

复合添加磷和硼对 Inconel 718 合金的影响

Effect of Combined Addition of Phosphorus and Boron
on Inconel 718 Alloy

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, 沈阳 110015)

SONG Hong-wei, GUO Shou-ren, LU De-zhong, XU Yan, WANG Yu-lan, HU Zhuang-qi
(Institute of Metal Research, The Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110015, China)

[摘要] 研究了磷和硼对 Inconel 718 合金持久和蠕变性能的影响。结果表明, 单独添加 0.02% 磷对性能明显有益, 单独提高硼含量至 0.01% 对性能有害, 复合添加磷和硼的效果最佳。磷和硼复合作用显著有益的原因在于磷与硼之间存在强烈有益的交互作用, 其机制可能与磷、硼和基体原子的晶界集团扩散有关。

[关键词] Inconel 718 合金; 磷-硼交互作用; 持久寿命; 蠕变速率

[中图分类号] TG 113.2; TG 132.3 [文献标识码] A [文章编号] 1001-4381 (1999) 08-0003-03

Abstract: The effect of phosphorus and boron on stress-rupture and creep properties of Inconel 718 alloy has been studied. The results indicate that addition of 0.02% phosphorus alone is beneficial and increasing boron content alone to 0.01% is harmful. The optimum property improvements can be achieved by combined addition of phosphorus and boron due to the strong beneficial interaction between phosphorus and boron, which probably associates with the group grain boundary diffusion of phosphorus, boron, and matrix atoms.

Key words: Inconel 718 alloy; phosphorus-boron interaction; stress-rupture life, creep rate

磷和硼是高温合金中两种常见的微量元素, 二者一直分别被看作有害杂质和典型的晶界强化元素^[1,2]。在应用广泛的高温合金 Inconel 718 中, 通常把硼含量保持在 0.004% (质量分数, 下同) 左右, 而把磷含量控制在 0.015% 以下。不过, 业已有研究表明, 磷显著提高 Inconel 718 合金的持久和蠕变性能^[3~6]。最近, Cao 等人^[7,8]又发现, 磷与硼之间存在有益的交互作用。磷-硼交互作用强化了磷的有益作用, 对于改善高温合金的性能具有一定的意义。目前, 对磷-硼交互作用机制及其与磷和硼单独作用之间的关系尚缺乏深入的了解。本研究测定了四种不同磷和硼含量的 Inconel 718 合金 650 的持久和蠕变性能, 以研究复合添加磷和硼的影响并探讨其可能的作用机制。

1 实验方法

四种试验合金取自同一工业用 Inconel 718 母合金,

并按同样的工艺经真空感应熔炼成每个 10 kg 的锭。其中 No. 1 合金保持母合金的磷和硼含量不变, No. 2 合金添加磷、No. 3 合金添加硼, No. 4 合金同时添加磷和硼。熔炼后各合金的成分列于表 1。试验合金锻轧后, 经过如下的热处理: 965 保温 1h 空冷, 720 保温 8h 炉冷 (50 /h) 至 620 再保温 8h 空冷。持久试验在 650 , 690MPa 进行, 蠕变试验在 650 , 580MPa 进行, 对持久断口进行了扫描电镜分析。

2 试验结果及其分析

2.1 持久和蠕变性能

表 2 列出了各试验合金的持久寿命、延伸率和稳态蠕变速率。与 No. 1 合金相比, No. 2 合金的 $\sigma_{0.2}$ 值高、 $\sigma_{0.01}$ 值低; 相反, No. 3 合金的 $\sigma_{0.2}$ 值低而 $\sigma_{0.01}$ 值高。这说明, 向常规 Inconel 718 合金中单独添加 0.02% 的磷对持久和蠕变性能有益; 而在保持磷为常规含量的情况下, 单独把硼由常规含量 (大约 0.004%) 增加至 0.01% 对性能有害。但是, 如果同时提高磷和硼含量, 则取得

表 1 试验合金的化学成分 (质量百分数; 余为 Fe)

Table 1 Chemical composition of the test alloys (mass fraction, %; Fe: the balance)

Heat No.	C	Si	S	Cr	Mo	Al	Ti	Nb	P	B	Ni
1	0.036	0.13	0.019	18.5	3.02	0.56	1.02	5.28	0.003	0.004	52.5
2	0.039	0.12	0.014	18.6	3.04	0.52	1.04	5.25	0.02	0.004	52.3
3	0.032	0.12	0.013	18.4	3.05	0.48	1.03	5.13	0.03	0.01	52.7
4	0.037	0.13	0.013	18.3	3.03	0.48	1.01	5.17	0.02	0.01	52.0

