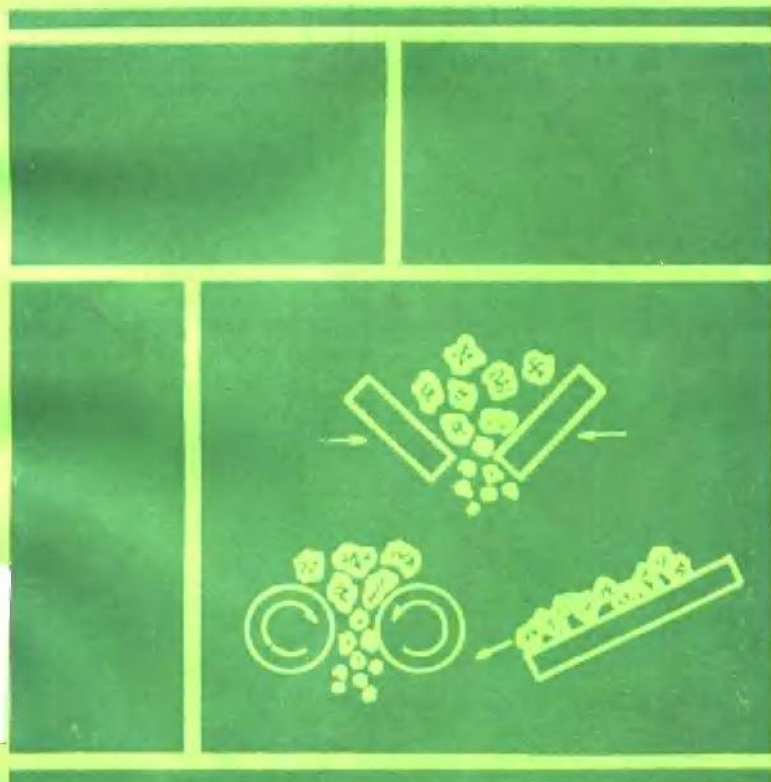


机械工程材料丛书

耐磨与减摩材料

李建明 编



机械工业出版社

《机械工程材料丛书》出版说明

国民经济及科学技术的飞速进步,使机械工业产品朝着大型化、高速化、高性能、高精度方向发展。因而对材料科学提出愈来愈高的要求;新的材料不断出现。为了帮助在机械工程行业工作的中、高级工程技术人员开拓工程材料的知识领域,进行知识更新,正确选择和使用材料,充分发挥材料的性能潜力,使机械工业产品的水平得到进一步提高;同时也考虑到高等工业学校非材料专业本科生及研究生的“机械工程材料”课程涉及的内容广泛而学时数有限,为使学生在学习机械工程材料课程时,有一套教学参考用书加以配合,我们组织编写了这套机械工程材料丛书,拟陆续出版十分册。这十分册是:工程陶瓷材料、模具材料、工程塑料、低温材料、耐热钢及耐热合金、复合材料、胶接与密封材料、高强度及超高强度钢、耐磨及减摩材料、铝合金及钛合金。

这套丛书的读者对象是:机械工程行业的中、高级技术人员;高等工业学校非材料专业的本科生及研究生。

丛书的内容以机械工程结构材料为主,适当介绍一些功能材料。内容的重点在于应用和选材,一般性谈及机理。阐述工程材料性能时,以使用性能为主,适当介绍其它性能。同时力求文字简洁,通俗易懂,便于自学。

由于条件和水平限制,特别是编审小组缺乏组织丛书编写的经验,因此丛书内容难免有不妥之处。希望读者尤其是

各高等工业学校从事机械工程材料教学的教师提出宝贵意见，帮助我们改进提高。

《机械工程材料及物理化学》教材编审小组

1985. 2.

