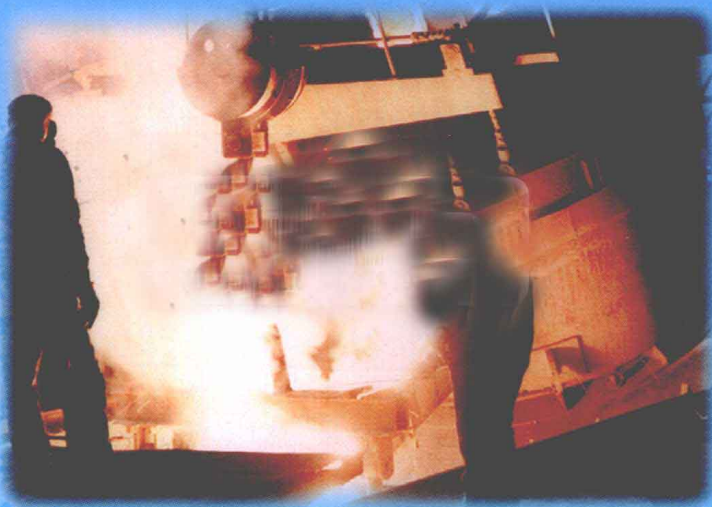


铬白口铸铁及其 生产技术

郝石坚 著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

铬白口铸铁及其生产技术

郝石坚 著

北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2011

内 容 简 介

铬白口铸铁是当代最优秀的抗磨金属材料之一,在国内外许多重要工业场合已代替了传统抗磨材料,成为冶金、采矿、电力、建材等工业领域首选的抗磨材料。本书系统介绍其主要品种高铬铸铁和镍铬铸铁(镍硬)的理论和生产实践,共分10章,包括铬白口铸铁组织形成的基础理论、化学成分、力学性能、制造工艺条件以及抗磨料磨损特性及其影响因素,是设计、制造及选用铬白口铸铁件的必备知识。书中以较大篇幅详细介绍铬白口铸铁制造者必需掌握的特定制造工艺过程,特别是铸造工艺和热处理工艺过程。这主要来自作者多年来在生产和科研一线取得的第一手资料,也汇集了国内外的有关报道和技术服务资料。为了帮助读者提高铬白口铸铁件制造工艺水平,还介绍了几种有代表性的铬白口铸铁件具体制造工艺。

本书适合从事抗磨金属材料及铬白口铸铁件研究、生产、开发、应用的工程技术人员及科学研究人员阅读,也适合高等院校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

铬白口铸铁及其生产技术/郝石坚著. —北京:冶金工业出版社, 2011. 8

ISBN 978-7-5024-5675-7

I. ①铬… II. ①郝… III. ①白口铁—铸铁件—铸造
IV. ①TG252

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011) 第 150903 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 yjcs@cnmip.com.cn

责任编辑 李 梅 美术编辑 彭子赫 版式设计 孙跃红

责任校对 王永欣 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-5675-7

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

2011 年 8 月第 1 版, 2011 年 8 月第 1 次印刷

787mm × 1092mm 1/16; 15.25 印张; 364 千字; 228 页

49.00 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(100010) 电话:(010)65289081(兼传真)

(本书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

前 言

铬白口铸铁是以铬为主加合金元素而形成的合金白口铸铁。这种白口铸铁包括多个品种。按含铬量来划分,有低铬铸铁、中铬铸铁、高铬铸铁之分,它们主要作为抗磨料磨损材料在产生磨料磨损工况下使用。另一种抗磨白口铸铁是镍铬白口铸铁,其中的主加合金元素是镍和铬。铬与碳形成高硬度铬碳化合物作为抗磨骨架。其抗磨机制与铬白口铸铁类似,因此可以把镍铬白口铸铁作为铬白口铸铁中的一个品种。

应用最广泛的铬白口铸铁是高铬铸铁,主要用于制造抗磨铸件。它的应用范围很广泛,在电力工业、采矿、选矿、冶金、建材、煤矿以及农用和粮油加工设备中都能显示其优异的抗磨功能。在发生强烈磨料磨损的工况下,高铬铸铁的抗磨能力可能是耐磨钢的数倍至数十倍,显著改善了机器的工作效能,企业可以获得良好的经济效益。

