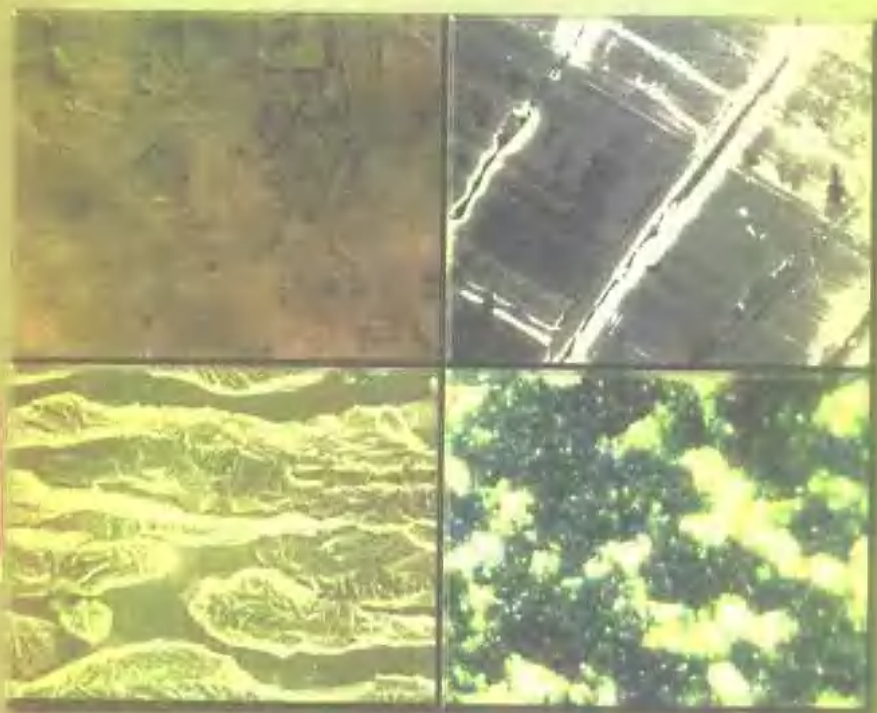


铜合金轧制摩擦、 润滑及摩擦化学研究

TONGHEJIN ZHAZHI MOCA
RUNHUA JI MOCA HUAXUE YANJIU

李积彬 著



冶金工业出版社

广东省高等教育科技著作出版基金资助

铜合金轧制摩擦、润滑 及摩擦化学研究

李积彬 著

北 京
冶 金 工 业 出 版 社

内 容 提 要

本书介绍了铜、铜合金带材轧制变形区表面状态、表面织构、润滑状态以及铜带轧制功能液的吸附性、极压性、腐蚀性等摩擦化学特性的试验与理论研究,探讨了最佳轧制摩擦学参数和轧制功能液的计算机优化设计及合成。

本书是著者多年从事轧制摩擦与润滑研究的经验和总结,试验新颖,思路开阔,内容翔实,对铜轧制摩擦、润滑的研究和系统理论形成具有重要意义。

本书可供从事轧制润滑工艺研究、应用,润滑油生产的科技人员以及高等院校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

铜合金轧制摩擦、润滑及摩擦化学研究/李积彬著.

—北京:

冶金工业出版社,1999.8

ISBN 7-5024-2386-9

I. 铜… II. 李… III. 铜合金-轧制-摩擦-研究

IV. TG337

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 45992 号

出版人 卿启云(北京沙滩嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009)

责任编辑 戈 兰 美术编辑 熊晓梅 责任校对 栾雅谦 责任印制 李玉山
北京兴华印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

1999 年 8 月第 1 版,1999 年 8 月第 1 次印刷

850mm×1168mm 1/32;6 印张;159 千字;183 页;1-1500 册

14.00 元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64013877

冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号(100711) 电话:(010)65289081

(本社图书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

6p/HOLL 121

序 言

铜合金轧制摩擦、润滑与摩擦化学研究是一项边缘学科的研究课题,它涉及数学、物理、力学、化学、冶金、机械工程、表面工程、材料科学、石油化工等多学科,同时是有色金属塑性加工摩擦学的一个重要分支。

