

0.47C-0.36Si-0.67Mn 钢连铸板坯低温轧制过程变形抗力模型

梁精龙^{1,2} 冯运莉² 郭晓霞² 苍大强¹

(1 北京科技大学冶金与生态学院, 北京 100083; 2 河北联合大学冶金与能源学院
河北省现代冶金技术重点实验室, 唐山 063009)

摘要 用 Gleeble-3500 热模拟试验机对 0.47C-0.36Si-0.67Mn 中碳钢 150 mm 连铸板坯在 650~920 ℃、变形量 0.1~0.6、变形速率 10~20 s⁻¹ 单道次轴向压缩时的变形抗力进行试验和研究, 并建立了实验钢在低温下的变形抗力数学模型。结果表明, 随温度降低, 变形速率和变形量增加, 试验钢变形抗力增加; 在 700 ℃ 以下变形时, 由于发生动态铁素体相变, 当加工硬化同动态相变软化达到平衡时曲线出现变形抗力极值, 而后随形变诱导铁素体量的增加, 变形抗力下降。预报值与实测值相符, 变形抗力的预报精度为 ±13.76 MPa。

关键词 0.47C-0.36Si-0.67Mn 中碳钢 连铸板坯 热模拟 低温轧制 变形抗力 数学模型

A Deformation Resistance Model for Casting Slab of 0.47C-0.36Si-0.67Mn Medium Carbon Steel in Low Temperature Rolling Process

Liang Jinglong^{1,2}, Feng Yunli², Guo Xiaoxia² and Cang Daqiang¹

(1 School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083; 2 Hebei Key Laboratory of Modern Metallurgy Technology, College of Metallurgy and Energy, Hebei United University, Tangshan 063009)

Abstract By using Gleeble-3500 thermal mechanical simulator, deformation resistance of 150 mm casting slab of 0.47C-0.36Si-0.67Mn medium carbon steel with strain 0.1~0.6 and strain rate 10~20 s⁻¹ at 650~920 ℃ in single pass axial compression process is tested and studied, and a math model for deformation resistance of test steel at lower temperature is established. Results show that with decreasing temperature, increasing strain and strain rate, the deformation resistance of test steel increases; in deformation at less than 700 ℃, due to occurrence of dynamic ferrite phase transformation, as work-hardening and dynamic phase transformation softening are going to balance the maximum value of deformation resistance occurs on curves, later with increasing deformation-induced ferrite amount the deformation resistance decreases. The calculated value conforms to measured value, the error of forecasting deformation resistance value is ±13.76 MPa.

Material Index 0.47C-0.36Si-0.67Mn Medium Carbon Steel, Casting Slab, Thermal Simulation, Low Temperature Rolling, Deformation Resistance, Mathematical Model

金属材料的变形抗力和塑性加工性能不仅仅取决于材料的化学成分和微观组织, 变形温度、变形速率、变形量、应力状态和环境介质等外在因素对材料的力学性能也有着十分重要的影响, 其中变形温度、变形速率、变形量对金属材料的变形抗力的影响最为明显^[1]。低温轧制不仅可以细化晶粒, 改善钢的组织性能, 使中碳钢碳化物在变形过程中球化; 同时还可以起到节能降耗的作用^[2,7]。本文通过热模拟实验的方法, 测定不同变形温度、变形量和变形速率下的变形抗力, 通过多元线性回归分析, 得出了实验钢的金属塑性变形抗力数学模型, 以便为准确确定轧机负荷和制定合理的轧制工艺规程提供理论依据。

1 实验材料及方案

实验材料为钢厂生产的 150 mm 厚板坯, 其化

学成分(%)为: 0.47C、0.67Mn、0.36Si、0.018S、0.022P。热模拟试样尺寸为 Φ10 mm × 15 mm。

在 Gleeble-3500 热模拟试验机上测定实验用中碳钢的真应力真应变曲线。将试样以 10 ℃/s 加热速度加热到 950 ℃ 保温 5 min, 再以 20 ℃/s 的冷却速度分别冷却到 920~650 ℃ 进行单道次轴向压缩, 变形量为 60%, 变形速率分别为 10、20 s⁻¹。

