 A_3 和 A_{cm} 变动情况示意图

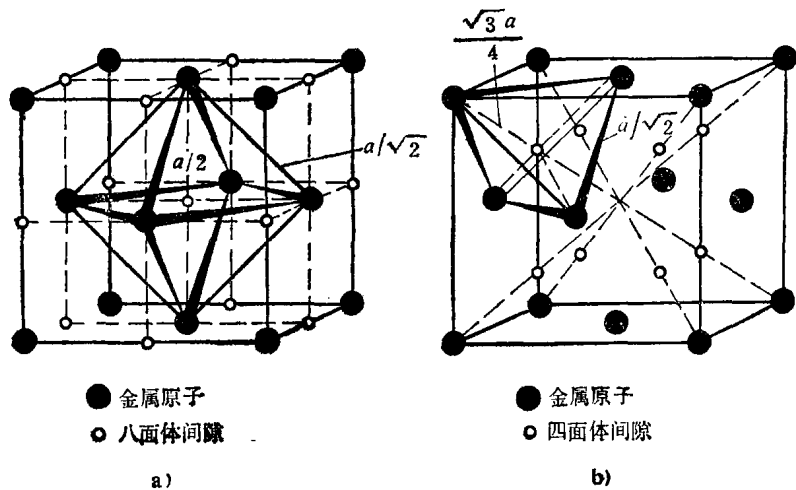


图1-4 碳在 γ -Fe中可能的间隙位置

一般钢的奥氏体组织多在高温存在，但某些高合金钢由于大量合金元素阻止了固态相变，可使奥氏体组织保持到室温，称之为奥氏体钢。

因奥氏体晶体属于面心立方结构，其滑移系多，故塑性很好，屈服强度和强度极限较低，所以常将钢加热至奥氏体状态进行锻轧等热压力加工。

奥氏体具有顺磁性。由于点阵中原子紧密排列，配位数大，在钢的各种组织中，奥氏体

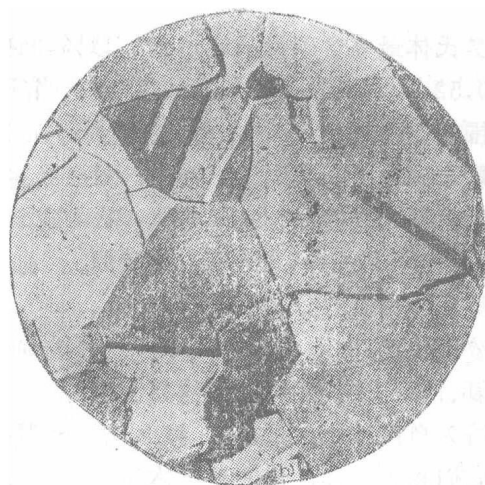
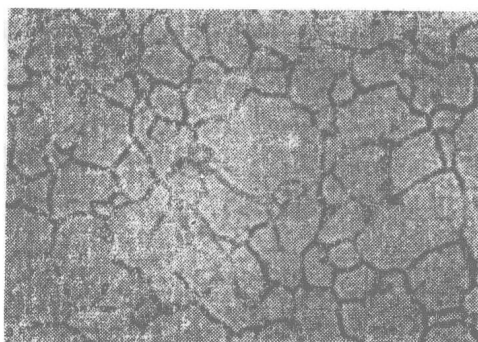


图1-5 奥氏体组织形态 500 ×

a) 颗粒状奥氏体 b) 晶界平直内有孪晶线的奥氏体等轴晶粒

比容最小。这就是利用磁性法和膨胀法测定奥氏体相变的依据。奥氏体的线胀系数比钢的其它任何相都大。在钢的各种相中，除渗碳体外，奥氏体导热性最差，因此奥氏体钢加热时速度不宜过大。

