

耐磨铸件制造技术



符寒光 邢建东 编著

TOOL



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



耐磨铸件制造技术

符寒光 邢建东 编著



机械工业出版社

本书系统地介绍了改善耐磨铸件质量的先进制造技术。内容包括磨损与耐磨材料、耐磨铸件复合制造技术、耐磨铸件颗粒强化技术、耐磨铸件的悬浮铸造、耐磨铸件过滤处理、耐磨铸件变质处理、耐磨铸件热处理、典型耐磨铸件制造工艺。本书内容全面,先进性、实用性强,可为我国耐磨铸件的生产、开发及工程应用提供参考和指导。

本书主要供铸造行业的工程技术人员使用,也可供从事摩擦磨损和耐磨材料工作的科技工作人员、机械和材料专业的在校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

耐磨铸件制造技术/符寒光,邢建东编著. —北京:机械工业出版社, 2009. 5

ISBN 978 - 7 - 111 - 26923 - 6

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 065047 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:陈保华 责任编辑:庞 晔

版式设计:张世琴 责任校对:程俊巧

封面设计:赵颖喆 责任印制:乔 宇

北京京丰印刷厂印刷

2009 年 6 月第 1 版 · 第 1 次印刷

169mm × 239mm · 17.25 印张 · 334 千字

0 001—3 000 册

标准书号:ISBN 978 - 7 - 111 - 26923 - 6

定价:37.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

销售服务热线电话:(010) 68326294

购书热线电话:(010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010) 68351729

封面无防伪标均为盗版

前 言

磨损普遍存在于冶金、矿山、电力、机械、建材、国防、军工和航空航天等许多工业部门,造成了材料的极大浪费和能源的巨大消耗。据不完全统计,目前国内每年消耗金属耐磨材料高达 500 万 t 以上,其中每年因磨损造成球磨机的磨球消耗达 100 多万 t,球磨机和各种破碎机衬板消耗近 40 万 t,轧辊消耗近 70 万 t,各种工程挖掘机和装载机斗齿、耐磨输送管道、破碎机锤头、颚板、履带板和磨辊等消耗超过 60 万 t,铁路道岔和车轮 20 多万 t,各种模具钢消耗近 150 万 t。

研究和开发新型耐磨材料及其制备技术,已受到国内外材料科技工作者的高度重视。作者长期从事耐磨材料的教学和科研工作,在国家自然科学基金、国家高技术研究发展计划、北京市教育委员会人才强教项目和中国博士后科学基金及国内众多企业横向合作项目的支持下,对耐磨铸件的制造技术进行了深入研究,已成功开发了高速钢轧辊、高强度高铬铸铁衬板、破碎机锤头、振动筛筛板、挖掘机斗齿、耐磨复合导卫板、烧结机炉箅条及低破碎率铸铁磨球等系列耐磨铸件,并将其成功应用于宝山钢铁股份有限公司、武汉钢铁股份有限公司和重庆钢铁股份有限公司等企业。这一系列耐磨铸件的应用促进了设备作业率的提高和产品生产成本的下降,已取得了显著的经济和社会效益。相关成果已授权发明专利有 15 项,在国内外发表的论文有 40 多篇。

在此基础上,作者总结前期的研究成果,撰写了本书。全书共八章,首先简述了材料磨损失效机理与耐磨材料研究进展,然后详细介绍了耐磨铸件复合铸造、颗粒强化、悬浮铸造、过滤处理、变质处理和热处理技术,最后有针对性地対典型耐磨铸件的制造工艺进行了说明。

作者衷心感谢北京工业大学材料学院雷永平教授的热情支持和无私奉献。本书的顺利完成,还得到了西安交通大学铸造及耐磨材料研究所高义民教授、鲍崇高副教授、孙莉秋老师、李秀兵博士、皇志富博士、智小慧博士、成小乐博士、吴晓俊硕士、北京工业大学材料加工技术研究所史耀武教授、李晓延教授、郭福教授、夏志东教授、杨晓军副教授、吴中伟博士、林健博士、李辉博士、清华大学机械工程系陈祥博士和宁波浙东精密铸造有限公司胡开华先生的大力支持,在此深表感谢!书中参考了许多耐磨铸件制造技术方面的文献,在此向这些文献的作者表示真挚的谢意!

