

高铁用 EA4T 车轴钢热变形行为及变形抗力模型的试验研究

徐刚 李士琦 王乐 刘奇
(北京科技大学冶金与生态工程学院,北京 100083)

摘要 试验用 EA4T 车轴钢(/% : 0.26C, 0.35Si, 0.75Mn, 0.011P, 0.012S, 1.04Cr, 0.22Mo) 由 10 kg 真空感应炉熔炼。用 Gleeble-1500 热模拟试验机对 EA4T 车轴钢进行高温单道次压缩试验以研究温度(950 ~ 1150 ℃)、应变(0 ~ 0.8)和应变速率(0.1 ~ 20 s⁻¹)对该钢变形抗力的影响,并建立该钢热变形抗力的数学模型。结果表明,钢种在较高温度和较低应变速率下动态再结晶容易发生,峰值应力(σ_p)、峰值应变(ε_p)和稳态应力(σ_s)与参数 lnZ 成线性关系;实验钢的峰值与稳态激活能分别为 320.22 kJ/mol 和 361.91 kJ/mol;变形抗力的预测模型与实验所得结果吻合良好。

关键词 EA4T 车轴钢 应力 应变 激活能 数学模型

Experimental Study on Hot Deformation Behavior and Math Models for Deformation Resistance of EA4T Axle Steel for High Speed Rail

Xu Gang, Li Shiqi, Wang Le and Liu Qi
(School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083)

Abstract Tested EA4T axle steel (/% : 0.26C, 0.35Si, 0.75Mn, 0.011P, 0.012S, 1.04Cr, 0.22Mo) is melted by a 10 kg vacuum induction furnace. The single pass reduction test on tested EA4T axle steel is carried out by using Gleeble-1500 thermal simulation machine to study the effect of temperature (950 ~ 1150 ℃), strain (0 ~ 0.8) and strain rate (0.1 ~ 20 s⁻¹) on deformation resistance of this steel, and the a math model for hot deformation resistance of the steel is established. Results show that the dynamic recrystallization of the steel easily occurs at higher temperature and lower strain rate, its peak stress (σ_p), peak strain (ε_p) and steady strain (σ_s) of test steel are all in linear relationship with parameter lnZ; the peak and steady activation energy of test steel is respectively 320.22 kJ/mol and 361.91 kJ/mol; and the deformation resistance calculated by predicted model is in good agreement with measured result.

Material Index EA4T Axle Steel, Stress, Strain, Activation Energy, Math Model

EA4T 为欧盟现高铁用空心轴材料,这种高速、重载机车及车辆车轴用钢已经开始国产化,但要获得具有一定性能和尺寸的钢材,不仅需要合理的冶炼方法、先进的设备,还需要合适的工艺流程。正确制定不同形变条件下材料的塑性变形抗力,是制订合理工艺规程必不可少的条件^[1],因此对该钢种的高温变形行为进行研究,为该钢种制订合理的轧制控制工艺提供理论依据。

1 试验材料与方法

冶炼设备为北京科技大学冶金与生态学院冶金实验技术中心金属熔炼实验室用 ZG-0.01 型 10 kg 真空感应炉,冶炼实测成分与标准值如表 1。试验材料经感应炉冶炼浇铸成钢锭,然后将其锻造成 Φ50 mm 圆柱棒,再从圆柱棒进行线切割成圆柱形试样,尺寸为 Φ8 mm × 15 mm。

利用 Gleeble-1500 热模拟试验机,采用单道次压缩工艺进行实验,为了建立能够较为准确的描述变形抗力的数学模型,充分考虑到形变量、应变速

表 1 试验 EA4T 钢的化学成分 /%

Table 1 Chemical composition of test EA4T steel /%

项目	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
标准值	0.22 ~ 0.29	0.15 ~ 0.40	0.50 ~ 0.80	≤ 0.020	≤ 0.015	0.90 ~ 1.20	0.15 ~ 0.30
实际值	0.26	0.35	0.75	0.011	0.012	1.04	0.22

率、形变温度等因素的相互作用,拟定以下工艺进行压缩模拟试验。

以 20 ℃/s 的加热速度加热到测试温度,保温 3 min,使其奥氏体完全化,利用 Gleeble-1500 热模拟试验机进行单道次压缩变形,变形完成后进行水淬冷却至室温。测试温度为 950 ~ 1150 ℃,应变速率为 0.1 ~ 20 s⁻¹;形变量 60%,共进行 30 个试验测试,对不同形变条件下测出的数据作出应力应变曲线。

