

耐磨材料及 其应用

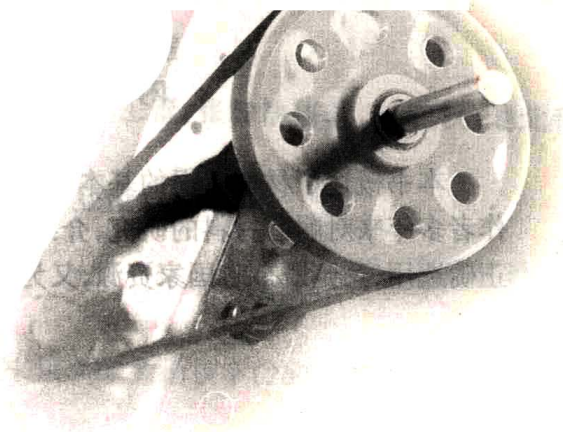


NAIMO CAILIAO JIQI YINGYONG

王蕾 张静浩 编著

湖北科学技术出版社

HUBEI SCIENCE & TECHNOLOGY PRESS



王蕾 张静浩 编著

耐磨材料及 其应用

NAIMO CAILIAO JIQI YINGYONG

湖北科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

耐磨材料及其应用/王蕾,张静浩编著. —武汉:湖北科学技术出版社,2004.6

ISBN 7-5352-3212-4

I. 耐... II. ①王... ②张... III. 耐磨材料
IV. TB39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 043911 号

耐磨材料及其应用

©王蕾 张静浩 编著

责任编辑:谭学军

封面设计:喻杨

出版发行:湖北科学技术出版社

电话:87679468

地 址: 武汉市雄楚大街 268 号
湖北出版文化城 B 座 12—14 层

邮编:430070

印 刷:仙桃市新华印刷厂

邮编:433000

850 毫米×1168 毫米 32 开

7.25 印张 170 千字

2004 年 6 月第 1 版

2004 年 6 月第 1 次印刷

印数:0 001—2 000

ISBN 7-5352-3212-4/TB·35

定价:18.00 元

本书如有印装质量问题 可找承印厂更换

内 容 简 介

本书概述了材料磨损的基本理论、磨损原因及其分类。根据作者多年来对耐磨材料的研究,介绍了各类耐磨材料的制作及其正确选用,达到既节省国家资源,又为企业创造良好效益之目的。

前 言

各种机械零件的磨损造成的材料和能源消耗是惊人的。据不完全统计,我国每年磨损造成的损失达 400 亿元。能源消耗仅大庆油田的粗略估计,每年总能耗的 $1/3 \sim 1/2$ 是无功耗损。美国每年由于摩擦磨损和腐蚀造成的损失约 960 亿美元,占国民经济总收入的 4%。据联邦德国研究的技术部报道,联邦德国每年因摩擦磨损造成的损失超过 100 亿马克^[1]。在我国估计每年消耗金属耐磨材料 300 万吨以上。应用摩擦磨损理论防止和减轻摩擦磨损,每年可节省 150 亿美元^[2]。近年来,针对各种设备部件磨损的具体工况和资源情况,研制出许多新型耐磨材料。但仍有许多行业,如冶金矿山等,还大量沿用已过时的耐磨材料,如 ZGMn13 仍占冶金矿山耐磨材料的 70% 以上。耐磨部件的选材及生产工艺不当,造成国家资源及企业经济效益的损失极大。例如耐磨衬板,过去几乎 80% 以上用 ZGMn13 制造,这对于中、低冲击负荷工况的耐磨件是毫无益处的。因此,针对众多使用耐磨材料的人,给予正确的诱导是非常必要的,国内此类专著非常少。

本书第一、二、三、四章由武汉科技大学王蕾副教授编写,第五、六章由武汉青科耐磨材料研究所所长、高级工程师张静浩编写。全书由陈大凯教授主审。本书理论与实践结合,内容丰富、图文并茂,是从事耐磨材料生产,耐磨件设计工作者的指南,也可供材料科学、机械工程专业的教师和学生参考。

