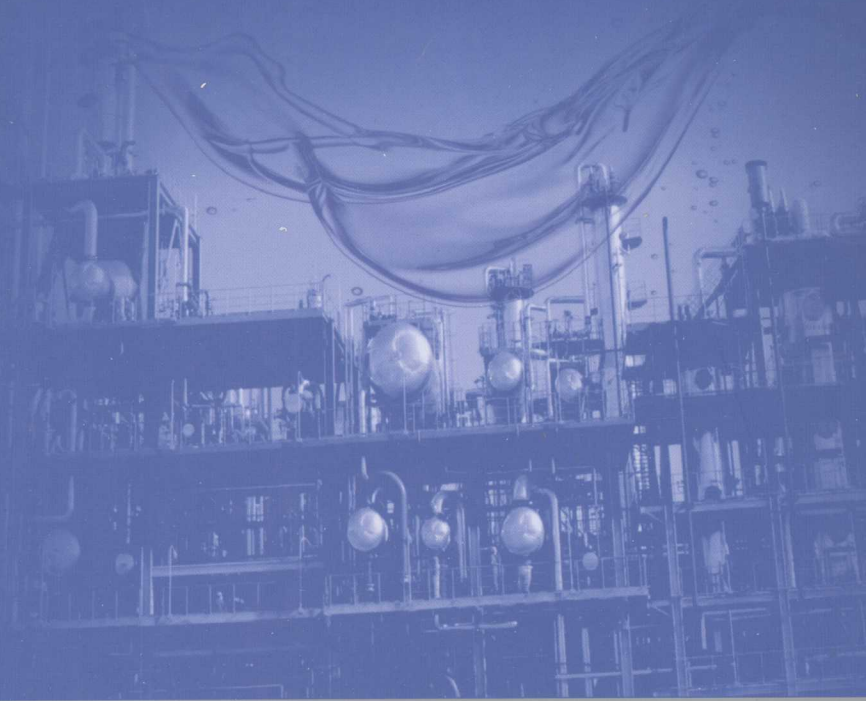
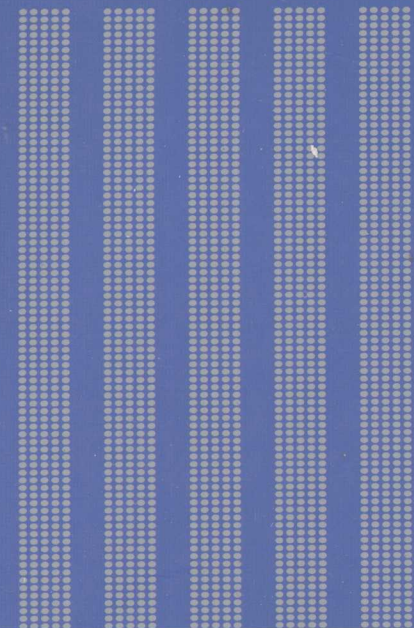


 全国高职高专**石油化工类专业**“十二五”规划教材
□ □ □ □ □ □

 免费提供电子教案



润滑油 生产与应用



NLIC2970826386

RUNHUAYOU SHENGCHAN YU YINGYONG

康明艳 卢锦华 主编

邓玉美 副主编



化学工业出版社

全国高职高专石油化工类专业“十二五”规划教材

润滑油生产与应用

康明艳 卢锦华 主编

邓玉美 副主编



NLIC2970826386



化学工业出版社

· 北京 ·

本书共分七章,系统地介绍了摩擦磨损和润滑的原理、润滑油和添加剂的分类、润滑油基础油(包括矿物润滑油基础油和合成润滑油基础油)的制备、润滑油添加剂的选用、商品润滑油的调合储存和包装、商品润滑油的选用和废润滑油再生等内容。

本书可供高职高专院校石油化工、炼油技术、精细化工、油品分析、石油工程、油气储运等专业的教师和学生使用,也可供石油化工企业一线操作人员参考学习。

图书在版编目(CIP)数据

润滑油生产与应用/康明艳,卢锦华主编. —北京:化学工业出版社, 2012.7

全国高职高专石油化工类专业“十二五”规划教材

ISBN 978-7-122-14551-2

I. 润… II. ①康…②卢… III. 润滑油-高等职业教育-教材 IV. TE626.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 126507 号

责任编辑:张双进 窦 臻 提 岩

文字编辑:李姿娇

责任校对:周梦华

装帧设计:王晓宇

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印 装:化学工业出版社印刷厂

787mm×1092mm 1/16 印张13 字数325千字 2012年9月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:28.00 元

版权所有 违者必究

序

高等职业教育是随着社会经济的发展而逐步成熟起来的现代高等教育形式。经过 20 多年的实践和建设,特别是近十年随着我国教育的不断深入,高等职业教育发展迅速,已经发展成为一种重要的教育类型,进入到一个新的发展阶段,为我国经济建设培养了一批急需的技术应用型人才和高技能型人才。

石油化学工业是基础性产业,它为农业、能源、交通、机械、电子、纺织、轻工、建筑、建材等工农业和人民生活提供配套和服务,是化学工业的重要组成部分,是国民经济最重要的支柱产业之一,关系到国家的经济命脉和能源安全,在国民经济、国防建设和社会发展中具有极其重要的地位和作用。世界经济强国无一不是石油化工工业强国。近年来,我国石油化学工业发展迅速,2010 年全行业总产值已位居世界第二位,仅次于美国。石油化学工业规模的扩大和技术水平的提高,对石油化工类的专业技术人才培养提出了新的要求,需要我们高等职业院校为之培养一大批实用型、操作型技术应用人才,这不仅为我们石油化工类高职院校的大力发展提供了良好机遇,更是对我们提出了更高的要求和挑战。