表 2 试验合金的持久和蠕变性能

Table 2 Stress-rupture and creep properties of the test alloys

合金	1	2	3	4
/h	150	311	75	524
/%	14	17	9	10
/10 ⁻³ h ⁻¹	1.0	0.4	2.8	0.2

注: 表中数据取自至少两个试样的平均值。

最佳的性能改善效果: 在所有的合金中, No.4 合金具有最高的持久寿命和最低的蠕变速率。换言之, 复合添加磷和硼优于单独添加磷或硼, 二者对合金的复合作用显著有益。

整理表 2 中的持久寿命值, 得到表 3。其中磷的单独作用、硼的单独作用以及二者的复合作用分别等于单独添加磷、单独添加硼以及同时添加磷和硼所引起的持久寿命增幅。显然, 磷和硼的复合作用 (+ 374h) 远远高于二者的单独作用之和 (+ 86h), 高出的幅度 (288h) 之大显然不能归因于试验误差的影响。这说明, 磷和硼复合作用不能用二者单独作用的线性叠加来估计。换言之, 磷的作用与硼的作用并非相互独立, 二者之间存在着交互作用。数值上, 复合作用等于两个单独作用与交互作用三项之和, 或者说, 交互作用等于复合作用减去两个单独作用。根据符号性质和数值大小判断, 磷-硼交互作用显著有益。按绝对值大小排列, 两个单独作用和交互作用的主次顺序为: 磷-硼交互作用> 磷的单独作用> 硼的单独作用。由此可见, 磷和硼复合作用的绝大部分来源于二者之间的交互作用, 复合添加磷和硼显著有益的最主要原因在于磷-硼交互作用是显著有益的。

2.2 持久断口

对持久断口的低倍观察表明, 所有试验合金的裂纹源都位于表面附近。图 1 是试验合金持久断口裂纹源区照片。其中只有 No.3 合金的开裂方式是沿晶的, No.1、2 和 4 合金的断口都是混晶的。粗略观察, 这四种试验

表 3 磷和硼的单独作用、复合作用及其交互作用对 Inconel 718 合金持久寿命的影响

Table 3 Individual and combined effects of phosphorus and boron along with their interaction on the stress-rupture life of Inconel 718 alloy, where t_i is the life of No. i alloy

磷的单独作用 $t_2 - t_1/h$	硼的单独作用 $t_3 - t_1/h$	磷和硼的复合作用 $t_4 - t_1/h$	磷和硼的交互作用 ($t_4 - t_1$) - [($t_2 - t_1$) + ($t_3 - t_1$)] /h
+ 161	- 75	+ 374	+ 288

合金沿晶开裂率由高至低依次为: No.3> No.1> No.2 > No.4。也就是说, 单独增加硼含量促进沿晶开裂, 单独添加磷对持久开裂方式有所改善, 而复合作用添加磷和硼的有益作用最显著。不同添加方式对持久断裂的这种影响与其对持久寿命和蠕变速率的影响规律基本一致(参见表 2)。

3 讨论

磷的有益作用与抑制晶界扩散有关^[6]。提高硼含量至 0.01% 对 Inconel 718 合金持久和蠕变性能不利的原因比较复杂。Cao 和 Kennedy^[7]的研究表明, 当磷含量较低时, Inconel 718 合金的持久寿命随着硼含量的增加先是提高而后下降, 在含硼 0.01% 左右达到持久寿命峰值。本研究添加的硼含量接近这一峰值, 但却对持久寿命有害。其原因可能在于, 文献 [7] 所研究的合金碳含量较低 (0.005% ~ 0.03%)。因此, 本研究的合金的最佳硼含量应该低于 0.01% (实际上, 各种技术条件都把常规 Inconel 718 合金的硼含量限制在 0.006% 以下)。根据试验结果推测, 本研究的合金持久寿命峰值所对应的硼含量值可能介于常规含量 (大约 0.004%) 与 0.01% 之间。低于这一含量, 硼提高持久性能; 高于这一含量, 例如将硼含量增加到 0.01%, 反而损害其持久性能。