谨此对提供参考文献的作者表示衷心感谢。希望能得到广大读者的喜爱和指教。

目 录

第 1 章 材料磨损基础	(1)
1.1 磨损的定义与分类	(2)
1.2 磨损现象的复杂性	(2)
1.3 摩擦与磨损	(4)
1.4 粘着磨损	(6)
1.5 磨粒磨损	(9)
1.6 腐蚀磨损	(13)
1.7 疲劳磨损	(14)
第 2 章 材料磨损的测试和分析	(17)
2.1 材料耐磨性的评定	(17)
2.2 金属磨损的测试技术	(19)
2.3 磨损量	(32)
第 3 章 常用耐磨材料及其选用	(36)
3.1 耐磨钢简介	(36)
3.2 钢的耐磨性及其主要影响因素	(39)
3.3 高锰钢	(42)
3.4 中锰奥氏体基耐磨钢	(51)
3.5 低合金耐磨钢	(61)
3.6 珠光体——渗碳体抗磨钢	(61)
3.7 马氏体抗磨钢	(65)
3.8 奥氏体—贝氏体抗磨钢	(65)
3.9 耐磨合金白口铸铁	(66)
3.10 球墨铸铁在耐磨材料领域的应用及发展	(106)

3.11	耐磨合金	(112)
3.12	非金属及复合材料	(131)
第4章	表面处理技术及耐磨性	(163)
4.1	表面化学热处理	(163)
4.2	气相沉积	(176)
4.3	堆焊及热喷涂层在耐磨件上的应用	(178)
4.4	离子渗氮及离子软化	(179)
4.5	表面淬火	(191)
第5章	冶金及矿山用耐磨材料	(192)
第6章	农机具及泥沙冲磨用耐磨材料	(201)
6.1	农机具耐磨零件用钢的特点和要求	(201)
6.2	农机具耐磨零件用钢的选用	(202)
6.3	农机具耐磨零件用钢的成分、性能和热处理 ...	(204)
6.4	65SiMnRE 钢	(213)
6.5	水泥工业耐磨材料	(215)

第 1 章 材料磨损基础

任何传动部件工作时，各部件之间总会发生相对运动或具有相对运动的趋势。当两个相对接触的机件表面作相对运动（滑动、滚动、滑动 + 滚动）时，就会产生摩擦，有摩擦必然会有磨损。

磨损不仅会降低机件的工作效率，增加能耗，降低机件的寿命，而且也会造成金属材料的损耗。因此提高机件耐磨性，延长机件的寿命势在必行。

造成磨损的原因，主要是力学作用，此外还有许多其他因素，如：物理和化学作用等。因此，摩擦副材料、润滑条件、加载方式和载荷大小、相对运动特性（方式、速度）以及工作温度等都会影响磨损量的大小，所以磨损是一个十分复杂的系统过程。

在磨损过程中，磨屑的形成是一个发生在机件表面的变形和断裂过程。

机件正常运行的磨损过程一般分为 3 个阶段，即：

(1) 跑合阶段(磨合阶段): 摩擦表面逐渐被磨平, 实际接触面积增大, 磨损速率减小;

(2) 稳定磨损阶段: 磨损率稳定, 是大多数机件正常服役的阶段;

(3) 剧烈磨损阶段: 由于机件不断摩擦, 摩擦副接触表面之间间隙增大, 润滑膜被破坏, 引起剧烈振动, 磨损加剧, 机件很快会失效。

1.1 磨损的定义与分类

1.1.1 磨损的定义

简单讲接触机件表面作相对运动时,表面逐渐有微小颗粒分离出来形成磨屑,使表面材料尺寸逐渐减少,体积损失,造成表面损伤的现象即为磨损。

欧洲经济合作和发展组织(OECD)的工程材料磨损研究小组在《摩擦学术语及定义汇编》一书中给磨损(wear)下的定义为:由于材料表面相对运动使物体工作表面上逐渐损失物质^[3]。

1.1.2 磨损的分类

伯韦尔(J. J. Burwell)按磨损机制将磨损分为如下几种^[4]:

