

轧制工艺润滑

原理、技术与应用

(第2版)

孙建林 著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

轧制工艺润滑原理、技术与应用

(第2版)

孙建林 著

北 京
冶金工业出版社
2010

内 容 简 介

本书将轧制原理与工艺和润滑原理与效果紧密结合起来,论述了轧制工艺润滑理论体系、相关技术和应用领域,详细阐述了轧制过程中摩擦、磨损与润滑的相互关系,论述了轧制工艺润滑剂的成分类型、作用机理以及对轧制过程的影响,包括最新的轧制润滑理论,如混合润滑、边界润滑和轧制表面粗糙化,以期指导工艺润滑剂的正确使用和保证工艺润滑效果。书中列举了工艺润滑技术在钢铁和有色金属轧制生产中的应用以及存在的问题和解决措施。另外,还介绍了工艺润滑系统的循环过滤及环境保护问题。本书力图反映 20 多年来轧制工艺润滑研究的新成果、新技术和新领域,以促进工艺润滑技术在轧制过程中的应用。

本书可供从事工艺润滑剂研究与应用的技术人员以及从事金属板带材生产的技术人员阅读或作为培训教材,同时也可以作为高等院校冶金、机械、材料加工、石油化工等专业的本科生、研究生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

轧制工艺润滑原理、技术与应用/孙建林著.

—2 版. —北京:冶金工业出版社,2010. 3

ISBN 978-7-5024-5187-5

I. ①轧… II. ①孙… III. ①轧制—润滑

IV. ①TG335

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 037192 号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 postmaster@cnmip.com.cn

组稿编辑 张 卫

责任编辑 李 梅 美术编辑 李 新 版式设计 孙跃红

责任校对 侯 珊 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-5187-5

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

2004 年 1 月第 1 版,2010 年 3 月第 2 版,2010 年 3 月第 2 次印刷

787 mm × 1092 mm 1/16;16.5 印张;393 千字;247 页;4001-6500 册

49.00 元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

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

(本书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

●●●●● 第2版前言

《轧制工艺润滑原理、技术与应用》(第1版)自2004年1月出版以来,受到广大同行的关注和读者的好评。在过去的6年里我国的钢铁工业和有色金属工业得到飞速发展,2008年中国钢铁产量达到5.8亿吨,铜铝材产量达到2200万吨。2009年国务院出台了“钢铁产业调整和振兴规划”和“有色金属产业调整和振兴规划”,进一步明确了企业技术进步与生产节能减排的任务,加快钢铁产业和有色金属产业由大到强的转变。为此,在2009年之初受冶金工业出版社之托开始了本书第2版的编写工作。

《轧制工艺润滑原理、技术与应用》(第2版)除了对第1版的内容进行了认真的修改外,补充了第2章的连续轧制、第3章的冷轧板带钢生产工艺、第4章的乳化液和第6章的金属轧制表面塑性粗糙化理论等相关内容,使工艺润滑紧密结合最新的轧制技术发展。同时针对第1版在教学、科研特别是企业技术培训中的使用情况和读者的要求,增加了板带钢轧制工艺润滑的应用、钢管轧制工艺润滑和铜、铝轧制工艺润滑以及CSP热轧工艺润滑系统等方面内容,以期为轧制生产服务,解决实际问题。

由于时间仓促,不足之处在所难免,恳请读者批评指正,以便不断补充和修改。

最后还要感谢北京科技大学谢建新教授、康永林教授、刘雅正教授和袁康教授及本研究室的其他同仁在第2版修改、撰写和定稿中给予的指导和帮助。

孙建林
2010年1月

第1版前言

作为金属塑性加工摩擦学的一个重要组成部分,轧制过程摩擦、磨损与润滑问题也是金属轧制理论与实践的基本研究课题。在金属轧制过程中采用工艺润滑可以有效地减小摩擦、降低轧制压力、控制磨损和改善轧材表面质量,符合当前冶金企业节能降耗、清洁生产及保护环境的发展方向。以钢铁生产为例:采用轧制工艺润滑后,吨钢能耗可降低5%~10%;金属损耗减少15%~20%;表面缺陷率降低30%~50%;成材率提高0.5%~1.0%;同时还能够降低酸液消耗与冷却水消耗。2003年中国钢铁产量达到2亿吨,铜铝加工材600万吨。可以预见,开展轧制工艺润滑的研究与应用工作其效果是巨大的。

