



现代润滑技术

MODERN LUBRICATION TECHNIQUE



张 剑 金映丽 编著
马先贵 丁津原



冶金工业出版社

<http://www.cnmp.com.cn>

TH117.2/15

2008

现代润滑技术

张 剑 金映丽 马先贵 丁津原 编著

冶金工业出版社

2008

内 容 提 要

润滑是降低摩擦、减少磨损的必要手段。如何在典型设备中正确使用润滑剂和润滑技术,改进生产技术,使之降低摩擦、减少磨损,大幅度提高设备寿命是本书重点探讨的内容。

本书主要分为两大部分。第一部分:第1章主要阐述了表面形貌、摩擦、磨损、润滑的基本概念。第二部分:第2章至第8章,主要介绍了现代的润滑油、润滑脂、维护方法、润滑方式和固体润滑等方面的概念及应用,旨在培养和提高读者解决工程实际问题的能力,解决节约能源、延长机器使用寿命以及环保问题。

本书可以作为从事润滑技术研究和相关应用的工程技术人员的参考书,也可以作为高等工科院校机械工程类专业本、专科生及研究生的教材。

图书在版编目(CIP)数据

现代润滑技术/张剑等编著. —北京:冶金工业出版社,
2008.1

ISBN 978-7-5024-4436-5

I. 现… II. 张… III. 润滑-技术 IV. TH117.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 203415 号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 postmaster@cnmp. com. cn

责任编辑 郭庚辰 美术编辑 张媛媛 版式设计 张 青

责任校对 刘 倩,李文彦 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-4436-5

北京兴华印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2008 年 1 月第 1 版;2008 年 1 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16;19.75 印张;475 千字;303 页;1-3000 册

55.00 元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号(100711) 电话:(010)65289081

(本书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

前 言

润滑技术是保证机械设备得以高效、正常、长期运转的基本手段,是机械运转的命脉。因此,世界各国都十分重视先进合理润滑技术的开发与利用。同样的设备,国外能够运行 6000h,而国内运行 1500h 就要进修理厂,其根本原因是润滑技术明显落后。现代化设备的发展促进了新一代润滑技术的发展,也使润滑技术成为现代科学技术中的一个重要组成部分,是企业提高利润的重要方法。

机器运转就有摩擦,有摩擦就有磨损。润滑是降低摩擦、减少磨损的必要手段。如何在典型设备中正确使用润滑剂和润滑技术,改进生产技术,使之降低摩擦、减少磨损,大幅度提高设备寿命是本书重点探讨的内容。

本书主要分为两大部分。第一部分(第 1 章)是有关润滑技术的预备知识,主要阐述了表面形貌、摩擦、磨损、润滑的基本概念,帮助读者建立摩擦、磨损的整体概念和基本框架。第二部分(第 2 章至第 8 章)是润滑技术的基础,从润滑技术的三大部分:润滑油品选择、供油方式选择和润滑维护等方面进行了分析阐述,主要介绍了现代的润滑油、润滑脂、维护方法、润滑方式和固体润滑等方面的概念及应用,旨在帮助读者建立完整的润滑技术体系,培养和擦高解决工程实际问题的能力;解决节约能源、延长机器使用寿命以及环保问题。并希望通过此书的出版帮助企业突破有关润滑的传统理念束缚,把设备的润滑工作做好。

本书可以作为从事润滑技术研究和相关应用的工程技术人员的参考书,也可以作为高等工科院校机械工程类专业本、专科生及研究生的教材。

参加本书编写的有沈阳工业大学张剑、金映丽,东北大学马先贵、丁津原,还有沈阳职业技术学院汽车分院解生泽。沈阳工业大学蒲大圣老师进行了封面设计。本书在编写过程中得到了各方面的大力支持,在此表示衷心的感谢。

本书在编写中难免存在这样或那样的不足,请各位专家学者给予指正,作者将深表谢意。

作者

2007 年 9 月

目 录

1 润滑技术预备知识——摩擦、磨损、润滑的基本概念	1
1.1 固体的表面组成和性能	1
1.2 表面形貌	2
1.2.1 表面形貌的组成	2
1.2.2 表面粗糙度对零件表面功能的影响	3
1.2.3 表面粗糙度	3
1.3 固体表面的接触	5
1.3.1 接触面积	5
1.3.2 接触应力	6
1.3.3 粗糙表面的接触	7
1.4 摩擦	7
1.4.1 概述	7
1.4.2 滑动摩擦机理	8
1.4.3 滚动摩擦机理	11
1.5 磨损	13
1.5.1 概述	13
1.5.2 黏着磨损	14
1.5.3 磨料磨损	18
1.5.4 表面疲劳磨损	25
1.5.5 摩擦化学磨损	33
1.6 润滑	38
1.6.1 润滑的作用	38
1.6.2 润滑的类型	38
参考文献	40
2 润滑油	41
2.1 润滑油的性能	41
2.1.1 黏度	41
2.1.2 酸值(总酸值、中和值)	42
2.1.3 总碱值	42
2.1.4 水溶性酸和碱	43
2.1.5 闪点	43

