

普通高等院校“十二五”规划教材

金属材料学 及热处理技术

JINSHU CAILIAO XUE
JI RECHULI JISHU

主编 赵忠魁



国防工业出版社

National Defense Industry Press

普通高等院校“十二五”规划教材

金属材料学及热处理技术

主 编	赵忠魁		
副主编	景财年	夏鹏成	于 宽
	林晓娟	孙保友	董连红
主 审	耿浩然		

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书对热处理原理及工艺、金属材料及其合金化原理进行了比较全面的描述,系统介绍了钢的热处理工艺,热处理过程的相变原理和相变产物,钢的合金化,常用金属材料的组织、性能、应用和热处理。本书深入浅出、图文结合、理论联系实际,并引入了最新科学成果。各章末附有一定量的习题。

本书可作为高等院校机械类、材料类专业本科生、研究生的教材,也可作为厂矿企业、科研院所从事材料选用与开发的工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

金属材料学及热处理技术/赵忠魁主编. —北京:国防工业出版社,2012. 1

ISBN 978-7-118-07817-6

I. ①金... II. ①赵... III. ①金属材料②热处理
IV. ①TG14②TG15

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 272731 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

腾飞印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 17¼ 字数 400 千字

2012 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 35.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

序

金属材料是现代工程制造的基本材料,也是现代科技的基础。自从人类发现与使用金属材料以来,它越来越广泛地被应用于制造生产工具、武器和生活用具。随着近年来科学技术和现代化的发展,对材料性能和质量提出了更高的要求,同时,需要许多具有特殊性能的金属材料。热处理是改变金属材料组织和性能的最重要的技术手段。随着科学技术的发展,为了满足材料不同性能的要求,也为获得高性能的金属材料,各种新的热处理技术正在不断涌现。

材料科学的进步,对担负培养能适应材料科学与工程领域人才的高等院校和科研院所提出了新的要求和任务。目前,新的有关金属材料及热处理技术方面的教材及技术参考书比较缺乏,许多院校还一直沿用旧的版本。为适应材料领域现代化高等教育的需要,本书以金属材料及其合金化、热处理原理及工艺为主要内容,系统全面地介绍了金属材料的组织和性能与其成分之间的联系,论述了如何通过合金化和热处理工艺手段来改变材料的组织结构,以达到提高材料性能的目的。本书还介绍了常用金属材料及其应用等基本知识,为工程结构和机械零件的设计和制造提供合理选用材料的方法。本书具有以下特色:①深入浅出,图文并茂,说理透彻,便于教师教学和学生的自学;②内容丰富,内容布局合理,理论与实践相结合,体现了科学性与实用性;③注重创新,书中编入了较多的金属材料及热处理方面的新知识、新理论、新工艺、新方法、新标准。因此,本书既有一定的学术价值,又有重要的工程应用背景。

《金属材料学及热处理技术》是从生产实践中创造和发展起来并为生产实践服务的一门课程。通过对该课程的学习,可获得有关金属材料和热处理的基本理论和知识,掌握“常用金属材料成分—热处理工艺—组织—性能—应用”之间关系的规律,能根据机械零件的服役条件和失效形式,合理地设计和选用材料。

耿浩然
2011年9月

前 言

金属材料科学与热处理技术是基础科学与工程科学的融合。金属材料广泛应用于工业生产各领域,是工业生产和生活中必不可少的物质基础,对现代科学技术发展和国民经济建设发挥着重要作用。本书较全面地介绍了钢的热处理原理与工艺,钢的合金化,碳素钢与合金钢、铸铁和有色金属材料的成分、组织结构、热处理工艺和性能之间关系以及最新的科学成果。

本书共分为13章,第1章和第2章讲述钢的热处理原理和技术,包括钢在加热、冷却过程中的组织转变规律及转变产物;整体热处理、表面热处理和化学热处理等钢的热处理工艺,也介绍了几种热处理新技术。第3章讲述钢的合金化,包括合金元素与碳的相互作用、合金元素对钢加热和冷却的影响、合金钢中的相组成、微合金化及钢的分类与编号等内容。第4章至第7章讲述结构钢、工具钢、不锈钢和耐热钢,包括各种钢的成分、热处理工艺、主要性能、应用及合金元素在其中的作用,介绍了各类零件的工作条件和选用材料的方法。第8章讲述铸铁,包括铸铁的石墨化,铸铁的类型、组织、性能和用途、热处理。第9章至第13章讲述铝、镁、钛、铜、锌和轴承合金的组织、性能、用途和热处理。本书介绍了金属材料学和热处理的基本原理,分析和认识了金属材料发展的规律,其目的是能使学生根据不同的需求,选择合适的材料,制定合理的工艺制度或者开发新型金属材料。本书编写时力求深入浅出、图文结合、注意理论联系实际,并引入了最新科学成果。为使学生对所学知识进行归纳、总结和复习,每章后面均安排了一些习题。

本书由山东建筑大学的赵忠魁编写第1章、第8章至第11章,山东科技大学的夏鹏成编写第2章和第3章,山东建筑大学的景财年编写第4章、第5章和第6章,山东建筑大学的于宽编写第7章,山东建筑大学的林晓娟编写第12章,菏泽学院的孙保友编写第13章。其中赵忠魁为主编,景财年、夏鹏成、于宽、林晓娟、孙保友为副主编,济南大学的耿浩然教授为主审。

本书在编写过程中,参考了国内外同行的大量文献资料,在此,谨向有关人员表示衷心的感谢!