据中国机械工程学会统计,在冶金企业开展摩擦、磨损及润滑的研究与应用工作的投入产出比为1:76。这其中有20%的收益只需要普及和应用现有的摩擦、磨损及润滑理论与技术就可获得。为此在作者1992年编写的《塑性加工摩擦与润滑》讲义与2002年编写的《材料成型摩擦与润滑》讲义的基础上,结合10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的科研工作,着重从轧制原理及工艺和工艺润滑剂使用与管理两方面相结合的角度论述轧制工艺润滑理论及应用。

为此,结合金属轧制过程中的摩擦、磨损、工艺润滑等摩擦学相关问题,论述了轧制工艺润滑剂基本类型、作用机理以及对轧制过程的影响,包括最新的轧制润滑理论,如混合润滑和边界润滑,以期指导工艺润滑剂的正确使用和保证轧制工艺润滑效果。针对国内外金属轧制生产工艺现状,阐述了工艺润滑理论与技术在板带钢及有色金属轧制生产中的应用。另外还涉及工艺润滑系统的循环过滤及环境保护问题。本书力图反映近二十年来轧制工艺润滑的最新研究成果和最新技术,促进工艺润滑技术在轧制生产中的应用,以达到提高轧制产品质量、节能降耗的目的。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。

由于编者水平有限和时间仓促,不足之处在所难免,恳请读者批评指正,今后准备不断补充和修改。

最后还要感谢在本书撰写过程中给予指导和支持的北京科技大学胡正寰院士、康永林教授、谢建新教授及本研究室的其他同仁的帮助。

孙建林
2004年1月

目 录

1 绪论	1
1.1 轧制过程摩擦磨损特点	2
1.1.1 轧制过程摩擦的特点	2
1.1.2 影响摩擦的因素	4
1.1.3 轧制过程中的磨损	6
1.1.4 影响磨损的因素	7
1.2 轧制过程工艺润滑的作用	9
1.2.1 轧制工艺润滑的发展过程	9
1.2.2 轧制工艺润滑的作用	10
1.3 轧制工艺润滑与节能环保	11
1.3.1 节能降耗	12
1.3.2 环境保护	12
参考文献	13
2 板带材轧制原理	14
2.1 轧制变形区及相关参数	14
2.2 轧制过程的轧件咬入与稳定轧制	15
2.2.1 轧件咬入条件	16
2.2.2 稳定轧制	17
2.2.3 改善咬入的措施	18
2.3 轧制过程的金属变形	18
2.3.1 前滑与后滑	18
2.3.2 前滑的计算及影响因素	19
2.3.3 宽展及影响因素	20
2.4 轧制压力、轧制力矩和功率	21
2.4.1 轧制压力	21
2.4.2 摩擦对轧制压力的影响	22
2.4.3 最小可轧厚度	24
2.4.4 轧制力矩与主电机功率	25
2.5 连续轧制	27
2.5.1 连轧基本特征	27

2.5.2 摩擦对连轧稳定性的影响	29
参考文献	29
3 轧制产品与工艺	30
3.1 轧制产品品种、用途与技术要求	30
3.1.1 板带钢产品	30
3.1.2 有色金属及其合金	31
3.2 热轧板带钢及工艺	33
3.2.1 中厚板热轧工艺	33
3.2.2 薄板带热轧工艺	35
3.3 冷轧板带钢及工艺	38
3.3.1 冷轧工艺特点	38
3.3.2 冷轧工艺过程	39
3.3.3 典型板带钢冷轧工艺	40
3.4 有色金属板带箔材生产	42
3.4.1 铸锭	42
3.4.2 热轧	42
3.4.3 冷轧	43
3.4.4 坯料与产品热处理	43
3.5 板带材轧机	45
3.5.1 板带材轧机的类型	46
3.5.2 新型轧机	48
参考文献	49
4 轧制工艺润滑剂	50
4.1 轧制工艺润滑剂的基本功能	50
4.2 油基润滑剂	51
4.2.1 矿物油	51
4.2.2 动植物油	53
4.2.3 合成油	53
4.3 乳化液	54
4.3.1 乳化剂	54
4.3.2 乳化液的组成	56
4.3.3 乳化液的制备	56
4.3.4 乳化液的使用性能	58
4.4 固体润滑剂	59
4.4.1 石墨	59
4.4.2 二硫化钼	60
4.4.3 其他固体润滑剂	60

