

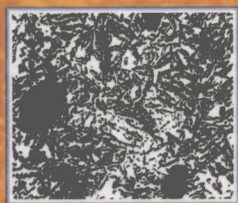
现代铸铁学

MODERN CAST IRON

(第2版)

(The 2nd Edition)

郝石坚 著



冶金工业出版社

<http://www.cnmp.com.cn>

现代铸铁学

(第2版)

郝石坚 著

北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2009

内 容 简 介

本书系统阐述了铸铁组织的构成、液态结构、凝固过程、固态相变、孕育处理、熔炼、合金元素以及各种铸铁的组织、成分、性能特点、生产技术和铸件应用,包括灰铸铁、球墨铸铁、蠕墨铸铁、白口铸铁、可锻铸铁、耐蚀铸铁、耐热铸铁、冷硬铸铁等。本书在第1版的基础上,对内容作了较大补充和调整。书中涉及的一些理论阐述,作者以不同方式作了解释,便于读者阅读和应用。特别对使用越来越广泛的高强度铸铁、高铬铸铁、奥贝球铁、高合金耐蚀铸铁、耐热铸铁的理论和实践问题,分别作了全面和比较深入的介绍,使本书的内容更加充实,更加贴近生产。

本书适合钢铁冶金、铸造及材料工程技术人员、科研人员阅读,也可作为高等学校相关专业的教材以及铸造工程师继续教育的教材。

图书在版编目(CIP)数据

现代铸铁学/郝石坚著. —2版. —北京:冶金工业出版社, 2009. 3

ISBN 978-7-5024-4834-9

I. 现… II. 郝 III. 铸铁 IV. TG143

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第029019号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷39号,邮编100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 postmaster@cnmip.com.cn

责任编辑 李 梅 美术编辑 张媛媛 版式设计 张 青

责任校对 卿文春 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-4834-9

北京百善印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2004年6月第1版,2009年3月第2版,2009年3月第2次印刷

787mm×1092mm 1/16;22.25印张;531千字;335页;3001-5500册

59.00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

(本书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

第2版前言

《现代铸铁学》第1版于2004年出版以来,一些读者以信函、电话、电子邮件、来访方式或通过互联网与作者联系。他们对该书的内容提出了不少有益的意见和建议,还提出了一些铸铁件在线生产技术与作者探讨、交流,作者深受鼓舞。在该书第2版即将与读者见面之际,作者谨向海内外热心读者表示衷心感谢。

为了进一步充实内容,作者对第1版进行了一些调整和补充,力求更全面、准确、系统、深入地介绍铸铁合金,并使内容更加贴近生产实践。作者特别注意到工作在不同岗位上读者的实际需要,根据读者建议,对于书中涉及相关学科的理论阐述,基本上都加以必要说明。例如,较深层次地讨论铸铁组织形成原理时,不可避免地涉及热力学、凝固理论以及相关的微观过程,要求读者具有相关知识。修订时对这些内容尽量修改得简明清晰,并添加了一些注解解释了有关理论背景。

作者在第2版对章节安排作了调整。原来分散于各章中涉及灰铸铁的内容集中于新增的“灰铸铁”一章,阐述灰铸铁组织、成分和各种性能。原书第11章“合金白口铸铁”章名改为“白口铸铁”,扩大了对白口铸铁的讨论范围。第11章重点内容仍为介绍铬白口铸铁,包括高铬铸铁、镍铬白口铸铁(镍硬铸铁)。除了介绍铬白口铸铁化学成分、组织与性能特点外,还介绍了熔炼、铸造、热处理工艺。第9章“球墨铸铁”中主要对于应用日渐广泛的奥贝球墨铸铁及其生产技术作了进一步讨论和补充。有关耐蚀铸铁与耐热铸铁的内容也作了较多补充。第2版中重点介绍耐蚀铸铁件与耐热铸铁件中主加合金元素的作用、铸件化学成分、在不同环境介质中耐蚀(耐热)性能以及制造该类铸件的各种特殊工艺要点,强化了内容的实用性。在此基础上,第1版第13章“耐热铸铁与耐蚀铸铁”扩展为第2版的第13章“耐蚀铸铁”与第14章“耐热铸铁”两章。经过调整和补充,全书由14章增加为15章。

