

现代轧制技术丛书

ZHAZHI RUNHUA JISHU

轧制润滑技术

关小军 主编



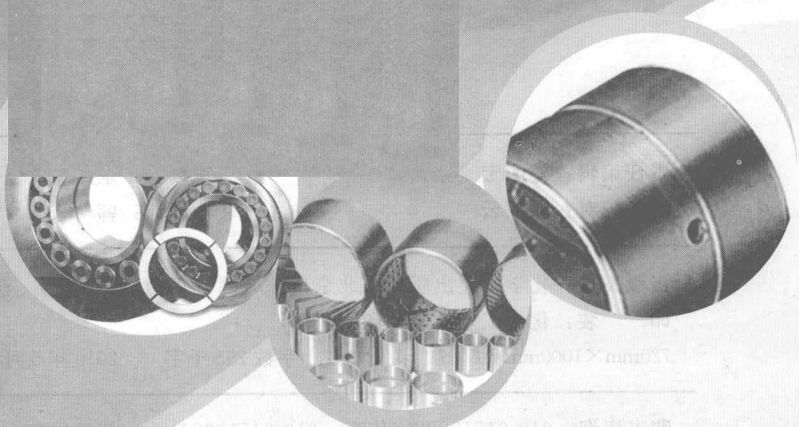
化学工业出版社

现代轧制技术丛书

ZHAZHI RUNHUA JISHU

轧制润滑技术

关小军 主编



化学工业出版社

冶金工业出版社

· 北京 ·

定价 90.00 元

图书在版编目 (CIP) 数据

轧制润滑技术/关小军主编. —北京: 化学工业出版社,
2010. 5

(现代轧制技术丛书)

ISBN 978-7-122-08023-3

I. 轧… II. 关… III. 轧制-润滑 IV. TG335

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 048684 号

责任编辑: 刘丽宏 张兴辉

文字编辑: 余纪军

责任校对: 顾淑云

装帧设计: 韩 飞

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 装: 化学工业出版社印刷厂

720mm×1000mm 1/16 印张 15 $\frac{3}{4}$ 字数 295 千字 2010 年 5 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 58.00 元

版权所有 违者必究

序

在钢铁工业生产中，轧钢工业的出现是现代工业革命的产物，轧钢工业和技术的发展历史也仅百余年。在一百年来冶金工业的发展中，高效能的轧钢工业和技术使得轧钢始终是钢铁工业中钢材成型的主要方式。由于轧钢过程是连续、可测和可控的高效变形过程，所以轧钢技术的进步之大，在钢铁工业中始终名列前茅，如计算机的应用，连续化的实现等。在用高新技术改造钢铁传统产业中，信息化和智能化管理及控制的轧钢厂已经出现。尽管钢材生产面临着市场竞争和可持续发展的挑战，但在可以预见的未来年代里，钢铁仍然是全球的主要基础原材料，轧钢仍将是钢材成型的支柱技术，将对全球（特别是发展中国家）经济发展和社会文明进步起到基础性支持作用。

近年来，轧钢生产中应用了大量高新技术适应日趋激烈的产品竞争，如薄板坯连铸连轧技术等均是 20 世纪 80 年代以来国际上出现的短流程生产技术，它们代表了轧钢发展的新方向。板带生产中，板厚控制技术已被人们所掌握，板形控制技术日臻成熟。型钢生产中，精密轧制、无头轧制和各种零件直接轧制技术的研究日益活跃，冷弯型钢生产等钢材深加工技术也取得长足的进步。钢管生产中，限动芯棒连轧管技术成为主流，AccuRoll 成形技术、六辊式轧管机大大减小了变形不均匀性；高速线材生产实现了高速、连续、无扭和微张力轧制，斯太尔摩轧后控冷技术进一步提高了高速线材生产效率和产品精度。为了开发高新功能轧材，异类金属的多层复合和粉末复合轧制技术与理论研究也受到高度重视。

高新技术的应用使轧钢生产在提高质量、降低成本和增加品种等方面都有了突飞猛进的发展，但同时也出现了一些新的技术难题，如薄板坯连铸连轧工艺还没有达到传统生产的质量水平，生产的钢种受到限制；热轧板带的组织性能预报与控制 and 型线、管材变形特性等方面都有待进一步研究。而传统的轧制理论则需要有新的发展和进步才能适应新技术发展的需要。

目前，轧钢工艺和理论的发展呈现出新的发展趋势和特点。首先是与力学、数学和计算机科学形成密不可分的交叉体系。力学的研究从独立的力学分析到热、磁、电、化学作用的综合分析，从宏观力学深入到细观和微观领域。近代数学的定性理论和非线性理论的成就，使力学研究层次和精确性都