除了作为抗磨材料以外,高铬白口铸铁还有耐热功能和耐腐蚀功能,也可以作为耐腐蚀材料和耐热材料,本书把高铬铸铁分为:高铬耐磨铸铁、高铬耐腐蚀铸铁、高铬耐热铸铁。

本书重点讨论高铬耐磨铸铁组织、成分、性能及制造工艺,并对铬白口铸铁的其他品种也加以介绍。

本书第1章首先介绍普通非合金白口铸铁成分、显微组织与性能。讨论非合金白口铸铁性能弱点以及改善性能的技术措施。添加合金元素是主要措施之一。本章列举出几种已经进入工业领域的合金白口铸铁并作了简要介绍。第2章由铁碳铬三元合金相图开始,讨论最常用的铬白口铸铁显微组织如何形成,化学成分对白口铸铁组织、主要组成相的影响,铬白口铸铁的主要品种。第3章介绍低铬铸铁和中铬铸铁(以中铬硅铸铁为代表)的组织 and 性能特点,并简要说明低铬铸铁的变质处理要点及这两种铸铁生产过程。作为本书的重点内容,第4章和第5章全方位介绍高铬铸铁中的主要品种:高铬耐磨铸铁。第4章介绍高铬铸铁显微组织、各种基体组织(包括马氏体、奥氏体、聚合组织基

体)的性能和生成条件、高铬铸铁化学成分选择、合金元素在高铬铸铁中的作用。第5章讨论高铬铸铁的磨损与断裂。高铬铸铁的抗磨料磨损能力是表征其优越工作性能的主要条件,也是人们选用这种材料的主要因素。因此本章对影响抗磨料磨损能力的因素作了重点介绍,试图加深读者对高铬铸铁工作性能的认识。本章后一部分从断裂韧性角度讨论高铬铸铁的抗断裂能力。第6章和第7章介绍高铬铸铁的另外两个品种:高铬耐蚀铸铁和高铬耐热铸铁。两章分别阐述铸铁腐蚀和热损伤的一些基本原理,并且列举许多数据说明这两种白口铸铁的工作性能,供读者参考、应用。第8章介绍镍铬白口铸铁,内容包括镍铬白口铸铁基本化学成分、各种成分对形成显微组织的影响,并具体阐述了KmT-BNi₄Cr₂和KmTBNi₉Cr₅两种规格铬镍白口铸铁的制造工艺(铸造、热处理)、工作性能以及工业应用。第9章介绍铬白口铸铁主要是高铬铸铁的铸造和热处理生产工艺,几乎包括了各个生产环节。作者力求内容切合实际,贴近生产,数据可靠,使工作在第一线的铸造工作者读后有所收获。第10章列举了多种类型铬白口铸铁件生产实例。所有实例都经过生产单位反复运用和验证,证明技术成熟、稳定,技术数据合理、可靠,确有推荐和推广价值。

本书的出版得到一些单位的支持和帮助。特别要感谢河南省西峡众德汽车零部件有限公司总经理田中青先生、该厂杨双杰先生。在高合金铸铁的理论与实践方面,该公司长期与作者进行专业合作,制成并批量生产了高镍奥氏体球铁、硅钼耐热球铁汽车排气歧管等高合金产品。还要感谢西安胜昔电力科技有限责任公司总经理郝伟先生,该公司专业制造高铬铸铁、镍硬铸铁等耐磨铸件并提供汽轮机叶片抗汽蚀超音速喷涂服务。该公司以及曾和作者多年合作的科研单位、技术情报院所都为本书提供了许多宝贵的文献资料,为本书增添了不少有价值的内容,作者在此表示衷心感谢。

郝石坚

2011年7月于长安大学

作者电子邮箱: haoshijian@vip.sina.com

目 录

1 白口铸铁及其合金化	1
1.1 非合金白口铸铁	1
1.1.1 白口铸铁组织的形成	1
1.1.2 渗碳体	4
1.1.3 非合金白口铸铁常用的化学成分	6
1.2 改进非合金白口铸铁性能的技术措施	7
1.2.1 白口铸铁变质处理	7
1.2.2 铸件热处理	7
1.2.3 添加合金元素	8
1.3 几种合金白口铸铁	9
1.3.1 锰白口铸铁	9
1.3.2 硼白口铸铁	10
1.3.3 钨白口铸铁	11
1.3.4 铬白口铸铁	12
1.3.5 镍铬合金铸铁	12
参考文献	13
2 铬白口铸铁	14
2.1 铁碳铬三元合金	14
2.1.1 铁碳铬三元合金的液相面投影图	14
2.1.2 铁碳铬三元相图的 $w(\text{Cr}) = 13\%$ 垂直截面	17
2.1.3 铁碳铬三元相图的几个等温截面	18
2.2 铬白口铸铁中铬的主要存在方式与铬碳化物	20
2.2.1 $(\text{Cr}, \text{Fe})_7\text{C}_3$ 碳化物	21
2.2.2 共晶 $(\text{Fe}, \text{Cr})_7\text{C}_3$ 碳化物	22
2.2.3 $(\text{Fe}, \text{Cr})_{23}\text{C}_6$ 碳化物	26
2.2.4 $(\text{Fe}, \text{Cr})_3\text{C}$ 碳化物	27
参考文献	29
3 低铬铸铁和中铬铸铁	30
3.1 低铬铸铁	30

