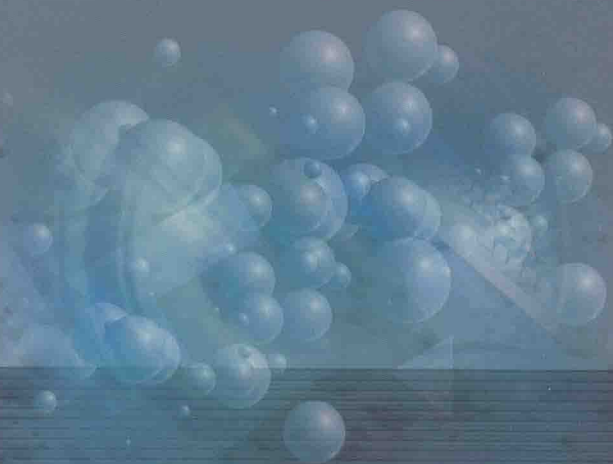


T

# 纳米流体热传输及 摩擦学行为研究

赵永涛 著



中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

# TiO<sub>2</sub>纳米流体热传输及 摩擦学行为研究

赵永涛 著



中国矿业大学出版社

## 内 容 提 要

本书通过对  $\text{TiO}_2$  纳米流体分散稳定性、理化性能、热传输以及摩擦学行为等方面的研究,明确了  $\text{TiO}_2$  纳米粒子在基础液中的分散形式,探明了  $\text{TiO}_2$  纳米流体在金属表面的润湿状态,修正了纳米流体的黏度公式,并进一步建立了纳米流体的热传输及润滑模型,开展了纳米流体特性和机理的研究,有助于促进人们对纳米流体的认知,并为纳米流体在金属加工润滑领域的应用提供了理论指导。

本书可供相关专业的研究人员借鉴、参考,也可供广大教师和学生使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

$\text{TiO}_2$  纳米流体热传输及摩擦学行为研究 / 赵永涛著. —

徐州:中国矿业大学出版社,2018.9

ISBN 978 - 7 - 5646 - 4099 - 6

I. ①T… II. ①赵… III. ①二氧化钛—纳米材料—热传导—研究②二氧化钛—纳米材料—摩擦—研究 IV. ①O614.41

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第203846号

书 名  $\text{TiO}_2$  纳米流体热传输及摩擦学行为研究  
著 者 赵永涛  
责任编辑 何晓明  
出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司  
(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)  
营销热线 (0516)83885307 83884995  
出版服务 (0516)83885767 83884920  
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com  
印 刷 江苏凤凰数码印务有限公司  
开 本 787×960 1/16 印张 10.5 字数 200 千字  
版次印次 2018年9月第1版 2018年9月第1次印刷  
定 价 35.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

## 前 言

随着热科学和技术的发展,在冶金、能源、运输、微电子、化学工程、航天器热控制、制造业中,对换热系统的效率提出了更高的要求。提高液体换热效率的一种有效方法是在基液中添加金属、非金属或聚合物固体粒子。由于固体粒子的导热系数比液体大几个数量级,因此这种添加了固体粒子的两相流体的导热系数比纯液体大许多。但在实际应用中仍存在许多问题,主要是粒子颗粒大、易沉降、易产生堵塞和磨损等。

1995年,美国阿贡国家实验室(简称ANL)的Choi等率先提出了纳米流体的概念。所谓纳米流体,是指以一定的方式在液体介质中添加纳米粒子或纳米管而形成的悬浮液。纳米流体概念的提出给强化传热技术的研究带来了新的希望。纳米流体在提高流体换热能力的同时,由于小尺寸效应和布朗运动,与传统添加微米或毫米级固体粒子的流体相比,悬浮稳定性更好。近年来,国内外学者对纳米流体技术进行了大量的研究,主要集中在以下几个方面:纳米流体体系的选择研究、纳米流体的制备及稳定性研究、纳米流体热导率影响因素及模型研究、纳米流体强化传热机理研究、纳米流体黏度测量及影响因素研究。

纳米粒子作为润滑油或基础油添加剂能明显提高摩擦学性能,这一事实在近年来的理论和实践中都得到了验证。同时,国内外各大公司也对纳米润滑剂产生了浓厚的兴趣,开始研制纳米金属加工液。然而,纳米润滑剂的分散机理、理化性能及传热特性等均尚未明确,影响了其在金属加工领域的进一步应用。