提高到一个新水平。计算机科学的发展使力学和数学成就在轧制过程中得以更加有效的应用。其次是将系统学引入轧制理论。轧制生产是一个由物理冶金、化学冶金、机械加工和自动控制等环节组成的复杂生产系统，整个系统的优化既需要引入系统工程学的方法，建立合理的模型描述，又要发展可靠而高效的计算方法。轧钢工艺和理论的发展需要借助高速信息技术、自动控制技术与现代化实验手段，与金属物理、热力学、金属学、力学、数学和计算机科学等领域紧密结合、互相促进，才能有更加广阔的发展前景。

历经百年的轧钢工业和技术，在进入 21 世纪以后，正因得到高新技术的改造而继续发展。以热轧为特征的连续变形轧钢技术，在可预见的未来仍将是钢铁工业钢材成型的支柱技术，地位不会动摇，热轧技术的本质不会改变。轧钢工序的各种连续化生产流程将继续得到发展，周期性和间歇性的生产流程将加速淘汰。钢的性能潜力将通过工艺过程控制优化而得到充分发挥。高新技术的应用成为必然的发展途径。竞争的要求和技术发展，必然会使轧钢工业实现高速度、快节奏的技术开发和成果转化。

展望 21 世纪，钢铁工业将面临更加激烈的竞争。但轧钢仍是钢材成型的支柱技术，对世界经济发展和文明起基础性支持作用。21 世纪轧钢技术进步将集中于生产工艺流程的连续化、紧凑化，过程控制将实现轧材性能的高品质化、品种规格多样化及控制和管理的计算机化和信息化。21 世纪对轧钢工业和技术将是光明的，高新技术的注入将改变轧钢工业和技术的面貌。

近年来，我国冶金行业的广大工程技术人员通过消化引进技术、科学研究、设计、生产等实践活动，积累了丰富的经验。但是长期以来，轧钢行业技术资料的总结提高等工作难以很好地满足技术发展需求，也未能系统地反映所取得的成就。随着工程技术人员的新老交替，轧钢及相关行业工程技术人员都迫切需要一套相对系统、科学、先进、全面地反映现代轧制技术最新进展的理论性和技术性丛书来指导自己的工作。中国金属学会青年委员会和北京机械工程学会组织编写了这套《现代轧制技术丛书》：力求反映我国轧钢工业生产和技术发展的实际情况，内容技术含量高，信息丰富；理论联系实际，以实践为主，突出实用性；国内外结合，突出先进性；注重科学性和系统性、代表性；可供厂矿、科研院所、大专院校有关技术和管理人员阅读。



前 言

作为一种金属塑性加工方法，轧制技术在冶金工业中得到了广泛应用。在轧制过程中，摩擦、磨损、润滑普遍存在且密切相关，特别是润滑可有效地减小摩擦，降低力能消耗，控制轧辊磨损，改善轧件表面质量和内部组织结构，已成为现代金属轧制理论和实践的基本内容。近年来，随着冶金企业向节能减排、清洁生产方式的转变，轧制润滑技术更加得到重视和发展，许多新的轧制工艺润滑剂、润滑系统、润滑装置等得到开发和应用，产生了显著的经济效益。与此同时，轧制润滑机制以及数值模拟的研究也大量进行，为轧制润滑技术的科学性提供了可靠依据，也为其未来发展奠定了充实的理论基础。

为了帮助从事轧制生产、设计、研究和管理的工程技术人员及有关人员系统了解轧制润滑技术的理论基础、基本内容、应用特点和发展状况，更好地促进其应用和发展，本书对近年来轧制润滑技术发展的应用和研究情况进行了总结。考虑到轧制作为金属塑性加工方式之一，轧制润滑技术涉及的摩擦润滑理论、工艺润滑剂基础知识与金属塑性加工完全相同，故本书在编写这些内容时未特别加以区分。

本书以润滑技术在轧制生产过程中的应用为主线，适当介绍了相关的摩擦润滑理论，力图体现实践与理论相结合的特色。在全书内容安排上，先介绍理论基础，后侧重实际应用。主要阐述了金属塑性加工摩擦学基本理论、实用轧制工艺润滑剂及其应用系统、轧制过程摩擦和润滑状态的测试方法和装置等，具体包括金属塑性加工摩擦学的产生与发展、金属塑性加工过程的摩擦与润滑、轧制工艺润滑剂、热轧工艺润滑技术、冷轧工艺润滑技术、轧制过程摩擦和润滑状态的测试等内容。

本书编写工作由山东大学材料科学与工程学院计算材料学与轧制工程研究室的八名人员共同完成，分别是：关小军（第1章，全书的内容审查与统稿）、邹菲菲（第2章）、韩振强（第3章）、屈鹏（第4章）、刘运腾（第5章）、麻晓飞（第6章）、曾庆凯（第7章）、禹宝军（全书的图表与文字校对）。中国金属学会青年委员会、中国金属学会轧钢学会和化学工业出版社对于本书编写给予了大量支持和帮助，在此衷心致谢。