铜及铜合金作为重要的有色金属材料,其轧制摩擦、润滑一直是世界各铜加工厂关注和深入研究的重要课题。由于铜、铜合金轧制产品的表面对外部环境的敏感性,铜合金轧制的润滑剂不仅是为了减少轧制中的摩擦,而且在防锈、表面光洁、导电性、抗疲劳、耐腐蚀性、耐磨损方面均有举足轻重的作用;对稳定轧制工艺过程,提高产品质量、增加轧制成品率等发挥积极的作用。所以,从某种意义上说,上述的润滑剂实际上是一种多用途的轧制功能液。长期以来,世界各铜加工厂则将其成分设计作为技术秘密而加以保护。

有人将轧制工艺划归为塑性加工中的灰色领域,轧制摩擦则为这灰色领域的灰箱。轧制区压力大、摩擦力方向多变、在狭窄的工作带区内,润滑功能液如何参与其中的活动?扮演何种角色?一直是塑性加工摩擦学研究的热点课题。随着轧制速度提高,要求提高生产率、高变形率、高表面质量和更均匀的变形织构体系,对润滑剂体系提出了更严格的条件和要求。

《铜合金轧制摩擦、润滑及摩擦化学研究》一书是作者对该领域多年深入专题研究的结晶。尽管已有大量有关摩擦学的专著和文献,但深入而较系统论述铜合金轧制过程中的摩擦、润滑、摩擦化学的专著在国内尚属空白。作者利用摩擦学的原理分析和探讨了铜合金轧制加工中的摩擦、润滑及摩擦化学问题。试验设计新颖,得到了一些有创建性的结论。例如,轧制摩擦力与轧制织构形成过程的关系,铜带轧制表面工程特征,轧制功能液的计算机优化设计等。

我国铜轧制润滑技术已得到很大的发展,但在整体水平上与国际先进水平相比还有一定差距。深入开展轧制摩擦、润滑、摩擦化学的研究,并将研究成果应用到生产实际中去,推动我国铜轧制加工工艺、技术的不断发展,是中国从事金属加工的科技工作者的义务和神圣职责。

古 可

1999 年 4 月

目 录

1 轧制摩擦、润滑及摩擦化学研究的现状	1
1.1 导 言	1
1.2 轧制润滑发展历史概况	2
1.3 轧制润滑摩擦状态	5
1.4 轧制变形区表面温度的理论及实验研究	6
1.5 摩擦润滑对轧材表面形貌和表面组织状态的影响	8
1.6 功能液及其加工表面的摩擦化学特征	10
1.7 铜及铜合金的防腐与铜带轧制润滑液	13
2 铜带轧制润滑理论试验研究	16
2.1 研究设想	16
2.2 轧制变形区表面温度的试验研究	19
2.3 轧制润滑状态的监测	32
2.4 铜带轧制变形区形貌特征研究	41
2.5 铜带轧制表面状态的研究	57
3 最佳轧制润滑剂摩擦学参数研究	66
3.1 问题的提出	66
3.2 轧制表面摩擦润滑条件的设计及表面状态分析	67
3.3 轧制表面织构的测试	69
3.4 轧制表面织构测定结果	69
3.5 对轧制表面织构测定结果的讨论	72
3.6 铜带轧制表面最佳摩擦学参数探讨	75
4 铜带轧制功能液的合成及摩擦化学特性研究	84
4.1 导 言	84
4.2 植物油的硫化	84
4.3 各种功能添加剂的合成	90
4.4 添加剂吸附性能研究	99

4.5	轧制乳化油极压性能的研究	110
4.6	铜带轧制润滑油的腐蚀试验	124
4.7	含 N 阴离子乳化油添加剂腐蚀行为的研究	139
4.8	铜带表面腐蚀及吸附膜的研究	147
5	高效铜带轧制功能液合成的计算机优化设计	153
5.1	铜带轧制工艺润滑油(液)的红外光谱特征及模式 参数识别	153
5.2	铜带轧制功能液的计算机优化设计	160
参考文献		174



轧制摩擦、润滑及摩擦化学研究的现状

1.1 引言

自 15 世纪意大利学者达芬奇提出著名的摩擦第一、第二定律到 18 世纪法国物理学家库仑提出的阿蒙顿-库仑定律,以及 19 世纪英国科学家尤因和哈迪关于摩擦原理的分子粘附学和 20 世纪前苏联学者克拉盖尔斯基提出的分子机械摩擦理论,这些理论为现代摩擦理论奠定了基础。尽管 15 世纪起人们就对摩擦进行了研究,但因摩擦涉及的研究内容广泛,摩擦学作为一门独立的、新兴的边缘学科,只有近 30 年的时间。塑性加工润滑属摩擦学的范畴,而轧制润滑又属塑性加工润滑领域的一个分支。

