

机械工业出版社高水平著作出版基金资助项目

耐磨铸钢及熔炼

谢敬佩 李 卫 宋延沛 陈全德 著

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



机械工业出版社高水平著作出版基金资助项目

耐 磨 铸 钢 及 熔 炼

谢敬佩 李 卫 著
宋延沛 陈全德



机 械 工 业 出 版 社

本书评述了耐磨铸钢的发展及现状,较全面系统地介绍了高锰钢、中锰钢、低合金耐磨铸钢、高合金耐蚀耐磨钢等主要耐磨铸钢的化学成分、微观组织、力学性能、耐磨性能、铸造工艺、热处理工艺及冶炼工艺的相关知识与科研成果。本书可供从事冶金、矿山、电力、建材、铁路、机械等领域的科研工作者、工程技术人员及大专院校的教师及研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

耐磨铸钢及熔炼/谢敬佩等著. —北京:机械工业出版社, 2003.6

ISBN 7-111-12114-7

I. 耐… II. 谢… III. 耐磨钢—熔炼

IV. TF762

中国版本图书馆CIP数据核字(2003)第034877号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:张秀恩 版式设计:霍永明 责任校对:姚培新
王兴垣

封面设计:姚毅 责任印制:闫焱

北京京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2003年7月第1版·第1次印刷

1000mm×1400mm B5·14印张·545千字

0 001—2 500册

定价:48.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话(010) 68993821、88379646

封面无防伪标均为盗版

前 言

磨损是摩擦学的三个重要组成部分之一（摩擦、磨损、润滑），磨损又是金属机械零件三种主要失效形式之一（断裂、腐蚀、磨损）。据统计，机械零件的失效中，磨损占 80% 以上。美国每年因磨损造成经济损失约 1000 多亿美元，我国仅在矿山、冶金、电力、煤炭和农机部门不完全统计，由于工件磨损造成经济损失每年 400 亿元。磨损理论、磨损工况、耐磨材料及磨损体系是国内外同行研究的热点和难点。

1977 第一届国际材料磨损会议上，剑桥大学的 D.Tabor 教授的特邀报告中写道“若硬的粒子或硬的粗糙表面切削或磨损与其相摩擦的材料表面时，发生磨粒磨损。磨粒磨损类似于显微切削，且磨损率相当高；若磨粒不比被磨表面硬时，也发生磨损，但速度很低。”由此可见，材料的磨损与磨料特性、磨损工作条件和成分组织性能相关。磨损的研究将是多学科的综合，涉及物理、化学、冶金、材料和机械工程等方面的知识。所以说磨损研究是一项系统工程。在研究磨损时，要结合工况条件，研究磨料与材料之间的相互作用，应力分布规律，组织因素等有关的问题。

本书是在 20 多年科研和教学工作基础上，结合工况条件，从磨损理论、磨损工况、耐磨材料作为研究的切入点，形成了磨损工况、材料设计、冶炼控制、铸造工艺及性能检测等完善的科学研究及产品开发体系。本书共分 9 章，第 1 章由李卫教授撰写，第 2 章由李卫教授、谢敬佩教授撰写，第 3 章由陈全德教授撰写，第 4 章由谢敬佩教授撰写，第 5 章由宋延沛教授、陈全德教授撰写，第 6 章由宋延沛教授撰写，第 7 章、8 章由李卫教授撰写，第 9 章由陈全德教授撰写。全书由谢敬佩教授统稿。

本书是在长期科研和实际生产中的工作总结。但由于笔者水平有限，加之磨损工况的复杂性，很多问题的研究正处于不断发展和深入的研究过程之中。因此，书中难免会出现缺点和错误，恳请读者批评指正。作者在此表示衷心的感谢。

