

## 氮含量对 1Cr17Mn6Ni5N 奥氏体不锈钢高温变形行为的影响

杨吉春<sup>1</sup> 高福彬<sup>1,2</sup> 李艳峰<sup>2</sup>

(1 内蒙古科技大学材料与冶金学院, 包头 014010; 2 河北钢铁集团承钢公司炼钢二厂, 承德 067102)

**摘要** 试验用 1Cr17Mn6Ni5N 钢( /% : 0.09 ~ 0.11C, 0.19 ~ 0.29Si, 7.33 ~ 7.42Mn, 0.011 ~ 0.015P, 0.004 ~ 0.007S, 16.87 ~ 17.24Cr, 5.06 ~ 5.19Ni, 0.21 ~ 0.40N) 由 10 kg 真空感应炉熔炼, 通过氮气气氛加氮化铬进行 N 合金化。通过 Gleeble-1500D 热模拟试验机将实验钢在真空下 1 150 ~ 1 000 °C, 以应变速率  $10^{-2} \text{ s}^{-1}$  和  $1 \text{ s}^{-1}$  进行压缩 60% 试验。结果表明, 在高温下, 以低应变速率压缩时钢的动态再结晶是主要的软化机制; 以高应变速率压缩时钢的动态回复是主要的软化机制; 与 0.21% N 和 0.29% N 试验钢相比, 含 0.40% N 的试验钢具有较高的峰值应力, 根据 Zener-Hollomon 参数的计算得出 0.40% N 的试验钢再结晶激活能最高, 在高温下不易发生动态再结晶。

**关键词** 1Cr17Mn6Ni5N 奥氏体不锈钢 高温变形行为 氮 动态再结晶

## Effect of Nitrogen Content on Behavior of Elevated Temperature Deformation of Austenite Stainless Steel 1Cr17Mn6Ni5N

Yang Jichun<sup>1</sup>, Gao Fubin<sup>1,2</sup> and Li Yanfeng<sup>2</sup>

(1 School of Material and Metallurgy, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010;  
2 No. 2 Steelmaking Plant, Chengde Steel Co., Hebei Iron and Steel Group, Chengde 067102)

**Abstract** The test steel 1Cr17Mn6Ni5N ( /% : 0.09 ~ 0.11C, 0.19 ~ 0.29Si, 7.33 ~ 7.42Mn, 0.011 ~ 0.015P, 0.004 ~ 0.007S, 16.87 ~ 17.24Cr, 5.06 ~ 5.19Ni, 0.21 ~ 0.40N) is melted by a 10 kg vacuum induction furnace with adding chromium nitride to N-alloying in nitrogen atmosphere. The compression 60% experiment of test steel in vacuum with strain rate  $10^{-2} \text{ s}^{-1}$  and  $1 \text{ s}^{-1}$  at 1 150 ~ 1 000 °C has been carried out by using Gleeble-1500D thermo-mechanical simulation machine. Test results show that at high temperature with lower strain rate the dynamic recrystallization of steel is main softening mechanism and with higher strain rate the dynamic recovery of steel is the main softening mechanism; as compared with 0.21% N and 0.29% N test steels the 0.40% N test steel has higher peak stress, and based on the calculation of Zener-Hollomon parameter, the recrystallization activation energy of 0.40% N test steel is highest, uneasily to happen dynamic recrystallization at elevated temperature.

**Material Index** Austenite Stainless Steel 1Cr17Mn6Ni5N, Behavior of Elevated Temperature Deformation, Nitrogen, Dynamic Recrystallization

1Cr17Mn6Ni5N 不锈钢为 AISI200 系列不锈钢。它用锰和氮代替传统不锈钢中部分镍, 在弱腐蚀条件 1Cr17Mn6Ni5N 不锈钢的耐腐蚀性能、焊接性能均可与 304 不锈钢相媲美<sup>[1-2]</sup>。

