

## 氮对 GCr15 轴承钢高温力学性能的影响

杨吉春 刘 南

(内蒙古科技大学材料与冶金学院, 包头 014010)

**摘 要** 实验用钢 GCr15 (% : 0.97 ~ 1.03C, 1.43 ~ 1.59Cr) 用 10 kg 真空感应炉熔炼, 在充氩情况下, 使用氮化硅向钢中加 0.1% ~ 0.3% 氮。通过 Gleeble-1500 热模拟试验机对该钢的锻材在 700 ~ 1 150 °C 进行拉伸试验, 并用光学显微镜、扫描电子显微镜观察断口形貌和纵向组织。结果表明, 氮在钢中以固溶形式存在, 随氮含量增加, 高温下钢的断面收缩率有较大提升, 峰值应力提升不明显。

**关键词** 氮 GCr15 轴承钢 高温力学性能

## Effect of Nitrogen on Mechanical Properties of Bearing Steel GCr15 at Elevated Temperature

Yang Jichun and Liu Nan

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

**Abstract** The test steel GCr15 (% : 0.97 ~ 1.03C, 1.43 ~ 1.59Cr) is melted by a 10 kg vacuum induction furnace and added 0.1% ~ 0.3% nitrogen in steel by silicon nitride at argon atmosphere. The tensile test of the forged steel at 700 ~ 1 150 °C has been carried out by using a Gleeble-1500 thermal simulation machine, and the morphology of fracture and longitudinal structure is observed by scanning electron microscope and optical microscope. Results show that nitrogen in steel is in the form of solution; and with increasing nitrogen content, the reduction of area of the steel at elevated temperature increases obviously while the peak stress of the steel increases slightly.

**Material Index** Nitrogen, Bearing Steel GCr15, Mechanical Properties at Elevated Temperature

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<sup>[1]</sup>。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。氮元素可提高 GCr15 轴承钢表面的硬度和耐磨性能, 使其满足实际工作条件下的需要。由于 GCr15 碳含量高, 在高温性能时常出现碳化物偏聚在晶界上, 因此利用氮来延缓碳化物在晶界上析出, 从而改善 GCr15 的高温力学。

### 1 实验材料及方法

#### 1.1 试样的预处理及加工

实验用钢采用容量 10 kg 的真空感应炉熔炼, 实验钢冶炼步骤为: 烘干 → 装料 → 抽真空 → 钢料完全熔化 → 充氩 → 由布料器加入不等量的氮化硅 → 浇注。分别浇注 3 种含氮量不同 GCr15 试验用钢, 每炉钢锭 3.5 kg, 成分见表 1。钢锭经 1 200 °C 加热锻成 25 mm × 25 mm 方坯, 从锻造板上纵向取样加工成 Φ10 mm × 120 mm 的标准热拉伸试样。

#### 1.2 热拉伸实验

表 1 试验用钢的化学成分 / %

Table 1 Chemical composition of test steels / %

钢号	C	Si	Mn	Cr	S	N
No1	0.97	0.16	0.31	1.43	0.040	0.1
No2	1.03	0.27	0.41	1.51	0.036	0.2
No3	0.98	0.33	0.37	1.59	0.033	0.3

试样在真空下以 10 °C/s 加热至 1 300 °C, 保温 2 min 后, 以 20 °C/s 的冷却速率分别冷至 1 150、900、700 °C, 等温 30 s, 然后以  $1 \times 10^{-3}$ /s 的变形速率在 Gleeble-1500 型热模拟试验机上对试样进行拉伸。拉断后向试样喷水, 将其快速冷却, 拉断的试样其中一半试样用 Axiovert25 型蔡司 (ZEISS) 金相显微镜做纵切面组织观察, 另一半试样用 QUANTA400 型扫描电镜 (SEM) 观察断口形貌<sup>[2]</sup>。

### 2 结果与讨论

#### 2.1 氮元素对钢断面收缩率及峰值应力的影响

从图 1(a) 中可以看出, 在每个温度下, 0.3% N 的 No3 钢的断面收缩率比 0.2% N 的 No2 钢提高了很多, 0.2% N 钢的断面收缩率比 0.1% N 的 No1 钢的高, 但提高幅度不是很大, 图 1(b) 所示峰值应力随着氮含量的增加而增大, 增加幅度不是很明显。说