作者

2003 年 4 月 于洛阳

目 录

前言

第1章 耐磨铸钢的发展简史	1
参考文献	3
第2章 耐磨铸钢的磨损	4
2.1 磨损的特性及其主要机制	4
2.1.1 磨损的特性	4
2.1.2 磨料磨损机制	5
2.1.3 腐蚀磨损机制	9
2.2 耐磨铸钢件的失效	11
2.2.1 磨损失效	11
2.2.2 断裂失效	12
2.2.3 变形失效	12
2.3 耐磨铸钢的磨损试验	13
2.3.1 冲击磨料磨损试验	13
2.3.2 高应力磨料磨损试验	13
2.3.3 冲刷腐蚀试验方法	14
2.3.4 低应力磨料磨损试验	14
2.4 耐磨奥氏体锰钢的冲击磨损硬化	15
2.4.1 位错强化机制	15
2.4.2 形变孪晶强化机制	16
2.4.3 相变强化机制	16
2.4.4 综合强化机制	17
参考文献	17
第3章 高锰钢	18
3.1 高锰钢的化学成分	20
3.1.1 Fe-Mn, Fe-Mn-C相图	20
3.1.2 高锰钢的化学成分	23
3.2 合金元素在高锰钢中的作用	31
3.2.1 铬的作用及含铬高锰钢	31
3.2.2 镍的作用及含镍高锰钢	33
3.2.3 钼的作用及含钼高锰钢	34
3.2.4 钛、钒、铌的作用	36

3.2.5 稀土元素的作用	40
3.3 高锰钢的铸造工艺	44
3.3.1 造型材料	44
3.3.2 收缩、冒口和冷铁	51
3.3.3 浇注系统	58
3.3.4 典型高锰钢铸件铸造工艺举例 ^[7]	63
3.3.5 高锰钢铸件的铸型烘烤工艺	76
3.3.6 浇注与出箱	76
3.3.7 高锰钢铸件切割和补焊	80
3.4 高锰钢铸件的热处理	82
3.4.1 高锰钢在加热过程中的行为	82
3.4.2 高锰钢加热过程参数选择	83
3.4.3 普通高锰钢热处理工艺	84
3.4.4 高锰钢热处理新工艺	85
3.5 高锰钢铸件的主要缺陷	89
3.5.1 晶粒粗大	89
3.5.2 组织不致密性	91
3.5.3 MnO 夹杂	93
3.5.4 高锰钢的裂纹倾向	94
3.5.5 韧性储备不足	96
3.6 高锰钢的标准及性能	96
3.6.1 高锰钢标准	96
3.6.2 高锰钢性能	99
3.7 Mn17 高锰钢	103
参考文献	103
第 4 章 奥氏体中锰钢	104
4.1 化学成分选择	104
4.2 中锰钢组织及性能	106
4.2.1 铸态和热处理组织	106
4.2.2 铌、氮变质处理	106
4.2.3 稀土对组织的影响	107
4.3 中锰钢中的夹杂物	108
4.3.1 变质剂对夹杂物数量的影响	108
4.3.2 变质剂对夹杂物形状的影响	108
4.3.3 变质剂对夹杂物类型的影响	109
4.4 铌的碳、氮化合物作用	110
4.4.1 Nb 的 C、N 化合物形成热力学条件	110
4.4.2 Nb 的化合物可作为异质核心	111

4.5 示波冲击和 COD 试验	112
4.6 奥氏体锰钢加工硬化	115
4.7 奥氏体锰钢应变诱发马氏体相变热力学	118
4.7.1 奥氏体转为马氏体自由能计算	118
4.7.2 中锰钢和高锰钢的 M_s 温度及 $\Delta G_{\text{FeMnC}}^{\gamma \rightarrow \alpha}$ 在 M_s 和室温的 相变驱动力计算	120
4.7.3 机械驱动力计算	121
4.8 中锰钢原位动态拉伸过程中电镜观察	122
4.8.1 位错动态变化	122
4.8.2 碳化物强化作用	122
4.8.3 层错与李晶	126
4.8.4 应变诱发马氏体相变	128
4.8.5 裂纹形成及扩展	130
4.9 中锰奥氏体钢的塑变磨损	130
4.10 中锰奥氏体钢的凿削磨损	134
4.10.1 建立力学模型	134
4.10.2 磨料与试样接触时的受力分析	135
4.10.3 凿削坑形成机理	137
参考文献	139
第 5 章 合金元素在耐磨钢中的作用	140
5.1 常用合金元素在耐磨钢中的作用概述	141
5.1.1 合金元素在钢中存在的形态	141
5.1.2 合金元素在钢中的作用	143
5.1.3 合金元素与碳的相互作用	145
5.1.4 合金元素对相图的影响	146
5.1.5 合金元素对耐磨钢过冷奥氏体分解转变的影响	147
5.1.6 合金元素对耐磨钢淬透性的影响	151
5.2 稀土在耐磨钢中的作用概述	152
5.2.1 稀土在冶金过程中的行为	153
5.2.2 稀土在铸造过程中的行为	156
5.3 稀土在中碳马氏体耐磨铸钢中的作用	161
5.3.1 稀土复合变质剂对中碳低合金耐磨钢组织的影响	161
5.3.2 稀土复合变质剂对中碳低合金钢力学性能的影响	180
参考文献	189
第 6 章 多元低合金耐磨钢	191
6.1 水淬低合金耐磨铸钢	191
6.1.1 耐磨钢的化学成分选择	191