从 1886 年英国学者雷诺建立雷诺方程至今,人们对流体润滑理论进行了大量的研究,并将流体动压润滑理论发展成线接触全膜弹流润滑,点接触全膜弹流润滑和部分弹流润滑理论。由于在轧制塑性加工中,轧制区轧件塑性变形不均、压力大、摩擦力方向多变以及接触区温度高,一般机械摩擦润滑理论已不能解决轧制塑性加工中的润滑问题,需要人们研究提出新的理论。尤其是近年来,一些大型、高速轧机的问世以及对各种新型轧材的高质量要求,使得塑性加工摩擦学和轧制润滑技术的研究得以迅速发展。国际上,在金属塑性加工摩擦润滑研究领域比较活跃的学者有 John. A. Schey (加拿大) W. R. D. Wilson (美国) E. E. Klaus (美国)。其中 W. R. D. Wilson 自 1978 年以来在塑性加工中的塑性流体动压润滑理论和粘塑性流体动压润滑理论方面做了大量的工

作,而 E. E. Klaus 则在润滑的摩擦化学方面进行了深入的研究。

我国在轧制塑性加工润滑理论方面的研究还很薄弱,理论研究水平落后于工业应用技术。在现行的生产实践中,轧制润滑工艺也落后于世界先进水平。至今我国还没有一种铜带轧制润滑液产品。一些大型铜加工厂虽然在 80 年代引进了国外先进的设备和技术,但轧制润滑用油至今仍未摆脱依赖进口的局面。因此,尽快地使铜带轧制用油国产化、系列化、专业化并开展铜带轧制润滑机理方面的研究和探讨,是当前铜带轧制润滑领域一个急待解决的研究课题。美国一位著名的科学家曾说过:“不要问我能干什么?而要问社会需要什么?”正是基于上述考虑,本章选择了“铜带轧制摩擦,润滑理论及摩擦化学研究”这一多学科交叉的课题作为研究的主题,希望能通过本课题的研究,为发展铜带轧制润滑理论,改变我国轧制润滑水平的落后状况作出一点贡献。

1.2 轧制润滑发展历史概况

埃及在公元前 1500 年的墓葬中发现了金箔制品。中国生产金箔有悠久历史^[1],在安阳殷墟出土了商代厚 0.01mm 的金箔。据明宋应星《天工开物》记载,将金打成薄片,逐层夹入金纸中,每叠二千余张,外裹矾纸,在青石砧上用铁锤击三万多次,即成金箔。在打制金箔过程中,为了防止粘结,在纸间涂上滑石粉。这大概算得上塑性加工首次应用润滑剂的最早记载之一。

到 15 世纪,欧洲有了轧机^[2]。1480 年,意大利达芬奇设计出轧机草图。1553 年法国人布津列尔用轧机轧制金银的板材以制造钱币。1728 年英国设计了生产圆钢材用的轧机。1766 年,有了串列式小型轧机。当时,轧制技术水平低,低速、窄带,轧制时经常不使用任何润滑剂^[3](这种不使用任何润滑剂指的是人类并没有意识到在生产过程中需添加润滑剂。实际上,轧材和轧辊表面存在的氧化层本身就是一种润滑剂)。随着工业的发展,人类需要宽的板带,但干轧摩擦力大,变形不均,轧辊磨损大,难以控制板型和板带

表面质量,轧制能耗也大^[4,9]。如何改善轧制的润滑状态就成为 18 世纪欧洲轧制加工业的一个技术难题。从某种意义上说,宽板带轧制的发展历史就是轧制润滑的发展历史。

18 世纪,首先轧制出了铝的宽板,随后其他有色金属也慢慢地增加了轧材的宽度。从 1860 年开始,人类使用以矿物油为基础油,添加动物、植物油和脂的润滑剂。铝板带冷轧在 20 世纪已获得了很大的发展^[2],其轧制过程选择了低污染性的轻矿物油,发现加少量的象羊脂作为润滑添加剂很适合低速的轧制工艺。铜和铜合金的轧制润滑是本世纪的事情,开始使用严加保密成分的润滑剂。

