

机械设备 润滑技术

张翠凤 龚光寅 编著

机械设备润滑技术

张翠凤 龚光寅 编著



A1022826

广东高等教育出版社

·广州·

内 容 提 要

全书共分七章,内容包括摩擦学基础、润滑材料、机械设备的润滑方法和润滑系统、典型机械零部件的润滑、机械设备润滑故障分析及预防、润滑油液监测与诊断技术、设备润滑管理。书后编有附录,收入了世界主要石油公司代号、全称,以及适合机械设备用的国内外润滑油、润滑脂品种对照表等。

本书贯穿了用摩擦学原理指导设备润滑技术和润滑管理的思想,力求达到使机械工程类专业学生和企业工程技术人员掌握现代润滑技术、并用它来分析和解决机械设备的润滑故障的目的。

本书可作为高等学校机械工程类专业教材,也可作为工业企业工程技术人员继续教育或专题培训教材和工作参考书。

图书在版编目(CIP)数据

机械设备润滑技术/张翠凤,龚光寅编著. —广州:广东高等教育出版社, 2001.2

ISBN 7-5361-2517-8

I. 机… II. ①张…②龚… III. 机械设备-润滑-教材
IV. TH117.2

中国版本图书馆数据核字(2000)第68041号

广东高等教育出版社出版发行

(邮政编码:510076 电话:(020)87550735)
(地址:广州市广州大道北广州体院内20幢)

广州市新明光印刷有限公司印刷

开本:787×1092 1/32 15.25印张 353千字

2001年2月第1版 2001年2月第1次印刷

印数:1~1500册

定价:22.90元

前 言

随着科学技术的飞速发展,新成果不断地应用在机器设备中,使设备的高新技术含量、现代化水平急剧提高,形成了现代机器设备的大型化、高速化、精密化、多功能化、功能高级化、微电子化、自动化等显著特点,相应地也带来技术和管理上很多新问题。尤其是设备大型化、高速化、精密化等特点导致机械设备摩擦副所处的条件更严酷,使设备的润滑技术变得极为重要,引起人们瞩目和极大重视。

润滑技术包括润滑剂和润滑方法及装置等。润滑剂是机械设备的“血液”,润滑方法及装置则是运送“血液”的“心脏”,润滑技术的每个环节,包括选用润滑剂、更换润滑剂、使用润滑装置等,若有不当,都会引起机械设备故障,直至引发整个生产线故障,使企业蒙受巨大经济损失。

摩擦学是研究两接触表面摩擦、磨损、润滑的理论和工程实际的学科,它是涉及数学、力学、物理学、化学、冶金学、材料科学、机械工程学,以及石油化工等多种学科领域的一门综合性边缘学科。它在提高机械设备的可靠性、保证机械设备的精度、延长机械设备的使用寿命,以及节省能源等方面起着重要作用,直接影响企业的竞争能力(体现在产品质量和成本等方面),从而影响国民经济的发展。

我们编写本书的目的在于:使企业重视机械设备润滑技术,用摩擦学原理指导设备润滑技术和润滑管理;使企业工程技术人员和高校机械工程类专业学生掌握现代润滑技术,用它来分析和解决机械设备的润滑故障。

1986年以来,编著者一直从事设备工程教学和研究工作,为高校机械类专业、设备工程与管理专业学生主讲“机械设备润滑技术”、“机械设备维修技术”、“工业企业现代设备管理”等专业课程;也为国内一些大型企业以及广东地区诸多国有企业、合资企业、乡镇企业、独资企业的工程技术人员和设备管理人员进行有关设备润滑、设备维修、设备现代管理的培训、咨询和工程技术服务;同时承担了近海钻井平台设备用润滑油品的监测诊断研究、发动机的磨合油铁谱分析、大型锻压设备齿轮副失效分析等科研课题。本书凝聚了诸多企业工程技术人员多年的工程实践,以及编著者多年的教学和科研的心血和成果。

本书题材新颖,内容翔实,图文并茂,实用性强。在介绍摩擦学原理的基础上,重点介绍了新型润滑材料和油品选用、代用、混用、更换等工程实践中遇到的问题,详细介绍了机械设备的润滑方式、润滑装置和典型机械零部件润滑油的选用方法。并且从机械设备工程实践出发,对机械设备的润滑故障分析和预防进行了探讨;对润滑油液监测与诊断技术作了详尽的介绍,用很多设备的实际案例说明了该技术的广泛应用。考虑到润滑技术与润滑管理的关联性,本书还用较少的篇幅,从现代设备管理的高度介绍了设备润滑管理。在以上内容中,本书引用了国内外一些最新信息和动态,融入了编著者多年发表的论文、著作和科研成果。

本书由广州大学张翠凤主编并负责第一章、第二章、第四章、第五章、第六章、第七章的编写，广州大学龚光寅参编，负责第三章的编写。广州机床研究所周洪澍高工担任主审。在编写和审稿过程中，广州机床研究所所长李文哲高工、广州机床研究所设备状态监测中心贺石中高工、西安交通大学朱均教授、武汉交通科技大学沈元培教授、西南石油学院杨启明教授、西安公路交通大学陈新轩副教授、西安电力整流器厂陈龙生工程师等同志给予了极大的关怀和提出了许多宝贵的意见。同时承蒙原广东省教育厅给予经费资助，原广东省教育厅教学处给予支持和指导，广东高等教育出版社付出辛勤劳动，促成本书出版。谨在此一并表示衷心的感谢。

