

JIN SHU SU XING JIA GONG ZHONG  
MO CA RUN HUA  
YUAN LI JI YING YONG

金属塑性加工中  
摩擦润滑  
原理及应用

叶茂 编著

东北工学院出版社

TG301  
15  
2

# 金属塑性加工中摩擦 润滑原理及应用

叶 茂 编 著

东北工学院出版社



B

3507

## 内 容 简 介

本书系统地论述了金属塑性加工中摩擦的特点、摩擦机理、流体动压润滑原理、粘着与磨损以及影响摩擦系数的主要因素；阐述了各类润滑剂、涂层剂、添加剂的组成与特性以及在金属塑性加工中的应用；比较全面地介绍了轧制与拉拔过程的工艺润滑。为了建立必要的理论基础，在有关章节中还引入了有机化学、结构化学和表面化学的基本知识；对摩擦系数的测定方法与润滑剂润滑效果的评选方法也做了一定的介绍。

本书可用做高等院校金属塑性加工专业研究生和本科生的教材，还可供金属塑性加工和油脂化学方面的工程技术人员参考。

### 金属塑性加工中摩擦润滑原理及应用

叶 茂 编 著

东北工学院出版社出版 辽宁省新华书店发行  
(沈阳·南湖) 辽宁省情报所印刷厂印刷

开本787×1082 1/32 印张：13 字数：292 千字

1990年1月第1版 1990年1月第1次印刷

印数：1~900册

责任编辑：刘长仁 赵志业 责任校对：孙铁军  
封面设计：赫 林

ISBN 7-81006-101-1/TB·6

定价：2.33元

## 前 言

正确解决金属塑性加工中的摩擦与润滑问题是非常重要的，因为它们不仅决定着工具使用寿命、产品尺寸精度与表面质量以及加工能耗，也影响到金属塑性流动规律，从而对金属成形性能和产品使用性能也都有重要的影响。此外，若能采取有效的工艺润滑，显著降低接触摩擦、减少工具磨损，便可强化加工而缩短生产周期，增加作业率，从而可以显著提高产量。因此，金属塑性加工中的摩擦与润滑问题，在塑性加工理论与工艺的研究方面历来受到十分重视。

金属塑性加工中的摩擦与润滑属于“摩擦学”的一个重要分支，是60年代以来发展起来的一门边缘学科，它涉及到材料学、机械学、塑性加工学、力学、化学等多科内容。近些年来对于塑性加工中的摩擦与润滑问题，世界各国虽然都进行了大量的试验研究工作，并取得了很大进展，但是由于问题比较复杂，目前还有许多理论问题和技术问题需要进一步解决。可见，金属塑性加工中的摩擦与润滑问题也是一门新兴的发展中的学科。

在我国，对于塑性加工中的摩擦与润滑问题的研究开展较晚，与国外的差距较大。为了尽快地把这方面的研究工作广泛而深入地开展起来，需要加强“摩擦学”的教育与培训。本书就是为满足高等院校金属压力加工专业“摩擦学”的教学需要而编写的。全书内容分为三个部分：第一篇主要讲述摩擦原理，包括摩擦机理、金属粘着与磨损以及摩擦系数等章节；第二篇主要讲述润滑剂理论，包括各类润滑剂的

---

组成与特性、润滑油添加剂以及金属表面润滑涂层等章节；第三篇比较详细地讲述了轧制和拉拔过程的工艺润滑，并简要介绍了润滑剂工艺性能的研究方法。

本书主要是参考国内外有关文献资料，并结合编者几年来的教学与科研实践经验而编写的。由于编者水平所限，书中一定会存在许多缺点和错误，诚恳欢迎读者批评指正。

本书在编写过程中，吴宏元同志帮助搜集部分资料；在完稿后，赵志业教授进行过审阅，提出一些宝贵意见，特此一并表示感谢。

编 者

1987年5月

# 目 录

## 第一篇 金属塑性加工中的摩擦

### 第1章 金属塑性加工中摩擦的特点及其分类

- 1.1 摩擦学的发展…………… ( 2 )
- 1.2 塑性加工中摩擦的特点…………… ( 4 )
- 1.3 塑性加工中摩擦的影响…………… ( 6 )
- 1.4 摩擦的分类…………… ( 9 )

