

温度模型对中厚板轧制压力预算精度的影响

肖志余¹ 李丽容² 刘兵¹ 刘小宁¹

(1 武汉软件工程职业学院, 武汉 430205; 2 中南财经政法大学武汉学院, 武汉 430079)

摘要 通过建立的中厚板轧制压力3种预算温度模型对Q235钢($\sigma_s \leq 0.22C, \leq 1.40Mn, \leq 0.35Si$)200 mm铸坯经12道次轧成20 mm板的各轧制道次轧制压力进行预算模拟,分析轧制温度模型对中厚板轧制压力预算精度的影响。结果表明,轧制温度模型通过轧件变形抗力对轧制压力预算精度产生影响,在中厚板轧制时,采用轧制温度模型 $\Delta t = 24 \frac{Z}{h} \left(\frac{t+273}{1000} \right)^4$ 对轧制压力进行预算的精度相对稳定且误差相对较小,为0.67%~12.41%。

关键词 温度模型 Q235钢 中厚板 轧制压力预算

Effect of Temperature Models on Prediction Accuracy of Rolling Force for Medium and Heavy Plate Rolling

Xiao Zhiyu¹, Li Lirong², Liu Bin¹ and Liu Xiaoning¹

(1 Wuhan Professional College of Software and Engineering, Wuhan 430205, 2 Wuhan College, Zhongnan University of Economics and Law, Wuhan 430079)

Abstract The rolling force of Q235 steel ($\sigma_s \leq 0.22C, \leq 1.40Mn, \leq 0.35Si$) at each pass rolled from 200 mm casting slab to 20 mm plate with 12 passes has been pre-calculated simulated by established three pre-calculated temperature models for medium-heavy plate to analysis the effect of rolling temperature model on prediction accuracy of rolling force for medium and heavy plate rolling. Results show that the rolling temperature model affects pre-calculated accuracy of rolling force by deformation resistance of stock; during medium-heavy plate rolling, the accuracy of rolling force pre-calculated by using rolling temperature model $\Delta t = 24 \frac{Z}{h} \left(\frac{t+273}{1000} \right)^4$ is relatively constant and the relative error is relatively small, i. e. 0.67% ~ 12.41%.

Material Index Temperature Model, Q235 Steel, Medium and Heavy Plate, Pre-calculation of Rolling Force

中厚板轧制过程中,轧制压力的预算十分重要,它对轧制工艺制定、调整轧机强化轧制、扩大产品轧制范围具有十分重要的意义。而轧制压力的准确预算与温度有关,温度模型作为计算轧件变形抗力的子模型,在轧制压力预算中占有非常重要的位置。本文通过建立中厚板轧制压力预算模型,选取不同的温度模型对轧制压力进行预算模拟,分析温度模型对轧制压力预算精度的影响,以期进一步提高中厚板轧制压力预算精度^[1-7]。

1 采集中厚板轧制数据

本文采集数据来自国内特钢厂中厚板生产线,利用轧机自动检测系统,对中厚板轧制过程进行跟踪,采集轧制数据,主要设备参数及轧制钢种化学成分如表1和表2所示。

2 建立中厚板轧制压力预算模型

2.1 轧制压力预算模型的确定

目前针对热轧中厚板轧制压力预算模型较多,应用最为广泛的是基于OROWAN单位压力微分方

表1 轧制设备参数

Table 1 Parameters of rolling equipment

项目	参数
轧机类型	四辊可逆式单机架
轧机轧制压力/kN	4 000
轧机轧制速度/(m·s ⁻¹)	0~5.34
电机转速/rpm	0~±50~±120
电机功率/kW	4 000(2台)
支承辊及工作辊材质	70Cr3Mo、高铬锻钢
支撑辊尺寸/mm	Φ1 500/Φ1 400×2 400
工作辊尺寸/mm	Φ850/Φ800×2 500
轧制钢种	Q235

