

有色金属 板带材生产

傅祖铸 主编

646
-38

中南工业大学出版社

有色金属板带材生产

付祖铸 主编

中南工业大学出版社

有色金属板带材生产

付祖铸 主编

责任编辑：周兴武

*

中南工业大学出版社出版发行

中南工业大学出版社印刷厂印装

湖南省新华书店经销

*

开本：787×1092/16 印张：12.5 字数：312千字

1992年9月第1版 1992年9月第1次印刷

印数：0001—2500

*

ISBN 7-81020-465-3/TG·018

定价：3.25元

内 容 提 要

本书阐述了金属板、带、箔材轧制的基本原理，论述了高精度产品尺寸与板形的控制原理及新技术。还讨论了有色金属板、带、箔材的生产方案、工艺规程的设计与计算，轧制设备的选择，产品性能与表面质量控制。另外，介绍了有色金属板带箔材生产的其他轧制方法，计算机在轧制过程中的应用，以及典型产品的生产工艺。

本书可作为大专院校金属压力加工、金属材料及其他相近专业的教学用书，也可供从事金属材料加工生产、科研及设计的有关技术人员、科研人员和工人参考。

前 言

本书是在多年教学实践、多次修订原用讲义基础上，按照专业教学计划和大纲要求，经过精选、充实编写而成。

本书可作为金属压力加工、金属材料及其他相近专业的专业课教材，或教学参考书。按教学计划要求，本书只包括轧制的原理、产品精度控制及生产工艺等内容。而轧制设备已在“塑性加工设备课”中讲述，本书按工艺要求只叙述了轧制设备的选择、设备与工艺及设备与产品质量的关系等基本理论和基本知识。在内容上力图反映近20年来，国内外有色金属板带材加工技术的新发展，突出新工艺、新设备、新技术的应用，目的是使板带材产品达到“尺寸精确板形好，表面光洁性能高”的技术要求。在论述上尽力做到理论联系实际，概念清晰，条理清楚，重点突出。并采用深入浅出、通俗易懂的表达方式，便于教学和自学。

本书由傅祖铸（1～8章）、罗春晖（7.9节及9章）编写，傅祖铸任主编。全书由娄燕雄教授审阅，彭大暑教授审阅了部分章节，均提出了许多宝贵意见；在本书编写过程中，王曼星副教授，陈先波和孙建林讲师等提供了很多宝贵意见和建议；王孟君老师为本书制备了部分底图，在此一并表示衷心感谢。

由于编者的水平有限，书中必定存在不少错误和疏漏之处，诚恳希望读者批评指正。

编 者

1990年12月

目 录

1 简单轧制过程的基本概念	(1)
1.1 简单轧制过程及变形参数	(1)
1.1.1 简单轧制过程	(1)
1.1.2 变形参数的表示方法	(1)
1.2 变形区及其参数	(2)
1.2.1 轧制变形区	(2)
1.2.2 变形区的主要参数	(2)
1.3 轧制过程建立的条件	(4)
1.3.1 轧制的过程	(4)
1.3.2 咬入条件	(4)
1.3.3 稳定轧制的条件	(6)
1.3.4 改善咬入的措施	(7)
1.4 轧制过程的基本特点	(8)
1.4.1 变形特点	(8)
1.4.2 运动学特点	(9)
1.4.3 力学条件	(10)
1.4.4 稳定轧制过程的动态平衡	(11)
2 轧制时金属的流动与变形	(13)
2.1 影响金属流动与变形的因素	(13)
2.1.1 外摩擦的影响	(13)
2.1.2 轧辊形状和尺寸的影响	(14)
2.1.3 外端的影响	(15)
2.1.4 张力和轧件尺寸的影响	(16)
2.2 金属的高向变形	(17)
2.2.1 薄轧件 ($l/\bar{h} > 0.5 \sim 1.0$)	(18)
2.2.2 厚轧件 ($l/\bar{h} < 0.5 \sim 1.0$)	(19)
2.3 轧制时的前滑与后滑	(21)
2.3.1 前滑和后滑	(21)
2.3.2 前滑的理论计算	(22)
2.3.3 影响前滑的因素	(23)
2.3.4 研究前滑的意义	(25)
2.4 金属的横向变形——宽展	(25)
2.4.1 宽展沿高向的分布	(26)