由于编者水平有限,书中错误和纰漏之处在所难免,敬请广大读者批评指正。

编 者

2011年9月 济南

目 录

第1章 钢的热处理原理 1

1.1 概述 1

1.1.1 金属热处理工艺简介 1

1.1.2 热处理的作用 2

1.1.3 热处理与相图 2

1.1.4 钢的临界温度 3

1.2 钢在加热时的转变 4

1.2.1 共析钢的奥氏体形成 过程 4

1.2.2 非共析钢的奥氏体形成 过程 6

1.2.3 影响奥氏体形成的 因素 6

1.2.4 奥氏体晶粒度及其影响 因素 7

1.2.5 过热与过烧 10

1.3 钢在冷却时的转变 10

1.3.1 概述 10

1.3.2 过冷奥氏体等温转变曲线 (C—曲线) 10

1.3.3 影响过冷奥氏体等温转变的 因素 11

1.3.4 过冷奥氏体连续冷却转变曲 线 15

1.3.5 过冷奥氏体转变图的 应用 17

1.4 珠光体相变 18

1.4.1 珠光体分类 18

1.4.2 珠光体的形成机理 20

1.4.3 亚(过)共析钢的珠光体 转变 23

1.4.4 影响珠光体转变的 因素 24

1.5 马氏体相变 24

1.5.1 马氏体相变的基本 特征 24

1.5.2 马氏体的形态及其亚 结构 26

1.5.3 马氏体相变的开始和 停止 29

1.5.4 奥氏体的稳定化 30

1.5.5 马氏体的力学性质 32

1.5.6 马氏体的应用 34

1.6 贝氏体相变 35

1.6.1 贝氏体的形貌及其亚 结构 35

1.6.2 贝氏体的力学性能 37

1.6.3 贝氏体的形成机理 38

1.7 马氏体回火转变 39

1.7.1 马氏体的分解 39

1.7.2 残余奥氏体转变 42

1.7.3 淬火钢回火时力学性能的 变化 43

习题 45

第2章 钢的热处理工艺 46

2.1 钢的普通热处理 46

2.1.1 退火 46

2.1.2 正火 49

2.1.3 淬火 50

2.1.4 回火 61

2.2 钢的表面热处理 63

2.2.1 感应加热表面热处理 64

2.2.2 火焰加热表面热处理	66	3.5 钢的分类及牌号	100
2.3 钢的化学热处理	66	3.5.1 钢的分类	100
2.3.1 渗碳	67	3.5.2 钢的牌号	100
2.3.2 渗氮	70	3.5.3 钢铁及合金牌号统一数字 代号体系	104
2.3.3 碳氮共渗	73	习题	105
2.4 钢的热处理新技术	73	第4章 结构钢	106
2.4.1 可控气氛热处理	73	4.1 工程结构钢	106
2.4.2 真空热处理	74	4.1.1 工程结构钢的基本 要求	106
2.4.3 离子渗扩热处理	74	4.1.2 低合金高强度结构钢的合 金化	106
2.4.4 形变热处理	75	4.1.3 铁素体—珠光体钢	109
2.4.5 环保型热处理技术	75	4.1.4 微珠光体低合金高强 度钢	113
2.4.6 激光热处理	76	4.1.5 针状铁素体型钢、低碳贝氏 体型钢和双相钢	114
2.4.7 气相沉积	76	4.1.6 低合金高强度钢发展 趋势	117
习题	77	4.2 机器零件用钢	117
第3章 钢的合金化	79	4.2.1 概述	118
3.1 合金元素和铁的作用	79	4.2.2 整体强化态钢	120
3.1.1 钢中的杂质元素	79	4.2.3 表面强化态钢	135
3.1.2 合金元素	80	4.2.4 高锰钢	138
3.1.3 合金元素对 Fe—Fe ₃ C 相图 的影响	83	4.2.5 零件材料选择基本 原则	140
3.2 合金元素对钢的热处理的 影响	85	习题	142
3.2.1 合金元素对奥氏体化的 影响	85	第5章 工具钢和模具钢	143
3.2.2 合金元素对过冷奥氏体的 影响	86	5.1 概述	143
3.2.3 合金元素对淬火钢的回火的 影响	91	5.1.1 工具钢的成分与性能 特点	144
3.3 钢的微合金化	93	5.1.2 工具钢的热加工及热 处理	145
3.3.1 微合金钢的强化机制	93	5.1.3 典型工具钢及其 应用	145
3.3.2 铌、钒、钛微合金化元素的特 性及作用	94	5.2 刀具钢	146
3.3.3 控制轧制与控制冷却 技术	96	5.2.1 刀具钢的工作条件及性能要	
3.4 合金元素对钢工艺性的 影响	97		
3.4.1 热处理工艺性	97		
3.4.2 成型加工性	98		

