

77.3013
409
3-1

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

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

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. 电动机力矩和功率计算	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;

$\varepsilon_s, \bar{\varepsilon}_s$ ——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_o ——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, $\tan \beta = \mu$, 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面积 F_H 与轧后断面面积 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：

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

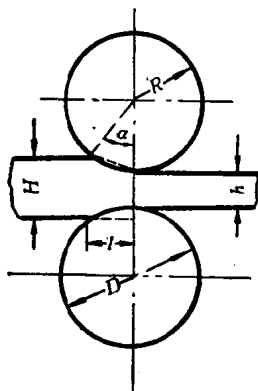


图 3-1-1 变形区

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:

$$\beta > \alpha$$

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

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。

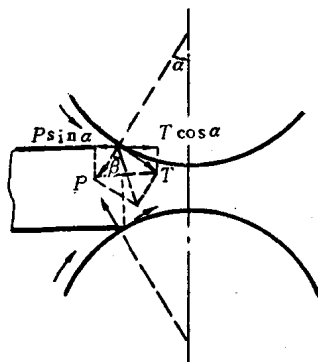


图 3-1-2 咬入时的作用力

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。

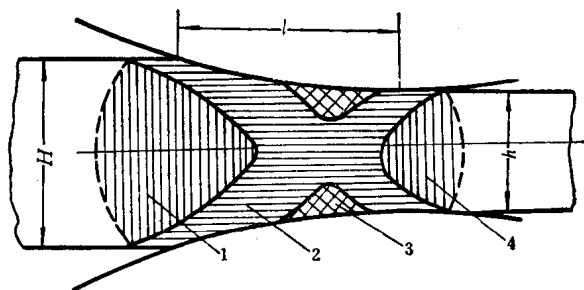


图 3-1-4 轧制变形区的组成

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。

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。

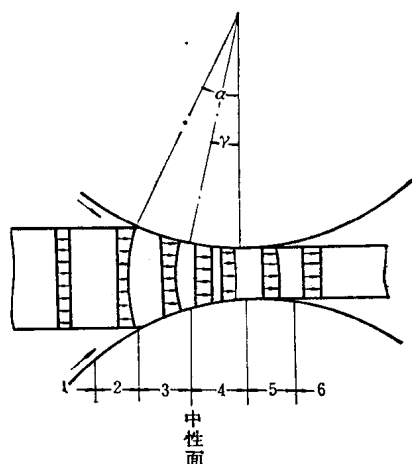


图 3-1-5 $\frac{l}{h}$ 较大时轧件断面高度上的流动速度分布

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

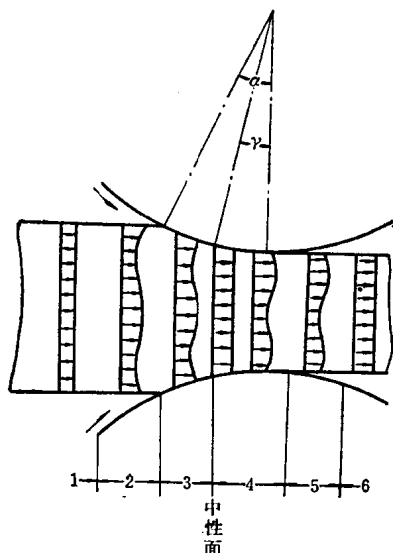


图 3-1-6 $\frac{l}{h}$ 较小时轧件断面高度上的流动速度分布

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, 而且随合金本性及其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, 合金本性及其轧制条件(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。