前 言

摩擦与磨损是各种机器设备在运转过程中普遍存在的一种现象。一般说来,磨损是摩擦的必然结果。它们是影响机器设备工作效率与使用寿命的主要因素。据估计,目前世界上大约有 $\frac{1}{2}$ 至 $\frac{1}{3}$ 的能源消耗在各种不同形式的摩擦上。而磨损所造成的年经济损失也是十分巨大的。据美国1982年在这方面的估计,达1190亿美元。因此,减少摩擦和提高材料的耐磨性是一项具有重大社会经济意义的任务。

摩擦与磨损是与整个运转系统有关的复杂过程,影响因素很多。相应地,减少摩擦与提高零件耐磨性的措施也是多方面的,如零件的设计、润滑状况及材料的选用与处理等。然而,摩擦、磨损毕竟是发生在材料表面层,材料本身的特性不能不是一个最基本的影响因素。事实证明,材料的摩擦、磨损特性与零件的设计、选材是否恰当,将直接影响机器的工作效率与使用寿命。本书正是从这一基本事实出发,介绍了一些常用机械工程材料的摩擦、磨损特性。重点介绍了各种因素,包括成分、显微组织与运转条件,如载荷、速度、介质及温度等对材料耐磨性的影响。并指出了如何针对零件的具体运行条件,选择尽可能合适的材料。以期为机器制造与设计的高年级学生、研究生及有关工程技术人员学习相应课程和进行零件设计、选材时提供参考。

按照一般受到摩擦的零件的工作状况,对材料摩擦磨损特性要求大体可分为三类:一类主要要求材料具有高的强

度、硬度和足够的韧性，在正常条件下长期运转时，能保持必要的尺寸和形状稳定性，即具有良好的耐磨性。具有这类特性的材料就是通常意义上说的耐磨材料；第二类是对强度、硬度的要求一般不太高，但要求材料在运转过程中有低而稳定的摩擦系数，例如，滑动轴承材料。具有这类特性的材料常称为减摩材料；第三类则要求材料在运转时具有很高的摩擦系数和抗擦伤能力，如刹车鼓等，这类材料常称为摩擦(或摩阻)材料。不过，这种分类并不是很严格的。事实上，不管哪一类材料都会对耐磨性有一定要求。因此，有的著作中，也常常把这三类材料统称为耐磨材料。本书主要讨论的是耐磨与减摩材料。只是在铸铁部分，对材料在干摩擦(即作摩擦材料使用)时的特性作了简单介绍。

目前，在机器制造业中使用的材料，仍是以金属材料为主，而聚合物的应用也越来越广泛，特别是在一些摩擦组件中。因此，本书的讨论也主要集中于金属及合金上，其次才是聚合物。为了方便一般读者，在讨论聚合物摩擦磨损特性之前，把一些有关的基本常识作了简单介绍。陶瓷虽可作为优良的耐磨材料，本套丛书中“工程陶瓷材料”一书已作介绍，故本书未予述及。

在本书成书过程中，湖南大学彭宽副教授、夏宗禹老师曾审阅初稿，提供了宝贵意见。另外熊峭海、高香山、雷泽英同志给予了很大帮助。谨向他们致以衷心感谢。

耐磨与减摩材料并不是一个严格独立的材料类别。有关材料多散见于手册及一些教科书中。从这个意义上说，本书还只是一种尝试，在体系和内容取舍上难免有不妥甚至错误之处，恳请读者批评指正。

目 录

前言

第一章 概述	1
§ 1-1 磨损的基本类型与磨损量	1
§ 1-2 特征及一般规律	5
§ 1-3 耐磨设计与选材	15
参考文献	19
第二章 钢的磨损与耐磨钢	20
§ 2-1 碳钢及低合金钢的磨损特性与应用	20
§ 2-2 工具钢的磨损特性与应用	28
§ 2-3 不锈钢的磨损特性与应用	42
§ 2-4 高锰钢的磨损特性与应用	45
§ 2-5 石墨钢	56
参考文献	58
第三章 铸铁的磨损特性与应用	58
§ 3-1 普通铸铁	59
§ 3-2 滑动摩擦用铸铁的成分与选用	64
§ 3-3 冷硬铸铁	78
§ 3-4 白口铸铁	84
§ 3-5 中锰球墨铸铁	97
参考文献	99
第四章 非铁耐磨合金	100
§ 4-1 铝合金	100
§ 4-2 铜合金	108
§ 4-3 钴基合金	119

