



北京市高等教育精品教材

(第2版)

轧制工程学

康永林 孙建林 等编著

ZHAZHI GONGCHENGXUE



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

北京市高等教育精品教材

轧制工程学

(第2版)

康永林 孙建林 等编著

北 京
冶金工业出版社
2014

内 容 提 要

本书较系统地介绍了轧制工程所涉及的基本原理、方法和主要生产工艺,以及工程技术的相关知识与进展,内容包括轧制理论、板带轧制、钢管成形、型钢轧制与孔型设计、棒线材轧制和控制冷却六章,较全面地介绍了本学科的知识体系。书中所涉及的成形材料包括了钢铁材料和有色金属材料,各章都配备了适量的思考题。通过学习,相关专业学生和技术人员对该领域会有较全面的了解。

本书可作为高等学校材料成形与控制工程和材料科学与工程专业本科生的专业课教材,也可供有关专业的研究生,生产、科研和设计等部门的科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

轧制工程学/康永林,孙建林等编著. —2版. —北京:冶金工业出版社, 2014. 9

北京市高等教育精品教材

ISBN 978-7-5024-6677-0

I. ①轧… II. ①康… ②孙… III. ①轧制 IV. ①TG33

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第191520号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷39号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjcbbs@cnmp.com.cn

责任编辑 宋 良 美术编辑 吕欣童 版式设计 孙跃红

责任校对 禹 蕊 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-6677-0

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;三河市双峰印刷装订有限公司印刷
2004年6月第1版,2014年9月第2版,2014年9月第1次印刷

787mm×1092mm 1/16; 22.75印张; 548千字; 351页

46.00元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街46号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgy.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

第 2 版 前 言

在金属材料尤其是钢铁材料塑性加工生产中, 90% 以上是通过轧制成形的, 由此可见, 轧制工程技术在冶金工业及国民经济建设中占有十分重要的地位。近年来, 轧制工程技术发展迅速, 薄板坯连铸连轧、近终形薄带铸轧、高精度板带钢管及型线材轧制、无头半无头轧制、自由规程轧制、多线切分轧制及高速轧制等现代轧制技术以及现代控制冷却技术日新月异, 尤其是与信息技术、智能控制技术和现代工程控制管理技术的紧密结合, 使现代控制轧制与控制冷却成为复杂的系统工程。因此, 轧制工程学所涉及的基础理论、应用技术基础和工程控制技术知识也十分广泛, 要进行全面介绍, 其难度可想而知。

本书是在 2004 年出版的北京市高等教育精品教材《轧制工程学》基础上, 结合近年轧制工艺技术的最新进展, 进行较大的修改更新而成的, 目的是较系统地介绍轧制工程所涉及的基本原理和方法、工艺及工程技术的相关知识与发展, 使相关专业学生和工程技术人员对该领域的基础和工艺工程技术有较全面的了解。

本书内容主要包括轧制理论、板带轧制理论及工艺、钢管成形理论及工艺、型材轧制工艺及孔型设计基础、棒线材轧制工艺和控制冷却理论及工艺等六个部分, 较全面地介绍了轧制工程的理论和主要工艺技术。书中所涉及的轧制成形材料不仅限于钢铁材料, 也部分涉及有色金属材料。全书由康永林、孙建林等编著, 其中第 1 章及 2.3.2.2 节、2.3.2.3 节由康永林编写; 第 2 章由孙建林编写; 第 3 章由刘靖编写; 第 4 章由洪慧平编写; 第 5 章及 6.3.3 节由于浩编写; 第 6 章由朱国明编写。

本书可供高等学校材料科学与工程专业、材料成形与控制工程专业教学使用, 也可供有关生产、科研和设计等部门的专业科技人员参考。

编 者
2014 年 6 月
于北京科技大学

第 1 版 前 言

金属材料尤其是钢铁材料的塑性加工，90%以上是通过轧制完成的。由此可见，轧制工程技术在冶金工业及国民经济生产中占有十分重要的地位。近年来，轧制工程技术发展迅速，薄板坯连铸连轧技术、近终形薄带铸轧技术、高精度板带、钢管及型线材轧制技术、无头轧制及自由规程轧制等现代轧制技术日新月异，尤其是信息技术、智能控制技术和现代工程控制管理技术的应用，轧制工程已成为复杂的系统工程。因此，要全面、系统地介绍轧制工程学所涉及的基础理论、应用技术基础和工程控制技术，其难度可以想象。本书的目的是介绍轧制工程所涉及的基本原理和方法、工程技术基础及工艺知识，使有关人员对该领域的基础和工艺技术有一较全面的了解。