### 1 材料的熔炼和试验方法

试验钢采用 10 kg 真空感应炉熔炼, 锭重 6.5 kg, 熔炼过程为: 装料→抽真空→融化→充氮气→加入氮化铬颗粒→精炼→浇铸成锭, 试验钢成分如表 1 所示。钢锭经 1 200 °C 30 min 加热, 热锻成 25 mm × 25 mm 方坯, 方坯经 1 050 °C 30 min 水冷, 在

方坯上纵向切取  $\Phi 8 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$  标准压缩试样。

在 Gleeble-1500D 型热模拟试验机真空下将试样以 10 °C/s 加热到 1 200 °C, 保温 5 min, 然后以 10 °C/s 分别冷却到 1 150, 1 100, 1 050, 1 000 °C, 保温 30 s, 分别以  $10^{-2} \text{ s}^{-1}$  和  $1 \text{ s}^{-1}$  的应变速率进行压缩, 应变量为 60%, 压缩结束后水冷到室温。

### 2 试验结果及分析

#### 2.1 真应力-真应变曲线

如图 1 所示, 在压缩的初始阶段, 真应力随真应变的增加而不断增大; 在真应变增加过程中通过热激活使位错成对抵消、晶粒规整形成亚晶以及亚晶合并等过程也在进行, 即在发生加工硬化的同时也发生动态回复。发生动态回复时, 软化过程和硬化过程达到平衡, 真应力-真应变曲线接近于一水平线, 变形进入稳态流变阶段。如图 1(d, e, f) 所示, 当真应变达到一定程度时, 真应力并不随真应变的

表 1 试验用 1Cr17Mn6Ni5N 钢成分 / %  
Table 1 Analysis of test steel 1Cr17Mn6Ni5N / %

炉号 No	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	N
1	0.11	0.29	7.33	0.015	0.004	17.16	5.06	0.21
2	0.09	0.20	7.40	0.013	0.006	17.24	5.14	0.29
3	0.10	0.19	7.42	0.011	0.007	16.87	5.19	0.40