限于作者的经验和水平，书中定有不少疏漏与不当之处，诚望各位前辈及广大读者提出批评指正。

作 者
2009 年 4 月

目 录

前言

第 1 章 磨损与耐磨材料	1
1.1 磨损及其分类	1
1.2 材料磨损失效机理	3
1.2.1 磨料磨损机理	4
1.2.2 粘着磨损机理	6
1.2.3 腐蚀磨损机理	7
1.2.4 冲蚀磨损机理	8
1.2.5 接触疲劳磨损机理	9
1.2.6 微动磨损机理	10
1.3 研究磨损的意义	11
1.4 耐磨铸钢研究进展	13
1.4.1 耐磨锰钢研究进展	13
1.4.2 低合金耐磨钢研究进展	18
1.5 耐磨铸铁研究进展	19
1.5.1 镍硬铸铁研究进展	19
1.5.2 高铬铸铁研究进展	20
1.5.3 其他耐磨铸铁研究进展	21
1.6 其他耐磨材料研究进展	23
参考文献	25
第 2 章 耐磨铸件复合制造技术	28
2.1 双金属复合铸造概述	28
2.2 耐磨铸件双液双金属复合制造	29
2.2.1 耐磨铸件双液无隔板水平浇注技术	29
2.2.2 耐磨铸件中间隔板-平做立浇技术	32
2.2.3 耐磨铸件双液浇注-变换铸型技术	35
2.3 耐磨铸件镶铸复合制造	36
2.3.1 高铬铸铁-碳钢镶铸复合技术	37
2.3.2 硬质合金-铸钢(铁)镶铸复合技术	38
2.3.3 耐磨铸铁钢筋强化技术	40
2.4 耐磨铸件离心复合铸造	42

2.4.1 离心复合铸造的特点	42
2.4.2 离心复合铸造轧辊技术	43
2.4.3 离心复合铸造其他耐磨铸件	46
2.5 耐磨复合铸件电渣熔铸	47
2.5.1 电渣熔铸技术简介	47
2.5.2 电渣熔铸复合轧辊	48
2.5.3 电渣熔铸其他耐磨复合铸件	49
2.6 耐磨复合轧辊 CPC 成形	51
参考文献	53
第3章 耐磨铸件颗粒强化技术	56
3.1 耐磨铸件颗粒强化技术简介	56
3.2 耐磨铸件外加陶瓷颗粒强化技术	59
3.2.1 机械搅拌法外加陶瓷颗粒	59
3.2.2 渗透铸造法外加陶瓷颗粒	61
3.2.3 离心铸造法外加陶瓷颗粒	64
3.2.4 其他铸造法外加陶瓷颗粒	66
3.3 耐磨铸件反应铸造法原位合成颗粒强化技术	70
3.3.1 反应铸造法原位合成原理	70
3.3.2 反应铸造法原位合成颗粒强化耐磨铸钢	72
3.3.3 反应铸造法原位合成颗粒强化耐磨铸铁	75
3.3.4 反应铸造法原位合成颗粒强化有色合金	77
3.4 耐磨铸件 SHS 颗粒强化技术	78
3.4.1 SHS 颗粒强化原理	78
3.4.2 SHS 颗粒强化耐磨钢铁铸件	79
3.4.3 SHS 颗粒强化有色合金	81
参考文献	82
第4章 耐磨铸件的悬浮铸造	85
4.1 悬浮铸造原理	85
4.1.1 悬浮铸造特征	85
4.1.2 悬浮剂分类与组成	87
4.1.3 悬浮铸造方法的发展	89
4.2 悬浮铸造耐磨铸件的组织和性能	89
4.2.1 悬浮铸造耐磨铸钢的组织和性能	89
4.2.2 悬浮铸造耐磨铸铁的组织和性能	91
4.2.3 悬浮铸造有色铸件的组织和性能	102
4.3 固液混合铸造	108
4.3.1 固液混合铸造与相关铸造工艺的比较	108

