

重有色金属材料
加工手册

第 **3** 分册

冶金工业出版社

重有色金属材料加工手册

第三分册

《重有色金属材料加工手册》编写组 编

冶金工业出版社

重有色金属材料加工手册

第三分册

《重有色金属材料加工手册》编写组 编

责任编辑：向培森

(限国内发行)

*

冶金工业出版社出版

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 13 5/8 字数324千字

1979年6月第一版 1979年6月第一次印刷

印数00,001~20,000册

统一书号：15062·3418 定价（科四）1.60元

出版说明

根据我国社会主义建设的需要和有色金属材料加工战线广大职工的迫切愿望，我们组织有关单位在系统总结建国二十多年来有色金属材料及其加工技术经验的基础上编写了一套《手册》陆续出版。

这套书共分四种，即《重有色金属材料加工手册》、《轻金属材料加工手册》、《贵金属加工手册》和《稀有金属材料加工手册》。洛阳铜加工厂、东北轻合金加工厂、冶金工业部贵金属研究所和宝鸡有色金属加工厂分别为上述四个《手册》编写组的组长单位。各《手册》均是在组长单位党委领导下，由参加编写单位和执笔的同志，依据总的编写原则，结合各专业具体情况共同负责编写的。

《重有色金属材料加工手册》按篇分成五个分册出版。第一分册：重有色金属及其合金；第二分册：熔炼和铸锭；第三分册：板带材生产；第四分册：管棒材生产；第五分册：线材生产。

本书系《重有色金属材料加工手册》第三分册——板带材生产，介绍了轧制时的变形特点和力能计算方法，详细叙述了热轧、冷轧的工艺及设备，以及热处理、精整和产品的质量分析等。主要供从事重有色金属材料加工生产部门的技术人员、工人使用，亦可供科研、设计、教学和使用部门的有关人员参考。

参加本书编写的单位和人员有：洛阳铜加工厂李名洲、夏立信、李著恺、孔昭文、杨海云、黄维忠、叶同发、余树康、陈桂媛、徐振文；中南矿冶学院张纬斌、曹明盛；沈阳有色金属加工厂彭兴邦、余怡谷、李义宝、伍招才；西北铜加工厂赵学仲、张志超、张宗禄；广州锌片厂张德强；东北工学院陈家民；昆明工学院张利衡；洛阳有色冶金设计院龙志英；上海铜厂柳大敏；上海有色金属压延厂陈炳兴；上海有色合金线材厂梅品修；上海东风有色合金厂张瑞华；上海合金厂徐正国。

本书在编写和修改过程中，还得到了全国许多单位和有关同志的大力支持及协助，对本《手册》进一步充实和提高起了重要作用，特此致谢。

由于我们组织编写这种书籍的经验不足，书中可能存在不少缺点或错误，请广大读者批评指正。

一九七八年七月

目 录

| | |
|--------------------------------|----|
| 第三篇 板带材生产 | |
| 常用符号 | 1 |
| 第一章 轧制时的金属变形和轧制力 | 4 |
| 第一节 轧制时的金属变形 | 4 |
| 一、轧制时常用的变形参数 | 4 |
| 1. 变形程度..... | 4 |
| 2. 变形区..... | 4 |
| 3. 变形速度和前滑..... | 5 |
| 二、轧制时的金属流动特征 | 6 |
| 三、宽展 | 8 |
| 四、摩擦系数 | 10 |
| 第二节 轧制时金属组织和性能的变化 | 12 |
| 一、轧制时金属的组织 and 性能 | 12 |
| 二、塑性 | 13 |
| 三、变形抗力 | 15 |
| 第三节 轧制力的计算 | 24 |
| 一、轧制力的影响因素 | 24 |
| 二、轧制总压力的计算方法 | 25 |
| 1. 接触面的水平投影面积的计算..... | 25 |
| 2. 平均单位压力的计算..... | 26 |
| 三、平均单位压力的计算公式 | 27 |
| 1. 在塑性条件中考虑切应力的 | |
| 理论公式 | 27 |
| 2. 简化公式..... | 30 |
| 3. 近似计算公式..... | 33 |
| 4. 其他计算公式..... | 35 |
| 四、轧制压力计算公式的分析和选择 | 37 |
| 五、轧制力计算实例 | 40 |
| 1. 热轧时轧制力计算实例..... | 40 |
| 2. 冷轧时轧制力计算实例..... | 43 |
| 第四节 轧制力的实测 | 44 |
| 一、轧制力的实测方法 | 44 |
| 二、轧制力的实测曲线 | 47 |
| 第五节 轧辊的许用压力和强度校核 | 52 |
| 一、轧辊的许用压力 | 52 |
| 二、轧辊强度校核 | 53 |
| 第六节 传动力矩计算和单位能耗曲线 | 56 |

