

316LN 高氮超低碳奥氏体不锈钢的热变形行为和组织演变

裴海祥^{1,2} 曾莉^{2,3} 王立新^{2,3} 张海龙¹ 王西涛¹

(1 北京科技大学新金属材料国家重点实验室, 北京 100083;
山西太钢不锈钢股份有限公司 2 技术中心, 3 先进不锈钢材料国家重点实验室, 太原 030003)

摘要 试验的 316LN 钢(/% : 0.011C, 0.49Si, 1.52Mn, 0.016P, 0.001S, 16.65Cr, 13.43Ni, 2.18Mo, 0.153N) 为 7.2 t 铸锭初轧开坯并锻造的 $\Phi 180$ mm 圆钢。利用 Gleeble-3800 热模拟试验机研究了 316LN 钢在应变速率 $0.1 \sim 50 \text{ s}^{-1}$ 、 $1050 \sim 1200 \text{ }^\circ\text{C}$ 时的热变形行为和组织演变规律, 并通过线性回归分析建立了 316LN 钢的本构方程。结果表明, 变形温度升高有利于动态再结晶的形核, 并在热变形过程中促进动态再结晶扩展; 热变形过程材料常数 α 为 0.006 1, 应力指数 n 为 5.543 6, 表观激活能 550.512 kJ/mol, 动态再结晶晶粒数量随着变形温度的增加而增多, 到 $1200 \text{ }^\circ\text{C}$ 变形时发生了完全的动态再结晶。

关键词 316LN 高氮超低碳奥氏体不锈钢 热变形 本构方程 动态再结晶

Hot Deformation Behavior and Structure Evolution of High Nitrogen Ultra-Low-Carbon Austenite Stainless Steel 316LN

Pei Haixiang^{1,2}, Zeng Li^{2,3}, Wang Lixin^{2,3}, Zhang Hailong¹ and Wang Xitao¹

(1 State Key Laboratory for Advanced Metals and Materials, University of Science and Technology, Beijing 100083;
2 Technical Center, 3 State Key Laboratory of Advanced Stainless Steel Materials,
Taiyuan Iron and Steel Co Ltd, Taiyuan 030003)

Abstract The test steel 316LN (/% : 0.011C, 0.49Si, 1.52Mn, 0.016P, 0.001S, 16.65Cr, 13.43Ni, 2.18Mo, 0.153N) is $\Phi 180$ mm round bar forged and primary-rolled from 7.2 t ingot. The hot deformation behavior and structure evolution rule of steel 316LN with strain rate $0.1 \sim 50 \text{ s}^{-1}$ at $1050 \sim 1200 \text{ }^\circ\text{C}$ has been studied by using thermal-simulated test machine Gleeble-3800, and a constitutive equation of steel 316LN is established by linear regression analysis. Results show that increase of deformation temperature is favorable for nucleation of dynamic recrystallization and promoting the development of dynamic recrystallization during hot deformation; in hot deformation process the material constant α is 0.006 1, the stress exponent n is 5.543 6 and the apparent activation energy is 550.512 kJ/mol; with increasing deformation temperature the number of dynamic recrystallized grains in steel increases, and the complete dynamic recrystallization occurs in steel deformed at $1200 \text{ }^\circ\text{C}$.

Material Index High Nitrogen Ultra-Low-Carbon Austenite Stainless Steel 316LN, Hot Deformation, Constitutive Equation, Dynamic Recrystallization

316LN 钢是在不同温度下使用的核电及多种工程应用的候选材料^[1-4]。

对于一些钢种已有运用双曲正弦模型计算了其本构方程^[5-6], 并在实践中得到了较好的应用, 本文主要研究变形温度、变形速率等参数对热变形力学参数的影响, 运用双曲正弦模型建立本构方程, 并分析了形变后组织。

1 试验材料及方法

试验用钢取自钢厂生产交货态的棒材, 工艺流程为: 7.2 t 模铸铸锭经初轧开坯为 $230 \text{ mm} \times 1000 \text{ mm}$ 的初轧坯, 然后锻造为 $\Phi 180 \text{ mm}$ 的棒材, 最后

进行 $1050 \text{ }^\circ\text{C}$ 、保温 4 h 的固溶处理。试验 316LN 钢的成分为(/%) : 0.011C, 0.49Si, 1.52Mn, 0.016P, 0.001S, 16.65Cr, 13.43Ni, 2.18Mo, 0.153N。