表2 Q235钢化学成分/%

Table 2 Chemical composition of Q235 steel / %

C	Mn	Si	P	S
≤0.22	≤1.40	≤0.35	≤0.050	≤0.045

程基础上的西姆斯公式,此公式的特点是认为热轧时轧件沿整个接触弧发生黏着。西姆斯热轧轧制压力预算公式为^[1]:

$$P = BL'KQ_p \quad (1)$$

式中： P - 轧制压力/kN； B - 轧件宽度/mm； L' - 轧辊弹性压扁后变形区长度/mm； K - 平面变形抗力/MPa； Q_p - 应力状态系数。

2.2 轧件宽度的确定

中厚板轧制过程中，变形区的形状系数（轧辊弹性压扁后变形区长度与轧件平均厚度的比值） $L'/h_m > 1$ ，一般在 1.5 ~ 3.0；轧制变形区的变形基本已经深入到轧件中心，轧件沿高度方向上的变形比较均匀，宽展量较小，基本可以忽略不计^[2]。

2.3 轧辊弹性压扁后变形区长度的确定

由于中厚板轧制过程中轧制压力较大，轧辊产生局部弹性压扁，造成接触弧长度增加。轧辊弹性压扁后的半径根据 Hitchhok 所提出的两个圆柱体弹性接触变形理论推得^[3]：

$$R' = R \left(1 + \frac{C_0 P}{B \Delta h} \right) \quad (2)$$

式中： R' - 轧辊弹性压扁后半径/mm； R - 轧辊初始半径/mm； Δh - 道次压下量/mm； C_0 - 轧辊压扁系数。

$$C_0 = \frac{16(1 - \zeta^2)}{\pi E} \quad (3)$$

式中： E - 轧辊材料的弹性模数/MPa； ζ - 轧辊材料的泊松系数。对于钢质轧辊，弹性模量 $E = 2.165 \times 10^5$ MPa，泊松系数 $\zeta = 0.3$ ，考虑轧辊弹性压扁后的变形区长度为：

$$L' = \sqrt{R' \Delta h} \quad (4)$$

轧制压力预算模型公式(1)中轧件宽度 B 与轧辊弹性压扁后变形区长度 L' 是影响轧制压力的几何因素；平面变形抗力 K 为影响轧制压力的物理化学因素；应力状态系数 Q_p 为影响轧制压力的力学因素；而轧制过程中的温度直接影响轧件的物理力学性能，是确定平面变形抗力 K 的子模型。

3 建立中厚板轧制压力预算过程模型

3.1 建立中厚板轧制温度模型

中厚板轧制压力预算的准确性和各道次轧制温度有关，确定各道次轧制温度，必须求出各道次的温降。高温热轧时，轧制温降可以按辐射散热计算，而认为对流散热和传导散热与轧制变形功转化的温升相互抵消^[4]。本文采用如表 3 所示的 3 种辐射温降模型来分析温度模型对中厚板轧制压力预算精度的影响^[5]。

表 3 辐射温降模型中： Δt - 每道次辐射轧制温降/℃； ρ - 轧件密度(7.85)/(g·cm⁻³)； h - 轧件轧

表 3 轧制辐射温降的 3 种模型
Table 3 3 kinds of radiation temperature-drop models during rolling

模型	公式
1	$\Delta t = \frac{3.48}{\rho h} (t + 464)^4 \times 10^{-14}$
2	$\Delta t = \frac{t - 400}{16} \times \frac{Z}{h}$
3	$\Delta t = 24 \frac{Z}{h} \left(\frac{t + 273}{1000} \right)^4$

后厚度/mm； t - 轧件轧制温度/℃； Z - 轧制延续时间/s。

$$Z = Z_c + Z_j \quad (5)$$

式中： Z_c - 纯轧制时间/s； Z_j - 轧制间隙时间/s。

$$t_{n+1} = t_n - \Delta t \quad (6)$$

式中： t_n - 第 n 道次轧制温度/℃； t_{n+1} - 第 $n+1$ 道次轧制温度/℃。

3.2 建立中厚板轧制变形抗力模型

中厚板轧制过程中，由于宽展量较小，假设宽展忽略不计，轧件产生平面变形，根据 Mises 能量塑性条件^[6]：

$$K = 1.15 \sigma_s \quad (7)$$

式中： σ_s - 金属塑性变形抗力/MPa。

金属塑性变形抗力是指单向应力状态下金属材料产生塑性变形所需单位面积上的力。它的大小与金属材料的化学成分、变形温度、变形速度和变形程度有关。北京科技大学管克智、周纪华教授利用高速变形凸轮试验机对多种钢材进行了高温、高速变形抗力试验，建立了常用的热轧变形抗力模型结构，如公式(8)所示。

