

磷对 IN718 合金蠕变性能的影响

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 研究了磷对 IN718 合金蠕变性能的影响。结果表明,磷显著提高蠕变抗力。磷对应力指数没有明显的影响,掺杂 0.02% 磷使表观蠕变激活能由 678.5kJ/mol 提高至 746.1kJ/mol。磷的有益作用可能是通过抑制晶界扩散实现的。

关键词 IN718 合金 磷 蠕变

分类号 TG113

EFFECT OF PHOSPHORUS ON THE CREEP BEHAVIOR OF IN718 ALLOY

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 effect of phosphorus on the creep behavior of IN718 alloy has been studied. The results showed that phosphorus significantly increases the creep resistance. Increasing phosphorus to 0.02% has no notable effect on the stress exponent but causes an increase of the apparent creep activation energy from 678.5kJ/mol to 746.1kJ/mol. It has been proposed that the beneficial effect of phosphorus arises from the suppression of the diffusion along grain boundaries.

KEY WORDS IN718 alloy, phosphorus, creep

长期以来,人们一直认为高温合金中的磷是有害的^[1,2]。但最近的研究发现,适量磷可以显著改善某些高温合金的持久性能^[3~5]。对 IN600^[6] 和 IN718 合金^[7] 蠕变的研究表明,磷显著提高蠕变抗力。不过,由于这些研究只测定了特定试验温度和应力条件下的蠕变,不能揭示磷对应力指数和蠕变激活能等重要参数的影响。McKamey 等人虽然对高纯、常规和微合金化的 IN718 合金的蠕变进行了系统的研究^[8],但是,由于这三种合金不仅磷含量不同,而且硼和碳含量也进行了较大幅度的调整,根据该研究仍无法了解磷的单独作用。本文制备了含磷 0.003% 和 0.02% 的 IN718 合金,以研究单独改变磷含量对蠕变的影响。

试验方法 两种试验合金均取自同一工业 IN718 母合金,并按同样的工艺经真空感应熔炼成每个重 10kg 的锭。其中标号为 M 的试验合金保持母合金成分(磷含量为 0.003%),标号为 DP 的合金只掺杂 0.02% 磷。熔炼后的基体化学成分为(质量百分数,下同): Ni 52.65, Cr 18.36, Nb 5.26, Al 0.55, Ti 1.02, Mo 3.03, C 0.038, Si 0.13, S 0.002, Mg 0.004, Fe 为余量。试验合金经 1110 °C 均匀化处理 10h 后,在 1100 °C 锻造截面为 35mm×35mm

1999 年 1 月 13 日收到初稿; 1999 年 6 月 10 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

的棒料, 再在 1100 °C 经一火轧制成直径为 16mm 的棒材. 蠕变性能试棒均经过标准热处理, 即 965 °C 下保温 1h 空冷, 720 °C 保温 8h 炉冷 (50 °C /h) 至 620 °C 再保温 8h 空冷. 经过标准热处理后, M 和 DP 合金的金相组织没有明显的区别, 二者的平均晶粒直径分别为 10.6 μ m 和 10.0 μ m.

蠕变试样的原始截面直径为 8mm, 原始计算长度为 100mm. 试验在空气中进行. 应力指数通过在 700 °C 下不同应力水平的稳态蠕变速率求得. 相应的应力水平值分别为 393MPa、490MPa、535MPa 和 580MPa. 蠕变激活能通过 580MPa 下不同温度的稳态蠕变速率求得. 相应的试验温度在 650~775 °C 范围内、大约间隔 25 °C 取值, 具体的温度以实际测定值为准.

对蠕变试样的纵向剖面进行了 SEM 分析. 对试样采用电解抛光和电解腐蚀. 电解抛光液的成分为: 20% H_2SO_4 + 80% 甲醇; 电解腐蚀液的成分为: 1 份 HCl+3 份 HNO_3 +5 份甘油.

结果与讨论

蠕变曲线 比较图 1a 和 b 可知, 磷对蠕变第一阶段的影响不大. 磷的作用突出表现在对蠕变第二阶段的影响上: 掺杂磷显著降低 IN718 合金的稳态蠕变速率. 这一作用的直接结果是推迟了蠕变第三阶段的发生, 从而使蠕变断裂寿命或持久寿命大大延长. 这一点已经为持久试验所证实^[3~5].