由于编著者水平有限，书中仍会存在一些错误，恳请读者予以批评指正。

1999年8月于广州

目 录

前言

第一章 摩擦学基础	(1)
第一节 摩擦学的定义和研究内容	(1)
第二节 摩擦表面	(3)
第三节 摩擦	(6)
第四节 磨损	(14)
第五节 润滑	(21)
第二章 润滑材料	(30)
第一节 润滑油	(30)
第二节 润滑脂	(61)
第三节 固体润滑剂	(70)
第四节 润滑油品的选用、代用与混用	(71)
第五节 润滑油品的更换	(73)
第三章 机械设备的润滑方法和润滑系统	(77)
第一节 概述	(77)
第二节 润滑油润滑方法和润滑系统	(80)
第三节 润滑脂润滑方法和润滑系统	(91)
第四章 典型机械零部件的润滑	(106)
第一节 滑动轴承的润滑	(106)
第二节 滚动轴承的润滑	(114)
第三节 齿轮传动的润滑	(121)
第四节 机床导轨的润滑	(133)
第五节 液压系统的润滑	(138)
第五章 机械设备润滑故障分析与预防	(145)
第一节 典型机械零件的常见损伤和防治	(145)
第二节 润滑系统故障分析和排除	(147)
第三节 液压系统的故障分析和处理	(158)
第六章 润滑油液监测与诊断技术	(167)
第一节 概述	(167)
第二节 光谱技术及仪器	(170)

第三节 铁谱技术及仪器	(172)
第四节 其他润滑油液监测和诊断技术	(191)
第五节 润滑油液监测与诊断技术的应用	(195)
第七章 设备润滑管理	(209)
第一节 摩擦学原理指导设备润滑管理	(209)
第二节 设备润滑管理的内容和实施	(210)
第三节 计算机辅助设备润滑管理	(214)
附表	(216)
附表1 世界主要石油公司代号及全称(部分)	(216)
附表2 国内外主轴轴承油品对照表	(217)
附表3 国内外油膜轴承油品对照表	(218)
附表4 国内外工业齿轮油品对照表	(219)
附表5 国内外开式齿轮油品对照表	(222)
附表6 国内外蜗轮蜗杆油品对照表	(223)
附表7 国内外导轨油品(L-G)对照表	(224)
附表8 国内外液压—导轨油品(HG)对照表	(225)
附表9 国内外液压油品(HL)对照表	(226)
附表10 国内外抗磨液压油品(HM)对照表	(228)
附表11 国内外往复式空压机油品对照表	(230)
附表12 国内外回转式空压机油品对照表	(231)
附表13 国内外工业润滑脂品种对照表	(232)
附表14 国内外车辆润滑脂品种对照表	(236)
参考文献	(237)

第一章 摩擦学基础

第一节 摩擦学的定义和研究内容

摩擦学 (Tribology) 是 60 年代中期发展起来的一门边缘学科, 它被定义为“研究相对运动的相互作用表面的有关理论与实践的一门科学与技术”。实践表明, 接触表面相对运动就产生摩擦, 运动表面在摩擦过程中将发生一系列的物理、化学及力学等方面的变化, 因而摩擦学是涉及数学、力学、物理学、化学、冶金学、机械工程学以及材料科学、石油化工等多种学科领域的一门综合性边缘学科。

世界各工业国的科技界和教育界已经认识到摩擦学这门学科对提高机械设备的可靠性、延长设备的使用寿命、节省能源和对机械产品向大批量、高速度、重载荷、高度自动化方向发展等起的重要作用, 以及对国民经济发展的直接影响。因此各工业发达国家, 例如美国、英国、日本、德国、意大利等, 都非常重视对摩擦学的研究。我国也逐步开展对摩擦学的研究工作, 特别是应用摩擦学并在提高我国的机械产品质量、延长机械设备使用寿命、节约能源与材料等方面已取得一定的成就, 应用的企业也获得明显经济效益。

摩擦学研究的主要内容如图 1-1-1 所示。

(1) 摩擦学机理的研究。主要包括摩擦的产生原因、磨屑的形成机理和润滑机理等方面的内容。对这些问题的深入研究有助于揭示摩擦磨损问题的本质, 为解决工程实际问题提供理论基础。

(2) 各种典型机械运动副在不同工况、不同介质作用下的摩擦学特性和失效机理的研究。通过该研究将摩擦学和机械设计、生产实践和设备的维修管理联系起来, 使机械产品的使用性能、可靠性、寿命等的提高建立在科学的基础上。

(3) 各种材料和表面处理工艺的摩擦学特性研究。研究目的是为合理地选择摩擦副材料和表面耐磨处理工艺, 以提高机械零件寿命和带来可观的经济效果。

(4) 润滑剂、工艺润滑冷却剂和固体润滑材料的研究。为了提高机器设备的寿命、保证产品质量, 尤其是适应现代化设备的高速、高精度、重载的要求, 迫切需要研究和开发新型润滑材料、新型工艺润滑冷却剂等。

(5) 摩擦学数据中心和数据库的建立。摩擦学数据是机械设计的最基本数据之一。建立摩擦学数据库为提高机械产品设计水平和工艺水平、提高机械产品的性能和可靠性、节约能源与材料、降低成本提供坚实的科学依据。

(6) 摩擦学测试设备和测试技术的应用及研究。应用摩擦学测试设备和测试技术可以使摩擦学研究达到弄清机理、定量计算、预测和控制摩擦磨损的目的, 使摩擦学研究工作上升到微观、定量、综合、动态研究的新水平。