4.4.4 固体纳米粒子	60
4.5 润滑剂的理化性能及其评价	61
4.5.1 黏度	61
4.5.2 密度	62
4.5.3 闪点	62
4.5.4 倾点与凝点	62
4.5.5 馏程	63
4.5.6 酸值	63
4.5.7 碘值	63
4.5.8 水溶性酸碱	64
4.5.9 皂化值	64
4.5.10 水分	64
4.5.11 灰分	65
4.5.12 残炭	65
4.5.13 机械杂质	65
4.5.14 硫含量	65
4.5.15 芳烃含量	65
4.5.16 腐蚀性	65
4.6 润滑剂的流变	66
4.6.1 润滑油黏度与压力的关系	66
4.6.2 润滑油黏度与温度的关系	67
4.6.3 润滑油密度与压力、温度的关系	69
参考文献	70
5 轧制工艺润滑剂中添加剂	71
5.1 添加剂的分类	71
5.2 添加剂的作用机理	73
5.2.1 抗氧剂	73
5.2.2 油性剂	73
5.2.3 极压剂	74
5.2.4 防锈剂	75
5.2.5 清净分散剂	75
5.2.6 防腐杀菌剂	76
5.3 添加剂的作用效果及影响因素	76
5.3.1 温度影响	76
5.3.2 添加剂类型	76
5.4 轧制工艺润滑剂常用添加剂	79
5.4.1 轧制乳化液	79
5.4.2 轧制油	80

5.4.3 添加剂分析与测定	82
5.5 环境友好润滑剂	82
5.5.1 清洁生产	82
5.5.2 环境友好润滑剂	83
参考文献	84
6 工艺润滑理论	85
6.1 轧制润滑状态	85
6.1.1 流体润滑	86
6.1.2 混合润滑	87
6.1.3 边界润滑	87
6.1.4 润滑状态的判别	87
6.2 流体润滑	89
6.2.1 轧制变形区分析	90
6.2.2 模型计算与分析	92
6.2.3 实验结果	93
6.3 混合润滑	93
6.3.1 平均流动方程	93
6.3.2 轧制混合因子的提出	95
6.3.3 入口膜厚计算与实验结果分析	96
6.3.4 混合润滑变形区	97
6.4 边界润滑	108
6.4.1 边界吸附膜的形成	108
6.4.2 边界润滑模型	109
6.4.3 吸附膜的润滑作用机理	110
6.5 润滑轧制金属表面塑性粗糙化	113
6.5.1 金属变形与表面粗糙化	114
6.5.2 润滑轧制时表面粗糙化	115
6.5.3 轧制过程表面粗糙化的控制	116
参考文献	118
7 钢轧制工艺润滑应用	122
7.1 板带钢热轧工艺润滑	122
7.1.1 热轧工艺润滑的主要作用	122
7.1.2 热轧工艺润滑机理	123
7.1.3 热轧工艺润滑剂	126
7.1.4 热轧工艺润滑对力能参数的影响	128
7.1.5 工艺润滑对带钢表面质量的影响	130
7.1.6 工艺润滑对轧辊磨损的影响	133

7.1.7 热轧工艺润滑应用实例	136
7.2 板带钢冷轧工艺润滑	139
7.2.1 冷轧工艺润滑剂	140
7.2.2 冷轧乳化液特征	141
7.2.3 冷轧表面质量	146
7.2.4 冷轧工艺润滑的应用	151
7.3 钢管热轧工艺润滑	153
7.3.1 现代热轧钢管的工艺流程	153
7.3.2 钢管热轧润滑剂特征与类型	153
7.3.3 钢管热轧工艺润滑剂	154
7.3.4 热轧钢管润滑方式	155
7.3.5 影响润滑性能的因素	157
7.4 不锈钢轧制工艺润滑	158
7.4.1 不锈钢生产技术的发展	158
7.4.2 不锈钢轧制工艺特点	159
7.4.3 工艺润滑的作用与要求	159
7.4.4 不锈钢轧制油	161
7.4.5 不锈钢轧制工艺润滑应用	162
参考文献	164
8 有色金属板带箔轧制工艺润滑	166
8.1 铝材热轧工艺润滑	166
8.1.1 热轧乳化液	166
8.1.2 热轧乳化液的应用技术	167
8.1.3 热连轧工艺润滑	168
8.1.4 铸轧润滑剂	170
8.2 铝板带冷轧工艺润滑	171
8.2.1 轧制油	171
8.2.2 添加剂	174
8.2.3 影响冷轧润滑效果的因素	175
8.3 铝箔冷轧工艺润滑	179
8.3.1 铝箔轧制油	180
8.3.2 铝箔轧制润滑效果评价	181
8.3.3 退火工艺与表面质量	186
8.3.4 双合轧制与双合油	189
8.4 铜及其合金轧制工艺润滑	189
8.4.1 铜板带热轧润滑	189
8.4.2 铜板带冷轧润滑	190
8.5 钛及其他稀有金属轧制润滑	193

