

Q345 钢宽展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 通过建立的实验中厚板轧制过程宽展计算模型, 对 Q345 钢($\%C \leq 0.20C, \leq 1.60Mn, \leq 0.55Si$) 中厚板 210 mm 铸坯经 10 道次轧成 48 mm 板的各粗轧道次轧制压力进行预算, 分析试验宽展模型和 Besse 宽展模型对中厚板轧制压力的影响。结果表明, 在中厚板轧制开始 2~3 道次和终止 9~10 道次, 实验宽展模型轧制压力预算精度较高, 相对误差为 0.26%~0.68%; 轧制 4~8 道次, Besse 宽展模型轧制压力预算精度较高, 其相对误差为 0.33%~11.79%, 两模型第 1 道次的相对误差均为 18.00%。

关键词 Q345 钢 宽展模型 轧制压力 中厚板

Effect of Spread Model for Steel Q345 on Predicted Calculated Precision of Medium and Heavy Plate Rolling Load

Xiao Zhiyu¹, Li Lirong², Liu Bing¹ and Liu Xiaoning¹

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

Abstract With established calculated spread model for test medium and heavy plate rolling process, the predicted calculation on rolling load for steel Q345 ($\%C \leq 0.20C, \leq 1.60Mn, \leq 0.55Si$) in each rough rolling pass by 10 passes rolling from 210 mm casting slab to 48 mm plate has been carried out and the effect of test spread model and Besse spread model on medium and heavy plate rolling load is analyzed. Results show that in medium and heavy plate initial 2 and 3 pass and last 9 and 10 pass the predicted precision of rolling load calculated by test spread model is higher, its relative error is 0.26%~0.68%, in 4~8 passes the predicted precision of rolling load calculated by Besse spread model is higher, its relative error is 0.33%~11.79%, and for the two models all the relative error in first pass is 18.00%.

Material Index Steel Q345, Spread Model, Rolling Load, Medium and Heavy Plate

轧后板带宽度是轧制压力预算的过程参量, 要确定轧后板带宽度必须对宽展量进行研究, 但轧制过程金属宽展变形较复杂, 影响因素较多, 而现有的宽展计算模型各自有其适用范围, 所以很难满足实际生产线轧制压力预算精度要求。本文通过实验法对 Q345 钢轧制过程宽展模型进行研究, 并与 Besse 宽展模型进行比对, 通过宽展模型对轧制压力预算精度的影响, 验证其适用性^[1-7]。

量(ΔB_3), 即鼓形宽展。

本文根据宽展的主要影响参数 l'/h , 在实验室模拟 Q345 钢中厚板现场轧制情况, 对各宽展量进行研究, 钢种化学成分及实验设备和参数如表 1 和表 2 所示。

1 Q345 钢中厚板轧制宽展模型研究

1.1 平辊轧制道次宽展模型

1.1.1 实验宽展模型

沿接触面轧件金属质点的流动轨迹, 宽展量由 3 个部分组成:

(1) 轧件与轧辊在接触面的相对滑动所增加的宽展量(ΔB_1), 即滑动宽展;

(2) 轧件侧面金属翻转到接触表面所增加的宽展量(ΔB_2), 即翻平宽展;

(3) 平辊轧制使轧件侧面成鼓形而增加的宽展

表 1 Q345 钢化学成分 /%

Table 1 Chemical composition of steel Q345 /%				
C	Mn	Si	P	S
≤ 0.20	≤ 1.60	≤ 0.55	≤ 0.035	≤ 0.035

表 2 实验设备及工艺参数

Table 2 Parameters of process and experimental equipment

设备	参数
加热炉型号	YLW-3500MA
轧制钢种	Q345
轧制温度/℃	1 010
轧机形式	可逆式单机架二辊轧机
工作辊尺寸/mm	$\Phi 180 \times 200$
工作辊材质	高铬锻钢
最大轧制压力/kN	600
主电机功率/kW	45
主电机最大转速/($r \cdot \min^{-1}$)	25

滑动宽展 (ΔB_1) 与参数 l'/\bar{h} 的关系如图 1(a) 所示, 建立滑动宽展数学模型结构形式为^[11]:

$$\Delta B_1 = a_1 + a_2 \cdot \left(\frac{l'}{\bar{h}}\right) + a_3 \cdot \left(\frac{l'}{\bar{h}}\right)^2 + a_4 \cdot \left(\frac{l'}{\bar{h}}\right)^3 \quad (1)$$