| | |
|------------------------------|-----|
| 一、传动负荷的力矩计算 | 56 |
| 1. 静力矩计算和静负荷图..... | 56 |
| 2. 电动机电矩和功率计算..... | 58 |
| 二、单位能耗曲线 | 60 |
| 1. 单位能耗曲线的测定方法..... | 60 |
| 2. 按能耗曲线确定轧制力矩和电机功率..... | 65 |
| 第二章 板带材产品和生产流程 | 68 |
| 第一节 板带材产品 | 68 |
| 第二节 生产流程 | 83 |
| 一、生产流程的制定 | 83 |
| 二、板带材常用的生产流程 | 85 |
| 1. 紫铜板带材的生产流程..... | 85 |
| 2. 黄铜板带材的生产流程..... | 89 |
| 3. 青铜板带材的生产流程..... | 89 |
| 4. 镍及镍铜合金板带材的生产流程..... | 91 |
| 5. 锌、铅、锡板带材的生产流程..... | 91 |
| 第三章 热轧 | 94 |
| 第一节 锭坯的质量和尺寸 | 94 |
| 一、锭坯的质量 | 94 |
| 二、锭坯的尺寸 | 94 |
| 第二节 热轧前锭坯加热 | 96 |
| 一、加热制度 | 96 |
| 1. 加热温度..... | 96 |
| 2. 加热时间..... | 97 |
| 3. 加热炉内气氛的控制..... | 98 |
| 二、锭坯加热炉 | 99 |
| 第三节 热轧压下制度 | 102 |
| 一、总加工率 | 102 |
| 二、道次加工率 | 103 |
| 三、热轧时的温降 | 110 |
| 第四节 热轧时的冷却润滑和辊型 | 114 |
| 一、热轧时的冷却润滑 | 114 |
| 二、热轧辊型的选择和调整 | 115 |
| 第五节 热轧机及轧辊 | 117 |
| 一、热轧机 | 117 |
| 二、热轧辊 | 119 |
| 第六节 热轧后坯料的表面铣削 | 122 |

| | | | |
|-----------------------------|-----|-----------------------------|-----|
| 第四章 冷轧 | 124 | 二、保护性气氛 | 174 |
| 第一节 冷轧压下制度 | 124 | 三、真空热处理 | 175 |
| 一、总加工率..... | 124 | 第三节 晶粒度 | 176 |
| 二、道次加工率..... | 125 | 第四节 热处理炉 | 179 |
| 三、成品加工率..... | 128 | 第六章 酸洗、表面清理和精整 | 182 |
| 第二节 冷轧辊型的选择和调整 | 134 | 第一节 酸洗 | 182 |
| 一、辊型的选择..... | 134 | 一、酸洗工艺..... | 182 |
| 二、辊型凸度的理论计算..... | 135 | 二、酸洗设备..... | 183 |
| 三、生产中的辊型调整..... | 140 | 三、废酸处理..... | 184 |
| 四、液压弯辊..... | 141 | 第二节 表面清理 | 185 |
| 第三节 冷轧时的冷却润滑 | 142 | 一、清刷和修理..... | 185 |
| 一、冷却润滑剂的选择..... | 142 | 二、压光和抛光..... | 186 |
| 二、常用润滑剂的性能..... | 143 | 第三节 矫直 | 186 |
| 三、乳液润滑..... | 144 | 一、矫直工艺..... | 186 |
| 第四节 成卷冷轧时的张力 | 146 | 二、矫直机..... | 186 |
| 一、张力的作用和选择..... | 146 | 第四节 剪切 | 188 |
| 二、张力的测量和调节..... | 148 | 一、剪切下料计算..... | 188 |
| 第五节 冷轧机 | 149 | 二、剪切工艺..... | 188 |
| 一、冷轧机的选择..... | 149 | 三、剪切机..... | 189 |
| 1. 轧机型式..... | 149 | 第五节 带卷焊接 | 191 |
| 2. 轧辊尺寸..... | 149 | 第七章 产品质量分析 | 193 |
| 3. 轧制速度..... | 151 | 第一节 尺寸精度 | 193 |
| 二、二辊冷轧机..... | 154 | 一、轧机的刚性和弹塑性曲线..... | 193 |
| 三、四辊冷轧机..... | 155 | 二、产品纵向厚度变化的影响因素..... | 196 |
| 四、多辊冷轧机..... | 162 | 三、产品厚度的测量和自动控制..... | 198 |
| 第六节 冷轧辊 | 165 | 第二节 平直度 | 200 |
| 一、冷轧辊材料及技术要求..... | 165 | 一、平直度的影响因素..... | 200 |
| 二、冷轧辊的使用寿命..... | 168 | 二、常见的板形缺陷..... | 203 |
| 第五章 热处理 | 171 | 第三节 脆裂 | 206 |
| 第一节 热处理制度 | 171 | 一、热裂..... | 206 |
| 一、退火制度..... | 171 | 二、冷裂..... | 208 |
| 二、淬火-回火制度..... | 173 | 第四节 表面质量 | 209 |
| 第二节 热处理气氛 | 173 | 第五节 机械性能 | 211 |
| 一、普通热处理炉的气氛控制..... | 174 | | |

第三篇 板带材生产

常用符号

轧件尺寸:

H, h ——轧前、轧后厚度, 毫米;

\bar{h} ——平均厚度, $\bar{h} = \frac{H+h}{2}$, 毫米;

B_H, B_h ——轧前、轧后宽度, 毫米;

L_H, L_h ——轧前、轧后长度, 毫米;

F_H, F_h ——轧前、轧后断面积, 毫米²。

变形参数:

Δh ——压下量, $\Delta h = H - h$, 毫米;

ε ——加工率, $\varepsilon = \frac{\Delta h}{H} \times 100\%$, %;

λ ——延伸系数, $\lambda = \frac{F_H}{F_h} \approx \frac{L_h}{L_H} = \frac{H}{h}$;

Δb ——宽展, $\Delta b = B_h - B_H$, 毫米;

$\frac{\Delta b}{\Delta h}$ ——宽展指数;

