

Q345 钢中厚板热矫直变形抗力与弹性模量数学模型的研究

谢 凯¹ 程晓茹¹ 任 勇¹ 詹胜利² 黄大军²

(1 武汉科技大学材料与冶金学院, 武汉 430081; 2 武汉钢铁股份有限公司, 武汉 430083)

摘 要 根据中厚板矫直力的理论公式和 Q345 钢 22~40 mm 板 500~630 ℃ 矫直的生产实测数据, 以变形抗力和弹性模量数学模型中的待定系数为优化变量, 以矫直力计算误差最小为目标函数, 采用单纯形法对待定系数进行优化计算, 建立了 Q345 钢中厚板矫直过程变形抗力和弹性模量数学模型. 得出 Q345 钢中厚板在 500~630 ℃ 矫直过程随温度(T)提高, 变形抗力(σ_s)降低: $\sigma_s = -1\,080.1 + 4.8547T - 0.0048115T^2$; 随温度(T)提高, 弹性模量(E)先增加后减少: $E = (-6.4807 \times 10^5) + 2\,576.5T - 2.3875T^2$. 结果表明, 矫直力的计算值和测量值的相对误差小于 5%.

关键词 Q345 钢 中厚板 热矫直 变形抗力 弹性模量

A Study on Math Models for Hot Straightening Deformation Resistance and Elastic Modulus of Steel Q345 Medium and Heavy Plate

Xie Kai¹, Cheng Xiaoru¹, Ren Yong¹, Zhan Shengli² and Huang Dajun²

(1 College of Material Science and Metallurgical Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081; 2 Wuhan Iron and Steel Co Ltd, Wuhan 430083)

Abstract Based on theoretical formulae for medium and heavy plate straightening force and measured data in production of steel Q345 22~40 mm plate straightening at 500~630 ℃, taking undetermined coefficients in math models of deformation force and elastic modulus as optimized variables, minimum error of straightening force calculation as objective function, the math models of deformation resistance and elastic modulus of steel Q345 medium and heavy plate during straightening process is established by using simplex algorithm to optimized calculate the undetermined coefficients. It is obtained that in straightening process of steel Q345 medium and heavy plate at 500~630 ℃, with increasing temperature (T) the deformation resistance (σ_s) decreases: $\sigma_s = -1\,080.1 + 4.8547T - 0.0048115T^2$; and with increasing temperature (T) the elastic modulus (E) increases earlier and decreases later: $E = (-6.4807 \times 10^5) + 2\,576.5T - 2.3875T^2$. Results show that the relative error between calculated and measured value is less than 5%.

Material Index Steel Q345, Medium and Heavy Plate, Hot Straightening, Deformation Resistance, Elastic Modulus

中厚板热矫直机是布置在控冷之后, 保证板材平直精度、消除残余应力的重要设备. 近年来, 随着中厚板宽度的增加, 客户对平直度精度要求的提高以及在中厚板生产线上广泛采用 TMCP (Thermo-Mechanical Control Process- 控制轧制) 工艺后, 进入热矫直机前的钢板温度低、屈服强度高、冷却不均而导致板材产生板形不良等问题, 要求矫直设备强度大、刚度大、具有完善精确的矫直压下模型. 本文根据大量生产实测的 Q345 钢矫直力和辊缝数据, 运用矫直力学原理, 采用最优化方法建立变形抗力和弹性模量数学模型^[1,2], 其化学成分如表 1 所示.

变形抗力和弹性模量数学模型是矫直力数学模型的子模型, 采用最优化方法建立变形抗力和弹性模量数学模型, 将优化的目标确定为理论计算矫直力与实际测量矫直力的误差最小, 使优化计算过程

表 1 Q345 钢的化学成分 / %

Table 1 Chemical composition of steel Q345 / %

C	Si	Mn	P	S
0.12~0.20	0.20~0.60	1.20~1.60	≤0.030	≤0.030

通过修正矫直力理论计算公式中变形抗力和弹性模量子模型的待定系数, 最终达到理论计算矫直力与实际测量矫直力逼近的目的^[3].

