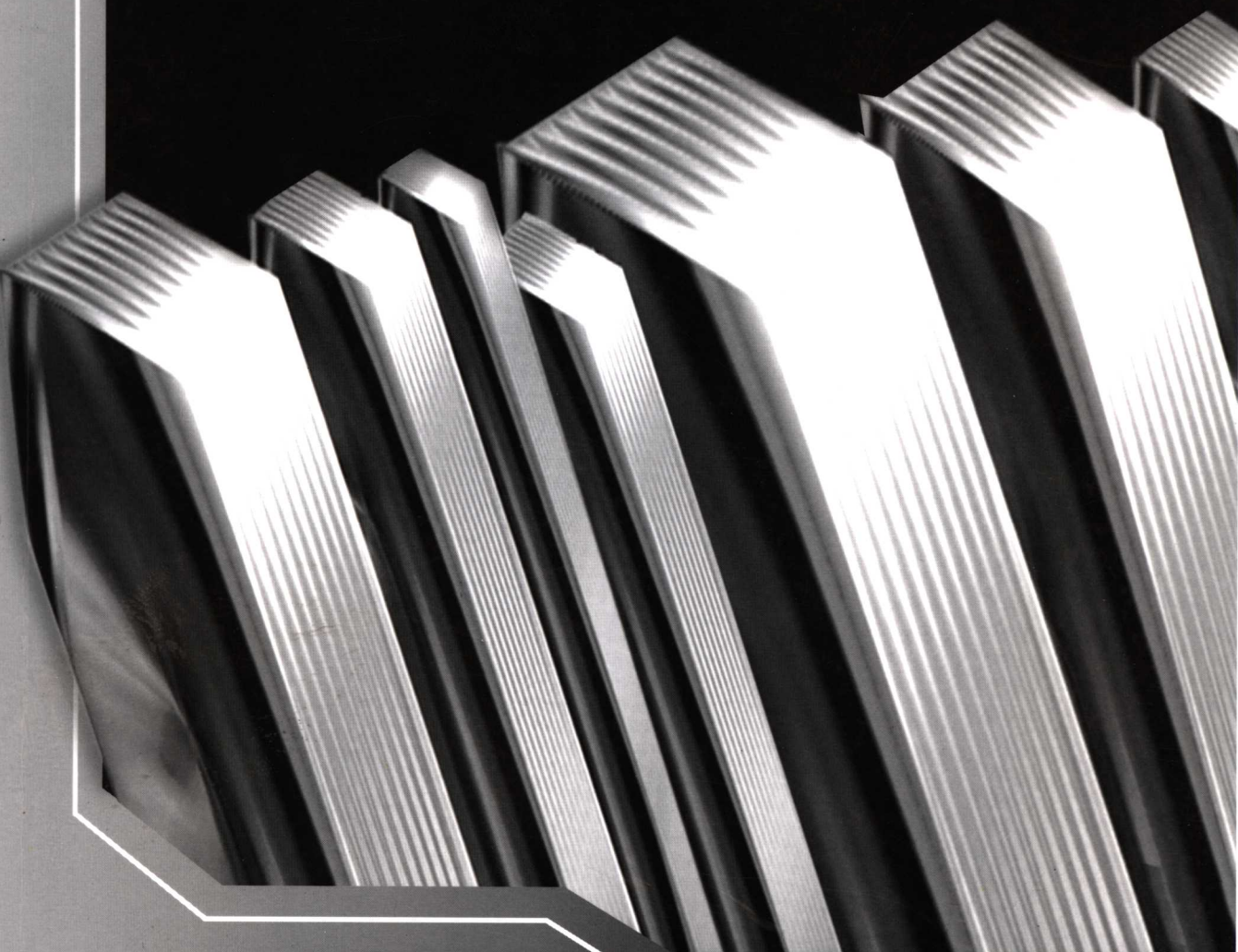


金属材料 及其成形性能

李晨希 何世海 刘政军 于宝义 编著



化学工业出版社

金属材料及其成形性能

李晨希 何世海 刘政军 于宝义 编著



化学工业出版社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

金属材料及其成形性能/李晨希等编著. —北京: 化学工业出版社, 2007
ISBN 978-7-5025-9869-3

I. 金… II. 李… III. 钢-热处理 IV. TG161

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 001522 号

责任编辑: 丁尚林

文字编辑: 张绪瑞 张燕文

责任校对: 蒋 宇

装帧设计: 王晓宇

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 装: 化学工业出版社印刷厂

787mm×1092mm 1/16 印张 14 $\frac{3}{4}$ 字数 362 千字 2007 年 3 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 28.00 元

版权所有 违者必究

前 言

尽管无机非金属材料、有机高分子材料和复合材料等发挥的作用越来越重要，但现在乃至以后相当长的时期内，金属材料作为工程材料仍将发挥极其重要的作用。金属材料广泛地应用于人类生活和生产中，是现代工业和科学技术等方面不可缺少的重要材料。金属材料之所以被广泛应用，是由于它具有优良的使用性能和工艺性能，易于制成性能、形状都能满足使用要求的机械零件、工具和其他制品。

为了能够正确地选用金属材料，合理地制定材料的加工工艺，充分发挥金属的性能潜力，金属材料热加工、材料学、机械制造、冶金工程等领域的科研人员、工程技术人员必须熟悉金属材料的性能，掌握其变化规律。为此，就需要深入研究金属材料的成分、组织结构和性能之间的关系，掌握金属材料中各种组织结构的形成及其变化规律，熟悉金属材料的铸造性能、焊接性能和锻压性能，而这些正是本书所要讨论的内容。