$\varepsilon_\Sigma, \bar{\varepsilon}_\Sigma$ ——总加工率及平均总加工率, %;

$\varepsilon, \bar{\varepsilon}$ ——道次加工率及平均道次加工率, %;

$\bar{\lambda}$ ——平均延伸系数;

n ——轧制道次。

轧辊尺寸:

D, R ——轧辊直径及半径, 毫米;

L ——辊身长度, 毫米;

D_o, R_p ——支承轧辊的直径及半径, 毫米;

L_o ——支承辊的辊身长度, 毫米;

d_1, d_o ——工作辊及支承辊的辊颈直径, 毫米;

a ——轧辊两轴承受力点之间的距离, 毫米;

c ——辊身边缘到轴承受力点的距离, 毫米;

e ——轧件边部到轴承受力点的距离, 毫米;

l ——接触弧的水平投影长度, $l \approx \sqrt{R\Delta h}$, 毫米;

l' ——考虑弹性压扁的接触弧长度, 毫米;

F_l ——接触面的水平投影面积, $F_l = l \times \bar{B}$, 毫米²;

f ——辊型凸度 (+) 或凹度 (-), 毫米;

y ——轧辊弯曲挠度, 毫米;

y_t ——轧辊中部的热膨胀凸度, 毫米;

S_0, S ——零载时及轧制时的辊缝, 毫米。

角度及常用系数:

α ——咬入角, $\alpha \approx \sqrt{\frac{\Delta h}{R}}$, $\cos \alpha = 1 - \frac{\Delta h}{D}$, 弧度或角度;

β ——摩擦角, $\operatorname{tg} \beta = \mu$, 弧度或角度;

γ ——中性角 (临界角), 弧度或角度;

θ ——变形区内的任意角, 弧度或角度;

μ ——轧件与轧辊间的摩擦系数;

μ_1 ——轧辊轴承与辊颈间的摩擦系数;

E ——弹性模量, 公斤/毫米²;

G ——剪切模量, 公斤/毫米²;

K ——轧机刚性系数, 公斤/毫米。

温度、速度与时间:

T_H, T_h ——轧前及轧后的轧件温度, °C;

C ——比热, 卡/克·°C;

α ——热膨胀系数, 1/度;

v ——轧辊的圆周速度, $v = \frac{\pi D n}{60}$, 米/秒;

n ——轧辊转数, 转/分;

v_h, v_H, v_v ——轧件出辊时、入辊时及在中性点处的水平速度, 米/秒;

S ——前滑, $S = \frac{v_h - v}{v} \times 100\%$;

$\omega, \bar{\omega}$ ——变形速度及平均变形速度, $\bar{\omega} = \frac{v}{H} \sqrt{\frac{\Delta h}{R}}$, 秒⁻¹;

t, t' ——轧制时间及间隙时间, 秒。

力能参数:

p_x ——作用在单元接触弧水平投影面上的垂直单位压力, 公斤/毫米²;

\bar{p} ——平均单位压力, 公斤/毫米²;

P ——轧制力 (总压力, 全压力), 吨或公斤;

σ_x ——作用在轧件单元高度上的水平应力, 公斤/毫米²;

t ——单位摩擦力, 公斤/毫米²;

σ, τ ——正应力及切应力, 公斤/毫米²;

T_h, T_H ——前、后张力 (拉力), 公斤或吨;

σ_h, σ_H ——前、后单位张力, 公斤/毫米²;

σ_b, σ_s ——轧件的抗拉强度及屈服极限, 公斤/毫米²;

σ_{SH}, σ_{Sh} ——轧前及轧后的轧件屈服极限, 公斤/毫米²;

K ——轧制流动应力, $K = 1.155\sigma_s$, 公斤/毫米²;

n_σ ——应力状态系数, $n_\sigma = \frac{\bar{p}}{K}$;

$[\sigma]$ ——许用应力, 公斤/毫米²;

M ——轧制力矩, 吨·米或公斤·米;

M_μ, M_o ——摩擦力矩及空转力矩, 吨·米或公斤·米;

M_d, M_q ——动力矩及静力矩, 吨·米或公斤·米;

M_Σ ——电机传动所需总力矩, 吨·米或公斤·米;

$[M]$ ——电机额定力矩, 吨·米或公斤·米;

N ——轧制功率, 马力或千瓦。

第一章 轧制时的金属变形和轧制力

平辊轧制是生产板、带、条、箔材的主要压力加工方法。轧制生产的基本理论可以归纳为金属变形和轧制力两部分。

第一节 轧制时的金属变形

一、轧制时常用的变形参数

1. 变形程度 轧件通过旋转着的轧辊之间时产生塑性变形，并在高向、横向及纵向出现相应的尺寸变化，这种变化的大小称为变形程度。

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）：

$$\Delta h = H - h \quad (3-1-1)$$

压下量 Δh 与轧前厚度 H 的百分比称为相对压下量 ε （简称加工率）：

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{H} \times 100\% \quad (3-1-2)$$

