

高等学校教学用书

# 有色金属塑性加工学

冶金工业出版社

高等学校教学用书

# 有色金属塑性加工学

西安冶金建筑学院 杨守山 主编

冶金工业出版社

高等学校教学用书  
**有色金属塑性加工学**  
西安冶金建筑学院 杨守山 主编  
(限国内发行)

\*

冶金工业出版社出版

(北京灯市口74号)

新华书店北京发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

\*

787×1092 1/16 印张 28 1/4 字数 675 千字

1982年1月第一版 1982年1月第一次印刷

印数00,001~5,000册

统一书号: 15062·3762 定价2.90元

## 前 言

《有色金属塑性加工学》系根据1977年冶金部教材会议制订的有色金属压力加工专业教学计划编写的。本书着重阐述有色金属塑性加工的基本原理和方法（包括轧制、挤压、拉伸、锻压和冲压等五个方面）；介绍金属变形规律及其特征，并推导某些计算公式；同时介绍各种加工过程所用的主要设备和各种工具设计。考虑到设计需要，还编入了工艺流程和车间设计；同时，也选入了一些新的加工方法，以供进一步研究参考。为了帮助读者学习，也适当地列入了一些例题。

由于篇幅所限，书中未列入辅助设备内容，有些工艺内容也未作详细介绍。

本书是由四同志合编：东北工学院段曰瑚编写“平辊轧制”，西安冶金建筑学院杨守山编写“型辊轧制”，中南矿冶学院马怀宪编写“挤压”和“拉伸”，江西冶金学院周宜森编写“锻压”、“冲压”、“工艺”和“车间设计”。全书由杨守山任主编。

编写过程中，曾得到工厂广大技术人员的大力帮助，并引用了国内外许多文献，在此特向文献作者和有关技术人员表示感谢。本书初稿完成后，曾请有关院校教师进行了讨论和审查，对本书提出了许多宝贵意见，在此表示感谢。

由于编者水平有限，书中错误之处在所难免，欢迎读者批评指正。

编 者

1980年12月

# 目 录

<b>第一章 平辊轧制</b> .....	1
第一节 简单轧制过程及轧制变形区.....	1
第二节 轧制过程的建立条件.....	4
第三节 轧制时金属变形的规律.....	6
第四节 单位压力沿接触弧上的分布.....	14
第五节 金属对轧辊的压力计算.....	19
第六节 转动轧辊所需的力矩.....	40
第七节 板带材轧机.....	52
第八节 热轧工艺.....	81
第九节 冷轧工艺.....	86
第十节 连轧特点.....	91
第十一节 其它轧制方法.....	95
<b>第二章 型辊轧制</b> .....	100
第一节 型辊轧制时金属变形的规律.....	100
第二节 轧辊孔型设计.....	119
第三节 型材轧机.....	146
第四节 型线材生产的其它方法.....	155
第五节 斜轧穿孔时金属变形的规律.....	159
第六节 斜轧穿孔的工具设计、设备和工艺.....	175
第七节 其它斜轧方法.....	182
第八节 冷轧管时金属变形的规律.....	184
第九节 冷轧管孔型设计和冷轧管机.....	197
第十节 其它冷轧管法.....	221
<b>第三章 挤压</b> .....	223
第一节 挤压的基本方法.....	223
第二节 挤压时的金属变形的规律.....	225
第三节 挤压力计算.....	240
第四节 挤压制品的组织与性能.....	257
第五节 挤压工具.....	261
第六节 挤压设备.....	281
第七节 挤压工艺.....	287
第八节 其它挤压方法.....	296
<b>第四章 拉伸</b> .....	299
第一节 拉伸的基本方法.....	299

第二节	拉伸时的变形与应力	300
第三节	拉伸力	314
第四节	拉伸工具	328
第五节	拉伸机	334
第六节	拉伸工艺	341
第七节	其它拉伸方法	356
<b>第五章</b>	<b>锻压</b>	<b>359</b>
第一节	锻压时金属变形的规律	359
第二节	自由锻	364
第三节	模锻	369
第四节	其它锻压方法	377
第五节	锻压设备	378
第六节	有色金属锻压工艺特点	383
<b>第六章</b>	<b>板料冲压</b>	<b>389</b>
第一节	冲压时金属变形的规律	391
第二节	冲裁	398
第三节	弯曲	400
第四节	拉延	407
第五节	旋压	411
第六节	成形	414
第七节	冲压的其它方法	417
第八节	冲压设备	419
<b>第七章</b>	<b>工艺流程和车间设计</b>	<b>422</b>
第一节	有色金属压力加工产品标准	422
第二节	工艺流程的制定	425
第三节	工艺流程简介	426
第四节	车间设计	435

# 第一章 平辊轧制

所谓轧制，是指在旋转的轧辊间，借助轧辊施加的压力使金属发生塑性变形的过程。如果轧辊为均匀的圆柱体，则这种轧辊称为平辊；用平辊进行的轧制，称为平辊轧制。

平辊轧制主要用于生产板、带、条、箔等半成品。由于这种方法具有设备简单、生产率高、产品成本低等特点，因此在有色金属塑性加工中得到了广泛地应用。

## 第一节 简单轧制过程及轧制变形区

### 一、简单轧制过程

简单轧制过程是轧制理论研究的基本对象，它应具备以下条件：

- (1) 轧件除受轧辊作用外，不受其它任何外力作用；
- (2) 轧件在入辊处和出辊处速度均匀；
- (3) 两个轧辊均为主传动，且其直径相等，转速相同；
- (4) 轧制过程对两个轧辊完全对称；
- (5) 轧件的机械性质均匀。