4.3.2 固液混合铸造原理	110
4.3.3 固液混合铸造对铸件组织和性能的影响	111
4.4 悬浮铸造耐磨铸件的制备与应用	115
4.4.1 悬浮铸造大型轧辊	115
4.4.2 悬浮铸造耐磨铸件	117
参考文献	121
第5章 耐磨铸件过滤处理	125
5.1 过滤技术发展概况	125
5.2 金属熔液过滤净化机理	129
5.2.1 普通过滤净化机理	129
5.2.2 整流效应	130
5.2.3 真空吸附机理	132
5.3 耐磨铸钢过滤处理	134
5.3.1 高锰钢过滤处理	134
5.3.2 高速钢过滤处理	135
5.3.3 铸钢和不锈钢过滤处理	136
5.4 耐磨铸铁过滤处理	142
5.4.1 铸铁过滤处理	142
5.4.2 合金铸铁过滤处理	145
5.4.3 高铬耐磨铸铁算条过滤处理	146
5.5 耐磨有色铸件过滤处理	149
5.5.1 铝合金铸件过滤处理	149
5.5.2 铜合金铸件过滤处理	151
5.5.3 锌合金铸件过滤处理	152
参考文献	153
第6章 耐磨铸件变质处理	158
6.1 变质处理技术特点	158
6.2 耐磨铸钢变质处理	161
6.2.1 锰钢变质处理	161
6.2.2 铸造高速钢变质处理	164
6.2.3 其他耐磨铸钢变质处理	169
6.3 耐磨铸铁变质处理	174
6.3.1 低合金耐磨铸铁变质处理	174
6.3.2 高铬白口铸铁变质处理	176
6.3.3 其他合金白口铸铁变质处理	184
6.4 耐磨有色铸件变质处理	187
6.4.1 铝硅合金变质处理	187

6.4.2 锌铝合金变质处理	192
参考文献	193
第7章 耐磨铸件热处理	199
7.1 耐磨铸件等温淬火	199
7.1.1 白口铸铁等温淬火	199
7.1.2 高铬铸铁等温淬火	202
7.1.3 球墨铸铁等温淬火	203
7.1.4 耐磨铸钢等温淬火	207
7.2 耐磨铸件亚临界热处理	215
7.3 耐磨铸件深冷处理	220
7.3.1 高铬铸铁深冷处理	220
7.3.2 高速钢深冷处理	223
7.3.3 其他铸件深冷处理	225
7.4 耐磨铸件其他热处理工艺	227
7.4.1 耐磨铸件喷雾淬火	227
7.4.2 耐磨铸件淬火液处理	232
7.4.3 耐磨铸件淬火预处理	234
参考文献	236
第8章 典型耐磨铸件制造工艺	241
8.1 钢筋网强化高铬铸铁衬板制造工艺	241
8.1.1 高铬铸铁衬板特点和钢筋网强化技术	241
8.1.2 加钢筋网高铬铸铁衬板的制造	242
8.1.3 加钢筋网高铬铸铁衬板裂纹的形成与控制	244
8.1.4 加钢筋网高铬铸铁衬板的性能和应用	245
8.2 离心铸造高速钢复合轧辊工艺	245
8.2.1 离心铸造高速钢轧辊特点	245
8.2.2 离心铸造高速钢复合轧辊的制造	246
8.2.3 提高离心铸造高速钢复合轧辊质量的措施	248
8.3 硬质合金复合轧钢导卫板制造工艺	250
8.3.1 硬质合金制作导卫板的可行性分析	250
8.3.2 硬质合金复合导卫板的制造	251
8.3.3 复合铸造导卫板的性能检测和应用	252
8.4 变质高铬合金筛板制造工艺	254
8.4.1 筛板化学成分设计	254
8.4.2 变质高铬合金筛板的制造	257
8.4.3 变质高铬合金筛板的性能和应用	258
8.5 离心 SHS 陶瓷内衬复合钢管制造工艺	259

8.5.1 离心 SHS 陶瓷内衬复合钢管原理	259
8.5.2 离心 SHS 陶瓷内衬复合钢管的制造	260
8.5.3 离心 SHS 陶瓷内衬复合钢管的应用现状及展望	264
参考文献	265

第1章 磨损与耐磨材料

摩擦和磨损是自然界中最普遍的现象,是两个不同的概念,但二者既有不可分割的联系,又有本质的区别。它们还是自然界存在的不可逆过程,摩擦是能量的转换,磨损则是材料的损耗。特别是金属磨损,已成为机械零件失效的主要原因之一。统计资料表明,在失效的机械零件中,大约有75%~80%属于金属磨损。供给机器的能量大约有30%~50%消耗于摩擦和磨损过程中。机械零件的磨损失效,不但需要耗费人力、物力和财力去更换配件,也造成了机器设备作业率降低。金属磨损已成为制约国民经济发展的重大问题。

