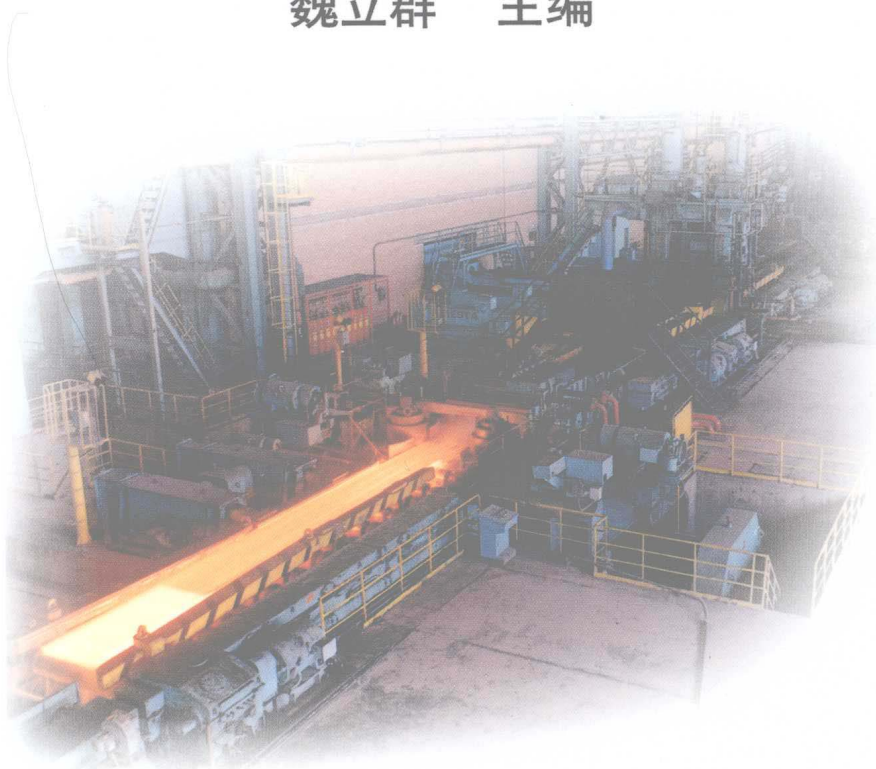


高等学校规划教材

GAODENG XUEXIAO GUIHUA JIAOCAI

金属压力加工原理

魏立群 主编



冶金工业出版社

<http://www.cnmp.com.cn>

高等学校规划教材

金属压力加工原理

主 编 魏立群
副主编 柳谋渊 宋美娟

北 京
冶金工业出版社
2008

内 容 提 要

本书针对应用型本科教学的特点与要求,本着理论与应用并重的原则,吸收各相关教材的精华编写而成。全书共分三篇,第一篇金属轧制理论,主要介绍轧制理论的发展趋势、轧制的基本原理、轧制时金属的变形规律、力能参数计算方法等;第二篇金属挤压理论,主要介绍挤压技术的发展趋势、挤压时金属流动和变形规律、力能参数计算方法等;第三篇金属拉拔理论,主要介绍拉拔技术的发展趋势、拉拔时金属流动和变形规律、力能参数计算方法等。

本书主要作为高等学校金属压力加工专业本科教学用书,也可作为金属压力加工专科学生的教学用书和冶金企业相关技术人员的培训教材。

图书在版编目(CIP)数据

金属压力加工原理/魏立群主编. —北京:冶金工业出版社, 2008. 10

高等学校规划教材

ISBN 978-7-5024-4626-0

I. 金… II. 魏… III. 金属压力加工—理论—高等学校—教材 IV. TG3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 159042 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

责任编辑 李枝梅 宋 良 美术编辑 李 心 版式设计 葛新霞

责任校对 王永欣 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-4626-0

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

2008 年 10 月第 1 版, 2008 年 10 月第 1 次印刷

787mm × 1092mm 1/16; 13.25 印张; 345 千字; 198 页; 1-3000 册

26.00 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)

前 言

本书针对应用型本科教学的特点和要求,以“加强理论,突出应用,强调理论联系实际,有利培养学生应用能力”为指导思想,本着理论与应用并重的原则,吸收各相关教材的精华,尽可能使书中的内容接近学科的前沿,力求反映学科的发展水平,同时突显应用特色。全书共分三篇,第一篇金属轧制理论:主要介绍轧制理论的发展趋势、轧制的基本原理、轧制时金属的变形规律、力能参数计算方法等。第二篇金属挤压理论:主要介绍挤压技术的发展趋势、挤压时金属流动和变形规律、力能参数计算方法等。第三篇金属拉拔理论:主要介绍拉拔技术的发展趋势、拉拔时金属流动和变形规律、力能参数计算方法等。每章均设有习题,以便学生自主学习。全书内容力求体现针对性、实用性和先进性相统一的原则,力求反映传统与现代、理论与实际相结合的特色。