理想的简单轧制过程在实际中是很难找到的，但是为了讨论问题方便，常常把复杂的轧制过程简化成简单轧制过程。

### 二、轧制变形区及其主要参数

轧制变形区是指轧件充填辊间那部分金属的体积，即从轧件入辊的垂直平面到轧件出辊的垂直平面所围成的区域  $AA_1B_1B$  (图 1-1)，通常又把它称为几何变形区。

轧制变形区主要参数有：

1. 接触角 ( $\alpha_j$ ) 轧件与轧辊相接触的圆弧所对应的圆心角称为接触角，其大小可以从图1-1中的几何关系找出：

$$\cos \alpha_j = \frac{OC}{AO}; \quad OC = R - \frac{\Delta h}{2}$$

所以

$$\cos \alpha_j = \frac{R - \frac{\Delta h}{2}}{R} = 1 - \frac{\Delta h}{2R} \quad (1-1)$$

或者

$$\sin \frac{\alpha_j}{2} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\Delta h}{R}} \quad (1-2)$$

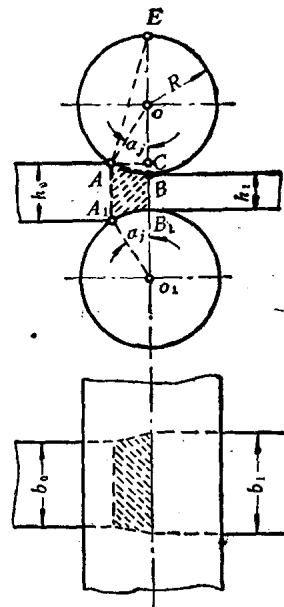


图 1-1 轧制变形区主要参数

当  $\alpha_j$  很小时 ( $\alpha_j < 10^\circ \sim 15^\circ$ ), 取  $\sin \frac{\alpha_j}{2} \approx \frac{\alpha_j}{2}$ , 此时可得:

$$\alpha_j = \sqrt{\frac{\Delta h}{R}} \quad (1-3)$$

式中  $R$ ——轧辊半径;

$\Delta h$ ——压下量。

2. 接触弧长度 ( $l$ ) 轧件与轧辊相接触的圆弧的水平投影长度称为接触弧长度, 即图1-1中的  $AC$  表示。通常又把  $AC$  称为变形区长度。

接触弧长度随轧制条件不同而不同, 一般有以下三种情况:

(1) 两轧辊直径相等时接触弧长度。从图 1-1 中的几何关系可以找出此时的接触弧长度的计算公式:

$$l = R \sin \alpha_j \quad (1-4)$$

$$\sin \alpha_j = \sqrt{1 - \cos^2 \alpha_j} = \sqrt{\frac{\Delta h}{R} - \frac{\Delta h^2}{4R^2}} \quad (1-5)$$

将公式 (1-5) 代入公式 (1-4) 得:

$$l = \sqrt{R\Delta h - \frac{\Delta h^2}{4}} \quad (1-6)$$

由于公式 (1-6) 中根号里第二项较第一项小得多, 因此可以忽略不计, 则接触弧长度计算公式变为:

$$l = \sqrt{R\Delta h} \quad (1-7)$$

用公式 (1-7) 求出的接触弧长度实际上是  $AB$  弦的长度, 可用它近似地代替  $AC$  长度。

(2) 两轧辊直径不相等时接触弧长度。此时可按下式确定:

$$l = \sqrt{\frac{2R_1R_2}{R_1 + R_2} \Delta h} \quad (1-8)$$

该式是假设两个轧辊的接触弧长度相等而导出的, 即:

$$l = \sqrt{2R_1\Delta h_1} = \sqrt{2R_2\Delta h_2} \quad (1-9)$$

所以

$$\Delta h_1 = \frac{R_2}{R_1} \Delta h_2$$

式中  $R_1, R_2$ ——分别为两轧辊的半径;

$\Delta h_1, \Delta h_2$ ——每一个轧辊对金属的压下量。

由于

$$\Delta h_1 + \Delta h_2 = \Delta h$$

所以

$$\Delta h_1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \Delta h$$

把  $\Delta h_1$  代入公式 (1-9) 便得公式 (1-8)。

(3) 轧辊和金属产生弹性压缩时接触弧长度。由于金属与轧辊间的压力作用, 轧辊产生局部的弹性压缩变形, 此变形可能很大, 尤其在冷轧薄板时更为显著。轧辊的弹性压缩变形一般称为轧辊的弹性压扁, 轧辊弹性压扁的结果使接触弧长度增加。另外, 金属在



辊间发生塑性变形时，也伴随产生弹性压缩变形，此变形在金属出辊后即开始恢复，这也会增大接触弧长度。因此，在热轧薄板和冷轧时，必须考虑轧辊和金属的弹性压缩变形对接触弧长度的影响（图1-2）。