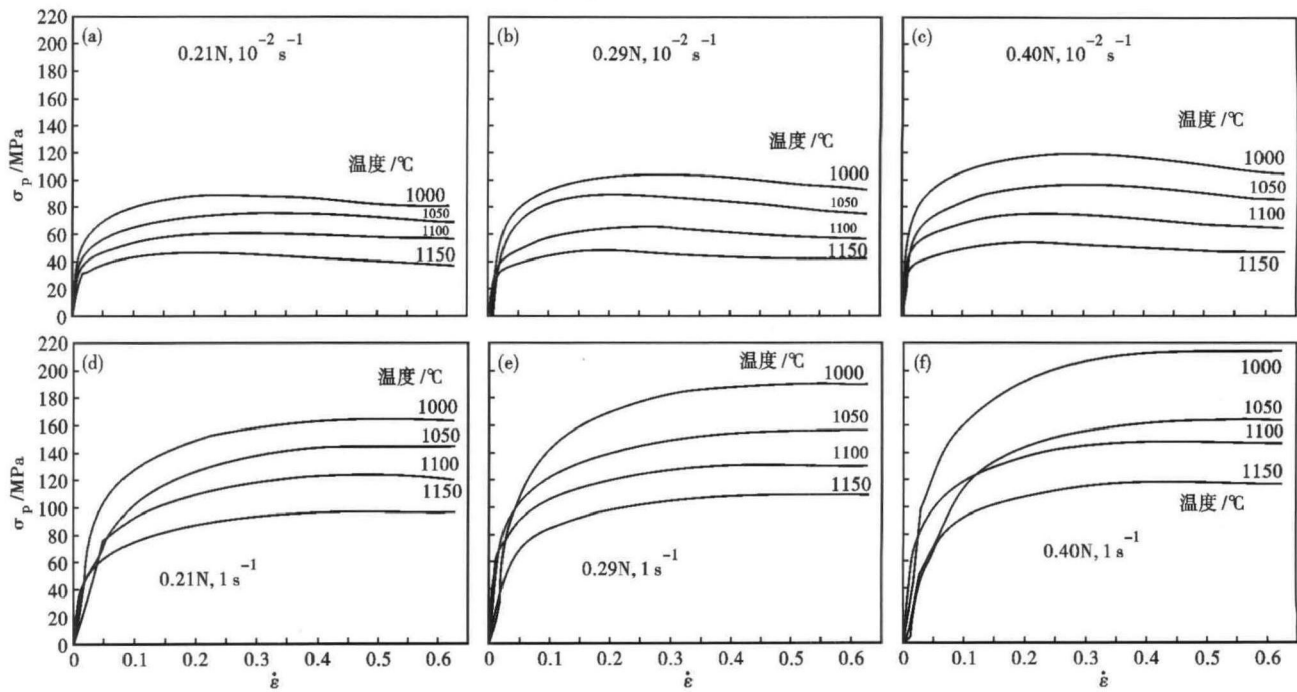


图1 试验1Cr17Mn6NiN钢真应力-真应变曲线:应变速率- (a)(b)(c) $10^{-2} s^{-1}$ , (d)(e)(f) $1 s^{-1}$ , N/%: (a)(d)0.21, (b)(e)0.29, (c)(f)0.40

Fig.1 True stress-True strain curves of test steel 1Cr17Mn6NiN: strain rate- (a) (b) (c)  $10^{-2} s^{-1}$  and (d) (e) (f)  $1 s^{-1}$ ; nitrogen content in steel /%- (a) (d) 0.21, (b) (e) 0.29 and (c) (f) 0.40

继续增大而发生明显增大,所有温度的应力曲线变得平坦,呈现出稳态流变的特征。说明这时试验钢在以  $1 s^{-1}$  的应变速率变形时的高温变形机制以动态回复为主;当动态回复难以同步抵消应变产生的位错增加和积累时,位错增加积累到一定程度后就会诱发再结晶形核,即发生动态再结晶<sup>[3]</sup>,发生动态再结晶时,大量位错被再结晶核心的大角度界面推移而消除,应力下降,真应力-真应变曲线出现峰值。如图1(a,b,c),它的真应力-真应变曲线均有明显的高峰,说明在热变形过程中以  $10^{-2} s^{-1}$  产生应变时动态再结晶为主要的软化机制。

### 2.2 氮含量对峰值应力的影响

从图2可以看出,在1000 °C时, No3 钢的峰值应力均比 No2 和 No1 大很多,尤其应变速率  $1 s^{-1}$  时, No3 钢比 No2 钢和 No1 钢的峰值应力分别大 24.64 MPa 和 50.61 MPa,这是由于氮原子在晶包中占据在八面体间隙位置,在钢中容易均匀分布,而且可以产生更大的晶格膨胀,再者铁基与氮化物之间的界面能较小,氮化物在钢中更易形成弥散的细小强化相<sup>[4]</sup>;另外氮可以降低奥氏体中的密排不完全位错,限制含有杂质原子团的 Splintered 位错运动,提高钢的强度<sup>[5]</sup>。随着温度的升高,间隙原子氮对位错的钉扎作用减弱,三钢种的峰值应力都不断减小,差值也不断减小。

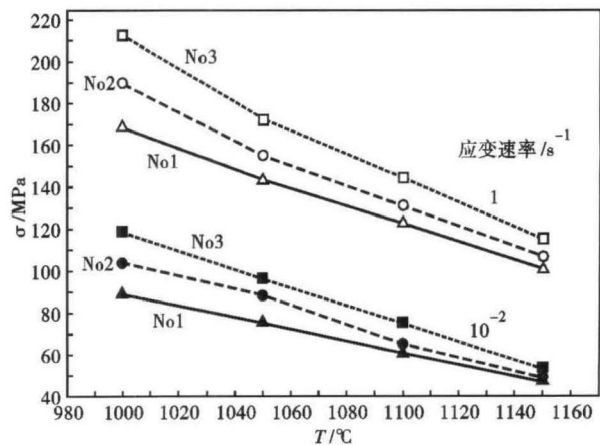


图2 氮含量对试验钢1Cr17Mn6Ni5N峰值应力的影响  
Fig.2 Effect of nitrogen content on peak stress of test steel 1Cr17Mn6Ni5N