由于奥氏体比容比其它相小，在由其它相转变为奥氏体时，发生比容变化，引起相变应力，这种应力会促使奥氏体产生塑性变形，故在显微镜下会观察到奥氏体有孪晶线。

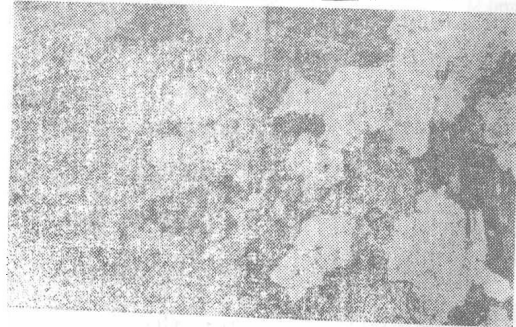
奥氏体有比较高的耐蚀性，在显微镜下，多呈白亮色。

四、奥氏体形成过程

奥氏体的形成过程因原始组织的不同而有不同的特点；但却有共同的规律，即遵循形核和核长大的一般扩散相变的规律。

以共析碳钢为例，其原始组织为珠光体，当加热至 A_{c1} 以上时，珠光体将转变为奥氏体。这一转变过程是如何进行的呢？经过分析已知，转变前珠光体是由片状铁素体和渗碳体组成的机械混合物。铁素体含碳量不大于 0.021%，具有体心立方点阵；渗碳体为复杂的斜方点阵，含碳量为 6.69%。转变后的新相奥氏体含碳 0.77%，具有面心立方点阵；其含碳量比铁素体高 36.6 倍，而为渗碳体的 $1/8$ 。可见，由珠光体转变为奥氏体时，必然产生碳原子的重新分配和铁原子的点阵重建。只有通过铁原子的自扩散和碳原子的异扩散才能完成。故珠光体的奥氏体转变属于扩散型相变。在超快速加热条件下，也会发生无扩散相变，这是一种特殊情况。

如将珠光体组织的共析碳钢薄片试样迅速加热至 A_{c1} 以上某一温度停置，进行保温，在显微镜下可以明显的看到，如图1-6所示，等温初期，奥氏体在珠光体团的交界处，或在铁素体与渗碳体片间的相界面上形核。随着时间的延长，奥氏体晶核靠消耗周围的珠光体不断长大，当珠光体大部分转变为奥氏体后，在新相奥氏体中还有残余的渗碳体；



a) 4 s, b) 6 s, c) 8 s, d) 15 s

图1-6 共析碳钢（珠光体组织）迅速加热至 A_{c1} 以上某一温度停置时奥氏体形成过程（图上为不同的停置时间） 1000 ×

最后渗碳体溶解，形成均匀的奥氏体晶粒。

由上所述，奥氏体形成过程为形核、核长大、残余渗碳体溶解、碳在奥氏体中的均匀化等四个阶段。现对这四个阶段做进一步的分析：

1. 形核

由Fe-Fe₃C状态图可以看出，由平衡组织转变为奥氏体时，铁素体的浓度需达到相应温度下的奥氏体浓度，如740℃时为0.66%的含碳量，780℃时为0.4%的含碳量，800℃时为0.32%的含碳量等。那么，在含碳量很低的铁素体中是否存在这样的高碳区呢？业已证明，由于碳原子的热运动，在铁素体的微观体积内，有可能出现与奥氏体成分相当的高碳区，从而具备了形成奥氏体晶核的浓度条件。另外，在铁素体中，总体上铁原子是按体心立方点阵排列的；但在微观区域内，由于铁原子的热运动，在某一瞬间，可能出现类似于面心立方点阵的排列形式，称之为结构起伏，从而具备了形成奥氏体晶核的结构条件。最后在铁素体微观范围内，有的能量高，有的能量低，亦存在能量起伏，当能量起伏达到一定程度时，就具备了形成奥氏体晶核的能量条件。在Ac₁以上，当浓度、结构、能量都适宜的微观区域的尺寸大于奥氏体晶核的临界值时，就可能成为奥氏体的稳定晶核，并开始长大；小于临界尺寸的微观区域，不能成为稳定晶核，又会在铁素体中消失。

奥氏体晶核优先在铁素体与渗碳体相界面上形成，或优先在珠光体团的交接处形成，这是因为这些地方原子排列不规则。势能高、铁素体与渗碳体中浓度差大，容易达到奥氏体形核条件，有利于扩散形核。

2. 核长大

稳定的奥氏体晶核一旦形成，便出现了新的相界面，即A—F界面和A—cm界面。奥氏体晶核的长大是靠渗碳体向奥氏体中溶解，碳在奥氏体中的扩散以及新相界面分别向铁素体和渗碳体方向推移来完成的。

