

# 粉末高温合金 FGH97 疲劳裂纹扩展行为

肖 磊<sup>1,2</sup>, 朱晓闽<sup>1</sup>, 张高翔<sup>1</sup>, 王 冲<sup>1</sup>

(1. 深圳市万泽中南研究院有限公司, 广东 深圳 518000)

(2. 深圳市万泽航空科技有限责任公司, 广东 深圳 518000)

**摘 要:** 研究了氩气雾化制粉+热等静压工艺成型所制备的粉末高温合金 FGH97 在 650 °C 下的疲劳裂纹扩展性能, 并与俄制旋转电极制粉+热等静压工艺成型的 EP741NP 合金盘件进行对比; 重点分析了不同制粉工艺、氧含量、晶粒度和  $\gamma'$  尺寸等因素对裂纹扩展速率的影响。结果表明: 氩气雾化制粉+热等静压工艺制备的 FGH97 合金试验盘具有比俄制旋转电极制粉+热等静压工艺制备的 EP741NP 合金盘件更好的疲劳裂纹扩展抗力; 分析发现晶粒度对氩气雾化制粉+热等静压工艺制备的试验盘裂纹扩展性能影响较为明显, 晶粒度越大, 疲劳裂纹扩展速率越低;  $\gamma'$  相尺寸的影响次之, 在一定范围内  $\gamma'$  相尺寸增大, 疲劳裂纹扩展速率略为降低; 而氧含量在 100~150  $\mu\text{g/g}$  范围内对疲劳裂纹扩展性能无显著影响。

**关键词:** FGH97 粉末冶金高温合金; 氩气雾化制粉; 旋转电极制粉; 疲劳裂纹扩展

**中图分类号:** TG146.1<sup>+</sup>5

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-185X(2019)05-1623-08

镍基粉末高温合金具有组织均匀、晶粒细小、合金化程度高、不存在宏观偏析等特征, 因而具有优良的高温强度和抗疲劳性能, 是制造航空发动机涡轮盘等关键部件的首选材料。我国自 20 世纪 80 年代初以来研制了 FGH95、FGH96 和 FGH97 等一系列镍基粉末高温合金<sup>[1,2]</sup>。其中 FGH97 与俄罗斯的粉末合金 EP741NP 成分相似, 制备工艺也基本上沿用了俄罗斯的工艺路线, 即旋转电极工艺(PREP)制粉+直接热等静压(HIP)成型。应用此工艺所制备的盘件具有优良的拉伸、持久和蠕变性能<sup>[3,4]</sup>。但是 PREP 工艺制备的粉末粒度较粗, 成品粉一般控制在 50~150  $\mu\text{m}$ , HIP 成型后所获得的再结晶晶粒也较粗大, 达到 6~7 级。夹杂物尺寸也较大, 可达 150  $\mu\text{m}$ ; 目前普遍应用的夹杂物去除方法如静电法只能去除 75%左右的夹杂物<sup>[5]</sup>, 使得盘件中残存夹杂物的尺寸较大(可达 150  $\mu\text{m}$ ), 导致其低周疲劳性能差, 数据分散度大, 影响了盘件的使用寿命<sup>[6,7]</sup>。为了改善 FGH97 盘件的疲劳性能, 笔者所在团队在前人研究的基础上提出了用氩气雾化工艺(AA)制粉+HIP 成型的工艺路线。AA 法制备的粉末粒度较细, 一般小于 80  $\mu\text{m}$ , HIP 成型后的再结晶晶粒较细, 可达 8~9 级或更细。AA 法制备的盘件中夹杂物的尺寸受到所用筛网尺寸的控制, 相应较小(小于 80  $\mu\text{m}$ ), 使得 AA 法制粉+HIP 成型的 FGH97 合金低周疲劳性能显著提高, 而且数据分散度小, 提高了

盘件的使用寿命和可靠性。目前高性能粉末涡轮盘用合金粉末有朝超纯、细粒径方向发展的趋势。GE 和 RR 公司已将粉末粒度由 63  $\mu\text{m}$  降为 53  $\mu\text{m}$ <sup>[8,9]</sup>。粉末的粒度越小, 则夹杂物的尺寸也越小, 对合金力学性能的不利影响就越弱。但目前关于 FGH97 的研究大多集中在 PREP 工艺制备的材料中<sup>[10]</sup>, 对于 AA 法制粉+HIP 成型的 FGH97 合金研究很少, 用这个方法制备的 FGH97 热等静压件的疲劳裂纹扩展性能还未见报道。一般认为细晶粒材料对于主要代表裂纹形成寿命的低周疲劳性能有利, 对裂纹扩展性能不利。另外粉末的粒子越细, 比表面积越大, 所吸附的气体含量越高, 导致小尺寸粉末中氧含量较高, 热等静压后容易形成粉末原始颗粒边界(PPB), 可能影响疲劳裂纹扩展性能, 因此有必要对 AA 法制粉+HIP 工艺制备的 FGH97 合金疲劳裂纹扩展性能进行深入地研究。本研究对采用 AA 法制粉+HIP 制备的 FGH97 试验盘件进行 650 °C 疲劳裂纹扩展速率试验, 并与俄制 PREP 制粉+HIP 成型的 EP741NP 合金盘件对比, 讨论不同制粉工艺、氧含量、晶粒尺寸和  $\gamma'$  尺寸分布对 FGH97 合金裂纹扩展行为的影响。

