

摩擦

与

磨损

邵荷生 曲敬信
许小棣 陈华辉 编著

煤炭工业出版社

TH117.1
S35

摩 擦 与 磨 损

邵荷生 曲敬信 许小棣 陈华辉 编著

煤炭工业出版社

(京)新登字042号

内 容 提 要

本书共分十六章。从零件的表面特性、接触力学着手,提出摩擦理论及摩擦表面的物理化学变化;根据磨损的分类,分章叙述各类磨损的定义、特点、磨损机理及影响磨损的内、外部因素;详细介绍了生产中常用的摩擦材料、耐磨材料、表面强化技术及摩擦与磨损的测试技术和磨损失效分析等。

本书可供研究人员、大专院校师生及工矿企业工程技术人员及技术管理人员参考。

摩 擦 与 磨 损

邵荷生 曲敬信 许小棣 陈华辉 编著

责任编辑:向云霞

*

煤炭工业出版社 出版

(北京安定门外和平里北街21号)

煤炭工业出版社印刷厂 印刷

新华书店北京发行所 发行

*

开本 787×1092mm^{1/32} 印张 16^{5/8}

字数 360千字 印数 1—2,050

1992年9月第1版 1992年9月第1次印刷

ISBN 7-5020-0702-4/TD·644

书号 3471

定价 10.20元

序 言

凡两相互作用相对运动的表面之间，都有摩擦与磨损存在。无论是机器还是人，无论是飞机、汽车、火箭还是人体的关节，都是两个物体相互接触和相对运动的组合，否则人类不能生存，社会也不会存在。

摩擦与磨损自古存在，人们一直力图控制摩擦，减小磨损，特别是在工业革命机器代替人力以后。然而把摩擦与磨损作为一门独立的边缘学科，则是近二三十年的事。

据不完全统计，世界能源的 $\frac{1}{3} \sim \frac{1}{2}$ 消耗于摩擦，而机械零件80%失效原因是磨损。可见摩擦与磨损对人类是至关重要的。

摩擦与磨损之间有内在联系，摩擦是原因，磨损是结果。摩擦和磨损都是表面现象，且必须先有接触，才能出现这些现象。故本书先从零件的表面特性、接触力学着手，然后提出摩擦理论及摩擦表面的物理化学变化。

本书根据磨损的机理，将磨损分为粘着磨损、磨料磨损、冲蚀磨损、疲劳磨损、腐蚀磨损及微动磨损等，并分章叙述，使读者对不同磨损类型有一个清晰的概念。

研究摩擦与磨损的目的在于控制摩擦，减小磨损，书中所述摩擦材料、耐磨材料、表面强化技术等，是为正确选择材料，提高机器耐磨寿命建立基础。书中第十五章的摩擦与磨损测试技术及第十六章的磨损失效分析则为研究者及工程

技术人员寻求磨损失效的原因提供方法，使之了解不同条件下摩擦与磨损的测试技术，以便解决磨损实际问题，排除磨损故障，进一步提高机器的耐磨寿命。

本书由邵荷生、曲敬信任主编，第一至五章由陈华辉编写，序言和第六、七、八、十一章由邵荷生编写，第九、十三、十四章由曲敬信编写，第十二、十五、十六章由许小棣编写，最后由曲敬信审阅全书。

由于作者水平有限，书中错误之处，尚望读者指正。

目 录

第一章 金属表面特性	1
§ 1 金属表面几何形状	1
§ 2 支承面积曲线	9
§ 3 金属的表面结构	13
§ 4 表面能与表面张力	22
§ 5 金属表面的化学性质	25
§ 6 金属表层的组成	28
第二章 金属表面的接触	30
§ 1 接触表面间的相互作用	30
§ 2 接触面积	32
§ 3 接触力学	38
§ 4 接触变形	42
§ 5 接触表面性能的测量	45
第三章 摩擦	50
§ 1 摩擦的定义及分类	50
§ 2 古典摩擦定律	52
§ 3 滑动摩擦	54
§ 4 滚动摩擦	75
§ 5 边界摩擦	87
第四章 摩擦过程中金属表层的变化	98
§ 1 摩擦表面几何形状的变化	98
§ 2 表面受力与变形	99
§ 3 摩擦表面结构的变化	106
§ 4 摩擦表面的温度	108

