

磷对 Inconel 718 形变合金力学性能的影响^①

唐 宾^{1, 2} 董建新¹ 胡尧和¹ 谢锡善¹
1(北京科技大学材料科学与工程系, 北京 100083)
2(西安交通大学材料科学与工程学院, 西安 710049)

摘 要 对国内生产的低磷 Inconel 718(P 含量< 0. 001%) 及常规 Inconel 718(P 含量为 0. 008% ~ 0. 013%) 形变合金锻件的力学性能进行了对比研究。结果表明, 室温拉伸强度和高温拉伸强度的差异不大, 然而低磷 Inconel 718 合金的高温塑性和 650 ℃, 686 MPa 的持久塑性明显降低; 更为值得注意的是, 低磷合金在疲劳、蠕变和疲劳/蠕变交互作用下的抗裂纹扩展能力都低于常规合金; 而且低磷合金的 595 ℃, 895 MPa 缺口周期持久寿命有降低趋势。

关键词 高温合金 Inconel 718 磷 力学性能

中图法分类号 V252. 2

磷是钢及合金中的必存元素, 通常作为夹杂元素^[1~ 3], 大量研究结果表明, 由于晶界断口富磷^[4, 5], 合金中磷晶界偏析造成脆性。在高温合金中, 磷和硫通常被当作有害元素, 控制磷含量到 10⁻³% 以下能减小块状 Laves 相数量, 减少枝晶偏析^[6]。但是过份降低合金中的磷含量势必导致生产成本大幅度提高。近来一些研究结果表明, 适当地提高 Inconel 718 合金中的磷含量, 能明显改善合金的高温静态力学性能^[6, 7]。本文研究了磷对工业模锻件动态力学性能的影响, 并对合金组织和断口进行了 AES, TEM 和 SEM 分析和观察。

1 实验材料及方法

试验材料分别取自低磷和常规工业化生产

的对照形变锻件, 其冶炼工艺为: VIM+ VAR 双联工艺, 并经 1 160 ℃/ 20 h+ 1 190 ℃/ 30~ 40 h 均匀化处理。合金化学成分分析结果如表 1 所示, 其中 A, B 及 C 编号的合金磷含量分别为: 0. 000 7%, 0. 008 3% 和 0. 013 0%。

合金常规力学性能的测试(室温拉伸, 高温拉伸, 光滑持久), 分别按 YB941-78 和 YB899-77 标准要求进行。

缺口周期持久试验参照 GE 公司 C50TF12 标准进行。温度为 595 ℃, 峰值应力为 895 MPa, 保载时间为 90 s, 最低应力为 0~ 33 MPa, 加载时间为 5~ 15 s, 试样 $R = 0. 9(K = 2. 0)$, 标准要求断裂寿命大于 2 000 N_f 。高温裂纹扩展速率采用 25 mm × 25 mm × 10 mm 紧凑拉伸试样, 直流电位法测定, 试验温度为 (650 ± 3) ℃, 载荷误差 < 1%, 选取起始恒定

表 1 常规和低磷 Inconel 718 合金的成分(%)

Table 1 Composition of conventional and low P Inconel 718 alloy														
Alloy No.	C	Mn	Si	S	P	Ni	Cr	Mg	Al	Ti	Mo	Nb	Co	B
A	0. 031	0. 02	0. 04	0. 003 5	< 0. 000 7	51. 52	18. 23	0. 001 8	0. 52	1. 03	0. 07	2. 97	0. 07	0. 004 0
B	0. 027	< 0. 03	< 0. 05	0. 004 5	0. 008 3	52. 76	18. 45	—	0. 52	1. 01	< 0. 20	2. 88	< 1. 0	0. 006 0
C	0. 03	< 0. 35	< 0. 35	0. 003 2	0. 013 0	52. 70	18. 50	—	0. 55	1. 00	< 0. 20	2. 85	< 1. 0	0. 005 8

① 收稿日期: 1997- 07- 09; 修回日期: 1997- 12- 15 唐 宾, 男, 32 岁, 博士

载荷条件, 保载 5 s, 90 s 和纯蠕变三种加载波形。

用 S250mk II 扫描电镜 (SEM) 观察清洗后的断口形貌, 用 H800 透射电镜 (TEM) 和 PHI600 俄歇能谱仪 (AES) 分别观察, 分析合金的断口形貌、组织及磷元素分布。