## 1 实 验

本实验中使用的合金是通过真空感应熔炼工艺(VIM)制备, 用氩气雾化法(AA)制取 FGH97 粉末,

收稿日期: 2018-05-10

基金项目: 广东省珠江人才计划项目和深圳市科技创新委员会项目(KQTD2015032716463668)

作者简介: 肖 磊, 男, 1986 年生, 博士, 深圳市万泽中南研究院有限公司, 广东 深圳 518000, 电话: 0755-82731326, E-mail: catshaw@zju.edu.cn

将制备的合金粉末进行筛分、检测后，采用小于 80 μm 的成品粉末装包套，经除气、封焊后，HIP 成型。HIP 工艺为：(1200±10) °C、压力≥140 MPa，保温保压≥3 h。HIP 坯料经粗加工、去除包套后，采用真空气淬炉进行固溶和时效处理。热处理工艺为：(1200±10) °C 保温 4 h，空冷+(910±10) °C 保温 3 h，空冷+(750±10) °C 保温 8 h，空冷+(700±10) °C 保温 17 h，空冷。AA 制粉+HIP 成型的 FGH97 试验盘尺寸为 Φ250 mm×45 mm。作为对比用的 EP741NP 合金取自采用 PREP 法制粉+HIP 成型的俄制全尺寸盘件，所有盘件均施加上述相同的热处理工艺。

疲劳裂纹扩展试验按照 GB/T6398-2000 《金属材料疲劳裂纹扩展速率试验方法》在 Instron8801 液压疲劳试验机上进行。试验采用标准紧凑拉伸 C(T)试样，宽度 W=25 mm，厚度 B=6.25 mm，试样的形状和尺寸如图 1 所示。所有试样采用线切割沿周向取自试验盘件的外缘部分，试样的加载方向为盘件的周向，裂纹扩展沿盘件的径向。试验在大气环境条件下进行，试验温度 650 °C。试验前，先在试样一端预制约 0.5 mm 长的裂纹。试验波形为三角波、应力比 R=0.05、载荷幅值 ΔP=4000 N、加载频率为 0.33 Hz，为保证数据的可靠性，每个条件测试 2 个试样。用 NikonMM-400 测量显微镜观察显微组织，CARLZEISSEVOMA25 扫描电镜观察断口形貌，LECO844 气体分析仪检测热等静压件的氧含量。

## 2 结果与分析

### 2.1 2 种制粉工艺合金的显微组织对比

2 种制粉工艺的合金热等静压状态的化学成分如

表 1 所示，可见 AA 制粉+HIP 成型的 FGH97 试验盘件与 PREP 制粉+HIP 成型的俄制 EP741NP 合金盘件的化学成分基本一致。2 种合金盘件的显微组织如图 2 所示。可见由于不同制粉方式得到的粉末粒度不一样，HIP 成型后的再结晶晶粒度有较明显的差异，FGH97 试验盘的平均晶粒尺寸约为 22 μm (ASTM8.0)，EP741NP 盘的平均晶粒尺寸约为 35 μm (ASTM6.3)。2 种合金的氧含量也有显著的差别，AA 制粉+HIP 成型的 FGH97 试验盘的氧含量为 112 μg/g，PREP 制粉+HIP 成型的 EP741NP 盘件氧含量为 55 μg/g。通常氧含量随着粉末粒度的减小而增加。根据文献[11]报道，AA 法制备的粉末小于 63 μm 的粉末氧含量应该控制在 150 μg/g 以下；小于约 53 μm 的粉末氧含量可控制在 200 μg/g 以下。虽然粉末预处理和真空脱气可以在一定程度上控制热等静压制件的氧含量，一般热等静压过程中合金的氧增量可达 20~50 μg/g。以上 FGH97 试验盘的氧含量 112 μg/g 接近 AA 制粉+HIP 成型工艺所能达到的下限。

### 2.2 2 种制粉工艺合金的疲劳裂纹扩展性能比较

图 3 是以上 2 种制粉工艺的盘件在 650 °C 下的疲劳裂纹扩展 (a-N) 曲线和裂纹扩展速率 (da/dN-ΔK) 曲线。由图 3 可见，在疲劳裂纹扩展初期，PREP+HIP 制备的 EP741NP 盘件裂纹扩展较慢，但随着裂纹扩展周次的增加，AA+HIP 制备的 FGH97 盘的疲劳裂纹扩展速率明显低于俄制盘，使得总疲劳裂纹扩展寿命比俄制盘寿命高。在整个稳态裂纹扩展区 (即 Paris 区)，AA+HIP 制备的 FGH97 盘的疲劳裂纹扩展速率比俄

