

高钒高速钢 耐磨材料

魏世忠 韩明儒 徐流杰 著



科学出版社

www.sciencep.com

高钒高速钢耐磨材料

魏世忠 韩明儒 徐流杰 著

河南科技大学学术著作出版基金资助出版

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书系统介绍了高钒高速钢耐磨材料的组织性能、技术指标、抗磨特性及其在矿山机械上的应用。本书概述了当前国内外耐磨材料的研究与生产的发展趋势;论述了摩擦磨损的基本理论和减少材料摩擦磨损在矿山机械行业的重要意义;介绍了目前高钒高速钢耐磨材料研究开发和应用的现状,高钒高速钢研制的实验方法、凝固结晶过程、组织结构、磨粒磨损性能、滚动磨损性能及其稳定性,碳、钒等化学元素对高钒高速钢组织性能的影响,基体组织和残余奥氏体对高钒高速钢耐磨性能的影响,热处理工艺及其他条件对高钒高速钢耐磨性能的影响,高钒高速钢复合导轮、锤头、磨辊和合金轧辊的研制及在矿山机械中的应用,并在附录中介绍了金属钒的应用与当前钒工业的发展。

本书可供从事材料摩擦磨损领域和耐磨材料、表面工程技术研究的大专院校师生参考;也可供矿山机械行业及为其提供产品和服务的相关生产厂家的工程技术人员和经营管理人员使用。

图书在版编目(CIP)数据

高钒高速钢耐磨材料/魏世忠,韩明儒,徐流杰著. —北京:科学出版社,2009

ISBN 978-7-03-025668-3

I. 高… II. ①魏…②韩…③徐… III. 耐磨材料-研究 IV. TB39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 172580 号

责任编辑:耿建业 于宏丽 / 责任校对:陈玉凤

责任印制:赵 博 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2009 年 9 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2009 年 9 月第一次印刷 印张: 22 3/4

印数: 1—2 000 字数: 497 000

定价: 70.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈双青〉)

前 言

本书论述的高钒高速钢耐磨材料是河南省耐磨材料工程技术研究中心近十年来研制的新一代耐磨材料。高钒高速钢是以钒为主要添加元素,辅以铬、钼等其他合金元素,充分利用钒碳化物(VC)硬度高、形态好的特点来提高钢材的硬度、韧性及耐磨性的材料。作为新型耐磨材料,高钒高速钢目前已被用于生产轧辊、锤头、球磨机衬板和转子体等多种矿山机械用耐磨工件。

矿山机械的服役条件非常恶劣,机械零件的磨损十分严重。由于零件的使用寿命短,在生产过程中不得不经常停机检修、更换零部件,有时甚至因零部件的磨损而造成重大事故。工件的磨损是一个复杂的动态过程,其磨损形式主要有磨料磨损、冲蚀磨损、腐蚀磨损、黏着磨损及接触疲劳磨损等。影响磨损的外部因素有载荷大小、相对运动的形式和速度、环境温度和介质等;影响磨损的内部因素有材料的化学组成、组织结构和机械性能等。要提高矿山机械的耐磨性,应先从矿山机械的失效分析入手,找出具体零件的磨损机理及对材料本身的要求,以选择合适的耐磨材料,并采取有效的抗磨措施。研究材料的磨损理论,掌握零件的磨损规律,制造出成本低、寿命长的矿山机械是当代科技领域尤其是冶金、机械制造领域面临的首要问题。

河南省耐磨材料工程技术研究中心从2000年成立开始,依托河南科技大学材料科学与工程学院,组织教授、博士、硕士成立科研梯队,在原有研究成果的基础上,对高钒高速钢进行了系统的研究开发,取得了具有国内领先水平的科技成果,研制出应用于矿山机械粉磨行业的高碳高钒高速钢复合磨辊、复合锤头;开发出应用于冶金行业的半连续铸造电磁复合轧辊等关键耐磨件,深受广大矿山机械企业用户的好评。

河南省耐磨材料工程技术研究中心是由河南省科技厅、河南省教育厅与河南科技大学联合投资兴建的,是国内唯一的省部级耐磨材料工程技术研究中心,是耐磨材料生产技术和优质耐磨材料的聚散地和扩散源。中心集科学研究、新产品开发及其工程化、产业化于一体,正以高科技耐磨(包括耐蚀、耐热)材料产品的独立生产、合作生产、技术入股等多种形式创造辉煌。