板带材轧制时，轧件宽度在变形后稍有增加，轧件厚度减薄是主要的，通常用加工率 ε 表示轧制时的变形程度。

轧后宽度 B_h 和轧前宽度 B_H 的差称为绝对宽展 Δb （简称宽展）：

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

轧后长度 L_h 与轧前长度 L_H 之比称为延伸系数 λ ：

$$\lambda = \frac{L_h}{L_H} \quad (3-1-4)$$

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

$$\lambda = \frac{F_H}{F_h} \quad (3-1-5)$$

如宽展在轧制时忽略不计，延伸系数也可写成如下形式：

$$\lambda = \frac{H}{h} = \frac{1}{1 - \varepsilon} \quad (3-1-6)$$

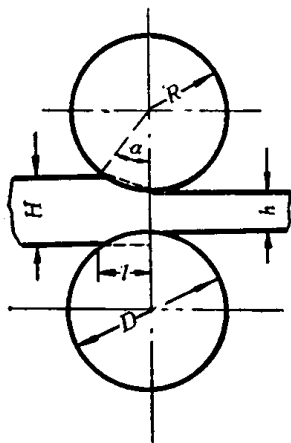


图 3-1-1 变形区

2. 变形区 轧制时金属在轧辊间产生塑性变形的区域称为变形区。

如图 3-1-1 所示，轧件被轧辊咬入时，轧件和轧辊最先接触点与轧辊中心线所组成的圆心角 α 称为咬入角。根据轧制过程建立以后的条件计算咬入角的公式如下：

$$\cos \alpha = 1 - \frac{\Delta h}{D} \quad (3-1-7)$$

当 α 角很小时（ $\alpha < 10 \sim 15^\circ$ ），咬入角可按下式近似计算：

$$\alpha \approx \sqrt{\frac{\Delta h}{R}} \quad (3-1-8)$$

如图3-1-2所示, 轧件刚与轧辊接触时, 轧辊给轧件的作用力 P 的水平分力 $P \sin \alpha$ 企图把轧件推出辊缝, 而轧辊给轧件的摩擦力 T 的水平分力 $T \cos \alpha$ 则企图把轧件拖入辊缝。因此在没有外推力进行强制咬入时, 自然咬入的条件是:

$$T \cos \alpha > P \sin \alpha$$

在接触面上某点的摩擦力 T 和轧辊在该点上的法向压力 P 之比定为摩擦系数, 其值等于摩擦角 β 的正切, 即:

$$\mu = \operatorname{tg} \beta = \frac{T}{P} \quad (3-1-9)$$

因此在下列条件时轧件即可自然咬入:

$$\beta > \alpha$$

或 $\mu > \operatorname{tg} \alpha \quad (3-1-10)$

式中 α ——咬入角;

β ——摩擦角;

μ ——轧件与轧辊间的摩擦系数。

上式表明, 要使轧件在接触面上有足够的摩擦力被咬入辊缝, 必须使轧制时的咬入角小于摩擦角, 亦即轧制时的摩擦系数大于咬入角的正切值。

轧件被咬入并充满辊缝后, 轧制过程建成并稳定进行时的咬入角仅为开始咬入瞬间咬入角的一半。

与 α 角相对应的弧叫做接触弧, 接触弧的水平投影长度 l 叫做变形区长度。由图3-1-1 得出:

$$l = \sqrt{R\Delta h - \frac{\Delta h^2}{4}} \quad (3-1-11)$$

当 α 角较小时, l 一般用下式计算:

$$l = \sqrt{R\Delta h} \quad (3-1-12)$$

3. 变形速度和前滑 单位时间内的变形程度叫做变形速度。板带材轧制时的平均变形速度按下式计算:

$$\bar{\omega} = \frac{v}{H} \sqrt{\frac{\Delta h}{R}} \quad (3-1-13)$$

式中 $\bar{\omega}$ ——平均变形速度, 秒⁻¹;

v ——轧辊线速度, $v = \frac{\pi D n}{60}$, 米/秒;

D, R ——轧辊的直径与半径, 米;

n ——轧辊转数, 转/分;

H ——轧制前的轧件厚度, 米;

Δh ——该道次压下量, 米。

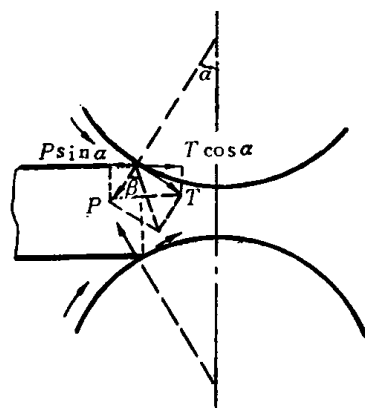


图 3-1-2 咬入时的作用力

接触面上轧件的流动速度等于轧辊圆周线速度的部位叫做中性面（临界面），中性面所对应的中心角 γ 叫做中性角（临界角）。

如图 3-1-3 所示，位于中性面后的金属流动速度小于轧辊线速度，出现后滑；而位于中性面前的金属流动速度大于轧辊线速度，产生前滑。

前滑值按下式计算：

$$S = \frac{v_h - v}{v} \times 100\% \quad (3-1-14)$$

式中 S ——前滑，%；

v_h ——轧件出辊速度，米/秒；

v ——轧辊线速度，米/秒。

前滑也可用如下近似公式计算：

$$S = \frac{\gamma}{2} \left(\frac{D}{h} - 1 \right) \quad (3-1-15)$$

式中 γ ——中性角，弧度；

D ——轧辊直径；

h ——轧制后的轧件厚度。

前滑值随变形程度、摩擦系数、轧辊直径和前张力增加而增大，随轧件厚度、后张力和轧制速度增加而减小。带张力冷轧调整张力时，应避免后张力太大、前滑减小出现轧辊在轧件上打滑的现象。冷连轧机调整轧制速度时应考虑前滑的影响，避免出现活套或断带。前滑有利于提高生产率，一般情况下前滑值等于3~6%。

