

硼、硫和铝对磷在 IN718 合金中作用的影响

宋洪伟 郭守仁 卢德忠 徐岩 王玉兰 胡壮麒

(中国科学院金属研究所)

摘 要 分析了硼、硫和铝对磷在 IN718 合金中作用的影响. 结果表明, 磷改善晶界 δ 相, 显著提高持久性能. 磷提高持久寿命的相对幅度不受铝含量的明显影响, 但随着硼含量的增加而加强、硫含量的增加而减弱. 硼、硫和铝对磷的作用的影响取决于其各自的晶界行为.

关键词 IN718 合金 磷 硼 硫 铝 持久性能

分类号 TG135

文章编号 1005-3093(2000)02-0183-05

INFLUENCES OF BORON, SULFUR AND ALUMINUM ON THE EFFECTS OF PHOSPHORUS IN IN718 ALLOYS

SONG Hongwei* GUO Shouren LU Dezhong XU Yan WANG Yulan HU Zhuangqi
(*Institute of Metal Research, The Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110015*)

ABSTRACT The influences of boron, sulfur and aluminum on the effects of phosphorus in IN718 alloys have been studied. The results showed that phosphorus improves the δ -phase on the grain boundary and increases the stress-rupture properties markedly. The relative increment of the stress-rupture life due to the phosphorus addition is not modified by aluminum but strengthened and weakened by boron and sulfur respectively. The effect of phosphorus is a phenomenon related to grain boundary. The characteristics of the influences of boron, sulfur, and aluminum depend on their respective behavior with respect to grain boundary.

KEY WORDS IN718 alloy, phosphorus, boron, sulfur, aluminum, stress-rupture property

适量的磷显著提高某些高温合金的持久和蠕变性能^[1~5]. 在镍基高温合金中, 硼是典型的晶界强化元素, 硫是常见的杂质元素, 而铝则是基本的析出强化元素. 研究这三种元素的影响对有效利用磷的有益作用以及探讨磷的作用机制具有重要意义. 本文测定了具有不同磷、硼、硫和铝含量的 8 种 IN718 基合金的组织 and 持久性能, 以研究磷的作用以及硼、硫和铝对磷的作用的影响.

1999 年 2 月 4 日收到初稿; 2000 年 1 月 17 日收到修改稿.

本文联系人: 宋洪伟, 沈阳市 110015, 中国科学院金属研究所

* To whom correspondence should be addressed

1 实 验 方 法

实验合金经真空感应熔炼, 每个合金锭重 10 kg. 8 种合金分为两组: No.1、No.3、No.5、No.7 合金为第一组, 磷含量为 0.003%(质量分数, 下同), 与母合金的相同; No.2、No.4、No.6、No.8 合金为第二组, 磷含量为 0.02%. 合金基体中 Ni、Cr、Nb、Ti、Mo、C、Si 以及 Mg 的含量分别为: 52.65, 18.36, 5.26, 1.02, 3.03, 0.038, 0.13, 0.004, 其余为 Fe. 各实验合金的硼、硫和铝含量列于表 1. 锻轧后试棒的热处理制度为: 在 965 °C 保温 1h, 空冷, 在 720 °C 保温 8 h, 炉冷 (50 °C /h) 至 620 °C 再保温 8h, 然后空冷. 持久性能实验在温度为 650 °C、应力为 690MPa 的条件下进行. 用扫描电镜分析显微组织和持久断口.

表 1 实验合金的硼、硫和铝含量

Table 1 Contents of alloying elements in the test alloys (mass fraction, %)

Alloy No.	1	2	3	4	5	6	7	8
P	0.003	0.02	0.003	0.02	0.003	0.02	0.003	0.02
B	0.005	0.005	0.01	0.01	0.005	0.005	0.005	0.005
S	0.002	0.002	0.002	0.002	0.02	0.02	0.002	0.002
Al	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.90	0.90