本书内容主要包括轧制理论、板带轧制理论及工艺、钢管成形理论及工艺、型钢孔型设计基础及棒线材轧制五个部分，基本反映了轧制工程的理论和主要工艺技术。书中所涉及的成形材料不仅限于钢铁材料，也涉及到有色金属材料。全书由康永林主编；第1章由康永林编写，第2章由孙建林编写，第3章由刘靖编写，第4章由洪慧平编写，第5章由陈银莉编写。全书由王有铭教授、朱景清教授和韦光教授审阅，于浩博士也参加了本书的部分编写和校对工作，编者对他们表示衷心感谢。

本书可供材料成形与控制工程专业和材料科学与工程专业的本科生、专科生使用，也可供有关专业的研究生及生产、科研和设计等部门的科技人员参考。

编 者
2004 年 1 月

目 录

1 轧制理论	1
1.1 轧制过程的基本概念	1
1.1.1 轧制变形区的几何参数	1
1.1.2 咬入条件和轧制过程的建立	5
1.2 轧制过程中金属的变形	8
1.2.1 轧制时金属变形的基本概念及变形系数	8
1.2.2 轧制时金属的宽展	10
1.2.3 轧制过程中的不均匀变形	18
1.3 轧制过程中的前滑和后滑	20
1.3.1 平辊轧制前滑、后滑的计算	20
1.3.2 平辊轧制时中性角的确定	23
1.3.3 影响前滑的主要因素	25
1.4 轧制过程中的摩擦	28
1.4.1 摩擦的基本概念	28
1.4.2 金属塑性成形时摩擦的特点	28
1.4.3 接触摩擦理论	29
1.4.4 确定轧制时摩擦系数的方法	31
1.5 金属的变形抗力	36
1.5.1 变形抗力的基本概念	36
1.5.2 影响变形抗力的因素	40
1.5.3 冷变形抗力	44
1.5.4 热变形抗力	46
1.6 轧制压力、轧制力矩及功率	50
1.6.1 轧制单位压力的理论及实验	50
1.6.2 轧制力计算	57
1.6.3 轧制力矩及功率	68
1.7 连续轧制理论	76
1.7.1 连续轧制基本规律	77
1.7.2 连续轧制中的前滑	79
1.7.3 连续轧制的静态特性	80
1.7.4 连续轧制的动态特性	82
思考题	87
参考文献	88

2 板带轧制理论及工艺	90
2.1 板带材生产概论	90
2.1.1 板带钢的种类及用途	90
2.1.2 板带钢产品的技术要求	90
2.1.3 有色金属板带材的种类及用途	91
2.1.4 板带材生产特点	93
2.2 板带轧机	93
2.2.1 板带轧机的分类	93
2.2.2 高精度板带轧机	98
2.2.3 轧机刚度	99
2.3 板带生产工艺	105
2.3.1 中厚板生产工艺	105
2.3.2 热连轧板带生产工艺	118
2.3.3 冷轧板带生产工艺	134
2.3.4 有色金属板带材生产工艺	141
2.4 板厚控制	146
2.4.1 产生板厚变化的原因	146
2.4.2 板厚控制原理	147
2.4.3 连轧板厚控制	148
2.4.4 板厚自动控制系统 AGC	149
2.5 板形控制	151
2.5.1 板形的定义	151
2.5.2 板形控制原理	152
2.5.3 板形控制技术	154
2.5.4 板形控制系统	154
2.6 轧材性能控制	156
2.6.1 影响材质的因素与钢板强化机制	156
2.6.2 轧制工艺对材质的影响	157
2.6.3 轧制工艺与材质控制	159
思考题	162
参考文献	163
3 钢管成形理论及工艺	164
3.1 概述	164
3.1.1 钢管的特性及分类	164
3.1.2 钢管生产的基本工艺	164
3.1.3 钢管的技术要求与钢管生产技术进步的趋势	166
3.2 热轧无缝钢管的生产	167