1.1 磨损及其分类

磨损是一种复杂的现象,到目前为止,尚未有一条简明的定律及确切统一的磨损定义。英国机械工程师协会所下的定义是:由于机械作用而造成的物体表面材料的逐渐消耗。美国材料试验学会(ASTM)的标准关于磨损的定义是:由于一物体的表面与相接触的物质间的相对运动造成物体表面的损伤,还常伴有材料的逐渐损失。而欧洲经济合作和发展组织(OECD)的工程材料磨损研究小组编写的《摩擦学术语及定义汇编》一书给磨损下的定义为:由于表面相对运动而使物体工作表面上逐渐损失物质。前苏联的克拉盖尔斯基^[1]所下的定义为:由于摩擦结合力的反复扰动而造成的材料破坏。邵荷生^[2]则认为,磨损是由于机械、间或伴有化学或电的作用,导致物体工作表面材料在相对运动中不断损耗的现象。

由上述有关磨损的定义,我们可以看到材料磨损的三要素是^[3]:材料的表面特性,与另一物质(包括固体、液体和气体)的接触特性(包括接触方式、力的传递、表面变形、相互作用等)以及相对运动。磨损是物体或零件相互接触并相对运动的系统中的一种现象,它普遍地存在于生产和生活之中。它消耗机器运转的能量,使零部件使用寿命缩短,造成材料的消耗和能源的浪费。

磨损过程是复杂的,要了解磨损现象,研究磨损机制和磨损规律,必须对磨损进行分类。根据不同的磨损条件,可有不同的分类方法,常见的分类方法见图1-1。随着磨损研究的发展,磨损分类也在不断变化。在磨料磨损分类中,张清^[4]还补充了按干、湿状态分为干磨料磨损和湿磨料磨损,以及按工作环境分为普通磨料磨损、腐蚀磨料磨损和热磨料磨损。腐蚀磨损则分为氧化腐蚀磨损、特殊介质(如硫化)腐蚀磨损、微动腐蚀磨损和气蚀腐蚀磨损。而冲蚀磨损则

分为固体粒子冲蚀磨损、浆体冲蚀磨损和液滴冲蚀磨损等。由于磨料磨损所造成的经济损失占磨损的 50% 以上, 因此, 国内外对磨料磨损的研究给予了很多的关注和重视, 表 1-1 给出了磨料磨损的分类以及典型实例。