在所有金属中，钢和铸铁是使用最多的金属材料。本书主要介绍钢的热处理原理及工艺，钢的强化机制和改善钢塑性、韧性的途径，合金元素在钢中的作用；铸铁的石墨化过程，灰口铸铁、球墨铸铁、蠕墨铸铁、可锻铸铁、特种铸铁的成分、组织和性能；结构钢、刀具钢、模具钢、量具钢、不锈钢和抗磨钢的分类、成分、组织、性能和用途，这些钢种的焊接性能、铸造性能和锻造性能。

常用的有色金属材料是铝及铝合金、铜及铜合金，最近几年镁合金和钛合金的应用也日益广泛。本书论述了这些金属材料的分类、成分、组织和力学性能、铸造性能、焊接性能和锻压性能。

高温合金主要用于制造航空发动机、航天火箭发动机、工业燃气轮机的耐热部件，也是能源、冶金和化工等工业的重要金属材料。本书介绍了高温合金的特性、分类和合金化原理，高温合金的定向凝固技术、焊接性能和锻造性能。

在本书编写过程中，内容上力求做到理论性、先进性和实用性的结合，重点地论述一些理论性问题，以使读者能深入理解一些工艺问题的实质。在编写中，注意引入近年来国内外一些新的理论和生产技术，以使读者能了解金属材料及其成形性能方面的新发展。还注意引用生产实际中的资料和数据，以求理论与实际结合。本书可供材料、机械、冶金等领域的科研人员、工程技术人员学习或培训使用，也可作为材料成型及控制工程专业及相关专业的教材。

本书的绪论、第10章、第11章、8.1~8.3、3.2节由何世海编写；5.4~5.6、6.9、7.1、7.3、7.4、9.4节由刘政军编写；3.4、4.4、5.2、7.2、8.4、9.1~9.3节由于宝义编写；其他各章节均由李晨希编写并全书统稿。

由于作者水平有限，书中疏漏和不足之处在所难免，诚恳欢迎广大读者批评指正。

编著者
2007年1月

目 录

绪论	1
0.1 概述	1
0.2 金属材料的焊接性能	2
0.3 金属材料的铸造性能	2
0.4 金属材料的锻造性能	3
第1章 钢的热处理原理及工艺	4
1.1 概述	4
1.1.1 热处理的目的及应用	4
1.1.2 钢的临界温度	4
1.2 钢在加热时的转变	5
1.2.1 共析钢的奥氏体化过程	5
1.2.2 影响奥氏体化的因素	6
1.2.3 非共析钢的奥氏体化过程	7
1.2.4 奥氏体晶粒度	8
1.3 钢在冷却时的转变	9
1.3.1 过冷奥氏体的等温转变	9
1.3.2 过冷奥氏体在连续冷却中的转变	10
1.3.3 珠光体转变	12
1.3.4 马氏体转变	14
1.3.5 贝氏体转变	18
1.3.6 魏氏组织	20
1.4 钢在回火时的转变	20
1.4.1 淬火状态钢的不稳定性	20
1.4.2 淬火状态钢在回火过程中的组织转变	20
1.4.3 淬火钢回火过程中力学性能的变化	22
1.4.4 回火脆性	23
1.5 钢的退火与正火	23
1.5.1 钢的退火	23
1.5.2 钢的正火	26
1.6 钢的淬火与回火	26
1.6.1 钢的淬火	26
1.6.2 钢的回火	30
1.6.3 淬火及回火的主要缺陷和防止措施	31
1.7 钢的表面淬火	32
1.7.1 感应加热表面淬火	32
1.7.2 火焰加热表面淬火	33
1.8 钢的化学热处理	34

1.8.1	化学热处理的基本过程	34
1.8.2	钢的渗碳	35
1.8.3	钢的氮化	37
1.8.4	碳氮共渗	39
1.9	钢的形变热处理	39
1.9.1	高温形变热处理	39
1.9.2	低温形变热处理	40
第2章	合金元素在钢中的作用	41
2.1	合金元素与铁和碳的作用	41
2.1.1	合金元素在钢中的存在形式	41
2.1.2	合金元素与铁的相互作用	41
2.1.3	合金元素与碳的相互作用	43
2.2	合金元素对钢相变的影响	45
2.2.1	合金元素对 Fe-C 相图的影响	45
2.2.2	合金元素对加热时奥氏体形成过程的影响	46
2.2.3	合金元素对过冷奥氏体分解过程的影响	46
2.2.4	合金元素对回火过程的影响	47
2.3	钢的强化机制	48
2.3.1	固溶强化	48
2.3.2	晶粒细化强化	49
2.3.3	第二相强化	49
2.3.4	位错强化	50
2.4	改善钢塑性和韧性的途径	50
2.4.1	改善钢塑性的途径	50
2.4.2	影响钢塑性的主要因素	50
2.4.3	改善钢韧性的途径	51
2.5	钢的分类及编号	53
2.5.1	钢的分类	53
2.5.2	钢的编号	53
第3章	结构钢	56
3.1	结构钢的成分、性能和用途	56
3.1.1	普通结构钢	56
3.1.2	优质结构钢	60
3.2	结构钢的焊接性能	67
3.2.1	普通低合金钢的焊接性能	68
3.2.2	低碳调质钢的焊接性能	70
3.2.3	中碳调质钢的焊接性能	72
3.3	结构钢的铸造性能	73
3.3.1	流动性	73
3.3.2	体积收缩率与缩孔率	74