然而我们也清醒地认识到高职高专院校所培养的人才与行业企业的需求还存在一定的偏差。虽然很多学校校园面积、建筑面积、教学仪器设备、图书等硬件办学条件得到大大改善,一批院校形成了相当优质的教学资源,为培养高素质、高水平的人才奠定了物质基础。但是影响教学质量提高的核心——专业建设、课程建设这些软件条件却不能完全满足人才培养的需要,其中作为课程建设和专业建设重要内容的教材建设滞后于高等职业教育发展的步伐,是造成这种偏差的直接原因之一。教材是教学思想与教学内容的重要载体,是教学经验的结晶,体现了教学方式与方法,也是提高教育教学质量的重要保证,具有广泛的辐射和带动作用。教育部《关于全面提高高等职业教育教学质量的若干意见》(教高[2006]16号)明确提出要“加强教材建设,重点建设好 3000 种左右国家规划教材,与行业企业共同开发紧密结合生产实际的实训教材,并确保优质教材进课堂。”纵观目前我国高职高专石油化工类专业教材建设,主要存在:教材缺乏系统,落后于教育教学改革;内容陈旧,先进性与针对性不强;缺乏以能力培养为核心的特色专业教材;没有形成高水平教材编写团队,编写人员实践经验缺乏,未能体现“工学结合”、“校企结合”的职业教育理念和“工作过程系统化”、“教学做一体”、“项目导向、任务驱动”等先进教学模式;教材没有立体化的教学资源相配套等问题。

为了适应我国高职高专石油化工类专业教学的需要,在总结近十年高职高专教学改革成果的基础上,组织建设一批满足我国石油化工行业高技能人才培养需要的高质量规划教材不仅必要而且非常迫切。因此,教育部高职高专化工技术类专业教学指导委员会、中国化工教育协会全国化工高等职业教育教学指导委员会联合化学工业出版社共同规划并组织了“全国高职高专石油化工类专业‘十二五’规划教材”。为保证本套规划教材编写工作有序高效和教材编写质量,教指委在广泛调研的基础上组织有关专家就教材建设方案进行了研讨,提出规划教材的建设原则与要求;出版社依据此编写原则与要求组织全国石油化工高职高专院校专业老师进行教材编写项目的申报,公开征集编写方案,并在教指委的指导下组织了高职教

育领域的课程专家按照“工学结合，理论实践一体化设计思想”的教材建设评审标准，对申报的编写方案进行了答辩，最终在全国范围内遴选出16所院校从事石油化工职业教育的优秀骨干教师编写这套规划教材。另外，在教指委的领导下还成立了“全国高职高专石油化工类专业‘十二五’规划教材编审委员会”。

这套规划教材主要体现了如下特色：

1. 坚持理论实践一体化，避免了理论与实践相隔离的现象。重在基本概念的阐释、科学方法的结论和理论的应用方面，减少大篇幅的理论阐述和推导过程。教材编写符合高职高专学生实际，充分考虑学生学习能力之所长。

2. 以学生能力培养为核心，与“工学结合”、“校企合作”等先进教育模式相适应。

3. 以当前高职教育的课程改革为基础，突出教材编写体系的创新性，同时注意把握创新教材的通用性，便于教师的教学设计，教材的结构安排、编排方式符合教师教学的需要和学生学习的需要。

4. 反映了生产实际中的新技术、新工艺、新方法、新设备、新规范和新标准，基本保证了教学过程与生产一线的技术同步。

5. 立体化教学资源配套齐全。本套规划教材均配有供教师使用的电子课件、课程标准、习题解答等教学资源。

本套教材根据教育部教高[2006]16号文件的精神，吸收了先进的高职高专教育教学改革理念，特别是石油化工、炼油等专业国家示范性高等职业院校建设的成果，汇集了全国众多石油化工类院校优秀教师的教学经验，也得到了行业企业专家、相关院校的领导和教育教学专家的指导与大力支持。相信它的出版不但能够满足当前高职高专石油化工类专业教学的需要，而且对于该类专业的课程建设与改革也能起到一定的示范和引领作用，对于提高高职教育教学质量将起到积极的推动作用。

总之，希望通过我们的工作能够为我国的高职高专教育工作和石油化学工业的发展贡献绵薄之力。在此向所有积极参与本套规划教材建设及给予热情支持的领导、专家和教师们表示衷心的感谢！殷切期望广大读者提出宝贵意见和建议！

曹克广

2011年7月

前 言

本教材是教育部高职高专化工技术类专业教学指导委员会、中国化工教育协会全国化工高等职业教育教学指导委员会规划组织的全国高职高专石油化工类专业“十二五”规划教材之一。

一切作相对运动的表面间都会存在摩擦现象,表面都会产生磨损,为了降低摩擦、减小磨损,在摩擦副表面间都要加入润滑油。润滑油的产量不高,但品种很多,随着现代工业的发展,对润滑油的要求也越来越严格。为了让读者了解润滑油的作用原理、润滑油的制备过程、润滑油的选用以及润滑油使用后的废油处理,我们综合各方面的资料加以提炼和总结编撰成本书。

本书共分七章,系统地介绍了摩擦磨损和润滑的原理、润滑油和添加剂的分类、润滑油基础油(包括矿物润滑油基础油和合成润滑油基础油)的制备、润滑油添加剂的选用、商品润滑油的调合储存和包装、商品润滑油的选用和废润滑油再生等内容。

本书由康明艳、卢锦华、邓玉美、肖文平和李贤宇等人共同编写。其中,第一章部分内容和第二章由天津渤海职业技术学院康明艳编写;第四章和第六章部分内容 by 承德石油高等专科学校卢锦华编写;第三章和第五章由天津渤海职业技术学院邓玉美编写;第七章由天津石油职业技术学院肖文平编写;第一章部分内容和第六章部分内容 by 天津渤海职业技术学院李贤宇编写。全书由康明艳统稿。