钢铁板带冷轧发展初期,轧件相当窄,轧制速度低^[2],用水进行冷却,用可能已经污染的矿物油进行边界润滑。宽板热轧是 18 世纪中叶的事情,薄板叠轧没有任何润滑。1892 年第一台宽板连轧机问世,建在当时奥地利的 TepLitz。到 1926 年,宽板热轧已经变得很普遍。同时,美国的 Rever 铜业公司引进了类似钢铁轧机的铜串联轧机和铝串联轧机。

从 14 世纪德国的锡板生产^[6]到 18 世纪所有锡板材的生产,首先是锻造^[3],然后是轧制。大约在 1790 年,开始热轧叠板的生产。随着社会对锡板需求量的增加,要求建造宽幅锡板冷轧机。这时,又一次提出一个重大课题,即一般的矿物基础油润滑剂完全不适应生产的要求。1930 年,A. J. Costle 提出用棕榈油作为锡轧制线上的润滑剂^[5],并立即被采纳。直到现在,棕榈油仍被认为是一种高质量的润滑剂。

1968 年,美国在带钢热连轧机上应用工艺润滑液,每吨钢材仅耗用润滑油 5~200g,可降低轧制力 20%~50%,节约能耗 15%,延长轧辊寿命一倍,并改善钢的表面质量^[9]。

高速轧制也产生了一系列的轧制热问题。水剂,含水分散体乳化液润滑剂获得了人类的重视。70 年代,板材冷轧速度达到了 2500m/min,线材轧制速度达到了 5600m/min,热轧也达到了 1600m/min^[10],在高速轧制下,具有高润滑性、好的稳定性的润滑剂得到发展。

中国 1871 年在福州船政局的拉铁厂开始用轧机轧制厚 15mm 以下的铁板,6~120mm 的方圆钢^[1]。到 1890 年,汉冶萍公司汉阳铁厂装有由蒸汽机拖动的横列双机架 2450mm 的二辊中板轧机和三机架横列二辊式构梁轧机以及 350/300mm 小型轧机。

1949 年以前,我国生产铝箔的唯一厂家是设在上海的一外资企业(现上海铝材一厂),在上海、广州有小型铜板压延厂。60 年代,中国塑性压力加工得到很大发展,先后建设了五大钢铁基地,三大铝加工基地和三大铜加工基地。在 60 年代中期,我国自行设计了 $\phi 2100$ mm 初轧机,到 70 年代末,我国最大的铝板轧机($\phi 750$ 、 $\phi 1400/2800$ mm)投入生产,但相应轧制润滑水平比较低。铝轧制的热轧润滑 30 年一直沿用前苏联牌号 59II,轧制乳化液,冷轧一直用煤油。铜带轧制润滑技术更落后,国家几家骨干企业热轧一直用水进行冷却和润滑。冷轧粗轧借用铝热轧乳液型号 59II,精轧用菜油进行润滑。地方小企业润滑液的使用更加紊乱,全国没有统一的轧制用油标准和产品,严重地影响了我国轧制产品质量和生产水平的发展。

到 80 年代,随着我国的改革开放,塑性加工领域引进了当今世界先进的设备和技术。武钢和宝钢代表了 70、80 年代世界钢铁加工最新技术水平。洛阳铜加工厂技术改造集多国轧制技术的精华,并配以乳化油和全油轧制润滑和光亮退火技术,使我国铜加工厂技术水平迈进了世界先进行列。西南铝加工厂改造热轧线,引进薄板和铝箔轧机及生产技术,其中 1850mm 薄板轧机速度达到 1200mm/min,跨入了高速轧制行列,同时我国也具有了高速轧制的润滑技术,但是用于铜光亮退火的乳化油、全油以及铝高速轧制润滑油仍未摆脱依赖进口的现状。纵观轧制加工技术的发展,从窄板到宽板,从低速到高速,从冷轧到热轧,都伴随着轧制润滑技术上的突破,实质上这也是轧制中摩擦与润滑的矛盾的统一。

在轧制加工中,轧制区轧件塑性变形不均、压力大、摩擦力方向多变以及接触温度高是一般机械摩擦润滑环境不能比拟的。上

述润滑理论已不能解决塑性加工中的润滑问题,因而,近几十年,对塑性加工摩擦学和润滑技术的研究得到迅速的发展。

在 John. A. Schey^[2]有关金属塑性加工摩擦、润滑和磨损的专著中,收集了从 1933 年到 1983 年有关金属塑性加工润滑方面的研究文献达 3769 篇。其中关于轧制润滑方面的论文为 425 篇,占 11.3%;有关铜及铜合金塑性加工润滑的文献为 71 篇,占 1.9%。笔者曾进行过国际联机检索,查阅到相关铜带轧制润滑方面的文献不足 10 篇。目前铜带轧制润滑工艺技术和润滑油成分受到各国政府和企业的严加保密和封锁^[2]。