2 结 果 与 讨 论

2.1 原始组织

图 1 表明, 两组相应合金晶界 δ 相的数量、形态和分布不同. 由表 2 可见, 与常规 IN718 合金 No.1 相比, 单独添加磷的 No.2 合金晶界 δ 相的体积分数略少、个体长度较小、分布更加均匀. No.2 合金晶界 δ 相的特征有利于阻碍晶界的长程滑动. 可见, 添加磷对晶界 δ 相有一定的改善作用. 磷在高硫合金和高铝合金中的作用性质与此类似, 但作用的幅度不同. 其中硫对磷的上述作用影响不大, 而铝则使磷改善晶界 δ 相的作用更加显著. 磷和铝含量都高的 No.8 合金的 δ 相呈颗粒状, 分布均匀, 并在晶界上形成链. 在高硼合金中, 磷的作用有所不同. 与 No.3 合金相比, 添加磷的 No.4 合金的 δ 相没有改善. 这说明, 硼对磷改善晶界 δ 相的作用略有削弱.

2.2 持久性能

实验合金的持久寿命 τ 、断面收缩率 ψ 和延伸率 δ 也列于表 2. 为添加磷所引起的相对寿命增幅. 可见, 第二组合金的性能均高于第一组的相应合金. 这说明, 无论硼、硫和铝含量高低, 添加磷都使持久性能提高. 其中, 以持久寿命的提高最为显著: 所有添加磷的合金的寿命都比相应的未添加磷的合金提高一倍以上, 提高的绝对幅度均大于 100h. 不过, 不同合金的相对寿命增幅有所不同. 与向常规合金 (No.1) 添加磷相比, 向高硼合金添加磷引起的相对寿命增幅加大 (No.4 与 No.3); 相反, 向高硫合金添加磷引起的相对寿命增幅减小 (No.6 与 No.5); 而向高铝合金中添加磷引起的相对寿命增幅几乎不变 (No.8 与 No.7). 换言之, 磷的有益作用因硼含量的增加而加强、因硫含量的增加而减弱, 但不受铝含量变化的明显影响. 由图 2 可见, 两组实验合金的持久开裂模式有明显的差别: 第一组合金以沿晶方式开裂, 第二组合金以混晶方式开

