

塑性加工摩擦学

中国金属学会

冶金继续工程教育丛书

科学出版社

1

茹铮余望阮煦寰孟宪堂编著

359954

冶金继续工程教育丛书

塑性加工摩擦学

茹铮 余望 阮煦寰 孟宪堂 编著



科学出版社

1992

(京)新登字 092 号

内 容 简 介

本书是“冶金继续工程教育丛书”之一。本书紧密结合压力加工的技术实践,系统地论述了摩擦学的基本原理及其在压力加工过程中的适用性,介绍了锻压、轧制、拉拔等压力加工过程中的摩擦、磨损和润滑问题,并着重讨论了摩擦的控制、利用以及润滑剂的性能和测试方法。

本书为压力加工专业的继续工程教育用书,可供从事压力加工的科研、教学和生产管理人员阅读,也可作为高等院校高年级本科生和研究生的教材及参考书。

冶金继续工程教育丛书

塑性加工摩擦学

茹铮 余烈 陈照寰 王尧基 编著

责任编辑 何舒民

机械工业出版社

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100707

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1992年8月第一版 开本:787×1092 1/32

1992年8月第一次印刷 印张:12 7/8 插页:1

印数:1—5 000 字数:289 000

ISBN 7-03-002949-6/TF·10

定价:10.80 元

序

中国金属学会组织编写了“冶金继续工程教育丛书”，为大家办了一件好事。积极开展继续教育，对于提高冶金科技人员水平，促进冶金工业的发展具有重要意义。希望冶金战线各级领导重视这项工作，努力创造条件，为科技人员在职学习提供方便；同时也殷切希望广大冶金科技工作者坚持学习，不断吸收新知识，学习新技术，为实现四化、振兴中华做出更大贡献。

中国继续工程教育协会理事
冶金工业部副部长

徐大铨

一九八八年十二月

前 言

摩擦学是近年来发展起来的一门新学科,它涉及数学、物理、化学、冶金、机械工程、材料、石油化工等多种学科,因此它是一门边缘学科。塑性加工摩擦学是摩擦学的一个分支,它主要研究金属塑性变形过程中的摩擦、磨损和润滑的行为,并利用摩擦的有利作用部分,限制其有害作用部分,以达到最佳生产工艺过程,生产出优质产品。

尽管已有大量有关摩擦学的专著和文献,但专门系统地论述压力加工过程中的摩擦、磨损及润滑的专著尚不多见,广大从事压力加工生产、教学及科学研究的工程技术人员急需这方面的理论来指导工作。为此,我们参考了国内外 80 年代以来反映有关塑性加工摩擦学知识的最新著作和文献,并结合我们的科研与教学的成果和经验,对塑性加工摩擦学系统地进行介绍,同时用摩擦学的原理分析和解决金属压力加工过程中的摩擦、磨损与润滑问题。在编写过程中,我们力争做到理论联系实际,反映最新的科研成果。

本书共分两部分。第一部分(1—5 章)描述塑性加工摩擦学的一般理论,内容包括塑性加工摩擦学的发展,压力加工过程中的摩擦特点,摩擦与润滑机理。第二部分(6—9 章)介绍几种主要压力加工如轧制、拉拔、板成型和锻造过程中的摩擦、磨损及润滑问题。限于篇幅,有些加工过程的介绍则不在此赘述。

本书是在中国金属学会统一领导和组织下进行编写的。

茹铮编写第 1,2,3,5,8 章,余望编写第 4,6 章,阮煦寰编写第 7,9 章。孟宪堂审校了全稿并对第 1,3,5 章部分内容进行了改写。张顺庆、江社明、李一太和张勇分别参加了第 3,5,6 章的部分编写工作。

由于作者水平有限,书中不足之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

编著者

1991 年 10 月

目 录

序.....	i
前言.....	iii
1 摩擦学概述及发展	1
1.1 摩擦学的定义.....	1
1.2 塑性加工摩擦学的发展.....	3
1.2.1 锻造.....	4
1.2.2 拉拔.....	5
1.2.3 轧制.....	7
1.2.4 发展.....	7
1.2.5 小结.....	8
2 压力加工过程中的摩擦	9
2.1 金属塑性成形时摩擦的特点	10
2.1.1 塑性变形.....	10
2.1.2 屈服准则.....	10
2.2 工具与工件的界面.....	13
2.2.1 摩擦系数.....	13
2.2.2 界面剪切系数.....	14
2.2.3 动摩擦.....	15
2.3 摩擦影响.....	16
2.3.1 压力和力.....	16
2.3.2 摩擦的影响.....	18
2.3.3 温升.....	19
2.3.4 应变分布.....	20
2.4 过程分类.....	22
2.5 小结.....	23