2 实验结果与讨论

常规力学性能对比如图 1 所示。可以看出, 随着磷含量的增加, 合金的室温及高温拉伸屈服强度降低, 但差异不大。而常规合金的 650 °C 拉伸及 650 °C, 686 MPa 持久的塑性指标 δ 明显高于低磷形变合金, 这说明在形变 Inconel 718 合金中, 把磷含量控制在适量程度反而能改善合金的高温塑性。低磷合金的缺口周期持久寿命 $N_f = 2256$ 次, 而常规合金 $N_f > 3000$ 次时还未断裂。重复试验低磷合金缺口周期持久寿命, 第 2 根试样在 $N_f = 2631$ 次时发生断裂, 试验结果可以说明低磷形变合金的 595 °C, 895 MPa 缺口周期持久寿命有降低的趋势。图 2 中的 (a), (b), (c) 分别为 A 和 C 合金在 5 s, 90 s 及纯蠕变条件下的裂纹扩展速率。从图中可以看出, 在相同试验条件下, 低磷 Inconel 718 合金的裂纹扩展速率都高于常规合金。这表明过低的磷含量 ($P < 0.001\%$) 显著降低了合金在蠕变及疲劳/蠕变交互作用下抗裂纹扩展能力。这主要由于合金中磷含量

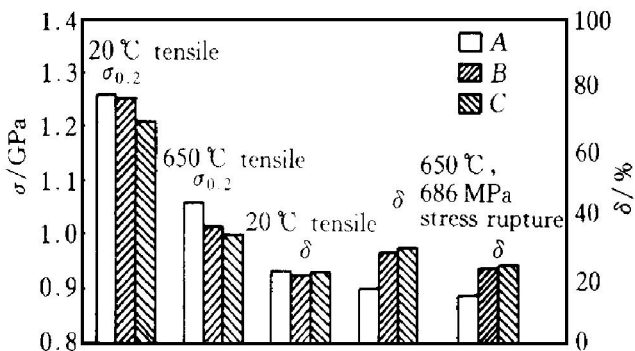


图 1 磷含量不同的 Inconel 718 合金力学性能

Fig. 1 Mechanical properties of Inconel 718 alloy with different P contents

的降低导致了合金高温塑性的降低, 易于使裂纹尖端形成应力集中, 促进裂纹萌生及扩展。而常规合金, 由于磷含量一般为 0.008% ~ 0.013%, 反而使合金具有较好的高温塑性,

