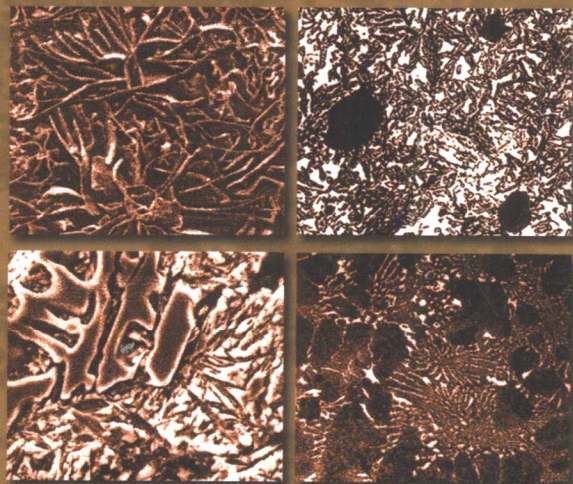


现代铸铁学

MODERN CAST IRON

郝石坚 著



冶金工业出版社

<http://www.cnmp.com>

现代铸铁字

中国美术学院美术考级教材

中国美术学院美术考级教材



中国美术学院美术考级教材

现代铸铁学

郝石坚 著

北 京
冶金工业出版社
2004

内 容 简 介

铸铁由于具有特定的使用性能,工艺性能优良,制造成本低,成为产量最大、应用范围广泛的铸造合金。本书前半部分系统阐述铸铁液态结构、凝固过程、固态相变、孕育处理、熔炼、铸铁力学性能、工艺性质等基本理论,以诸多鲜明和创新的观点及丰富的实验数据诠释铸铁合金,解决和澄清了许多存疑问题和模糊概念;后半部分以较大篇幅介绍了现代各种主要特种铸铁的生产技术和实际应用,包括球墨铸铁、蠕墨铸铁、合金铸铁、可锻铸铁、耐热与耐蚀铸铁、冷硬铸铁等,以延伸理论成果和推动铸铁技术进步。

本书适合铸造企业工程技术人员、科研单位研究人员使用,也可供高校铸造、材料工程及相关专业本科、研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

现代铸铁学/郝石坚著. —北京:冶金工业出版社,
2004.6

ISBN 7-5024-3520-4

I. 现… II. 郝… III. 铸铁 IV. TG143

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 035740 号

出版人 曹胜利(北京沙滩嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009)

责任编辑 李 梅 美术编辑 李 心

责任校对 王永欣 李文彦 责任印制 牛晓波

北京兴华印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2004 年 6 月第 1 版,2004 年 6 月第 1 次印刷

850mm×1168mm 1/32;13.25 印张;353 千字;405 页; 1—3000 册

38.00 元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号(100711) 电话:(010)65289081

(本社图书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

前 言

在人类文明发展的历史长河中,金属材料的应用在推动社会生产力进步方面发挥过巨大作用。铸铁作为人类最早发现和应用的金属材料之一,应用历史已有 3000 多年,而且迄今仍是广泛应用的结构合金。无论过去和现在,铸铁对人类社会都做出了重要贡献。

人类最初使用的是天然陨铁制成的简陋铁器,后来古希腊和古罗马人发现了原始的冶铁方法。我们的祖先在公元前 14 世纪曾用木炭还原铁矿石获得的铁锻制铁刃兵器。春秋后期(约在公元前 6 世纪)中国已经制成 270kg 的铁鼎。战国中期以后(公元前 300 年至公元前 200 年),铸铁农具已较普遍。秦汉南北朝时期,铁器品种显著增多,质量提高。迄今我们仍能见到那个时期的冶铁作坊遗址。

我国劳动人民创造的生铁柔化技术是古代冶金史上璀璨的一页。战国中期制造的铁器中,已经发现团絮状石墨。两汉时期的铁器在显微镜下观察到近似白心可锻铸铁和黑心可锻铸铁的组织。而根据文献记载,欧洲人于 18 世纪发明白心可锻铸铁,曾应用于巴黎铺设的通往凡尔赛宫的水管。美国人于 19 世纪首先制成黑心可锻铸铁。

河南巩县铁生沟冶铁作坊遗址出土的西汉中晚期铁镢经金相检验,其中含有球状石墨。在偏振光下石墨呈现辐射状多晶形貌。电镜下观察热氧腐蚀试样可看到球状石墨内部的年轮状结构,与现代球墨铸铁中的球状石墨结构完全相同(华觉明等,中国冶铸史论集,北京:文物出版社,1986)。