求	146	6.3.3 奥氏体不锈钢的热 处理	177
5.2.2 碳素刀具钢	147	6.3.4 铬锰不锈钢及铬镍锰奥氏 体不锈钢	178
5.2.3 合金刀具钢	148	6.4 双相不锈钢	179
5.2.4 高速钢	149	6.4.1 铁素体—奥氏体双相不 锈钢	179
5.3 模具钢	156	6.4.2 奥氏体—马氏体双相不 锈钢	180
5.3.1 冷作模具钢	156	习题	181
5.3.2 热作模具钢	160	第7章 耐热钢	182
5.3.3 塑料模具钢	163	7.1 对耐热钢的性能要求	182
5.3.4 表面硬化技术在模具钢中 的应用	163	7.1.1 金属的抗氧化性	182
5.4 量具用钢	164	7.1.2 金属的高温力学性能与 强化	183
5.4.1 量具的工作条件及性能 要求	164	7.2 热强钢	185
5.4.2 常用量具用钢	164	7.2.1 钢的热强性	185
5.4.3 量具钢的热处理	165	7.2.2 珠光体型热强钢	186
习题	166	7.2.3 马氏体耐热钢	188
第6章 不锈钢	167	7.2.4 奥氏体耐热钢	189
6.1 铁素体不锈钢	167	7.3 抗氧化钢	189
6.1.1 铁素体不锈钢的化学成分 及分类	167	7.3.1 铁素体抗氧化钢	189
6.1.2 铁素体不锈钢的 脆性	168	7.3.2 奥氏体抗氧化钢	190
6.1.3 铁素体不锈钢的热 处理	170	习题	190
6.1.4 铁素体不锈钢的特性和 应用	170	第8章 铸铁	191
6.2 马氏体不锈钢	171	8.1 概述	191
6.2.1 马氏体不锈钢的化学 成分	171	8.1.1 铸铁的特点和分类	191
6.2.2 马氏体不锈钢的热 处理	172	8.1.2 铸铁的石墨化	192
6.2.3 马氏体不锈钢的 应用	174	8.2 灰铸铁	197
6.3 奥氏体不锈钢	174	8.2.1 灰铸铁的片状石墨 形态	197
6.3.1 奥氏体不锈钢的化学成分及 平衡组织	174	8.2.2 灰铸铁的化学成分和 组织特征	198
6.3.2 奥氏体不锈钢的晶间腐蚀和 应力腐蚀	175	8.2.3 灰铸铁的牌号	199
		8.2.4 灰铸铁的性能	199
		8.2.5 灰铸铁的孕育处理	200
		8.2.6 灰铸铁的热处理	201

8.3 球墨铸铁	201	9.4.4 锻铝合金	222
8.3.1 球墨铸铁的化学成分和 组织特征	202	9.4.5 Al-Li 合金	223
8.3.2 球墨铸铁的球化处理与孕育 处理	203	9.5 铸造铝合金	223
8.3.3 球墨铸铁的牌号、性能与 用途	204	9.5.1 Al-Si 系铸造铝 合金	224
8.3.4 球墨铸铁的热处理	205	9.5.2 Al-Cu 系铸造铝 合金	225
8.4 蠕墨铸铁	207	9.5.3 Al-Mg 系铸造铝 合金	225
8.4.1 蠕墨铸铁的化学成分和 组织特征	207	9.5.4 Al-Zn 系铸造铝 合金	226
8.4.2 蠕墨铸铁的牌号、性能 特点及用途	207	习题	226
8.5 可锻铸铁	208	第 10 章 镁及其合金	227
8.5.1 可锻铸铁的化学成分和 组织特征	208	10.1 镁合金的特点和分类	227
8.5.2 可锻铸铁的牌号、性能 特点及用途	209	10.1.1 镁合金的特点	227
8.5.3 可锻铸铁的石墨化 退火	210	10.1.2 镁合金的分类	227
8.6 合金铸铁	210	10.2 变形镁合金	228
8.6.1 耐磨铸铁	211	10.2.1 Mg-Mn 系合金	228
8.6.2 耐热铸铁	212	10.2.2 Mg-Zn-Zr 系 合金	229
8.6.3 耐腐蚀铸铁	212	10.2.3 Mg-RE 系合金	230
习题	213	10.2.4 Mg-Li 系合金	231
第 9 章 铝及其合金	214	10.3 铸造镁合金	232
9.1 纯铝	214	10.3.1 Mg-Zn 系合金	232
9.2 铝合金的分类	215	10.3.2 Mg-Al 系合金	233
9.3 铝合金的强化	216	10.3.3 Mg-RE 系合金	234
9.3.1 固溶强化	216	10.3.4 其他镁合金	234
9.3.2 时效强化	217	10.4 特种镁合金	235
9.3.3 过剩相强化	218	10.4.1 耐热镁合金	235
9.3.4 细化组织强化	219	10.4.2 耐蚀镁合金	235
9.3.5 加工强化	219	10.4.3 阻燃镁合金	235
9.4 变形铝合金	219	10.4.4 高强高韧镁合金	236
9.4.1 防锈铝合金	220	10.5 镁及其合金的应用	236
9.4.2 硬铝合金	221	习题	237
9.4.3 超硬铝合金	221	第 11 章 钛及其合金	238
		11.1 钛及其合金的特性	238
		11.1.1 纯钛的性能	238

