

李伯民 李清 编著

耐磨铸件 加工技术与实例

NAIMO ZHUJIAN JIAGONG JISHU YU SHILI



化学工业出版社

耐磨铸件 加工技术与实例

李伯民 李清 编著



化学工业出版社

·北京·

随着经济的发展,新型耐磨材料不断涌现,为了更好地将新型耐磨材料应用于诸多工业部门的技术装备和关键零件,对耐磨铸件的加工精度与表面加工质量提出了更高、更新的要求。本书全面、系统介绍了重要的耐磨材料特征,耐磨铸铁、铸钢件的制造技术中的铸件成型,铸件切削加工的特点,并结合耐磨铸件的切削加工典型耐磨铸件加工实例,论述了刀具材料及刀具几何参数与切削用量的合理选择等详细内容。本书既对常用耐磨铸件的切削加工技术进行论述,又对适用于耐磨铸件各类加工技术进行了详细介绍。本书先进性、实用性较强,可为从事耐磨铸件的生产、开发及工程应用人员提供指导和参考。

本书可供广大从事机械加工、铸造行业的工程技术人员使用,还可供广大从事摩擦磨损和耐磨材料专业科研人员、技术人员参考,也可作为材料等相关专业在校师生教学参考书使用。

图书在版编目(CIP)数据

耐磨铸件加工技术与实例/李伯民,李清编著. —北京:
化学工业出版社, 2011.12
ISBN 978-7-122-12687-0

I. 耐… II. ①李…②李… III. 耐磨材料-铸件-铸造
IV. TG25

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第217883号

责任编辑:朱彤
责任校对:边涛

文字编辑:王琪
装帧设计:刘丽华

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)
印刷:北京永鑫印刷有限责任公司
装订:三河市万龙印装有限公司
787mm×1092mm 1/16 印张10 $\frac{1}{4}$ 字数195千字 2012年2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: 39.00 元

版权所有 违者必究

前言

磨损造成了能源和原材料的大量消耗，能源的 $1/3 \sim 1/2$ 消耗于摩擦与磨损。据统计，我国因摩擦、磨损造成的经济损失近千亿元。美国每年因磨损造成的损失达数千亿美元。由于磨损造成的经济损失是巨大的，因此研究和发新型耐磨材料及其制造技术，特别是对耐磨铸件的制造技术，对国民经济具有重要意义。

传统金属耐磨材料经铸造所成形的耐磨铸件，大多不进行切削加工，直接用于生产设备上。

随着科学技术与经济的发展，新型耐磨金属材料如高铬白口铸铁、奥贝球墨铸铁、耐磨低合金钢新钢种的涌现，用这些新型耐磨材料制造航空、航天、汽车、轧机、矿山机械、石油、交通、电力等许多工业部门的技术装备的关键零件，对这些耐磨铸件的加工精度与表面加工质量提出了更高技术要求，需要对耐磨铸件进行车、铣、刨、镗及磨削等多种切削加工。而耐磨铸件不论是耐磨铸铁件还是耐磨铸钢件，其耐磨金属材料均具有高强度、高硬度、高耐磨性，延伸率较低，脆性较大等特性，给切削加工带来困难。对耐磨铸件的切削加工技术，在以往科技文献及书刊中有些较零散的资料，缺乏专门论述耐磨铸件加工技术的书籍。为促进我国耐磨铸件制造技术的发展，作者编写《耐磨铸件加工技术与实例》一书，奉献给读者。

《耐磨铸件加工技术与实例》一书共 8 章，主要包括耐磨铸件加工技术概述、刀具材料与磨料磨具、耐磨低合金铸铁的加工、镍硬铸铁的切削

加工、高铬铸铁件的加工、蠕墨铸铁与贝氏体球铁、高锰钢与中锰钢耐磨铸件的加工、耐磨合金钢加工技术。本书重点介绍了八类耐磨金属材料的物理力学特性，切削加工特点，合适的刀具选择，刀具合理的几何参数推荐与选择合理的切削用量并且结合工程实际给出典型耐磨铸件的切削加工实例。

限于编者经验和时间，书中难免会有疏漏之处，诚望广大读者批评指正。

编著者

2011年11月

第 1 章 耐磨铸件加工技术概述	1
1.1 耐磨金属材料及其发展	1
1.1.1 耐磨铸铁材料	2
1.1.2 耐磨铸钢及其新发展	4
1.2 耐磨铸件生产	5
1.2.1 耐磨铸件复合铸造	6
1.2.2 耐磨铸件变质处理	7
1.2.3 耐磨铸件热处理	8
1.3 耐磨铸件的切削加工性	9
1.3.1 耐磨金属材料的切削加工性	10
1.3.2 衡量耐磨金属材料切削加工性的指标	10
1.3.3 影响耐磨铸件切削加工性的因素	11

