

· 组织和性能 ·

氮含量对 Cr12N 合金高温形变行为的影响

杨吉春 刘 南

(内蒙古科技大学材料与冶金学院, 包头 014010)

摘 要 Cr12N 合金(%: 2.03~2.26C, 0.16~0.33Si, 0.29~0.37Mn, 11.86~11.96Cr, 0.09~0.28N) 由 10 kg 真空感应炉熔炼并通过充氮和加氮化硅进行 N 合金化。通过 Gleeble-1500 热模拟试验机将不同 N 含量的 Cr12N 合金在真空下以 10 °C/s 加热至 1 180 °C 3 min, 再以 10 °C/s 冷却至 1 100~900 °C 20 s, 以 $1 \sim 10^2 \text{ s}^{-1}$ 进行 30% 压缩变形, 得出真应力-应变曲线和氮对该合金高温力学性能的影响。结果表明, N 抑制合金动态再结晶发生, Cr12N 合金在高温变形时, 动态回复是最主要的软化机制; 与 0.09% N 合金和 0.28% N 合金比较, 0.18% N 合金具有较高的峰值应力和屈服应力, 回复激活能最低。

关键词 Cr12N 合金 N 高温变形 动态回复

Effect of Nitrogen Content on Behavior of High Temperature Deformation of Cr12N Alloy

Yang Jichun and Liu Nan

(School of Material and Metallurgy, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010)

Abstract Cr12N alloy (%: 2.03~2.26C, 0.16~0.33Si, 0.29~0.37Mn, 11.86~11.96Cr, 0.09~0.28N) is melted by a 10 kg vacuum induction furnace with N-alloying by filling nitrogen and adding silicon nitride. The Cr12N alloys bearing different N content are heated to 1 180 °C for 3 min with 10 °C/s at vacuum, then cooled to 1 100~900 °C for 20 s with 10 °C/s and compressed by 30% with $1 \sim 10^2 \text{ s}^{-1}$ by using a Gleeble-1500 thermo-mechanical simulation machine to get the true stress-strain curves and the effect of nitrogen on mechanical properties of the alloy at high temperature. Results show that N inhibits occurrence of dynamic recrystallization of alloy; as deformation at high temperature the dynamic recovery is dominating softening mechanism of the Cr12N alloy; and as compared with 0.09% N alloy and 0.28% N alloy, the 0.18% N alloy has higher peak stress and yield stress and its recovery activation energy is lowest.

Material Index Cr12N Alloy, N, High Temperature Deformation, Dynamic Recovery

目前,保加利亚的反压铸造工艺,粉末冶金工艺以及德国的加压电渣重熔工艺等可成功生产多种新型高氮钢种,其氮的质量分数最高可达 1.0% 以上^[1,2]。但是,由于加压装置设备昂贵,并且必须在定压下完成氮合金化,故生产成本和能耗相比典型炉子较高,工业化生产受到一定的制约。本实验试图在常压下将廉价元素氮加入钢中,通过回复活化能的计算和真应力应变曲线的观察,探究氮对动态回复及再结晶的影响。

1 实验材料及方法

1.1 试样的预加工及处理

实验用 Cr12N 合金采用 10 kg 的真空感应炉熔炼,锭重 3.5 kg,冶炼步骤为:烘干→装料→抽真空→熔化→充氮→加氮化硅→浇铸, Cr12N 合金成分见表 1。钢锭经 1 200 °C 加热锻成 25 mm × 25 mm 方坯,锻造板纵向取样加工成 Φ8 mm × 12 mm 的标准热压缩试样。

1.2 热压缩实验

表 1 试验用 Cr12N 合金的化学成分/%

Table 1 Chemical composition of test Cr12N alloy /%

钢号	C	Si	Mn	Cr	S	N
No1	2.03	0.16	0.31	11.96	0.020	0.09
No2	2.16	0.27	0.29	11.86	0.016	0.18
No3	2.26	0.33	0.37	11.89	0.023	0.28

试样在真空下以 10 °C/s 加热至 1 180 °C,保温 3 min,以 10 °C/s 的冷却速率分别冷至 1 100、1 000、900 °C,等温 20 s,然后以 $1、10^{-2}、10^2 \text{ s}^{-1}$ 的变形速率,变形量 30%,在 Gleeble-1500 型热模拟试验机上对试样进行压缩,压缩后向试样喷水,冷却(图 1)。

