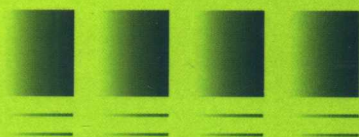




高等院校材料科学与工程专业规划教材



材料成形



摩擦与润滑

孙建林 编著

MCRH



国防工业出版社

National Defense Industry Press

TB3/122

2007

高等院校材料科学与工程类专业规

材料成形摩擦与润滑

孙建林 编著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书主要讲述了摩擦、磨损与润滑的基础知识和基本理论以及在材料成形过程中的应用,同时还介绍了工艺润滑剂的组成、性能与用途,分析了成形过程中摩擦、磨损的作用规律及影响因素,着重强调了摩擦与润滑在轧制、拉拔、挤压、冲压等成形工艺中的应用。希望借此为开端,进一步深入研究材料成形过程中的摩擦、磨损与润滑问题。

本书可作为材料成形与控制工程专业和材料科学与工程专业本科生的专业课教材,也可供相关专业的研究生以及从事金属成形领域和工艺润滑领域技术研究、生产或设计等部门的科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

材料成形摩擦与润滑 / 孙建林编著. —北京: 国防
工业出版社, 2007. 7
高等院校材料科学与工程规划教材
ISBN 978 - 7 - 118 - 05174 - 2

I. 材... II. 孙... III. ①工程材料 - 成型 - 摩擦 - 高等
学校 - 教材②工程材料 - 成型 - 磨损 - 高等学校 - 教材
③工程材料 - 成型 - 润滑 - 高等学校 - 教材 IV. TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 068786 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100044)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 710 × 960 1/16 印张 14 字数 247 千字

2007 年 7 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 29.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

前 言

材料成形过程中的摩擦、磨损与润滑问题是摩擦学的一个重要组成部分,也是材料成形理论和实践的基本研究课题。通过学习与应用摩擦学知识可以在成形过程中有效地降低摩擦、控制磨损和改进润滑工艺,确保成形过程稳定进行,同时,优化生产工艺和提高成形产品质量,进而达到节能降耗、清洁生产、提高产品质量的目的。为此,本教材从摩擦学基础知识出发,分析成形过程中摩擦的作用规律及影响因素,同时介绍工艺润滑的基础理论与工艺润滑剂的基本知识,着重强调了摩擦学在轧制、拉拔、挤压、冲压等成形工艺中的应用。希望借此为开端进一步深入研究材料成形过程中的摩擦、磨损与润滑问题。

本教材是在1992年编写的《塑性加工摩擦与润滑》讲义和2002年编写的《材料成形摩擦与润滑》讲义的基础上,结合10多年来在中南大学、北京科技大学为本科生与研究生讲授这门课程的经验体会以及多年来在该领域从事科研工作的基础上编写的。教材力图反映近20年来材料成形领域摩擦学最新教学与科研成果,同时还参考了国内外许多专家学者的资料与研究成果。对于参考书目中未列的文献作者也表示衷心感谢。

本书经北京科技大学袁康教授审阅,同时还要感谢中南大学宋冀生教授、王曼星教授和北京科技大学谢建新教授、康永林教授、刘雅正教授以及本研究室的其他同仁在本教材编写中给予的指导和帮助。

鉴于编者的学识和经验,书中不妥之处在所难免,恳请批评指正,以便不断补充完善和修改。

编 者
2007年4月

目 录

第1章 摩擦学绪论

1.1 摩擦学的主要内容	1
1.1.1 摩擦	1
1.1.2 磨损	1
1.1.3 润滑	2
1.2 材料成形摩擦学	2
1.2.1 材料成形方法	2
1.2.2 材料成形中的摩擦学系统	3
1.3 对摩擦的认识过程	4
1.3.1 凹凸说	5
1.3.2 粘附说	5
1.4 润滑实践的发展	6
1.4.1 锻造润滑	8
1.4.2 轧制润滑	8
1.4.3 拉拔润滑	9
1.4.4 挤压与其他成形工艺润滑	10
1.5 开展材料成形摩擦学研究的意义	10
1.5.1 目的意义	10
1.5.2 摩擦学面临的任务	12
思考题	12