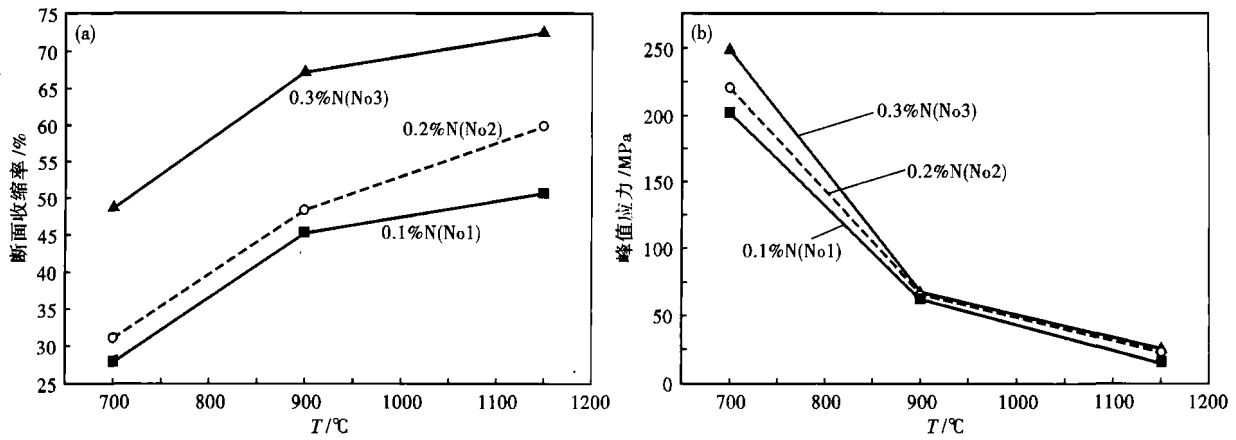


图1 氮含量对 GCr15 钢高温下断面收缩率(a)和峰值应力(b)的影响

Fig. 1 Effect of nitrogen content on reduction of area (a) and peak stress (b) of steel GCr15 at elevated temperature

明氮提高钢的韧性的同时,提高钢的强度。减弱强度与韧性的矛盾关系<sup>[3]</sup>。

### 2.2 高温拉伸试样断口形貌分析

图2(a,b,c)是在700℃高温拉伸后的断口形貌,可以看出,0.1%N钢属于明显的沿晶断裂,断面较光滑,断口处有较小的韧窝。0.2%N钢的断口部分表现为混合断口,部分区域可以看到明显的晶界,但大部分表现为明显的塑性断裂,晶界凸凹不平,断口处有一定数量的韧窝;0.3%N钢韧窝数量较多,表现为明显的塑性断裂。主要是氮起固溶强化作用的同时随着氮含量的增加,含氮的沉淀相增多使位错运动受到阻碍,而塑性增强<sup>[4]</sup>。图2(e,d,f)是在900℃高温拉伸后的断口形貌,可以看出,0.1%N钢

时沿晶断裂,断口处的小韧窝数量比700℃时多,0.2%N钢韧窝比0.1%N钢多,0.3%N钢的韧窝大又比较均匀,属于明显的韧性断裂。该温度处于奥氏体单相区温度区域,对于GCr15钢,高温时氮有助于细化晶界上的碳化物析出物,从而抑制晶界脆化。是Suzuki型气团阻碍位错运动<sup>[5]</sup>。实验用钢的塑性随着氮含量的增加而增强。图3是1150℃0.3%N钢高温拉伸断口在晶粒周围的夹杂物和能谱图,从图3中可以看出Cr、Fe元素峰值较高,可以推断出是球状氮化物 $\epsilon\text{-}[(\text{Cr},\text{Fe})_2\text{N}]$ 。氮与溶质原子发生相互作用而形成复合物和有序析出物,也起到强化作用。所以0.3%N钢在1150℃时的断面收缩率和峰值应力比0.2%N钢的高。