2.1.6	倾点和凝点	44
2.1.7	机械杂质	44
2.1.8	灰分	44
2.1.9	水分	45
2.1.10	抗乳化性	45
2.1.11	抗泡性	46
2.1.12	蒸发度(蒸发损失)	46
2.1.13	腐蚀性	47
2.1.14	氧化安定性	47
2.1.15	苯胺点	48
2.1.16	润滑性	48
2.2	基础油	51
2.2.1	矿物油基础油的制备	51
2.2.2	矿物润滑油的精制	52
2.2.3	基础油的调和	53
2.2.4	润滑油基础油的发展	53
2.2.5	天然气合成油(GTL)	55
2.3	添加剂	56
2.3.1	概述	56
2.3.2	保护金属表面的添加剂	57
2.3.3	改善润滑油性能的添加剂	63
2.3.4	保护润滑油本身的添加剂	66
2.3.5	结语	68
2.4	合成润滑油	68
2.4.1	概述	68
2.4.2	酯类油	72
2.4.3	聚醚	78
2.4.4	聚 α -烯烃	82
2.4.5	磷酸酯	92
2.4.6	硅油	96
2.4.7	氟油	99
	参考文献	101

3	润滑脂	102
3.1	概述	102
3.1.1	润滑脂结构的概念	102
3.1.2	润滑脂的优点和局限性	102
3.2	润滑脂的组成	104
3.2.1	基础油	104

3.2.2	稠化剂	106
3.2.3	添加剂和填料	107
3.3	润滑脂的主要使用性能	110
3.3.1	润滑脂的稠度——锥入度	110
3.3.2	滴点	111
3.3.3	润滑脂的黏度	112
3.3.4	分油	113
3.3.5	蒸发度	113
3.3.6	机械安定性	113
3.4	润滑脂的种类和特性	114
3.4.1	皂基润滑脂	114
3.4.2	钠基脂	114
3.4.3	铝基脂	115
3.4.4	锂基脂	115
3.4.5	复合铝基润滑脂	116
3.4.6	复合锂基脂	116
3.4.7	脲基脂	118
3.4.8	合成高温润滑脂(7020)	121
3.4.9	密封润滑脂(7903)	122
3.4.10	复合钛基润滑脂	122
3.4.11	新一代润滑脂——高碱值复合磺酸钙基脂	125
3.5	润滑脂的选择	131
3.5.1	考虑使用润滑脂的目的	131
3.5.2	考虑润滑部位的工作温度	132
3.5.3	考虑润滑脂润滑部位的负荷	133
3.5.4	考虑润滑脂润滑部位的速度	133
3.5.5	考虑润滑部位的环境和所接触的介质	134
3.5.6	考虑润滑脂的加注方法	134
3.5.7	从经济性方面考虑	135
3.6	润滑脂的合适用量	135
3.7	结语	136
	参考文献	137

4	润滑油的应用	138
4.1	内燃机油	138
4.1.1	概述	138
4.1.2	沉积物	139
4.1.3	汽车发动机润滑油的作用和要求	143
4.1.4	内燃机油的现状与发展趋势	147