6.1.2 水淬耐磨铸钢	194
6.1.3 油淬和空淬耐磨钢	206
6.2 低合金贝氏体耐磨铸钢和 M、B 复相耐磨铸钢	216
6.2.1 贝氏体转变	216
6.2.2 贝氏体、贝氏体-马氏体耐磨铸钢	221
6.2.3 国外常用的低合金耐磨钢	234
6.4 耐磨钢的铸造性能	236
参考文献	242
第 7 章 中铬合金耐磨钢和高铬合金耐磨钢	244
7.1 中铬合金耐磨钢	244
7.1.1 中铬合金耐磨钢的化学成分	244
7.1.2 中铬合金耐磨钢的铸造和热处理	246
7.1.3 中铬合金耐磨钢的显微组织	248
7.1.4 中铬合金耐磨钢的力学性能	250
7.1.5 中铬合金耐磨钢的耐磨性	251
7.1.6 中铬合金耐磨钢的工业应用	252
7.2 高铬合金耐磨钢	254
参考文献	257
第 8 章 高合金耐热耐磨钢	259
8.1 耐热耐磨钢中合金元素的作用	259
8.2 高铬镍耐热耐磨钢	261
8.3 其他耐热耐磨钢	276
8.3.1 ZGCr28	276
8.3.2 ZGCr17Ni2Mo	278
8.3.3 Cr-Mn-N 耐热耐磨钢	280
参考文献	284
第 9 章 耐磨铸钢的熔炼	285
9.1 炼钢用原材料	285
9.1.1 金属材料	285
9.1.2 造渣材料、氧化剂、增碳剂	301
9.1.3 电极	304
9.1.4 炼钢用耐火材料	306
9.2 电弧炉炼钢的物理化学原理及过程控制	311
9.2.1 炉渣的作用和性质	311
9.2.2 炼钢过程物理化学原理概述	316
9.2.3 炼钢过程的控制	328
9.2.4 合金钢冶炼的特点	333
9.3 碱性电弧炉炼钢工艺	335

9.3.1 熔炼前的准备工作	335
9.3.2 熔化期	343
9.3.3 氧化期	344
9.3.4 还原期	349
9.3.5 碱性电弧炉氧化法炼钢举例	360
9.3.6 碱性电弧炉不氧化法炼钢	363
9.4 酸性电弧炉炼钢工艺	366
9.4.1 熔炼前的准备	366
9.4.2 熔化期	368
9.4.3 氧化期	369
9.4.4 还原期和出钢	372
9.4.5 1.5t 酸性电弧炉碳素铸钢氧化法冶炼工艺举例	374
9.4.6 钢的浇注	376
9.5 感应炉炼钢	381
9.5.1 感应电炉的工作原理	382
9.5.2 感应炉炼钢用坩埚	387
9.5.3 中频感应炉炼钢工艺	400
9.5.4 感应炉炼钢中几个关键技术的讨论	415
9.6 铸钢件的主要缺陷	431
9.6.1 裂纹类缺陷	431
9.6.2 孔洞类缺陷	436
9.6.3 夹渣及渣气孔	438
参考文献	439

第 1 章 耐磨铸钢的发展简史

耐磨铸钢是广泛用于各种磨损工况的一类合金钢,100 余年来新的耐磨铸钢钢种层出不穷,其冶炼、铸造、热处理和机加工工艺不断改进,耐磨铸钢的综合力学性能、耐磨性能和使用寿命逐步提高,其应用领域日渐扩大。当我们回顾耐磨铸钢的历史,我们会为同行前辈们的丰功伟绩而骄傲,当我们认识耐磨铸钢的现状,我们将从中获得启迪,找寻不足,明确本行业的希望和未来的发展方向。