如果用  $\Delta_1$  和  $\Delta_2$  分别表示轧辊与金属的弹性压缩量，为使金属轧制以后获得  $\Delta h$  的压下量，那么必须把每个轧辊再压下  $\Delta_1 + \Delta_2$ 。此时金属与轧辊的接触线为图1-2中的  $A_2B_2C$  曲线，其接触弧长度为：

$$l' = x_1 + x_0 = \overline{A_2D} + \overline{B_1C}$$

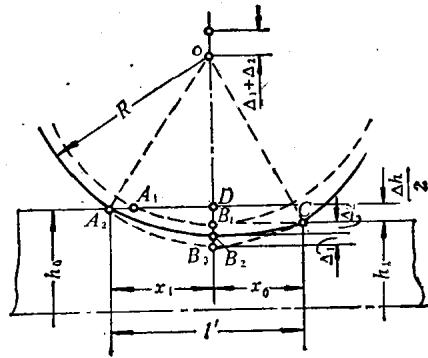


图 1-2 轧辊与金属弹性压缩时接触长度

$\overline{A_2D}$  和  $\overline{B_1C}$  可分别从图1-2的几何关系中找出：

$$\overline{A_2D} = \sqrt{A_2O^2 - (OB_3 - DB_3)^2} = \sqrt{R^2 - (R - DB_3)^2};$$

$$\overline{B_1C} = \sqrt{CO^2 - (OB_3 - B_1B_3)^2} = \sqrt{R^2 - (R - B_1B_3)^2}$$

展开上两式中的括号，由于  $\overline{DB_3}$  与  $\overline{B_1B_3}$  的平方值较轧辊半径与它们的乘积小得多，故可以忽略不计，得：

$$\overline{A_2D} = \sqrt{2R \cdot DB_3}; \quad \overline{B_1C} = \sqrt{2R \cdot B_1B_3}$$

因为

$$\overline{DB_3} = \frac{\Delta h}{2} + \Delta_1 + \Delta_2; \quad \overline{B_1B_3} = \Delta_1 + \Delta_2$$

所以  $l' = x_1 + x_0 = \overline{A_2D} + \overline{B_1C} = \sqrt{R\Delta h + 2R(\Delta_1 + \Delta_2)} + \sqrt{2R(\Delta_1 + \Delta_2)}$

或者  $l' = \sqrt{R\Delta h + x_0^2} + x_0$  (1-10)

这里  $x_0 = \sqrt{2R(\Delta_1 + \Delta_2)}$  (1-11)

轧辊和金属的弹性压缩变形量  $\Delta_1$  和  $\Delta_2$  可以用弹性理论中的两圆柱体相互压缩时的计算公式求出：

$$\Delta_1 = 2q \frac{1-\nu_1^2}{\pi E_1}; \quad \Delta_2 = 2q \frac{1-\nu_2^2}{\pi E_2}$$

式中  $q$  —— 圆柱体单位长度上的压力， $q = 2x_0 \bar{p}$  ( $\bar{p}$  —— 平均单位压力)；

$\nu_1, \nu_2$  —— 轧辊与金属的泊桑系数；

$E_1, E_2$  —— 轧辊与金属的弹性模数。

将  $\Delta_1$  和  $\Delta_2$  的值代入公式 (1-11)，得：

$$x_0 = 8R\bar{p} \left( \frac{1-\nu_1^2}{\pi E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{\pi E_2} \right) \quad (1-12)$$

把  $x_0$  之值代入公式 (1-10)，即可计算出  $l'$  之值。金属的弹性压缩变形很小时，可忽略不计，即  $\Delta_2 \approx 0$ ，则可得只考虑轧辊弹性压缩时接触弧长度计算公式——西齐柯克公式。

$$x_0 = 8 \frac{1-\nu_1^2}{\pi E_1} R \bar{p} \quad (1-13)$$

$$l' = \sqrt{R\Delta h + \left[8\frac{1-\nu_1^2}{\pi E_1} R\bar{p}\right]^2} + 8\frac{1-\nu_1^2}{\pi E_1} R\bar{p} \quad (1-14)$$

3. 变形区综合参数 (或变形区形状系数) 变形区综合参数是指  $l/\bar{h}$  和  $B/\bar{h}$ , 它们可以写成下式:

$$\frac{l}{\bar{h}} = \frac{\sqrt{R\Delta h}}{\frac{h_0+h_1}{2}} = \frac{2\sqrt{R\Delta h}}{h_0+h_1}; \quad \frac{B}{\bar{h}} = \frac{B}{\frac{h_0+h_1}{2}} = \frac{2B}{h_0+h_1}$$

式中  $B$ ——轧件宽度;

$h_0, h_1$ ——轧件轧前、轧后高度;