3.2.1 钢管的一般生产工艺过程	167
3.2.2 无缝钢管的穿孔工艺	169
3.2.3 毛管的轧制延伸理论及工艺	178
3.2.4 钢管的定、减径工艺及理论	185
3.2.5 无缝钢管的质量控制	188
3.3 焊管生产	193
3.3.1 焊管生产的一般工艺过程	193
3.3.2 直缝焊管的成形	194
3.3.3 螺旋焊管成形	197
3.3.4 焊管的焊接	197
3.4 钢管的冷加工	200
3.4.1 概述	200
3.4.2 钢管的冷轧生产	201
3.4.3 钢管的冷拔生产	202
思考题	204
参考文献	205
4 型材轧制工艺及孔型设计基础	206
4.1 型材轧制工艺基础	206
4.1.1 型材生产的特点	206
4.1.2 型材的分类和特征	206
4.1.3 经济断面型材和深加工型材	207
4.1.4 有色金属型材	208
4.1.5 型材轧制工艺	209
4.1.6 型材轧机分类及典型布置形式	210
4.2 孔型设计的基本知识	212
4.2.1 孔型设计的内容和要求	212
4.2.2 孔型设计的主要步骤	213
4.2.3 孔型的形状及分类	215
4.2.4 孔型的构成和各部分的作用	216
4.2.5 孔型在轧辊上的配置	219
4.3 延伸孔型设计	223
4.3.1 延伸孔型设计方法概述	223
4.3.2 延伸孔型系统分析与设计	224
4.3.3 箱形孔型系统	226
4.3.4 菱一方孔型系统	228
4.3.5 椭圆一方孔型系统	231
4.3.6 六角一方孔型系统	233
4.3.7 椭圆—立椭圆孔型系统	234

4.3.8 椭圆—圆孔型系统	236
4.3.9 延伸孔型系统的参数计算	238
4.3.10 延伸孔型系统的比较	239
4.4 型材孔型设计	244
4.4.1 简单断面型材孔型设计	244
4.4.2 复杂断面型材的孔型设计	250
4.5 计算机辅助孔型设计	255
4.5.1 计算机辅助孔型设计的意义	255
4.5.2 计算机辅助孔型设计的主要功能	256
4.5.3 计算机辅助孔型设计算例	257
思考题	260
参考文献	261
5 棒线材轧制工艺	262
5.1 棒、线材概述	262
5.1.1 棒、线材品种及分类	262
5.1.2 棒、线材的用途	263
5.1.3 棒、线材产品的应用及发展	263
5.2 棒、线材生产	264
5.2.1 高速线材轧机类型及布置	264
5.2.2 高速线材生产工艺流程	267
5.2.3 高速线材轧制新技术	269
5.2.4 棒材轧机类型及布置	270
5.2.5 棒材轧制新技术	271
5.3 螺纹钢筋生产	273
5.3.1 概述	273
5.3.2 生产装备	273
5.3.3 高强钢筋生产工艺	274
5.3.4 钢筋热处理工艺	285
5.4 典型棒线材合金系统设计与工艺控制	287
5.4.1 非调质钢棒材分类及特点	287
5.4.2 冷锻钢分类及特点	290
思考题	296
参考文献	296
6 控制冷却理论及工艺	297
6.1 控制冷却理论基础	297
6.1.1 控制冷却方式	297
6.1.2 水冷过程中的物理现象	309

6.1.3	轧后控制冷却的分段	319
6.1.4	控制冷却对钢材组织性能的影响	320
6.1.5	控制冷却过程钢材温度场的数值模拟方法	327
6.2	热轧板带钢控制冷却	329
6.2.1	热轧板带钢冷却的换热形式	329
6.2.2	中厚板控制冷却	330
6.2.3	热连轧带钢控制冷却	333
6.3	型钢轧制过程中的控制冷却	336
6.3.1	H型钢轧制的控制冷却	336
6.3.2	钢轨轧制的控制冷却	340
6.3.3	棒线材轧制的控制冷却	341
6.3.4	其他常见型钢轧制的控制冷却	347
思考题		349
参考文献		350

1 轧制理论

1.1 轧制过程的基本概念

1.1.1 轧制变形区的几何参数

1.1.1.1 轧制变形区和描述参数

A 轧制变形区

轧制过程是由轧件与轧辊之间的摩擦力将轧件拉进相对旋转方向的轧辊之间使之产生塑性变形的过程。轧制变形区是指轧制时，轧件在轧辊作用下发生变形的体积。实际的轧制变形区分成弹性变形区、塑性变形区和弹性恢复区三个区域（见图 1-1）。在热轧时，轧辊表面粗糙情况下，轧件与轧辊有一部分粘着在一起，轧件轧制时发生的变形情况又复杂得多。