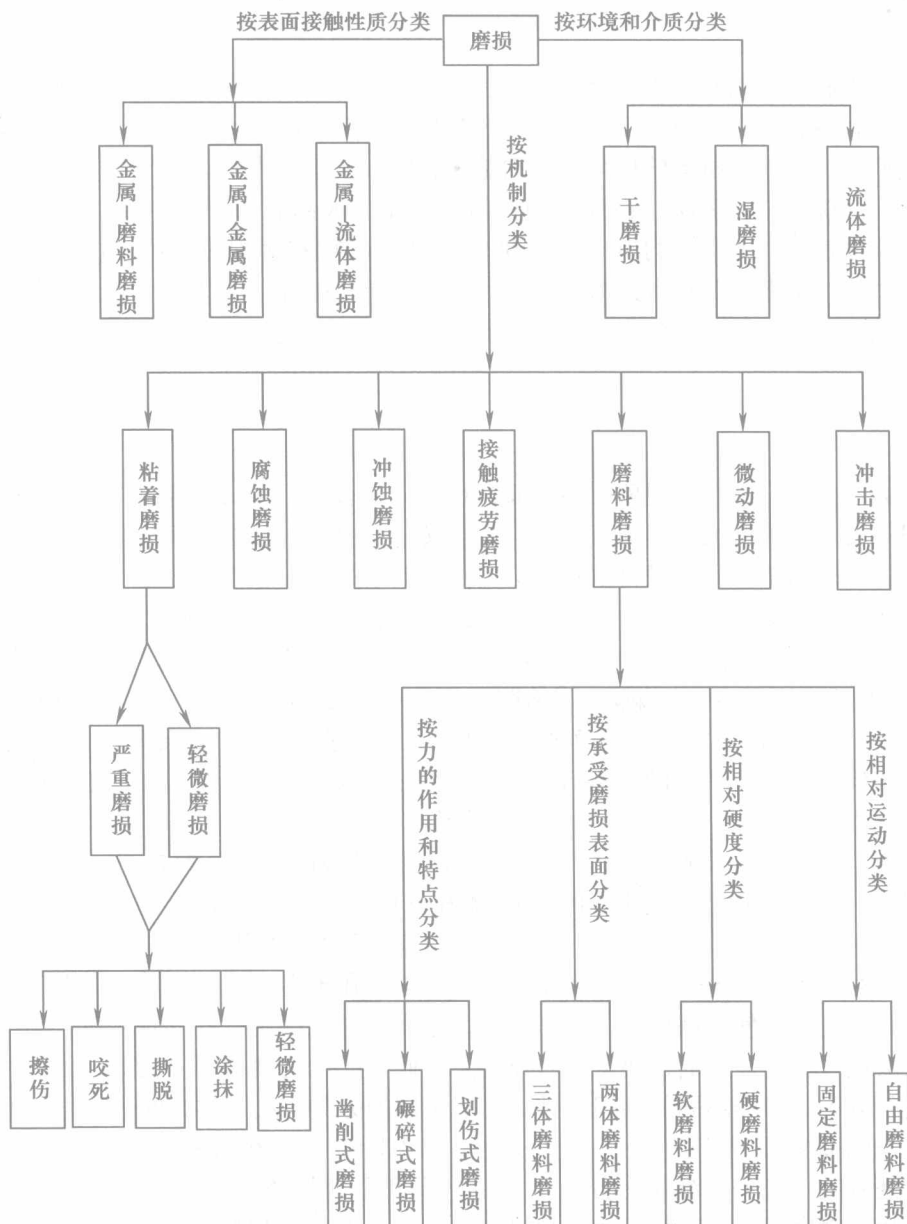


图 1-1 磨损分类^[6,7]

表 1-1 磨料磨损分类与典型实例^[4, 5]

类 别	类 型	说 明	实 例
以磨料固定状态分类	自由磨料磨损	磨料自由松散并与零件表面接触, 磨料可以在表面滑动或滚动, 磨料之间也有相对运动	犁铧、刮板输送机溜槽、对辊破碎机磨辊等
	固定磨料磨损	磨料固定并和零件表面作相对滑动, 磨料可以是小颗粒的(如砂纸), 也可以是很大的整体(如岩石、矿物等)	采煤机截齿、风镐、挖掘机斗齿等
以磨损接触物体表面分类	两体磨料磨损	磨料与一个零件表面接触, 磨料为一物体, 零件表面为另一物体	犁铧、水轮机叶片
	三体磨料磨损	磨料介于两零件表面之间, 磨料为一物体, 两零件为两物体, 磨料可以在两表面间滑动, 也可以滚动	滑动轴承间、活塞与气缸间落入磨料、齿轮、矿车轮等
以力的作用特点分类	低应力划伤式磨料磨损	磨料作用于表面的应力不超过磨料的压碎强度, 材料表面仅为轻微划伤	刮板输送机溜槽、犁铧
	高应力碾碎式磨料磨损	磨料与零件表面接触处的最大压应力大于磨料的压碎强度	破碎机滚筒、球磨机磨球与衬板等
	凿削式磨料磨损	磨料对材料表面有高应力冲击式的运动, 从材料表面上凿下较大颗粒的磨屑	破碎机颚板、锤头、破碎壁、轧臼壁
以相对硬度分类	硬磨料磨损	磨料硬度大于材料表面的硬度, 磨损量较大	各种刚玉、碳化硅料的破碎
	软磨料磨损	磨料硬度低于材料表面的硬度, 磨损量急剧下降	纯煤的研磨
以磨料干湿状态分类	干磨料磨损	磨料是干的	球磨机磨煤粉、水泥等干料
	湿磨料磨损	磨料中含有水分, 有加速磨损作用	球磨机磨矿浆
以工作环境分类	一般磨料磨损	一般正常条件下的磨料磨损	
	腐蚀磨料磨损	在腐蚀介质中的磨料磨损, 腐蚀加速了磨料磨损的速度	各种渣浆泵、电镀锌导电辊等
	热磨料磨损	在高温下的磨料磨损, 高温和氧化加速了磨料磨损	热轧辊、导卫板、燃烧炉中的炉箅等

1.2 材料磨损失效机理

关于材料磨损失效机理, 至今还不是很清楚, 这主要是由于影响磨损因素复杂所致。各种类型的磨损产生于不同的工况, 各有其失效特征。在工业实践中, 磨料磨损造成的材料损耗是最高的, 约 50% 以上的磨损失效归因于磨料磨损, 因而磨料磨损成为人们研究的热点。粘着磨损大多数发生于经过机械加工的零件; 腐蚀磨损和冲蚀磨损则大多发生于接触腐蚀介质的零件或流体动力机械零件; 而疲劳磨损是因周期性的接触载荷或交变应力而产生裂纹, 裂纹扩展后使表层材料变成细片状剥落所致; 微动磨损则是在相互压紧的表面之间, 因小幅度的

