

轧钢设计参考资料

通用部分(二)



冶金部 北京钢铁设计研究院 合编
工业部 包头钢铁设计研究院

轧钢设计参考资料

通用部分(二)

冶金部 北京钢铁设计研究院 包头钢铁设计研究院 合编

内 容 提 要

《轧钢设计参考资料》通用部份分（一）、（二）两册出版。通用部份（一）为轧钢工艺设计一般性资料；通用部份（二）为轧钢工艺设计力能计算资料。通用部份（一）已由武汉钢铁设计院于一九七八年出版。

本书为通用部份（二）。主要内容阐述了初轧、型钢、钢板及钢管等轧机的轧制压力、轧制力矩的计算，主电动机容量选择，计算机计算力能参数程序设计及予设定，并列举有例题和实测资料。

本书主要供从事轧钢工艺设计、设备设计和有关研究人员使用，也可供轧钢生产与施工单位工程技术人员、大专院校轧钢专业师生以及从事轧钢专业管理人员等参考使用。

序 言

本书为轧钢工艺设计力能计算资料。全书共分两篇，第一篇为初轧、型钢、钢板部份，第二篇为钢管部份。第一篇主要编入初轧、型钢、钢板各计算中共用参数的确定，平均单位压力计算，轧制总压力计算，轧辊传动所需力矩和主电动机容量计算以及用计算机计算力能参数程序设计及设定方法。第二篇编入钢管穿孔机、轧管机、均整机、定减径机、挤压机及冷拔冷轧钢管机等力能计算方法。最后均列举有例题和实测资料。

由于计算技术的飞速发展，本书中除介绍一般的计算方法外，还编入了计算轧钢力能参数的程序设计，并介绍了国外热带钢连轧机力能参数计算在计算机上的计算结果，N架冷带钢连轧机予设定数学模型以及张力减径机力能计算程序。

本书第一篇所用计算符号，基本上采用常用符号，个别符号与常用符号有矛盾者，均作了交待。第二篇所用计算符号没有作统一的规定，希阅读中注意。

本书第一篇，其中第六章例五由鞍钢设计院杨春茂同志及包头钢铁设计研究院黄信之同志编写，其余各章均由北京钢铁设计研究院王基才、胡菊芳、王宗萱、陈瑛等同志编写；第二篇，其中第四章、第二节由北京钢铁设计研究院余邦键同志编写，其余各章均由包头钢铁设计研究院徐绍伟、李元德、张德勤、倪训诚、邵丰敏、许令德、李佳芬等同志编写。

本书由包头钢铁设计研究院印刷厂印刷。

由于我们水平有限、书中一定会有缺点和错误，敬请读者提出批评指正。

《轧钢力能计算》编写组

一九七九年

常 用 符 号

- h_0 、 h_1 、 h_c ——轧制前后轧件高度和平均高度 (毫米)
 b_0 、 b_1 、 b_c ——轧制前后轧件宽度和平均宽度 (毫米)
 L_0 、 L_1 ——轧制前后的轧件长度 (毫米)
 F_0 、 F_1 ——轧制前后的轧件断面积 (毫米²)
 h_z ——轧件在中性面上的高度 (毫米)
 H_0 ——轧件原始厚度 (毫米)
 Δh ——压下量 (毫米)
 ϵ 、 λ ——压下率和延伸率
 l ——轧件与轧辊的接触弧长度 (毫米)
 F ——轧件与轧辊的接触面积 (毫米²)
 D 、 R ——轧辊辊身直径和半径 (毫米)
 d 、 r ——轧辊辊颈直径和半径 (毫米)
 σ_b ——强度极限 (公斤/毫米²)
 σ_s ——屈服极限 (公斤/毫米²)
 σ_{s0} 、 σ_{s1} ——冷轧前后的屈服极限 (公斤/毫米²)
 t_{v0} ——钢的熔点温度 (°C)
 E ——轧辊的弹性模数 (公斤/毫米)
 μ ——轧辊的波桑系数
 K ——静压力下的单位变形抗力 (公斤/毫米²)
 P ——轧制总压力 (吨)
 p ——平均单位压力 (公斤/毫米²)
 P_0 ——工作辊与支持辊间的作用力 (吨)
 T_1 、 T_0 ——出口与入口张力 (公斤或吨)
 t_1 、 t_0 ——出口与入口单位张力 (公斤/毫米²)
 M ——轧制力矩 (吨·米)
 M_f ——摩擦力矩 (吨·米)
 M_N ——空转力矩 (吨·米)
 M_C ——静力矩 (吨·米)
 M_d ——动力矩 (吨·米)
 M_H ——额定力矩 (吨·米)
 GD^2 ——飞轮力矩 (吨·米²)
 M_Σ ——总力矩 (吨·米)
 A ——轧制总能耗 (马力·小时/吨或千瓦·小时/吨)
 ΔA ——每道次能耗 (马力·小时/吨或千瓦·小时/吨)