《现代铸铁学》第2版的出版,得到一些企业的热情支持。西安胜昔电力科技公司(生产高等级抗磨铸件及超音速喷涂工程)总经理郝伟、本溪钢铁公司特种铸造厂(生产矿用高强度铸件)田嘉兴厂长和黄辉厂长分别为本书提供宝贵技术资料或给予物质支持。美术教育工作者张卉女士应邀在百忙中利用业余时间为本书封面设计提供美术创意并加工金相图片。作者对此均深表感谢。

作者

2009年2月于西安

第1版前言

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钁经金相检验，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。铸件性能可以充分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。可锻铸铁产量虽位居前列,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章讨论液态铸铁结构,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

1 铸铁组织	1
1.1 铁碳合金相图和铁碳硅合金相图	1
1.1.1 铁碳合金相图	1
1.1.2 铁碳硅三元合金相图	3
1.1.3 铸铁实际相变温度和成分	3
1.2 合金热力学基础简要回顾	6
1.2.1 合金相变的能量条件	6
1.2.2 自由能-成分曲线	6
1.2.3 过冷	7
1.2.4 铸铁凝固组织形成过程中各相自由能变化	7
1.2.5 新相形核	9
1.2.6 溶液中组元活度	10
1.2.7 铁水中碳的活度	10
1.3 基本组成相	12
1.3.1 石墨	12
1.3.2 渗碳体	18
1.3.3 奥氏体(γ 相)	20
1.3.4 铁素体	21
1.3.5 珠光体	22
1.3.6 贝氏体	23
1.3.7 磷共晶	23
1.4 铸铁组织的近代物理检测技术	25
1.4.1 电子显微镜	25
1.4.2 X射线衍射技术鉴定物相和探查晶体取向	26
1.4.3 微区分析	27
1.4.4 图像分析仪对材料组织进行定量分析	28
参考文献	29
2 液态铸铁结构	30
2.1 液态金属结构	30
2.2 合金的液态结构	32
2.3 液态铸铁结构	32

2.4 液态铸铁中的非匀质物质	34
参考文献	35
3 铸铁凝固	36
3.1 石墨生成	36
3.1.1 片状石墨生长	36
3.1.2 球状石墨生长	39
3.1.3 蠕虫状石墨生长	41
3.2 初生相析出	42
3.2.1 初生渗碳体析出	42
3.2.2 初生奥氏体析出	43
3.3 共晶转变	47
3.3.1 共生区	47
3.3.2 共晶组织基本类型	49
3.3.3 铁碳合金共晶的非平衡凝固	49
3.3.4 共晶团的形成	50
3.3.5 片状石墨共晶团的生长速度	52
3.3.6 共晶石墨的生长	53
3.3.7 片状石墨共晶生长界面形貌	55
3.3.8 球墨铸铁共晶凝固	57
3.3.9 渗碳体共晶转变	60
3.4 反白口现象	62
3.5 铸铁凝固过程热分析	63
3.5.1 铸铁冷却曲线	63
3.5.2 微分热分析曲线	64
3.5.3 根据冷却曲线判断铸铁组织	65
3.5.4 热分析技术的其他应用	66
3.6 铸铁显微组织的计算机模拟	67
参考文献	69
4 固态相变	70
4.1 先共析相析出	70
4.2 共析转变	71
4.2.1 片状珠光体的层间距	73
4.2.2 珠光体转变动力学	73
4.3 铸铁热处理	74
4.3.1 铸铁热处理特点	75
4.3.2 铸铁在加热过程中的组织转变	76
4.3.3 铸铁在冷却过程中的组织转变	76