$\bar{h}$ ——轧件平均高度。

这两个参数反映了当轧制的几何变形条件不同时, 接触表面上的作用力 (如摩擦力) 对轧制变形的影响也是不同的, 或者说是轧制时的应力状态影响是不同的。因此, 它们是变形区的重要参数, 在研究轧制时的金属流动、变形分布、应力分布等都有着重要意义。其中  $l/\bar{h}$  是反映对纵向变形的影响, 而  $B/\bar{h}$  则反映对横向变形的影响。前者比后者更为重要, 因为通常把轧制看成平面变形状态, 只是在研究宽展等问题时,  $B/\bar{h}$  才有意义。

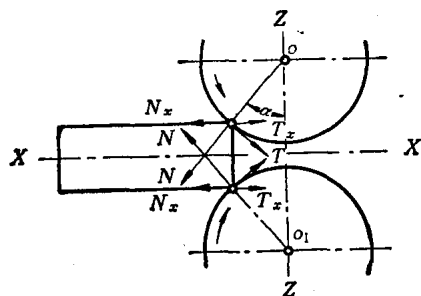
## 第二节 轧制过程的建立条件

### 一、咬入条件

当轧件与轧辊刚刚接触时, 轧件所受的作用力如图1-3所示:

$N$ ——轧辊对轧件作用的法向力;

$T$ ——轧辊对轧件的摩擦力。



为了比较这些力的作用, 可以把它们投影到垂直和水平方向上 (图1-3)。这样, 在咬入时轧件所受的作用力分解为垂直分力和水平分力。

作用在垂直方向上的分力使轧件从上、下两个方向同时受到压缩, 只有轧件受到压缩产生塑性变形时才能咬入, 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有  $N_x$  和  $T_x$  两个力。从图1-3中可以看出,  $N_x$  是阻碍轧件进入辊间的力, 而  $T_x$  是把轧件拽入辊间的力。

图 1-3 咬入时轧件上的作用力

如果  $N_x$  大于  $T_x$ , 则轧件只能被推出辊间, 不可能被咬入; 如果  $N_x$  小于或等于  $T_x$ , 则轧件可以被咬入。

综上所述, 轧件被轧辊咬入的条件为:

$$T_x \geq N_x \quad (1-15)$$

因为

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

所以咬入条件  $T_x \geq N_x$  可变成下面的形式:

$$f \geq \tan \alpha \quad (f = \tan \beta) \quad (1-16)$$

或者

$$\beta \geq \alpha \quad (1-17)$$

式中  $f$ ——轧件与轧辊间的摩擦系数;

$\beta$ ——摩擦角；

$\alpha$ ——咬入角，它是轧件法向力与轧辊中心联线的夹角，在刚开始咬入时，其数值等于接触角，即可按公式 (1-1) 和 (1-3) 计算。

公式 (1-17) 一般称为自然咬入条件，它表示了在没有外力（除轧辊对轧件的作用力外）作用时，轧件进入辊间的条件是摩擦角大于或等于咬入角，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  $\alpha$  称为最大咬入角，用  $\alpha_{max}$  表示。它取决于轧件和轧辊的材质、接触表面状态和接触条件等。表1-1为常用几种有色金属热轧时的最大咬入角和摩擦系数。

有色金属热轧时最大咬入角和摩擦系数值

表 1-1

金属	轧制温度 (°C)	最大咬入角 (度)	摩擦系数
铝	350	20~22	0.36~0.40
铜	900	27	0.50
黄铜	850	21~24	0.38~0.45
镍	950	22	0.40
锌	200	17~19	0.30~0.35

## 二、稳定轧制的条件

当咬入后，轧件与轧辊间的接触表面随轧件向辊间充填而逐渐增加，因此轧辊对轧件的作用力的位置也向出辊方向移动，这必然破坏了刚开始咬入时的力的平衡条件。如果用  $\varphi$  角表示轧件充填辊间时轧件法向力与轧辊中心联线的夹角，则此时轧件上的作用力的位置变化如图1-4所示。

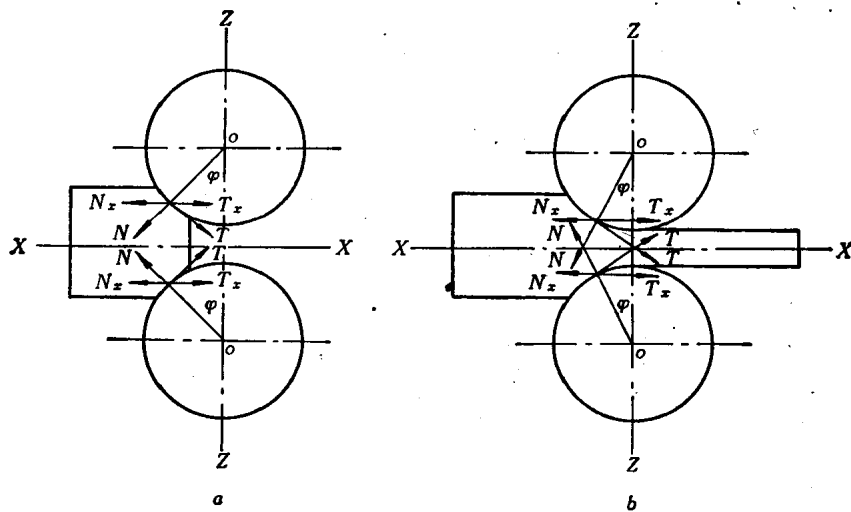


图 1-4 轧件充填辊间过程中作用力位置的变化

a—轧件向辊间充填，b—轧件完全充填辊间

在轧件向辊间充填时，使轧件继续进入辊间的条件仍然需要作用在轧件上的水平拽入力等于或大于推出力，即  $T_x \geq N_x$ 。此时  $T_x = T \cos \varphi$ ， $N_x = N \sin \varphi$ ， $T = fN$ ，所以  $f \geq \tan \varphi$

