

第一篇 初轧、型钢和钢板部分

第一章 各公式中共用参数的确定

第一节 热轧钢材的温度降计算

一、各种钢材的加热温度和终轧温度

钢材的加热温度和终轧温度各厂经验不一，文献资料中介绍的差别也很大，计算时应依轧机的特性并根据现场实际经验选取。一般来说，终轧温度应取比上临界温度高20~30℃，加热温度由于需考虑压下制度和终轧温度，并需防止在加热过程中可能发生过热、过烧、表面氧化和脱碳等缺陷，不应高于熔点以下200~250℃的温度。

国内钢厂常用的加热温度和终轧温度见表1—1—1和表1—1—2。

各钢种的加热温度和终轧温度

表1—1—1

钢种	加热温度(℃)	开轧温度(℃)	终轧温度(℃)
低碳钢和低碳合金结构钢 (如:10~35, 15~30Mn, 15~30Cr, 15~30Ni, 27SiMn, 20CrNi, 20MnV, 20MnMoB, 20MnTiB等)	1310~1330① 1150~1250	≥1100	≥850
中碳和中碳合金结构钢 (如:40~60, 35~50Cr(Ni), 30CrMnSrA, 45CrNiMoVA等)	1290~1310① 1150~1220	≥1100	≥850
高碳和弹簧钢 (如:65~80, 60~70Mn, 65SiCr, 55~70SiMn等)	1270~1290① 1120~1180	≥1100	≥900
碳素工具钢	1100~1160		800~900
合金工具钢	1120~1160		800~900
滚珠轴承钢	1150~1200		800~900
高速和不锈钢②	1150~1200		≥900
纯铁	1280~1350	≥1220	≥1050
电工硅钢			

①均热炉内加热温度。

②对于Cr17~25 (Ti) 的加热温度为1050~1150℃，终轧温度为750~830℃。

叠轧薄板坯的加热温度和终轧温度

表1—1—2

钢 种	加热温度(℃)	开轧温度(℃)	终轧温度(℃)
低碳钢(板坯)	850~900	750~780	>710
(叠板)	750~800	650~680	
电工硅钢(板坯)		1050~1100	900~950
(叠板)		1000~1050	
耐热、不锈钢(板坯)	950~1050	950~1000	800~850
(叠板)		850~900	

二、轧制时温度降的计算

钢材在轧制过程中温度的变化，是由辐射，传导和对流所引起的温降和变形热所产生的温升合成的，可用下式表示：

$$\Delta T = \Delta T_r + \Delta T_z + \Delta T_d - \Delta T_b \quad (1-1-1)$$

式中 ΔT_r ——由辐射引起的温降；

ΔT_z ——由传导引起的温降；

ΔT_d ——由对流引起的温降；

ΔT_b ——由变形热产生的温升。

以上四项中起主要作用的是辐射损失，而传导和对流相对来说是很小的。因此在实际计算中可略去不计。现将各项温度变化的计算公式分别介绍于下。

1. 由于辐射引起的温降

斯捷范—鲍利茨曼公式 [10]

$$\Delta T_r = \frac{C_s \epsilon_r F}{3600 C_o G} \left[\left(\frac{T}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_o}{100} \right)^4 \right] dt \quad (1-1-2)$$

式中 C_s ——绝对黑体的辐射常数，等于 $4.88 \sim 5.2 \text{卡} \times 100^4 / \text{米}^2 \cdot \text{小时} \cdot \text{°K}^4$ ；

ϵ_r ——轧件表面的相对黑度，热轧温度下，带氧化铁皮的钢锭为0.9，表面磨光的钢材为0.4~0.6，镍铬钢和镍铬合金为0.7，一般碳素和低合金结构钢平均可取0.8；

F ——轧件的散热表面积(米²)；

C_o ——钢材的比热(卡/公斤·℃)。一般热轧温度下可取为166或由下式求得：

$$C_o = \left[0.118 + 0.351 \frac{T}{T_{y0}} + 0.143 \left(\frac{T}{T_{y0}} \right)^2 \right] r$$

r ——修正系数。碳素钢和低合金钢为1.0，高镍合金为0.92，高速切削钢为0.93，高铬钢为0.97，铬镍高合金钢为1.01，高锰钢为0.7；

G ——轧件重量(公斤)；

T, T_o ——轧件温度和环境温度(°K)；

T_{y0} ——钢材的熔点温度(°K)；

dt ——冷却时间(秒)。

因为环境温度较轧件温度低的多，为简化计算起见，可略去不计，再将公式1—1—2

积分并整理后得t时间内的辐射温降:

$$\Delta T_r = T - \frac{1000}{\sqrt[3]{\frac{C_s \epsilon_r F t}{120 C_0 G} + \left(\frac{1000}{T}\right)^3}} \quad (1-1-3)$$

如果时间不长,温降不大时,公式(1-1-2)中的T值可看作为平均温度,这样可得:

$$\Delta T_r = \frac{C_s \epsilon_r F t}{3600 C_0 G} \left(\frac{T}{100}\right)^4 \quad (1-1-4)$$

对于一般钢材,为了便于计算,取 $C_s = 5 \times 10^4$ 卡/米²·小时·K⁴, $\epsilon_r = 0.8$, $C_0 = 166$ 卡/公斤·°C, 则:

$$\Delta T_r = 0.0067 \times \frac{F t}{G} \times \left(\frac{T}{100}\right)^4 \quad (1-1-5)$$

2. 由于传导引起的温降

可由下式求出:

$$\Delta T_z = \frac{\lambda F_z t_z}{1.8 C_0 G h_c} \times (T - T_R) \quad (1-1-6)$$

式中 λ ——钢材的导热系数,热轧温度下 $\lambda = 30$ 千卡/米·秒·°C;