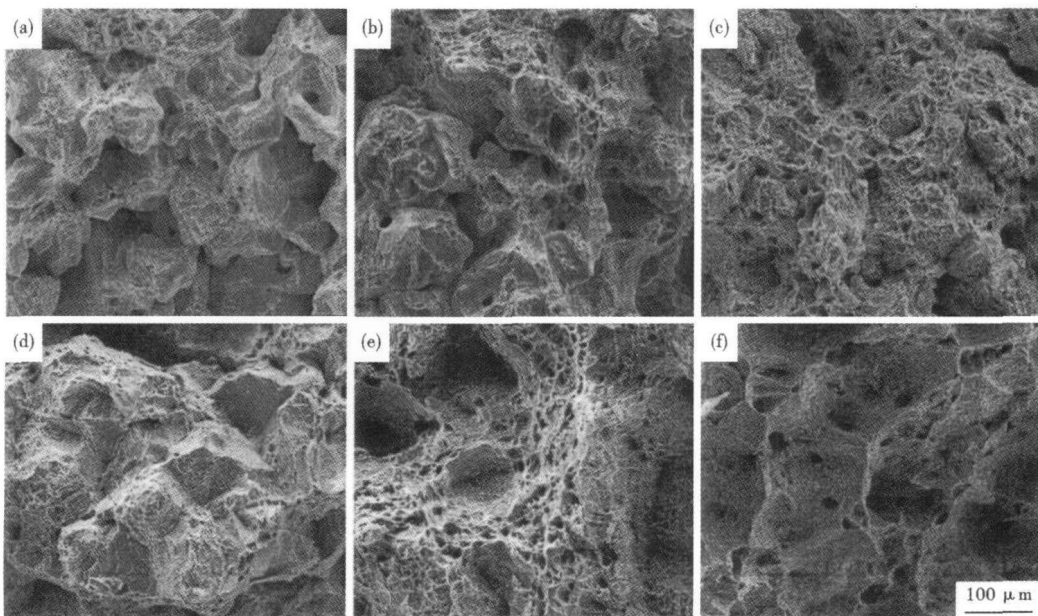


图2 700℃(a,b,c)和900℃(d,e,f)时GCr15轴承钢拉伸断口形貌:钢中氮含量/% (a)(d)0.1;(b)(e)0.2;(c)(f)0.3,SEM  
Fig.2 Morphology of tensile fracture of bearing steel GCr15 at 700℃ (a, b, c) and 900℃ (d, e, f), nitrogen content in steel /% : (a) (d) 0.1; (b) (e) 0.2; (c) (f) 0.3,SEM

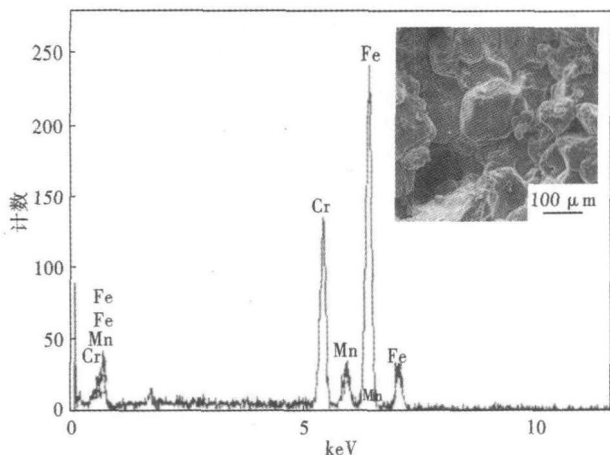


图 3 GCr15 轴承钢 1 150 °C 拉伸断口形貌及 X-射线能谱图, 0.3% N, SEM

Fig. 3 Morphology of tensile fracture of bearing steel GCr15 at 1 150 °C and energy dispersive X-ray spectrum, SEM, 0.3% N