2.4.2	宽展沿横向的分布	(26)
2.4.3	影响宽展的因素与宽展计算	(27)
3	金属对轧辊的压力计算	(30)
3.1	轧制压力的概念	(30)
3.1.1	轧制压力	(30)
3.1.2	轧制压力的确定方法	(31)
3.2	接触面积的确定	(32)
3.2.1	不考虑轧辊弹性压扁	(32)
3.2.2	考虑轧辊弹性压扁	(32)
3.3	单位压力的计算	(34)
3.3.1	卡尔曼(Karman)微分方程	(35)
3.3.2	奥罗万(Orowan)微分方程	(36)
3.3.3	单位压力计算公式	(37)
3.4	金属实际变形抗力的确定	(42)
3.4.1	屈服极限的确定	(42)
3.4.2	热轧变形抗力的确定	(44)
3.4.3	冷轧变形抗力的确定	(47)
3.5	平均单位压力的计算	(49)
3.5.1	应力状态系数 n_0 的确定	(49)
3.5.2	按全滑动摩擦规律计算平均单位压力	(50)
3.5.3	按全粘着摩擦规律计算平均单位压力	(54)
3.5.4	按混合摩擦规律计算平均单位压力	(55)
3.6	外摩擦系数的确定	(55)
3.6.1	概述	(56)
3.6.2	热轧摩擦系数的确定	(56)
3.6.3	冷轧摩擦系数的确定	(57)
3.7	轧制压力计算举例	(57)
4	轧机传动力矩及主电机功率计算	(60)
4.1	轧机传动力矩的组成	(60)
4.1.1	电机传动轧辊所需力矩	(60)
4.1.2	附加摩擦力矩的确定	(60)
4.1.3	空转力矩的确定	(61)
4.1.4	动力矩的确定	(62)
4.2	轧制力矩的确定	(62)
4.2.1	轧制力矩	(62)
4.2.2	轧制力矩的确定方法	(65)
4.3	轧制负荷图及主电机功率计算	(67)
4.3.1	静负荷图	(67)
4.3.2	可逆式轧机的负荷图	(68)

4.3.3 电动机的校核及功率计算	(69)
5 板带材纵向厚度精度控制	(71)
5.1 轧机的弹性特性和弹跳方程	(71)
5.1.1 轧机的弹性变形	(71)
5.1.2 轧机的弹性特性曲线	(71)
5.1.3 轧机的弹跳方程	(72)
5.2 轧件的塑性曲线	(73)
5.3 轧制时的弹塑性曲线	(74)
5.3.1 弹塑性曲线	(74)
5.3.2 辊缝转换函数	(74)
5.4 轧机刚度及其调节	(76)
5.4.1 轧机的刚度	(76)
5.4.2 轧机刚度系数 k 的确定	(76)
5.4.3 轧机的可调刚度	(78)
5.5 影响板带材纵向厚度的因素	(79)
5.5.1 坯料尺寸与性能的影响	(79)
5.5.2 轧制工艺条件的影响	(80)
5.5.3 轧机刚度的影响	(81)
5.6 板厚控制原理及方法	(82)
5.6.1 板厚控制原理	(82)
5.6.2 板厚控制方法	(82)
5.7 板厚自动控制	(84)
5.7.1 反馈式板厚自动控制	(85)
5.7.2 厚度计式板厚自动控制	(85)
5.7.3 前馈式板厚自动控制	(86)
5.7.4 张力式板厚自动控制	(87)
5.7.5 液压式板厚自动控制	(87)
5.8 最小可轧厚度	(89)
5.8.1 基本概念	(89)
5.8.2 最小可轧厚度的确定	(90)
6 板形与横向厚度精度控制	(92)
6.1 板形与横向厚差	(92)
6.1.1 辊型与辊缝形状	(92)
6.1.2 板形及其表示方法	(92)
6.1.3 横向厚差	(94)
6.1.4 板形与横向厚差的关系	(94)
6.2 辊型设计	(95)
6.2.1 影响辊缝形状的因素	(95)
6.2.2 辊型设计方法	(96)