纳米流体是以一定的比例和方式在基础液中添加纳米级金属或非金属氧化物粒子而形成的一种特殊的悬浮液。研究表明,纳米流体具有优异的摩擦学以及传热传质特性,因而经常作为一种典型的润滑剂应用于机械润滑乃至金属加工领域。但目前人们对纳米流体的研究还不够深入,各种特性的机理尚不明确。因而进一步开展纳米流体特性和机理的研究,有助于促进人们对纳米流体的认知,并为纳米流体在金属加工润滑领域的应用提供理论指导。

为此,本书总结了纳米流体研究进展的情况,包括纳米流体的制备,以热导率为主的纳米流体理化性能,纳米流体的稳定性,纳米流体的润滑机理;以TiO<sub>2</sub>纳米粒子为研究对象,围绕TiO<sub>2</sub>纳米流体的制备、理化性能、传热特性以及摩擦学特征进行了一系列的研究。

首先,通过X射线衍射(XRD)、扫描电子显微镜(SEM)以及差热分析等对纳米粒子进行了表征,确定了TiO<sub>2</sub>纳米粒子的存在形式;利用沉降法、Zeta电位法对分散剂的分散效果进行了甄别,并结合物理分散法和化学分散法,制备出分散性良好的TiO<sub>2</sub>纳米流体;明确了TiO<sub>2</sub>纳米粒子在水性介质中的分散机理。其次,应用接触角测量仪对纳米流体的润湿性进行了研究,明确了纳米流体在金属表面的润湿状态:分散剂的加入,会促使纳米流体在金属表面的润湿状态由Wenzel润湿向Cassie润湿转变;通过一系列的黏度实验发现,纳米流体黏度变化的首要因素是其本身的“电滞效应”:黏度实验值和经典模型理论值的偏差主要来源于纳米流体的初级“电滞效应”;引入了Gouy-Chapman双电层模型,基于纳米粒子周围电势分布和距离的关系,通过理论计算,提出了全新的黏度公式,与纳米流体的黏度变化具有很高的吻合度。再次,根据纳米流体中纳米粒子的界面层效应和布朗运动特点,分别建立了基于两者的热导率模型;考查了界面层热导率分布、厚度、温度以及纳米粒径对纳米流体热导率的影响;利用本书建立起来的理论模型,得到界面层以及布朗运动对纳米流体热导率强化的贡献值,并通过瞬态热线法对TiO<sub>2</sub>纳米流体的热导率进行了测量,与理论值进行了比较;此外通过热轧实验发现,由于纳米流体具有较高的热导率,能够起到细化轧后表面组织的效果。最后,通过四球摩擦实验和万能摩擦磨损实验,明确了分散剂和纳米粒子对纳米流体润滑性能的影响机制;使用六偏磷酸钠(SHMP)或油酸(OA)做分散时,纳米流体的润滑性能受分散剂含量的影响较小,使用聚丙烯酸钠(PAAS)做分散时,由于黏度较大,影响了纳米流体的流动性,进而会阻碍TiO<sub>2</sub>纳米粒子进入摩擦副,影响纳米流体的润滑性能,总体来讲分散剂的影响要小于TiO<sub>2</sub>纳米粒子,仅能通过改变有效纳米润滑粒子的数量影响纳米流体的润滑性能;提出了流-固协同润滑模型,即由于固体表面粗糙度的存在,且微凸体处具有较高的表面能,因此TiO<sub>2</sub>倾向于沉积在摩擦副的微凸体处,形成一种低剪切的纳米润滑膜,使真实的接触面由纳米流体、纳米润滑膜以及部分微凸体组成,沉积膜避免了微凸体的直接接触,因而提高了纳米流体的润滑性能。

笔者希望通过本书能使更多的研究工作者对纳米流体的研究产生兴趣,从而推动纳米流体相关理论和实验的进展,促进纳米流体的快速发展,使得研

## 前 言

---

究工作真正应用于实践,也希望纳米流体相关理论能在其他学科得到应用,同时也希望更多的专家、学者共同开放研究纳米流体相关理论。

纳米流体相关理论的发展时间较短,理论和实验上都非常欠缺,由于笔者的水平有限,在论述中阐述的观点和对问题的理解难免存在缺陷和错误,敬请专家、学者和对此感兴趣的科研工作者提出批评和指正。