2 实验结果及讨论

2.1 变形温度对变形抗力的影响

从图 1 可以看出, 随着变形温度的升高, 变形抗力从整体看均降低, 而且温度对变形抗力的影响最为强烈。变形温度对变形抗力的影响体现在以下几个方面^[8]: (1) 变形温度的升高加大了动态回复与

动态再结晶的软化作用。(2)随着变形温度的升高,原子的动能增大,导致原子间的结合力减弱,降低变形抗力;(3)温度的升高,原子动能的增大导致新的滑移系的出现,使塑性变形在较低的应力下就能发生。

2.2 变形量对变形抗力的影响

从图 2 可以看出,在变形温度为 920 °C 的条件下,变形量达到 0.4 时变形抗力出现极大值,说明金属变形强化达到极限。如变形量再增加变形抗力反而呈下降趋势,表明高温奥氏体发生动态回复和动态再结晶产生的软化效果大于变形产生的强化效果。当在 830 °C 到 750 °C 区间变形时,在部分高畸变区有少量形变诱导铁素体析出,因为铁素体较奥氏体相软,其软化效果与加工硬化效果基本相当,曲线趋于一稳定值。在 700 °C 以下变形时,由于变形过程中会发生动态铁素体相变,当加工硬化同动态相变软化达到平衡时曲线出现极值,之后随着动态相变的进行,即形变诱导铁素体量的增加,变形抗力开始下降。

2.3 变形速率对变形抗力的影响

由于实验用中碳钢是对变形速率非常敏感的一种钢种,从图 1 和图 2 可以看出,当变形温度和变形量一定时,变形速率增加,变形抗力增大。这是因为金属在塑性变形过程中,在晶体内部产生相互矛盾的两个过程,即强化和强化消除,在同一变形量下(即强化程度一定),由于变形速率较高,强化消除的时间就会减少,从而强化消除就没有占主导地位,因而变形抗力也就越大^[9]。

3 金属塑性变形抗力的数学模型

建立数学模型遵循下列原则:(1)变形温度与变形抗力的关系曲线应用指数函数表示;(2)变形程度对变形抗力的影响较复杂,故采用非线性函数表示;(3)采用幂函数表示变形速率与变形抗力之

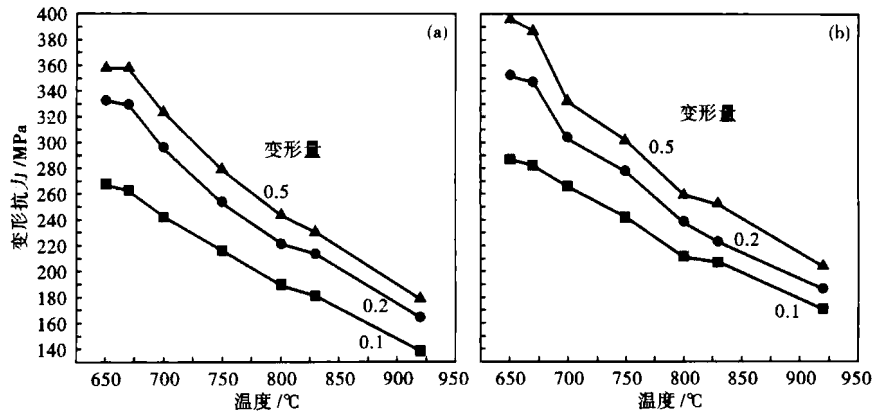


图 1 温度对 0.47C-0.36Si-0.67Mn 中碳钢变形抗力的影响,变形速率/s⁻¹:(a)10;(b)20

Fig. 1 Effect of temperature on deformation resistance of 0.47C-0.36Si-0.67Mn medium carbon steel, strain rate /s⁻¹: (a) 10; (b) 20