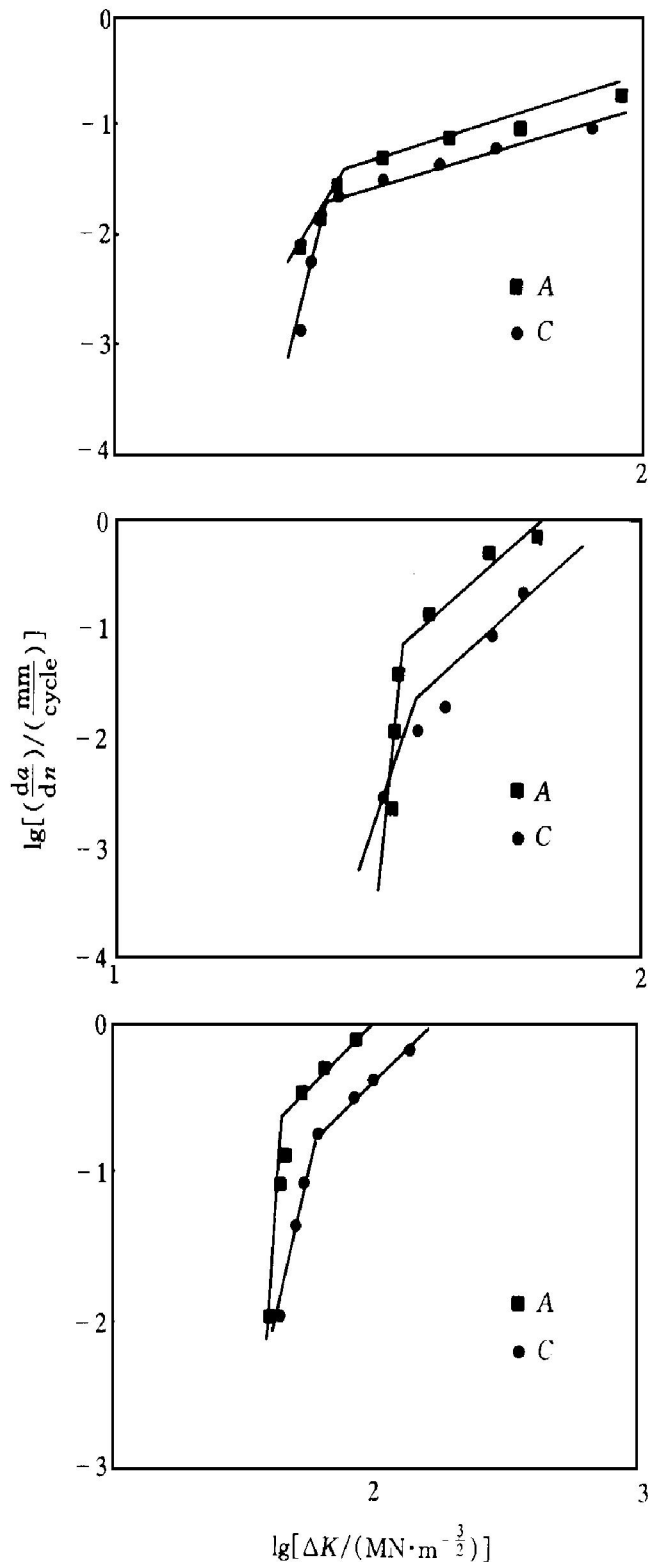


图 2 不同保载条件下的裂纹扩展速率与 ΔK 的关系

Fig. 2 Crack propagation rates as a function of effective stress intensity factor range ΔK under different conditions

(a) — $t = 5$ s; (b) — $t = 90$ s; (c) — Creep condition

裂纹尖端由于良好的塑性变形而使应力松弛, 延缓了裂纹的萌生和扩展。图3分别为A和C试样在不同载荷波形条件下于开裂纹尖端断口扫描照片。从图中可以看出在5s保载条件下, 尽管有疲劳损伤的迹象, 但蠕变损伤已很明显。90s和纯蠕变保载条件下, 断口为典型的蠕变损伤特征, 这也说明在保证强度指标基本不变的前提下, 提高合金的塑性指标能改善合

金在蠕变及疲劳/蠕变交互作用条件下抵抗裂纹扩散的能力。另外, 从图3可以发现, 在相同试验条件下, 常规合金在开裂前经历了更大的塑性变形, 而低磷合金则塑性变形较小。文献[3]也表明适当增加磷含量能提高铸造 Ni-Cr-Fe 基 600 合金抗蠕变能力, 改善合金的塑性尤其是高温塑性。至于磷是如何改善 Inconel 718 合金的塑性特别是高温塑性, 本文通过

