

高速列车车轴钢 30NiCrMoV12 的热变形行为

陈楚何毅黄军波霍洁

(中国一重能源装备材料科学研究所,天津 300457)

摘要 通过 $\Phi 250$ mm 锻件切取的试样在 Gleeble-3500 热模拟机于 850 ~ 1 150 °C 以应变速率 0.01 ~ 10 s⁻¹ 对高速列车车轴钢 30NiCrMoV12 (/% : 0.26C, 0.33Si, 0.62Mn, 3.01Ni, 0.82Cr, 0.56Mo, 0.10V) 进行了热压缩试验。研究了车轴钢在热变形过程中奥氏体变形行为及再结晶规律, 确定了车轴钢的热变形方程, 建立应变变量 ϵ 为 0.5 和 0.9 的热加工图。结果表明, 在应变速率一定时, 温度越高, 变形量越大, 则越有利于动态再结晶的发生; 随着温度升高以及应变速率降低, 能量耗散效率 η 逐渐升高; 当真应变 0.5, 温度 1 100 °C, 应变速率 0.01 s⁻¹ 时, 变形能量耗散效率达到最大值 0.41。该车轴钢在 1 000 ~ 1 150 °C, 应变速率 0.01 ~ 1.0 s⁻¹ 时, 具有较好的可锻性。

关键词 高速列车车轴 30NiCrMoV12 钢 热变形激活能 热加工图 可锻性

Behavior of Hot Deformation of Steel 30NiCrMoV12 for High-Speed Train Axles

Chen Chu, He Yi, Huang Junbo and Huo Jie

(Materials Research Institute for Energy Equipment, China First Heavy Industries, Tianjin 300457)

Abstract The hot compression test on steel 30NiCrMoV12 for high speed train axles (/% : 0.26C, 0.33Si, 0.62Mn, 3.01Ni, 0.82Cr, 0.56Mo, 0.10V) with strain rate 0.01 ~ 10 s⁻¹ at 850 ~ 1 150 °C has been carried out by using Gleeble-3500 thermal simulation machine with specimen cutting from $\Phi 250$ mm forges. The austenite deformation behavior and rule of recrystallization of steel for axles during hot deformation process are studied to define the hot deformation equation of steel for axles and establish its hot working map with true strain ϵ 0.5 and 0.9. Results show that at definite strain rate, the higher temperature and the heavier deformation, the more beneficial to occurrence of dynamic recrystallization of steel; with raising temperature and decreasing strain rate, the efficiency of energy dissipation η gradually increases; and with true strain 0.5 and strain rate 0.01 s⁻¹ at 1 100 °C the efficiency of energy dissipation is up to max value- 0.41. At 1 000 ~ 1 150 °C with strain rate 0.01 ~ 1.0 s⁻¹ the steel for axles has better forgeability.

Material Index High Speed Train Axles, Steel 30NiCrMoV12, Hot Deformation Activation Energy, Hot Working Diagram, Forgeability

到 2020 年我国将建成“四纵四横”铁路快速客运通道以及三个城际快速客运系统。快速客运网总里程 5 万 km 以上, 大约要运行 2 万辆以上动车组, 高速列车车轴钢需求量巨大。因此, 高速列车重要部件的国产化是我国装备制造业发展的必然要求。

本文主要针对高速列车车轴材料 30NiCrMoV12 钢的热变形行为进行研究。利用 Gleeble-3500 热模拟试验机进行热压缩实验, 主要研究变形温度、应变速率等参数对热变形力学参数、显微组织和再结晶规律的影响, 从而建立热加工图 (Processing map), 研究结果可为高速列车车轴 30NiCrMoV12 钢制定合理的轧制或锻造工艺, 有效控制组织和性能。

1 试验材料及方法

试验所用材料取自工业生产试制的 30NiCrMoV12 钢锻件, 生产工艺为: EAF + LF + VD 冶炼工艺, 钢水容量为 44 t, 铸锭重 40 t。在 4 500 t 快锻机上锻造成车轴毛坯件, 始锻温度为 1 180 °C,

