

磨损理论与 抗磨技术

林福严 曲敬信 陈华辉 编

科学出版社



TH711

L57

磨损理论与抗磨技术

林福严 曲敬信 陈华辉 编

科学出版社

1993

(京)新登字 092 号

内 容 简 介

本书围绕磨损理论与抗磨技术这一主题,论述了近 10 年来磨料磨损、冲蚀磨损、腐蚀磨损、疲劳磨损等各种磨损形式的国内外研究现状、磨损机理、影响因素及测试方法等,分析了部分钢铁耐磨材料及其磨损特性,介绍了表面化学处理、耐磨胶粘涂层、激光表面强化、电刷镀、流镀、塑料喷涂、陶瓷喷涂等现代表面抗磨技术的最新研究成果。

本书可供冶金、材料以及机械设计、制造、维修等有关专业的工程技术人员阅读,也可供科研人员及大专院校师生参考。

磨损理论与抗磨技术

林福严 尚敬信 陈华辉 编

责任编辑 杨家福 马长芳

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100707

国防科工委印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1993 年 6 月 第 一 版 开本: 787×1092 1/16

1993 年 6 月 第一次印刷 印张: 15 % 插页: 1

印数: 1—2500 字数: 360 000

ISBN 7-03-003437-6/TB·108

定价: 15.00 元



邵荷生教授

欣逢邵荷生教授七十寿辰,为了祝贺邵先生在磨损理论与抗磨技术领域所做的突出贡献并表示对他的敬意,谨将邵先生和我们在他的关怀和指导下完成的论著,编辑成书,以为纪念.

前 言

磨损是机械零件失效的主要形式之一,磨损还会造成机械设备运转效率降低、工件更换或维修频繁、能源消耗增加,等等.由于磨损而造成的经济损失是相当惊人的.据美国材料政策委员会测算,美国每年由于磨损造成的经济损失约 150 亿美元;前联邦德国技术科学部估测,磨损造成的损失每年达 100 亿马克;据不完全统计,我国仅工件的磨料磨损一年就消耗钢材 150 万吨以上.因此,磨损问题越来越引起人们的普遍重视,磨损理论与抗磨技术的研究在世界各国方兴未艾.

磨损是非常复杂的、系统性很强的动态过程.它牵涉到摩擦系统中工件的外部因素和材料的内部因素.外部因素系指载荷、相对运动形式、运动速度和持续时间、环境温度、介质和润滑状态等;内部因素主要是指材料的化学成分、组织结构和力学性能等.摩擦系统中任一因素的变化都可能引起磨损规律及磨损机制的变化,因此磨损理论研究是一项艰巨而复杂的工作.为了便于进行深入讨论,一般需要研究各种材料在不同条件下的磨损规律和磨损机理,以期在不同工况下选用耐磨材料提供参考.本书涉及到的各主要磨损类型有磨料磨损、冲蚀磨损、腐蚀磨损、粘着磨损及接触疲劳磨损.它们虽然不能完全代表工件的实际磨损工况,但如果把试验结果应用于某些主要现象与其类似的工况,这些结果还是具有指导作用的.由于磨损的复杂性,迄今为止还没有较为系统和成熟的磨损理论和磨损计算公式.本书部分文章就一些典型的磨损机理和模型进行了初步探讨,虽然它们还不够完善和成熟,但对摩擦学工作者还是有一定的指导意义和借鉴作用的.

改善零件的磨损性能,提高其使用寿命,往往离不开耐磨材料和表面抗磨技术.本书研究和探讨了钢的化学成分、组织结构、热处理制度等对其磨损特性的影响,也介绍了表面化学处理、耐磨胶粘涂层、激光表面强化、电刷镀、流镀、塑料喷涂、陶瓷喷涂等现代表面抗磨技术等.期盼它们能起到推广表面强化技术应用的作用.

本书共分五个部分.第一部分由陈华辉同志组稿;第二部分由林福严同志组稿;第三部分由曲敬信、陈华辉同志组稿;第四部分由曲敬信同志组稿;第五部分由林福严同志组稿.全书所有论文都是在邵荷生教授直接指导下完成的.钢铁研究总院张清高级工程师审阅了全稿.

在本书的出版过程中,王捧柱、杨院生、丁钢等同志做了大量工作,在此向他们表示衷心的感谢!

由于水平所限,书中难免存在缺点和错误,欢迎读者指正.

林福严 曲敬信 陈华辉

1992 年 12 月 20 日

• i •

目 录

第一部分 磨料磨损

煤的磨料磨损特性研究.....	1
不同煤种精选煤的干磨料磨损的研究	11
煤粒和石英砂作为磨料的三体磨料磨损特性	17
塑性材料的三体磨料磨损转化机制	23
磨料磨损磨屑的计算机图象分析方法研究	30
钢的力学性能参数对耐磨料磨损性能影响的研究	39
固溶强化对铁素体-珠光体钢磨损和机械性能的影响	46
单磨粒磨损的初步研究	55
刮板输送机中部槽磨损机理的研究	60

第二部分 冲蚀磨损

固体粒子冲蚀磨损试验机研究	64
新型浆体冲蚀磨损试验机研制	70
低角冲蚀磨损机理的研究	76
软磨料冲蚀磨损机理的研究	83
对面心立方材料冲蚀磨损的研究	89
冲蚀磨损理论模型的研究	96
冲击速度对浆体冲蚀磨损的影响.....	102
冲击角度对浆体冲蚀磨损的影响.....	107

