

动车组车轴用钢 EA1N 的热压缩流变应力行为

王玉玲 成生伟

(山西太钢不锈钢股份有限公司技术中心, 太原 030003)

摘要 试验用 EA1N 钢 (/% : 0.35C, 0.30Si, 0.90Mn, 0.013P, 0.008S, 0.15Cr, 0.10Ni, 0.10Cu, 0.04V, 0.04Al) 的冶金流程为 60 t EBT EAF-LF-VD-下铸 8.4 t 方锭-轧成 150 mm × 150 mm 方坯。采用 Gleeble-3800 型热模拟机试验研究了 EA1N 钢在 800 ~ 1 300 °C、应变速率 0.01 ~ 10 s⁻¹ 时的热压缩变形, 分析该钢变形时的流变应力、应变速率及变形温度之间的关系, 得出流变应力方程。结果表明, EA1N 钢在热压缩变形时流变应力随应变速率提高而增大, 随变形温度升高而降低, 当温度高于 1 100 °C 和应变速率大于 1 s⁻¹ 时, 该钢流变曲线呈现明显的动态再结晶特征。EA1N 钢的热变形激活能为 392.43 kJ/mol。

关键词 EA1N 车轴钢 热压缩变形 变形激活能 本构方程

Behavior of Hot Compression Flow Stress of Steel EA1N for High Speed Train Axle

Wang Yuling and Cheng Shengwei

Technical Center, Shanxi Taiyuan Iron and steel (Group) Co Ltd, Taiyuan 030003

Abstract Metallurgical flowsheet of tested steel EA1N (/% : 0.35C, 0.30Si, 0.90Mn, 0.013P, 0.008S, 0.15Cr, 0.10Ni, 0.10Cu, 0.04V, 0.04Al) is 60 t EBT EAF-LF-VD-bottom casting 8.4 t square ingot-hot-rolled to 150 mm × 150 mm billet. The hot compression deformation of steel EA1N with strain rate 0.01 ~ 10 s⁻¹ at 800 ~ 1 300 °C has been tested and studied by using Gleeble-3800 thermal simulation tester to analyze in hot deformation of the steel the relation between flow stress, strain rate and deformation temperature and get the flow stress equation. Results show that in hot compression deformation of steel EA1N with increasing strain rate the flow stress increases and with increasing deforming temperature the flow stress decreases, and as the temperature is more than 1 100 °C and the strain rate is larger than 1 s⁻¹, the feature of dynamic recrystallization occurs obviously on flow stress curves of steel. The hot deformation activation energy of steel EA1N is 392.43 kJ/mol.

Material Index Axle Steel EA1N, Hot Compression Deformation, Deformation Activation Energy, Constitutive Equation

EA1N 钢在国际上广泛使用于动车组车轴, 也是国际最先进的车轴标准 (EN13261) 中规定的高速客车车轴用钢。本文主要研究了 EA1N 钢在热压缩过程中的真应力-应变曲线, 以及流变应力与变形速率、变形温度的关系, 确立材料热变形的本构方程。

1 试验材料与方法

试验用钢采用 60 t EBT 电弧炉冶炼, LF 精炼、VD 真空脱气处理, 下铸 8.4 t 方锭, Φ 1 000 mm 可逆式轧机轧成 150 mm × 150 mm 钢坯。自钢坯对角线距角部 1/4 处取样。化学成分 (/%) 为 0.35C, 0.30Si, 0.90Mn, 0.013P, 0.008S, 0.15Cr, 0.10Cu, 0.10Ni, 0.04V, 0.04Al。将材料加工成直径 × 高度为 Φ 10 mm × 15 mm 的圆柱热压缩试样。

高温压缩试验在 Gleeble-3800 热模拟试验机上进行。试验时将试样以 5 °C/s 的速度加热到规定温度, 保温 3 min, 然后按预先设定的变形速率进行热压缩试验: 热压缩温度为 900, 1 000, 1 100, 1 200,

1 300 °C, 应变速率为 0.01, 0.1, 1, 10 s⁻¹, 最大热压缩量达到真应变 0.7。

2 试验结果与讨论

2.1 真应力-应变曲线

图 1 为不同应变速率下 EA1N 钢在各温度变形的真应力-应变曲线。从图 1 可以看出, 在相同的应变速率下, 材料的真应力随温度的增加而下降; 在相同的温度下, 随应变速率的增加, 真应力值升高。图 1(a, b) 中, 900 ~ 1 100 °C 的曲线其应力值在较大应变下保持不变或者仍上升, 为动态回复型应力-应变曲线^[1]; 图 1(a, b) 中 1 200 °C、1 300 °C 和图 1(c, d) 中的曲线表现为应力达到峰值后下降至某稳定值保持不变, 为动态再结晶型应力-应变曲线^[2]。可以推知, 随着变形温度的下降和变形速率的升高, EA1N 钢的真应力-应变曲线由动态再结晶型向动态回复型转变。

