

热轧参数对粗奥氏体晶粒铌钢变形抗力的影响

阴树标^{1,2} 刘清友² 孙新军² 文建华² 雷霆¹

(1 昆明理工大学材料与冶金工程学院, 昆明 630091; 2 钢铁研究总院结构材料研究所, 北京 100081)

摘要 通过 Thermecmaster-Z 热模拟试验机, 在 900 ~ 1 050 °C 以变形速率 1 ~ 20 s⁻¹、真应变 0 ~ 0.7 研究了晶粒尺寸 800 μm 的铌钢 (% : 0.05C、1.44Mn、0.13Nb) 奥氏体控轧过程的变形抗力, 并建立了变形抗力的回归方程。试验结果表明, 随温度增高, 铌钢在奥氏体区变形抗力递减; 在同一温度下, 随变形程度增加, 钢的变形抗力增加; 同时在给定变形程度下, 变形抗力随变形速率增大而增大; 变形抗力回归方程计算值与实测值相差 ≤ 5 MPa。

关键词 铌钢 奥氏体 热轧参数 变形抗力 数学模型

Effect of Hot Rolling Parameters on Deformation Resistance of Coarse-Grained Niobium Steel

Yin Shubiao^{1,2}, Liu Qingyou², Sun Xinjun², Wen Jianhua² and Lei Ting¹

(1 School of Material and Metallurgy Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 630091; 2 Institute of Structural Materials, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081)

Abstract The deformation resistance of niobium steel 0.05C, 1.44Mn, 0.13Nb with austenite grain size 800 μm during control rolling at 900 ~ 1 050 °C with deformation rate 1 ~ 20 s⁻¹ and true strain 0 ~ 0.7 has been studied by Thermecmaster-Z thermal simulation test machine, and a regression equation for deformation resistance is established. Test results showed that with increasing temperature, deformation resistance of niobium steel in austenite region decreased, at same temperature with increasing straining, deformation resistance of steel increased, and at given straining deformation resistance increased with increasing deformation rate. The difference in deformation resistance between calculation value by regression equation and measured value was ≤ 5 MPa.

Material Index Niobium Steel, Austenite, Hot Rolling Parameters, Deformation Resistance, Math Model

在微合金钢中, 铌元素可起到延迟和阻碍热加工奥氏体再结晶的作用, 得到非常细晶的相变组织^[1,2]。目前, 许多学者已对含铌微合金钢进行了大量的研究, 含铌量一般在 ≤ 0.05%, 属于比较低的含量^[3-5]。综合运用 CSP-HTP (High Temperature Press) 技术, 利用 Thermecmaster-Z 热模拟实验机对不同温度、不同变形速率下的变形抗力进行了测定, 以研究高温轧制对此钢性能的影响。

1 试验材料与方法

在实验室用真空感应炉冶炼本次试验所用的 0.13Nb 钢, 其化学成分 (%) 为: 0.05C、0.13Nb、0.006N、0.002S、0.010P、1.44Mn、0.18Si。浇铸成 50 kg 钢锭, 经锻造后得到 Φ15 mm × 1 000 mm 的棒材待用。锻造工艺如下: 钢锭加热到 1 200 °C, 保温 1 h, 然后锻成 45 mm × 100 mm 方坯, 终锻温度为 1 000 ~ 1 100 °C。再将切割后的方坯加热到 1 250 °C, 锻成 Φ15 mm × 1 000 mm 的棒材。

将棒材进行预热处理, 在 1 280 °C 保温 1 h 后水淬, 目的是使钢中的铌最大限度固溶。加工成 Φ8

mm × 12 mm 规格的试样, 在 Thermecmaster-Z 试验机上进行热变形模拟研究。

试验选定的变形速率分别为 1, 5, 10, 20 s⁻¹, 变形温度分别为 1 050、1 000、950、900 °C。选用压缩实验法, 试样在 Thermecmaster-Z 热模拟机以 10 °C/s 加热至 1 430 °C, 保温 60 s 后, 以 1 °C/s 降至 1 410 °C 再保温 200 s, 然后以 5 °C/s 温降至压缩变形温度。为使试样内外温度场一致, 在变形前保温 3 s 再进行试验, 压缩变形量为 50%。