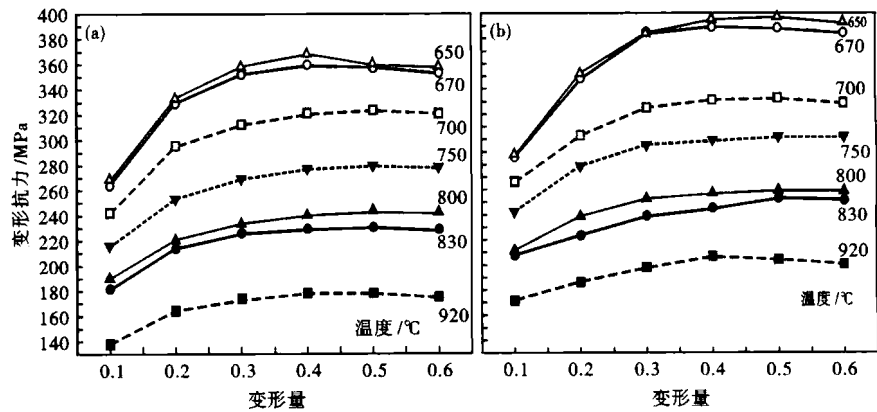


图 2 变形量对 0.47C-0.36Si-0.67Mn 中碳钢变形抗力的影响,变形速率/s⁻¹:(a)10;(b)20

Fig. 2 Effect of strain on deformation resistance of 0.47C-0.36Si-0.67Mn medium carbon steel, strain rate /s⁻¹: (a) 10; (b) 20

间的曲线关系;(4)模型有一定精度要求同时结构尽量简单。

本文采用管克智公式^[9],将该实验钢的变形抗力(σ)数学模型确定为:

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(a_1 \frac{T}{1\ 000} + a_2\right) \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{10}\right)^{\left(a_3 \times \frac{T}{1\ 000} + a_4\right)} \times \left[a_6 \left(\frac{\varepsilon}{0.4}\right)^{a_5} - (a_6 - 1) \frac{\varepsilon}{0.4}\right] \quad (1)$$

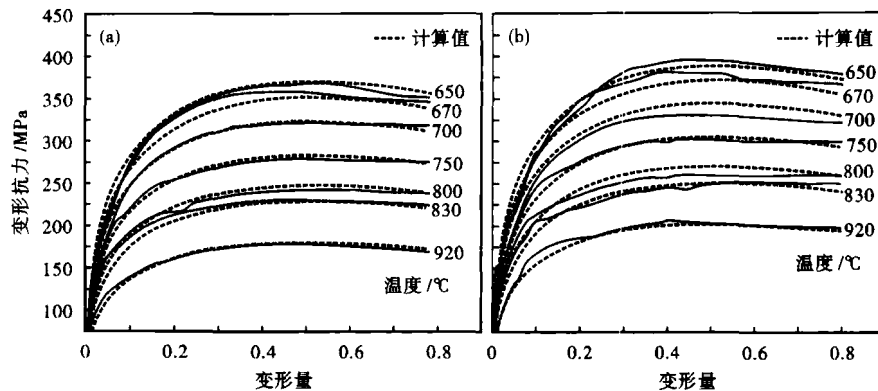
式中: T -绝对温度; σ_0 - $t = 1\ 000$ °C, $\varepsilon = 0.4$, $\dot{\varepsilon} = 10$ s⁻¹时的变形抗力/MPa; $\dot{\varepsilon}$ -变形速率/s⁻¹; ε -变形量; a_1 、 a_2 、 a_3 、 a_4 、 a_5 、 a_6 -均为回归系数。

按照式(1)结构的变形抗力数学模型,根据实验中测得的应力应变曲线和变形抗力与温度的关系,对实验钢低温变形曲线数据进行 Levenberg-

表 1 实验钢变形抗力数学模型回归系数

Table 1 Regression coefficient of math model for deformation resistance of test steel

σ_0 / MPa	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
134	-2.681 58	3.485 16	0.344 37	-0.244 65	0.342 798	1.412 96

图 3 0.47C-0.36Si-0.67Mn 中碳钢变形抗力计算值与试验值比较, 变形速率/ s^{-1} : (a) 10; (b) 20Fig. 3 Comparison between calculated value and measured value of deformation resistance of 0.47C-0.36Si-0.67Mn medium carbon steel, strain rate / s^{-1} : (a) 10; (b) 20