压缩热变形试验在 Gleeble-3800 热模拟试验机上进行, 试样尺寸为 $\Phi 10 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ 。变形温度为 1050 、 1100 、 1150 、 $1200 \text{ }^\circ\text{C}$ 。应变速率分别为 0.1 、 1 、 50 s^{-1} 。将试样以 $10 \text{ }^\circ\text{C/s}$ 加热到变形温度, 并在此温度保温 5 min, 然后以不同的应变速率压缩到真实应变为 0.65 (变形程度 50%)。

热变形试验后, 水冷, 沿纵向切开, 经一系列研磨抛光后, 用盐酸: 氯化铁: 水溶液 (1: 1: 3) 进行浸蚀, 再 Leica DM4000 光学显微镜观察变形后组织。

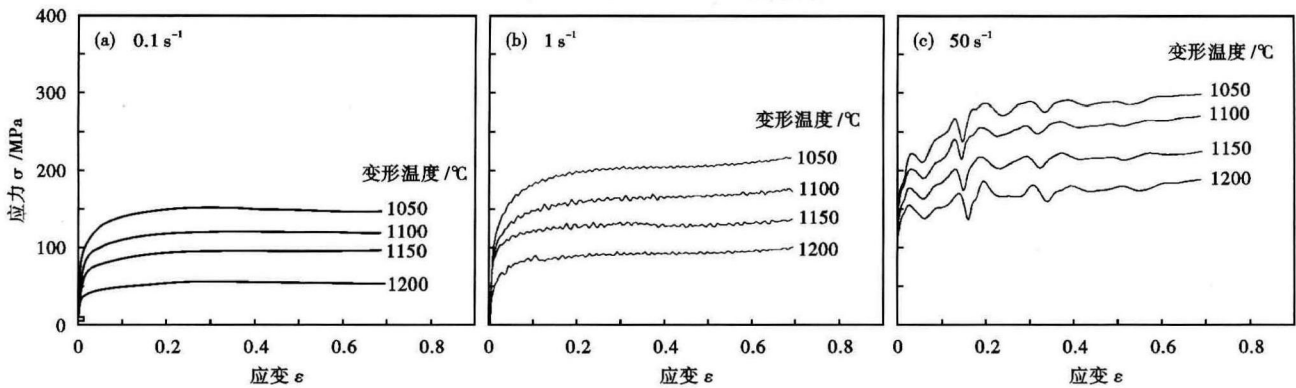


图 1 变形温度和应变速率对 316LN 钢的应力-应变曲线的影响,应变速率/ s^{-1} : (a) 0.1; (b) 1; (c) 50

Fig. 1 Effect of deformation temperature and strain rate ($/\text{s}^{-1}$) on stress-strain curves of steel 316LN: (a) 0.1; (b) 1; (c) 50

2 热变形行为

2.1 流变曲线

从图 1 可见,在相同的应变速率下,随着变形温度的升高,材料的变形抗力降低。材料的流变应力随应变速率的降低而减小。应变速率较大时,流动应力随变形量的增加,出现明显波动,这是由于大应变速率导致温度上升,从而使得动态软化效果增强,动态硬化和软化效果相互作用使曲线产生波动。

2.2 本构模型

在热变形过程中,用来描述变形条件(变形温度、应变速率)与真应力关系的本构方程共有 3 种,如式(1)~(3)。

$$Z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) = A_1 \sigma^{n_1} \quad (1)$$

$$Z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) = A_2 \exp(\beta \sigma) \quad (2)$$

$$Z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) = A [\sinh(\alpha \sigma)]^n \quad (3)$$

式中: Z - Zener-Hollomon 系数,代表经过热激活修正后的应变速率; Q - 热变形过程的表现激活能; R - 气体常数; $A_1, A_2, A, \beta, \alpha$ - 材料常数; n - 应力指数。3 个本构方程公式分别适合于不同应力水平的变形条件:其中幂函数形式由传统蠕变曲线回归得到,适用于低应力区,指数形式适用于描述低温高速率的高应力区,由 Sellars 和 Tegart 提出的双曲正弦模型^[7-8]在所有