### 2.3 氮元素对组织的影响

添加氮之后, 钢的沉淀析出行为发生很大变化。因为氮在碳化物中通常是不可溶的, 从而推迟碳化物的形核。图 4 (a) 中, 0.1% N 钢的晶界比较明显, 析出物部分分布在晶界上, 部分分布在晶内。图 4 (b) 中, 0.3% N 钢析出物大部分都在晶内。主要是因为氮化物在基体中均匀分布而不像碳化物偏向晶界择优分布, 并且在氮钢中没有脆性相。氮还能降低碳原子和铬原子的扩散能力, 推迟碳化物的过时效现象的发生; 由于氮提高铬的溶解度, 氮抑制金属间相的形成。氮在金属间相中不溶, 增加  $\sigma$  相得形成自由能, 使铬的溶解度提高。所有这些优点是源于氮原子的电子相互作用, 提高了附近费米能级态的密度, 提高了原子间结合键的金属键属性, 增加了

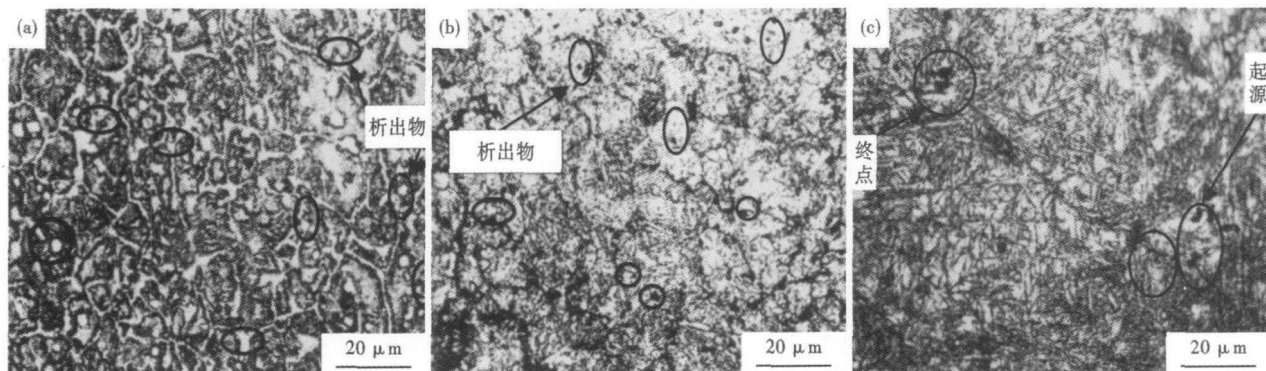


图 4 GCr15 轴承钢拉伸断口附近组织和析出物形貌: (a) 0.1% N, 900 °C; (b) 0.3% N, 900 °C; (c) 0.1% N, 700 °C

Fig. 4 Morphology of structure and precipitates in bearing steel GCr15 near tensile fracture: (a) 0.1% N, at 900 °C; (b) 0.3% N, at 900 °C; (c) 0.1% N, at 700 °C

钢的热塑性。图 4 (c) 中可以看出, 微裂纹形核是脆性析出物和建合弱的颗粒能促进晶界形成微孔, 同时裂纹也在析出物处终止。

### 3 结论

(1) 氮含量 0.1% ~ 0.2% 时, 随着氮含量的增加, 断面收缩率、峰值应力提高, 但幅度不大; 氮含量 0.2% ~ 0.3% 时, 氮含量增加, 断面收缩率有大幅度提升, 峰值应力变化不大。

(2) 750 °C 时拉伸断口可以看出氮含量 0.3% 的实验用钢的小韧窝数量多, 属于韧性断裂。含氮 0.1% 的实验用钢是沿晶断裂, 是脆性断裂。900 °C 拉伸断口中可以看出, 氮含量 0.3% 实验用钢的断口韧窝大而均匀, 属于韧性断裂, 氮含量 0.1% 的实验用钢部分区域有沿晶断裂。

(3) 在 900 °C 金相图像中可以看出, 氮元素有推迟碳化物形核的作用, 并且氮化物不择优偏向晶

界而在基体中均匀分布。

### 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. 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: 205
- 4 Zhao X, Jing T F, Gao Y W, et al. Morphology of Graphite in Hot-compressed Nodular Iron. Journal of Materials Science, 2004, 39: 6093
- 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, 硕士研究生导师, 冶金新工艺新技术研究。

收稿日期: 2010-12-20