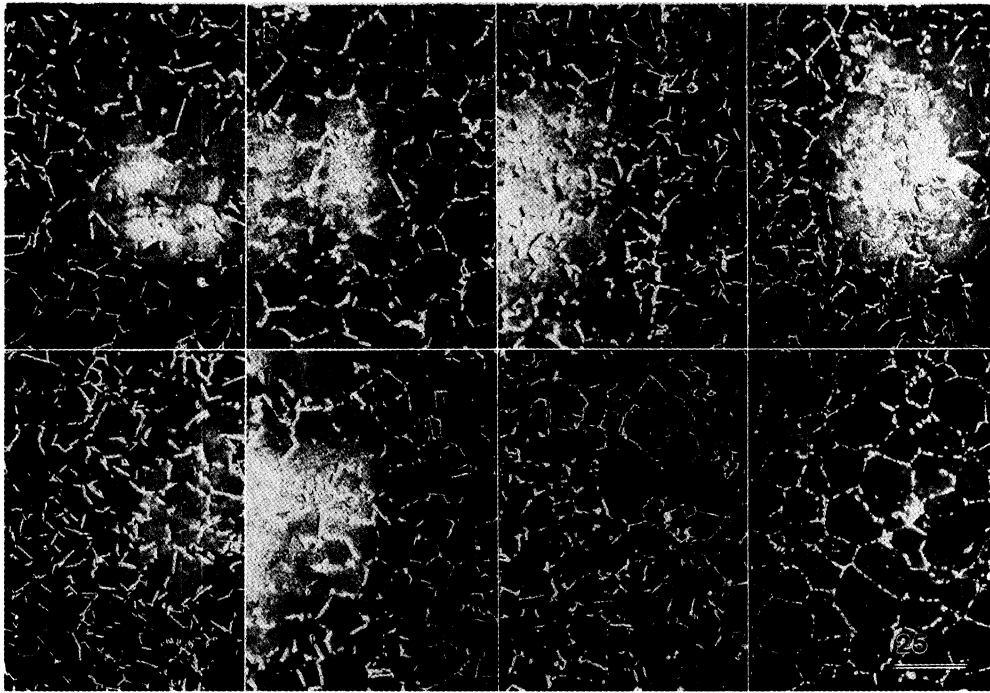


图 1 实验合金热处理后的显微组织

Fig.1 Microstructures of the test alloys after heat-treated

(a)No.1; (b)No.2; (c)No.3; (d)No.4; (e)No.5; (f)No.6; (g)No.7; (h)No.8

裂. 这表明, 不论硼、硫和铝含量高低, 添加磷都改善 IN718 的持久开裂模式. 磷的这一作用随着硼、硫和铝含量的高低略有变化. 这三种元素对磷改善持久开裂模式作用的影响与其对磷提高持久寿命作用的影响具有定性一致的规律.

所述结果表明, 磷改善 IN718 合金晶界 δ 相和持久开裂模式, 磷的作用是一种晶界效应. 这是微量元素在高温合金中的普遍作用机制^[6,7]. 由持久开裂模式的改善可知, 磷增加了 IN718 合金的高温晶界强度, 这是磷改善持久性能的根本原因. 硼、硫、铝三种元素对磷的作用的影响取决于其各自的晶界行为. 有证据表明, 磷^[1,5,8]以及硼^[1,5,8]和硫^[8]都在 IN718 合金的晶界偏聚. 因此, 硼和硫能够通过某种机制, 如竞争晶界位置, 对磷的作用产生较明显的影响. 硼是高温合金中典型的晶界强化元素^[6,7], 一定量的硼替代晶界上的磷^[9,10]有可能强化磷增加高温晶界强度的作用; 相反, 硫是常见的有害杂质^[6,7], 一定量的硫替代晶界的磷有可能削弱磷的作用^[11,12]. 与磷以及硼和硫不同, 铝是高温合金中的基本析出强化元素, 改变铝含量对 IN718 合金的 γ' 和 γ'' 相以及晶界 δ 相会产生一定影响. 提高铝含量可以增强磷改善晶界 δ 相的作用. 但是, δ 相的改善可能并非磷改善持久性能的唯一原因(见表 2); 而且, 磷对 γ' 和 γ'' 相^[5]的影响也不明显. 因此, 铝对磷改善持久性能的作用影响不大.

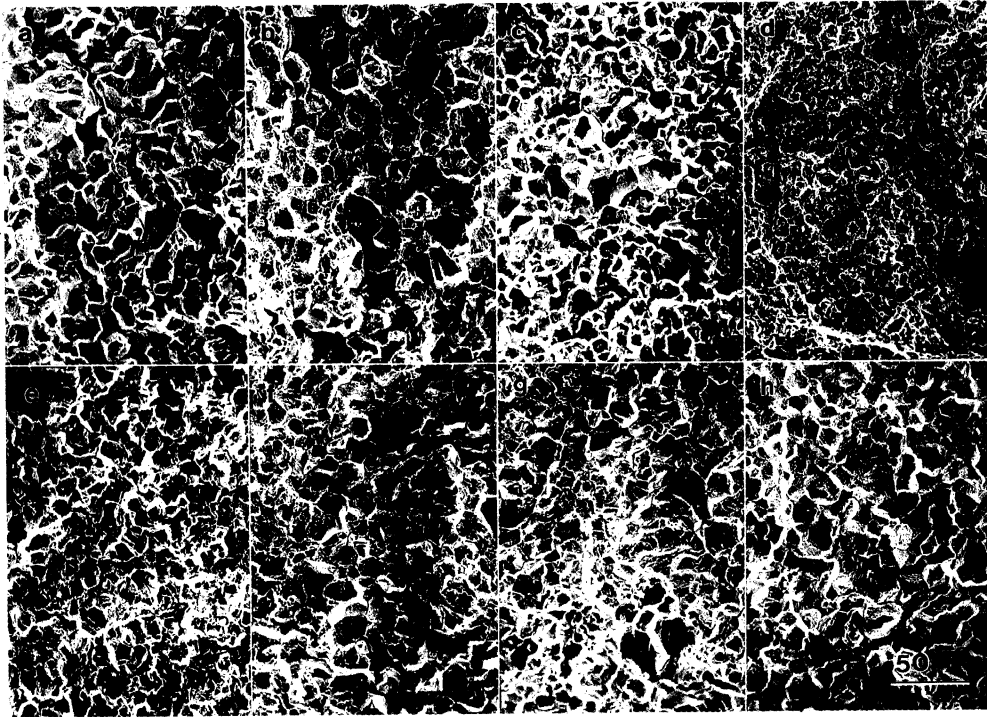


图 2 实验合金持久断口裂纹源区照片

Fig.2 Crack originating zone on the fractures of the test alloys stress-ruptured
(a)No.1; (b)No.2; (c)No.3; (d)No.4; (e)No.5; (f)No.6; (g)No.7; (h)No.8