第2章 表面性质与表面接触

2.1 金属表面形貌	13
------------	----

2.1.1 表面形貌	13
2.1.2 表面粗糙度	14
2.1.3 表面粗糙度的测量	16
2.2 表面吸附与表面氧化	17
2.2.1 金属表面性质	17
2.2.2 表面吸附	18
2.2.3 表面氧化	19
2.3 表面张力与接触角	20
2.3.1 表面张力	20
2.3.2 接触角	21
2.4 表面特征与接触面积	22
2.4.1 表面特征	22
2.4.2 接触面积	22
2.5 表面塑性粗糙化	23
2.5.1 金属变形与表面粗糙化	23
2.5.2 润滑条件下金属变形表面粗糙化	25
思考题	26

第3章 材料成形摩擦理论

3.1 材料成形过程摩擦的特点和作用	27
3.1.1 摩擦的特点	27
3.1.2 摩擦的作用	28

3.2	摩擦类型	30	5.1.1	基本功能	52
3.2.1	干摩擦	30	5.1.2	分类	53
3.2.2	边界摩擦	31	5.2	油基润滑剂	53
3.2.3	流体摩擦	31	5.2.1	矿物油	53
3.2.4	混合摩擦	32	5.2.2	动植物油	55
3.3	基本摩擦理论	32	5.2.3	合成油	56
3.3.1	分子-机械理论	33	5.3	乳化液	57
3.3.2	粘着理论	34	5.3.1	乳化剂	58
3.3.3	修正的粘着理论	35	5.3.2	乳化液的组成	59
思考题		37	5.3.3	乳化液的制备	60
第4章 影响摩擦的因素			5.3.4	乳化液的热分 离性	61
4.1	接触表面性质	38	5.4	固体润滑剂	62
4.1.1	金属种类与化学 成分	38	5.4.1	石墨	62
4.1.2	工模具表面状况	39	5.4.2	二硫化钼	63
4.2	接触表面的界面膜	40	5.4.3	其他固体润滑剂	63
4.2.1	污垢膜	41	5.5	润滑剂的理化性能 及其评价	64
4.2.2	氧化膜	41	5.5.1	黏度	64
4.2.3	金属膜	43	5.5.2	密度	65
4.3	成形温度	43	5.5.3	闪点	65
4.3.1	无润滑条件	43	5.5.4	倾点与凝点	65
4.3.2	有润滑条件	44	5.5.5	馏程	65
4.4	成形速度	45	5.5.6	酸值	66
4.4.1	轧制速度	45	5.5.7	碘值	66
4.4.2	拉伸速度	47	5.5.8	水溶性酸碱	66
4.5	变形程度	48	5.5.9	皂化值	66
4.5.1	载荷的影响	48	5.5.10	水分	67
4.5.2	变形程度的影响	48	5.5.11	灰分	67
思考题		51	5.5.12	残炭	67
第5章 成形工艺润滑剂概述			5.5.13	机械杂质	67
5.1	工艺润滑剂的基本功能	52	5.5.14	硫含量	68