二、轧制时的金属流动特征

轧制时金属沿轧件高度上的流动是不均匀的，不均匀流动程度与变形区形状系数（即变形区长度 l 与轧件平均厚度 \bar{h} 之比）有关，还与轧件厚度、金属组织、轧件温度等的不均匀程度有关。

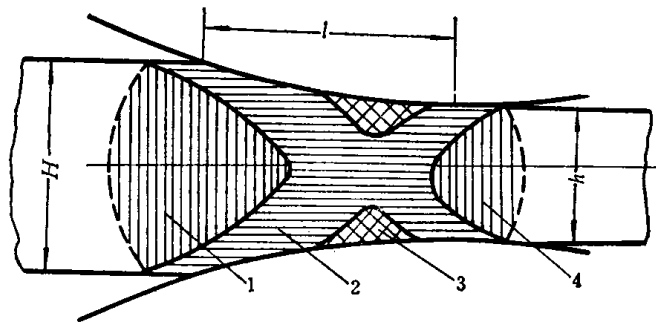


图 3-1-4 轧制变形区的组成

1—弹性压缩区；2—塑性变形区；3—难变形区；4—弹性恢复区

由于不均匀变形的存在，轧制变形区的组成如图3-1-4所示。难变形区（粘着区）内金属的变形极微小，轧件表层与轧辊表面基本上无相对滑动。轧件的变形主要集中在塑性变形区，在进入辊缝前及离开辊缝后，轧件也产生变形。通常认为，摩擦系数越大及 $\frac{l}{h}$ 值越小，粘着区或以粘着区为基底的难变形区的相对体积就越大。

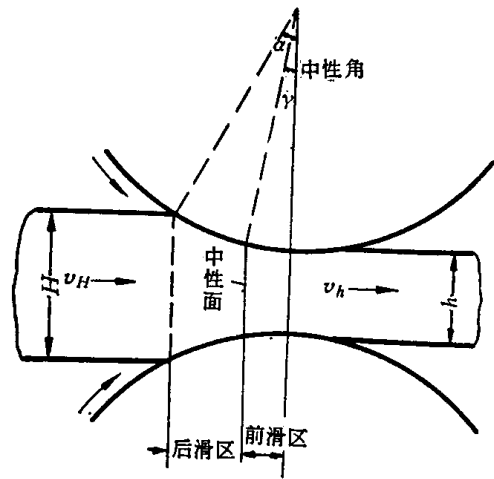


图 3-1-3 前滑

在入口及出口截面以外的轧件部分，一般叫做外区（或刚端）。通常把轧件假设为刚体，在入口后面外区（变形前外区）的流动速度等于轧件的入口速度，而在出口前面外区（变形后外区）的流动速度等于轧件的出口速度。

$\frac{l}{h}$ 值较大时，轧件断面高度上的流动速度分布见图3-1-5。变形前、后外区 1 及 6 处，流动速度分布较均匀。在弹性压缩区 2 及后滑区 3 处，轧件断面上表面层的流动速度大于中间层的流动速度，在轧件表面产生拉应力，在中间层相应产生压应力。在中性面处，轧件表面层和中间层流动均匀，产生的压应力也是均匀分布的。在前滑区 4 及弹性恢复区 5 处，轧件中间层的流动比表面层快，由于变形后外区 6 的阻碍，中间层承受压应力，表面层承受拉应力。