或者

$$\beta \geq \varphi \quad (f = \tan \beta) \quad (1-18)$$

但由 $\varphi$ 角比刚开始咬入时的咬入角 $\alpha$ 为小,并且随轧件向辊间充填的过程中逐渐减小,所以水平拽入力便随轧件向辊间移动而逐渐增加,水平推出力则逐渐减小,使咬入变得越来越容易。当轧件完全充满辊间时,咬入过程结束,稳定轧制过程建立起来。假设此时单位压力沿接触弧上均匀分布,则轧辊对轧件的合压力的作用点必然在接触弧中点上,即

$\varphi = \frac{\alpha}{2}$ , 则公式(1-18)变成下式:

$$\beta \geq \frac{\alpha}{2} \quad (1-19)$$

公式(1-19)为稳定轧制条件。从咬入时 $\beta \geq \alpha$ 到稳定轧制时 $\beta \geq \frac{\alpha}{2}$ 之比较可以看出:

出:

(1) 开始咬入时所要求的摩擦条件高,即摩擦系数要大;

(2) 随轧件逐渐充填辊间,水平拽入力逐渐增大,水平推出力逐渐减小,因而越容易咬入;

(3) 开始咬入条件一经建立起来,轧件就能自然向辊间充填,建立起稳定轧制过程;

(4) 稳定轧制条件比开始咬入条件容易实现。

### 三、改善咬入条件的措施

改善咬入条件是进行顺利操作、增加压下量、提高生产率的有利措施,也是轧制生产中经常碰到的实际问题。

根据咬入条件 $\beta \geq \alpha$ ,便可以得出:凡是能增大 $\beta$ 角的一切因素和减小 $\alpha$ 角的一切因素都有利于咬入,其具体措施为:

(1) 轧件前端做成锥形或楔形,使开始咬入时的咬入角小;

(2) 开始咬入时把辊缝加大,使咬入角减小,稳定轧制过程建立后,可减小辊缝,增加压下量;

(3) 低速咬入增加摩擦角,稳定轧制建立后,再增加轧辊速度以便提高生产率;

(4) 开始咬入时不润滑,增加摩擦角;稳定轧制建立后再润滑;

(5) 给轧件加上外推力也能改善咬入条件,使轧件与轧辊间的接触面积增加,摩擦力加大。

## 第三节 轧制时金属变形的规律

### 一、沿轧件断面高向上变形的分布

关于轧制时变形的分布有两种不同的理论,一种是均匀变形理论,另一是不均匀变形理论。后者比较客观地反映了轧制时金属变形规律。均匀变形理论认为,沿轧件断面高度上的变形、应力和金属流动的分布都是均匀的,造成这种均匀性的主要原因是由于未发生塑性变形的前后外端的强制作用,因此又把这种理论称为刚端理论。不均匀变形理论认为,沿轧件断面高度上的变形、应力和金属流动分布都是不均匀的(图1-5)。其主要内容有:

(1) 沿轧件断面高度上的变形、应力和流动速度分布都是不均匀；

(2) 在几何变形区内，在轧件与轧辊接触表面上，不但有相对滑动，而且还有粘着，即轧件与轧辊间无相对滑动；

(3) 变形不但发生在几何变形区以内，而且在几何变形区以外也发生变形，其变形分布也是不均匀的。这样就把轧制变形区分成变形过渡区、前滑区、后滑区和粘着区（图 1-5）；

(4) 在粘着区内有一个临界面，在这个面上金属的流动速度分布均匀，并且等于该处轧辊的水平速度。

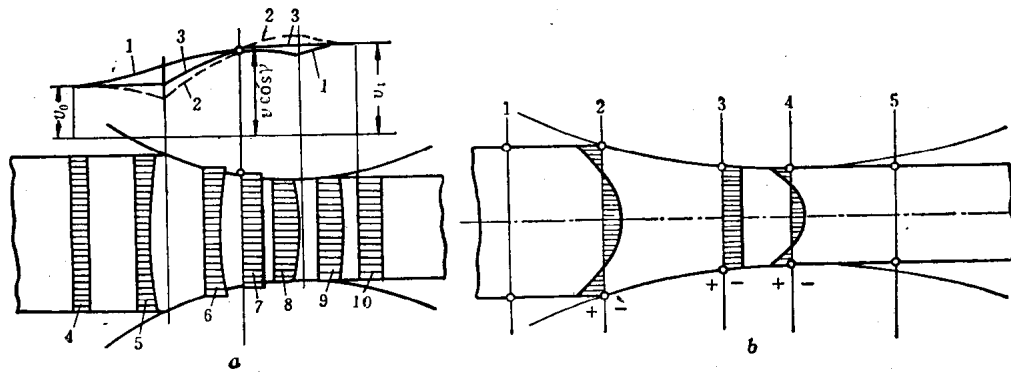


图 1-5 按不均匀变形理论金属流动速度和应力分布

a—金属流动速度分布

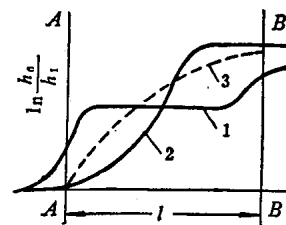
1—表面层金属流动速度；2—中心层金属流动速度；3—平均流动速度；4—后外端金属流动速度；5—后变形过渡区金属流动速度；6—后滑区金属流动速度；7—临界面金属流动速度；8—前滑区金属流动速度；9—前变形过渡区金属流动速度；10—前外端金属流动速度