第三部分 腐蚀磨损

煤水浆体的腐蚀磨料磨损特性的研究.....	116
冲蚀速度和 pH 值对钢腐蚀磨损性能的影响	123
Ni-Co-P/B ₄ C 复合流镀层的腐蚀磨损机理	132
激光熔敷镍基合金层与钢的耐腐蚀-冲蚀磨损性能研究	139

第四部分 耐磨钢

新型高强韧性奥-贝组织低合金钢的研究	146
一种新型贝氏体组织的研究.....	152
新型高强韧性奥-贝钢及其抗冲击磨料磨损特性的研究	155
新型奥氏体-贝氏铁素体双相钢两体磨料磨损特性的研究	162

新型高强韧性奥-贝钢及其接触疲劳磨损特性的研究	166
奥-贝钢滑动磨损特性及三维磨损机制图的研究	172
奥氏体在冲击磨料磨损过程中的作用	178
奥-贝钢滑动磨损过程中 $\alpha \rightleftharpoons \gamma$ 相变及白层组织的研究	183

第五部分 表面耐磨新技术

耐磨胶粘涂层气固冲蚀磨损的研究	189
耐磨胶粘涂层的冲蚀磨损及其在煤水泵上的应用	194
渗硼层磨料磨损特性的研究	200
热模具钢渗硼层热磨料磨损特性的研究	205
45 钢激光包覆镍基合金及其性能的研究	211
复合流镀镍基合金的试验研究	216
复合尼龙涂层的腐蚀-冲蚀磨损机理研究	223
复合陶瓷涂层的腐蚀-磨料磨损特性	230
电刷镀镍-磷合金镀层磨损特性研究	239

第一部分 磨料磨损

煤的磨料磨损特性研究

邵荷生 陈华辉

摘要 为了搞清煤对矿山机械的磨损及其机制,用不同碳含量的钢在改装的 M-200 磨损试验机上进行了原煤、浮选煤和具有不同石英砂含量的煤的三体磨料磨损试验.结果表明,煤和材料的硬度比 H_0/H_m 大于 0.64 时,会造成材料的硬磨料磨损,但煤的磨料磨损机制同其他磨料不同.煤粒在磨损过程中发生某些弹塑性变形,使材料产生犁沟、塑变,最终断裂而磨失.其机理类似于塑性金属的一般断裂机理,而直接的显微切削现象甚少.煤中石英含量的增加使材料的磨损率增大,磨损率和煤中的自由石英含量呈线性比例关系.

一、引言

煤矿中的采掘机械和运输机械,以及电力工业中的磨煤机械等,都存在着严重的磨损问题.它们的磨损不仅直接造成金属的大量损耗,而且直接影响着煤炭的生产并使发电成本提高.对此问题,国外早就开始了研究^[1].近年来,国内也有人模拟风扇磨工况进行煤的冲刷磨损实验^[2].他们得出,纯煤引起金属的磨损很小,甚至不产生磨损,对金属起磨损作用的只是煤中那些硬度高而含量又多的矿物质.然而,无论是采煤机和运输机,还是风扇磨煤机,接触的主要物质都是原煤,而其中的硬矿物量是相当少的.若根据上述某些研究结论,则可认为造成金属的磨损不会十分严重.而实际上,上述机器的磨损却相当严重.因此,本文就煤是否造成磨损,以及煤的磨料磨损特性进行了初步研究.

二、实验材料及实验方法

1. 实验材料及热处理规范

实验材料为不同碳含量的钢,经正火及淬火后 200℃ 回火两种处理,以便得到不同的材料硬度.实验材料的化学成分及热处理规范见表 1.

表 1 实验材料的化学成分及热处理规范

钢号	化 学 成 分 (%)						热 处 理 状 态	维氏硬度 (HV)	显 微 组 织
	C	Mn	Si	S	P	V			
A	0.18	1.37	0.29	0.041	0.010	—	热 轧	155—160	带状组织
B	0.20	1.40	0.38	0.014	0.047	—	热 轧 880℃ 淬火+200℃ 回火	190—195 390—400	粗大带状组织 回火马氏体
C	0.22	1.65	0.29	0.008	0.020	—	880℃ 正火 840℃ 淬火+200℃ 回火	210—212 420	铁素体+珠光体 回火马氏体
E	0.35	1.60	0.29	0.009	0.020	—	830℃ 淬火+200℃ 回火	520	回火马氏体
G	0.76	0.33	0.20	0.012	0.014	—	800℃ 正火	243	珠光体+少量铁素体
H	0.21	1.42	0.26	0.020	0.024	0.13	800℃ 淬火+400℃ 回火	370—390	

2. 实验方法

磨损实验在 M-200 磨损试验机上进行. 加载系统改装为杠杆加载, 磨损方式如图 1 所示. 磨轮材料为 20MnVK (H 钢) 经淬火后 400℃ 回火处理, 维氏硬度为 370—390HV. 轮缘线速度为 0.86m/s. 试样为不同碳含量的钢. 实验内容见表 2.