1 变形抗力和弹性模量数学模型的建立

1.1 优化计算的目标函数

优化计算的目标是使矫直力的理论计算值与实际测量值的误差最小, 优化计算过程是通过修正矫直力理论计算公式中变形抗力和弹性模量子模型的待定系数 (优化设计变量 $a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3$), 使理论计算矫直力与实际测量矫直力逼近. 所以设计优

化目标函数为^[4]:

$$F = \min \sum_{i=1}^m (P_{\Sigma} - \sum_{i=1}^n P_i)^2 = \min \sum_{i=1}^m [P_{\Sigma} - \sum_{i=1}^n P_i(a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3)]^2 \quad (1)$$

式中: P_{Σ} - 实测矫直力的合力/ Pa; P_i - 理论计算的第 i 辊的矫直力/ Pa; m - 实测数据组数; n - 矫直辊数。

1.2 变形抗力和弹性模量与变形温度、变形速率和变形程度的关系

变形温度、变形速率和变形程度对变形抗力均有不同程度的影响,且它们之间还存在着复杂的相互作用。但在中厚板矫直过程中,由于变形程度很小和变形速率变化很小,因此可以忽略变形程度和变形速率对变形抗力的影响,而将变形抗力作为矫直温度的函数。选取数学模型的结构为^[5]:

$$\sigma_s = a_1 + a_2 T + a_3 T^2 \quad (2)$$

式中: a_1 、 a_2 、 a_3 - 变形抗力待定系数; T - 温度/°C。

金属的弹性模量也是随温度而变化的,一般采用下列数学模型结构^[5]:

$$E = b_1 + b_2 T + b_3 T^2 \quad (3)$$

式中: b_1 、 b_2 、 b_3 - 弹性模量待定系数。

1.3 变形抗力和弹性模量与矫直力的关系

根据矫直力学原理,对于辊式中厚板矫直机,在

已知压下量和钢板变形抗力及弹性模量的条件下,理论计算各矫直辊矫直力的过程为先计算出反弯曲率、弹复曲率、残余曲率、弹性层厚度和弹塑性弯曲力矩,最后计算矫直力。其中弹复曲率、弹性层厚度、弹塑性弯曲力矩的计算需要用到钢板的变形抗力和弹性模量,计算公式为^[6]:

(1) 弹复曲率:

$$\frac{1}{\rho_s} = \frac{\sigma_s S}{EI} \left[1 - \frac{1}{3} \left(\frac{2\sigma_s}{hE} \cdot \frac{1}{\frac{1}{r_0} + \frac{1}{\rho_w}} \right)^2 \right] \quad (4)$$

式中: σ_s - 变形抗力/MPa; E - 弹性模量/MPa; S - 矩形断面的塑性断面系数; I - 对矩形断面的轧制惯性矩; h - 钢板厚度/mm; r_0 - 原始曲率半径/mm; $\frac{1}{\rho_w}$ - 反弯曲率/mm⁻¹。

(2) 弹性层厚度:

$$z_s = \frac{\sigma_t}{E} \cdot \frac{1}{\frac{1}{r_0} + \frac{1}{\rho_w}} \quad (5)$$

式中: σ_t - 弹性极限/MPa。

(3) 弹塑性弯曲力矩:

$$M = \frac{\sigma_s b h^2}{6} \left(\frac{3}{2} - \frac{2z_s}{h} \right) \quad (6)$$