本书由兰州石化职业技术学院冯文成教授和天津渤海职业技术学院杨永杰教授主审,在编写过程中还得到了润滑油行业的老前辈——西安石油大学张景河教授的悉心指导,在此,对三位专家表示深深的谢意。

在编写本书的过程中,我们参考了相当多的文献资料,已列入参考文献中,在此特向文献资料的原作者表示衷心感谢。

由于编者的水平有限,在编写的过程中对内容的把握以及取舍还存在不足,不妥之处难免,敬请广大专家和读者不吝指教。

编 者

2012年5月

目 录

第一章 摩擦、磨损与润滑	1
【知识目标】	1
【能力目标】	1
实例导入	1
第一节 摩擦	1
一、摩擦的作用	2
二、产生摩擦的原因	3
三、摩擦的分类	3
第二节 磨损	4
一、磨损的原理	4
二、磨损的分类	5
第三节 润滑	7
一、润滑的作用原理	7
二、润滑剂的分类	11
三、润滑油的构成	13
四、润滑油生产流程	16
知识拓展 如何鉴别机油的质量	17
本章小结	17
习题	18
实训建议	18
第二章 矿物润滑油基础油的制备	19
【知识目标】	19
【能力目标】	19
实例导入	19
第一节 矿物润滑油基础油原料的制备	20
一、常压渣油减压蒸馏	21
二、减压渣油溶剂脱沥青	25
第二节 物理法生产矿物润滑油基础油	27
一、溶剂精制	27
二、溶剂脱蜡	33
三、白土补充精制	38
第三节 加氢法生产矿物润滑油基础油	41
一、加氢法生产基础油技术	41
二、润滑油加氢精制	42
三、润滑油加氢处理	48
四、加氢脱蜡	53
知识拓展 超临界技术在渣油脱沥青中的 应用	60
本章小结	60
习题	61
实训建议	61
第三章 合成润滑油基础油的制备	62
【知识目标】	62
【能力目标】	62
实例导入	62
第一节 概述	62
一、合成润滑油基础油的分类	63
二、合成润滑油基础油的性能特点	63
三、合成润滑油基础油的应用	66
第二节 酯类油的制备	66
一、酯类油的分类	66
二、酯类油的生产过程	67
三、酯类油的性能特点	68
四、酯类油的应用	70
五、酯类油的发展历史	70
第三节 合成烃类基础油的制备	71
一、聚 α -烯烃合成基础油	71
二、聚丁烯合成基础油	72
三、烷基苯合成基础油	74
第四节 聚醚合成油	75
一、单体的合成	75
二、聚醚的制备	77

三、聚醚合成油的性能特点	81	知识拓展 矿物润滑油、半合成润滑油和全合成润滑油的区别	90
四、聚醚的应用	84	本章小结	90
第五节 其他合成基础油的制备	84	习题	91
一、硅油	84	实训建议	91
二、磷酸酯	87		
三、含氟油	88		
第四章 润滑油添加剂	92		
【知识目标】	92	第四节 抗氧剂和金属减活剂	96
【能力目标】	92	一、概述	96
实例导入	92	二、抗氧剂和金属减活剂的商品代号和使用情况	96
第一节 清净分散剂	92	第五节 黏度指数改进剂	96
一、清净分散剂的作用	92	一、概述	96
二、清净分散剂的品种	93	二、黏度指数改进剂的商品代号和使用情况	96
三、清净分散剂的商品代号和使用情况	93	第六节 降凝剂	97
第二节 抗氧防腐剂	94	一、概述	97
一、抗氧防腐剂的作用	94	二、降凝剂的商品代号和使用情况	97
二、抗氧防腐剂的品种	94	知识拓展 影响润滑油添加剂发展的因素	97
第三节 极压抗磨剂	95	本章小结	99
一、极压抗磨剂的使用性能	95	习题	99
二、极压抗磨剂的品种	95	实训建议	99
三、极压抗磨剂的商品代号和性能	95		
第五章 商品润滑油的调合和储存包装	100		
【知识目标】	100	五、国外油品调合软件	107
【能力目标】	100	六、间歇和连续两种调合工艺的比较	109
实例导入	100	第四节 润滑油调合工艺控制	110
第一节 润滑油调合工艺简介	100	一、调合质量的影响因素	110
一、润滑油的调合原理	101	二、润滑油调合注意事项	111
二、润滑油的调合工艺类型	101	三、硅油的分散	112
第二节 罐式间歇调合工艺	101	第五节 商品润滑油的储存和包装	112
一、机械搅拌调合	101	一、商品润滑油的储存要求	112
二、泵循环搅拌调合	103	二、润滑油污染的控制	112
三、压缩空气调合	103	三、润滑油使用注意事项	112
第三节 自动化连续调合工艺	104	四、商品润滑油的包装	113
一、连续调合装置的构成	104	知识拓展 高清洁润滑油的生产	114
二、在线管道调合系统	104	本章小结	115
三、自动批量调合系统	106	习题	115
四、同步计量调合系统	107	实训建议	115