试样在 1 430 °C 保温 60 s 后, 以 1 °C/s 降至 1 410 °C 再保温 200 s 直接淬水, 对试样进行磨样、抛光后, 采用苦味酸 + 酒精 + 洗涤剂腐蚀来观察原始奥氏体组织。原始奥氏体晶粒直径达到 800 μm 以上, 与 CSP 的第一道次轧制晶粒尺寸较为接近。

2 试验结果

2.1 变形温度对变形抗力的影响

试验测得的变形速率为 1, 5, 10, 20 s⁻¹, 不同温度条件下的变形抗力曲线见图 1。

通过图 1 的应力-应变曲线可知, 0.13Nb 钢在

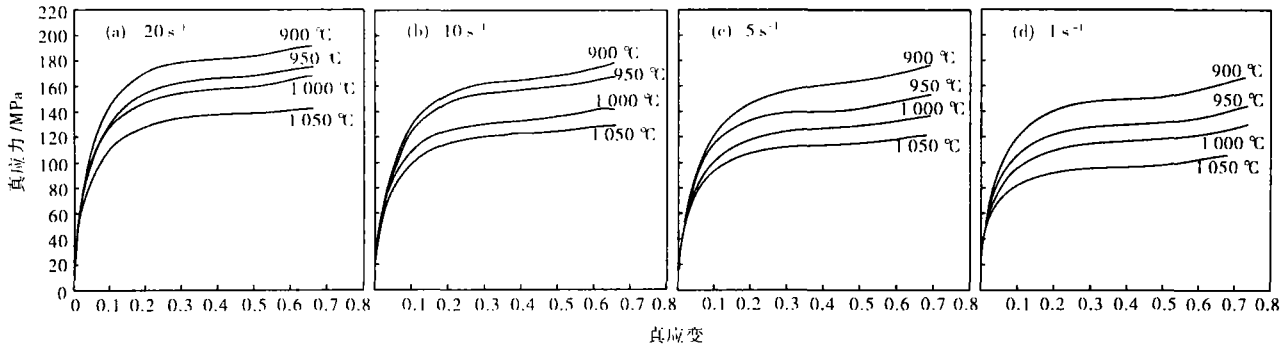


图 1 0.13Nb 钢的变形抗力曲线

Fig. 1 Curves of deformation resistance of 0.13Nb steel

奥氏体区的变形抗力随温度的升高而递减,其递减过程基本是幂函数关系,可用以下公式来表示:

$$\sigma = A \cdot e^{B \cdot t} \quad (1)$$

式中: σ - 变形速度、变形程度常值下的变形抗力/MPa; t - 变形温度/°C; A 、 B - 回归系数,其值决定于钢种。

由关系式可以看出,变形抗力与变形温度的关系,在半对数坐标轴中呈线性。

对式(1)取对数,整理后得到公式(2):

$$\ln \sigma = C + B \cdot t \quad (2)$$

上式中 $C = \ln A$ 。

依据公式(2)绘出图 2,由图可见,变形抗力与变形温度在对数坐标下有很好的线性关系。

2.2 变形程度对变形抗力的影响

随着 0.13Nb 钢变形温度的升高,在同一变形程度下,变形抗力降低;但在同一温度条件下,随变形程度的增加,变形抗力也随之增加。变形程度同变形抗力关系如图 3 所示。