终锻温度 800 °C, 锻后冷却方式为空冷, 锻后毛坯直径为 250 mm, 经锻后正火处理后沿纵向切取试验料, 加工成 $\Phi 8$ mm \times 12 mm 的压缩试样。车轴材料的主要化学成分如表 1 所示。

Gleeble-3500 热力学模拟试验机热压缩试验参数为: 变形温度分别为 850、900、950、1 000、1 050、1 100、1 150 °C; 应变速率为 0.01、0.1、1.0、10 s⁻¹, 压缩量为 60% (真应变约 0.9)。试验时首先将试样以 10 °C/s 升至 1 180 °C, 保温 5 min, 然后再以 5 °C/s 降到变形温度, 保温 1 min, 变形后的试样进行风冷快速冷却。试样采用饱和苦味酸溶液腐蚀后观察金相组织。

表 1 试验用高速列车车轴钢 30NiCrMoV12 的化学成分/%
Table 1 Analysis of test steel 30NiCrMoV12 for high speed train axles /%

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V
0.26	0.33	0.62	0.82	3.01	0.56	0.10

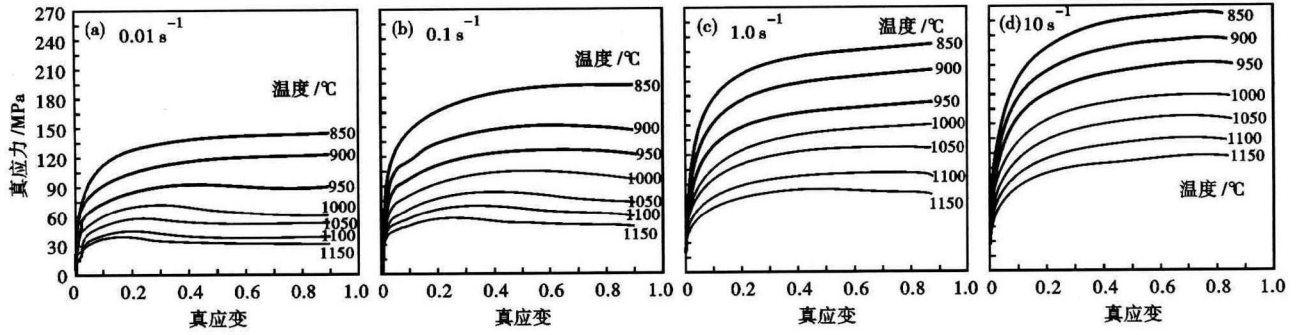


图 1 高速列车车轴钢 30NiCrMoV12 热变形的真应力-应变曲线,应变速率/s⁻¹:(a)0.01;(b)0.1;(c)1.0;(d)10

Fig. 1 True stress-strain curves of hot deforming steel 30NiCrMoV12 for high speed train axles with strain rate /s⁻¹: 0.01 (a), 0.1 (b), 1.0 (c) and 10 (d)

2 试验结果与分析

2.1 热变形应力应变曲线

高速列车车轴钢 30NiCrMoV12 在不同变形温度和应变速率下的真应力-应变曲线如图 1 所示。通过对比分析各应力应变曲线值可知,随着变形温度的升高及应变速率的降低,流变曲线的类型由加工硬化型向动态回复和动态再结晶型转变;在变形量和变形温度相同条件下,流变应力均随应变速率的增加而升高;应变速率一定时,流变应力随变形温度的升高而降低。

2.2 热变形方程

影响热变形过程的主要因素有变形温度、应变速率和变形量^[1]。其中变形温度和应变速率对热变形过程的影响更为显著。变形温度及应变速率对峰值应力的影响方程式^[2-3]可表示为:

$$\dot{\epsilon} = A [\sinh(\alpha\sigma_p)]^n \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (1)$$

式中:A- 结构因子; $\dot{\epsilon}$ - 应变速率; α - 应力水平参数; σ_p - 峰值应力;R- 气体常数;T- 热力学绝对温度;n- 应力应变指数;Q- 热变形激活能,它是反映高温塑性变形时应变硬化与动态软化过程之间的平衡关系。对公式(1)两边取对数,得:

$$\ln \sinh(\alpha\sigma_p) = -\frac{1}{n} \ln A + \frac{1}{n} \ln \dot{\epsilon} + \frac{Q}{nRT} \quad (2)$$