### 2.3 氮含量对动态再结晶的影响

为了探究试验钢应变速率  $\dot{\epsilon}$ 、变形温度  $T$  对动态再结晶的影响,引入参数 Zener-Hollomon:

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

式中:  $Z$ - Zener-Hollomon 参数,物理意义是温度补偿的应变速率因子/ $s^{-1}$ <sup>[6]</sup>;  $\dot{\epsilon}$ - 应变速率/ $s^{-1}$ ;  $Q$ - 再结晶激活能/ $(kJ \cdot mol^{-1})$ ;  $R$ - 气体常数;  $T$ - 绝对温度/ $K$ 。

另外有分析表明形变因子与峰值应力之间存在幂指关系,即:

$$Z = A\sigma_p^n = \dot{\epsilon} [\exp(Q/RT)] \quad (2)$$

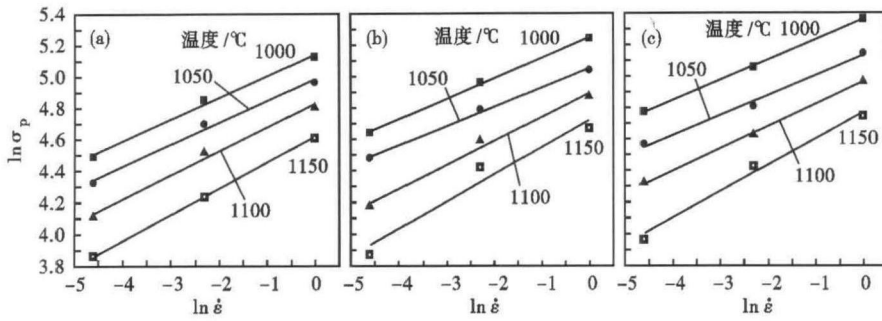


图 3 试验钢 1Cr17Mn6Ni5N 峰值应力对数与真应变速率对数的关系, N/% : (a) 0.21; (b) 0.29; (c) 0.40

Fig. 3 Relation between peak stress logarithm and strain rate logarithm for test steel 1Cr17Mn6Ni5N, N / % : (a) 0.21; (b) 0.29; (c) 0.40

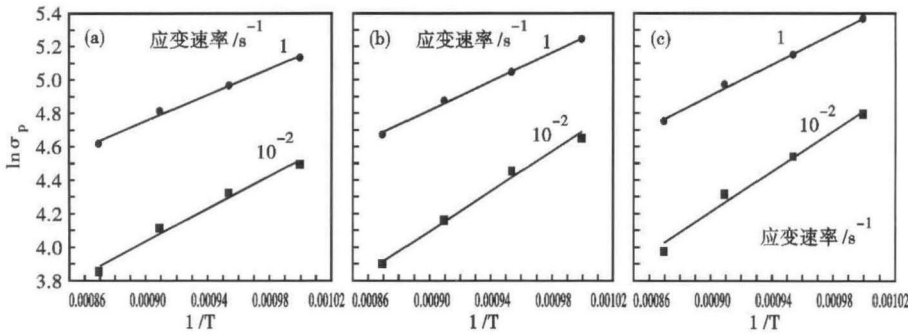


图 4 试验钢 1Cr17Mn6Ni5N 在应变速率  $10^{-2} \text{ s}^{-1}$  和  $1 \text{ s}^{-1}$  时峰值应力对数与温度倒数的关系, N/% : (a) 0.21; (b) 0.29; (c) 0.40

Fig. 4 Relation between peak stress logarithm and  $1/T$  for test steel 1Cr17Mn6Ni5N with strain rate  $10^{-2} \text{ s}^{-1}$  and  $1 \text{ s}^{-1}$ , N / % : (a) 0.21; (b) 0.29; (c) 0.40

$$\partial (\ln \sigma_p) / \partial (1/T)_3 = 5\ 635.033$$

将  $n$  值及  $\partial (\ln \sigma_p) / \partial (1/T)$  值分别代入式 (5) 中可求得试验钢不同氮含量的再结晶激活能:  $Q_1 = 178.219 \text{ kJ/mol}$ ;  $Q_2 = 211.415 \text{ kJ/mol}$ ;  $Q_3 = 236.965 \text{ kJ/mol}$ 。