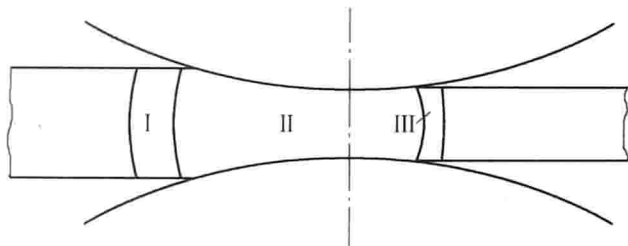


图 1-1 冷轧薄板的变形区

I—弹性变形区；II—塑性变形区；III—弹性恢复区

在实际分析中，一般将轧制变形区简化为轧辊与轧件接触面之间的几何区。最简单的轧制变形区是轧制宽而较薄的钢板轧机的变形区，如图 1-2 所示。当轧件横向变形为零时，变形区水平投影为一矩形。当有宽展存在时，变形区水平投影近似为梯形。

B 描述变形区的参数

图 1-2 中，描述变形区的主要参数有：

α ——咬入角，轧件被咬入轧辊时，轧件和轧辊最先接触点（实际上为一条线）和轧辊中心的连线与两轧辊中心连线所构成的角度；

l ——接触弧长的水平投影，也称变形区长度；

F ——接触面水平投影面积，简称接触面积；

l/h_m ——变形区形状参数， $h_m = (H + h)/2$ （变形区平均高度）。

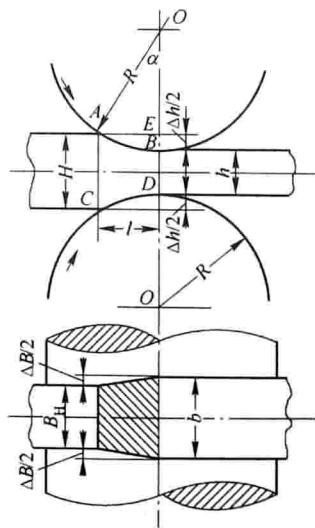


图 1-2 轧制板材的变形区

1.1.1.2 简单轧制时变形区参数间的关系

A 简单轧制

实际生产中有各种各样的轧辊组合形式，在轧制方式中，主要是纵轧，轧辊组合形式有2辊、3辊、4辊、6辊、8辊、12辊、20辊等不同形式。但除Y型轧机、行星轧机等形式轧机外，轧件承受压缩产生塑性变形是在一对工作辊之间完成的。这是轧制过程的最基本形式。

但是一对工作辊也有各种不同的情况，如辊径相同和不同，轧辊刻槽和不刻槽（平辊），轧辊转速相同和不同，轧辊均为主动（传动）或一个主动辊一个被动辊的，轧制时有无张力或推力，轧件温度、摩擦条件是否均匀等等。

为了便于进行研究分析，对一些轧制条件做出假设和简化，建立一个理想的轧制模型，这就是简单理想轧制过程，即上下轧辊直径相同，均为传动辊，转速相同，轧辊为圆柱形刚体，轧件金属为均匀连续体，轧制时变形均匀，轧件为平板（参见图1-2）。

B 咬入角 α 、轧辊直径 D 、压下量 Δh 间的关系

利用图1-2中的几何关系，可以得出

$$EB = OB - OE$$

其中 $EB = \frac{\Delta h}{2}$, $OB = R = \frac{D}{2}$, $OE = R \cos \alpha = \frac{D}{2} \cos \alpha$, 代入上式得出

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

根据三角函数关系，当 α 较小时 ($\alpha < 10^\circ \sim 15^\circ$)，取近似值 $\sin \frac{\alpha}{2} \approx \frac{\alpha}{2}$ ，因此可得

$$\Delta h \approx R \alpha^2 \quad (1-2)$$

根据上式，当轧辊直径相同时 ($D = C$, C 为常数)，压下量 Δh 随咬入角 α 呈抛物线型增长（见图1-3a），当咬入角 α 一定时 ($\alpha = C$)，压下量 Δh 与轧辊直径呈线性关系（见图1-3b），而当压下量一定时 ($\Delta h = C$)，咬入角 α 随轧辊直径 D 的增加呈双曲线型下降（见图1-3c）。式（1-2）的咬入角 α 也可以表示为：

