

CL70 车轮钢热压缩流变应力行为

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 用 Gleeble-3800 热模拟机研究了 CL70 车轮钢在应变速率 $0.01 \sim 10 \text{ s}^{-1}$ 、 $900 \sim 1300 \text{ }^\circ\text{C}$ 时的高温热压缩行为,分析了热压缩变形时该钢的流变应力、变形温度及应变速率之间的关系,通过线性回归确定该钢流变应力本构方程。结果表明,CL70 钢在高温压缩时流变应力随变形温度的减小而增大,随应变速率升高而增大。当应变速率 $\leq 1 \text{ s}^{-1}$ 时,CL70 钢的流变应力曲线表现为动态再结晶特征。CL70 钢的热变形激活能为 401.06 kJ/mol 。

关键词 CL70 重载车轮钢 热压缩变形 变形激活能 本构方程

Behavior of Hot Compression Flow Stress of Steel CL70 for Heavy Haul Wheel

Cheng shengwei

(Technology center, Shanxi Taigang Stainless Steel Co Ltd, Taiyuan 030003)

Abstract Hot compression deformation of steel wheel CL70 with strain rate $0.01 \sim 10 \text{ s}^{-1}$ at $900 \sim 1300 \text{ }^\circ\text{C}$ has been tested and studied by using Gleeble-3800 thermo-mechanical simulator to analyze in hot deformation of the steel the relation between flow stress, strain rate and deformation temperature and get the flow stress constitutive equation. Results show that the flow stress increases of with the increase strain rates and decreases of temperature, and as the strain rate is less than 1 s^{-1} , the feature of dynamic recrystallization occurs obviously on flow stress curves of steel CL70. The hot deform activation energy of steel CL70 is 401.06 kJ/mol .

Material Index Heavy Haul Wheel Steel CL70, Hot Compression Deformation, Deformation Activation Energy, Constitutive Equation

目前国内外对 CL70 车轮钢的研究主要集中在摩擦学性能、力学性能及抗热损伤性能方面^[1],本试验通过研究 CL70 车轮钢的高温热塑性变形行为,确定其高温本构方程,以期 CL70 车轮钢热加工工艺的制定与优化提供依据。

1 试验材料与方法

试验用钢采用 80 t EBT 电弧炉冶炼,LF 精炼、VD 真空炉脱气处理,下铸 3 t 圆锭,锻造成 $200 \text{ mm} \times 200 \text{ (mm)}$ 钢坯。自钢坯对角线距角部 $1/4$ 处取样,化学成分 (%): 0.72C , 0.72Si , 0.82Mn , 0.008P , 0.01S , 0.13Cr , 0.002Cu , 0.012Al 。将材料加工成 $\Phi 10 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ 的热压缩试样。

在 Gleeble-3800 热模拟试验机上进行高温压缩试验。压缩时在试样两端涂敷高温石墨润滑剂,并在试样与压头之间放置钼箔以减少端面摩擦的影响。压缩试验温度为 $900 \sim 1300 \text{ }^\circ\text{C}$,应变速率为 $0.01, 0.1, 1, 10 \text{ s}^{-1}$ 。试验时将试样以 $5 \text{ }^\circ\text{C/s}$ 的速度升温至预设温度,保温 3 min 以使材料温度均匀,然后按照设定的变形速率进行压缩试验,压缩量为

真应变 0.7。

2 试验结果及讨论

2.1 真应力-应变曲线

图 1 为四种应变速率下 CL70 钢在 $900 \sim 1300 \text{ }^\circ\text{C}$ 的真应力-真应变曲线。可以看出,在初始变形阶段,真应力随着应变的增加快速增大,当应变达到某一临界值后,真应力趋于恒定。在应变速率恒定情况下,材料的真应力随变形温度的升高而下降;在温度恒定情况下,材料的真应力随应变速率的增加而升高。图 1(a)、(b)和图 1(c) $100 \sim 1300 \text{ }^\circ\text{C}$ 的真应力-真应变曲线中,应力达到峰值后下降至某一值基本保持不变,表现为动态再结晶型应力-应变曲线^[2-5];图 1(c)中 $900 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ 和图 1(d)的真应力-真应变曲线中其应力值在较大应变下保持不变或者仍有上升,表现为动态回复型应力-应变曲线^[3-5]。可以推知,随着变形速率的降低和变形温度的升高,CL70 钢的真应力-真应变曲线由动态回复型向动态再结晶型转变。