了解耐磨铸钢的历史发展,应从合金钢的发展说起。

伟大的发明家 Faraday 不仅在电磁感应及电化学方面为世界的现代文明作出了重要的贡献,他还是一位伟大的冶金学家,他被称为发展合金钢的先驱^[1~3]。Faraday 在英国皇家学院工作期间,与 Stodart 一起在 1820 年发表了论文“改善钢的合金试验”,在 1822 年发表了论文“论钢的合金”。这两篇关于合金钢的论文后来被世人称为合金钢历史初期的重要贡献。Faraday 在 1820~1822 年间试验研究了加入铜、镍、铬及贵金属元素的钢,这一研究虽然在当时没有产生什么直接意义的结果,但其系统的试验对后来的合金钢发展具有启发性并有着深远的意义^[3]。后来人们逐渐认识到 Faraday 的工作在合金钢发展史上的重要地位,因而推崇他为合金钢研发的先驱。

第二位代表人物是 Mushet,他在 1868 年研发出高钨自淬工具钢即 Mushet 特殊钢,其特点是不需要淬火而具有高的硬度,用该钢制造的刀具车削速度和使用寿命均比碳素钢刀具高很多。在此基础上高碳合金工具钢得到发展,经过后人不断改进,在 1906 年研发出今天仍在使用的 W18Cr4V 型高速钢^[3]。

Faraday 和 Mushet 被后人公认为在合金钢方面做了一些开创性的试验研究工作,但这只能说是现代合金钢的前奏^[3],而英国人 Hadfield 才是现代合金钢的奠基人。Hadfield 在 1882 年 9 月发明了耐磨高锰钢(又称 Hadfield 高锰钢),在 1884 年又发明了制造硅钢片的硅钢,这两种有特殊性能的新合金钢的出现,为世界进入现代合金钢时代揭开了序幕。Hadfield 堪称是伟大的发明家,他在 1882 年研制的耐磨高锰铸钢主要成分是 $w(\text{C}) = 1.35\%$, $w(\text{Si}) = 0.69\%$, $w(\text{Mn}) = 12.76\%$,其主要特点是有很好的韧性而且越磨越硬。1892 年高锰铸钢首次被工业应用,在电车轨道的道岔上试用成功,之后 100 余年耐磨高锰铸钢得到了广泛的应用,至今仍在许多大冲击强磨损工况应用而不能被替代,如用做圆锥式破碎机轧臼壁和破碎壁,大型颚式破碎机颚板等,而且百年前的成分与今相仿,不能不说是合金钢史上的奇迹。由于 Hadfield 钢是耐磨高锰铸钢,因而 Hadfield 也是

现代耐磨铸钢的奠基人。真正的现代耐磨铸钢发展始于 1882 年。

中、高碳低合金和中合金耐磨铸钢的发展则是与合金结构钢的发展相伴的。中碳合金结构钢的出现是从 19 世纪末镍钢的研制开始的, 1878~1888 年间, 法国的冶金学家冶炼出镍合金钢, 此后各种中碳合金结构钢相继出现。20 世纪初典型的 4340 (40NiCrMo) 合金钢 ($w(C)=0.4\%$, $w(Ni)=1.65\% \sim 2.00\%$, $w(Cr)=0.70\% \sim 0.90\%$, $w(Mo)=0.20\% \sim 0.30\%$) 即开始应用直到现在。中、低合金耐磨铸钢的发展借鉴了合金结构钢的化学成分, 但在制备工艺方面有较多的改进, 特别是热处理工艺与合金结构钢有较大的不同, 大多采用淬火后低温回火的热处理工艺, 以获得高强度、高硬度和一定韧性的配合, 以满足耐磨损的要求。中、低合金耐磨铸钢的发展还有一个显著的特点, 那就是在许多磨损工况特别是中低冲击或无冲击的磨损工况逐渐替代了高锰钢并表现出卓越的性能价格比, 这也是中低合金耐磨铸钢得以广泛应用的重要原因。以水泥厂球磨机耐磨衬板为例, 20 世纪 60 年代及其之前绝大多数衬板采用高锰铸钢, 进入 70 年代以后, 逐渐使用了中碳低合金耐磨铸钢。