b—应力分布

+—拉应力；--压应力

1—后外端；2—入辊处；3—临界面；4—出辊处；5—前外端

后来大量实验证明，不均匀变形理论是比较正确的，其中以И.Я.塔尔诺夫斯基实验最有代表性。他用研究沿轧件对称轴的纵断面上的坐标网格的变化，证明了沿轧件断面高度上的变形分布是不均匀的，其实验研究结果如图 1-6 所示。图中的曲线 1 表示轧件表面层各个单元体的变形沿接触弧长度  $l$  上的变化情况，曲线 2 表示轧件中心层各个单元体的变形沿接触弧长度上的变化情况。图中的纵坐标是以自然对数表示的相对变形。



由图 1-6 可看出，在接触弧开始处靠近接触表面的单元体的变形，比轧件中心层的单元体变形要大。这不仅说明沿轧件断面高度上的变形分布不均匀，而且还说明表面层的金属流动速度比中心层的要快。

显然图中曲线 1 与曲线 2 的交点是临界面的位置，在这个面上金属变形和流动速度是均匀的。在临界面的右边，即出辊方向，出现了相反现象：轧件中心层单元体的变形比表

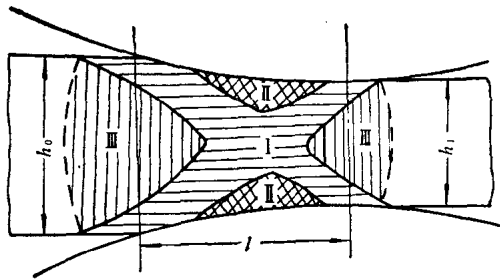


图 1-7 轧制变形区 ( $l/\bar{h} > 0.8$ )  
I—易变形区；II—难变形区；III—自由变形区

面层的要大，中心层金属流动速度比表面层的要快。

在接触弧的中间部分，即曲线上有一段很长的平行于横坐标轴的线段，这说明在轧件与轧辊相接触的表面上确实存在着粘着区。

另外，从图中还可以看出，在入辊前和出辊后轧件表面层和中心层都发生变形，这充分说明了在外端和几何变形区之间有变形

过渡区，在这个区域内变形和流动速度也是不均匀的。

塔尔诺夫斯基根据实验研究把轧制变形区绘成图1-7，用以描述轧制时整个变形情况。

实验研究还指出，沿轧件断面高度上的变形不均匀分布与变形区形状系数有很大关系。在  $l/\bar{h} > 0.5 \sim 1.0$  时，即轧件断面高度相对于接触弧长度不太大时，压缩变形完全深入到轧件内部，形成中心层变形比表面层变形要大的现象；在  $l/\bar{h} < 0.5 \sim 1.0$  时，随着变形区形状系数的减小，外端对变形过程影响变得更为突出，压缩变形不能深入到轧件内部，只限于表面层附近的区域；此时表面层的变形较中心层要大，金属流动速度和应力分布都不均匀（图1-8）。

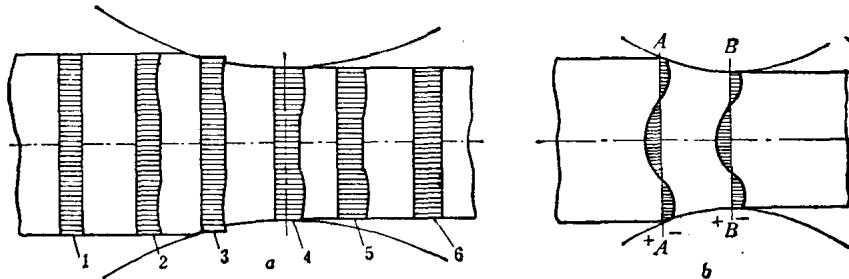


图 1-8  $l/\bar{h} < 0.5 \sim 1.0$  时金属流动速度与应力分布

a—金属流动速度分布

1、6—外端；2、5—变形过渡区；3—后滑区；4—前滑区

b—应力分布

A-A—入辊平面；B-B—出辊平面

A.И.柯尔巴什尼柯夫也用实验证明，沿轧件断面高度上的变形分布是不均匀的。他采用LY12铝合金扁锭分别以2.8%、6.7%、12.2%、16.9%、20.4%和25.3%的压缩率  $\epsilon$  进行热轧，用快速摄影对其侧表面坐标网格进行拍照，观察变形分布，其实验结果如图1-9所示。