11.1.2 钛的合金化	238	12.4.2 铍青铜	252
11.1.3 钛合金的主要特性 ...	239	12.4.3 其他青铜	253
11.2 常用钛合金	239	12.5 白铜	253
11.2.1 α 型钛合金	240	12.6 铜合金的热处理	254
11.2.2 β 型钛合金	240	12.6.1 铜合金的去应力退火 处理	254
11.2.3 $\alpha + \beta$ 型钛合金	240	12.6.2 铍青铜的时效处理 ...	254
11.3 钛合金的热处理	241	12.6.3 铜合金的淬火回火 ...	254
11.4 钛合金的用途	242	习题	255
11.5 新型钛合金	242		
习题	243		
第 12 章 铜及其合金	245	第 13 章 滑动轴承合金和锌合金 ...	256
12.1 紫铜	245	13.1 滑动轴承合金	256
12.1.1 紫铜的性能	245	13.1.1 滑动轴承对材料的要 求及材料	256
12.1.2 紫铜的杂质	245	13.1.2 锡基轴承合金	256
12.1.3 紫铜的分类	246	13.1.3 铅基轴承合金	257
12.2 铜的合金化	246	13.1.4 铜基轴承合金	257
12.3 黄铜	247	13.2 锌合金	257
12.3.1 黄铜的性能与成分之 间的关系	247	13.2.1 锌合金的特点	257
12.3.2 黄铜的牌号、分类及 用途	248	13.2.2 锌合金的分类	258
12.4 青铜	250	13.2.3 锌合金成分控制	259
12.4.1 锡青铜	251	习题	259
		参考文献	260

第1章 钢的热处理原理

1.1 概 述

1.1.1 金属热处理工艺简介

热处理工艺一般包括加热、保温、冷却三个过程。这些过程互相衔接,不可间断。热处理工艺曲线如图 1.1 所示。

加热是热处理的重要工序之一。金属热处理的加热方法有很多,主要采用煤、天然气和电作为热源。由于电加热易于控制,且无环境污染,所以应用较多。

加热温度是热处理工艺的重要工艺参数之一。选择和适当的加热温度,是保证热处理质量的前提。加热温度因金属材料 and 热处理的目的不同而不同,一般是加热到相变温度以上,以获得高温组织。另外,相变需要一定的时间。因此,当金属工件表面达到要求的加热温度时,还须在此温度保持一段时间,使内外温度一致,使组织完全转变,这段时间称为保温时间。采用高能密度加热和表面热处理时,加热速度极快,一般没有保温时间的要求,而化学热处理则要求较长的保温时间。

冷却也是热处理工艺过程中不可缺少的工序,主要是控制冷却速度。冷却方法因工艺不同而不同。一般退火的冷却速度最慢,正火的冷却速度较快,淬火的冷却速度更快。钢种不同对冷却速度要求也不同,例如,空硬钢就在空气中冷却而淬硬。

金属热处理工艺可分为整体热处理、表面热处理和化学热处理三大类。根据加热介质、加热温度和冷却方法的不同,每一大类又分为若干不同的热处理工艺。同一种金属采用不同的热处理工艺处理,可获得不同的组织,从而具有不同的性能。

(1) 整体热处理是对金属工件整体加热,并以适当的速度冷却,以改变其整体力学性能的热处理工艺。钢铁整体热处理大致有退火、正火、淬火和回火四种基本工艺。

① 退火是将工件加热到适当温度,保温一段时间后缓慢冷却的热处理工艺。其目的是使金属内部组织达到或接近平衡状态,以获得良好的工艺性能和使用性能,或者为进一步淬火做组织准备。

② 正火是将工件加热到适宜的温度,并保温一段时间后在空气中冷却的热处理工艺。正火的效果同退火相似,但是得到的组织更细。常用于改善材料的切削性能,有时也用于对一些要求不高的零件,作为最终热处理。

③ 淬火是将工件加热并保温后,在水、油或其他无机盐、有机水溶液等淬冷介质中快速冷却的热处理工艺。淬火后,钢件变硬,同时变脆。

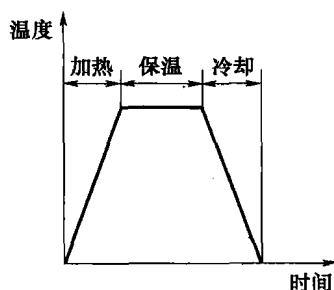


图 1.1 热处理工艺曲线

④ 为了降低钢件的脆性,将淬火后的钢件放在高于室温而低于 650°C 的某一温度下进行长时间的保温,再进行冷却,这种工艺称为回火。

(2) 表面热处理是只加热工件表层,以改变其表层力学性能的热处理工艺。表面热处理的主要方法有火焰淬火和感应加热热处理。

(3) 化学热处理是将工件放在含碳、氮或其他合金元素的介质(气体、液体、固体)中加热,保温较长时间,从而使工件表层渗入碳、氮、硼和铬等元素。渗入元素后,有时还要进行其他热处理工艺,如淬火及回火。化学热处理的主要方法有渗碳、渗氮、渗金属。