### 第2章 金属表面形貌与真实接触面积

- 2.1 金属表面的几何形貌…………… ( 11 )
  - 2.1.1 概述…………… ( 11 )
  - 2.1.2 表面光洁度的评定…………… ( 13 )
  - 2.1.3 表面光洁度的测量方法…………… ( 19 )
- 2.2 金属表面接触与真实接触面积…………… ( 20 )
  - 2.2.1 金属表面的接触…………… ( 20 )
  - 2.2.2 真实接触面积…………… ( 22 )

### 第3章 干摩擦理论

- 3.1 机械摩擦理论…………… ( 24 )
- 3.2 粘着摩擦理论…………… ( 25 )
- 3.3 分子-机械摩擦理论…………… ( 29 )
- 3.4 塑性加工中干摩擦理论的某些特点…………… ( 31 )
  - 3.4.1 从物理-化学基础出发对摩擦过程的分析… ( 32 )
  - 3.4.2 从变形力学基础出发对摩擦过程的分析… ( 37 )

## 第4章 润滑状态下的摩擦

- 4.1 液体(流体)摩擦..... (42)
  - 4.1.1 液体摩擦定律与液体的粘度..... (42)
  - 4.1.2 流体动压润滑的理论基础..... (49)
  - 4.1.3 润滑轧制时摩擦情况的分析..... (67)
- 4.2 边界摩擦..... (74)
  - 4.2.1 物体的表面现象与润湿现象..... (75)
  - 4.2.2 吸附现象与边界膜..... (79)
  - 4.2.3 边界摩擦机理..... (87)

## 第5章 塑性加工中金属的粘着与磨损

- 5.1 金属的粘着..... (91)
  - 5.1.1 影响烧结的主要因素..... (92)
  - 5.1.2 减轻或防止烧结的措施..... (106)
- 5.2 金属的磨损..... (111)
  - 5.2.1 磨损定律..... (112)
  - 5.2.2 磨损粉的形成与脱落..... (114)
  - 5.2.3 磨损粉的大小..... (117)

## 第6章 摩擦系数

- 6.1 摩擦力的计算方法..... (120)
- 6.2 摩擦系数的测定方法..... (122)
- 6.3 影响摩擦系数的主要因素..... (139)
- 6.4 轧制时计算摩擦系数的公式..... (155)

# 第二篇 工艺润滑总论

## 第7章 有机化合物

- 7.1 有机化合物的组成及其结构特点..... (161)
  - 7.1.1 组成与结构..... (161)
  - 7.1.2 共价键的本质..... (164)

|       |             |       |
|-------|-------------|-------|
| 7.1.3 | 共价键的属性      | (170) |
| 7.1.4 | 分子间力和氢键     | (174) |
| 7.2   | 有机化合物的特性与分类 | (179) |
| 7.2.1 | 有机化合物的特性    | (179) |
| 7.2.2 | 有机化合物的分类    | (179) |
| 7.2.3 | 官能团及其分类     | (181) |
| 7.3   | 烃           | (182) |
| 7.3.1 | 烷烃          | (183) |
| 7.3.2 | 烯烃和炔烃       | (190) |
| 7.3.3 | 芳香烃         | (198) |
| 7.4   | 烃的衍生物简介     | (206) |
| 7.4.1 | 醇、酚、醚       | (206) |
| 7.4.2 | 羧酸及其衍生物     | (217) |