1.3 轧制润滑摩擦状态

轧制润滑状态一直是从事轧制工艺技术人员争论的焦点之一。日本学者认为^[9]:在冷轧铁薄板时,轧辊和轧材间的摩擦系数按轧制力反算为 0.03~0.08,这个数值比发生边界摩擦时的摩擦系数要小,而比存在流体膜时的流体润滑摩擦系数要大,故在轧辊和轧材的接触面上,边界摩擦部分和流体润滑部分是以小面积单位混合存在。Azushima^[10,11]利用热塑性动压润滑理论,建立其雷诺方程、能量方程,计算并测得工作辊为 $\phi 500\text{mm}$,速度为 2000m/min 的实际轧机入口油膜厚度为 0.1~1.0 μm ,小于带材和轧辊表面粗糙度的总和,因此必须考虑用混合润滑来代替流体动压润滑^[12]。

Y. Kimura 和 K. Okada^[14]仔细地研究了 O/W 乳化液的边界润滑特性。乳化液形成边界油膜厚度在 0.1~0.31 μm 之间,它的最小油膜厚度,取决于乳化液中油粒被轧辊表面捕获的几率以及表面活性剂的特性。

Nakajima 等人^[13]发现用乳化液润滑,轧制之后,粘附在表面上的油比用全油润滑少得多。因此,大部分轧钢专家认为,在轧制接触变形区边界润滑是主要的。

W. R. D. Wilson 等人^[15,16]建立了轧制变形区中润滑剂的粘

塑性模型。他们发现,在变形区内的润滑膜的厚度由于塑性剪力的作用,戏剧性地减少,并强烈地受到轧制入口轧辊表面形貌和润滑剂临界剪切应力的影响。通过油滴法实验验证,将矿物油滴在化学纯铅板上轧制,会产生相当厚的油膜,厚度同牛顿理论是一致的,而用硅油所产生的油膜厚度却是矿物油的 $1/10$,在 $0.5 \sim 1.4\mu\text{m}$ 之间,具有粘塑特性。故在计算冷轧界面温度时^[11]认为轧辊与带材之间完全由一连续薄膜所隔开,可用全流体动压润滑模型来描述。

Schey^[18]给出了一个修正了的类似于弹性流体动压润滑状态判别的 Stribeck 曲线,用于金属塑性变形润滑状态的判别,如图 1-1 所示。他认为塑性流体动压润滑实际上是罕见的^[2],大部分润滑工艺过程是混合膜润滑,随着 $\eta\nu$ 的增加,可能由边界润滑占主导向以流体动压润滑占主导转化。

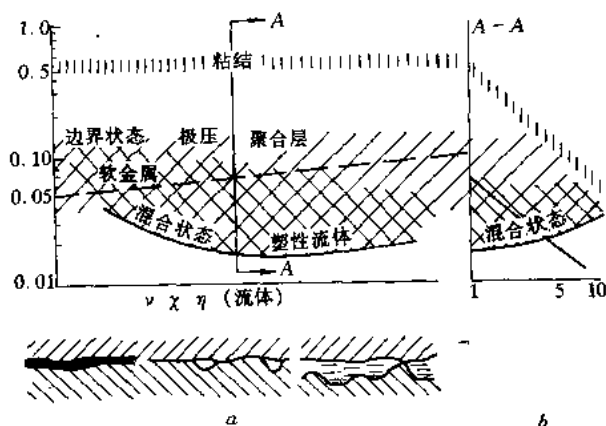


图 1-1 用于塑性变形而修正的 Stribeck 图

1.4 轧制变形区表面温度的理论及实验研究

轧制区的温度是影响轧制区润滑状态的一个重要参数,它不仅与轧材的软化、组织的回复和再结晶及相变有直接的关

系^[24~26],并且对轧制润滑油的吸附和解吸,直至分解失效以及表面膜的化学反应都产生作用^[2,19,20,31,225]。

轧制热包括两个部分,其一是摩擦产生的热,其二是轧件不均匀塑性变形产生的热。在轧制区,轧辊和轧件表面温度梯度很大,热平衡的计算变得非常复杂。Robert^[21]、Tseng^[22]、Cerni^[23]和Wilson^[17]先后给出钢铁和铝冷轧变形区平衡温度的近似计算公式。