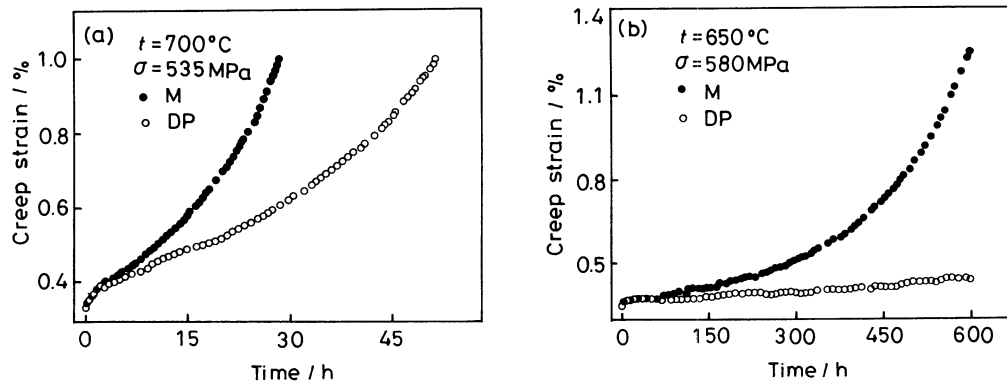


图 1 两种合金在 700 °C、535MPa(a) 和 650 °C、580MPa(b) 的蠕变曲线

Fig.1 Creep curves at 700 °C under 535MPa (a) and at 650 °C under 580MPa (b)

应力指数和蠕变激活能 图 2 表明, DP 合金的稳态蠕变速率总是低于 M 合金的相应值. 可见, 适量的磷的确提高了 IN718 合金的蠕变抗力. 通常, 稳态蠕变速率符合如下的 Dorn 方程^[9]:

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

其中 σ 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 (或表观蠕变激活能), μ 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 $b=0.249$ nm、 $\mu(T)=90190-30T$ (单位为 MPa, 该关系式由文献 [10] 中 300~700 °C 切变模量数据回归确定), 对图 2a 和 b 的数据进行线性拟合, 结果列于表 1. 可见, 在试验误差范围内, 磷对应力指数 n 没有明显影响. 磷的作用在于改变表观蠕变激活能: 掺杂 0.02% 磷使 Q 值由 678.5kJ/mol 提高至 746.1kJ/mol.

磷的作用机制 由图 3 可见, 蠕变进行相同时间之后, M 合金的晶界有明显的滑动, 并在三叉点与晶界相之间形成了孔洞 (箭头所指), 而 DP 合金的晶界却看不出变形和开裂的迹象. 这说明, 磷抑制了 IN718 合金的晶界滑动.

磷的作用机制目前尚无定论. 磷的作用是一种晶界效应^[1,2], 已有证据表明磷在 IN718 合金的晶界偏聚^[3,7,11]. 偏聚元素对晶界有三方面的直接作用: 晶界能、晶界扩散和晶界结合力^[12], 其中晶界能的降低与

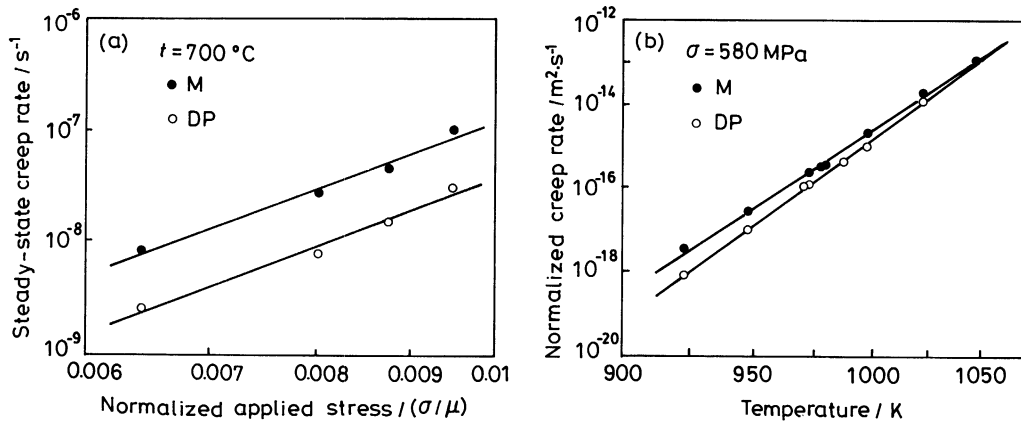


图 2 稳态蠕变速率对试验应力 (a) 和温度 (b) 的依赖关系

Fig.2 Stress (a) and temperature (b) dependence of steady-state creep rate (Creep rate in (b) has been normalized by a factor of $\mu b/kT$)

表 1 试验合金的应力指数和表观蠕变激活能

Table 1 Stress exponent and apparent creep activation energy for the alloys tested

Alloy	n	$Q/kJ \cdot mol^{-1}$
M	6.21	678.5
DP	6.23	746.1

晶界偏聚互为因果, 而晶界扩散与高温力学性能如持久或蠕变性能密切相关. 蠕变是一个热激活过程, 稳态蠕变速率受位错的攀移亦即原子的扩散速率控制 (公式 1). 本文的结果表明, 磷的突出作用在于蠕变第二阶段—磷显著降低稳态蠕变速率、提高表观蠕变激活能 (亦即扩散激活能). 磷的这一作用可能与晶界“适配”的改善^[13] 或者晶界“自由体积”的减少^[14] 有关. 由于晶界扩散与晶界滑动性成正比, 晶界扩散的抑制必将导致晶界滑动的抑制. 而晶界滑动又促进晶内蠕变变形并