3.3.3	线收缩率	74
3.3.4	热裂倾向	75
3.3.5	冷裂倾向	75
3.4	结构钢的锻造性能	76
3.4.1	合金元素和杂质对钢塑性的影响	76
3.4.2	钢的高温塑性	77
3.4.3	变形抗力和锻造温度范围	78
第4章	工具钢	81
4.1	刃具钢	81
4.1.1	碳素工具钢	81
4.1.2	低合金工具钢	82
4.1.3	高速钢	83
4.2	模具钢	87
4.2.1	冷作模具钢	88
4.2.2	热作模具钢	90
4.3	量具钢	92
4.4	高速钢的锻造性能	93
4.4.1	合金元素对高速钢热塑性的影响	93
4.4.2	高速钢的热塑性和锻造温度范围	94
第5章	特殊性能钢	95
5.1	不锈钢	95
5.1.1	金属腐蚀的类型	95
5.1.2	不锈钢中合金元素的作用	96
5.1.3	常用不锈钢	97
5.2	不锈钢的锻造性能	102
5.2.1	不锈钢的可锻性	102
5.2.2	不锈钢的锻造温度范围	105
5.3	耐热钢	106
5.3.1	耐热钢的抗氧化性和高温强度	106
5.3.2	常用的耐热钢	108
5.4	不锈钢和耐热钢的焊接性能	111
5.4.1	奥氏体钢的焊接性能	111
5.4.2	马氏体钢及铁素体钢的焊接	117
5.5	不锈钢和耐热钢的铸造性能	117
5.6	抗磨钢	119
5.6.1	高锰钢的成分、热处理和性能	119
5.6.2	化学成分对高锰钢性能的影响	120
5.6.3	改善高锰钢性能的途径	121
5.6.4	高锰钢的铸造性能	121
第6章	铸铁	122

6.1 铸铁的特点和分类	122
6.1.1 铸铁的成分、组织和性能特点	122
6.1.2 铸铁的分类	122
6.2 铸铁的结晶	123
6.2.1 灰铸铁的一次结晶	124
6.2.2 灰铸铁的二次结晶	125
6.3 铸铁的石墨化	126
6.3.1 铸铁的石墨化过程	126
6.3.2 影响铸铁石墨化的因素	126
6.4 灰铸铁	127
6.4.1 灰铸铁的牌号、成分及组织	128
6.4.2 灰铸铁的性能和用途	128
6.4.3 灰铸铁的孕育处理	131
6.5 球墨铸铁	133
6.5.1 球墨铸铁的生产	133
6.5.2 球墨铸铁的组织和性能特点	134
6.5.3 球墨铸铁的牌号、成分和用途	134
6.5.4 球墨铸铁的球化处理	135
6.5.5 球墨铸铁的孕育处理	137
6.5.6 球墨铸铁的铸造性能及常见缺陷	138
6.6 蠕墨铸铁	141
6.6.1 蠕墨铸铁的生产	141
6.6.2 蠕墨铸铁的牌号、组织、性能及用途	141
6.6.3 蠕墨铸铁的铸造性能及常见缺陷	142
6.7 可锻铸铁	142
6.7.1 可锻铸铁的牌号、组织、性能和用途	142
6.7.2 可锻铸铁的化学成分及孕育处理	144
6.7.3 可锻铸铁的生产过程	144
6.7.4 加速可锻铸铁退火过程的途径	146
6.7.5 可锻铸铁的铸造性能	146
6.7.6 可锻铸铁件常见缺陷及产生原因	147
6.8 特种铸铁	147
6.8.1 耐磨铸铁	147
6.8.2 耐热铸铁	148
6.8.3 耐蚀铸铁	150
6.9 铸铁的焊接性能	150
6.9.1 灰口铸铁的焊接性能	150
6.9.2 球墨铸铁的焊接性能	155
6.10 铸铁的热处理	155
6.10.1 铸铁的金相学特点	156

6.10.2 铸铁热处理工艺	156
第7章 铝及铝合金	158
7.1 铝及铝合金的特性和分类	158
7.1.1 纯铝的特性	158
7.1.2 铝及铝合金的分类	158
7.2 变形铝合金及其锻造性能	160
7.2.1 变形铝合金	160
7.2.2 铝合金的锻造性能	162
7.3 铸造铝合金及其铸造性能	165
7.3.1 铸造铝硅合金及其铸造性能	165
7.3.2 铸造铝铜合金及其铸造性能	167
7.3.3 铸造铝镁合金及其铸造性能	168
7.3.4 铸造铝锌合金	169
7.3.5 铝合金铸件的热处理	169
7.4 铝合金的焊接性能	170
7.4.1 焊缝的气孔	171
7.4.2 焊接热裂纹	172
7.4.3 焊接接头的力学性能	174
7.4.4 焊接接头的耐腐蚀性能	176
第8章 铜及铜合金	177
8.1 纯铜的性能特点	177
8.2 铜合金	177
8.2.1 黄铜	177
8.2.2 青铜	180
8.3 铜合金的焊接性能	184
8.4 铜合金的锻造性能	186
8.5 铜合金的铸造性能	189
第9章 镁及镁合金	190
9.1 镁合金的成分、组织和性能	190
9.1.1 镁及镁合金的特性	190
9.1.2 镁合金的分类、组织和性能	191
9.2 变形镁合金及其锻造性能	193
9.2.1 常用变形镁合金	193
9.2.2 镁合金的锻造性能	194
9.3 铸造镁合金及其铸造性能	195
9.3.1 常用铸造镁合金	195
9.3.2 镁合金的铸造性能	196
9.4 镁及镁合金的焊接性能	196
第10章 钛及钛合金	198
10.1 钛及钛合金的分类及性能	198