著 者

2018年5月

# 目 录

第 1 章 引言	1
第 2 章 纳米润滑理论的形成和发展	3
2.1 轧制润滑的发展和机理	4
2.2 纳米润滑理论研究现状	11
2.2 纳米流体的制备	15
2.3 纳米流体的稳定性理论和强化机制	19
2.4 纳米流体的物理性能	27
第 3 章 纳米润滑机理探究	45
3.1 滚珠轴承作用	45
3.2 自修复机制与薄膜润滑	46
3.3 超光滑表面作用机制	46
3.4 不同类型纳米流体的润滑机制	47
第 4 章 $\text{TiO}_2$ 纳米流体制备与表征	52
4.1 纳米 $\text{TiO}_2$ 的表征	52
4.2 分散剂的筛选和分散机理探讨	55
4.3 $\text{TiO}_2$ 纳米流体的制备	61
第 5 章 $\text{TiO}_2$ 纳米流体理化性能研究	63
5.1 实验设计	63
5.2 润湿性能研究	64
5.3 黏度测试与机理探究	72
第 6 章 $\text{TiO}_2$ 纳米流体的热传输行为研究	89

6.1	纳米流体导热系数的测量 .....	89
6.2	界面层效应 .....	93
6.3	基于布朗运动的热导率强化效应 .....	99
<b>第 7 章</b>	<b>摩擦与轧制润滑性能研究 .....</b>	<b>104</b>
7.1	实验条件 .....	104
7.2	四球摩擦实验 .....	106
7.3	万能摩擦磨损实验 .....	113
7.4	纳米 TiO <sub>2</sub> 润滑机理探究 .....	118
7.5	TiO <sub>2</sub> 纳米流体热轧实验研究 .....	121
后记	.....	130
参考文献	.....	133



# 第1章 引言

随着轧制过程向高温、高负荷、高速方向的发展以及对产品质量要求的不断提高,作为轧制关键技术之一的工艺润滑也面临着新的挑战,由初期单纯的提高产品表面质量或节能降耗,到目前提高产品表面质量与节能减排并举,传统的润滑剂已不能满足市场需求。纳米润滑技术的出现为解决轧制过程中出现的上述问题提供了新的思路。

纳米粒子作为润滑油或基础油添加剂能明显提高摩擦学性能,这一事实在近年来的理论和实践中都得到了验证。然而,目前国内外纳米润滑的研究重点主要集中在对重要机械设备的润滑上,对金属加工方面则研究较少。为此,我国于2009年启动了“863计划”新材料技术领域专题“环保型纳米水性板带钢轧制液规模化制备技术”研究。同时,国内外各大公司,如美国奎克化学公司、我国上海宝钢集团等都对纳米润滑剂产生了浓厚的兴趣,开始研制纳米金属加工液。然而,纳米润滑剂的分散机理、理化性能及传热特性等均尚未明确,影响了其在金属加工领域的进一步应用。为此,本书结合纳米流体的特征,对作为轧制液的纳米流体进行了一系列的机理探索。

众所周知,在轧制工艺润滑中,润滑剂对摩擦副表面的润湿起着至关重要的作用。良好的润湿行为更有利于润滑剂在摩擦副表面的铺展,形成更均匀的润滑膜,从而提高润滑剂的润滑性能;另外,黏度是液态润滑剂内摩擦的表现,黏度的大小能够反映润滑剂在摩擦副中流动的难易程度,并且直接影响变形区油膜厚度及润滑剂本身的润滑性能。因此,充分理解和控制纳米粒子的分散对润滑剂黏度的影响以及润滑剂与摩擦副表面的润湿性,是获得良好润滑性能的必要前提。此外,润滑剂除了需具有优异的润滑性能外,冷却性也是一个很重要的参考标准,良好的冷却性能有助于降低机械部件摩擦过程中的温升,延长部件的使用寿命。因而对纳米流体热导率的探究,也是研究作为润滑剂的纳米流体综合性能所必不可少的重要因素之一。

$\text{TiO}_2$  纳米粒子具有独特的理化特性。研究表明,将  $\text{TiO}_2$  纳米粒子分散到润滑油中能够显著提高润滑油的摩擦学特性,然而其对水基纳米轧制液润

