

材料的粘着磨损 与疲劳磨损

材料耐磨抗蚀及其表面技术丛书 编委会主编

本书是“材料耐磨抗蚀及其表面技术”丛书的第三分册。全书共分二篇十章，第一篇概述了材料粘着磨损定义、分类、基本原理及影响因素，粘着磨损的试验方法和粘着磨损的特性，最后简单叙述了耐粘着磨损的表面强化技术。第二篇概述了材料疲劳磨损定义、特征、基本原理，疲劳磨损的试验方法及控制因素，最后简述了防止材料疲劳磨损的表面处理技术。

本书可供从事材料及机械产品研究、设计、制造、使用等方面工作的具有中专以上水平的工程技术人员及技术管理人员阅读，也可供其它有关科技人员及大专院校师生参考。

材料的粘着磨损与疲劳磨损

材料耐磨抗蚀及其表面技术丛书 编委会主编

高彩桥 刘家浚 编著

*

责任编辑：常燕宾 版式设计：张世琴

封面设计：刘代 责任校对：熊天荣

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南里一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号）

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 787×1092¹/₃₂·印张 14³/₄·字数 326 千字

1989年5月北京第一版·1989年5月北京第一次印刷

印数 0,001—2,410·定价：11.00元

*

ISBN 7-111-00736-0/TG·173

丛书编委会顾问：陈南平 邵荷生
王小同

主 编：刘家浚

副主编：周平安 孙希泰 廖乾初

编委会委员（按姓氏笔划）

王小同、刘家浚、刘英杰、孙希泰、
李诗卓、李志芳、陈玉民、周平安、
范玉殿、倪瑞澄、高彩桥、郦振声、
常燕宾、廖乾初

前 言

在国民经济和国防建设中,各种机械产品的零件由于磨损与腐蚀引起的早期失效与报废,从而造成能源与材料的消耗是十分惊人的。各主要工业国家都有这方面的调查统计。如美国每年由于摩擦磨损和腐蚀造成的损失各约1000多亿美元,各占国民经济总产值的4%。我国据有关部门的不完全统计,每年摩擦学损失达400亿元,腐蚀方面的损失也将近200亿元。同时,材料的磨损与腐蚀也是影响近代机械产品的性能质量和寿命,从而影响其竞争能力的重要问题。作为机械产品的设计原则,目前已从单纯的强度设计发展到针对材料强度、磨损与腐蚀三大失效原因的综合设计。因此,解决材料的耐磨与抗蚀问题,已受到国内外机械设计与制造部门、材料研究与生产部门的普遍重视。

材料的磨损与腐蚀是个相当复杂的边缘学科,它受到一系列因素的影响。解决的途径应从分析失效的原因出发,从调整或改变工况条件,改善构件设计,合理选择材料,改进工艺措施和进行表面防护等各个方面,由整个系统角度去确定解决方案。原则是从实际出发且经济有效。为此需要通过近代研究方法,弄清系统中各因素的相关关系,即弄清楚磨损与腐蚀的基本规律和失效机理,以便正确指导这方面的工程实践。因此,中国机械工程学会材料学会于1982年决定成立“材料耐磨抗蚀及其表面技术委员会”,其任务就是要推动综合研究解决材料耐磨抗蚀问题的学术交流活动,为节约能源与材料消耗,提高机械产品质量发挥积极作用。为了

尽快地，广泛地把这方面的基本理论知识和研究成果介绍给广大的有关工程技术人员，使其能在生产及科研实践中应用并收到实效，为此，学会决定编写一套“材料耐磨抗蚀及其表面技术”丛书，由机械工业出版社出版，为此成立了丛书编委会及顾问组。第一批丛书包括丛书概论等十个分册（分册名称附后），每册大约15~25万字左右。本套丛书共分四大部分，第一部分材料的摩擦与磨损；第二部分材料的腐蚀与防护；第三部分材料表面强化；第四部分材料的表面分析。

材料的腐蚀与防护只在第一分册概论中作一般的介绍，详细的论述将待再版时继续补充。

本丛书选材力求先进、全面，尽量作到在内容上具有一定理论深度，概念准确。为避免与其它专业丛书重复，本书力求突出材料的耐磨与抗蚀，重点放在应用上，同时内容通俗易懂，便于自学掌握。