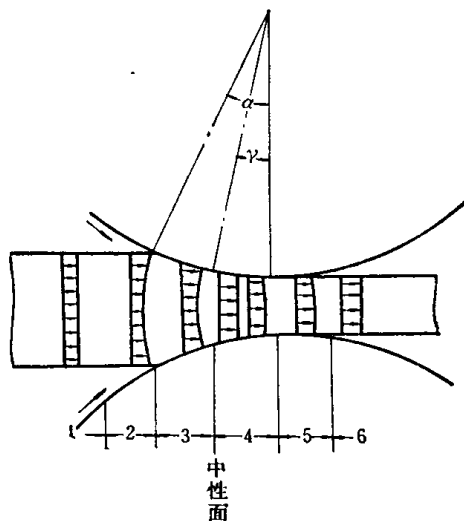


图 3-1-5 $\frac{l}{h}$ 较大时轧件断面高度上的流动速度分布

1—变形前外区；2—弹性压缩区；3—后滑区；4—前滑区；5—弹性恢复区；6—变形后外区

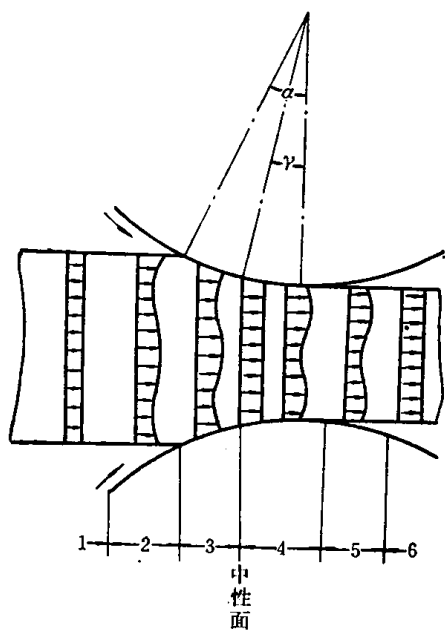


图 3-1-6 $\frac{l}{h}$ 较小时轧件断面高度上的流动速度分布

1—变形前外区；2—弹性压缩区；3—后滑区；4—前滑区；5—弹性恢复区；6—变形后外区

$\frac{l}{h}$ 值较小时，轧件断面高度上的流动速度分布见图 3-1-6。由于变形不能深入轧件中间层（里层），在弹性压缩区 2 及后滑区 3 处，外层的流动速度由表面层向里层逐渐减小，中间层将受表面层的流动影响产生相应的延伸。在前滑区 4 及弹性恢复区 5 处，轧件外层的流动速度由表面层向里层逐渐加快，中间层保持不变。由于轧件外层流动速度比中间层快，以及变形前、后外区 1 及 6 的阻碍，变形未渗透的中间层承受拉应力，表面层承受压应力，轧件断面高度上的流动速度分布及应力分布都是很不均匀的。

根据变形区形状系数 $\frac{l}{h}$ 的大小，大致

可以把轧制过程分为三种类型：

1. $\frac{l}{h} > 5$ 时，如冷轧薄板带材的情况，变形区较长而轧件厚度较薄，接触面上金属质点全部滑移流动，外摩擦系数较小，而且接触弧上摩擦系数呈曲线变化，不均匀变形程度较小，宽展可忽略。

2. $\frac{l}{h} = 1 \sim 5$ 时, 如热、粗轧中间道次的情况, 接触面金属质点的流动同时存在滑移和部分粘着, 外摩擦系数不大, 变形比较均匀并深透轧件断面高度, 宽展不大。

3. $\frac{l}{h} < 1$ 时, 如热轧及粗轧的开始道次, 即用小压下量轧制厚轧件的情况, 变形区大部分为粘着区, 外摩擦系数较大, 接触弧上摩擦力不变或变化很小, 轧件断面上变形很不均匀, 轧件中间层不变形或变形很小, 由于中间层金属不变形及外区的阻碍使表层金属产生强迫宽展, 轧件边部常呈内凹状(双腰形)。

应当指出, $\frac{l}{h}$ 主要与轧辊尺寸、轧件厚度及压下量的大小有关, 仅仅采用 $\frac{l}{h}$ 值来区分轧制过程是不全面的, 外摩擦条件对变形特征影响也较大, 而且随合金本性及具体轧制过程中的不均匀变形程度而变化。

三、宽展

轧制时除由于高向压缩产生纵向延伸外, 在宽度方向的变形使轧件边部出现宽展。在轧件的宽厚比 B/H 小于 6 的热轧条件时必须考虑宽展, 冷轧时的宽展量一般不超过 1%, 可忽略不计。

由于轧件变形区前后有不变形的外区影响, 宽展主要在入辊面与中性面之间(即后滑区)产生, 在中性面与出辊面之间有少量增加。从轧件长度方向来看, 轧件前后端由于没有外区的影响, 金属易于延伸, 宽展也较大, 当热轧时辊型凹度太大、辊身中部磨损严重或辊身中部温度低、两边辊颈温度太高时, 轧件宽向中部延伸慢, 轧件端部常出现“鱼尾”; 与此相反, 当轧件中部延伸比两边快时, 端部常出现“舌头”。轧制软合金时容易出现这类纵向、横向变形不均匀的现象, 致使切除前后端的金属损失增加。

轧制时单位压力沿轧件宽向分布是不均匀的, 轧件边缘单位压力最小, 并出现宽展, 边部的纵向延伸必然小于轧件中部, 而外区企图使延伸趋向均匀, 边部出现纵向拉应力, 当合金塑性及强度不足以承受时即出现裂边。热轧机装设轧边立辊, 使轧件两边部受到压缩并增加局部延伸, 可以减小宽展及防止裂边, 这对于轧制热脆性较大、易裂边合金是有益的。

热轧时的宽展量大小与下列因素有关:

1. 随轧件宽度增大, 宽展逐渐增加到最大值后趋于不变;
2. 轧制时道次加工率增大, 宽展增加;
3. 轧辊直径增大, 宽展增加;
4. 总加工率相等时, 轧制道次越多, 宽展减小;
5. 轧件与轧辊间的摩擦系数越大, 宽展增加;

宽展的影响因素较多, 合金本性及轧制条件(轧制温度、速度等)对宽展的影响多通过摩擦系数起作用。前张力和后张力都减小宽展, 采用大张力冷轧带材时, 有时出现宽向变狭的现象(负宽展)。宽展与合金成份、变形程度、变形温度的关系见图3-1-7至图3-1-9,