- (1) 粘着磨损;
- (2) 磨粒磨损;
- (3) 腐蚀磨损;
- (4) 表面疲劳;
- (5) 其他(冲击磨损、冲蚀磨损等)。

1.2 磨损现象的复杂性

影响上述各种形态磨损现象的主要原因是以载荷和速度为主的,此外还有以下种种因素组成。因此在诸多因素的互相影响下,使磨损现象更为复杂。

(1) 载荷与速度;

(2) 材质(种类、金属的组织、硬度、抗拉强度、疲劳强度、弹性模量、延伸率等)。摩擦表面材质的成分(同一种材质的、由不同

金属组成的,等等);

(3) 摩擦的方式(滑动摩擦、滚动摩擦、初生面的摩擦、反复摩擦等);

(4) 表面光洁度及其他的表面特性值(残余应力、加工变质层等);

(5) 润滑状态、温度、湿度、气体介质等。

从上述各种因素来看,也就是由于摩擦条件的不同,例如上述滑动摩擦中的粘着磨损、氧化磨损、熔融磨损、磨粒磨损等各种形态的磨损会同时发生。特别是其中的粘着磨损与磨粒磨损属于严重磨损,而氧化磨损与熔融磨损则为轻微磨损。它们在共存时各自所占的比例,随摩擦条件而改变,如图 1-1 所示。磨损现象呈现出更为复杂的情况。运用条件或试验条件的微小变化,磨损量急剧地增加或减少的现象是经常发生的。此外,对应于载荷与速度的变化,磨损量的变化可以定性地进行表示,但有时会出现完全相反的情况(见图 1-1)。

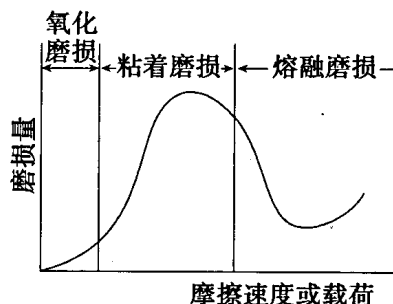


图 1-1 磨损量随载荷与速度变化曲线

磨损现象的复杂性与不稳定性,是使室内试验的结果难于实际应用的原因之一。同时为了说明复杂的磨损现象,仅仅探讨其表面现象是得不偿失的,必须从机理和本质上进行深入研究。

下面就粘着磨损、磨粒磨损、腐蚀磨损、表面疲劳这四种有代

表性的磨损形态,予以详细论述。

1.3 摩擦与磨损

滑动摩擦时的静摩擦系数 μ_s 为:

$$\mu_s = \frac{1}{1 - \frac{2S}{\pi P_m} \operatorname{tg} \theta} \left[\frac{1}{2} \frac{S}{P_m} \left(\frac{1}{\cos \theta} + 1 \right) - \frac{2}{\pi} \operatorname{tg} \theta \right] \quad (1-1)$$

式中: S ——接触点的抗剪强度;

θ ——凸峰的斜面倾角;

P_m ——材料的屈服压强。

就单 S 来说,当摩擦接触点完全处于金属粘附状态时,材料的抗剪强度,最好取为 S_B [$S_B = (0.5 \sim 1.0) P_m$]。这时实际接触面积(A)中,如果粘附部分为 αA ,那么剩下的 $(1 - \alpha)A$,则通过氧化膜而相互接触;如果氧化膜的抗剪强度为 S' ,则公式(1-1)中的 S ,应以下式计算,即:

$$S = \alpha S_B + (1 - \alpha) S' \quad (1-2)$$

公式(1-1)中的第一部分为剪断接触点所受的阻力;第二部分为接触点犁削表面与变形而受到的阻力。根据上述分析,当 $S_B = (0.5 \sim 1.0) P_m$, $\alpha = 1$ 时,分别计算这两种阻力的大小。这时,表面光洁度 $R_{\max} = 1 \sim 10 \mu\text{m}$, $\operatorname{tg} \theta = 0.084 \sim 0.314$,则

$$\begin{aligned} \mu_s &\approx \frac{S}{P_m} + \frac{2}{\pi} \operatorname{tg} \theta \\ &= (0.5 \sim 1) + (0.054 \sim 0.2) \end{aligned} \quad (1-3)$$