本书由上海应用技术学院魏立群任主编。参加编写的有重庆科技学院宋美娟(第1~3、9章),上海应用技术学院柳谋渊(第10~13章),魏立群(第0、4~8、14、15章),全书由魏立群统稿,并请相关院校的任课教师对书稿进行了审议,提出了许多宝贵意见,特别是上海应用技术学院陆济民教授为本书编写提供了很大的帮助。另外,本教材的编写工作还得到“上海市高等学校——《材料加工》本科教育高地建设”的资助,作者在此深表感谢。

本书主要作为高等学校金属压力加工专业本科教学用书(适用70学时),也可作为金属压力加工专科学生的教学用书和冶金企业相关技术人员的培训教材。

由于编者水平有限,书中不妥之处,敬请读者批评指正。

编 者
2008年2月

目 录

第一篇 金属轧制理论

0 绪论	1
0.1 轧制理论的发展历史	1
0.2 现代轧制理论的发展趋势	2
1 轧制过程的基本概念	3
1.1 变形区及其主要参数	3
1.1.1 简单轧制与非简单轧制	3
1.1.2 变形区的主要参数	4
1.1.3 轧制变形的表示方法	6
1.1.4 平均工作辊径与平均压下量	7
1.2 实现轧制过程的条件	9
1.2.1 轧制过程开始阶段的咬入条件	9
1.2.2 轧制过程稳定阶段的咬入条件	11
1.2.3 开始咬入条件与稳定轧制阶段咬入条件的比较	12
1.3 最大压下量的计算及改善咬入的措施	13
1.3.1 最大压下量的计算	13
1.3.2 影响轧件咬入的因素	14
1.3.3 改善咬入条件的措施	16
1.4 轧制时的不均匀变形	17
1.5 轧制过程的运动学与力学条件	20
1.5.1 轧制过程的运动学	20
1.5.2 轧制的力学条件	21
2 轧制过程中的宽展	24
2.1 宽展的种类和组成	24
2.1.1 宽展的种类	24
2.1.2 宽展的组成	25
2.2 影响宽展的因素	28
2.2.1 压下量对宽展的影响	28
2.2.2 轧辊直径对宽展的影响	29
2.2.3 轧件的宽度对宽展的影响	29

2.2.4	摩擦系数对宽展的影响	30
2.2.5	轧制道次对宽展的影响	32
2.2.6	金属性质对宽展的影响	32
2.2.7	后张力对宽展的影响	33
2.2.8	外端对宽展的影响	34
2.3	计算宽展的公式	34
2.3.1	Л. 日兹(ЖеЭ)宽展公式	34
2.3.2	Е. 齐别尔(Siebel)宽展公式	35
2.3.3	Б. П. 巴赫钦诺夫(Бахтинов)宽展公式	36
2.3.4	Z. 乌沙托夫斯基(Wusatowski)宽展公式——相对宽展计算公式	36
2.3.5	А. И. 采利柯夫(Целиков)宽展公式	40
2.3.6	轧制合金钢时计算宽展的公式	41
2.4	孔型中轧制时的变形特点	41
2.4.1	在轧件宽度上压下不均匀的影响	41
2.4.2	孔型侧壁的影响	42
2.4.3	轧件与轧辊非同时性接触的影响	43
2.4.4	轧制速度差的影响	43
3	轧制过程中的纵变形——前滑与后滑	45
3.1	轧制时的前滑与后滑	45
3.2	前滑的计算	46
3.3	中性角的确定	47
3.3.1	整个接触面全滑动并遵守库仑干摩擦定律	48
3.3.2	假定沿接触面全粘着的 R. B. 西姆斯(Sims)解	49
3.4	影响前滑的因素	49
3.4.1	压下率对前滑的影响	49
3.4.2	轧件厚度对前滑的影响	49
3.4.3	轧件宽度对前滑的影响	50
3.4.4	轧辊直径对前滑的影响	50
3.4.5	摩擦系数对前滑的影响	51
3.4.6	张力对前滑的影响	51
4	影响轧制过程力学参数的因素	53
4.1	影响金属本身性质的因素	54
4.1.1	金属化学成分和组织状态的影响	54
4.1.2	热力学条件——变形温度的影响	55
4.1.3	热力学条件——变形速度的影响	55
4.1.4	热力学条件——变形程度(加工硬化)的影响	57
4.1.5	确定变形抗力的有关曲线及公式	59