滑性能的影响却不得而知；TiO<sub>2</sub> 纳米粒子熔点较高，在热轧条件下基本上以固体的形式存在。

基于以上分析，笔者选择 TiO<sub>2</sub> 纳米粒子作为研究对象，拟从水基纳米流体的黏度以及在板带钢表面的润湿性入手，研究纳米流体的传热和摩擦学特性，为纳米水基润滑剂在金属加工领域的批量应用提供理论指导和技术支持。

由于油基轧制润滑剂（热轧油、油基纳米润滑剂）在使用过程中存在着诸多问题，在此背景下，笔者致力于研究纳米粒子在水性介质中的理化性能、热导率以及抗磨减摩特性，为制备新型的水基润滑液，使其既满足轧制润滑性能，又符合当前节能环保、清洁生产的要求，建立坚实的理论基础，并推动和完善金属加工纳米润滑理论的发展。

因此，笔者通过多种分散手段相结合的方式，实现了 TiO<sub>2</sub> 纳米粒子在水基体系中的稳定分散，对其黏度、润湿性、流变性能、热导率以及抗磨减摩特性进行了系统研究。同时，对 TiO<sub>2</sub> 纳米流体的热导率强化机制进行了探究，建立了水基 TiO<sub>2</sub> 纳米流体的界面层模型以及布朗运动模型，并根据 TiO<sub>2</sub> 纳米粒子的沉积特征，提出了“流-固二相协同润滑”模型，为探索纳米流体的润滑机理提供了新的理论参考。

## 第2章 纳米润滑理论的形成和发展

纳米粒子粒径在1~100 nm,是物质的一种新的形态——纳米态<sup>[1]</sup>。纳米态物质的性质主要取决于表面或界面上分子排列的状态。由于它们具有量子力学上的强关联性而表现出介于宏观物质和微观原子或分子之间的过渡亚稳态,具有界面与表面效应、小尺寸效应<sup>[2]</sup>、量子效应与宏观量子隧道效应<sup>[3]</sup>,表现出奇异的热学、力学、电学、磁学、光学和化学活性等特性。

摩擦是自然界普遍存在的现象,每年世界各国因摩擦磨损产生了机械零部件的严重能量损失及设备损坏,造成了巨大的经济损失。为减少摩擦磨损造成的损失,各国都在加紧研究相应的润滑剂及润滑技术。

纳米材料与润滑技术相结合,制备出同时具有减摩、抗磨和修复功能的润滑材料,是近年来摩擦与润滑领域研究的热点<sup>[4]</sup>,也是纳米材料与润滑剂相结合的切入点。以纳米材料为基础开发的润滑剂减摩、抗磨、自修复技术已成为现代再制造技术的发展方向之一,也是再制造领域的创新性前沿研究课题,具有广阔的应用前景。

随着精密机械和高新技术装备的发展,特别是纳米科技所推动的新兴学科,如纳米电子学、纳米生物学和微机电系统的研究都涉及微观摩擦和表面界面行为。由于尺度效应和表面效应的影响,这些问题所遵循的规律已不再是宏观摩擦学原理,在此基础上迅速衍生出了纳米摩擦学。

纳米摩擦学,或称微观摩擦学,是在纳米尺度上研究摩擦界面上的行为、变化、损伤及其控制的科学<sup>[5]</sup>。摩擦学就其性质而言属于表面科学范畴,摩擦过程中材料表面所表现的宏观特性与其微观结构密切相关。纳米摩擦学研究提供了一种新的思维方式,即从分子、原子尺度上揭示摩擦磨损和润滑机理,建立材料微观结构与宏观特性之间的构性关系,因此更加符合摩擦学的研究规律,标志着摩擦学学科的发展进入一个新阶段。

纳米摩擦学在学科基础、研究方法、实验测试设备和理论分析手段等方面都与宏观摩擦学研究有着很大的区别。宏观摩擦学根据体相性质应用连续介质力学作为分析的基础。由于尺寸效应的影响,作用在表面上的摩擦力和润

