

Q345B 低温变形抗力模型及在矫直工艺中的应用

王振国¹ 任勇¹ 程晓茹¹ 詹胜利² 黄大军²

(1 武汉科技大学材料科学与冶金工程学院, 武汉 430081; 2 武汉钢铁股份有限公司, 武汉 430083)

摘要 通过 Gleeble-1500 热模拟试验机对低合金钢 Q345B $\Phi 10$ mm \times 30 mm 圆柱体试样在 450 ~ 650 °C 以 0.001 ~ 0.1 s⁻¹ 变形速率进行真应变为 0.15 拉伸试验。结果表明, 低温低变形速率状态下的变形抗力处于弹塑性变形区, 线性段较长, 当变形量大于 0.06 以后出现较明显塑性变形, 变形抗力的变化规律与较高温状态基本类似。通过采集实验数据, 应用 Origin 软件通过多元非线性回归建立了 Q345B 钢变形抗力的数学模型。应用该模型结合矫直理论公式计算了中厚板 9 辊矫直机矫直力, 计算结果的相对误差为 0.01% ~ 6.71%。

关键词 热模拟 低温变形抗力 数学模型 矫直力

Math Model for Deformation Resistance of Steel Q345B at Low Temperature and Its Application in Straightening Process

Wang Zhenguo¹, Ren Yong¹, Cheng Xiaoru¹, Zhan Shengli² and Huang Dajun²

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

Abstract The hot tensile test of $\Phi 10$ mm \times 30 mm cylinder specimen of low alloy steel Q345B with true strain 0.15 and strain rate 0.001 ~ 0.1 s⁻¹ at 450 ~ 650 °C has been carried out by Gleeble-1500 thermal test machine. Results show that with low strain rate at lower temperature the deformation resistance is at elastic-plastic deformation stage and its linear section is longer, and as deformation is larger than 0.06, the apparent plastic deformation of steel occurs and the change rule of deformation resistance is basically similar to that at higher temperature. Based on test data the math model for deformation resistance of steel Q345B is established by using Origin software with multivariate nonlinear regression. The straightening force of 9 rolls straightener for medium and heavy plate is calculated by using this model combined with straightening theoretical equation, the relative error of calculated results are 0.01% ~ 6.17%.

Material Index Hot Simulation, Low Temperature Deformation Resistance, Math Model, Straightening Force

中厚板轧制中, 由于轧件上下表面存在着温度差, 精轧阶段负荷分配不合理, 轧钢机控制精度差, 轧后控制冷却不当等原因, 都可能造成钢板轧后的板形缺陷, 这种情况特别是进行 TMCP 工艺的钢种尤为突出, 为了保证钢板的平直度符合产品规定, 对热轧后的钢板必须进行矫直。中厚板矫直过程的变形抗力与轧制过程有较大差别, 矫直温度一般在 400 ~ 700 °C 的变化范围, 矫直变形程度和变形速度均较低, 在此工艺参数范围内的金属变形抗力研究较少^[1], 而变形抗力是计算矫直力的重要因素, 因而必然影响到矫直工艺的精确设定^[2]。本文利用 Gleeble-1500 热模拟试验机^[3], 根据中厚板矫直工艺所规定的参数范围进行了 Q345B 在低温状态下的拉伸热模拟试验, 建立了变形抗力数学模型并根

据所建立的模型进行了矫直力的计算与应用研究。

1 实验过程

实验材料取自中厚板轧制并经层流冷却后的钢板, 试样化学成分如表 1 所示, 试样加工成 $\Phi 10$ mm \times 30 mm 的拉伸试样, 然后在 Gleeble-1500 热模拟试验机进行拉伸试验。考虑到矫直温度和变形范围, 以 10 °C/s 的加热速度将试样加热到变形温度, 保温 5 min 后开始变形。变形温度为 450 ~ 650 °C, 每 50 °C 为一个间隔, 应变速率范围分别为 0.001、0.03、0.1 s⁻¹, 真应变为 0.15。

2 实验结果分析

2.1 变形温度和变形速率对变形抗力的影响

由图 1 可见, 在变形量一定, 不同变形速率的情

表 1 Q345B 钢的化学成分 / %

Table 1 Chemical composition of steel Q345B / %

C	Si	Mn	P	S	Cu	Al	Als	Ni	Cr	Ti	Mo	V	Nb	Ca	B
0.15	0.33	1.35	0.021	0.024	0.04	0.02	0.018	0.01	0.02	0.007	0.003	0.005	0.004	0.000 2	0.000 1