3 塑性加工摩擦学基础	25
3.1 摩擦界面	25
3.1.1 宏观界面	25
3.1.2 微观界面	27
3.1.3 过程环境	28
3.2 表面接触和摩擦理论	30
3.2.1 接触面积	30
3.2.2 界面压力	31
3.2.3 工件的弹性变形	33
3.2.4 滑移和摩擦理论	35
3.2.5 工件的塑性变形	38
3.3 固体膜润滑	43
3.3.1 氧化膜	44
3.3.2 金属膜	47
3.3.3 聚合物膜	49
3.3.4 层状点阵化合物	53
3.4 极压润滑	57
3.5 边界润滑	58
3.5.1 润滑机理	58
3.6 流体膜润滑	64
3.6.1 厚油膜润滑	65
3.6.2 弹性流体动力润滑 (EHD)	68
3.6.3 塑性流体动力润滑 (PHD)	69
3.7 混合膜润滑	75
3.7.1 润滑机理	76
4 金属压力加工润滑剂	84
4.1 金属压力加工润滑剂的特性	84
4.2 矿物油	87
4.2.1 链长度的影响	88
4.2.2 结构的影响	89
4.2.3 纯度的影响	91

4.2.4	石蜡	91
4.3	天然油、脂肪及其衍生物	92
4.3.1	天然脂肪	92
4.3.2	天然蜡	98
4.3.3	油脂的衍生物	98
4.3.4	皂类	100
4.4	合成油	102
4.4.1	合成油及其衍生物	102
4.4.2	合成酯	103
4.4.3	硅的化合物	107
4.4.4	聚苯基醚	109
4.5	复合润滑剂	109
4.5.1	复合油	109
4.5.2	复合酯、蜡和脂肪酸盐	113
4.5.3	润滑脂	113
4.6	水基润滑剂	115
4.6.1	分类	115
4.6.2	乳化液	116
4.6.3	合成物	126
4.6.4	腐蚀和设备损坏	127
4.6.5	乳化液中微生物的控制	129
4.6.6	润滑剂的控制	132
5	测试技术	136
5.1	概述	137
5.2	模拟试验	141
5.2.1	整体塑性变形试验	141
5.2.2	部分塑性变形试验	147
5.2.3	局部变形试验	155
5.2.4	台架试验	158
5.2.5	试验结果的评价	161
5.2.6	模拟的有效性	162

5.2.7	模拟试验的选择	165
5.3	金属压力加工中摩擦的评价	166
5.3.1	总力或总能量	166
5.3.2	摩擦力	167
5.3.3	应力分布	167
5.4	小结	171
6	轧制过程中的摩擦与润滑	175
6.1	轧制过程中的摩擦	175
6.1.1	单位压力的摩擦峰	175
6.1.2	轧制时摩擦系数的计算	180
6.2	冷轧的润滑与磨损	180
6.2.1	全油膜润滑	180
6.2.2	混合油膜润滑	182
6.2.3	无润滑轧制	194
6.2.4	轧辊磨损	194
6.3	热轧工艺润滑	195
6.3.1	热轧工艺润滑剂	197
6.3.2	热轧工艺润滑的研究	202
6.3.3	热轧工艺润滑对轧辊磨损的影响	214
6.3.4	热轧工艺润滑对轧辊工作温度的影响	222
6.3.5	热轧工艺润滑对热轧板表面质量的影响	227
6.3.6	热轧工艺润滑系统	231
6.3.7	关于使用热轧工艺润滑技术的生态观点及经济效果	242
7	拉拔过程中的摩擦与润滑	254
7.1	棒、丝材拉拔中的摩擦	254
7.1.1	拉拔中的摩擦分析	254
7.1.2	摩擦对拉拔的影响	256
7.1.3	摩擦系数的计算	267
7.2	管子拉拔中的摩擦	270
7.3	拉拔时的润滑与磨损	275

7.3.1	拉拔润滑的意义	275
7.3.2	拉拔对润滑剂的要求	276
7.3.3	拉拔润滑的机理	277
7.3.4	拉拔中的润滑状态	280
7.3.5	流体润滑的实现	283
7.3.6	润滑剂流体动压的建立	297
7.4	拉拔时模具的磨损	308
7.4.1	磨损的形状	308
7.4.2	磨损机理	309
7.4.3	减少磨损的措施	310
8	板金属成形过程中的摩擦与润滑	316
8.1	拉延、深拉伸和变薄拉延的摩擦特点	317
8.1.1	材料性质	317
8.1.2	拉延	319
8.1.3	深冲	323
8.1.4	复合拉胀	333
8.1.5	特殊过程	336
8.1.6	变薄拉延和缩颈	339
8.2	润滑与磨损	341
8.2.1	过程条件	341
8.2.2	表面粗糙度的影响	344
8.3	小结	348
9	锻造过程中的摩擦与润滑	351
9.1	镦粗的摩擦特点	351
9.1.1	圆柱体的镦粗	352
9.1.2	环形件的压缩	357
9.1.3	矩形件的镦粗	358
9.1.4	平面应变压缩	360
9.1.5	倾斜模具面	361
9.2	冲孔的摩擦特点	362
9.2.1	概述	362