6.2.3 辊型的合理选择与配置	(99)
6.3 辊型控制	(102)
6.3.1 调温控制法	(102)
6.3.2 变弯矩控制法	(103)
6.3.3 液压弯辊	(104)
6.4 板形控制新技术	(105)
6.4.1 新型结构轧机	(105)
6.4.2 张应力分布控制板形	(108)
6.4.3 板形检测与板形自动控制简介	(109)
7 板带材生产的基本工艺	(112)
7.1 板带材产品及生产工艺流程	(112)
7.1.1 产品技术条件	(112)
7.1.2 生产工艺流程	(113)
7.2 热轧铸锭的要求	(116)
7.2.1 铸锭尺寸和形状	(116)
7.2.2 铸锭的质量要求	(117)
7.2.3 铸锭的表面处理	(118)
7.2.4 铸锭的热处理	(119)
7.3 热轧工艺	(120)
7.3.1 热轧特点及应用	(120)
7.3.2 热轧温度	(121)
7.3.3 热轧速度	(121)
7.3.4 热轧压下制度	(122)
7.3.5 热轧时的冷却润滑	(123)
7.3.6 热轧制品的主要缺陷及产生原因	(124)
7.4 热轧机的选择	(125)
7.4.1 热轧机的特点	(125)
7.4.2 热轧机的型式选择	(125)
7.4.3 热轧机的主要参数选择	(127)
7.4.4 热轧辊	(129)
7.5 热轧工艺计算	(130)
7.5.1 热轧变形及工艺参数计算	(130)
7.5.2 轧制压力及轧辊强度校核计算	(132)
7.5.3 力矩及主电机校核计算	(132)
7.6 冷轧工艺	(136)
7.6.1 冷轧特点及分类	(136)
7.6.2 冷轧压下制度	(136)
7.6.3 冷轧时的张力	(138)
7.6.4 冷轧时的速度	(140)

7.6.5	冷轧时的冷却润滑	(140)
7.6.6	冷轧产品的主要缺陷及产生原因	(142)
7.7	冷轧机的选择	(144)
7.7.1	冷轧机的特点	(144)
7.7.2	冷轧机的型式选择	(144)
7.7.3	冷轧机的主要参数选择	(145)
7.7.4	冷轧辊	(147)
7.8	冷轧工艺计算	(149)
7.8.1	冷轧变形及工艺参数计算	(149)
7.8.2	轧制压力及轧辊强度校核计算	(151)
7.8.3	力矩及主电机校核计算	(151)
7.9	轧制过程的计算机应用	(152)
7.9.1	概述	(152)
7.9.2	计算机控制轧制生产过程	(152)
7.9.3	轧制工艺的辅助计算	(153)
7.9.4	轧制过程的计算机模拟	(154)
7.10	坯料与成品的热处理	(155)
7.10.1	中间退火	(155)
7.10.2	成品退火	(156)
7.10.3	淬火与时效	(157)
7.10.4	热处理气氛	(158)
7.11	坯料与成品的表面处理	(159)
7.11.1	热轧坯料铣面	(159)
7.11.2	表面清洗技术	(160)
7.11.3	压光与抛光	(162)
7.11.4	表面涂层	(162)
7.12	矫平与剪切	(163)
7.12.1	矫平	(163)
7.12.2	剪切	(164)
7.13	成品检验与包装	(165)
7.13.1	成品检验	(165)
7.13.2	成品包装	(166)
8	有色金属板带材的其他轧制方法	(167)
8.1	连轧	(167)
8.1.1	概述	(167)
8.1.2	连轧的特点	(167)
8.1.3	冷连轧压下制度的确定	(168)
8.2	连续铸轧	(169)
8.2.1	概述	(169)

8.2.2	铸轧过程建立的条件	(171)
8.2.3	铝板连续铸轧的生产工艺	(173)
8.3	异步轧制	(174)
8.3.1	概述	(174)
8.3.2	异步轧制的特点	(174)
8.4	粉末轧制	(176)
8.4.1	概述	(176)
8.4.2	粉末轧制的特点	(177)
8.4.3	粉末轧制工艺	(177)
8.5	金属复合轧制	(178)
8.5.1	概述	(178)
8.5.2	复合轧制的特点	(179)
8.5.3	复合轧制工艺	(179)
9	几种有色金属板带箔材的生产工艺简介	(181)
9.1	铝及铝合金板带材的生产	(181)
9.1.1	LY12 硬铝板生产工艺过程	(181)
9.1.2	LF21 防锈铝板生产工艺过程	(181)
9.1.3	3004-H19 铝合金罐用薄板生产	(182)
9.1.4	L2 纯铝板生产工艺过程	(183)
9.2	铝箔的生产	(183)
9.3	铜及铜合金板带材的生产	(185)
9.3.1	H62 黄铜带生产工艺过程	(185)
9.3.2	QSn6.5-0.1 锡磷青铜带生产工艺过程	(185)
9.4	锌及锌合金板带材的生产	(186)
9.5	钛板的生产	(187)
	参考文献	(188)