该实验说明，在上述压缩率范围内沿轧件断面高度上的变形分布都是不均匀的。当压缩率  $\epsilon$  在2.8~16.9%的范围内， $l/\bar{h}$  在0.3~0.92时，轧件中心层的变形比表面层的变形要小，而压缩率  $\epsilon$  等于20.4%和25.3%， $l/\bar{h}$  等于1.0和1.25时，轧件中心层的变形比表面层的变形要大。

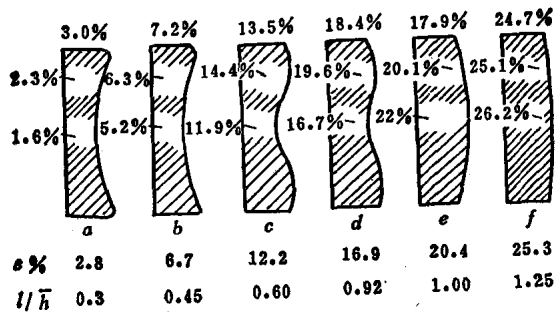


图 1-9 热轧LY12时沿断面高度上的变形分布

## 二、轧制过程的纵向变形——前滑与后滑

通过研究沿轧件断面高度上的变形分布规律可知，在前滑区内轧件任意断面上的流动速度都大于该处轧辊水平速度，这样就使得轧件出辊速度大于该处轧辊的水平速度，这种现象称为前滑。与此相反，在后滑区内轧件任意断面上的流动速度都小于该处轧辊的水平速度，这样就使得轧件入辊速度小于该处轧辊的水平速度，这种现象称为后滑。

前滑与后滑是轧制变形的特有的变形现象，它们对连轧生产有着重要意义，因为要保持轧件同时在几个轧机上进行轧制，必须使各机架速度协调，为此要精确计算前滑与后滑。另外，在张力轧制时，为了精确控制张力，也要计算前滑和后滑。

1. 前滑的确定 根据前滑的定义，其值为：

$$S_1 = \frac{v_1 - v}{v} 100\% \quad (1-20)$$

式中  $S_1$ ——前滑值，简称前滑；

$v_1$ ——轧件出辊速度；

$v$ ——轧辊圆周速度。

前滑值一般不太大，约在3~6%之间，只是在特殊情况下，可能高一些。

(1) 前滑的测定。在实际中常用刻痕法来测定，即在轧辊表面上刻有两个痕迹，其长度为 $L_0$ ，在轧制时轧件表面上便留有两个压痕，其距离为 $L_1$ 。测出 $L_1$ 和 $L_0$ 的长度并求出其差值，便可以算出前滑值（图 1-10）。因为轧辊转动两个刻痕间的夹角所用的时间等于轧件通过距离为 $L_1$ 的时间，因此公式(1-20)可变成如下形式：

$$S_1 = \frac{v_1 t - vt}{vt} = \frac{L_1 - L_0}{L_0} \quad (1-21)$$

在热轧时，轧件表面上的两个压痕间的距离  $L_1$  是在冷却以后测得的，所以必须注意修正到热状态时的长度，即

$$L'_1 = L_1 [1 + \alpha(T_1 - T_0)] \quad (1-22)$$

式中  $L'_1$ ——热状态时的实际长度；

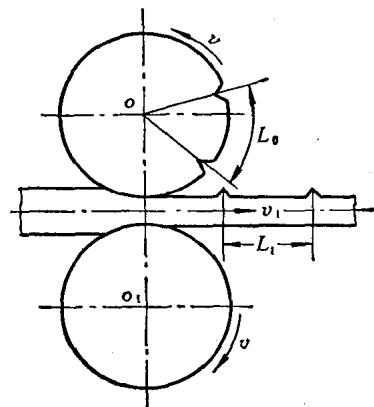


图 1-10 刻痕法测前滑

$L_1$ ——冷却后测得的长度；  
 $\alpha$ ——轧件的线膨胀系数；  
 $T_1$ ——轧件出辊时的实际温度；  
 $T_0$ ——测量  $L_1$  时的实际温度。

(2) 前滑的理论计算。在理论上前滑值可以根据临界面的位置来确定，这时把轧制变形看成平面变形状态，即忽略宽展，按秒体积不变定律，则：

$$v_1 h_1 = v_\gamma h_\gamma = v \cos \gamma h_\gamma$$

所以 
$$\frac{v_1}{v} = \frac{h_\gamma}{h_1} \cos \gamma \quad (1-23)$$

式中  $h_\gamma, h_1$ ——临界面和出辊面处轧件高度；  
 $v_\gamma, v_1$ ——临界面和出辊面处轧件速度；  
 $v$ ——轧辊圆周速度；  
 $\gamma$ ——临界角。

因为 
$$S_1 = \frac{v_1 - v}{v} = \frac{v_1}{v} - 1$$

所以

$$\frac{v_1}{v} = S_1 + 1$$

将此式代入公式 (1-23)，得：

$$S_1 = \frac{h_\gamma}{h_1} \cos \gamma - 1$$

因为  
 所以

$$h_\gamma = h_1 + 2R(1 - \cos \gamma)$$

$$S_1 = (1 - \cos \gamma) \left( \frac{2R}{h_1} \cos \gamma - 1 \right) \quad (1-24)$$