况下,变形抗力随温度的升高而减小,这是由于温度的升高,降低了金属原子间的结合力,并且发生回复,可减轻由于塑性变形产生的加工硬化,使得变形阻力降低。虽然在该低温区,变形速率较小,但变形抗力仍随着变形速率的增加而增加,如图 2 所示。因变形速率的增加会使位错移动速度增加,从而阻碍滑移的进行,变形抗力增加。另外,应变速率增加,缩短了软化过程的时间,使其来不及充分进行,因而加剧加工硬化,使变形抗力增加^[4]。

由图 1 还可看出,当温度由 650 ℃ 下降到 550 ℃ 时,变形抗力呈线性增加较快,但当下降到 550~450 ℃ 的低温区后,变形抗力值变化不大。出现这种情况是由于变形温度处于蓝脆区,碳氮原子的扩散速度接近变形作用下位错的运动速度,碳氮原子更有利在位错周围动态偏聚,形成柯氏气团,对位错产生较强的粘附、钉扎和束缚作用,从而造成位错阻力明显增加^[5]。

2.2 变形量对变形抗力的影响

随变形量的增加,Q345B 钢的变形抗力逐渐增大,如图 3 所示。变形量较小时,变形抗力增加比较显著,当变形量较高时,随着变形量的增加,变形抗力的增加变得缓慢。因随着塑性变形的进行,位错

密度不断增加,因此位错在运动时的相互交割加剧,产生固定割阶、位错缠结等障碍,使位错运动的阻力增加,引起变形抗力的增加。

同时塑性变形过程中,金属内部产生大量的位错和空位,引起点阵畸变,会阻碍滑移的进行^[6]。畸

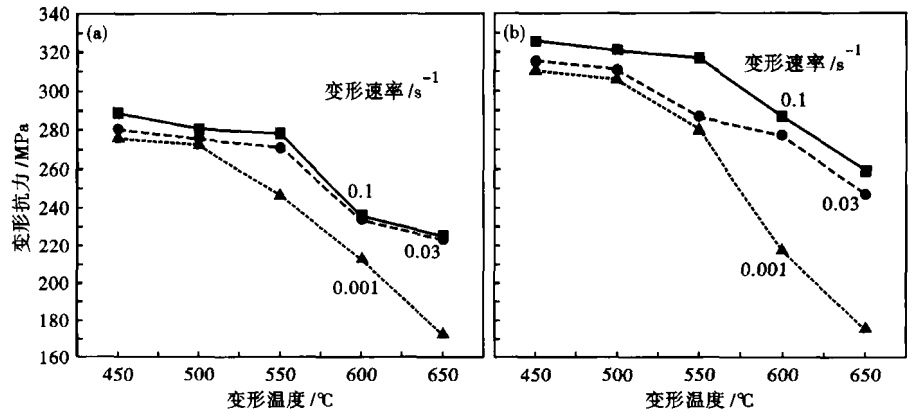


图 1 温度对 Q345B 钢变形抗力的影响,变形量- (a)0.06; (b)0.08
Fig. 1 Effect of temperature on deformation resistance of steel Q345B, deformation- (a) 0.06; (b) 0.08

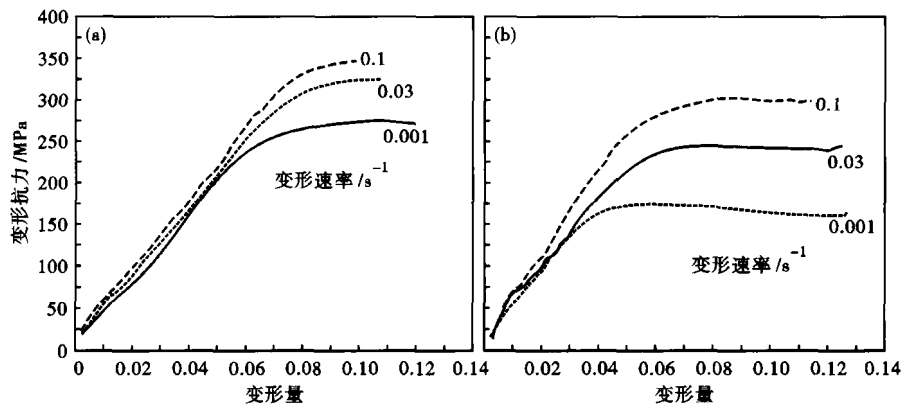


图 2 变形速率对 Q345B 钢变形抗力的影响:(a)550 ℃;(b)650 ℃
Fig. 2 Effect of strain rate on deformation resistance of steel Q345B: (a) 550 ℃; (b) 650 ℃