$$\alpha \approx \sqrt{\Delta h / R} \quad (\text{弧度}) \quad (1-2')$$

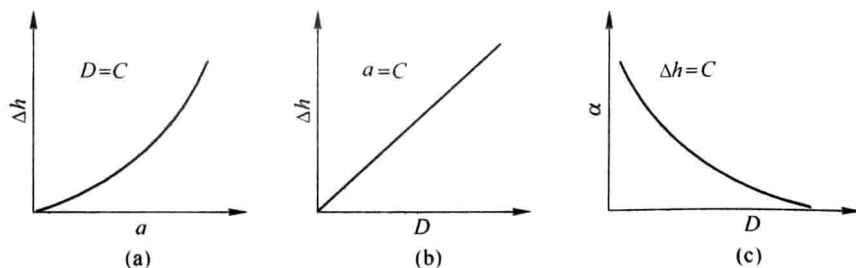


图1-3 压下量、咬入角、轧辊直径三者间的关系

如考虑轧机机架的弹性变形 δ 时，咬入角 α 近似为

$$\alpha \approx \sqrt{(\Delta h - \delta) / R} \quad (1-3)$$

1.1.1.3 变形区长度及接触面积计算

A 变形区长度计算

由图 1-2 得

$$l = R \sin \alpha \text{ 或 } l^2 = R^2 - \left(R - \frac{\Delta h}{2}\right)^2 = R \Delta h - \frac{\Delta h^2}{4}$$

则有

$$l = \sqrt{R \Delta h - \frac{\Delta h^2}{4}} \quad (1-4)$$

如果忽略 $\frac{\Delta h^2}{4}$, 则变形区长度 l 可近似用下式表示

$$l \approx \sqrt{R \Delta h} \quad (1-5)$$

B 考虑轧辊及轧件弹性变形时的变形区长度 l'

在冷轧薄板以及热轧厚度小于 4 ~ 6mm 的薄板时, 由于在金属和轧辊表面上产生较高的接触应力, 使轧辊产生弹性压扁, 而被加工金属在塑性变形后也有弹性恢复, 因而造成接触弧长度增加。由于弹性压扁的接触弧长增加量可达 30% ~ 100% (有的甚至更大), 在这种情况下, 简单轧制时变形区长度公式就不适用了。

设轧辊的弹性变形量为 Δ_1 , 轧件的弹性恢复值为 Δ_2 (图 1-4), 为得到 Δh 的绝对压下量, 应多压下 $\Delta_1 + \Delta_2$ 。由 $\triangle OA_2D$ 得:

$$x_1 = \sqrt{2R \left(\frac{\Delta h}{2} + \Delta_1 + \Delta_2 \right)} \quad (1-6)$$

从 $\triangle OB_1C$ 可近似得到

$$x_2 \approx \sqrt{2R(\Delta_1 + \Delta_2)} \quad (1-7)$$

考虑轧辊和轧件弹性变形时的变形区长度 l' 为

$$l' = x_1 + x_2 \approx \sqrt{2R \left(\frac{\Delta h}{2} + \Delta_1 + \Delta_2 \right)} + \sqrt{2R(\Delta_1 + \Delta_2)} \quad (1-8)$$

或者

$$l' \approx \sqrt{R \Delta h + x_2^2} + x_2 \quad (1-9)$$

Δ_1 和 Δ_2 的值可由弹性理论中关于两个圆柱体压缩的结论来确定。如果忽略轧制时两圆柱体压缩在轧辊连心线两边的非对称性, 变形量 Δ_1 和 Δ_2 可表示为

$$\Delta_1 = 2\gamma \frac{1 - \nu_1^2}{\pi E_1}, \quad \Delta_2 = 2\gamma \frac{1 - \nu_2^2}{\pi E_2} \quad (1-10)$$

式中 γ ——压缩圆柱体单位长度上的压力;

ν_1, ν_2 ——轧辊与轧件的泊松系数;

E_1, E_2 ——轧辊与轧件的弹性模量。

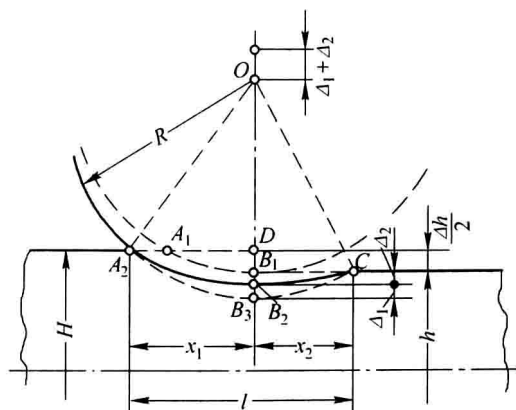


图 1-4 考虑轧辊和轧件弹性变形时的变形区长度

如果平均单位压力用 $\bar{p}$ 表示, γ 值为

$$\gamma = 2x_2\bar{p} \quad (1-11)$$

将式 (1-10)、式 (1-11) 代入式 (1-7), 得

$$x_2 = 8\bar{p}R \left(\frac{1-\nu_1^2}{\pi E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{\pi E_2} \right) \quad (1-12)$$