式中: b - 钢板宽度/mm。

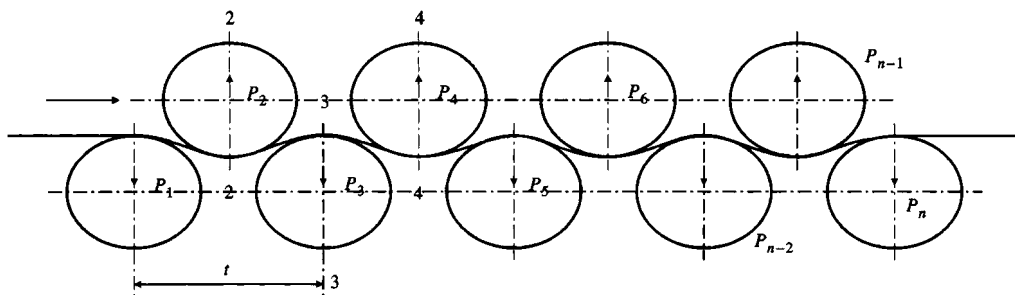


图1 作用在矫直辊上压力的示意图

Fig.1 Schematics of pressure acting on straightening roller

钢板矫直过程中矫直辊的受力如图1所示。各矫直辊的矫直力是根据钢板各断面的弯曲力矩求得的^[5]:

$$P_1 = \frac{2}{t} M_2$$

$$P_2 = \frac{2}{t} (2M_2 + M_3)$$

$$P_3 = \frac{2}{t} (M_2 + 2M_3 + M_4)$$

.....

$$P_i = \frac{2}{t} (M_{i-1} + 2M_i + M_{i+1}) \quad (7)$$

.....

式中: M_i - 第 i 个辊的弹塑性弯曲力矩。

2 优化计算及结果

采用20组Q345钢实测矫直辊缝、温度、矫直力数据,对上述目标函数进行优化计算。实测数据如表2所示。实测数据的钢板开轧温度1150~1100°C,终轧温度900~850°C,厚度变化范围为

表 2 Q345 钢中厚板热矫直实测数据

Table 2 Measured data of hot straightening of steel Q345 medium and heavy plate

序号	温度/ ℃	矫直力/ kN	前辊缝/ mm	后辊缝/ mm	板厚/ mm	长度/ mm	宽度/ mm
1	554.7	1 766.8	21	22	22	108 600	2 000
2	550.3	1 720.8	21	22	22	108 600	2 000
3	551.0	1 716.0	21	22	22	108 600	2 000
4	564.8	1 635.6	21	22	22	108 600	2 000
5	550.0	1 700.0	21	22	22	108 600	2 000
6	519.2	2 596.0	22	24	24	137 200	2 080
7	500.7	2 596.0	22	24	24	137 200	2 080
8	518.4	2 598.4	22	24	24	137 200	2 080
9	517.0	2 604.0	22	24	24	137 200	2 080
10	534.8	2 580.0	22	24	24	118 600	2 080
11	522.9	2 676.0	22	24	24	137 200	2 080
12	514.0	2 696.0	22	24	24	108 600	2 080
13	553.0	3 150.4	24	25	25	12 300	2 430
14	551.0	2 660.8	24	25	25	12 300	2 430
15	505.0	1 701.6	24	25	25	137 200	1 630
16	611.0	2 688.0	39.4	40	40	68 600	2 000
17	608.0	2 748.0	39.4	40	40	68 600	2 000
18	629.1	2 624.0	39.4	40	40	68 600	2 000
19	627.0	3 200.0	39.3	40	40	68 600	2 000
20	619.7	3 772.0	39.0	40	40	68 600	2 000

表 3 Q345 钢中厚板矫直力理论计算值与实际测量值的比较

Table 3 Comparison between theory-calculated value and real measured value of straightening force of steel Q345 medium and heavy plate