欧洲工业革命以前的漫长历史时期内,中国在冶铸技巧和铁器生产规模方面始终位于世界前列。但是封建社会制度极大地束缚了社会生产力的发展,以致多个世纪以来我们逐渐落后于西方,并出现较大差距。

1949年以来,我国的铸铁生产有了质的飞跃,产品质量不断提高。开发了许多新工艺和新材料,多方面改进了生产技术,丰富了产品品种。灰铸铁技术一直沿着强韧化和功能化方向发展。目前,孕育铸铁抗拉强度已能达到400MPa水平,具有针状组织的合金铸铁达到600MPa以上。球墨铸铁则是经历了从无到有的过程,经过多年努力,普通球墨铸铁现已得到全面推广,而且生产了以大型曲轴为代表的高强韧性球墨铸铁件,研制出用于化工及核工业的奥氏体球墨铸铁件。我国自行开发的稀土镁球化合金应用已得到普及。蠕墨铸铁和可锻铸铁理论和实践不断出现新成果。合金白口铸铁,特别是耐磨高铬铸铁已经大面积推广应用。目前,我国的铸铁产量已能满足国民经济需要,并有部分产品出口。据20世纪末统计,我国已有11000座铸铁厂(车间),约占世界总数1/3。1998年生产800万t铸铁件,其中灰铸铁630万t,球墨铸铁143万t,可锻铸铁29.3万t,分别占总产量的78.5%、18%、3.6%。总产量仅低于美国,居世界前列。

就世界范围而言,在国际竞争机制推动下,铸铁行业在各方面都有巨大进步。当今铸铁业的国际先进水平主要体现在以下方面:

(1) 实行机械化、自动化的规模生产,铸造全过程采用当代先进技术,无缺陷铸件产出率高,经济效益好,铸件有很强的市场竞争力。

(2) 铸铁强韧化水平很高,而且性能稳定,并有可靠技术物质条件保持产品达到这一目标。在强韧化和降低断面敏感性的基础上,已实现铸件薄壁化和轻量化。

(3) 能生产高质量、高精度、多品种的特种铸铁件和功能铸铁件。铸件性能可以满足各种特殊工况的要求。

(4) 计算机技术广泛应用于控制生产过程;能对铸件成形过程进行宏观和微观仿真模拟;采用专家系统分析诊断铸造中的问题;在质量控制、信息管理等方面,计算机也都发挥重要作用。信息化和自动化技术已经改造了旧的铸造生产模式。

(5) 经常系统而有针对地开展铸铁合金及其制造技术的基础

理论研究,以支持生产者开发新品种,提高铸件质量,改进关键铸件制造技术。

(6) 最大限度减轻铸造生产对环境的污染,实现符合生态要求的可持续发展。

当前世界经济一体化大潮对我国铸铁业提出了严峻挑战。目前,我国大多数铸铁企业规模小,生产的社会化水平低;生产设备更新缓慢,机械化程度低;铸造科研开发投入不足,成果转化率低以及铸造从业人员素质参差不齐,影响当代先进技术和先进管理经验的推广应用,以致铸件质量和生产效率、经济效益、能源消耗、劳动条件和环境保护等方面与工业发达国家相比还有一定差距。据统计,由于铁水质量不够稳定等原因,在碳当量相同情况下,我国的灰铸铁抗拉强度比工业发达国家普遍低 50~100MPa;我国球墨铸铁和低合金铸铁产量在总产量中所占比例远低于工业发达国家,而且性能较差。可锻铸铁产量虽居首位,但绝大多数为黑心可锻铸铁,白心可锻铸铁和珠光体可锻铸铁产量极少。这些都是需要改进的。

铸铁是复杂的多元合金,其凝固转变具有两重性,高碳相的形成和变化受到诸多内外因素影响,而且对热动力学因素高度敏感,这使铸铁组织的控制成为十分复杂的工作。为了提高铸铁生产技术和质量水平,铸造工作者必须深入研究和掌握铸铁的现代理论,更新实践知识。这是一项长期而艰苦的工作,需要科研、生产、教学、出版等领域大力协作才能有所进展。作者希望这本著作能对这项工作做出微薄贡献。