第六章 商品润滑油的选用 116

【知识目标】 116

【能力目标】 116

实例导入 116

第一节 商品润滑油的分类 116

一、石油产品的分类 116

二、润滑油的分类 117

第二节 润滑油的基本性质及检测方法 118

一、物理性质及其检测方法 118

二、化学性质及其检测方法 120

第三节 车辆润滑油的选用 125

一、汽车汽油机油 125

二、汽车柴油机油 127

三、汽柴油机通用油 130

四、车辆齿轮油 130

五、汽车防冻液 132

六、汽车制动液 134

七、减震器油 135

第四节 工业设备润滑油的选用 136

一、液压油 136

二、工业齿轮油 141

三、压缩机油 144

四、轴承油 146

第五节 金属加工润滑油的选用 148

一、金属切削液 148

二、热处理油（淬火油） 151

知识拓展 商品润滑油的试验方法 153

本章小结 154

习题 154

实训建议 154

第七章 废润滑油再生 156

【知识目标】 156

【能力目标】 156

实例导入 156

第一节 认识废润滑油 156

一、废润滑油的组成及危害 156

二、废润滑油的分类及性质 157

三、废润滑油的处理 159

第二节 废润滑油再生工艺 160

一、沉降、离心分离和过滤 161

二、碱中和、水洗、破乳及薄膜过滤 169

三、吸附精制 175

四、加氢 182

五、硫酸精制 184

第三节 废合成油的再生 188

一、废磷酸酯合成油的再生 189

二、废合成氟油的再生 189

三、废合成酯类油的再生 190

四、废硅油的再生 191

第四节 废润滑油的质量控制 191

一、废润滑油的分析 191

二、再生润滑油的质量控制 192

知识拓展 废润滑油回收与再生利用技术导则

(GB/T 17145—1997) 193

本章小结 195

习题 196

实训建议 196

参考文献 198

第一章 摩擦、磨损与润滑

【知识目标】

1. 了解摩擦和磨损的原理。
2. 理解摩擦和磨损的种类、摩擦和磨损的原因。
3. 了解摩擦和磨损的危害。
4. 理解润滑的作用原理、润滑的种类。
5. 理解润滑剂的分类，掌握各种润滑剂的组成、特点和适用场合。

【能力目标】

1. 能从外观上认识润滑油。
2. 能根据两个作相对运动的物体表面的形状判断摩擦和磨损程度并正确选用润滑油。
3. 能根据相对运动的物体接触面的油膜厚度和形式判断润滑形式。
4. 会根据不同的应用场合分析并选用适合的润滑剂。

实例导入

图 1-1 为某一设备中产生摩擦现象的相互接触的两个表面（即摩擦副）中一个面的剖面图。

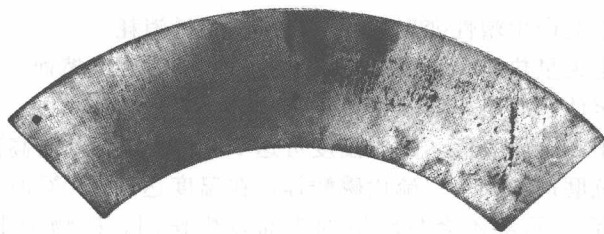


图 1-1 摩擦副表面的剖面图

从摩擦副表面的剖面图 1-1 上，可以看到在摩擦副的这个表面出现了什么现象？实际生活中又有哪些生活实例中有这些相同的现象发生？这些现象有哪些危害？如何避免？

第一节 摩擦

世界能源的 $\frac{1}{3} \sim \frac{1}{2}$ 最终以各种不同形式的摩擦消耗掉，因此，降低机械的摩擦损失，对节约能源至关重要。为了减小机械的摩擦和磨损，必须对机械表面的性状、摩擦和磨损的情形进行研究。

一、摩擦的作用

1. 摩擦的定义

相互接触的物体在相对运动时或具有相对运动的趋势时，接触面间所产生阻碍其相对运动的阻力称为摩擦力，发生的现象则称为摩擦。

互相接触的物体相对运动时产生的摩擦现象，在生产实践中早就被人们注意到。早在1519年，达·芬奇就正确地阐述了有关摩擦力的概念。1699年，法国工程师阿蒙顿归纳了两条有关摩擦的基本定律：第一，摩擦与两物体的接触面的大小无关；第二，摩擦阻力与垂直负荷成正比。

根据此定律得出摩擦力与负荷的关系：

$$f = F/P$$

式中 f ——摩擦系数；

F ——摩擦力，N；

P ——摩擦面上的垂直负荷，N。

在一定条件下，摩擦系数 f 是一个常数，但摩擦系数与摩擦接触表面积、摩擦表面的材料、摩擦的种类和摩擦表面的加工精度等有关。如两块铜材在空气中的摩擦系数约为0.6，石墨与石墨的摩擦系数在不太干燥的空气中约为0.1，在很干燥的空气中超过0.5。

摩擦现象是在两个摩擦表面之间产生的，摩擦力的大小与摩擦表面的相互作用有密切的关系。

2. 摩擦的作用

在许多场合，摩擦对人类有利。比如，人们依靠摩擦来拿起和握住物品，房间内的家具依靠与地面的摩擦而保持在固定的位置，水龙头利用摩擦力而拧紧，钉子依靠摩擦力而固定在木材中以及人们生活中用刷子洗刷掉衣服上的污渍等。

在更多的情况下，摩擦是一个有害的因素，需要采取一定的措施进行限制，这在机械行业是一个十分普遍的问题。摩擦产生的危害主要体现在以下几个方面。

(1) 消耗动力 金属表面发生相对运动时，其凸起的部分发生碰撞，会消耗一部分机械能。金属在摩擦过程中会产生塑性变形，导致能量的大量消耗。

(2) 金属表面产生大量热能 金属表面发生相对运动时因摩擦而产生的热能使机件表面温度升高，严重时甚至使金属熔化而烧结。

由于这些热量集中在金属表面，瞬时温度可达500~1000℃，而高温下，化学反应很容易进行。例如常用的抗磨剂二烷基二硫代磷酸锌，在温度达到140℃时会分解，并进一步生成聚合物，分解出的活性元素还会与摩擦副表面发生作用。矿物油中的烃类当温度达到400℃左右时分解，当遇到氧或受到摩擦表面的催化作用时，会在更低的温度下发生化学反应。

(3) 机件磨损 在摩擦碰撞过程中，凸起部分会被撕裂，或因疲劳而碎裂，坚硬的部分还可将较软的部分划伤，这些都会使机件损毁，即磨损。机械零件表面磨损后往往造成设备精度丧失，需要进行维修，使得生产过程不得被迫停工。