4.1.5 二冲程汽油机油	149
4.2 齿轮油	152
4.2.1 齿轮类型及摩擦条件	152
4.2.2 齿轮润滑的特点	153
4.2.3 齿轮润滑剂的作用及应具备的性质	154
4.2.4 现行的齿轮润滑油选用方法	155
4.2.5 车辆齿轮润滑油	164
4.3 蜗轮蜗杆润滑油	167
4.3.1 蜗轮蜗杆传动润滑的特点	167
4.3.2 变化了的情况	167
4.3.3 蜗轮蜗杆油的选择	169
4.3.4 钢蜗轮的应用	170
4.4 开式齿轮润滑	171
4.4.1 开式齿轮润滑的特点	171
4.4.2 开式齿轮润滑剂	172
4.4.3 开式齿轮传动润滑方式	175
4.4.4 结语	178
4.5 液压油及液力传动油	178
4.5.1 液压油	178
4.5.2 液力传动油	190
4.6 压缩机油	199
4.6.1 压缩机的结构特点及分类	199
4.6.2 压缩机的润滑特点	201
4.6.3 空气压缩机油的特性及使用性能	202
4.6.4 气体压缩机及无污染压缩机用油要求	205
4.6.5 压缩机油标准	206
4.6.6 结语	212
4.7 机床用油	212
4.7.1 机床特点	212
4.7.2 机床对润滑油品的要求	213
4.7.3 导轨油	214
4.8 风力发电机润滑	222
4.8.1 风力发电机组的工作环境及对润滑的基本要求	222
4.8.2 风力发电机主要的润滑部位	222
4.8.3 风力发电机推荐的润滑剂	224
4.8.4 结语	227
参考文献	227

5 现代润滑维护	229
----------------	-----

5.1	概述	229
5.2	维修方式的换代	229
5.2.1	传统的润滑油品监测	229
5.2.2	维修体制的改革	230
5.2.3	维修制度的发展	230
5.2.4	油品清洁度的检测及控制	231
5.3	提高系统油液清洁度的净化处理	237
5.3.1	概述	237
5.3.2	过滤	237
5.3.3	过滤器	238
5.3.4	过滤器的性能	239
5.4	油品性能、状态的监测与油品康复	245
5.4.1	铁谱技术	245
5.4.2	转盘发射式光谱	247
5.4.3	付氏变换红外光谱	248
5.4.4	油品康复	249
	参考文献	250
6	现代润滑方式	251
6.1	集中循环润滑系统	251
6.1.1	系统的组成	252
6.1.2	润滑系统的工作	252
6.2	油雾润滑	253
6.2.1	概述	253
6.2.2	油雾润滑系统的组成及工作原理	253
6.3	润滑方式划时代的变化——油气润滑	254
6.3.1	概述	254
6.3.2	油气润滑的基本原理	255
6.3.3	油气润滑系统	255
6.3.4	油气润滑与集中循环润滑和油雾润滑的比较	259
6.4	机械加工中的微量润滑(Minimal Quantity Lubricants, MQL)	261
6.4.1	MQL 切削加工方法	261
6.4.2	MQL 加工方法的发展	262
6.4.3	MQL 带来机床结构的变化	262
6.4.4	MQL 加工带来的效益	263
	参考文献	263
7	润滑油与密封件的相容性	265
7.1	概述	265

7.2 橡胶密封技术的发展趋势	265
7.2.1 丁腈橡胶(NBR)	265
7.2.2 氢化丁腈橡胶(HNBR)	266
7.2.3 丙烯酸酯橡胶(ACM)	266
7.2.4 乙烯—丙烯酸橡胶(AEM)	266
7.2.5 硅橡胶(VMQ)	267
7.2.6 氟橡胶(FKM)	267
7.2.7 氟硅橡胶(FVMQ)	267
7.2.8 三元乙丙橡胶(EPDM)	267
7.3 结语	267
参考文献	269
 8 固体润滑	 270
8.1 概述	270
8.1.1 固体润滑机理	270
8.1.2 对固体润滑剂基本性能的要求	271
8.2 常用的固体润滑剂	272
8.2.1 石墨	272
8.2.2 二硫化钼	276
8.2.3 聚四氟乙烯	281
8.2.4 三聚氰胺—氰尿酸络合物(MCA)	288
8.3 固体润滑剂的应用范围和使用方法	291
8.3.1 固体润滑剂的应用范围	291
8.3.2 固体润滑剂的使用方法	292
8.4 金属磨损自修复技术	300
8.4.1 技术特点和机理	301
8.4.2 ART 技术应用领域	302
8.4.3 再生技术的应用效果	302
参考文献	303

1 润滑技术预备知识——摩擦、磨损、润滑的基本概念

润滑技术是摩擦学三大支柱(摩擦、磨损、润滑)之一。摩擦学是研究“具有相对运动的、相互作用表面间的科学、技术和有关实践”的科学。通俗地讲,就是保证机器健康、长寿、节能、节省材料消耗、环保的科学。

机器运转就有摩擦,有摩擦就有磨损。润滑是降低摩擦、减少磨损的必要手段。要想能正确地使用润滑剂,使之发挥最大效果,必须了解机器的摩擦状态、磨损机理、工作情况和的工作环境。润滑工作者必须具备摩擦和磨损的基本知识,必须了解实际工作情况,才能针对具体机器、具体工作情况,“有的放矢”地选择最佳的润滑剂、最佳的供油方式、提出合理的维护方法。