滑膜黏滞力对于微型机械性能的影响要远远大于体积力的影响,同时由于微型机械的润滑膜厚度一般处于纳米量级,只有几个或者十几个分子层厚度,以连续介质力学为基础的流体润滑理论已不再适用。纳米摩擦学则是从原子、分子结构出发,考查纳米尺度下的表面和界面分子层摩擦学行为,其理论基础是表面物理和表面化学,实验测试仪器是各类扫描探针显微镜以及专门的微型实验装置<sup>[6-7]</sup>。近年来开发出了多种类型的有序分子薄膜,对于纳米间隙摩擦副具有良好的润滑作用<sup>[8]</sup>。

纳米摩擦学的发展有着重要的理论价值。纳米摩擦学中所采用的实验测试技术能够深入到分子和原子尺度揭示摩擦过程中的微观现象。然而由于纳米摩擦学研究涉及的是微观摩擦过程,在理论分析和实验研究上还存在着较大的困难。因此,实验测试技术还需要进一步改进,以此来如实地反映实际工况。特别是要建立微观摩擦下的物理模型和定量分析方法,完善分子动力学方法对于复杂分析和真实系统的模拟技术,发展新的理论计算方法。

纳米润滑技术在金属加工领域有着重要的应用前景,将纳米级金属或非金属粒子加入到金属加工液中而形成的纳米流体,能够显著改善加工液的润滑和冷却性能。因此,这项技术若应用到切削液中,能够提高切削效率以及延长刀具的使用寿命,但此技术应用于轧制尤其是热轧过程的理论却鲜有文献进行报道。

## 2.1 轧制润滑的发展和机理

### 2.1.1 轧制润滑技术发展及应用

采用轧制润滑技术能够减少摩擦、降低轧辊磨损,确保轧制过程的顺利进行。轧制润滑技术经过长时间的发展在不断地进步,也得到了不断的发展。1886年,Reynolds 推导出著名的雷诺方程,为轧制润滑技术的应用和发展提供了重要的理论指导,有色金属轧制开始使用矿物油和动植物油涂抹在轧辊上进行润滑。20世纪初,铝板轧制过程中出现了轧辊黏附铝而导致表面质量变差的问题,人们开始在矿物油中加入活性添加剂以提高润滑效果,多组分轧制润滑剂的研制得到迅速发展。20世纪30年代,德国开始使用棕榈油进行冷轧宽带钢工艺润滑。随后,由于棕榈油资源有限、轧制速度的提高以及变形量的不断增大,乳化液逐步取代棕榈油成为常用的冷轧工艺润滑剂,冷轧润滑技术被广泛使用,并且日渐成熟<sup>[9]</sup>。

板带钢热轧生产长期以来一直以水作为轧辊的冷却和润滑介质<sup>[10]</sup>。这

种传统的轧制模式是轧辊与轧件直接接触,因而轧辊表面非常容易磨损,导致凹坑和麻点的产生,凹坑和麻点又会加剧磨损,形成了恶性循环,使轧辊很快因磨损而报废。随着轧制生产技术的发展,水已经远远不能满足热轧时作为润滑介质的要求,需要寻求新的润滑介质<sup>[11-12]</sup>。

1968年,美国 Great-Lake 钢铁厂首次在热连轧精轧机组上使用热轧油润滑,随后苏联、日本、英国也进行了热轧油配方及热轧润滑新技术的研究。近年来,随着连铸连轧工艺的发展,板带钢粗轧机组逐渐被减少或忽略,精轧机组向高速化、连续化、高效率化方向发展,热轧工艺润滑技术得到了前所未有的重视和应用<sup>[13]</sup>。

随着机械设计和制造、自动控制技术的迅速发展,在我国的宽带钢热连轧机上,有相当一部分已采用了国产的热轧润滑装置,如攀钢 1 450 mm、太钢 1 420 mm、梅钢 1 422 mm、莱钢 1 500 mm、济钢 1 780 mm、本钢 1 700 mm,取得了预期的效果和明显的经济效益<sup>[14]</sup>。然而,我国热轧工艺润滑应用中存在的主要问题是油耗高,特别是在热轧润滑研究初期认为热轧油浓度越高,其润滑效果越好,有些企业热轧油耗量甚至高达 250 g/t,导致轧制工艺润滑效果不稳定、热轧油使用成本高等一系列问题,更严重的是多余的热轧油残留在轧辊和带钢表面会污染冷却水<sup>[15-16]</sup>。而有国外学者研究则认为油水比例在 1:1 000 即可达到润滑作用效果,国外热轧工艺润滑技术发展日臻成熟,同类机组先进水平油耗为 80~100 g/t<sup>[17-18]</sup>。