## 第8章 液体润滑剂

|       |                |       |
|-------|----------------|-------|
| 8.1   | 对工艺润滑剂的要求      | (226) |
| 8.2   | 矿物润滑油          | (227) |
| 8.2.1 | 矿物润滑油的炼制       | (227) |
| 8.2.2 | 润滑油的理化性能       | (232) |
| 8.2.3 | 常用矿物润滑油名称及牌号划分 | (241) |
| 8.2.4 | 矿物油的润滑性能       | (242) |
| 8.3   | 动植物润滑油         | (244) |
| 8.3.1 | 油脂的组成和性质       | (244) |
| 8.3.2 | 油脂的润滑性能        | (254) |
| 8.4   | 合成润滑油          | (260) |
| 8.4.1 | 合成脂肪酸          | (260) |
| 8.4.2 | 合成脂肪酸酯         | (264) |
| 8.5   | 乳化液            | (267) |
| 8.5.1 | 表面活性剂简介        | (267) |



8.5.2 乳化理论..... (273)

8.5.3 乳化液稳定性指数及其测定..... (279)

8.6 润滑油的添加剂..... (276)

## 第9章 固体与熔体润滑剂

9.1 固体润滑剂..... (284)

9.1.1 固体润滑剂的特性..... (284)

9.1.2 塑性加工中固体润滑剂的应用..... (295)

9.2 熔体润滑剂..... (301)

9.2.1 玻璃润滑剂的组成及其特性..... (302)

9.2.2 塑性加工中玻璃润滑剂的应用..... (310)

9.3 金属表面润滑涂层(皮膜)..... (314)

9.3.1 概述..... (314)

9.3.2 几种主要润滑涂层的应用..... (317)

## 第三篇 金属塑性加工中工艺润滑

### 第10章 轧制时工艺润滑

10.1 钢材轧制润滑..... (332)

10.1.1 冷轧板带钢工艺润滑..... (332)

10.1.2 热轧钢材工艺润滑..... (351)

10.2 铝材轧制润滑..... (361)

10.2.1 热轧铝板的工艺润滑..... (361)

10.2.2 冷轧铝板的工艺润滑..... (365)

10.3 铜材轧制润滑..... (369)

### 第11章 拔制时工艺润滑

11.1 拉丝加工时润滑剂的作用与分类..... (373)

11.1.1 润滑剂的作用..... (373)

11.1.2 润滑剂的分类..... (374)

|        |               |       |
|--------|---------------|-------|
| 11.2   | 干式拉丝润滑剂       | (375) |
| 11.2.1 | 润滑剂的组成        | (376) |
| 11.2.2 | 润滑剂的含水量和颗粒大小  | (378) |
| 11.2.3 | 润滑剂的性能判断      | (379) |
| 11.2.4 | 拉丝工作中的问题及对策   | (379) |
| 11.3   | 湿式拉丝润滑剂       | (381) |
| 11.4   | 油性润滑剂(油)      | (382) |
| 11.5   | 冷拉钢丝润滑剂的选用    | (383) |
| 11.6   | 我国拉丝润滑剂的使用与研究 | (385) |
| 11.6.1 | 干式润滑剂         | (385) |
| 11.6.2 | 湿式润滑剂         | (388) |
| 11.7   | 提高拉丝润滑效果的措施   | (390) |

## 第12章 润滑剂工艺性能的研究方法

|        |                 |       |
|--------|-----------------|-------|
| 12.1   | 润滑剂性能研究方法的分类    | (394) |
| 12.2   | 摩擦试验机试验方法       | (395) |
| 12.3   | 在塑性加工实验设备上模拟试验法 | (395) |
| 12.3.1 | 评定润滑效果的直接方法     | (397) |
| 12.3.2 | 评定润滑效果的间接方法     | (397) |

### 主要参考文献

### 一般参考文献

# 第一篇 金属塑性加工中的摩擦

## 第1章 金属塑性加工中摩擦 的特点及其分类

相互接触的两个物体（或称摩擦对）发生相对运动或有相对运动的趋势时，就会在接触表面上产生阻碍这种运动的力。这种存在于接触表面间的切向阻力，称为摩擦力，这种现象叫做摩擦。在外力作用下克服摩擦力使摩擦对反复相对运动时，就会导致表面物质的不断损失，此即磨损现象。为了降低摩擦与减少磨损，其主要措施就是采用润滑剂润滑。可见，摩擦是现象，磨损是摩擦的结果，润滑是降低摩擦减少磨损的重要措施，这三者是密切相关的，它们构成了当代一门新兴学科——摩擦学。