第 2 章 刀具材料与磨料磨具	14
2.1 超硬高速钢	16
2.1.1 高碳含钴超硬高速钢	16
2.1.2 含铝超硬高速钢	16
2.1.3 含氮超硬高速钢	16
2.2 硬质合金	17
2.2.1 ISO 标准规定的硬质合金分类及性能	17
2.2.2 碳化钨基硬质合金的性能与用途	21

2.2.3	WC-TaC(NbC)-Co 硬质合金	25
2.2.4	TiC(N) 基硬质合金	30
2.2.5	超细晶粒硬质合金	32
2.3	涂层硬质合金刀具	36
2.3.1	涂层材料	36
2.3.2	涂层硬质合金刀具的基体	37
2.3.3	涂层硬质合金的刀具切削性能	38
2.4	陶瓷刀具材料	42
2.4.1	氧化铝基陶瓷	42
2.4.2	氮化硅基陶瓷	44
2.4.3	Si ₃ N ₄ 陶瓷涂层刀具	47
2.5	超硬刀具材料 CBN	47
2.6	磨具	48
2.6.1	磨具结构与特性	48
2.6.2	磨具的选择和使用	54
<hr/>		
第3章	耐磨低合金铸铁的加工	85
<hr/>		
3.1	耐磨低合金铸铁的特性	85
3.1.1	普通白口铸铁	85
3.1.2	锰白口铸铁	85
3.1.3	钨白口铸铁	87
3.1.4	硼白口铸铁	87
3.1.5	钒白口铸铁	88
3.2	耐磨低合金铸铁的加工特点	89
3.3	低合金铸铁、冷硬铸铁切削加工的途径	90
3.3.1	切削耐磨低合金铸铁的刀具材料的选择	90
3.3.2	选择合理的刀具几何参数	92
3.3.3	选择合理的切削用量	92
3.4	耐磨低合金铸铁、冷硬铸铁加工实例	93
<hr/>		
第4章	镍硬铸铁的切削加工	95
<hr/>		
4.1	镍硬铸铁的性能	95
4.2	镍硬铸铁耐磨铸件加工特点	97
4.3	镍硬铸铁的切削加工	97

4.4 切削镍硬铸铁的实例	98
<hr/>	
第5章 高铬铸铁件的加工	100
<hr/>	
5.1 铬白口铸铁	100
5.1.1 低铬白口铸铁	100
5.1.2 高铬白口铸铁	101
5.1.3 高铬铸铁应用实例	102
5.2 高铬铸铁件的加工特点	103
5.3 高铬铸铁的切削加工	103
5.4 高铬铸铁的磨削	104
5.5 高铬铸铁轧辊加工实例	105
<hr/>	
第6章 蠕墨铸铁与贝氏体球铁	107
<hr/>	
6.1 蠕墨铸铁与贝氏体球铁材料特性	107
6.1.1 蠕墨铸铁	107
6.1.2 贝氏体球墨铸铁	108
6.2 蠕墨铸铁、贝氏体球铁的切削加工	110
6.2.1 蠕墨铸铁的切削加工	110
6.2.2 奥贝体球铁的切削加工	110
6.3 蠕墨铸铁与奥-贝体球墨铸铁件加工实例	111
6.3.1 蠕墨铸铁汽缸盖的加工	111
6.3.2 ADI 曲轴车铣加工与磨削加工	112
6.3.3 发动机曲轴的机械加工实例	114
<hr/>	
第7章 高锰钢与中锰钢耐磨铸件的加工	117
<hr/>	
7.1 高锰钢的材料特性	117
7.1.1 Mn13 系列高锰钢耐磨材料	117
7.1.2 中锰钢	120
7.2 高锰钢的切削加工	120
7.2.1 高锰钢的切削加工特点	120
7.2.2 高锰钢的切削性能的改善	121
7.2.3 切削高锰钢的刀具材料的选择	121

7.2.4	高锰钢切削加工刀具几何参数的选择	122
7.2.5	切削高锰钢的切削用量选择	122
7.3	高锰钢零件加工实例	123
7.3.1	高锰钢铸件的车削加工	123
7.3.2	高锰钢的钻削	127