### 2.1.2 热轧润滑的应用效果

由于热轧高温、高压使得热轧润滑技术的最初出发点主要为减少轧辊损耗,提高热轧带钢表面质量,采用热轧工艺润滑技术成为钢铁企业降低成本的一个重要途径,见表 2-1。热轧润滑可以达到以下效果:

#### (1) 减少或调控摩擦因数

未采用热轧工艺润滑时摩擦因数一般在 0.35 左右,而采用工艺润滑时的摩擦因数可减小到 0.12<sup>[19]</sup>。

#### (2) 显著降低轧制力

摩擦因数的减小使轧制力明显降低,一般可以降低轧制力 10%~25%,甚至更多。热轧润滑不仅可以降低轧制功率,节约能耗,还可以在原有轧机的基础上进行大压下轧制,有利于轧制更薄规格的产品,同时也可以有效地消除轧机的振动。

#### (3) 降低轧辊消耗,提高作业率

热轧时由于温度高,工作辊表面发生氧化生成黑皮,造成轧辊异常磨损。

热轧润滑剂能够阻止轧辊表面黑皮的产生,延长轧辊使用寿命,同时减少换辊次数,提高轧制生产作业率<sup>[20]</sup>。

表 2-1 板带钢热轧工艺润滑前后效果对比

机架号	有润滑				无润滑			
	电流百分比 /%	单位电流 /A	轧制力 /kN	单位轧制力 /MPa	电流百分比 /%	单位电流 /A	轧制力 /kN	单位轧制力 /MPa
F1	86	0.069 7	17 740	14.39	81	0.082	15 580	15
F2	90	0.073 0	18 660	15.13	88	0.086	15 950	15.56
F3	84	0.068 0	15 440	12.54	74	0.072	14 400	14.05
F4	94	0.076 2	14 430	11.70	88	0.086	12 710	12.40
F5	58	0.047 0	10 080	8.18	70	0.068	12 930	12.26
F6	61	0.049 0	10 210	8.28	62	0.060	10 230	9.98
F7	67	0.046 0	5 210	4.23	51	0.050	5 280	5.15

#### (4) 改善板带表面质量

轧辊磨损的降低、氧化皮的减少,直接改善了轧后板面质量。另外,工艺润滑对变形区摩擦的调控作用可以改善轧后板形,提高热轧板带的酸洗速度,降低酸液消耗,减少酸洗金属损失<sup>[21]</sup>。

#### (5) 改善轧件内部组织性能

工艺润滑不仅能够提高轧后表面质量,而且还可以使轧后板带钢的晶粒组织得到改善,提高其深冲性能。如热轧 IF 钢时由于摩擦因数的降低,表层的剪切变形减少,使板厚方向从表层到中心的织构差别减小,有利于织构的增加,从而可提高热轧板的  $r$  值<sup>[22]</sup>。

#### (6) 节能降耗

采用工艺润滑后,热轧吨钢平均节电 3 度(kW·h),酸洗酸液减少 0.3~1.0 kg,金属消耗降低 1.0 kg,轧辊的消耗降低 30%~50%<sup>[23]</sup>。

### 2.1.3 冷轧润滑的作用

不同于冷轧工艺润滑,带钢冷轧过程变形区摩擦特征决定了采用润滑轧制的必要性<sup>[24]</sup>。热轧板变形抗力低,同时轧件表面氧化铁皮、冷却水也具有润滑作用,而冷轧时材料加工硬化严重,变形抗力大,轧制压力高,因此工艺润滑是冷轧工艺必不可少的一部分。

生产过程中有效的润滑能够最大限度地保证轧机有足够的轧薄能力,并明显降低轧制力的消耗和轧辊与轴承的消耗,生产出表面质量良好的产品。在冷轧过程中,轧制润滑剂的另一个重要作用是它的冷却作用,在现代化高速冷连轧机上基本上不再另外配置冷却系统,润滑剂兼作冷却剂使用,轧制过程中热效应现象比较剧烈,如不进行有效的冷却,会带来和产生一系列严重的后果:轧辊温度过高,使轧辊消耗和换辊次数增多;轧辊表面容易产生裂纹和剥落现象;会加剧润滑剂的热分解和老化,导致能量消耗增加<sup>[25]</sup>。