F_z ——轧件与导热体的接触面积(米²),对于轧辊 $F_z = 2/cbc \times 10^{-6}$;

l_c ——轧件与轧辊间的接触弧长(毫米);

b_c ——轧件通过该道次的平均宽度(毫米);

t_z ——传导时间(秒);

h_c ——轧件通过该道次的平均厚度(毫米);

T_R ——轧辊温度(°C);

T ——轧件温度(°C)。

3. 由于对流引起的温降

可由下式得出 [1]:

$$\Delta T_d = \left[0.3 \times (T - T_0)^{\frac{1}{3}} + \left(\frac{V_0}{t^2}\right)^{\frac{1}{2.5}} \right] \times \frac{T - T_0}{\epsilon_r} \times \left(\frac{100}{T}\right)^4 \times \Delta T_r \quad (1-1-7)$$

式中 V_0 ——轧件的轧制速度(米/秒);

T, T_0 ——轧件温度和环境温度(°C);

ΔT_r ——同时间内的辐射温度降(°C)。

4. 由变形热产生的温升 [10]

可由下式得出:

$$\Delta T_b = \frac{A(1-\alpha)}{427 C_0 G} \quad (1-1-8)$$

式中 A ——该道次所需变形功(公斤·米),根据芬克公式 $A = p V l_n \frac{h_0}{h_1}$;

p ——平均单位压力(公斤/毫米²),粗略计算时可用下式:

$$p = \frac{t_{y0} - t - 75}{1500} \sigma_b \quad (1-1-9)$$

t ——轧件温度 (°C)；

t_{y0} ——所轧钢种的熔点温度 (°C)；

V ——轧件体积 (毫米³)；

h_0, h_1 ——轧件在通过该道次前后的厚度 (毫米)；

α ——表明变形能中有多大部份用于加热轧辊和散失于周围介质的系数。在 $T/T_{y0} > 0.4$ 时，在静力变形时为 0.9~2.6%，当动力变形时为 19~21%。

取钢材的比重 $r = 7.8$ 克/厘米³，比热 $C_0 = 166$ 卡/公斤·°C 则得：

$$\Delta T_b = 1.81 p (1 - \alpha) \ln \frac{h_0}{h_1} \quad (1-1-10)$$

三. 温度降的简易计算 [2]

1. 轧制薄板时每道次的温降计算

$$\Delta T = \frac{T_0 - 400}{16} \times \frac{t}{h_1} \quad (1-1-11)$$

式中 ΔT ——轧件通过该道次的温度降 (°C)；

T_0 ——轧件通过该道次前的温度 (°C)；

t ——轧件在该道次的延续时间 (包括轧制和间隙时间) (秒)；

h_1 ——轧件在通过该道次后的厚度 (毫米)。

2. 轧制厚板时任一道次的温度降计算

$$T_i = T_1 - \frac{T_1 - 400}{16} \cdot \frac{\lambda_c t_c}{\lambda_c - 1} \left(\frac{1}{h_{i-1}} - \frac{1}{H_0} \right) \quad (1-1-12)$$

式中 T_i ——轧件在任一道次的温度 (°C)；

T_1 ——轧件的开轧温度 (°C)；

λ_c ——轧件通过每道次的平均延伸率；

t_c ——轧件在每道次上的平均延续时间 (秒)；

H_0, h_{i-1} ——轧件的原始厚度和任一道次的轧前厚度 (毫米)。

若已知开轧和终轧温度时：

$$T_i = T_1 - \frac{(T_1 - T_k) h_{k-1}}{H_0 - h_{k-1}} \left(\frac{H_0}{h_{i-1}} - 1 \right) \quad (1-1-13)$$

式中 T_k ——轧件的终轧温度 (°C)；

h_{k-1} ——轧件在末道前的厚度 (毫米)。

3. 热带钢轧机温度降计算

轧件的温度降不仅与辐射，对流和传导所散失的热量有关，还与轧制时变形功所转化的热量有关。高温时辐射散热是主要因素 [4] [5]，因此，轧件温度降可以按辐射散热计算，而认为对流和传导所散失的热量同变形功所转化的热量相抵消。

对粗轧各道的温降，可按下列式求得 [5]：

$$\Delta T = 12.9 \frac{Z}{h} \left(\frac{T_1}{1000} \right)^4 \quad (1-1-14)$$

对精轧各道的温降，可按式求得〔5〕：

$$\Delta T = 17.2 \frac{Z}{h} \left(\frac{T_1}{1000} \right)^4 \quad (1-1-15)$$

带坯在中间辊道上冷却，也可按辐射散热计算，其公式如下〔5〕：

$$\Delta T = T_1 - \frac{T_1}{\sqrt[3]{1 + 0.0386 \frac{Z}{h} \left(\frac{T_1}{1000} \right)^3}} \quad (^\circ\text{K}) \quad (1-1-16)$$

1—1—14至1—1—16式中：

T_1 ——前一道的绝对温度（ $^\circ\text{K}$ ）；

Z ——纯轧时间和间隙时间（秒）；

h ——计算头部温度时为轧后厚度（毫米），计算尾部温度时为轧前厚度（毫米）。

为了控制终轧温度，带坯在中间辊道上还须有一定的停留时间。带坯厚度不变时，轧制薄规格的带钢时，带坯在中间辊道上停留时间较短，主要根据终轧温度来决定。对软钢来说，终轧目标温度一般控制在865~880 $^\circ\text{C}$ ，由于钢坯较长，尾部降温较大，升速轧制能克服带钢头尾温差，并控制在一定范围之内（15~28 $^\circ\text{C}$ ）。

对精轧机组，轧件任一部位通过各架时间与轧件厚度 h 的比为一常数，即：

$$\frac{Z}{h} = \frac{S_0}{V_1 h_1} = \frac{S_0}{V_2 h_2} = \dots = \frac{S_0}{V_{n-1} h_{n-1}} = \text{常数} \quad (1-1-17)$$