5.5.15	芳烃含量	68		效果分析	94
5.5.16	腐蚀性	68	6.3	混合润滑	96
5.6	润滑剂的流变	68	6.3.1	平均流动方程	96
5.6.1	黏度与压力的 关系	68	6.3.2	粗糙表面接触变形 机制	98
5.6.2	黏度与温度的 关系	70	6.3.3	混合润滑变形区 模型	101
5.6.3	润滑油密度与压力、 温度的关系	73	6.3.4	混合润滑变形区 分析	104
5.7	工艺润滑剂中添加剂	73	6.4	边界润滑	106
5.7.1	添加剂的分类	74	6.4.1	边界吸附膜	107
5.7.2	添加剂的作用 机理	75	6.4.2	边界润滑模型	108
5.7.3	添加剂的作用效果及 影响因素	79	6.4.3	润滑机理与作用 效果	109
5.8	润滑剂使用与环境 保护	81		思考题	112
5.8.1	润滑剂的毒性与 防护	81	第7章 轧制过程摩擦与润滑		
5.8.2	废油处理	82	7.1	轧件的咬入与稳定轧制	113
5.8.3	乳化液废液处理	83	7.1.1	轧件咬入条件	114
	思考题	83	7.1.2	稳定轧制	116
第6章 基本工艺润滑理论			7.1.3	改善咬入的措施	116
6.1	润滑状态	85	7.1.4	前滑与后滑	117
6.1.1	流体润滑状态	86	7.1.5	前滑与摩擦系数 的关系	118
6.1.2	混合润滑状态	87	7.2	轧制过程中的摩擦与 磨损	119
6.1.3	边界润滑状态	87	7.2.1	轧制变形区摩擦 条件	119
6.1.4	润滑状态的判别	88	7.2.2	摩擦对轧制压力 的影响	120
6.2	流体润滑	90	7.2.3	轧制过程的 磨损	122
6.2.1	润滑模型的建立	91			
6.2.2	轧制变形区润滑				

7.2.4	影响磨损的因素	123	8.1.2	摩擦对拉拔过程的影响	152
7.3	热轧工艺润滑	124	8.1.3	影响摩擦的因素分析	154
7.3.1	热轧工艺润滑的作用	124	8.2	润滑方式与表面处理	155
7.3.2	热轧工艺润滑机理	125	8.2.1	拉拔润滑的作用	155
7.3.3	热轧工艺润滑剂	125	8.2.2	拉拔润滑方式	155
7.3.4	热轧工艺润滑效果	127	8.2.3	表面处理	157
7.4	冷轧工艺润滑	129	8.3	拉拔工艺润滑剂	157
7.4.1	冷轧工艺润滑的作用	129	8.3.1	润滑剂的选择依据	157
7.4.2	冷轧工艺润滑剂	130	8.3.2	干式拉拔润滑剂	158
7.4.3	冷轧工艺润滑的应用	134	8.3.3	湿式拉拔润滑剂	159
7.5	工艺润滑系统	140	8.4	拉拔工艺润滑的应用	160
7.5.1	热轧工艺润滑系统	141	8.4.1	钢丝拉拔	160
7.5.2	冷轧工艺润滑系统	143	8.4.2	铝管棒线材拉拔	161
7.6	润滑剂的维护与管理	146	8.4.3	铜管线材拉拔	161
7.6.1	乳化液使用与管理	146	8.4.4	其他有色金属拉拔	163
7.6.2	轧制油使用与管理	148	思考题		163
思考题	150			
第8章 拉拔过程的摩擦与润滑			第9章 挤压过程的摩擦与润滑		
8.1	拉拔过程摩擦分析	151	9.1	挤压过程的摩擦	164
8.1.1	拉拔过程受力分析	151	9.1.1	挤压方式与摩擦特性	164
			9.1.2	挤压变形时摩擦对金属流动特征的影响	165
			9.1.3	挤压过程的摩擦分析	167
			9.1.4	摩擦对挤压过程及表面质量的影响	169