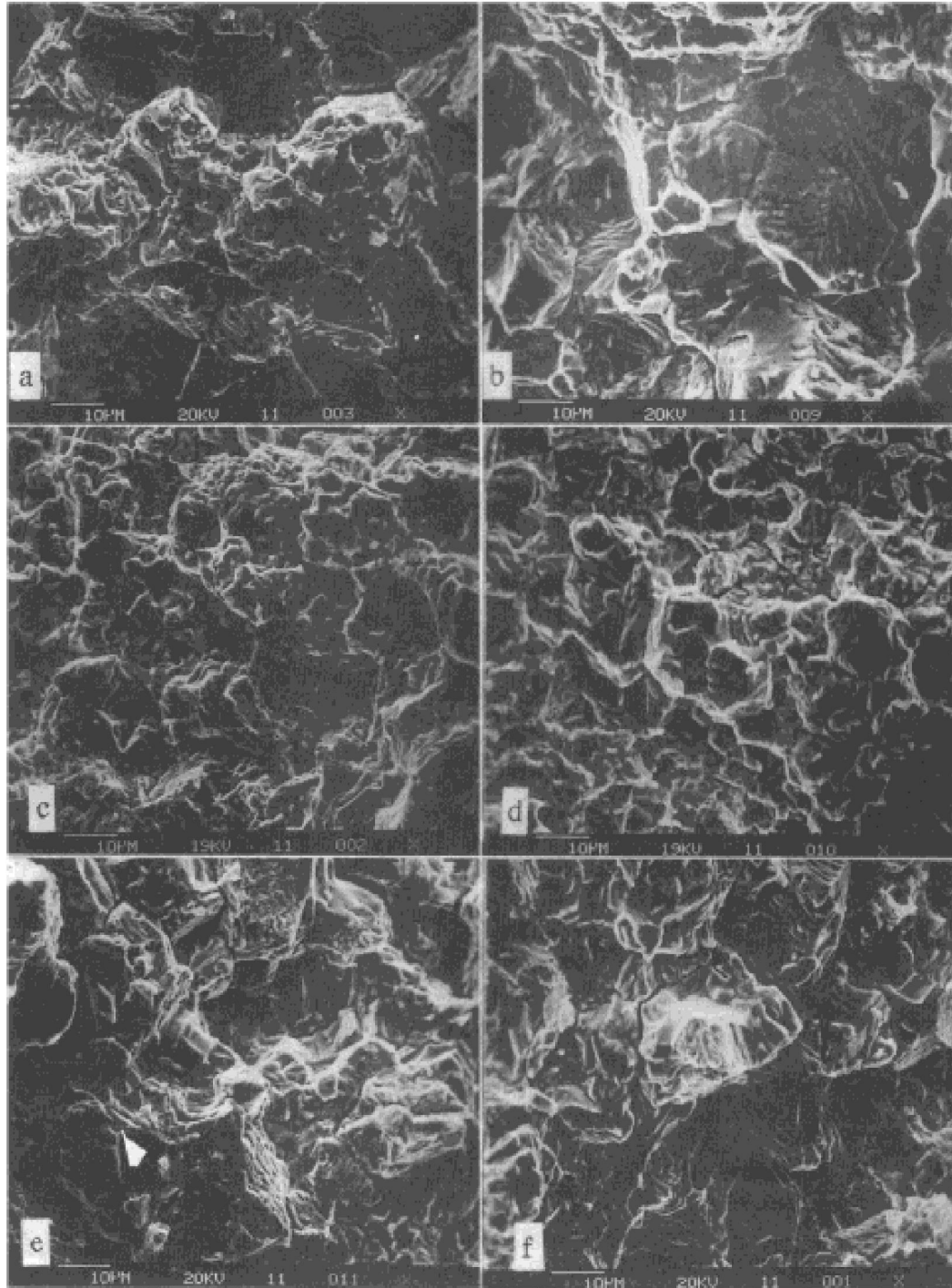


图3 常规合金和低磷合金 650 °C 紧凑拉伸断口

Fig. 3 SEM fractographs of conventional and low P Inconel 718 alloy at 650 °C compact tension (a) -C alloy 5s; (b) -A alloy 5s; (c) -C alloy 90s; (d) -A alloy 90s; (e) -C alloy creep; (f) -A alloy creep

TEM, AES 进行了观察分析。图 4(a) 为含磷量 0.013% 常规形变合金冷脆新鲜沿晶断口俄歇能谱图, 图 4(b) 为同一试样经 Ar^+ 深层剥蚀后的能谱图, 可以看出磷明显沿晶界偏析, 晶界发生磷的富集和偏聚, 而这种磷沿晶界的富集现象反而使形变合金的高温塑性得到改善。图 5 为含磷量 0.013% 常规形变 C 号合金 TEM 照片, 可以看出, 晶界 δ 相基本以胞状形态分布。图 6(a) 为 C 号常规合金高温光滑持久断口芯部组织的 SEM 照片, 可以看出这种沿晶界胞状形式析出的 δ 相, 使裂纹在扩展过程中必须绕过它, 而不能沿晶界快速扩展, 对裂纹扩展起到了阻碍作用。断口中的大量塑性韧窝表明, 裂纹在扩展过程中经历了一定量的塑性变形。由于合金在高温工况服役时, 晶界弱化, 蠕变损伤占主导地位, 提高合金塑性指标尤其是高温塑性指标能明显改善合金在高温服役条件下抗损伤能力。低磷 C 号合金 δ 相沿晶界以片状形式析出, 断口塑性韧窝区明显减小, 断口表现为典型的沿晶脆性特征。文献 [8] 研究结果也表明, 低磷(0.0029%) 形变合金中, δ 相基本以片状分布为主, 片状 δ 相沿晶界分布易使裂纹沿片状组织生长方向扩展,

