

# 硫对 IN718 合金蠕变性能的影响

宋洪伟 郭守仁 胡壮麒

(中国科学院金属研究所, 沈阳 110015)

摘要: 研究了常规和掺杂 0.02wt% 硫的 IN718 合金的蠕变行为。结果表明, 硫降低 IN718 合金的蠕变抗力, 使表观蠕变激活能由 678.5kJ/mol 减小到 634.8kJ/mol。计算表明, 硫的危害主要来源于其对晶界扩散的促进作用。

关键词: IN718 合金; 硫; 蠕变; 晶界扩散

中图分类号: TG111.8 文献标识码: A 文章编号: 1005-5053(1999)01-0013-04

硫一直是高温合金中公认的有害元素之一<sup>[1]</sup>。事实上, 有关硫对工业高温合金影响的系统研究只是从 70 年代才真正开始<sup>[1]</sup>。最近, 有一系列文献报告了有关硫对 IN718 合金影响的新的研究结果<sup>[2~5]</sup>。本文重点研究了常规和掺杂 0.02wt% 硫的 IN718 合金的蠕变行为。有关这 2 个合金持久性能的试验结果已经在文献[5]中做了详细报告。

## 1 试验方法

### 1.1 试验材料的准备

2 种试验合金取自同一工业 IN718 母合金, 并经真空熔炼成每个重 10kg 的锭。其中标号为 M 的试验合金不掺杂任何元素(残余硫含量为 0.002wt%), 标号为 dS 的合金只掺杂 0.02wt% 硫; 2 种合金的残余磷含量都是 0.003wt%。试验合金经 1110 °C × 10h 均匀化处理, 在 1100 °C 锻造成截面为 35mm × 35mm 的棒料, 再在 1100 °C 轧制成  $\Phi$ 16mm 的棒材。蠕变试样均经过标准热处理: 965 °C × 1h 空冷, 720 °C × 8h 炉冷(50 °C/h)至 620 °C × 8h 空冷。有关试验材料制备的详细描述参阅文献[5]。

### 1.2 蠕变试验

蠕变试样的原始截面直径为 8mm, 原始计算长度为 100mm。采用 3 支热电偶控温, 另外接出 3 支热电偶进行温度监测。所有试验均进行至蠕变第 3 阶段。

## 2 试验结果

图 1a 和 b 分别给出了不同试验应力和温度下 2 种合金的稳态蠕变速率。显然, 在相同

收稿日期: 1998-11-30

作者简介: 宋洪伟(1962-), 男, 博士研究生, 副教授

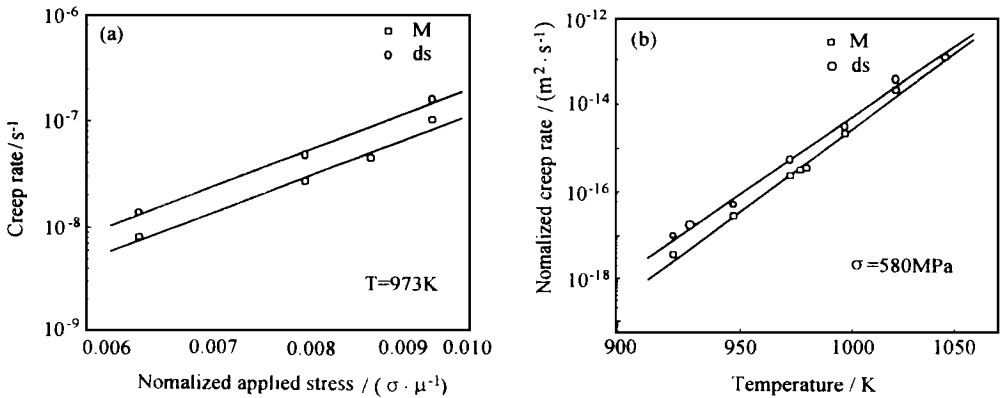


图1 稳态蠕变速率对试验应力(a)和对温度(b)的依赖关系

Fig. 1 Stress (a) and temperature (b) dependence of steady-state creep rate, where creep rate in (b) has been normalized by a factor of  $\mu b/kT$