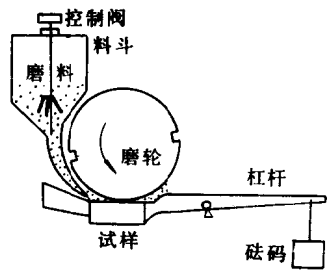


图 1 M-200 试验机工作方式示意图

表 2 磨损实验内容

序号	实验材料	磨 料	载 荷 (N)
1	热轧态 B 钢	不同粒度无烟煤* 60 目无烟煤中加入 不同石英含量	98
			98
2	热轧态 A 钢	60 目无烟煤	17.6 —117.6
3	所有实验材料	60 目浮煤**	31.4

* 门头沟矿无烟煤破碎后筛分.

** 用浮沉法选出的浮煤.

每个磨轮对应一种状态的试样, 磨轮新表面用煤磨合 2min. 试样在试验前后, 用丙酮清洗并烘干, 然后在精度为 0.0001g 的天平上称量. 由失重换算成单位滑动距离、单位载荷下的磨失体积来评定材料的磨损. 相对耐磨性 $e = \frac{\text{热轧态 B 钢磨损失重}}{\text{试验材料磨损失重}}$.

三、实验结果

1. 60 目浮煤磨损实验

为了排除煤中硬矿物如石英、黄铁矿的影响, 应用浮沉法进行选煤. 其过程为: 门头沟矿大块无烟煤 $\xrightarrow{60 \text{ 目}}$ 破碎 $\xrightarrow{60 \text{ 目}}$ 筛分 $\xrightarrow{60 \text{ 目}}$ 水清洗 $\xrightarrow{60 \text{ 目}}$ 烘干 $\xrightarrow{60 \text{ 目}}$ 浮选 $\xrightarrow{60 \text{ 目}}$ 浮煤烘干 $\xrightarrow{60 \text{ 目}}$ 水洗 $\xrightarrow{60 \text{ 目}}$ 烘干后备用. 浮选液为四氯化碳+三溴甲烷, 密度为 1.8. 煤的镜质组硬度为 138—174HV. 表 3 列出了磨损实验结果.

表 3 60 目浮煤磨损实验结果

实验材料	维氏硬度 (HV)	摩擦系数 μ	平均失重 (g)	平均磨失体积		相 对 耐磨性 ε	相对 磨损 ε^{-1}	煤平均硬度 与材料硬度 之比 H_a/H_m	磨损系数 K
				(mm ³)	[mm ³ / (mm · N)]				
A-0**	155—160	0.63—0.72	1.269	162.69	8.96×10^{-6}	0.74	2.11	1.0	1.43×10^{-2}
B-0	190—195	0.66—0.69	0.943	120.90	6.66×10^{-6}	1.0	1.0	0.82	1.26×10^{-2}
C-1**	210—212	0.34—0.66	0.250	32.05	1.77×10^{-6}	3.77	0.27	0.74	3.72×10^{-3}
G-1	243	0.28—0.31	0.012	1.49	8.18×10^{-8}	81.46	0.012	0.64	1.99×10^{-4}
B-2**	390—400	0.28—0.31	0.003	0.39	2.11×10^{-8}	314.42	0.003	0.40	8.37×10^{-5}
C-2	420	0.28	0.002	0.26	1.41×10^{-8}	438.72	0.002	0.37	5.92×10^{-5}
E-2	520	0.28—0.34	0.001	0.13	7×10^{-9}	943.25	0.001	0.30	3.66×10^{-5}
B-2	390—400		0.0076*						

* 磨损时间为 1.25h.

** 0——热轧; 1——正火; 2——200℃回火.

2. 不同石英含量的 60 目无烟煤磨损实验

分别往 60 目无烟煤中加入石英砂, 石英砂为 60 目无烟煤含量的 5%, 10%, 15%, 以此作为磨料进行了磨损实验. 实验材料为热轧态 B 钢, 磨损实验结果见表 4.

不同载荷和不同粒度的磨损实验数据较为分散, 此处不予列出, 仅在讨论时作为参考.

表 4 不同石英含量的 60 目无烟煤磨损实验结果

磨 料		载荷 (N)	摩擦系数 μ	平均失重 (g)	平均磨失体积		相对耐磨性 ε	磨损系数 K ($\times 10^{-3}$)
加入的 石英含量 (%)	实际石英含量 (%)				(mm ³)	[10^{-6} mm/ (mm · N)]		
60 目无烟煤	0.78	98	0.56	0.3784	48.5	0.63	1	1.19
5	5.74	98	0.65	1.0969	140.64	1.82	0.35	3.45
10	10.70	98	0.67	2.0711	262.52	3.43	0.18	6.52
15	15.66	98	0.66	3.0961	369.94	5.13	0.12	9.08

四、讨 论

1. 硬度与磨损的关系

图 2 为材料硬度与磨损率的关系. 把此图画成 $\varepsilon, \varepsilon^{-1}$ 与 H_a/H_m 的关系图 (见图 3), 可见 $H_a/H_m = 0.64$ 为一转折点, 当 $H_a/H_m > 0.64$ 时, 随材料硬度提高, 磨损急剧下降. 当 $H_a/H_m < 0.64$ 时, 磨损率几乎趋近于零. $H_a/H_m = 0.64$ 比许多研究者用石英、刚玉等常见磨料求出的 0.8 偏低, 这是因为: H_a 值取自煤中镜质组的平均硬度值, 可能偏低了些, 而实测无烟煤镜质组的硬度范围为 138—174HV; 煤中有少量比较硬脆的丝质组分 (426HV), 可能起的磨损作用较大. 但因丝质组硬度难以测定, 故无法以镜质组和丝质组的综合硬度指标来描述磨损规律.