1.1 固体的表面组成和性能

金属及其合金,是工程上应用最广泛的一种合金。图 1-1 是金属表面层的一般组成示意图。

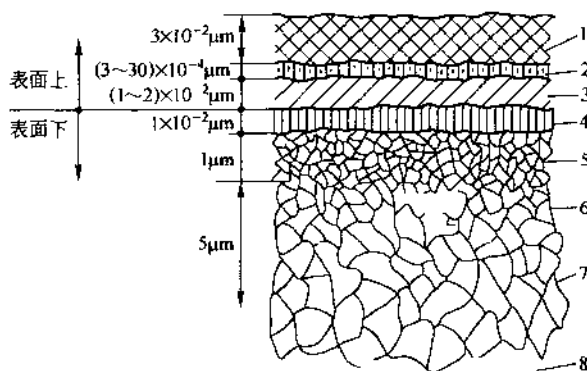


图 1-1 金属表面层组成示意图

1—普通污染膜;2—吸附气、液分子膜;3—氧化膜;4—毕氏层;5—强烈变形层;
6—严重变形层;7—轻微变形层;8—金属基体

在自然条件下,表面存在各种覆盖膜,如污染膜、吸附膜、氧化膜等。其中氧化膜,是空气中氧与金属发生氧化反应的产物,对摩擦、磨损有很大影响,根据氧化物的成分和膜厚,有的可以起到保护金属降低摩擦和磨损的作用,有的则增加摩擦、加速磨损。金属在机械加工过程中,表层分子的塑性流动或熔化沉积,在冷的下层材料上冷却硬化,形成一层分子无序排列的层,这个层被称作毕氏层。这是一种非常细的结晶或非结晶组织,厚度只有 $0.01\text{ }\mu\text{m}$ 左右,但硬度却很高,是自然形成的抗磨料磨损层;不过,因存在残余应力并有微观裂缝,对接触疲劳强度不利,也易渗入腐蚀介质,加速磨蚀磨损。在毕氏层与正常晶体结构(金属基

体)之间有一过渡层——加工变形层,它们是在金属加工过程中发生的残余变形,晶格受到扭曲,故硬度较高。

1.2 表面形貌

表面形貌或称表面几何形貌,是指固体表面的几何性质。表面形貌对摩擦面间的润滑状态、耐磨性能等影响很大,它是国际摩擦学界的热门课题。为了获得耐磨的零件表面,必须控制零件表面的化学性质(成分、化学活性等)、物理性质(硬度、强度、残余应力和显微组织等)以及表面形貌。关于表面形貌,过去往往被低估或不正确理解,如不太了解其重要程度,或认为表面愈光愈耐磨等。其实它的影响,有时远超过改善材料成分和热处理,这一点必须引起注意。

1.2.1 表面形貌的组成

实际的固体表面,不论用什么方式加工,即使是经过超精加工,其表面也不是绝对平滑的,在显微镜下仔细观察,仍然是凹凸不平的。这是摩擦学的基本出发点。

经过机械加工的表面产生凹凸不平的原因,主要是:

- (1) 切削加工过程中,刀具遗留在工件表面上的痕迹;
- (2) 切屑与表面分离断裂时,引起不规则的塑性变形;
- (3) 机床、刀具、工件系统的振动,在工件表面上留下的波纹,以及机床系统误差和工件在切削力与重力等作用下发生变形,引起的误差;
- (4) 表面高能量密度淬火,形成的表面波峰、波谷和波距。

按照表面凹凸不平的几何特性和成因,可将平面形貌的组成为:宏观几何形状误差、表面波度和表面粗糙度,如图 1-2 所示。图 1-2a 是实际表面轮廓,它可以看成是上述三者的叠加。

1.2.1.1 宏观几何形状误差

宏观几何形状误差,如图 1-2b 所示。这是实际表面形状与理想表面形状间的宏观误差。例如,圆柱体沿轴线方向的锥度、鼓形度、鞍形度和垂直轴线截面的椭圆度、棱圆度等。它是由于机床和刀具精度不够,以及不正确的加工规范或温度应力等造成的。

1.2.1.2 表面波度

表面波度,如图 1-2c 所示。它是表面上有规则的、周期性出现的表面形状误差。通常波的波长较大,约为 1~10 mm;在同样表面不平度幅值下,波长愈长其抗胶合能力愈高;波高较小,约为波长的 1/40 或几个微米至几百微米,它是因加工时,机床—工件系统低频振动引起的,通常与正弦曲线比较接近,是影响配合零件实际接触面积的一种宏观表面粗糙度,高能量淬火表面也会产生波度。

