

国家示范性专业重点规划教材

摩擦材料生产工艺

主 编 于占江 王晓芳
参 编 陈克文 朱文婷

 天津大学出版社
TIANJIN UNIVERSITY PRESS

前 言

互相接触并做相对运动的物体之间会产生摩擦。比如人们走路以及汽车行驶时和地面间产生的摩擦。自然界中因为摩擦现象的存在,使一部分能量不能转化为有用功而被消耗。同时,由于摩擦现象而引起的工具、机器零件磨损。摩擦表面的磨损不仅与摩擦副所处的工况条件(载荷、接触形式、相对运动速度、环境条件)有关,还与零件材料、加工工艺、表面处理工艺以及润滑材料和润滑剂的相互作用有关。因此,在研究摩擦、磨损和润滑问题的过程中,将数学、化学、物理、冶金学、材料学等学科互相渗透交叉,从而形成了一门新的独立的学科——摩擦学(Tribology)。摩擦学是研究产生相对运动的两表面间的摩擦、磨损和润滑的一门科学技术,包括摩擦理论、摩擦材料的设计制备以及摩擦材料的性能检测三大部分。

本书针对目前机械行业中广泛应用的摩擦材料进行阐述,主要包括摩擦材料的磨损机理、配方设计、摩擦材料制备、性能检测及摩擦材料行业标准几大内容,目的是使读者了解工业中应用的摩擦材料的设计标准、基本组成、生产方法以及产品质量分析的基本知识。

本书共包括八大章节其中第1章简述了摩擦磨损的基础知识;第2章从摩擦材料的发展历史和发展现状对摩擦材料行业做了介绍;第3章介绍了生产摩擦材料的原料以及原料选择的标准;第4章介绍了摩擦材料的生产工艺;第5章介绍了摩擦材料的配方设计与改进;第6章介绍了工业中常用的摩擦材料;第7章介绍了摩擦材料性能评价的相关标准;第8章介绍了摩擦材料行业中的名词术语。本书通俗易懂,实用性强,适合初学者使用。

本书由咸阳师范学院于占江博士/副教授任主编并编写第2章和第8章,咸阳师范学院王晓芳博士任主编并编写第3章、第4章、第5章和第7章,咸阳非金属研究院陈克文高级工程师编写第6章,咸阳师范学院朱文婷老师编写第1章。全书由于占江博士/副教授负责统稿。

本书在编写过程中,参阅和引用了部分国内外相关专著和资料,在此向相关作者致以深深的谢意!由于作者学识有限以及时间仓促,书中存在不足之处在所难免,敬请读者不吝赐教。

编者

2017年6月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 摩擦	1
1.1.1 概念与分类	1
1.1.2 基本理论	2
1.2 磨损	7
1.2.1 概念	7
1.2.2 磨损类型	7
1.3 摩擦磨损过程的影响因素	13
1.4 课程地位	15
第2章 摩擦材料	17
2.1 摩擦材料发展简史	17
2.1.1 摩擦材料发展史	17
2.1.2 我国摩擦材料的发展	19
2.2 摩擦材料行业的发展现状和趋势	19
2.2.1 国外摩擦材料发展现状	19
2.2.2 国内摩擦材料发展现状	20
2.3 摩擦材料的分类	22
2.3.1 按照材质分类	23
2.3.2 按照工作功能分类	27
2.3.3 按照检测标准分类	33
2.3.4 按照制品外形分类	34
2.3.5 按照用途分类	34
2.4 摩擦材料的结构与组成	34
2.4.1 复合材料简述	34
2.4.2 摩擦材料的组成	34
2.5 摩擦材料的技术要求	35
2.5.1 摩擦磨损性能	36
2.5.2 耐热性能	37
2.5.3 物理力学性能	37
2.5.4 制动噪声	38
2.6 摩擦材料的磨损机理	38
2.7 摩擦材料的摩擦磨损特点	39
第3章 摩擦材料的组成	42
3.1 黏结剂	42

3.1.1	酚醛树脂	42
3.1.2	改性酚醛树脂	46
3.1.3	橡胶	50
3.1.4	橡胶和树脂共混型黏结剂	52
3.1.5	无机黏结剂	54
3.2	增强材料	55
3.2.1	天然矿物纤维	59
3.2.2	人造矿物纤维	61
3.2.3	复合矿物纤维	63
3.2.4	岩棉纤维	64
3.2.5	有机纤维	65
3.2.6	金属纤维	68
3.2.7	晶须	69
3.2.8	混杂纤维	73
3.2.9	增强纤维小结	73
3.3	填料	74
3.3.1	填料特性与摩擦材料性能的关系	75
3.3.2	增摩填料	76
3.3.3	减摩填料	78
3.3.4	有机类填料	79
3.3.5	废料填料	80
3.3.6	偶联剂	81
第4章	摩擦材料的生产工艺	86
4.1	摩擦材料制备工艺	86
4.1.1	短纤维摩擦材料制备工艺	86
4.1.2	湿法压塑料制备工艺	94
4.2	压塑料的工艺性能	97
4.3	压塑料的预成型	99
4.4	热压成型	100
4.4.1	工艺参数	100
4.4.2	操作规程	104
4.4.3	模具设备	104
4.4.4	质量控制	106
4.5	辊压法成型固化工艺	108
4.6	热处理	109
4.7	湿法工艺	111
4.7.1	混料制浆	111
4.7.2	预制体成型	112
4.7.3	浸渍树脂	112