图 5—10 为实验材料在扫描电子显微镜下的磨损形貌. 明显可见, 随材料硬度提高, 磨痕变浅变细. 图 8 似为一转折, 这与图 2 中硬度的转折点基本对应.

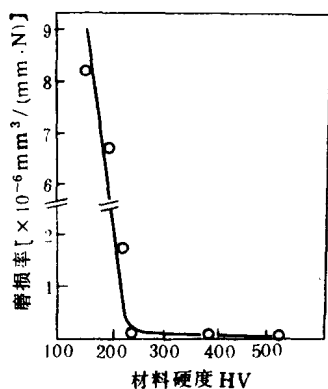


图2 材料硬度与磨损率的关系

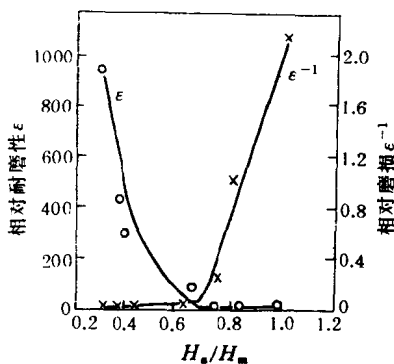


图3 ϵ, ϵ^{-1} 与 H_a/H_m 的关系

2. 煤中矿物对磨损的影响

煤中含有许多种矿物,而硬度较高的矿物为石英和黄铁矿等.材料磨损率与煤中自由石英砂含量成线性关系(见图4).由此可知,煤中硬矿物含量愈多,则造成的磨损就会愈严重.由图11,12对比可知,随石英砂含量增加,磨沟明显变宽变深,且沟槽增多.由表4可知,煤中加入石英砂后,摩擦系数也增大.

用不同粒度无烟煤做的磨损实验结果表明,不同粒度对磨损的影响,实际上为煤中石英含量对磨损的影响.因为煤经破碎后,其粒度愈细,则石英含量愈多(见表5).这可能是由于石英较脆易破碎之故.而石英含量不同比无烟煤粒度不同对磨损的影响要大得多,因此掩盖了粒度的作用.由表5还可知,煤中石英含量增加,则灰分也增加.由以上结果可以认为,材料的磨损率与煤中的自由石英含量成比例.Yancey等人认为,煤中的矿物杂质比煤本身的磨损作用大得多,因而,可用煤中黄铁矿加石英含量来表征煤的磨损特性.

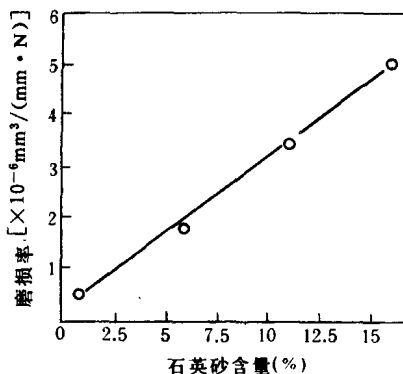


图4 煤中石英砂含量与磨损的关系

表5 不同粒度无烟煤中的矿物含量

粒 度	矿 物 * (%)			有机质 ** (%)		灰分 (%)
	石英	粘土矿物	黄铁矿	镜质组	丝质组	
40 目	1.2	5.6	很少	84.1	15.9	8.04
60 目	0.78	3.14	0.4	95.5	4.5	10.04
80 目	3.0	3.11	<2	97.2	2.8	11.00
100 目	6.0	3.0	0.3	90.4	9.6	11.49
40 目矽石	50.9			49.3	50.7	80.20

* 有机质加矿物含量作为100%计算各矿物含量.

** 有机质作为100%计算镜质组和丝质组含量.

3. 煤的磨损机制

由图3可知,当 $H_a/H_m > 0.64$ 时,煤和金属材料表面接触会造成材料的磨失,而并非像有些人所认为的煤不起磨损作用.这里,我们把 $H_a/H_m > 0.64$ 定义为硬磨料磨损; $H_a/H_m < 0.64$ 定义为软磨料磨损.下面讨论其磨损机制.

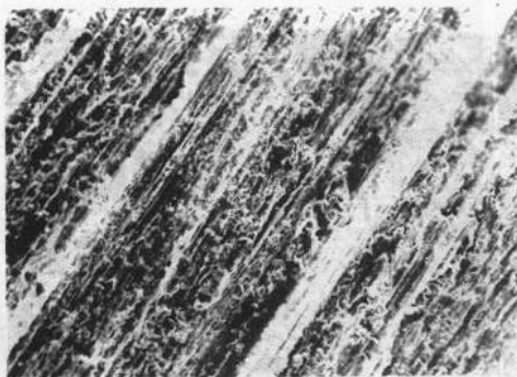


图5 A钢(热轧态)的磨损形貌
(扫描电子显微镜, 50×)