参考文献	125
第五章 滑动轴承合金	126
§ 5-1 运转条件及其对材料的要求	126
§ 5-2 常用滑动轴承合金	130
§ 5-3 滑动轴承合金的实际应用	142
参考文献	149
第六章 聚合物的磨损与应用	150
§ 6-1 聚合物简介	150
§ 6-2 聚合物的磨损	157
§ 6-3 以聚合物为基的减摩材料	164
§ 6-4 摩擦件常用聚合物	170
§ 6-5 聚合物减摩材料的应用	173
参考文献	183
第七章 耐磨堆焊材料	184
§ 7-1 耐磨堆焊材料	185
§ 7-2 耐磨堆焊的应用	191
参考文献	194

第一章 概 述

磨损是相互接触物体在相对运动时，表层材料不断发生损耗的过程。据统计，有75%的机器零件是由于磨损而报废的。因此，磨损是引起机械零件失效的主要原因之一。研究磨损，针对不同工况条件合理选用耐磨材料，不断开发新型的耐磨、减摩材料，已经成为人们愈来愈关心的课题。

§ 1-1 磨损的基本类型与磨损量

一、磨损的基本类型

磨损并不是材料固有的特性，而是与整个系统有关的过程。不同系统中，由于材料性质、工作条件，如载荷、温度、相对运动速度及润滑状态、零件表面加工方法与质量不同，磨损过程及其破坏形式也可能不同。为此，人们对磨损进行了分类。不过，由于磨损过程的影响因素很多，很复杂，至今并没有一个统一的分类法。比较常用的是按磨损机理进行分类。一般分成五个基本类型：（1）粘着磨损；（2）磨粒磨损；（3）表面疲劳磨损；（4）腐蚀磨损；（5）微动磨损。这五种基本磨损形式的内容、特点及实例列举在表1-1中。

要强调指出，随着工作条件，如载荷、运转速度的变化，磨损形式可能发生转化。例如，图1-1就是普通碳钢（0.52% C）销受到同种材料作的圆环滑动磨损时，磨损率与载荷间的关系。当载荷比较小时，摩擦是在表面氧化膜间进行的。磨损产物几乎全是细小的氧化物，磨损率很低。通

常把这个阶段的磨损称为轻微磨损或氧化磨损。其磨损机制主要是腐蚀磨损。

表1-1 五种基本磨损类型①

类 型	内 容	特 点	举 例
粘着磨损	摩擦副相对运动时, 由于接触突点焊合, 材料由一个表面转移至另一个表面的过程	接触突点粘着剪切破坏	内燃机的铝活塞与缸体的磨损
磨粒磨损	在摩擦过程中, 因硬颗粒或硬的凸出物作用, 使摩擦表面材料脱离的现象	磨粒作用于材料表面产生的破坏	球磨机衬板与磨球; 农业与矿山机械零件的磨损
表 面 疲劳磨损	接触表面作滚动或滚动、滑动复合摩擦时, 因周期加载作用, 使表面产生变形和应力, 从而使材料产生裂纹, 以致分离出微片或颗粒的磨损	表层或亚表层受接触应力反复作用而疲劳破坏	滚动轴承、齿轮副
腐蚀磨损	在摩擦过程中, 金属同时与周围介质发生化学或电化学反应而产生材料损失的現象	有化学或电化学反应的表面摩擦、腐蚀破坏	曲轴轴颈的氧化磨损; 化工设备中零件的表面磨损
微动磨损	两接触表面相对小振幅振动, 引起表面材料损失的現象	复合式磨损	片式摩擦离合器的内外摩擦片的结合面上

① 戴雄杰主编, 《摩擦学基础》, 上海科技出版社, 1984。

当外加载荷超过 T_1 时, 磨损率急剧增加, 差不多比轻微磨损时高出两个数量级。这时的磨损产物——磨屑是由一些相当大的金属颗粒组成的, 有的甚至肉眼都可以看出来。与此同时, 磨损面上出现严重损伤。这一阶段的磨损通常称为严重磨损或金属磨损。其作用机制主要是粘着磨损。