4.7.4 热压固化	112
4.8 金属附件的处理	112
4.8.1 金属附件的制备	113
4.8.2 金属附件的表面处理	113
4.8.3 金属附件的涂胶	113
4.9 压制品的后加工处理	113
4.9.1 磨削加工	114
4.9.2 钻孔	115
第5章 摩擦材料的配方设计与改进	120
5.1 配方设计的概述	120
5.1.1 配方设计的原则	120
5.1.2 配方设计试验的程序	121
5.2 配方设计的方法	122
5.2.1 单因素试验设计	122
5.2.2 多因素正交试验设计	123
5.2.3 均匀试验设计	125
5.3 摩擦材料改进途径	128
5.3.1 配方的主要内容	128
5.3.2 配方与工艺的关系	132
5.3.3 摩擦材料的结构形态与内部界面	135
5.3.4 配方与产品性能	137
5.3.5 配方的改进途径	140
第6章 常用摩擦材料介绍	145
6.1 金属基摩擦材料	145
6.1.1 材料的组成	145
6.1.2 制备工艺	146
6.1.3 性能	147
6.1.4 用途	148
6.2 碳/碳复合材料	149
6.2.1 制备工艺	150
6.2.2 碳/碳复合材料的特点	151
6.3 陶瓷基摩擦材料	152
6.3.1 C/C-SiC 复合材料	153
6.3.2 Al ₂ O ₃ 基陶瓷摩擦材料	155
6.4 纸基摩擦材料	157
6.4.1 制备工艺	158
6.4.2 碳纤维增强纸基摩擦材料	163
6.4.3 纸基摩擦材料的特点及应用	164
第7章 摩擦材料的性能评价	167

7.1 摩擦材料的基本特性	167
7.2 摩擦副设计对摩擦材料的要求	168
7.2.1 设计摩擦系数	168
7.2.2 设计磨损寿命	168
7.2.3 对其他性能的要求	169
7.3 小样试验	169
7.3.1 摩擦磨损性能试验	170
7.3.2 热性能试验	182
7.3.3 物理机械性能	185
7.4 台架试验	187
7.5 道路试验	189
7.6 发展趋势	189
第8章 摩擦材料术语	192
8.1 摩擦材料制品术语	192
8.2 摩擦磨损术语	195
8.3 试验方法及性能术语	196

第 1 章 绪 论

1.1 摩擦

1.1.1 概念与分类

1. 概念

摩擦普遍存在于人类的日常生活和生产活动中,是我们日常行走、行车等不可缺少的作用力。比如脚底、轮胎与地面之间的摩擦力为我们提供了行动的动力。但同时摩擦也会带来负面影响,如齿轮之间长时间相互摩擦,会产生摩擦热并造成磨损,导致零件失效。

摩擦是相互接触的表面在相对运动中发生能量转换并产生能量损耗的过程,也就是说相互接触并做相对运动的物体之间会产生摩擦。

两个物体做相对运动时,其接触界面上存在的切向阻抗现象,称为(外)摩擦。同一物体(如流体或变形中的固体)各部分做相对运动时,其分子间的阻抗现象称为内摩擦(流体的内摩擦力仅取决于流体的黏度、速度梯度、摩擦面积),这里只讨论外摩擦。

两个相互接触的物体在外力作用下发生相对运动(或具有相对运动趋势)时,在接触面间产生切向运动阻力,这种阻力叫摩擦力,这种现象称作摩擦。两个在接触表面相互摩擦的物体统称为摩擦副。如图 1.1 所示,在外力 P 的作用下,物体沿接触表面滑动(或具有相对滑动趋势)时,存在于界面上的切向阻力 F 就称作摩擦力。

2. 分类

根据摩擦副的结构和运动方式,摩擦可分为以下几种形式。

1) 按摩擦副运动方式分类

(1) 滑动摩擦:当接触面相对滑动(或具有相对滑动趋势)时的摩擦。

(2) 滚动摩擦(图 1.2):物体在力矩的作用下沿接触表面滚动时的摩擦。

2) 按摩擦副运动状态分类

(1) 静摩擦:物体受力后与另一物体具有相对运动趋势,处于静止临界状态时的摩擦。

(2) 动摩擦:物体受力后,越过静止临界状态而沿另一物体表面发生相对运动时的摩擦。

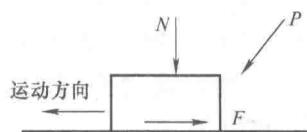


图 1.1 物体摩擦时的受力情况

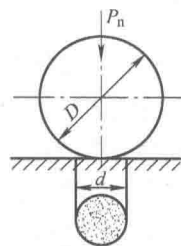


图 1.2 滚动摩擦

其中最大静摩擦系数是两物体具有相对运动趋势,但还没发生相对运动时的摩擦系数;动摩擦系数是当两物体发生相对运动时的摩擦系数。

3) 按表面的润滑情况分类

(1) 干摩擦:物体的接触表面上无任何润滑剂存在时的摩擦。

(2) 边界摩擦:两物体表面被一种具有润滑性能的边界膜分开时的摩擦。

(3) 流体摩擦:两物体表面被润滑剂膜完全隔开时的摩擦(摩擦发生在界面间的润滑剂膜内,即流体的内摩擦)。

(4) 混合摩擦(半干摩擦和半流体摩擦):半干摩擦是指在摩擦表面上同时存在着干摩擦和边界摩擦的现象;半流体摩擦是指在摩擦表面上同时存在着流体摩擦和边界摩擦的现象。

实际工程表面在摩擦过程中,可能出现一部分被流体膜分隔开,一部分覆有边界膜甚至同时伴有材料直接接触的混合摩擦。

为了了解摩擦的起因及影响因素,达到有效控制摩擦的目的,通常从干摩擦进行分析。严格地讲,干摩擦是指两个纯净表面(除了材料本身,表面上不存在任何润滑剂膜、吸附膜、反应膜和污染膜等)的摩擦。但在大气环境中很难得到纯净表面,所以人们通常把“大气环境条件下的无润滑摩擦”称为干摩擦。