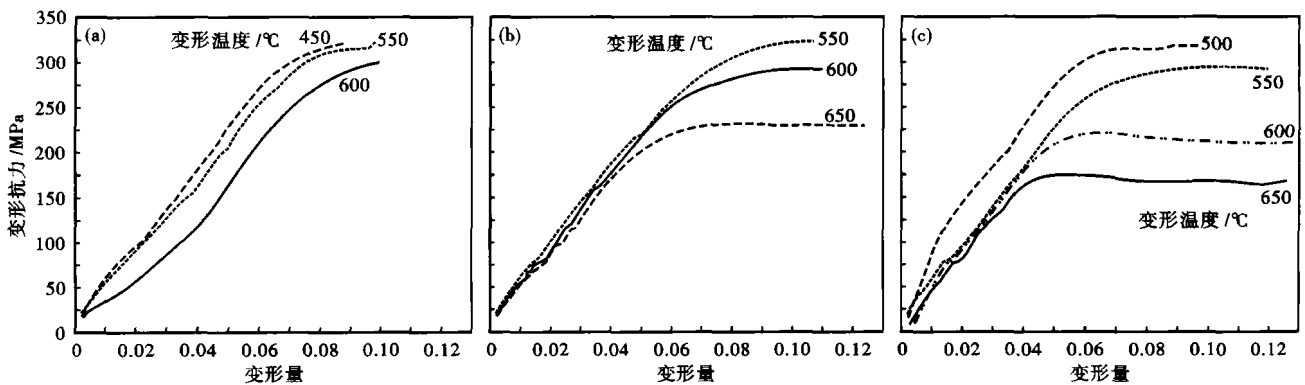


图 3 变形量对 Q345B 钢变形抗力的影响:变形速率/s⁻¹ (a)0.1; (b)0.03; (c)0.001
Fig. 3 Effect of deformation on deformation resistance of steel Q345B, strain rate /s⁻¹ (a) 0.1; (b) 0.03; (c) 0.001

变越严重,塑性变形越难进行,呈现变形抗力越大。随着变形量的增大,晶格的畸变增大,滑移带将产生严重的弯曲。在滑移带中,晶体将碎化为微晶块,同时产生裂纹,这就进一步使金属的变形阻力增大塑性降低。

2.3 变形抗力数学模型

金属变形抗力主要因素是变形温度、变形量、变形速率^[7],据此选取 Q345B 钢的变形抗力数学模型结构如式(1)。

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

式中: $T = \frac{t + 273}{1000}$; σ_0 - 基准变形抗力,即 $t = 1000\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $\varepsilon = 0.4$ 和 $\dot{\varepsilon} = 10\text{ s}^{-1}$ 时的变形抗力/MPa; t - 变形温度/ $^\circ\text{C}$; $\dot{\varepsilon}$ - 变形速率/ s^{-1} ; ε - 变形量(对数应变); $a_1 \sim a_6$ - 回归系数,其值取决于钢种。

根据热模拟试验所确定的自变量观测值和公式

表 2 低碳低合金钢 Q345B 变形抗力数学模型的回归系数
Table 2 Regression coefficient of math model for deformation resistance of low carbon and low alloy steel Q345B

σ_0/MPa	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
18.356 62	2.208 23	1.641 7	0.455 91	-0.391 85	0.983 54	44.664 48

(1),用 Origin 软件进行多元非线性回归,得到模型的回归系数如表 2 所示。

由此得到变形抗力数学模型为:

$$\sigma_s = 18.356\ 62 \exp(2.208\ 23 T + 1.641\ 7) \times \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{10}\right)^{(0.455\ 91 T - 0.391\ 85)} \times \left[44.664\ 48 \left(\frac{\varepsilon}{10}\right)^{0.983\ 54} - (44.664\ 48 - 1) \frac{\varepsilon}{0.4} \right]$$