本书力求系统而完整地展示现代铸铁合金领域的科技内涵。本书首先介绍铸铁合金相变基础、铸铁组成相及相关的近代物理检测技术。第2章讨论铸铁液态结构,简要说明液相中存在的能量起伏和浓度起伏,液态铸铁中碳活度,以及非匀质物质对凝固组织的影响。在第3章中,阐述铸铁组织生成的现代理论,特别是石墨生成和变异机理以及初生相和共晶相的生成过程,力求将影响凝固过程的诸多因素联系起来,揭示铸铁凝固过程及其规律性;此

外还讨论了铸铁热分析技术,并介绍计算机模拟仿真在描述铸铁凝固组织方面的应用。第4章讨论铸铁固态相变理论及铸铁热处理。第5章介绍铸铁孕育的现代理论以及孕育实践问题。重点介绍铁水中高碳高硅活化微区的形成以及硅原子的核外电子向铁、碳原子转移在石墨形核中的作用;碳与形核基质晶格结构的适配性以及元素氧化物生成热对形核的影响;然后讨论孕育衰退现象、孕育剂选用以及合理孕育问题。第6章阐述铸铁熔炼,重点讨论气体元素在铁水中的行为以及它们对铸铁质量的影响,从实际熔炼角度介绍了冲天炉和感应炉熔炼。第7、8章分别阐述铸铁力学性质和工艺性能,从分析铸铁断裂和变形原理出发,逐步讨论铸铁的各项力学性能指标,并介绍提高灰铸铁强度的基本技术措施;工艺性能方面,着重介绍铸铁凝固方式和收缩性质,继而讨论铁水流动性和充型能力、铸铁的断面敏感性、焊接性能和切削性能。第9~14章根据理论知识与生产实践结合的原则,分别介绍球墨铸铁、蠕墨铸铁、铸铁中的合金元素、合金白口铸铁、可锻铸铁、耐热铸铁与耐蚀铸铁、冷硬铸铁等特种铸铁,内容涉及相关基础理论、材质特性、制造工艺、质量控制,有较强的实践性和生产指导意义。

作者热切期盼我国铸造业能在经济全球化形势下,在激烈的国际竞争中,稳步提高科技水平,增强国际竞争力,在竞争中不断进步。

在本书出版之际,作者衷心感谢多年来事业上的合作者、挚友以及家人。李启东教授、冯忠绪教授、张永壮教授级高级工程师、冶金工业出版社对本书的出版都给予了热情的支持和帮助,在此深表感谢。本书承蒙西安胜昔电力科技公司允许作者将其公司内部资料公开发表,充实了本书内容,谨致谢意。

郝石坚

2004年6月于长安大学

目 录

第1章 铸铁组织

1.1 铁碳合金相图和铁碳硅合金相图	2
1.1.1 铁碳合金相图	2
1.1.2 铁碳硅三元合金相图	4
1.1.3 铸铁实际相变温度和成分	5
1.2 合金热力学基础简要回顾	9
1.2.1 合金相变的能量条件	9
1.2.2 自由能-成分曲线	9
1.2.3 过冷	10
1.2.4 铸铁凝固组织形成过程中各相自由能变化	12
1.2.5 新相形核	14
1.2.6 溶液中组元活度	16
1.3 基本组成相	18
1.3.1 石墨	18
1.3.2 渗碳体	28
1.3.3 奥氏体(γ 相)	30
1.3.4 铁素体	31
1.3.5 珠光体	31
1.3.6 磷共晶	32
1.4 铸铁组织的近代物理检测技术	33
1.4.1 电子显微镜观察石墨三维形貌	33
1.4.2 X射线衍射技术鉴定物相和探查晶体取向	34
1.4.3 探查固体表层微区中元素分布	34
1.4.4 图像分析仪对材料组织进行定量分析	35
参考文献	36

第2章 液态铸铁结构

2.1 液态金属结构·····	37
2.2 铸铁熔液结构·····	38
2.3 液态铸铁中碳的活度·····	39
2.4 液态铸铁中的非匀质物质·····	40
参考文献·····	41