§ 5	摩擦时组织的变化	112
§ 6	摩擦时的扩散过程	117
§ 7	白层	118
§ 8	摩擦表面的氧化	120
第五章	减摩材料和摩阻材料	123
§ 1	减摩材料	123
§ 2	摩阻材料	138
第六章	材料的磨损	142
§ 1	磨损的重要性与定义	142
§ 2	磨损的分类	145
§ 3	磨损的评定方法	148
第七章	粘着磨损	151
§ 1	粘着磨损的特点与分类	151
§ 2	粘着的实验研究	153
§ 3	粘着机理	159
§ 4	粘着磨损的模型和定律	164
§ 5	材料的转移和磨屑形成过程	173
§ 6	轻微磨损、严重磨损及机械零件的磨损特性	182
§ 7	影响粘着磨损的因素	185
第八章	磨料磨损	196
§ 1	磨料磨损的定义与分类	196
§ 2	磨料磨损的简化模型	200
§ 3	磨料磨损机理	203
§ 4	磨料及其磨损性能	213
§ 5	外部摩擦条件对磨料磨损的影响	234
§ 6	材料的内部因素对磨料磨损的影响	245
§ 7	磨料磨损模型的讨论	255
第九章	冲蚀磨损	265
§ 1	冲蚀磨损理论	266

§ 2	影响冲蚀磨损的主要因素	277
§ 3	冲蚀磨损的试验装置	295
§ 4	浆体冲蚀磨损	299
第十章	接触疲劳磨损	305
§ 1	接触疲劳磨损理论	306
§ 2	影响接触疲劳磨损的主要因素	312
§ 3	接触疲劳磨损的检测	318
第十一章	腐蚀磨损	321
§ 1	氧化磨损	322
§ 2	特殊介质中的腐蚀磨损	328
§ 3	电化学腐蚀磨损	329
§ 4	腐蚀磨料磨损	337
第十二章	微动磨损	344
§ 1	微动磨损的定义及特点	344
§ 2	微动磨损机理	345
§ 3	影响微动磨损的因素和防护方法	350
第十三章	耐磨材料	363
§ 1	高锰钢	363
§ 2	低合金耐磨钢	374
§ 3	高铬合金白口铸铁	380
§ 4	其他合金白口铸铁	400
§ 5	陶瓷材料	409
§ 6	耐磨材料的选用	415
第十四章	提高材料耐磨性的表面强化技术	420
§ 1	表面淬火	420
§ 2	化学热处理	424
§ 3	表面镀覆	431
§ 4	表面冶金强化	442
第十五章	摩擦与磨损的测试技术	449

§ 1 摩擦磨损试验机	450
§ 2 一些与摩擦磨损有关的测试方法	463
§ 3 表面分析技术及常用的分析仪器	473
§ 4 磨损动态测试	479
§ 5 磨屑检测分析技术	485
第十六章 磨损失效分析	491
§ 1 磨损失效分析的特点与一般方法	491
§ 2 磨损失效分析的步骤	501
参考文献	507

第一章 金属表面特性

摩擦磨损是在相互接触的物体表面进行的，因此研究接触体摩擦表面的性质是研究摩擦磨损的基础。固体的表面性质主要包括两方面的内容，即表面形貌与表面组成。前者着重研究表面的形状，后者着重研究表面的结构及表面的物理、化学性质。

§ 1 金属表面几何形状

经过加工的金属零件表面宏观上似乎很平整、光滑，但在显微镜下观察就可发现表面很粗糙，呈现凹凸不平的波峰和波谷，凸起的波峰称微凸体，如图1-1所示。这是由于加工过程中刀痕（即切屑分离时的塑性变形）以及机床——刀具——工件系统的振动等原因，造成实际的工件表面与理想的绝对光滑、平整的表面存在一定的几何形状误差。表面几何形状的误差可用表面波纹度（也称宏观粗糙度）和表面粗糙度（也称微观粗糙度）来描述。