也就是说,在干燥的表面上,第一部分的剪断阻力占摩擦系数的绝大部分,而犁削阻力还要考虑到表面光洁度的影响。对于上述例子, $R_{\max} = 1 \mu\text{m}$ 时, $\mu_s = 0.05 \sim 1.05$; $R_{\max} = 10 \mu\text{m}$ 时, $\mu_s = 0.7 \sim$

1.2。

因此,摩擦是由于在接触点上产生的剪断阻力与犁削阻力引起的。从这一点上来说,磨损则是随摩擦而产生的一种现象,然而,在本质上,磨损是由于接触点破坏时出现了磨屑的结果。也就是说,在摩擦过程中,磨损是伴随着克服剪断阻力而发生的,如图 1-2 所示。

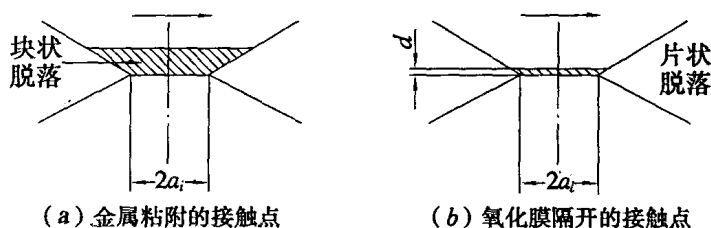


图 1-2 接触点剪断时的两种模型

当接触点剪断时,粘附在接触点上的金属呈块状脱落,而中间有氧化膜的接触点则呈片状脱落而形成磨屑。另一方面,磨损是随克服犁削阻力而产生的,如图 1-3 所示,嵌入的尖端切掉与之相接触的材料表面而形成磨粒磨损。如果在这种情况下,仅出现隆起现象,而无犁削的颗粒产生时,则与磨损无直接关系。

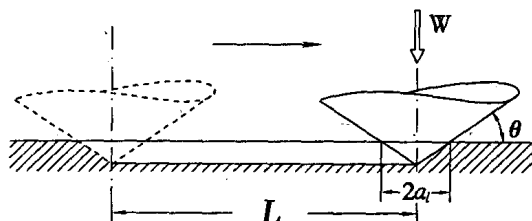


图 1-3 磨粒磨损的模型

1.4 粘着磨损

粘着磨损也称为粘附磨损或咬合磨损,是在滑动摩擦条件下,当摩擦副之间无润滑油且相对滑动速度较小时发生的。

粘着磨损分为3个阶段:

(1) 接触面凸起部分因塑性变形被碾平,并在接触表面之间形成剪断强度高的分解面;

(2) 在摩擦副一方金属远离分解面内发生断裂,从该金属上脱落下碎屑并转移到另一方金属表面;

(3) 转移的碎屑脱落下来形成磨屑。

在图1-2(a)中,随粘附接触点的剪断而产生的磨屑的形状,假定为半径是 a_i 的半球体(阿查得模型^[5]),载荷力为 W (kgf) 时,则单位滑动距离的平均磨损量 Q (mm^3/mm) 为:

$$Q = \frac{1}{3} \frac{1}{P_m} W \quad (1-4)$$

如果在发生粘着磨损的表面上,测出了倾角为 θ 的表面光洁度曲线;那么当磨屑的形状是底面半径为 a_i ,得到底角为 θ 的圆锥,则(1-4)式可变为下式,即:

$$Q = \frac{1}{6} \frac{\tan \theta}{P_m} W \quad (1-5)$$

当 $R_{\max} = 1 \sim 30 \mu\text{m}$ ($\tan \theta = 0.0849 \sim 0.3925$) 时,对于 $P_m = 500 \text{ kgf}/\text{mm}^2$ 的碳钢来说,利用(1-5)式计算其磨损率 Q/W ($\text{mm}^3/\text{kgf} \cdot \text{mm}$) 为

$$\begin{aligned} \frac{Q}{W} &= \frac{1}{6} \frac{\tan \theta}{P_m} \\ &= (2.8 \sim 13) \times 10^{-5} (\text{mm}^3/\text{kgf} \cdot \text{mm}) \end{aligned} \quad (1-6)$$

从公式(1-4)或(1-5)中可以看出,粘着磨损的大小存在下列关

系:

- (1) 磨损量与载荷 W 成正比;
- (2) 磨损量与滑动速度无关;
- (3) 磨损量与屈服压强 P_m 成反比(金属材料的硬度越高,磨损程度越小);
- (4) 磨损量与 $\lg\theta$ 成正比(表面光洁度越高,磨损程度越轻)。

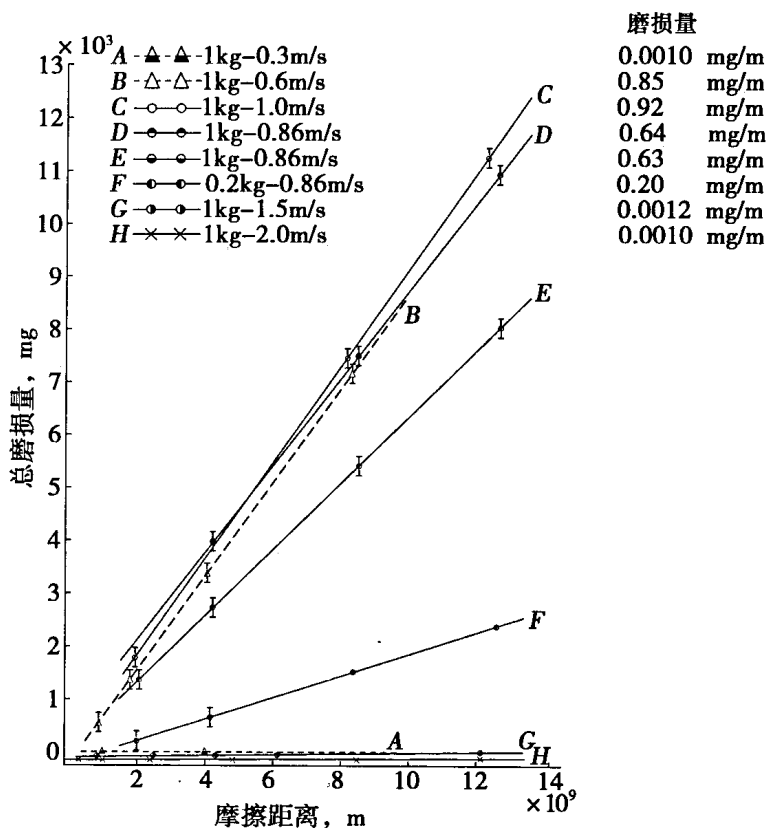


图 1-4 八种磨损试验结果

在阿查得的公式(1-4)中,对表面光洁度的影响未予以说明;同时,其磨损量比公式(1-5)计算出的结果大出试验值近一

个数量级。为此,阿查得建议将公式(1-4)乘以概率系数 K ,该系数 K 就是公式(1-2)中的 α 。

销(12×12)对圆盘($\Phi 40\text{mm}$)

材质:两者均为 S45C($P_m = 500\text{kgf/mm}^2$)

干摩擦总磨损量:销与圆盘两者磨损量之和(其中销约占40%)

图1-4 是对于载荷与摩擦速度发生各种变化时的八种情况。其中五种(B、C、D、E、F)情况,磨损后磨损表面保持金属光泽,可以认为以产生粘着磨损(光亮磨损)为主。

对于 A、G、H 三种情况来说,摩擦面在初始摩擦时,首先呈黑色,随着摩擦的进行逐渐出现褐红色,这是以氧化磨损中的片状脱落(图1-2(b))为主的现象。粘着磨损与氧化磨损相比较,后者是前者的 $10^{-2} \sim 10^{-3}$ 倍。

再从图1-4中,仅取出载荷 $W = 1\text{kgf}$ 时得出的磨损量速度特性,如图1-5所示。再利用摩擦速度为 0.86m/s ,求出粘着磨损的载荷特性,得出的结果见图1-6。

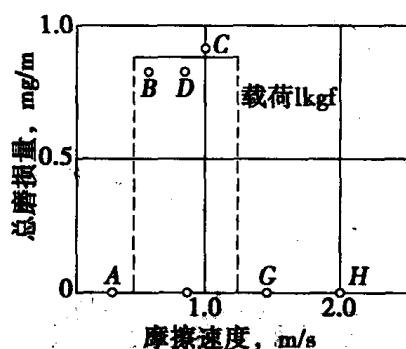


图1-5 磨损量与摩擦速度的关系
(试验条件与图1-4 相同)