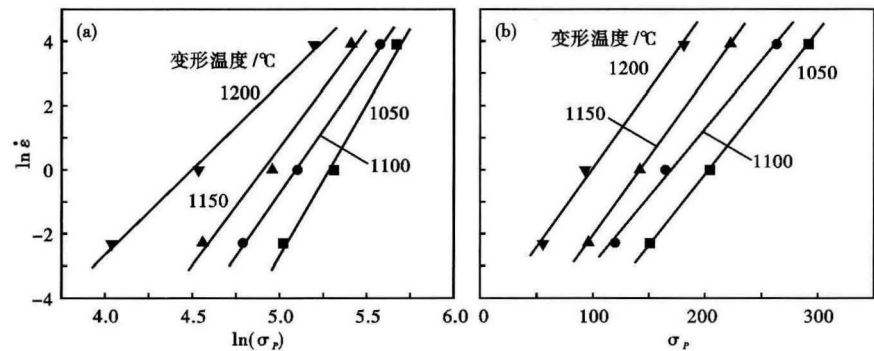


图 2 试验 316LN 钢真应变速率对数和峰值应力对数的关系 (a) 以及真应变速率对数和峰值应力的关系 (b)

Fig. 2 Relation between true strain rate logarithm and peak stress logarithm (a) as well as true strain rate logarithm and peak stress (b) for test steel 316LN

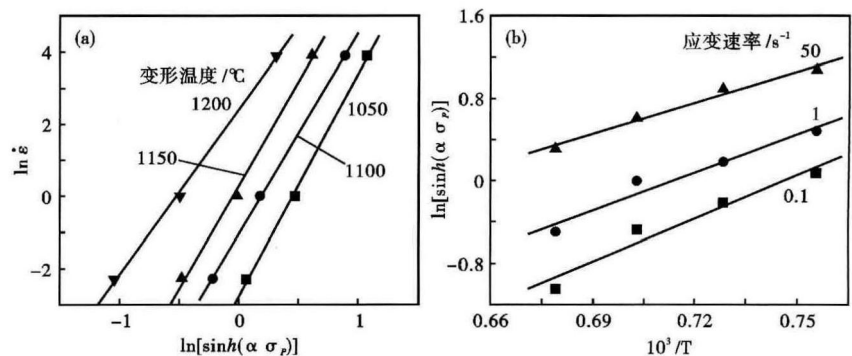


图 3 (a) $\ln \dot{\epsilon}$ 和 $\ln[\sinh(\alpha \sigma_p)]$ 的关系以及 $\ln[\sinh(\alpha \sigma_p)] - 1/T$ 的关系,试验 316LN 钢

Fig. 3 (a) Relation between $\ln \dot{\epsilon}$ and $\ln[\sinh(\alpha \sigma_p)]$; (b) Relation between $\ln[\sinh(\alpha \sigma)]$ and $1/T$, test steel 316LN

应力范围内均具有较好的拟合度,所以选取公式(3)作为描述合金本构关系的方程。

目前普遍采用自然对数的线性回归方法来获得以上各参量的数值。

2.2.1 α, n 值和激活能 Q

将公式(3)简化为公式(1)进而(2),对公式两边分别取自然对数,通过实验数据拟合 $\partial \ln \dot{\epsilon} / \partial \ln \sigma_p$ 和 $\partial \ln \dot{\epsilon} / \partial \sigma_p$,即得到 n_1 和 β 值,如图 2 所示。并由此得出 $\alpha = 0.0061$ 。

进一步通过 $\partial \ln \dot{\epsilon} / \ln [\sinh(\alpha \sigma_p)]$ (图 3a) 求得应力指数 n 值,则 $n = 5.5436$ 。

对 $\ln [\sinh(\alpha \sigma)] - 1/T$ 作图(图 3b),用最小二乘法回归得到 $Q/(R \cdot n)$,其中 $R = 8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ 。即可得到变形激活能 $Q = 550512 \text{ J}/\text{mol} = 550.512 \text{ kJ}/\text{mol}$ 。

2.2.2 本构方程

按照以上过程计算得到的 α, n 分别为 0.0061、5.5436, Q 值为 550512 J/mol。将各参数代入公式(3)求得 A 值,并最终得到热变形本构方程为:

$$\dot{\epsilon} = 4.29 \times 10^{20} [\sinh(0.0061 \sigma_p)]^{5.5436} \exp(-550512/RT) \quad (4)$$

图 4 为公式(4)计算得到的 $\ln Z$ 值与实验测得峰值应力 σ_p 函数值的线性拟合,相关系数达到

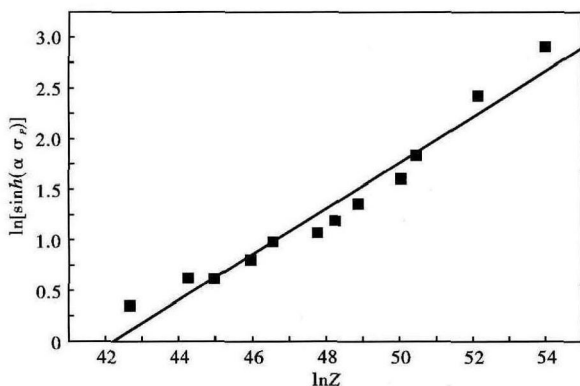


图 4 试验 316LN 钢峰值应力- $\ln [\sinh(\alpha \sigma_p)]$ 与 Z 函数的关系
Fig. 4 Relation between peak stress- $\ln [\sinh(\alpha \sigma_p)]$ and Z function, test steel 316LN