9.2	挤压过程的工艺润滑	172	11.1.1	磨损过程	190
9.2.1	工艺润滑的部位	172	11.1.2	磨损与摩擦关系	190
9.2.2	挤压工艺润滑剂	173	11.2	磨损的类型	191
9.3	挤压工艺润滑应用	175	11.2.1	粘着磨损	192
9.3.1	热挤压润滑	175	11.2.2	磨粒磨损	193
9.3.2	冷挤压润滑与表面处理	178	11.2.3	疲劳磨损	194
思考题		179	11.2.4	化学磨损	195
第10章	冲压过程中的摩擦与润滑		11.3	金属成形中的磨损	196
10.1	冲压成形摩擦特征	181	11.3.1	磨损形式多样性	196
10.1.1	冲压过程摩擦分析	181	11.3.2	金属变形时的粘着磨损	197
10.1.2	摩擦对冲压成形力的影响	183	11.3.3	工模具的磨损	198
10.2	冲压过程的工艺润滑	184	11.3.4	磨损对成形制品质量的影响	199
10.2.1	工艺润滑的作用	184	11.3.5	减少磨损的方法与措施	200
10.2.2	工艺润滑剂的选择	184	思考题		202
10.2.3	润滑方式	185	第12章	材料成形过程中摩擦测试	
10.3	冲压工艺润滑的应用	186	12.1	摩擦磨损实验机	203
10.3.1	薄板冲压工艺润滑	186	12.1.1	四球摩擦磨损实验机	204
10.3.2	铝制品冲压工艺润滑	186	12.1.2	梯姆肯摩擦实验机	205
10.3.3	对冲压工艺润滑的新要求	187	12.1.3	法莱克斯摩擦磨损实验机	205
思考题		188	12.1.4	MM-200 磨损实验机	206
第11章	金属成形中的磨损		12.2	模拟实验	207
11.1	磨损	189	12.3	实际成形过程测定	209

12.3.1	最大咬入角法测量咬入时摩擦系数	…	209	拉拔摩擦系数	…	210	
12.3.2	前滑法测量轧制变形区摩擦系数	……	209	12.3.4	变形力反推法	…	211
12.3.3	由反拉力直接测量			思考题	……	213	
				参考文献	……	214	

第 1 章 摩擦学绪论

1.1 摩擦学的主要内容

摩擦是自然界存在的一种普遍现象,人们很早就知道摩擦的存在。“钻木取火”是人类第一次利用摩擦。早在 1781 年法国物理学家 C. A. 库仑就提出了摩擦三定律。但是作为一门科学,摩擦学只是在 1966 年后才发展形成一门学科体系。摩擦学(Tribology)一词也是在 1966 年后才开始出现。Tribology 是由希腊字 Tribos(摩擦)派生来的,其意思是“摩擦的科学”。摩擦学是研究相互作用表面发生相对运动时的有关科学、技术和实践,其主要研究内容是相互作用表面发生相对运动时的摩擦、磨损和润滑。

1.1.1 摩擦

两个相互作用的物体在外力作用下发生相对运动时所产生的阻碍运动的阻力称为“摩擦力”,这种现象称之为“摩擦”。产生摩擦应具备三个条件:①两个物体(或一个物体的两部分);②相互接触;③相对运动(相对运动趋势)。只要具备上述三个条件,摩擦就存在,这是不以人的意志为转移的。

根据两接触物体状态不同,摩擦可以是固体与固体的摩擦、固体与液体的摩擦和固体与气体的摩擦,如图 1-1 所示。

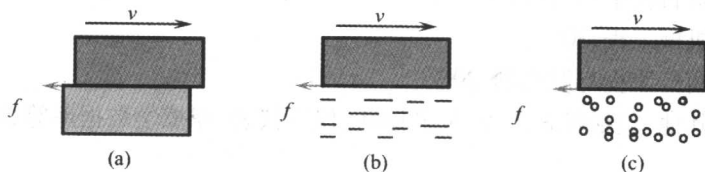


图 1-1 摩擦示意图

(a) 固体与固体; (b) 固体与液体; (c) 固体与气体。

1.1.2 磨损

摩擦副之间发生相对运动时引起接触表面上材料的迁移或脱落过程称之为

磨损,见图1-2。这一过程往往还伴随有摩擦热的产生。磨损和摩擦热是摩擦的必然结果。同样,磨损也是伴随着摩擦必然存在的,只不过在有些情况下磨损非常小,可以忽略不计。