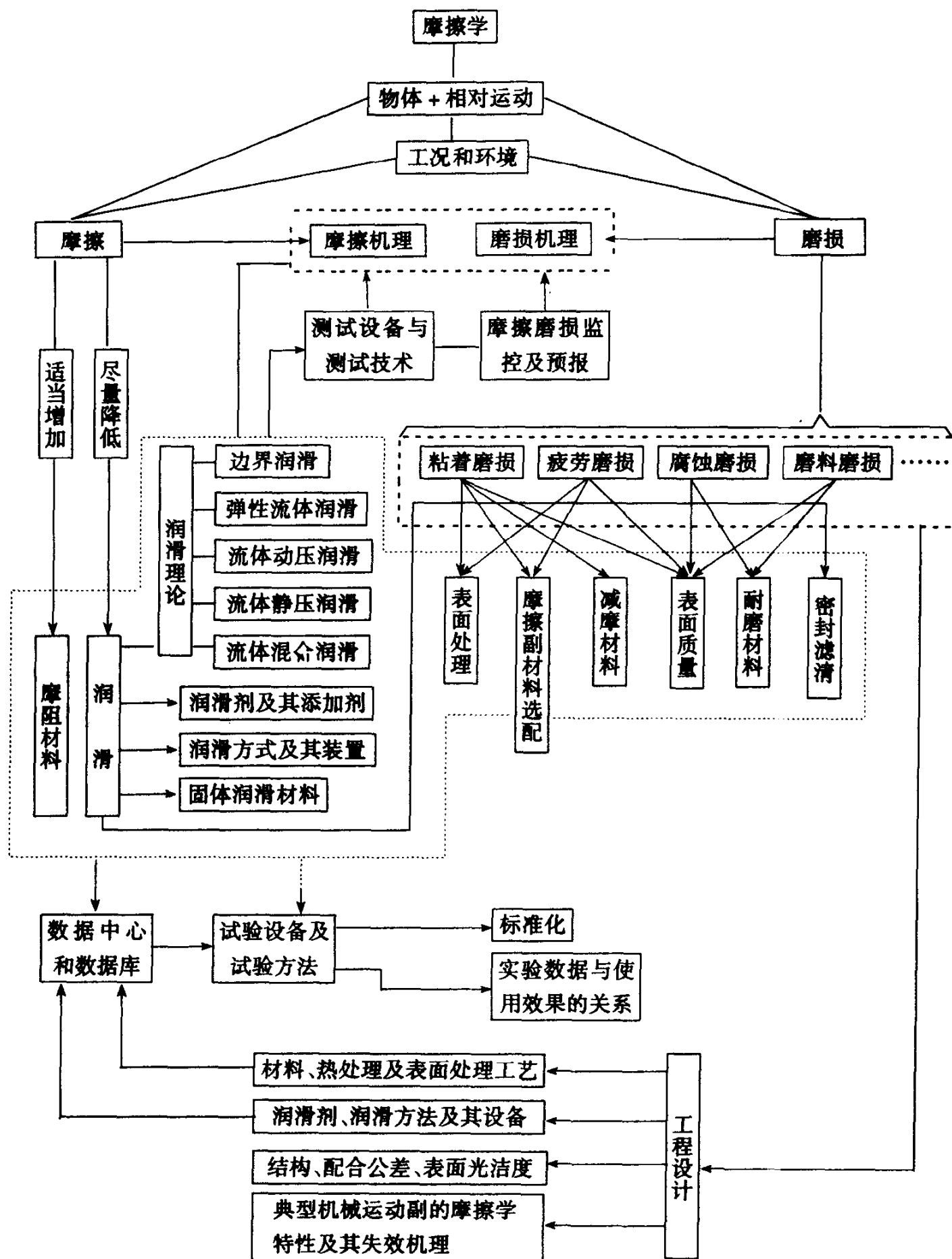


图 1-1-1 摩擦学研究及其应用方框图

除上述六个方面内容外，还有摩擦物理、摩擦化学、摩擦力学、摩擦声学、特殊工况下的摩擦学、磁摩擦学等内容需进行研究。

深入开展摩擦学的研究，从而正确控制摩擦和磨损，合理选择润滑材料和润滑方式，才能达到节约能源，提高机器设备的使用寿命、可靠性和生产效率，以及满足特殊工况的

要求等目的。无疑这将对国民经济的发展带来巨大的经济效益。

第二节 摩擦表面

摩擦、磨损和润滑是在摩擦表面或表层进行的，因此了解和研究摩擦表面和表层的状况是解决摩擦学各种问题的基础。

一、摩擦表面的几何形貌

摩擦表面的几何形貌或称表面形貌，是指摩擦副表面的几何性质，它包括粗糙度（微观几何形貌）、波度、形状误差（宏观几何形貌）以及纹理（表面粗糙条纹的方向性）等四个因素的综合。

在机械加工过程中，由于刀痕、切削过程中切屑分离时的塑性变形、工艺系统中的高频振动、刀具和被加工表面的摩擦等原因，使被加工零件的表面产生微小的峰谷。这些微小峰谷的高低程度和间距状况称为表面粗糙度，它是一种微观几何形状误差。通常按波距来划分表面粗糙度、波度和形状误差：波距小于 1 mm 的属于表面粗糙度，波距在 1 ~ 10 mm 的属于表面波度，波距大于 10 mm 的属于形状误差。

国标规定，表面粗糙度的基本评定参数有轮廓算术平均偏差 R_a (图 1-2-1)、微观不平度十点高度 R_z (图 1-2-2) 和轮廓最大高度 R_y (图 1-2-3) 等与高度特性有关的参数，