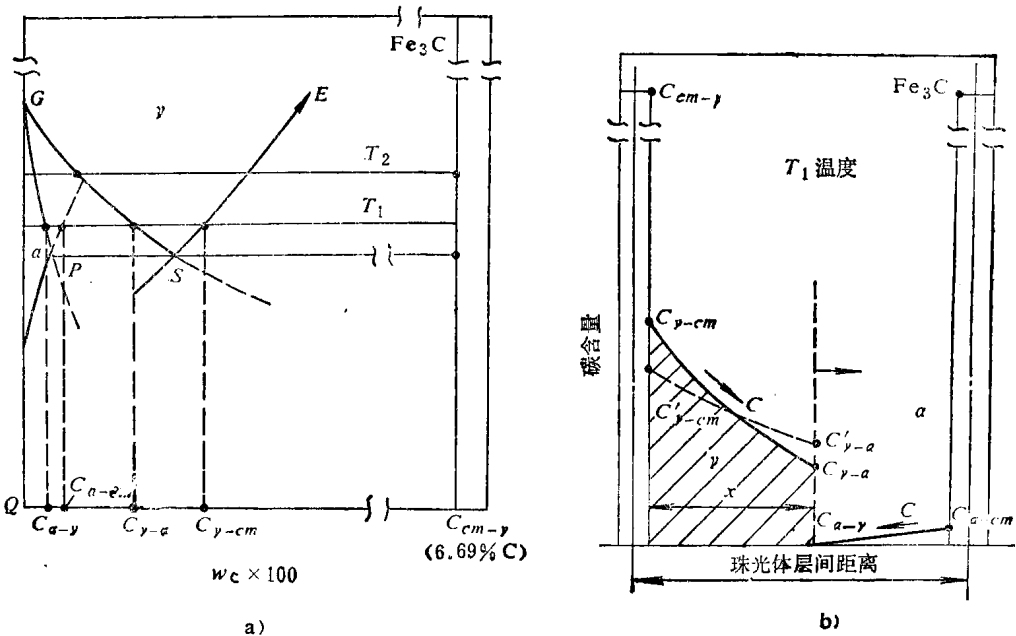


图 1-7 奥氏体晶核长大示意图

a) 碳钢三相共存时利用Fe-Fe₃C状态图确定相界成分 b) 奥氏体晶核靠扩散长大示意图

奥氏体晶核形成后,各相在相界面的平衡碳浓度可由Fe-Fe₃C状态图得知。例如图1-7 a中T₁温度时,奥氏体与铁素体和渗碳体相接触的相界浓度分别为C_{γ-α}及C_{γ-Fe₃C},因C_{γ-α}<C_{γ-Fe₃C},故奥氏体中的碳原子从C_{γ-Fe₃C}处向C_{γ-α}处扩散,如图1-7 b所示。碳的扩散导致C_{γ-Fe₃C}处奥氏体碳浓度降低(C'_{γ-Fe₃C}),C_{γ-α}处奥氏体碳浓度升高(C'_{γ-α})。这就破坏了平衡,提高了系统的自由能,为使自由能降低,恢复平衡,渗碳体必溶于奥氏体,使C_{γ-Fe₃C}处碳浓度升高。同时,铁素体必然转变为奥氏体,使C_{γ-α}处碳浓度下降,从而使奥氏体界面分别向铁素体和渗碳体方向推进了一个新的距离,达到新的平衡。但这又产生了浓度差,必将引起扩散。如此,平衡—扩散—打破平衡—界面推移—平衡,往复循环,使奥氏体不断长大,直至互相接触,转变结束。

3. 残余渗碳体的溶解

由于奥氏体与铁素体相界面的浓度差远比奥氏体与渗碳体相界面的浓度差小,同时,奥氏体与铁素体的结构差别也比奥氏体与渗碳体的结构差别小,所以奥氏体向铁素体方向推移的速度要大的多,铁素体总是比渗碳体消失的早。当奥氏体晶体彼此接触,珠光体形态消失以后,还有部分渗碳体残余下来。只有继续保温,残余渗碳体才会逐渐溶入奥氏体中,直至消失。

4. 碳在奥氏体中扩散均匀化

当残余渗碳体完全溶入奥氏体后,虽然得到单一的奥氏体,但其成分仍是不均匀的,原渗碳体处含碳量高,铁素体处含碳量低,还需继续保温,通过碳原子在奥氏体中的扩散,使奥氏体均匀化。

上述奥氏体形成过程示于图1-8中。

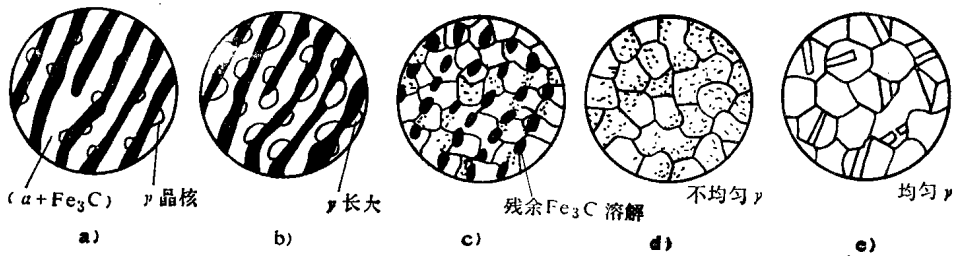


图1-8 珠光体向奥氏体转变过程示意图

如原始组织为球状珠光体时,则加热时奥氏体在球状渗碳体与铁素体相界面上形核,依靠扩散长大,很快包围渗碳体,将渗碳体与铁素体隔开。然后使其界面分别向渗碳体和铁素体方向推移长大。

上述只是以共析碳钢为例说明奥氏体的形成过程。亚共析钢和过共析钢加热时又如何呢?研究指出,与共析钢加热时的转变规律大同小异,亚(过)共析钢加热时,在Ac₁以上首先发生珠光体到奥氏体的转变,进而是先共析相铁素体或渗碳体的溶解。只有加热至Ac₃或Ac_{cm}以上并经过保温后,才能获得单相奥氏体组织。