2 试验结果及讨论

2.1 试验钢的应力-应变曲线及其分析

在 1150 ℃、应变速率 20 s⁻¹ 的试验中,由于试样压坏,缺少 1 组数据,共得有效数据 29 组,对结果

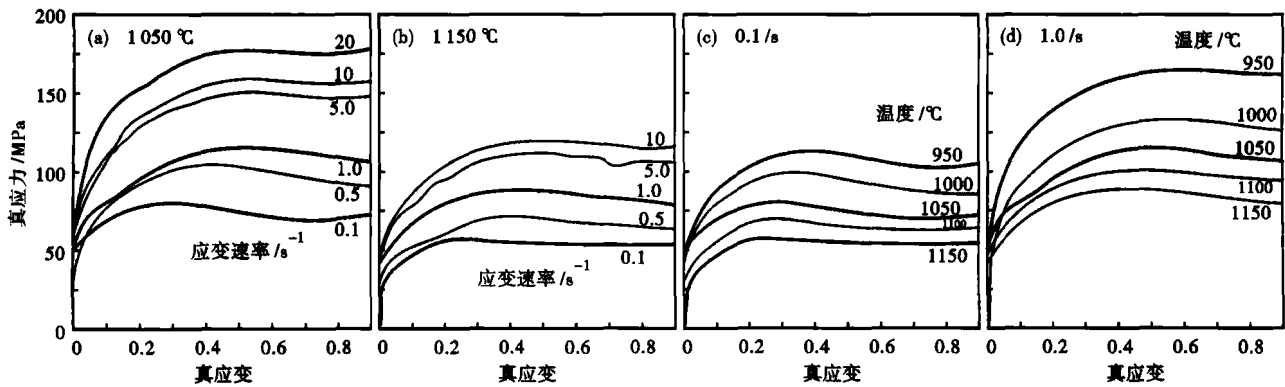


图1 试验EA4T钢的应力-应变曲线:(a)1050 °C;(b)1150 °C;(c)0.1 s⁻¹;(d)1.0 s⁻¹
 Fig. 1 Stress-strain curves of test EA4T steel: (a) 1050 °C; (b) 1150 °C; (c) 0.1 s⁻¹; (d) 1.0 s⁻¹

分析影响不大。图1中的应力应变曲线反映了此钢种在不同形变温度和不同应变速率下变形抗力与真应变量的关系,可以看出,同一温度下,应变速率增大,变形抗力增大,同一应变速率下,形变温度增高,变形抗力减小。

应变速率对变形抗力的影响主要取决于金属在塑性变形过程中其内部发生的加工硬化和动态回复、再结晶等软化机制交互作用的结果。随着应变速率的增加,位错运动速度加快,要求的切应力增大,流变应力必然要提高,因此应变速率越大,变形抗力值越大。

如图1(a,b)所示,当形变温度分别在1050 °C,应变速率为0.1 s⁻¹,真应变值达到0.3以后,变形抗力明显下降,应力应变曲线出现峰值,这说明材料发生了动态再结晶。随着变形的继续进行,动态再结晶继续发展,抗力继续下降,直到完成一轮再结晶,变形抗力降低到最低值。且应变速率增大,在应力-应变曲线上,其达到峰值所需的真应变值也增大。

形变温度对变形抗力的影响非常明显。由于温度的升高,增大了原子热振动的振幅,降低了金属原子间的结合力,使临界切应力降低,位错滑移运动阻力减小,新的滑移系统及交滑移不断产生和开动,更容易发生动态回复和动态再结晶,使变形抗力下降,即所谓的软化作用,变形抗力随温度升高而降低。

如图1(c,d)所示,在应变速率为1 s⁻¹,真应变为0.4,当形变温度为950 °C,变形抗力约为160 MPa,而形变温度为1100 °C时,变形抗力约为92 MPa。且形变温度增大,在应力-应变曲线上,其达到峰值所需的真应变减小。

由图1可知,试验钢种在高的形变温度和低的应变速率下应力应变曲线容易出现峰值,说明在此条件下,该钢种容易发生动态再结晶。

2.2 确定形变激活能

在等温条件下,可以用Zener-Hollomon参数^[2-3]表达变形温度和应变速率对动态再结晶的影响关系为:

$$Z = \zeta \exp\left(\frac{Q_d}{RT}\right) \quad (1)$$

式中: Q_d -动态再结晶激活能/(J·mol⁻¹); R -气体常数,8.314 J/(mol·K); T -变形的绝对温度/K; ζ -应变速率/s⁻¹。 Z 因子和 σ_p 的关系又可以表示为^[4]:

$$Z = A \exp(B\sigma_p) \quad (2)$$

式中 A, B 为常数,由式(1)、(2)可以得如下关系式:

$$A \exp(B\sigma_p) = \zeta \exp\left(\frac{Q_d}{RT}\right) \quad (3)$$

对式(3)两边取自然对数整理得:

$$\sigma_p = \frac{1}{B} \ln \zeta + \frac{Q_d}{BRT} - \frac{1}{B} \ln A \quad (4)$$