的试验条件下, ds 的稳态蠕变速率总是高于 M。由此可见, 掺杂硫对 IN718 合金的蠕变性能有害, 但这种危害并不十分显著, 这与文献[5]的持久试验结果基本一致。

一般地, 稳态蠕变速率符合如下的 Dorn 方程<sup>[6]</sup>

$$\dot{\epsilon} = \frac{AD\mu b}{kT} \left( \frac{\sigma}{\mu} \right)^n \quad (1)$$

式中:  $\sigma$  是应力,  $n$  是应力指数,  $D = D_0 \exp(-Q/RT)$  是晶格扩散系数,  $D_0$  是频率因子,  $Q$  是扩散激活能(即表观蠕变激活能),  $\mu$  是剪切模量,  $b$  是 Burgers 矢量,  $k$  是 Boltzmann 常数,  $T$  是绝对温度,  $A$  是一个无量纲常数, 取  $\mu = 90190 - 30T$  (单位为 MPa),  $b = 0.249 \text{ nm}$ , 分别对图 1a 和 b 的数据进行线性拟合, 结果列于表 1。由表 1 可见, 在试验误差范围内, 硫对应力指数  $n$  没有明显影响。硫的作用主要集中于表观蠕变激活能  $Q$ : 掺杂 0.02wt% 硫使  $Q$  值由 678.5 kJ/mol 减小到 634.8 kJ/mol, 从而降低了 IN718 合金的蠕变抗力。

表1 按公式(1)确定的蠕变参数

Table 1 Creep parameters determined according to Dorn equation(1)

Alloy	$n$	$Q/(\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$
M	6.21	681.0
ds	6.23	634.8

### 3 讨论

尽管硫的具体作用机制目前尚无定论, 但可以肯定的是, 硫的作用与某种晶界效应有关<sup>[1~5]</sup>。Auger 分析已经证实, 硫偏聚于 IN718 合金的晶界<sup>[7]</sup>。然而, 前面的计算所依据的 Dorn 方程(1)并未直接包含晶界参数。为了解决这一问题, 可以应用本文导出的多晶体蠕变

宏观方程<sup>[8]</sup>:

$$\dot{\epsilon} = (1 + \beta \epsilon_{gb}) \epsilon_g \quad (2)$$

式中:  $\dot{\epsilon}$  是多晶体总的宏观稳态蠕变速率,  $\beta$  是与试验温度和应力无关的材料常数(称为晶内-晶界交互作用系数),  $\epsilon_g$  和  $\epsilon_{gb}$  分别是晶内和晶界的平均稳态蠕变速率, 二者都具有 Dorn 方程(1)的形式, 即

$$\dot{\epsilon} = [1 + \beta \frac{A_{gb} D_{gb} \mu_{gb} b_{gb}}{kT} (\frac{b_{gb}}{d})^p (\frac{\sigma}{\mu_{gb}})^{n_{gb}}] \frac{A_g D_g \mu_g b_g}{kT} (\frac{\sigma}{\mu_g})^{n_g} \quad (3)$$

式中:  $d$  和  $p$  分别是晶粒直径和晶粒尺寸指数, 其余参数的意义与 Dorn 方程(1)相似, 所不同的只是各个材料参数要加下标  $_g$  或  $_{gb}$  以注明晶内或晶界。为了简化计算, 假设: 就稳态蠕变而言, 硫只影响 IN718 合金的晶界扩散系数  $D_{gb}$ , 而对晶内扩散系数  $D_g$  和应力指数  $n_g$  以及晶界应力指数  $n_{gb}$  都没有影响。令  $p = 0$ ,  $\mu_g = \mu_{gb} = 90190 - 30T$  (单位为 MPa), 利用一个非线性最小二乘法程序, 用式(3)拟合本文图 1 所示的蠕变数据, 结果如表 2 所示。由表 2 可见, 掺杂硫使晶界扩散激活能  $Q_{gb}$  有所减小。根据式(2)和(3), 晶界扩散激活能的降低将促进晶界滑动, 从而导致试样总的宏观蠕变速率的提高。