由于作者知识水平有限，经验阅历不多，书中缺点错误在所难免，恳请广大读者和专家提出批评指教。

材料耐磨抗蚀及其表面技术丛书编委会

1984.11

第三分册材料的粘着磨损与疲劳磨损，全书共分两篇十章，第一章至第五章由高彩桥同志编写，第六章至第十章由刘家浚同志编写。全书由邵荷生审阅。

目 录

第一篇 材料的粘着磨损

第一章 粘着磨损概述.....	1
一、粘着磨损的本质和特点	1
二、粘着磨损的分类	3
三、粘着磨损的表达式	7
四、研究粘着磨损的意义	10
五、粘着磨损的研究历史与现况	13
参考文献	20
第二章 粘着磨损的基本原理及其影响因素.....	22
一、序言	22
二、粘着磨损的基本模型	24
三、粘着磨损的主要理论	34
四、粘着磨损的影响因素	50
参考文献	67
第三章 粘着磨损的试验研究方法.....	71
一、粘着磨损的试验方法	71
二、粘着磨损的测试方法	80
三、摩擦表面及亚表层的研究方法	98
参考文献	113
第四章 几种典型材料的粘着磨损特性	116
一、各种摩擦副材料的粘着磨损	116
二、钢的粘着磨损特性	118
三、铸铁的粘着磨损特性	142
四、有色金属的粘着磨损特性	153
五、聚合物的粘着磨损特性	165
六、其它非金属材料的粘着磨损特性	168
参考文献	170
第五章 提高材料表面耐粘着磨损的表面强化技术	173
一、渗碳	173

二、渗氮186

三、渗硼198

四、丰田工艺204

五、气相沉积超硬覆盖层206

六、渗硫与硫氮共渗209

七、氮氧共渗212

参考文献212

第二篇 材料的疲劳磨损

第六章 疲劳磨损概述215

一、疲劳磨损的定义与特征215

二、疲劳磨损机制在磨损中的普遍性217

参考文献232

第七章 疲劳磨损的基本原理与现象234

一、接触应力的计算234

二、点蚀与剥落257

三、剥层与擦伤280

四、疲劳理论在疲劳磨损中的应用304

参考文献324

第八章 疲劳磨损的试验研究方法327

一、接触疲劳磨损试验方法327

二、疲劳裂纹的观察及裂纹扩展速率的测定340

三、与研究疲劳磨损有关的主要材料参数测定方法352

参考文献362

第九章 预防疲劳磨损的措施364

一、材料生产过程的影响364

二、材料组织结构的影响371

三、材料硬度的影响388

四、表面粗糙度的影响398

五、润滑油的影响405

六、环境的影响412

参考文献415

第十章 防止疲劳磨损的表面处理技术	419
一、表面渗碳、渗氮及碳氮共渗	420
二、磷化及硫化处理	431
三、自熔合金表面涂层	437
四、电镀	446
五、固体润滑膜涂层	455
参考文献	462

第一篇 材料的粘着磨损

第一章 粘着磨损概述

一、粘着磨损的本质和特点

粘着磨损是一种重要而常见的磨损形式。由于粘着作用，使摩擦表面的材料由一个表面转移到另一个表面所引起的磨损称为粘着磨损。它是指两个相对滑动的表面在摩擦力的作用下，表层发生塑性变形，表面的污染膜、氧化膜被破坏，而裸露出新鲜金属，由于固相焊合作用使两个表面结合起来，如果外力克服不了焊合点及其附近的结合力，便发生咬卡现象。当外力大于这种结合力时，外力使结合处发生剪切断裂。剪切若发生在接触表面，那就不会发生磨损（即所谓“零磨损”）；若不发生在接触表面上，而发生在强度较低的一方，此时，强度较高一方的表面上将粘附较软的金属，这种现象称为“物质转移”，这种现象是粘着磨损的重要特点。用扫描电子显微镜观察粘着磨损表面时，可以清楚地看到粘附在金属表面的附着物。在以后的摩擦过程中，附着物辗转于对磨件的表面之间（图 1-1）。有些粘附物在反复的摩擦中可能由金属表面脱落下来，变成磨损产物—磨屑。粘着磨损的磨屑多成片状（图 1-2）。