本书是河南省耐磨材料工程技术研究中心全体科研技术人员多年心血的结晶和他们科技成果的精华荟萃。前洛阳工学院院长、前河南省耐磨材料工程技术研究中心主任龙锐对初稿的内容、章节安排、写作体例进行审阅,并给予指导。在成书过程中,很多同志给予作者热情的帮助和大力的支持,特别是杨涤新、王顺兴、倪

锋、李炎、陈慧敏、陈跃、马陟祚、彭涛、王强、白万真、王守诚、张新庄、邵抗振等提供了有关的技术资料,李景韩进行了认真校对,王丽红收集了相关资料。在此表示衷心的感谢!

由于本书的内容是近期最新科研成果,理论与技术上都有需要完善之处,加之作者水平有限,如有不妥之处,敬请读者批评指正。

作 者

2009年6月

目 录

前言

第 1 章 耐磨材料研究与生产的发展趋势	1
1.1 磨损问题对国民经济的重要意义	1
1.2 耐磨材料发展史上的三个重要里程碑	4
1.2.1 第一个里程碑——白口铸铁的应用	4
1.2.2 第二个里程碑——高锰钢的发明	5
1.2.3 第三个里程碑——高铬铸铁研制成功	6
1.3 常用耐磨材料	6
1.3.1 奥氏体锰钢	6
1.3.2 低合金耐磨钢	7
1.3.3 镍硬铸铁	7
1.3.4 低铬白口铸铁	7
1.3.5 高铬铸铁	8
1.3.6 耐磨硬质合金	8
1.4 耐磨材料的研究现状	9
1.4.1 高锰钢的合金化及变质改性处理	10
1.4.2 中锰钢及变质改性处理	10
1.4.3 超高锰钢及低碳高锰钢的研制	11
1.4.4 白口铸铁研究的新进展	11
1.4.5 复合材料的应用	12
1.4.6 金属磁性衬板的研制	12
1.4.7 低合金耐磨球墨铸铁的研制	13
1.4.8 中碳多元合金钢的研制	13
1.5 国内外耐磨材料研究和生产的发展趋势.....	13
1.5.1 对耐磨材料的基本要求	13
1.5.2 耐磨材料研究的方向	14
1.5.3 耐磨材料工业的发展方向	15
参考文献	16
第 2 章 摩擦学的定义及研究的主要内容	18
2.1 摩擦学原理.....	18

2.1.1 摩擦的概念	18
2.1.2 摩擦学的研究	19
2.1.3 摩擦的分类	20
2.2 摩擦定律	21
2.2.1 古典摩擦定律	21
2.2.2 摩擦理论	22
2.3 金属材料的摩擦	26
2.3.1 金属材料摩擦的分类	26
2.3.2 在空气中表面未沾染的洁净金属的摩擦性能	27
2.3.3 去汽金属表面的摩擦性能	28
2.4 非金属材料的摩擦	30
2.4.1 脆性固体的摩擦	30
2.4.2 聚合物的摩擦	32
参考文献	35
第3章 磨料磨损的特征及分类	36
3.1 磨料磨损的定义及特征	36
3.1.1 人类对摩擦磨损的认识	36
3.1.2 磨损的定义	37
3.1.3 磨料磨损的三要素	37
3.1.4 磨料磨损的主要特征	38
3.2 磨料磨损的分类	38
3.2.1 决定摩擦磨损系统的三因素	38
3.2.2 磨损分类的七种方法	39
3.2.3 磨料磨损研究的新进展	40
3.3 磨损的评定方法	41
3.3.1 磨损量	42
3.3.2 磨损率	42
3.3.3 耐磨性	42
3.3.4 冲蚀磨损率	43
3.4 静载条件下的表面接触及应力分布	43
3.5 动载条件下的表面接触及应力分布	45
参考文献	49
第4章 高钒高速钢的研究开发与应用状况	51
4.1 高速钢的百年发展历程	51
4.1.1 高速钢的定义	51