希望本书的出版能够促进轧制润滑技术的应用和发展，满足冶金工业技术进步和企业发展的需求，对我国轧制理论和技术的提高有所贡献。

由于认识水平有限，书中难免存在不足之处，恳请读者批评指正。

编者

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 摩擦与润滑	1
1.1.1 摩擦、磨损与润滑	1
1.1.2 摩擦系数和摩擦力	4
1.2 摩擦对塑性加工过程的影响	6
1.2.1 对力能参数的影响	6
1.2.2 对应变和应力分布的影响	7
1.2.3 对温升的影响	8
1.2.4 对工件组织结构、性能及其质量的影响	8
1.2.5 对轧制过程的特殊影响	9
1.3 轧制工艺润滑技术的发展	10
第 2 章 金属塑性加工过程的摩擦	12
2.1 摩擦界面	12
2.1.1 接触表面形貌及其表层结构	12
2.1.2 真实接触面积	17
2.2 摩擦理论	21
2.2.1 塑性加工过程中干摩擦的特点及其机理	21
2.2.2 润滑轧制时的液体摩擦机理和特点	22
2.2.3 边界摩擦的机理和特点	26
2.2.4 混合摩擦	32
2.3 金属塑性成形和轧制过程的摩擦特点及其影响因素	32
2.3.1 金属塑性成形和轧制过程中的摩擦特点	32
2.3.2 影响摩擦的主要因素	33
第 3 章 金属塑性加工过程的润滑	36
3.1 润滑对金属塑性加工过程的影响	36
3.2 润滑类型	37
3.2.1 固体润滑	37
3.2.2 极压 (EP) 润滑	47
3.2.3 边界润滑	50
3.2.4 流体膜润滑	52
3.2.5 混合膜润滑	56

3.2.6 润滑轧制时的摩擦与润滑	56
第4章 轧制工艺润滑剂	61
4.1 轧制工艺润滑剂的基本功能、性能及其评价指标	61
4.1.1 润滑剂的基本功能	61
4.1.2 润滑剂的物理-化学性能及其评价指标	62
4.2 轧制工艺润滑剂的类型及组成	66
4.2.1 润滑剂的分类及其基本组分	66
4.2.2 矿物润滑油	71
4.2.3 动植物润滑油脂	73
4.2.4 合成润滑剂	76
4.2.5 乳化液	77
4.3 轧钢工艺润滑剂	79
4.3.1 概述	79
4.3.2 热轧工艺润滑剂	80
4.3.3 冷轧工艺润滑剂	94
4.4 轧制有色金属工艺润滑剂	108
4.4.1 润滑剂的选用、性能及其基本组分	108
4.4.2 轧铝工艺润滑剂	109
4.4.3 轧铜工艺润滑剂	120
4.4.4 轧制其他金属工艺润滑剂	127
第5章 热轧工艺润滑技术	130
5.1 热轧工艺摩擦	130
5.1.1 摩擦特征及其影响	130
5.1.2 摩擦系数近似计算	131
5.1.3 实测摩擦系数	133
5.2 热轧工艺润滑	134
5.2.1 热轧工艺润滑的作用和特征	134
5.2.2 热轧工艺润滑系统	141
5.2.3 热轧钢板工艺润滑	145
5.2.4 热轧型钢工艺润滑	157
5.2.5 热轧钢管工艺润滑	160
5.3 热轧工艺润滑对生态环境的影响及其安全生产技术	162
5.3.1 热轧工艺润滑过程的污染与环保要求	162
5.3.2 热轧工艺润滑的安全保证措施	164
第6章 冷轧工艺润滑技术	165
6.1 冷轧工艺摩擦	165
6.1.1 摩擦特征及其影响	165
6.1.2 摩擦系数近似计算	167
6.1.3 实测摩擦系数	170
6.2 冷轧工艺润滑	174
6.2.1 冷轧工艺润滑的作用和特征	174
6.2.2 冷轧工艺润滑剂供给系统	178
6.2.3 润滑剂喷射装置及其润滑和冷却方式	185