故轧件任一部位，从精轧第一架温度 T_1 （ $^\circ\text{K}$ ），降至最后一架的温度 T_n 为：

$$T_n = \frac{T_1}{\sqrt[3]{1 + 0.0515 \frac{S_0 (n-1)}{V_n \cdot h_n} \left(\frac{T_1}{1000} \right)^3}} \quad (^\circ\text{K}) \quad (1-1-18)$$

1—1—17、1—1—18式中：

S_0 ——精轧各架间的间距（米）；

n ——精轧机架数；

$V_1 \dots V_n$ ——分别为第1到 n 架出口速度（米/秒）；

$h_1 \dots h_n$ ——分别为第1架到第 n 架出口厚度（毫米）；

T_1 ——带坯头部进入 F_1 架的温度（ $^\circ\text{K}$ ）。

故精轧每架温降可以按公式1—1—15逐架计算，也可以按公式1—1—18求得总温降再除以 $n-1$ 求得每架的温度降。

例题：

设有一台连续式1700毫米热轧带钢轧机，粗轧机组有4架，第1架为不可逆水平辊破鳞机架，第2架为可逆式机架，第3和第4为连续机架，机架间距分别为36米；56米和11米；中间辊道长136米；精轧机组有6架，机架间距为6米，设钢种为软钢，进入粗轧破鳞机架的板坯温度为1200 $^\circ\text{C}$ 。板坯尺寸为188毫米×650毫米×8.7米，带坯厚25毫米，成品带钢厚1.8毫米。

已知：

粗轧:	道次	出口厚度 (毫米)	轧制时间 (秒)	轧制速度 (米/秒)	间隙时间 (秒)
	水平辊破鳞机				
	1	150	10.1	1.2	
	可逆机架				
	2	115	5.3	3.61	5
	3	85	5.9	3.61	5
	4	55	9.2	3.61	
	连续机架				
	5	38	13.5	3.5	
	6	25	16.5	4.48	
精轧:	道次	出口厚度 (毫米)	轧制速度 (米/秒)	由本架到下一架时间 (秒)	
	1	13.34	1.35	4.44	
	2	8.08	2.23	2.67	
	3	5.20	3.42	⋮	
	4	3.65	4.93	⋮	
	⋮	⋮	⋮	⋮	
	⋮	⋮	⋮	⋮	
	7	1.8	10.00	0.60	

求各道次的轧制温度及在中间辊道上的停留时间等。

解: 粗轧机组

第一道轧制温度: 头部轧制温度为 1200°C (已知), 轧制温度降为:

$$\Delta T = 12.9 \times \frac{10.1}{188} \left(\frac{1200 + 273}{1000} \right)^4 = 4^{\circ}\text{C}$$

∴ 轧件尾部温度为 $1200 - 4 = 1196^{\circ}\text{C}$ 。

第一道轧件全部轧完后头部温度为:

$$\Delta T = 12.9 \times \frac{10.1}{150} \left(\frac{1200 + 273}{1000} \right)^4 = 5^{\circ}\text{C}$$

∴ 第一道轧完后钢坯头部温度为 $1200 - 5 = 1195^{\circ}\text{C}$ 。

此时轧件长为 $8.7 \times \frac{188}{150} = 11$ 米, 轧件头部到可逆轧机还有25米。设辊道速度为1.5米/秒, 则轧件头部到可逆轧机还需走约20秒, 此时轧件头尾温降为:

$$\Delta T = 12.9 \times \frac{20}{150} \left(\frac{1195 + 273}{1000} \right)^4 = 8^{\circ}\text{C}$$

第2道头部的轧制温度: $1195 - 8 = 1187^{\circ}\text{C}$ 。

$$\text{尾部温降: } \Delta T = 12.9 \times \frac{20}{150} \left(\frac{1196 + 273}{1000} \right)^4 = 8^{\circ}\text{C}$$

即第2道刚刚开轧时, 轧件尾部温度为 $1196 - 8 = 1188^{\circ}\text{C}$ 。

第2道轧完后 (包括间隙时间5秒) 轧件头部温降为:

$$\Delta T = 12.9 \times \frac{5.3 + 5}{115} \left(\frac{1187 + 273}{1000} \right)^4 = 6^\circ\text{C}$$

头部温度: $1187 - 6 = 1181^\circ\text{C}$

第2道轧完后尾部温度 (不包括间隙时间5秒) 计算:

$$1188 - \Delta T = 1188 - 12.9 \times \frac{5.3}{150} \left(\frac{1188 + 273}{1000} \right)^4 = 1188 - 3 = 1185^\circ\text{C}$$

即刚轧完时尾部温度, 亦即第2道尾部的轧制温度。

包括间隙时间5秒后的温度为:

$$1185 - \Delta T = 1185 - 12.9 \times \frac{5}{115} \left(\frac{1185 + 273}{1000} \right)^4 = 1185 - 3 = 1182^\circ\text{C}$$

第2道尾部温度即为第3道的入口温度 (或第3道头部的轧制温度)。

其余各道照此计算, 在此就不再计算了。

把上面粗轧2道的温度计算结果可以归纳为:

		轧 制 温 度 (°C)	
第1道	头	1200	尾 1196
第2道	头	1187	尾 1185
第3道	头	1182	

带坯进入F₁架时头部温度计算

$$\text{带坯长度} = 8.7 \times \frac{188}{25} = 65.5 \text{米}$$

设带坯头部在末架粗轧机上的轧制温度为 1136°C , 则全部带坯出末架粗轧机时带坯头部温度为:

$$1136 - \Delta T = 1136 - 12.9 \times \frac{16.5}{25} \left(\frac{1136 + 273}{1000} \right)^4 = 1136 - 33 = 1102^\circ\text{C}$$