参考文献	194
9 工艺润滑系统装置与润滑剂管理	196
9.1 热轧工艺润滑系统	196
9.1.1 油水预搅拌混合法	197
9.1.2 蒸汽雾化混合法	197
9.1.3 直接注入法	198
9.1.4 油水在管路中直接混合法	198
9.1.5 CSP 热轧工艺润滑系统	200
9.2 冷轧工艺润滑系统	203
9.2.1 乳化液系统	203
9.2.2 轧制油的循环系统	207
9.3 润滑剂的维护与管理	211
9.3.1 轧制油使用管理	211
9.3.2 轧制油火灾预防	212
9.3.3 乳化液管理	213
9.3.4 常见的轧制生产故障及处理	216
9.4 环境保护	217
9.4.1 润滑剂的毒性与防护	217
9.4.2 废油处理	219
9.4.3 乳化液废液处理	220
参考文献	221
10 工艺润滑剂与轧制润滑效果的评价方法	222
10.1 摩擦磨损试验机	222
10.1.1 四球摩擦试验机	223
10.1.2 梯姆肯磨损润滑试验机	224
10.1.3 法莱克斯摩擦磨损试验机	224
10.1.4 MM-200 磨损试验机	225
10.2 模拟实验	226
10.2.1 物理模拟	226
10.2.2 数值模拟	227
10.3 轧制工艺性能评价	228
10.3.1 轧制变形区摩擦系数	229
10.3.2 油膜厚度	231
10.3.3 轧制压力与力矩	232
10.3.4 轧制道次	233
10.3.5 最小可轧厚度	234
10.4 轧后板带材表面质量	234

10.4.1 板形	234
10.4.2 表面粗糙度与表面形貌	235
10.4.3 轧制油退火表面污染	237
10.5 轧制油润滑效果综合评价	238
10.5.1 层次分析法评判的基本步骤	238
10.5.2 AHP 法对铝材轧制油润滑效果的综合评价	240
参考文献	243
术语索引	244

1 绪 论

轧制是在轧机旋转的轧辊之间改变金属的断面形状与尺寸,同时控制其组织状态和性能的金属塑性加工方法。轧制是金属发生连续塑性变形的过程,其生产效率高,因此是应用最广泛的塑性加工方法。轧制产品占有塑性加工产品的90%以上。钢铁、有色金属、某些稀有金属以及它们的合金均可以采用轧制进行加工。轧制除能改变金属形状及尺寸外,还可以改善铸锭和连铸坯的初始铸态组织,细化晶粒,改善相的组成和分布状态,因而能提高产品性能。

按照轧辊的配置方式和旋转方向、轧件的运动方式以及产品的形状,轧制方式主要有纵轧、横轧和斜轧。根据轧制过程中金属的加工硬化、回复和再结晶的程度不同,轧制分为热轧、冷轧和温轧。

按轧制品种不同,轧制可分为坯料轧制(初轧)、板带箔材轧制(板带箔材生产)、型材和线材轧制(型材和线材生产)、管材轧制(管材生产)以及特殊形状材的轧制,如周期断面轧制、车轮轮箍轧制等。按轧机的分布形式,板带材轧制分为单机架、双机架、半连续式和连续式轧制。型钢和线材轧制可分为一列式、二列式、多列式、顺列跟踪式、棋盘式、半连续式和连续式轧制(型材轧机)。

轧制是冶金企业生产钢材和有色金属材的主要加工方法。钢材轧制生产系统见图1-1。系统的主要产品包括厚钢板、带钢、薄板、镀锌和镀锡板等,常用型钢如方钢、圆钢、扁钢、角钢、工字钢、槽钢等;专用型钢如钢轨、钢桩、球扁钢、窗框钢等,以及异形断面型钢、周期断面或特殊断面型钢;钢管包括圆管及部分异形钢管及变断面管。有色金属材主要有板、带、箔材及各种管、棒、型、线材。