文献〔1〕报导了黄铜（销）与不锈钢（环）进行粘着磨损试验时，金属转移与磨损之间的关系。图 1-3 说明黄铜在



图1-1 粘着磨损表面的物质转移 400×



图1-2 粘着磨损的磨屑特征

摩擦试验的初期先向不锈钢上涂抹（物质转移），经过一定时间之后（如图上所示约为 3 min）转移量不再增加。该文献还指出，钢与钢对磨时的转移量比不同金属之间对磨时小 40 倍。

粘着磨损是一种普遍存在的磨损形式。汽车、拖拉机、机床、飞机、宇航器械中的许多零件承受着粘着磨损，刀具、模具、钢轨、量具的失效都与粘着磨损有密切关系。例如航空发动机零件中约有 30% 是承受粘着磨损的，而柴油机中则有 65% 的零件是在粘着磨损的作用下工作的。宇航环境中

由于没有氧气，金属表面不产生氧化膜，裸露的金属表面间在相对运动时很容易产生粘着。所以在制造第一颗人造卫星时，粘着摩擦使设计人员提心吊胆。

由于粘着磨损有这样大的普遍性和重要的科学技术意义，因此引起了各国的普遍重视，人们正对它进行大量的研究工作。

二、粘着磨损的分类

根据磨损程度常把粘着磨损分为如下几种〔2、3〕。

（一）涂抹（涂敷）（Smearing）

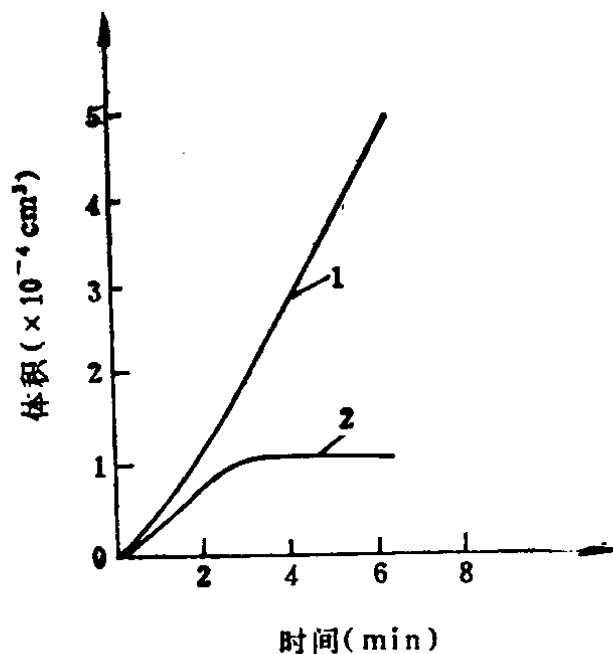


图1-3 黄铜与不锈钢对磨时磨损量（1）和转移量（2）的变化〔1〕
销-环式试验机，干滑动摩擦

材料从摩擦表面上磨损下来，又以涂抹形式附着于摩擦表面上，称为涂抹。磨损产物可能附着在摩擦副的一方或双方。涂抹时剪切发生在离粘着结合点不远的较软金属的浅层内，软金属涂敷在硬金属表面上。如铅基合金的轴瓦与钢的轴颈相摩擦时就是这样。此时，软金属的剪切强度小于界面上的剪切强度。

(二) 擦伤 (Scratching)

在摩擦表面的滑动方向形成细而浅的划痕，使摩擦表面遭到损坏，称为擦伤。擦伤时剪切发生在软金属的亚表层，如铝与钢对摩时就是这样。此时，界面上的剪切强度即大于软金属也大于硬金属，因此，转移到硬金属表面的粘着物对软金属有擦伤作用。

(三) 刮伤 (划伤) (Scuffing)