1 简单轧制过程的基本概念

轧制过程是轧辊与轧件（金属）相互作用时，轧件被摩擦力拉入旋转的轧辊间，受到压缩发生塑性变形的过程。通过轧制使金属具有一定的尺寸、形状和性能。

如果轧辊辊身为均匀的圆柱体，这种轧辊称为平辊，用平辊进行的轧制，称为平辊轧制。平辊轧制是生产板、带、箔材最主要的压力加工方法。

1.1 简单轧制过程及变形参数

1.1.1 简单轧制过程

为了研究方便，常常把复杂的轧制过程简化成理想的简单轧制过程。简单轧制过程是轧制理论研究的基本对象，所谓简单轧制过程应具备下列条件：

- （1）两个轧辊均为主传动辊，辊径相同，转速相等，且轧辊为刚性；
- （2）轧件除受轧辊作用外，不受其他任何外力（张力或推力）作用；
- （3）轧件的性能均匀；
- （4）轧件的变形与金属质点的流动速度沿断面高度和宽度是均匀的。

总之，简单轧制过程对两个轧辊是完全对称的。

在实际生产中理想的简单轧制过程是不存在的。例如，单辊传动（周期式叠轧薄板轧机，单辊传动的铝箔轧机）；异步轧制，即两个工作辊的圆周速度不相等；给轧件施加外力（带卷轧制的张力）；轧辊直径不等，如劳特轧机；被轧金属的性能也不可能完全均匀；轧辊和轧机不可能是绝对刚体，在力的作用下，它要产生弹性变形……

1.1.2 变形参数的表示方法

当轧件高向受到轧辊压缩时，金属便朝纵向和横向流动。轧制后，轧件在长度和宽度方向上尺寸增大，而高向上厚度减小。由于工具（轧辊）形状等因素的影响，轧制时金属主要是向纵向流动（称为延伸），而横向流动（称为宽展）则较少。

在工程上，对轧件常用如下参数表示其变形量。

高向变形参数：轧前厚度 H 和轧后厚度 h 的差，称为绝对压下量 Δh （简称压下量）：

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

压下量 Δh 与轧前厚度 H 的百分比称为相对压下量（简称加工率或压下率）：

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{H} \times 100\% \quad (1-2)$$

轧制时，轧件从进入轧辊至离开轧辊，承受一次压缩塑性变形，称为一个轧制道次。加工率分道次加工率 ε 和总加工率 ε_z 两种。道次加工率是指某一个轧制道次，轧制前后轧件厚度变化的计算值。总加工率有两种：一种是一个轧程（两次退火间）的总加工率；另一种是一个轧程中某轧制道次后的总加工率。它可反映轧件加工硬化的情况。

横向变形参数：它指轧后宽度 B_h 与轧前宽度 B_H 的差 ΔB ，称绝对宽展量，简称宽展：

$$\Delta B = B_h - B_H \quad (1-3)$$

纵向变形参数：它用轧件轧后长度 L_h 与轧前长度 L_H 之比表示，通常称为延伸系数 λ ：

$$\lambda = \frac{L_h}{L_H} \quad (1-4)$$

根据体积不变条件, 延伸系数也可用轧件的轧前断面积 F_H 与轧后断面积 F_h 之比表示:

$$\lambda = \frac{F_H}{F_t} \quad (1-5)$$

如宽展在轧制时忽略不计, 延伸系数也可写成如下形式:

$$\lambda = \frac{H}{h} = \frac{1}{1 - \varepsilon} \quad (1-6)$$

由此可见，延伸系数的大小，反映了金属纵向变形的程度，或者说金属的横断面积在轧制过程中减小的程度。

1.2 变形区及其参数

1.2.1 轧制变形区

轧制时金属在轧辊间产生塑性变形的区域称为轧制变形区。在图 1-1 中, 轧辊和轧件的

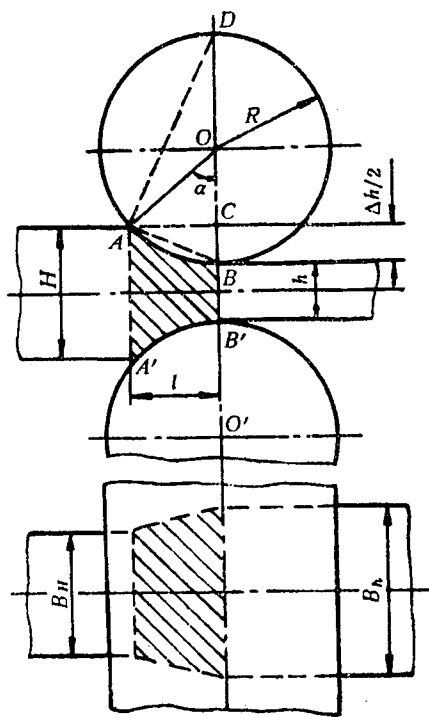


图1-1 几何变形区图示

接触弧 ($\widehat{AB}$ 、 $\widehat{A'B'}$)，及轧件进入轧辊的垂直断面 (AA') 和出口垂直断面 (BB') 所围成的区域，称为几何变形区 (图中阴影部分)，或理想变形区。

实际上,在出、入口断面附近(几何变形区之外)局部区域内,轧件多少也有塑性变形存在,这两个区域称为非接触变形区。可见,轧制变形区包括几何变形区和非接触变形区。

在生产中，热轧头几道次，轧件很厚，变形不容易深透，甚至几何变形区内，也还有部分金属不产生塑性变形。

1.2.2 变形区的主要参数

讨论简单轧制过程的基本概念, 主要研究几何变形区。几何变形区的主要参数有: 接触角 α ; 变形区长度 l (接触弧 $\widehat{AB}$ 的水平投影长度); 变形区形状系数 $l/\bar{h}$ 和 $B/\bar{h}$, 其中 $\bar{h} = (H + h)/2$ 。

1. 接触角 α 轧件与轧辊的接触弧所对应的圆心角 α ，称为接触角。由图 1-1 可求得：

$$BC = BO - CO = R - R \cos \alpha = R(1 - \cos \alpha)$$

由于 $BC = \frac{1}{2}(H - h) = \frac{1}{2}\Delta h$

$$\text{则有 } \cos \alpha = 1 - \frac{\Delta h}{2R} \text{ 或 } \Delta h = D(1 - \cos \alpha) \quad (1-7)$$

在接触角比较小的情况下 ($\alpha < 10^\circ \sim 15^\circ$)，由于，

$$1 - \cos \alpha = 2 \sin^2 \frac{\alpha}{2} \approx \frac{\alpha^2}{2}$$

公式 (1-7) 可简化成下列形式：

$$\alpha = \sqrt{\frac{\Delta h}{R}} \quad (1-8)$$

式中 R ——轧辊的半径。

接触角 α 是一个与接触弧长短有关的几何量。轧件与轧辊刚接触的瞬间，即轧件前棱和旋转轧辊的母线相接触时， α 为零；随着金属逐渐被拽入辊缝的过程中， α 逐渐增大；当金属完全充满辊缝，即轧件前端面到达两辊连心线 oo' ，并继续进行轧制时， α 的大小按 (1-7) 式计算。随着压下量的增大，例如轧制楔形轧件，当轧辊与轧件出现完全打滑，即轧辊转动而轧件不动，此时接触角 α 达到极限值。

2. 变形区长度 l 几何变形区长度 l ，是指接触弧 $\widehat{AB}$ 的水平投影长度 (图1-1)。由图得变形区长度 $l = AC$ ，因为 AC 是直角三角形 AOC 的一个直角边。