在国外中、低合金耐磨铸钢多为 Cr、Mo 或 Cr、Ni、Mo 系合金钢, 在我国曾有一段时间着力开发符合我国合金资源情况的 Si、Mn 系合金钢, 其典型钢种是 30Si2Mn。但随着国内外技术交流的扩大和生产实践的总结, 人们逐渐意识到采用多元合金化是提高耐磨铸钢淬透性、强韧性和硬度的行之有效的方法, 因而近些年的中、低合金耐磨铸钢大多采用了 Cr、Mo、Ni、Si、Mn 多元合金化。

我国在 20 世纪 80 年代之后大力开展了中、低合金耐磨铸钢的研制和工业应用工作, 取得了一系列成果, 较典型的耐磨钢种是 30CrMnSiMoNi 和 Cr5Mo 钢, 用于制造球磨机衬板、锤破机锤头及挖掘机斗齿等典型耐磨件, 获得了良好的经济效益。这一时期我国的许多单位还开展了 V、Ti、Nb、RE、B 等微量元素在耐磨铸钢中的应用研究, 进一步提高了耐磨铸钢的综合性能。

在奥氏体锰钢的发展过程中, 除了 Mn13 系列高锰钢, 中锰钢 ($w(Mn)=6\% \sim 8\%$, $w(Mo)=0.9\% \sim 1.2\%$) 和 Mn17 系列高锰钢 ($w(Mn)=16\% \sim 19\%$) 也得到发展。美国的 Climax 钼公司在 20 世纪 70 年代发展了中锰钢, 该钢以牺牲一些韧性换取高的加工硬化性能, 用于冲击不太大的磨损工况, 该钢种早已列入美国 ASTM 标准并在 1999 年列入 ISO 奥氏体锰钢铸件标准。Mn17 系列高锰钢更适于厚大铸件的生产, 以高的韧性和加工硬化能力得以应用, 该钢种在 1999 年被列入 ISO 奥氏体锰钢铸件标准。

随着耐磨铸钢的发展, 近些年用于特殊磨损工况的耐磨钢逐渐引起人们的注意, 如高温氧化磨损工况下使用的耐热耐磨钢, 湿态腐蚀磨损工况下使用的耐蚀耐磨钢等, 其研制和工业应用已取得了一些成效, 但相对奥氏体锰钢和中低合金耐磨钢而言还有待深入的试验研究和进一步推广应用。

参 考 文 献

- 1 Smith C S. The Sorby Centennial Symposium on the History of Metallurgy. Amer. Inst. Min. Met. Engrs. , 1965
- 2 Hadfield R A. Faraday and His Metallurgical Researches. 1931
- 3 郭可信. 金相学史话 (4): 合金钢的早期发展史. 材料科学与工程, 2001 (3): 2-9

第2章 耐磨铸钢的磨损

耐磨铸钢的耐磨性不是钢的固有性能，而是钢在一个磨损系统中的性能，它既受钢固有性能如硬度、韧性和强度的影响，又受磨损工况的影响。例如，在强烈冲击磨损工况，高锰钢表层加工硬化，有较好的耐磨性；但在冲击较小或无冲击的磨损工况，高锰钢表层得不到硬化，则耐磨性较差。

磨损是十分复杂的，磨损工况中各因素均影响材料的耐磨性，例如，磨料的硬度、粒度、温度、速度及运动方向，工况的干、湿状态，湿态工况中的酸、碱性及浓度，工况中零件所承受的载荷等等。因此，要获得良好的耐磨性，必须了解磨损工况，掌握磨损特性及其主要机制。