冷轧工艺润滑的作用在于工艺润滑剂在轧辊和轧件表面形成一层很薄的润滑膜,阻止相互间产生吸附作用,并且渗入两个接触表面上的凹凸峰,把轧件和轧辊分隔开,从而可以很大程度上降低各接触面上的摩擦力,使轧件变形抗力及其对轧辊的压力减少。随着轧辊弯曲和轧机弹性变形的减少,在相同轧辊调整条件下,可以保证轧件较大的压下量和伸长量<sup>[26]</sup>。

### 2.1.4 轧制润滑机理

轧制润滑技术先于轧制润滑理论得到应用,世界各国对轧制润滑机理也在不断地探索。轧制过程中的摩擦与机械摩擦相比,接触表面的物理性质相同,因此研究轧制过程中的摩擦也应当从一般摩擦理论出发,但是两者又有差别。轧制过程的摩擦具有以下特性<sup>[27]</sup>:

(1) 同时存在内外摩擦。轧制过程中金属发生剧烈塑性变形,因此内外摩擦同时存在,内摩擦释放大量变形热,而机械运动中只有外摩擦存在。

(2) 高接触压力。热轧时,单位接触压力达 50~500 MPa,冷轧时则高达 500~2 500 MPa。而一般重载荷轴承所承受的压力也只有 20~50 MPa。

(3) 摩擦状况复杂。轧制变形区内摩擦应力影响因素众多,如金属所处应力状态、变形区几何参数、温度、速度、变形程度及变形方式等。

(4) 产生新生表面。机械零件变形为弹性变形,整体零件不会发生塑性变形,而轧制过程中轧件则发生塑性变形,新生表面不断产生。同时,表面氧化膜破坏后,金属新表面裸露,将引起接触表面状况的改变。

轧制工艺润滑能够起到减少轧制过程摩擦、降低磨损的作用<sup>[28]</sup>,而润滑效果与润滑状态密切相关。金属成形时润滑机制与机械润滑机制不同,金属塑性变形区润滑状态除了受润滑剂黏度、轧制速度影响外,由于发生塑性变形还受到工件变形抗力  $\sigma_f$  的影响。为此有学者用修正的 Stribeck 曲线对金属塑性变形时的润滑状态进行了分析。当界面压力  $P = \sigma_f$  时所构成润滑状态图即为传统的 Stribeck 曲线。当  $P > \sigma_f$ , 也即发生塑性变形时,必须构成一个三维润滑状态图,如图 2-1 所示。图中 A—A 表示摩擦因数最小点的截面。

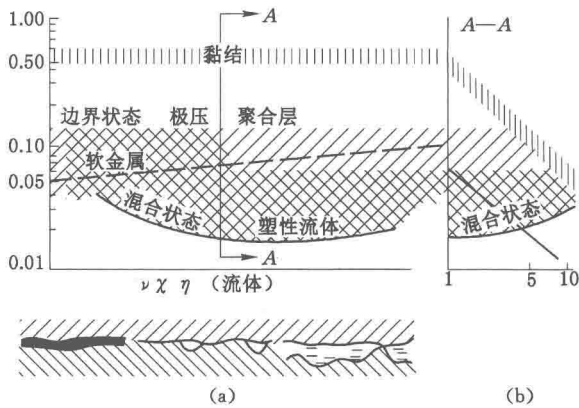


图 2-1 修正后的 Stribeck 曲线

从图 2-1 中能够看出,当润滑剂黏度较小,轧制速度较低时,流体动压作用不大,还不能形成有效厚度的润滑膜,只有含有添加剂的边界润滑膜将表面分开,轧辊光洁表面就被复印到轧件表面上,如图 2-2(a)所示,此时摩擦因数较高。随着黏度、速度的增加,在接触表面的凹处首先形成流体动压池,润滑膜厚度增加,达到混合润滑范围时,导致摩擦因数降低。