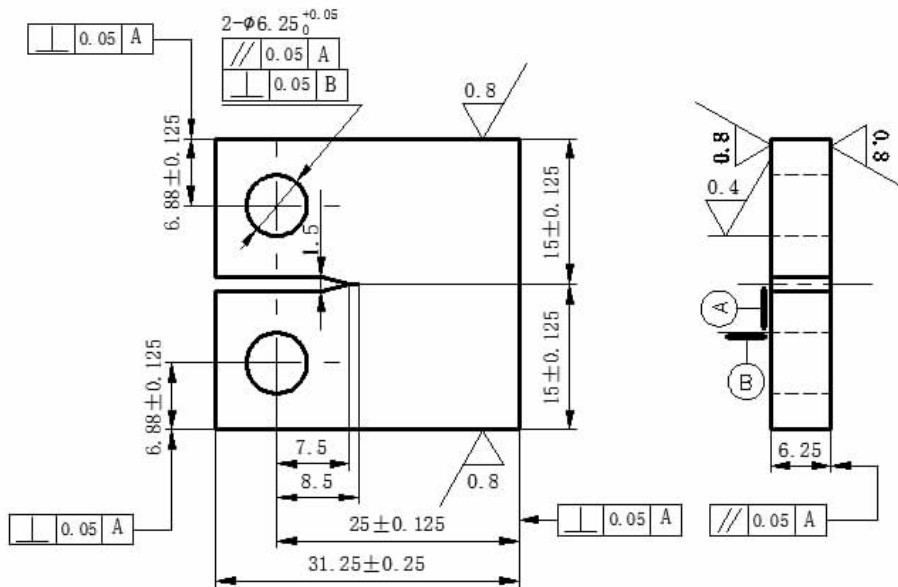


图 1 疲劳裂纹扩展试样

Fig.1 Sample for fatigue crack growth testing

表 1 2 种合金热等静压状态的化学成分测试结果

Table 1 Chemical composition of as-HIP FGH97 and EP741NP (wt%)

Alloy	Cr	Mo	W	Ti	Co	Al	Nb	C	Hf	Zr	B	O	Ni
FGH97 test disk	8.77	3.91	5.83	1.81	15.47	5.01	2.52	0.025	0.23	0.0143	0.0134	0.0112	Bal.
EP741NP disk	9.01	3.74	5.46	1.73	15.06	5.00	2.43	0.061	0.30	0.028	0.016	0.0055	Bal.
FGH97 standard	8.0~10	3.5~4.2	5.5~5.9	1.6~2.0	15~16.5	4.85~5.25	2.4~2.8	0.02~0.06	0.1~0.4	<0.015	<0.015	<0.007	Bal.

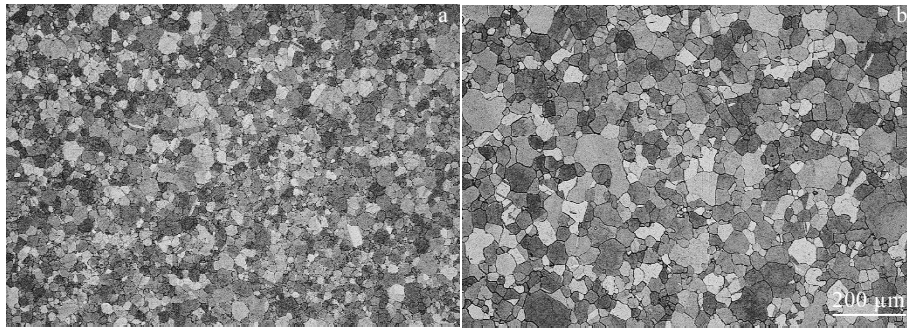


图 2 不同晶粒尺寸的 2 种合金显微组织

Fig. 2 Microstructure of two alloys with different grain sizes: (a) FGH97 disk, ASTM 8 and (b) EP741NP disk, ASTM 6.3

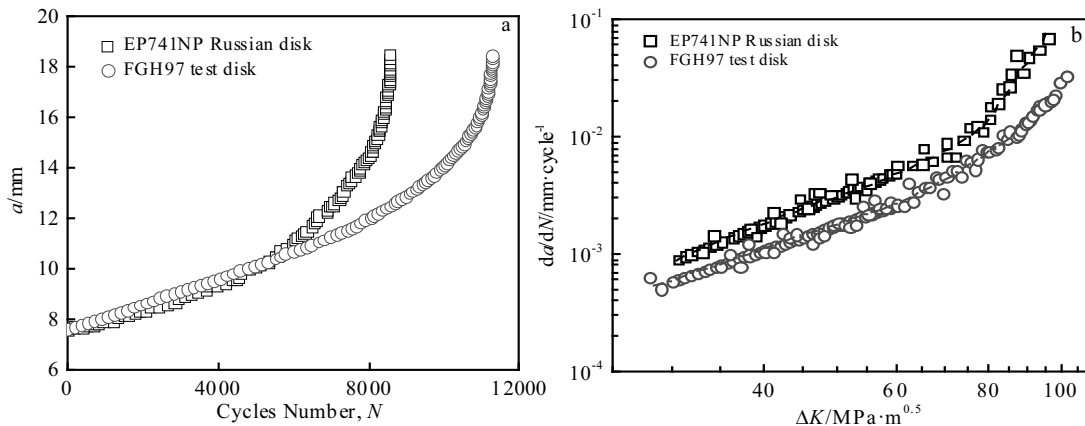


图 3 2 种合金疲劳裂纹扩展寿命和裂纹扩展速率的比较

Fig.3 Fatigue crack growth rate curves of two alloys: (a)  $a-N$  curves and (b)  $da/dN-\Delta K$  curves

