

弹簧钢 55CrSi 连铸坯变形抗力数学模型

吕鹏 刘雅政 肖金福 孙小军

(北京科技大学材料科学与工程学院,北京 100083)

摘要 用 Gleeble-1500 热模拟试验机研究了弹簧钢 55CrSi (% : 0.54C, 1.37Si, 0.70Cr) 320 mm × 280 mm 连铸坯 950 ~ 1 150 °C 塑性变形抗力。分析了变形速率(1 ~ 10 s⁻¹)、变形程度(0.2 ~ 0.5)和变形温度对该钢变形抗力的影响,建立了 55CrSi 钢变形抗力数学模型。通过模型计算值和实测值对比和回归分析表明,回归方程高度显著,具有良好的曲线拟合特性。

关键词 弹簧钢 55CrSi 变形抗力 数学模型

Math Model for Deformation Resistance of Cast Bloom of Spring Steel 55CrSi

Lü Peng, Liu Yazheng, Xiao Jinfu and Sun Xiaojun

(Materials Science and Engineering School, University of Science and Technology, Beijing 100083)

Abstract Deformation resistance of 320 mm × 280 mm cast bloom of spring steel 55CrSi (% : 0.54C, 1.37Si, 0.70Cr) at 950 ~ 1 150 °C was studied by Gleeble-1500 thermal simulator. Based on analyzing the effect of strain rate (1 ~ 10 s⁻¹), deformation extent (0.2 ~ 0.5) and temperature on deformation resistance of the steel, the math model for deformation resistance of steel 55CrSi has been established. The results of comparison between calculated value by model and measured value and regression analysis showed that the regression expression was high noticeable and had nice curve-fitting characteristics.

Material Index Spring Steel 55CrSi, Deformation Resistance, Math Model

因钢厂初轧机轧制弹簧钢 55CrSi 时出现过载问题,为此利用 Gleeble-1500 热模拟实验机对该钢厂生产的 55CrSi 钢在不同变形温度、变形速率、变形程度下的变形抗力进行了测定,得到以上因素对其变形抗力的影响。同时利用数值模拟的方法建立了变形抗力与各影响因素之间关系的数学模型。

1 实验方法

1.1 实验材料

实验材料弹簧钢 55CrSi 连铸坯,铸坯断面尺寸为 320 mm × 280 mm,在距表面 1/4 处取样,线切割成 Φ8 mm × 15 mm 的热模拟圆柱形试样。其化学成分如表 1 所示。

1.2 实验方案

利用 Gleeble-1500 热模拟实验机采用单道次压

缩试验,以 10 °C/s 的速度将试验材料加热至 1 150 °C;保温 2 min,以 10 °C/s 的速度冷却至变形温度(950、1 000、1 050、1 100、1 150 °C)进行压缩变形,变形速率分别为 1、6、10 s⁻¹,最大压缩应变为 50%,记录真应力、真应变值,绘出真应力-真应变曲线。变形后将试验材料水冷至室温。

2 变形抗力实验结果及分析

2.1 变形温度对变形抗力的影响

图 1(a) 表示了变形温度与变形抗力的关系。由图 1(a) 可见,在同一变形量和变形速率下,随着变形温度的提高,变形抗力减小。这是由于温度升高,热激活作用增强,位错的活动性能提高,新的滑移系统产生并开动,扩散塑性变形机理同时起作用^[1],使变形容易进行,同时温度升高有利于回复和再结晶软化过程的发展,从而降低了金属的变形抗力。特别是再结晶过程,其软化过程需要一定的时间来完成,因此应变速率越低,软化效果越明显。