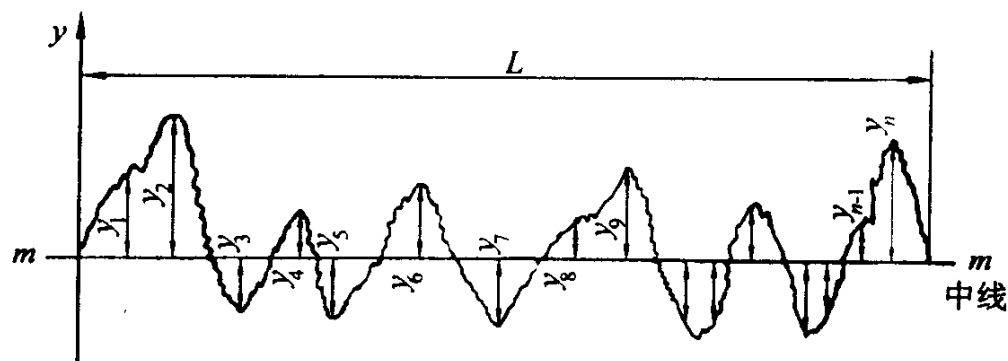


图 1-2-1 轮廓算术平均偏差 R_a

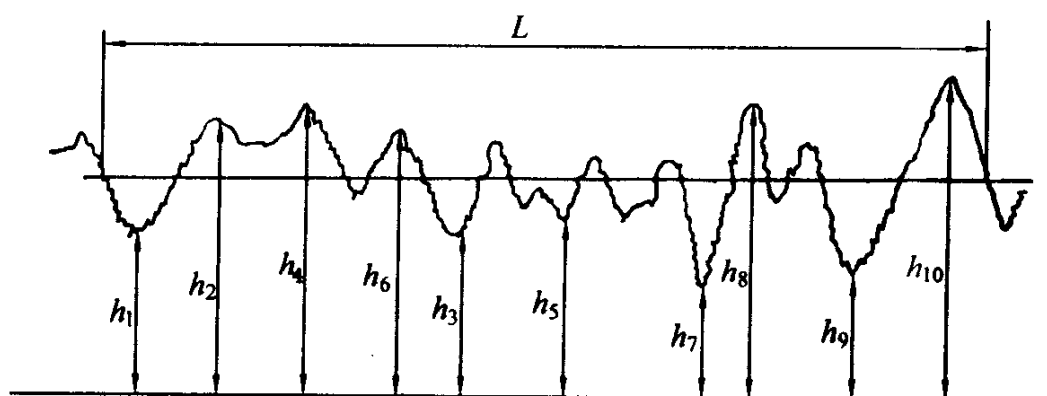


图 1-2-2 微观不平度十点高度 R_z

其他与间距特性有关的参数(如轮廓微观不平度的平均间距 S_m 、轮廓的单峰平均间距 S)、

与形状特性有关的参数（如轮廓的支承长度率 t_p ）均为附加的评定参数。

在零件的加工过程中，由于工件、刀具、机床的变形，相对运动关系的不准确，各种频率的振动以及定位不准确等原因，都会使零件表面形状和相互位置产生误差。国标规定，表面形状公差有直线度、平面度、圆度、圆柱度、线轮廓度、面轮廓度等。

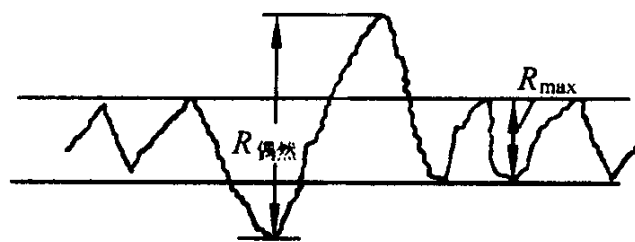


图 1-2-3 轮廓最大高度 R_y

摩擦表面的几何形貌对于表面间的摩擦、磨损和润滑都有作用，尤其是对磨损起着极为重要的作用。因为表面几何形貌一方面影响润滑的有效性，另一方面也影响润滑膜破坏后表面粗糙峰之间碰撞的概率和应力大小，这一点往往被人低估或不正确地理解。所以要综合控制表面几何形貌参数，不能简单地仅仅控制轮廓算术平均偏差 R_a 一个参数，而应针对不同的磨损类型，控制不同的表面形貌参数。例如，对于点接触、线接触，应主要控制表面粗糙度的有关参数；而对于面接触，则应控制波度，因为它对动压油膜形成有重要影响。

此外，表面粗糙条纹（纹理）方向对摩擦也有重要影响。有研究表明，当摩擦表面运动方向与条纹方向重合时，摩擦阻力最大；当它们之间成一定角度或条纹无规则时，摩擦阻力最小。

二、摩擦表层的结构

金属材料的表层（图 1-2-4）通常由于机械加工造成一层加工硬化层（变形层），有几百 μm 厚，由重变形层逐渐向内过渡到轻变形层。变形层的强度高于金属基体材料，因而较基体耐磨。变形层外面是非晶体或微晶粒结构的毕氏层（Bielby），它是机械加工时，由于金属表层熔化和流动而在底层材料上骤冷淬硬而成。该层通常有 $10^{-2} \mu m$ 量级厚度，硬度很高，不易磨合。毕氏层的外表通常是氧化层，它硬而脆，厚度与毕氏层同量级。通常，硬的表面将使摩擦阻力下降，但重载下氧化层可能被压碎。表面氧化层和毕氏层随表面轮廓而起伏。

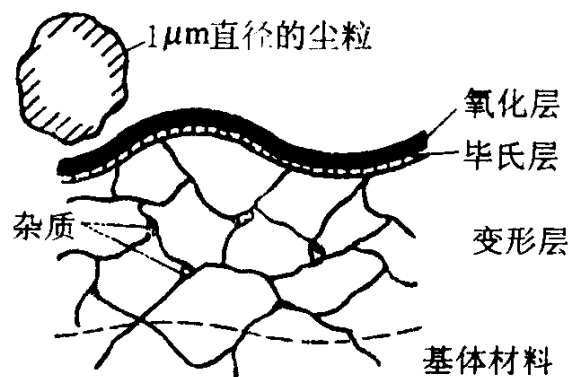


图 1-2-4 典型的金属表层

三、摩擦表面的保护膜

机械零件的摩擦表面之间大多有润滑剂存在，因此，表面外大多有各种保护膜，其厚度取决于摩擦副的润滑状态。当摩擦副设计成流体润滑状态时，摩擦副表面必须形成能覆盖表面粗糙度的油膜（包括流体动压油膜或弹性流体动压油膜，以及静压油膜等）；反之，当摩擦副设计成混合润滑状态时，表面的流体动压油膜或弹性流体动压油膜厚度不足以完全覆盖表面粗糙度，则两个摩擦表面既有流体介质隔开部分，又有表面直接接触区域；当润滑油中含有油性添加剂或极压添加剂时，还可能有某些边界膜隔开摩擦表面。

四、摩擦表面的接触

当两个摩擦表面互相接触时，其接触具有不连续性和不均匀性（见图 1-2-5），所以两表面的实际接触面积（指各实际接触部分的微小面积的总和）非常小，通常是名义接触面积的 0.01% ~ 0.1%。

摩擦表面粗糙峰高度不等，接触时一部分必然处于弹性变形状态，而另一部分则处于塑性状态。这两部分的比例与载荷大小及表面情况有关。由于摩擦表面真实接触面积非常小，所以真实接触部位的应力总是可观的，因此除在轻载下工作的零件外，多数摩擦表面都存在大量的塑性变形粗糙峰。这点可由塑性指数 ψ 来衡量：

$$\psi = \frac{E'}{H} \sqrt{\frac{R_q}{\rho}}$$

式中： H ——软表面的硬度，布氏硬度 HB；

R_q ——表面轮廓的均方根偏差， μm ；

$R_q \approx (1.1 \sim 1.5) R_a$ ， R_a 为轮廓算术平均偏差；

ρ ——两表面粗糙峰的综合峰顶曲率半径， μm ；

E' ——两表面的当量弹性模量，Pa。

塑性指数 ψ 反映表面粗糙峰产生塑性变形的难易程度。当 $\psi < 0.6$ 时，表面一般在弹性变形范围，除非载荷特别大，才产生塑性变形；当 $\psi > 1$ 时，正常载荷下也有塑性变形，除非表面特别光滑。实际上多数工程表面 $\psi > 1$ 。