第8章 耐磨合金钢加工技术

8.1	耐磨合金钢的分类、牌号、化学成分及力学性能	130
8.1.1	耐磨合金钢的分类	130
8.1.2	耐磨低合金钢的特性	132
8.1.3	耐磨中合金超高强度钢	133
8.1.4	耐磨高合金超高强度钢	133
8.2	耐磨合金超高强度钢的切削加工特点	135
8.3	切削耐磨合金钢的有效途径	136
8.3.1	合理选择刀具材料	136
8.3.2	合理设计刀具结构与几何参数	138
8.3.3	合理选择切削用量	139
8.3.4	采用适宜的切削液和供给方式	139
8.3.5	提高工艺系统刚性	140
8.4	耐磨合金高强度、超高强度钢切削加工实例	140
8.4.1	耐磨合金高强度、超高强度钢的车削加工	140
8.4.2	耐磨合金高强度、超高强度钢的铣削加工	145
8.4.3	耐磨合金高强度、超高强度钢的钻削加工	146
8.4.4	耐磨合金高强度、超高强度钢的铰削加工	147
8.5	耐磨合金高强度、超高强度钢的磨削加工	149
8.5.1	高精度、低粗糙度磨削特点	149
8.5.2	耐磨合金钢磨削的砂轮选择	150
8.5.3	耐磨合金高强度、超高强度钢高精度低粗糙度磨削工艺参数选择	150
8.5.4	高速低粗糙度磨削	152
8.5.5	耐磨合金钢精密轧辊磨削加工实例	152

参考文献

第1章

耐磨铸件加工技术概述

国民经济各部门的装备在运行中，普遍存在摩擦和磨损。摩擦是能量的转换，磨损是材料的损耗。特别是金属磨损，已成为机械零件失效的主要原因，在失效的机械零件中，约有75%~80%属于金属磨损失效。供给机器的能量约有30%~50%，消耗于摩擦和磨损过程中。机械零件的磨损失效，耗费人力、物力、财力。金属磨损已成为制约国民经济发展的重要问题。我国金属磨损造成巨大损失，根据2008年初统计，每年消耗金属耐磨材料500万吨，其中因磨损造成球磨机磨球消耗达100多万吨；球磨机和各种破碎机衬板消耗近40万吨；轧钢机轧辊消耗近70万吨；各种工程挖掘机斗齿、破碎机锤头、履带机、磨辊等消耗超过60万吨；铁路道岔和车轮20多万吨，各类模具钢消耗近150万吨。美国因磨损造成的损失达数千亿美元。随着经济的发展，磨损造成的损失将更加巨大。因此，研究和发展新型耐磨材料和耐磨技术，减少金属磨损，对国民经济具有重要的意义。

1.1 耐磨金属材料及其发展

材料耐磨性是在一定工作条件下材料抵抗磨损的能力。随着生产的强化，材料

学和工艺学的不断发展，目前世界各国已研制出各种类的耐磨金属材料。耐磨金属材料都是在白口铸铁和普通碳钢的基础上发展起来的，充分利用合金元素在钢、铁中的作用，以求得到具有各种特性的材料来满足生产的需要。

1.1.1 耐磨铸铁材料

根据铸铁中高碳相的存在形态，工程上将耐磨铸铁分为耐磨白口铸铁和耐磨球墨铸铁两大类。

根据耐磨白口铸铁中主要合金元素的种类与添加量的多少可分为普通白口铸铁、镍硬铸铁、铬系白口铸铁。耐磨球墨铸铁主要是马氏体球墨铸铁、贝氏体球墨铸铁、中锰球墨铸铁。

(1) 低合金白口铸铁 低合金白口铸铁主要包含普通白口铸铁、锰白口铸铁、钨白口铸铁、硼白口铸铁、钒白口铸铁。低合金白口铸铁价格低廉，生产简便，应用于某些工况下，如面粉机轧辊，该轧辊硬度为 45~54HRC，冲击韧度为 40J/cm²。

(2) 镍硬铸铁 镍硬铸铁在国际上常称为 Ni-Hard。它是含镍、铬的白口铸铁。按含铬量（质量分数）可分为 $w(\text{Cr})=2\%$ 和 $w(\text{Cr})=9\%$ 两类。加入铬，使 Fe_3C 成为 $(\text{Fe},\text{Cr})_3\text{C}$ ，硬度可提高至 1100~1150HV；加入镍，有助于获得马氏体为主的金属基体，其硬度可高于 600HV。我国国家标准 GB/T 8263—1999 制定的耐磨白口铸铁件中包括了镍硬铸铁件。镍硬铸铁的主要牌号为 KmTBNi4Cr2-DT、KmTBNi4Cr2-GT、KmTBCr9Ni5（相当于 Ni-Hard4），DT、GT 分别为低碳与高碳，表示含碳量的高低。