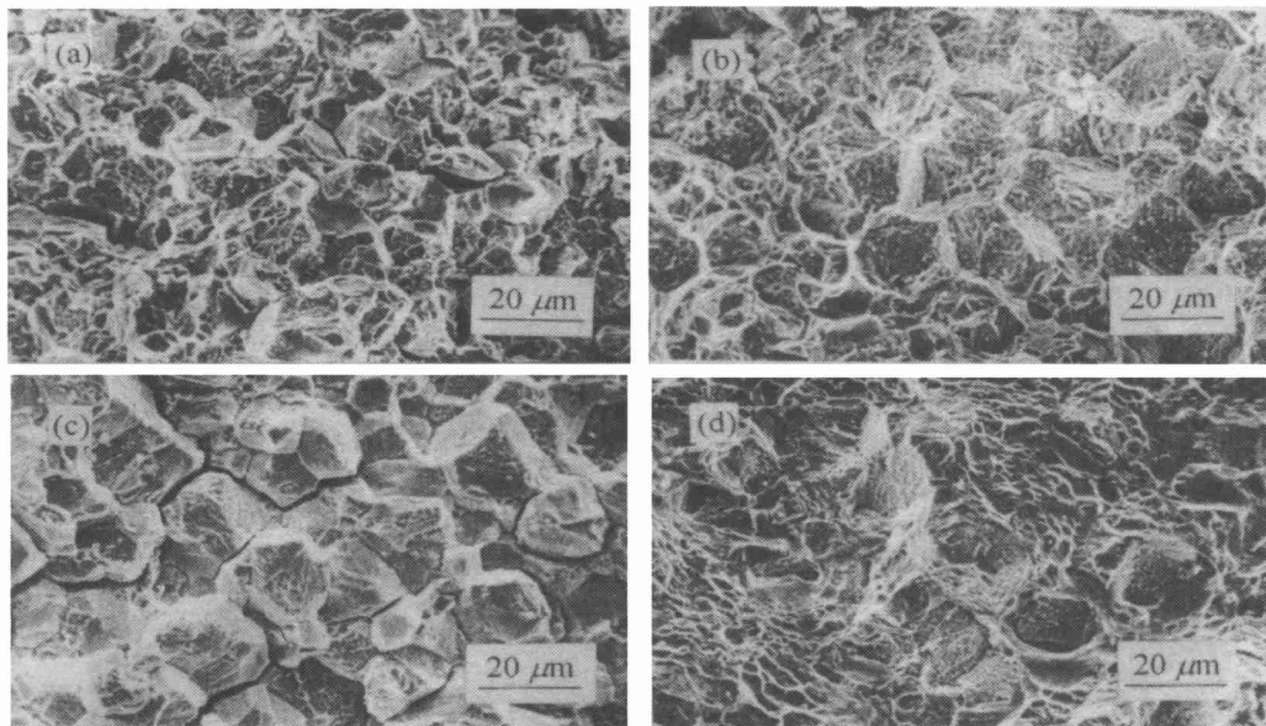


图 1 试验合金持久断口裂纹源区照片 (a) No. 1; (b) No. 2; (c) No. 3; (d) No. 4

Fig. 1 Crack originating zone on the fractures of the test alloys stress-ruptured

本试验表明, 磷与硼之间存在显著有益的交互作用, 复合添加磷和硼可以取得最佳的性能改善效果。有研究证实, 磷^[3,5,8]和硼^[8,9]都向 Inconel 718 合金的晶界偏聚。因此, 磷-硼交互作用肯定与晶界有关。最近, Molodov 等人^[10]在研究铋双晶体的晶界运动时提出了一个“原子的集团扩散机制 (group mechanism)”以解释非对称晶界的异常高迁移激活能。应用这一机制可以比较合理地解释磷与硼之间的有益交互作用。众所周知, 蠕变是一个热激活过程, 受位错的攀移亦即原子的扩散控制。文献[6]的研究表明, 磷通过抑制晶界扩散而改善 Inconel 718 合金的持久和蠕变性能。如果复合添加磷和硼, 若干磷和硼的偏聚原子就有可能与基体原子发生交互作用并在晶界形成集团 (并非化合物)。这种集团在持久或蠕变变形过程中需要通过协同运动 (cooperative motion) 才能进行晶界扩散。结果, 位错攀移阻力和晶界抗蠕变开裂能力增加, 使合金的持久寿命显著提高。

4 结论

(1) 单独添加 0.02% 磷对 Inconel 718 合金的持久和蠕变性能明显有益, 单独提高硼含量至 0.01%

略微有害, 而复合添加 0.02% 磷和 0.01% 硼能够产生最佳的性能改善效果。

(2) 复合添加磷和硼对 Inconel 718 合金的有益作用高于单独添加磷和硼的单独作用之和, 磷与硼之间存在显著有益的交互作用。其机制可能与磷、硼和基体原子的晶界集团扩散有关。

参考文献

- [1] Holt R T, Wallace W. Impurities and trace elements in nickel-base superalloys. *Int Metals Rev*, 1976; 21: 1.
- [2] McLean M, Strang A. Effects of trace elements on mechanical properties of superalloys. *Metals Technol*, 1984; 11: 454.
- [3] Cao W D, Kennedy R L. The effect of phosphorus on mechanical properties of alloy 718. In: Loria E A ed., *Superalloys 718, 625, 706 and Various Derivatives*, Warrendale, PA: 1994: 463.
- [4] Guo S R, Sun W R, Lu D Z, Hu Z Q. 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*, Warrendale, PA: 1997: 521.