4.2 应力状态的影响	65
4.2.1 外摩擦的影响	65
4.2.2 工具形状和尺寸的影响	66
4.2.3 外力的影响	68
4.2.4 轧件尺寸的影响	69
4.3 三种典型轧制情况	69
5 轧制单位压力	76
5.1 轧制压力的概念	76
5.2 T. 卡尔曼(Karman)单位压力微分方程及 A. И. 采利柯夫解和 M. D. 斯通(Stone)解	77
5.2.1 T. 卡尔曼单位压力微分方程	77
5.2.2 A. И. 采利柯夫解	79
5.2.3 M. D. 斯通公式	82
5.3 E. 奥洛万(Orowan)单位压力微分方程及 B. 西姆斯(Sims)和 D. R. 勃兰特-福特(Bland-Ford)公式	83
5.3.1 E. 奥洛万单位压力微分方程	83
5.3.2 B. 西姆斯单位压力公式	84
5.3.3 D. R. 勃兰特-福特公式	86
6 轧制压力的计算	88
6.1 接触面水平投影面积的计算	88
6.1.1 在平辊上轧制矩形断面轧件	88
6.1.2 在孔型中轧制时接触面积的确定	90
6.2 计算平均单位压力的 A. И. 采利柯夫公式	91
6.2.1 外摩擦影响系数 n'_σ 的确定	92
6.2.2 外端影响系数 n''_σ 的确定	94
6.2.3 张力影响系数 n'''_σ 的确定	94
6.3 M. D. 斯通公式	95
6.4 B. 西姆斯公式	97
6.5 D. R. 勃兰特-福特公式	99
6.6 S. 爱克伦德(Ekelund)公式	105
7 传动轧辊所需力矩及功率	108
7.1 辊系受力分析	108
7.1.1 简单轧制情况下辊系受力分析	108
7.1.2 单辊驱动时辊系受力分析	108
7.1.3 有张力作用时的辊系受力分析	109
7.1.4 四辊轧机辊系受力分析	110
7.2 轧制力矩的确定	111

7.2.1 按金属对轧辊的作用力计算轧制力矩	111
7.2.2 按能耗曲线确定轧制力矩	114
7.3 电机传动轧辊所需力矩	116
7.3.1 附加摩擦力矩的确定	116
7.3.2 空转力矩的确定	117
7.3.3 动力矩	117
7.4 主电机负荷图	118
7.4.1 静负荷图	118
7.4.2 可逆式轧机的负荷图	118
7.4.3 飞轮对传动负荷的影响	120
7.5 主电机的功率计算	121
7.5.1 等效力矩计算及电动机校核	121
7.5.2 电动机功率计算	122
7.5.3 超过电动机基本转速时电机的校核	122
8 轧制时的弹塑性曲线	124
8.1 轧机的弹跳方程	124
8.2 轧机的弹性曲线和刚度系数确定	124
8.3 轧件的塑性曲线	126
8.4 轧制时的弹塑性曲线	127
8.5 轧制弹塑性曲线的实际意义	129
9 连轧的基本理论	132
9.1 连轧的特殊规律	132
9.1.1 连轧的变形条件	132
9.1.2 连轧的运动学条件	133
9.1.3 连轧的力学条件	133
9.2 连轧张力	133
9.2.1 连轧张力微分方程	133
9.2.2 张力公式	134
9.3 前滑系数、堆拉系数和堆拉率	137
9.3.1 前滑系数	137
9.3.2 堆拉系数和堆拉率	138
第二篇 金属挤压理论	
10 金属挤压概述	141
10.1 挤压的基本方法	141
10.2 挤压法的优缺点	142
10.2.1 挤压的优点	142

10.2.2 挤压的缺点	142
10.3 挤压技术的发展历史	142
10.4 挤压技术的发展趋势	143
11 挤压时金属的流动	144
11.1 正向挤压圆棒材时金属的流动	144
11.1.1 开始挤压阶段金属的流动行为	144
11.1.2 基本挤压阶段金属的流动行为	145
11.1.3 終了挤压阶段	147
11.2 反向挤压时金属的流动	148
11.3 影响挤压时金属流动的因素	149
11.3.1 挤压方法的影响	149
11.3.2 外摩擦条件的影响	149
11.3.3 工具结构与形状的影响	150
11.3.4 变形程度和变形速度的影响	151
11.3.5 制品形状的影响	151
11.3.6 材质的影响	152
11.3.7 变形温度的影响	152
11.3.8 金属力学性能的影响	153
12 挤压力	154
12.1 影响挤压力的因素	154
12.1.1 挤压温度的影响	154
12.1.2 坯料长度的影响	154
12.1.3 变形程度的影响	154
12.1.4 挤压速度的影响	155
12.1.5 模角的影响	155
12.1.6 摩擦的影响	156
12.1.7 其他因素的影响	156
12.2 挤压力计算	156
12.2.1 解析法	157
12.2.2 经验法	162
12.3 挤压力公式计算例题	166