(3) 铬系白口铸铁 铬系白口铸铁分为低铬铸铁、中铬铸铁、高铬铸铁。向铸铁中添加一定数量的铬形成碳化物。低铬铸铁的含铬量（质量分数）为 $w(\text{Cr})=1\%\sim 5\%$ ，中铬白口铸铁中含铬量（质量分数） $w(\text{Cr})=5\%\sim 10\%$ 。高铬铸铁是铬的质量分数 $w(\text{Cr})>12\%$ 的白口铸铁。它是使用最为广泛的耐磨铸铁之一。

(4) 耐磨球墨铸铁 耐磨球墨铸铁分为马氏体耐磨球墨铸铁、贝氏体耐磨球墨铸铁、中锰耐磨球墨铸铁。

球墨铸铁经 40~250℃ 低温回火得到马氏体+少量残余奥氏体，硬度可达 55~61HRC，有很好的耐磨性。球墨铸铁经 250~350℃ 等温淬火（等温时间为 45~90min），形成贝氏体组织及淬火马氏体和残余奥氏体组织。贝氏体球铁分为奥氏体+贝氏体为基体的奥氏球铁（ADI）与少量碳化物+贝氏体为基体的贝氏体球铁（BDI）。中锰球墨铸铁中有 $w(\text{Mn})=5\%\sim 9\%$ ，基体组织中有较多的奥氏体，其金属组织为马氏体+奥氏体+少量碳化物+球状石墨+少量索氏体。

(5) 耐磨铸铁的新发展 在球墨铸铁与灰口铸铁基础上开发了蠕墨铸铁，蠕墨

铸铁是一种新型铸铁材料。镍硬白口铸铁在强度、硬度和耐磨性方面均优于低合金白口铸铁。而奥-贝体球铁(ADI)为第四代耐磨白口铸铁,具有高强度、高延伸性、高冲击值等良好的综合力学性能。ADI的性能变化范围可调,主要用在耐磨、耐冲击、高强度、高韧性和耐疲劳的工况条件下,如用于曲轴等关键零件的制造。镍硬铸铁中的碳化物主要为连续片状的渗碳体,其脆性较大。近来研究通过热处理方法获得贝氏体+回火马氏体,以得到较高综合力学性能和耐磨料磨损能力。为了节约镍,国外开展了以锰、铜代镍的研究。但要得到相同的性能,镍只能被部分代替。

高铬白口铸铁由于铬元素的加入,使碳化物结构类型由网状 M_3C 变为孤立的 M_7C_3 型,碳化物硬度提高,由 M_3C 的840~1100HV,提高到1300~1500HV,不但提高了耐磨性,而且提高了韧性,其使用效果比镍硬铸铁更好。高铬铸铁应用十分广泛。

目前,对于高铬铸铁显微组织和性能的研究已取得了很大进展。研究发现,在高铬铸铁中加入一定量的钒,在铸态下可获得高硬度的马氏体组织,省去高铬铸铁的高温热处理工艺,对高铬铸铁添加适量的硼及合适的热处理工艺,可使高铬铸铁中的碳化物细化,使基体淬透性增加。硬度和韧性可同时提高,增加了材料的耐磨性。为提高高铬铸铁的韧性,采用微合金化、除气处理、热塑性变形、高温处理、悬浮铸造及过滤处理等手段,改变碳化物形态,使之变为断续状或颗粒状,以提高高铬铸铁的韧性,满足在较大冲击载荷下应用。

我国学者结合我国国情,开发了中锰白口铸铁、贝氏体球墨铸铁、硼系合金白口铸铁和钨系白口铸铁等。中锰白口铸铁的各项力学性能可与国外镍硬铸铁相比,用于生产磨料低应力冲刷的磨损件,如矿山砂浆泵泵体、分级机衬板等,均取得很好的经济效益;但用于制作冲击磨损件和高应力凿削磨损件,如球磨机衬板和磨球,无论在硬度还是冲击韧度上,都需要进一步提高。中锰白口铸铁经稀土变质处理可以使碳化物由连续网状分布变为断网状和逐渐成为孤立状分布,冲击韧度可以达到 $5\sim 12\text{J}/\text{cm}^2$ 。但硬度的提高则依赖于合金化和热处理,来消除组织中残留奥氏体及获得最大量的马氏体或贝氏体。

采用合理的成分设计以及特殊的变质处理工艺,则无须等温淬火处理即可获得马氏体-贝氏体球墨铸铁,其硬度适中(48~55HRC)、冲击韧度较高($a_k \geq 100\text{kJ}/\text{m}^2$),适用于制作球磨机磨球、衬板等多种耐磨部件,特别是在具有腐蚀介质的湿式磨损工况中其优越性更为显著。采用该材质生产的球磨机磨球(金属型铸造),其成本与普通低铬铸铁相当,但其耐磨性在铅锌矿中是低铬铸铁的2倍左右。