从轻微磨损到严重磨损的转变载荷 T_1 称为过渡载荷。很多金属在滑动磨损时都存在这种转变。在工程实际中, 当然不希望发生从轻微磨损到严重磨损的转变。设计(包括选择

材料) 工作的首要任务之一, 是要避免零件在使用时出现严重磨损。

从图1-1可以看出, 当载荷进一步增加到超过 T_2 时, 磨损率又急剧下降, 重新进入轻微磨损阶段。一般认为, 这一阶段的出现是与磨损面发生了加工硬化有关。

二、正常磨损过程与磨损量的表示

机械零件的正常磨损过程一般可分为三个阶段 (见图1-2):

1. 跑合阶段 由于实际表面从微观讲都是粗糙不平的, 所以两固体表面的接触实际只是表面上微突体的相互接触。当接触表面开始相对滑动时, 接触与焊合 (粘着) 的那些高微突体将首先由于剪切而

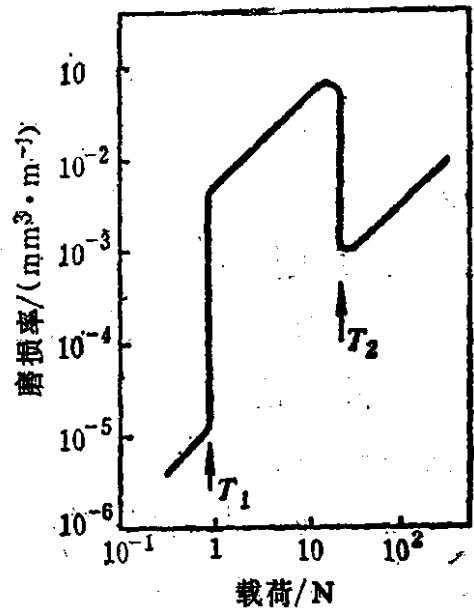


图1-1 退火的普通碳钢 (0.52% C) 无润滑滑动磨损时, 磨损率与加载间的关系

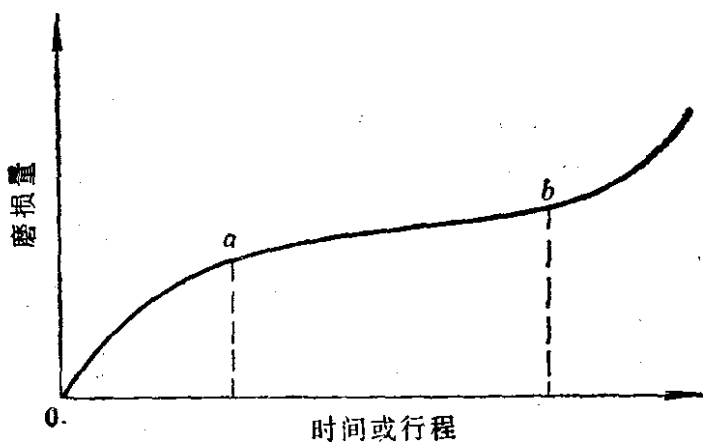


图1-2 典型的磨损过程

导致破坏。这样，随着过程的进行，摩擦表面逐渐磨平，实际接触面积增大。相应地，磨损量开始时增加很快，然后逐渐变慢（如图1-2的 oa 段）。

2. 稳定磨损阶段 经过跑合，表面微观几何形状改变。与此同时，摩擦表面加工硬化，从而建立了弹性接触条件。这时磨损已经稳定下来，磨损量与时间成正比（如图1-2中 ab 段）。

3. 急剧磨损阶段 b 点以后，由于温度急剧升高或表层金属组织发生变化等原因，磨损速度急剧增加。这时机械效率下降，精度降低，出现异常的噪音与振动，最后导致零件完全失效。