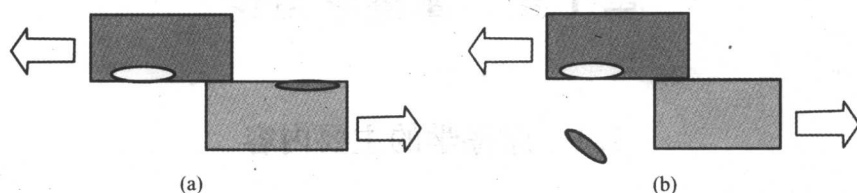


图1-2 磨损示意图

(a) 迁移; (b) 脱落。

1.1.3 润滑

在两物体相对运动表面之间施加润滑剂,以减少接触表面间的摩擦和磨损。其中润滑剂包括润滑油、润滑脂、薄膜材料(粘接干膜、镀膜、陶瓷膜等)和自润滑材料。可见,润滑与摩擦、磨损不同,润滑是人为的、有目的的行动,其目的就是力图减少接触表面间的摩擦和磨损,或者说是控制摩擦和磨损。

过去对摩擦、磨损及润滑的研究仅仅是从各个方面孤立地进行,实践表明:当相互接触表面发生相对运动产生摩擦的同时,运动表面在摩擦过程中也将发生一系列的物理、化学、力学和热力学等方面的变化,因而摩擦学是涉及数学、物理、化学、力学及热力学、冶金、材料、机械工程、石油化工等多学科领域的综合性的学科。回顾过去近40年摩擦学的发展,如果要划分摩擦学的学科构成,在考虑到相当大的重叠情况下大致可划分如下:

- (1) 材料科学与工程,40%;
- (2) 机械工程,30%;
- (3) 润滑工程与润滑剂,20%;
- (4) 其他,包括状态监控、故障诊断、仪器仪表、摩擦学数据库等,10%。

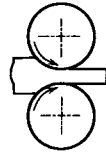
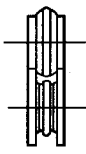

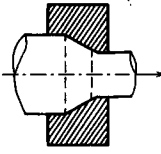
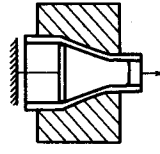
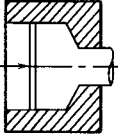
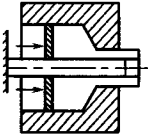
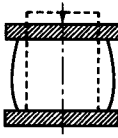
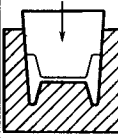
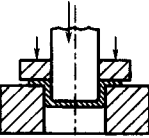
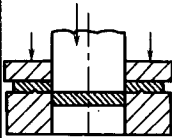
1.2 材料成形摩擦学

1.2.1 材料成形方法

就成形工艺过程而言,有板、型、管、棒线的轧制成形;有管、棒线的拉拔成形;有型、管、棒的挤压成形;有自由锻、模锻成形;有冲裁、拉深、变薄拉深等板成

形。就成形温度而言,有热成形和冷成形。另外还有稳态成形和非稳态成形。具体成形工艺方式见表1-1。

表 1-1 成形工艺方式

成形方式	轧 制			拉 拔		
图例						
	板带	型线	管材	棒线	管材	
成形方式	挤 压		锻 造		冲 压	
图例						
	实芯材	管材	开式模	闭式模	拉深	冲裁

上述成形过程具有一个共同特点就是在成形过程中通过工模具与工件的接触,使工件发生塑性变形。其中,摩擦力是影响材料变形的重要因素之一。摩擦的存在不仅导致变形力增加,工模具磨损加剧,而且有些情况下摩擦力又是变形过程中的主动力,如轧制过程中轧件的咬入就是通过摩擦力来实现的。

1.2.2 材料成形中的摩擦学系统

作为摩擦学的一个重要组成部分,材料成形摩擦学是研究成形过程中两种相互作用的金属,其中一种金属发生塑性变形时的金属表面间的摩擦、磨损和润滑的科学和技术问题。可见材料成形中的摩擦学问题不仅遵循摩擦学的一般规律,而且与成形过程密切相关。就成形过程而言,上述成形过程各具有其特点,摩擦力在不同成形过程所起的作用也不同,但是它们都有一个共同点就是成形过程中工模具、工件和润滑剂组成了一个摩擦学系统。该系统各要素间的相互关系如图1-3所示。图中左边为成形过程中的成形工具,图的右边为被成形工件,而图的中间正是通过摩擦力传递工具与工件相互作用的工艺润滑剂。因此,可以按照这个摩擦学系统去分析解决具体的成形过程中的摩擦、磨损和润滑问题。