由于轧制过程轧件是通过与轧辊之间的摩擦曳入辊缝的,摩擦既是保证轧制过程顺利进行的条件,同时摩擦又导致轧制压力增加,轧辊磨损加剧,并恶化轧后制品的表面质量,因此必须采用工艺润滑。

就金属轧制生产与技术而言,近年来主要呈现以下发展趋势:

- (1) 轧制理论与技术研究取得明显进步,并在轧制生产中迅速得到应用;
- (2) 轧制生产过程连续化、自动化、高速化以及专业化和灵活化;
- (3) 薄板坯连铸连轧与薄带铸轧技术广泛应用;
- (4) 板厚、板宽与板形控制技术进一步发展;
- (5) 轧制过程组织性能预测与控制技术开始实际应用;
- (6) 轧制过程表面质量、组织性能与尺寸形状的在线检测与控制;
- (7) 新一代控轧控冷技术取得了突破性进展;
- (8) 轧制过程环保和高效减摩、抗磨与润滑技术日益成熟;
- (9) 轧制生产节能降耗、清洁生产技术受到广泛重视和应用;

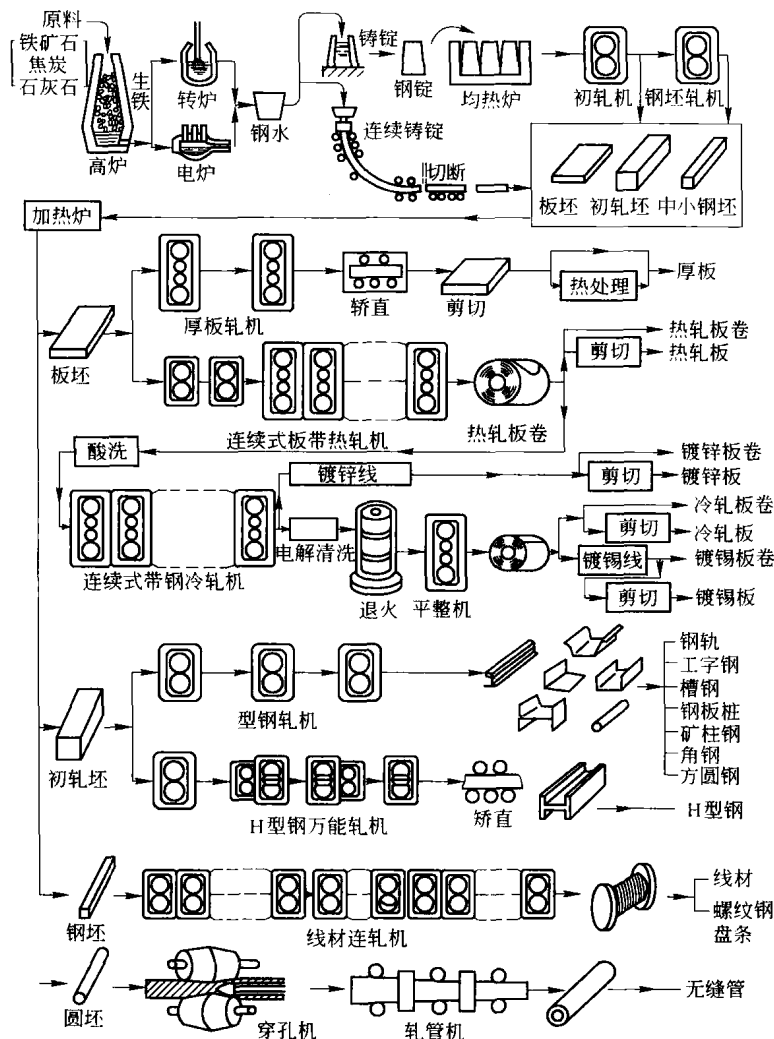


图 1-1 钢材轧制生产系统

(10) 不断扩大轧材品种规格,增加板带和管的产品比重。

轧制工艺润滑技术符合上述金属轧制生产与技术发展要求,特别是与当前轧制生产节能环保、清洁生产密切相关,具有广泛的应用前景。

1.1 轧制过程摩擦磨损特点

上述轧制过程具有一个共同特点,就是在轧制过程中通过轧辊与轧件的接触,使轧件发生塑性变形。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轧制力增加,轧制能耗增大,轧辊磨损加剧,而且有时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。