第三篇 金属拉拔理论

13 拉拔概述	169
13.1 拉拔的一般概念	169
13.2 拉拔分类	169
13.2.1 实心材拉拔	169

13.2.2 空心材拉拔	169
13.3 拉拔的特点	171
13.4 拉拔技术的发展历史	171
13.5 拉拔技术的发展趋势	172
14 拉拔理论基础	173
14.1 拉拔时的变形指数	173
14.2 实现拉拔过程的基本条件	174
14.3 圆棒拉拔时的应力与变形	175
14.3.1 应力与变形状态	175
14.3.2 金属在变形区内的流动特点	176
14.3.3 变形区的形状	178
15 拉拔力	181
15.1 各种因素对拉拔力的影响	181
15.1.1 被加工金属的性质对拉拔力的影响	181
15.1.2 变形程度对拉拔力的影响	181
15.1.3 模角对拉拔力的影响	181
15.1.4 拉拔速度对拉拔力的影响	182
15.1.5 摩擦与润滑对拉拔力的影响	182
15.1.6 反拉力对拉拔力的影响	184
15.1.7 振动对拉拔力的影响	185
15.2 拉拔力的理论计算	185
15.2.1 棒线材拉拔力计算	186
15.2.2 管材拉拔力计算	189
15.2.3 拉拔机电机功率计算	193
15.3 拉拔力计算例题	193
参考文献	198

第一篇 金属轧制理论

0 绪 论

金属压力加工过程就是金属塑性变形的过程,所以金属压力加工亦称金属塑性加工,其作用不仅是通过塑性变形改变金属的形状和尺寸,而且也能改善其组织和性能。塑性加工的方法主要有锻造、冲压、拉拔、挤压和轧制等,其中轧制在冶金工业,尤其在钢铁工业中是最主要的加工方法。在钢铁生产总量中,除少部分采用铸造和锻造等方法直接制成成品以外,其余90%以上的钢都须经过轧制成材。许多有色金属与合金材料也是靠轧制方法进行生产的。由此可见,金属材料的轧制生产在国民经济中占有极其重要的地位。

金属轧制理论是研究轧制过程的基本理论,它是建立在塑性加工力学和金属塑性加工物理学基础之上的,同时它又是轧制工艺学、轧制设备、轧制过程数学模拟等课程的基础,是与生产实践紧密结合,适用性很强的学科分支。金属轧制理论无论对于轧制原理的深入研究,还是对于轧制生产的发展都关系非常密切。因此,在学习过程中要求掌握轧制过程的规律及实质,并能应用所学规律去分析、解决生产实践和科学研究中的问题。此外还要掌握一些工程近似计算方法,这是由于影响轧制过程的因素很复杂,往往要进行一些假设和简化,但只要正确使用近似计算方法,用于轧制过程的工程计算精度还是足够的。

本篇的内容大致分为:轧制基础理论、力能参数、弹塑性曲线与连轧理论的基本方程。分析方法主要是从变形区的微观分析到宏观计算等。

0.1 轧制理论的发展历史

由于金属轧制理论的发展较晚,因此其系统性、理论性不像其他学科那样严密和精确。所谓发展较晚,是指从1925年T.卡尔曼(Karman)发表轧制压力微分方程至今也不过八十多年,轧钢机的发明到现在为止也只有五百多年历史,因此其发展远远赶不上化学、物理等基础学科。

轧制理论的发展大致经历了这样几个时期:

(1) 轧制理论不能实际应用的时期(1940~1950)。1925年T.卡尔曼的轧制压力微分方程发表后,为轧制理论奠定了理论计算基础,但是,由于人工计算复杂,花费时间长,实际上未得到推广应用。另外,一方面由于理论计算值与实测值不一致,即理论公式即使是正确的,但变形抗力的值和摩擦系数计算不正确,结果也不准;另一方面由于当时的现场测定值受仪表精度的限制不太准确,理论计算在现场不能使用。

(2) 轧制理论发展阶段(1950~1960)。进入20世纪50年代后,轧制理论的研究蓬勃发展起来。许多国家开展了热轧和冷轧时的变形抗力和摩擦机理研究,对轧制压力及扭矩的测量

方法、测量装置的研究等。在变形区轧制压力分布、摩擦力分布等研究领域得到许多精确结果,为轧制理论的发展,提供了实测依据,提出了大量轧制压力公式,以及轧制压力分布的理论分析。

(3) 轧制理论的应用阶段(1960年以后)。随着电子计算机的发展和普及,应用计算机控制轧制过程得到推广,计算机应用后,复杂的公式很容易得到数值解,使轧制理论及其有关数学模型实际应用性显著增大,并且还研究出与理论公式同样精度的回归模型,使之更便于控制和使用。