3.1.1 低铬铸铁变质处理	31
3.1.2 稀土元素变质剂	31
3.1.3 低铬铸铁热处理	32
3.2 中铬铸铁	34
3.2.1 中铬铸铁显微组织	35
3.2.2 中铬铸铁件生产技术	37
3.2.3 中铬铸铁力学性能和冲击磨损抗力	38
3.2.4 中铬铸铁应用	39
参考文献	39
4 高铬耐磨铸铁	40
4.1 高铬耐磨铸铁组织	40
4.2 高铬铸铁共晶组织	43
4.3 高铬铸铁的共晶团	44
4.3.1 铁水过热温度和共晶反应温度范围对共晶组织的影响	45
4.3.2 铁水凝固速度对共晶组织的影响	46
4.3.3 化学成分对共晶组织的影响	49
4.4 高铬铸铁的基体金属	50
4.4.1 碳和铬在碳化物和基体之间的分配	50
4.4.2 铸态基体金属中的元素偏析	52
4.5 高铬铸铁中的马氏体	53
4.5.1 冷却过程中避免珠光体转变	54
4.5.2 提高马氏体转变开始温度 (M_s)	55
4.5.3 二次碳化物析出	58
4.5.4 脱稳处理工艺	59
4.5.5 马氏体硬度	61
4.5.6 脱稳处理后的 A_{c1} 、 A_{c3} 、 M_s 和马氏体基体硬度	61
4.5.7 铸态马氏体高铬铸铁	62
4.5.8 马氏体高铬铸铁中的残余奥氏体	63
4.6 奥氏体高铬铸铁	64
4.7 ($\alpha + M_7C_3$) 聚合组织基体高铬铸铁	66
4.7.1 高铬铸铁基体中的 ($\alpha + M_7C_3$) 聚合组织	66
4.7.2 奥氏体组织亚临界回火后的变化	66
4.7.3 回火析出碳化物的类型	68
4.7.4 ($\alpha + M_7C_3$) 聚合组织高铬铸铁力学性能和抗磨能力	68
4.8 高铬铸铁件化学成分选择	69
4.9 高铬铸铁的合金元素	71

4.9.1 钼	71
4.9.2 硅	74
4.9.3 锰	75
4.9.4 铜	77
4.9.5 镍	78
4.9.6 钒	80
4.9.7 铌	80
参考文献	82
5 高铬耐磨铸铁的磨损与断裂	83
5.1 磨料磨损	83
5.2 磨料磨损类型	84
5.3 磨屑形成机制	84
5.4 观察磨料磨损现象的方法	86
5.5 材料抗磨能力测试	87
5.5.1 销盘磨损试验	88
5.5.2 橡胶轮磨损试验	88
5.5.3 动载磨损试验	89
5.6 高铬铸铁件的磨料磨损	89
5.6.1 碳化物的磨损	89
5.6.2 基体金属的磨损	91
5.7 影响高铬铸铁件磨损率的一些因素	95
5.7.1 碳化物尺寸、间距和位向的影响	95
5.7.2 碳化物体积分数的影响	96
5.7.3 磨料硬度的影响	98
5.7.4 磨料形状与尺寸的影响	99
5.7.5 磨料作用方式的影响	100
5.8 高铬铸铁的耐磨性与抗冲击能力	101
5.8.1 以断裂韧度衡量高铬铸铁抗冲击能力	101
5.8.2 碳化物体积分数对高铬铸铁断裂韧度的影响	102
5.8.3 奥氏体基体和马氏体对高铬铸铁断裂韧度的影响	103
参考文献	105
6 高铬耐蚀铸铁	106
6.1 金属腐蚀	106
6.2 金属耐蚀性	107
6.3 白口铸铁的腐蚀	107