1.1.2 基本理论

1. 古典摩擦定律

古典摩擦定律是1699年法国物理学家阿蒙顿提出的,1781年由法国物理学家库仑进行广泛验证和充实,故此定律又称为阿蒙顿-库仑定律。古典摩擦定律的内容如下。

(1) 滑动摩擦力与作用于摩擦表面的正压力成正比,一般表达形式为

$$F = \mu \cdot N$$

$$\mu = F/N$$

式中, F 为滑动摩擦力; N 为法向载荷; μ 为摩擦系数(也常用 f 表示),是一个常数。

(2) 滑动摩擦力与名义接触面积的大小无关。因此,尽管两个物体的物理尺寸不同,但摩擦系数相同。

(3) 最大静摩擦力大于动摩擦力,即最大静摩擦系数大于动摩擦系数。

(4) 摩擦力与滑动速度的大小无关。

古典摩擦定律是实验经验定律,它揭示了摩擦的基本性质,虽然历经了几百年,但由于在一定程度上反映了滑动摩擦的机理,因此仍被许多工程实际采用。但是,随着对摩擦研究的深入,人们发现该定律有许多与实际情况不相符的地方,但这并不意味着其违背自然界的规律。

古典摩擦定律中提出摩擦系数是一个常数,但经过多次实验验证发现,在一定的介质环境下、特定材质的摩擦副的摩擦系数才是一个常数。不同材质的摩擦副在干摩擦时的摩擦系数不同。此外,不同的介质环境也会影响摩擦系数。例如,在正常的大气环境下,硬质钢摩擦副的摩擦系数大约为0.6,但在真空条件下,其摩擦系数可达到20。因此,摩擦系数不是材料固有的特性,是材质和环境条件的综合特性。

还有一些特殊情况使得摩擦系数的确定变得复杂,如最大静摩擦系数受到静止时间长短的影响,接触时间增加,最大静摩擦系数也增大;摩擦过程中出现跃动现象,干摩擦运动并

非连续平稳地滑动,而是断续地滑动,当摩擦表面是弹性固体时,这种现象更为显著;预位移问题,在施加外力使静止的物体开始滑动的过程中,当切向力小于最大静摩擦力的极限时,物体会产生一极小的预位移,达到新的静止位置。预位移随切向力的增大而增大,物体开始稳定滑动时的最大预位移称为极限位移,对应极限位移的切向力就是静摩擦力。预位移具有弹性,即切向力消除后物体沿反方向移动,试图恢复原来的位置,但保留一定的残余位移量。预位移状态下的摩擦力对于制动装置的可靠性同样具有重要意义。

当法向载荷较小时,普通材料的摩擦力和法向载荷成正比,即摩擦系数为常数。实际上摩擦系数往往并不是常数,它与摩擦副材料的性质、温度、速度、表面粗糙度、表面污染等有关。对于极硬材料和极软材料,摩擦力和正压力不成线性关系,摩擦力与法向载荷的关系如下:

$$F = CN^B$$

式中, F 为摩擦力; N 为法向载荷; C 为常数; B 为指数,大小在 $0.7 \sim 1.0$ 。

采用木块与钢作为摩擦副,其名义接触面积增加了250倍,但摩擦系数基本没有变化,这证实了古典摩擦定律的第二摩擦定律。但是,对于聚合物之类的软材料或者非常光滑、洁净的表面,其实际接触面积接近名义接触面积,摩擦系数随着接触面积而变化。例如,随着汽车轮胎加宽,轮胎与路面的摩擦系数增大。

第三摩擦定律描述的摩擦力与滑动速度无关的现象有很大的局限性。动摩擦系数与滑动速度的关系通常都呈现负变化。一般情况下,摩擦系数随速度变化而变化,当速度变化一个数量级时,摩擦系数仅有很小的变化。滑动速度变化使界面剪切率发生改变,这影响到摩擦副材料的力学性能。对于许多金属和非金属材料而言,剪切率越大,表面强度就越大,从而使干摩擦下的实际接触面积和摩擦系数降低。另一方面,高压接触和高速滑动产生的表面瞬间高温,将显著降低材料强度,某些情况下还会发生表面局部熔化而降低抗剪强度,从而使得摩擦系数降低。古典摩擦定律之所以得出摩擦力与滑动速度无关的结论,是因为当时没有现代的高速运转机器,只有风力和水力可供利用。

2. 经典摩擦理论

一般被接受的理论是“机械啮合理论”“黏着理论”和“分子-机械理论”。这几种理论都认为,摩擦表面的固体接触状态直接影响摩擦性能。

如果将两个几何学的平面相互压在一起,则整个平面完全接触。但经过机械加工的金属表面不可能是理想的光滑表面,从微观上看,其表面也总是凹凸不平的,即存在表面粗糙度。因此当两个表面相互接触时,实际接触的斑点主要出现在微凸体,而不是整个固体表面,各接触区实际接触点具有不连续性和不均匀性。因此,固体表面接触时通常具有三种不同的接触面积(图1.3)。

(1)名义接触面积 A_n ,物体表面的宏观面积定义为名义接触面积,即理想光滑面物体的接触面积, $A_n = a \times b$ 。

(2)轮廓接触面积 A_p ,是指物体的接触表面被压扁部分所形成的面积,其大小与表面承受的载荷有关。轮廓接触面积是一种假设接触面积,大小与载荷和表面几何形状有关,占名义接触面积的5%~15%,可作为名义接触面积向实际接触面积转化和换算的过渡参数。