由公式(2)可知, $\ln \sinh(\alpha\sigma_p) - \ln \dot{\epsilon}$ 与 $\ln \sinh(\alpha\sigma_p) - 1/T$ 均为线性关系,将高速列车车轴钢 30NiCrMoV12 的实测流变应力的

结果进行多元回归分析,可以求得: $Q = 382\ 679$ J/mol, $n = 6$, $A = 4.38 \times 10^{14}$ 。则高铁车轴钢的热变形方程为:

$$\dot{\epsilon} = 4.38 \times 10^{14} [\sinh(\alpha\sigma_p)]^6 \exp\left(-\frac{382\ 679}{RT}\right) \quad (3)$$

图 2(a) 为 30NiCrMoV12 钢在不同温度下应变速率对峰值应力的影响,可以看出,在同一变形温度下,高铁车轴钢的 $\ln \sinh(\alpha\sigma_p) - \ln \dot{\epsilon}$ 呈线性关系,随着应变速率的增加,峰值应力呈线性增加,各个温度下变化率几乎是一致的。图 2(b) 给出了 30NiCrMoV12 钢在不同的应变速率下,热变形峰值应力与变形温度的关系,应变速率一定时,奥氏体不锈钢的 $\ln \sinh(\alpha\sigma_p)$ 与 $1/T$ 呈线性关系。随着变形温度的升高,热变形峰值应力迅速降低。

Z 参数^[4] (Zener-Hollomon 参数) 是温度矫正过的应变速率参数,它是综合描述在热加工过程形变温度及应变速率等影响的一个重要参数,通过已求得的热变形激活能 Q,可以计算出高速列车车轴钢

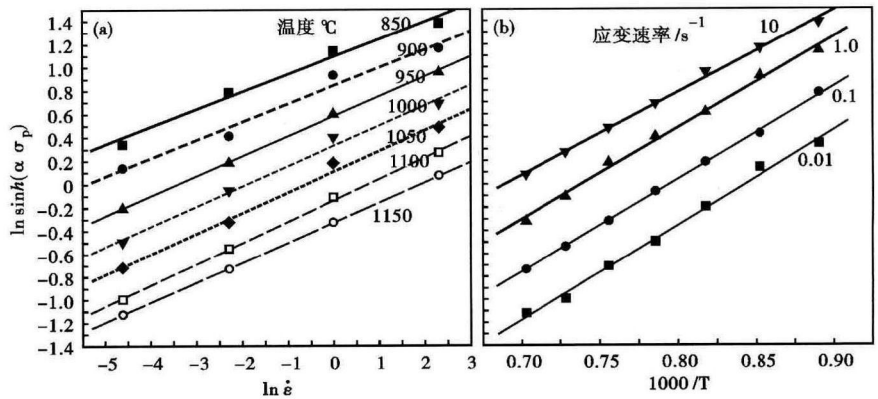


图 2 高速列车车轴钢 30NiCrMoV12 热变形过程中峰值应力和应变速率 (a)、温度 (b) 的关系

Fig. 2 Relation between peak stress and strain rate (a) as well as peak stress and temperature (b) during hot deformation process of steel 30NiCrMoV12 for high speed train axles

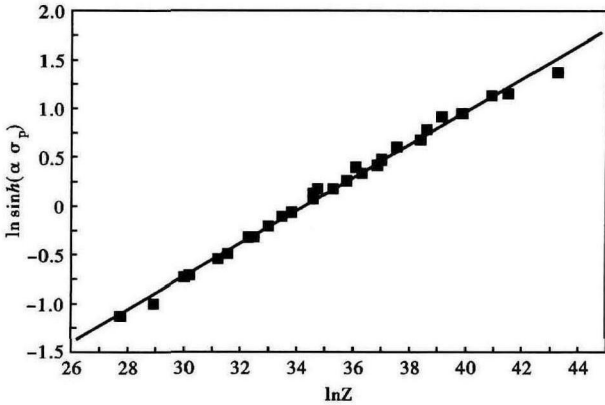


图3 高速列车车轴钢 30NiCrMoV12 的热变形过程中峰值应力与 Z 参数的关系

Fig.3 Relation between peak stress and Z parameter of steel 30NiCrMoV12 for high speed train axles during hot deformation process