制盘低，这种趋势随着应力强度因子范围的增加变得更加显著。表明 AA 制粉+HIP 制备的 FGH97 合金具有更好的裂纹扩展抗力。

按照 Paris 公式将试验数据进行拟合，得到 Paris 区的疲劳裂纹扩展速率方程分别为：

$$(da/dN)_{EP741NP(PREP+HIP)} = 1.58 \times 10^{-7} (\Delta K)^{2.53} \quad (1)$$

$$(da/dN)_{FGH97(AA+HIP)} = 1.96 \times 10^{-7} (\Delta K)^{2.42} \quad (2)$$

比较 2 条曲线的方程可知，AA 制粉+HIP 的 FGH97 试样的指数  $m$  值比俄制 EP741NP 试样的  $m$  值小，而  $m$  值的大小代表了裂纹扩展速率的变化快慢，表明 AA 制粉的 FGH97 盘件具有更好的裂纹扩展抗力。

### 2.3 2 种制粉工艺合金的断裂机制比较

图 4 是 2 种制粉工艺合金试样的疲劳裂纹扩展断口形貌。合金试样的疲劳裂纹断口主要由 3 个典型区域组成，即初始裂纹萌生区、稳态裂纹扩展区和瞬断区，其中裂纹扩展区所占比重最大。在裂纹扩展低速率区，见图 4a、4b，可以看到撕裂棱、解理台阶和小平面，断口呈平行锯齿状，裂纹断面主要沿面心立方金属 {111} 滑移面，比较两者可以发现，俄制 EP741NP 盘试样断口较为平坦，而 AA 制粉+HIP 制备的 FGH97 试验盘试样断口较粗糙，高低起伏较为明显。

图 4c 和 4d 反映了裂纹扩展至  $\Delta K=35 \text{ MPa}\sqrt{m}$  时两盘件合金试样的裂纹扩展形貌，可以看到明显的疲

劳辉纹，测量两者的辉纹间距发现，FGH97 试验盘试样约为 1.0 μm，俄制盘件试样约为 1.3 μm，对应的裂纹扩展速率为 1.0 和 1.3 μm/cycle，这与测试值（见图 3）基本一致。

图 4e 和 4f 为瞬断区，可以看到韧窝，呈典型的韧性断裂，韧窝内部夹杂着第二相粒子。比较两者瞬断区形貌可以发现，FGH97 试验盘试样断口韧窝数量相对较多、尺寸较小。韧窝是材料在微区范围内塑性变形产生的显微特征，从表 2 中 650 °C 拉伸试验的延伸率的比较可以看到 AA 制粉+HIP 制备的 FGH97 盘件塑性好于俄制盘件，故更容易形成韧窝。

### 2.4 氧含量对疲劳裂纹扩展速率的影响

为研究氧含量的波动对 AA 制粉+HIP 成型的 FGH97 合金疲劳裂纹扩展性能的影响，选用不同含氧量的粉末制备试验盘，试验盘件 T01 和 T02 的氧含量和其它参数见表 3。

图 5 是试验盘件 T01（氧含量 148 μg/g）和 T02（氧含量 113 μg/g）的疲劳裂纹扩展速率曲线。在稳态裂纹扩展阶段  $\Delta K=30 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  时，两个试验盘试样的裂纹扩展速率分别为  $5.93 \times 10^{-4}$  和  $5.07 \times 10^{-4} \text{ mm/cycle}$ ；在加速扩展阶段  $\Delta K=80 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  时，2 个试验盘试样的裂纹扩展速率分别为  $9.68 \times 10^{-3}$  和  $9.52 \times 10^{-3} \text{ mm/cycle}$ ，可见尽管 2 个试验盘氧含量相