粗糙峰的变形是属于弹性还是塑性，对判断是否产生磨损有重要意义。因为粘着和磨损通常不是发生在弹性变形阶段，而是发生在塑性变形阶段。因此，用塑性指数能清晰地反映出表面在磨合时逐渐提高耐磨性的过程。

随着载荷的增高，真实接触面积约成正比地增加，它的增加主要体现在接触点数目的增加上，至于各接触点平均接触面积的增加则是次要的；接触斑点是否均布在整个表面上，主要取决于装配精度、表面的形状精度和波度，而与表面粗糙度无关。

五、摩擦表面的滑动

当载荷作用时，不仅造成粗糙峰之间的挤压和变形，还由于表面间的滑动，进一步带来粗糙峰之间的碰撞。这时，不仅是挤压作用，还有剪切及滑动摩擦力等的作用，使得粗糙峰塑性变形的可能性增加，并且表面下的最大剪应力点移向表面，从而使得表面裂纹更加萌生和发展，并促进磨损过程。

表面滑动的重要结果是表面摩擦发热，产生温升。摩擦表面的温升很可观，即使多数只是瞬现温度，也使表面软化，易产生塑性变形和粘着，直至胶合。温升还使润滑剂失去润滑效果，使摩擦系数变化。同时温升还加快磨损过程中的表面氧化速度。总之，摩擦发热使表面温升在摩擦表面滑动中对磨损有重大影响。

表面滑动除了促进磨损外，还促使表面的润滑油建立有效的动压油膜。

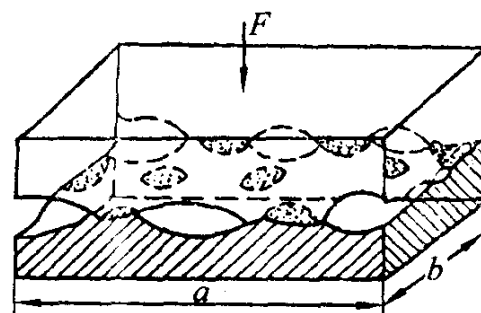


图 1-2-5 粗糙表面的接触

第三节 摩 擦

两个互相接触的物体，在外力作用下发生相对运动，或者具有相对运动的趋势时，在接触表面之间将产生阻止其发生相对运动或相对运动趋势的作用，这个阻力称为摩擦力，这种现象称为摩擦现象。

任何机器的运动都依赖于其机器零件的相对运动来实现。当机器运转时，机器零件的相对运动表面间必然有摩擦力产生，机器克服摩擦力要消耗其动力，使机器效率降低。同时相互运动表面间出现磨损，致使零件相互配合的间隙增大，影响机器的精度、寿命和可靠性。此外摩擦还会使相互运动表面温度升高。如果散热不良，将导致零件材料受热而膨胀，以致发生咬死现象而破坏机器的正常运转；或者由于机器过热而使润滑剂失去作用，进一步使机器的工作条件变坏，加速磨损而失效。

一、摩擦类型

摩擦可以按不同的方式来分类。在摩擦学中，通常按摩擦副表面的润滑状况将摩擦分为干摩擦、边界摩擦和流体摩擦。

1. 干摩擦

既无润滑又无湿气的摩擦称为干摩擦，它是种理想状态。对于摩擦的研究可作为其他摩擦研究的基础。

2. 边界摩擦

它是指两接触表面间存在极薄润滑膜时的摩擦。这时两接触表面的摩擦和磨损不取决于润滑剂的粘度，而是取决于两表面的特性和润滑剂特性。边界摩擦是一种极为普遍的状态。例如在机器设备中，普通滑动轴承与轴、气缸与活塞环、机床导轨副等接触处都可能是边界摩擦。与干摩擦相比，边界摩擦的特点是：

- (1) 具有较低的摩擦系数， f 在 $0.03 \sim 0.1$ 之间。
- (2) 由于表面不直接接触，可以减少磨损，延长使用寿命。
- (3) 能大幅度提高承载能力，扩大使用范围。

两接触表面间存在的极薄的润滑膜被称为边界膜。按膜的结构性质不同，边界膜可分为吸附膜和反应膜两类。吸附膜又可分为物理吸附膜和化学吸附膜，反应膜又可分为化学反应膜和氧化膜。研究膜的基本性质，是研究边界润滑的一个重要方面。现将各种膜的基本性质说明如下：

1) 物理吸附膜。由于分子或原子相互吸引的作用力（Van der Waals 作用力），使得金属表面和聚合物之间吸附。当二者靠近到几 nm (10^{-9} m) 时便产生吸附，这种吸附称为物理吸附（physical adsorption）。分子和表面的结合是弱的。可以单分子吸附，也可多分子吸附，并且膜的形成是可逆的。

图 1-3-1 是硬脂酸分子吸附在金属表面的示意图。这种分子是极化的，垂直于表面的方向吸附，其 O、H 的正负离子与金属表面的负、正离子相吸附。长链结构的碳氢化合物都有这种性能。图中所示的吸附分子层的高为 $19 \text{ \AA}$ 。

物理吸附膜对温度很敏感，热量可以使分子脱吸、乱向直至边界膜产生熔化。在较低

的温度及摩擦热较小，即低载荷、低滑动速度的条件下，物理吸附膜可以正常工作。

2) 化学吸附膜。如果润滑剂的极性分子与金属表面是化学的结合，即短范围表面力与表面结合，称为化学吸附。图 1-3-2 为硬脂酸与表面氧化铁在有水的条件下所形成的金属皂膜的示意图。