五、马氏体向奥氏体转变简介

以上所述,是原始组织为平衡组织的条件下,奥氏体的形成规律,实际上,还有原始组织为非平衡组织加热形成奥氏体的情况。如淬火件反修重新加热淬火或循环加热淬火等。

非平衡组织主要指淬火组织、淬火后在不同温度未充分回火的组织、贝氏体及魏氏组织等。当这些非平衡组织加热时,也要形成奥氏体。但其形成规律与平衡组织形成奥氏体的规

律有很大差异，非常复杂，且具有更大的实际意义，因此也是近年来热处理工作者着力研究的课题之一。

马氏体组织加热形成奥氏体的规律具有代表性，并早已应用于实际生产中，现简介如下。

1. 马氏体逆转变形成奥氏体

淬火马氏体组织加热时，将直接转变为奥氏体，其开始转变的温度为 A_s ，转变终了的温度为 A_f ，二者均处于 A_1 温度以下。随着含碳量和加热速度的增加， A_s 下降， A_f 升高，二者差值增大。此种马氏体逆转变现象，多发生于原始组织为片状马氏体中，同样遵循形核和核长大的规律。奥氏体晶核多在马氏体片边缘或马氏体片内部形成，按切变形式长大（详见第五章）成片状或针状，如图1-9所示。当逆转变奥氏体进一步被加热时，将发生再结晶，形成

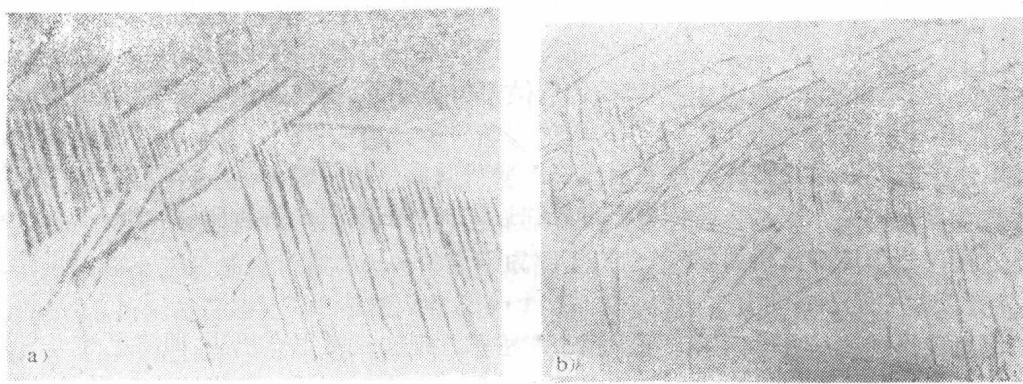


图 1-9 马氏体逆转变形成的片状奥氏体 1000×

a) 马氏体逆转变的奥氏体浮凸 b) 马氏体逆转变的针状奥氏体

等轴晶粒。有意义的是，这种逆转变形成的奥氏体强度要比原奥氏体强度高，由逆转变奥氏体再淬火形成的第二代马氏体，也比第一代马氏体强度、硬度都高。这是由于第一代马氏体中大量位错、孪晶等晶体缺陷，遗传给逆转变奥氏体，并增加了新的晶体缺陷，再淬火后，逆转变奥氏体中的大量晶体缺陷又遗传给第二代马氏体，并再次增加晶体缺陷的结果，这就是相遗传。

2. 马氏体转变为针形和球形奥氏体

将淬火马氏体组织加热至高于 A_{c1} 以上的温度时，将直接转变为针状或球形奥氏体，这种转变多发生于条状马氏体组织加热时。如图1-10所示，针状奥氏体在马氏体板条之间形核，球状奥氏体则在马氏体板条束界或原奥氏体晶界上形核。当继续加热时，针状奥氏体长大互相合并成晶粒大小与原奥氏体同，此种现象即所谓的组织遗传，如图1-10 a。或发生再结晶形成球形奥氏体；球形奥氏体则依靠扩散方式形成球形，如图1-10 b所示，原奥氏体晶界上形成了球形奥氏体，晶内的针形奥氏体又大部分合并成与原奥氏体大小相同的晶粒。

这种转变取决于加热速度、加热温度和原始组织的预处理情况。快速或慢速加热易形成针状奥氏体，中速加热易形成球形奥氏体。加热温度高，以形成球形奥氏体为主，加热温度低以形成针状奥氏体为主。同样加热速度下，未回火或回火不充分者易形成针状奥氏体，回火充分者易形成球状奥氏体。板条马氏体的这种转变最终还是要形成球形奥氏体，可见针状奥氏体只是一种过渡组织。