(下转第 29 页)

摩擦副高温下摩擦系数较稳定。由于摩擦性能的分散度较大, 所以不同摩擦副的摩擦系数值呈带状分布。

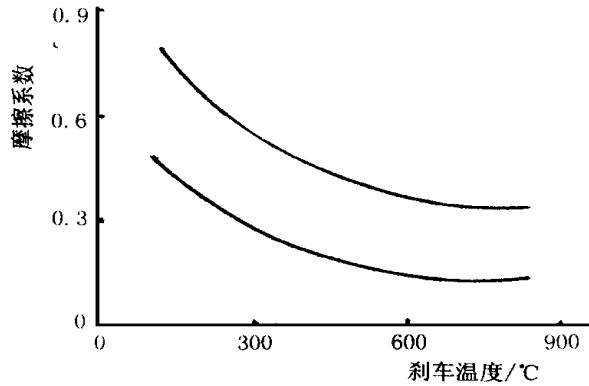


图2 铁基摩擦材料摩擦系数与温度的关系曲线

Fig.2 Relationship between the friction coefficient and temperature of iron-based friction materials

(2) 模拟刹车试验。模拟刹车试验是在实验室条件下用小试样根据惯性制动原理和模拟试验方法对摩擦副进行刹车性能试验, 一般结果示于图3。理论和经验证明, 这是实验室最重要的试验。正确选择和控制试验条件能得到与外场实际使用条件较为一致的结果。

5 结论

(1) 铁的熔点高, 其强度、硬度、塑性、耐热强度

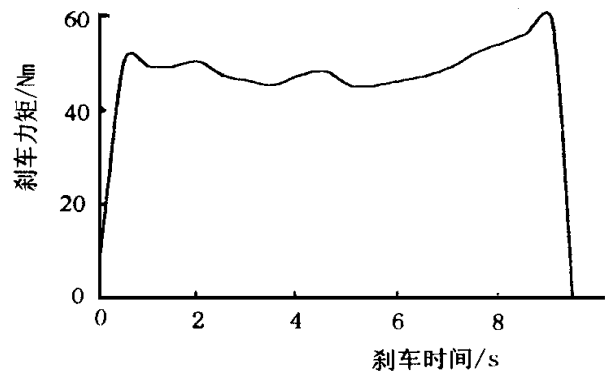


图3 模拟刹车力矩曲线

Fig.3 Simulated brake torque curve

和抗氧化性等, 可通过合金化而加以调整, 且铁基摩擦材料经济性好, 因此铁基金属陶瓷摩擦材料广泛应用于航空、汽车及工程机械等刹车或离合器中。

(2) 铁基金属陶瓷摩擦材料在高温高负荷下显示出更加优良的摩擦性能, 且机械强度高, 能承受较大载荷, 因此, 被广泛应用于重载或超重载刹车条件。

[作者简介] 王秀飞 (1970-), 男, 工程师, 在北京航空材料研究院从事飞机刹车材料研究。联系地址: 北京市81信箱26分箱 (邮编100095)

(上接第5页)

- [5] Xie X S, Liu X B, Dong J X, Hu Y H, Xu Z C, Zhu Y X, Luo W B, Zhang Z W, Thompson R G. Segregation behavior of phosphorus and its effect on microstructure and mechanical properties in alloy system Ni-Cr-Fe-Mo-Nb-Ti-Al. In: Loria E A ed., Superalloys 718, 625, 706 and Various Derivatives, TMS, Warrendale, PA: 1997: 531.
- [6] 宋洪伟, 郭守仁, 胡壮麒. 磷在变形IN 718合金中的作用. 金属学报, 1999; 35: 387.
- [7] Cao W D, Kennedy R L. Phosphorus-boron interaction in Nickel base superalloys. In: Kissinger R D, Deye D J, Anton D L, Cetel A D, Nathal M V, Pollock T M, Woodford D A ed., Superalloys 1996, TMS, Warrendale, PA: 1996: 589.
- [8] Horton J A, McKamey C G, Miller M K, Cao W D, Kennedy R L. Microstructural and characterization of superalloy 718 with boron and phosphorus addition. In: Lo-

ria E A ed., Superalloys 718, 625, 706 and Various Derivatives, TMS, Warrendale, PA: 1997: 401.

- [9] Chen W, Chaturvedi M C, Richards N L, and McMahon G. Grain boundary segregation of boron in Inconel 718. Metall. Mater. Trans A, 1998; 29A: 1947.
- [10] D A Molodov, G Gottstein, F Heringhaus, and Shvindlerman L S. D A Molodov. True absolute grain boundary motion of specific planar boundaries in Bi-bicrystals under magnetic driving forces. Acta Mater, 1998; 46: 5627.

[作者简介] 宋洪伟 (1962-), 男, 辽宁省丹东市人, 高级工程师, 1987年毕业于大连工学院研究生院, 现于中国科学院金属研究所从事变形高温合金研究。

联系地址: 沈阳文化路72号 中国科学院金属研究所 第六研究室 (邮编110015)