1.2.1.3 表面粗糙度

表面粗糙度是表面上,微小尺寸的凹凸不平,也称微观不平度。实质上是一种微观几何形状误差,它与表面加工时的加工方法有关,其形状可能呈现某种规律变化,例如车削、钻孔

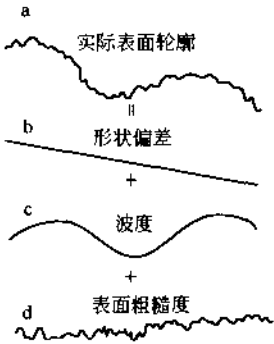


图 1-2 表面形貌的组成

或刨削等工艺产生的表面,微凹凸分布往往具有一定的规律性和方向性;磨削、研磨或抛光等光整加工产生的表面,微凹凸分布呈无规律的随机分布,其粗糙度的波长较短,约为 $2\sim 800\ \mu\text{m}$,波高也很低,约为 $0.03\sim 400\ \mu\text{m}$ 。

1.2.2 表面粗糙度对零件表面功能的影响

1.2.2.1 对摩擦、磨损的影响

表面越粗糙,摩擦系数越大。对有相对运动的表面,其摩擦阻力也越大,除会增加动力消耗,使零件发热,工作条件恶化外;还由于两表面接触时的实际接触面积小,单位面积压力增大,加剧磨损。同时,由于表面粗糙,凹凸表面互相嵌入,啮合作用加大,也会增加磨损。但是,如果表面过于光滑,两表面吸引力增大,而且也不利于润滑油的贮存,也会增大摩擦和加剧磨损。因此,接触表面应当有适当的粗糙度。

1.2.2.2 对接触刚度和定位精度的影响

当两个粗糙表面接触时,凸峰与凸峰接触,受压力时,由于实际接触较小,凸峰很容易变形(包括弹性变形与塑性变形),从而降低了接触刚度和定位精度。因此,提高接触面的接触刚度,必须降低表面粗糙度。

1.2.2.3 对疲劳强度的影响

存在于零件表面的微小峰谷,如同许多尖角、缺口和裂纹,它们就是产生应力集中的根源。当零件承受交变载荷作用时,由于应力集中的存在,就会降低疲劳强度。表面愈粗糙,疲劳强度降低得愈厉害。因此,承受交变应力的零件表面应降低粗糙度,尤其是钢质零件。

1.2.2.4 对耐腐蚀性的影响

金属表面与空气、水蒸气和其他腐蚀性物质接触时,由于化学和电化学反应,会产生腐蚀现象。粗糙表面因其凹谷较深,容易积存腐蚀性物质,故使耐蚀性降低。特别是电化学反应的不断进行,使腐蚀从轮廓的谷底逐渐深入并扩大到金属内部,可能使零件产生突然破坏。因此,在腐蚀性严重的环境中工作的零件,应具有较小的表面粗糙度。

除上述影响外,表面粗糙度还影响配合性质、密封性和流体的摩擦阻力等。

1.2.3 表面粗糙度

为了描述表面的粗糙程度,可用一维参数、二维参数和三维参数表示。工程中应用的金属表面,并不是理想的平滑表面。实际表面是三维空间曲面,如图 1-3 所示。

所谓一维参数,是指单独用来描述一个方向(如粗糙高度)粗糙程度的评定参数,二维参数,是指与轮廓曲线在高度方向以及某一水平方向上的几何特征有关的参数。自然,二维参数比前述各个一维参数反映了更多的几何特性;三维参数,它反映了表面轮廓的立体性质,这类参数同时与两个水平坐标以及高度坐标有关,是能全面描述表面形貌的。但三维参数的测定,需要较复杂的仪器和较复杂的数据处理手段。目前对三维表面形貌参数的研究,还没有进入实用阶段。

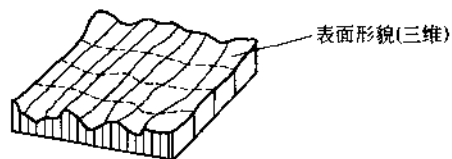


图 1-3 三维空间曲面

对于不同的磨损类型,理应控制不同的表面形貌参数,但迄今为止还没有一套完整的规范可循,还不完全清楚什么样的表面形貌是最佳的。更困难的是,确定了最佳形貌方案后,应当采用什么样的加工工艺,去有控制的实现它,都有待进一步进行研究。