很明显，提高机器零件的使用寿命，就在于设法尽量延长稳定磨损阶段。

在上述的讨论中，曾一再使用了磨损量这个术语。磨损量表示磨损时材料损失的程度。通常可用三种方法来表示：

(1) 线磨损 W_L ——用摩擦表面法向尺寸变化计量的磨损；

(2) 体积磨损 W_v ——用体积减少量计量的磨损；

(3) 重量磨损 W_m ——用重量损失计量的磨损。

不过，使用最多的还是磨损率 W ，它是指磨损量与产生磨损的行程或时间的比。它又可以有三种表示方法：单位时间内的材料磨损量；每转一周或每一往复行程的材料磨损量；单位滑动距离内的材料磨损量。磨损率的倒数 W^{-1} 常用来表示材料的耐磨性。被试材料的磨损率与标准材料在相同条件下的磨损率之比，则称为相对磨损率 R 。

应该指出的是，在试验研究中所指的磨损率（如图1-1中的纵坐标），均是在稳定磨损阶段测得的磨损率。

此外，在一些文献中还常常用到相对耐磨性 ϵ 的概念，它表示的是标准材料与被试材料在相同条件下线磨损量之比。显然，相对耐磨性 ϵ 值越大，被试材料的磨损量越小，耐磨性越好。

§ 1-2 特征及一般规律

在表1-1所列五种磨损类型中，粘着磨损、磨粒磨损及表面疲劳磨损是最基本的磨损类型。对这三种磨损形式已进行了相当深入的研究。下面将就它们的基本特点作简单介绍。

一、粘着磨损

(一) 基本特征

粘着磨损是在正向加载下，两个接触固体表面相对滑动时产生的。宏观光滑的表面，从微观尺度看总是粗糙不平的。当两个表面接触时，接触的将只是表面上的一些较高微突点。它们承受着整个载荷，承受很大压力，以至使很多微突点发生塑性变形，并更紧密地接触。在这种情况下，这些紧密接触的微突点表面原子之间将发生相互作用，使两个表面微突点粘着、焊合。当两接触表面发生相对滑动时，粘合点就会被剪切断。这种剪切断裂一般是发生在原子结合力较弱金属的内部，而不会正好在界面上。结果就使得金属从一个表面粘着转移至另一个表面，产生了粘着磨损。其特征是转移的材料往往以大的团块和冷焊形式粘着在配对面上，如图 1-3 所示。

显然，有润滑油的表面要在油膜破裂后才可能发生粘着磨损。无润滑油的表面也只有在表面污染（或氧化）膜失效后才会出现粘着磨损。

(二) 影响因素与一般规律



图1-3 钢-钢滑动粘着失效后的表面照片

从上述粘着磨损产生的过程可以看出，影响粘着磨损的因素可分成两个大的方面：一是材料本身的性质；一是运转时的具体条件。

1. 材料性质 对一没有受到污染的金属-金属摩擦副，其粘着磨损可概括出如下一些主要规律：

(1) 在任何金属摩擦副之间都可能出现界面金属的粘着。粘着磨损一般是摩擦副中内聚力较弱材料转移至内聚力较强材料的表面。也就是粘合点的断裂一般是发生在内聚力较弱材料中；

(2) 晶体结构对粘着磨损有影响。一般六方金属的粘着能力比体心和面心立方金属的都低些；

(3) 晶体表面的取向影响粘着磨损特性。一般高原子密度、低表面能的晶面作表面时，粘着力低，因而粘着磨损率也低；

(4) 在互溶度很高的两个纯金属间具有很高的粘着和焊合能力。因此，应尽量避免使用同种材料组成滑动摩擦副；

(5) 微量合金元素如碳、硫对金属及合金的粘着有较大的阻滞作用,从而会使粘着磨损降低。原因很可能是因为,在摩擦热的激活下,碳和硫原子扩散至表面,产生表面偏聚,降低了金属原子间的粘着;