1.1.2 热处理的作用

为使金属工件具有所需要的力学性能、物理性能和化学性能,除选用合适的材料和成形工艺外,往往还需要进行热处理。钢铁是机械工业中应用最广的材料。钢铁显微组织复杂,可以通过热处理予以控制,所以钢铁的热处理是金属热处理的主要内容。另外,铝、铜、镁、钛等及其合金也都可以通过热处理改变其力学、物理和化学性能,以获得不同的使用性能。例如,白口铸铁经过长时间退火处理可以获得可锻铸铁,提高塑性;齿轮采用正确的热处理工艺,使用寿命可以比不经热处理的齿轮提高几倍或几十倍;另外,碳钢表面渗入某些合金元素就具有某些合金钢的性能,从而用来代替某些耐热钢、不锈钢。

热处理的目的是改变金属材料的内部组织,以改善其性能。例如,采用高速钢制造车刀,必须先经过热处理,降低钢材硬度,才能进行切削。加工成车刀后,还必须进行热处理,提高钻头的硬度和耐磨性,才能用以切削其他金属。对同一种材料,由于前后要求的性能完全不同,所以,必须通过热处理才能满足要求。

与其他加工工艺不同,热处理一般不改变工件的形状和整体的化学成分,而是通过改变工件的显微组织,或改变工件表面的化学成分,增加或改善工件的使用性能。采用适当的热处理工艺可以消除铸、锻、焊等热加工工艺造成的各种缺陷,细化晶粒、消除偏析、降低内应力,使钢的组织 and 性能更均匀。热处理还可以使工件表面具有抗磨损、耐腐蚀等特殊的物理、化学性能。

钢热处理后,其性能发生如此重大的变化,是由于经过不同的加热和冷却过程,其内部组织结构发生了变化。因此,要制定正确的热处理工艺规范、保证热处理质量,就要了解钢在不同加热和冷却条件下的组织变化规律。钢中组织转变的规律,就是钢的热处理原理。

1.1.3 热处理与相图

虽然通过热处理可改变金属材料组织,从而改善性能,但并不是所有合金都可以通过热处理强化。下面结合相图进行分析。

图 1.2 为某铝合金相图,位于 F 点以左的 I 合金,在固态加热或冷却过程中均无相变产生,因此不能进行热处理强化。成分在 FF' 之间的 II 合金加热到 DF 线以上温度时,可使过剩 β 相全部溶解,形成均匀的 α 相。冷却时,过剩 β 相在 α 相中的溶解度又会发生变化。如果合金从 α 相快速冷却,就会得到过饱和的 α 固溶体,随后加热到一定温度时,过剩 β 相又会从过饱和的 α 固溶体中析出。 D 点以右的 III 合金,有部分 β 相加热时未溶解,这部分组织不参与热处理过程。

可见,只有在加热或冷却时溶解度发生显著变化或者发生类似纯铁的同素异晶转变,即

有固态相变发生的合金才能进行热处理强化。纯金属、某些单相合金等不能用热处理强化,只能采用加工硬化的方法。

图 1.3 为 Fe-Fe₃C 相图的一部分。共析钢加热到 PSK 线以上时,全部转变为奥氏体,亚共析钢、过共析钢则必须加热到 GS 线和 ES 线以上才能获得单相奥氏体。共析钢从奥氏体缓慢冷却到 PSK 线以下,将发生共析转变,形成珠光体。亚共析钢、过共析钢缓冷到 GS 线和 ES 线以下时,分别从奥氏体中析出过剩相铁素体和渗碳体,到 PSK 线以下,再发生共析转变。可见,钢在加热或冷却过程中越过上述临界点就会发生固态相变,所以能够进行热处理强化。

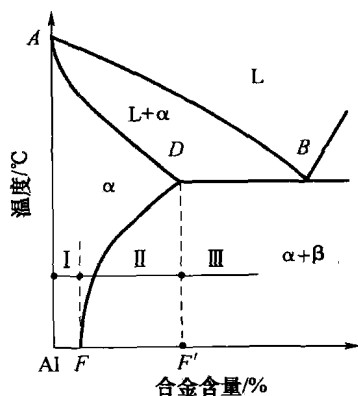


图 1.2 某铝合金相图

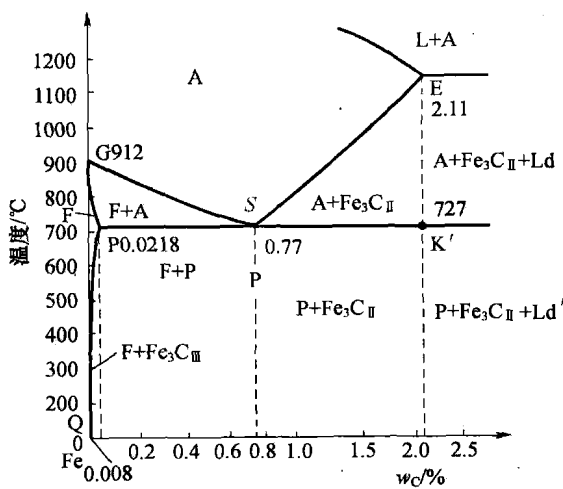


图 1.3 Fe-Fe₃C 相图的一部分

1.1.4 钢的临界温度

从 Fe-Fe₃C 相图(图 1.3)可知,碳素钢(其临界温度在 Fe-Fe₃C 相图上的位置如图 1.4 所示)在缓慢加热和冷却过程中,其固态组织转变的临界温度都可以根据相图上的 PSK 线(A₁ 线)、GS 线(A₃ 线)和 ES 线(A_{cm} 线)来确定。共析钢只有一个临界温度 A₁;亚共析钢有两个临界温度 A₁ 和 A₃;过共析钢也有两个临界温度 A₁ 和 A_{cm}。有时也称 A₁ 为下临界温度,称 A₃ 和 A_{cm} 为上临界温度。