0.2 现代轧制理论的发展趋势

近年来,面对着新技术浪潮的冲击,轧制技术的面貌可以说是日新月异,瞬息万变。在这种情景下,作为支撑轧制技术发展的轧制理论,也在传统轧制理论的基础上,大大地拓宽了研究领域、加深了研究深度,成为推动轧制技术发展的系统理论。传统的轧制理论以宽展、前滑等变量参数和轧制力、轧制力矩等力能参数为主要研究对象。近年来,现代轧制理论向应用理论的方向发展,向为工业生产服务的方向发展,并呈现出新的发展趋势和特点。首先与力学、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、微观,甚至纳观力学。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的水平。计算机科学的发展使力学和数学成果在轧制过程中得以更加有效的应用;其次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。为了适应轧制生产现代化发展的需要,轧制理论今后在以下几个方面仍需进行不断的研究:

(1) 精确计算轧制过程力能参数仍是深入理解轧制过程的物理实质,进一步发展轧制理论的基础。

(2) 利用物理实验和数学方法相结合,研究轧材成分和变形条件对组织变化影响的定量关系,建立不同轧材组织结构与性能变化之间的理论模型,以便实现根据产品的使用要求进行轧材成分和轧制规程的预设计。

(3) 轧制工艺向上下工序的拓展与集成要求轧制理论突破原有界限,针对新材料、新技术和新工艺的具体要求,开拓新的理论研究领域。

(4) 利用固体力学、计算力学的最新成果,开发各种计算软件来模拟轧制过程将是提高理论研究水平与速度的重要手段。

(5) 开展轧制系统仿真的研究,应用计算机辅助工程、系统工程及人工智能方法寻求整个轧制生产过程的最优化,以实现最终提高产品质量、降低成本的目的。

总之,现代轧制理论的发展需要借助高速发展的信息技术、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。

本篇涉及的范围仅是金属轧制理论的基础部分,是轧钢工程技术人员应当掌握的基本内容,并应用这些基本理论与计算方法解决生产实际问题。而轧制理论本身还要通过生产实践与科学研究来不断地充实、完善和发展。

1 轧制过程的基本概念

轧制又称压延，是金属压力加工中应用最为广泛的一种生产形式。所谓轧制过程就是指金属被旋转轧辊的摩擦力带入轧辊之间受压缩而产生塑性变形，从而获得一定尺寸、形状和性能的金属产品的过程。

根据轧制时轧辊旋转与轧件运动等关系，可以将轧制分成纵轧、横轧和斜轧。所谓纵轧是指工作轧辊的轴线平行、轧辊旋转方向相反、轧件的运动方向与轧辊的轴线垂直（如图 1-1a 所示）。横轧是指工作轧辊的轴线平行、轧辊旋转方向相同、轧件的运动方向与轧辊的轴线平行、轧件与轧辊同步旋转（如图 1-1b 所示）。斜轧是指工作轧辊的轴线是异面直线、轧辊旋转方向相同、轧件的运动方向与轧辊的轴线成一定角度（如图 1-1c 所示）。本书主要讨论纵轧时的轧件变形和力能参数计算等问题。

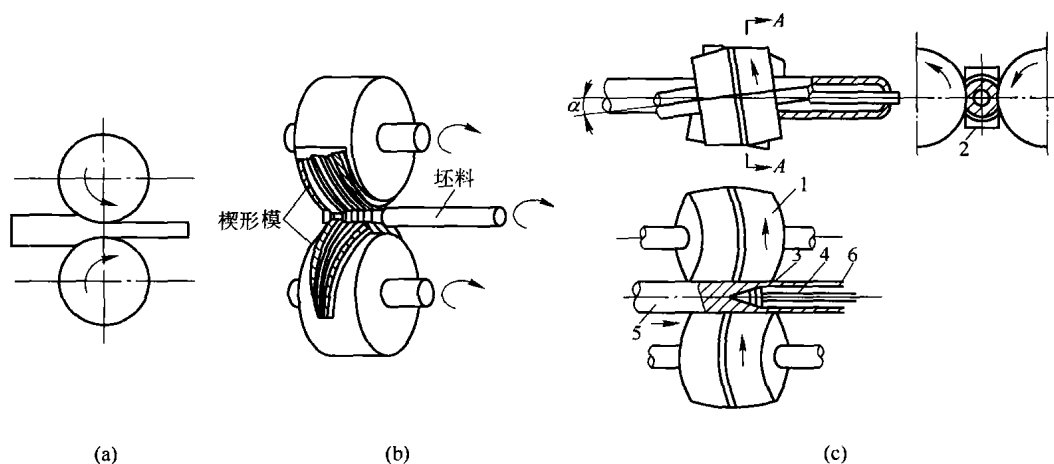


图 1-1 轧制的分类

(a) 纵轧；(b) 横轧；(c) 斜轧

1—轧辊；2—导板；3—顶头；4—顶杆；5—管坯；6—毛管

研究轧制过程中咬入、宽展及前滑等的规律性，以解决轧制时力能参数的计算等问题，则首先必须建立起轧制过程的基本概念。

1.1 变形区及其主要参数

1.1.1 简单轧制与非简单轧制

在实际生产中，轧制变形是比较复杂的。为了便于研究，有必要对复杂的轧制问题进行简化，即提出了所谓比较理想的轧制过程——简单轧制过程。通常把具有下列条件的轧制过程称为简单轧制过程。