在金属塑性加工中，加工工具与变形金属相互接触构成摩擦时，它们之间或是由于机械的相对运动，或是由于变形金属的塑性流动而存在着相对滑动。因此，在接触面上不可避免的也存在着摩擦，则必有磨损与润滑问题。金属塑性加工的摩擦与润滑属于“摩擦学”的一个重要分支，也是当代“摩擦学”领域研究工作中最为活跃的一部分。金属塑性加工中的摩擦与润滑也是一门边缘学科，它的理论基础与内容涉及到力学、化学、石油化工、材料科学以及塑性加工工程学等方面。因此，只有在有关方面的科学技术工作者分工协

作,共同努力,才能使这一新兴的边缘学科得到更快地发展。

## 1.1 摩擦学的发展

摩擦、磨损与润滑是一种普遍地存在于生产和生活中的现象,对人类的物质生产和日常生活有着极其重要的影响。摩擦帮助原始人学会了取火,从而使人第一次支配了一种自然力。可以说,摩擦现象贯穿于整个人类的发展史,人类在与摩擦的不良影响进行斗争的同时,还充分利用了摩擦有利的一面,造福于人类。

摩擦学是随着人类物质生产的发展而发展的。我国作为文明古国,在摩擦学领域内曾有过巨大的贡献。早在公元前2000年左右就已使用古车、辘轳、滑车等,采用了木质滑动轴承,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、润滑方式以及润滑剂等方面的摩擦学知识上都居于世界的前列。国外的摩擦学发展与我国大同小异。据记载,在公元前1650年左右古埃及就使用了滑轮和以滚动代替滑动来搬运重物;欧洲到12世纪才出现现象我国西汉时代的水力机械,13~14世纪水力机械才普遍应用,出现以水为动力的磨坊,14~15世纪出现脚踏纱车、织布机。

对摩擦学的理论研究开展较晚,并且在很长一段时间内,研究摩擦、磨损、润滑的现象往往只是从各个侧面孤立地进行。最早对摩擦现象进行科学研究的是意大利科学家雷纳德·达芬奇(Leonardo da Vinci)(1452—1519),以后有法国的阿蒙顿(Aмонтон)(1699)和库仑(Coulomb)(1781),通过他们的试验研究,归纳出揭示干摩擦规律的

“古典摩擦定律”。在此期间还出现了阐明液体摩擦规律的牛顿 (Newton) 定律 (1720)。后来发表了粘性流体运动的微分方程, 即那维-斯托克 (Navier-Stokes) 方程 (1823), 它从理论上解释了流体动压润滑原理; 到1886年又出现了雷诺 (Reynolds) 方程, 它是那维-斯托克方程在滑动轴承上的具体应用, 也是比较有名的流体润滑理论。直至今日, 上述这些研究成果仍是很有意义的。

进入20世纪以来, 随着工业生产的发展与科学进步, 摩擦学的研究取得了很大的进展, 不仅解决了各工业部门所提出的有关摩擦、磨损、润滑的实际问题, 而且在理论研究方面也取得许多成果。在阐明摩擦机理方面提出了各种理论, 如机械理论、分子吸附理论、粘着理论、分子-机械理论等; 在解释磨损起因方面有粘着磨损理论、表面疲劳磨损理论、磨料磨损理论等; 在润滑理论方面有流体动压润滑理论、流体静压润滑理论以及弹性流体动压润滑理论等。