式中: l' - 考虑轧辊弹性压扁轧件与轧辊接触弧长度/mm; \bar{h} - 轧件入辊和出辊厚度的平均值/mm; $a_1 \sim a_4$ - 模型回归系数, 根据实验数据进行回归分析得出 Q345 钢中厚板轧制滑动宽展模型为:

$$\Delta B_1 = 0.078 - 0.682 \times \left(\frac{l'}{\bar{h}}\right) + 8.355 \times \left(\frac{l'}{\bar{h}}\right)^2 - 4.033 \times \left(\frac{l'}{\bar{h}}\right)^3 \quad (2)$$

翻平宽展 (ΔB_2) 和 l'/\bar{h} 的关系如图 1(b) 所示, 按照幂函数关系建立翻平宽展数学模型结构形式为:

$$\Delta B_2 = a_1 \cdot \left(\Delta h \frac{l'}{\bar{h}}\right)^{a_2} + a_3 \quad (3)$$

式中: Δh - 轧制过程道次压下量/mm; $a_1 \sim a_3$ - 模型回归系数, 根据实验数据进行回归分析得出 Q345 钢中厚板轧制翻平宽展模型为:

$$\Delta B_2 = 0.355 \times \left(\Delta h \frac{l'}{\bar{h}}\right)^{1.055} - 0.083 \quad (4)$$

鼓形宽展 (ΔB_3) 与 l'/\bar{h} 的关系如图 1(c) 所示, 按照线性关系建立数学模型结构形式为:

$$\Delta B_3 = a_1 + a_2 \cdot \Delta h + a_3 \cdot \frac{l'}{\bar{h}} \quad (5)$$

式中: $a_1 \sim a_3$ - 模型回归系数, 根据实验数据进行回归分析得出 Q345 钢中厚板轧制鼓形宽展模型为:

$$\Delta B_3 = 0.277 + 0.041 \times \Delta h + 0.396 \times \frac{l'}{\bar{h}} \quad (6)$$

平辊轧制过程, 轧件的总宽展量 (ΔB) 为:

$$\Delta B = \Delta B_1 + \Delta B_2 + \Delta B_3 \quad (7)$$

1.1.2 Besse 宽展模型

Besse 主要研究了平辊轧制道次宽展量与轧前轧件厚度 (H), 轧前轧件宽度 (B), 以及轧辊弹性压扁下接触弧长度 (l') 的关系, 建立了 Besse 宽展计算模型为^[2]:

$$\Delta B = 0.61 \times \left(\frac{H}{B}\right)^{1.27} \cdot \exp\left[-0.38 \times \left(\frac{H}{l'}\right)\right] \quad (8)$$

综上所述, 平辊轧制道次宽展模型结构形式如表 3 所示。

1.2 立-平辊轧制道次宽展模型研究

立-平辊轧制道次宽展计算模型为^[3]:

$$\Delta B_R = B_0 \cdot \left[\left(\frac{H_0}{H_1}\right)^a - 1\right] \quad (9)$$

$$\Delta B_D = b \cdot \Delta B_E \cdot (1 + \Delta B_R / \Delta B_1) \quad (10)$$

$$m = \frac{B_1}{H_0} \quad (11)$$

$$a = \exp\left[-1.64 m^{0.376} \cdot (B_1/l')^{0.016} \cdot \left(\frac{H_0}{R'}\right)^{0.015 m}\right] \quad (12)$$

$$b = \exp\left[-1.877 \cdot (\Delta B_E/B_0)^{0.063} \cdot \left(\frac{H_0}{R_E}\right)^{0.441} \cdot (R_E/B_0)^{0.989} \cdot (B_0/B_1)^{7.591}\right] \quad (13)$$

式中: ΔB_R - 由矩形断面形成的宽展量/mm; ΔB_D - 由狗骨形产生的宽展量/mm; H_0 - 立辊侧压前轧件的厚度/mm; H_1 - 平辊轧制后轧件的厚度/mm; B_0 、 B_1 - 侧压前和侧压后轧件宽度/mm; ΔB_E - 立辊侧压量/mm; R_E - 立辊半径/mm; a 、 b 、 m - 几何参数。