6.2.4 冷却水和润滑剂净化系统	190
6.3 冷轧工艺润滑系统	191
6.3.1 冷连轧板带机组	191
6.3.2 多辊式轧机工艺润滑系统	199
6.3.3 板带涂油系统	202
第7章 轧制过程摩擦和润滑状态的测试	207
7.1 概述	207
7.2 摩擦系数测试	208
7.2.1 最大咬入角法	208
7.2.2 轧件强迫制动法	209
7.2.3 前滑法	210
7.2.4 打滑法	213
7.2.5 扭矩法	213
7.2.6 组合法	215
7.2.7 压力法	215
7.2.8 前滑/后滑热轧摩擦测试法	216
7.2.9 压力针测量法	217
7.3 润滑效果评定	219
7.3.1 油膜厚度评定法	219
7.3.2 测试轧制变形法	220
7.3.3 轧制力法	220
7.3.4 轧辊磨损测试法	221
7.4 模拟试验	221
7.4.1 平面拉拔试验	222
7.4.2 压缩-旋转式摩擦试验	222
7.4.3 四球摩擦、磨损试验	223
7.4.4 MM型磨损试验	224
7.4.5 环块型磨损试验	225
7.5 测试方法及其结果的评价	226
7.5.1 摩擦系数测定的不唯一性	226
7.5.2 测试方法及其结果的评价	228
7.6 轧制过程数值模拟采用的摩擦模型	228
7.6.1 经典的干摩擦模型	228
7.6.2 改进的摩擦模型	231
7.6.3 润滑轧制的油膜与磨损模型	236
参考文献	239

第1章

概述

摩擦与磨损是自然界存在的两种不可分割的现象。在材料的轧制过程中,轧件与轧辊的接触表面间发生相对运动或具有相对运动趋势而产生摩擦,同时伴随了轧辊和轧件表面的磨损。一方面,摩擦保证了轧制过程正常进行,但引起了轧制力能消耗、变形特征及其规律、轧件组织结构、产品质量、生产效率等的变化。另一方面,磨损破坏了轧辊表面形貌和摩擦状态,影响了轧制过程和产品质量稳定性,降低了生产效率,增加了轧辊消耗和生产成本。因此,如何有效地降低摩擦、减少磨损成为轧制生产企业必须解决的问题。长期的实践和研究发现,润滑是降摩减磨的最有效方法。但是,欲保证轧制过程正常进行的摩擦状态又使得轧制润滑方法与传统意义的机械润滑等不同,由此产生了具有自身特点的轧制润滑技术。

众所周知,轧件和轧辊接触表面上的摩擦、润滑、磨损状态共同存在且相互影响,决定了相应的物理、化学和力学变化。因此,研究轧制过程中的摩擦、润滑和磨损现象及其规律,探求合理、有效的润滑技术已成为现代轧制理论及其技术的重要组成部分。本章主要介绍与轧制工艺有关的金属塑性加工摩擦润滑基础知识。

1.1 摩擦与润滑

1.1.1 摩擦、磨损与润滑

(1) 摩擦与摩擦力 当两个相互接触的物体在外力作用下发生相对运动或具有相对运动趋势时,接触表面之间会产生阻止其相对运动或相对运动趋势的阻力,即摩擦力。产生摩擦力的这一现象称为摩擦,这两个相互接触的物体组成了摩擦副。通常,为了与塑性加工过程中变形工件内部各部分间发生相对运动而产生的内摩擦相区别,将其又称为外摩擦。

① 干摩擦、液体摩擦和边界摩擦 根据摩擦副表面状态,摩擦可分为干摩擦、液体摩擦和边界摩擦。

干摩擦是指在两个物体相互接触的纯净表面（表面上无任何其他介质和薄膜）之间的摩擦状态，由于金属在成形过程中表面总会产生氧化膜或吸附一些气体和灰尘，真正意义的干摩擦是不存在的。因此，通常的干摩擦指不施加润滑剂的摩擦副表面的摩擦，此时摩擦力来自于摩擦副表面凸峰的机械啮合力和分子引力。

液体摩擦是指两个相对运动表面被足够厚的一层液体润滑剂膜所隔离的摩擦状态，此时摩擦力来自于润滑剂膜界面层分子间的内摩擦，主要取决于润滑剂的黏度，与接触面状态无关且无磨损产生。

边界摩擦是指两个物体相对运动表面仅被厚度为分子大小（ $<0.1\mu\text{m}$ ）的一层润滑剂膜所隔离的摩擦状态，它是介于干摩擦和液体摩擦之间的一种摩擦状态，此时摩擦力及其引起的磨损取决于摩擦副双方的表面性能和除黏度以外的润滑剂自身性能。

② 静摩擦和动摩擦 根据摩擦副的运动方式，摩擦可分为静摩擦和动摩擦。

在无相对运动而存在相对运动趋势的两个物体接触面之间的摩擦称为静摩擦，此时的运动阻力称为静摩擦力。

在发生相对运动的两个物体接触面之间的摩擦称为动摩擦，此时的运动阻力称为动摩擦力。一般情况下，静摩擦力大于动摩擦力。动摩擦又可按照相对滑动和滚动方式的不同分为滑动摩擦和滚动摩擦。通常，滚动摩擦力小于滑动摩擦力。