表 2 磷对各种 IN718 基合金 δ 相体积分数、平均长度和持久性能的影响

Table 2 Effects of phosphorus on the volume fraction and average length of δ -phase particles as well on the stress-rupture properties of various IN718 based alloys. The data in the fifth row indicate the relative life increments of the phosphorus-doped alloys with respect to their counterpart alloys

Alloy No.	1	2	3	4	5	6	7	8
$f_{\delta}/\%$	10	8	12	16	16	14	15	9
$L_{\delta}/\mu\text{m}$	2.2	1.6	2.1	2.2	2.5	2.3	2.6	1.8
τ/h	170	426	87	263	150	311	85	213
$\frac{\tau_{i+1}-\tau_i}{\tau_i}/\%*$	+151	+151	+204	+204	+107	+107	+150	+150
$\psi/\%$	13	25	13	35	20	27	12	13
$\delta/\%$	10	11	7	12	14	17	6	8

* τ_i and τ_{i+1} are the life of No. i and No. $i+1$ alloys respectively; $i=1, 3, 5$ or 7

3 结 语

磷改善 IN718 合金晶界 δ 相的形态和分布, 提高铝含量明显加强了磷的这一作用; 磷显著提高 IN718 合金的持久性能, 提高的相对幅度不受铝含量的明显影响, 但随着硼含量的增加而加强、硫含量的增加而减弱. 硼、硫和铝对磷的作用的影响取决于其各自的晶界行为.

参 考 文 献

- 1 W.D.Cao, R.L.Kennedy, in *Superalloys 718, 625, 706 and Various Derivatives*, ed. by E. A.Loria (PA, Warrendale, TMS, 1994) p.463
- 2 W.D.Cao, R.L.Kennedy, in " *Superalloys 1996* ", ed. by R.D.Kissinger, D.J.Deye, D.L.Anton, A.D.Cetel, M.V.Nathal, T.M.Pollock, D.A.Woodford, (PA, Warrendale, TMS, 1996) p.589
- 3 Z.Q.Hu, W.R.Sun, S.R.Guo, *Acta Metall. Sinica, English Letters*, **9**, 443(1996)
- 4 S.R.Guo, W.R.Sun, D.Z.Lu, Z.Q.Hu, in *Superalloys 718, 625, 706 and Various Derivatives*, ed. by E.A.Loria, (PA, Warrendale, TMS, 1997) p.521
- 5 J.A.Horton, C.G.McKamey, M.K.Miller, W.D.Cao, R.L.Kennedy, in *Superalloys 718, 625, 706 and Various Derivatives*, ed. by E. A. Loria (PA, Warrendale, TMS, 1997) p.401
- 6 R.T.Holt, W.Wallace, *Int.Metals Rev.*, **21**, 1(1976)
- 7 M.McLean, A.Strang, *Met.Technol.*, **11**, 454(1984)
- 8 R.G.Thompson, M.C.Koopman, B.H.King, in *Superalloys 718, 625 and Various Derivatives*, ed. by E. A. Loria (PA, Warrendale, TMS, 1991) p.53
- 9 E.Hall, C.L.Briant, *Metall.Trans.A*, **16A**, 1225(1985)
- 10 R.M.Kruger, G.S.Was, *Metall.Trans.A*, **19A**, 2555(1988)
- 11 T.Takasugi, D.P.Pope, *Metall.Trans.A*, **13A**, 1471(1982)
- 12 S.H.Chen, T.Takasugi, D.P.Pope, *Metall.Trans.A*, **14A**, 571(1983)