则立-平辊轧制道次, 总宽展 (ΔB) 为:

$$\Delta B = \Delta B_R + \Delta B_D \quad (14)$$

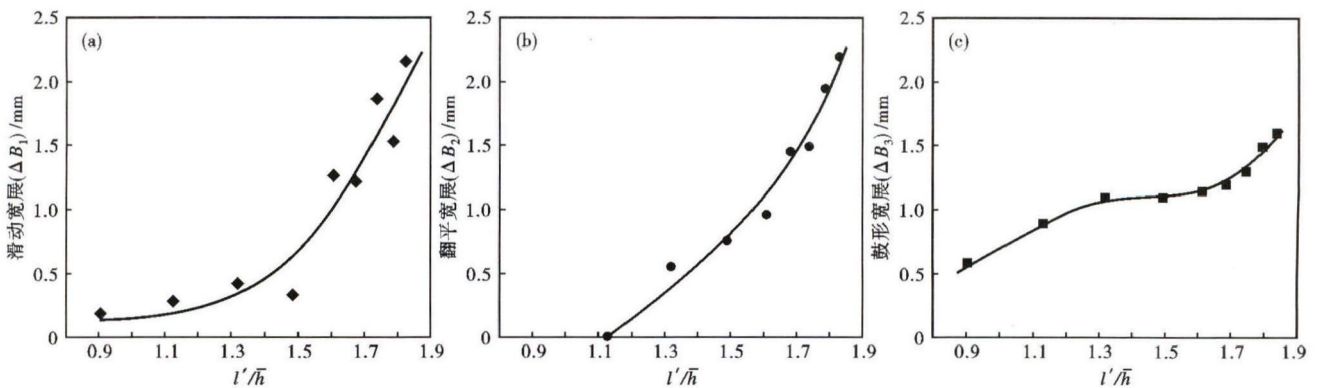


图 1 参数 l'/\bar{h} 对钢板滑动宽展 ΔB_1 (a), 翻平宽展 ΔB_2 (b) 和鼓形宽展 ΔB_3 (c) 的影响

Fig. 1 Effect of Parameter l'/\bar{h} on slide spread ΔB_1 (a), turn over spread ΔB_2 (b) and drum spread ΔB_3 (c) of plate

表3 (a) 实验宽展模型和 (b) Besse 宽展模型
Table 3 Test spread model (a) and Besse spread model (b)

模型	公式
(a) 实验宽展模型	$\Delta B_1 = 0.078 - 0.682 \times \left(\frac{l'}{h}\right) + 8.355 \times \left(\frac{l'}{h}\right)^2 - 4.033 \times \left(\frac{l'}{h}\right)^3$ $\Delta B_2 = 0.355 \times \left(\frac{\Delta h}{h}\right)^{1.055} - 0.083$ $\Delta B_3 = 0.277 + 0.041 \times \Delta h + 0.396 \times \frac{l'}{h}$ $\Delta B = \Delta B_1 + \Delta B_2 + \Delta B_3$
(b) Besse 宽展模型	$\Delta B = 0.61 \times \left(\frac{H}{B}\right)^{1.27} \exp\left[-0.38 \times \left(\frac{H}{l'}\right)\right]$

2 建立 Q345 钢中厚板轧制压力预算模型

2.1 轧制压力模型

目前中厚板轧制过程中,轧制压力的预算模型结构形式为^[4]: $P = F \cdot \bar{p}$ (15)

式中: P - 轧制压力/kN; F - 轧件与轧辊的接触面积/ mm^2 ; \bar{p} - 平均单位压力/MPa。

轧件与轧辊接触面积 F 为: $F = \bar{B} \cdot l'$ (16)

式中: \bar{B} - 轧件平均宽度/mm, $\bar{B} = \frac{B+b}{2}$; B - 轧件入辊宽度/mm; b - 轧件出辊宽度/mm, $b = B + \Delta B$ 。

轧制过程中平均单位压力 \bar{p} 为: $\bar{p} = KQ_p$ (17)

式中: K - 轧件平面变形抗力/MPa, 根据 Mises 能量塑性条件, $K = 1.15 \sigma_s$, σ_s - 轧件变形抗力/MPa; Q_p - 应力状态系数。

经过推导,中厚板轧制压力计算公式为:

$$P = F \cdot \bar{p} = \bar{B} \cdot l' \times 1.15 \sigma_s \cdot Q_p \quad (18)$$