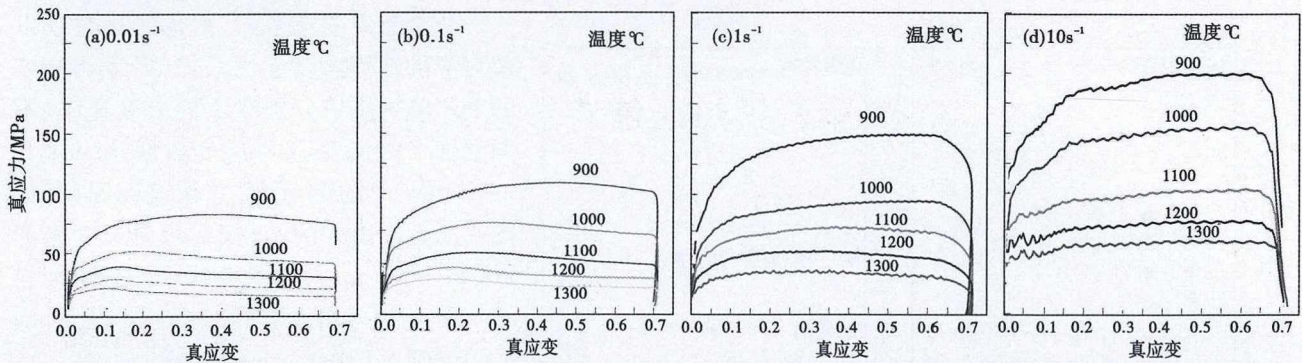


图 1 CL70 钢在 900 ~ 1300 °C, (a) $\dot{\epsilon}=0.01\text{s}^{-1}$; (b) $\dot{\epsilon}=0.1\text{s}^{-1}$; (c) $\dot{\epsilon}=1\text{s}^{-1}$; (d) $\dot{\epsilon}=10\text{s}^{-1}$ 下热压缩变形的真应力-真应变曲线
Fig. 1 True stress-strain curves of CL70 steel during hot compression deformation with $\dot{\epsilon}$ (a)0.01/s; (b)0.1/s; (c)1/s and (d)10/s at 900 ~ 1300 °C

热变形过程中,形变引起的位错增殖导致材料的加工硬化,在一定温度下,随着应变速率的增加,材料的位错密度迅速增加,其应力也随之增大。当变形量到达一定程度时,位错将通过攀移或交滑移合并、重组发生动态回复或动态再结晶从而导致材料软化,减轻或消除了热塑性变形产生的加工硬化。在低应变速率和高温情况下,达到临界应变以后,材料将发生动态再结晶,此时,材料的主要软化机制为动态再结晶,流变应力达到峰值后略微下降。在高应变速率和低温状态下,由于变形速率快,变形温度低,积累的位错能不足以达到动态再结晶的发生条件,此时主要软化机制为动态回复,当动态回复所产生的软化与加工硬化达到平衡后,流变应力也趋于一稳定值^[3-7]。