除了传动皮带、摩擦轮等部件外，一般的机械部件都要求减小摩擦和磨损，以保证机械的正常、高效运转。

摩擦对人们的生活既有利又有害，这是一个客观规律。只要认真研究和了解摩擦的原因，并采取相应的措施，就能达到利用摩擦为人类造福和控制、减缓摩擦，提高机械效率，延长机器零件使用寿命的目的。

二、产生摩擦的原因

当两个金属表面被负荷压紧并发生相对运动时,阻碍运动进行的阻力就是产生摩擦的根本原因。

1. 机械啮合

机械啮合由物体表面不平滑的凸起部分阻挡相互的运动而产生。任何实际存在的表面都不是绝对平滑的,一般都留有加工的痕迹,即使经过精密的加工,如研磨,其表面也只是相对光滑些,绝对光滑的表面是不存在的。

即使加工很“光滑”的零件表面,在显微镜的观察下也是凹凸不平的(见图 1-2),有如地球表面的地貌一样,布满了高山和深谷。

零件表面的这种凹凸不平的几何形状,称为表面形貌。表面上凸起处称为波峰,凹下处称为波谷。相邻的波峰与波谷间的距离称为波幅(H),相邻波峰或相邻波谷间的距离称为波距或波长(L)。

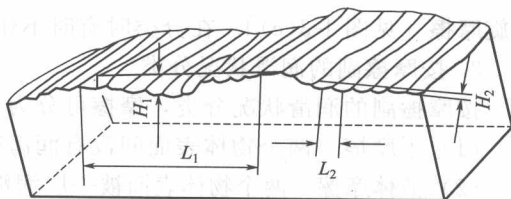


图 1-2 金属零件表面的形貌

2. 摩擦副表面产生的热量

当表面发生相对运动时,由于所有摩擦作用都发生在很小的实际接触面上,因此支撑点附近的表面温度会迅速升高,产生的热量造成局部的软化和熔化而使黏结力增大。因此发生相对运动特别是高速运动时撕裂黏结点要消耗更多的动力。

3. 摩擦副相互接触部分的分子间引力

实践表明,摩擦力不一定随摩擦副表面的粗糙度降低而减小,有时反而增大。这是因为表面越光滑,相互接触的部分越多,分子间引力产生的摩擦阻力也越大。

三、摩擦的分类

摩擦的现象极为普遍,种类很多,根据对摩擦现象观察和研究的依据不同,可将摩擦划分为不同的类型。摩擦的分类通常按摩擦副的运动状态、运动形式和润滑状况来划分。

1. 按摩擦副的运动状态分类

按摩擦副的运动状态分类,摩擦可分为静摩擦和动摩擦两种。

(1) 静摩擦 当物体在外力作用下对另一物体产生微观弹性位移,但尚未发生相对运动时的摩擦称为静摩擦。在相对运动即将开始瞬间的静摩擦即最大静摩擦,又称极限静摩擦。此时的摩擦系数,称为静摩擦系数。

(2) 动摩擦 当物体在外力作用下沿另一物体表面相对运动时,产生的摩擦称为动摩擦。两物体之间具有相对运动时的摩擦系数,称为动摩擦系数。

静摩擦小于极限静摩擦,而动摩擦则一般大于极限静摩擦。

2. 按摩擦副的运动形式分类

按摩擦副的运动形式分类,摩擦可分为滑动摩擦、滚动摩擦和自旋摩擦等三种。其示意图见图 1-3。

(1) 滑动摩擦 一个物体在另一个物体上滑动时产生的摩擦称为滑动摩擦[见图 1-3(a)]。如机床导轨的往复运动、曲轴在轴瓦套中的转动和活塞在汽缸内的运动等。

(2) 滚动摩擦 圆柱形或球形的物体在另一物体上滚动时产生的摩擦称为滚动摩擦[见图 1-3(b)]。如滚珠或滚柱在轴承中滚动等。

(3) 自旋摩擦(转动摩擦) 物体沿垂直于接触表面的轴线作自旋运动时的摩擦,称为

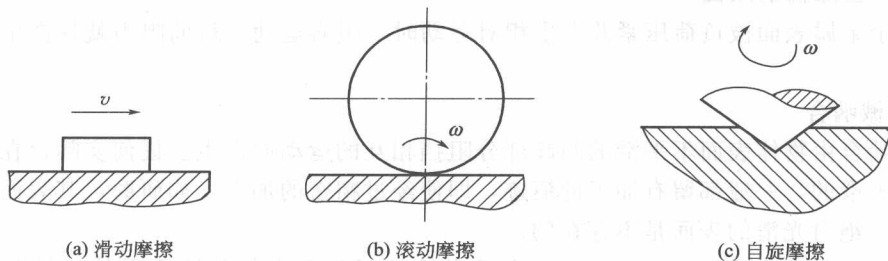


图 1-3 不同运动形式的摩擦示意图

自旋摩擦 [见图 1-3(c)]。在分类时有时不作为单独的摩擦形式出现, 以摩擦力矩来表征。

3. 按摩擦副的润滑状况分类

按摩擦副的润滑状况分类, 摩擦可分为干摩擦、液体摩擦和边界摩擦等三种。

(1) 干摩擦 两个物体表面间没有润滑剂存在时的摩擦称为干摩擦 [见图 1-4(a)]。

(2) 液体摩擦 两个物体表面被一层润滑剂隔开时的摩擦称为液体摩擦 [见图 1-4(b)]。此时摩擦只发生在润滑剂分子之间。

(3) 边界摩擦 当固体摩擦表面不是被一层具有流动性的液体隔开, 而是被一层很薄的吸附油膜隔开, 或是被一层具有分层结构和润滑性能的边界膜隔开时的摩擦, 称为边界摩擦 [见图 1-4(c)]。