30NiCrMoV12 的热变形 Z 参数 $[Z = \dot{\epsilon} \exp(\frac{Q}{RT})]$, 由 $\ln \sinh(\alpha \sigma_p)$ 与 $\ln Z$ 的关系曲线(图3)可以看出, 增加 Z 值, 高铁车轴钢的峰值应力也相应增加。

2.3 热加工图

根据动态材料模型 (Dynamic Materials Model)^[5-7], 材料热变形过程中的参量消耗行为取决于材料显微组织的变化。热变形过程中, 单位体积材料的瞬时消耗功 P 为流变应力与应变速率的乘积 ($\sigma \cdot \dot{\epsilon}$), 可用式(4)表示:

$$P = \sigma \cdot \dot{\epsilon} = \int_0^{\dot{\epsilon}} \sigma d\dot{\epsilon} + \int_0^{\sigma} \dot{\epsilon} d\sigma \quad (4)$$

式中: $G = \int_0^{\dot{\epsilon}} \sigma d\dot{\epsilon}$, $J = \int_0^{\sigma} \dot{\epsilon} d\sigma = \int_0^{\sigma} \frac{1}{K} \sigma^{1/m} d\sigma$, 即 $P =$

$G + J$ 。

而恒定温度下, 热变形过程中的流变应力为: $\sigma = K \dot{\epsilon}^m |_{T, M}$, 因此可得:

$$J = \int_0^{\sigma} \dot{\epsilon} d\sigma = \frac{m \dot{\epsilon} \sigma}{m+1}, \text{ 则}$$

$$P = \sigma \cdot \dot{\epsilon} = \dot{\epsilon} \sigma \frac{m}{m+1} + \frac{\dot{\epsilon} \sigma}{m+1} \quad (5)$$

由式(4)和(5)可以看出, 热变形过程中材料的能量消耗包括两部分, 即材料塑性变形而消耗的能量 G 以及材料组织动态变化所消耗的能量 J, 应变速率敏感性指数 m 可认为是两部分能量之间的分配系数。

对于理想的线性消耗过程, 有 $J = J_{\max} = \frac{\sigma \cdot \dot{\epsilon}}{2}$

对于非线性消耗过程, 能量消耗效率 η ^[8] 可表示为: $\eta = \frac{J}{J_{\max}} = \frac{2m}{m+1}$ (6)

η 为一无量纲参数, 描述了材料热变形过程中因显微组织改变而消耗的能量与总能量的比值。根据不同变形温度及应变速率下的能量耗散效率, 可绘制出高铁车轴钢的功率耗散图。

失稳参数用一个无量纲参数, $\zeta(\dot{\epsilon})$ 表示塑性大变形时连续失稳的判据。这一判据是根据不可逆热力学极值原理建立的。根据塑性流变行为不稳定的条件可知:

$$\zeta(\dot{\epsilon}) = \partial \ln[m/(m+1)] / \partial \ln \dot{\epsilon} + m \quad (7)$$