第3章 铸铁凝固

3.1 石墨生成·····	42
3.1.1 片状石墨生长·····	42
3.1.2 球状石墨生长·····	47
3.1.3 蠕虫状石墨生长·····	50
3.2 初生相析出·····	53
3.2.1 初生渗碳体析出·····	53
3.2.2 奥氏体析出·····	55
3.3 共晶转变·····	58
3.3.1 共生区·····	58
3.3.2 共晶组织基本类型·····	60
3.3.3 灰铸铁共晶凝固过程·····	61
3.3.4 球墨铸铁共晶凝固·····	68
3.3.5 渗碳体共晶转变·····	73
3.4 反白口现象·····	75
3.5 铸铁凝固过程热分析·····	78
3.5.1 铸铁冷却曲线·····	78
3.5.2 微分热分析曲线·····	80
3.5.3 根据冷却曲线判断铸铁组织·····	82
3.5.4 热分析技术的其他应用·····	84
3.6 铸铁显微组织的计算机模拟·····	85
参考文献·····	88

第4章 固态相变

4.1 先共析相析出	90
4.2 共析转变	92
4.2.1 片状珠光体的层间距	95
4.2.2 珠光体转变动力学	96
4.3 奥氏体的中、低温转变	98
4.4 铸铁热处理	99
4.4.1 消除内应力处理	100
4.4.2 石墨化退火	101
4.4.3 正火	102
4.4.4 淬火	103
参考文献	108

第5章 孕育处理

5.1 铸铁孕育机理	110
5.1.1 石墨形核基质	111
5.1.2 孕育衰退现象	117
5.2 孕育剂	119
5.2.1 石墨化孕育剂	119
5.2.2 稳定化孕育剂	122
5.3 合理孕育	123
5.3.1 孕育剂加入方式	123
5.3.2 熔炼方法和炉料的影响	124
5.3.3 铁水化学成分的影响	125
5.3.4 温度对孕育效果的影响	125
参考文献	125

第6章 熔 炼

6.1 铸铁中的氧	126
-----------	-----

6.2 铁水中的氮和氢	132
6.2.1 氮在铁水中的行为	134
6.2.2 铁水中的氢	136
6.3 冲天炉熔炼	138
6.3.1 合理送风	140
6.3.2 燃料	141
6.3.3 炉渣	142
6.3.4 熔炼过程中铁水成分变化	145
6.4 感应炉熔炼	148
参考文献	152

第7章 铸铁力学性能

7.1 灰铸铁的断裂	153
7.2 拉伸性能	157
7.2.1 影响灰铸铁抗拉强度的一些因素	159
7.2.2 球墨铸铁的拉伸性能	161
7.3 压缩性能	163
7.4 弹性模量与滞弹性	166
7.4.1 弹性模量	166
7.4.2 滞弹性	168
7.5 弯曲性能和扭转性能	169
7.5.1 弯曲性能	169
7.5.2 扭转性能	170
7.6 冲击性能	171
7.7 疲劳性能	174
7.8 断裂韧性	175
7.9 硬度	177
7.10 低温力学性能	178
7.11 提高灰铸铁强度的基本措施	180
参考文献	183

第 8 章 铸铁的工艺性能

8.1 铸铁件凝固方式	184
8.2 铸铁的收缩性质	187
8.2.1 收缩产生的体积缺陷	190
8.2.2 不均匀固态收缩产生铸造应力	194
8.3 铁水流动性与充型能力	195
8.3.1 液态合金流动性	195
8.3.2 灰铸铁的流动性	197
8.3.3 铁水表面张力对充型能力的影响	200
8.4 断面敏感性	201
8.5 焊接性能	206
8.5.1 灰铸铁焊接熔池及热影响区	207
8.5.2 铸铁焊接裂纹	210
8.5.3 白口铸铁焊接	211
8.6 切削性能	211
参考文献	213

第 9 章 球墨铸铁与蠕墨铸铁

9.1 球墨铸铁显微组织	214
9.1.1 基体组织	215
9.1.2 石墨	216
9.2 化学成分	219
9.3 球化剂	224
9.4 炉前处理	234
9.4.1 冲入法	234
9.4.2 压力加镁法	237
9.4.3 镁丝法	238
9.4.4 钟罩压入法	239
9.4.5 转包法	239

10.2	合金元素对固态相变的影响	282
10.3	碳化物形成元素的影响	285
10.3.1	铬	285
10.3.2	钒	288
10.3.3	钼	291
10.3.4	钛	295
10.3.5	锰	298
10.4	促进石墨化元素的影响	300
10.4.1	镍	300
10.4.2	铜	304
10.4.3	硅	304
10.5	微量元素的作用	305
10.5.1	氮	306
10.5.2	锡	307
10.5.3	铈	310
10.5.4	磷	311
10.5.5	铋	311
	参考文献	312