在金属塑性加工摩擦学的研究方面虽然起步较晚, 但自本世纪中期以来, 研究工作逐渐活跃起来, 取得了较大的进展。在1924年和1927年先后发表了达费尔 (W. Tafel) 和艾克隆德 (S. Ekelund) 用最大咬入角法研究轧制摩擦的成果; 1934年巴甫洛夫 (И. М. Павлов) 提出用强迫制动法测定轧制过程中平均摩擦系数; 到1955年, 劳茵 (Rooyen) 用测压销方法研究了轧制时变形区接触面上摩擦力的分布规律。以后, 关于塑性加工中摩擦抗力直接测定的试验机, 即所谓模拟试验机陆续提了出来。由这些试验机得到的结果, 使人们对各加工过程摩擦学方面增长了很多见识, 例如, 摩擦系数的大小以及在行程中的变化、速度效果、各种润滑剂的性能、对宏观塑性变形的影响等等。

进入60年代以来，用解析方法研究流体润滑方面有了一定进展。例如水野<sup>[12]</sup>把雷诺方程应用于板材轧制上（1966）；威尔逊（Wilson）<sup>[13]</sup>将同样的方法用于由圆锥模孔静水挤压和拉拔上（1971）。此后，还有考虑到接触面上由于温升使润滑油粘度降低的雷诺方程解<sup>[14]</sup>。引用雷诺方程，并考虑由于温度和压力使润滑油粘度变化，以及塑性变形时的平衡方程与屈服条件联立，解出面压分布、油膜厚度与温度等所谓的塑性流体润滑理论，已成为研究塑性加工中流体润滑问题的新的注目点。

近十几年来，在揭示边界的润滑理论、金属的粘着与工具的磨损以及润滑剂研制等方面，也都开展了许多研究工作。由于实用上的需要，关于金属塑性加工中的摩擦学问题，从各种加工过程角度出发的研究，目前正在活跃地开展，取得了重要的成果。

在我国，关于塑性加工中摩擦与润滑的研究，只在近十几年来才引起重视，主要工作限于对冷、热加工用润滑剂的研制与应用，理论研究工作开展的非常有限。可以预计，随着我国金属塑性加工生产的发展与科学技术的进步，做为新兴的边缘学科塑性加工摩擦学的研究一定会很快活跃起来。

## 1.2 塑性加工中摩擦的特点

“摩擦学”是从研究机械传动问题而发展起来的，目前关于机械传动中的摩擦、磨损与润滑方面已形成一些比较公认的理论，而塑性加工中的摩擦与润滑问题，在理论研究方面开展较晚，并且由于问题更为复杂，使许多理论问题还有

待进一步解决。为了引用和借鉴机械中摩擦与润滑的研究成就来深入探索金属塑性加工中摩擦与润滑问题，首先必须了解金属塑性加工中摩擦的特点。

如前所述，在机械传动中零部件之间有相对运动时，在接触表面上就会有摩擦发生。在金属塑性加工中，除有这种摩擦之外，由于变形金属内部发生塑性变形以及变形均匀、各质点流速不同而出现金属内部的摩擦。故在金属塑性加工中要区分外摩擦与内摩擦两种概念：内摩擦系指金属塑性变形时，金属的一部分沿内部某一滑移面对另一部分移动时出现的摩擦；外摩擦为被加工金属与加工工具接触面间阻碍金属质点自由流动的那种摩擦。我们现在所讲述的是金属塑性加工中的外摩擦，以下简称摩擦。

金属塑性加工中的摩擦与机械传动时的摩擦有很大差别，其主要特点可概括如下。

(1) 塑性加工中的摩擦是在高压下产生的。金属塑性加工时，金属所受的单位压力，在热加工时为 $50\sim 500\text{MPa}$ 左右；冷加工时可高达 $500\sim 2500\text{MPa}$ 。而承受重载荷的轴承，工作时的单位压力仅为 $20\sim 50\text{MPa}$ 。由于塑性加工时的面压高，使润滑困难，润滑剂难以带入变形区或易从变形区中挤出；在高压作用下还将改变润滑剂的性质（例如流变性能）；此外，面压高也使变形金属与加工工具的真实接触面积增大。所有这些情况，在选择润滑剂与润滑方法以及对润滑状态进行解析时必须加以考虑。