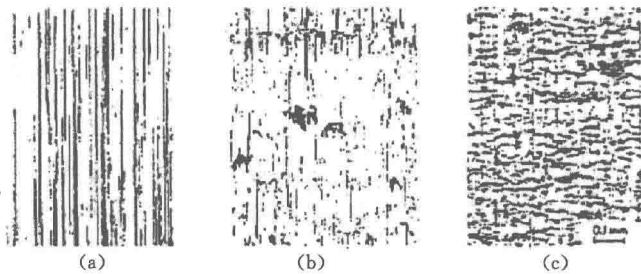


图 2-2 轧后表面形貌

(a) 边界润滑; (b) 混合润滑; (c) 流体润滑

当图 2-1(b)中  $P/\sigma_f$  减小时,流体润滑趋势增大,摩擦因数降低。混合润滑的工件表面形貌介于边界润滑与流体润滑之间,如图 2-2(b)所示。一旦整个变形区表面完全被流体动压膜覆盖,摩擦因数达到最低点,表示进入了流体润滑状态,从图 2-2(c)中可以看到加工表面开始产生粗糙化。若  $\eta \times v$  进一步增加,流体膜剪应力增大,对应的摩擦因数也有所增加。然而,变形速度增加会导致变形温度上升,相应会抑制润滑膜厚度及摩擦因数的增加。



轧辊与轧件之间摩擦的产生是由于接触表面微凸体的相互作用,此时接触面摩擦符合阿芒顿库仑摩擦定律。即由于表面微凸体的强度大体恒定,因此黏附摩擦力的大小与接触面积成正比<sup>[29]</sup>。由于影响边界润滑的因素众多,采用阿芒顿库仑定律计算边界润滑摩擦力只能作为一个近似的参考。

由流体动力学推导出的雷诺方程为流体润滑理论发展提供了依据<sup>[30]</sup>。经典雷诺方程的一般形式见式(2-1):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\rho h^3}{\eta} \frac{dP}{dx} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\rho h^3}{12\eta} \frac{dP}{dy} \right) = -6U \frac{\partial \rho h}{\partial x} + 12 \frac{\partial \rho h}{\partial t} \quad (2-1)$$

式中  $\eta$ ——润滑剂黏度,  $\text{mm}^2/\text{s}$ ;  
 $\rho$ ——润滑剂的密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  
 $P$ ——润滑膜压力,  $\text{Pa}$ ;  
 $h$ ——润滑膜厚度,  $\mu\text{m}$ ;  
 $U$ ——两表面移动速度,  $\text{m}/\text{s}$ ;  
 $t$ ——时间,  $\text{s}$ 。

Patir 和 Cheng<sup>[31-32]</sup>考虑了粗糙表面对润滑的影响,推导出了平均雷诺方程,较好地将平均雷诺方程应用在乳制润滑领域,通过平均雷诺方程计算得到的流体动压具有一定的可靠性。王晓力和温诗铸<sup>[33]</sup>综合考虑了热效应和表面粗糙度效应,提出了基于平均流动模型的广义雷诺方程。

Tsao 和 Sargent<sup>[34]</sup>在 Dow、Kannel 和 Bupara 入口区分析方法<sup>[35]</sup>的基础上,提出了混合润滑模型,对入口处的油膜厚度进行了计算。在综合了热效应和工件的加工硬化,忽略轧件变形时表面粗糙度变化之后, Tsao 和 Sargent<sup>[36]</sup>对他们的模型进行了改进。Suteliffe 和 Johnson<sup>[37]</sup>考虑了变形区入口处微凸体变形,提出了一个冷轧混合润滑模型,然而却同样没有考虑发生塑性变形后轧辊及轧件表面微凸体的变化。

Sheu 和 Wilson<sup>[38-39]</sup>考虑了变形区内微凸体被压平的情况,借鉴了 Patir 和 Cheng 推导的平均雷诺方程,提出了一个更为严密的模型,将轧制过程分为入口区、过渡区和变形区三个独立而又相互联系的区域。随后, Wilson 和 Chang<sup>[40]</sup>研究表明,在入口处由轧辊转动产生的流体动压将会影响到变形区润滑膜厚度。Qiu、Wu 和 Tieu<sup>[41]</sup>考虑了工件的屈服条件特征,推导了更加严密的二阶平均雷诺方程,在没有引入未知流动常量基础上提出了类似于 Wilson 和 Chang 的模型。

这些润滑理论模型的研究和建立对深入研究轧制过程摩擦润滑机制以及应用奠定了坚实的理论基础。