(1) 两个轧辊都被电动机带动，且两轧辊直径相同，转速相等，轧辊辊身为平辊，轧辊为刚性；

- (2) 两个轧辊的轴线平行，且在同一个垂直平面中；
- (3) 被轧制金属性质均匀一致，即变形温度一致，变形抗力一致，且变形均匀；
- (4) 被轧制金属只受到来自轧辊的作用力，即不存在前后拉力或推力，且被轧制金属做匀速运动。

显然，凡不具备以上四个条件的轧制过程均为非简单轧制过程。如：

- (1) 由于加热条件的限制所引起的轧件各处温度分布不均匀，或受孔型形状的影响，变形沿轧件断面高度和宽度上不均匀等；
- (2) 由于轧辊各处磨损程度的不同，上下轧辊直径不完全相等，使金属质点沿断面高度和宽度运动速度不等；
- (3) 轧制压力和摩擦力沿接触弧长度上分布不均。

因此，简单轧制过程是一个理想化的轧制过程模型。为了简化轧制理论的研究，有必要从简单轧制过程出发，并在此基础上再对非简单轧制过程的问题进行探讨。

实际生产中，还有各种非简单轧制情况：

- (1) 单辊传动的轧机，如单辊传动平整轧机、周期式叠轧薄板轧机；
- (2) 附有外力（张力或推力）的连续式轧机，如带张力的冷连轧机组；
- (3) 轧制速度在一个道次中发生变化的轧机，如初轧机及带直流电动机传动的轨梁轧机；
- (4) 上下轧辊直径不相等的轧机，如劳特式三辊轧机；
- (5) 在非矩形断面的孔型中的轧制，如在异形孔型及椭圆、菱、立方孔型中的轧制。

1.1.2 变形区的主要参数

所谓轧制时的变形区就是指在轧制过程中，轧件连续不断地处于塑性变形的那个区域，也称为物理变形区。为研究问题方便起见，定义图 1-2 所示的简单轧制过程示意图中 $ABCD$ 所构成的区域，在俯视图中画有剖面线的梯形区域为几何变形区。近来轧制理论的发展，除了研究 $ABCD$ 几何变形区的变形规律之外，又对几何变形区之外的区域进行了研究。因为轧件实际上不仅在 $ABCD$ 范围内变形，其以外的范围也发生变形。故一般泛指变形区均系专指几何变形区而言。

简单轧制时，变形区的纵横断面可以看作梯形，变形区可以用轧件入出口断面的高度 H 、 h （或平均高度 $\bar{h}_c$ ）和宽度 B_H 、 B_h （或平均宽度 $\bar{B}$ ）及变形区长度 l ，接触弧所对应的圆心角即咬入角 α 来表示，以上各量称为变形区基本参数。对它们之间的关系及其表示方法的研究是弄清变形过程的重要手段。