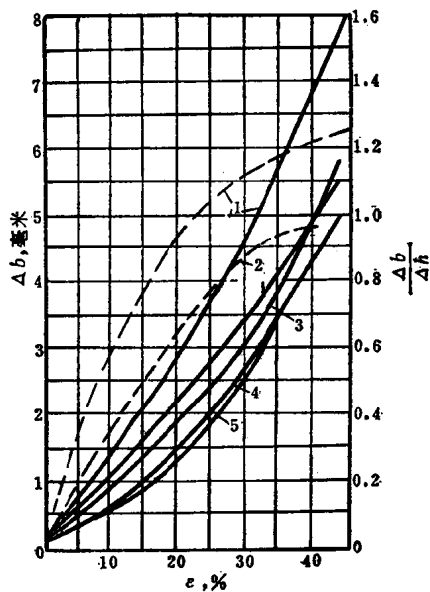
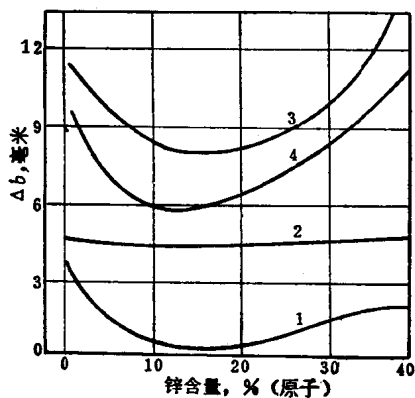


图 3-1-7 黄铜热轧时宽展与锌含量的关系 图 3-1-8 宽展 Δb 及宽展指数 $\frac{\Delta b}{\Delta h}$ 与变形程度的关系

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

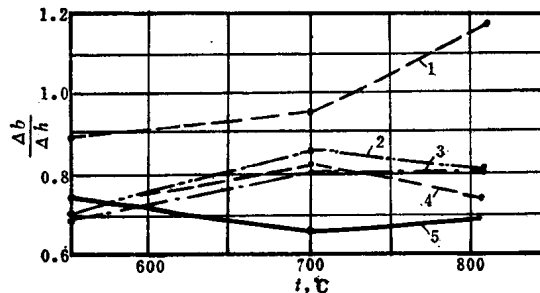


图 3-1-9 铜锌合金的宽展指数与变形温度的关系

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。

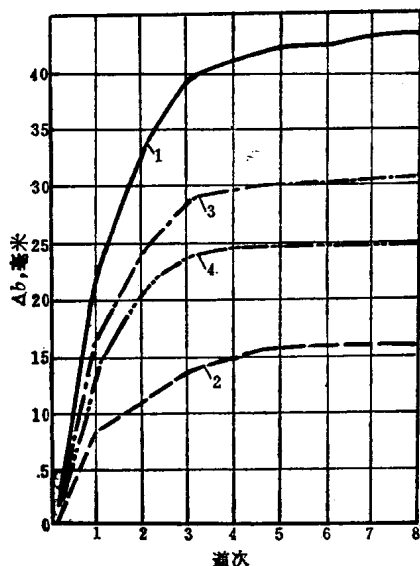


图 3-1-10 热轧时各道次的宽展
(锭坯尺寸100×600×850毫米)

1—H62; 2—T2; 3—H63; 4—H90

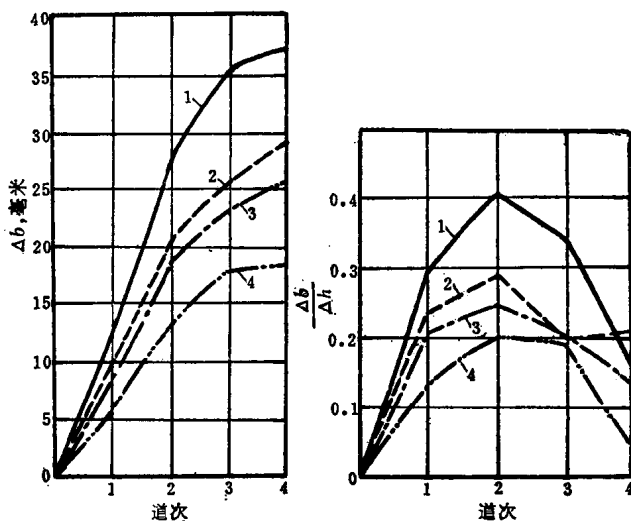


图 3-1-11 热轧时各道次的宽展
(锭坯尺寸140×608×850毫米)