10.1.1	工业纯钛	198
10.1.2	钛合金	200
10.2	钛及钛合金的焊接性能	202
10.2.1	杂质元素对焊接接头力学性能的影响	202
10.2.2	焊接接头裂纹	205
10.2.3	焊缝气孔	205
10.3	钛合金的锻造性能	206
10.3.1	加热温度对钛合金组织及工艺塑性的影响	206
10.3.2	应变速率对变形抗力和工艺塑性的影响	207
10.3.3	锻造温度范围	208
10.4	钛合金的铸造性能	209
第 11 章	高温合金	210
11.1	高温合金的特性和分类	210
11.2	高温合金的合金化	213
11.2.1	镍基高温合金的合金化	213
11.2.2	铁基高温合金的合金化	214
11.3	高温合金的定向凝固技术	214
11.4	高温合金的焊接性能	215
11.4.1	焊接热裂纹	216
11.4.2	应变时效裂纹	217
11.4.3	焊接接头的“等强性”	217
11.5	高温合金的锻造性能	218
11.5.1	高温合金的变形特点	218
11.5.2	高温合金的可锻性	218
11.5.3	高温合金的锻造温度	220
参考文献		224

绪 论

0.1 概述

进入 21 世纪,我国金属材料的产量和品种已跃居世界生产大国的行列。仅就钢铁产量,近几年更是突飞猛进,连续几年位居世界钢铁生产大国之首。据国际钢协 (IISI) 统计和新华社信息,2004 年、2005 年世界钢铁主要生产国钢铁产量见表 0-1、表 0-2。

表 0-1 2004 年世界钢铁主要生产国钢铁产量

国 家	粗钢产量/ 10^6 t	占世界总产量比例/%	高炉铁水产量/ 10^6 t	占世界总产量比例/%
中国	272.5	25.8	257.8	35.7
欧盟 25 国	193.3	18.3	110.9	15.4
独联体国家	113.8	10.8	85.7	11.9
日本	112.7	10.7	83.0	11.5
美国	98.9	9.4	42.3	5.9
韩国	47.5	4.5	27.6	3.8
合计	838.7	79.5	607.3	84.2
世界总计	1054.8	100.0	781.1	100.0

表 0-2 2005 年世界钢铁主要生产国钢铁产量

国 家	粗钢产量/ 10^6 t	占世界总产量比例/%	高炉铁水产量/ 10^6 t	占世界总产量比例/%
中国	349.4	30.9	330.4	42.3
欧盟 25 国	186.0	16.5	107.0	13.7
独联体国家	112.7	10.0	82.8	10.6
日本	112.6	10.0	83.1	10.6
美国	103.5	9.2	36.4	4.7
韩国	47.5	4.2	27.3	3.5
合计	956.7	80.8	667.0	85.4
世界总计	1129.8	100.0	781.1	100.0

2004 年世界钢铁产量达到 10.548 亿吨,这是人类历史上钢产量首次突破 10 亿吨。2004 年钢产量比 2003 年增长了大约 1.1 亿吨,其中中国的钢产量增长为 5234 万吨,占世界钢产量增长量的 47.73%。

2005 年中国粗钢产量首次超过 3 亿吨,达到了 3.49 亿吨,相当于全世界产量的 30%左右,相当于产量排名第 2、3、4 位国家全部产量的总和。

据中国国家统计局公布,2004 年、2005 年中国有色金属产量见表 0-3。

表 0-3 中国有色金属产量

/ 10^4 t

年 份	铜	铝	锡	铅	锌	镍
2004 年	20.351	65.575	1.17247	17.53500	25.371	0.71481
2005 年	25.335	74.121	1.24017	13.34200	26.721	0.91413

除个别金属如镍为我国短缺资源外,其他有色金属多为世界生产大国。

虽然无机非金属材料、有机高分子材料和复合材料等新型材料或先进材料发挥的作用越来越重要,但现在乃至以后相当长的时期内金属材料作为主要材料,仍将发挥极其重要的作用。

元素周期表中化学元素大致可分为金属和非金属元素。第Ⅰ、Ⅱ族及过渡族元素都是典型的金属元素,自ⅢA(硼族)至0族(惰性气体)中以B、Si、Ge、Sb、Te、At等元素为界线,左边为金属,右边为非金属,分界线上的这些元素称为半金属。通常,将金属材料分为黑色金属和有色金属两部分。黑色金属是指钢铁和其他铁基合金,以及铬、锰及其合金。以其他金属为基的合金称为有色金属或非铁合金。诸如Al、Mg、Cu、Ti等及其合金为有色金属。