4.4 灰铸铁件热处理实践	79
4.4.1 消减内应力处理	79
4.4.2 石墨化退火	80
4.4.3 正火	80
4.4.4 淬火与回火	81
参考文献	82
5 孕育处理	83
5.1 孕育处理概说	83
5.2 铸铁孕育理论探讨	84
5.2.1 孕育剂改变铁水中碳活度促进石墨化	84
5.2.2 成为石墨形核基质的基本条件	85
5.3 石墨形核基质	87
5.3.1 硫化物作为石墨形核基质	87
5.3.2 碳化物作为石墨形核基质	89
5.3.3 二氧化硅作为石墨形核基质	91
5.3.4 石墨微粒作为石墨形核基质	92
5.4 孕育衰退现象	93
5.5 孕育剂	94
5.5.1 石墨化孕育剂	95
5.5.2 稳定化孕育剂	98
5.6 孕育剂的选用	99
5.7 合理孕育	99
5.7.1 铁水化学成分的影响	100
5.7.2 熔炼方法和炉料的影响	100
5.7.3 铁水温度的影响	101
5.7.4 孕育剂加入方法的影响	101
5.8 孕育效果评定	102
参考文献	103
6 熔炼	104
6.1 铸铁中的氧	104
6.1.1 氧对铸铁石墨化的影响	104
6.1.2 氧在铁水中的行为	105
6.2 铁水中的氮和氢	107
6.2.1 氮在铁水中的行为	108
6.2.2 铁水中的氢	110
6.3 冲天炉熔炼	111
6.3.1 合理送风	112

6.3.2 燃料	112
6.3.3 炉渣	113
6.3.4 熔炼过程中铁水成分变化	114
6.4 感应炉熔炼	117
6.4.1 坩埚式感应电炉结构	117
6.4.2 感应炉炉衬耐火材料	118
6.4.3 炉衬捣固和烧结	119
6.4.4 感应炉熔炼作业中的一些问题	120
参考文献	123
7 铸铁中的合金元素	124
7.1 合金元素对凝固过程的影响	125
7.2 合金元素对固态相变的影响	127
7.3 碳化物形成元素的影响	128
7.3.1 铬	128
7.3.2 钒	130
7.3.3 钼	131
7.3.4 钛	133
7.3.5 锰	134
7.3.6 铌	135
7.4 促进石墨化元素的影响	136
7.4.1 镍	136
7.4.2 铜	138
7.4.3 硅	139
7.5 微量元素的作用	139
7.5.1 氮	139
7.5.2 锡	140
7.5.3 锑	141
7.5.4 碲	142
7.5.5 铋	143
参考文献	143
8 灰铸铁	144
8.1 灰铸铁中的常存元素	144
8.1.1 碳	144
8.1.2 硅	145
8.1.3 碳当量	145
8.1.4 共晶度	146
8.1.5 锰	146

8.1.6 硫	147
8.1.7 磷	147
8.2 灰铸铁牌号及建议化学成分	148
8.3 灰铸铁力学性能	149
8.3.1 灰铸铁的断裂	149
8.3.2 拉伸性能	151
8.3.3 压缩性能	153
8.3.4 弹性模量与滞弹性	154
8.3.5 弯曲性能和扭转性能	156
8.3.6 冲击性能	157
8.3.7 疲劳性能	158
8.3.8 断裂韧性	158
8.3.9 硬度	159
8.3.10 低温力学性能	160
8.3.11 灰铸铁强度的提高	161
8.4 铸铁的物理性质	162
8.4.1 密度	162
8.4.2 线胀系数	162
8.4.3 质量热容	163
8.4.4 熔化潜热	163
8.4.5 热导率	163
8.4.6 电导率	164
8.4.7 磁性能	164
8.5 铸铁的工艺性能	165
8.5.1 铸铁件凝固方式	166
8.5.2 铸铁的收缩性质	167
8.5.3 收缩产生的体积缺陷	169
8.5.4 铸造应力	171
8.5.5 铁水流动性与充型能力	172
8.5.6 铸件断面敏感性	176
8.5.7 焊接性能	178
8.5.8 切削性能	180
8.6 D型石墨铸铁	181
参考文献	183
9 球墨铸铁	184
9.1 球墨铸铁显微组织	184
9.1.1 基体	184
9.1.2 石墨	185