此外,钨合金白口铸铁具有硬度高、耐磨性好等特点,用于制作搅拌机叶片、渣浆泵泵体,使用寿命已达到高铬铸铁的水平。钨合金白口铸铁中,钨分布在基体和碳化物中,钨能改变碳化物的形态和分布。钨合金白口铸铁中的 $w(W) < 6\%$

时, 碳化物呈 M_3C 型, 呈连续网状分布; $w(W) \approx 20\%$ 时, 碳化物以 M_6C 型为主, 少量为 $M_{23}C_6$ 型及 M_7C_3 型, 其形貌呈紧密结构的孤立块状, 为奥氏体所包围; $w(W) = 13\% \sim 15\%$ 时, 碳化物以 M_6C 型为主, 有少量的 M_7C_3 型及 M_3C 型, 其形貌呈断网状或孤立状。低钨合金白口铸铁成本低, 但其共晶碳化物呈连续网状分布, 脆性大, 在承受冲击载荷的工况下安全性差, 用铈-钾-钠处理低钨合金白口铸铁, 其共晶碳化物的网状组织全部消失, 呈团块状。

1.1.2 耐磨铸钢及其新发展

(1) 耐磨锰钢 耐磨铸钢是应用广泛的耐磨材料, 高锰钢 (Mn13, 也称奥氏体锰钢) 自 1882 年发明以来, Mn13 主要成分并未发生太大变化。Mn13 的铸态组织为奥氏体+马氏体+碳化物, 水韧处理后成为单一奥氏体组织。水韧处理后, Mn13 具有高韧性, 高冷作硬化, 耐磨性良好。中锰钢是 $w(Mn) = 5\% \sim 9\%$, $w(C) = 1.05\% \sim 1.40\%$ 的耐磨中锰钢, 提高了锰钢的加工硬化能力。含锰量降低, 奥氏体稳定性下降, 这类钢在非强烈冲击工况下耐磨性高于 Mn13。

含钼中锰钢的抗拉强度, 屈服强度与标准 Mn13 相当。

(2) 耐磨合金钢 耐磨合金钢按化学成分元素含量的多少分为耐磨低合金钢, 合金元素质量分数不超过 5%; 耐磨中合金钢, 合金元素总质量分数为 5%~10%; 耐磨高合金钢, 合金元素总质量分数超过 10%, 耐磨合金钢的研究、开发、制造与应用获得很大发展, 耐磨合金钢种类和牌号众多。耐磨合金钢是一类用于磨损工况下的特殊性能钢, 其主要特征是在磨损条件下具有较高的强度、硬度、韧性和耐磨性。耐磨低合金结构钢调质后极限强度 $\sigma_b > 1200\text{MPa}$ 、 $\sigma_s > 1200\text{MPa}$ 的钢称为高强度钢, 把 $\sigma_b > 1500\text{MPa}$ 、 $\sigma_s > 1300\text{MPa}$ 的钢称为超高强度钢。

(3) 耐磨铸钢的新发展 目前大量生产的高锰钢化学成分, 质量分数为 $w(C) = 1.0\% \sim 1.4\%$, $w(Mn) = 10\% \sim 14\%$ 。高锰钢的耐磨性与含碳量有关, 含碳量越高, 耐磨性越好, 但 $w(C)$ 在 1.3% 以上, 则容易析出碳化物而使韧性下降。根据使用条件的不同, 在普通高锰钢基础上, 有目的地加入合金元素 Cr、Ni、V、W、Cu、B 等元素, 特别是加入 V、Ti、Cr、H 等元素, 可在奥氏体基体上弥散析出细小碳化物, 实现第二相强化, 大幅度提高高锰钢的加工硬化能力。

在标准高锰钢中加入极少量 (0.4%~0.7%, 质量分数) 合金元素可使高锰钢硬度和强度大幅度提高, 使韧性降低。加入稀土 (RE)、镁、钙等元素, 可净化晶界, 改善夹杂物的形态和分布, 实现晶界强化; 加入稀土、钛等元素, 可明显细化组织, 实现细晶强化。高锰钢铸件随晶粒细化, 其强度和韧性同时提高。

为使厚大铸件的中心部位全是奥氏体组织, 提高加工硬化能力, 发展了超高锰钢 Mn15、Mn17 (Mn18)、Mn20、Mn25, 这些超高锰钢的初始硬度提高 80~

150HBW, 加工硬化性能明显增强及具有好的耐磨性。针对铸件结构复杂, 易产生裂纹的特殊铸件, 研制出低碳高锰钢 75Mn13、50Cr2Mn14、60Cr5Mn12, 满足了生产需要。