相对切向振动所致。上述磨损的失效机制及防护措施也日益受到人们的重视。下面对各种磨损的失效机理进行分别讨论。

1.2.1 磨料磨损机理

磨料磨损一般是指硬的磨粒或凸出物在与摩擦表面相互接触运动的过程中,使表面材料发生损耗的现象。磨料磨损机理就是研究磨料颗粒与材料表面相互作用过程的物理化学变化规律。目前关于磨料磨损的机理主要有微观切削、多次塑变、微观断裂和疲劳破坏等。

1. 微观切削磨损机理

磨粒在材料表面的作用力分为法向力和切向力两个分力。法向力使磨粒压入表面,切向力使磨粒向前推进。当磨粒形状与运动方向适当时,磨粒如同刀具一样,在表面进行切削而形成切屑。但这种切屑的宽度和深度都很小,因此切削也很小,故称微观切削。图 1-2 是典型的显微切削模型,图 1-3 是磨粒切削材料形成切屑过程。微观切削磨损是经常见到的一种磨损,特别是在固定磨料磨损和凿削式磨损中,它是材料表面磨损的主要机理。实际磨损过程中,切削比例并不大,其原因是:①磨粒形状较圆钝;②在犁沟的过程中磨粒的棱角(而不是棱边)对着运动方向;③磨粒与被磨材料表面之间的夹角太小;④表面材料塑性很高。磨粒在表面滑过后,往往只能犁出一条沟来,而把材料推向两边或前面,不能切出切屑。特别是松散的磨料,大致有 90% 磨粒发生滚动接触,只能压出印痕,而形成犁沟的概率只有 10%,这样切削的可能性就更小了。

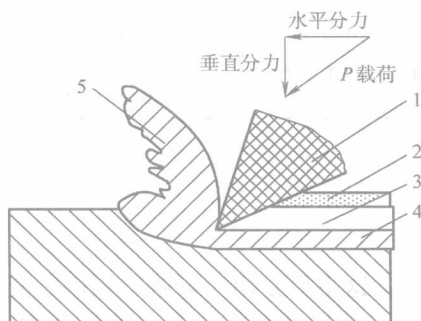


图 1-2 显微切削模型

1—磨粒 2—变形区 I 3—切槽
4—变形区 II 5—切屑

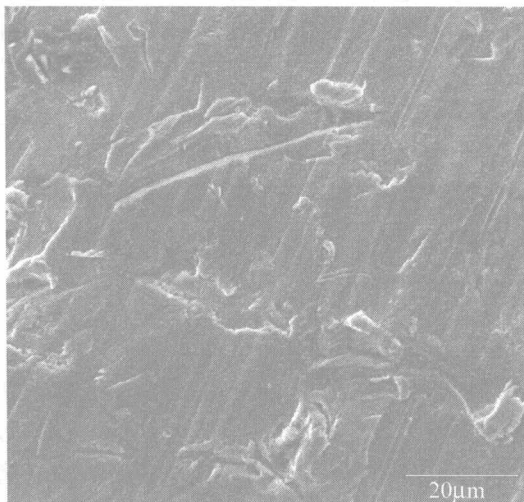


图 1-3 磨粒切削材料形成切屑过程

2. 多次塑变磨损机理

在磨料磨损过程中,当磨粒滑过表面时,除了切削外,如果磨粒棱角不够锐利,或是刺入表面角度不适合切削,那么大部分情况下是把材料推向两旁或前缘,被磨材料的塑性变形很大,却没有脱离母体,而且在沟底及沟槽附近的材料也有较大的变形。若犁沟时全部沟槽中的体积被推向两旁和前缘而不产生切屑,则称为犁皱。图1-4是磨粒推挤材料的模型,磨粒具有负前角,不能切削材料,只能推挤材料或犁沟材料而变形。图1-5是磨粒将材料犁向沟槽一侧的扫描电镜照片,与犁铧犁地时将土翻向一边的作用相似。犁沟或犁皱后堆积在两旁和前缘的材料以及沟槽中的材料,在受到随后的磨粒作用时,可能将已堆积的材料重新压平,也可能使已变形的沟底材料遭到再一次的犁皱变形,如此反复塑变,导致材料产生加工硬化或其他强化作用,最终剥落而成为磨屑。