4.1.2 高速钢的诞生	51
4.1.3 高速钢的发展	52
4.1.4 高速钢发展年表	54
4.1.5 高速钢化学成分及性能表	55
4.2 高钒高速钢的由来	55
4.2.1 新型耐磨材料——高钒高速钢	55
4.2.2 高钒耐磨合金优良的特性	59
4.3 高钒高速钢的化学成分	60
4.3.1 高速钢的成分沿革	60
4.3.2 高碳高钒高速钢的化学成分特点	60
4.4 高钒高速钢的组织与性能	62
4.4.1 高钒高速钢的凝固组织	62
4.4.2 高钒高速钢的热处理	63
4.4.3 高钒高速钢的耐磨性和磨损机理	63
4.4.4 高钒高速钢的断裂韧性	64
4.5 高钒耐磨合金钢的粉末冶金技术	65
4.5.1 高钒耐磨合金钢制程的优点	65
4.5.2 高钒耐磨钢 CPM 10V 的特性	65
4.6 国内外高钒高速钢的研究应用现状	68
4.7 高钒高速钢研发过程中有待解决的问题	70
4.7.1 应用范围	71
4.7.2 化学成分	71
4.7.3 凝固过程	71
4.7.4 组织形态	71
4.7.5 热处理工艺	72
4.7.6 磨损性能与机理的研究	72
4.8 本书关于高钒高速钢研究的主要内容	72
参考文献	73
第 5 章 研制高钒高速钢的实验方法	76
5.1 高钒高速钢化学成分设计	76
5.2 熔化工艺	76
5.3 定向凝固实验	77
5.3.1 定向凝固实验目的和装置	77
5.3.2 试样制备及实验方法	77
5.3.3 检测方法	78

5.4	在连续冷却条件下的冷却曲线与相变温度的测定	78
5.4.1	冷却曲线的测定	78
5.4.2	相变温度的确定	79
5.5	力学性能测试	79
5.6	磨损性能测试	79
5.6.1	滑动磨粒磨损实验	79
5.6.2	滚动磨损实验	80
5.6.3	冲击磨损实验	81
5.7	金相组织与相的检测方法	83
5.7.1	显微组织与相的分析	83
5.7.2	残余奥氏体的测定方法	83
	参考文献	83
第6章	高钒高速钢凝固结晶过程与组织研究	84
6.1	高钒高速钢定向凝固过程研究	84
6.1.1	典型成分高速钢的凝固过程分析	84
6.1.2	(Fe-5Cr-2Mo-9V)-C 准二元相图	89
6.1.3	分析与讨论	91
6.2	高钒高速钢中碳化钒的形态分布研究	92
6.2.1	实验条件	92
6.2.2	碳化物形态与分布	93
6.2.3	分析与讨论	95
6.3	高钒高速钢碳化钒类型及其超细结构	98
6.3.1	钒的存在形式	98
6.3.2	碳化钒的相结构分析	98
6.3.3	碳化钒中的精细结构分析	100
6.3.4	碳化钒的成分分析	101
6.3.5	碳化钒的 HREM 分析	102
6.4	碳化钒和基体界面	104
6.4.1	碳化钒(VC)与基体界面相结构分析	104
6.4.2	碳化钒和基体界面高分辨电镜分析	105
6.4.3	碳化钒与基体界面的成分分析	107
6.5	本章小结	107
	参考文献	108
第7章	高钒高速钢磨粒磨损性能研究	110
7.1	化学成分对组织性能的影响	110

7.1.1 实验条件	110
7.1.2 实验结果	111
7.1.3 分析与讨论	117
7.2 高钒高速钢的热处理工艺研究	118
7.2.1 热处理对残余奥氏体含量的影响	118
7.2.2 神经网络预测残余奥氏体量的研究	121
7.2.3 硬度及冲击韧性	126
7.3 热处理和组织对高钒高速钢磨损性能的影响	127
7.3.1 淬火回火温度对耐磨性影响	127
7.3.2 多次回火对高钒高速钢硬度及磨粒磨损性能的影响	128
7.3.3 碳化钒含量对磨粒磨损性能的影响	129
7.3.4 残余奥氏体对耐磨性能的影响	130
7.4 高钒高速钢与高铬铸铁、高锰钢比较研究	131
7.4.1 金相组织	132
7.4.2 硬度、冲击韧性和磨粒磨损实验结果	132
7.4.3 磨损机理探讨	133
7.5 本章小结	134
参考文献	135
第8章 高钒高速钢滚动磨损性能研究	136
8.1 冷轧轧辊摩擦磨损实验机研制	136
8.1.1 轧辊摩擦磨损实验机现状	136
8.1.2 方案设计	138
8.1.3 轧制力学参数的确定	139
8.1.4 仪器的选取	141
8.1.5 实验机性能测试	142
8.2 实验轧辊的受力分析	146
8.2.1 实验条件	146
8.2.2 等效应力计算	148
8.2.3 剪应力计算	149
8.3 高钒高速钢和高铬铸铁滚动磨损研究	151
8.3.1 试样材料及试样	151
8.3.2 滚动磨损实验结果	152
8.3.3 滚动磨损机理讨论	155
8.4 轧辊材质摩擦磨损性能测定装置的研制	158
8.4.1 轧辊摩擦磨损性能测定装置的工作原理	159