该模型的相关系数为 0.963 5,曲线拟合程度较好,误差在 5% 以内。用回归的数据与实测数据进行比较检验,可以看出模拟值与实验值吻合的较好(图 4)。

2.4 中厚板矫直力计算

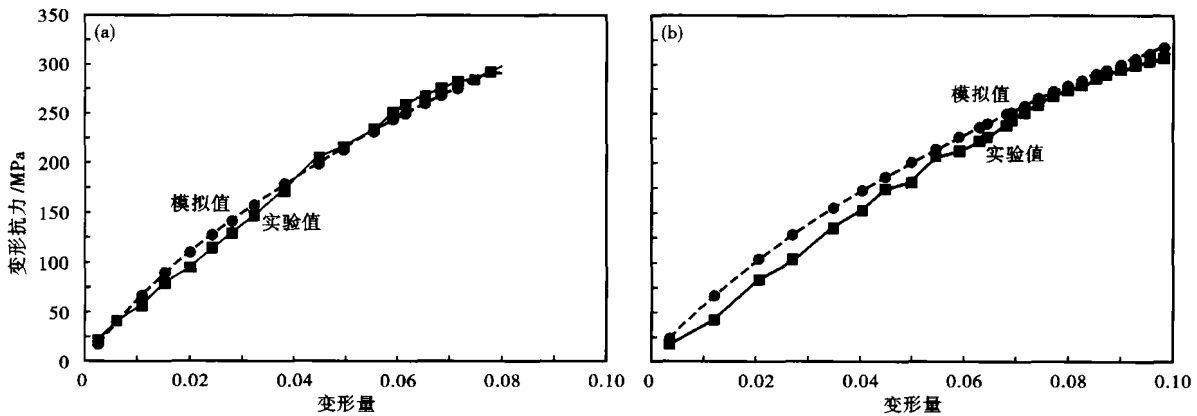


图 4 Q345B 钢变形抗力模拟值与实验值之比较:(a)550 °C,0.001 s⁻¹;(b)600 °C,0.1 s⁻¹

Fig. 4 Comparison between simulated value and measured value of deformation resistance of steel Q345B: (a) 550 °C; 0.001 s⁻¹; (b) 600 °C, 0.1 s⁻¹

根据矫直力学原理,对于辊式中厚板矫直机^[8],在已知压下量和弹性模量,并应用上述回归得到的变形抗力模型,可计算出矫直机矫直力。分别求得弹复曲率 $\frac{1}{\rho_s}$ 、弹性层厚度 z_s 和弹塑性弯曲力矩 M_i ,最后计算出各矫直辊矫直压力 P_i ,如式(2)~(5)。

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

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} 。

$$z_s = \varepsilon_i \cdot \rho_\Sigma = \frac{\varepsilon_i}{\frac{1}{r_0} + \frac{1}{\rho_w}} = \frac{\sigma_i/E}{\frac{1}{r_0} + \frac{1}{\rho_w}} \quad (3)$$

式中: σ_i - 弹性极限/MPa; ε_i - 最大弹性应变。

$$M_i = \frac{\sigma_s b h^2}{6} \left(\frac{3}{2} - \frac{2z_s}{h^2} \right) \quad (4)$$

式中: b - 钢板宽度/mm; $i = 1 \sim 9$ 。

$$P_1 = \frac{2}{t}M_2; P_2 = \frac{2}{t}(2M_2 + M_3);$$

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

$$P_4 = \frac{2}{t}(M_3 + 2M_4 + M_5);$$

.....