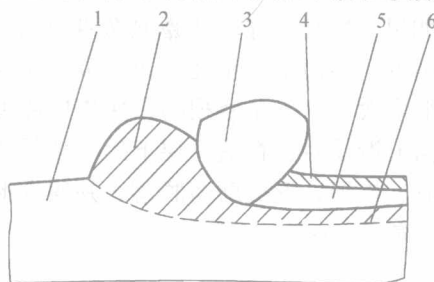


图1-4 磨粒推挤材料的模型

1—被磨材料 2—推挤变形区 3—磨粒
4—变形脊 5—犁沟 6—变形层

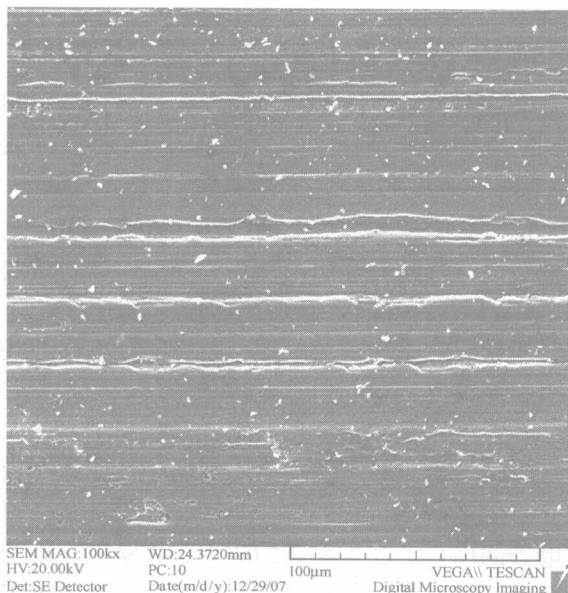


图1-5 磨粒犁沟材料并将其推向沟槽一侧

3. 疲劳磨损机理

疲劳磨损是因表层微观组织受周期载荷作用而产生的,这种机理是由克拉盖尔斯基首先提出的^[1]。其特征是材料在强化过程发展的同时,强化过程的速度主要取决于周围的介质及其对强化的作用。标准的疲劳过程常有发展的潜伏期,在此期间内表面不出现任何破坏层,材料外部发生硬化而不会发生亚微观破坏。当进一步发展时,在合金表层出现硬化的滑移塑变层和裂纹。近年来发现材料在超过弹性极限的周期性重复应力作用下有破坏的现象,并称为低周疲劳,因而扩大了疲劳的含义。

Suh 和他的合作者提出的磨损剥层理论^[8-10],应该属于疲劳磨损形式。这一

理论于1973年由Suh提出^[8]，Suh及其合作者的工作到1977年趋于完善^[9-10]。这一理论的提出对磨损理论的研究曾起过重要作用。通过简单的计算可以看出^[6]，如果一次相互作用下磨屑发生脱落，则相应的磨损率就会非常大。在外摩擦作用下，磨损率要小几个数量级。从逻辑上推断，为了使磨屑脱落，就要相互作用很多次，这就是磨损的多次作用原理。剥层理论认为^[8-10]，当硬的微凸体在软表面上滑动时，在这一层下的高位错密度区由于位错的堆积导致形成空穴，裂纹形成、扩展，形成磨屑脱落，并假设形成的磨屑片厚度等于低位错密度区的深度 h ，按式(1-1)计算：

$$h = \frac{Gb}{4\pi(1-\nu)\sigma_f} \quad (1-1)$$

式中， G 是剪切模量， b 是柏氏矢量， ν 是泊松比， σ_f 是位错在固体中运动所需克服的应力。显然， G/σ_f 值越小，磨屑越薄，在表层下会发生平行于摩擦面的裂纹。

4. 微观断裂磨损机理

磨料磨损时，由于磨粒的压入，大多数材料会发生塑性变形。但有些材料，特别是脆性材料，塑性变形很小，裂纹扩展导致断裂脱落的机理可能占据支配地位。

以上是磨料磨损可能出现的几种机理^[6-7, 11]。必须说明的是，磨料磨损过程中往往会有几种机理同时存在，那是由于材料内部组织和性能等因素以及磨损外部条件的影响和变化，而使磨损机理发生变化。上述几种机理中，以微观切削对材料所造成的磨损最为严重，断裂的影响在某些脆性较大的材料中也相当严重。