$$\sigma_s = \sigma_0 \exp(a_1 T + a_2) \left(\frac{\dot{\epsilon}}{10} \right)^{(a_3 T + a_4)} \cdot \left[a_6 \left(\frac{\epsilon}{0.4} \right)^{a_5} - (a_6 - 1) \frac{\epsilon}{0.4} \right] \quad (8)$$

式中： T - 绝对轧制温度/K， $T = (t + 273)/1000$ ； $\dot{\epsilon}$ - 平均变形速率/s⁻¹， $\dot{\epsilon} = 2\nu \sqrt{\Delta h/R}/(H + h)$ ， h - 各道次轧后厚度/mm， H - 各道次轧前厚度/mm， ν - 轧辊平均线速度/(mm·s⁻¹)， $\nu = 2\pi RN/60$ ， N - 轧辊转速/(r·min⁻¹)； ϵ - 变形程度， $\epsilon = \ln H/h$ ； σ_0 ， $a_1 \sim a_6$ - 回归系数，其值取决于钢种。

为了适应计算机控制对变形抗力模型的要求，本文对轧制钢种 Q235 进行了非线性回归分析，得

出回归系数如表 4 所示^[7]。

3.3 建立中厚板轧制应力状态系数模型

轧制过程中金属应力状态系数主要受外摩擦和外区等因素的影响,经过对多种模型的分析,中厚板轧制过程中应力状态系数采用西姆斯简化模型结构 $Q_p = f\left(\frac{L'}{h_m}, \varepsilon\right)$ 形式,建立应力状态系数回归模型结构形式为^[8]:

$$Q_p = a + b\varepsilon + c\frac{L'}{h_m} + d\frac{L'}{h_m}\varepsilon \quad (9)$$

根据中厚板生产线采集到的轧制数据,计算出轧辊弹性压扁后变形区长度、轧件宽度、变形抗力,由轧制压力实测值,反算出应力状态系数 Q_p ,再对 Q_p 进行回归分析,得出回归系数值为 $a = 1.1093$, $b = -2.8342$, $c = 0.1706$, $d = 0.8536$ 。

4 中厚板轧制压力预算模拟

4.1 轧制工艺参数

本文选取中厚板生产线实测轧制数据,轧制材料为 Q235 钢,材料断面尺寸为 200 mm × 1 600 mm,轧制成品断面尺寸为 20 mm × 2 340 mm,开轧温度为 1 066.9 °C,轧制工艺参数如表 5 所示。

4.2 轧制压力预算模拟结果分析

建立中厚板轧制压力预算模型,分别采用表 3 中的 3 种温度模型对 Q235 钢中厚板轧制压力进行预算模拟。由于本

表 4 Q235 钢变形抗力模型回归系数

Table 4 Regression coefficient of deformation resistance model for steel Q235

σ_0 / MPa	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
140.3	-2.923	3.721	0.310 2	-0.265 9	0.455 4	1.52

文数据处理量较大,采用 C# Visual Studion2005 软件编程,对轧制数据进行计算,得出各道次轧制压力预算值,如表 6 所示。结合表 6 数据与图 1 曲线进行分析:

(1)采用 3 种不同轧制温度模型对 Q235 钢中厚板轧制压力进行预算,发现预算轧制压力与实测值之间存在一定误差,但是预算曲线与实测值变化趋势基本一致,这说明轧制温度模型对中厚板轧制压力预算的准确性存在影响。

(2)在铸坯 12 个道次的轧制过程中,3 种轧制温度模型对 Q235 钢中厚板轧制压力的预算误差值不同,在铸坯的第 4、5、7、10、12 道次,3 种模型的预