8.4.2 轧辊摩擦磨损性能测定装置的结构	160
8.4.3 实验装置主要技术参数	162
8.4.4 验证结果	162
8.4.5 结论	163
8.5 本章小结	163
参考文献	163
第9章 高钒高速钢冲击磨损性能与机理的研究	165
9.1 碳含量对高钒高速钢冲击磨损性能的影响	165
9.1.1 实验条件	165
9.1.2 实验结果	166
9.1.3 分析与讨论	167
9.2 高钒高速钢冲击磨损性能与机理的研究	169
9.2.1 高钒高速钢、高铬铸铁实验条件	169
9.2.2 高钒高速钢、高铬铸铁冲击磨损实验结果	171
9.2.3 分析与讨论	172
9.3 本章小结	176
参考文献	176
第10章 关于高钒高速钢的磨粒磨损稳定性问题探讨	177
10.1 残余奥氏体含量、硬度及冲击韧性对磨粒磨损性能之间的关系	177
10.2 磨损稳定性及磨损稳定性因子的概念	179
10.3 硬度对磨损稳定性的影响	179
10.4 冲击韧性对稳定性的影响	180
10.5 残余奥氏体量对磨损稳定性的影响	181
10.6 讨论	182
10.6.1 磨损稳定性的影响因素	182
10.6.2 相对耐磨性与磨损稳定性的关系	185
10.7 本章小结	185
参考文献	185
第11章 化学成分对高钒高速钢组织性能的影响	186
11.1 碳对高钒高速钢碳化物种类的影响	186
11.1.1 实验条件	186
11.1.2 实验结果	186
11.1.3 结论	188
11.2 碳对高钒高速钢凝固过程的影响	188
11.2.1 实验条件	189

11.2.2 实验结果及分析	190
11.2.3 高钒高速钢结晶过程分析与讨论	192
11.2.4 结论	194
11.3 碳含量对高钒高速钢滚动磨损性能的影响	194
11.3.1 实验条件及方法	194
11.3.2 实验结果与分析	195
11.3.3 讨论	199
11.3.4 结论	200
11.4 碳含量对高钒高速钢冲击磨损性能的影响	201
11.4.1 实验条件	201
11.4.2 实验结果及分析	204
11.4.3 讨论	208
11.4.4 结论	208
11.5 钒含量对高碳高钒高速钢组织与性能的影响	208
11.5.1 实验条件及方法	209
11.5.2 实验结果及分析	209
11.5.3 结论	213
11.6 碳钒含量对高钒高速钢组织和性能的影响	213
11.6.1 实验材料和方法	213
11.6.2 实验结果	214
11.6.3 结论	220
11.7 钾盐复合变质剂对高钒高速钢中碳化钒形态与分布的影响	220
11.7.1 实验条件及方法	221
11.7.2 实验结果	221
11.7.3 分析讨论	225
11.7.4 结论	226
参考文献	226
第 12 章 基体组织和残余奥氏体量对高钒高速钢耐磨性能的影响	229
12.1 基体组织对高钒高速钢耐磨性能的影响	229
12.1.1 实验条件	229
12.1.2 实验结果	230
12.1.3 讨论	233
12.1.4 结论	234
12.2 残余奥氏体量对高钒高速钢硬度、冲击韧性和耐磨性的影响	234
12.2.1 实验材料和方法	234