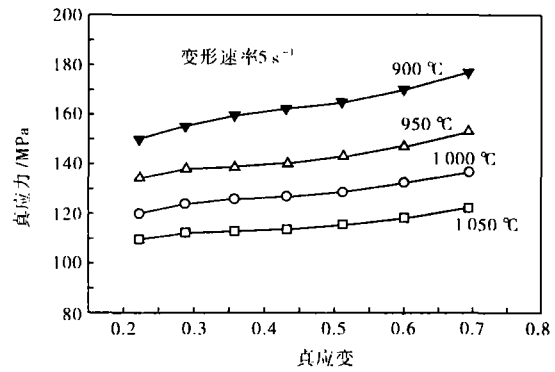


图 3 真应变对 0.13Nb 钢变形抗力的影响

Fig. 3 Effect of true strain on deformation resistance of 0.13Nb steel

2.3 变形速率与变形抗力的关系

在一定的变形程度下,变形抗力随着变形速率的增加而增大。图 4 为真应变 0.511 时变形速率对变形抗力的影响。由图 4 可见,在同温度下变形时,0.13Nb 钢变形抗力同样随着变形速率增加而增大。

3 塑性变形抗力数学模型

3.1 塑性变形抗力数学模型建立的原则

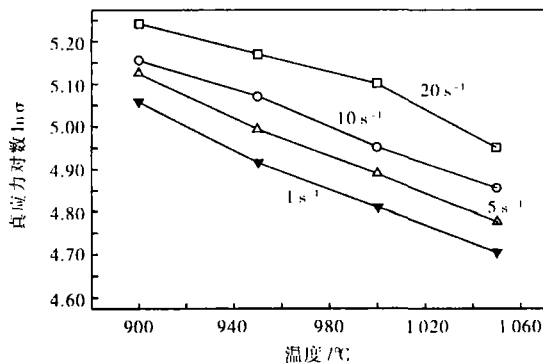


图 2 温度对 0.13Nb 钢变形抗力的影响

Fig. 2 Effect of temperature on deformation resistance of 0.13Nb steel

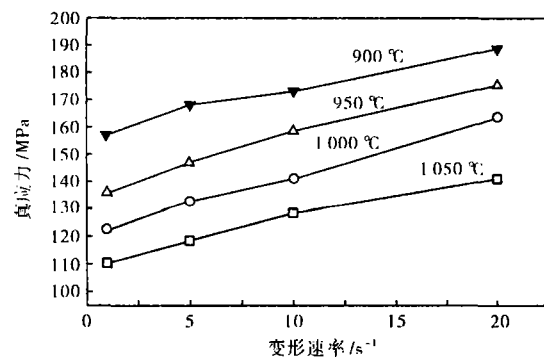


图 4 变形速率对 0.13Nb 钢变形抗力的影响

Fig. 4 Effect of deformation rate on deformation resistance of 0.13Nb steel

决定变形抗力的影响因素主要为:变形温度、变形量和变形速率。其中变形温度对变形抗力的影响较大,结合试验数据曲线形式,其关系曲线用指数函数表示。变形程度对变形抗力的影响较复杂,不能简单采用单调递增的幂函数表示,考虑到变形温度和变形速率等因素的影响,采用非线性函数表示。变形速率对变形抗力的影响,受变形速率影响指数和变形温度等因素的约束,采用幂函数表示其间的曲线关系。为在线控制使用,金属塑性变形抗力数学模型建立在保证一定精度要求的情况下,结构应尽量简单。

3.2 变形抗力数学模型

综合变形抗力影响因素的分析,并对金属塑性变形抗力数学模型进行比较及精度分析,最后确定金属塑性变形抗力数学模型为:

$$\sigma = \sigma_0 \cdot X_T \cdot X_\epsilon \cdot X_{\dot{\epsilon}} \quad (3)$$

其中: $X_T = \exp^{a_1 + a_2 T}$

$$X_\epsilon = (\dot{\epsilon}/10)^{a_3 T + a_4}$$

$$X_{\dot{\epsilon}} = a_6 (\epsilon/0.4)^{a_5} - (a_6 - 1) (\epsilon/0.4)$$

式中: $T = \frac{t + 273}{1000}$, t - 变形温度/°C; σ_0 - 基准变形抗力,即 $t = 1000$ °C, $\epsilon = 0.4$, $\dot{\epsilon} = 10$ s⁻¹时的变形抗力, $\sigma_0 = 133$ MPa; σ - 金属塑性变形抗力/MPa; ϵ - 变形程度; $\dot{\epsilon}$ - 变形速率/s⁻¹。