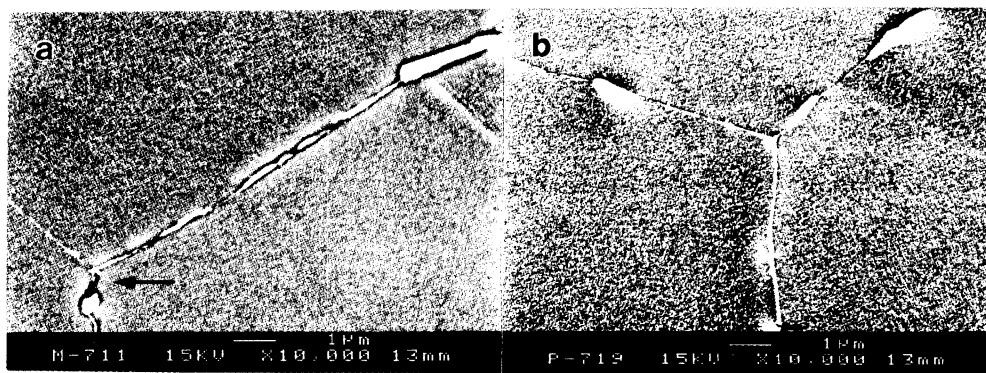


图 3 650 °C、580MPa 蠕变 600h 的 M 合金 (a) 和 DP 合金 (b) 试样的 SEM 照片

Fig.3 Microstructures of alloy M (a) and alloy DP (b) crept at 650 °C for 600h under 580MPa (Corresponding creep strains of M and DP are 1.3% and 0.5% respectively. The arrow in (a) points to a cavity. The tensile axis is horizontal).

使总的宏观蠕变加速^[15], 因此, 磷可能通过抑制晶界扩散而降低宏观蠕变速率.

结 论 磷对蠕变第一阶段的影响不大, 对第二阶段的影响显著. 掺杂磷显著降低 IN718 合金的稳态蠕变速率、提高其蠕变抗力. 磷对应力指数没有明显影响, 磷的主要作用在于改变表观蠕变激活能. 掺杂 0.02% 的磷使 IN718 合金的表观蠕变激活能由 678.5kJ/mol 提高至 746.1kJ/mol. 磷的有益作用可能是通过抑制晶界扩散从而抑制晶界滑动实现的.

参 考 文 献

- 1 R.T.Holt, W.Wallace, *Int.Metals Rev.*, **21**, 1(1976)
- 2 M.McLean, A.Strang, *Met.Technol.*, **11**, 454(1984)
- 3 W.D.Cao, R. L. Kennedy, in *Superalloys 718, 625, 706 and Various Derivatives*, edited by E.A.Loria, (PA:TMS, Warrendale, 1994) p.463
- 4 W.R.Sun, S.R.Guo, D.Z.Lu, Z.Q.Hu, *Metall. Mater. Trans. A*, **28A**, 649(1997)
- 5 S.R.Guo, W.R.Sun, D.Z.Lu, Z.Q.Hu, in *Superalloys 718, 625, 706 and Various Derivatives*, edited by E.A.Loria (PA: TMS, Warrendale, 1997) p.521
- 6 G.S.Was, J.K.Sung, T.M.Angeliu, *Metall.Trans.A*, **23A**, 3343(1992)
- 7 X.S.Xie, X.B.Liu, J.X.Dong, Y.H.Hu, Z.C.Xu, Y.X.Zhu, W.B.Luo, Z.W.Zhang, R.G.Thompson, in *Superalloys 718, 625, 706 and Various Derivatives*, edited by E.A.Loria (PA: TMS, Warrendale, 1997) p.531
- 8 C.G.McKamey, C.A.Carmichael, W.D.Cao, R.L.Kennedy, *Scripta Mater.*, **38**, 485(1998)
- 9 K.Mukherjee, J.E.Bird, J.E.Dorn, *Trans.ASM*, **62**, 155(1969)
- 10 中国航空材料手册编辑委员会. 中国航空材料手册 (北京, 中国标准出版社, 1989) p.339
- 11 R.G.Thompson, M.C.Koopman, B.N.King, in *Superalloy 718, 625 and Various Derivatives*, edited by E.A.Loria (PA: TMS, Warrendale, 1991) p.53
- 12 E.D.Hondros, M.P.Seah, S.Hofmann, P.Lejcek, in *Physical Metallurgy*, fourth, revised and enhanced, edited by R.W.Cahn, P. Haasen (Elsevier Science BV, Amsterdam, 1996) p.1202
- 13 W.D.Nix, K.S.Yu, J.S.Wang, *Metall.Trans. A*, **14A**, 563(1983)
- 14 T.Ogura, C.J.McMahon, Jr., H.C.Feng, V.Vitek, *Acta Metall.*, **26**, 1317(1978)
- 15 M.V.Speight. *Acta Metall.*, **24**, 725(1976)