此时, 带坯头部至F₁架尚有70余米, 设辊道速度为2米/秒, 则尚需走36秒, 此36秒温度损失可按公式1—1—16计算。另按〔6〕, 即当带坯厚度为40毫米时, 带坯在中间辊道上的冷却速度为 $67^\circ\text{C}/\text{分钟}$; 当带坯厚度为25毫米时, 冷却速度为 $95^\circ\text{C}/\text{分钟}$; 故带坯在中间辊道上行走时的温降可估算为 $95 \times \frac{36}{60} = 57^\circ\text{C}$; 则此时带坯头部温度为 $1102 - 57 = 1045^\circ\text{C}$; 若二次除鳞温度损失为 30°C , 则此时带坯头部温度为 $1045 - 30 = 1015^\circ\text{C}$; 若带坯在中间辊道停留时间按10秒算, 则尚需降温 $95 \times \frac{10}{60} = 15^\circ\text{C}$; 则此时头部进入F₁的温度为 $1015 - 15 = 1000^\circ\text{C}$, 这正是带坯进入F₁架所需要的温度。

由精轧1架到2架温度降计算:

$$\Delta T = 17.2 \frac{Z}{h} \left(\frac{T_1}{1000} \right)^4$$

此处, $Z = 4.44$ 秒, $h = 13.34$ 毫米, $T_1 = 1000^\circ\text{C}$

$$\therefore \Delta T = 17.2 \times \frac{4.44}{13.36} \times \left(\frac{1000 + 273}{1000} \right)^4 = 15^\circ\text{C}$$

\therefore 第2架的轧制温度为 $1000 - 15 = 985^\circ\text{C}$ 。其余各架就不作计算了。

4. 轧制板坯和方坯时的温度降计算:

$$\Delta T = \frac{T_0 - 400}{3} \left(\frac{t}{h_1} + \frac{t}{b_1} \right) \quad (1-1-19)$$

式中 T_0 ——轧前温度 (°C)。

5. 轧制工槽钢时的温降计算 [3]:

$$\Delta T = \frac{T_0 - 400}{16} \times \frac{t}{d \times n} \quad (1-1-20)$$

式中 d ——腹板厚度 (毫米);

T_0 ——轧前温度 (°C);

n ——修正系数, 决定于轧件单位长度的重量 g (公斤/米), 见表1-1-3。

工槽钢温降计算的修正系数

表1-1-3

g (公斤/米)	14~16.9	17~24.9	17~39.9	25~49.9	40~105	50~105
对于腹板	1.00	—	1.125	—	1.25	—
对于翼板	0.75	0.80	—	1.00	—	1.30

第二节 轧件与轧辊间的摩擦系数

轧件与轧辊间的摩擦系数的影响因素很多, 不但与轧件和轧辊的材质和表面状态、轧制温度、润滑条件、单位压力及轧制速度等有关, 而且也随轧制的咬入或稳定轧制及打滑过程而异, 因之随试验的方式不同, 得出的公式也各不相同, 现将常用的计算公式和经验数据介绍如下:

一. 热轧时的摩擦系数

1. 艾克隆德公式 [4]

此公式适用于轧制温度大于700°C且轧制速度不大的情况, 此时摩擦系数:

$$f = \alpha_1 (1.05 - 0.0005T) \quad (1-1-21)$$

式中 T ——轧制温度 (°C);

α_1 ——系数; 对于钢轧辊为1.0, 对于冷硬铸铁轧辊为0.8。

2. 盖列依公式 [4]

在艾克隆德公式的基础上考虑了轧制速度的影响, 适用于轧制温度大于700°C和轧制速度小于5米/秒之情况。

$$f = \alpha_2 - 0.0005T - 0.056V \quad (1-1-22)$$

式中 α_2 ——系数; 对于钢轧辊为1.05, 硬面铸铁为0.94磨光的冷硬铸铁轧辊和磨光的钢轧辊为0.82;

T ——轧制温度 (°C);

V ——轧制速度 (米/秒)。

3. 札依柯夫公式 [1]

公式中考虑了轧辊表面状态、轧件化学成份、轧制温度及轧件与轧辊间的平均相对滑动速度。

$$f = 0.64K_1K_2 \frac{1 - 0.0005T}{\sqrt{V_c}} \quad (1-1-23)$$

式中 K_1 ——考虑轧件化学成分的系数 见表1-1-4;

K_2 ——考虑轧辊表面状态的系数 见表1-1-5;

V_c ——轧件与轧辊接触表面平均相对滑动速度: $V_c = V_0 \left[\frac{R}{3h_c} - \frac{1}{6} \right] \alpha^2$ 当 $V_c < 0.25$

米/秒时, 用 $V_c = 0.25$ 米/秒代入;

T ——轧制温度 (°C);

V_0 ——轧辊的园周速度 (米/秒);

R —— 轧辊工作半径 (毫米);

h_c ——轧件的平均厚度(毫米);

α ——咬入角 (弧度)。

化学成份的系数 K_1

表1-1-4

钢 种	K_1
碳素钢	$\frac{1}{1 + 1.35C}$ ①
莱氏体钢	1.10
珠光体、马氏体钢	1.30
奥氏体钢	1.40
夹有铁素体和莱氏体的奥氏体钢	1.47
铁素体钢	1.55
夹有碳化物的奥氏体钢	1.60

①C——钢中含碳量 (%)。

轧辊表面状态系数 K_2

表1-1-5

轧 辊 表 面 状 态	K_2
钢板轧机的磨光轧辊	0.75
冷硬铸铁轧辊	0.85
一般钢轧辊	1.0
带孔型轧辊和表面粗糙的铸铁辊	1.1
表面粗糙的钢轧辊	1.2
带刻痕的轧辊	1.35