根据几何关系： $l = R \sin \alpha$

或者

$$l^2 = R^2 - OC^2$$

由于

$$OC = R - \frac{\Delta h}{2}$$

则得

$$l^2 = R^2 - \left(R - \frac{\Delta h}{2}\right)^2 = R^2 - R^2 + R\Delta h - \frac{\Delta h^2}{4} = R\Delta h - \frac{\Delta h^2}{4}$$

最后得出变形区长度的精确计算式为：

$$l = \sqrt{R\Delta h - \frac{\Delta h^2}{4}}$$

由于根号中的第二项比第一项小许多，而忽略不计。则 l 可近似地用下式表示：

$$l = \sqrt{R\Delta h} \quad (1-9)$$

此外，若用接触弧的弦长做为变形区的长度 (以弦代弧)，可根据直角三角形 ABC 和 ABD 相似条件，求出接触弧的弧长得：

$$l = \overline{AB} = \sqrt{R\Delta h}$$

至于考虑轧辊在轧制压力作用时产生的弹性压扁，以及两轧辊直径不相等的变形区长度计算 (参见3.2节)。

3. 变形区几何形状系数 变形区形状系数 $l/\bar{h}$ 和 $B/\bar{h}$ 可用下式表示：

$$\frac{l}{\bar{h}} = \frac{\sqrt{R\Delta h}}{\frac{H+h}{2}} = \frac{2\sqrt{R\Delta h}}{H+h}, \quad \frac{B}{\bar{h}} = \frac{B}{\frac{H+h}{2}} = \frac{2B}{H+h}$$

式中 B ——轧件宽度 (不计宽展)；

$\bar{h}$ ——轧件平均厚度。

变形区形状系数对轧制时轧件的应力状态有影响。因此,此参数在研究轧制时的金属流动、变形及应力分布等具有重要意义。 $l/\bar{h}$ 和 $B/\bar{h}$ 分别反映了对轧制过程纵向和横向的影响。因为一般把轧制过程视为平面变形状态,所以,前者比后者更为重要。只有研究宽展等问题时, $B/\bar{h}$ 才有意义。

1.3 轧制过程建立的条件

1.3.1 轧制的过程

在一个道次里,轧件的轧制过程可以分为开始咬入、拽入、稳定轧制和轧制终了(抛出)4个阶段。

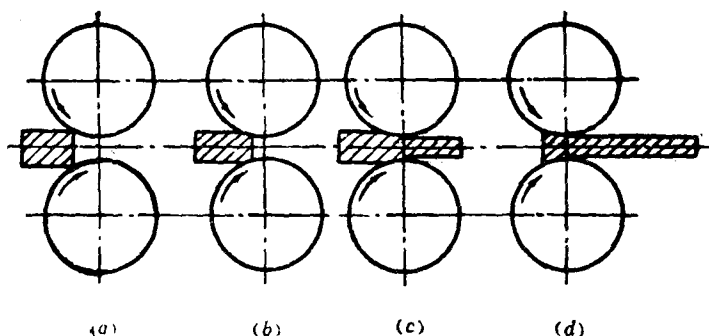


图1-2 轧制过程图示

(a)开始咬入; (b)拽入; (c)稳定轧制; (d)抛出

1. 开始咬入阶段[图1-2(a)] 轧件开始接触到轧辊时,由于轧辊对轧件的摩擦力的作用,实现了轧辊咬入轧件。开始咬入为一瞬间完成。

2. 拽入阶段[图1-2(b)] 一旦轧件被旋转的轧辊咬入之后,由于轧辊对轧件的作用力变化,轧件逐渐被拽入辊缝,直至轧件完全充满辊缝为止。即轧件前端到达两辊连心线位

置。这一过程时间很短,而且轧制变形、几何参数、力学参数等都在变化。

3. 稳定轧制阶段[图1-2(c)] 轧件前端从辊缝出来后,轧制过程连续不断地稳定进行。整个轧件通过辊缝承受变形。

4. 轧制终了阶段[图1-2(d)] 从轧件后端进入变形区开始,轧件与轧辊逐渐脱离接触,变形区逐渐变小,直至轧件完全脱离轧辊被抛出为止。此阶段时间也很短,其变形和力学参数等均也发生变化。