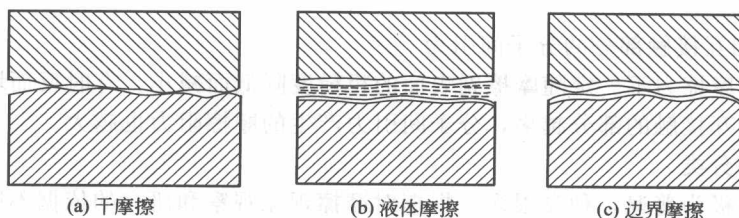


图 1-4 不同润滑状况的摩擦示意图

边界膜的厚度一般在 $0.1 \sim 1 \mu\text{m}$ 以下, 摩擦面大部分区域被边界膜隔开。边界摩擦是液体摩擦和干摩擦之间的一种中间状态。摩擦阻力远小于干摩擦, 摩擦系数约为 $0.01 \sim 0.1$ 。

实际上, 纯粹的边界摩擦并不存在。物体作相对滑动时, 由于它的表面粗糙度不同, 当凸起较高的部分发生边界摩擦时, 凸起较低的部分处于液体摩擦状态中; 当凸起较低的部分处于边界摩擦时, 凸起较高的部分因挤压剧烈会导致边界膜破裂, 其表面直接接触而发生局部的干摩擦。

第二节 磨 损

一、磨损的原理

1. 磨损的定义

两个物体作相对运动时, 在摩擦力和垂直负荷的作用下, 摩擦副的表层材料不断发生损耗的过程或者产生残余变形的现象称为磨损。

磨损是摩擦副运动所造成的, 即使是经过润滑的摩擦副, 也不能从根本上消除磨损。特别是在机械启动时, 由于零件的摩擦表面上还没有形成油膜, 就会发生金属间的直接接触,

从而造成一定的磨损。

2. 磨损的危害

摩擦副材料表面磨损后,往往造成设备精度丧失,需要进行维修,造成停工损失、材料消耗与生产率降低,尤其在现代工业自动化、连续化的生产中,由于某一零件的磨损失效甚至会影响到全线的生产。磨损是机械运转中普遍存在的一种现象,人们必须对磨损现象不断进行研究,寻求提高零件耐磨性和使用寿命以及控制磨损的措施,才能减少制造和维修费用。

3. 磨损过程的三个阶段

机械摩擦副的磨损随使用时间的不同而不同。摩擦副从开始使用到完全失效的磨损过程大致可分为三个阶段,即跑合阶段、稳定磨损阶段和急剧磨损阶段,如图 1-5 所示。

(1) 跑合阶段 跑合阶段又称磨合阶段,摩擦副在使用初期,在载荷的作用下,摩擦表面逐渐被磨平,实际接触面积逐渐增大,磨损速度开始很快,然后减慢,见图 1-5 中的 oa 段。

(2) 稳定磨损阶段 经过跑合阶段的磨合,摩擦表面硬化,微观几何形状改变,从而建立了弹性接触的条件,这时磨损已经稳定下来,磨损量与时间成正比缓慢增加,见图 1-5 中的 ab 段。

(3) 急剧磨损阶段 经过较长时间的稳定磨损之后,由于摩擦表面之间的间隙和表面形状的改变,以及产生金属晶格疲劳等情况,磨损速度急剧加快,直至摩擦副不能正常运转。当摩擦副工作达到这一阶段时,机械效率下降,精度降低,出现异常的噪声及振动,最后导致零件完全失效。

从磨损过程的变化来看,为了提高机械零件的使用寿命,应尽量延长稳定磨损阶段。但是,恶劣条件下的磨合磨损之后,可能会直接进入急剧磨损阶段,不能建立正常工作条件。因此,对于新的机械设备保证良好的磨合是非常重要的。实践证明,良好的磨合能够使摩擦副的正常工作寿命延长 1~2 倍,而且还能有效地改善摩擦副的其他性能。例如对于滑动轴承,良好的磨合可改善表面形貌,更有利于建立流体动压润滑膜;发动机的合理磨合可提高汽缸活塞环的表面品质,减少擦伤痕迹,提高密合性,使发动机的耗油量降低。

良好的磨合性能表现为磨合时间短,磨合磨损量小,以及磨合后的表面耐磨性高。为了提高磨合性能,一般可选择合理的磨合规范。合理的磨合规范应当是逐步地增加载荷和摩擦速度,使表面品质得到改善,磨合的最后阶段应当接近使用工况。

二、磨损的分类

根据磨损产生的原因和磨损过程的本质,磨损主要可分为四种类型,即黏着磨损、磨料磨损、疲劳磨损和腐蚀磨损。

1. 黏着磨损

当摩擦副接触时,由于表面不平发生点接触,在相对滑动和一定载荷作用下,在接触点发生塑性变形或剪切,使其表面膜破裂,摩擦表面温度升高,严重时表层金属会软化或熔化,此时,接触点产生黏着。在摩擦滑动中,黏着点被剪断,同时出现新的黏着点,如果黏

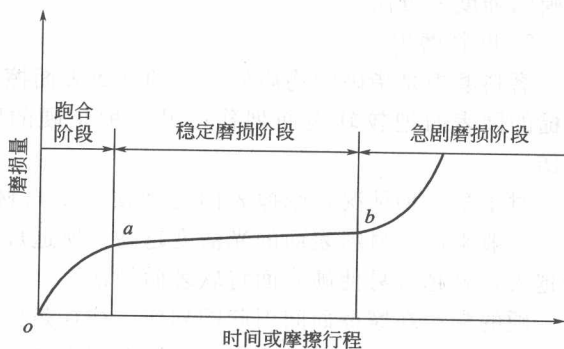


图 1-5 磨损过程的三个阶段

着点被剪断的位置不是原来的交界面，而是在金属表层，则会造成材料的消耗，即黏着磨损。

根据黏着程度不同，黏着磨损情况也有差异。若剪切发生在黏着结合面上，表面转移的材料极轻微，则称“轻微磨损”；若剪切发生在摩擦副一方或两方金属较深的地方，称为“撕脱”，在一些高负荷的摩擦副表面可以看到这种现象。黏着磨损的磨损量与载荷大小、滑动的距离和材料的硬度等因素有关，通常与载荷大小和滑动的距离成正比，与材料的硬度成反比。