(2) 很多塑性加工过程是在高温下进行的。例如热加工铝时为 $400\sim 500^\circ\text{C}$ 范围；热加工钢时为 $800\sim 1200^\circ\text{C}$ 范围；而有的难熔金属的加工温度高达 $1200\sim 2000^\circ\text{C}$ 。对于冷加工来说，由于表面摩擦热和变形热效应等，也可使接触面上

的温度达到颇高的程度。例如冲压不锈钢时摩擦面上的温度可达 $150^{\circ}\text{C}$ ；而在拉拔与冷锻时，通常可达 $200\sim 300^{\circ}\text{C}$ ，最高可达 $400^{\circ}\text{C}$ ，在高速变形条件下，有的金属冷加工时还可能在接触面上出现局部熔化点或熔化薄层。在高温下，金属的组织性能将发生变化，也会改变金属的表面状态（例如氧化膜的厚薄与性能等）；并且，也使润滑剂的性能与存在状态发生变化。所有这些，都会强烈地影响摩擦状况与润滑效果，并使高温下润滑剂与润滑方式的选择存在着更大的困难。

(3) 塑性加工中的摩擦常常是伴随着工件塑性变形而产生的。由于塑性变形金属要发生塑性流动，但在接触面上不同区域金属质点的表现的行为可能不同，有的滑动，有的粘着。同时，在塑性变形过程中，金属的宏观表面积增大，在工件与工具间会出现新的接触表面，金属表面的氧化膜、污染膜也将不断被破坏，新生表面的依次袒露，表现表面的更新作用。在工具紧密的贴合而近乎真空状态下出现的新鲜金属表面具有较强烈的化学活性，在摩擦与塑性变形联合作用下使金属表层的组织结构状况发生很大变化以及接触面积增大，这些情况往往使摩擦力增大。

综上所述，塑性加工中的摩擦要比机械传动中的摩擦复杂得多，这对润滑剂的使用性能（例如吸附性、铺展性、润滑油膜强度等）提出更高的要求，给摩擦与润滑问题的理论解析带来很大的困难。

### 1.3 塑性加工中摩擦的影响

各种塑性加工过程的变形情况虽有不同，但在工具和工



件的接触表面上都存在着外摩擦。经验表明，外摩擦几乎在所有场合都将引起不良的影响，这主要表现在以下几方面。

(1) 摩擦引起变形力增加，多消耗了本来并不需要的功。例如，冷锻时，在一般操作条件下，发现摩擦使载荷增加30%。对于拔制过程，有人通过计算与实验指出：在中等断面减缩率（40%）和具有良好润滑剂（摩擦系数 $\mu \approx 0.05$ ）时，摩擦对载荷的影响约为10%；若摩擦系数为0.1，则摩擦影响增加到20%。轧制时，甚至在摩擦系数较小的冷轧中亦可发现轧辊载荷增加10%~20%；热轧时摩擦系数要大得多，故轧辊载荷增加更多。

由于摩擦引起变形力增加，有时导致工具的强度不够，这就限制了道次加工率，从而影响了生产率的提高。薄板轧制时，由于轧辊的弹性变形，使轧件厚度小到某一数值以下就不能再继续加工，即存在所谓“最小可轧厚度”。摩擦增大使变形力增加，引起轧辊弹性变形增加，从而使最小可轧厚度增大。

(2) 摩擦引起变形不均匀，从而带来很多不良后果。例如，锻粗时产生鼓形，挤压时出现“死区”等。变形不均匀也将导致产品的组织性能不均匀，影响产品质量。由变形不均匀而产生的附加拉应力，会促使产品出现微观和宏观的裂纹。例如锻粗时出现侧面裂纹；挤压时助长外部开裂。

(3) 摩擦引起工具磨损，缩短工具的使用寿命。由于工具表面磨损，改变了所需要的工具表面形状尺寸以及光洁度，从而使产品尺寸、精度和表面质量降低。

应指出，影响表面光洁度的另一重要原因是毛坯金属转移到工具表面上去，这是不适当的润滑所造成的严重后果。金属转移比较严重时发生粘着，即工具表面上牢固地粘合着