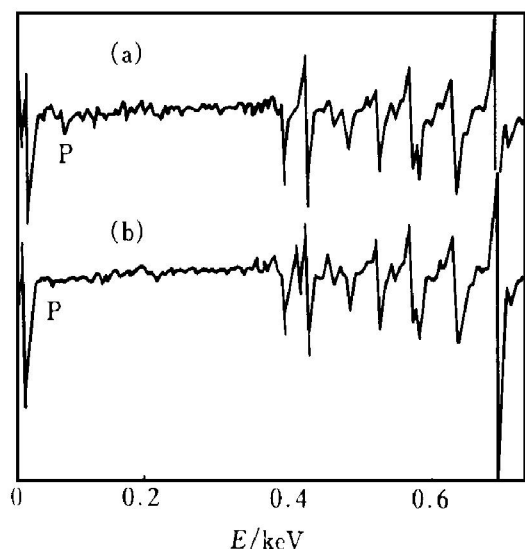


图 4 常规合金(C)沿晶断口俄歇能谱图

Fig. 4 AES of conventional alloy (C) boundary brittle fracture

(a) —Fresh boundary brittle fracture;
(b) —After Ar^+ etching

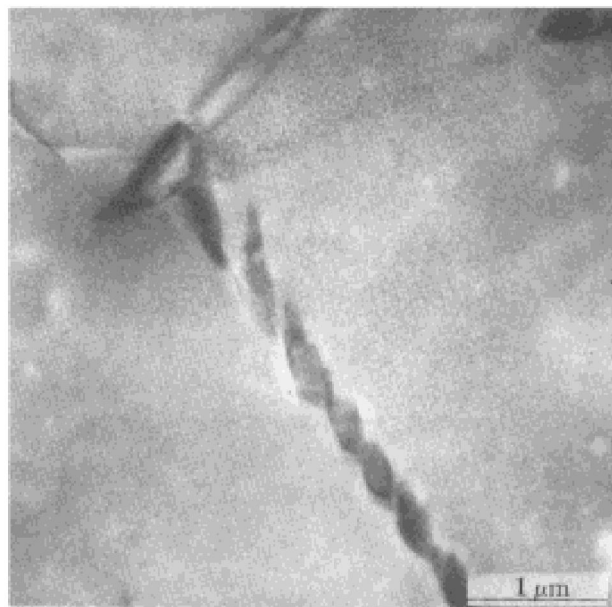


图 5 常规合金(C)晶界 δ 相形貌

Fig. 5 Morphology of δ phase of conventional alloy (C) at boundary

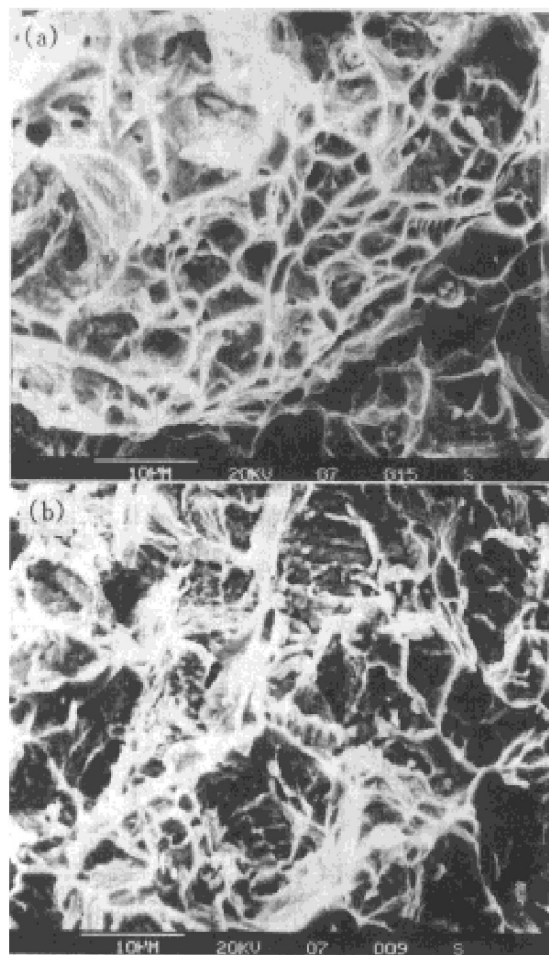


图 6 合金 650 °C, 686 MPa 光滑持久断口组织

Fig. 6 SEM fractographs of Inconel 718 alloy at 650 °C, 686 MPa stress rupture

(a) —Conventional alloy (C); (b) —Low P alloy (A)

降低合金的高温塑性。

以上研究结果表明, 磷富集于晶界, 并和沿晶界析出的 δ 相形貌有一定的对应关系。超低磷含量的 Inconel 718 合金, 并未表现出优异的性能, 反而促使 δ 相沿晶界片状析出, 降低了合金的塑性, 尤其是高温塑性指标, 使合金抗蠕变损伤能力显著降低。

3 结论

常规合金的拉伸强度指标低于低磷合金, 但差别不大, 而常规形变 Inconel 718 合金的塑性指标特别是高温塑性指标明显高于低磷合金。低磷形变合金的缺口周期持久寿命较常规合金有降低的趋势。低磷形变合金在蠕变、疲劳和疲劳/蠕变交互作用条件下的裂纹扩展速率明显高于常规合金。磷沿晶界偏聚, 适当磷含量使 δ 相以胞状形态沿晶界析出, 提高合金抗裂纹沿晶扩展能力。

REFERENCES

- 1 Ji Jinwen(戢景文) and Li Maohua(李茂华). Acta Metallurgy Sinica(金属学报), 1981, 17: 293.
- 2 Dong Jianxin(董建新), Liu Xinbo(刘兴博) and Tang Bin(唐 宾). Acta Metallurgy Sinica(金属学报), 1996, 32: 241.
- 3 Cai Yuling(蔡玉林) and Zheng Yunrong(郑运荣). Metallography of Superalloy(高温合金的金相研究). Beijing: Defense Industry Press, 1986: 3.
- 4 Zhang Lixin(张立新). Acta Metallurgy Sinica(金属学报), 1988, 24: 15.
- 5 Xu Zhichao(徐志超). Effect and Control of Trace Element in Superalloy(高温合金中微量元素的作用和控制). Beijing: Metallurgical Industry Press, 1987: 10.
- 6 Sung J K and Angeliu T M. Met Trans, 1992, 23A: 3343.