金属材料作为工程材料,必须经过各种形式的加工和处理才能满足工程结构及其各种机器零部件性能的要求。而金属材料的成形性能则是各种金属材料在一定工艺条件下,经过焊接或铸造或锻压而获得的具有使用性能要求的完整构件和机器零部件的能力,亦即金属材料的焊接性能、铸造性能和锻压性能。

0.2 金属材料的焊接性能

众所周知,焊接在航空航天、交通运输、石油化工、锅炉、压力容器、机械制造等诸多领域中是必不可少的重要加工手段。在工业发达国家,钢产量的45%用于焊接结构。在电力建设中,工程结构、蒸汽锅炉的水冷壁、过热器、蒸发器以及省煤器等,都是由优质碳素钢、耐热合金钢以及不锈钢等通过焊接而成。由蒸汽锅炉到蒸汽轮机的主蒸汽管道、旁路和给水等管道也是由不同钢种、不同规格的钢管焊接而成,焊接件占80%以上。在有关标准中,焊接接头分为几类,各类焊接接头有不同的质量要求,从焊接接头表面外观质量到无损探伤,从硬度、光谱分析到严密性试验,凡此种种,都要求对各种金属材料的成分、性能了如指掌,对其焊接性如何更是要求准确掌握,这样才能正确制定工艺措施,获得符合质量要求的产品。

金属焊接性是指金属是否具有适应焊接加工,以及在焊接加工以后是否具有能在使用条件下安全运行的能力。这就是说,金属焊接性包括两方面的概念:一方面是金属的结合性能,即在焊接加工时,金属形成完整焊接接头的能力;另一方面是焊接接头的使用性能,即焊成的焊接接头在使用条件下安全运行的能力。

传统的焊接结构通常采用强度低、韧性良好的低碳钢或低合金钢制造。近几年来,随着焊接技术的不断完善,高强度钢在现代焊接结构中获得了广泛的应用。抗拉强度为750~800MPa的高强度钢已用于桥梁、高压水管、重型电机、海洋结构等领域中。在航天、航海及机器制造业中,超高强度钢的应用也日趋广泛。用来制造固体燃料火箭发动机壳的4340钢,经过合适的热处理,其抗拉强度可达1765.3MPa。另一种常用的超高强度钢是不含碳的马氏体时效钢(如18Ni钢),焊后经时效处理,可获得1373~2060MPa的高强度,国外已用它来制造飞机零件、大直径固体燃料火箭外壳,以及冷冻机和船体结构等。预计近年内还将有强度极限大于2450MPa的马氏体时效钢用于工程实际中。

0.3 金属材料的铸造性能

区别于其他成形方法,铸造是一种液态金属成形的方法。即将金属加热到液态,使其具

有流动性，然后浇入到具有一定形状型腔的铸型中，液态金属在重力场或外力场（压力、离心力、电磁力、振动惯性力等）的作用下充满型腔，冷却并凝固成具有型腔形状的铸件。

金属的铸造性能通常指流动性、收缩、铸造应力、偏析和吸气倾向、冷热裂倾向等。铸件或铸锭形成过程中产生的某些缺陷，如偏析、缩孔、气孔、非金属夹杂物、裂纹、变形等都与合金的铸造性能有关。即使经过锻造、压延等塑性加工，也不能完全消除它们对金属制品性能的影响。因此，研究铸件的成形性能对获得高质量铸件具有十分重要的意义。

按生产方法分类铸造可分为砂型铸造和特种铸造，而特种铸造又可分为金属型铸造、压力铸造、差压铸造、离心铸造、低压铸造、熔模铸造、陶瓷型铸造、连续铸造、真空吸铸等。按所用合金分类可分为铸铁、铸钢、铝合金铸造、镁合金铸造、铜合金铸造等。各种铸造方法都有其特点和应用范围，究竟应该采用哪一种铸造方法，这要根据铸件的大小、形状、生产批量、对铸件精度和光洁度的要求以及经济性加以综合考虑。

随着科学技术的发展，当前铸造技术发展的趋势是，在加强铸造基础理论研究的同时，发展和革新铸造新工艺及新设备，在稳定提高铸件质量、精度、光洁度的前提下，积极实现铸造生产过程的机械化、自动化，减少公害，节约能源，降低成本，发展专业化生产，使铸造技术进一步成为可与其他成形工艺相竞争的少余量、无余量成形工艺。

0.4 金属材料的锻造性能

锻造是塑性加工的重要分支，它是利用金属材料的可塑性，借助外力的作用产生变形，获得所需形状、尺寸和一定组织性能的锻件。锻造用材料涉及面很宽，既有多种牌号的钢及高温合金，又有铝、镁、钛、铜等有色金属材料。

金属的可锻性是指金属材料在外力作用下产生塑性变形的难易程度。通常用金属材料的塑性和变形抗力来综合衡量。金属材料的塑性越好，变形抗力越小，则可锻性越好。锻造包括自由锻造和模锻。

近年来，自由锻发展的重点是提高大锻件的质量。所采用的技术措施有：①改进锻造工艺，如采用“中心压实法”；②发展探伤技术，并用断裂力学原理计算允许的锻件裂纹尺寸或已知裂纹尺寸的安全服役期；③发展锻焊联合工艺，把大锻件分成几块锻制，然后拼焊成一体，或者将几个钢锭用电渣焊焊成一体，再锻成锻件；④在水压机自由锻方面采用程控联动快锻，使水压机和操作机的动作按预先规定的程序相互配合、协调行动，以改善劳动条件、提高生产率和减小锻件的加工余量；⑤精密锻造工艺和设备。