公式 (1-24) 为前滑的理论计算公式，它还可以进一步简化。

因为  $1 - \cos \gamma = 2 \sin^2 \gamma / 2$ ，当临界角  $\gamma$  很小时， $\cos \gamma \approx 1$ ， $\sin \gamma / 2 \approx \gamma / 2$ ，代入公式 (1-24)，经整理得：

$$S_1 = \left( \frac{R}{h_1} - \frac{1}{2} \right) \gamma^2$$

在冷轧薄板时， $R \gg h_1$ ，因此  $R/h_1 \gg 1/2$ ，故上式第二项的常数  $1/2$  可以忽略不计，得出计算前滑简化公式：

$$S_1 = \frac{R}{h_1} \gamma^2 \quad (1-25)$$

从前滑的理论计算公式中可以看出，计算前滑还必须要确定出临界角  $\gamma$ 。

(3) 临界角  $\gamma$  的确定。当轧件进入辊间建立起稳定轧制过程时，根据轧件的受力平衡条件 (图1-11) 则得：

$$\Sigma x = - \int_0^a p_x \sin \varphi R d\varphi + \int_\gamma^a \tau_x \cos \varphi R d\varphi - \int_0^\gamma \tau_x \cos \varphi R d\varphi + \frac{Q_1 - Q_0}{2b} = 0 \quad (1-26)$$



式中  $p_x$ ——单位压力;  
 $\tau_x$ ——单位摩擦力;  
 $b$ ——轧件宽度;  
 $Q_1, Q_0$ ——前后张力。

假如单位压力  $p_x$  沿接触弧均匀分布, 即  $p_x = \bar{p}$ , 且令  $\tau_x = f p_x = f \bar{p}$ , 那么公式 (1-26) 经积分可导出带有前后张力时的临界角公式:

$$\sin \gamma = \frac{\sin \alpha}{2} - \frac{1 - \cos \alpha}{2f} + \frac{Q_1 - Q_0}{4\bar{p}fbR} \quad (1-27)$$

当  $Q_1 = Q_0$  或者  $Q_1 = Q_0 = 0$  时, 则可由公式 (1-27) 导出前后张力相等或无张力时的临界角公式:

$$\sin \gamma = \frac{\sin \alpha}{2} - \frac{1 - \cos \alpha}{2f} \quad (1-28)$$

式中  $\alpha$ ——接触角;  
 $f$ ——摩擦系数。

公式 (1-28) 还可以进一步化简。当  $\alpha$  角很小时,  $\sin \alpha \approx \alpha$ ,  $\sin \gamma \approx \gamma$ ,  $1 - \cos \alpha = 2 \sin^2 \alpha / 2 \approx \alpha^2 / 2$ , 将这些关系式代入公式 (1-28), 得临界角简化公式:

$$\gamma = \frac{\alpha}{2} \left( 1 - \frac{\alpha}{2f} \right) \quad (1-29)$$

利用公式 (1-29) 可以计算出最大临界角, 即:

$$\frac{d\gamma}{d\alpha} = \frac{1}{2} - \frac{\alpha}{2f} = 0$$

所以

$$\alpha = f \approx \beta$$

式中  $\beta$ ——摩擦角。

当接触角  $\alpha$  等于摩擦角  $\beta$  时, 临界角  $\gamma$  有极大值, 为:

$$\gamma_{\max} = \frac{\beta}{2} \left( 1 - \frac{\beta}{2\beta} \right) = \frac{\beta}{4}$$

(4) 影响前滑的因素。影响前滑的因素比较多, 主要有轧件轧后厚度、摩擦系数、轧辊直径、道次压缩率和张力等。

1) 轧件轧出厚度的影响: 随轧件轧出厚度的减小, 前滑值增加。因为  $S_1 = \frac{R}{h_1} \gamma^2$ , 当  $R$  和  $\gamma$  不变时,  $h_1$  减小则前滑值  $S_1$  增加。

2) 摩擦系数的影响: 随摩擦系数的增加, 前滑值增加。这可从临界角公式  $\gamma = \frac{\alpha}{2} \left( 1 - \frac{\alpha}{2f} \right)$  中看出。摩擦系数  $f$  的增加, 促使临界角  $\gamma$  增加, 故使前滑值  $S_1$  增加。

3) 轧辊直径的影响: 随轧辊直径增加, 前滑值增加。将  $\alpha = \sqrt{\frac{\Delta h}{R}}$  代入临界角公式

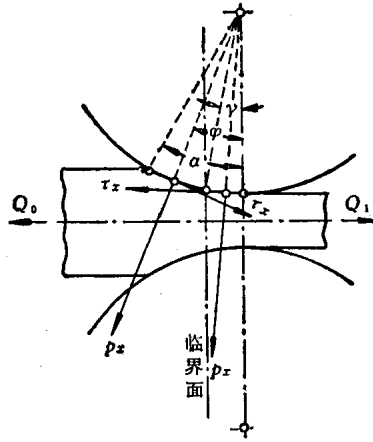


图 1-11 稳定轧制时作用在轧件上的力