应变速率对钢的流变应力有显著影响。在温度

一定、材料的组织结构不变的情况下,随应变速率的增大,位错结构形成的速度增大,晶体内由原子及位错间的相互作用迅速形成内应力场和能量势垒,但是,变形一般由扩散控制的位错攀移引起或者由割阶攀移控制的螺位错开动引起,位错运动需要外力和热激活的驱动来克服由内应力构成的障碍和能量势垒。温度一定的情况下,热起伏的作用是有限的,因此流变应力随应变速率的增大而增大^[3]。变形温度是影响流变应力的另一主要原因,随着变形温度的升高,原子活动的动能增加,各种点缺陷的扩散加快,依赖于扩散的位错开动易于进行,热激活能的增强,位错运动依靠的有效应力减小致使流变应力降低^[4];另一方面,高温下变形将发生动态回复和动态再结晶,这些软化作用也随着温度的提高而加强,可减轻或消除由于塑性变形而产生的加工硬化^[5]。

峰值应力的出现是由位错堆积造成的硬化和动态再结晶软化共同作用的结果。金属的高温变形时一个热激活过程,温度升高会使热激活过程增强,可以立即引起回复现象的出现而不需要孕育期。在这过程中,由加工硬化造成的位错密度会有所下降,宏观上表现为流变应力下降^[5]。

金属在高温下的塑性变形是一个受热激活控制的过程,应变速率 $\dot{\epsilon}$ 、温度 T 与流变应力 σ 可用 Zener-Hollomon 参数 Z 表示^[6-7]:

$$Z = \dot{\epsilon} \exp(Q/RT) \quad (1)$$

式中: $\dot{\epsilon}$ - 应变速率/ s^{-1} ; T - 热力学温度/ K ; R - 摩尔气体常数; Q - 变形激活能/ $KJ \cdot mol^{-1}$ 。

热变形时 $\dot{\epsilon}$ 、 T 和 σ 之间的数学关系主要有以下 3 种情况:

低应力水平情况下($\alpha\sigma < 0.8$ 时):

$$\dot{\epsilon} = A_1 \sigma^n \exp[-Q/RT] \quad (2)$$

高应力水平下($\alpha\sigma > 1.2$ 时):

$$\dot{\epsilon} = A_2 \exp(\beta\sigma) \exp(-Q/RT) \quad (3)$$

整个应力水平时:

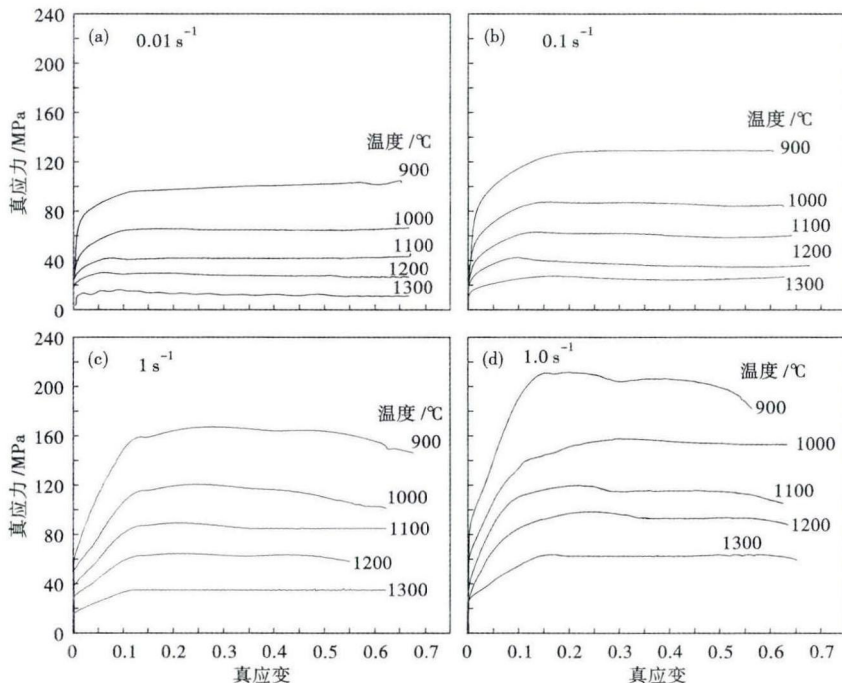


图 1 EA1N 钢应变速率($\dot{\epsilon}$)/ s^{-1} : (a)0.01; (b)0.1; (c)1; (d)10 时的热压缩变形的真应力-应变曲线