2.2 接触弧长度的确定

轧辊弹性压扁后半径 R' 为^[5]:

$$R' = R \cdot \left(1 + \frac{C_0 P}{B \Delta h}\right) \quad (19)$$

式中: R' - 轧辊弹性压扁后半径/mm; R - 轧辊原始半径/mm; Δh - 轧制过程道次压下量/mm; C_0 - 轧辊压扁系数, $C_0 = \frac{16(1-\xi^2)}{\pi E}$; ξ - 轧辊材料的泊松比, 对于钢质轧辊 $\xi = 0.3$; E - 轧辊材料的弹性模量/MPa, 对于钢质轧辊 $E = 2.1 \times 10^5$ MPa。这样轧辊弹性压扁接触弧长(l')为: $l' = \sqrt{R' \cdot \Delta h}$ (20)

2.3 变形抗力的确定

变形抗力 σ_s 模型为^[6]:

$$\sigma_s = \sigma_0 \cdot \exp\left(a_1 \cdot \frac{T}{1000} + a_2\right) \cdot \left(\frac{u_m}{10}\right)^{(a_3 \cdot \frac{T}{1000} + a_4)} \cdot \left[a_6 \cdot \left(\frac{\varepsilon}{0.4}\right)^{a_5} - (a_6 - 1) \cdot \frac{\varepsilon}{0.4}\right] \quad (21)$$

式中: σ_0 - 基准变形抗力/MPa; T - 绝对变形温度/K, $T = \frac{t+273}{1000}$, t - 轧制温度/°C; u_m - 平均变形速度/ s^{-1} ,

$u_m = \frac{2\nu \sqrt{\Delta h/R}}{H+h}$, h - 轧件出辊厚度/mm; H - 轧件入辊厚度/mm; Δh - 道次压下量/mm, ν - 轧辊平均线速度/($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$), $\nu = \frac{2\pi RN}{60}$, N - 轧辊转速/($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$); ε - 变形程度, $\varepsilon = \ln \frac{H}{h}$; $a_1 \sim a_6$ - 回归系数。

为了适应计算机在线控制的要求,把各钢种的变形抗力按公式(7)的模型结构形式进行非线性回归分析,得到 Q345 钢模型回归系数为:

$$\sigma = 152 \times \exp\left(-2.1362 \times \frac{T}{1000} + 2.7170\right) \times \left(\frac{u_m}{10}\right)^{(0.7191 \times \frac{T}{1000} - 0.7848)} \times \left[1.52 \times \left(\frac{\varepsilon}{0.4}\right)^{0.3616} - 0.3350 \times \frac{\varepsilon}{0.4}\right] \quad (22)$$

2.4 应力状态系数的确定

试验得出: l'/h [$h = (H+h)/2$ 为轧件入辊和出辊厚度的平均值] 和变形程度 ε 是影响应力状态系数的主要参数,轧制应力状态系数 Q_p 的模型为^[7]:

$$Q_p = a_1 + a_2 \cdot \frac{l'}{h} + a_3 \cdot \varepsilon \cdot \frac{l'}{h} + a_4 \cdot \varepsilon \quad (23)$$

式中: $a_1 \sim a_4$ - 回归系数。

通过试验数据对 Q345 钢应力状态系数模型进行回归分析得出:

$$Q_p = 0.8205 + 0.2376 \times \frac{l'}{h} + 0.1006 \times \varepsilon \cdot \frac{l'}{h} - 0.3768 \times \varepsilon \quad (24)$$

3 Q345 钢中厚板轧制压力模拟预算

依据中厚板轧制压力计算模型,平辊轧制道次采用表3中的两种宽展模型分别确定轧后轧件宽

表 4 轧制条件
Table 4 Rolling parameters

轧制	参数
平辊工作辊辊径/mm	1 150
立辊工作辊辊径/mm	1 000
轧件材质	Q345
立辊侧压量/mm	30
转钢侧压量/mm	30

表 5 粗轧轧制规程
Table 5 Parameters of rough rolling process

轧制道次	轧件入辊厚度/mm	轧件出口厚度/mm	道次压下量/mm	道次轧制压力/kN
1	210	194	16	8 590
2	194	176	18	8 530
3(z)	176	155	21	16 670
4	155	135	20	17 130
5	135	117	18	18 380
6	117	100	17	19 230
7	100	84	16	20 240
8	84	70	14	21 410
9	70	58	12	22 500
10	58	48	10	21 900