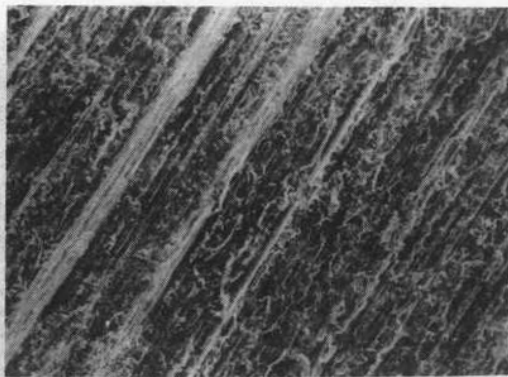


图6 B钢(热轧态)的磨损形貌
(扫描电子显微镜, 50×)

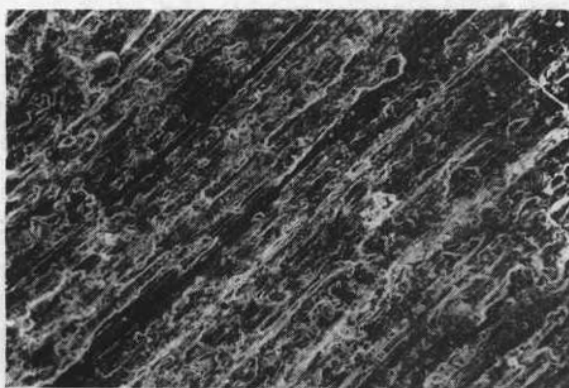


图7 C钢(正火态)的磨损形貌
(扫描电子显微镜, 50×)

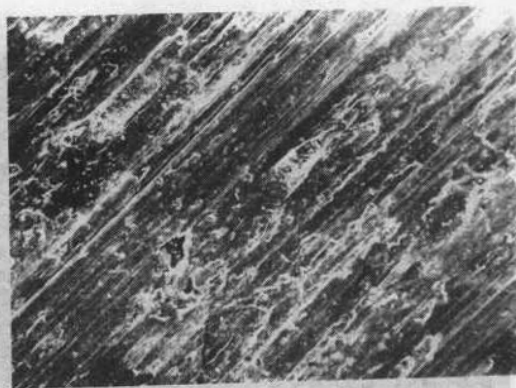


图8 G钢(正火态)的磨损形貌
(扫描电子显微镜, 50×)

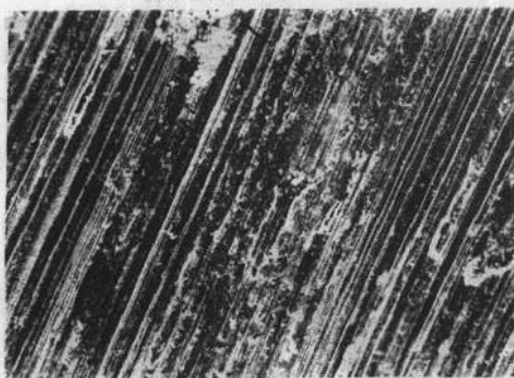


图9 B钢(200℃回火态)的磨损形貌
(扫描电子显微镜, 50×)

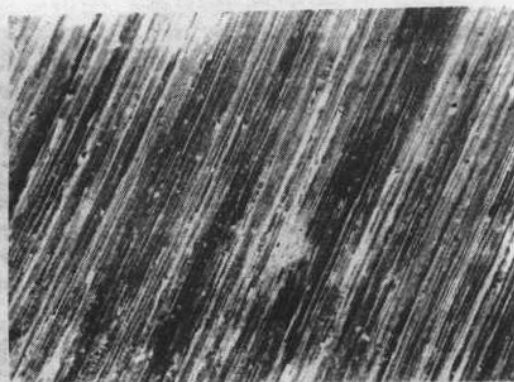


图10 C钢(200℃回火态)的磨损形貌
(扫描电子显微镜, 50×)

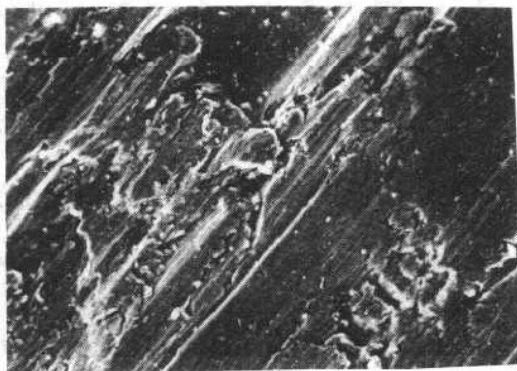


图 11 5%石英砂
(扫描电子显微镜, 350×)

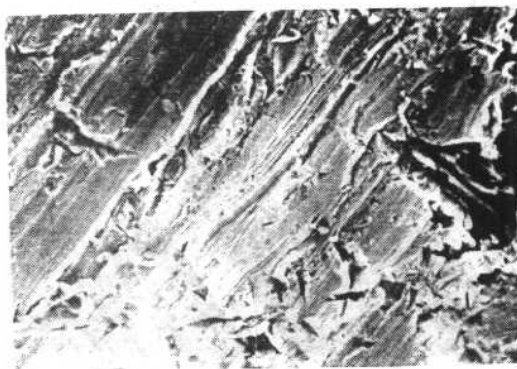


图 12 15%石英砂
(扫描电子显微镜, 350×)