如忽略轧件弹性变形 (考虑轧件厚度与轧辊直径相比非常小, 即 $h \ll R$, 忽略 Δ_2), 则有

$$x_2 = 8\bar{p}R \frac{1-\nu_1^2}{\pi E_1} = CR\bar{p} \quad \left(C = 8 \frac{1-\nu_1^2}{\pi E_1} \right) \quad (1-13)$$

若钢轧辊 $E = 2.2 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$, $\nu = 0.3$, 此时

$$x_2 \approx \frac{\bar{p}R}{9500} \quad (\text{mm})$$

对钢轧辊

$$l' = \sqrt{R\Delta h + \left(\frac{\bar{p}R}{9500} \right)^2} + \frac{\bar{p}R}{9500} \quad (1-14)$$

有时为了方便, 也用 R' 来表示 l' , 即

$$l' = \sqrt{R'\Delta h} \quad (1-15)$$

下面确定 R' 。平均单位压力 $\bar{p}$ 可写成

$$\bar{p} = \frac{P_0}{l'}$$

式中 P_0 ——单位宽度上的总压力 ($P_0 = P/B$)。

将式 (1-13) 代入式 (1-9), 得

$$R'\Delta h = \sqrt{C^2 R^2 P_0^2 + RR'(\Delta h)^2} + CRP_0$$

经移项整理得

$$R' = R \left(1 + \frac{2CP_0}{\Delta h} \right)$$

或

$$R' = R \left(1 + \frac{2CP}{\Delta h B} \right) \quad (1-16)$$

当采用其他材质的轧辊轧制时, 把相应的 E 和 ν 值代入式 (1-13), 确定 x_2 数值。用式 (1-15) 不能直接求解, 因为平均单位压力 $\bar{p}$ 未知, 因此需用迭代法求解式 (1-16), 再由式 (1-15) 求得 l' 。

C 接触面积计算

前已述及, 接触面积是指轧制时轧辊与轧件实际接触面积的水平投影, 这是计算轧制力时非常重要的参数。

这里只考虑平辊轧制时的接触面积 (若轧件入、出口宽度分别为 B 、 b), 其形状为梯形, 则

$$F = \bar{B}l = \frac{B+b}{2} \sqrt{R\Delta h} \quad (1-17)$$

考虑轧辊及轧件弹性变形时的接触面积为

$$F = \bar{B}l' = \frac{B+b}{2}l' \quad (1-18)$$

上、下工作辊径 R_1 、 R_2 不同 ($R_1 \neq R_2$) 时的接触面积为

$$F = \bar{B}l = \frac{B+b}{2} \sqrt{\frac{2R_1R_2\Delta h}{R_1+R_2}} \quad (1-19)$$

1.1.2 咬入条件和轧制过程的建立

1.1.2.1 平辊轧制的咬入条件

在轧钢生产中, 轧制过程有时能顺利进行, 有时会出现轧件不能顺利进入轧辊或者说轧件不能被轧辊咬入, 使轧制不能进行。所以轧制过程能否建立的先决条件是轧件能否被轧辊咬入。轧件在轧辊上的咬入过程是一个不稳定过程, 因为在咬入的时候, 变形区的几何参数、运动学参数以及力能参数都是变化的。

为完成轧制过程, 必须使轧辊咬入轧件, 只有当轧件上作用有外力, 使其紧贴在轧辊上时才可能咬入。这种使轧件紧贴轧辊的力, 可能是轧件运动的惯性力, 也可能是由施力装置给的, 还可能是轧钢工喂钢时的撞击力。在这种力作用下, 轧辊与轧件前端接触, 前端边缘被挤压时产生摩擦力, 由摩擦力把轧件曳入辊缝中。

分析轧件曳入时的平衡条件 (见图 1-5), 应当是有利于咬入的水平投影力的总和大于阻碍咬入的水平投影力的总和:

$$(Q - F) + 2T_x > 2P_x \quad (1-20)$$

式中 P_x ——正压力 P 的水平投影;