摩擦表面在滑动方向上产生较深划痕的磨损破坏称为刮伤。刮伤比擦伤的破坏程度严重，但两者并没有明确的定量界限。美国人有时也用Scoring来表述这种磨损形式。Scoring是刮伤中较轻的，而galling则是刮伤中较重的。刮伤时界面的剪切强度大于摩擦副两方的剪切强度。

(四) 咬死 (Seizure)

摩擦表面发生严重粘焊时，使摩擦副双方不能相对滑动，称为咬死。咬死的根本原因是粘着。此时，外力克服不了界面的结合力，也不能使摩擦双方发生剪切断裂，摩擦副的相对运动被迫停止。

上面这种分类方法是比较多见的一种。在摩擦、磨损的研究工作中还经常运用轻微磨损 (Mild Wear) 和严重磨损 (Severe Wear) 的术语。严重磨损的原因主要是粘着，在重载时容易发生，磨损产物多为金属片屑。轻微磨损的磨屑

多为氧化物，因此这种磨损形式与氧化磨损关系密切。众所周知，这两个术语是不严谨不科学的。因为它们没有明确的标准和衡量界限，它们更不能反映磨损的实质。

在国内、外的摩擦学文献中〔4〕，特别是苏联的学者常用胶合这个术语来表述粘着磨损的一些形式。胶合是指由摩擦力和摩擦热的作用使材料表面发生严重破坏的一种磨损形式。发生胶合时摩擦表面出现较深的划痕和沟坑，有时表面发生熔化，摩擦系数突然增大，有时表面温度急剧升高。胶合的实质也是固相焊合及随后的撕脱。以塑性变形为主要原因造成冷焊引起的磨损称为第一类胶合。以表面温度升高为主要原因造成热焊引起的磨损称为第二类胶合，后者也称热粘着，前者与刮伤很相近。图 1-4 是胶合表面的断面组织。

a) 是等温处理的45号钢，硬度较低，摩擦时表面产生严重的塑性变形，表面有许多划痕，是冷胶合（第一类胶合）的典型结构。b) 是调质的45号钢，强度大，塑变抗力也大，因此摩擦功主要消耗在材料表面上，所以表面的温升很高，表面的白层说明温度已经超过了临界点，它是热胶合（第二类胶合）的典型结构。

Н. Л. Голего 在他的专著“机器中的胶合及其克服办法”中，比较详细地描述了这种特殊的粘着磨损类型。他指出：第一类胶合发生在滑动速度低（小于 $0.5\sim 0.6\text{ m/s}$ ）、压强小于屈服极限、表面塑性变形大的条件下。产生这种胶合时表面温度不高（小于 $100\sim 150^\circ\text{C}$ ），磨屑为金属而不是氧化物，表层应力增加。因此，摩擦表层不发生成分改变，没有相变，连 $\alpha\text{-Fe}$ 的状态也无甚变化。但是，表面有明显的塑性流动的痕迹，有不同尺寸的划伤和坑痕。如果表面层的机械性能（如硬度）较高（ $\text{HRC} = 50\sim 60$ ），这种磨损就

不容易产生与发展。增加载荷使磨损强度加剧，润滑对这类磨损有很重要的作用。

第二类胶合发生在滑动速度大、压强较大的条件下，发生这种粘着磨损时，材料表面温度升高较明显，有时甚至高于临界点，表面发生回火、退火及熔化现象。所以，此时摩擦表面不仅有组织状态的变化，也有成分的变化，常可以看到有“白层”，并时常伴有表面的熔化和涂沫，这类磨损发生的突然且十分剧烈，是一种十分危险的失效形式。