1. 表面波纹度

表面波纹度是零件表面周期性重复出现的一种几何形状误差，如图1-2所示。波纹度有两个重要参数，即波高 h 和波距 s 。

波高 h 表示波峰与波谷之间的距离；波距 s 表示相邻两波形对应点的距离。表面波纹度的波距一般为1~10mm，波

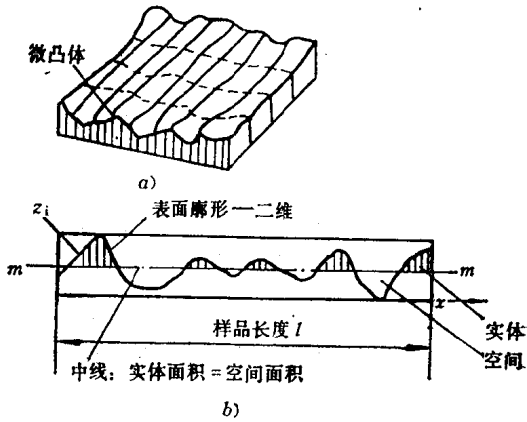


图 1-1 表面形貌

a—表面形貌（三维）；*b*—高度分布

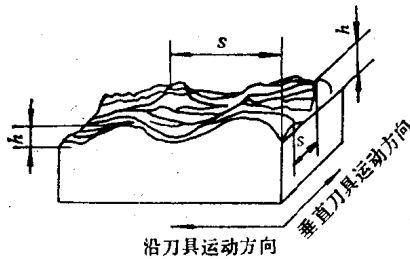


图 1-2 平面表面波纹度

高与波长之比约为1:40。

表面波纹度会减少零件实际支承表面面积，在动配合中会引起零件磨损加剧。

2. 表面粗糙度

表面粗糙度不像表面波纹度那样具有明显的周期性，其

波距亦短 约 $2\sim 800\mu\text{m}$, 波高亦较小, 约 $0.03\sim 400\mu\text{m}$ 。表面粗糙度越低, 则表面越光亮。

表面粗糙度的评定指标最常用的有轮廓算术平均偏差 Ra 和轮廓均方根偏差 Rq , 此外还有微观不平度十点高度 Rz 和轮廓最大高度 Ry 。

2.1. 轮廓算术平均偏差 Ra (简称 $c.l.a$)

在图1-1中, 从三维的表面形貌截取一横截面, 就是二维的表面轮廓。轮廓的算术平均中线 m 是一特定的线, 它将轮廓图形划分为上下两部分, 并使上面实体面积和下面空间面积相等。

算术平均偏差的数学表达式为

$$Ra = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |z_i| \quad (1-1)$$

式中 z_i ——以中线为起点度量出的廓形高度;

n ——在样品标准长度 l 内的测量次数。

用概率统计的表达方式为

$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l |f(x)| dx \quad (1-2)$$

式中 $f(x)$ ——轮廓图形的分布函数。

标准长度 l 随粗糙度而定, 粗糙度等级不同, l 的值也不同, 见表1-1。

2.2. 均方根偏差 Rq (简称 $R.M.S$)

均方根偏差 Rq 为轮廓图形上各点和中线之间距离平方的平均值的平方根。其数学表达式为

$$Rq = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (z_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1-3)$$

用概率统计的表达方式为

表 1-1 Ra 、 Rz 、 Ry 的取样长度 l 与评定长度 l_n 的选用值

Ra (μm)	Rz 与 Ry (μm)	l (mm)	$l_n(l_n=5l)$ (mm)
$\geq 0.008 \sim 0.02$	$\geq 0.025 \sim 0.10$	0.08	0.4
$> 0.02 \sim 0.1$	$> 0.10 \sim 0.50$	0.25	1.25
$> 0.1 \sim 2.0$	$> 0.50 \sim 10.0$	0.8	4.0
$> 2.0 \sim 10.0$	$> 10.0 \sim 50.0$	2.5	12.5
$> 10.0 \sim 80.0$	$> 50.0 \sim 320$	8.0	40.0

$$Rq = \left[\frac{1}{l} \int_0^l f^2(x) dx \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1-4)$$

可以看出均方根偏差给予离开平均线较远的点较大的比重，因此它更能高度地反映出粗糙度的情况。

Ra 与 Rq 的关系为 $Ra \approx 0.8Rq$ 。

表1-2列出几种加工表面的 Rq 值。

2.3. 微观不平度十点高度 Rz

Rz 是指在标准长度 l 内五个最高的轮廓峰高的平均值与五个最低的轮廓谷深的平均值之和，如图1-3所示，其计算公式为

$$Rz = \frac{\sum_{i=1}^5 h_{p_i} + \sum_{i=1}^5 h_{v_i}}{5} \quad (1-5)$$

式中 h_{p_i} 是第 i 个最高的轮廓峰高；

h_{v_i} 是第 i 个最低的轮廓谷深。

若测量长度包括几个标准长度时，应取该测量长度内所测得的几个 Ra 或 Rz 的平均值作为某一表面的 Ra 或 Rz 。







2.4. 轮廓最大高度 Ry

Ry 是指表面经常出现的微观不平度的最大高度（如图

表 1-2 几种加工表面的 R_q 值

加工方法		表面粗糙度 R_a		R_q (μm)
车外圆	粗车	12.5	6.3	1.6~3.2
	细车	3.2	0.80	
	精车	0.80	0.20	
镗	粗镗	12.5	6.3	1.6~3.2
	细镗	3.2	0.80	
	精镗	0.80	0.20	
铣	粗铣	6.3	3.2	3.2~6.3
	精铣	3.2	0.80	1.6~3.2
磨外圆	粗磨	3.2	1.6	3.2
	细磨	0.80	0.40	0.8
	精磨	0.40	0.20	0.4
滚齿	粗切	3.2	1.6	1.6~3.0
	精切	1.6	0.80	