T_x ——摩擦力 T 的水平投影;

Q ——外推力;

F ——惯性力。

采用库仑摩擦定律, 则有

$$T_x = \mu P \cos\left(\alpha - \frac{\theta}{2}\right), \quad P_x = P \sin\left(\alpha - \frac{\theta}{2}\right)$$

式中 α ——咬入角;

θ ——边缘挤压角。

把 T_x 和 P_x 代入式 (1-20), 得出 μ , 则轧件被轧辊咬入的条件是:

$$\mu \geq \tan\left(\alpha - \frac{\theta}{2}\right) - \frac{Q - F}{2P \cos\left(\alpha - \frac{\theta}{2}\right)}$$

如果没有水平外力作用, Q 可以忽略, 且不考虑惯性力 F , 那么轧入条件可以写成

$$\mu \geq \tan\alpha \quad (1-21)$$

如果用咬入时摩擦角 β 的正切来表示 μ , 咬入条件又可写成

$$\beta \geq \alpha \quad (1-22)$$

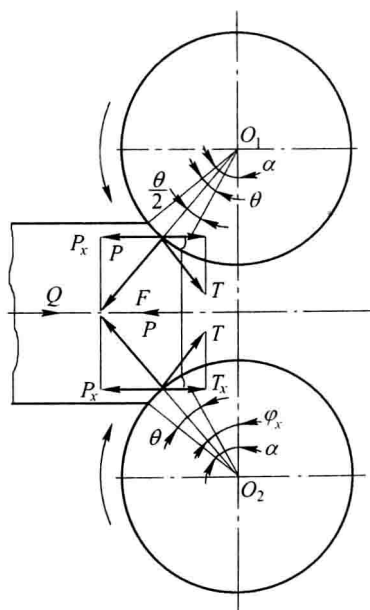


图 1-5 轧件进入轧辊时的作用力图示

这个条件意味着只有当咬入时的摩擦角 β 等于或大于咬入角 α 时才能实现轧件进入辊缝的过程 ($\beta = \alpha$ 为咬入的临界条件)。

1.1.2.2 轧制过程建成条件分析

当轧件前端到达轧辊中心线后, 轧制过程建成。在轧制过程建成时, 假设接触表面的摩擦条件和其他参数均保持不变, 合力作用点将由入口平面移向接触区内。

在 x 轴上列出轧件-轧辊的力学平衡条件, 其临界条件是 (见图 1-6)

$$2T_x - 2P_x = 0$$

采用库仑摩擦条件 $T = \mu P$ 并考虑到

$$P_x = P \sin \varphi_x, T_x = T \cos \varphi_x = \mu_y P \cos \varphi_x$$

式中 φ_x ——合力作用角;

μ_y ——轧制过程建成后的摩擦系数。

因此有

$$\mu_y P \cos \varphi_x = P \sin \varphi_x, \mu_y = \tan \varphi_x$$

由于建成过程的摩擦系数为 $\mu_y = \tan \beta_y$, 则有

$$\beta_y = \varphi_x$$

(1-23)

设 n 为合力移动系数, $n \geq 1$, 则 φ_x 可表示为

$$\varphi_x = \frac{\alpha_y}{n}$$

式中 α_y ——轧制过程建成后, 轧辊与轧件的接触角。

将上式代入式 (1-23)