9.2 化学成分	187
9.2.1 常存元素对组织的影响	187
9.2.2 球墨铸铁件化学成分的选择	189
9.3 球墨铸铁力学性能	189
9.3.1 球墨铸铁拉伸断裂	189
9.3.2 拉伸性能	191
9.3.3 压缩强度	193
9.3.4 弹性模量	193
9.3.5 扭转、剪切、弯曲强度	193
9.3.6 硬度	193
9.3.7 冲击功	194
9.3.8 疲劳强度	196
9.3.9 断裂韧性	198
9.3.10 低温力学性能	198
9.4 球化处理	199
9.4.1 球化元素与干扰元素	199
9.4.2 常用的球化剂	201
9.4.3 球化处理的几种方法	205
9.4.4 球化处理后铁水温度和成分的变化	211
9.4.5 球化衰退现象	212
9.4.6 球化剂加入量	213
9.5 孕育处理	213
9.6 异态石墨	214
9.6.1 不规则石墨	214
9.6.2 爆裂状石墨	215
9.6.3 碎块石墨	215
9.6.4 片状石墨和刺状石墨	216
9.7 球墨铸铁件铸造	217
9.7.1 球墨铸铁凝固特征	217
9.7.2 球墨铸铁件缩孔的形成	218
9.7.3 铸件补缩	220
9.7.4 球墨铸铁铁水流动性与浇注系统	221
9.7.5 球墨铸铁件特有的铸造缺陷	221
9.8 热处理	226
9.8.1 部分奥氏体化正火	226
9.8.2 淬火	226
9.8.3 等温淬火	226
9.8.4 奥贝球铁	227
9.8.5 高强韧球墨铸铁的氢损伤	231

参考文献	233
10 蠕墨铸铁	234
10.1 蠕虫状石墨的形态特征	234
10.2 蠕墨铸铁显微组织	234
10.3 蠕虫状石墨的产生	235
10.4 蠕化剂	235
10.5 蠕化处理	236
10.6 铸件化学成分选择	237
10.7 蠕墨铸铁热处理	237
10.8 蠕墨铸铁性能特点	238
10.9 蠕墨铸铁的应用	239
参考文献	240
11 白口铸铁	241
11.1 白口铸铁组织的形成	241
11.2 非合金白口铸铁化学成分	242
11.3 非合金白口铸铁变质处理	243
11.4 非合金白口铸铁热处理	244
11.5 合金白口铸铁	244
11.6 合金白口铸铁中的碳化物	245
11.7 锰、钨、硼白口铸铁	246
11.8 铬白口铸铁	247
11.9 高铬铸铁	248
11.9.1 高铬铸铁的碳化物共晶	248
11.9.2 高铬铸铁基体	250
11.9.3 高铬铸铁中的合金元素	251
11.9.4 高铬铸铁热处理基础	255
11.9.5 热处理实践	258
11.9.6 高铬铸铁件基本铸造性能	262
11.9.7 铸造	263
11.9.8 高铬铸铁件成分选择	266
11.9.9 显微组织对高铬铸铁工作性能的影响	269
11.9.10 高铬铸铁碳化物鉴别	270
11.10 镍铬白口铸铁	271
11.10.1 镍铬白口铸铁组织和成分	272
11.10.2 Km TB Ni4Cr2 铸铁	273
11.10.3 KmTB Cr 9Ni5 铸铁	275
11.10.4 镍铬合金白口铸铁的应用	278