$$P_i = \frac{2}{t}(M_{i-1} + 2M_i + M_{i+1}) \quad (5)$$

钢板在矫直过程中矫直辊的受力如图 5 所示。矫直力是根据各矫直辊压力 P_i 之和求得的^[9]。

通过 Q345B 低温变形抗力回归模型所求得的

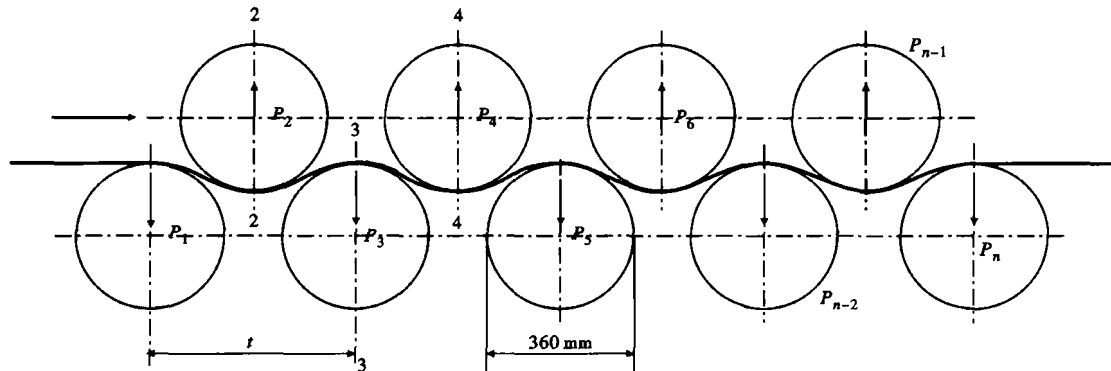


图 5 作用在矫直辊上的压力

Fig. 5 Schematics of pressure acting on straightening roller

矫直力值和生产线实测值进行比较检验, 得出模型计算值和实测值吻合较好, 误差范围在 0.01% ~ 6.71% (表 3), 因此计算过程中应用的变形抗力模型精度较高, 可用于实际矫直工艺计算。

表 3 矫直力计算值与实测值对比

Table 3 Comparison between calculated value and measured value of straightening force

温度/ ℃	前辊 缝/ mm	后辊 缝/ mm	板厚/ mm	通过变形抗 力模型计算 的矫直力/ kN	实测矫 直力/ kN	误差/ %
554.7	21	22	22	3 600.44	3 533.6	1.891 5
550.3	21	22	22	3 624.19	3 441.6	5.305
551	21	22	22	3 620.35	3 432	5.488
564.8	21	22	22	3 490.68	3 271.2	6.71
550	21	22	22	3 625.74	3 400	6.64
519.2	22	24	24	5 286.8	5 192	1.826
500.7	22	24	24	5 273.2	5 192	1.564
518.4	22	24	24	5 287.1	5 196.8	1.738
517	22	24	24	5 286.9	5 208	1.515
534.8	22	24	24	5 263.9	5 160	2.014
522.9	22	24	24	5 285.2	5 352	1.248
514	22	24	24	5 286.3	5 392	1.96
611	39.4	40	40	5 522.5	5 376	2.725
608	39.4	40	40	5 524.8	5 496	0.052
629.1	39.4	40	40	5 547.4	5 248	5.705
627	39.4	40	40	6 399.3	6 400	0.011
619.7	39	40	40	8 466.6	8 344	1.146

3 结论

(1) 低温低变形速率状态下的变形抗力处于弹

塑性变形区, 线性段较长, 当变形量大于 0.06 以后出现较明显塑性变形, 变形抗力的变化规律与较高温状态基本类似。

(2) 建立的 Q345B 钢变形抗力数学模型的拟合值与实测值之间具有良好的拟合程度, 拟合精度高。

(3) 应用该模型结合矫直理论公式计算了中厚板 9 辊矫直机矫直力, 计算结果与现场实测数据基本吻合, 误差范围在 0.01% ~ 6.71%。

参考文献

- Hatta N, Kokado J I, Kikuchi S. Modeling on Flow Stress of Plain Carbon Steel at Elevated Temperatures. *Steel Research*, 1985, 56(11): 575
- 梁皖伦, 方金凤, 曹 军. 热模拟试验在金属热变形研究中的应用. *理化检验(物理分册)*, 2001, 37(11): 470
- Bai B Z, Sun X J, Yang L Y. Application of Gleeble 1500 on Superplasticity. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2000, 13(2): 514
- 赵志业. 金属塑性加工力学. 北京: 冶金工业出版社, 2003
- 张质良. 温塑性成形技术. 上海: 上海科学技术文献出版社, 1986
- 崔忠圻, 覃耀春. 金属学与热处理. 北京: 机械工业出版社, 2007
- 周纪华, 管克智. 金属塑性变形阻力. 北京: 冶金工业出版社, 1989
- 陈健就, 许 超. 现代宽厚板矫直机. *宝钢技术*, 1999(4): 10
- 崔 甫. 矫直原理. 北京: 冶金工业出版社, 2005

王振国(1987-), 男, 硕士研究生, 2008 年湖南工程学院毕业, 轧制过程冶金学和轧材产品开发。

收稿日期: 2011-09-25