1.2.2 粘着磨损机理

粘着磨损是在法向加载下，两物体接触表面相对滑动时产生的磨损。当两个相互作用表面进行接触时，接触仅在少数几个孤立的微凸体顶尖上发生，在这些接触着的面积上产生很高的应力，接触面出现塑性流动。接触点粘着和焊合，称为接点。假如犁沟项忽略不计，那么摩擦力等于剪断接点的力。如果剪断位置在界面上，不会发生磨损；否则，就会形成材料从一个表面转移到另一个表面，继续摩擦时，一部分转移材料脱离，而成为游离的磨屑，这就是粘着磨损机理。

粘着磨损理论是Holm于1946年首先提出，Archard^[12]和Rabinowicz加以发展。Holm第一个把表观接触与实际接触区别开，目前被人们广泛接受的粘着磨损机制模型（即Archard模型）正是建立在计算真实接触面积的基础之上的。1953年Archard提出粘着磨损模型，即实际上当名义上的两平滑表面相遇时，只在高的微凸体上发生了接触，且由于局部应力集中而在接触处出现塑性流动。当载荷很小时，接触仅在三个点上发生。外力增加后，接触面积增大，而摩擦副间

的表面间隙减小, 结果使更多的微凸体在各处接触。在此基础上建立了体积磨损量与载荷、摩擦距离、材料硬度之间的关系:

$$W_v = K \frac{PL}{3H} \quad (1-2)$$

式中, W_v 是体积磨损量 (mm^3); P 是法向载荷 (N); L 是摩擦行程 (mm); H 是摩擦副中较软材料的硬度 (MPa); K 是磨损系数。磨损系数是一个无量纲量, 表示一个已与配对表面接触的微凸体产生磨屑的概率, 不同配对金属的 K 值可在有关手册上查出, 一般为 $10^{-4} \sim 10^{-3}$ 数量级。由式 (1-2) 可以看出, 粘着磨损量与法向载荷、摩擦行程和磨损系数成正比, 与摩擦副中较软材料的硬度成反比, 而与接触面积无关。

1.2.3 腐蚀磨损机理

腐蚀磨损是腐蚀和磨损同时起作用的一种磨损。摩擦相互作用的表面在液体或气体的工作环境或在润滑剂中发生化学或电化学反应, 而在表面上形成的腐蚀产物常粘附不牢, 在摩擦过程中被剥落下来, 而新的表面又继续和介质发生反应, 这种腐蚀和磨损的重复过程, 称为腐蚀磨损^[4]。当腐蚀成为磨损的主要原因时, 通常出现几种机理综合的磨损, 各种机理之间存在着复杂的相互影响, 腐蚀和磨损还有相互促进的作用。腐蚀磨损可分为化学腐蚀磨损和电化学腐蚀磨损。而化学腐蚀磨损则分为氧化磨损和特殊介质腐蚀磨损, 而以氧化磨损最常见。氧化磨损的实质是在金属表面与气体介质发生氧化反应时, 生成单分子氧化膜, 厚度逐渐增加, 但增长速度却随时间推移, 按指数规律而减小。氧化膜过厚易产生断裂和剥落, 被剥落的氧化物本身在摩擦面之间就形成了磨料磨损, 新的腐蚀磨损兼有腐蚀与磨损的双重作用。氧化磨损理论是 Quinn^[13]首先提出的, 他发现在磨屑里出现了不同的氧化物, 这表明存在不同的氧化温度, 并且在微凸体相互作用时会达到这种温度, 在 Archard 公式的基础上, 建立了著名的轻微磨损的氧化理论, 并推导出钢的氧化磨损方程, 即

$$\bar{W} = \frac{W_v}{L} = [A_0 \exp(-Q/RT) S / v h^2 \rho^2] \frac{P}{3H} \quad (1-3)$$

式中, $\bar{W}$ 是磨损率; W_v 是体积磨损量; L 是滑动距离; P 是法向载荷; H 是材料硬度; ρ 是氧化膜密度; S 是一次接触的滑动距离; v 是滑动速度; A_0 是阿累纽斯 (Allheuius) 常数; Q 是氧化反应的激活能; R 是摩尔气体常数; T 是滑动界面上的热力学温度; h 是氧化膜的临界厚度。

另外, 金属材料在能形成电化学反应的电介质溶液中的磨损行为称为电化学腐蚀磨损。它比氧化磨损更广泛, 涉及的因素更多, 磨损过程也更加复杂。同时还存在多种机理, 而且各种机理、因素之间还存在着复杂的相互作用。在电化学