表 5 轧制工艺参数

Table 5 Parameters of rolling process

轧制道次	轧出厚度/ mm	宽度/ mm	压下量/ mm	实测温度/ °C	实测轧制 压力/kN	速度/ (r · min ⁻¹)	轧制 时间/s	间隙 时间/s
0	200.00	1 600		1 066.90				
1	176.37	2 210	23.63	1 046.90	15 872.00	46.08	0.5	8.0
2	160.91	2 220	15.46	1 059.25	14 122.00	44.88	0.5	20.7
3	137.71	2 230	23.20	1 032.90	17 953.00	42.60	0.6	19.7
4	114.97	2 340	22.74	1 041.30	20 291.00	39.60	0.5	70.0
5	91.96	2 340	23.01	1 009.75	24 276.00	46.80	1.0	9.5
6	72.04	2 340	19.91	1 021.75	24 158.00	45.60	11.0	8.5
7	53.92	2 340	18.13	1 010.50	28 633.00	50.16	1.5	9.0
8	40.95	2 340	12.97	1 020.75	24 749.00	50.28	2.0	9.5
9	31.89	2 340	9.06	1 024.90	23 520.00	61.32	2.0	7.5
10	25.46	2 340	6.44	1 016.35	22 187.00	63.36	3.0	18.5
11	22.01	2 340	3.44	990.15	13 972.00	53.28	4.5	7.0
12	20.00	2 340	2.01	953.60	10 798.00	66.96	3.5	0

表 6 3 种温降模型轧制压力预算值及相对误差

Table 6 Calculated value of rolling force by 3 kinds of temperature-drop models and relatively error

轧制道次	实测 温度/°C	实测轧制 压力/kN	模型 1		相对 误差/ %	模型 2		相对 误差/ %	模型 3		相对 误差/ %
			计算轧制 温度/°C	预算轧制 压力/kN		计算轧制 温度/°C	预算轧制 压力/kN		计算轧制 温度/°C	预算轧制 压力/kN	
1	1 046.90	15 872	1 066.90	15 948.61	0.48	1 065.13	16 043.34	1.08	1 063.61	16 124.87	1.59
2	1 059.25	14 122	1 046.90	13 112.60	7.15	1 042.04	13 329.98	5.61	1 038.14	13 506.83	4.36
3	1 032.90	17 953	1 059.25	17 279.78	3.75	1 054.05	17 578.64	2.09	1 049.71	17 832.14	0.67
4	1 041.30	20 291	1 032.90	20 291.62	0	1 012.65	21 681.96	6.86	997.17	22 808.90	12.41
5	1 009.75	24 276	1 041.30	21 536.62	11.28	1 037.64	21 786.93	10.25	1 034.76	21 985.89	9.43
6	1 021.75	24 158	1 009.75	23 698.82	1.90	1 001.67	24 302.94	0.60	995.97	24 738.14	2.40
7	1 010.50	28 633	1 021.75	24 611.31	14.05	1 016.09	25 035.54	12.56	1 011.92	25 352.29	11.46
8	1 020.75	24 749	1 010.50	23 988.28	3.07	1 002.36	24 577.19	0.69	996.61	25 002.25	1.02
9	1 024.90	23 520	1 020.75	21 697.27	7.75	1 011.75	22 269.33	5.32	1 005.15	22 698.26	3.49
10	1 016.35	22 187	1 024.90	19 261.72	13.18	998.57	20 767.67	6.40	978.98	21 963.62	1.01
11	990.15	13 972	1 016.35	12 600.53	9.82	998.95	13 264.26	5.07	986.39	13 765.00	1.48
12	953.60	10 798	990.15	9 317.22	13.71	984.28	9 478.32	12.22	980.43	9 585.60	11.23

算误差值差别较大,这说明在轧制过程中,可以通过选取不同的温度模型来提高轧制压力预算精度。

(3)在铸坯 12 个道次的轧制过程中,第 2、3、5、7、8、9、10、11、12 道次,采用模型 3 对轧制压力进行预算的误差值小于模型 1 和模型 2,这说明采用轧制温降模型 3 对轧制压力进行预算的精度相对稳定且误差相对较小。