4. 劳勃脱茨公式〔7〕

在热轧带钢轧机上轧制低碳钢的情况下提出的公式, 其轧制温度范围为650~1200°C。

$$f = 4.86 \times 10^{-4} T - 0.071 \quad (1-1-24)$$

式中 T ——轧制温度 (°C)。

带润滑轧制时 (轧制温度范围为700~930°C) 推荐采用摩擦系数为 $f = 0.22 \sim 0.28$ 。

二. 冷轧时的摩擦系数

1. 列格—邦浦数据〔11〕见表1—1—6

列格—邦浦数据

表1—1—6

改 变 因 素	f	试 验 条 件
轧制材料: 钢(0.02%C, 0.38%Mn)	0.073	铬钢轧辊, D = 46毫米 无润滑
钢(0.17%C, 0.72%Mn)	0.089	轧辊转数n = 10转/分
钢(0.37%C, 0.81%Mn, 0.25%Si)	0.11	带钢H = 2毫米, B = 30毫米
轧辊材料: 冷硬铸铁	0.078	轧制带钢0.17%C、0.72%Mn 抛光面轧辊, D = 180毫米
铬 钢	0.087	乳剂润滑, n = 10转/分
轧辊表面: 抛光面带润滑轧制	0.07	轧制带钢0.17%C 铬钢轧辊, n = 36转/分
磨光面不带润滑轧制	0.09~0.11	带钢H = 2毫米,
喷砂面轧辊	0.15	B = 30毫米。

2. 特列契耶可夫数据〔12〕见表1—1—7

适用于薄带钢轧制, 轧辊是精磨或抛光表面的。

塔列契耶可夫数据〔12〕

表1—1—7

润 滑 液	轧 制 速 度 米/秒			
	<3	3~10	10~20	>20
乳化液	0.14	0.12~0.10	—	—
矿物油	0.12~0.10	0.10~0.09	0.08	0.06
棕桐油	0.08	0.06	0.05	0.03

3. 斯通曲线 (见图1—1—1)〔10〕

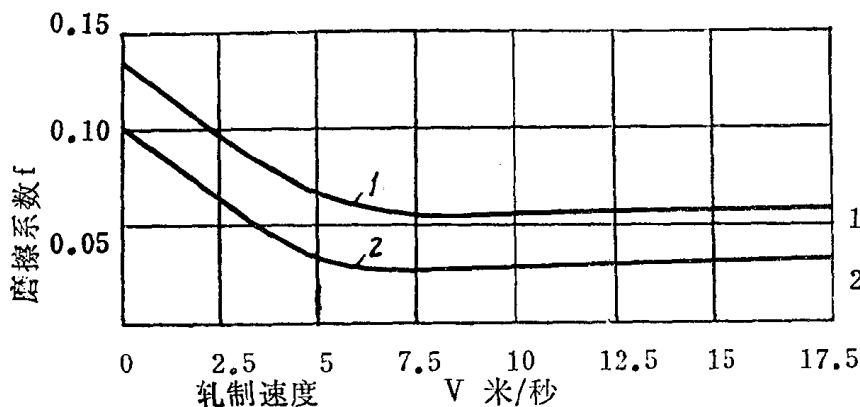


图1—1—1 在冷轧带钢的条件下摩擦系数与工作辊的圆周速度的关系

1— 矿物油乳状剂润滑。
2— 棕桐油乳状剂润滑。

4. 日本. 岗本丰彦公式 [8]

在钢板冷连轧机组上采用乳化液润滑的条件下试验得出, 此时摩擦系数的计算公式如下:

$$f = 0.667 (0.3 - \lambda_c)^2 + 0.04 \quad (1-1-25)$$

式中 λ_c ——总压下率;

$$\lambda_c = 0.4 \left(1 - \frac{h_0}{H_0}\right) + 0.6 \left(1 - \frac{h_1}{H_0}\right) \quad (1-1-26)$$

当 $\lambda_c \geq 0.3$ 时, 可取摩擦系数等于 0.04。

第三节 钢材的强度极限和屈服极限

一. 各种炭素钢在不同温度下的强度极限 σ_b (公斤/毫米²) 见表 1-1-8

二. 各种合金钢在不同温度下的强度极限 σ_b (公斤/毫米²) 见表 1-1-9 和图 1-1-4、图 1-1-3、图 1-1-4。

三. 各种钢材的总压缩率与强度的关系见附图 1。

各种碳素钢在不同温度下的强度极限 σ_b (公斤/毫米²) 表 1-1-8

温 度 ℃	C(%)									
	0.06	0.13	0.19	0.32	0.45	0.7	0.83	1.02	1.25	1.5
20	38	43.9	47	57	60	54	55	55	59	43.9
100	35	46.9	45	50	56	48	51	50	54	46.9
200	41	49.5	46	48	53	47	48	48	53	49.5
300	41	54.7	46	49	57	48	48	50	54	54.7
400	35	35.7	47	51	59	47	48	49	50	35.7
500	20	23	37	40	45	33	34	32	52	23.0
600	11	12.6	25	27	32	20	20	18	18	12.6
700	5.8	5.6	13	15	17	11	10.6	10.7	10.6	5.6
800	4.3	5.8	9.1	10	11	9.6	9.3	9.2	10.2	5.8
900	3.5	4.5	7.7	7.9	8.3	6.4	5.6	5.6	6.1	4.5
1000	3.4	2.8	4.8	4.9	5.1	3.7	3.4	3.0	3.5	2.8
1100	2.9	2.4	3.1	3.1	3.1	2.2	2.1	1.8	1.8	2.4
1200	2.0	1.4	2.0	2.1	2.1	1.7	1.5	1.6	1.5	1.4

各种合金钢在不同温度下的强度极限 σ_b (公斤/毫米²)