图中的宽展指数 $\frac{\Delta b}{\Delta h}$ 为绝对宽展量与绝对压下量之比, 表示横向变形程度的大小。

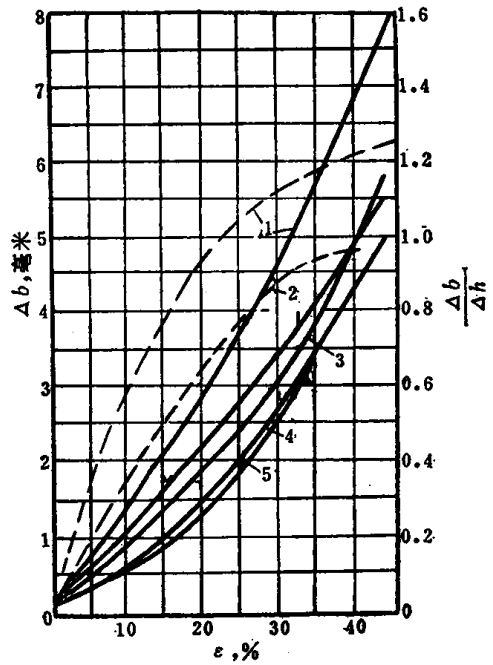
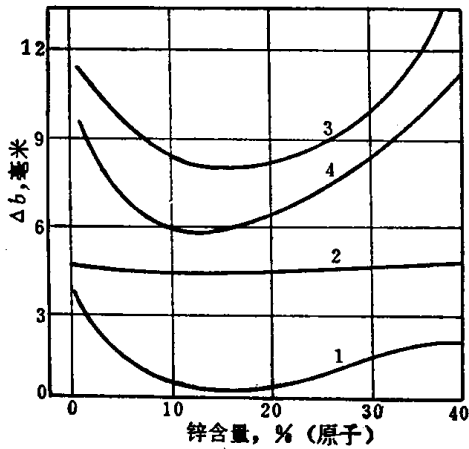


图 3-1-7 黄铜热轧时宽展与锌含量的关系

图 3-1-8 宽展 Δb 及宽展指数 $\frac{\Delta b}{\Delta h}$ 与变形程度的关系

1—600~680°C; 2—680~700°C; 3—760°C; 4—780°C

1—H62; 2—68; 3—T2; 4—H70; 5—H90

— Δb ; - - - $\frac{\Delta b}{\Delta h}$

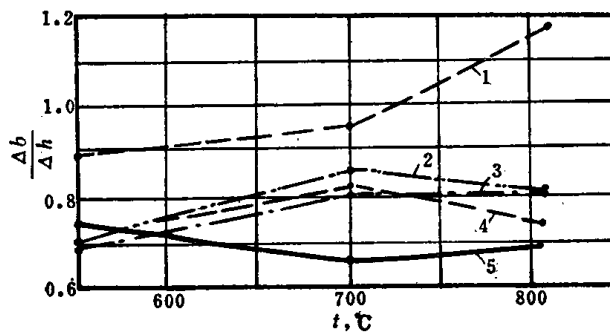


图 3-1-9 铜锌合金的宽展指数与变形温度的关系

1—H62; 2—H68; 3—H70; 4—H90; 5—T2

宽展的计算公式很多，推荐采用如下公式：

$$\Delta b = c \frac{\Delta h}{H} \sqrt{R \Delta h} \quad (3-1-16)$$

式中 c ——计算宽展时采用的试验系数，一般取0.35~0.45，铜及铜合金取下限。

该公式未考虑坯料宽度的影响，不适于 $\frac{b}{H} \leq 1$ 的情况。

生产中根据具体轧制条件实测的宽展值比较准确，热轧时各道次的宽展实测值见图3-1-10及图3-1-11。

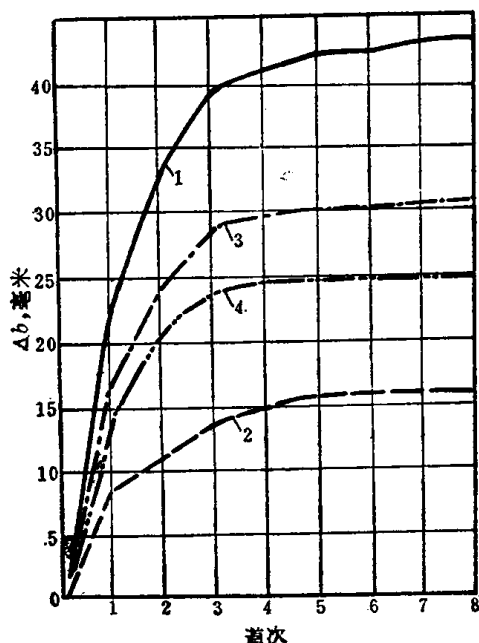


图 3-1-10 热轧时各道次的宽展
(锭坯尺寸 $100 \times 600 \times 850$ 毫米)
1—H62; 2—T2; 3—H68; 4—H90

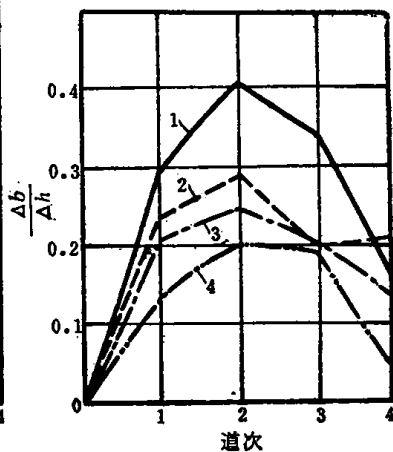
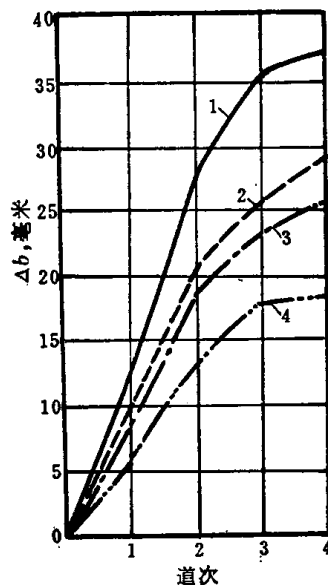