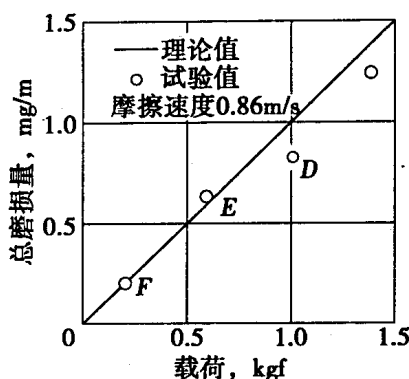


图 1-6 粘着磨损量的理论值与试验值的比较
(试验条件与图 1-4 相同)

这时摩擦面的表面光洁度为: $R_{\max} = 25 \mu\text{m}$, $\text{tg}\theta = 0.383$, 并且, 同时假设 $P_m = 500 \text{ kgf/mm}^2$, 利用公式(1-5)得出:

$$Q = 12.8 \times 10^{-5} W (\text{mm}^3/\text{mm})$$

$$= 1.00 W (\text{mg/m}) \quad (1-7)$$

该理论计算值表示在图 1-6 中, 与同一图中的试验值一致。

1.5 磨粒磨损

磨粒磨损也称为研磨磨损, 当摩擦副一方表面存在坚硬的细微凸起, 或者在接触面之间存在硬质粒子时产生的一种磨损。

根据磨粒所受应力大小的不同, 磨粒磨损可分为凿削式磨粒磨损、高应力碾碎性磨粒磨损和低应力擦伤性磨粒磨损三类。在凿削式磨粒磨损时, 从材料表面上凿削下大颗粒金属, 摩擦表面有较深的沟槽, 如挖掘机斗齿、破碎机腭板等机件表面的破坏。如果磨粒与摩擦面接触处的最大应力超过磨粒的破坏强度, 则磨粒不断被碾碎, 并产生高应力碾碎性磨粒磨损。此时, 一般金属材料被

拉伤,韧性金属产生塑性变形或疲劳,脆性金属则形成碎裂或剥落。如球磨机衬板与钢球、轧碎机滚筒等机件表面的破坏。当作用于磨粒上的应力不超过其破坏强度时,产生低应力擦伤性磨粒磨损。此时,摩擦表面仅产生轻微擦伤,如犁铧、运输槽板及机件被沙尘污染的摩擦表面等。

从磨粒硬度与被磨材料硬度的相对关系来看,如果磨粒硬度高于被磨材料的硬度,则属于硬磨粒磨损;反之为软磨粒磨损。通常的磨粒磨损指的是硬磨粒磨损。

磨粒磨损的主要特征是摩擦面上有明显犁皱形成的沟槽(犁沟)。

在磨粒磨损过程中,磨粒与摩擦表面之间的相互作用,与机械加工中切削刀具和工件的相互作用类似。对于韧性金属材料而言,每一磨粒从表面上切下的是一个连续屑;而对于脆性金属材料,则一个磨粒切下的是许多断屑。由于磨粒磨损产生的条件不同,它不是一个简单的切削过程^[6]。

总之,磨粒磨损过程可能是磨粒对摩擦表面产生的切削作用、塑性变形和疲劳破坏作用或脆性断裂的结果,还可能是它们综合作用的反映,而以某一损坏为主。

在图1-3中,嵌入的尖端在对方表面上拉出的沟槽,其体积的 β 倍变成磨屑时,则单位滑动距离中的磨粒磨损体积 $Q(\text{mm}^3/\text{mm})$ 为^[7]:

$$\begin{aligned} Q &= \sum_{i=1}^n \frac{\frac{1}{2} \times 2a_i \times a_i \tan \theta \times L \times \beta}{L} \\ &= \beta \tan \theta \sum_{i=1}^n a_i^2 \end{aligned} \quad (1-8)$$

这时

$$W = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} \pi a_i^2 P_m \quad (1-9)$$