表1—1—9

温度 °C	12CrNi3A	18CrNi8A	30CrNiSiA	60Si2	Cr12MoV	W9Cr4V21Cr18Ni9	T7	T12	1Cr18Ni9Ti	1Cr13	Cr17
20	64	122	71.1	102.1	73.7	74.6	64.5	63.7	60	62.8	60.2
100							53.1				—
200	56.6	115.8					54.7				56.5
300	60.9	121.7		103.5			52.2				58.9
400	62.5	108.3		83.3			49.2				65.7
500	40.5	88.7		51.3			45.8				31.0
600	22.8	64.4	18.6	27.5	27.6	31.8	36.6	19.2	13.5	16.5	22.9
700	13.0	22.9	9.7	16.7	14.3	19.6	21.6	8.6	7.2	6.6	8.6
800	8.1	11.3	7.4	8.1	12.5	9.2	12.2	6.1	6.9	3.6	4.1
900	5.2	6.6	4.2	5.7	8.3	8.3	6.9	3.8	2.8	2.7	2.2
1000	4.0	4.9	3.6	3.4	4.7	5.7	3.9	3.1	2.4	3.7	2.1
1100	2.8	2.7	2.2	2.6	2.5	3.3	3.1	1.9	1.5	2.2	1.4
1200	1.6	1.9	1.8	3.3	0.8	2.1	1.6	1.1	1.3	1.2	0.8
1300	1.3	1.5		0.6							0.6

续表1—1—9

温度 °C	Cr28	4Cr9Si2	1Cr25Al5	W18Cr4V	Cr18Ni25Si2	2Cr13Ni11Cr14Ni 4Mn9	1Cr14Ni 14W2Mo	Cr15Ni60	Cr20Ni80	Cr18Ni11Nb	Cr23Ni18
20	54.1	74.6	56.7		70.4	81	57.8	66	66.7 68.2	67.5	71, 58.1
100	50.4		—								
200	50.4		73.8							49.5, 50, 52.1, 48.4	
300	47.4										55
400	50.2		65.7							47.1, 44.7, 50.7, 47.2	56.9
500	39.3										53.7
600	14.4	28.9	34.7	34.7	48.2	44.2		41.3		41.1, 41.1, 39.6, 39.8	38
700	7.7	14.0	17.7	22.6	33.8	22.5		29.2	45.5 44.7		27.2, 33.8
800	2.6	5.2	8.23	11.4	18	14.6		17	21.8 22.8	17.4, 17.7, 15.1, 20.2	14.1, 19.4
900	1.9	6.0	4.82	11.0	10.2	7.1	14.6	10.6	9.45 10.5		9.2, 10.7
1000	1.1	4.6	2.05	6.8	6.3	4.4	7.2	6.0	7.32 5.75	6.0, 6.2, 5.4, 5.8	5.53, 6.1
1100	0.8	2.3	1.0	3.2	3.1	2.3	4.4	3.9	3.61 3.71		5.25, 3.8
1200	0.8	1.6	0.62	2.1	2.2	1.4	2.7	2.9	2.34 2.27	2.0, 1.9, 2.0, 2.2	2.93, 1.9
1300										1.1, 1.4, 1.0, 1.4	1.4