当应变速率一定时,将式(4)中对 $1/T$ 求偏导数,得:

$$Q_d = BR \left[\frac{\partial(\sigma_p)}{\partial\left(\frac{1}{T}\right)} \right]_T \quad (5)$$

当形变温度一定时,将式(4)中对 $\ln \zeta$ 求偏导数

$$\text{得: } \frac{1}{B} = \left[\frac{\partial \sigma_p}{\partial(\ln \zeta)} \right]_T \quad (6)$$

对试验钢的变形温度,应变速率和应力应变曲线的峰值和稳态应力,分别用 σ_p, σ_s 对 $1/T, \ln \zeta$ 作图^[5-6],如图2,3所示,采用线性回归分析方法得出曲线的斜率,即可得峰值和稳态的 B 和 Q_d 值,从而得出 A 值,结果如表2。

2.3 峰值应力,稳态应力,峰值应变与 $\ln Z$ 的关系

将试验数据得到的峰值应力 σ_p ,稳态应力 σ_s ,

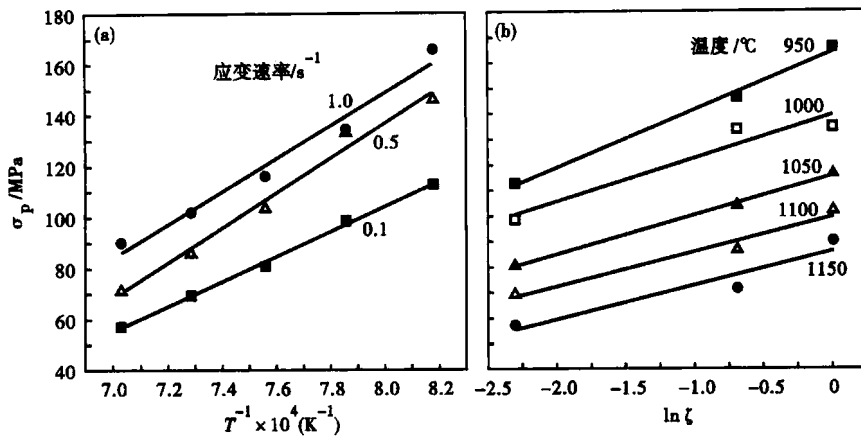


图 2 应变速率(a)和温度(b)对试验 EA4T 钢峰值应力的影响
Fig. 2 Effect of strain rate (a) and temperature (b) on peak stress of test EA4T steel

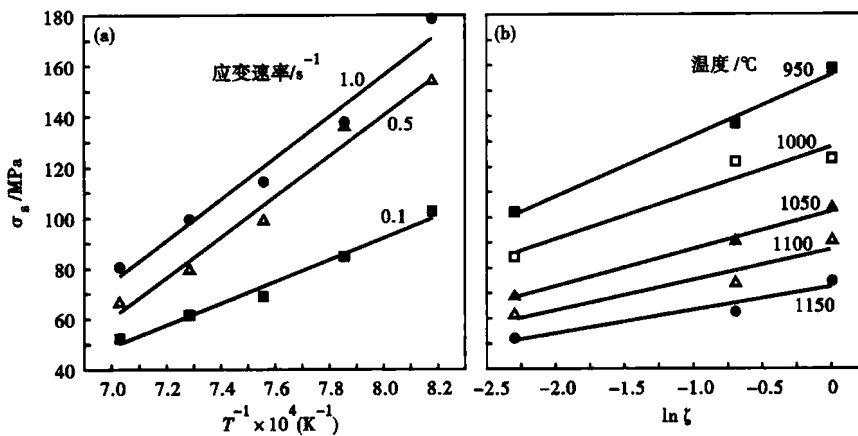


图 3 应变速率(a)和温度(b)对试验 EA4T 钢稳态应力的影响
Fig. 3 Effect of strain rate (a) and temperature (b) on steady stress of test EA4T steel

表 2 试验 EA4T 钢形变激活能以及 A, B 值
Table 2 Calculated activation energy of deformation and A and B value, test EA4T steel

项目	$Q_d / (\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$	A	B
峰值	320.22	8.3536×10^9	0.0634
稳态	361.91	1.0327×10^{12}	0.0716