为了提高摩擦副的抗黏着磨损能力，通常可以使用不易相互黏附的金属作摩擦副材料，增加润滑油膜的厚度，以及在润滑油脂中加入油性和极压添加剂，提高润滑油的吸附能力和油膜的强度等方法。

2. 磨料磨损

磨料磨损是指硬的物质使较软的金属表面擦伤而引起的磨损。它包括两种类型，一种是粗糙的硬表面把较软表面划伤；另一种是硬的颗粒在两摩擦面间滑动引起摩擦副表面的划伤。

对于第一种情况，摩擦表面的磨损主要与材料表面的粗糙程度和两表面硬度的差异相关。一般来讲，材料表面的光洁度越高，所造成划伤的情况就越轻微；两摩擦表面的硬度相差越大，就越容易使硬表面将软表面划伤。

硬的颗粒在摩擦面间引起的划伤，往往是因为摩擦面间混入了灰尘、泥沙、铁锈以及发动机中的焦末等，在黏着磨损、腐蚀磨损中产生的颗粒也能引起磨料磨损。磨料磨损是造成摩擦面磨损的一个重要类别。据统计，因磨料磨损而造成的损失，占整个工业范围内磨损损失的50%。因此，对机械摩擦副要特别注意保持摩擦面、润滑系统以及润滑油的清洁，防止混入杂质颗粒。

3. 疲劳磨损

黏着磨损和磨料磨损都是基于摩擦副表面直接接触，相接触的表面出现的材料损耗。金属磨损颗粒尺寸非常小，而且在摩擦副开始工作时就出现。还有一种磨损，在摩擦副工作的初期阶段一般不会发生，而发生在摩擦副经过长时期工作以后的阶段，其磨损现象是较大的片状颗粒从材料上脱落，在摩擦表面上出现针状或豆瓣状的小凹坑，此磨损类型被称为疲劳磨损。

疲劳磨损通常出现在滚动形式的摩擦机件上，如滚动轴承、齿轮、凸轮以及钢轨与轮箍等。出现疲劳磨损的主要原因是在滚动摩擦面上，两摩擦面接触的部位产生接触应力，表层发生弹性变形，而在内部产生较大的剪切应力所致。由于接触应力的反复作用，使得金属的晶格结构逐渐遭到破坏，当晶格结构被破坏到使材料承载强度低于载荷应力时，材料将会出现裂纹，而随着摩擦过程的进行，裂纹逐渐扩大，沿着最大剪应力的方向裂纹扩展到材料表面，最终使少量的材料从表面上脱落，在摩擦表面出现豆瓣状凹坑。

对于完善的、无缺陷的金属材料来说，在滚动接触的情况下，损坏的位置决定于出现最大剪应力的位置。如果还伴随着滑动，损坏的位置就移向表面。由于材料很少是完美无缺的，因此，发生损坏的位置就与材料中的杂质、孔隙、细小的裂纹以及其他因素有关。

工作一定时间后开始出现大的磨损碎片是疲劳磨损的特点，摩擦副一旦出现了疲劳磨损，就标志着使用寿命的终结。改善摩擦副的材质、减小接触点的接触应力和采用合适的润滑剂可以延缓疲劳磨损的出现。尤其是高黏度的润滑油不易从摩擦面挤掉，有助于接触区域压力的均匀分布，从而降低了最高接触应力值。例如某单位有两台同型号减速器，其中一台

先投入生产,采用 30 号机械油润滑,运行两个月后出现疲劳磨损;另一台换用 28 号轧钢机油,由于提高了用油黏度,运行了一年半未出现疲劳磨损。

4. 腐蚀磨损

当摩擦在腐蚀性环境中进行时,摩擦表面会发生化学反应,并在表面上生成反应产物。一般反应产物与表面黏结不牢,容易在摩擦过程中被擦掉,被擦掉反应层的金属可又产生新的反应层,如此循环下去,会造成金属摩擦副材料很快地被消耗掉,这就是腐蚀磨损。由此可见,材料的腐蚀磨损实质是腐蚀与摩擦两个过程共同作用的结果。

根据与材料发生作用的环境介质的不同,腐蚀磨损可分为氧化腐蚀磨损和特殊介质腐蚀磨损。氧化腐蚀磨损是材料与氧气作用而产生的,是最常见的一种磨损形式,它的损坏特征是在金属的摩擦表面沿滑动方向呈匀细磨痕。特殊介质腐蚀磨损是在摩擦过程中,零件受到酸、碱、盐介质的强烈腐蚀而造成的腐蚀磨损。

摩擦副的磨损除以上讨论的几种主要情况外,还有一些其他类型,如微动磨损、冲蚀磨损和热磨损等。微动磨损是两接触表面相对低幅振荡而引起的磨损现象,其多发生在机械连接处的零件上。冲蚀磨损是指流体束冲击固体表面而造成的磨损,它包括颗粒束冲蚀、流体冲蚀、汽蚀和电火花冲蚀(如电机上的电刷的冲蚀等)。热磨损是指在滑动摩擦中,由于摩擦区温度升高使金属组织软化,而使表面“涂沫”、转移和摩擦表面的微粒脱落。