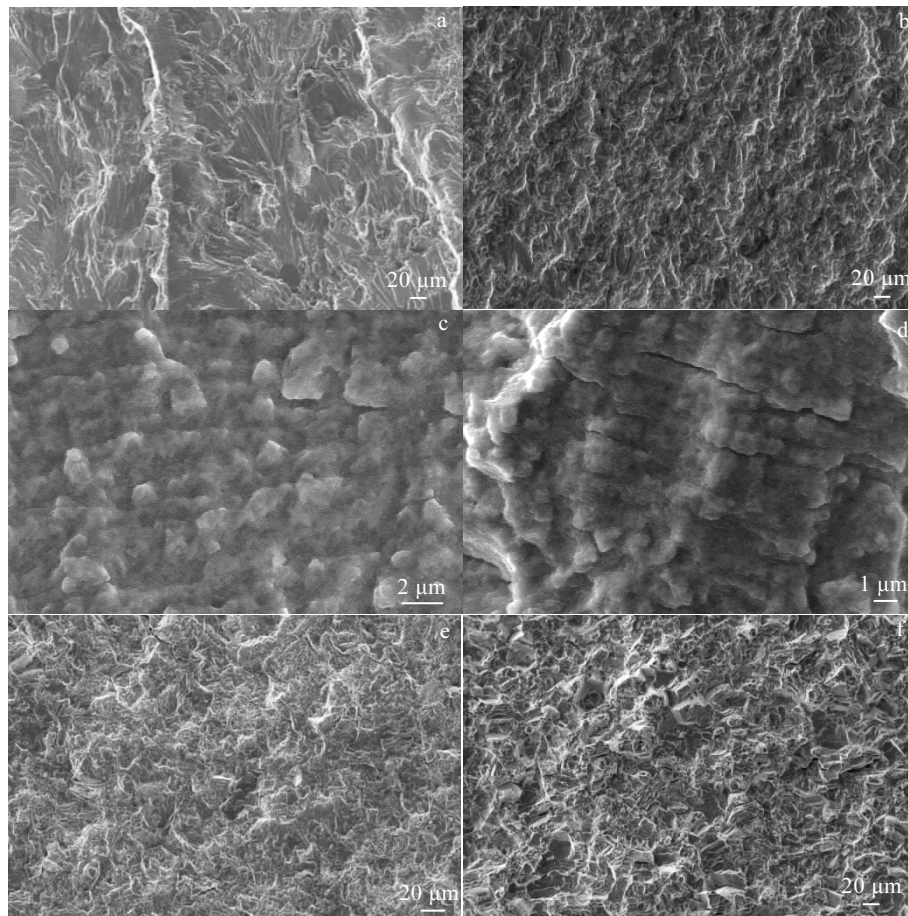


图 4 AA 制粉+HIP FGH97 试验盘和 PREP 制粉+HIP 俄制 EP741NP 盘件的疲劳裂纹扩展断口

Fig.4 Fracture surface comparison of AA+HIP FGH97 test disk with Russian EP741NP disk: (a) Russian EP741NP disk-initial growth area, (b) FGH97 test disk-initial growth area, (c) Russian EP741NP disk-steady growth area striation, (d) FGH97 test disk-steady growth area striation, (e) Russian EP741NP disk-final fracture area, and (f) FGH97 test disk-final fracture area

表 2 2 种合金盘件的拉伸性能

Table 2 Tensile properties of as-HIP FGH97 and EP741NP

Alloy	Young's modulus/ GPa	Yield strength/ MPa	Tensile strength/ MPa	Elongation/ %	Reduction of area/ %
FGH97 test disk	214±4	999±12	1490±17	30.0±3.0	29±3
EP741NP disk	222±6	997±4	1500±10	28.0±2.5	26±1

表 3 AA 制粉+HIP 制备的 FGH97 合金试验盘件

Table 3 AA+HIP Processed FGH97 alloy testing piece

	Oxygen/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	Grain size, ASTM	Gamma prime size/nm	Hardness, HB/ $\times 10$ MPa
T01	148	7.7	250	393
T02	113	8.0	280	392

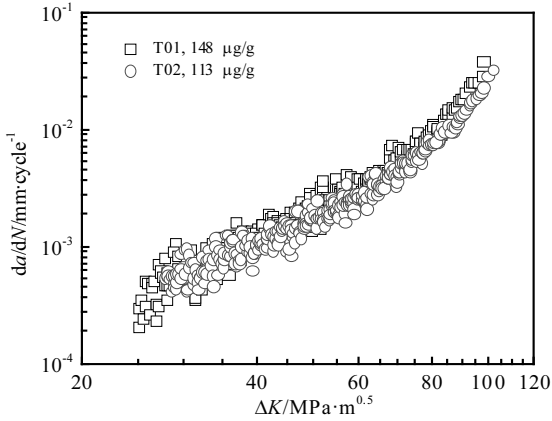


图 5 不同氧含量 FGH97 试验盘件的疲劳裂纹扩展速率

Fig.5 Fatigue crack growth rate of FGH97 test disks with different oxygen contents

差  $35 \mu\text{g/g}$ , 但裂纹扩展速率十分接近, 2 个试验盘件的裂纹扩展寿命分别为  $N=10305$  cycles (氧含量  $148 \mu\text{g/g}$ ) 和  $N=10605$  cycles (氧含量  $113 \mu\text{g/g}$ ), 二者也极为接近。以上结果表明当氧含量小于  $150 \mu\text{g/g}$  时氧含量的变化对裂纹扩展速率的影响不显著。

粉末中的氧主要以氧化物的形式存在于粉末颗粒表面, 在热等静压致密化过程中碳化物会优先在粉末颗粒表面的氧化物上形核, 形成以碳氧化物 (oxy-carbides) 为主的 PPB。PPB 会阻碍合金中元素扩散, 降低颗粒间结合力, 影响合金的力学性能。因此氧含量对裂纹扩展速率的影响主要归结为对晶粒边界碳化物和 PPB 的影响<sup>[11,12]</sup>。图 6 是试验盘件 T01 和 T02 的显微组织。从图 6 可以看到, T01 试样 (氧含量  $148 \mu\text{g/g}$ ) 中有少量颗粒已经形成完整的 PPB。但 T02 试样 (氧含量  $113 \mu\text{g/g}$ ) 的晶粒边界主要由再结晶形成的曲折边界组成, 只有极少量的不完整的 PPB 边界。比较两个盘件试样中碳化物的尺寸和分布, 没有发现明显的差异, 都是以断续点状沿晶界析出, 未形成网状分布。图 7 是断口截面的显微组织, 可以看到 2 个盘件的裂纹扩展路径都是穿晶断裂。以上结果说明, 氧含量控制在一定范围内, 晶界仍然有足够的强度抑制裂纹扩展。J. R. May 等<sup>[13]</sup>试验了氧含量分别