2.1 磨损的特性及其主要机制

2.1.1 磨损的特性

磨损，是物体相对运动时相对运动表面的物质不断损失或产生残余变形的过程。

人们习惯于将磨损分为以下几个主要类型：

1. 磨料磨损 因物料或硬突起物与材料表面相互作用使材料产生迁移的磨损。

1) 凿削磨料磨损（通常有较严重的冲击作用，例如颚式破碎机颚板的磨损）。

2) 研磨磨料磨损（又称高应力碾碎磨料磨损，例如球磨机磨球和衬板的磨损、中速磨辊和磨盘的磨损）。

3) 刮伤磨料磨损（又称低应力磨料磨损，或称冲蚀或冲刷，例如渣浆泵叶轮和泵壳的磨损、管道的磨损）。

2. 腐蚀磨损 伴随有化学及电化学反应的磨损。

3. 粘着磨损 因粘着作用使材料由一表面转移到另一表面的磨损。

4. 疲劳磨损 因循环交变应力引起疲劳使材料脱落的磨损。

在生产实践中遇到的磨损，往往是几种磨损类型同时存在且相互影响，但是总有一种磨损类型及磨损机制起主导作用。因此在分析耐磨铸钢件的磨损及耐磨铸钢选材时，首先要搞清具体的工况条件及起主要作用的磨损类型和磨损机制。耐磨铸钢应用时常见的主要磨损类型是磨料磨损和腐蚀磨损。

2.1.2 磨料磨损机制

磨料磨损机制常被分为切削机制、裂纹扩展机制和塑变磨损机制，也有人将之简单分为切削机制和疲劳剥落机制。

磨损机制用来表征和说明材料的磨损过程，即磨损的产物——磨屑是怎样形成的。基于对磨损表面的观测，通常认为磨料磨损是在外力作用下磨料以一定角度与材料表面接触，此作用力可分解成垂直于材料表面的分力和平行于材料表面的分力，垂直分力使磨料压入材料表面，平行分力则使压入表面的磨粒作切向运动，在材料表面产生擦伤或显微切削作用，结果在材料表面留下磨痕。当材料具有一定塑性时，压入的磨料可分为两类：一类是其运动方向和棱角较有利于切削时，将对金属表面产生显微切削作用，另一类是压入深度较浅的圆滑磨料，可能只在表面造成塑性变形而产生擦伤或材料挤压推移，而中间形成“犁沟”，两侧堆积隆起。当材料为脆性材料时，倾向于形成压碎磨损，犁沟为锯齿状。

1977 第一届国际材料磨损会议上，剑桥大学的 D. Tabor 教授的特邀报告中写道“若硬的粒子或硬的粗糙表面切削或磨损与其相摩擦的材料表面时，发生磨粒磨损。磨粒磨损类似于显微切削，且磨损率相当高。若磨粒不比被磨表面硬时，也发生磨损，但速度很低”。由此可见，材料的磨料磨损与磨料特性等相关。在研究磨料磨损时，要结合工况条件，研究磨料与材料之间的相互作用，应力分布规律，组织因素等有关的问题。

2.1.2.1 磨料磨损切削机制

根据 Rabinowicz 简化模型，圆锥形磨料在载荷作用下滑动距离 S 后，可得：

$$F = H_m \cdot \pi a^2$$

$$\text{磨沟截面积为：} A_g = a \cdot t = a^2 \cdot \tan \theta$$

$$\text{磨损面积为：} V = A_g \cdot S = \frac{F \cdot S \cdot \tan \theta}{\pi \cdot H_m}$$

从而说明，磨损体积与载荷 F 成正比，与滑动距离成正比，而与材料硬度 H_m 成反比。这个简化模型解释了磨损中基本问题，但没有考虑沟槽体积只是一部分形成磨损，而大部分发生塑性变形，排向两边和前沿，所以磨损体积应该乘上一个系数。另一问题是没有考虑冲角对磨损的影响，当磨料对基体产生切削时，能否形成切屑与冲角有关，当冲角 α 超过临界冲角 α_0 时才能产生切屑，否则，只能产生塑变沟槽，将金属排向两边和前沿，而不能形成切屑。

大量的现场观察和实验分析发现，磨料磨损不仅与材料硬度相关，更重要的是与磨料与材料的硬度比 ($H_a:H_m$) 关系密切，材料的磨损体积和相对耐磨性与磨料硬度的关系可分为三个区：

区域 I ——低磨损区， $H_a < H_m$ (一般 $H_m > (1.2 \sim 1.3) H_a$)；

区域 II ——过渡磨损区， $H_a \approx H_m$ ($0.8 H_a < H_m < 1.2 H_a$)；

区域Ⅲ——高磨损区, $H_m < 0.8H_a$ 。

Richardson 则认为金属经磨损后表面硬度要提高, 决定金属耐磨性的是经磨损后的材料表面硬度 H_a , 而不是磨损前的原始硬度 H_m 。

Zum Gahr 等经过大量实验, 提出了 f_{ab} 因子理论(见图 2-1a), 该理论认为塑性材料的磨损是犁沟和切削的综合作用结果, 其相对量可用下式表示:

$$f_{ab} = \frac{A_g - (A_1 + A_2)}{A_g} = 1 - \frac{A_1 + A_2}{A_g}$$

式中 f_{ab} ——塑变因子;