③ 与摩擦副材质有关的摩擦 实际上，组成摩擦副的两个物体的材质是多种多样的。摩擦副既可由相同材质的物体构成，也可由不同材质的物体构成。因此，摩擦和摩擦力也可根据摩擦副的具体材质进行分类，例如合金钢与合金钢之间的摩擦和摩擦力、高碳钢与低碳钢之间的摩擦和摩擦力等。

④ 轧制过程的摩擦 在轧制过程中，轧件和轧辊接触表面之间产生的相对运动阻力，称为轧制摩擦力。通常，轧制摩擦属于滚动摩擦。在无润滑条件下轧制时，轧件和轧辊表面被一层氧化膜和其他污染膜覆盖，属于干摩擦状态；在润滑条件下轧制时，大多属于干摩擦、边界摩擦和液体摩擦同时存在的混合摩擦状态。可见，轧制过程的摩擦状态比机械传动的摩擦状态更加复杂。

对于轧制过程而言，摩擦力既有利也有弊。一方面，它是保证轧件咬入和完成正常轧制的必要条件；另一方面，它也导致轧辊磨损和轧件表面缺陷产生，同时使得轧制变形力和变形功增加，引起金属变形不均，严重时甚至使轧件出现裂纹等缺陷。

（2）磨损 两个物体的相互接触表面上，由于相对运动而导致的物质损失现象称为磨损。磨损总是与摩擦同时发生，对塑性加工过程是有害的。

磨损可按不同方式分类。按其产生机理可分为粘着磨损、磨料磨损、疲

劳磨损、腐蚀磨损、冲蚀磨损和微动磨损等类型。粘着磨损是指由于两个相对运动接触表面的焊合所导致金属从一个表面转移到另一表面的现象,产生根源为物体接触表面的剪切变形;磨料磨损是指两个接触表面相对运动过程中硬质点引起的表面材料脱落现象,产生根源为硬质点的磨削作用;疲劳磨损是指两个接触表面相对运动过程中交变应力导致材料表面疲劳破坏而产生的物质转移现象,产生根源为材料表面接触应力的反复作用;腐蚀磨损是指两个接触表面相对运动过程中表面与周围介质的化学或电化学反应所引起的物质损失现象,产生根源为化学或电化学反应的腐蚀作用;冲蚀磨损是指润滑剂流体或润滑剂流体中的固体粒子、蒸气、气泡对接触表面的冲刷和冲击所导致的物质损失现象;微动磨损是指两个接触表面相对低振幅振荡而引起的表面材料损失现象。

轧制过程中,轧辊磨损多为粘着磨损和磨料磨损;当使用某些润滑剂进行润滑轧制时,可能产生局部的腐蚀磨损。轧辊磨损不仅影响到轧件表面质量与尺寸精度,而且增加轧辊消耗和破坏概率,增高生产成本。通常,在连轧机组中,中部机架压下量较大,轧辊磨损最快;精轧机架的轧辊磨损对于轧材表面精度最重要。

(3) 润滑 通过加入某种物质以减少两个物体的相互接触表面上的摩擦、磨损或表面损伤的现象称为润滑。这种物质称为润滑剂。

按照所用润滑剂的形态,润滑主要分为非流体膜润滑和流体膜润滑两大类,前者采用固体润滑剂,后者采用液体润滑剂。如图 1-1 所示,非流体膜润滑包括固体膜润滑、极压润滑和边界润滑;流体膜润滑包括流体动压润滑、流体静压润滑、混合膜润滑。

固体膜润滑又称干膜润滑,固体膜润滑剂包括氧化膜、金属膜、聚合物膜和层状点阵化合物等,可阻止两物体相互接触,其界面颇像干摩擦时的情况,剪切强度低;极压润滑是在一定的温度下,摩擦副表面元素与极压润滑剂的活性元素相反应而生成低剪切强度薄膜的润滑,极压润滑膜一般多在工具或模具表面形成;边界润滑是指两相对运动表面被极薄的一层润滑膜隔离的润滑,所对应的摩擦状态为边界摩擦。

流体动压润滑为相对运动表面之间形成的收敛油楔使润滑油产生油膜压力以平衡外载荷的润滑,考虑到塑性加工过程中工具或模具的变形以及润滑剂黏度随压力的变化,流体动压润滑又可分为弹性流体动压润滑和塑性流体动压润滑两种情形;流体静压润滑为依靠润滑剂自身静压力以平衡外载荷的润滑;混合膜润滑为润滑油膜厚度不足以将两物体表面完全分离的润滑,也称为准流体动压润滑或薄膜润滑。流体膜润滑所对应的摩擦状态主要为液体摩擦。