$$\beta_y = \frac{\alpha_y}{n}$$

轧制过程建成后的最大接触角为

$$\alpha_{y\max} = n\beta_y \quad (1-24)$$

如果设 $n = 2$ (当沿接触弧应力均匀分布时有这种可能, 在这种情况下, 合力作用点在接触弧的中点), 则轧制过程建成后的最大接触角为

$$\alpha_{y\max} = 2\beta_y \quad (1-25)$$

由式 (1-22) 得最大咬入角为

$$\alpha_{\max} = \beta \quad (1-26)$$

因此, 轧制过程建成的综合条件乃是

$$\alpha_y \leq n\beta_y$$

当 $\alpha_y > n\beta_y$ 时, 轧制过程不能进行, 并且轧件在轧辊上打滑。用式 (1-24) 除以式 (1-26), 得到

$$\alpha_{y\max} / \alpha_{\max} = n\beta_y / \beta \quad (1-27)$$

从上式可以看出, 轧制过程建成时的最大接触角与最大咬入角的比值, 可以由合力移动系数 n 与摩擦角的比值决定。

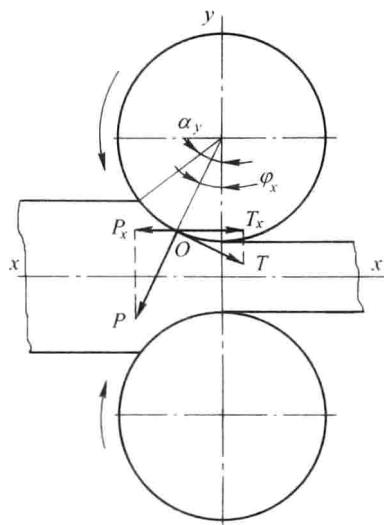


图 1-6 轧件-轧辊的平衡条件

$$\text{当 } n=2 \text{ 和 } \beta=\beta_y \text{ 时} \quad \alpha_{y\max} = 2\alpha_{\max} \quad (1-28)$$

可见，轧制过程建成的最大接触角是咬入时最大咬入角的两倍。研究指出，轧制条件决定了 $\alpha_{y\max}/\alpha_{\max}$ 的比值变化在 1~2 之间。

1.1.2.3 利用和改善咬入条件的方法

A 剩余摩擦力的概念

轧件从开始咬入到轧制建成的过程中，有利于轧件咬入的水平分力 T_x （见图 1-6）不断增加，而阻碍轧件咬入的水平分力 P_x 不断减小， $T_x - P_x$ 的差值愈来愈大，也就是咬入过程所要求的靠摩擦作用的曳入力愈来愈富余。我们将咬入力 T_x 和水平阻力 P_x 的差值称为剩余摩擦力，并用 T_s 表示。

$$T_s = T_x - P_x = \mu P \cos \varphi - P \sin \varphi$$

如引入摩擦角 β ，且 $\mu = \tan \beta$ ，则有

$$T_s = P(\tan \beta \cos \varphi - \sin \varphi)$$

当 β 、 φ 很小时， $\tan \beta \approx \beta$ ， $\cos \varphi \approx 1$ ， $\sin \varphi \approx \varphi$ ，上式简化为

$$T_s = P \tan(\beta - \varphi) \quad (1-29)$$

如将剩余摩擦角的概念引入剩余摩擦力中，剩余摩擦力表示为

$$T_s = P \tan \omega$$

当剩余摩擦角 ω 很小时， $\tan \omega \approx \omega$ ，则

$$T_s = P \omega \quad (1-30)$$

比较式 (1-29) 和式 (1-30)，显然 ω 为

$$\omega = \beta - \varphi \quad (1-31)$$

可知，剩余摩擦角 ω 等于金属与轧辊间的接触摩擦角 β 与合力作用角 φ 的差值。

最初咬入时， $\varphi = \alpha$ （咬入角），此时自然咬入的临界条件如 $\alpha = \beta$ ，即 $\varphi = \beta$ ，则 $\omega = \beta - \varphi = 0$ 。这表明自然咬入时没有剩余摩擦力。

当 $\varphi < \alpha$ 时， $\omega = \beta - \varphi > 0$ ，产生剩余摩擦力。

当 $\varphi = \frac{\alpha}{2}$ 时， $\omega = \beta - \varphi = \frac{\alpha}{2}$ ，轧制过程建成，剩余摩擦角 ω 达到最大值（见图 1-7）。

引入剩余摩擦力（角）的概念有助于分析轧件咬入中的一些现象以及合理利用咬入特性。例如，当以 $\beta = \alpha$ 的条件咬入轧件并过渡到轧制过程建成后，可以大大增加压下量，只要保证 $\omega = \beta - \varphi \geq 0$ 即可，即利用剩余摩擦力来提高压下量。带钢压下就是利用了这个原理。

B 改善咬入条件的方法

从咬入条件的分析中可以看出，改善咬入特性是提

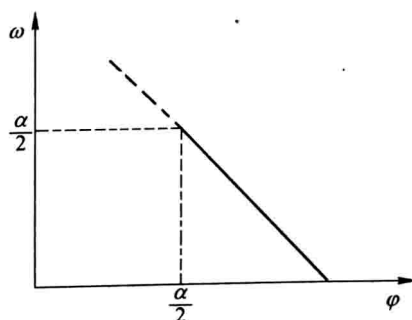


图 1-7 剩余摩擦角 ω 与合力作用角 φ 的关系