

Ti-IF 钢 800 ~ 875 °C 变形抗力模型研究

罗 丰 徐 光 甘晓龙 易洪武

(武汉科技大学钢铁及资源利用省部共建教育部重点实验室, 武汉 430081)

摘 要 在 Thermecmator-Z 热模拟试验机上对 0.045% Ti-0.003% C 的 Ti-IF 钢进行 700 ~ 950 °C、应变 0 ~ 0.7、应变速率 1 ~ 70 s⁻¹ 条件下的热模拟实验, 以分析温度、应变速率和应变对变形抗力的影响。用 BP (back propagation) 神经网络算法给出了 Ti-IF 钢在 800 ~ 875 °C 变形抗力预报模型。通过对模型预报值和实验数据实测值的比较得出, 变形抗力相对误差在 4.0% 以内

关键词 Ti-IF 钢 铁素体轧制 变形抗力 BP 神经网络 数学模型

A Study on Model of Deformation Resistance of a Ti-IF Steel at 800 ~ 875 °C

Luo Feng, Xu Guang, Gan Xiaolong and Yi Hongwu

(Key Lab for Ferrous Metallurgy and Resource Utilization of Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081)

Abstract Thermal simulation test for 0.045Ti-0.003C Ti-IF steel with strain 0 ~ 0.7 and strain rate 1 ~ 70 s⁻¹ at 700 ~ 950 °C has been carried out by Thermecmator-Z simulation machine to analyze the effect of temperature, strain and strain rate on deformation resistance. The prediction model of deformation resistance of the Ti-IF steel at 800 ~ 875 °C was obtained by BP neural net calculation method. With comparison between model predicted value and actual measured value, it indicated that the relative error of deformation resistance was less than 4.0%.

Material Index Ti-IF Steel, Ferrite Rolling, Deformation Resistance, BP Neural Net, Math Model

目前对于 Ti-IF 钢在铁素体区低温变形时的变形抗力的研究, 大多是给出某种具体的传统数学形式^[1-4]。本文在热模拟实验的基础上, 将 BP 神经网络应用于变形抗力的预报, 给出了 BP 神经网络变形抗力预报模型。

1 实验材料及方法

实验用 Ti-IF 钢为 2.75 mm 热连轧钢板, 其化学成分 (%) 为: 0.003 C、0.011 S、0.02 Si、0.12 Mn、0.011 P、0.045 Ti、≤ 0.005 Nb、0.027 Al。

将试样加工成 8 mm × 12 mm 的压缩试样, 试样两端带凹槽, 实验时在凹槽内填入润滑剂以减小摩擦的影响, 保证得到单向压应力。试验在 Thermecmator-Z 热模拟试验机上进行。试样加热速度 5 °C/s, 加热温度 1 000 °C 保温 5 min, 由加热温度至变形温度的冷速 5 °C/s, 变形温度 700 ~ 950 °C, 变形量 0 ~ 80%, 变形速率 1 ~ 70 s⁻¹, 共试验 34 个试样。

2 实验结果

2.1 变形温度对变形抗力的影响

当变形温度降至 850 °C 左右时, 随奥氏体向铁素体转变开始, 变形抗力迅速下降, 并在转变终了时达最低值; 之后, 随温度的继续降低变形抗力再次呈线性增加 (图 1)。