12.2.2	实验结果	236
12.2.3	残余奥氏体量对硬度、冲击韧性与耐磨性能的影响	238
12.2.4	结论	239
	参考文献	240
第 13 章	热处理工艺及其力学性能对高钒高速钢耐磨性能的影响	241
13.1	热处理工艺对高钒高速钢组织与耐磨性能的影响	241
13.1.1	实验条件	241
13.1.2	实验结果及分析	243
13.1.3	讨论	248
13.1.4	结论	249
13.2	热处理对高钒高速钢中残余奥氏体量的影响	249
13.2.1	实验条件	249
13.2.2	实验结果	250
13.2.3	结论	252
13.3	硬度及冲击韧性对高钒高速钢磨损稳定性的影响	252
13.3.1	实验部分	253
13.3.2	结果与分析	254
13.3.3	结论	259
	参考文献	259
第 14 章	高钒高速钢复合导轮、锤头和磨辊的研制	261
14.1	高速线材轧机导轮的研制	261
14.1.1	高速线材轧机导轮的工况条件	261
14.1.2	导轮技术要求	261
14.1.3	制造导轮使用的几种材料比较	262
14.1.4	镍铬合金奥氏体型钢导轮的铸造	263
14.1.5	导轮使用效果	264
14.2	表面复合渗镀耐磨合金导轮的研制	264
14.2.1	表面复合渗镀耐磨合金导轮的钢种成分设计	264
14.2.2	导轮制造热处理工艺分析	265
14.2.3	耐磨性实验和装机实验结果及分析	268
14.2.4	结论	268
14.3	双金属复合耐磨锤头铸造技术	269
14.3.1	双金属复合锤头具有优良的性能	269
14.3.2	镶铸复合锤头	269
14.3.3	双液双金属复合铸造锤头	270

14.3.4 实验结果	272
14.3.5 复合锤头的装机使用情况	273
14.4 高钒高速钢锤头的研制及使用	273
14.4.1 材料	273
14.4.2 冶炼、铸造工艺及热处理工艺	276
14.4.3 工业实验	277
14.4.4 结论	277
14.5 高钒高速钢/碳钢双金属复合锤头铸造工艺的改进	277
14.5.1 研制条件	277
14.5.2 研制结果与分析	279
14.5.3 结论	281
14.6 高钒高速钢复合磨辊在辊式破碎机上的应用	281
14.6.1 磨辊材料的选择	281
14.6.2 复合磨辊的生产工艺要点	282
14.6.3 高钒高耐磨合金复合磨辊的金相组织与机械性能	284
14.6.4 磨辊的耐磨性	285
14.6.5 结论	287
参考文献	287
第 15 章 高钒高速钢耐磨轧辊的研制	288
15.1 国内外高钒高速钢优质复合轧辊研制的现状及进展	288
15.1.1 研制优质轨辊的重要意义	288
15.1.2 国外高钒高速钢优质复合轧辊研制的现状	288
15.1.3 我国高速钢复合轧辊的研究及广阔生产前景	289
15.2 高钒高速钢复合轧辊的制造方法	290
15.2.1 铸造复合轧辊的方法及技术经济性能比较	290
15.2.2 高钒高速钢复合轧辊的化学成分	291
15.2.3 高钒高速钢的磨损机理	292
15.2.4 合金元素对高钒高速钢耐磨性的影响	292
15.2.5 结论	293
15.3 高钒高速钢/35CrMo 复合轧辊界面组织与性能研究	293
15.3.1 实验方法	293
15.3.2 实验结果及分析	294
15.3.3 结论	298
15.4 电磁复合铸造轧辊界面组织和性能研究	298
15.4.1 实验方法	299

15.4.2	实验结果及分析	301
15.4.3	结论	306
15.5	Fe-V-Cr-Mo 合金轧辊显微组织及磨损性能研究	306
15.5.1	高速钢轧辊化学成分的优化	306
15.5.2	实验条件	307
15.5.3	实验结果	308
15.5.4	讨论	310
15.5.5	结论	311
15.6	高钒高速钢、高铬铸铁复合轧辊界面对比	312
15.6.1	试样制备与实验方法	312
15.6.2	实验结果与分析	313
15.6.3	结论	316
15.7	高钒高速钢冷轧辊磨损性能与机理研究	316
15.7.1	实验条件及方法	316
15.7.2	实验结果与分析	317
15.7.3	讨论	324
15.7.4	结论	325
15.8	滚滑动条件下高钒高速钢轧辊摩擦磨损性能研究	325
15.8.1	实验条件	325
15.8.2	结论	331
	参考文献	331
附录	金属钒的应用与钒合金的发展	334
1	金属钒的基本知识与用途	334
1.1	金属钒的基本知识	334
1.2	金属钒的发现	334
1.3	五光十色的钒化合物	335
1.4	钒是人体必需的微量元素	336
2	世界钒资源的分布与生产	337
3	钒钢的发展	338
4	中国钒钢生产能力大增	338
5	钒在钢及合金中的应用	339
5.1	钒在钢中应用	339
5.2	钒在金属合金中应用	340
6	钒在化工、玻璃、制药等行业中的应用	341
6.1	钒在化工工业中的应用	341