6.4	高铬耐蚀铸铁	109
6.5	铁素体高铬耐蚀铸铁	109
6.5.1	铁素体高铬耐蚀铸铁成分与组织	109
6.5.2	铁素体高铬耐蚀铸铁的耐蚀性能	112
6.6	奥氏体基体高铬耐蚀铸铁	115
6.7	高铬耐蚀铸铁件制造工艺	116
	参考文献	118
7	高铬耐热铸铁	119
7.1	铸铁在高温下的性状变化	119
7.1.1	氧化	119
7.1.2	高温下静载强度下降	120
7.1.3	蠕变	120
7.1.4	热疲劳	121
7.2	铬在耐热白口铸铁中的作用	122
7.3	几种高铬耐热铸铁化学成分	123
7.4	高铬耐热铸铁的应用	124
7.5	高铬耐热铸铁中的 σ 相	127
7.6	高铬耐热铸铁件制造	128
7.6.1	高铬耐热铸铁的铸造性能	128
7.6.2	熔化与浇注	128
7.6.3	铸造性能	129
7.6.4	造型和清理	129
7.6.5	可切削性	129
7.6.6	热处理	130
	参考文献	130
8	镍铬白口铸铁	131
8.1	镍铬白口铸铁化学成分	131
8.2	各元素在镍铬白口铸铁组织中的作用	132
8.2.1	碳的作用	132
8.2.2	硅的作用	134
8.2.3	镍的作用	134
8.2.4	铬的作用	135
8.2.5	锰的作用	136
8.2.6	钼的作用	136
8.3	KmTBNi4Cr2 镍铬白口铸铁	137

8.3.1	KmTBNi4Cr2 镍铬白口铸铁组织	137
8.3.2	KmTBNi4Cr2 镍铬白口铸铁的力学和物理性能	140
8.4	KmTBCr9Ni5 镍铬白口铸铁	140
8.5	KmTBCr9Ni5 镍铬白口铸铁的力学性能和物理性能	144
8.5.1	KmTBCr9Ni5 镍铬白口铸铁的力学性能	144
8.5.2	镍铬白口铸铁的物理性能	144
8.6	镍铬白口铸铁件热处理	145
8.6.1	KmTBNi4Cr2 镍铬白口铸铁件热处理	145
8.6.2	KmTBCr9Ni5 镍铬白口铸铁热处理	146
8.6.3	镍铬白口铸铁深冷处理	148
8.7	镍铬白口铸铁的应用	150
	参考文献	151
9	铬白口铸铁的铸造与热处理	152
9.1	高铬铸铁熔化与浇注	152
9.1.1	熔炉	152
9.1.2	炉料	152
9.1.3	炉料熔化	155
9.2	高铬铸铁件铸造工艺	158
9.2.1	高铬铸铁铁水流动性	158
9.2.2	高铬铸铁件的浇注系统	159
9.3	高铬铸铁的收缩性	161
9.3.1	凝固收缩现象与铸件补缩	162
9.3.2	冒口补缩	162
9.3.3	冷铁	167
9.3.4	线收缩	168
9.4	铸造应力	169
9.5	铸件开箱和清理	169
9.5.1	开箱	169
9.5.2	切除浇冒口	170
9.5.3	去除冒口残根	174
9.5.4	铸件补焊	175
9.6	高铬耐磨铸铁件热处理	175
9.6.1	铸件加热	176
9.6.2	铸件奥氏体化处理	176
9.6.3	铸件冷却	178
9.6.4	铸件回火	179

参考文献	180
10 铬白口铸铁件生产实例	181
10.1 厚壁高铬铸铁件生产	181
10.1.1 厚壁高铬耐磨铸铁件化学成分	181
10.1.2 造型、熔化和浇注	183
10.1.3 热处理	183
10.2 碾轮式磨煤机磨辊套	185
10.2.1 磨辊套化学成分	186
10.2.2 磨辊套铸造	187
10.2.3 磨辊套热处理	187
10.3 球磨机磨球	188
10.3.1 磨球的失效	188
10.3.2 铬白口铸铁磨球	189
10.3.3 马氏体高铬铸铁	189
10.3.4 聚合物基体高铬铸铁	191
10.3.5 中铬硅白口铸铁	191
10.3.6 低铬白口铸铁	192
10.3.7 磨球铸造工艺	192
10.3.8 磨球热处理	194
10.3.9 磨球工作性能试验	195
10.4 球磨机衬板	196
10.5 往复式泥浆泵缸套	199
10.6 高铬铸铁-球墨铸铁双金属轧辊	202
10.6.1 离心铸造高铬铸铁-球墨铸铁双金属轧辊	203
10.6.2 高铬铸铁的化学成分	203
10.6.3 轧辊耐磨层离心铸造	203
10.6.4 浇注球墨铸铁辊芯	205
10.6.5 高铬铸铁-球墨铸铁双金属轧辊的热处理	207
10.7 高铬铸铁喷焊粉末	208
10.7.1 高铬铸铁喷焊粉末性能要求和化学成分	208
10.7.2 喷焊粉末制造过程	210
10.7.3 粉末产品检测	210
10.7.4 高铬铸铁喷焊粉末应用实例	211
10.7.5 喷焊作业	211
10.7.6 喷焊层组织检测	211
10.7.7 喷焊层耐磨性试验	212