2.2 变形程度对变形抗力的影响

表 1 55CrSi 钢的化学成分/%
Table 1 Chemical composition of steel 55CrSi /%

C	Si	Mn	Cr	S	P
0.54	1.37	0.69	0.70	0.005	0.013

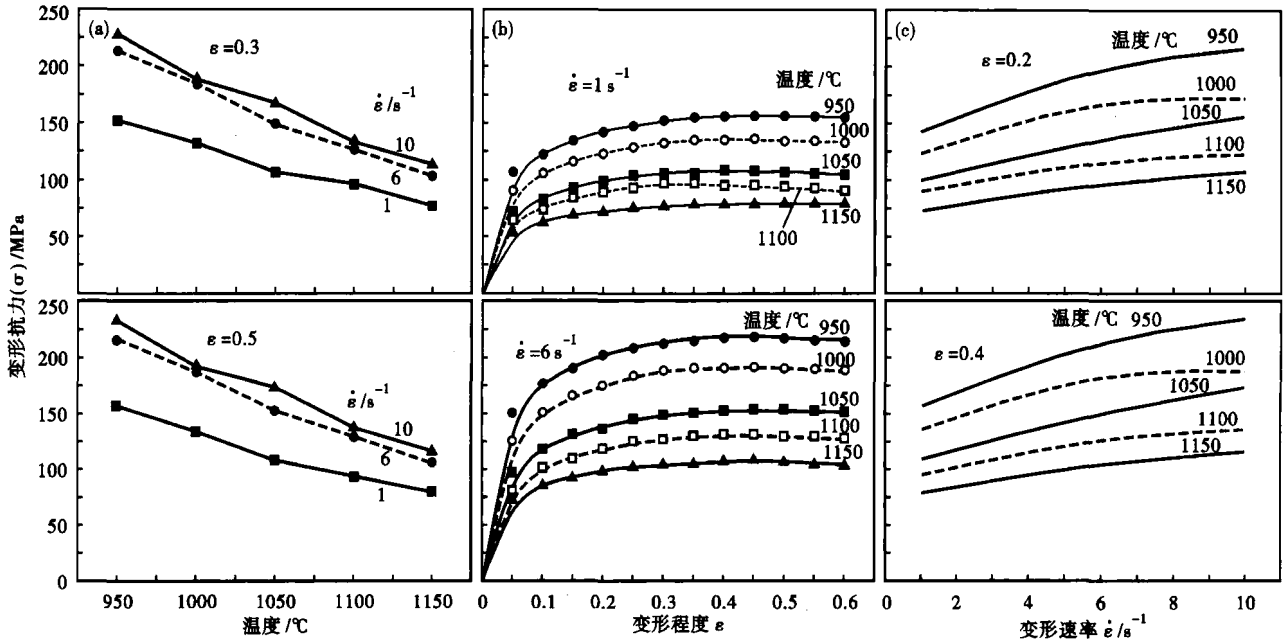


图 1 变形温度(a),变形程度(b)和变形速率(c)对 55CrSi 钢铸坯变形抗力的影响

Fig. 1 Effect of temperature (a), deformation extent (b) and strain rate (c) on deformation resistance of cast bloom of steel 55CrSi

图 1(b)是变形速率分别为 1、6 s⁻¹时,在变形温度 950、1 000、1 050、1 100、1 150 °C 下的应力-应变曲线。由图 1(b)可见,在同一变形温度下,随变形程度的增加,变形抗力增大,当变形程度达到一定值时,变形抗力出现极大值,以后随着变形程度的增加,变形抗力增加的速度放缓,并有减小的趋势。这是因为当变形量小时,随着变形量增加,位错密度不断增加,位错之间相互作用形成了位错塞积和位错交割阻碍了位错的运动,造成了材料的加工硬化,并且形变硬化超过动态回复的软化作用,因此变形抗力逐渐增大,直至达到最大值;此后随着变形程度的进一步增加达到一临界变形量,金属内部畸变能达到一定程度,就发生动态再结晶,使更多的位错快速消失,动态再结晶的软化效果与加工硬化相当,甚至超过加工硬化,导致变形抗力的增速放缓并有了减小的趋势。

2.3 变形速率对变形抗力的影响

图 1(c)是变形程度分别为 0.2 和 0.4 时,不同变形温度下,变形速率与变形抗力的关系。由图 1(c)可见,在同一变形温度和变形程度下,随着变形速率的增加,变形抗力增大。一方面应变速率增加使位错移动速度加快,不利于异号位错的合并重排,不利于回复和再结晶的软化过程的进行,加剧了加工硬化,这都导致了变形抗力增大;另一方面变形速率增加,变形热来不及散发,提高了变形温度,可以促使变形过程中产生的排列混乱的位错重新排列为

某些低能组态,有利于异号位错合并,一定程度上降低了位错密度。由于两方面因素共同作用,使得变形抗力随着应变速率的增加而增大,但是对于不同应变速率,变形抗力增大的程度明显不同。

2.4 变形抗力数学模型

根据金属变形抗力数学模型建立的原则,通过实测曲线分析变形温度 *T*、变形程度 ϵ 、变形速率 $\dot{\epsilon}$ 对变形抗力 σ 的影响,确定 55CrSi 钢的变形抗力数学模型为:

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

式中: $T = t + 273/K$; σ_0 - 基准变形抗力,即 $t = 1\ 000$ °C, $\epsilon = 0.4$ 和 $\dot{\epsilon} = 10\ s^{-1}$ 时的变形抗力,为 187 MPa; t - 变形温度/°C; ϵ - 变形程度(真应变); $\dot{\epsilon}$ - 变形速率/ s^{-1} ; $a_1 \sim a_6$ - 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,对 55CrSi 钢变形抗力曲线数据进行 Levenberg-Marquardt 多元非线性回归^[2],得出式(1)模型系数,如表 2 所示。

表 2 变形抗力模型系数

Table 2 Coefficient for model of deformation resistance

a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
4.615 3	-3.583 2	0.236 7	-0.050 8	0.311 3	1.388 6