序号	矫直力实测值/ MPa	矫直力计算值/ MPa	相对误差/ %
1	3.53	3.53	0.23
2	3.44	3.56	-3.51
3	3.43	3.56	-3.64
4	3.27	3.42	-4.41
5	3.40	3.56	-4.84
6	5.19	5.26	-1.35
7	5.19	5.24	-0.91
8	5.20	5.26	-1.29
9	5.21	5.27	-1.13
10	5.16	5.17	-0.24
11	5.35	5.25	1.91
12	5.39	5.27	2.26
13	6.26	5.51	12.02
14	5.28	5.53	-4.75
15	3.40	3.43	-0.65
16	5.38	5.60	-4.18
17	5.50	5.38	2.15
18	5.25	5.15	1.79
19	6.40	6.24	2.43
20	7.54	7.73	-2.44

20 ~ 40 mm, 矫直温度变化范围为 500 ~ 630 ℃。

优化方法选用单纯形法改进算法^[7]: 在单纯形改进算法的基础上, 对步长作适当修改得到的寻优方法, 通过计算单纯形法各顶点的目标函数值并加以比较, 从中确定有利的搜索方向和步长, 找到一个较好的点取代单纯形法中较差的点, 组成新的单纯形法来代替原来的单纯形法, 使单纯形法不断向目

标函数的极小点靠近, 直到搜索到极小点为止^[8]。

优化计算结果如下: $a_1 = -1 080.1$, $a_2 = 4.854 7$, $a_3 = -0.004 811 5$; $b_1 = -6.480 7 \times 10^5$, $b_2 = 2 576.5$, $b_3 = -2.387 5$ 。

得到变形抗力和弹性模量的数学模型如下:

$$\sigma_s = -1 080.1 + 4.854 7 T - 0.004 811 5 T^2$$

$$E = (-6.480 7 \times 10^5) + 2 576.5 T - 2.387 5 T^2$$

3 矫直力理论计算值与实际测量值的对比

根据建立的变形抗力和弹性模量模型, 按照实际矫直工艺, 计算出矫直力, 将理论计算的矫直力与实际测量的矫直力进行比较, 结果见表 3。

除第 13 组数据误差百分数大于 10% 以外, 其余的误差百分数都小于 5%, 因此, 建立的模型精度较高, 可用于实际矫直工艺计算。

4 结论

(1) 根据中厚板矫直力学原理和实测生产数据, 采用单纯形法优化方法, 建立的 Q345 中厚板热矫直过程变形抗力和弹性模量数学模型精度较高。

(2) Q345 钢中厚板 500 ~ 630 ℃ 热矫直过程变形抗力随温度增大而减少, 变形抗力随温度的变化规律为:

$$\sigma_s = -1 080.1 + 4.854 7 T - 0.004 811 5 T^2$$

(3) Q345 钢中厚板 500 ~ 630 ℃ 热矫直过程弹性模量随温度增大先增加后减少, 弹性模量随温度的变化规律为:

$$E = (-6.480 7 \times 10^5) + 2 576.5 T - 2.387 5 T^2$$

参考文献

- 1 黄庆学, 秦建平. 轧钢生产实用技术. 北京: 冶金工业出版社, 2004
- 2 刘欢培, 黄建华. 改进单纯形法寻优的 MATLAB 实现. 浙江工业大学学报, 2003, 31(4): 377
- 3 飞思科技产品研发中心. MATLAB6.5 辅助优化计算与设计. 北京: 电子工业出版社, 2003
- 4 崔 甫, 施东成. 矫直机压弯量算法探讨. 冶金设备, 1999(1): 1
- 5 黄华清. 轧钢机械. 北京: 冶金工业出版社, 1980
- 6 崔 甫. 矫直原理. 北京: 冶金工业出版社, 2005
- 7 付文祖. 板带矫直机辊缝的确定. 重型机械, 1979(6): 26
- 8 徐义波, 王效岗, 凡 明, 等. Q345D 钢高温力学性能试验研究. 机械工程及其自动化, 2009(5): 84

谢 凯(1985-), 男, 硕士, 2008 年武汉科技大学毕业, 材料加工工程研究。

收稿日期: 2011-01-19