10.7.8 喷焊高铬铸铁后零件运行情况	213
10.7.9 高铬铸铁熔焊块	214
10.8 矿料烧结机算条	215
参考文献	216
附 录	217
附录1 我国抗磨铸铁标准 (GB/T 8263—1999)	217
附录2 国际抗磨铸铁标准 [ISO 21988 : 2006(E)]	218
附录3 美国抗磨铸铁标准 (ASTM A532M—2008)	220
附录4 欧洲抗磨铸铁标准 (EN 12513 : 2000)	221
附录5 德国抗磨铸铁标准 (DIN 1695—1981)	222
附录6 铬白口铸铁中合金碳化物的金相鉴别	225
附录7 铬白口铸铁宏观硬度换算	227

1 白口铸铁及其合金化

白口铸铁是人类最早使用的黑色金属。在古代，这种硬而脆的材料主要用于犁铧之类的耕作器具以及原始兵器。白口铸铁器具的使用在推动人类社会进步方面曾经发挥过重大作用。据史料记载，我国应用白口铸铁历史悠久，这种金属材料已经伴随我们的祖先渡过了几千年的历史。白口铸铁作为人类文明史上的宝贵财富，直到今天仍然是工农业中应用于抗磨料磨损零件的重要金属材料。

普通白口铸铁虽然比较坚硬耐磨，但是作为现代金属材料，仍然表现出有明显不足之处。其主要不足之处在于以下两点：

- (1) 白口铸铁性质较脆，难以承受较大的冲击负荷；
- (2) 抗磨料磨损能力虽然远强于灰口铸铁，但仍不能充分满足现代机械设备对易磨损件使用寿命日益增长的要求。

20 世纪以来，国际上和国内铸造界对于改进白口铸铁件性能和质量的问题一直很重视，改进白口铸铁组织、性能、生产工艺等方面的研究取得不少成果。白口铸铁件应用范围不断扩大，零件工作寿命显著提高。

当前国内每年需要白口铸铁耐磨件达数百万吨。即使这些铸件工作寿命稍有提高，也会产生很大经济效益。

合金化是改善白口铸铁性能的重要技术措施之一。当代使用的白口铸铁大多数是合金白口铸铁，铬白口铸铁更是应用最广泛的合金白口铸铁。例如，高铬铸铁、镍铬白口铸铁都是当代广泛应用于抗磨料磨损零件的典型合金白口铸铁。有些白口铸铁件以锰、钨等元素作为主加合金元素，所形成的合金白口铸件也都有各自的应用范围。

本章简要讨论白口铸铁及改善其组织、性能的一些问题。

1.1 非合金白口铸铁

非合金白口铸铁是指由铸铁常存元素组成、不含其他合金元素的白口铸铁。非合金白口铸铁基本显微组织由渗碳体和基体金属构成。

非共晶成分白口铸铁水降温到稍低于液相线温度时，首先析出初生相（先共晶奥氏体或先共晶渗碳体），其余液相则在亚稳定系共晶转变温度发生共晶转变。共晶成分铁水则由液相直接转变为渗碳体共晶。高过冷度和合适的化学成分是形成白口组织的必要条件。渗碳体共晶需要过冷到低于灰口铸铁共晶转变温度才能形成。亚共晶铁水形成渗碳体共晶的冷却曲线如图 1-1 所示。