图 3-1-11 热轧时各道次的宽展
(锭坯尺寸 $140 \times 608 \times 850$ 毫米)
1—H62; 2—T2; 3—H68; 4—H90

四、摩擦系数

轧制时轧件与轧辊表面间接触产生的摩擦，有利于轧件的咬入，但增加应力和变形分布的不均匀性，导致轧制力和能量消耗的增加及加剧轧辊磨损。

摩擦条件通常用摩擦系数大小来衡量，由于变形区内各种条件的变化，确定接触弧上准确的摩擦系数平均值比较复杂。摩擦系数的影响因素如下：

1. 轧辊及轧件的表面愈粗糙，轧辊表面硬度愈低，摩擦系数愈高；
2. 润滑剂的润滑性能愈优越，摩擦系数愈小；
3. 轧制金属的弹性及强度愈高，柔软性愈小，摩擦系数也愈小；
4. 轧制温度越高，对易氧化的铜合金而言，轧件随温度升高生成氧化皮的倾向越大及变形抗力越低，摩擦系数越高；
5. 轧制压力增加时，如磨损物增加且出现粘辊时会增大摩擦系数；而冷轧时随轧制压力增加、加剧轧件加工硬化及改善润滑条件，摩擦系数减小；
6. 轧制速度增大对摩擦系数的影响比较复杂，冷轧时大多认为轧制速度增大有助于形成液体润滑的趋势，并且速度增大使辊温增加及润滑剂粘度下降，润滑效果增加导致摩擦系数降低；但当轧制速度很高、出现润滑剂不易带入或润滑时间太短的情况时，摩擦系数反而有所增加；
7. 轧辊直径越大，润滑油易于带入及轧制压力增加有利于减小摩擦系数。

轧制时沿接触弧长度上的摩擦系数是变化的，而且随轧制条件的变化，轧制各道次的摩擦系数也不一样。轧制时的摩擦系数的实测数据见表3-1-1至表3-1-3；这些数据都是在一定条件下测得的，选用时应该根据轧制时的具体条件，找出影响摩擦系数的主要因素。如热轧时轧辊表面龟裂越严重，轧制温度越高导致表面氧化越严重，轧制金属及氧化皮粘附在轧辊表面上越多，锭坯表面越粗糙，轧制金属的弹性、强度越低而柔软性越大等摩擦系数就越高。冷轧时润滑不充分及润滑剂质量越差，轧辊表面硬度及光洁度越低，轧辊表

面粗糙甚至出现粘辊，坯料酸洗不净及轧件表面粗糙不均越严重等摩擦系数就越高。冷轧时在选定摩擦系数时，还应考虑轧件状态、轧件厚度及张力的影响。

热轧时的摩擦系数 μ

表 3-1-1

| 合 金 | 热 轧 温 度, $^{\circ}\text{C}$ | 平均咬入角 α | μ | 测 定 条 件 |
|-------|-----------------------------|----------------|-----------|------------------------------|
| 铜 | 750~800 | 28°~29°15' | 0.54~0.56 | 轧辊上粘有金属 轧辊表面有网纹 轧辊表面粗糙 |
| | 700~800 | 22°~24°51' | 0.41~0.46 | |
| | 750~800 | — | 0.27~0.36 | |
| 黄 铜 | 800~850 | 24°3' | 0.45 | 热轧前坯表面已铣面，轧 辊表面有网纹 |
| | 750 | 23°6' | 0.43 | |
| | 850 | 18°58' | 0.34 | |
| | 850 | 15° | 0.27 | |
| 镍 | 1120 | 12°3' | 0.22 | — |
| | 900~1100 | — | 0.30~0.40 | |
| 白 铜 | 950~980 | 14°2'~21°8' | 0.25~0.40 | — |
| 铍 青 铜 | 620~790 | — | 0.36~0.40 | — |

冷轧时的摩擦系数 μ

表 3-1-2

| 合 金 | μ | 润 滑 剂 |
|-------|-----------|------------------------------|
| 铜 | 0.15~0.25 | 无 煤油，水 矿物油，乳液 植 物 油 |
| | 0.10~0.15 | |
| | 0.07~0.12 | |
| | 0.05~0.08 | |
| 黄 铜 | 0.12~0.17 | 无 煤油，水 矿物油，乳液 植 物 油 |
| | 0.08~0.12 | |
| | 0.06~0.10 | |
| | 0.05~0.07 | |
| 铍 青 铜 | 0.17~0.22 | 机 油 |

锌、铅、锡轧制时的摩擦系数 μ

表 3-1-3

| 合 金 | 润 滑 剂 | 变 形 温 度, $^{\circ}\text{C}$ | μ |
|------------|-----------------|-----------------------------|-----------|
| 锌及锌合金 | 5%甘油三硬脂酸脂+95%石蜡 | 150 | 0.25~0.30 |
| | | 200 | 0.30~0.35 |
| | | 250 | 0.35~0.40 |
| | 16%黄蜡+84%松香 | 50 | 0.07~0.10 |
| | | 100 | 0.08~0.12 |
| | 煤 油 | 20 | 0.12~0.15 |
| | | 50 | 0.13~0.17 |
| 无 | 20 | 0.25~0.30 | |
| 98%煤油+2%松香 | 20 | 0.07~0.10 | |
| | 85%机油+15%锭子油 | 20 | 0.06~0.08 |
| 铅 | — | 180 | 0.33 |
| 锡 | — | 100 | 0.18 |