A_1 、 A_2 ——挤压相对面凸出部分面积;

A_g ——挤压相对面凹下部位面积。

当式中 f_{ab} 因子为零时, 就出现犁沟, 当 f_{ab} 因子为 1 时, 则出现切削。此时线性磨损率为:

$$W/S = \Phi \cdot f_{ab} \frac{F}{H}$$

式中 W/S ——单位长度的磨损量;

S ——磨损距离;

Φ ——磨料形状因子;

F ——材料表面压力。

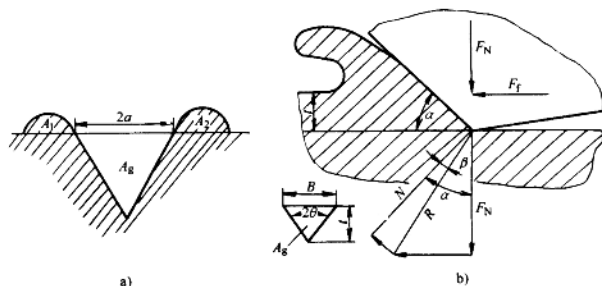


图 2-1 f_{ab} 因子计算模型

a) 塑变区域 b) 犁沟截面图

从式中可知, 被磨材料的磨损量随着形状因子 Φ 的增大而增大, 并且磨料越尖, 形状因子越大; 磨损量随着外部压力增大而增加, 随着被磨材料的硬度增加而减少。公式中 f_{ab} 因子是材料表面实际变形能力的函数, 也是材料强度的函数。 f_{ab} 因子随着材料变形能力增加而减小。因为材料变形能力越强, 越容易在犁沟两侧产生塑性变形。对于确定的工况条件, 材料高的耐磨性将通过小的 f_{ab}

值和高的材料硬度来实现。

图 2-1b 计算材料耐磨性与硬度及 f_{ab} 因子关系

$$F_N = \frac{A_g}{\tan \theta} \sigma_{0.2} \quad A_g = \frac{B^2}{4} \cdot \frac{\sin \alpha}{\tan \theta}$$

$$f_{ab} = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{\sigma_{0.2}}{\tau_{lim}} \cdot \frac{\left(\cos \beta \cdot \sin \alpha + \frac{\tan \beta}{\sin \theta} \right)}{\tan \theta}$$

$$W^{-1} = \left(\frac{V_w}{S} \right)^{-1} = \frac{\sigma_{0.2}}{f_{ab}} \cdot \frac{\sqrt{\cos \frac{\alpha}{2} \cdot \cos(\alpha - \beta)}}{F_N \cdot \cos \beta \cdot \sin \alpha}$$

式中, τ_{lim} 为磨损表层的极限抗剪强度, $\sigma_{0.2}$ 为屈服强度, α 、 θ 如图所示, β 为摩擦角, S 为磨粒滑动距离, V_w 为磨损量, W^{-1} 为材料的耐磨性, 对于给定的工况条件, α 、 β 、 F_N 为常数, $\sigma_{0.2}$ 可用 H 代替, 则上式可改写为 $W^{-1} = K \cdot \frac{H}{f_{ab}}$, 从而说明材料的耐磨性正比于材料的 H/f_{ab} 。

2.1.2.2 磨粒磨损的裂纹扩展机制

Zum Gahr 教授研究工具钢和白口铸铁时发现磨损表层及亚表层有水平方向裂纹和纵向裂纹^[1]。他用锥形压头压入材料表面形成顶角为 2α 、宽度为 $2a$ 的压痕 (图 2-1a), 且在压入尖端处有直径为 $2c$ 的圆形裂纹。计算出裂纹处的应力强度:

$$K_E = \frac{F}{(\pi \cdot c)^{3/2} \tan \alpha}$$

若考虑接触体的滑动就必须把摩擦产生的应力强度叠加上, 这里把摩擦力作用的有效宽度定为 $2a^*$, $a^* = \frac{a}{2}$, 则有: $F_R = f \cdot \frac{F_N}{2a^*} = \frac{f \cdot D}{2a^* \cdot \sin \alpha}$ 作用于 $K_R = \frac{f \cdot F}{2a^* (\pi \cdot c)^{1/2} \cdot \sin \alpha}$