2.2 热激活能与本构方程

高温下金属的塑性变形是受热激活控制的过程,Zener-Hollomon 参数 Z 常用来描述应变速率、变形温度 T 之间的关系^[6-7]。

$$Z = \dot{\epsilon} \exp(Q/PT) \tag{1}$$

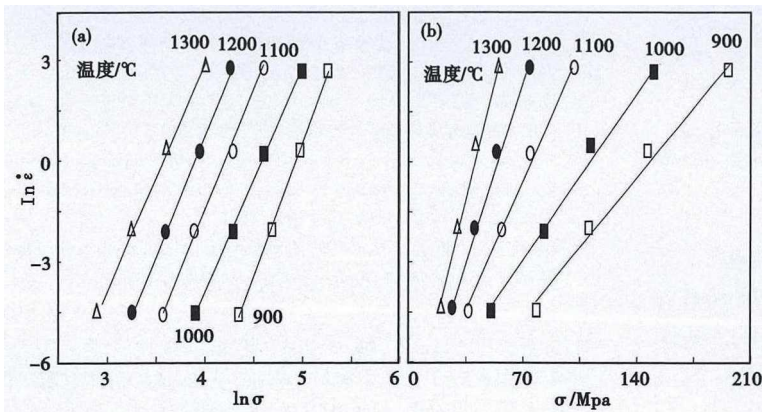


图 2 CL70 钢峰值应力 $\ln\sigma$ (a)、 σ (b)与应变速率 $\ln \dot{\epsilon}$ 之间的关系
Fig. 2 Relationship between peak stress $\ln\sigma$ (a)、 σ (b) and $\ln \dot{\epsilon}$ of CL70 steel

式中: $\dot{\epsilon}$ -应变速率/ s^{-1} ; Q -变形激活能/ $(\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$; R -气体摩尔常数; T -热力学温度/ K 。

根据应力水平,热变形时, $\dot{\epsilon}$ 与 T 和 Q 之间的数学关系分下列 3 种情况。

低应力水平 ($\alpha\sigma < 0.8$ 时):

$$\dot{\epsilon} = A_1 \sigma^n \exp(-Q/PT) \tag{2}$$

高应力水平 ($\alpha\sigma > 1.2$ 时):

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

整个应力水平:

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

式中: A_1, A_2, β, A 均为常数; α -应力水平参数/ MPa^{-1} ; σ -峰值流变应力/ MPa ; $\alpha = \beta/n$; n -应力指数。

对式(2)和(3)两边取对数,根据试验所得数据,分别以 $\ln \dot{\epsilon}$ 和 $\ln \sigma$ 、 $\ln \dot{\epsilon}$ 和 σ 为坐标作图,如图 2 所示。很明显, $\ln \dot{\epsilon}$ - $\ln \sigma$ 、 $\ln \dot{\epsilon}$ - σ 呈直线关系。图 2 (a) 中,利用最小二乘法回归得出 5 条直线的斜率, n 取 5 条直线斜率的平均值, $n = 6.732$; 值取图 2 (b) 中 5 条直线斜率的平均值,得 $\beta = 0.121, a = \beta/n = 0.018$

在整个应力水平下,对式(4)取自然对数并求偏微分得到下式:

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

将 CL70 钢不同温度、不同应变速率下的流变应力各自的应力水平参数做 $\ln [\sinh(\alpha\sigma)]$ - $1/T$ 关系曲线,见图 3(a),将 CL70 钢不同流变应力、不同温度下的应变速率参数做下的 $\ln \dot{\epsilon}$ -

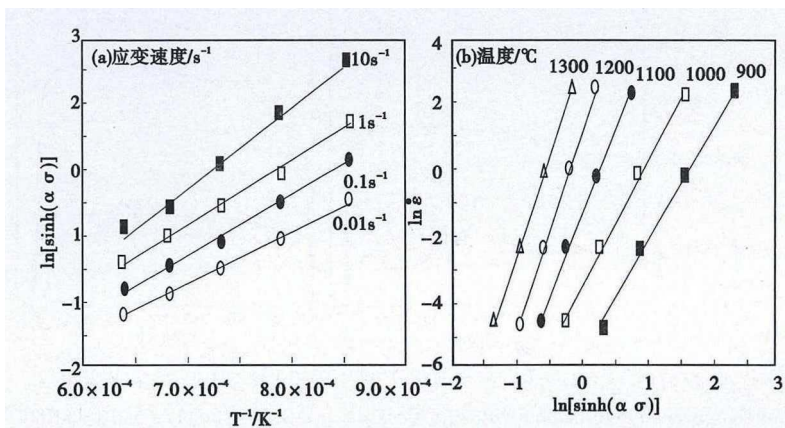


图 3 (a) $\partial \ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 和 $1/T$; (b) $\partial \ln \dot{\epsilon}$ 和 $\partial \ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 的关系
Fig. 3 Relation between $\partial \ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ and $1/T$ (a) and between $\partial \ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ and $1/T$ (b)