为  $172 \mu\text{g/g}$  和  $139 \mu\text{g/g}$  的 2 种 RR1000 合金的热等静压制件, 发现经过过固溶热处理, 两种试样具有相同的裂纹扩展速率。该结果也支持了氧含量控制在一定范围内对疲劳裂纹扩展影响不显著的结论。

### 2.5 晶粒尺寸对疲劳裂纹扩展速率的影响

为研究晶粒尺寸对 AA 制粉+HIP 成型的 FGH97 合金疲劳裂纹扩展性能的影响, 缩短热处理保温时间使试验盘 T03 的晶粒尺寸略小于 T01, 见表 4。试验盘 T01 的平均晶粒尺寸约为  $24.2 \mu\text{m}$  (ASTM7.7), 试验盘 T03 的平均晶粒尺寸约为  $18.3 \mu\text{m}$  (ASTM8.6)。2 个试验盘的显微组织如图 8 所示。

图 9 是 FGH97 试验盘件 T01 (晶粒度 ASTM 7.7) 和 T03 (晶粒度 ASTM 8.6) 的裂纹扩展速率对比。在稳态裂纹扩展阶段  $\Delta K=30 \text{ MPa}\cdot\sqrt{\text{m}}$  时, 粗晶粒的 T01

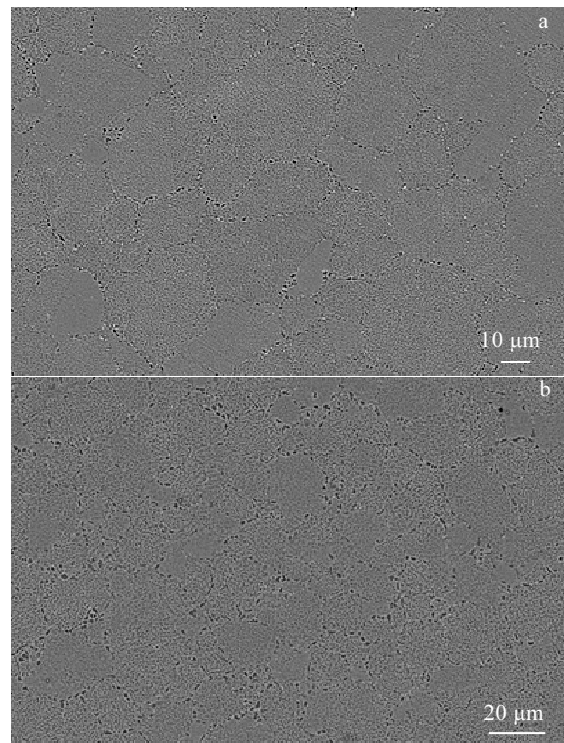


图 6 不同氧含量的 FGH97 试验盘 PPB 形貌及碳化物

Fig.6 PPB and grain boundary carbides of two FGH97 test disks with different oxygen contents: (a) test disk T01 and (b) test disk T02

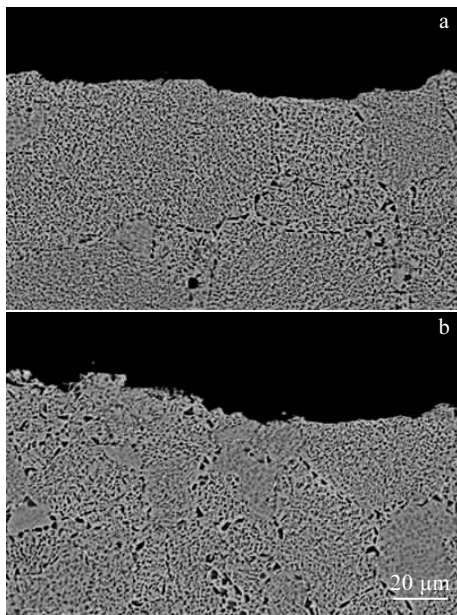


图 7 不同氧含量的 FG97 试验盘裂纹扩展路径

Fig.7 Crack path of two FG97 test disks with different oxygen contents: (a) test disk T01 and (b) test disk T02

表 4 AA 制粉+HIP 制备的 FG97 合金试验盘件

Table 4 AA+HIP processed FG97 alloy testing piece

	Oxygen/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	Grain size, ASTM	Gamma prime size/nm	Hardness, HB/ $\times 10$ MPa
T01	148	7.7	250	393
T03	148	8.6	250	397