(3)实际接触面积 A_r ,是指在轮廓接触面积内,各实际承载部分的微凸体接触面积的总和(图1.3中黑点表示的接触面积)。实际接触面积的计算是摩擦磨损计算的一个重要组

成部分,其与固体表面的形状和大小无关,只占名义接触面积的0.01%~0.1%。

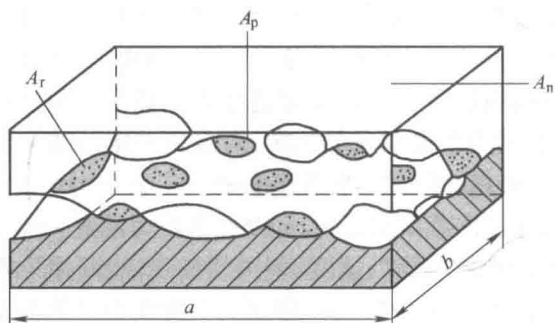


图 1.3 固体表面接触时的接触面积

动中形成的犁沟效应。

1699 年阿蒙顿提出最简单的机械啮合模型和理论。机械啮合理论认为,摩擦可能是表面粗糙单体的机械啮合所引起的。这个机理对静摩擦系数的存在做了解释,静摩擦力是凸峰相互啮合而阻止相对运动产生的力(图 1.4),同时把动摩擦系数解释为使表面上的微凸体越过下表面微凸体所需的力。

最大静摩擦系数

$$\mu_s = \tan \theta_s$$

动摩擦系数

$$\mu_k = \tan \theta_k \approx \mu_s / 2$$

只有在表面凸峰被削平、变形及压溃后,两表面才易于做相对运动。用这种理论可以解释一般情况下粗糙的表面比光滑的表面摩擦力大,即表面越光滑平整,摩擦力越小。把表面间涂油进行润滑解释为用油料填平凹谷而减小摩擦力。这种学说也称为“表面凹凸论”。它不能解释表面粗糙度特别小,经过充分研磨达到凸透镜程度的光洁表面与粗糙加工的表面摩擦时摩擦力反而增大、擦伤痕迹宽和表面破坏严重的现象。

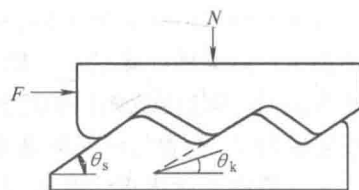


图 1.4 机械啮合理论模型

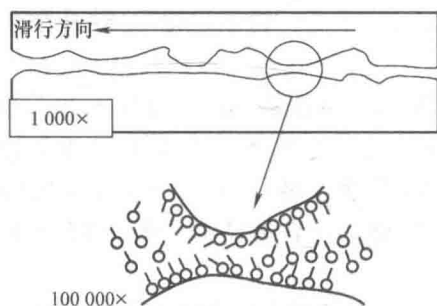


图 1.5 微凸体相互作用

2) 分子 - 机械理论

德萨古里亚斯发现摩擦表面间存在分子吸附力,指出表面越光滑,摩擦力越大。实际上当十分光洁的两表面接触,双方表面分子吸附力起主要作用时,摩擦力确实增大。因此分子 - 机械理论认为,在相当高的压力下,一方面在接触表面会产生分子引力,分子引力的作用如同对接触表面施加的负荷作用;另一方面摩擦表面实际接触部分的微凸体相互啮合(图 1.5)。因此,摩擦的过程就是克服表面微凸体的机械啮合以及表面分子间

引力的过程,故称为“分子 - 机械啮合理论”。摩擦系数为摩擦力与垂直负荷和接触表面分子引力之和的比值,即

$$\mu = \frac{F}{N + N_0}$$

3) 黏着理论

承载表面的相对运动阻力(摩擦力)是由表面相互作用引起的。表面的相互作用如图 1.6 所示。

I. 表面黏着作用

在两物体表面,即微凸体顶端相接触的界面上不存在表面膜的情况下,两物体在高压下直接发生接触,导致两表面分子相互吸附而形成连接点(冷焊),如图 1.6 中的 A, C, D 点。

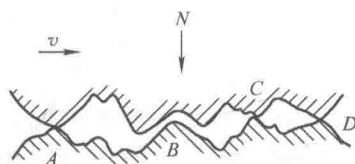


图 1.6 摩擦黏着理论模式

黏着理论认为,实际接触面积 A 只占表面接触面积的很小一部分。由于实际接触面积很小,故即使施加很小的负荷,在实际接触面上也会产生很大的单位压力,此时塑性接触点上的应力等于较软材料的压缩屈服强度极限或流动压力(σ_b),摩擦表面处于塑性接触状态,而实际接触面积等于负荷与屈服强度之比,即

$$A = \frac{N}{\sigma_b}$$

式中, A 为实际接触面积。

由上式可见,负荷增加或屈服强度降低均会使实际接触面积增大。

当两物体表面摩擦时,接触点产生的瞬时温度可达 1 000 °C 以上,分子与分子之间的作用力、高温、高压会使接触的微凸体发生黏着(或冷焊)。一旦发生相对滑动,微凸体之间的黏着点将被切断而产生滑动,滑动摩擦就是黏着点的形成和剪切交替发生的过程。那么黏着点切断时阻力的总和即是构成摩擦力的主要原因,称为摩擦力的“剪切项”。摩擦力(F)等于剪切面积(A)与材料剪切强度(τ_b)的乘积,即

$$F = A \times \tau_b$$

$$\mu = \frac{F}{N} = \frac{A \cdot S}{A \cdot P_m} = \frac{S}{P_m} = \frac{\text{软材料的剪切强度}}{\text{软材料的屈服强度}}$$