Marquardt 多元非线性回归^[10], 得出式(1)模型系数和变形抗力基值, 见表 1。

由此得出变形抗力的数学模型为:

$$\sigma = 134 \exp \left(-2.681 58 \frac{T}{1000} + 3.485 16 \right) \left(\frac{\dot{\epsilon}}{10} \right)^{(0.344 37 \frac{T}{1000} - 0.244 65)} \times \left[1.412 96 \left(\frac{\dot{\epsilon}}{0.4} \right)^{0.342 798} - (1.412 96 - 1) \frac{\dot{\epsilon}}{0.4} \right] \quad (2)$$

将回归方程与实验数据进行比较, 见图 3。图中虚线为回归方程的计算值, 实线为实验数据, 可见符合程度较好, 回归方程的计算值与实验数据有较

好的拟合性, 可用于实际生产轧制力的计算。

根据回归理论, 剩余标准偏差为:

$$S_i = \sqrt{Q/(N-M)} = \sqrt{25\,956.5/(378-6)} = 8.353\,2 \quad (3)$$

式中: Q - 残差平方和; N - 实验数据组数; M - 待定回归系数个数。

以水平 $\alpha = 0.05$, 查 t 分布表, 得 $t_{0.05}^{371} = 1.645$, 那么 $t_{0.05}^{371} \times S_i = 8.353\,2 \times 1.645 = 13.74$ MPa。回归方程的预报精度为 $\sigma_0 \pm 13.74$ MPa。即变形抗力 σ 有 95% 的可能性落在 $(\sigma_0 - 13.74 \text{ MPa}) < \sigma < (\sigma_0 + 13.74 \text{ MPa})$ 范围内。

4 结论

(1) 变形抗力随变形温度的升高而降低, 随变形速率和变形量的增加而增加。

(2) 在 700 °C 以下变形时, 由于变形过程中会发生动态铁素体相变, 当加工硬化同动态相软化达到平衡时曲线出现极值, 之后随着动态相变的进行, 即形变诱导铁素体量的增加, 变形抗力开始下降。

(3) 回归方程的计算值与实验数据有较好的拟合性, 可用于实际生产轧制力的计算。

国家自然科学基金资助项目(51074062); 河北省杰出青年基金资助项目(E2011209029)。

参考文献

- [1] Johnson G R, Cook W H. A Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strains, High Strain Rate and High Temperatures [A]. Proceedings of Seventh International Symposium on Ballistic [C]. Zhang Z. The Hague, the Netherlands: [s. n.], 1983: 541-547.
- [2] Wang J S, Jiang Z Y, Tieu A K. Adaptive Calculation of Deformation Resistance Model of Online Process Control in Tandem Cold Mill [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 162-163: 585-590.
- [3] 杨景明, 陈志旺, 朴春俊, 等. 1270 轧机弹性曲线的回归及参数估计[J]. 冶金设备, 2003(5): 4-6.
- [4] Monajat H, Asefi D, Parsapour A, et al. Analysis of the Effects of Processing Parameters on Mechanical Properties and Formability of Cold Rolled Low Carbon Steel Sheets Using Neural Networks [J]. Computational Materials Science, 2010, 49(4): 876-881.
- [5] 姚红英, 刘香茹. 宝钢 195 钢低温轧制变形抗力数学模型的建立 [J]. 材料开发与应用, 2009, 24(1): 36-38.
- [6] 田 鹏, 惠卫军, 刘荣佩, 等. 形变参数对中碳钢组织演变的影响 [J]. 材料热处理学报, 2005, 26(4): 32-36.
- [7] 惠卫军, 田 鹏, 董 翰, 等. 形变温度对钢组织转变的影响 [J]. 金属学报, 2005, 41(6): 611-616.
- [8] 吕立华. 轧制理论基础 [M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1991: 53-55, 59-60.
- [9] 周纪华, 管克智. 金属塑性变形阻力 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1989.
- [10] 杨 节. 轧制过程数学模型 [M]. 修订版. 北京: 冶金工业出版社, 1993: 137-145.

梁精龙(1979-), 男, 博士研究生, 2002 年河北理工大学毕业, 高性能钢铁材料研究。

收稿日期: 2012-12-17