在两相区具有体心立方结构的铁素体比具有面心立方结构的奥氏体软, 变形主要发生在铁素体晶

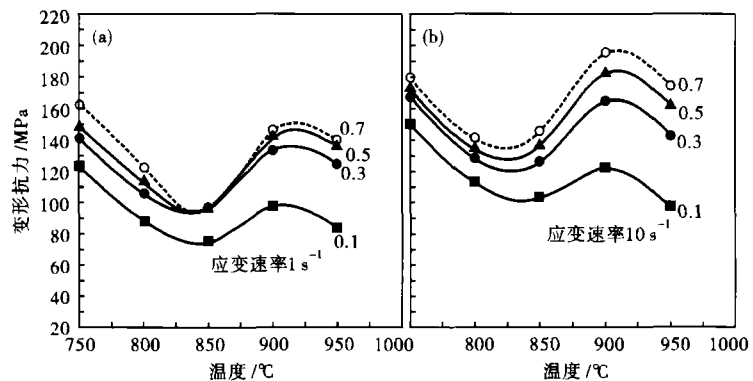


图 1 温度对 Ti-IF 钢变形抗力的影响: (a) 1 s⁻¹; (b) 10 s⁻¹

Fig. 1 Effect of temperature on deformation resistance of Ti-IF steel; (a) 1 s⁻¹; (b) 10 s⁻¹

粒上。随变形程度的增加,当晶界的应力达到一定程度时,相邻较难变形的晶粒(如奥氏体晶粒)中的位错开始滑动。由于两相区温度较低,奥氏体在变形过程发生动态再结晶是很困难的。铁素体的层错能高,变形过程中位错比较容易运动。同时铁素体处于高温铁素体区,在变形程度较大时,铁素体还容易发生动态再结晶。所以在两相区的变形抗力出现下降趋势。同时,温度在 750 ~ 850 °C 铁素体区之间,虽然随着温度的降低变形抗力在增大,但是仍然小于奥氏体区 900 °C 时的变形抗力(图 1)。

2.2 变形速率对变形抗力的影响

从图 2 可知,在较低的变形温度范围内,变形抗力随变形速率的增加不是很大。但是在 850 ~ 900 °C 的变形温度范围,变形速率对变形阻力的影响是随着变形速率的提高而显著提高。

2.3 应变变量对变形抗力的影响

应变变量是影响变形抗力的一个重要因素。当变形温度一定时,不同变形速率下的变形抗力与应变

量的关系见图 3。

3 BP (Back Propagation) 神经网络模型的建立

3.1 BP 神经网络模型

BP 神经网络通常是指基于误差反向传播算法的多层前向神经网络,它是 Rumelhart 和 McClland 及其研究小组在 1986 年研究并设计出来的。BP 算法已经成为目前应用最为广泛的神经网络学习算法。

对于 BP 网络,任何闭区间内的连续函数都可以用单隐层的 BP 网络逼近,因而一个三层的网络就可以完成任意的 n 维到 n 维的映射。只考虑变形抗力的主要影响因素即变形温度、变形速率和应变变量的影响,网络结构模型为一个输入层、一个隐层和一个输出层,输入层有 3 个输入量,输出层只有 1 个变形抗力输出量。

隐层的神经元数目选择是一个十分复杂的问题,往往需要根据设计者的经验和多次实验来确定,隐单元的数目与问题的要求,输入和输出单元的数

目都有直接关系。隐单元数目过多会导致学习时间过长,误差不一定最佳,也会导致容差性差,不能识别以前没有看到的样本,可以用如下公式作为参考公式: $n_1 = \sqrt{n + m} + a$

式中: m - 输出神经元数; n - 输入单元数; a - 为 [1, 10] 之间的常数。所以 n_1 一般取 3 ~ 10, 通过对各组数据的比较,本实验取 7。

本实验通过样本采集,训练数据为 2 000 组,预报数据为 50 组。通过对函数进行采样得到了网络的输入变量 P 和目标变量 T 。考虑到预报模型的精确性和实际条件限制,利用实测数据按温度在 875 ~ 800 °C 对试样变形抗力进行训练,其中,具体的训练数据和预报数据如表 1。