式中, S 为软材料的剪切强度, P_m 为软材料的屈服强度。

II. 表面犁沟作用

图 1.6 中 B 点处虽没有黏着作用,但是当表面发生相对运动时, B 点处阻碍运动的那部分表面材料仍需要被移动,较硬材料会嵌入较软材料,在软表面犁成沟槽才能继续做相对滑动,这时的阻力是构成摩擦力的另一个原因,称为摩擦力的“粗糙度项(犁沟项)”。

两接触表面做相对运动时,需要施加作用力(即对其做功)克服运动阻力。这些功主要消耗在以下方面。

(1) 当两接触表面做相对运动时,必须使阻碍运动的微凸体发生弹性变形或塑性变形。对于大多数金属材料而言,塑性变形消耗的功是不可逆的。

(2) 当微凸体间相互黏着时,必须消耗部分功,剪断此处的焊点连接。

(3) 当微凸体相互嵌合时,必须消耗部分功,剪断一些微凸体的高峰或使较软一方材料发生变形。

摩擦过程中消耗的能量就是摩擦力做的功。因此,摩擦力由两部分组成:

(1) 剪断固相焊接点的力——黏着分量(剪切分量);

(2) 克服硬质微凸体在软表面上的犁沟阻力——犁沟分量。

假定这两项阻力彼此没有影响,则总摩擦力为此两个分量的代数和,摩擦系数也可看作是两部分之和:

$$F = F_b + F_v = A_r \cdot \tau_b + A_v \cdot \sigma_b$$

$$\mu = \mu_b + \mu_v$$

式中, F 、 μ 分别为总摩擦力和总摩擦系数, F_b 、 μ_b 分别为摩擦力和摩擦系数的黏着分量, F_v 、 μ_v 分别为摩擦力和摩擦系数的犁沟分量, τ_b 为剪切强度, σ_b 为抗拉强度。

研究表明,当表面微凸体之间的接触是弹性接触或塑性接触以及有表面膜的作用时,会影响微凸体接触的结点强度,因此影响摩擦力的大小。由此可见,材料的剪切强度增高或压缩屈服强度极限变小,均会导致材料摩擦系数的增大。

在摩擦材料的配方设计中,采用高硬度的填料或者增加高硬度填料的用量来提高摩擦系数,就是基于黏着理论。高硬度填料粒子会增加物体之间摩擦表面的嵌入点及嵌入深度,颗粒越大、用量越多,剪切力会越大,材料剪切强度及摩擦系数也相应提高。另一方面,当摩擦材料中含有相当多的软质成分时,构成软质摩擦材料,例如橡胶基摩擦材料,或者摩擦表面温度在一定范围内升高时,材料的压缩屈服强度极限降低,导致摩擦表面真实接触面积变大,摩擦系数也会升高。

界面黏附强度取决于接触体的力学特性与化学作用。如果削弱界面的相互作用,则黏附强度会随之降低。表面上黏附污染物或液体膜(水、空气、润滑剂)将减小黏附强度,因为液体膜之间或气体膜之间的剪切作用远小于固体之间的剪切作用。

根据此表达式得到的大多数金属的摩擦系数都是一样的。因为大多数金属的 τ_b 与 σ_b 之比为 0.2,而实践表明,在大气条件下,无润滑金属的摩擦系数约为 0.5,高真空条件下摩擦系数更大,所以这个理论尚不完善。

4) 修正的黏着摩擦理论

简单的黏着摩擦理论认为,摩擦力只取决于材料的机械性质,而未考虑表面化学性质和表面物理性质对摩擦的影响。

(1) 实际接触面积的大小,不仅与法向载荷有关,也与载荷切向分量有关,切向力 F 的作用很容易使接触面积扩大。故实际接触面积的形成,应该是切应力和压应力的合力达到材料屈服极限时,接触点处发生的塑性变形。

(2) 简单黏着摩擦理论没有考虑表面膜(包括污染)对摩擦的影响。

经过修正,黏着摩擦理论的主要论点如下。

(1) 实际接触面积 A_r 取决于法向载荷与切向力(摩擦力)共同作用。

(2) 当两个金属表面在大气环境条件下相接触时,被剪切强度极限为 τ_f 的表面膜隔开。

(3) 摩擦力的黏着分量,就是指剪断分隔这些连接点处的表面膜需要的力。如果在高真空中接触,分隔膜可能不存在,这时就沿较软金属的表层剪断软表面上一部分材料,并将其转移到硬表面上。当表面有氧化膜或吸附膜覆盖时,有些膜破裂处发生金属间的焊接,这时界面的剪切强度可能介于金属与表面膜的剪切强度之间,具体数值视残留表面膜的面积与金属接触面积的比例而定。

这种论点能够很好地解释金属摩擦副在大气中产生干摩擦时的实际情况。

1.2 磨损

1.2.1 概念

在远古时代人们就已经意识到了磨损的存在和危害,例如卢克里蒂斯(公元前95—55年)曾经指出:铁杵与石头相磨成针,滴水会穿石成孔。犁头即使是铁的,在犁沟时也会逐渐磨小;道路的路石因受行人的磨擦而被磨光;城门的青铜雕像右手因受过路旅客的抚摸而被磨光滑。因此磨损是由摩擦副之间相对运动而造成的摩擦表面材料逐渐损耗的现象。磨损是摩擦的必然结果,它是一种综合的物理-化学-机械现象。