峰值应变 ϵ_p 与 $\ln Z$ 作图,由图 4 可以看出,它们与 $\ln Z$ 成线性关系,且随着 $\ln Z$ 的增加而增大,回归结果如下式:

$$\sigma_p = 14.84 \ln Z - 321.4 \quad (7)$$

$$\sigma_s = 14.33 \ln Z - 365.0 \quad (8)$$

$$\epsilon_p = 0.045 \ln Z - 0.903 \quad (9)$$

2.4 变形抗力数学模型的建立

随着计算机参与对轧制钢生产过程的控制,研究者采用不同的结构式,拟合实验数据,得到不同的回归系数,为轧钢的生产提供在线控制的数学模型。

北京科技大学周纪华、管克智等人的研究^[7],在考虑了形变温度,应变速率和形变量因素的影响,经过试验数据的分析和验证,得出拟合较好的结构式,如式(10)表示:

$$\sigma = \exp\left(\frac{U_1}{T} + U_2\right) \left(\frac{\zeta}{10}\right)^{U_3 T + U_4} \left[U_6 \left(\frac{\epsilon}{0.4}\right)^{U_5} - (U_6 - 1) \frac{\epsilon}{0.4}\right] \quad (10)$$

式中: $U_1 \sim U_6$ - 回归系数,其值取决于钢种; $T = \frac{t + 273}{1000}$, t - 热变形温度/°C; ζ - 应变速率; ϵ - 应变变量, $\epsilon = \ln \frac{h_0}{h}$ 。

结合相关学者^[8-11]对变形抗力的研究,综合考虑对变形抗力影响的各种因素,最终采用式(11)的分段函数来计算试验 EA4T 钢的变形抗力即:

$$\sigma = \begin{cases} \sigma_p \left[\left(\frac{\epsilon}{\epsilon_p} \right) \exp\left(1 - \frac{\epsilon}{\epsilon_p}\right) \right]^0, & \epsilon \leq \epsilon_p \\ \sigma_s + (\sigma_p - \sigma_s) \times \exp\left[\theta_1 \left(\epsilon - \frac{\epsilon_p}{2} - \frac{\epsilon^2}{2\epsilon_p}\right)\right], & \epsilon > \epsilon_p \end{cases} \quad (11)$$

将 Z 参数代入式(7)~(9),得:

$$\sigma_p = 14.84 \left(\ln \zeta + \frac{320.219}{RT} \right) - 321.4 \quad (12)$$

$$\sigma_s = 14.33 \left(\ln \zeta + \frac{361.911}{RT} \right) - 365.0 \quad (13)$$

$$\epsilon_p = 0.045 \left(\ln \zeta + \frac{320.219}{RT} \right) - 0.903 \quad (14)$$

将式(12)~(14)代入式(11),得应力-应变数学模型,再将不同温度和应变速率下的实测数据代入进行线性回归,求出参数 $\theta = 0.539$, $\theta_1 = 8.217$,图 5 为试验钢在 1100 °C,应变速率 0.1~1.0 s⁻¹ 的应力-应变曲线实测值与预测值的比较,可以看出,此模型与实验曲线有良好的吻合度。

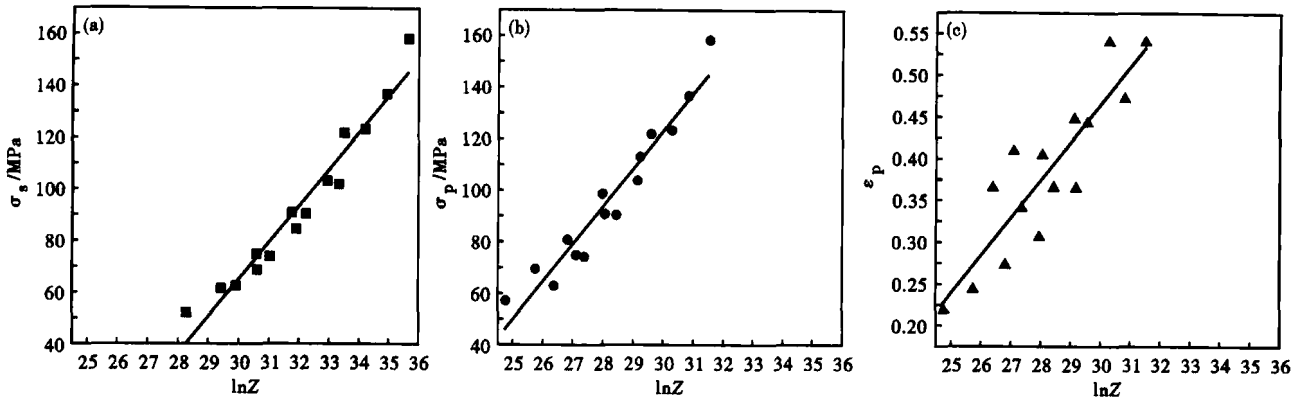


图4 Z参数对试验EA4T钢稳态应力(a)、峰值应力(b)和峰值应变(c)的影响
Fig. 4 Effect of Z parameter on steady stress (a), peak stress (b) and peak strain (c) of test EA4T steel