3.2 模型误差分析

$$mse = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N$$

$\sqrt{(t_i - a_i)^2}$ 为网络的绝对误

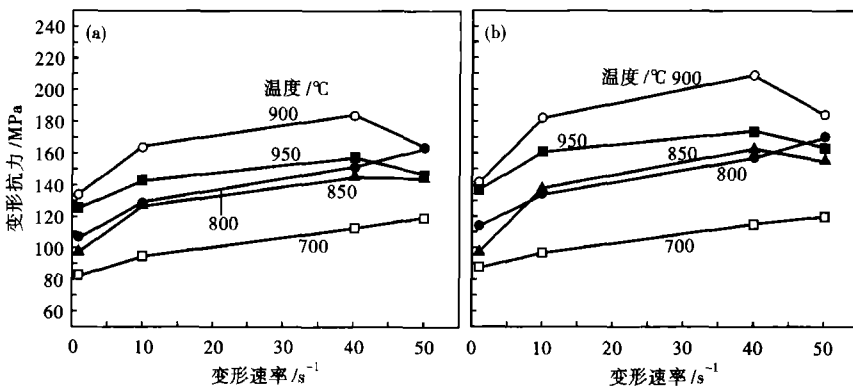


图 2 变形速率对 Ti-IF 钢变形抗力的影响: (a) 应变 0.3; (b) 应变 0.5

Fig. 2 Effect of strain rate on deformation resistance of Ti-IF steel: (a) strain 0.3; (b) strain 0.5

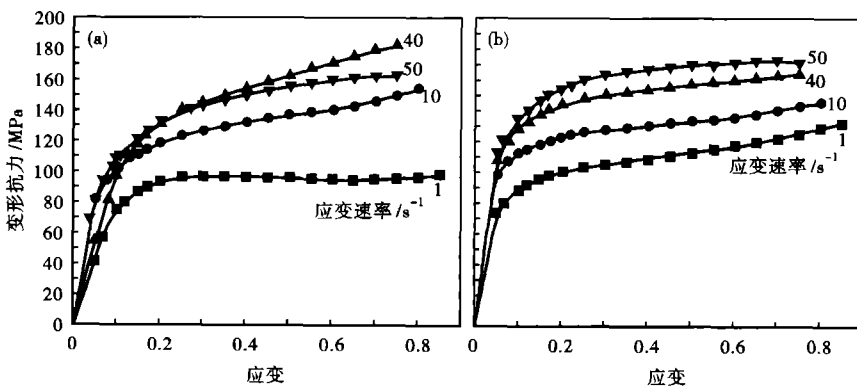


图 3 应变对 Ti-IF 钢变形抗力的影响: (a) 850 °C; (b) 800 °C

Fig. 3 Effect of strain on deformation resistance of Ti-IF steel: (a) 850 °C; (b) 800 °C

表 1 训练数据和预报数据对比

Table 1 Comparison between training data and prediction data

数据	变形温度/℃	变形速率/s ⁻¹	数据组数	
训练	850	1	127	
		40	547	
	800	10	467	
		40	367	
		70	196	
预报	875	40	153	
		70	41	
	825	40	102	
		800	1	25
		850	10	25

差, $\Delta = \frac{1}{N} \sum \sqrt{\left(\frac{t_i - a_i}{a_i}\right)^2}$ 为网络的相对误差, 其中 t_i 为期望输出, a_i 为实际输出, N 为数据组数。利用表 1 中的预报数据对 BP 神经网络模型的预报误差进行分析, 模型的预报误差见图 4。

当温度在 875 ~ 800 °C 时, 通过用训练的模型对变形抗力进行预报, 得出相应的预报值; 把预报值和实际值作为纵坐标, 样本数作为横坐标, 描绘在如图 4(a) 的误差曲线中, 通过对预报数据的绝对误差和相对误差的计算, 得到 $mse = 4.228\ 284\ 157\ \text{MPa}$, $\Delta = 0.040\ 035\ 433$, 即误差可以控制在 4.5 MPa 即