摩擦副的正常磨损过程一般分为三个阶段,如图1.7所示。

(1)磨合阶段。出现在初始运动阶段,磨损量随时间的增加而增加。由于表面粗糙,微凸体接触面积小,接触应力大,磨损速度快。

(2)稳定磨损阶段。摩擦表面磨合后达到稳定状态,磨损率变化缓慢稳定。标志着磨损条件保持相对稳定,是材料整个寿命范围内的工作过程。这是摩擦副的正常工作时间。

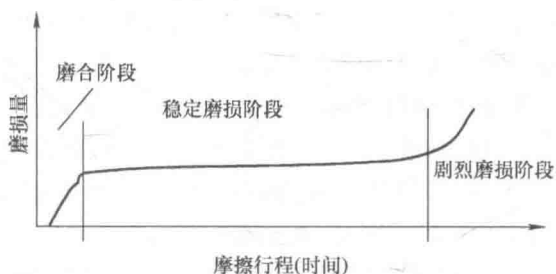


图 1.7 磨损的三个阶段

(3)剧烈磨损阶段。在稳定磨损阶段后,磨损率急剧增大。这时机械效率下降,精度丧失,产生异常噪声及振动,摩擦副的温度迅速升高,最终导致材料失效。

1.2.2 磨损类型

同摩擦一样,磨损现象不是材料的固有特性,而是摩擦副的一种系统响应,运行工况会影响磨损。由磨损引起的材料损失的量称为磨损量。磨损通常表现为松脱的细小颗粒(或称为磨屑)的出现,通常是不希望出现的。磨损量的倒数称为耐磨性。产生磨损的根本原因是摩擦副材料中相关元素之间发生的机械、物理和化学作用的结果。目前人们公认的最重要的四种基本磨损类型是:磨料磨损、疲劳磨损、黏着磨损、腐蚀磨损。

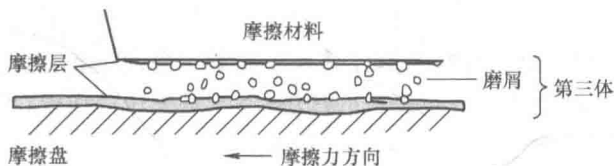


图 1.8 磨料磨损过程示意

1. 磨料磨损

1) 概念与类型

由硬颗粒或硬凸体引起的摩擦表面破坏,分离出磨粒或划伤的过程称为磨料磨损(图1.8)。在磨料磨损中,材料表面的塑性变形表现为犁削、堆积和切削等形式。

(1)犁削:由于较软材料产生塑性流动,犁沟在表面形成一系列沟槽,材料从沟槽向侧面转移,经过多次犁削作用后,因周期性疲劳使材料剥离表面。

(2)堆积:磨料的尖端楔入表面犁出一条沟,在楔头的两端形成材料堆积。

(3)切削:具有大冲角的磨料尖端在表面犁出一条沟,表面的材料以不连续磨屑或卷曲

状磨屑的形式被剥离。

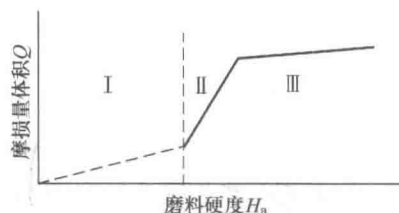


图 1.9 磨料和材料硬度对磨料磨损的影响

前苏联的研究工作者赫鲁晓夫认为材料硬度是磨料磨损最重要的参数。图 1.9 表示了磨损量体积 Q 与材料硬度 H_m 和磨料硬度 H_a 之间的关系：

- ① $H_m \geq 1.3H_a$ 为 I 区，低磨损状态；
- ② $0.8H_a < H_m < 1.3H_a$ 为 II 区，过渡状态；
- ③ $H_m \leq 0.8H_a$ 为 III 区，严重磨损状态。

2) 磨屑形成机理

磨料磨损的过程实质上是材料表面在磨料的作用下局部区域发生变形、断裂的过程。在此过程中，磨料对金属接触表面的作用力可分解为垂直于表面和平行于表面的两个分力。垂直分力的作用是使磨料压入表面；平行分力的作用是使磨料在金属表面上做切向运动，引起表面切向变形和断裂，形成磨屑。

3) 影响磨料磨损的因素

(1) 材料硬度：一般来说，材料的硬度越高越好。

(2) 磨料硬度：一般情况下，磨料的硬度越高，材料的磨损越大；但超过一定值后，磨损量的增加得到了缓解，甚至有所降低。

(3) 磨料颗粒大小：一般情况下，材料的磨损量随磨粒平均尺寸的增大而增大，但磨料达到一定临界尺寸后，磨损量保持不变。

2. 疲劳磨损

当摩擦副接触表面产生滚动或滑动摩擦时，由于周期性载荷作用，接触区产生很大的交变应力，导致表面产生塑性变形，在表层薄弱处引起裂纹，逐渐扩展并发生断裂，而造成表面材料出现点蚀或剥落，称为疲劳磨损。

1) 疲劳磨损的分类

I. 非扩展性疲劳磨损

刚接触时表面间的接触点较少，接触应力较高，很容易产生小麻点。随着接触面积逐渐扩大，单位面积的实际压应力降低，小麻点停止扩大。这种现象主要发生在表面强度较高的材料表面。

II. 扩展性疲劳磨损

作用在接触表面上的交变应力较大时，由于材料的塑性稍差或润滑不当，使运动初期就产生小麻点，而且在较短的时间内，由小麻点扩展成豆斑状的凹坑。

2) 疲劳磨损机理

疲劳磨损是在摩擦接触面上不仅承受交变压应力，使材料产生疲劳，同时还存在摩擦和磨损，且表面还有塑性变形和温升，因此，材料损耗情况更为严重。

根据弹性力学的赫兹公式可知，无论是点接触还是线接触，表层最薄弱处是在离表面 $0.786b$ 处（ b 为点接触或线接触的接触区宽度的 $1/2$ ）。因为这里是最大剪切应力的作用点，最容易产生裂纹。特别是在滚动加滑动摩擦的情况下，最大剪切应力的作用点离摩擦表面更近，也就更容易剥落产生磨损。