1.1.1 轧制过程摩擦的特点

轧制过程中,轧辊与轧件之间发生相对运动产生的阻碍接触表面金属质点流动的阻

力,称为摩擦阻力或外摩擦力,摩擦力方向与运动方向相反。而轧件发生塑性变形时,金属内部质点产生相对运动(滑移)引起的摩擦,叫内摩擦。固体的内摩擦是整体分子强迫运动的直接后果,这些分子在平衡状态下,间隔紧密,彼此之间显示出一种强烈的相互吸引力和排斥力。内摩擦引起金属本体内部剪切,并导致内部发热。到目前为止,对金属材料的内摩擦研究尚不够深入,资料亦很贫乏。因此,轧制过程中所论述的摩擦是指轧辊与轧件之间的外摩擦。

轧制过程中的摩擦与一般机械运动相比,因接触表面的物理性质相同,所以,研究轧制过程中的摩擦同样应建立在一般摩擦理论基础上。但是,两者又有差别,金属轧制过程的摩擦具有下述特点:

(1) 内外摩擦同时存在。在轧制过程中由于金属发生塑性变形,所以内外摩擦同时存在,相互作用,而机械运动中只有外摩擦存在。内摩擦的表现形式是产生变形热。

(2) 接触压力高。金属轧制时,接触面承受较高的接触压力。热轧时,接触单位压力达 50 ~ 500 MPa,冷轧时可达 500 ~ 2500 MPa。而运转机械中,一般重荷轴承所受压力也不过是 20 ~ 50 MPa。

(3) 影响摩擦的因素众多。接触摩擦应力是变形区内金属所处应力状态、变形几何参数以及轧制工艺条件(温度、速度、变形程度及变形方式等)的函数。例如,摩擦应力是接触面坐标点的函数,热轧时,越靠近变形区中性面处,接触摩擦应力越大;薄件比厚件的摩擦应力要大;低温时的摩擦应力一般比高温时的要大。

(4) 接触表面状况与性质不断变化。运转机械零件之间的接触属弹性变形范围。整体零件不会发生塑性变形,仅仅是因磨损而产生少量新表面。而金属轧制过程中轧件发生塑性变形,接触表面不断扩大和更新(内部质点转移至表面)。此外,表面氧化膜破坏后,金属新表面裸露,都将引起接触表面状况与组织和性能的改变。尤其在高温时金属表面迅速被氧化,例如,钢加热到 950 ~ 1160℃,铝加热到 350 ~ 650℃时,工件表面氧化,且表面各层氧化物组成(例如,钢的氧化层有 Fe_2O_3 、 Fe_3O_4 和 FeO 三种氧化物层)与性质都不一样,都会使接触摩擦应力改变。通常,高温氧化物能减少摩擦,起润滑作用,而室温氧化物性质较坚硬而脆,在变形时氧化膜破碎后,起磨粒磨削作用。冷轧时,因加工硬化,引起金属组织与性能变化,也会影响接触副摩擦状况的改变。

总之,摩擦始终存在于轧制过程中,而摩擦的作用,就像万有引力对自然界的作用一样,有时需要它,有时又尽量避免它。轧制过程中摩擦的作用是:

(1) 保证加工过程的实现。在轧制过程中,轧件之所以能曳入辊缝内轧制,发生塑性变形,就是由于后滑区摩擦力作用的结果,否则轧制无法实现自然咬入。现场生产中,为了提高产量而加大道次压下量,常常通过在热轧辊表面刻痕、点焊或者向变形区内加氧化磷等方法以增加摩擦,进行强化轧制。

(2) 改变物体应力状态,致使金属变形抗力和能量消耗增加。由于摩擦存在,轧制变性区内物体处于三向应力状态,且多为三向压应力状态,根据 Tresca-Mises 屈服准则:

无摩擦时——单向应力状态:

$$\sigma_1 = \sigma_s \quad (1-1)$$

有摩擦时——三向应力状态:

$$\sigma_1 = \beta \sigma_s + \sigma_3 \quad (1-2)$$

β ——系数, $\beta = 1 \sim 1.155$ 。

(6) 降低作业率,增加生产成本。轧辊使用寿命的减少和因磨损导致的制品质量的下降直接影响生产成本,不仅如此,轧辊的频繁更换还导致轧制生产作业率的下降。

1.1.2 影响摩擦的因素

1.1.2.1 金属种类与化学成分

研究表明,一般情况下同类金属接触的摩擦系数比不同类金属的要大;彼此间能形成合金的金属相互摩擦时,比彼此间不能形成合金或化合物的摩擦系数要大。表 1-1 表示无润滑条件下,一些纯金属接触时的理论摩擦系数。