1—H62; 2—T2; 3—H63; 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	$28^{\circ}\sim 29^{\circ}15'$	0.54~0.56	轧辊上粘有金属
	700~800	$22^{\circ}\sim 24^{\circ}51'$	0.41~0.46	轧辊表面有网纹
	750~800	—	0.27~0.36	轧辊表面粗糙
黄 铜	800~850	$24^{\circ}3'$	0.45	热轧前坯坯表面已铣面，轧 辊表面有网纹
	750	$23^{\circ}6'$	0.43	
	850	$18^{\circ}58'$	0.34	
	850	15°	0.27	
镍	1120	$12^{\circ}3'$	0.22	—
	900~1100	—	0.30~0.40	
白 铜	950~980	$14^{\circ}2'\sim 21^{\circ}8'$	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
	0.10~0.15	煤油，水
	0.07~0.12	矿物油，乳液
	0.05~0.08	植 物 油
黄 铜	0.12~0.17	无
	0.08~0.12	煤油，水
	0.06~0.10	矿物油，乳液
	0.05~0.07	植 物 油
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%甘油三硬脂酸酯+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

第二节 轧制时金属组织和性能的变化

一、轧制时金属的组织 and 性能

金属随着冷变形程度的增加, 变形抗力升高及塑性降低的现象叫做加工硬化 (即冷作硬化)。

加工硬化的形成过程是: 随变形程度增加, 晶粒在最大延伸变形方向上被拉长, 形成纤维组织; 出现变形织构; 产生晶格畸变; 出现副应力和残余应力; 随着晶内滑移及晶间破碎等阻碍变形的因素增加, 变形阻力加大, 形成加工硬化。

冷变形金属在比较低的温度加热时, 原子回到稳定平衡位置, 显微组织 (晶粒形状和尺寸) 不发生明显变化, 消除了第一类残余应力 (轧件各部分之间由于不均匀变形产生的附加应力), 机械性能和物理化学性能恢复的过程叫“回复”或“恢复”。

冷变形金属在比较高的温度加热时, 发生重新生核长大的结晶过程叫再结晶。经过再结晶, 充分消除了加工硬化, 被拉长了的晶粒变成了等轴的球形晶粒; 消除了变形织构及其产生的方向性; 进一步消除了第二类 (晶粒与晶粒之间由于不均匀变形引起的) 和第三类 (晶粒内原子晶格歪扭变形引起的) 残余应力; 晶粒内和晶粒间的损坏得到恢复; 塑性提高及变形抗力降低; 物理化学性能显著恢复。

轧制通常分为热轧与冷轧。热轧时轧件温度在再结晶温度以上, 同时存在着加工硬化和软化 (回复及再结晶) 两个矛盾的过程, 软化过程起主导作用。冷轧时轧件温度在再结晶温度以下, 一般来说就是不加热在常温进行轧制, 主要出现加工硬化。

热轧时, 锭坯的粗大组织及晶粒形状 (如柱状晶) 被压碎, 铸造组织改变为较致密的加工组织, 成分及组织不均一性得到改善, 强度与塑性均有提高, 其性能与退火状态相当。生产中由于轧终温度变化很大, 有时热轧后出现不完全再结晶组织。例如当加热时间太短出现“里生外熟”及轧终温度太低时, 表面呈再结晶状态而中心层呈恢复状态, 有时坯料表面及中心层均呈不均匀的带状加工组织; 当变形不能深入轧件里层时, 轧件里层残留部分铸造组织。锭坯的疏松在热轧时部分压合, 密度有所提高, 一般表面层的致密度比中心层大。

冷轧时随变形程度增加, 加工硬化越显著, 晶粒及晶间物质沿轧制方向拉长形成纤维组织, 金属的变形抗力及硬度、强度增加, 塑性降低, 而且由于晶粒择优取向形成变形织构, 产生各向异性。冷轧时由于晶粒间及晶粒内的滑移、破碎使密度有所降低, 而在再结晶退火后又有所恢复。

塑性与变形抗力是确定合金加工变形性能的主要依据, 塑性反映金属变形能力的大小, 变形抗力则表示金属变形的难易程度。主要取决于变形合金的成份和组织状态 (包括杂质含量、合金相转变、晶粒的大小形状及分布均匀性、内部缺陷等) 及具体的变形条件。一般来说, 大多数工业用变形合金都是单相固溶体或者含第二相不太多的多相合金, 由于固溶强化, 在形成固溶体的浓度范围内, 随着合金元素的增加, 一般出现变形抗力增加及塑性降低的现象, 晶粒细化时也是这样, 但不能认为在任何情况下塑性增加则变形抗力降低或者塑性降低则变形抗力增高, 例如当脆性相及易熔杂质不均匀分布在晶界时, 会同时出现塑性及变形抗力降低的情况。