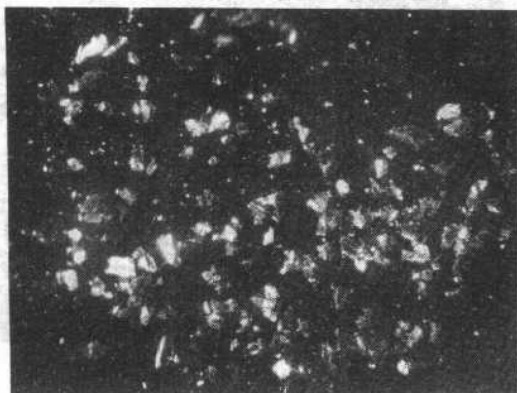


图 13 磨损前煤粒的形貌

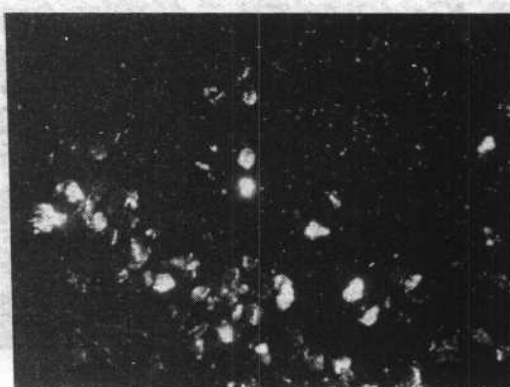


图 14 磨损后煤粒的形貌

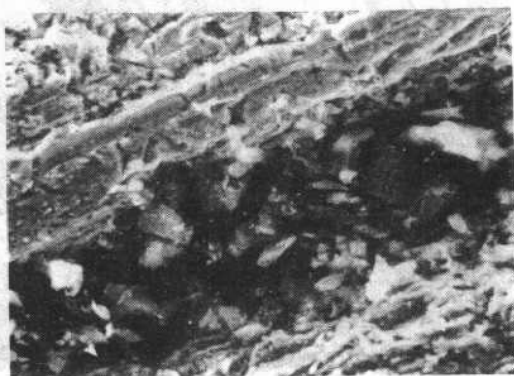


图 15 沟底煤粒
(扫描电子显微镜, 700×)

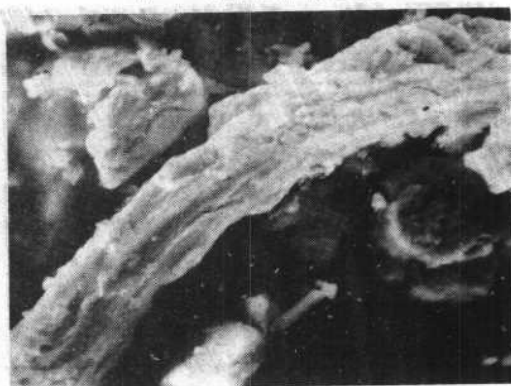


图 16 犁屑(B 钢, 热轧态)
(扫描电子显微镜, 700×)

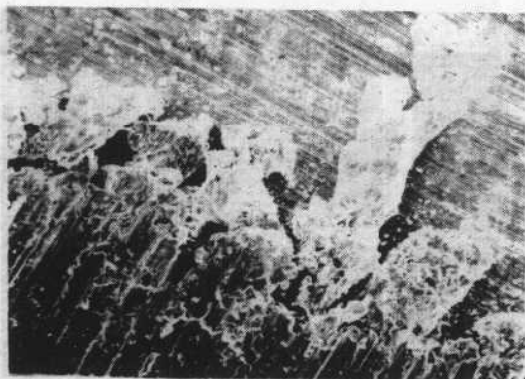


图 17 出口端挤屑(B 钢,热轧态)
(扫描电子显微镜,70×)

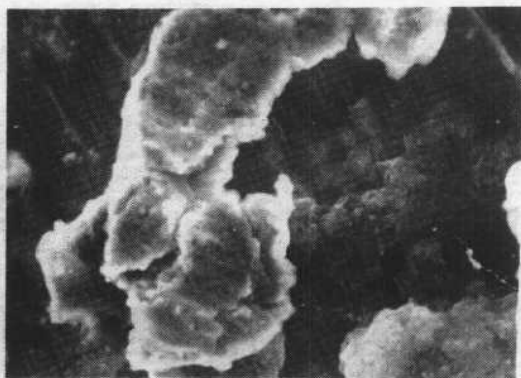


图 18 挤压屑(B 钢,热轧态)
(扫描电子显微镜,700×)

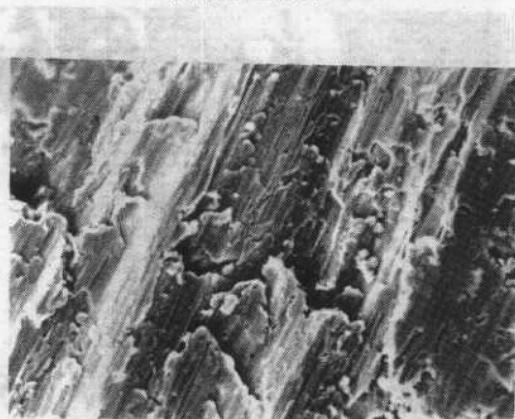


图 19 犁沟后研压(A 钢,热轧态)
(扫描电子显微镜,350×)