国家标准 GB 1031—83 规定的都是一维参数,其中三个与微观不平度高度特性有关的参数,作为基本的评定参数,详见有关教材。应当指出的是:设计者对零件工作表面提出粗糙度要求;制造厂按图纸要求加工;经检查确定是否合格;这种设计、加工、检验的过程从当代科学角度看,是不合适的。因为,接触面在运动过程中,必然有磨损,零件表面的粗糙程度时刻在变化。例如,经过磨削加工的钢表面,其垂直方向放大 5000 倍,水平方向放大 25 倍的表面粗糙度如图 1-4a 所示。当它在另一固体表面上滚动或滑动,由于黏着磨损。表面轮廓会变成图 1-4b 所示的形貌,该图在垂直方向放大 250 倍。这说明发生黏着磨损以后,表面变得更粗糙。相反,如表面发生的是轻微磨料磨损,运动过程中会把表面上的凸峰逐渐磨掉,使表面更加光滑,如图 1-4c 所示。

这一试验结果,说明两个事实:(1)在一个运动副中表面形貌在不断变化;(2)磨损方式不同会严重影响表面形貌。

有人也做过如下实验,用三种不同的初始表面状态:普通砂轮磨光的、磨削的和精研的,分别如图 1-5 中 a、c、e 所示。从图中可看到,普通砂轮磨出的表面,经几次滑动后,其表面形貌变化很大,如图 1-5b 所示。原来的峰顶全部被磨掉,表面上的凹谷仍然保持;磨削表面(图 1-5c)经过几次滑动后,表面形貌变化不太大,如图 1-5d 所示。对于精研表面经几次滑动后,其表面形貌如图 1-5f 所示,前后比较变化更小。

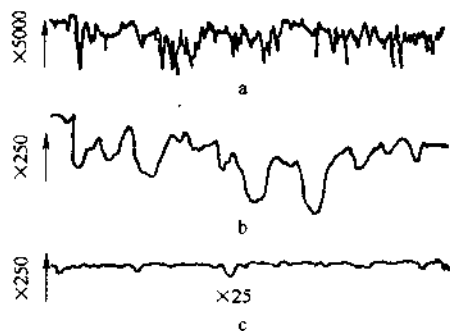


图 1-4 钢表面的轮廓线

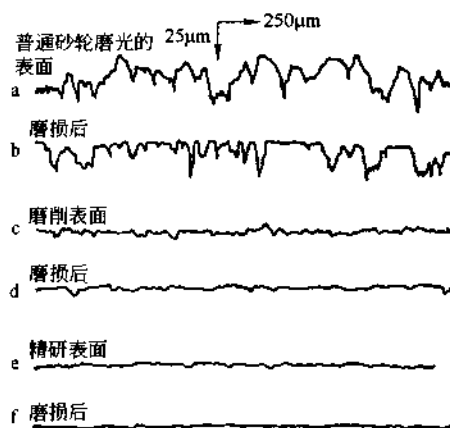


图 1-5 不同初始表面形貌滑动摩擦后的表面轮廓线

如果磨损过程继续下去,这三种不同的原始表面形貌,其最终结果会相差无几。这个概念很重要,因为设计者常常要问,什么是零件最合适的初始表面形貌,答案很明显:尽管初始表面粗糙度不同,但经过一些磨损以后,零件的表面粗糙度,产生于磨损过程。也就是,尽管初始表面粗糙度不同,经过一段时间的磨损,会产生各自的表面粗糙度。

上述变化,可以通过摩擦系数的变化证明,即用三种不同方法:车削、氧化铝抛光和电解抛光加工的铝表面,测定铝表面上滑动摩擦的摩擦系数与滑动通过次数的关系,可得如

图 1-6 中所示的曲线 a、b、c。车削表面最粗糙,电解抛光的最光滑。曲线变化表明,在最初几次滑动,由于表面形貌不同,摩擦系数差别很大。当滑块在表面上通过 100 次以后,不同加工表面间摩擦系数的差别大为减少。实际上,在滑动 50 次以后,这三种加工表面的摩擦系数,都在 0.2~0.3 之间。这说明在跑合阶段,其表面形貌、摩擦系数将随跑合过程而变化,最终建立一个新的摩擦面,这个最终的表面形貌,与初始表面形貌关系不大,是由接触材料性质、环境状态和润滑状态决定的。