变形区的平均高度及平均宽度为：

$$\bar{h}_c = \frac{H + h}{2} \quad (1-1)$$

$$\bar{B} = \frac{B_H + B_h}{2} \quad (1-2)$$

式中 H 、 h ——轧件轧前、轧后的高度；

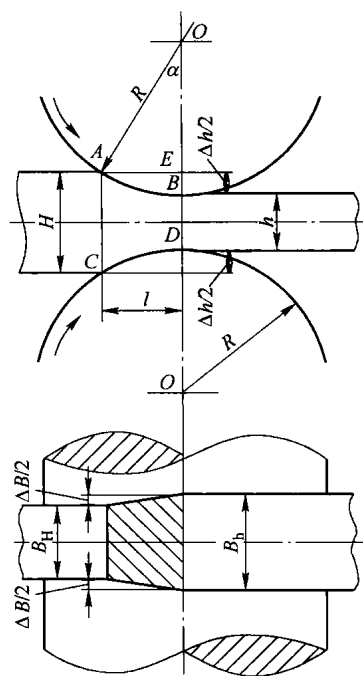


图 1-2 简单轧制过程示意图

B_H 、 B_h ——轧件轧前、轧后的宽度。

当变形区形状不是梯形时，其平均宽度可按式计算：

$$\bar{B} = \frac{B_H + 2B_h}{3} \quad (1-3)$$

变形区长度 l 可以用 AB 弦的水平投影长度表示，由图可知：

$$l = AE = \sqrt{R^2 - OE^2}$$

$$OE = R - \Delta h/2$$

式中 R ——轧辊工作半径；

Δh ——该道次的压下量， $\Delta h = H - h$ 。

当 Δh 不大时，代入上式并略去 Δh 的平方项，整理后得：

$$l = \sqrt{R\Delta h} \quad (1-4)$$

关于咬入角 α 的表示法，由图示的几何关系可知：

$$\sin \alpha = l/R = \sqrt{\Delta h/R}$$

当 α 很小时，近似地取 $\sin \alpha \approx \alpha$ ，则得：

$$\alpha = \sqrt{\Delta h/R} \quad (1-5)$$

$$\Delta h = R\alpha^2$$

咬入角、压下量和轧辊工作直径之间的关系，由图 1-2 可知：

$$R \cos \alpha = R - \Delta h/2$$

整理后得

$$\Delta h = D_K(1 - \cos \alpha) \quad (1-6)$$

式中 D_K ——轧辊工作直径。

为简化计算，又可将 Δh 、 D_K 和 α 三者之间的关系用算图来显示。如图 1-3 所示，只要知道 Δh 、 D_K 和 α 三个参数中的任意两个，便可应用算图很快地求出第三个参数。

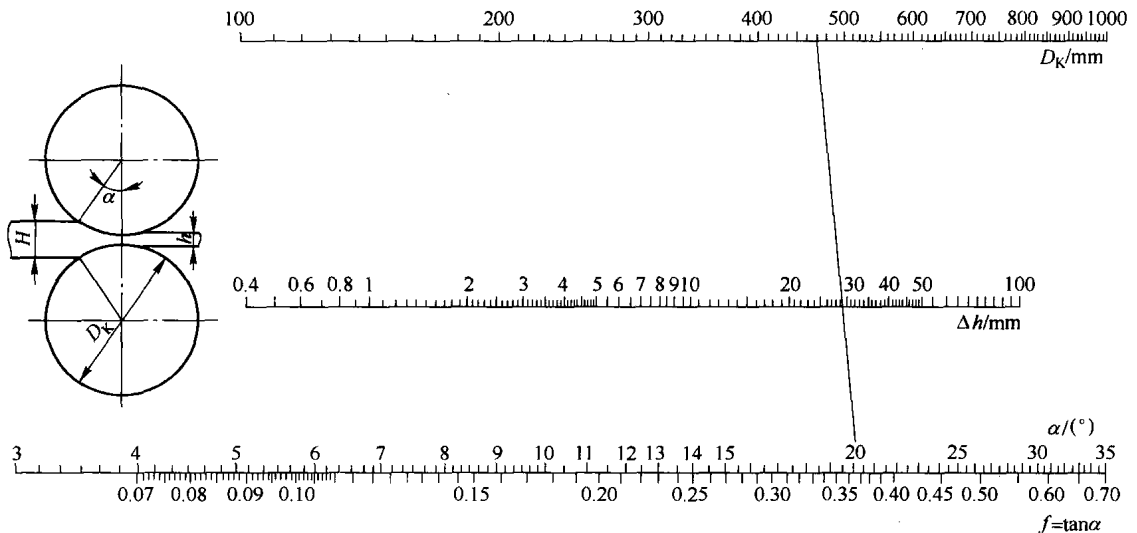


图 1-3 Δh - α - D_K 图

1.1.3 轧制变形的表示方法

轧制变形使轧件三个方向上的尺寸发生变化。为简化工程计算，通常假定这三个主要变形方向和主轴方向一致，即三个主轴方向发生的变形为主变形。变形的表示方法有三种。

1.1.3.1 绝对变形量表示方法

表示轧件高向变形的量称为压下量。即：

$$\Delta h = H - h \quad (1-7)$$

表示轧件宽向变形的量称为宽展量。即：

$$\Delta b = B_h - B_H \quad (1-8)$$

表示轧件纵向变形的量称为伸长量。即：

$$\Delta l = L_h - L_H \quad (1-9)$$

式中 H 、 B_H 和 L_H ， h 、 B_h 和 L_h ——分别为轧件轧前与轧后的高、宽和长度。

绝对变形量表示变形的的方法，在大、中型及开坯生产，板带钢生产中应用较多，尤以前二者应用更为广泛。绝对变形量不能确切地表示变形程度的大小，只能表示轧件外形尺寸的变化。

1.1.3.2 相对变形量表示方法

一般相对变形量是用绝对变形量与轧件原始尺寸（或轧后尺寸）的比值表示的。即：

$$\varepsilon_1 = \frac{H - h}{H} = 1 - \frac{h}{H} \quad \text{或} \quad \varepsilon_1 = \frac{H - h}{h} = \frac{H}{h} - 1 \quad (1-10)$$

$$\text{同理} \quad \varepsilon_2 = \frac{B_h - B_H}{B_H} \quad \text{或} \quad \varepsilon_2 = \frac{B_h - B_H}{B_h} \quad (1-11)$$

$$\varepsilon_3 = \frac{L_h - L_H}{L_H} \quad \text{或} \quad \varepsilon_3 = \frac{L_h - L_H}{L_h} \quad (1-12)$$