Fig. 1 True stress-true strain curves of steel EA1N during hot compression deformation process with strain rate ($\dot{\epsilon}$)/ s^{-1} : 0.01 (a); 0.1 (b); 1 (c) and 10 (d)

$$\dot{\epsilon} = A[\sinh(\alpha\sigma)]^n \exp(-Q/RT) \quad (4)$$

式中: A_1, A_2, β - 均为与温度无关的常数; A - 结构因子/ s^{-1} ; σ - 流变应力/ MPa ; α - 应力水平参数/ MPa^{-1} , $\alpha = \beta/n$; n - 应力指数。

对式(2)和(3)两边取对数得,并取 σ 为稳态流变应力,分别以 $\ln \dot{\epsilon}$ 和 $\ln \sigma$ 、 $\ln \dot{\epsilon}$ 和 σ 为坐标作图,利用最小二乘法线性回归,可得图 2。 n 可取图 2(a)中 5 条直线斜率的平均值,得 $n = 6.975$; β 值可取图 2(b)中 5 条直线的斜率的平均值,得 $\beta = 0.104$ 。 $\alpha = \beta/n = 0.015$ 。

在整个应力水平下,对式(4)两边取自然对数的微分可得:

$$Q = R \left\{ \frac{\partial \ln \dot{\epsilon}}{\partial \ln[\sinh(\alpha\sigma)]} \right\}_T \left\{ \frac{\partial \ln[\sinh(\alpha\sigma)]}{\partial (1/T)} \right\}_\sigma \quad (5)$$

取 EA1N 钢在不同应变速率和温度下的流变应力、应变和各自的应力水平参数,做出 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)] - 1/T$ 以及 $\ln \dot{\epsilon} - \ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 关系曲线,如图 3 所示。根据图 3(a)可以求得直线的平均斜率为 10 305.8,图 3(b)直线的平均斜率为 4.58,从而可以得到变形激活能 $Q = 392.43 \text{ kJ/mol}$ 。

将式(4)代入(1),并对式两边取自然对数,可得:

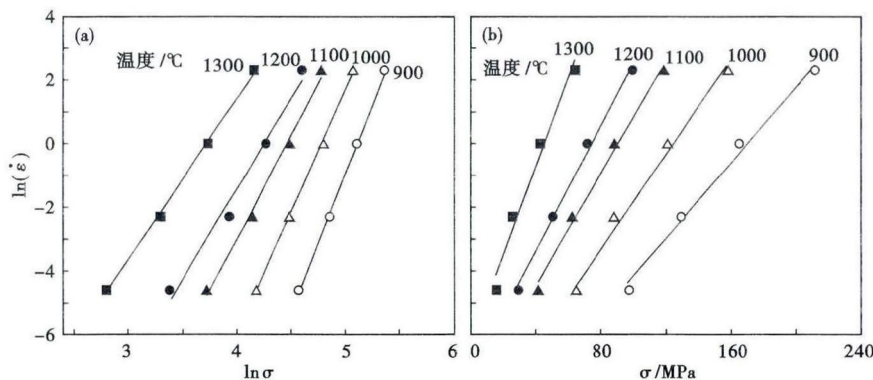


图 2 EA1N 钢峰值应力 [$\ln\sigma$ (a), σ (b)] 与应变速率之间的关系

Fig. 2 Relation between peak stress [$\ln\sigma$ (a), σ (b)] and strain rate of steel EA1N

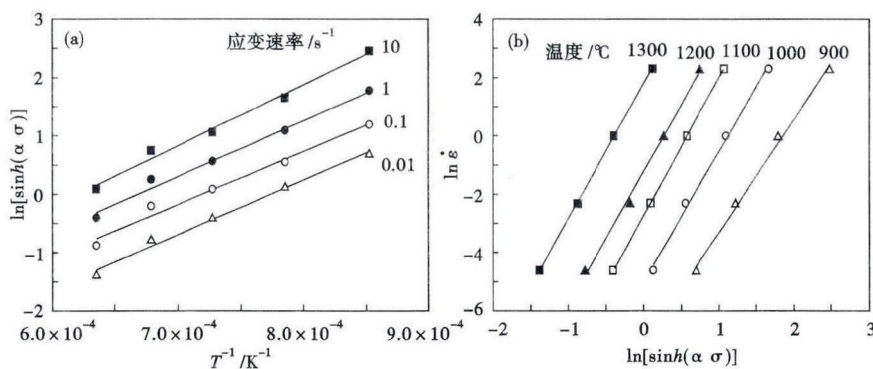


图 3 (a) $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 和 $1/T$; (b) $\ln\dot{\epsilon}$ 和 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 的关系