9.2.2 冲孔.....	364
9.3 模锻的摩擦特点.....	366
9.3.1 概述.....	366
9.3.2 模具中金属的充满.....	367
9.3.3 锻造后的推出力.....	369
9.4 闭式模锻及挤压变形的摩擦特点.....	370
9.4.1 闭式模锻的工序.....	370
9.4.2 挤压变形的摩擦特点.....	372
9.5 润滑与磨损.....	373
9.5.1 冷锻及挤压变形.....	374
9.5.2 温锻及挤压变形.....	383
9.5.3 热锻.....	385
参考文献.....	397

摩擦学概述及发展

摩擦学是 20 多年来形成的一门年轻的边缘学科。由于它对国民经济与科学技术的发展具有重要意义, 因此发展很快。

摩擦在塑性加工中占有非常重要的地位, 故一直成为塑性加工中的一个重要组成部分。在塑性加工过程中, 接触表面作相对运动就产生摩擦, 在摩擦过程中运动表面间发生一系列的物理、化学及力学等方面的变化, 这些变化对金属成形加工的过程和质量有着重要的影响。研究塑性加工中的摩擦、润滑和磨损的现象及规律, 并介绍有关的基础知识, 就是本书的主要内容。由于这是摩擦学的一个重要分支, 因此可称之为塑性加工中的摩擦学, 或塑性加工摩擦学。

1.1 摩擦学的定义

摩擦学 (Tribology) 一词是 1966 年才开始使用的。Tribology 是由希腊字 Tribos 一词派生而来的, 其含义是“摩擦”或“摩擦的科学”。

摩擦学是研究相互运动表面的作用、变化, 损伤理论和实践的一门综合性科学技术, 其基本内容就是研究机械中的摩

擦、磨损和润滑问题,以达到节约能源和原材料消耗,提高机械设备高效可靠运转的目的。故而它的研究与发展对国民经济和国防建设均有重要意义。

众所周知,摩擦、磨损和润滑是一种普遍存在于生产和生活中的现象,对人类的物质生产和生活有着极其深远的影响。‘钻木取火’是原始人第一次利用摩擦。以滚动代替滑动,以润滑改善摩擦,则是人类在降低摩擦,减少磨损斗争中的一大进步。

在现实的生产和生活中,提起摩擦,人们总是首先想到其不利的一面,能耗增加、材料损失、效率降低等。然而,若摩擦很低或没有摩擦,则人类生活将是不可想象的。人依靠鞋底与地面间的摩擦而能正常行走,各种车辆靠车轮与地面间的摩擦而得以行驶,当在冰上行走、骑车、驾驶车辆时,常常因为摩擦力过低而失去控制。静止的物体,如置于地面上的家具,摆在书桌上的书本,靠其界面间的摩擦而保持位置固定。在乒乓球运动中,运动员利用球与球拍的摩擦控制球的旋转方向以克敌制胜。这些又是摩擦有用的方面。

然而,摩擦带给人类的有害影响又是不可低估的。如卫星返回地球时,若控制不当,可能会因与大气层的剧烈摩擦而被焚毁。润滑不良的自行车由于摩擦力过大,会使骑车人消耗过多体力。据统计,现在全世界每年的能耗中,约有 $\frac{1}{3}$ — $\frac{1}{2}$ 是由于摩擦而损失掉的。为此,人们对有相对运动的表面之间采用各种各样的润滑方法降低摩擦和磨损,以期降低能耗,减少材料损失,提高使用寿命。

在金属压力加工中也是如此。如在轧制钢锭的初轧机上人们常在轧辊表面上刻痕以提高摩擦系数,增加咬入角,而有利于轧制件的咬入。而在薄板冷轧时,为了提高表面质量降

低轧制压力和控制板型，又需要良好的润滑和冷却措施以降低摩擦。因此，在金属塑性成形加工中，如何控制摩擦的不利效应，利用其有益作用不断提高金属塑性加工的质量和效率是塑性加工摩擦学研究的基本任务。

然而，过去对摩擦、磨损、润滑的研究往往只是从各个方面孤立地进行的，实践表明，当接触表面作相对运动时就会产生摩擦，运动表面在摩擦过程中将发生一系列的物理、化学、力学等方面的变化，因而摩擦学是涉及数学、力学、物理、化学、冶金、材料、机械工程、石油化工等多种学科领域的一门综合性的边缘学科。正因如此，这门学科的研究和发展过去并未得到人们重视，即使有许多科技人员已对摩擦学理论和应用技术研究做出了许多重大成果，但因大都孤立地分散在各工业部门中，人们无法全面系统地看到它在机械工程中的重要性、普遍性和复杂性，从而妨碍了人们对该学科经济和技术意义的深刻理解，阻碍了对它进行更深入的科学研究。