- 7 Xie Xishan and Dong Jianxin. In: Kissinger R D ed. Superalloys 1996. TMS, 1996: 599.
- 8 Tang Bin(唐 宾), Liu Xinbo(刘兴博) and Dong Jianxin(董建新). Ordnance Material Science and Engineering(兵器材料科学与工程), 1997, 20: 8.

MECHANICAL PROPERTIES OF LOW PHOSPHOROUS AND CONVENTIONAL INCONEL 718 DEFORMATION ALLOYS

Tang Bin^{1, 2}, Dong Jianxin¹, Hu Yaohe¹ and Xie Xishan¹

1 Department of Materials Science and Engineering,

University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, P. R. China

2 School of Materials Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University,

Xi'an 710049, P. R. China

ABSTRACT The mechanical properties of low phosphorous Inconel 718 ($P < 0.001\%$) and conventional Inconel 718 ($P 0.008\% \sim 0.013\%$) deformation alloys were investigated. The results show that there is no obvious difference in room temperature and elevated temperature tensile strength between the low P content and conventional Inconel 718 alloys. However, the ductilities of the low P content alloy obviously decrease at 650 °C, 686 MPa. The more important fact is that the crack propagation rates of the low P content alloy at 650 °C creep, fatigue and creep/fatigue interaction conditions are higher than that of the conventional alloy, and it seems to have a tendency that the cycle notch stress rupture life of the low P alloy decreases at 595 °C, 895 MPa.

Key words superalloy Inconel 718 phosphorous mechanical property

(编辑 黄劲松)