第 11 章 合金白口铸铁

11.1	白口铸铁合金化	314
11.1.1	白口铸铁中的合金碳化物	314
11.1.2	铬白口铸铁	317
11.2	高铬耐磨铸铁	318
11.2.1	显微组织	318
11.2.2	铸件成分选择	324
11.2.3	高铬铸铁热处理	328
11.2.4	高铬铸铁淬透性	329
11.2.5	热处理作业	335
11.2.6	高铬铸铁的熔化与铸造	343

11.2.7 显微组织对高铬铸铁工作性能的影响·····	345
11.3 镍铬白口铸铁·····	347
参考文献·····	351

第12章 可锻铸铁

12.1 组织的形成·····	353
12.1.1 渗碳体分解·····	354
12.1.2 石墨在固相中形核·····	356
12.1.3 石墨的生长·····	357
12.1.4 基体组织·····	358
12.2 可锻铸铁铸坯·····	360
12.3 铁素体可锻铸铁·····	364
12.3.1 化学成分·····	364
12.3.2 金相组织与力学性能·····	364
12.3.3 石墨化退火·····	366
12.4 珠光体可锻铸铁·····	368
12.5 球墨可锻铸铁·····	371
12.6 白心可锻铸铁·····	372
参考文献·····	374

第13章 耐热铸铁及耐蚀铸铁

13.1 高温下铸铁性状的变化·····	375
13.1.1 铸铁的氧化·····	375
13.1.2 铸铁高温静载强度·····	377
13.1.3 蠕变·····	379
13.1.4 热疲劳·····	382
13.2 高合金耐热铸铁·····	385
13.2.1 高镍耐热铸铁·····	386
13.2.2 高铬耐热铸铁·····	387
13.2.3 高硅耐热铸铁·····	387

13.2.4 高铝耐热铸铁·····	390
13.3 耐蚀铸铁·····	393
13.3.1 金属腐蚀·····	393
13.3.2 铸铁的腐蚀·····	393
13.3.3 高硅耐蚀铸铁·····	394
13.3.4 高镍奥氏体铸铁·····	397
参考文献·····	398

第14章 冷硬铸铁

14.1 化学成分对冷硬铸铁组织和性能的影响·····	400
14.2 工艺因素对冷硬铸铁组织的影响·····	405
参考文献·····	405

第 1 章 铸铁组织

铸铁属于铁基高碳多元合金,其常存元素,除铁以外,一般含 $w(\text{C})$ 为 2%~4%^①、 $w(\text{Si})$ 为 1%~3% 以及锰、磷、硫。碳在铸铁中通常以三种状态存在:形成石墨晶体单独存在;与铁形成二元或多元化合物以化合状态存在;溶入 $\alpha\text{-Fe}$ 或 $\gamma\text{-Fe}$ 中以固溶状态存在。

由于化学成分和结晶条件不同,铸铁液-固相变有二重性,凝固后产生不同的高碳相,即渗碳体或石墨。渗碳体组织在高温下不稳定,发生分解,分解出来的碳,大部分转变为石墨晶体,因而渗碳体属于可分解的亚稳定相,石墨晶体则称为稳定相。不同的高碳相赋予铸铁以截然不同的性能。高碳相为渗碳体的铸铁断面呈银白色,硬而脆,称为白口铸铁。高碳相为石墨的铸铁断面呈灰黑色,硬度低,称为灰口铸铁。铸铁组织中高碳相类型、形态、数量、分布状态都影响铸铁性能。

铸铁组织的形成经历两个阶段。第一阶段为凝固过程,形成凝固组织;第二阶段为固态相变过程,由凝固组织转变为室温组织。

了解铸铁组织及其形成过程和转变规律通常需要借助铁碳合金相图。相图上的相区、相变临界点数据来自实验或热力学计算,这些数据符合热力学平衡条件。也就是说,合金温度发生变化时,其组分原子有充分时间迁移而达到该温度下的浓度平衡。平衡状态虽然难以在铸件实际相变过程中出现,但要认识合金组织形成过程和组织转变规律,首先需依靠合金相图。

碳和硅都是铸铁中主要常存元素。硅的存在使铁碳相图发生

① 本书凡未经标注的百分含量均为质量分数。