日本的一些摩擦学者又将第一类胶合称为机械破坏磨损，第二类胶合称为熔化磨损。图 1-5 是磨损类型与滑动速度的关系

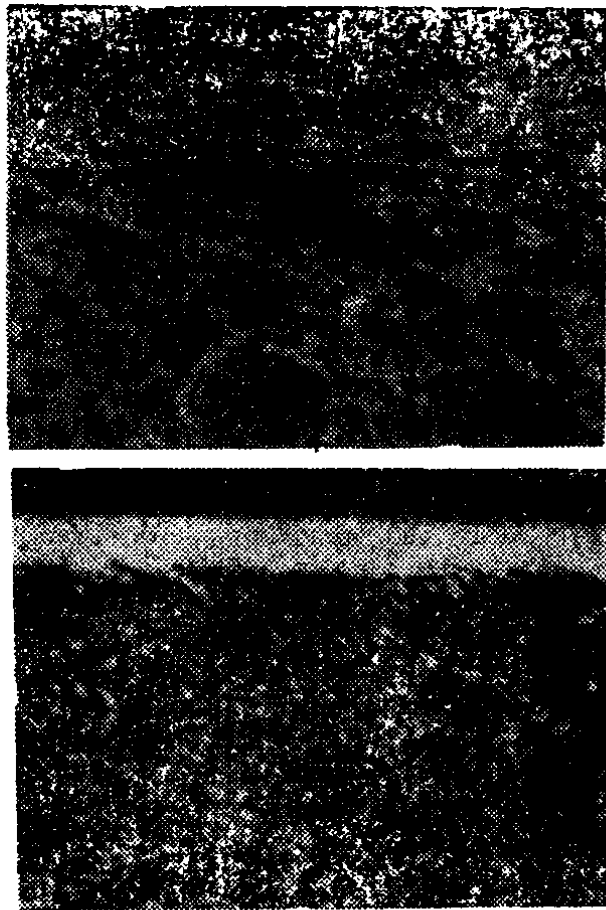


图1-4 冷(a)、热(b)胶合的断面结构 400×

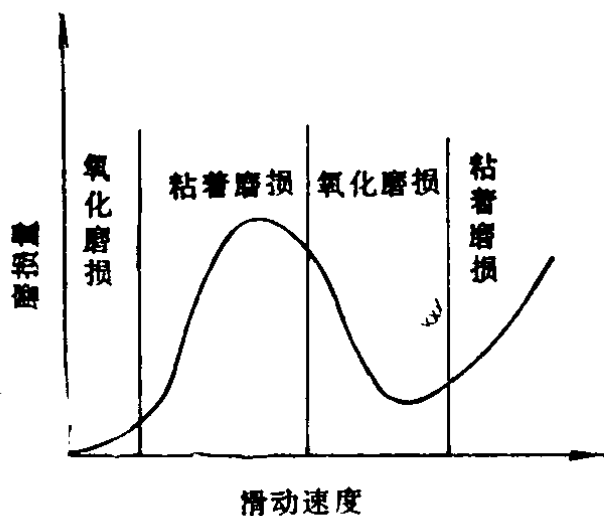


图1-5 磨损类型与滑动速度的关系

系曲线。

将胶合磨损的特点总括起来，可见表 1-1。

表1-1 胶合磨损的特点

项 目	第 一 类 胶 合	第 二 类 胶 合
主导因素	塑性变形	温度升高
机械性能	加工硬化	软化、硬化
组织变化	无显著变化	变化明显
润滑作用	有明显效果	作用不大
表面成分	无变化	有变化
表面温度	不大于200°C	可能超过临界点
表层形变	剧烈	有变形
磨损速率	剧烈	严重
磨损产物	金属	金属氧化物
表面白层	不显著	明显

三、粘着磨损的表达式

粘着磨损的公式有好几种，例如1952年 I. T. Burwell 和 C. D. Strang, 1974年 N. P. Sub都提出过^[7]。但是，现在普遍采用的是1953年 J. F. Archard 提出来的一种表达式^[6、8、9、10]。

根据以往对粗糙表面接触状态的分析（参见本丛书的第一分册，第一章），可以假设接触发生在一些半径为 r 的微凸体上。每个接触点的面积为 πr^2 ，而每个接触点所承受的载荷为 $\pi r^2 \sigma_s$ 。这里的 σ_s 为屈服强度。当摩擦副发生滑动距离为 $2r$ 的相对运动时，表面上每一个微凸体都将受到触及。每个微凸体将产生一个半球形的磨屑，其体积为 $2/3 \pi r^3$ 。于是，单位滑动距离的磨损量（即磨损率） W 为：

$$W = \frac{\Sigma \frac{2}{3} \pi r^3}{2r} = \frac{n \cdot \pi r^3}{3} \quad (1-1)$$