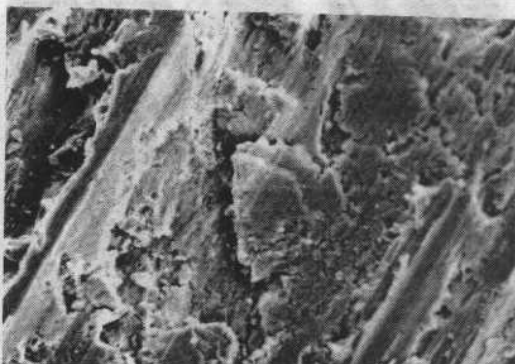


图 20 犁沟后研压(B 钢,热轧态)
(扫描电子显微镜,350×)



图 21 脊隆研压(A 钢,热轧态)
(扫描电子显微镜,350×)

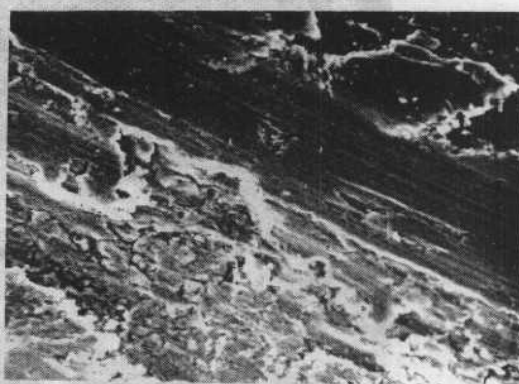


图 22 脊隆研压后断开(A 钢,热轧态)
(扫描电子显微镜,350×)

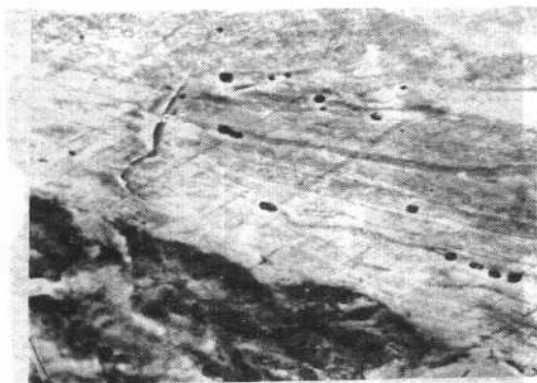


图 23 空洞及空洞拉长(斜截面样品)
(扫描电子显微镜, 700 $\times$)



图 24 裂纹及空洞(斜截面样品)
(扫描电子显微镜, 1400 $\times$)

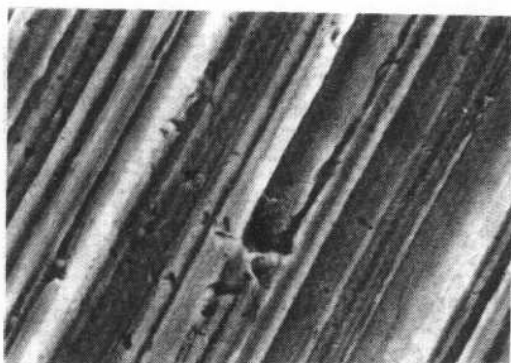


图 25 犁沟中断(扫描电子显微镜, 1400 $\times$)



图 26 坑底裂纹(扫描电子显微镜, 900 $\times$)



图 27 变形层硬度变化(扫描电子显微镜, 600 $\times$)

(1)硬磨料磨损. 通常的硬磨料为碳化硅或石英砂等, 当磨损金属时, 它们的磨损方式一般为切削和犁沟. 煤的磨损方式主要是以犁沟塑变为主(见图 20), 说明煤的切削性质比一般的硬磨料要差得多. 这是由于煤与石英砂等不同, 煤具有一定的弹性和塑性^[3], 在一定的外载荷作用下, 由于煤的弹性模数比钢低得多(若煤的弹性模数 E 为 6370MPa, 则比钢的弹性模数 $E = 205800\text{MPa}$ 约低两个量级), 因此煤首先发生了弹性变形. 如把煤粒看作切削刀具,

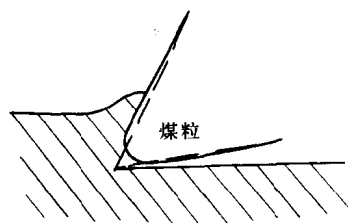


图 28 煤粒变钝示意图

则相当于刀具变钝(图 28). 这可由磨损表面上圆钝的犁沟形貌, 以及磨损后煤粒的破碎极少得到证明(图 13, 14, 19, 20). 从图 15 还可看到沟里的磨粒形状无甚变化. 因而, 在一定载荷下进行滑动时, 煤粒主要在金属材料上产生犁沟, 除部分产生犁屑外(图 16), 大部分是把金属推向两侧或向前推挤成为脊隆, 在接之而来的煤粒作用下又把脊隆碾平. 图 17 为尾部挤出的磨屑, 似为一层层排出的磨屑, 这是磨屑一次次被挤出的结果. 图 18 为挤压屑. 图 19, 20 为犁沟脊隆碾平后的形貌, 同时可看到沟槽较为圆钝. 总起来讲, 煤在材料上反复犁沟-碾压导致裂纹成核与扩展, 最后呈片状磨屑而断裂. 图 21, 22 为即将断开和已经断开的磨损表面的形貌. 图 23, 24 分别为热轧 B 钢用 60 目无烟煤磨损后, 试样斜截面所观察到的次表面晶粒变形拉长和空洞的形成, 以及空洞拉长形成裂纹和材料即将发生断裂的情况. 磨损后斜截面的硬度变化(图 27)也说明, 塑变使磨损表面发生了明显的加工硬化. 由此可以认为, 犁沟产生塑变而后碾压断裂, 这种机制类似于金属断裂的机制. 这与 Argon^[4]对磨损的看法是一致的. 他认为摩擦和磨损是发生于滑动接触材料表面的非弹性变形和断裂的过程. 也就是说, 煤粒滑过材料时, 当作用于材料局部的应力达到屈服应力时, 材料便发生塑性变形, 塑性变形引起位错在晶界塞积而形成裂纹萌芽——空洞, 即裂纹形核是由塑性变形促成的, 切应力在裂纹的萌生过程中起决定作用. 在反复滑动过程中, 裂纹扩展导致材料断裂. 裂纹的扩展依赖于拉应力. T. Sakamoto^[5]等人用 140° 圆锥在铜板上滑动 1.8mm 后, 发现在沟槽的前方有明显的滑移带及小裂纹. 这表明在一次滑动中也可形成裂纹. Hills^[6]等人则比较强调第二相粒子的应力集中效应是裂纹形核的可能机理. 这从理论上是完全成立的, 而本实验中仅观察到沿晶界形成的空洞及裂纹. 这也许是由于试验材料中含第二相颗粒不多之故.