模锻方面近年来的发展包括：①压力机模锻取代锤上模锻，因为压力机比模锻锤更适应工艺精化及实现机械化、自动化生产的要求；②模锻件的精度不断提高，其重要发展之一是精密模锻；③模锻生产自动化程度日益提高，除了在热模锻压力机上配备机械手实现不同程度的自动化外，还发展了模锻自动线；④模锻过程的计算机模拟和工艺、模具的 CAD/CAM，通过数值模拟可确定变形体内部的温度场、应力场、应变场等，为工艺优化和质量控制提供科学的理论依据。现代制造工业对模锻工艺设计和模具制造提出更高的要求，传统的手工设计和模具制造方法已无法适应，采用 CAD/CAM 技术成为解决这个矛盾的有效途径。

第1章 钢的热处理原理及工艺

1.1 概述

1.1.1 热处理的目的及应用

热处理的主要目的在于改变钢的性能，包括钢的工艺性能和使用性能。钢的组织决定钢的性能，热处理改变钢的性能是通过改变钢的组织来实现的。钢在固态加热、保温和冷却过程中，会发生一系列组织转变，这些转变具有严格的规律性，在不同条件下会形成不同的组织。因此采用不同的热处理工艺，钢具有不同的性能。

热处理是一种重要的金属加工工艺，广泛用于机械制造工业。例如，在机床制造中，60%~70%的零件要经过热处理；在汽车、拖拉机制造中，70%~80%的零件要进行热处理；工模具和滚动轴承等，要100%进行热处理。总之，重要零件都须经适当的热处理才能使用。随着工业的不断发展，热处理将发挥更大的作用。

钢在固态下的组织转变规律就是热处理的原理。根据热处理原理制定的加热温度、保温时间、冷却速度就是热处理工艺。钢的热处理工艺分为如下几类：普通热处理，包括退火、正火、淬火和回火；化学热处理，包括渗碳、氮化、碳氮共渗、渗硼、渗铝、渗铬、渗硅、渗硫等；表面热处理，包括感应加热淬火、火焰加热淬火、电接触加热淬火等；其他热处理，包括控制气氛热处理、真空热处理、形变热处理等。

1.1.2 钢的临界温度

如图1-1，碳素钢在加热和冷却过程中，经过PSK线（ A_1 线）时会发生珠光体与奥氏体之间的相互转变；经过GS线（ A_3 线）时会发生铁素体与奥氏体之间的相互转变；经过ES线（ A_{cm} 线）时会发生渗碳体与奥氏体之间的相互转变。任一含碳量的碳素钢，在缓慢加热和冷却过程中其固态组织转变的临界点，都可以根据Fe-C状态图上的 A_1 线、 A_3 线和 A_{cm} 线来确定。共析钢只有一个临界点， A_1 ；亚共析钢则有两个临界点， A_1 和 A_3 点；过共析钢也有两个临界点， A_1 和 A_{cm} 点。

值得注意的是， A_1 、 A_3 和 A_{cm} 点都是平衡临界点，实际转变不可能在平衡临界点进行。加热转变只有在平衡临界点以上才能进行，冷却转变只有在平衡临界点以下才能进行。所以，实际的加热转变点和冷却转变点都偏离平衡临界点。而且，加热和冷却的速度越快，其偏离也越大。为了区别于平衡临界点，通常将加热转变点标以“c”，冷却转变点标以“r”，碳素钢的这些临界点在Fe-C合金状态图上的位置如图1-1所示。图中，

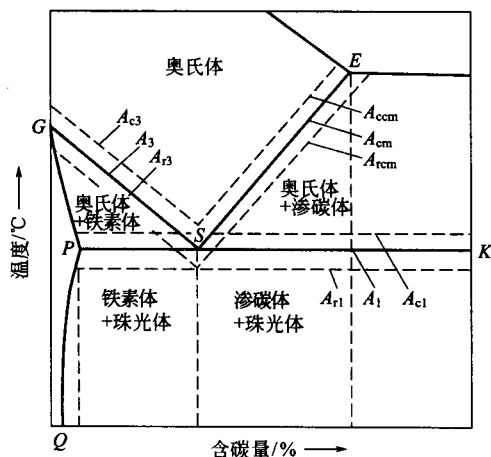


图1-1 Fe-C合金状态图上临界点的位置

A_{c1} 表示加热时珠光体向奥氏体转变的开始温度, A_{r1} 表示冷却时奥氏体向珠光体转变的开始温度; A_{c3} 表示加热时铁素体全部转变为奥氏体的终了温度, A_{r3} 表示冷却时奥氏体开始析出铁素体的温度; A_{cm} 表示加热时二次渗碳体全部溶入奥氏体的终了温度, A_{rcm} 表示冷却时奥氏体开始析出二次渗碳体的温度。

应当指出, 工业碳素钢并不是纯的 Fe-C 合金, 里面还含有硅、锰、硫、磷等元素。这些元素对碳素钢的平衡临界点是有影响的, 不过, 由于含量很少影响不大, 因而可以忽略不计, 仍以 Fe-C 二元状态图来确定临界点。合金钢含有较多合金元素, 对平衡临界点有很大影响, 甚至会大大改变相图的结构, 这时就不能再用 Fe-C 二元状态图来确定临界点, 而必须依据三元或多元相图才行。