5 结论

(1)轧制温度模型通过影响轧件变形抗力值对轧制压力预算的准确性产生影响。

(2)比较 3 种轧制温度模型,采用温度模型 $\Delta t = 24 \frac{Z}{h} \left(\frac{t+273}{1000} \right)^4$ 对 Q235 钢中厚板轧制压力进行预算的精度相对稳定且误差相对较小。

武汉市教育局教学研究项目资助(2013157)

参考文献

[1] 孙一康. 带钢热连轧的模型与控制[M]. 北京:冶金工业出版社, 2007:38-48.
 [2] 解保清. 中厚板力能参数测量分析与数学模型研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2007:20-21.
 [3] 赵志业. 金属塑性变形与轧制理论[M]. 北京:冶金工业出版社, 2004:288-290.

[4] 程晓茹. 轧制过程数学模型[M]. 北京:冶金工业出版社, 2008: 118-125.
 [5] 张毅. 中厚板产能优化[D]. 武汉:武汉科技大学, 2005:28-33.
 [6] 段小勇. 金属压力加工理论基础[M]. 北京:冶金工业出版社, 2004:203-204.
 [7] 周纪华. 金属塑性变形阻力[M]. 北京:机械工业出版社, 1989: 211-229.
 [8] 孙一康. 带钢热连轧数学模型基础[M]. 北京:冶金工业出版社, 1979:40-43.

肖志余(1982-),女,硕士(2011年武汉科技大学),讲师, 2005年安徽工业大学(本科)毕业,轧制过程计算机控制与模具设计研究。E-mail:1652070381@qq.com

收稿日期:2015-05-06

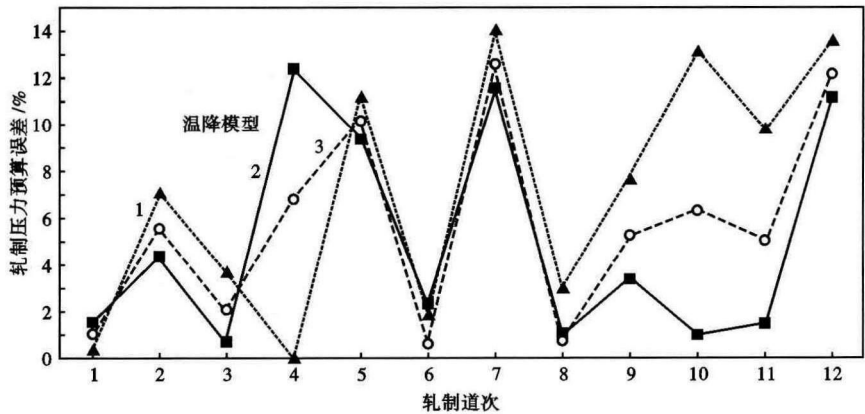


图 1 3 种温降模型轧制压力预算误差值对比图

Fig. 1 Comparison curves of rolling force prediction error by using 3 kinds of temperature-drop models

下期要目

不锈钢连铸中间包外壳倾角对液流影响的水模拟试验和应用	王承顺等
GCr15 轴承钢精炼渣冷却过程矿相析出热力学分析和应用	唐国章等
30 t VOD 精炼含氮不锈钢底吹氮气合金化的生产实践	安杰等
控制 ER70S-G 含钛焊丝钢 TiN 析出和防止水口结瘤的工艺实践	杨咏阶等
GCr15 轴承钢线材冷拔工艺优化的实践	王莹莹等
氩气流量、渣系和加 Al 粉对 1Cr21Ni5Ti 钢保护气氛重熔锭 [Ti] 的影响	王海江等
锻造和预备热处理对超高强度钢 23Co-Ni 晶粒度的影响	王瑞等
固溶温度对 00Cr13Ni7Co5Mo4W 马氏体时效不锈钢组织和耐点腐蚀的影响	姜越等
退火和平整工艺对 08Al 钢冷轧包芯线用冷轧薄带力学性能的影响	裴润奇
冷轧压下率对 Hi-B 高磁取向硅钢初次再结晶组织的影响	朱炜杰等