和物理吸附膜相比较，化学吸附膜稳定得多，形成吸附膜后是不可逆的，并且可以吸收较高的热量（物理反应膜 2 000 ~ 10 000 J/mol，化学反应膜 10 000 ~ 100 000 J/mol），热稳定性好，熔点较脂肪酸还要高很多，其熔点可达 120 ℃。而没有形成金属皂的硬脂酸，熔点只有 69 ℃。

化学吸附膜可以在中等负荷、温度及滑动速度下工作。工作条件恶劣时，金属皂膜会被破坏。其破坏的特点，除了乱向或皂膜熔化之外，还表现为皂膜软化。物理吸附膜破坏时往往不需要外界的能量，而化学吸附膜必须有外加的能量，例如加热，才能使其脱附。

3) 化学反应膜。如图 1-3-3 所示，化学反应膜的润滑作用是由润滑剂中的某些分子与金属表面发生化学反应而成的，二者之间的价电子相互交换，形成一种新化合物。

化学反应膜的厚度可以很大。它的特点是：不可逆、高结合能量及高活性。很多化学反应膜包括硫、磷、氯等原子与金属表面形成的金属盐，都具有高的熔点及低的剪切强度，并且比化学吸附膜和物理吸附膜要稳定得多。它适用于高负荷、高滑动速度及高温的条件下。

4) 氧化膜。它也是一种边界膜，是在纯净的金属表面上形成的，有利于防止金属表面与外界直接接触。例如铁的表面氧化膜的构造是 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{FeO}/\text{Fe}$ ，其中 Fe_3O_4 和 FeO 有利于减少磨损，而 Fe_2O_3 则起磨粒作用，使磨损增大。薄的氧化膜强度较