文献[5]提出的硫促进 IN718 合金晶界氧化机制可以用硫对晶界扩散的影响来解释。在空气中进行持久试验时, 自表面沿晶界侵入的氧受晶界扩散的控制, 硫因促进晶界扩散而促进试样表面晶界的氧化, 从而损害了 IN718 合金的持久性能。

表 2 按公式(2)和(3)确定的蠕变参数

Table 2 Creep parameters determined according to equation (2) and (3)

Alloy	$n_g$	$n_{gb}$	$Q_g / (\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$	$Q_{gb} / (\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$
M	4.5	2.0	415.02	276.1
dS				239.3

## 4 结 论

(1) 硫降低 IN718 合金的蠕变抗力, 掺杂 0.02wt% 硫使表观蠕变激活能由 678.5kJ/mol 减小到 634.8kJ/mol。

(2) 计算表明, 硫的危害主要来源于其对晶界扩散的促进作用——掺杂 0.02wt% 硫使晶界扩散激活能由 276.1kJ/mol 减小为 239.3kJ/mol。

## 参考文献:

- [1] Holt R T, Wallace W. Impurities and trace elements in nickel-base superalloys. Int Met Rev, 1976 (21): 1 ~ 24
- [2] Xie X S, Liu X B, Hu Y H, et al. The role of phosphorus and sulfur in Inconel 718. In: Kissinger R D, Deye D J, Anton D L, et al, ed. Superalloys 1996. TMS, Warrendale, PA, 1996, 599

- [3] Hu Z Q, Sun W R, Guo S R. Effect of P, S and Si on the solidification, segregation, microstructure and mechanical properties in Fe-Ni base superalloy. *Acta Metall Sinica, English Letters*, 1996(9): 443 ~ 452
- [4] Guo S R, Sun W R, Lu D Z, et al. Effect of minor elements on microstructure and mechanical properties of IN 718 alloy. In: Loria E A, ed. *Superalloys 718, 625, 706 and Various Derivatives*. TMS, Warrendale, PA, 1997, 521 ~ 530
- [5] 宋洪伟, 郭守仁, 卢德忠等. 掺杂硫对 IN718 合金的影响. *金属学报*, 1999, 35(3): 281 ~ 284
- [6] Mukherjee A K, Bird J E, Dorn J E. Experimental correlations for high-temperature creep. *Trans ASM*, 1969(62): 155 ~ 179
- [7] Thompson R G, Koopman M C, King B H. Grain boundary chemistry of alloy 718-type alloys. In: Loria E A, ed. *Superalloys 718, 625 and Various Derivatives*. TMS, Warrendale, PA, 1991. 53 ~ 70
- [8] Song H W, Gou S R, Hu Z Q. Equation for non-diffusion creep of polycrystals. Submitted to *Mater Sci Eng A*, 1999, A252

## Effect of sulfur on creep behavior of IN718 alloy

SONG Hong-wei      GUO Shou-ren      HU Zhuang-qi

(Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110015, China)

**Abstract:** The effect of sulfur on the creep behavior of IN718 alloy has been investigated. The results show that sulfur decreases the creep resistance of IN718 alloy. Increasing sulfur content to 0.02wt% causes a reduction of the apparent creep activation energy from 678.5kJ/mol to 634.8kJ/mol. The harmful effect mainly arises from the enhanced diffusion along grain boundary by sulfur.

**Key words:** IN718 alloy; sulfur; creep; grain boundary diffusion