1.1.1 白口铸铁组织的形成

首先来分析铸铁凝固后产生渗碳体的结晶条件和过程。

碳在铁水中的活度是影响铸铁凝固组织的重要因素。白口铸铁的碳当量较低。在碳活

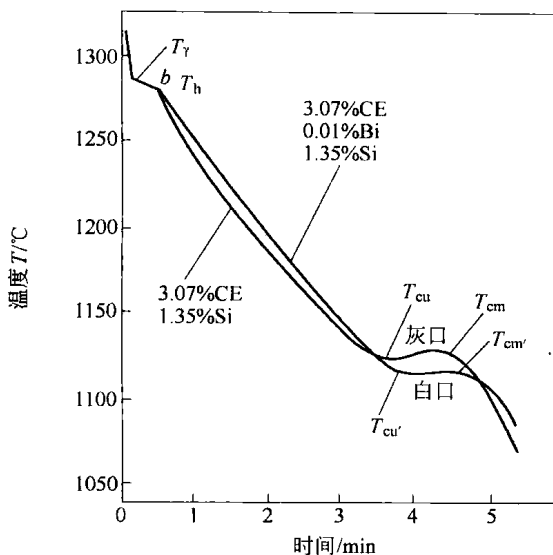


图 1-1 亚共晶铁水形成渗碳体共晶的冷却曲线

度低的铁水中，碳原子活动能力差，在铁水中扩散速率低，移位量（特别是铁原子）很小，铁水结晶过冷度大于灰铸铁。与石墨的形成比较，石墨含碳量接近 100%，形成石墨需要碳原子和铁原子做较大的迁移，特别是铁原子在结晶过程中的扩散速率和自扩散量是碳、铁原子进行点阵重组、形成新相的控制性因素。如果铁水碳活度低，铁原子的扩散运动受阻或进行缓慢以致不能为构成石墨晶体提供足够的空位，则铁、碳原子倾向于发生即位反应（化合）生成含碳量为 6.67% 渗碳体。

碳在铁水中的活度很大程度上取决于化学成分。铁水中石墨化元素（例如硅）含量低或含有较多碳化物形成元素都会降低铁水的碳活度，为白口铸铁的生成创造条件。

图 1-2 显示一般非合金白口铸铁中碳和硅的大致成分范围。

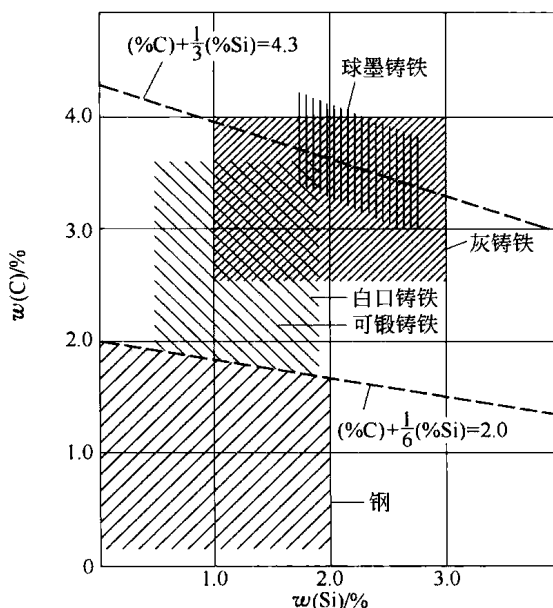


图 1-2 非合金白口铸铁中碳和硅的大致成分范围

从热力学角度来看,形成渗碳体共晶比形成石墨共晶需要较高的相变驱动力,只有当铁水过冷到较低的温度,才能获得形成渗碳体所需的热力学驱动力。从动力学角度看,形成两种共晶时,在不同温度下的晶体生长速度是不同的。生长速度高的晶体是优先生成的相组分,图 1-3 表明只有当生长速度高于两条曲线交点时,渗碳体才能成为优势生长晶体。这个交点温度略低于渗碳体共晶转变温度。当铁水以较快速度冷却时,就能促使渗碳体在较低温度下形核和生长;实践证实,铁水冷却速度、铁水过冷度和渗碳体共晶生成倾向,几乎是成比例增加的。高冷速、高过冷度是促进铁水产生白口组织的重要条件。

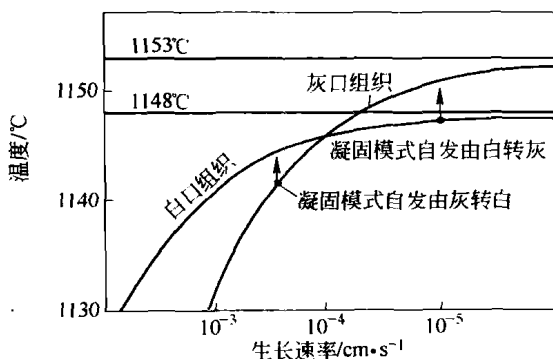


图 1-3 两种高碳相在不同温度下的生长速度

在非平衡条件下凝固时,亚共晶成分铁水在共晶转变前都已经存在一些先共晶奥氏体。近代研究发现,甚至共晶成分铁水和稍过共晶成分铁水中也可能存在先共晶奥氏体。先共晶奥氏体表面的晶体缺陷可以容纳一些由周围富碳铁液扩散而来的碳原子,这些晶体缺陷部位也可能成为渗碳体形核位置。先共晶渗碳体和共晶渗碳体可能在这些位置上依附奥氏体晶体生长。也就是说,先共晶渗碳体可能直接在先共晶奥氏体外的熔液中形核和生长。当铁水温度降低到低于渗碳体共晶转变开始温度时,渗碳体形核位置显著增加,渗碳体晶体将成批地在奥氏体表面析出。它将沿 $[010]$ 晶向优先生长,大量生长使邻近晶体的熔液碳浓度降低,为共晶奥氏体的形成创造了条件。这说明在两相共生长的过程中,渗碳体晶体起领先相的作用,即共晶渗碳体引领共晶奥氏体生长,形成渗碳体共晶^[1]。