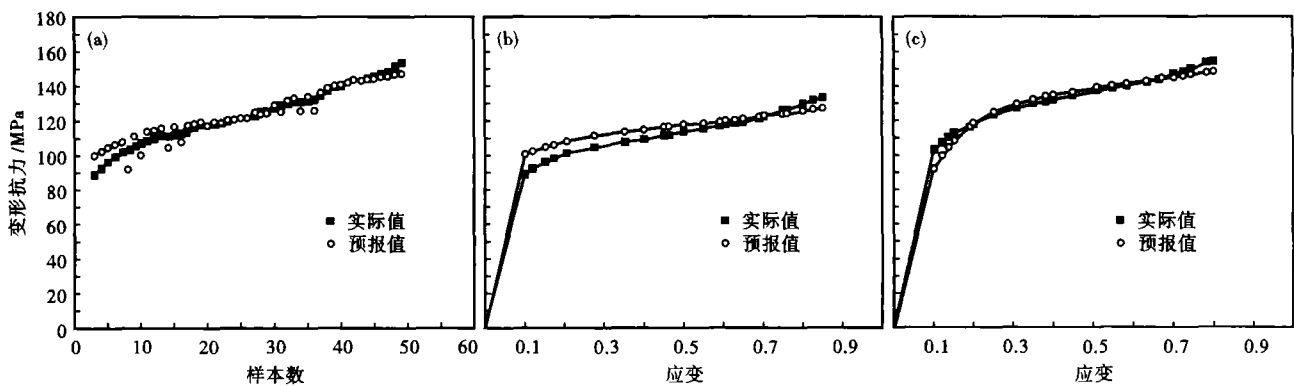


图 4 实际值与预报值的比较: (a) 875 ~ 800 °C; (b) 800 °C, 1 s⁻¹; (c) 850 °C, 10 s⁻¹

Fig. 4 Comparison between measured value and predicted value: (a) 875 ~ 800 °C; (b) 800 °C, 1 s⁻¹; (c) 850 °C, 10 s⁻¹

4.0% 以内, 预报精度较高。

图 4(b,c) 分别为 800 °C 和 850 °C 时的变形抗力实际值与计算值之间的比较, 取变形温度为 800 °C 时, 变形速率为 1 s⁻¹ 时的 25 组数据, 通过用模型预测得到的预报值和实际值计算得到绝对误差为 $mse = 5.375\ 206\ 606\ \text{MPa}$, 相对误差为 $\Delta = 0.055\ 525\ 529$ 。同时, 取变形温度为 850 °C 时, 变形速率为 10 s⁻¹ 时的 25 组实验数据, 得到绝对误差为 $mse = 3.081\ 361\ 708\ \text{MPa}$, 相对误差为 $\Delta = 0.024\ 545\ 337$ 。即预报精度可以控制在 2.4% 以内。也可以由图 4(b,c) 可以看出, 实测数据与模型预报值之间具有较好的拟合特性, 说明本文给出的 BP 神经网络模型具有较高的预报精度。

4 结论

(1) 建立了超低碳 IF 钢在 800 ~ 875 °C 低温变形温度范围内的 BP 神经网络变形抗力预报模型。实测数据与预报值之间具有较好的拟合特性, 证明该 BP 神经网络模型具有较高的预报精度。

(2) 本文给出的流动应力模型可用于超低碳钢

铁素体区低温变形时的变形抗力预报。本研究工作为超低碳钢铁素体区轧制工艺制度的制定提供了理论依据。

湖北省自然科学基金项目资助(2007ABA244)

参考文献

- 徐光, 张丕军. 金属低温变形理论与技术. 北京: 冶金工业出版社, 2007
- Xu Guang, Xu Chushao, Zhao Jiarong, et al. Research on Flow Stress in Ferrite Deformation of a Ti-IF Steel. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2006, 13(1): 34
- 刘战英, 周满春, 王涛, 等. IF 钢铁素体区轧制的变形抗力模型. 塑性工程学报, 2005, 12(5): 92
- 罗德信, 桂江兵. 含 Ti 超低碳钢流动应力的研究. 轧钢, 2006, 23(4): 17

罗丰(1986-), 男, 在读硕士研究生, 从事金属材料组织、性能等研究。

徐光(1961-), 博士, 教授. 武汉科技大学材料与冶金学院, 从事金属加工过程组织和性能控制、钢铁新产品开发等研究工作。

收稿日期: 2008-07-23