裂纹的产生有以下几种方式。

I. 裂纹从表面产生

在滚动接触过程中,由于外界载荷的作用,表面层的压应力引起表层塑性变形,导致表层硬化,开始出现表面裂纹,如图 1.10 所示。当作用力楔入裂纹中(图 1.10(a)),滚动体在运动时又将裂纹的口封住。表面材料的储存应变能迫使裂纹向前扩展。经过多次交变后,裂纹将扩展到一定的深度,形成悬臂状态(图 1.10(b)),在最弱的部位发生断裂,出现豆斑状的凹坑(图 1.10(c)),称为点蚀。

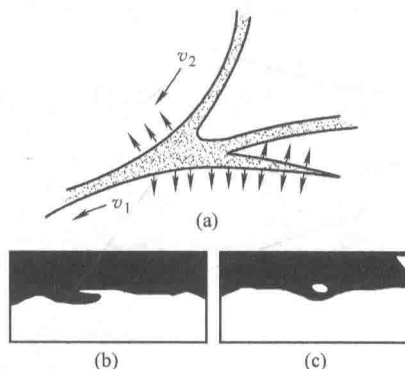


图 1.10 表面裂纹示意

(a) 润滑油楔入裂纹; (b) 裂纹扩展成悬臂状态; (c) 凹坑出现

II. 裂纹从接触表层下产生

由于接触应力的作用,离表面一定深度(0.786 b)的最大剪切应力处塑性变形最剧烈。在载荷作用下反复变形,材料局部弱化,首先在最大剪应力处出现裂纹,并沿着最大剪应力的方向扩展到表面,从而形成疲劳磨损。如在表层下最大剪应力区附近,材料有夹杂物或缺陷,造成应力集中,早期极易产生疲劳裂纹。

III. 脱层理论(分层理论)

苏(Suh)认为接触的两表面相对滑动,当硬表面的峰顶划过软表面时,软表面每一点都经受一次循环载荷。在载荷的反复作用下,产生塑性变形。塑性变形沿着材料的应力场,扩展到距表面较深的地方,而不是表面上。因此在表面以下,金属出现大量位错,并在表层以下一定距离内出现位错的堆积,如遇金属中的夹杂或第二相质点,位错遇阻,导致空位的形成和聚集,则更易发生塑性流动。这些地方往往是裂纹的成核区域(图 1.11)。

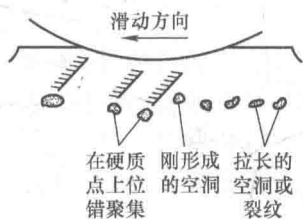


图 1.11 塑性流动的位置

根据表面下的应力分布状况可知,裂纹都是平行于表面的。每当裂纹受一次循环载荷,便在同样深度处向前扩展一个短距离,当裂纹扩展到临界长度时,裂纹与表面之间的材料

由于剪切应变而以薄片形式剥落下来。裂纹产生的深度由材料的性质及摩擦系数决定。

后来,富基坦(Fujita)等用渗碳钢做了试验研究,发现裂纹首先在较浅的部位形成,通过反复接触,产生二次裂纹和三次裂纹,脱层的位置加深。然后,裂纹扩展到表面,而使裂纹上方的材料发生断裂。

3) 表面疲劳磨损的影响因素

I. 材质特点

含有夹杂物的材料在交变应力作用下,最容易发生疲劳磨损。

II. 材料表面硬度的影响

对于不同类型的摩擦副均有各自的最佳硬度值。如滚动轴承用的钢材,硬度以 HR62 为最佳(实验结果)。高于或低于此值轴承寿命都将随之降低。对于齿轮材料,一般来说,小齿轮的硬度应该略高于大齿轮,这样有利于磨合,使接触应力分布均匀。

III. 表面粗糙度

对滚动或滚滑摩擦副而言,表面粗糙度应当尽量高些。特别是硬度较高的零件,粗糙度

更应高些。但粗糙度也有最佳值,过高的粗糙度对提高疲劳磨损寿命的影响不大。

IV. 润滑介质

润滑油的黏度越高,接触部分的压力越接近平均分布,材料的抗疲劳磨损能力越好。

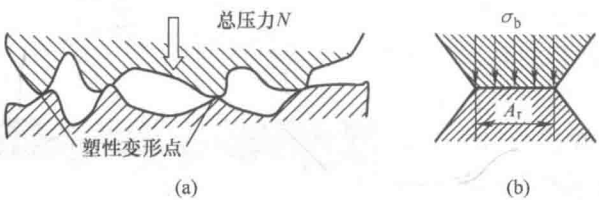


图 1.12 表面接触点的受力情况
(a)微凸体的接触;(b)接触点(放大)的受力

3. 黏着磨损

摩擦副做相对运动时,由于接触点上的固相焊合,接触表面的材料从一个表面转移到另一个表面的现象称为黏着磨损(图 1.12)。

1) 黏着磨损机理

由摩擦的黏着理论可知,金属表面微凸体在法向载荷的作用下,当顶端压力达到屈服强度时,就会产生塑性变形而使接触面扩大,直到实际接触面积大到足以支承外载荷时。当发生相对滑动时,界面膜破裂,就会在接触处形成“冷焊”接点。继续滑动又会将接点剪断,随后再形成新的接点。在不断的剪断和形成新的接点的过程中发生了金属磨损,磨损量的大小取决于接点处被剪断的位置。