轧制时多根据具体工艺过程采用相应润滑类型,主要涉及非流体膜润滑、流体动压润滑和混合膜润滑(图 1-1)。

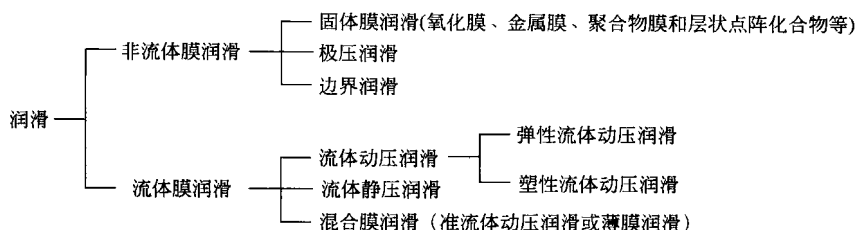


图 1-1 润滑分类

1.1.2 摩擦系数和摩擦力

(1) 经典的摩擦系数 按照力学意义，摩擦系数 μ 定义为两相互接触表面间的摩擦力 F 与正压力 P 之比，即

$$\mu = F/P \quad (1-1)$$

当接触面存在相对滑动时，则为滑动摩擦系数；当接触面存在相对滚动时，则为滚动摩擦系数；当接触面存在相对滑动趋势时，则为静摩擦系数。静摩擦系数 > 滑动摩擦系数 > 滚动摩擦系数。

这一定义包含了两个摩擦基本定律：摩擦力正比于正压力，且与表观接触面积无关；摩擦系数值取决于两接触物体的材质、表面状态、相对运动速度和润滑状况等。

(2) 塑性变形区接触点的干摩擦系数和单位摩擦力 事实上，在塑性加工过程中，变形区内各处的接触压力、实际接触面积、表面状态、变形条件、相对运动速度和润滑状况等通常是变化的，且存在相对运动和粘着的不同接触情况。因此，变形区内各接触点的摩擦系数和摩擦力是不同的，采用一点的摩擦系数或单位摩擦力描述摩擦状态是符合实际情况的。

① 一点的干摩擦系数 与经典的摩擦系数定义相同，干摩擦状态下，塑性加工变形区接触点的摩擦系数 μ_i 亦可定义为：

$$\mu_i = \tau_i / p \quad (1-2)$$

式中 τ_i —— 单位摩擦力；

p —— 为接触应力。

当 $\tau_i < k$ 时，接触点存在相对运动，产生动摩擦；当 $\tau_i = k$ 时，只是通过较小的能量消耗在工件内部产生材料的剪切，接触点不存在相对运动而是粘着，单位摩擦力为常数，此时摩擦系数已没有意义。其中， k 为工件的剪切屈服强度，按照 Tresca 准则， $k = 0.5\sigma_s$ ；按照 Mises 准则， $k = (0.5 \sim 0.577) \sigma_s$ 。

② 单位摩擦力 在塑性加工理论中，为研究方便起见，可定义单位摩擦力 τ_i 为：

$$\tau_i = dF/dA \quad (1-3)$$

式中 F ——摩擦力;
 A ——接触面积。

干摩擦时,可采用式(1-4)计算单位摩擦力。

$$\tau_i = m_i k \quad (1-4)$$

式中 m_i ——一点的摩擦剪切系数,与材料的物理化学、力学性质及点的坐标位置有关,其取值范围为 $[0, 1]$ 。对无摩擦接触点, $m_i = 0$; 对粘着接触点, $m_i = 1$ 。

液体摩擦时,在满足牛顿液体摩擦定律的条件下,应采用式(1-5)计算单位摩擦力。

$$\tau_i = \eta \frac{dv}{dy} \quad (1-5)$$

式中 η ——润滑剂的黏性系数;

$\frac{dv}{dy}$ ——垂直于相对运动表面方向上的速度梯度。

为确定变形区内任意一点的摩擦系数,必须掌握变形区单位摩擦力和接触应力的分布规律,即通过单位摩擦力和接触应力的分布比较,得到关于摩擦系数沿变形区分布的完整规律。迄今为止,由于影响因素较多以及它们的影响规律仍未得到全面认识,沿整个接触面单位摩擦力的真实分布规律仍然不能获得,以至于变形区内任意一点的摩擦系数的精确计算还无法实现。因此,在目前的塑性加工理论研究中,大多采用平均摩擦系数和平均摩擦剪切系数的概念来描述摩擦状态。

(3) 平均摩擦系数 在塑性加工过程中,工具和工件的接触变形区各处 μ_i 或 m_i 一般是不同的,且上述任一因素的变化都会引起摩擦系数始终处于波动。为研究方便起见,通常对摩擦状态进行了必要的简化。即在理论计算中,假定在整个变形区或其内某一区段上 μ_i 或 m_i 均匀分布,采用平均摩擦系数或平均摩擦剪切系数对接触面摩擦状况进行近似描述;而在工程应用中,通常根据实测的摩擦系数或平均摩擦剪切系数以求得其统计平均值。这一简化对于计算力能参数是合适的,但计算应变分布可能会有一些误差。