近年来文献报道, 为减少高锰钢铸件在热处理过程中的变形与开裂, 节约能源消耗, 并且进一步提高耐磨性, 发展了高锰钢铸件的余热淬火工艺, 即当铸件在铸型中凝固冷却至 1050~1100℃时, 立即成型淬入水中。这一工艺可降低热处理费用, 缩短生产周期, 铸件耐磨性提高。

中锰钢是在 Mn13 基础上适当降低含锰量, 并且加入一定含量的铬降低奥氏体稳定性所获得的一种新型耐磨材料。国内研制的中锰钢有 13Mn7、10Mn7Cr2 等系列。中锰钢耐磨性有较大提高, 但冲击韧度有所降低, 加工硬化速率比高锰钢高得多。经研究表明, 在中锰钢中加入适量的钨 [$w(W)=1.5\%$] 水韧处理后, 中锰钢冲击韧度提高 40%, 抗拉强度提高 10%, 耐磨性提高 40%, 铸态中锰钢的耐磨性提高 40%。

耐磨合金钢的研制是为了克服高锰钢在高冲击下耐磨性不足, 结合工况条件而下开发了多种低合金耐磨钢。低合金耐磨钢是很有发展前途的一类耐磨材料。

近年来, 以硅为主要合金元素, 利用硅在等温转变过程中强烈抑制碳化物析出的特点而进行的等温淬火, 得到了由无碳化物贝氏体和被碳、硅稳定化了的过饱和奥氏体组成的奥-贝双相组织, 具有优异的综合力学性能, 即高的强度、硬度以及良好的冲击韧度, 是一种在耐磨领域极具研究和开发价值的新材料。同时, 高碳高硅铸钢是一种廉价的新型材料, 所需添加的合金元素仅为 1.5%~3.5% (质量分数) 的硅, 其他的合金元素很少或根本不需添加, 因而具有极高的性价比。

西北工业大学还开发了一种准贝氏体耐磨钢, 其特点是加入硅或铝等抑制碳化物形成元素, 使组织中没有碳化物, 同时, 加入较多的锰使贝氏体和珠光体转变区分开, 并且使贝氏体转变线位于珠光体转变线左边, 在空冷条件下获得了无碳化物和分布于铁素体条间 (准上贝氏体) 和条内 (准下贝氏体) 的残留奥氏体膜。由于准贝氏体组织中残留奥氏体膜的合理分布, 使其具有比其他贝氏体组织及回火马氏体组织更好的塑性和韧性, 而强度和硬度仍维持在较高的水平, 使材料表现出优异的耐磨性。

1.2 耐磨铸件生产

铸铁和铸钢是现代工业重要的铸造金属材料, 铸造生产是获得机械产品毛坯的主要方法之一, 是机械制造工业的重要基础。在许多机械中, 铸件重量占整机重量比例很高, 如内燃机铸件占 80%, 拖拉机占 65%~80%。汽车工业的心脏部分发

动机关键零件——缸体、缸盖、曲轴等八大件几乎全部由铸造而成，而耐磨铸铁铸钢件在铸件中占有相当的比例，耐磨铸件用量不断增加，对耐磨铸件的技术要求在不断提高，过去许多耐磨铸件是由铸态经水韧处理后，不经切削加工直接用于机械设备上。现在很多耐磨铸件需要经过粗加工、半精加工直至精密加工，如曲轴的生产。耐磨铸铁铸钢件的结构复杂性在增加，铸件的强度、硬度、韧性及耐磨性要求在提高，切削加工的难度在增加。因此，对耐磨铸件毛坯提出了更高的要求。传统的单一材料的砂型铸造、金属模铸造、离心铸造生产的铸件毛坯，已不适应极恶劣的工矿下服役，这些铸件既要求高的耐磨性，又要求高的强韧性。所以在耐磨铸件生产中发展复合制造技术、悬浮铸造、铸件颗粒强化技术、耐磨铸件过滤处理与变质处理等新工艺技术。

1.2.1 耐磨铸件复合铸造

在冶金、矿山、建材和机械行业中，有许多机器零部件是在极恶劣的工况下服役的，既要求有高的耐磨性，又要求有高的强韧性，若采用单一材料难以同时满足高的耐磨性与高的强韧性，采用复合铸造技术生产双金属耐磨材料，使铸件能同时拥有高的耐磨性和强韧性，可大幅度提高机器零部件的使用寿命。双金属耐磨件常用的铸造方法有双液双金属法、离心铸造法、CPC法（continuous pouring process for clodding, CPC, 连续浇注外层成形法）、电渣熔铸法、镶铸法等。CPC法主要用于制造复合轧辊。离心铸造法用于制造复合轧辊、双金属复合辊套和管道。电渣熔铸法可制造复合轧辊、破碎机锤头、颚板、球磨机衬板、轧钢机导卫板等。