6.2 钒在玻璃工业中的应用	341
6.3 钒在制药工业中的应用	342
6.4 钒在电子工业中的应用	342
6.5 钒可用于制造绿色环保电池	342
7 钒在国防工业中的应用	344
7.1 钒用于制造航空航天飞机上的光学转换涂层	344
7.2 钒用于核聚变反应堆	344
参考文献	345

第1章 耐磨材料研究与生产的发展趋势

1.1 磨损问题对国民经济的重要意义

改革开放 30 年来,我国国民经济持续高速发展,钢铁、煤炭、水泥等产量均居世界首位。特别是钢铁,据国家统计局公布的数据:中国钢产量自 1995 年跃居世界第一位起,已连续 15 年位居世界第一。2000 年中国钢产量首次突破 $1 \times 10^8 \text{t}$, 达 $1.2850 \times 10^8 \text{t}$, 同比增长 4.33%; 2001 年 $1.5103 \times 10^8 \text{t}$, 同比增长 17.53%; 2002 年 $1.8225 \times 10^8 \text{t}$, 同比增长 20.67%; 2003 年 $2.2234 \times 10^8 \text{t}$, 同比增长 21.99%; 2004 年 $2.7280 \times 10^8 \text{t}$, 同比增长 22.69%; 2005 年 $3.5580 \times 10^8 \text{t}$, 同比增长 30.43%; 2006 年 $4.2266 \times 10^8 \text{t}$, 同比增长 18.79%; 2007 年 $4.8924 \times 10^8 \text{t}$, 同比增长 15.75%。在世界经济危机的背景下,2008 年我国钢产量仍然突破 $5 \times 10^8 \text{t}$ 大关,达到 $5.0116 \times 10^8 \text{t}$, 同比增长 2.44%^[1]。

在上述工业产品产量快速增长的过程中,原材料(如矿石)、半成品(如生产水泥熟料)、成品(如金刚砂)的破碎、粉磨工作量激增,消耗了大量的耐磨材料。耐磨材料广泛应用于矿山、建材、冶金、电力及铁路等行业的耐磨零件的制造,如破碎机的颚板锤头、球磨机衬板、磨球、磨段等,其中衬板是主磨损件,磨球、磨段更是大宗消耗材料。

据国外工业发达国家统计,全世界每年钢材因腐蚀、磨损损失,占钢材总产量的 18%,经济损失占国民经济总产值的 38%~48%。例如,美国能源部 2006 年完成的未来工业材料研究进展估计,美国工业每年因摩擦、磨损、腐蚀造成的损失高达 3000 亿美元^[2]。英国的统计数据显示,由于摩擦磨损造成的经济损失每年至少在 5 亿英镑以上,相当于年国民生产总值的 1.1%以上。加拿大的调查表明,摩擦磨损引起的损失每年可达 50 亿加元。在日本统计的 700 例设备故障中,因润滑不良造成故障的有 253 例,占 36%以上^[3]。2004 年 12 月 27 日,在中国工程院与国家自然科学基金委员会联合召开的“摩擦学科与工程前沿研讨会”上,中国石油大学的张嗣伟指出,中国每年由于摩擦磨损损失 584.7 亿元^[4]。

我国已成为耐磨材料的生产、消耗大国。据初步统计,国内年生产和消耗衬板、磨球、磨段等耐磨材料约 $3 \times 10^6 \text{t}$, 价值达 300 亿元人民币,数字惊人^[2]。尽管这些统计数字不一定十分精确,但也可以预见摩擦学的研究在经济效果上有巨大的潜力。磨损件很快失效、频繁更换,不仅浪费大量金属材料,而且造成巨大的停