轧制区温度的测量是一件非常困难的工作。Belansky 和 Peek^[27]用两个线刷(一个是铁的,一个是康铜)紧靠在轧辊的表面测量了热轧轧辊的表面温度。该方法的不足之处是温度的标定困难,且测量的是轧制区的平均温度。Kannel 和 Dow^[28]在轧辊表面沉淀一层很薄很窄的钛带,利用钛带在不同温度条件下电阻的变化来测量轧辊温度。最常用于测量轧制区温度的方法是在轧辊辊面上钻孔安装热电偶的方法。该方法在实验室得到广泛应用,但在工业现场,由于投资太大,很少采用。

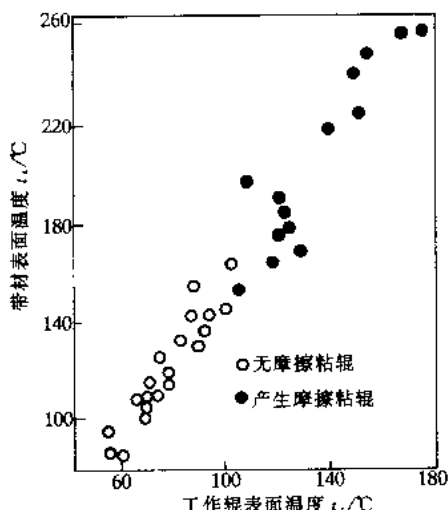


图 1-2 轧辊及带材表面温度与不发生轧痕的关系

Jeswiet 和 Rice^[29]实测工业纯铝冷轧时的轧制区最大温升约

为 120℃。据 H. Tamura^[30]等人报道,在冷轧铁薄板时,当轧件表面温度高于 140℃时,则发生轧痕或粘辊,这同润滑膜破裂的临界温度有很好的一致性。实际测量的最高表面轧辊平均温度达 180℃,如图 1-2 所示。

1.5 摩擦润滑对轧材表面形貌和表面组织状态的影响

一般轧辊表面粗糙度的优劣取决于粗糙度与油膜厚度的比率,取决于润滑剂的流变特性以及在轧辊表面的流动方向^[2]。在混合膜润滑方式中,较粗糙的轧辊产生更多的边界接触,因而轧制力较大^[32],Shibata 等人使用表面粗糙度 R_a 为 1.6 μm 和 0.3 μm 的轧辊,在相同润滑油,相同压下量条件下,前者所需的轧制力是后者的两倍。Sato 等人^[33]发现摩擦系数 μ 随着 h/R_t (必要的膜厚比)的增加而增加(R_t 为峰到谷的高度)。

利用流体润滑进行工业性轧制生产,油膜厚度随着粘度或随着轧制速度的增加而增加。Schey 和 Arthur^[34]轧制铜带时,使用镜面轧辊($R_a=0.1\mu\text{m}$),轧制速度从 3m/min 加速到 100m/min,摩擦系数从 0.056 降到 0.039。而使用毛面的轧辊($R_a=0.5\mu\text{m}$)时,以同样轧制速度,摩擦系数从 0.08 降至 0.048。使用粗糙度大的轧辊,采取增加轧制速度的方法来减少摩擦系数更显著。

轧制易于产生粘辊的材料时,表面粗糙度微小的增加将引起轧制力和前滑的较大增加^[34,35]。然而,由于铜带轧制时,这种粘辊是不会累积的^[2],因此,在边界区占优势时,表面粗糙度的作用也最普遍,随着轧辊的磨损变得更加光滑,在相同的压下制度时,轧制力将减小,压下率增加^[36]。

当润滑油膜接近破裂时,较粗糙的轧辊有助于防止粘辊和轧痕,在铜^[37]、铝^[38]和不锈钢^[33]轧制中均有相同的作用。

在缺乏润滑剂情况下,带材原始精整表面而迅速消失,微凸体很快压平,凹谷在 10%的压下量下便消失^[39]。当存在液体润滑时,表面精整的作用也许是次要的^[33,222]。Atala 和 Rowe^[39]在浓润滑剂