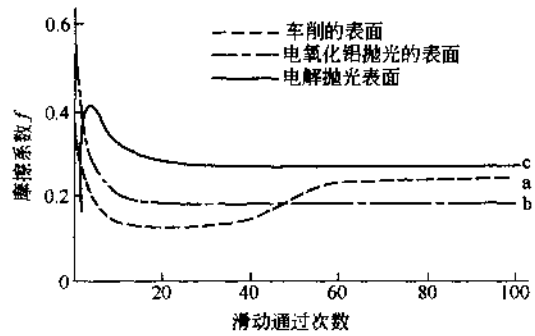


图 1-6 铝的表面条件对摩擦系统的影响

根据以上试验,可得出如下结论:(1)表面形貌随滑动次数增加而变化,即属于“时变系统”,并逐渐趋于较稳定状态;(2)运动副的“跑合”工艺很重要,因为跑合后的表面形貌,严重影响机械的效率和寿命。应当把“跑合”列为机械制造中的一道必需的工序。为了减少跑合成本、获得良好的润滑表面,建议采用化学跑合方法。

1.3 固体表面的接触

1.3.1 接触面积

以上讨论的表面性质,是单一的固体表面,没有涉及两固体表面之间受载荷后发生的相互作用。下面研究两表面接触,研究理想表面和实际表面之间,由于接触而产生的应力及变形问题。

两固体表面接触,有同形表面和反形表面两种:同形表面是由运动副中的低副构成,属于面接触,如平面与平面接触、圆柱体与圆柱孔接触;反形表面是用以构成高副的两曲面之间的接触,属于线接触或点接触,如圆柱体或球体的接触情况。

从宏观角度分析,上述两种接触性质不同,前者其接触面积即名义接触面积或表观接触面积 A_n ,相当于两表面为理想平面接触时的面积。它是按几何尺寸:宽度 C 和长度 L 计算的,即: $A_n = CL$ 。

Bowden 曾做过真实接触面积 A_r 随外载荷大小而变化的实验。他采用的试件是经过抛光的钢对钢的接触,名义的接触面积 $A = 21 \text{ cm}^2$,根据载荷 F_n 的不同,真实接触面积 A_r 的变化见表 1-1,真实接触面积 A_r 除与外载荷有关外,还与表面粗糙度、接触物体的刚度等有关。

表 1-1 真实接触面积 A_r 与载荷 F_n 的关系

F_n/N	接触点数	A_r/A_n
20	3	1/10 万
50	5	1/4 万
200	9	1/10000
1000	22	1/2000
5000	35	1/400

由于真实接触面积很小,当载荷作用时,在此接触面积上的接触压应力远远超过名义接触面积上的接触压应力,因此接触材料必然发生变形,它可能是弹性变形,也可能是塑性变形。对于大多数的接触表面,可同时存在弹性变形与塑性变形。在固体的体积内一般引起弹性变形,而在真实表面的一些微小的凸出点上,由于局部压力非常大而引起塑性变形。弹性变形与塑性变形之间的比例与许多因素有关,其中载荷大小是个重要因素。

由于表面粗糙度是“时变”的,随机的,零件表面硬度在摩擦过程中也会变化。因此,不可能根据表面几何状态,确定出真实接触面积。但粗糙表面受载后,接触点产生塑性变形,使真实接触面积增大,一直增大到接触面积与较软材料屈服极限 σ_s 的乘积等于外载荷 F_n 为止。根据这个规律,可以求出真实接触面积 A_r 。

$$A_r = F_n / \sigma_s \quad (1-1)$$

1.3.2 接触应力

在外载荷作用下,接触面的表层要产生接触应力,接触应力的大小、分布和变化,是零件表面产生摩擦、磨损的重要因素。目前,机械工程上的齿轮、凸轮、滚动轴承等计算的理论基础,仍然是1881年由赫兹提出的赫兹方程。

以两个圆柱体接触为例,其受力情况如图1-7所示。

其接触区宽度的一半 b 为:

$$b = \sqrt{\frac{4F_n}{\pi L} \left(\frac{1-\gamma_1^2}{E_1} + \frac{1-\gamma_2^2}{E_2} \right) \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}} \quad (1-2)$$

其最大接触应力 σ_{Hmax} 为:

$$\sigma_{Hmax} = \sqrt{\frac{F_n}{L} \frac{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}}{\pi \left(\frac{1-\gamma_1^2}{E_1} + \frac{1-\gamma_2^2}{E_2} \right)}} \quad (1-3)$$