在一个轧制道次里,轧件被轧辊开始咬入、拽入、稳定轧制和抛出的过程,组成一个完整的连续进行的轧制过程。

稳定轧制是轧制过程的主要阶段。金属在变形区内的流动、变形与力的状况,以及为此而进行的工艺控制,产品质量与精度控制,设备设计等等,都是研究板带材轧制的主要对象。开始咬入阶段虽在瞬间完成,但它关系到整个轧制过程能否建立的先决条件。所以,无论是制定工艺,还是设计轧辊等,都要对此高度重视。至于拽入与抛出亦在瞬间完成,通常不影响轧制过程,一般不予研究。

1.3.2 咬入条件

轧制过程能否建立,首先决定于轧件能否被旋转的轧辊咬入。因此,研究、分析轧辊咬入轧件的条件,具有重要的实际意义。

生产中,无论热轧或冷轧,一般情况下都能使轧件一接触旋转的轧辊就能被咬入,轧制

很顺利。但是，轧件也有时难以被轧辊咬入。生产中，比如大铸锭热轧开坯，常用推锭机将铸锭推入辊缝；或者降低转速，手工操作的小轧机上，甚至靠操作者施以推力；或者增大辊缝减小压下量；冷轧辊面光滑时加点涩性油剂，或减小压下量；当摩擦条件相同而压下量大时，直径大的轧辊容易咬入等等。可见，轧件能否被轧辊顺利咬入是与轧辊和轧件的尺寸，压下量，施加外力，特别是轧辊与轧件接触面上的摩擦状况有关。总之，讨论咬入条件，应从轧件受力分析着手。

1. 咬入时轧辊对轧件的作用力 在简单轧制情况下[见图1-3(a)]，当轧件的前棱和旋转的轧辊母线相接触时，在接触点(A和A')上轧件以力 N' 压向轧辊，同时产生摩擦力 T' ，企图阻碍轧辊的旋转。按牛顿第三定律，在此同时，轧辊对轧件同样作用有大小相等，方向相反的径向正压力 N ，以及摩擦力 T 。对轧件来说[见图(1-3(b))，受有径向正压力 N 和轧辊旋转方向一致的切向摩擦力 T ，且与 N 力垂直，按库仑摩擦定律， $T = fN$ 。 f 为咬入时轧辊与轧件之间的摩擦系数。

咬入角 α [见图1-3(b)]是指开始咬入时轧件上的正压力与两轧辊中心连线的夹角。其数值等于稳定轧制时的接触角，即按公式(1-7)或(1-8)计算。

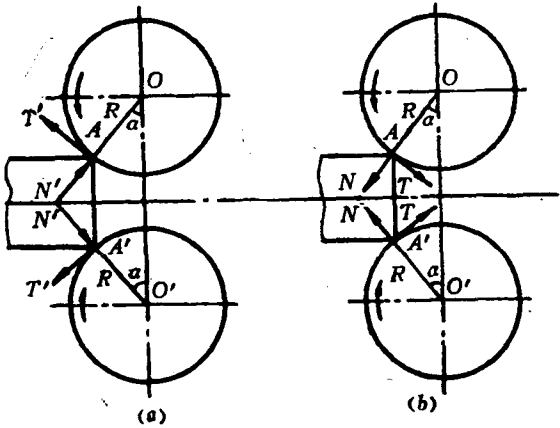


图1-3 轧辊与轧件接触时的受力图

(a) 轧辊受力图

(b) 轧件受力图

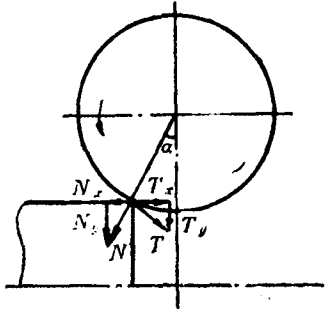


图1-4 T和N力的分解

2. 轧件被轧辊咬入的条件 轧件受有正压力 N 和切向摩擦力 T ，为了比较这些力的作用，将它们投影到垂直和水平方向上(图1-4)。即分解成水平方向的分力 N_x 和 T_x ，垂直方向的分力 N_y 和 T_y 。