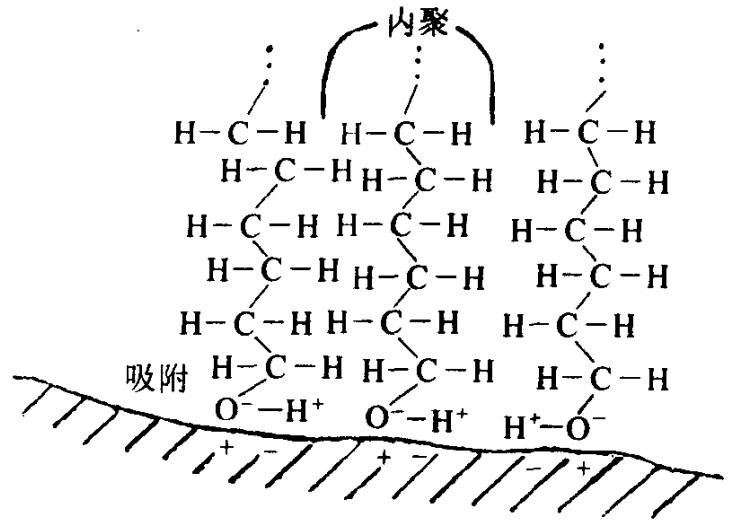


图 1-3-1 物理吸附模型

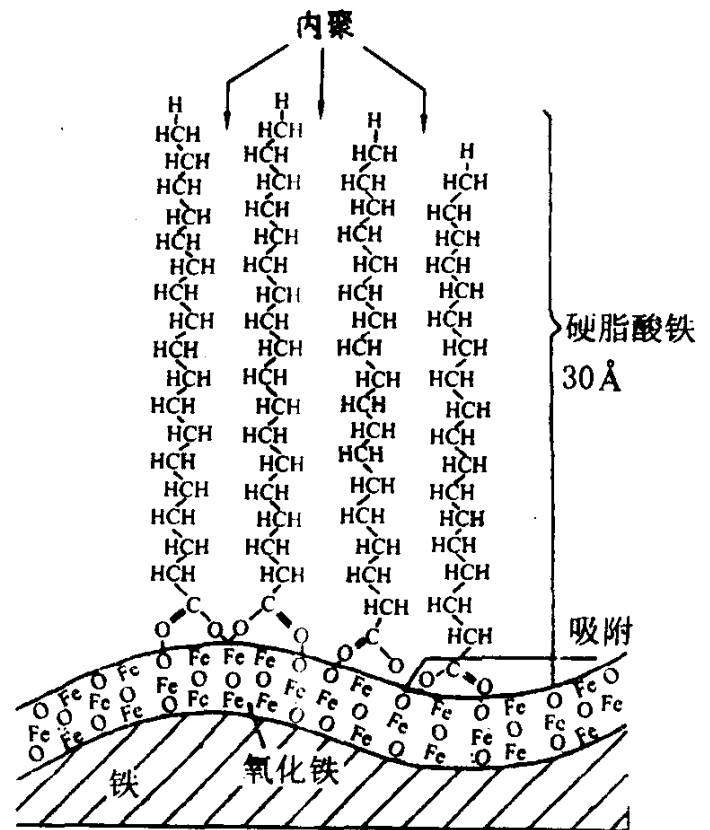


图 1-3-2 化学吸附模型

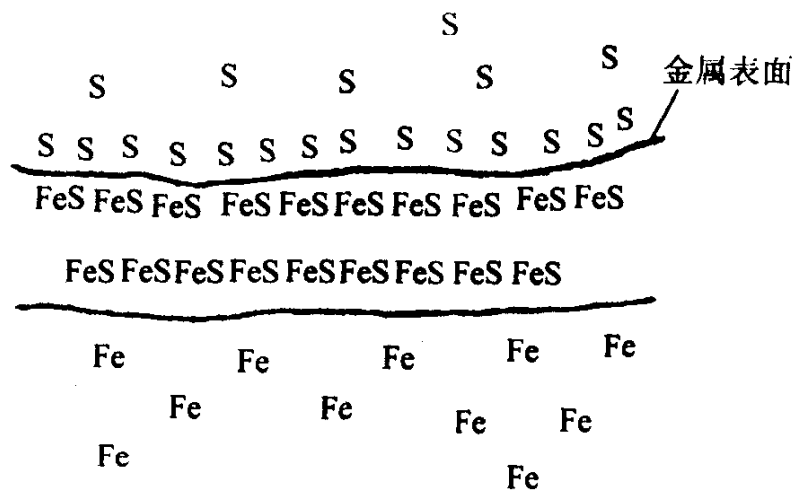


图 1-3-3 化学反应膜模型

高, 有利于阻止表面间发生粘着, 但随着氧化膜的厚度增大, 将使膜的强度下降, 在摩擦力的作用下易脱落成磨粒, 对摩擦不利。

3. 流体摩擦

流体摩擦是由具有体积特性的流体层隔开的两固体相对运动时的摩擦, 即由流体粘性起作用的摩擦。

另外, 还有混合摩擦, 它分半干摩擦 (部分接触点是干摩擦, 另一部分是边界摩擦) 和半流体摩擦 (部分接触点是边界摩擦, 另一部分是流体摩擦)。

二、摩擦理论概述

经过几百年科学家的努力, 目前对摩擦现象及其机理的研究已有很大的进展, 出现了各种理论来阐明摩擦的本质, 但至今仍未形成统一的理论。

18 世纪以前, 许多学者认为摩擦是由于接触表面间的凹凸不平处在两个表面发生接触时互相啮合, 从而产生阻碍两表面运动的阻力, 所以这种理论被称为“机械理论”。

以后巴拉认为摩擦是沿粗糙面上升的结果, 摩擦系数为粗糙面斜角 (θ) 的正切值, 即 $f = \tan \theta$, 表面越粗糙, 摩擦系数越大。贝利沙尝试将摩擦面的凹凸形作成半球凹凸模型来证实, 通过计算得出这种凹凸面合起来的摩擦系数为 $\frac{1}{3}$ 。至今这种模型仍被用来推导摩擦公式。

实践证明, 上述机械理论只适用于粗糙表面, 而当表面粗糙度达到使表面分子吸引力有效发生作用时 (例如超精加工表面), 摩擦系数反而加大, 这时机械理论就不适用。

至今, 普遍使用的有以下两种理论:

1. 粘着理论

该理论认为: 当两表面接触时, 在载荷作用下, 有些接触点的单位压力很大, 这些点将牢固地粘着, 使两表面形成一体 (图 1-3-4), 这种情况称为粘着或冷焊。当一表面相对另一表面滑动时, 粘着点则被剪断, 而剪断这些连接的力就是摩擦力。此外, 如果一表面比另一表面硬一些, 则硬表面的粗糙微凸体顶端将会在较软表面上产生犁沟, 这种犁沟阻力也是摩擦力。对于理想的弹—塑性材料, 摩擦力主要就是剪断金属粘结点所需的剪切力, 而犁沟阻力只占全部摩擦力的百分之几, 可以略去不计。

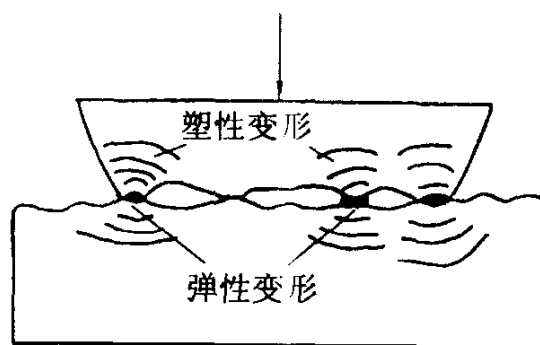


图 1-3-4 接触点的塑性变形及粘着点的形成

以后的研究更为完善。考虑到在摩擦副滑动时, 实际接触面积由于法向载荷与切向载荷联合作用而增大; 接触点发生屈服, 是法向载荷造成的压应力和切向载荷造成的切应力合成作用的结果。进一步的研究又考虑到表面有自然污染膜, 这时摩擦系数会下降。

该理论只适用于金属表面对金属表面的摩擦, 它建立在一些假设的基础上, 例如实际接触面积是由塑性变形来决定的, 两个接触表面是被一个剪切强度较低的膜隔开, 摩擦力是剪切膜所需要的力, 等等。

2. 分子-机械理论

该理论认为：摩擦是一个混合过程，它既要克服分子间相互作用力，又要克服机械变形的阻力。这样在载荷作用下的接触表面间的相互作用既有机械作用（取决于变形），又有分子作用（取决于原子相互作用）；机械作用的过程发生在固体表层厚度为 $10\ \mu\text{m}$ 处，而分子相互作用的过程局限于中间体，即发生在表面膜和涉及固体表面处 $100\ \mu\text{m}$ 左右的深度内。两种作用的比例与表面粗糙度、材料种类、载荷大小有关。粗糙度低时，分子作用比例大，而粗糙度高时，机械作用大；对于金属材料，分子作用大，而对于橡胶材料，则分子作用小。

进一步的深入研究还给出了在切向移动时接触点因机械作用或分子作用而被破坏的五种型式（图 1-3-5）。图中前三种型式主要是由于机械作用所致，后两种型式则明显地表现为分子作用的影响。

考虑到机械作用和分子作用，可推导出公式

$$F = \alpha Ar + \beta P$$

式中： α ——与表面分子特性有关的参数；

β ——与表面机械特性有关的参数；

Ar ——实际接触面积；

P ——正压力。

分子-机械理论考虑的因素较多，比较符合实验的结果。在干摩擦和边界摩擦时，对于金属、聚合物、碳氢化合物等大多数材料均可按上述公式分析。

除上述摩擦理论外，还有摩擦的能量理论研究。一种是从表面能量的观点出发分析摩擦机理，另一种则是从能量平衡的观点综合分析摩擦过程。

三、影响摩擦的因素

摩擦过程是一个十分复杂的过程，摩擦系数不仅随着材料的不同而不同，而且还受其他因素的影响，即摩擦系数不是材料的固有特性，而是材料和条件综合的特性。通过实验发现载荷、粗糙度、滑动速度、温度、表面膜等因素对摩擦系数均有相当的影响。同一种摩擦副在不同因素的影响下可能具有极不相同的摩擦系数。