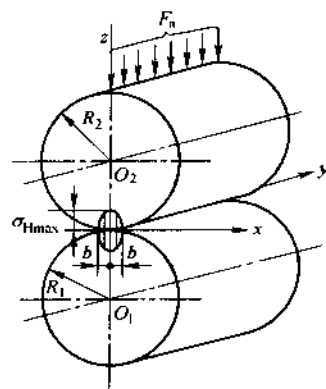


图1-7 两平行圆柱体的接触

式中 F_n ——法向总压力;

L ——圆柱体长度;

E_1, E_2 ——分别为两圆柱体材料的弹性模量;

γ_1, γ_2 ——分别为两圆柱体材料的泊松比。

在解决这个问题时,赫兹作了一系列假定:

- (1) 两个接触物体的材料都是均质等方(即绝对均匀和各向同性)的;
- (2) 发生的变形都在弹性极限以内,没有任何残余变形;
- (3) 两个接触表面都是绝对光滑的;
- (4) 接触物体不传递切向力,即没有摩擦力;
- (5) 接触面积比整个接触物体要小得多;
- (6) 接触表面之间不存在润滑膜。

从现代科学的角度看,6条假定中,只有第5条还基本正确,其余各条都是错误的。例如第(1)条:“材料都是均质等方(即绝对均匀和各向同性)的”。这条就做不到,因为机械零件的材料绝大多数是金属,金属是有晶格、晶界的,各向是不同性的;第(2)条:“变形都在弹

性极限以内,没有任何残余变形”。这是不可能的,因为从微观角度看,零件表面都是粗糙的,两个零件表面,首先接触的只是若干个凸出的凸峰,这些凸峰承受不了外载荷时,就要产生塑性变形,缩了下去,其他较低的凸峰开始接触,直到接触点面积总和,足以承受外载荷时,塑性变形才停止。因此,接触的过程,就是塑性变形的过程;第(3)条:“两个接触表面都是绝对光滑的”。这与事实相违,机械加工的表面都不是绝对光滑的,甚至可以说都是粗糙的。

从上述讨论看,赫兹公式与实际情况相差很大。但是,赫兹理论仍然广泛地应用着,在应用时常采用一些修正的方法,来减少原来的假定和实际情况不符所造成的影响。

1.3.3 粗糙表面的接触

由于表面是粗糙的,微凸体的分布又是随机的,真实接触面积相对整体是很小的,所以接触区的应力不可能像绝对光滑表面那样按赫兹分布。实际接触如图1-8所示:一些孤立的接触点,其压力可能达到屈服极限,各点上应力的总和等于外载荷。

根据以上分析发现,赫兹公式不能反映接触面上应力的真实分布情况。长期以来,根据赫兹公式派生出来的所谓“理论计算”(如齿轮计算公式、滚动轴承计算公式等),都是错误的。当前,急需在新的理论基础上建立起新的计算公式。

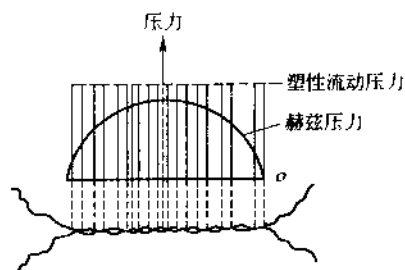


图 1-8 赫兹接触与真实接触

1.4 摩擦

1.4.1 概述

1.4.1.1 摩擦的定义

所谓摩擦,是指相互接触的两物体,在接触面上发生阻碍相对运动的现象。

相互接触的两物体,在接触面上发生阻碍相对运动(或有相对运动趋势)的力,称为摩擦力。当物体有滑动趋势但尚未滑动时,作用在物体上的摩擦力叫“静摩擦力”(亦称“静摩擦”);物体在滑动中,受到的摩擦力叫“滑动摩擦力”(亦称“滑动摩擦”)。传统的观点认为:静摩擦力大于滑动摩擦力。

1.4.1.2 摩擦的分类

人们在研究摩擦时,往往要涉及各种不同的摩擦。下面简要介绍各种不同的摩擦的分类和有关概念。

A 按发生摩擦的物体的部位分类

(1) 外摩擦。这是一般所指的摩擦,是两个相互接触的物体表面之间,发生的摩擦,只与接触表面的作用有关,而与物体内部状态无关。

(2) 内摩擦。它是指在同一物体内部,各部分之间发生的摩擦。内摩擦一般发生在液体或气体之类的流体内,但也能发生在固体内,如石墨、 MoS_2 等固体润滑剂内。

外摩擦和内摩擦的共同特征是:一物体或一部分物质将自身的运动传递给与它相接触