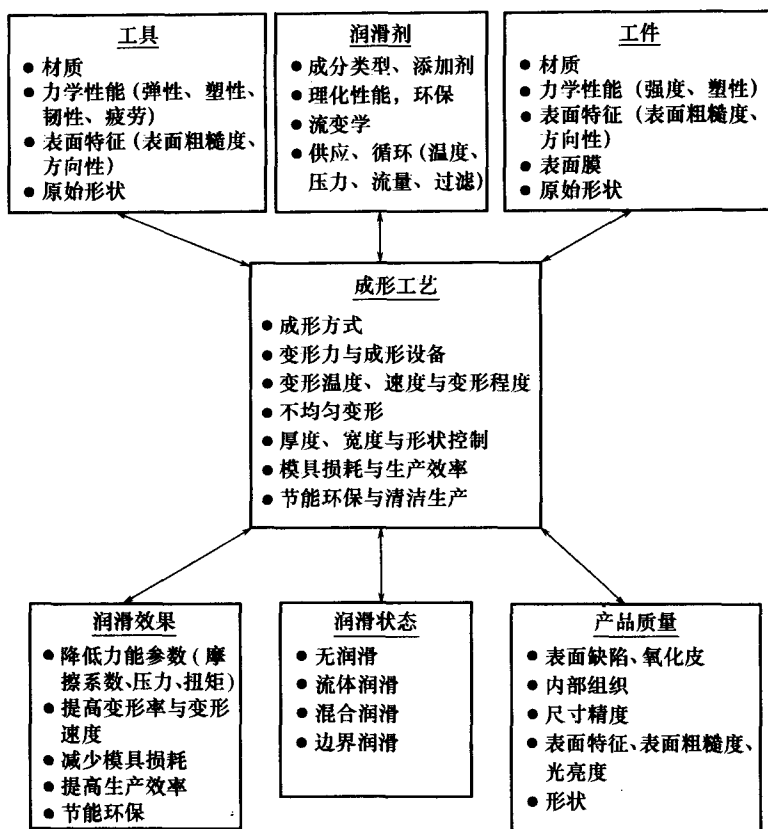


图 1-3 材料成形过程中摩擦学系统各要素间相互关系示意图

1.3 对摩擦的认识过程

长期以来,人类对摩擦现象进行了不懈的探索与研究。早在 15 世纪意大利文艺复兴时期,欧洲就开始对摩擦现象进行了研究。由于当时繁荣的建筑业和造船业需要,意大利学者雷纳多·达·芬奇(L. Da Vinci, 1452—1519)开始对固体摩擦的现象进行研究。他在轻、重不同物体的对比实验中指出:“如果物体的重量增加一倍,那么摩擦产生的力也增加一倍”,即摩擦力与作用的垂直力(重力)成正比,这也是日后的摩擦第一定律。他还发现,摩擦力与接触面积无关,即摩擦第二定律。然而,由于当时技术水平限制,达·芬奇关于摩擦所做出的结论已被人们遗忘,直到 200 年后才得到重视。在这期间,原始蒸汽机、水轮机等机械不断出现,牛顿提出了关于力、反作用力、加速度和动量等基本定律,即经典

力学时代已经开始。科学与技术的迅速发展促进了人们对摩擦的进一步研究。

1.3.1 凹凸说

法国物理学家兼建筑师 G. 阿蒙顿 (G. Amontons, 1663—1705) 1696 年在法国皇家科学学报上发表了关于摩擦的论文。文中重申了达·芬奇当初得出的摩擦第一定律和摩擦第二定律。阿蒙顿所研究的摩擦表面都是不光滑的。他认为,摩擦的起因是一个凸凹不平的表面沿另一表面上的微凸物体上升所作的功,也就是说摩擦是由于表面凸凹不平而引起,即摩擦的凹凸学说。