平均摩擦系数是由变形区内各处摩擦力之和(不考虑符号)与接触应力之和的比值或平均单位摩擦力与平均接触应力的比值确定,即

$$\bar{\mu} = \Sigma |F| / \Sigma P = \bar{\tau} / \bar{p} \quad (1-6)$$

式中 $\bar{\mu}$ ——平均摩擦系数;
 F ——摩擦力;
 P ——接触应力;
 $\bar{\tau}$ ——平均单位摩擦力;
 $\bar{p}$ ——平均接触应力。

按照轧制工艺过程,平均摩擦系数可分为:咬入时的平均摩擦系数;过渡阶段的平均摩擦系数;稳定轧制阶段的平均摩擦系数。按照接触表面相对运动方向,平均摩擦系数还可分为纵向平均摩擦系数和横向平均摩擦系数。通常,按照最大相对运动方向确定平均摩擦系数。

同理,亦可定义平均摩擦剪切系数 m ,并且对它进行分类。

1.2 摩擦对塑性加工过程的影响

摩擦的存在对于塑性加工过程的影响是多方面的,主要涉及力能参数变化、变形应力和应变的分布、温度升高、工件组织结构及其性能和质量的变化、成形过程特性等。由于摩擦系数的大小与诸多因素的影响有关,且这些因素相互联系、相互影响。因此,在讨论摩擦对塑性加工过程的影响时,应综合考虑它们对塑性加工过程的作用。

1.2.1 对力能参数的影响

(1) 对变形力和变形抗力的影响 塑性加工时,所需变形力主要由三部分组成,即对应纯变形功的变形力,此力是在均匀变形和无摩擦条件下获得的,主要取决于应力状态、变形程度和变形材料性质;对应摩擦主要影响的变形力,此应力是考虑实际工具与工件之间摩擦情况而产生的,与它们的材料性质和润滑条件等有关;对应不均匀变形影响的变形力,此应力导致附加在纯变形功和摩擦功之上的剩余功产生,由变形过程的几何条件所控制,通常又受到摩擦的影响。

在生产条件下,由于摩擦和变形区几何因子的影响,工件变形时接触面上实际平均变形抗力 $\bar{p}$ (平均单位压力) 比真实变形抗力大得多,可采用应力状态系数 n_σ 表示,即

$$\bar{p} = n_\sigma \sigma_\phi \quad \text{轴对称变形} \quad (1-7)$$

$$\bar{p} = n_\sigma K = 1.15 n_\sigma \sigma_\phi \quad \text{平面变形} \quad (1-8)$$

式中 K —— 工件的平面变形抗力;

σ_ϕ —— 工件的真实变形抗力。

可见, n_σ 值的大小直接反映了真实变形抗力增大的程度。通常, $n_\sigma > 1$ 且随摩擦系数而变化。如图 1-2 所示,热轧时, n_σ 随摩擦系数和变形区几何因子的增加而增大,以致实际平均变形抗力也相应增大。

(2) 对变形功的影响 由于摩擦的影响,导致塑性变形所需的变形功增加,除塑性变形自身所需的纯变形功之外,还包括摩擦功和剩余功。实际上,由于摩擦和变形区几何因子的影响无法分开,塑性变形时剩余功的精确理论解是很难求得的。