根据失稳判据计算出参数 $\zeta(\dot{\epsilon})$ 是小于0的数

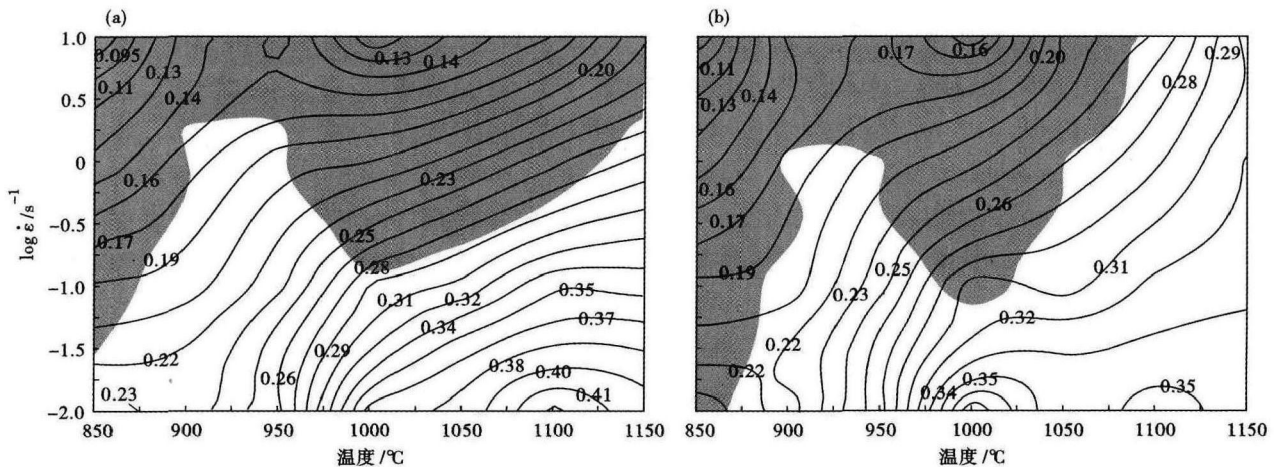


图4 高速列车车轴钢 30NiCrMoV12 在应变 $\epsilon = 0.5$ (a) 和 $\epsilon = 0.9$ (b) 时的典型热加工图, 等高线-能量散耗效率 η
Fig.4 Typical hot working map of steel 30NiCrMoV12 for high speed train axles with true strain $\epsilon = 0.5$ (a) and $\epsilon = 0.9$ (b), contour line-efficiency of energy dissipation η

值,可建立 ζ - T - $\dot{\varepsilon}$ 失稳图。

车轴钢 30NiCrMoV12 的流变失稳图叠加于功率耗散图之上,即得到其热加工图(阴影部分为流变失稳区,等高线中的数字表示能量耗散效率 η),如图 4 所示,它可定量描述车轴钢的热加工过程中组织变化特性。由图 4 可见,车轴钢在不同应变变量 ($\varepsilon=0.5, 0.9$) 下的热加工图形状相似,应变变量对车轴钢的热加工图的形状影响不大;随着变形温度的升高及应变速率的降低, η 值逐渐增加,即车轴钢的动态能量消耗能力增强。在真应变为 0.5, 变形温度 1 100 °C 左右、应变速率为 0.01 s⁻¹ 时,能量消耗效率 η 最高可以达到 0.41;阴影区进行加工有楔形裂纹和区域变形的危险产生,所以热加工过程中应尽量避免阴影区域。

2.4 热变形组织分析

热加工图中不同区域 η 值的差别,对应着不同热变形组织。对车轴钢应变量为 0.9 的热加工图不同区域相应工艺的热变形试样进行组织观察,热变形组织的典型特征如图 5 所示,分别为:形变组织(图 5a)、部分再结晶组织(图 5b)、完全再结晶组织(图 5c)及长大的粗大晶粒组织(图 5d)。

3 结论

(1) 高速列车车轴钢 30NiCrMoV12 在 0.01 ~ 10 s⁻¹, 850 ~ 1 150 °C 热压缩和变形温度一定时,流变应力均随应变速率的增加而升高;应变速率一定时,流变应力随变形温度的升高而降低。

(2) 高速列车车轴钢 30NiCrMoV12 的热变形激活能 Q 为 382 679 J/mol, 热变形方程为:

$$\dot{\varepsilon} = 4.38 \times 10^{14} [\sinh(\alpha\sigma_p)]^6 \exp\left(-\frac{382\ 679}{RT}\right)$$

(3) 随着变形温度的升高以及应变速率的降低,能量耗散效率 η 逐渐升高;真应变为 0.5, 变形温度 1 100 °C, 应变速率为 0.01 s⁻¹ 时,变形能量耗散效率达到最大值 0.41。车轴钢在 1 000 ~ 1 150 °C 和 0.01 ~ 1.0 s⁻¹ 区间内具有较好的可锻性。