(1) 双液双金属复合铸造法（液-液复合法） 它是将两种液态金属通过各自的浇注系统，先后浇入铸型中，获得具有两种材料特性的双金属复合铸件，可生产高铬铸铁-铸钢双金属球磨机衬板、破碎机颚板等，获得满意效果。如用质量分数为 $w(\text{C})=2.4\% \sim 2.8\%$ ， $w(\text{Si}) < 1\%$ ， $w(\text{Mn})=2.4\% \sim 2.8\%$ ， $w(\text{Cr})=13\% \sim 15\%$ ， $w(\text{Mo})=1.5\% \sim 2.0\%$ ， $w(\text{Cu}) < 1\%$ 的 Cu 的高铬铸铁与中碳钢复合浇注风扇式磨煤机冲击板、护甲等。与高锰钢铸件一起在相同工况下运行，高锰钢耐磨铸件仅运行 550h 就严重磨损，而双金属复合高铬铸件运行 1500h 仅有轻微磨损。

(2) 耐磨铸件镶铸复合铸造法 该法是将耐磨合金块固定在铸型中，并且使耐磨合金块位于铸件易磨损部位，利用基体金属液的热量，在铸件凝固时使耐磨合金块与基体金属结合在一起的工艺方法。可实现高铬铸铁-碳钢镶铸耐磨铸件、硬质合金-铸钢（铁）镶铸耐磨铸件、镶硬质合金-高锰钢耐磨锤头。

(3) 离心复合铸造耐磨铸件 离心铸造是将液体金属浇入旋转的铸模中，在离心力作用下，完成充填和凝固成形的一种铸造方法。用离心铸造方法，生产复合铸

造双金属轧辊。轧辊尺寸为 $\phi 730\text{mm} \times 5500\text{mm}$ ，轧辊辊面选择耐磨性、耐热性及韧性好的高镍铬耐磨白口铸铁，主要成分（质量分数）为 $w(\text{C}) = 3.20\% \sim 3.45\%$ ， $w(\text{Ni}) = 4.30\% \sim 4.50\%$ ， $w(\text{Cr}) = 1.80\% \sim 2.00\%$ ， $w(\text{Si}) = 0.65\% \sim 0.80\%$ ， $w(\text{Mn}) = 0.60\% \sim 0.90\%$ ， $w(\text{Mo}) = 0.30\% \sim 0.60\%$ ；辊心选择强度和韧性好的球墨铸铁，而且采用亚共晶碳当量，球墨铸铁的主要成分（质量分数）为 $w(\text{Si}) = 1.90\% \sim 2.30\%$ ， $w(\text{Mn}) < 0.30\%$ ， $w(\text{Ni}) = 0.80\% \sim 1.00\%$ ， $w(\text{Cr}) = 0.30\% \sim 0.40\%$ ， $w(\text{Mo}) = 0.20\% \sim 0.40\%$ ， $w(\text{Re}) = 0.01\% \sim 0.03\%$ ， $w(\text{Mg}) = 0.04\% \sim 0.06\%$ ， $w(\text{Sh}) < 0.02\%$ 。

还有用离心复合铸造三层金属轧辊，外层用高铬铸铁，中间用中铬铸铁，心部用球墨铸铁。

应用离心复合铸造技术还可生产石油钻井泵缸套，外套用碳钢，内套用高铬铸铁，高铬铸铁内套经退火、粗加工、淬火回火热处理后精加工至规定尺寸。双金属缸套尺寸外径 $\phi 206\text{mm}$ ，内径 $\phi 116\text{mm}$ ，长 380mm 。缸套外层浇注 ZG270-500，内层浇注 17CrMoCu 高铬铸铁。

(4) 电渣熔铸耐磨复合铸件 电渣熔铸是电流通过液态熔渣产生的电阻热将金属电极熔化，熔化的金属汇聚成滴，穿过渣层进入金属熔池，在水冷结晶器内凝固成铸件的工艺方法。在耐磨复合轧辊的生产中得到应用。电渣熔铸复合轧辊外层耐磨金属层厚度均匀，外层金属与辊心金属为冶金结合，结合部位无偏析和裂纹，结合层有高的强度，外层耐磨金属层组织细小、致密，纯净度高，轧辊抗剥落性能得到改善，延长了使用寿命。

1.2.2 耐磨铸件变质处理

变质处理是向合金熔液中添加某些微量元素达到控制、凝固组织形态与分布的目的，改善铸件性能的工艺技术手段。经变质处理耐磨铸件的凝固组织细化，可提高耐磨铸件的强度、硬度和韧性，改善了耐磨性及延长了使用寿命。