A₁、A₃ 和 A_{cm} 都是平衡临界温度,都是新相与旧相自由能相等的温度。实际的加热转变温度和冷却转变温度都偏离平衡临界温度。加热转变只有在平衡临界温度以上才能进行,冷却转变只有在平衡临界温度以下才能进行。加热和冷却速度越快,其偏离也越大。为了区别于平衡临界温度,通常将加热转变温度标注 c,冷却转变温度标注 r。这几个实际转变温度的物理意义如下。

- (1) A_{c1}:加热时珠光体转变为奥氏体的开始温度;
- (2) A_{r1}:冷却时奥氏体转变为珠光体的开始温度;
- (3) A_{c3}:加热时游离铁素体全部转变为奥氏体的终了温度;
- (4) A_{r3}:冷却时奥氏体析出游离铁素体的开始温度;

(5) A_{ccm} :加热时二次渗碳体全部溶入奥氏体的终了温度;

(6) A_{rcm} :冷却时奥氏体析出二次渗碳体的开始温度。

应当指出,工业碳素钢并不是纯的 $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$ 合金,里面还含有 Si 、 Mn 、 S 、 P 等杂质。这些杂质影响碳素钢的平衡临界温度。但由于杂质含量很少,影响不大,因而可以忽略不计,仍根据 $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$ 状态图确定钢的临界温度。对于合金钢,由于合金元素对平衡临界温度影响很大,甚至会大大改变相图结构,使 A_1 、 A_3 和 A_{cm} 不再是一个恒定温度,而是一个温度区间,这时就不能再根据 $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$ 状态图来确定钢的临界温度,而必须根据三元或多元相图才可以确定其临界温度。

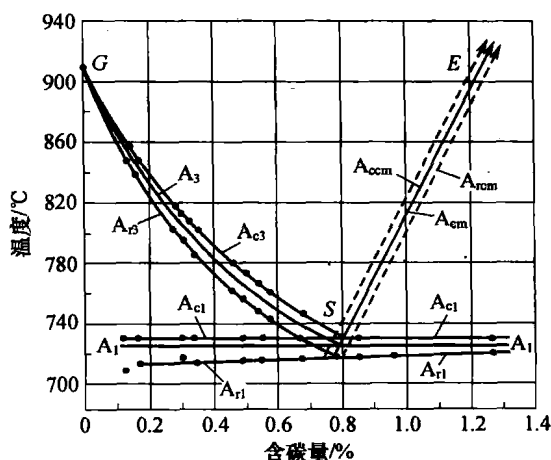


图 1.4 加热和冷却速度 ($0.125^\circ\text{C}/\text{min}$) 对碳素钢临界转变温度的影响

1.2 钢在加热时的转变

热处理的第一道工序是加热,既可以加热到 A_1 以上,也可以加热到 A_1 以下,但两种加热条件下发生的转变是不同的。本节讲述加热到 A_1 以上时,钢所发生的组织转变。

为了得到奥氏体,需要将钢加热到 A_1 以上。通常把钢加热获得奥氏体的转变过程称为奥氏体化。

奥氏体是碳溶于 $\gamma-\text{Fe}$ 形成的间隙式固溶体。合金元素原子 (Mn 、 Si 、 Cr 、 Ni 等) 溶入奥氏体中取代铁原子的位置,形成置换式固溶体,称合金奥氏体。奥氏体具有面心立方晶格,塑性好、易变形。奥氏体冷却时,过冷度不同,得到的组织不同,钢的性能也不同。

1.2.1 共析钢的奥氏体形成过程

共析钢在室温的平衡组织为珠光体,当加热至 A_{cl} 以上时,珠光体将转变为奥氏体,其形成过程如下:

$$\text{P}(\alpha + \text{Fe}_3\text{C}) \rightarrow \gamma$$

$w(\text{C})/\%$	0.0218	6.69	0.77
晶格	BCC	杂复斜方晶格	FCC

三者的成分和晶体结构都相差很大。珠光体是由碳含量很低、具有体心立方晶格的 $\alpha-\text{Fe}$ 和碳含量很高、具有复杂晶格的渗碳体组成的。而奥氏体的碳含量介于两者之间,晶体结构为面心立方晶格。因此,奥氏体的形成过程必然包括铁、碳原子的扩散重新分布和铁晶格的改组。