续表

加工方法		表面粗糙度 Ra	Rq (μm)
剃齿		0.80  ~  0.20	0.4~0.8
磨齿			0.2~0.4
珩齿			0.1~0.2
抛光	粗抛	0.40  ~  0.10	0.1~0.2
	精抛	0.10  ~  0.025	0.05~0.1

1-4所示), 即在标准取样长度内轮廓峰顶线和轮廓谷低线之间的距离, 注意图1-4中所示的个别偶然出现的特大高度 R_{max} 不能代表整个表面微观几何特性。一般取若干段, 求 Ry 的平均值。

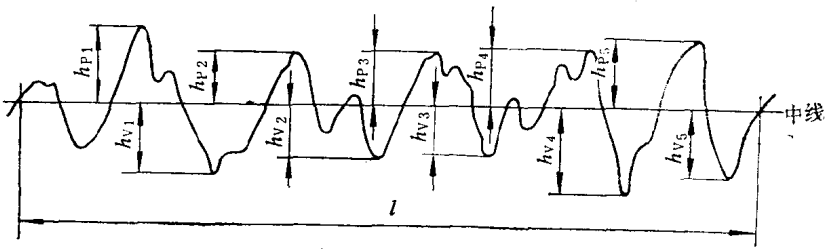


图 1-3 微观不平度十点高度 Rz 的测量

不同形状和轮廓的表面用上述不同方法测得的粗糙度值也不同, 但在一定程度上, 它们之间可以相互换算, 如表

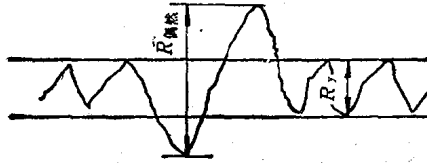
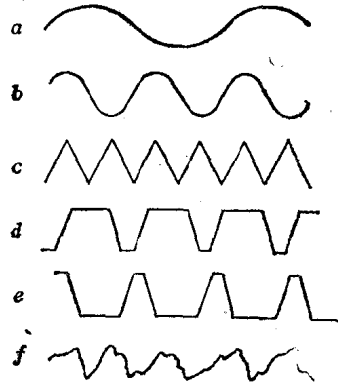
图 1-4 轮廓最大高度 R_y

表 1-3 各种粗糙度间的比值

表 面	$\frac{R_q}{R_a}$	$\frac{R_z}{R_a}$	$\frac{R_y}{R_a}$
车 削	1.1~1.15	4~5	4~5
磨 削	1.18~1.30	5~7	7~14
研 磨	1.3~1.5		7~14
随机统计	1.25		8.0

1-3所示。

以上参数仅能说明表面轮廓在高度方向的偏差，不能说明表面凸峰的形状、大小和分布状况等特性。如图1-5所示的各种廓形有相同的 R_a 值，但形状却完全不同。因此还需要有其它参数如微凸体的峰顶曲率半径、微凸体的坡度、密度以及支承

图 1-5 具有相同的 R_a 的不同表面

面积等来加以描述。

3. 表面轮廓高度的分布

表面微凸体高度的分布如图1-6a所示，以表面轮廓中线为 x 轴，在标准长度 l 内，每隔一定距离 Δl ，测量轮廓图形距参考中线的高度 Z_1 、 Z_2 、…… Z_i ，然后求出同一 Z 值的纵坐标数之和，也就是该高度的纵标频数。作出从 $+Z_{max}$ 至 $-Z_{max}$ 区间内的直方图。由此直方图可大致画出全部纵坐标高度分布曲线，如图1-6b所示。显然 Δl 取得愈小，曲线的精确度愈高。

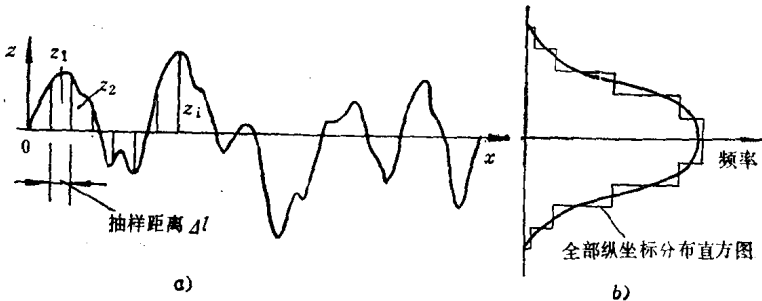


图 1-6 微凸体高度分布曲线

a—微凸体高度分布；b—微凸体高度分布曲线

图1-7为磨削表面的轮廓高度分布曲线。曲线的横坐标表示轮廓高度，纵坐标为该高度出现的频率数。

大多数工件表面的轮廓高度分布曲线接近正态分布，表面粗糙度愈低越接近正态分布。正态分布曲线函数为

$$\psi(z) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-z^2/2\sigma^2} \quad (1-6)$$