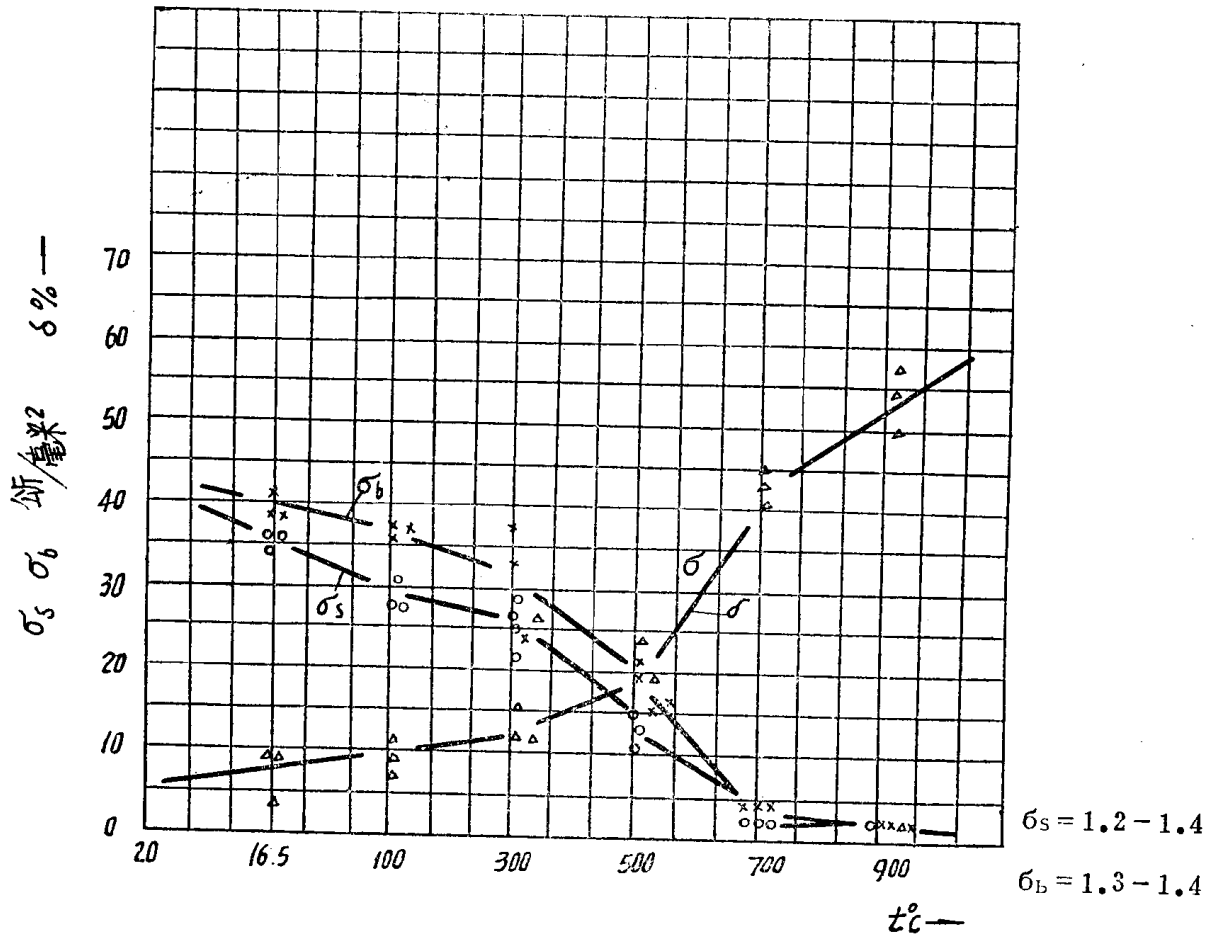


图1—1—2 硅钢片不同温度下 σ_s 和 σ_b (鞍钢实测资料, 带钢厚0.35毫米, 冷轧退火后)。

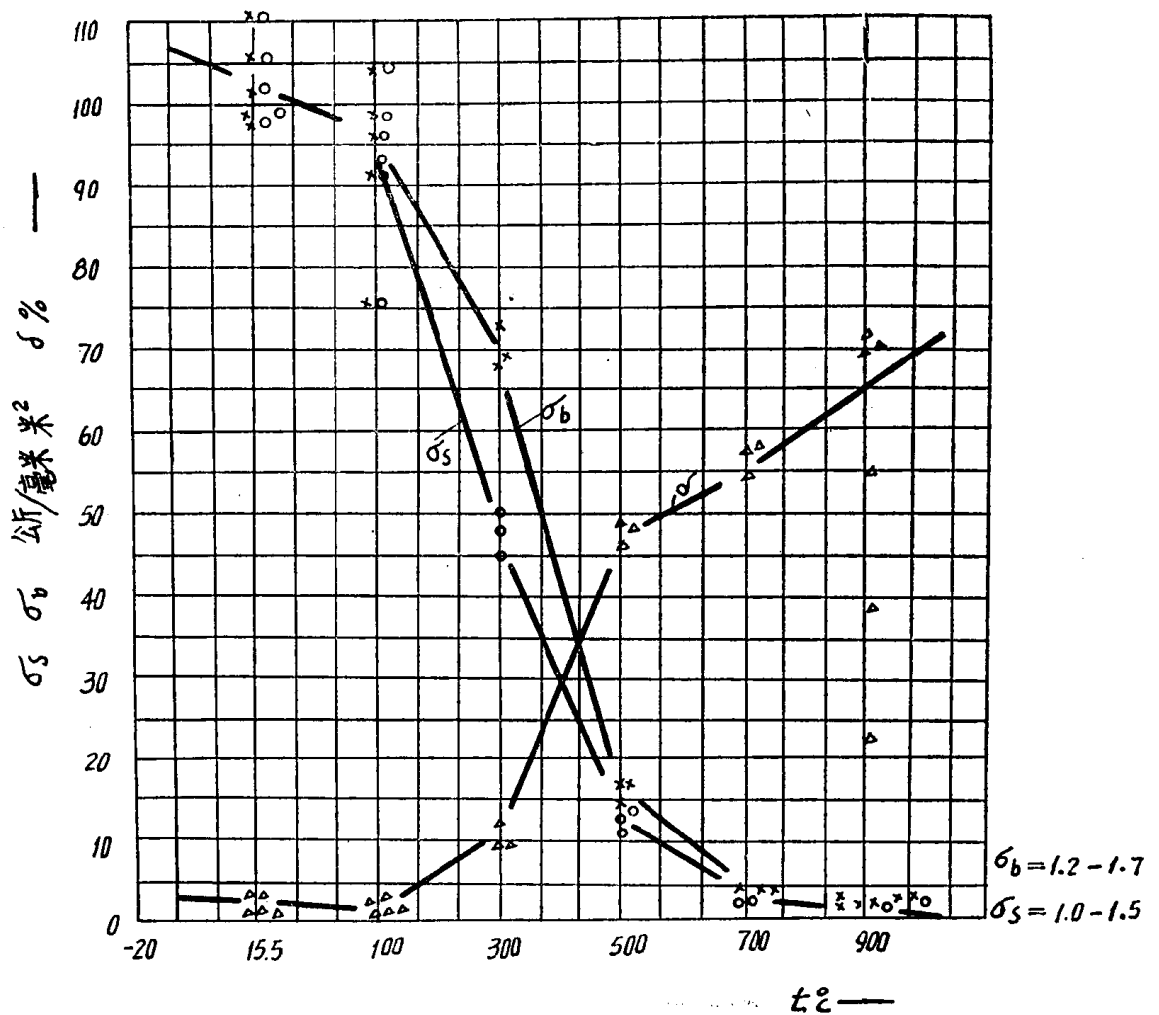


图1—1—3 硅钢片在不同温度下 σ_s 和 σ_b (鞍钢实测资料, 带钢厚0.7毫米, 冷轧后未退火)。

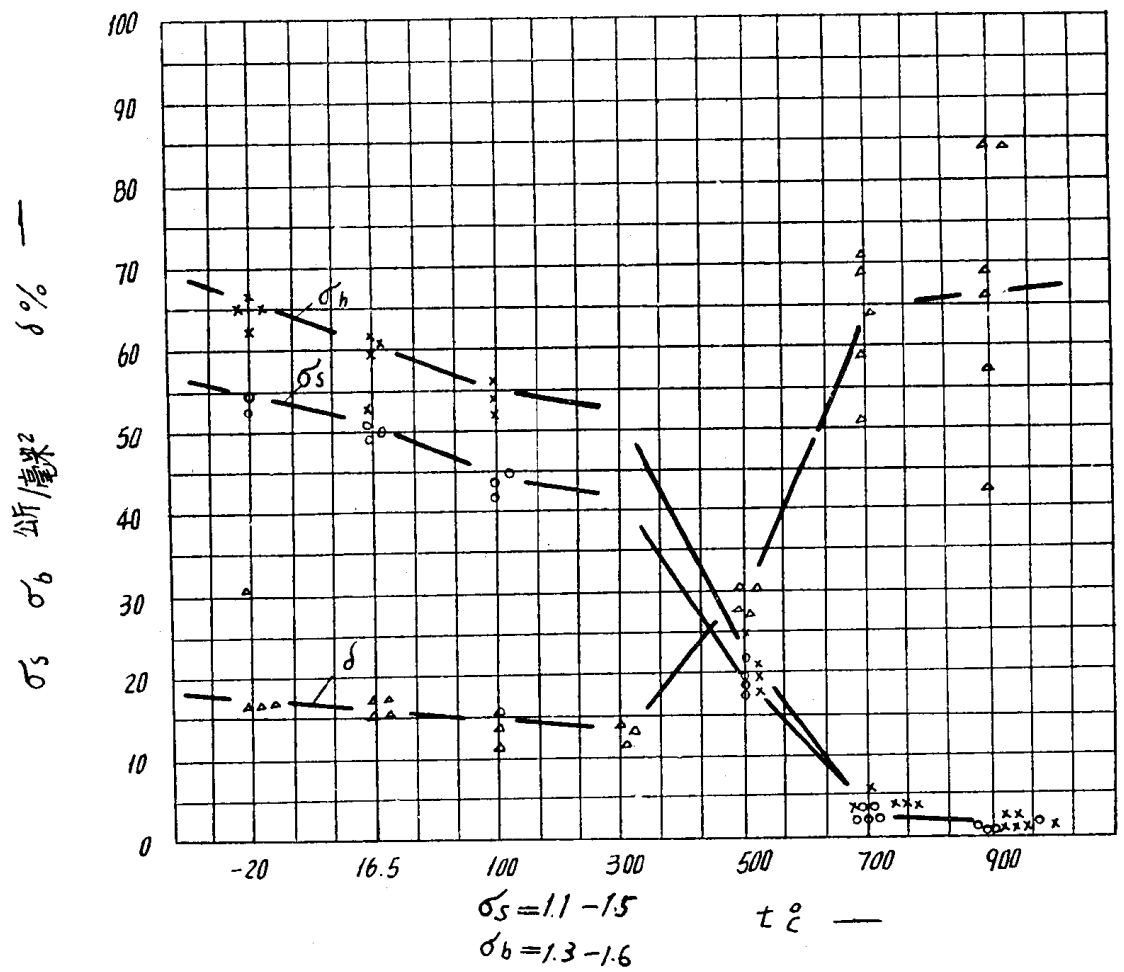


图1—1—4 硅钢片不同温度下 σ_s 和 σ_b (鞍钢实测资料, 带钢厚2.2毫米, 热轧並退火)。化学成份C—0.05%, Si—3.07%, Mn—0.13%, P—0.005%, S—0.01%

第二章 平均单位压力的计算公式

第一节 概 述

计算轧制压力的公式很多，而各公式计算的结果也有出入，这里仅介绍习惯上常用的几个公式。

在计算中使用最多的是艾克隆德公式、采利柯夫公式、高洛文和恰古诺夫公式，斯通公式和西姆斯公式等。在具体设计中习惯上常按下述方法选择计算公式。

在热轧钢板及型钢时如原料为碳钢 ($t \geq 800^\circ\text{C}$ 含锰不超过1% 及含铬不超过2~3%) 时，则常选用艾克隆德公式。

在上述情况下轧合金钢时，由于金属中含有其它合金元素，可以选用高洛文和恰古诺夫公式，但必须有钢的熔点温度 t_y 及强度极限 σ_b 的资料。也可以用采利柯夫公式计算。

西姆斯公式应用于热连轧带钢轧机及开坯轧机上较多。

在周期式薄板轧机上，由于轧制温度较低，一般选用高洛文和恰古诺夫公式计算。

在冷轧薄板时，由于需要考虑轧辊的压扁以及轧制时有时带有张力，常选用采利柯夫公式和勃兰特—福特公式和斯通公式计算，但最常用的是斯通公式。

利用每吨成品的单位能耗曲线来计算轧制力矩及电动机容量，被认为是与实际情况较符合的一种方法，因为这些曲线是从轧机上实测得到的。但在利用这些曲线时，必须是轧机的结构型式及规格相同，原料及成品的尺寸十分相近时才能获得满意的结果。因此在有条件获得能耗曲线时，可以按此方法进行计算。本文收编的能耗曲线见附图5。

第二节 热 轧 部 分