(6) 一般多相金属比单相金属的粘着倾向要小些,金属化合物比单相固溶体的粘着倾向也小些。

2. 工作条件 工作条件特别是载荷大小、运转距离(时间)对粘着磨损有很大影响。这些影响可以用著名的阿恰德方程表达如下:

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

或
$$W = \frac{W_v}{L} = \frac{KP}{3H} \quad (1-2)$$

式中 W_v ——体积磨损量;

W ——磨损率;

P ——作用在摩擦副的法向载荷;

L ——滑动距离;

H ——较软材料的硬度;

K ——磨损系数。

从式(1-1)可以看出如下规律:

(1) 材料的体积磨损量与行程成正比;

(2) 材料的体积磨损量与载荷成正比;

(3) 材料的体积磨损量与较软材料的硬度成反比。

实际情况表明,规律(1)能适用于各种情况;规律(2)只适用于载荷不太大(压力不超过大约 $H/3$)的工作条件;而规律(3)虽已为很多试验所证实,但也存在很多例外。也就是说,对一些材料的磨损,硬度不一定是衡量其耐磨性的

唯一指标。

式(1-1)及式(1-2)中的磨损系数 K 是一个很重要的参数。它是一个无量纲量。表示一个接触突点产生一个磨屑的几率。 K 越大, 磨损率越高。表1-2列出了一些材料相互摩擦时的磨损系数。对一般金属及合金, 在无润滑滑动磨损时, K 值一般是 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ 。

表1-2 一些材料的磨损系数K

材	料	气	氛	润	滑	剂	K
磨损表面	配对表面						
GCr15	GCr15	干	燥	氩	气	无	1.0×10^{-2}
低碳钢	低碳钢	空	气	无			2.3×10^{-3}
60/40铅黄铜	工具钢	空	气	无			2.0×10^{-3}
GCr15	GCr15	干	燥	空	气	无	1.0×10^{-3}
GCr15	GCr15	空	气	环	己	烷	1.8×10^{-5}
聚四氟乙烯	工具钢	空	气	无			8.3×10^{-6}
GCr15	GCr15	空	气	石	蜡	油	3.2×10^{-7}
聚乙烯	工具钢	空	气	无			4.3×10^{-8}
铝青铜	渗碳钢	空	气	齿	轮	润	滑
渗碳钢	渗碳钢	空	气	齿	轴	润	滑
GCr15	GCr15	空	气	引	擎	油	$< 2.0 \times 10^{-9}$

二、磨粒磨损

磨粒磨损主要出现于下列两种情况：一是粗糙而坚硬表面贴着软表面滑动；另一种情况是由游离的坚硬粒子在两个摩擦面之间运动而产生的磨损。不难看出，在粘着磨损时，如果产生的磨屑坚硬且呈游离状态，则将出现磨粒磨损。

磨粒磨损在工业中存在十分广泛。据估计，工业中发生的磨损约50%是属于磨粒磨损。依具体条件不同，通常又把磨粒磨损分成三类：

(1) 凿削式磨粒磨损 这类磨损中包含有大颗粒磨料,而且这些磨料具有尖锐的棱角。磨损的结果是从表面大颗粒地去掉金属。被磨损表面上有严重的凿槽或沟。如挖土机斗齿的磨损;

(2) 高应力碾碎式磨粒磨损 当原来尺寸较大的磨料不断被碎化或碾碎时,将产生这类磨损。显然,磨料与金属表面接触处的最大压应力是大于磨料的压碎强度的。如球磨机衬板与钢球的磨损;

(3) 低应力磨粒磨损 这种磨损是在应力不超过磨料本身压碎强度时产生的。磨损结果在金属表面产生擦伤或微小切削痕。如运输槽板的磨损。

图1-4给出了这三类磨粒磨损的示意图。也有按磨损体的位置把磨粒磨损分成二体及三体磨粒磨损的。二体磨粒磨损包括凿削式磨粒磨损与低应力磨粒磨损。而三体磨粒磨损主要是指高应力碾碎式磨粒磨损。