珠光体向奥氏体的转变包括以下四个阶段:奥氏体形核、奥氏体长大、剩余渗碳体溶解和奥氏体成分均匀化,如图 1.5 所示。

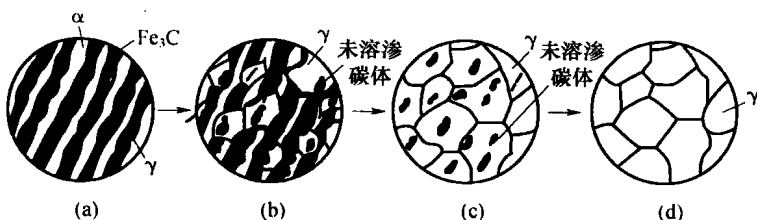


图 1.5 共析钢中奥氏体形成过程示意图

(a) 奥氏体形核; (b) 奥氏体长大; (c) 剩余渗碳体溶解; (d) 奥氏体成分均匀化。

1. 奥氏体的形核

珠光体加热到 A_1 点以上,首先在铁素体和渗碳体的相界面上形成奥氏体晶核。从成分上看,铁素体的碳含量很低,渗碳体的碳含量又很高,而奥氏体的碳含量介于两者之间,因此铁素体与渗碳体都不能直接转变为奥氏体。而在铁素体与渗碳体的界面上具备奥氏体形核所需要的浓度、结构起伏和能量起伏条件,因此,奥氏体晶核优先在铁素体和渗碳体的相界面上形成。

2. 奥氏体的长大

奥氏体晶核的长大过程是依靠 γ/α 和 $\gamma/\text{Fe}_3\text{C}$ 这两个相界面向原有的铁素体和渗碳体中推移进行的。此时,奥氏体与铁素体和渗碳体间建立起的界面的浓度平衡奥氏体中的碳浓度是不均匀的:与铁素体相接处碳含量较低,而与渗碳体相接处碳含量较高。碳原子必然要由高浓度处向低浓度处扩散,从而破坏了相界面平衡条件。为了恢复平衡,高碳的 Fe_3C 将溶解以提高相界面的碳含量;同时,另一界面上,铁素体转变为奥氏体以降低界面碳含量。这样,碳浓度平衡的破坏和恢复反复循环进行,奥氏体便不断地向铁素体和渗碳体中推移,逐渐长大。在碳原子扩散的同时,也包含着铁的晶格的改组。相界面移动的速度表示晶格改组的速度。

奥氏体晶粒长大时,向铁素体方向长大速度总是大于向渗碳体方向的长大速度,而且,转变温度越高,这两个速度相差越大。这是由于奥氏体长大速度与界面浓度差有关,并受碳的扩散所控制。由图 1.6 可知,碳在 γ/α 界面的浓度差 ($C_{d/cem} - C_{\alpha/\gamma}$) 远小于 $\gamma/\text{Fe}_3\text{C}$ 界面的浓度差 ($C_{cem/\gamma} - C_{\gamma/cem}$),这使得奥氏体向铁素体中长大快于向渗碳体中长大。温度越高, γ/α 界面的浓度差越小,而 $\gamma/\text{Fe}_3\text{C}$ 界面的浓度差变化不大,从而使奥氏体向铁素体中长大更快。所以在珠光体转变为奥氏体时,总是铁素体先消失,并由一部分渗碳体颗粒残留在奥氏体中,这时奥氏体的平均碳含量低于共析成分。奥氏体化温度越高,铁素体消失得越快,残余渗碳体越多,奥氏体平均碳含量越低。共析钢奥氏体化时,铁素体刚消失后,奥氏体中的平均碳含量变化如下: 735°C 为 0.77%, 760°C 为 0.69%, 780°C 为 0.61%, 850°C 为 0.51%, 900°C 为 0.46%。

3. 剩余渗碳体的溶解

铁素体消失以后,随着保温时间的延长或继续升温,奥氏体中剩余的渗碳体通过碳原子的扩散,不断溶入奥氏体中。

4. 奥氏体成分均匀化

渗碳体全部溶解后,奥氏体中的碳浓度仍是不均匀的,原来是渗碳体的区域碳浓度较高,而原来是铁素体区域碳浓度较低。通过碳原子的扩散,奥氏体碳浓度逐渐趋于均匀化,

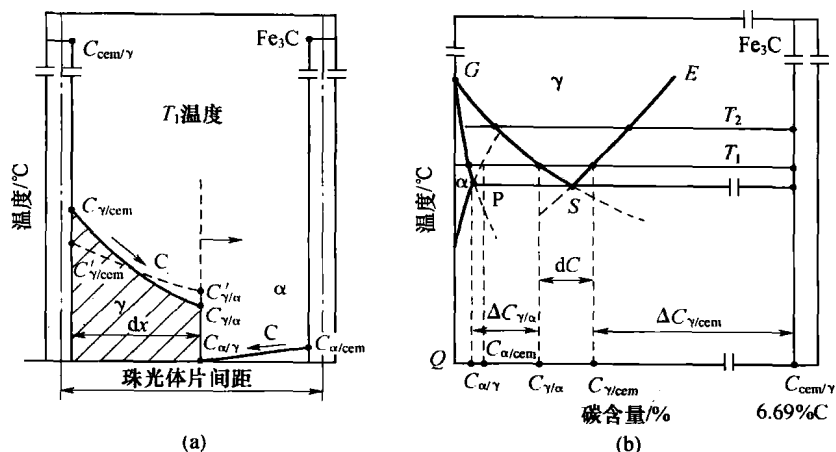


图 1.6 相界面上的碳浓度及扩散
(a) 相界面上的碳扩散; (b) 相界面上各处的碳浓度。

最后得到均匀的单相奥氏体。

1.2.2 非共析钢的奥氏体形成过程

亚共析钢和过共析钢的奥氏体形成过程与共析钢基本相同,当加热温度超过 A_{c1} 时,原始组织中的珠光体转变为奥氏体,仍保留一部分先共析铁素体或先共析渗碳体,该过程称为不完全奥氏体化过程。只有当加热温度超过 A_{c3} 或 A_{cm} ,并保温足够的时间时,才能获得均匀的单相奥氏体,此时称为完全奥氏体化过程。由此可见,非共析钢的奥氏体化包括两个过程,一是珠光体的奥氏体化过程;二是先共析相的奥氏体化过程。