Fig. 3 Relation between $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ and $1/T$ (a) and between $\ln\dot{\epsilon}$ and $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ (b)

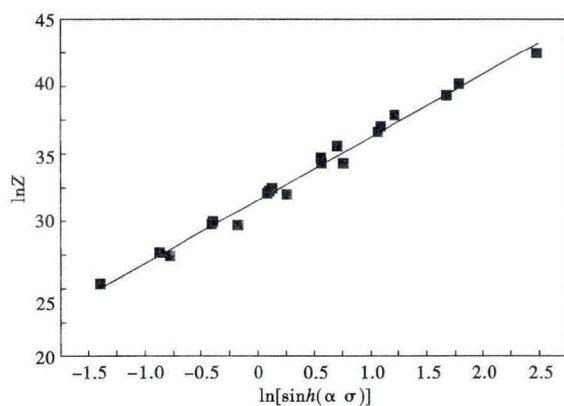


图 4 参数 Z 与 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 的关系

Fig. 4 Relation between Z parameter and $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$

$$\ln Z = \ln \dot{\epsilon} + Q/RT \quad (6)$$

$$\ln Z = \ln A + n \ln[\sinh(\alpha\sigma)] \quad (7)$$

分别将材料的变形激活能 Q 、 R 以及对应的变形温度 T 、应变速率代入式 (6) 可求得相应的 $\ln Z$ 值。然后分别取不同应变速率和温度下的稳态流变应力、应变值, 做出 $\ln Z - \ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 的散点图, 并

作线性回归, 如图 4 所示。由式 (7) 可知, $\ln A$ 和 n 分别为 $\ln Z - \ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 关系曲线中的截距和斜率。可得 $n = 4.67$, $\ln A = 23.3$, 则 $A = 1.315 \times 10^{10}$ 。

将求得的各材料参数代入式 (4), 得到 EA1N 钢热压缩时的流变应力方程为:

$$\dot{\epsilon} = 1.315 \times 10^{10} \cdot [\sinh(0.015\sigma)]^{4.67} \exp(-392.43 \times 10^3/RT) \quad (8)$$

利用式 (8) 可为 EA1N 钢变形组织的预测、控制及热加工工艺的制定提供科学依据。

3 结论

(1) EA1N 钢热压缩变形时的流变应力随应变速率提高而增大, 随变形温度升高而降低。当温度高于 $1100\text{ }^\circ\text{C}$ 和应变速率大于 1 s^{-1} 时, 该钢流变曲线呈现明显的动态再结晶特征。

(2) EA1N 钢热压缩变形时的热变形激活能为 392.43 kJ/mol , 流变应力方程为: $\dot{\epsilon} = 1.315 \times 10^{10} [\sinh(0.015\sigma)]^{4.67} \exp(-392.43 \times 10^3/RT)$ 。

参考文献

- [1] 袁武华, 周恒, 傅强. 微合金中碳钢的热压缩变形流变行为研究[J]. 材料科学与工程, 2011, 19(1): 21-27.
- [2] Meyers M A. 材料的动力学行为[M]. 张庆明, 刘彦, 黄凤雷, 译. 北京: 国防工业出版社, 2006: 260.
- [3] 徐刚, 李士琦, 王乐, 等. 高铁用 EA4T 车轴钢热变形行为及变形抗力模型的试验研究[J]. 特殊钢, 2013, 34(3): 60-63.
- [4] 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.
- [5] 蔺永诚, 陈明松, 钟掘. 42CrMo 钢的热压缩流变应力行为[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2008, 39(3): 549-553.
- [6] McQueen H J, Yue S, Ryan N D, et al. Hot Working Characteristics of Steels in Austenitic State[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1995, 53(1-2): 293-310.
- [7] Zener C, Hollomon H. Effect of Strain-Rate Upon the Plastic Flow of Steel[J]. Journal of Applied Physics, 1944, 15(1): 22-27.

王玉玲(1963-), 女, 硕士(北京科技大学), 教授级高级工程师, 包头钢铁学院(本科)毕业, 钢铁新产品和工业技术开发。E-mail: wangYL@tisco.com.cn