1.2 钢在加热时的转变

有两种不同的加热: 一种是临界点 A_1 以下的加热; 另一种是临界点 A_1 以上的加热。在这两种加热条件下发生的转变是不同的。本节所讲的是钢在加热到 A_1 点以上时所发生的转变。

任何成分的碳素钢加热到 A_1 点以上时, 都会发生珠光体向奥氏体的转变。加热到 A_3 点或 A_{cm} 点以上时, 全部转变成奥氏体。热处理时进行 A_1 点以上加热的目的是为了得到奥氏体, 通常把这种加热转变过程称为“奥氏体化”。加热到 A_1 点温度时奥氏体化开始, 加热到 A_3 和 A_{cm} 点温度时奥氏体化结束, 因此有时也称 A_1 点为下临界点, A_3 和 A_{cm} 点为上临界点。

1.2.1 共析钢的奥氏体化过程

共析钢在室温的平衡组织是单一珠光体, 加热到 A_1 温度以上珠光体转变为奥氏体, 这一转变可表示为:



珠光体由铁素体和渗碳体组成。铁素体呈体心立方晶格, 在共析温度下铁素体的含碳量为 0.0218%; 渗碳体的含碳量为 6.69%, 呈复杂斜方晶格; 奥氏体具有面心立方晶格, 共析成分奥氏体的含碳量为 0.77%。显然, 珠光体向奥氏体转变是由成分相差悬殊, 晶格截然不同的两相混合物转变成为单相固溶体的过程, 因此, 转变过程中必然要进行晶格改组和碳、铁的重新分布, 转变过程只有通过原子的扩散才能完成。奥氏体转变由下述三个阶段构成。

(1) 奥氏体的形核与长大

珠光体加热至 A_1 温度以上时, 经过一段孕育期, 首先在铁素体与渗碳体的相界面上形成奥氏体晶核, 如图 1-2(a) 所示。这是因为奥氏体形核如同液态金属结晶时形核一样, 需要一定的结构起伏、能量起伏和一定的成分起伏条件。在相界面上原子排列较不规则, 存在

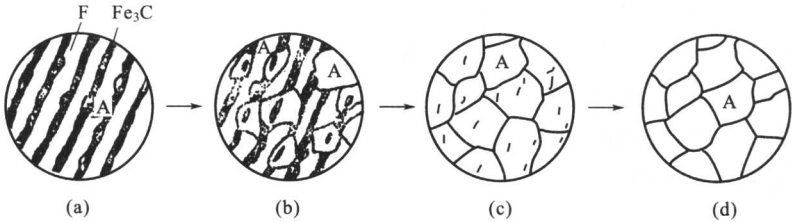


图 1-2 共析成分碳钢奥氏体形成过程示意图

一定的结构缺陷，原子处于高能量状态，同时相界面处与晶体内部相比，成分也不均匀。这些情况使相界面处具备形核的充分条件，因而奥氏体晶核总是优先在铁素体与渗碳体相界面处形核。

奥氏体形核之后，向铁素体和渗碳体两个方向长大，如图 1-3 所示。

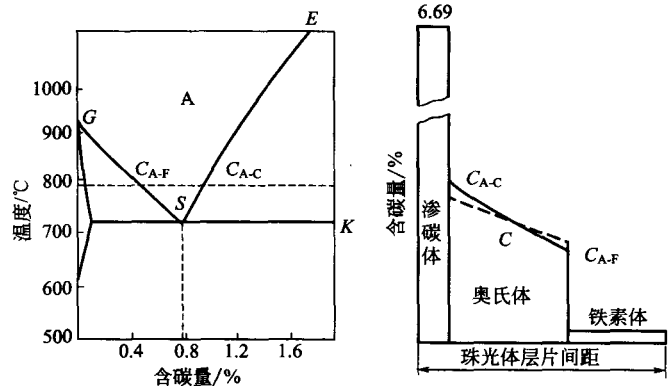


图 1-3 共析钢加热时奥氏体中碳浓度的分布

奥氏体晶核的一面与渗碳体相接触，另一面与铁素体相接触。在 t 温度时，靠近铁素体处奥氏体的含碳量为 C_{A-F} ，靠近渗碳体处奥氏体的含碳量 C_{A-C} ，因此在奥氏体中出现了碳浓度梯度，引起碳在奥氏体中不断地由高浓度处向低浓度处的扩散。随着碳扩散的进行，使奥氏体与铁素体接触处的碳浓度增高，而使奥氏体与渗碳体接触处的碳浓度降低，因此失去了平衡。为了保持平衡，渗碳体势必不断地溶解，碳原子溶入奥氏体，使其含碳量升高而恢复到 C_{A-C} 。与此同时，奥氏体中的碳原子向铁素体中扩散，促使这部分铁素体转变为奥氏体，并使其自身的含碳量降低而恢复到 C_{A-F} 。由于碳浓度失去平衡和恢复平衡的过程反复进行，就使奥氏体不断地向铁素体与渗碳体两个方向长大。

奥氏体的形核与长大过程连续不断地进行，先形成的晶核长大的同时，又有新的晶核在其他相界面处形成并随之长大。一直到各个奥氏体晶粒都彼此接触，珠光体全部消失，这一阶段才告结束。