一. 采利柯夫公式〔5〕

$$\begin{aligned} p &= n_\sigma \sigma_\phi \\ &= \gamma n_\sigma' n_\sigma'' n_\sigma''' n_{\text{TNHNV}} \sigma_s \\ &= K n_\sigma' n_\sigma'' n_\sigma''' \\ &= \gamma \sigma_\phi n_\sigma' n_\sigma'' n_\sigma''' \end{aligned}$$

$$K = \gamma \sigma_\phi = 1.15 n_{\text{TNHNV}} \sigma_s \approx 1.15 \sigma_b \approx 1.15 \sigma_u$$

式中 γ ——第二主应力影响系数，在1~1.15之间变化。当两相变形时忽略宽展影响 $\gamma = 1.15$ ，当轧窄坯料时 $\gamma = 1$ ；

K ——单位变形抗力， $K = 1.15 n_{\text{TNHNV}} \sigma_s$ ；

n_σ ——应力状态系数，在0.8~0.9间变化。可以认 $n_\sigma = \gamma n_\sigma' n_\sigma'' n_\sigma'''$ ，

n_σ' ——外摩擦影响系数：

$$\frac{p}{K} = \frac{p}{2k} = n_\sigma' = \frac{2(1-\epsilon)}{\epsilon(\delta-1)} \cdot \frac{h_z}{h_1} \left[\left(\frac{h_z}{h_1} \right)^\delta - 1 \right] \quad [5] \quad (1-2-1)$$

$$\text{式中} \quad \frac{h_z}{h_1} = \left(\frac{1 + \sqrt{1 + (\delta^2 - 1) \left(\frac{h_\sigma}{h_1} \right)^\delta}}{\delta + 1} \right) \frac{1}{\delta} \quad [5] \quad (1-2-2)$$