渗碳体与奥氏体生长方式不同。渗碳体是逐层生长,晶体基本上是二维分枝(图 1-4);奥氏体则沿扩展表面能最小的原子密排面(111)生长,基本上为三维分枝。因此有些渗碳体晶体生长时要穿过奥氏体晶体,这部分渗碳体晶体是不稳定的。

渗碳体晶体逐层二维分枝生长的结晶速度很快,在过共晶成分铁水里孤立生长时,通常形成

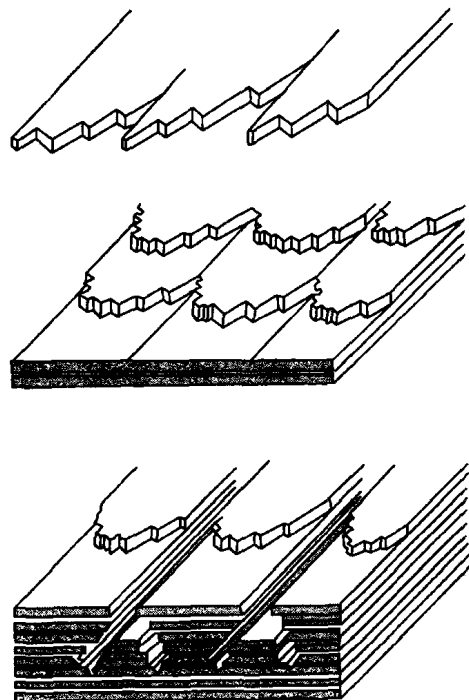


图 1-4 渗碳体晶体二维分枝

粗大的条状晶体，即先共晶渗碳体，如图 1-5 中白色条状晶体所示。

在形成渗碳体共晶温度下，渗碳体的生长速度远高于奥氏体，因而在共晶组织中占有较大体积分数。渗碳体共晶作为生长中的领先相，一方面以 $[010]$ 晶向为择优方向生长，使渗碳体形成长片状；另一方面，也在横向（ c 轴方向）生长，形成如图 1-6 所示的包覆型共晶，这种形态的共晶组织称为莱氏体。渗碳体与奥氏体倾向于形成包覆型共晶。因为形成这种共晶与形成层片状共晶相比较，前一种方式的生长虽然需要在晶体单位面积上提供较多能量，但两相的接触面积却小得多。总的来说，形成这种非正常共晶所增加的总界面能小于层状共晶。因而，渗碳体共晶的形态多数呈包覆状。此情况下共晶奥氏体多以圆柱体形状嵌入渗碳体。共晶体断面呈蜂窝状。这是莱氏体共晶特有的非正常共晶形态。多数非合金白口铸铁和低合金白口铸铁具有这种共晶组织状态。

当低碳当量的亚共晶白口铸铁开始凝固时，如果铁水中已有相当数量的先共晶奥氏体，而且铁水过冷度较大（在更快冷速下进行共晶转变），则倾向于形成含有板条状渗碳体的共晶组织（图 1-7）。



图 1-5 过共晶白口铸铁中的先共晶渗碳体



图 1-6 包覆型渗碳体共晶

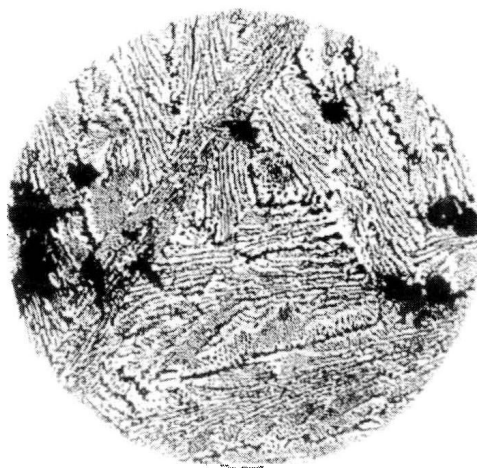


图 1-7 板条状渗碳体共晶

1.1.2 渗碳体

渗碳体 (Fe_3C) 是碳原子和铁原子构成的间隙化合物，在这种化合物中，每个碳原子被 6 个构成八面体的铁原子所包围，相邻的 6 个八面体共用一个铁原子（图 1-8）。因此，渗碳体中铁、碳原子比为 3:1。非合金白口铸铁中渗碳体组织的理论含碳量为 6.67%，硬