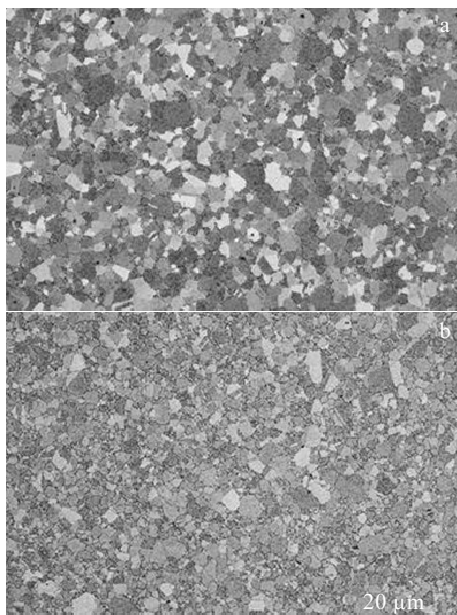


图 8 不同晶粒尺寸的 FG97 试验盘微观组织

Fig.8 Microstructures of FG97 test disks with different grain sizes: (a) T01, 24.2  $\mu\text{m}$  and (b) T03, 18.3  $\mu\text{m}$

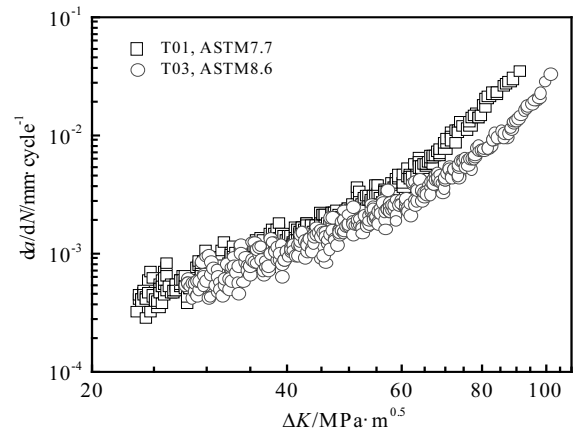


图 9 不同晶粒度的 FG97 试验盘裂纹扩展速率对比

Fig.9 Comparison of fatigue crack growth rates of FG97 test disks with different grain sizes

试样和细晶粒的 T03 试样裂纹扩展速率分别为  $5.93 \times 10^{-4}$  和  $6.09 \times 10^{-4}$  mm/cycle, 可见粗晶粒试样的稳态阶段裂纹扩展速率和细晶粒的试样基本相同; 在加速扩展阶段  $\Delta K=80 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  时, 粗晶粒的 T01 试验盘和细晶粒的 T03 试验盘裂纹扩展速率分别为  $9.68 \times 10^{-3}$  和  $0.0153 \text{ mm/cycle}$ , 可见在裂纹扩展加速阶段粗晶粒试样的疲劳裂纹扩展速率比细晶粒的试样降低了近一半。实验数据也显示粗晶粒的 T01 试验盘裂纹扩展寿命 ( $N=10305$  cycles) 比细晶粒的 T03 试验盘 ( $N=8678$  cycles) 高。以上结果表明, 晶粒尺寸增加, 提高了合金的疲劳裂纹扩展抗力。

一般认为, 粗晶有益于增加裂纹扩展抗力, 而细晶则有利于提高裂纹的萌生抗力。笔者所在团队对采用 PREP 法制粉+HIP 成型的 EP741NP 合金盘件和 AA 法制粉+HIP 制备的 FG97 自制试验盘件的低周疲劳试验研究表明, 采用细粉细晶粒的 FG97 自制试验盘件的疲劳裂纹萌生寿命 (均值约 15 万循环周次) 是俄制 EP741NP 合金盘件寿命 (均值约 4 万循环周次) 的 4 倍左右。这是因为细晶粒组织具有较高的强度, 阻碍了由于循环应力引起的位错运动, 使裂纹难以形核, 提高了疲劳裂纹萌生寿命。而晶粒尺寸增大时, 增强了裂纹沿晶体学小平面扩展的特征并延迟条纹机制的出现。这种特征不仅增大了裂纹面的粗糙度, 造成裂纹扩展路径的曲折, 导致裂纹尖端有效应力强度因子减小; 而且降低单位体积的晶界面积, 减少高温下的氧化损伤和沿晶界蠕变损伤。因此, 可有效降低高温下的疲劳裂纹扩展速率<sup>[10]</sup>。

## 2.6 $\gamma'$ 相尺寸和形貌对疲劳裂纹扩展速率的影响

为研究  $\gamma'$ 相尺寸和形貌对 AA 制粉+HIP 成型的

FGH97 合金疲劳裂纹扩展性能的影响, 采用 2 个晶粒度和氧含量相似的盘件, 延长时效保温时间使试验盘 T04 的  $\gamma'$  相尺寸略大于试验盘 T01, 见表 5。

2 个试验盘时效态的  $\gamma'$  形貌如图 10 所示。T01 试验盘试样晶内  $\gamma'$  相细小, 多为方形和多边形, 约 250 nm, 见图 10a; T04 试验盘试样内  $\gamma'$  相明显较粗大, 约 350 nm, 可见少量田字形  $\gamma'$  尺寸为 0.35~0.8  $\mu\text{m}$ , 见图 10b。