随后,法国物理学家兼工程师 C. A. 库仑 (C. A. Coulomb, 1736—1806) 在 1781 年通过实验进一步证实了阿蒙顿摩擦定律。同时在此基础上指出,应将静摩擦(静摩擦)和滑动摩擦(动力学)区分开,并且还观察到:滑动时所需外力大大低于滑动开始时所需外力,即静摩擦大于动摩擦。他提出:动摩擦的摩擦力与滑动速度无关,这被称作摩擦第三定律。过去不少文献中将古典的摩擦定律叫做库仑定律,这是不适当的,正确说法应称做阿蒙顿—库仑定律。古典摩擦理论只适用于滑动摩擦情况。库仑在解释摩擦起因时,他认为首先是接触表面凹凸不平的机械啮合力,其次是分子之间的粘附力。虽然,他已认识到粘附在摩擦中可能起一定作用,但是次要的,粗糙表面的微凸体才是主要的。

1.3.2 粘附说

在阿蒙顿提出摩擦凹凸说到库仑完成这一学说期间,也就是阿蒙顿论文发表后 35 年,英国科学家 J. 德萨古利埃 (S. Desaguliers, 1683—1744) 逆当时占统治地位的凹凸说,于 1734 年提出了截然不同的摩擦粘附说,他认为摩擦力的真正原因在于接触摩擦区两表面之间的分子粘附作用。他在实验中将两个铅球切掉直径约为 1/4 英寸部分,然后用手把它们压紧,稍作扭转,这两个铅球就很快粘附在一起,以至于用 16 磅 ~ 27 磅 (70N ~ 200N) 的力才能将两球分开。为此,他提出摩擦表面愈光滑,摩擦力愈大,由此奠基了摩擦的分子粘附说。在这期间迪·拉·希文 (De La Hire, 1640—1718) 通过实验进一步证实了接触面积的不连续性,并提出真实接触面积与外观面积无关。

随后,英国科学家 J. A. 尤因 (J. A. Ewing, 1855—1935) 和 W. 哈迪 (W. Hardy, 1864—1934) 通过实验进一步证实了分子粘附说。从德萨古利埃提出到哈迪完成分子粘附说也用了 200 年,凹凸说源于法国,而粘附说出自英国。

直到现在,分子粘附说作为摩擦机理仍得到广泛承认,但是,凹凸说也并没有被屏弃。事实上,因粘附而产生的摩擦当中,接触表面的凹凸不平也

不能被忽略。两种摩擦机理一直沿用到现在,它为现代摩擦理论的建立作出了出色的贡献。

到 19 世纪末 20 世纪初,由于表面加工技术的进步,提供了研究接触表面的实验条件,因此,哈迪在对两固体接触表面的研究中发现,固体之间真正接触面积仅仅是宏观面积的微小部分。真实接触面积的揭示推动了摩擦理论的进一步发展,为研究接触副间摩擦机理提供了更深刻、更可靠的基础。

20 世纪 30 年代,摩擦理论有了进一步发展。苏联学者捷拉金提出表面分子吸引力理论,认为摩擦是接触表面分子间相互排斥力与相互吸引力的作用结果。在分子吸附论的基础上又发展了分子机械摩擦理论,认为机械与分子吸附是摩擦之源。摩擦与接触面微凸体的弹塑性变形、微凸体相遇时的剪切、犁沟以及接触面分子吸引有关。

在近代摩擦学发展上被公认的摩擦粘附理论是 20 世纪 40 年代英国剑桥大学教授 F. P. 鲍登(Frank phllip Bowden)和 D. 泰柏(David Tabor)提出的。他们认为,表观接触面积与真实接触面积差别很大,而且真实接触面积还会随摩擦条件而变化,两微凸体之间因存在吸附力而形成接点。摩擦力应为剪断金属间接点所需的力与硬金属表面微凸体在软金属表面犁沟所需力之和。这一理论最初应用于两种金属之间的摩擦,现在,已深入到非金属等许多其他材料。