从上述可知, 在煤的磨损过程中, 无论是犁沟脊隆的碾平断裂还是沟底的塑性变形, 其过程非常类似于塑性金属材料中一般的断裂过程, 即塑性变形产生位错塞积、萌生裂纹和裂纹扩展三个阶段. 当然磨损过程还有它本身的特点, 其详细的微观机制尚需进一步进行研究.

(2)软磨料磨损. 当 $H_a/H_m < 0.64$ 时, 以 B, C 钢(200℃回火状态)为过渡材料, 磨损率几乎趋近于零. 但磨损表面仍有明显的一条条平行细直的沟槽(图 10), 而且随材料硬度增加, 沟槽变浅变细. 高倍镜下还可看到有类似石英砂磨损时的压坑及犁沟中断的情况(图 25). Richardson^[7]曾用 $H = 813\text{kg/mm}^2$ 的钢在玻璃($H = 590\text{kg/mm}^2$)上做磨损试验, 仅见有隐约的划痕, 而磨损失重为零. 作者认为, 这是由于细的磨粒在三向压应力作用下不易断裂, 并通过塑性变形而强化, 因此会划伤很硬的金属, 但切削效率是很低的. 因此可以认为, 图 10 的这些沟槽可能是由这个原因, 也可能是由于浮煤中夹有石英颗粒所致. 因

为:浮煤中不可能选得如此干净,以致于无石英颗粒存在;即使一颗煤粒中,除有机质外,局部也会有石英掺入,用浮沉法是无法把煤和硬矿物绝对分离开来的。至于究竟是何种原因起主要作用,有待于进一步研究。

Larsen-Badse 认为,软磨料磨损为剥层磨损机制。我们曾把 200℃回火态 B 钢 (390HV) 磨损时间延长到 75min,发现磨损表面有凹坑出现,坑底及侧边有裂纹(图 26),似为疲劳裂纹。若继续摩擦下去是否会产生片状剥落的疲劳磨损机制,尚有待进一步探讨。

综上所述, $H_a/H_m > 0.64$ 时,煤起一种硬磨料磨损作用,但其磨损机制与其他硬矿物磨料有所不同,它是以犁沟-塑变-断裂为主要磨损机制。但在 $H_a/H_m < 0.64$ 时,煤所起的磨损作用及机制尚需进一步研究。

五、结 论

(1)煤与其他磨料有共同的磨料磨损特性。当 $H_a/H_m > 0.64$ 时为硬磨料磨损;当 $H_a/H_m < 0.64$ 时为软磨料磨损。

(2)材料磨损率与煤中的自由石英含量成线性关系。

(3)当煤的硬度大于材料硬度或与其硬度相当时,煤造成材料磨失,煤的磨料磨损特性是其在磨损过程中发生某些弹塑性变形,故磨损机制主要以较浅的犁沟继之以碾压塑变最终造成材料的断裂。其过程类似于塑性金属一般的断裂机理,而直接切削的现象较少。 $H_a/H_m < 0.64$ 时煤的磨损机制尚需进一步研究。

本文曾发表于《煤炭学报》1983 年第 4 期。

参 考 文 献

- [1] Yancey, H. F., Geer, M. R. and Price, J. D., An Investigation of the Abrasiveness of Coal and Its Associated Impurities, *Mining Engineering*, 5, p. 262(1951).
- [2] 张国安等,煤的磨损特性试验研究,热力发电,5 期,18 页(1979).
- [3] 别隆, A. H. 等著,煤炭切削原理,中国工业出版社,5 页(1965).
- [4] Argon, A. S., Mechanical Properties of Near-Surface Material in Friction and Wear, *Fundamental of Tribology*, p. 103 (1981).
- [5] Sakamoto, T. and Tsukizoe, T., Friction and Prow Formation in a Scratch Process of Copper by a Diamond Cone, *Wear*, 44(2), p. 393(1977).
- [6] Hills, D. A. and Ashelby, D. W., The Initiation of Wear Cracks, *Wear*, 70(3), p. 365(1981).
- [7] Richardson, R. C. D., The Wear of Metals by Relatively Soft Abrasives, *Wear*, 11, p. 245(1968).