润滑试验中,发现带材表面的凸峰很快被压平,但凹谷一直保存到压下量为 40%才消失。Thomson^[38]在铝带轧制中也观察到类似现象。Backmann^[40]发现这种改善对较软碳钢的作用比硬化后的不锈钢显著。

入口带材表面的精整程度影响被带入轧制区的油量,最后导致一个较粗糙的表面^[2]。在流体动压润滑占优势的区域,变形是通过润滑剂的液垫而发生的,并由此产生明显粗糙的表面^[41~45]。如果存在硬的氧化膜(例如铝合金),润滑液膜可以使得氧化膜破裂,并随着 ηv 和变形程度的增加,这种破裂将扩展到一个较大的区域^[44]。

整个轧件在均匀变形过程中,必须经过相同形状变化。但是个别晶粒由于晶轴的取向和周围晶粒的约束,它的变形也会不同^[219]。在容易剪切方向的晶粒定向变形要早,因而形成储存润滑剂的凹槽和使表面变得粗糙^[45,223~224]。

当液膜厚度足以完全分离轧辊与轧件表面时,表面粗糙度应该同自由变形的情况一样。具有等轴晶结构的退火材料将产生一个无方向性的表面粗糙度。Tokizawa^[42]发现在面心立方和体心立方金属(Cu、Al、Fe)中的单个独立空穴(Pocket)相当于单个晶粒;在密排六方金属(Mg、Zn)中,单独的空穴扩展到几个晶粒;在两相材料中,空穴首先在软相或在硬粒子之间的软区中扩展^[46]。在压缩膜的情况下,空穴保持等轴^[47,48],但是在高压下量下被拉长或破裂。在具有织构的材料中,空穴可反映结构特征,当界面垂直于晶准线时,空穴也将是接近等轴的,但是当界面平行于晶准线时,空穴将被拉得更长^[2]。在大变形条件下,其横向特征占优势^[43,48,49]。

粗糙表面有助于将润滑剂带入变形区。被带入变形区的润滑剂在压力的作用下,在粗糙表面产生微 PHD 润滑作用。在成形过程和局部滑移条件下,这种作用是重要的^[51,224]。表面粗糙度有助于在变形区保留固态和半固态润滑剂,也有助于固体润滑剂的传输^[30]。

当两固体表面接触粘附后,如果粘附键能大于某一固体的内聚能,相对运动时的粘附磨损将表现为低内聚能的固体物质向另一固体表面转移^[52],表面的化学状态是影响磨损的本质因素^[53]。

随着界面温度的升高,非金属元素在金属表面的偏析降低了金属表面的自由电子数密度,它将使粘附键能降低,即粘附强度下降。一般来说,如果偏析导致一个下降的表面能,则发生偏析。

表面变形(尤其是塑性变形)是摩擦磨损机理中的重要问题之一。不言而喻,这是一个相当复杂的问题,正是因为如此,以往多半是在弹性状态下分析摩擦层的受力与变形。有些学者甚至认为,摩擦表层塑性变形的复杂性的原因是现阶段科学技术还不能掌握其规律性^[57]。塑性变形是接触状态、摩擦类型的一个标志。塑性变形的分布,反映了摩擦表面的受力特点,也影响摩擦表面的组织变化和断裂破坏的规律。例如当压力为 125MPa 时,钢的摩擦表面产生塑性变形超过 25%,而对同一材料在静压情况下产生同样的变形就需 600~700MPa^[58]。可见,表面局部变形以及与此相关的强化效果比整体的变形大得多。摩擦表面的表层(10~100nm)塑性变形使组织呈现方向性,摩擦表面的塑性变形是不连续的、反复发生的。

摩擦本身也会导致大加工量的薄微粉化表面层^[55],变形过程也许还会导致材料的冶金特性变化^[56]。

铜带轧制表面的摩擦状态具有其自身的特点,其表面作用的次数往往是 1 次,2 次或数次。在铜带轧制过程中,上述摩擦表面的特征是否出现,是否显著,是否会有其他特点,有待进一步研究和探讨。

1.6 功能液及其加工表面的摩擦化学特征

在实际应用中,需要一种功能液以满足几种不同的功能,有一些需要也许是相互矛盾、相互排斥的。因此功能液的选择应综合考虑,否则只能为满足某种特殊要求而进行选择^[2,60,64,65,83]。