由此得到 55CrSi 钢变形抗力的数学模型为式(2):

$$\sigma = 187 \exp\left(4.6153 - 3.5832 \times \frac{T}{1000}\right) \times \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{10}\right)^{0.2367 - 0.0508 \times \frac{T}{1000}} \times \left[1.3886 \times \left(\frac{\varepsilon}{0.4}\right)^{0.3113} - (1.3886 - 1) \times \frac{\varepsilon}{0.4}\right] \quad (2)$$

该数学模型适用范围:变形程度 0 ~ 50%, 变形温度 950 ~ 1150 ℃, 变形速率 1 ~ 10 s⁻¹。

2.5 模型的结果分析

2.5.1 计算值与实测值的对比

将实测 σ 值与经过式(2)计算出的 σ 值进行比较,如图 2 所示,模型计算值与实测值之间具有较好的拟合程度。

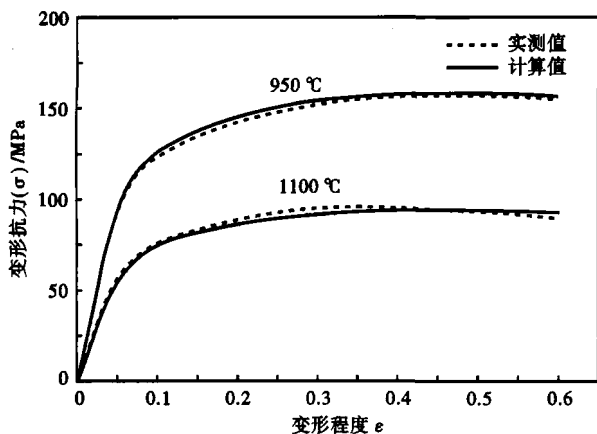


图 2 55CrSi 钢变形抗力实测值与计算值的比较

Fig. 2 Comparison between calculated value and measured value of deformation resistance of steel 55CrSi

2.5.2 显著性检验

对变形抗力的回归公式进行 *F* 检验^[3]:

$$S_r = \sum (y_{\text{计}} - y_{\text{平}})^2 = 146\,658.916\,9,$$

$$S_e = \sum (y_{\text{实}} - y_{\text{计}})^2 = 2\,389.858\,7,$$

$$\text{于是 } F = \frac{S_r/p}{S_e/(n-p-1)} = 1\,759.192\,8,$$

上式中 *p* 为自变量个数 (*p* = 3), *n* 为实测数据组数 (*n* = 90)。取信度 *a* = 0.001, 查表 $F_{0.001}^{(3,86)} = 6.01$ 。因 $F > F_{0.001}^{(3,86)}$, 证明该变形抗力的回归公式高度显著。

2.6 现场生产应用

根据回归的 55CrSi 变形抗力数学模型,对开坯机力能参数进行计算,并对电机负载情况进行校核,根据结果调整轧制温度和各道次轧制速度,解决了过载问题,实现了 55CrSi 的顺利轧制。

3 结论

(1) 采用 Gleeble-1500 热模拟试验机对弹簧钢 55CrSi 进行了变形抗力测试,通过对应力-应变曲线分析,得出了变形温度、变形程度以及变形速率对变形抗力的影响规律。

(2) 对弹簧钢 55CrSi 变形抗力曲线数据进行 Levenberg-Marquardt 多元非线性回归,得出 55CrSi 的变形抗力的数学模型,通过对模型的计算值与实测值对比及显著性分析可知,误差比较小,数学模型预测精度较高。

(3) 模型适用范围:钢的碳当量为 1.02, 变形程度 0 ~ 50%、变形温度 950 ~ 1150 ℃、变形速率 1 ~ 10 s⁻¹, 适用于初轧开坯以及高线粗、中轧机组的变形抗力计算。

参考文献

- 1 刘雅政. 材料成形理论基础. 北京:国防工业出版社,2004
- 2 杨 节. 轧制过程数学模型. 北京:冶金工业出版社,1993
- 3 朱伟勇,傅连魁. 冶金工程试验统计. 北京:冶金工业出版社,1991

吕 鹏 (1983-), 男, 硕士研究生, 弹簧钢控轧控冷工艺研究。

收稿日期:2009-01-19

下 期 要 目

耐蚀合金 G3、G3-Z 和 825 热加工性的研究	包耀宗等
铁水温度、炉渣碱度和初始硅含量对碳饱和和铁水脱锰的影响	李 闯等
镍基耐蚀合金 C-276 平衡析出相的热力学计算	施爱娟等
重轨万能连续轧制过程温度预报的数学模型	芦忆莹等
结晶器保护渣吸收 TiO ₂ 夹杂物的动力学研究	郝占全等
Cr5 型冷轧工作辊用钢的热变形行为	李 倩等
RH 上升管吹气孔堵塞对循环流量的影响	艾新港等