式中 n 为接触点数，由于每个接触点只承担部分载荷 $p = \sigma_s \cdot \pi r^2$ ，因此总载荷 P 为

$$P = \Sigma p = n \cdot \sigma_s \cdot \pi r^2 \quad (1-2)$$

或
$$\frac{P}{\sigma_s} = n \pi r^2 \quad (1-3)$$

有的文献中用 H 来代替 $3\sigma_s$ ，

即
$$W = \frac{P}{3\sigma_s} = \frac{P}{H} \quad (1-4)$$

换句话说，单位滑动距离的磨损量与载荷 P 成正比，与强度或硬度成反比。

上式的推导中假定每个微凸体都产生一个磨屑，事实上并非如此，只是有相当一部分，例如 k （百分数）的微凸体产生了磨屑。这样上式便可改写成：

$$W = k \frac{P}{3\sigma_s} \quad (1-5)$$

这里的 k （称磨损系数）可以理解为微凸体产生磨屑的概率。 k 与滑动摩擦副双方的材料及其配合有关，与摩擦的条件也有关。

由式（1-5）不难看出如下三点结论：

- 1) 滑动磨损率与载荷大小成正比；
- 2) 滑动磨损率与较软材料的强度或硬度成反比；
- 3) 滑动的磨损率与运动路程成正比。

后来的实验表明这些结论在定量关系上尚有一定的出入，例如第一点就只适于有限的载荷范围，Burwell 及 Str-

ang 的试验表明, 当载荷 P 小于钢的硬度的 $1/3$ 时, 磨损率与载荷成直线关系, 若超过这个范围, 直线关系就不成立了。换句话说, 当载荷小于硬度的 $1/3$ 时, k 值保持定值, 如载荷大于硬度的 $1/3$, k 值急剧增大, 磨损明显加剧。各种金属的临界载荷虽然不同, 但规律性是大致相同的。45号钢的试验结果示于图1-6。常见摩擦副的 k 值列于表 1-2。

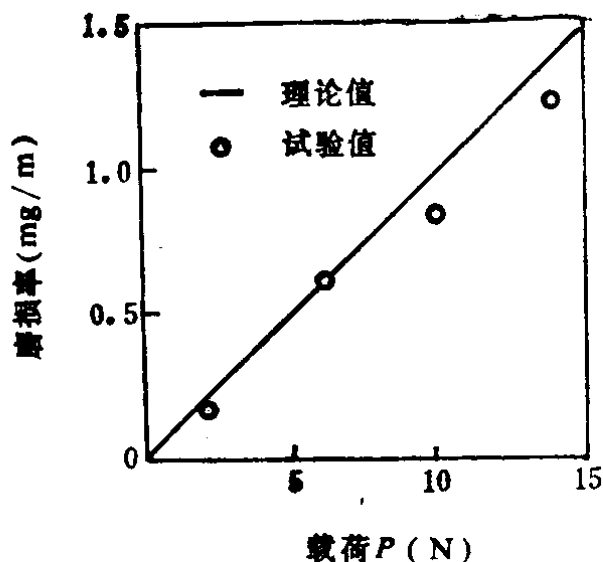


图1-6 粘着磨损率与临界载荷的关系

表1-2 常见摩擦副的 μ (摩擦系数)与 k (磨损系数)

摩擦副	摩擦系数 μ	磨损系数 k
金-金	2.5	0.1~1
铜-铜	1.2	0.01~0.1
软钢-软钢	0.6	10^{-2}
黄铜-硬钢	0.3	10^{-3}
特弗隆-硬钢	0.15	2×10^{-5}
不锈钢-硬钢	0.5	2×10^{-5}

关于材料硬度对耐磨性(磨损量)的影响, 在工程界常常发生误解和混淆。许多人认为只要提高硬度就能改善材料的耐磨性。如果说这对磨料磨损还有相对合理性的话, 那么, 对粘着磨损就不一定可取。试验证明, 降低表层硬度对粘着