利用 MATLAB,对 0.13Nb 钢在奥氏体区变形的金属塑性变形抗力曲线进行回归,模型回归系数见表 1。

表 1 0.13Nb 钢变形抗力数学模型模拟回归系数

Table 1 Simulated regression coefficient of mathematic model for deformation resistance of 0.13 Nb steel

系数	最优参数	参数标准差
a_1	-1.963 715	0.003 157 843
a_2	2.572 651 87	0.003 923 822
a_3	0.082 983 69	0.003 148 220
a_4	-0.023 873 14	0.003 922 218
a_5	0.377 463 4	0.000 719 415
a_6	1.478 486	0.002 182 085
相关系数 R	0.981 2	
剩余标准差	6.18	

将回归系数代入公式(3)中,得到 0.13Nb 钢奥氏体区的变形抗力数学模型公式: $\sigma = 133 \cdot \exp^{2.572 651 87 T - 1.963 715} \cdot (\dot{\epsilon}/10)^{0.082 983 69 T - 0.023 873 14} \cdot [1.478 486 (\epsilon/0.4)^{0.377 463 4} - (1.478 486 - 1) (\epsilon/0.4)]$,该数学模型适用于变形速率为 1 ~ 20 s⁻¹、变

形温度为 900 ~ 1 050 °C 的范围。

4 回归结果和实测值对比

通过回归模型公式的计算结果与试验测得的实测值进行对比,实测值和模拟值的误差控制在 5 MPa 之内。

由图 5 证明了该数学模型精度高,实测值与回归计算值之间具有较好的拟合特性。

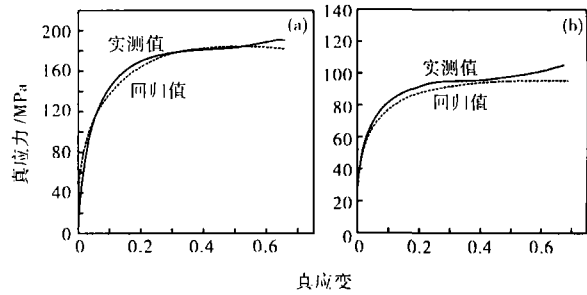


图 5 实测值与回归模型计算值比较:(a) 20 s⁻¹、900 °C; (b) 1 s⁻¹、1 050 °C

Fig.5 Comparison between measured value and calculated value by regression model: (a) 20 s⁻¹, 900 °C; (b) 1 s⁻¹, 1 050 °C

5 结论

依据用 Thermecmator-Z 实验机作出的应力-应变曲线试验数据,分别讨论了 0.13Nb 钢金属塑性变形抗力与变形温度、变形程度和变形速率之间的关系。

通过运用 MATLAB 回归,建立了 0.13Nb 钢金属塑性变形抗力回归方程,误差值控制在 5 MPa 之内;实测数据与计算值之间具有较好的拟合特性,预报精度较高。

973 国家重点基础研究资助项目(编号 2004C6619101)

参考文献

- Gomez M, Medina S F, Quispe A, et al. Static Recrystallization and Induce Precipitation in a Low Nb Microalloyed Steel. ISIJ Inter, 2002, 42(4):423
- 付俊岩. 镍·科学与技术. 北京:冶金工业出版社,2003:259
- 刘清友,董瀚,孙新军,等. CSP 工艺中含 Nb 钢的混晶问题及改善方法. 钢铁,2003,38(8):16
- 邓素怀,刘清友,董瀚,等. Nb 的析出对变形诱导铁素体相变的影响. 钢铁,2005,40(7):64
- 雍岐龙,马鸣图,吴宝榕. 微合金钢的物理和力学冶金. 北京:机械工业出版社,1988

阴树标(1977-),男,博士,从事钢铁材料研究。

收稿日期:2006-11-14