注：“z”代表转钢，轧制方式由横纵轧转变为纵横轧。

表 6 实验(a)和 Besse(b) 宽展模型各道次轧制压力预算值及相对误差
Table 6 Calculated value and relative error of rolling load in each pass by test (a) and Besse (b) spread model

轧制道次	轧制压力实测值/kN	(a) 实验宽展模型			(b) Besse 宽展模型		
		宽展值/mm	轧制压力预算值/kN	相对误差/%	宽展值/mm	轧制压力预算值/kN	相对误差/%
1	8 590	19.34	7 043.43	18.00	19.34	7 043.43	18.00
2	8 530	35.19	8 489.76	0.43	16.73	8 521.45	0.47
3	16 670	23.91	16 626.82	0.26	23.97	16 345.39	1.95
4	17 130	15.05	19 476.41	13.70	15.29	19 051.06	11.79
5	18 380	13.08	19 993.72	8.78	13.46	19 539.04	6.95
6	19 230	11.41	21 456.53	11.58	12.35	20 951.78	9.68
7	20 240	9.79	22 307.91	10.22	11.46	21 755.46	8.28
8	21 410	8.12	21 741.00	1.55	10.35	21 153.24	0.33
9	22 500	6.64	22 399.15	0.45	9.34	21 727.68	2.39
10	21 900	5.36	22 048.19	0.68	8.28	21 322.85	1.42

度(b),开轧道次及转钢侧压道次采用立-平辊轧制宽展模型确定轧后轧件宽度;对实际轧制规程轧制压力进行预算,并对计算结果进行分析,比较平辊轧制道次两种宽展模型对轧制压力预算精度误差。由于中厚板轧制过程中,板带的宽度控制主要是在粗轧区实现,所以本文只对粗轧区轧制压力进行预算。轧制条件及轧制规程如表 4、5 所示,各道次轧制压力预算值与实测值如表 6 所示。

结合表 6 计算数据进行比对分析:

(1) 采用两种平辊轧制道次宽展模型分别对 Q345 钢中厚板轧制压力进行预算,发现轧制压力预算值与实测值之间存在误差,但预算值与实测值变

化趋势基本一致;发现第 1 道次轧制压力预算误差较大,结合轧制规程分析,由于第 1 轧制道次轧件经立辊侧压后进入平辊轧制,轧件边部增厚产生“狗骨形”,造成宽展变形复杂,致使模型宽展量预算误差较大。

(2) 在后序轧制过程中,两种平辊轧制道次宽展模型对轧制压力预算误差值不同,在第 2、3、9、10 轧制道次,即粗轧区开始轧制道次和终止轧制道次,实验宽展模型轧制压力预算误差值较小;在第 4、5、6、7、8 轧制道次,即粗轧区中间轧制道次, Besse 宽展模型轧制压力预算误差值较小;说明在轧制过程中,可以通过选取不同平辊轧制道次宽展模型来降低轧制压力预算误差值。

4 结论

(1) 中厚板轧制过程中,宽展模型通过影响轧后轧件宽度影响轧制压力预算误差值。

(2) 中厚板轧制过程中,在粗轧开始道次和终

止道次,选用实验宽展模型轧制压力预算误差值较小;粗轧中间轧制道次,选用 Besse 宽展模型轧制压力预算误差值较小。

(3) 中厚板轧制过程中,可以通过选取不同宽展模型来降低轧制压力预算误差值,以提高轧制压力预算精度。

参考文献

- [1] 肖志余,袁小会,刘兵,等.中厚板边部折叠缺陷计算[J].钢铁研究,2013,41(4):9-13.
- [2] 张专利.超低碳钢热轧板宽展模型的研究[D].武汉:武汉科技大学,2008:16-18.
- [3] 程晓茹.轧制过程数学模型[M].北京:冶金工业出版社,2008:180-182.
- [4] 刘玠.带钢热连轧计算机控制[M].北京:机械工业出版社,1997:38-48.
- [5] 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.
- [6] 周纪华.金属塑性变形阻力[M].北京:机械工业出版社,1989:211-229.
- [7] 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.

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和模具设计研究。E-mail:1652070381@qq.com

收稿日期:2016-06-27