N ——功率 (马力或千瓦)
 T ——轧制温度 ($^{\circ}\text{C}$)
 ΔT ——温度降 ($^{\circ}\text{C}$)
 t ——时间 (秒)
 t_z ——轧制时间 (秒)
 t_i ——间隙时间 (秒)
 f ——轧件与轧辊的摩擦系数
 f_1 ——轴承中的摩擦系数
 S_H ——主电动机的额定转差率 (%)
 n ——转速 (转/分)
 V ——轧制线速度 (米/秒)
 u ——变形速度 (1/秒)
 φ ——力臂系数

目 录

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	1
第一节 热轧钢材的温度降计算	1
第二节 轧件与轧辊间的摩擦系数	2
第三节 钢材的强度极限和屈服极限	11
第二章 平均单位压力的计算公式	17
第一节 概述	17
第二节 热轧部分	17
第三节 冷轧部分	28
第三章 轧制总压力计算	41
第一节 圆柱形轧辊与轧件的接触面积(板材、带材、普通方、扁钢)	41
第二节 非柱形断面孔形中的接触的面积	41
第三节 考虑轧辊弹性压扁时的接触面积计算	45
第四节 中厚板角轧时接触面积的计算	46
第五节 热轧带钢轧机压力计算	46
第六节 用列线图求解轧制压力	47
第四章 轧辊传动所需力矩	49
第一节 轧制力矩	49
第二节 附加摩擦力矩	62
第三节 空转力矩	63
第四节 动力矩	63
第五节 静负荷图	66
第五章 主电动机容量计算	68
第一节 可逆式轧机主电机容量计算	68
第二节 非可逆式直流电机和同步电机容量计算举例	78
第三节 带飞轮的主电机容量计算	79
第四节 钢坯连轧机电机容量的选定	89
第六章 用计算机计算力能参数程序设计及予设定数学模型举例	91
例一、热轧带钢轧机压下制度、轧制压力、力矩、功率和小时产量通用程序(BASIC)	91
例二、厚板轧机力能参数计算通用程序	110
例三之一、介绍国外热连轧机力能参数计算在计算机上计算的结果	136
例三之二、介绍国外热连轧机力能参数计算在计算机上计算结果	142

例四 N架冷连轧机予设定数学模型	146
例五 N架冷轧带钢连轧机轧制压力、力矩、功率、小时产量和轧制节奏 时间的计算	150
第七章 实测资料	192
第二篇 钢管力能计算	
第一章 钢管穿孔机力能计算	231
第一节 水压穿孔机	231
第二节 斜轧穿孔机	241
第二章 轧管机力能计算	261
第一节 自动轧管机	261
第二节 周期式轧管机	285
第三节 连续式轧管机	306
第三章 均正机力能计算	315
第四章 定减径机力能计算	329
第一节 无张力定减径机力能计算	329
第二节 张力减径机力能计算及计算程序	343
第五章 挤压机力能计算	370
第六章 冷拔、冷轧钢管力能计算	388
第一节 冷拔钢管拔制力计算	388
第二节 冷轧钢管轧制力计算	399
附表及附图	409
参考文献	450

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]

$$\Delta T_r = \frac{C_s \epsilon_r F}{3600 Co G} \left[\left(\frac{T}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_0}{100} \right)^4 \right] dt \quad (1-1-2)$$

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

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);

Co ——钢材的比热 ($\text{卡} / \text{公斤} \cdot ^\circ\text{C}$)。一般热轧温度下可取为166或由下式求得:

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

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_0 ——轧件温度和环境温度 ($^\circ\text{K}$);

T_{y0} ——钢材的熔点温度 ($^\circ\text{K}$);

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:

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

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:

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

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, $\epsilon_r = 0.8$, $C_o = 166$ 卡/公斤·℃, 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:

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

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

F_z ——轧件与导热体的接触面积 (米²), 对于轧辊 $F_z = 2/cbc \times 10^{-5}$;

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 (℃);

T ——轧件温度 (℃)。

3. 由于对流引起的温降

可由下式得出 [1]:

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

式中 V_o ——轧件的轧制速度 (米/秒);

T, T_o ——轧件温度和环境温度 (℃);

ΔT_r ——同时间内的辐射温度降 (℃)。

4. 由变形热产生的温升 [10]

可由下式得出:

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

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

p ——平均单位压力 (公斤/毫米²), 粗略计算时可用下式:

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

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:

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

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,可按下式求得〔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3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 $\times$ 650毫米 $\times$ 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℃（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℃。

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℃。

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℃。

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

即第2道刚刚开轧时，轧件尾部温度为1196 - 8 = 1188℃。

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 ($^\circ\text{C}$)

第1道	头	1200	尾	1196
第2道	头	1187	尾	1185
第3道	头	1182		

带坯进入 F_1 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 F_1 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 F_1 架的温度为 $1015 - 15 = 1000^\circ\text{C}$, 这正是带坯进入 F_1 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。

$$f = 0.64 K_1 K_2 \frac{1 - 0.0005T}{\sqrt{V_c}} \quad (1-1-23)$$

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 ($^{\circ}\text{C}$);

V_0 ——轧辊的圆周速度 (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	$1 + 1.35C$ 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 $650 \sim 1200^{\circ}\text{C}$ 。

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

式中 T ——轧制温度 ($^{\circ}\text{C}$)。

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