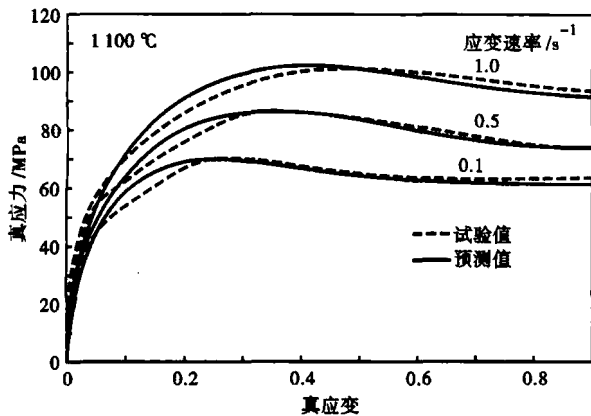


图5 应力-应变曲线试验值与预测值比较
Fig. 5 Comparison of true stress-strain curves between measured value and predicted value

3 结论

(1) 形变温度与应变速率对试验钢的影响如下:在同一温度下,应变速率增大,变形抗力增大,且达到峰值应力所需的真应变值增大;同一应变速率下,形变温度增高,变形抗力减小,且达到峰值应力所需的真应变值减小;此钢种在低的应变速率和高形变温度下容易发生动态再结晶。

(2) 试验EA4T钢的峰值激活能和稳态激活能分别为320.20 kJ/mol和361.91 kJ/mol。

(3) 峰值应力 σ_p ,峰值应变 ϵ_p ,稳态应力 σ_s 与 $\ln Z$ 呈线性关系,且随着 $\ln Z$ 增加而增大。

(4) 通过对试验数据的分析和计算模拟得出试

验钢的高温变形抗力的数学模型曲线与试验所得曲线吻合较好。

参考文献

- [1] 周纪华,管克智,伦怡馨.热变形工艺对钢的变形抗力影响的实验研究[J].钢铁,1989,24(9):27-42.
- [2] Spillers C M, Mcg W J. Hot Workability[J]. International Metallurgical Review, 1972, 158(17):1-24.
- [3] Medina S F, Hernandez C A. General Expression of Zener-Hollomon Parameter as a Function of Chemical Composition of Low Alloy and Microalloyed Steel[J]. Acta Mater, 1996, 44(1):137-148.
- [4] Karhausen K, Kopp R. Model for Integrated Process and Microstructure Simulation in Hot Forming[J]. Steel Research, 1992, 63(6):247-251.
- [5] 项建英,宋仁伯,任培东. 316L 不锈钢动态再结晶行为[J]. 北京科技大学学报, 2009, 21(12):1555-1559.
- [6] Polak E I, Jonas J J. Initiation of Dynamic Recrystallization in Constant Strain Rate Hot Deformation[J]. ISIJ International, 2003, 43(5):684-691.
- [7] 管克智,周纪华,朱其圣,等. 热轧金属塑性变形阻力研究[J]. 北京钢铁学院学报, 1986(2):123-138.
- [8] 熊尚武,王国栋,张强. 新变形抗力数学模型的建立与应用[J]. 钢铁, 1993, 28(5):21-26.
- [9] Ebrahimi R, Zahiri S H, Najafizad eh A. Mathematical Modelling of the Stress-Strain Curves of Ti-IF Steel at High Temperature[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 171:301-305.
- [10] Lin Yong Cheng, Chen Ming Song, Zhang Jun. Modeling of Flow Stress of 42CrMo Steel Under Hot Compression[J]. Materials Science and Engineering, 2009(A499):88-92.
- [11] 韩丽琦,臧勇,邹家祥,等. 基于人工神经网络的热轧碳钢变形抗力预报[J]. 北京科技大学学报, 2001, 23(2):131-133.

徐刚(1987-),男,博士研究生,特殊钢种及冶金固体废弃物再资源化研究。

收稿日期:2012-12-18

欢迎订阅《特殊钢》杂志

邮发代号:38-183 定价:16.00元/期 96.00元/年 邮编:435001

地址:湖北省黄石市黄石大道316号新冶钢-大冶特殊钢股份有限公司《特殊钢》杂志社