(1) 锰钢的变质处理 用稀土对高锰钢进行变质处理，可在钢水包中加入稀土进行变质处理，稀土能脱气、除硫、排渣，净化钢液，改善铸造性能，细化晶粒，降低裂纹倾向，增强了耐磨性，改善了铸钢件的力学性能，延长了铸件使用寿命。如用稀土高锰钢制造的煤块冲击锤，在同等工况下，使用寿命由原高锰钢冲击锤的 $80 \sim 100\text{h}$ ，提高到 $150 \sim 200\text{h}$ 。

(2) 低合金耐磨铸铁变质处理 在普通白口铸铁中加入质量分数为 $0.70\% \sim 1.20\%$ 的混合稀土或质量分数为 $1.50\% \sim 2.50\%$ 的包头 1 号稀土硅铁，可使铸态冲击韧度提高 $30\% \sim 80\%$ 。

用质量分数为 $w(\text{Si}) = 30\%$ ， $w(\text{K}) = 0.10\%$ ， $w(\text{Na}) = 0.10\%$ ，对质量分数

$w(\text{C})=2.80\% \sim 3.50\%$, $w(\text{W}) < 3.50\%$, $w(\text{Cr}) < 2.00\%$, $w(\text{Mo})=0.20\% \sim 0.50\%$, $w(\text{Ni})=0.20\% \sim 0.80\%$, $w(\text{Mn})=0.50\% \sim 1.00\%$, $w(\text{Si})=0.30\% \sim 1.20\%$ 的钨白口铸铁进行复合变质处理。未变质铸铁的铸态碳化物粗大,呈网状分布;加入Ce(铈)、K、Na后,铸态碳化物网状分布基本消失,孤立化程度明显改善,碳化物明显细化,导致白口铸铁脆性显著降低,冲击韧度提高72.2%,耐磨性提高49.9%。变质低合金白口铸铁辊环用于高速线材轧机预精轧机架,使用安全可靠,生产成本降低。

(3) 高铬白口铸铁变质处理 Cr15Mo3高铬铸铁中含价格昂贵的Mo较多,以锰代钼开发了含13%的Cr及4%的Mn的高Cr-Mn白口铸铁,并且加入质量分数为0.12%~0.3%的硼进行变质处理,或用硼和稀土对高铬铸铁进行复合变质处理,其变质效果最佳,经硼和稀土复合处理的高铬-锰白口铸铁可以替代Cr15Mo3。

(4) 镍硬白口铸铁变质处理 为降低镍硬白口铸铁的脆性,用钛-稀土-铋复合变质处理,对质量分数为 $w(\text{C})=2.19\%$, $w(\text{Cr})=2.9\%$, $w(\text{Ni})=5.11\%$, $w(\text{Mo})=0.95\%$, $w(\text{Mn})=2.14\%$, $w(\text{Si})=0.83\%$ 的镍硬白口铸铁进行变质处理,显微组织呈现碳化物的连续性减弱,变成块状和杆状分布,断裂韧度提高,耐磨性随变质剂加入量增加(但不超过1.5%)而大幅度提高。

1.2.3 耐磨铸件热处理

热处理是改善铸件组织和性能的重要手段。对于多数耐磨铸件来说是为了获得高硬度的马氏体或贝氏体组织,改善铸件耐磨性能。而常用的铸件热处理工艺是去应力退火处理和改善铸件加工性能的软化退火处理。

(1) 白口铸铁等温淬火 白口铸铁基体为珠光体,其硬度和韧性均较低。经等温淬火处理后可获得较优异的贝氏体组织,对质量分数为 $w(\text{C})=2.26\%$, $w(\text{Si})=0.42\%$, $w(\text{Mn})=0.48\%$ 的亚共晶白口铸铁(奥氏体组织)进行等温淬火。当等温温度为300℃时,获得下贝氏体组织,使白口铸铁的硬度和韧性得到很好的配合,磨损量降到最低限度。当等温温度低于300℃时,特别是在200℃以下获得马氏体组织,其硬度逐步提高,相应地韧性降低,使内应力不断增大,导致疲劳脆裂作用逐步占据优势,使耐磨性随等温温度的降低而下降。当等温温度在300℃以上时,组织弥散度随温度升高而逐步减少,硬度也随之下降。当等温温度超过350℃时,易获得上贝氏体组织,而且未转变的残留奥氏体量随温度的升高而增加,最终获得的是奥贝组织,其抗弯强度达2000MPa,冲击韧度大于20J/cm²,是一种高强度与塑韧性相结合的优异耐磨材料。

(2) 高铬铸铁等温淬火 采用等温淬火工艺,可改善高铬铸铁基体组织,提高