在分析轧制时金属组织和性能的变化时, 往往利用或绘制轧制合金的状态图、再结晶

图、塑性图、变形抗力图 and 机械性能图，这类图反映了轧制合金的成分、组织及性能与加工变形及热处理的内在关系，当生产中的具体加工条件（变形程度、变形温度、变形速度等）与图中的试验条件相同或者相近时，在生产中利用这类图可以直接获得较精确的结果。

二、塑性

金属在外力作用下产生永久变形而不破坏的性能叫做塑性。塑性主要取决于其化学成分和组织状态，其次还与变形条件——变形温度、变形速度、变形程度、应力状态和周围介质有关。度量塑性的指标很多，除常见的单向拉伸时的延伸率 δ 、断面收缩率 ψ 和冲击韧性 a_K 外，还有圆柱体试样镦粗时出现第一个裂纹时的最大压缩率、扭转时出现第一个裂纹时的变形程度、弯曲试验破坏前的反覆弯曲次数，以及杯突深度等。到目前为止还没有一个统一的塑性指标，以上几种塑性指标表示在一定条件下的塑性好坏程度，在生产中使用时应进行比较和适当的修正。在塑性指标中，延伸率是基本的，因为裂纹的产生和发展都和拉应力的存在有关，而压应力对塑性是有利的。

1. 温度对塑性的影响——塑性图 温度升高时，多数金属或合金的塑性提高，这是因为原子扩散引起变形机构增多和回复、再结晶所致。当脆性相在较高温度出现转变时，有时也使塑性提高。而当温度接近熔点时，由于晶间物质的强度丧失和液相的出现，塑性降低。对某些合金来说，在塑性图上有一个中温脆性区，这可能是由于：脆性组成物的析出；晶间物质的个别组成物强度显著降低；晶界处有易熔杂质熔化；固溶体分解并析出脆性相或力学性质显著不同的相等等等。

2. 变形速度对塑性的影响 一般变形速度增加，塑性降低，变形过程的快慢对物理-化学变化是否充分有影响。对热变形而言，变形速度快，回复及再结晶来不及进行，塑性降低；但有时由于可以抑制脆性相的析出，塑性提高。变形速度还通过变形热效应改变金属温度从而影响塑性。如果变形温度处于略低于脆性区的温度，则高变形速度可能使变形温度上升到脆性区范围，从而降低塑性。当然如果变形温度略高于脆性区，则高速变形可以保证变形温度不致于降落到脆性区范围，从而保证变形要求。

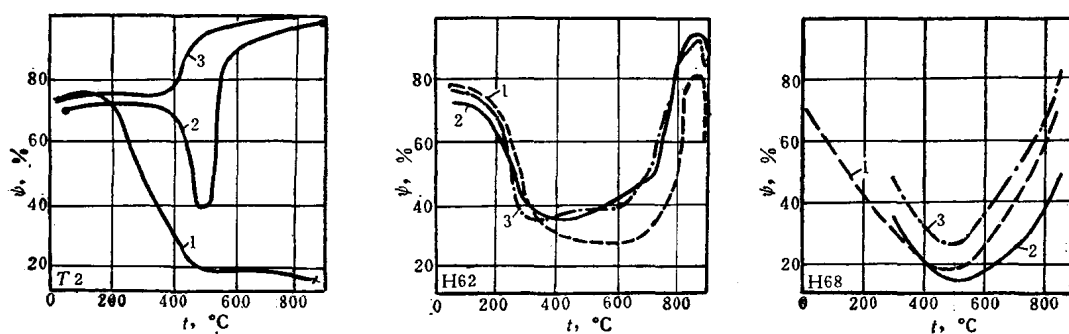


图 3-1-12 T2、H68、H62的断面收缩率 ψ %与变形温度 t °C及变形速度 ω 的关系

1— $\omega = 0.56 \times 10^{-3} \text{秒}^{-1}$; 2— $\omega = 0.11 \times 10^{-1} \text{秒}^{-1}$; 3— $\omega = 0.167 \text{秒}^{-1}$