近年来，随着生产力的飞速发展，润滑技术的作用已日显重要，许多生产和重大工程技术问题迫切需要应用摩擦学技术和理论去解决，故近年来该学科已受到各方面的重视，并加快了发展的步伐，扩大了研究领域和技术队伍。但是，应当指出，不管在过去还是在未来，人类在与摩擦进行斗争的过程中，总是抓住利用其对生产有利的作用、限制其有害的效应这两个方面进行研究，以造福于人类。

1.2 塑性加工摩擦学的发展

摩擦学是随着人类的历史的发展而发展的，对人类的物质生产和生活起着重要的作用。

我国作为文明古国，对摩擦学领域有过巨大的贡献。据

记载,我国劳动人民早在公元前 2000 年左右就已使用古车、踏碓和水碓、辘轳、滑车等,采用木质滑动轴承,并以动物油作为润滑剂。一直到 14 世纪以前,我国在掌握轴承、轮轴、滑车、齿轮、凸轮、润滑方式及润滑剂等方面的摩擦学知识,一直居于世界的前列。

国外摩擦学的发展与我国大同小异。据记载,在 El Bersheu 的一个岩洞中有一幅公元前 1900 年的壁画,上面有许多人在拖动滑橇上的巨象,其中有一人站在滑橇的前面把润滑油浇在滑橇行经的路上。Dowson 偶然发现最早的润滑剂出现在公元前 2400 年,在埃及的古墓中挖掘出一辆公元前 1400 年前后的战车,车轴上还残存着原来的润滑剂。公元前 1650 年左右,古埃及劳动人民就使用了滑轮和以滚动代替滑动来搬运重物。古代人虽然知道摩擦的存在、润滑剂的用途以及轴承表面存在覆盖膜的优点,但是,差不多 2000 年来未对它们作过科学的解释。

压力加工是人类了解最早的生产技术之一,自然界的金属在 7000 年以前就被锻打成形。然而,令人惊讶的是考虑成形过程中润滑剂的重要性却是相当近代的事。

这可能有三个原因,首先,润滑剂的成分、制造和应用在一定程度上是整个操作最保密的部分。其二,自然界提供了迄今人们所知道的许多最好的润滑剂,所以从事压力加工的技术人员勿需依赖其它科学技术知识和技能,或不用那么迫切地去揭示其组成和作用机理,而且即使发现某些有意义的启示也没有抓住它的本质。其三,认识到润滑剂在改善摩擦特性方面有极其重要作用只是科学技术发展到近期的事。

1.2.1 锻造

锻造是问世最早的塑性加工技术,天然的金、银和铜在公

元前 5000 年就被人们锻打成薄板，然后制成了首饰和工具。后来随着冶金技术的发展，人们才用矿石经还原得到这些金属。那时，这些金属的塑性冷加工未采用过润滑措施，即使认识到某些物质的润滑作用而加以采用时，往往也是无意中发现的，如很久以前，人们为了制取色泽光亮的金叶而把黄金薄板置于动物皮间锻打，发现以此方式容易实现金箔的制造。人们知道铜的退火，并且在退火后立即进行热锻，而氧化铜和氧化铁则是接触界面间良好的润滑剂。

公元前 800 年，铁成为制造武器、工具的重要材料，取代了铸造的和可锻的青铜板。金属的冷成形技术继续在发展，铸造的青铜由锻打、加工成装饰品。最早出现于公元前 7 世纪的古铜币就是用模具经过数道冲压工序而成形的。在这些生产技术中，未曾见到有关应用润滑技术的记载，据分析认为，在生产过程中，环境中的大气尘埃、水分以及工匠操作时手指上的油垢落在工件表面上形成的氧化层和污染覆盖膜就已形成了所需要的润滑剂。到了 18 世纪，用钢材制造火枪零件时，为了使其具有互换性，采用模锻，加工中使用锯末，薄层重油或石墨和油的混合物作为润滑剂，这种润滑方法与 50 年前所采用的方法几乎完全相同。

1.2.2 拉拔

据 12 世纪的文献记载，在公元 1 世纪，拉拔时采用润滑剂，当时用钢模拉制铅锡合金，用橡木模拉制金、银丝，在支撑模板上刻有沟槽用来供给润滑剂。13 世纪，拉拔指南的规则就被制订出来，并被采用。而第一部关于拉拔润滑的资料却出现很迟，Biringuccio 关于拉拔金、银丝时曾写道：“记住，当你拉拔时，必须把蜡涂在金、银丝的表面上，这除了使拉材容易通过拉拔模以外还能使丝的表面呈现金黄光亮的色泽”。