图1-4 磨粒磨损的三种类型

- a) 凿削式磨粒磨损 b) 高应力碾碎式磨粒磨损
c) 低应力磨粒磨损

对磨粒磨损的机理有很多种看法。一些人认为磨粒磨损是磨粒对金属表面进行显微切削的过程。对塑性较好的材料,在摩擦力作用下,磨料颗粒压入材料表面,产生压痕,

也可以从表面层挤压出剥落物。而脆性材料的磨粒磨损则主要是通过显微裂纹过程进行的。

一些研究得出，当显微切削过程占主导时，磨粒磨损遵循与式(1-1)类似的关系，即磨损量 W_v 与载荷及距离成正比、与软材料的屈服强度或硬度成反比。并且也有一个无量纲参数——磨损系数 K 。对一般金属及合金，磨粒磨损系数 K 大约在 $10^{-2} \sim 10^{-1}$ 范围内。

很多研究表明，在实际工作中，下述一般规律可供参考：

(1) 纯金属及未经热处理硬化的钢，其抗磨粒磨损能力（相对耐磨性 ε ）与它们的自然硬度成正比（图1-5）；

(2) 经过热处理硬化的钢其耐磨性随硬度增加而增加，

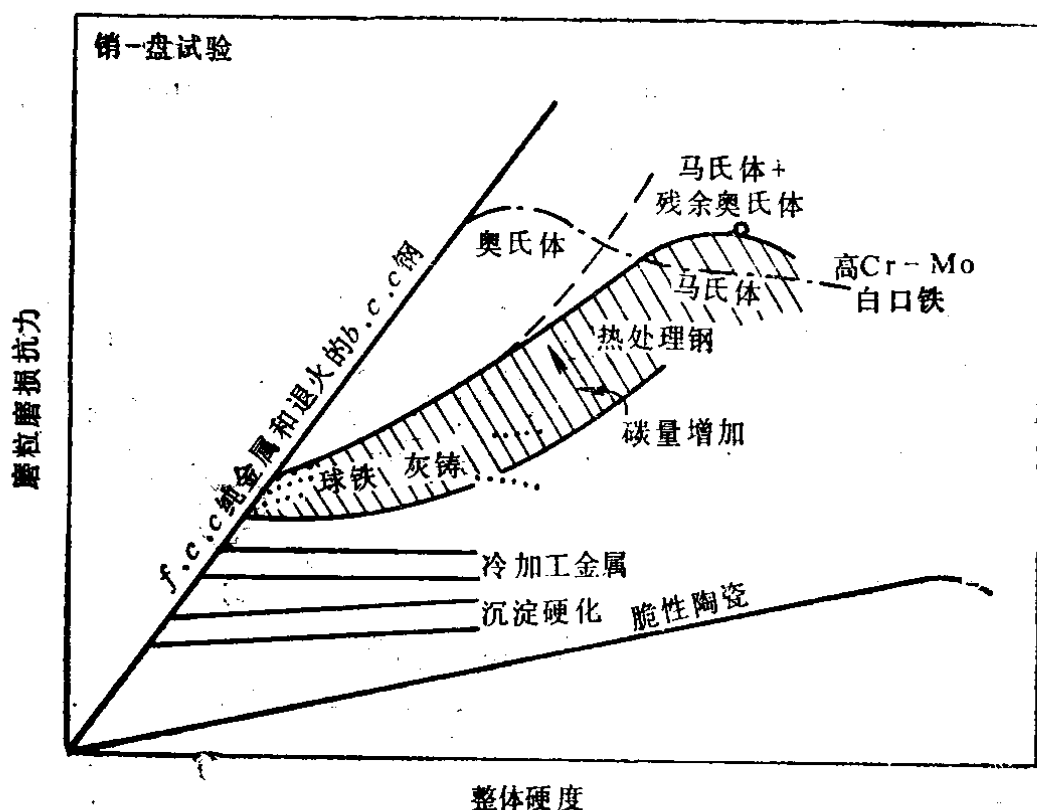


图5-1 不同材料耐磨粒磨损能力与整体硬度的关系
(磨料：碳化硅)