表 1-1 纯金属接触时的理论摩擦系数

[illegible]

然而在轧制过程中实际表面之间的摩擦系数远远小于纯金属表面之间的摩擦系数。因为实际表面性质和状况发生变化,因而摩擦条件也发生变化,如由黏着摩擦转变为滑动摩擦,会导致摩擦系数的降低。

即使同种材料,当化学成分变化时,表现出的摩擦系数也存在差异,如随钢中碳含量增加,摩擦系数下降。一般认为:随着合金元素增加,摩擦系数下降,但不锈钢的摩擦系数几乎比碳钢的高 1.3 ~ 1.5 倍。

1.1.2.2 轧辊材质与表面状况

铸铁辊的摩擦系数比钢辊的摩擦系数要低,而未淬火钢的摩擦系数比淬火钢的摩擦系数要高。另外,使用硬质合金轧辊的摩擦系数比合金钢的摩擦系数降低 10% ~ 20%,而使用金属陶瓷轧辊的摩擦系数又比硬质合金轧辊低 10% ~ 20%。一般情况,轧辊硬度愈高,摩擦系数愈小。同样,随着钢中碳含量增加,钢的硬度也相应增加,摩擦系数明显降低。

轧辊表面粗糙度对摩擦系数也有较大的影响。一般情况下表面愈粗糙,摩擦系数愈高,例如,淬火钢辊表面粗糙度由 $0.4\ \mu\text{m}$ 减少到 $0.2\ \mu\text{m}$ 时,摩擦系数则由 0.26 降低到 0.20。

1.1.2.3 界面膜

如表 1-1 所示,材料处于真空中而表面又没有吸附膜存在时,其摩擦系数是很高的。而当金属表面暴露在空气中时,与周围介质接触,如氧气、水、二氧化碳、油烟,在金属表面形成吸附膜,特别是在加热过程中形成氧化膜,进而导致摩擦系数的变化。在热轧过程中,氧化膜的性质与厚度都会影响轧制过程的摩擦。

除金(Au)外,氧对所有金属都能起化学反应,生成各种金属氧化膜。氧化膜的存在能防止金属进一步氧化。金属及其合金的氧化与金属本身的组成和所处的环境有关。其中以钢的氧化更为复杂,金属表面由外向里存在三种氧化铁层: Fe_2O_3 、 Fe_3O_4 、 FeO 。加热温度和时间对氧化铁的形成过程有很大影响,温度在 $850\sim 900^\circ\text{C}$ 以下,氧化速度很小,在 1000°C 以上急剧上升,而加热温度超过 1300°C 时氧化速度大大增加。在同一温度下,随着时间的增加,氧化速度逐渐减慢,但氧化铁生成的绝对量还是越来越多。此外,当温度不同时,氧化铁层的构成也有变化。温度低于 700°C 时,氧化铁层主要由 FeO (内层)和 Fe_3O_4 (外层)组成;温度在 $700\sim 900^\circ\text{C}$ 范围时,氧化铁层仍为 Fe_3O_4 和 FeO ,其中后者约占 90%;当温度增至 900°C 以上时,钢表面氧化覆层由 Fe_2O_3 (外层)、 Fe_3O_4 (中层)和 FeO (内层)所组成,此三种氧化物性质有很大不同,如表 1-2 所示。由于 FeO 质软,疏松多孔,热轧过程中能够起到减小摩擦的作用,而 Fe_2O_3 和 Fe_3O_4 由于坚硬致密,熔点高,所以不但无减摩作用,反而还增加了轧制过程的摩擦磨损。

表 1-2 氧化铁的性质

氧化产物	熔点/ $^\circ\text{C}$	硬度 HV	性 质
FeO	1377	270 ~ 350	疏松多孔,质软
Fe_3O_4	1538	420 ~ 500	致密较硬
Fe_2O_3	1560	1030	致密坚硬

由以上可见,金属氧化物由于其组成与性质不同,其减摩作用效果不同,有时还会增加摩擦,增大磨损。如果氧化膜起润滑作用,应具备下述性能:

(1) 氧化膜必须具有一定厚度,而且是连续的膜。氧化膜厚能够阻碍金属表面凸峰的