$\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 关系曲线, 见图 3(b)。根据图 3(a) 可以求得不同应变速率下直线的斜率分别为 9 510.63、9 688.27、10 262.63、11 075.78, 图 3(b) 直线的平均斜率为 4.76, 可得如表 1 所列的不同应变速率下的变形激活能。由此可知 CL70 钢的动态再结晶热激活能为 401.06 kJ/mol。将式(4)代入(1), 并对两边取自然对数:

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

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

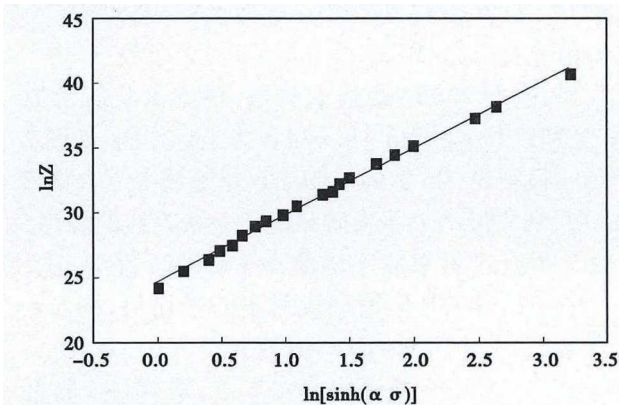


图 4 CL70 钢参数 Z 与 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 的关系

Fig. 4 Relation of $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ and Zener-Hollomon parameter $\ln Z$ for steel CL70

表 1 不同应变速率下的 CL70 热变形激活能

Table 1 Deformation activation energy of CL70 steel at different strain rates

应变速率 $\dot{\epsilon}/s^{-1}$	热变形激活能/(kJ·mol ⁻¹)
0.01	376.38
0.10	383.41
1.00	406.1410
10.0	438.32

分别将应变速率 $\dot{\epsilon}$ 、变形激活能 Q 以及对应的变形温度 T 代入式(6)求得相应的 $\ln Z$ 值。然后分别取不同应变速率、不同温度下的流变应力-应变数据, 做 $\ln Z - \ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 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。所以的可得 $n = 4.82$, $\ln A = 23.6$, 则 $A = 1.802 \times 10^{10}$ 。

将上述求得的材料参数代入公式(4), 得到 CL70 车轮钢热塑性变形的流变应力方程为:

$$\dot{\epsilon} = 1.802 \times 10^{10} [\sinh(0.018\sigma)]^{6.732} \exp(-401.06 \times 10^3/RT) \quad (8)$$

利用式(8)可为 CL70 车轮钢组织的预测、控制及热加工工艺的制定提供理论依据。

3 结论

(1) CL70 车轮钢热塑性变形时流变应力随变形温度的降低而升高, 随应变速率的增大而提高。当应变速率 $\leq 1 s^{-1}$ 时, 流变应力曲线表现为动态再结晶特征。

(2) CL70 车轮钢的变形激活能为 $Q = 401.06 kJ/mol$, 流变应力本构方程为: $\dot{\epsilon} = 1.802 \times 10^{10} [\sinh(0.018\sigma)]^{6.732} \exp(-401.06 \times 10^3/RT)$ 。

国家重点研发项目资助(2017YEB0304600)

参考文献

[1] 张 斌, 张 宏, 付秀琴. 新材质重载货车车轮性能研究[J]. 中国铁道科学, 2009, 30(5): 66-70.
 [2] 胡美娟, 王 鹏, 李金凤, 等. 20CrMo 合金钢热压缩变形流变应力研究[J]. 热加工工艺, 2011, 40(17): 42-44.
 [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] 王玉玲, 成生伟. 动车组车轴用钢 EA1N 的热压缩流变应力行为[J]. 特殊钢, 2017, 38(1): 63-65.
 [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] Mc Queen 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.

成生伟(1979-), 男, 博士, 2017 年北京科技大学, 工程师, 2004 年太原理工大学(本科)毕业, 从事钢铁新产品和工业技术开发。E-mail: csw_1001@126.com。