1.2.3 影响奥氏体形成的因素

奥氏体的形成是依靠原子的扩散,通过形核和长大进行的。凡是影响扩散、影响形核和长大的因素,都会影响奥氏体的形成速度。

1. 加热温度和保温时间的影响

图 1.7 为共析钢的等温奥氏体化曲线。图中曲线 1 表示珠光体向奥氏体转变开始;曲线 2 表示铁素体已全部转变为奥氏体,得到奥氏体加残余渗碳体组织;曲线 3 表示残余渗碳体溶解完毕,得到成分不均匀的奥氏体组织;曲线 4 表示奥氏体已经均匀化。从图 1.7 中可以看出:

(1) 加热温度必须高于 A_1 ,珠光体才能向奥氏体转变。转变前有一段孕育期。温度越高,孕育期越短。

(2) 转变温度越高,奥氏体的形成速度越快,转变所需要的时间越短。这是因为,温度越高,奥氏体与珠光体间的自由能差越大,转变的

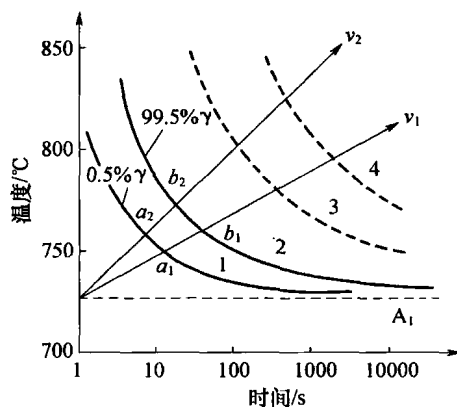


图 1.7 共析钢的等温奥氏体化曲线

推动力越大;温度越高,原子扩散越快,碳的重新分布与铁的晶格重组都越快。

(3) 要获得相同的奥氏体状态,既可长时间低温加热得到,也可短时间高温加热得到。

2. 加热速度的影响

采用连续加热时,加热速度影响奥氏体的形成过程。加热速度对奥氏体转变的影响如图 1.7 所示。比较图中不同加热速度 v_1 、 v_2 的加热曲线可以看出,加热速度越快(如 v_2),孕育期越短,奥氏体开始转变的温度与转变终了温度越高,转变所需的时间也就越短。

3. 原始组织的影响

当钢的原始组织为片状珠光体时,铁素体与渗碳体片层越薄(片间距越小),奥氏体形成速度越快。若珠光体中的渗碳体为粒状时,因铁素体与渗碳体的相界面较片状减少,故将减慢奥氏体的形成速度。

4. 化学成分的影响

随着碳含量的增加,碳化物量也增加了。珠光体中铁素体和渗碳体间界面增加,奥氏体形成率增加,从而使速度加快。同时碳原子扩散距离减小,扩散速度高。但是,渗碳体溶解及奥氏体均匀化时间增加。

钢中的合金元素不改变奥氏体的形成机制,但影响奥氏体形成的速度。一般情况下,合金元素改变珠光体向奥氏体转变的临界点,影响碳在奥氏体中的扩散速度,从而影响到奥氏体的形成速度。

Cr、Mn、W、V 等强碳化物形成元素降低碳在奥氏体中的扩散速度,大大减慢奥氏体形成速度。Si、Al、Mn 等元素对碳在奥氏体中的扩散能力影响不大。Co、Ni 等非碳化物形成元素提高碳在奥氏体中的扩散速度,加快奥氏体的形成速度。

合金元素可以改变碳在奥氏体中的溶解度,改变钢的过热度,影响奥氏体的形成过程。在合金钢的平衡组织中,碳化物形成元素集中在碳化物中,非碳化物形成元素集中在铁素体中。奥氏体形成后,碳和合金元素在奥氏体中分布极不均匀,这会增加奥氏体均匀化的时间。

1.2.4 奥氏体晶粒度及其影响因素

1. 晶粒大小与力学性能的关系

晶粒大小对材料的性能影响很大,材料的屈服强度 R_e 与晶粒直径 d 符合 Hall - Petch 公式:

$$R_e = R_{e0} + kd^{-1/2} \quad (1-1)$$

式中: R_{e0} 为单晶体的屈服强度; k 为与材料有关的常数。

可见,晶粒越细小,材料的强度越高。另外,晶粒细小还可以提高材料的塑性和韧性。奥氏体的晶粒大小对钢随后的冷却转变及转变产物的组织和性能都有重要影响。通常,粗大的奥氏体晶粒冷却后得到粗大的组织,其力学性能指标较低。这需要了解奥氏体晶粒度的概念以及影响奥氏体晶粒度的因素。

2. 奥氏体晶粒度

通常使用长度、面积、体积或晶粒度级别数来表示不同方法评定或测定的晶粒大小,而使用晶粒度级别数表示的晶粒度与测量方法和计量单位无关。所以奥氏体晶粒大小用晶粒