2 结果与讨论

2.1 影响应力应变曲线变形的条件

从图 2 可以看出,应力曲线平坦,没有明显的高峰。说明变形主要是动态回复而不是以动态再结晶为主。应力应变曲线以两种类型存在,一种是在 No2 钢上 900 °C 时的变形(图 2b),没有峰值应力发生的动态回复。另一种是 No1 钢在 1 100 °C 时的变

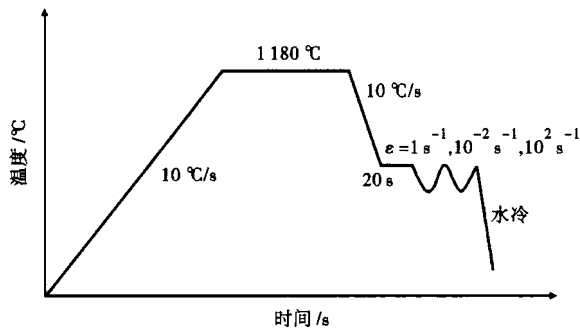


图1 Cr12N合金热压缩工艺示意图

Fig.1 Schematic of thermal compression process for Cr12N alloy

形(图2a),有峰值应力出现的动态再结晶。这表明在高温变形时,动态回复是主要的软化机制。

本实验是在不同应变速率(1、10⁻²、10² s⁻¹)条件下,只有温度达到1 100 °C时才能发生动态再结晶。另一方面,动态回复发生温度低于1 100 °C。所以含氮的Cr12N实验用合金的高温变形是由动态回复和动态再结晶的竞争关系控制,动态回复发生的同时发生动态再结晶,合金的高温变形在不同情况下可以通过动态回复或动态再结晶来控制^[3]。

2.2 氮含量对峰值应力和屈服应力的影响

从图3可以看出氮含量对峰值应力的影响,在温度小于1 050 °C,应变速率为10⁻² s⁻¹和1 s⁻¹的条件下,No2钢的峰值应力和屈服应力都比No1钢和No3钢的大,只有在1 100 °C时,No2钢的峰值应力、屈服应力比其他两种钢略小。因为,在中等和较高温度回复时,主要涉及的是位错运动,此时由于加热温度较高,不仅原子开始活跃起来,而且位错也开始活跃起来,加入的氮元素在钢中可以产生最大的晶格膨胀^[4],另外氮原子(负电荷)与位错(正电荷)还能产生静电吸引力,间隙氮促进了对位错更大的钉扎作用。此外,由于氮原子之间具有短程有序排列的特性,氮可以促进平面滑移,从而提高金

属变形的承受能力^[5]。因此No2钢的屈服应力和峰值应力比No1钢大,但如果是氮含量略多,形成析出物,这样就减小了在钢中固溶的氮含量,所以No3钢比No2钢的屈服应力峰值应力略低。

2.3 回复激活能

用Z参数描述材料的高温变形行为:

$$Z = f(\sigma_s) = A\sigma_s^n = \dot{\epsilon} [\exp(Q/RT)] \quad (1)$$

式中: σ_s -屈服应力/MPa; $\dot{\epsilon}$ -应变速率/s⁻¹;Q-回复活化能/(kJ·mol⁻¹);A、n-材料相关系数;R-气体常数;T-温度/K;Z-应变的温度函数。在式(1)两边取对数,求偏导得:

$$\partial(\ln \dot{\epsilon}) + Q/R\partial(1/T) = n\partial(\ln \sigma_s) \quad (2)$$

如果T是常数,式(2)可以写成:

$$n = \partial(\ln \dot{\epsilon}) / \partial(\ln \sigma_s) |_{T=const} \quad (3)$$