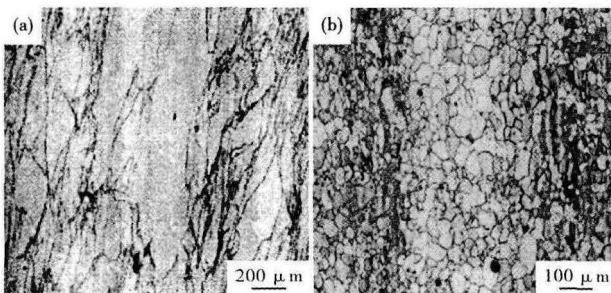


图 5 1050 °C (a) 和 1200 °C (b) 热变形的 316LN 钢组织形貌
Fig. 5 Morphology of structure of test steel 316LN hot deformed at 1050 °C (a) and at 1200 °C (b)

0.98,即用双曲正弦函数描述合金的本构关系具有较高的精度。

3 组织演变

从图 5(a) 可以看到,当 1050 °C 变形时,组织以变形晶粒为主,在变形晶粒晶界处,有许多细小的亚晶,而 1200 °C 变形后,组织已成为完整的等轴晶(图 5b),说明发生了完全动态再结晶。

4 结论

(1) 变形温度升高有利于动态再结晶的形核,并在热变形过程中促进动态再结晶扩展,使应力处在较低水平。材料的流变应力随应变速率的降低而减小。

(2) 根据 Sellars 和 Tegart 提出的双曲正弦模型,通过用自然对数的线性回归方法获得了热变形过程的材料常数 α 为 0.0061,应力指数 n 为 5.5436,表观激活能 Q 为 550.512 kJ/mol,从而得到了 316LN 钢的热变形本构方程。

(3) 随着变形温度的升高,热激活能增加,动态再结晶晶粒数量明显增多,直至 1200 °C 形变时,发生完全动态再结晶。

国家 863 计划项目资助(2012AA03A507)

参考文献

- [1] Prasad Reddy G V, Sandhya R, Valsan M, et al. Strain Controlled Fatigue Deformation and Fracture of Nitrogen Alloyed 316LN Austenitic Stainless Steel[J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2010, 63(2-3): 505-510.
- [2] Cho Hyunchul, Kim Gyoung Koo, Kim In Sup, et al. Low Cycle Fatigue Behaviors of Type 316LN Austenitic Stainless Steel in 310 °C Deaerated Water-fatigue Life and Dislocation Structure Development [J]. Materials Science and Engineering A, 2008, 480: 96-100.
- [3] Byun T S, Hashimoto N, Farrell K. Temperature Dependence of Strain Hardening and Plastic Instability Behaviors in Austenitic Stainless Steels[J]. Acta Mater, 2004, 52: 3889-3899.
- [4] Byun T S, Lee E H, Hunn J D. Plastic Deformation in 316LN Stainless Steel Characterization of Deformation Microstructures[J]. Journal of Nuclear Materials, 2003, 321: 29-39.
- [5] 陆 璐, 王照旭, 王辅忠. 33Mn2V 钢热变形本构方程研究[J]. 天津工业大学学报, 2012, 31(3): 78-80.
- [6] 马 彪, 韩文龙, 李 涛, 等. 30Mn27Al4V 无磁钢的热变形规律[J]. 塑性工程学报, 2012, 19(2): 66-69.
- [7] Sellars C M, Tegart W J. Relationship Between Strength and Structure in Deformation at Elevated Temperatures[J]. Les Memories Scientifiques de La Revue de Metallurgie, 1966, 63(9): 731-745.
- [8] Jonas J J, Sellars C M, Tegart W J. Strength and Structure under Hot Working Conditions[J]. International Metallurgical Reviews, 1969, 130(14): 11-24.

裴海祥(1972-),男,博士生(北京科技大学),高级工程师,1994年兰州大学(本科)毕业,钢铁组织与性能研究。

E-mail: peihx@tisco.com.cn

收稿日期: 2014-06-20