现在已经清楚看到,由凹凸说转向粘附说的摩擦机理得到公认,粘附说最后当作摩擦机理,但也应承认凹凸说并不能当作一种谬误学说而被屏弃。事实上,即使摩擦基本是由于粘附引起的,但在此当中接触表面凹凸不平 and 粗糙度仍然对摩擦有较大的影响,尤其是两种硬度不同的金属摩擦时,表面粗糙度是一个不容忽视的因素,尤其是对金属塑性变形的摩擦应有很大的影响。

1.4 润滑实践的发展

在古埃及的 El Bershem 的一个岩洞中,发现公元前 1900 年的一幅壁画,上面画着 172 个奴隶正拖动滑撬上一个巨大石像(见图 1-4)。其中,图中滑撬上有一个奴隶正在往车下浇一些流体性的物质。据估计:石雕像重 60 吨,画面上有 172 个奴隶,平均拉力 800N/人,那么滑撬占地面的摩擦系数为

$$\mu = \frac{172 \times 800}{600000} = 0.23$$

该摩擦系数大小约为经润滑后地面的摩擦系数,说明车上奴隶往下浇的是有润滑性的物质,这可能就是最早的“润滑剂”。

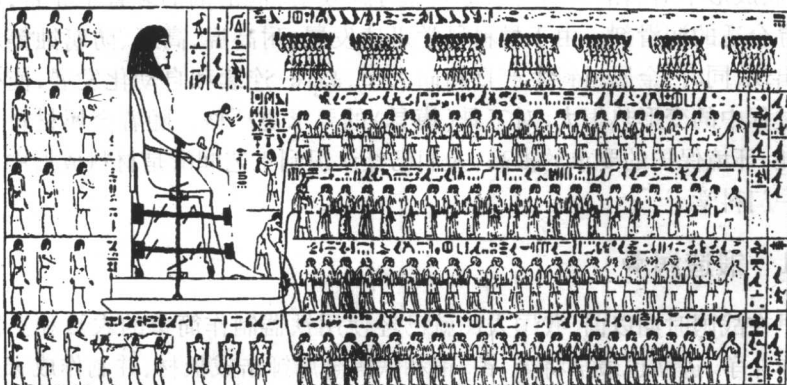


图 1-4 古埃及从采石场拖动石像的壁画

另外,我国古代《诗经》曾有“载脂载辇(xia)”,辇是指车轴两端的金属端头。由此可见,古代人类就已经知道使用润滑剂了,但是,差不多 2000 年来,还没有对润滑剂做过科学的解释。

直到 1883 年,英国人 B. 托尔(Benuchamp Tower, 1845—1904)在英国机械学会上发表了轴承的实验报告。托尔对机车车辆轴承的动态研究中偶尔发现,当轴承有效地运转时,润滑油会从轴承上开出的小孔中冒出。也就是说,油膜具有很高的流体动压力。这一实验对润滑的流体力学理论具有划时代的意义,但是,托尔本人当时都未觉察到其历史意义。历史上常常是当时人没想到的偶尔发现却留于后人。

英国著名水利学家 O. 雷诺(Osborne Reynolds, 1842—1912)研究分析了托尔实验,在此基础上于 1888 年在英国皇家学会论文集上发表了“润滑理论与 B. 托尔实验的应用”(Theory of Lubrication and Its Application to Mr. Beauchamp Tower's Experiments)一文。论文结合轴承润滑问题解释了托尔的实验,提出了流体动压润滑理论,并推导了轴承内油膜压力分布。这篇论文可以说是为流体润滑理论的建立奠定了基础,从此开创了润滑理论研究的先河。雷诺指出,在理想流体动力润滑条件下,轴与轴承之间的油膜能够支撑轴承载荷,其原因是:当润滑油进入逐渐缩小的间隙时,其流速很大,油是黏性液体,具有黏滞阻力。所以在油膜内会产生液体压力,在合适条件下,该压力能足以将轴与轴承隔开。

虽然金属成形是最早被人们认识的一门工艺,但是润滑技术仍然发展缓慢,其主要原因是人们对润滑剂的组成、特性、制取和使用不了解,某些品质优良天然润滑油直到近代才被发现,而至今仍有许多问题认识不够。与运转机械不