参考文献	278
12 可锻铸铁	279
12.1 黑心可锻铸铁组织的形成	279
12.1.1 渗碳体分解	279
12.1.2 团絮状石墨在固相中形核	280
12.1.3 石墨的生长	281
12.1.4 基体组织	282
12.2 可锻铸铁铸坯	282
12.2.1 可锻铸铁化学成分	282
12.2.2 可锻铸铁铸坯变质处理	284
12.3 可锻铸铁的组织与力学性能	284
12.4 石墨化退火	286
12.5 珠光体可锻铸铁	287
12.6 球墨可锻铸铁	288
12.7 白心可锻铸铁	289
参考文献	290
13 耐蚀铸铁	291
13.1 金属腐蚀	291
13.2 金属耐蚀性	291
13.3 铸铁的腐蚀	292
13.4 耐蚀铸铁	294
13.5 低合金耐蚀铸铁	294
13.5.1 铜	294
13.5.2 镍	295
13.5.3 铬	295
13.5.4 铝	295
13.6 高合金耐蚀铸铁	295
13.7 高硅耐蚀铸铁	295
13.7.1 高硅耐蚀铸铁的化学成分	297
13.7.2 高硅耐蚀铸铁耐蚀性能	298
13.7.3 高硅耐蚀铸铁件的铸造	301
13.8 高镍奥氏体耐蚀铸铁	303
13.8.1 化学成分、组织和力学性能	303
13.8.2 高镍奥氏体铸铁的抗蚀能力	304
13.8.3 高镍奥氏体铸铁件生产工艺	306
13.9 高铬耐蚀铸铁	307
13.9.1 显微组织	308

13.9.2 耐蚀性	308
13.9.3 工艺性	308
13.10 铝耐蚀铸铁	309
参考文献	310
14 耐热铸铁	311
14.1 铸铁在高温下的性状变化	312
14.1.1 铸铁氧化	312
14.1.2 铸铁热生长	313
14.1.3 铸铁高温静载强度	313
14.1.4 蠕变	314
14.1.5 热疲劳	315
14.2 硅系耐热铸铁	317
14.2.1 成分、组织与常温力学性能	317
14.2.2 耐热性能	318
14.2.3 高温力学性能	318
14.2.4 应用	319
14.3 铝系耐热铸铁	319
14.3.1 化学成分、组织、常温力学性能	319
14.3.2 抗氧化性与高温强度	320
14.3.3 高铝铸铁应用	321
14.4 铬系耐热铸铁	322
14.5 高镍奥氏体耐热铸铁	323
14.5.1 成分和性能	323
14.5.2 高镍奥氏体铸铁的生产与应用	325
参考文献	326
15 冷硬铸铁	327
15.1 化学成分对冷硬层组织和性能的影响	328
15.1.1 常存元素的影响	328
15.1.2 合金元素的影响	330
15.2 冷硬铸铁应用实例——冷硬铸铁轧辊	332
参考文献	335

1 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 $w(\text{C}) = 2\% \sim 4\%$ ^①， $w(\text{Si}) = 1\% \sim 3\%$ ，并含锰、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，一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。高碳相以渗碳体为主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，凝固组织经过降温和组织转变形成室温组织。

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平衡浓度。平衡状态虽然难以在实际铸件的相变过程中出现，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明显变化，有助于提高铁碳合金按稳定系转变倾向。因此，硅是影响铸铁组织的重要元素。为了进一步掌握铸铁组织的变化规律，人们构建了铁碳硅三元相图。三元相图比铁碳二元相图更加接近工业铸铁组织随成分和温度而变化的实际情况。

本章讨论铸铁组织及其形成规律。首先从铁碳二元相图和铁碳硅三元相图开始。

1.1 铁碳合金相图和铁碳硅合金相图

1.1.1 铁碳合金相图

铁碳二元合金相图显示含碳量不同的二元合金在平衡条件下各组成相存在的温度、成分范围以及合金液-固相变和固态相变的临界数据。它是研究铁碳系合金的基础资料。

人们熟知的 Fe-C 合金相图如图 1-1a 所示。图中标明的相有液相(L)、奥氏体(γ)、铁素体(α 及 δ)、高碳相(渗碳体 Fe_3C 或石墨 G)。各相区表明组成相单独存在或多相共存的成分、温度范围。

① 本书凡未经标注的百分含量均为质量分数。