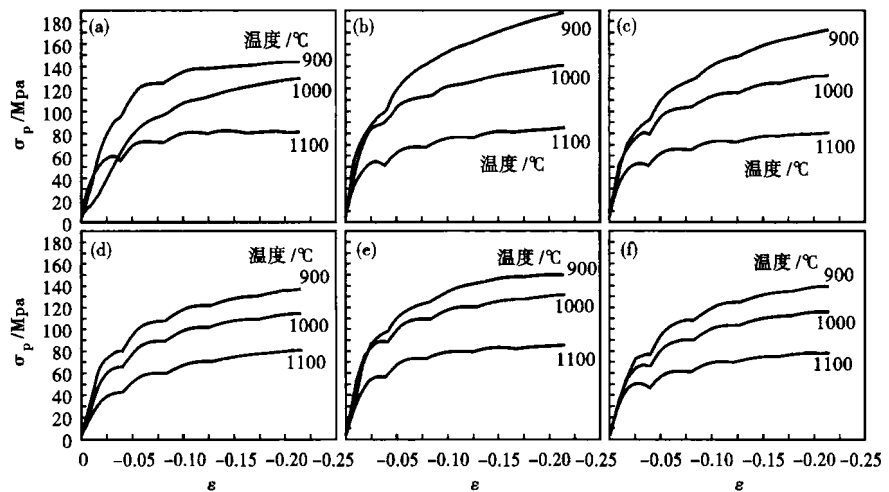


图2 Cr12N合金真应力-应变曲线:(a)(b)(c) $\dot{\epsilon} = 1 \text{ s}^{-1}$; (d)(e)(f) $\dot{\epsilon} = 10^{-2} \text{ s}^{-1}$; (a)(d) 0.09% N; (b)(e) 0.18% N; (c)(f) 0.28% N

Fig.2 True stress-strain curves of Cr12N alloy: (a) (b) (c) $\dot{\epsilon} = 1 \text{ s}^{-1}$; (d) (e) (f) $\dot{\epsilon} = 10^{-2} \text{ s}^{-1}$; (a) (d) 0.09% N; (b) (e) 0.18% N; (c) (f) 0.28% N

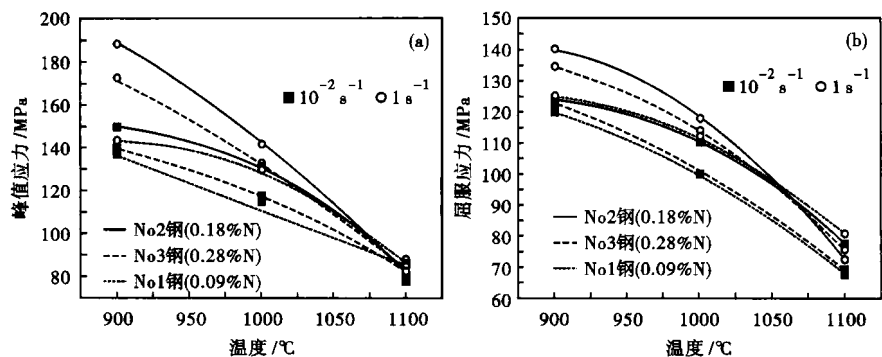


图3 氮含量对Cr12N合金峰值应力(a)和屈服应力(b)的影响

Fig.3 Effect of nitrogen content on peak stress (a) and yield stress (b) of Cr12N alloy

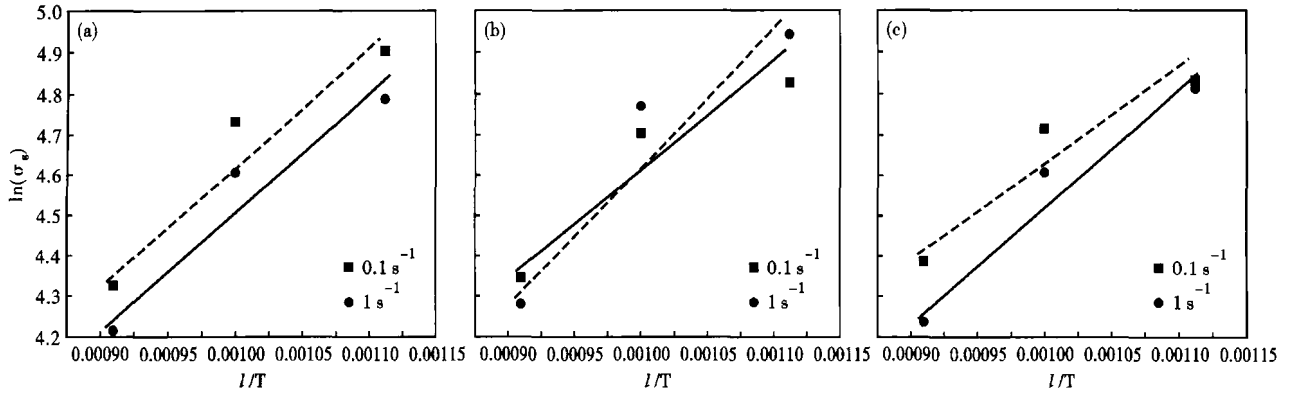


图 4 Cr12N 合金温度倒数与屈服应力对数在 $\dot{\epsilon}$ -0.1 s⁻¹ 和 1 s⁻¹ 下的关系; N 含量/% - (a) 0.09; (b) 0.18; (c) 0.28

Fig. 4 Relation between yield stress logarithm of Cr12N alloy with $\dot{\epsilon}$ -0.1 s⁻¹ and 1 s⁻¹ and inverse of temperature: N content /% - (a) 0.09; (b) 0.18; (c) 0.28