(2) 残余渗碳体的溶解

实验表明，铁素体向奥氏体转变的速度较快，当铁素体全部消失以后，仍有一部分残余的渗碳体存在，如图 1-2(c) 所示。需要一个继续溶解的过程，残余渗碳体才能完全溶入奥氏体。残余在奥氏体中的渗碳体颗粒，随着保温时间的延长，通过原子的扩散作用逐渐溶入奥氏体中，直至全部消失。在这一过程中奥氏体的含碳量逐渐达到共析成分。一旦渗碳体全部消失，这一阶段便结束。

(3) 奥氏体成分的均匀化

残余渗碳体刚刚溶解完毕时，奥氏体的成分是不均匀的。原来是渗碳体的地方碳浓度较高，原来是铁素体的地方碳浓度较低。只有通过较长时间碳原子的扩散，才能使奥氏体逐渐均匀化，最后得到均匀的单相奥氏体，如图 1-2(d) 所示。至此，奥氏体化过程全部完成。

1.2.2 影响奥氏体化的因素

(1) 加热温度及加热速度的影响

图 1-4 是珠光体向奥氏体等温转变曲线。由图可见，转变要在 A_1 温度以上才能进行，

而且转变需要经过一段孕育期以后才开始, 转变温度越高, 孕育期越短。图中还表明, 加热温度越高, 奥氏体的形成越快, 转变经历的时间越短。这是因为加热温度越高, 珠光体与奥氏体的自由能差越大, 转变的动力越大, 同时加热温度越高, 原子的扩散能力越大。它们都促使奥氏体形成速度加快。

在连续升温加热时, 加热速度对于奥氏体化过程有重要影响。图 1-5 是共析碳钢的连续加热奥氏体化曲线。由图可见, 加热速度越快珠光体的过热度越大, 转变的开始温度越高, 终了温度也越高。转变过程是在一个温度区间内完成的。但是, 加热速度越快, 则转变的孕育期越短, 转变所需的时间也越短。

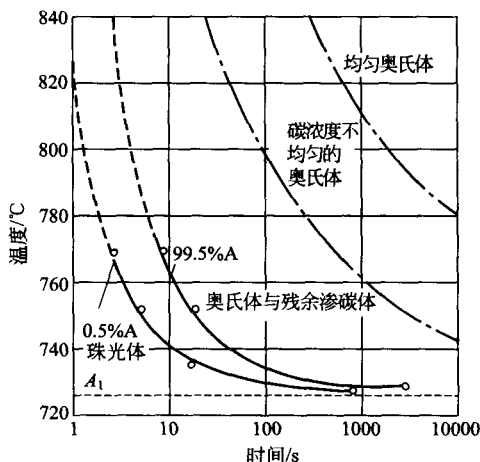


图 1-4 共析碳钢的等温奥氏体化曲线

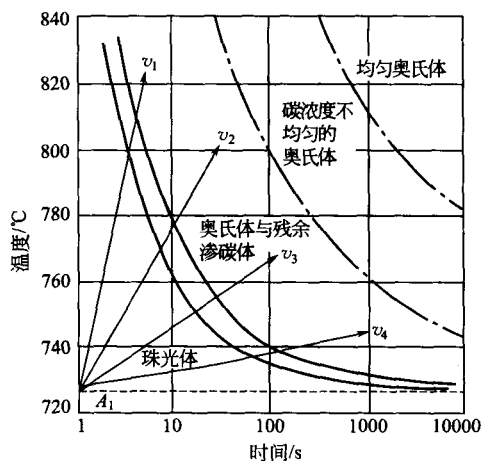


图 1-5 共析碳钢连续加热奥氏体化曲线

(2) 碳及合金元素的影响

随着含碳量的增加, 钢中渗碳体的数量增加, 铁素体与渗碳体的相界面总量增多, 这将使奥氏体形核的基底增多, 从而使奥氏体形成的速度加快。

钢中加入合金元素影响奥氏体的形成速度。除钴以外, 大多数合金元素都会减慢碳在奥氏体中的扩散速度; 合金元素本身的扩散速度较慢; 强碳化物形成元素形成的特殊碳化物的稳定性比 Fe_3C 高, 很难溶入奥氏体中。所以合金钢的奥氏体化速度比碳素钢慢, 特别是高合金钢更要慢得多。

(3) 原始组织的影响

奥氏体形成时晶核大多在铁素体与渗碳体的相界面上形成, 因此原始组织的分散度、形态会影响奥氏体化过程。对同一成分的钢来说, 原始组织越分散, 即铁素体与渗碳体相界面越多, 奥氏体形核基底就越多, 转变就越快。此外, 原始组织中渗碳体的形态对奥氏体的形成速度也有影响, 片状珠光体要比粒状珠光体转变的速度快, 因为片状珠光体的相界面面积更大。

1.2.3 非共析钢的奥氏体化过程

亚共析钢和过共析钢统称为非共析钢。由 Fe-C 状态图可知, 非共析钢与共析钢的组织不同之处在于, 除了珠光体之外, 还有一部分先共析相: 在亚共析钢中是自由铁素体, 在过共析钢中是二次渗碳体。因此, 非共析钢的奥氏体化要分两步来完成: 第一步完成珠光体的奥氏体化, 第二步完成先共析相的奥氏体化。亚共析钢加热到 A_1 点以上, 珠光体首先变成奥氏体, 随后, 在 A_1 至 A_3 的升温过程中, 自由铁素体逐渐变成奥氏体。当温度超过 A_3 点