两个强度因子叠加可得:

$$K_I = K_E + K_R = \frac{F}{(\pi \cdot c)^{1/2} \sin \alpha} \left(\frac{\cos \alpha}{\pi \cdot c} + \frac{f}{2a^*} \right)$$

在增加磨料作用下, 由于摩擦力作用, 还可能产生平行于表面的方向扩展, 从而产生应力强度因子 K_{II} :

$$K_{II} = \frac{4.6}{\pi} \cdot \frac{F \cdot f}{2a^* \cdot c^{1/2} \cdot \sin \alpha}$$

从而形成“犁”的作用磨损 ΔV_1 和局部裂纹及扩展造成剥落 ΔV_2 。

在磨损时, 裂纹扩展的判据为:

$$F_{K_{It}} = \left(\frac{\pi}{4.6} \right)^2 \times \frac{\lambda \cdot K_{Ic}^2 \cdot \sin^2 \alpha}{4f^2 H}$$

那么单位面积上磨料滑动过单位距离造成的磨损率为:

$$W = W_1 + W_2 = \frac{F}{\beta H \cdot \tan \alpha} + 12.13 K \frac{F^{3/2} \cdot D f^2 H^{1/2}}{K_{Ic}^2 \sin 2\alpha}$$

这里第一项 W_1 表述的是单纯的磨沟磨损, W_2 表述的是局部裂纹扩展导致材料剥落磨损。从上述看到, 对于裂纹扩展形成的磨损, 摩擦因数 f 也是一个主要参数, 因为它影响局部应力分布。随着磨料粒度增大, 材料硬度提高, $F_{K_{It}}$ 下降, 即发生裂纹扩展控制的磨损的可能性增加。金属的断裂韧性对磨粒磨损有重要的影响。随着 K_{Ic} 升高, 裂纹扩展机制的磨损临界载荷提高, 磨损率降低, 但对大多数金属来说, 随着断裂韧性的提高, 材料的硬度下降, 也就是说上式中第一项

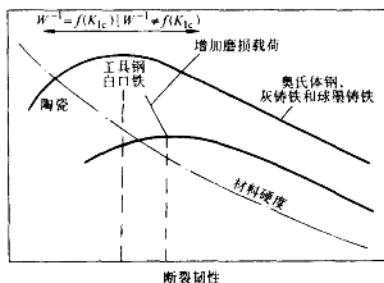


图 2-2 耐磨性和 K_{Ic} 的关系

W_1 受硬度控制, 而第二项 W_2 受材料的断裂韧性 K_{Ic} 控制, 磨损则是两项综合作用结果。正如试验结果给出, 在一定条件下, 材料的硬度起主导作用; 在另一种条件下, 材料的断裂韧性起主导作用。当断裂韧性很低时, 磨损以裂纹扩展机制为主, 随着 K_{Ic} 提高则耐磨性提高。但 K_{Ic} 提高的同时硬度下降, 即一定 K_{Ic} 时, 材料的硬度也降到最低值, 这时磨料的“犁”作用是磨损的主要方式, 材料的耐磨性随断裂韧性 K_{Ic} 提高和硬度下降而下降 (图 2-2)。

2.1.2.3 型变磨损机制

M.A. More 提出了型变磨损理论。在松散磨料磨损条件下, 磨料处于不断运动状态, 磨料大约有 90% 的机会与磨损表面作滚动接触, 只有 10% 的机会能在磨损表面上形成沟槽, Challen 发现松散磨料磨损表面和固定磨料磨损表面形貌有很大差别, 前者表面出现很多型变压痕, 所以认为此时是以型变磨损为主。

从图 2-3 可以看出型变磨损过程, 图 a、图 b 是磨粒的棱角刺入金属材料形成凹坑并挤出金属材料。图 c、图 d 是第二个磨粒又压在被挤出的金属材料上, 使之再次变形。多个磨损的多次变形, 形成了叠层状的特征 (如图 e、图 f)。有的磨粒棱角剪切变形层金属而使之形成碎屑, 也有的磨粒使之多次变形, 当材料应力超过强度极限时脆裂成碎屑。