为了确切地表示轧件某一瞬间的真实变形程度，又可用对数方法表示轧件的变形程度。即：

$$e_1 = \int_H^h \frac{dh_x}{h_x} = \ln \frac{h}{H} \quad (1-13)$$

$$e_2 = \int_{B_H}^{B_h} \frac{db_x}{b_x} = \ln \frac{B_h}{B_H} \quad (1-14)$$

$$e_3 = \int_{L_H}^{L_h} \frac{dl_x}{l_x} = \ln \frac{L_h}{L_H} \quad (1-15)$$

用对数表示的变形，反映了轧件的真实变形程度，所以又称真变形。根据体积不变定律，三个互相垂直方向的真变形的代数和应等于零，所以已知其中任意两个，便可求出另外一个真变形。一般在要求精度较高的计算时，才使用真变形。在简单轧制条件下，为了计算方便，经常采用的是相对变形量。相对变形量能够表示出轧件变形的大小。例如，同是 $\Delta h = 1\text{mm}$ 变形量的两个轧件，对于原高为 100mm 的轧件，变形量只有 1% ，而对于原高为 2mm 的轧件，其变形量达到 50% 。所以相对变形量表示方法在工程计算上较为常用。

1.1.3.3 变形系数表示方法

表示高度方向变形的系数称为压下系数。即：

$$\eta = \frac{H}{h} \quad (1-16)$$

表示宽度方向变形的系数称为宽展系数。即：

$$\beta = \frac{B_h}{B_H} \quad (1-17)$$

表示长度方向变形的系数称为伸长系数。即：

$$\mu = \frac{L_h}{L_H} \quad (1-18)$$

根据塑性变形遵守的体积不变定律，则对于任意横断面面积，可有以下关系：

$$\begin{aligned} F_0 L_0 &= FL \\ F_0/F &= L/L_0 = \mu \end{aligned} \quad (1-19)$$

式中 F_0 、 L_0 ——分别为轧件轧前横断面面积、长度；

F 、 L ——分别为轧制某道次后轧件的横断面面积、长度。

可见伸长系数 μ 又可等于轧制前与轧制后轧件横断面面积之比，而且伸长系数之值总大于1。

轧制时，由坯料到成品要经过若干道次，其中每一道次断面的变形称为道次伸长系数；由坯料原始横断面至成品横断面的变形，称为总伸长系数。

如轧制 n 道次，各道次轧前轧件横断面面积为： $F_0 = \mu_1 F_1, F_1 = \mu_2 F_2, F_2 = \mu_3 F_3, \dots, F_{n-1} = \mu_n F_n$ 。故 $F_0 = \mu_1 \cdot \mu_2 \cdot \mu_3 \cdots \mu_n F_n$ 。

$$F_0/F_n = \mu_1 \cdot \mu_2 \cdot \mu_3 \cdots \mu_n = \mu_\Sigma \quad (1-20)$$

式中 μ_Σ ——轧件轧制 n 道次后的总伸长系数，等于各道次伸长系数的乘积；

F_0 、 F_n ——分别为轧件轧前、轧后的横断面面积；

$F_1 \sim F_{n-1}$ ——分别为1~($n-1$)道次轧件轧后的横断面面积；

$\mu_1 \sim \mu_n$ ——分别为1~ n 道次的伸长系数。

假如各道次的伸长系数都相等，均等于平均伸长系数 $\bar{\mu}$ ，则：

$$\mu_\Sigma = \frac{F_0}{F_n} = (\bar{\mu})^n$$

故

$$\bar{\mu} = \sqrt[n]{\mu_\Sigma} = \sqrt[n]{F_0/F_n} \quad (1-21)$$

同理，也可以很容易地导出轧制道次同轧件原始断面面积、成品断面面积及平均伸长系数的关系，即：

$$n = \frac{\lg F_0 - \lg F_n}{\lg \bar{\mu}} \quad (1-22)$$

在忽略宽展，如轧制板材时，可以认为 $B_H = B_h$ ，则该伸长系数为：

$$\mu = F_0/F = B_H H/B_h h = H/h = \eta \quad (1-23)$$

即轧制板材时，伸长系数可以用压下系数表示。

同理，也可以得到总压下系数与部分压下系数间的关系：

$$\eta_\Sigma = \frac{H}{h_n} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdots \eta_n \quad (1-24)$$

由式(1-10)可知，在不计宽展时，相对压下量和伸长系数间存在如下关系：

$$\varepsilon_1 = 1 - \frac{1}{\mu} \quad (1-25)$$

或

$$\mu = \frac{1}{1 - \varepsilon_1} \quad (1-26)$$

1.1.4 平均工作辊径与平均压下量

公式(1-6)中所用轧辊直径为轧辊工作直径。所谓工作直径是指轧辊与轧件相接触处的