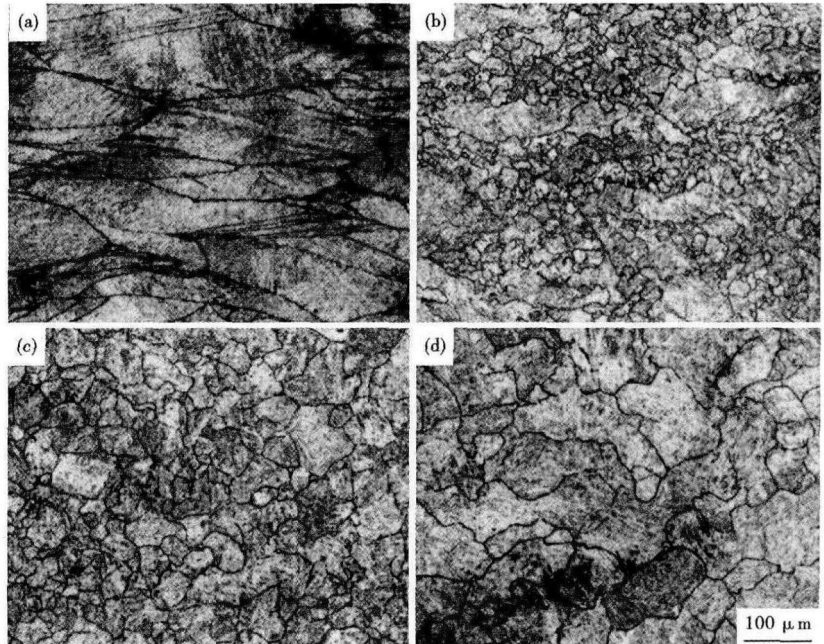


图 5 高速列车车轴 30NiCrMoV12 钢在应变速率和温度: 0.1 s⁻¹, 850 °C (a); 0.1 s⁻¹, 1 000 °C (b); 1.0 s⁻¹, 1 100 °C (c); 0.01 s⁻¹, 1 150 °C (d) 时的典型热变形组织形貌。

Fig. 5 Morphology of typical deforming structure of steel 30NiCrMoV12 for high speed train axles with strain rate: 0.1 s⁻¹, at 850 °C (a); 0.1 s⁻¹, at 1 000 °C (b); 1.0 s⁻¹, at 1 100 °C (c) and 0.01 s⁻¹, at 1 150 °C (d)

参考文献

- [1] Chio J W, Chang S K. Effect of Molybdenum and Copper Additions on Microstructure of High Chromium Cast Iron Rolls. ISIJ International[J]. 1992, 32(11): 1170-1176.
- [2] Srinivasan N, Prasad YV R K. Hot Working Characteristics of Ni-monic75, 80A and 90 Super Alloys: a Comparison Using Processing Maps[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1995, 51: 171-192.
- [3] 蔡大勇, 熊良银, 孙贵东, 等. GH708 高温合金的热变形行为[J]. 稀有金属材料与工程, 2006, 35(A02): 40-42.
- [4] Kocks U F, Mecking H A. Mechanism for Static and Dynamic Recovery Strength of Metals and Alloys[M]. Oxford, England: Pergamon Press, 1985: 345.
- [5] Gronostajski Z. The Deformation processing Map for Control of Microstructure in CuAl9. 12Fe3 Aluminium Bronze[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 125-126(9): 119-124.
- [6] 李立新, 汪凌云. 含硼微合金钢动态再结晶模型的研究[J]. 特殊钢, 2003, 24(6): 30-32.
- [7] 魏立群. BH08 焊接用钢的热变形行为及动力学再结晶模型[J]. 特殊钢, 2007, 28(1): 10-12.
- [8] Park Nho-Kwang, Yeom Jong-Taek, Na Young-Sang. Characterization of Deformation Stability in Hot Forging of Conventional Ti-6Al-4V Using Processing Maps[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 130-131: 540-545.

陈 楚(1986-), 男, 硕士, 助理工程师, 2009 年燕山大学(本科)毕业, 高速列车车轴材料的开发。

E-mail: chenchu1986@163.com

收稿日期: 2014-04-23