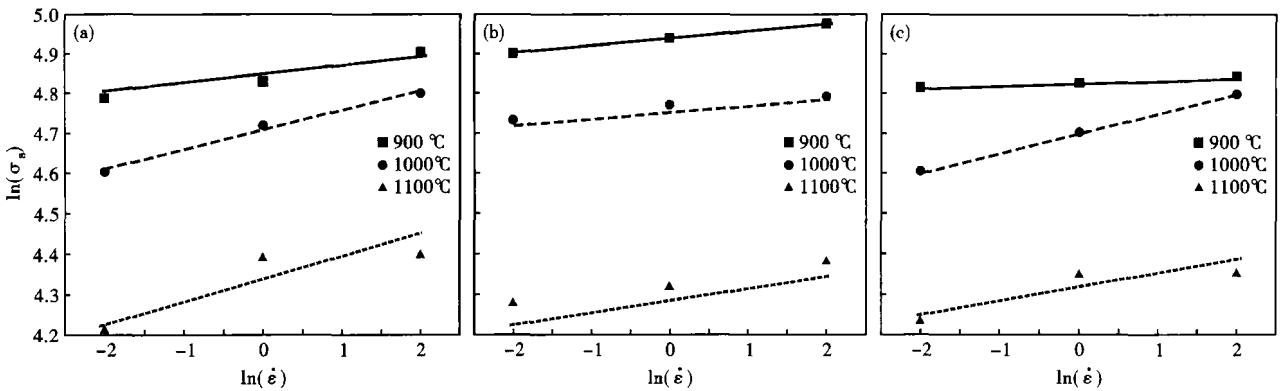


图 5 Cr12N 合金屈服应力对数与应变速率对数的关系; N 含量/% - (a) 0.09; (b) 0.18; (c) 0.28

Fig. 5 Relation between yield stress logarithm of Cr12N alloy and strain rate logarithm; N content /% - (a) 0.09; (b) 0.18; (c) 0.28

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

$$Q = nR\theta (\ln\sigma_s) / \theta (1/T) |_{\dot{\epsilon} = const} \quad (4)$$

在本实验中,屈服应力(σ_s)约等于工程屈服应力($\sigma_{0.2}$)。从图 4、5 中可以看出是线性关系。直线 $\ln\sigma_s - 1/T$ 和 $\ln\dot{\epsilon} - \ln\sigma_s$ 的斜率可以带到式(3)、(4)中,不同氮含量的回复激活能可算出:

$$Q_{0.09\%N} = 515.468 \text{ kJ/mol}$$

$$Q_{0.18\%N} = 432.11 \text{ kJ/mol}$$

$$Q_{0.28\%N} = 457.27 \text{ kJ/mol}$$

可以看出氮含量 0.18% 的 Cr12N 试验用合金激活能最小。回复活化能越大,意味着动态再结晶的门槛越高。所以氮含量 0.18% 的 Cr12N 合金易发生动态再结晶,这就解释了图 2(b) 的真应力应变曲线形状。

3 结论

通过真应力-真应变曲线和对不同氮含量 Cr12N 实验用合金的回复激活能的计算,得出动态回复在

高温变形中是主要的软化机制。其中含 0.18% N 的 Cr12N 实验用合金高温强度最高,同时回复激活能最低。氮的加入抑制动态再结晶的发生。

参考文献

- 1 卡曼奇·曼德里 U, 贝德威 R. 高氮钢和不锈钢-生产,性能与应用. 李晶, 黄运华译. 北京: 化学工业出版社, 2006
- 2 Yang Mingbo, Pan Fusheng. Effects of Y Addition on As-cast Microstructure and Mechanical Properties of Mg-3Sn-2Ca Alloy. Materials Science and Engineering A, 2009, 525: 112
- 3 Dai Q X, Wang A D, Cheng X N, et al. Effect of Alloying Elements and Temperature on Strength of Cryogenic Austenitic Steels. Materials Science and Engineering A, 2001, 311(1-2): 205
- 4 Zhao X, Jing T F, Gao Y W, et al. Morphology of Graphite in Hot-compressed Nodular Iron. Materials Science and Engineering A, 2004, 39(19): 603
- 5 王安东, 戴起勋, 程晓农. 低温奥氏体钢及其断裂机理的研究进展. 金属学报, 2000, 21(5): 59

杨吉春(1963-), 男, 博士, 教授, 硕士生导师, 1984 年包头钢铁学院毕业, 稀土在钢中应用研究。

收稿日期: 2011-03-09