下面对摩擦系数的影响进行分析：

1. 静摩擦系数

试验表明，对固体材料静摩擦系数有重要影响的是法向压力和静止接触时间。

图 1-3-6、图 1-3-7 是在摩擦试验机上用不同材料的摩擦副测出来的静摩擦系数。图 1-3-8 说明了在真空条件下不同材料摩擦副测得的摩擦系数与压力的关系。图 1-3-9 是在采用不同的加工方法所得到的表面上测得的摩擦系数与压力的关系。以上实验均表明静摩擦系数随着法向压力的增加而下降，这是因为当法向压力增大时，摩擦面的实际接触面积增大了。

图 1-3-10 为水工闸门上使用胶木滑道的胶木摩擦系数随静止承压时间变化的曲线。曲线表明，静止接触时间越长，摩擦系数就越大。原因在于由法向压力引起的高应力作用



图 1-3-5 摩擦连接破坏的五种型式

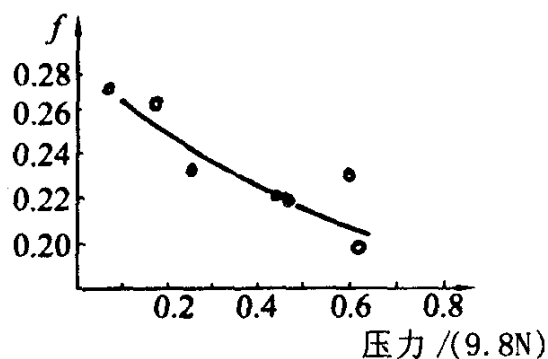


图 1-3-6 静摩擦系数与压力的关系
(45 钢 - 铜, 干摩擦)

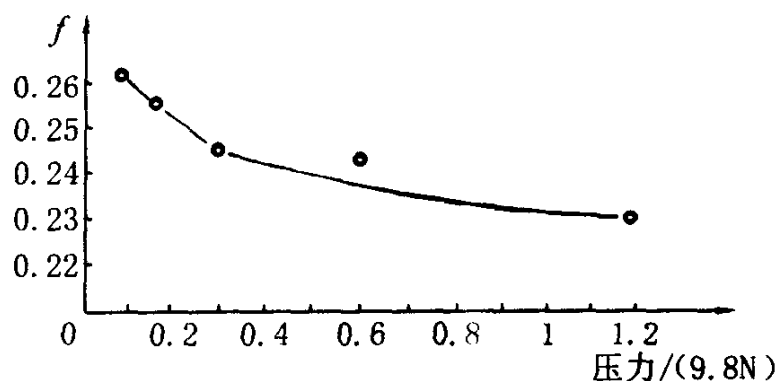


图 1-3-7 静摩擦系数与压力的关系
(45 钢 - 铸铁, 干摩擦)

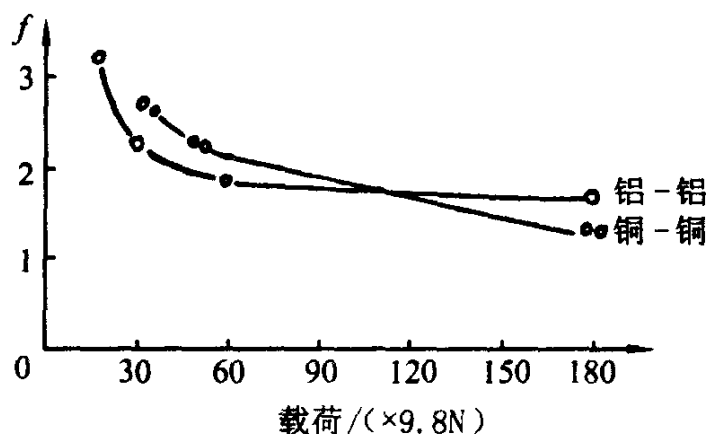


图 1-3-8 真空条件下摩擦系数与载荷的关系

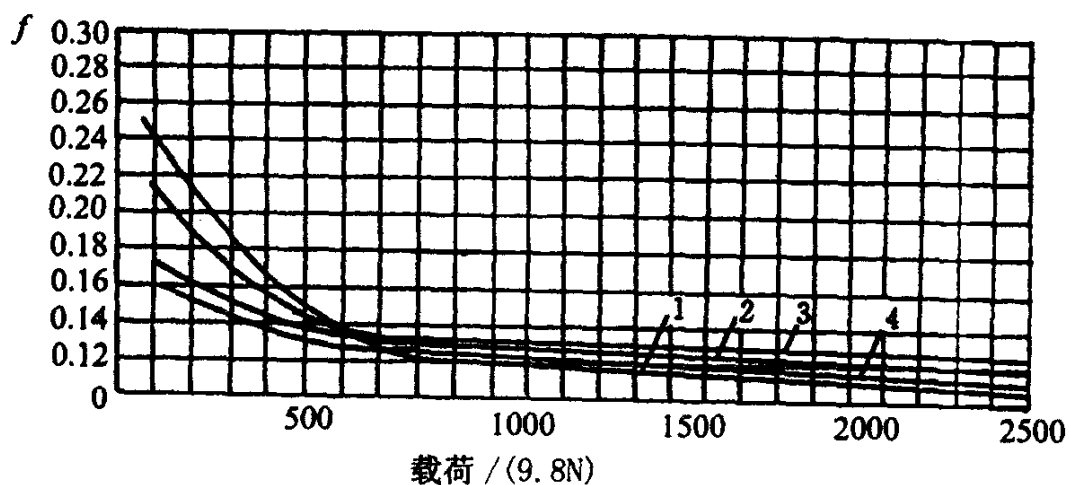


图 1-3-9 静摩擦系数与载荷的关系 (45 钢)
1—精拉 2—磨削 3—拉削 4—铰孔

下, 接触的地方发生塑性变形, 这种变形引起了实际接触面积的增加和接触物体表面间的相互交错接触, 因而引起了摩擦系数的增大。

2. 动摩擦系数

动摩擦系数的情况要比静摩擦系数复杂, 因为除了压力外还涉及到滑动速度以及由于滑动速度而引起的其他一些参数的影响。综合国内外资料看, 寻求摩擦系数与滑动速度和压力之间关系的通用形式较为困难。

温度也是影响摩擦过程的一个重要参数。当摩擦副相互滑动时, 温度的变化使表面材