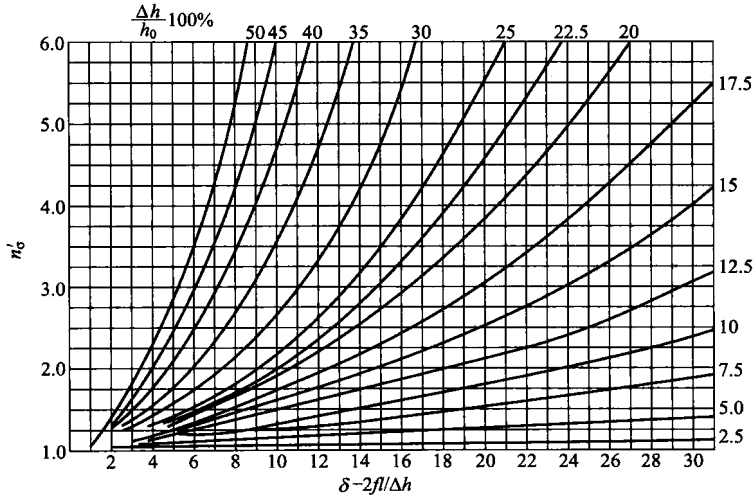


图 1-2 应力状态系数与摩擦系数和变形区几何因子的关系

1.2.2 对应变和应力分布的影响

(1) 对单位压力摩擦峰的影响 实际轧制过程中,单位摩擦力沿接触弧的分布规律是比较复杂的,它既不完全服从干摩擦定律,也不准确满足粘着区摩擦力为定值的假说。轧制变形区的摩擦应力指向中性面,限制了轧件沿接触弧的相对运动,因而导致单位压力沿变形区分布有所谓摩擦峰的出现,如图 1-3 所示。可见,在无张力轧制条件下,单位压力由工件自身力学性能所决定的基底分量和外摩擦所决定的摩擦分量组成,两部分的交界线即为工件材料的加工硬化曲线。

关于轧制过程沿接触弧单位摩擦力的分布有不同的假设,其分布特点和变形区几何特点对单位轧制压力的摩擦峰形状、峰值及其位置有很大影响。一般,在薄件轧制时,单位摩擦力对于单位轧制压力及其摩擦峰的影响值得重视。随着 $l/\bar{h}$ 的增大,单位摩擦力影响增强,摩擦峰陡峭度增大。

(2) 对应变分布的影响 塑性加工时,摩擦、变形区几何因子、加热和冷却不均匀性的综合影响使得工件产生不

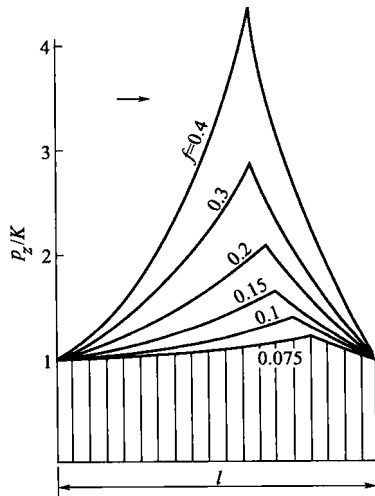


图 1-3 单位轧制压力的摩擦峰

均匀变形,即应变分布不均匀。如单位摩擦力的不均匀分布或产生的粘着区、变形区几何因子(D/H , B/H , $l/\bar{h}$)的变化、温度应力的不均匀都会在工件表层或内部引起不同程度的不均匀变形。

(3) 对应力分布的影响 欲满足这种变形不均匀性与金属整体性共存的需求,在工件内变形程度不同的各部分之间将产生相互平衡、相互制约的应力,即附加应力。不均匀变形程度愈大,产生的附加应力值愈高。工件的实际应力(变形应力)应为基本应力与附加应力叠加的结果。基本应力是指工具的外载作用所引起的工件应力,在工件变形绝对均匀时等于实际应力。显然,摩擦导致的变形不均最终导致了工件实际应力的不均匀分布。

1.2.3 对温升的影响

塑性加工时,大部分变形功转变为热量,除引起工件变形部分的温度升高外,热量还可通过传导、对流和辐射方式传递到工具、周围介质和工件未变形部分,使得它们的温度升高。

通常,摩擦通过下列两种方式影响温升:

① 在相对运动条件下,摩擦功在极薄的工件界面层内转变为热,产生很高的瞬时温升;

② 在粘着条件下,界面温度的变化与整体温度变化相差不大,工件内部的剪切变形导致局部温升,加重了变形的不均匀分布。

1.2.4 对工件组织结构、性能及其质量的影响

(1) 对组织结构和性能的影响 塑性加工时,摩擦引起的应变和应力的不均匀分布同样导致工件的组织结构和性能的不均匀分布,且在一定程度上加剧了变形区几何因子所导致的组织结构和性能的不均匀性。组织结构不均表现在晶粒畸变程度、晶粒大小、析出相和织构等方面。性能不均表现在强韧性、塑性、二次加工性等方面。

工件变形较大时,该处组织结构的晶粒畸变程度较大、变形织构较强且析出相较多。变形过程存在相变时,在最终组织相应处,晶粒较小、织构较强、析出相较多,以致强度和韧性高、塑性和二次加工性差且出现性能各向异性;变形过程不存在相变时,最终组织仍然保留变形特征,未经后续热处理无法对工件进行二次加工,变形较大处加工硬化更为严重,特别是位于工件内部“死区”和正常变形区之间的严重剪切变形区(过渡区)晶粒畸变现象严重,经后续热处理可形成粗晶组织,使工件的二次加工性能降低。

工件内过大的拉伸应力将导致裂纹产生。裂纹发展较弱时,一般可保留在变形后的工件中但影响使用性能和寿命;裂纹发展严重时,致使工件在加工过程中出现断裂而被破坏。

(2) 对质量的影响 塑性变形过程中,为协调工件内各部分之间附加应