由此可见, No3 钢的再结晶激活能最大, 也就是说 No3 钢在高温时最不容易发生动态再结晶。

### 3 结论

1Cr17Mn6Ni5N 钢高温压缩时当应变速率为  $10^{-2} \text{ s}^{-1}$  动态再结晶是主要的软化机制, 当应变速率大于  $1 \text{ s}^{-1}$  时动态回复是主要的软化机制; 与 0.21% N 和 0.29% N 的试验钢相比, 0.40% N 的试验钢高温强度最高, 动态再结晶激活能最大, 说明高温下氮对试验钢的动态再结晶具有抑制作用。

式中:  $A_1$ - 常数;  $n$ - 应力指数;  $\sigma_p$ - 峰值应力。

对公式 (2) 两边取对数, 求偏导则有:

$$n \partial (\ln \sigma_p) = \partial (\ln \dot{\epsilon}) + Q/R \partial (1/T) \quad (3)$$

当  $T$  为常数时, 公式 (3) 可以写成:

$$n = \partial (\ln \dot{\epsilon}) / \partial (\ln \sigma_p) |_{T=\text{const}} \quad (4)$$

当  $\dot{\epsilon}$  是常数时,  $Q$  从公式 (2) 就可以表示为:

$$Q = nR \partial (\ln \sigma_p) / \partial (1/T) |_{\dot{\epsilon}=\text{const}} \quad (5)$$

以  $\ln \dot{\epsilon}$  为横坐标,  $\ln \sigma_p$  为纵坐标, 用 Origin 软件对其进行线性回归, 如图 3 所示, 由图 3 可求的各钢种在不同变形温度下的  $n$  值, 对其求均值可得:  $n_1 = 4.894$ ;  $n_2 = 4.981$ ;  $n_3 = 5.058$ 。

用 Origin 软件对其进行线性回归得出如图 4, 分别求出各钢种不同应变速率下  $\partial (\ln \sigma_p) / \partial (1/T)$  的值对其求均值则有:

$$\partial (\ln \sigma_p) / \partial (1/T)_1 = 4\ 380.051$$

$$\partial (\ln \sigma_p) / \partial (1/T)_2 = 5\ 129.311$$

国家自然科学基金资助项目 (51364031)

### 参考文献

- [1] 严旺生. 200 系列 (锰系) 不锈钢发展前景 [J]. 中国锰业, 2004, 22(2): 8-12.
- [2] 伍千思. 不锈钢标准中的铬锰系 (美国 200 系) 奥氏体不锈钢 [J]. 冶金标准化与质量, 2004, 42(6): 34-37.
- [3] Gavriljuk V G. Nitrogen in Iron and Steel [J]. ISIJ International, 1996, 36(7): 738-745.
- [4] Medina S F, Hernandez C A. General Expression of the Zener-Hollomon Parameter as a Function of the Chemical Composition of Low Alloy and Micro Alloyed Steels. Acta Mater, 1996, 44(1): 137-148.
- [5] Zhao X, Jing T F, Gao Y W, et al. Morphology of Graphite in Hot-compressed Nodular Iron [J]. Materials Science and Engineering A, 2004, 39(19): 603-609.
- [6] Dai Q X, Wang A D, Cheng X N, et al. Effect of Alloying Elements and Temperature on Strength of Cryogenic Austenitic Steels [J]. Materials Science and Engineering A, 2001, 311(1/2): 205-210.

杨吉春 (1963-), 男, 博士, 教授, 1984 年包头钢铁学院 (本科) 毕业, 稀土在钢中的应用研究。

E-mail: Yangjichun1963@163.com

收稿日期: 2013-12-21