度 HV 950 ~ 1050, 性质硬而脆。

渗碳体具有正交晶格。在正交晶格中, a 轴方向和 b 轴方向的生长速度大于 c 轴方向的生长速度。晶体沿 $[010]$ 晶向以层状生长方式二维生长 (图 1-4)。生长中的层片厚度约为几个至几十个原子间距。每个晶片内的碳原子以共价键结合。片体表面存在许多晶体缺陷, 其中螺位错可使生长着的晶体出现许多二维分枝。这些分枝大部分也是沿 $[010]$ 晶向优势生长并形成新的片层, 片层使渗碳体增厚, 片层之间以金属键结合。这种生长方式使渗碳体晶体成为许多片体互相链接的结构。由于片层内和片层间键结合强度不同, 渗碳体晶体产生各向异性。

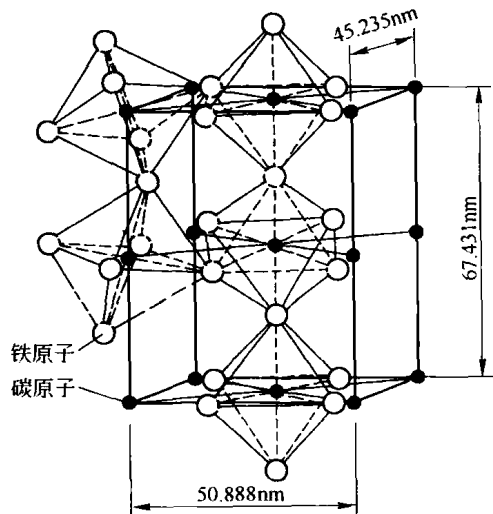


图 1-8 渗碳体晶格结构

渗碳体在铸铁中以多种形式存在, 包括先共晶渗碳体、共晶渗碳体、二次渗碳体、三次渗碳体、晶间渗碳体 (晶间碳化物)。

先共晶渗碳体是指在共晶反应之前由铁水中析出而独立存在的先共晶相。共晶渗碳体以包覆型共晶相 (莱氏体) 形态或以板条状共晶相形态存在。

合金元素可能使共晶渗碳体形态发生改变。加入少量合金元素, 碳化物可能仍然为渗碳体型, 但某些合金元素加入量超过一定限度后, 能使晶体结构发生变化。例如, 铬白口铸铁中铬的含量超过 11% 时, 渗碳体型碳化物将变为 Cr_7C_3 型合金碳化物, 碳化物形貌和性质也随之改变。

二次渗碳体是铸件降温过程中奥氏体所含过饱和碳析出而形成的渗碳体。大多数二次渗碳体以棒状或粒状弥散分布于奥氏体晶粒中, 有些也分布于奥氏体晶界上。在光学显微镜下可以清楚地看到二次渗碳体的存在。

铸件快速冷却时, 共析铁素体和先共析铁素体中的碳均处于过饱和状态。如果铸件在低于共析温度停留, 过饱和碳将以粒状碳化物形式沿铁素体或渗碳体界面析出。这种在低于共析温度下析出的渗碳体 (或合金碳化物) 称为三次渗碳体。三次渗碳体非常细小, 使用光学显微镜难以分辨, 一般需借助电子显微镜观察。

共晶转变完成后, 仍有一部分碳化物形成元素因偏析而富集于残留熔液中。如果熔液的熔点低于渗碳体共晶转变终止温度, 并且具有形成碳化物倾向时, 在渗碳体共晶转变完成之后, 将会在晶粒边界产生晶间碳化物。图 1-9 所显示的磷共晶是晶间碳化物的实例。产生晶间碳化物的冷却曲线如图 1-10 所示。

渗碳体中的铁原子和碳原子均能被一些尺寸和化学性质相近的原子部分取代, 即化合物中可溶入一些合金元素。例如, 碳化物形成元素铬、钼、钒、锰能够置换部分铁原子而溶入碳化物中, 形成合金碳化物, 如 $(\text{Fe}, \text{Cr})_3\text{C}$ 、 $(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{C}$ 等。但是溶入的某些合金元素超过一定限度后, 渗碳体的晶体结构和性能会发生质的变化。渗碳体中的碳原子也能被其他原子所取代, 例如硼原子取代部分碳原子而形成 $\text{Fe}_3(\text{C}, \text{B})$ 。

有些抗磨白口铸铁中可能有少量石墨与渗碳体同时存在。关于是否允许少量石墨存在