第三节 润 滑

一、润滑的作用原理

1. 润滑的定义

在摩擦副表面之间加入一些介质(润滑剂),用润滑剂的液体层或润滑剂中的某些分子形成的表面膜将摩擦副表面全部或部分地隔开,变固体表面间的干摩擦为润滑油分子间的摩擦。由于润滑油分子间的摩擦系数比金属表面的干摩擦系数要小得多,从而达到降低摩擦、节省能耗、减小磨损、延长机械设备使用寿命的目的,这一过程称为润滑。

2. 润滑的作用

润滑剂最重要的功能是减小摩擦与磨损,但在不同的应用场合除具备这两项最重要的润滑功能外,还具备其他不同的功能。润滑剂也因具有动力媒介、热传导与绝缘等性能而可作为用于非相对运动体的一种纯功能性油。润滑剂的作用具体表现在以下几个方面。

(1) 降低摩擦 在摩擦副表面加入润滑剂后形成的润滑油膜将摩擦表面隔开,使金属表面间的摩擦转化为具有较低抗剪切强度的油膜分子间的内摩擦,从而降低摩擦阻力和能量消耗并使摩擦副运转正常。

(2) 减小磨损 在摩擦副表面形成的润滑膜可降低摩擦并支撑载荷,因此可以减小表面磨损及划伤,保持零件的配合精度。

(3) 冷却降温 采用液体润滑剂的循环润滑系统可以把摩擦时产生的热量带走,降低机械运转摩擦发热造成的温度上升。

(4) 防止腐蚀 摩擦表面的润滑剂膜覆盖在摩擦面上有隔绝空气、水蒸气及其他腐蚀性气体的作用,可防止摩擦表面被腐蚀或生锈。

(5) 传递作用力 某些润滑剂(如液压油)可以作为力的传递介质,把冲击振动的机械能转变成液压能。

(6) 减振作用 吸附在金属表面上的润滑剂由于本身应力小,在摩擦副受到冲击时能够

吸收冲击振动的机械能起到减振和缓冲作用。

(7) 绝缘作用 矿物油等润滑剂有很高的电阻, 因此可作为电绝缘油和变压器油。

(8) 清洗作用 随着润滑油的循环流动, 可把摩擦表面的污染物和磨屑等杂质带走, 再经过滤器滤除。内燃机油还可以把活塞上的尘土和其他沉积物分散去除, 保持发动机的清洁。

(9) 密封作用 润滑剂对某些外露零部件形成密封, 防止冷凝水、灰尘及其他杂质入侵, 并使汽缸和活塞之间保持密封状态。

在润滑剂的这些作用中, 降低摩擦和减小磨损是润滑剂最主要的功能。

3. 润滑的分类

用润滑剂来隔开摩擦表面, 防止它们直接接触, 就是通常所说的“机械的润滑”。根据润滑油在摩擦表面上所形成润滑膜层的状态和性质, 润滑分为流体润滑和边界润滑两大类。

(1) 流体润滑 流体润滑又称液体润滑, 它是在摩擦副的摩擦面被一层具有一定厚度并可以流动的流体层隔开时的润滑。此时摩擦面间的流体层, 称为流体润滑的润滑膜层。

流体润滑膜层具有三个特点: 一是具有流动性, 可以流动, 摩擦阻力小, 但容易流失; 二是具有一定的流体压力, 可起到平衡外载负荷的作用; 三是流体层需达到一定的厚度, 保证摩擦面间的微凸体相互之间不发生接触。

流体润滑的摩擦系数很小, 在 $0.001 \sim 0.01$ 之间, 磨损也非常低, 是润滑中一种最理想的状态。其缺点是流动液体层的形成较困难, 需特定的条件, 同时所形成的流体层易于流失, 承受负荷的能力有限。

流体润滑根据流体润滑膜产生的方式, 分为流体静压润滑、流体动压润滑及弹性流体动压润滑三种类型。

① 流体静压润滑。通过外部油泵提供的压力实现流体润滑的方式称为流体静压润滑。润滑中, 油品在高压油泵的作用下通过油路输送到轴承底部的油腔中, 利用油的压力和流动的冲力将支承的轴顶起, 以此形成轴与轴套之间的流体油层。由于这种润滑油层的形成与轴承的运转状况无关, 无论轴承的转速高或低, 即使在静止状态时也可以保证摩擦面上有着足够厚度的流动油层, 因而称之为流体静压润滑。这种润滑方式的缺点是设备昂贵、复杂。

② 流体动压润滑。通过轴承的转动或摩擦面在楔形间隙中的滑动而产生油压自动形成流体油膜的方式叫做流体动压润滑。流体动压润滑广泛应用于滑动轴承和高速滑动摩擦部件之中, 是机械设备中应用最普遍的润滑方式。

滑动轴承在运转过程中, 由于轴和轴套间隙中润滑油受到高速转动轴的摩擦力作用, 随同轴一起转动, 在转动中油进入轴承底部相接触的摩擦区域时, 由于轴与轴套间呈楔形间隙, 油流通道变小, 使油受到挤压, 因而产生油压。油压的产生使轴受到一个向上的作用力, 当轴承的转速足够高, 产生的油压达到一定值时, 就可以将轴抬起, 在摩擦面间形成一层流动的油层。

③ 弹性流体动压润滑。弹性流体动压润滑是一种比较复杂的情况, 它是在流动油层已存在的前提下, 摩擦面对油层挤压并伴随着金属表面和润滑油性质发生变化的过程。弹性流体动压润滑主要存在于齿轮和滚动轴承的润滑中。在齿轮和滚动轴承中, 摩擦件的运动方式及摩擦面的接触方式同滑动轴承完全不同。滑动轴承中摩擦件的相对运动和摩擦面的接触都是滑动的方式。而在齿轮部件和滚动轴承中, 摩擦副的运动方式是一个摩擦件相对于另一个摩擦件的滚动, 摩擦面的接触是从分离到接触, 接触后再分离的“离合”过程。在这个“离