如果剪断发生在界面上,则磨损轻微;如果剪断发生在界面以下,则会使金属从一个表面转移到另一个表面。继续摩擦时,这部分转移物就可能成为磨屑。黏着磨损与其他磨损形式的很大不同在于,其他磨损形式一般都需要一些时间来扩展或达到临界破坏值,而黏着磨损则发生得非常突然,可能导致灾难性后果。

如果表面有污染膜、吸附膜等表面膜存在,则磨损轻微。由于表面膜的抗剪强度较低,接触点处的表面膜很容易遭到破坏,使新的金属表面暴露,加上摩擦热的影响,金属间形成了很强的黏着,运动时必须剪断这些金属黏着点,否则会造成表面损伤,严重时甚至可以咬死。

综上所述,可以将黏着磨损的过程作如下描述:接触→塑性变形→表面膜(包括油膜)破裂→黏着(冷焊)→剪断接点→再黏着的循环过程。

2) 黏着磨损的分类

根据剪断位置的不同,表面损伤程度的不同,又可将黏着磨损分为以下几个等级(表 1.1)。

表 1.1 黏着磨损的分类

类别	破坏现象	损坏原因
轻微磨损	剪切破坏发生在黏着结合面上,表面转移的材料极轻微	黏着结合处强度比摩擦副的两基体金属都弱
涂抹	剪切破坏发生在离黏着结合面不远的较软金属浅层内,软金属涂抹在硬金属表面	黏着结合处强度大于较软金属的剪切强度
擦伤	剪切破坏主要发生在较软金属的亚表层内;有时硬金属亚表面也有划痕	黏着结合处强度比两金属基体都高,转移到硬面上的黏着物质又拉削软金属表面
撕脱(深掘)	剪切破坏发生在摩擦副一方或两方金属较深处	黏着结合处强度大于任一基体的剪切强度,剪切应力高于黏着结合强度
咬死	摩擦副之间咬死,不能产生相对运动	黏着结合处强度比任一基体金属的剪切强度都高,而且黏着区域大,剪切应力低于黏着结合强度

4. 腐蚀磨损

摩擦能够改变滑动表面之间的化学反应动力。在气态或液态环境下,通常只有在高温时才能发生反应,但在滑动摩擦的过程中,材料在中低温环境下即可发生反应。在摩擦过程中,由于机械作用和摩擦表面材料与周围介质发生化学或电化学反应,共同引起的物质损失,称为腐蚀磨损,或称其为机械化学磨损。

一般情况下,腐蚀磨损处于轻微磨损状态,而在高温潮湿环境或特殊腐蚀介质中,则处于严重磨损状态。

通常,材料表面与环境先起化学或电化学反应,然后通过运动—机械作用,将反应生成物除掉;也有可能由机械作用产生微细的磨屑,然后再起化学作用。

由于介质的性质、介质作用于摩擦面上的状态以及摩擦副材料的不同,腐蚀磨损的状态也不同,大致可以分为以下几类。

1) 氧化磨损

在大气或有氧环境中,磨损表面生成一层氧化膜,避免了两物体之间的直接接触。磨损过程即是氧化物的磨损过程。氧化磨损最简单的机理是氧化层形成和生长达到一定厚度,将金属摩擦面隔开。经过摩擦氧化层脱落,由于对偶金属表面与氧化性介质的反应速度很快,氧化膜从表面磨掉后,又很快形成新的氧化膜。如此周而复始。

2) 氢致磨损

鲍烈可夫等发现,在摩擦表面上由于氢浓度上升而使磨损加速的现象,称为氢致磨损。其过程如下。

(1) 氢可能来自材料本身或环境介质(润滑油、水),在摩擦过程中,由于力学和化学的作用,导致氢的析出,并不断进入摩擦副材料的表面层。

(2) 介质中的氢扩散到对偶金属表面的变形层中,由于温度和应力梯度,使氢在扩散后形成富集。

(3) 由于氢的渗入,使表面变形层出现大量裂纹源,并在很短的时间内形成非常细小而分散的粉末状磨屑。

氢致磨损不同于钢的氢脆现象,它只是在摩擦过程中,由于烃类化合物断裂的 C—H 吸附在对偶金属表面上,在摩擦过程中引起的。

3) 其他腐蚀介质的腐蚀磨损

摩擦副表面可能与酸、碱、盐等介质起作用。一方面可能生成耐磨性较好的保护膜,但另一方面,随着腐蚀速率的增大,磨损也会加快。磨损率通常随腐蚀性的增强而变大(磨损率还取决于摩擦过程中的载荷、速度和温升等条件)。如耐磨性保护膜的生成速度大于磨损速度,则磨损率不受介质腐蚀性的影响,即磨损均发生在保护膜中。如磨损率大于保护膜的生成速度,则将发生较为严重的磨损。

如 Ni、Cr 等金属在特殊介质下,易形成化学结合力较强、结构致密的钝化膜,因而可减轻腐蚀磨损。W 和 Mo 等在 500 ℃ 以上形成保护膜,摩擦系数变小,所以这些是耐高温耐腐蚀的金属材料。而含有 Cd、Pb 等元素的轴承材料,容易被润滑油中的酸性物腐蚀而生成黑斑,并逐渐扩展成海绵状空洞,并于摩擦过程中形成小块剥落。又如 Ag、Cu 等元素,在温度不高时,就会与润滑油中的硫化物起作用生成硫化膜,有减磨作用;而在高温下,这层膜破