作用在垂直方向上的分力 N_y 和 T_y ，使轧件从上、下两个方向同时受到压缩，产生塑性变形，这是轧件被轧辊咬入的先决条件。

作用在水平方向上的分力 N_x 和 T_x ，对轧制过程的建立起着不同的作用， N_x 是将轧件推出辊缝的力， T_x 是将轧件拉入辊缝的力。在轧件上无其他外力作用的情况下，这两个力的大小决定了轧辊能否咬入轧件。显然，当 N_x 大于 T_x 时，咬不进，而 N_x 小于 T_x 时，能够咬入。所以， $N_x < T_x$ 是咬入的条件，而 $N_x = T_x$ 是咬入的临界条件。

由图1-4可知：

$$N_x = N \sin \alpha, T_x = T \cos \alpha$$

因为

$$T = fN, \quad f = T/N$$

当 $T_x \geq N_x$ 时可变成下面的形式:

$$fN \cos \alpha \geq N \sin \alpha$$

$$f \geq \sin \alpha / \cos \alpha$$

$$f \geq \tan \alpha$$

(1-10)

正压力 N 和摩擦力 T 的合力为 R (见图1-5所示)。根据物理概念, 正压力 N 与合力 R 的夹角 β 称为摩擦角。摩擦系数可以用摩擦角 β 表示, 即摩擦角 β 的正切就是摩擦系数 f , $\tan \beta = f$, 将此式代入 (1-10) 式得:

$$\tan \beta \geq \tan \alpha$$

或者

$$\beta \geq \alpha$$

(1-11)

当 $\alpha < \beta$ 时, 称为自然咬入条件, 它表示只有轧辊对轧件的作用力, 而无其他外力作用时, 轧件被轧辊咬入的条件, 必须使摩擦角大于咬入角, 这是咬入的充分条件。

当 $\alpha = \beta$ 时, 为咬入的临界条件, 把此时的咬入角 α 称为最大咬入角, 用 $\alpha_{\max}$ 表示。它取决于轧辊和轧件的材质、表面状态、尺寸大小, 以及润滑条件和轧制速度等等。表 1-1 为几种有色金属热轧时的最大咬入角和摩擦系数。

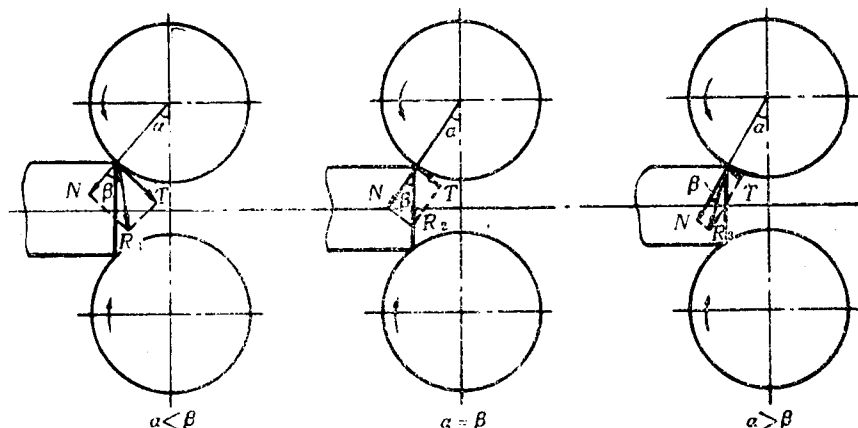


图1-5 咬入角与摩擦角的三种关系

表1-1 有色金属热轧时最大咬入角和摩擦系数

金 属	轧制温度, °C	最大咬入角	摩擦系数
铝	350	20~22	0.36~0.40
铜	900	27	0.5
黄铜	850	21~24	0.38~0.45
镍	950	22	0.40
锌	200	17~19	0.30~0.35

咬入角和摩擦角的 3 种关系如图 1-5 所示, 合力 R_1 向轧制方向倾斜 ($\alpha < \beta$), 说明轧件可以被咬入; R_2 的方向与轧制线垂直 ($\alpha = \beta$), 说明处于咬入的临界状态; R_3 的方向逆轧制方向作用于轧件 ($\alpha > \beta$), 阻止轧件咬入,

表明轧件不能自然咬入。

1.3.3 稳定轧制的条件

当轧辊咬入轧件后, 随着轧辊的转动, 金属不断地被拽入辊缝内。由于轧辊与轧件的接触表面, 随轧件向辊间填充而逐渐增加, 则轧辊对轧件的作用力位置也不断向出口方向移