2 种不同尺寸  $\gamma'$  相试样的裂纹扩展速率见图 11。 $\Delta K=30 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  时,  $\gamma'$  尺寸小的 T01 试验盘试样和  $\gamma'$  尺寸大的 T04 试验盘试样裂纹扩展速率分别为  $5.93 \times 10^{-4}$  和  $4.78 \times 10^{-4} \text{ mm/cycle}$ , 可见两个试样在稳态阶段裂纹扩展速率基本相同;  $\Delta K=80 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  时,  $\gamma'$  尺寸小的试验盘 T01 和  $\gamma'$  尺寸大的试验盘 T04 试样的裂纹扩展速率分别为  $9.68 \times 10^{-3}$  和  $7.73 \times 10^{-3} \text{ mm/cycle}$ , 可见在裂纹扩展加速阶段  $\gamma'$  尺寸大有利于裂纹扩展速率的降低。试验数据显示  $\gamma'$  尺寸大的试验盘 T04 试样的裂纹扩展寿命 ( $N=11\ 392 \text{ cycles}$ ) 比  $\gamma'$  尺寸小的试验盘 T01 裂纹扩展寿命略高 ( $N=10\ 305 \text{ cycles}$ )。

表 5 AA 制粉+HIP 制备的 FGH97 合金试验盘件  
Table 5 AA+HIP processed FGH97 alloy testing piece

	Oxygen/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	Grain size, ASTM	Gamma prime size/nm	Hardness, HB/ $\times 10 \text{ MPa}$
T01	148	7.7	250	393
T04	140	8.0	350	391

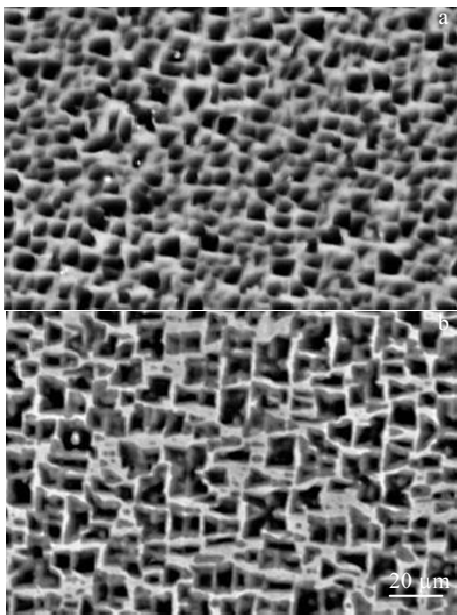


图 10 时效热处理后的  $\gamma'$  相形貌

Fig.10 Morphologies of  $\gamma'$  phases after aging heat-treatment: (a) T01, 250 nm and (b) T04, 350 nm

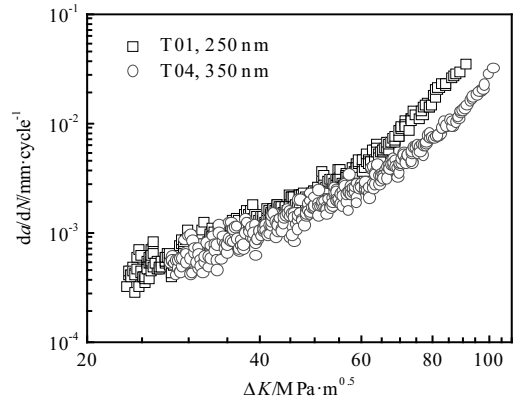


图 11 不同  $\gamma'$  尺寸试验盘的裂纹扩展速率对比

Fig.11 Comparison of fatigue crack growth rates for test disks with different  $\gamma'$  phase sizes

以上结果表明,  $\gamma'$  相尺寸增加对稳态阶段的裂纹扩展速率影响不显著, 但是有利于降低加速阶段的疲劳裂纹扩展速率。 $\gamma'$  尺寸大的试样表现出稍高的疲劳裂纹扩展抗力, 是因为  $\gamma'$  相尺寸的长大, 使位错绕过  $\gamma'$  粒子, 导致弯曲滑移, 产生均匀切变, 位错很容易改变方向, 可以更好地容纳疲劳损伤, 降低了裂纹扩展速率<sup>[10]</sup>。

### 3 结 论

1) AA 制粉+HIP 工艺制备的粉末高温合金 FGH97 具有比俄制 PREP 制粉+HIP 工艺制备的 EP741NP 合金更高的高温疲劳裂纹扩展抗力。

2) 对于 AA 制粉+HIP 工艺制备的 FGH97 合金, 将试验盘的平均晶粒尺寸从 18  $\mu\text{m}$  (ASTM8.6) 增加到 24  $\mu\text{m}$  (ASTM7.7), 将提高合金的高温疲劳裂纹扩展抗力, 特别在高应力强度因子的加速扩展阶段, 晶粒尺寸的影响更加明显。这是因为晶粒尺寸大, 裂纹扩展路径呈锯齿状, 比较曲折, 裂纹尖端有效应力强度因子随着裂纹路径的偏转而减小。

3) 对于 AA 制粉+HIP 工艺制备的 FGH97 合金,  $\gamma'$  相尺寸从 250 nm 增加到 350 nm 时, 疲劳裂纹扩展速率将略有降低。

4) 对于 AA 制粉+HIP 工艺制备的 FGH97 合金, 氧含量从 100  $\mu\text{g/g}$  增加到 150  $\mu\text{g/g}$  时, 对高温疲劳裂纹扩展性能没有明显的影响。这是因为当氧含量小于 150  $\mu\text{g/g}$  时, 显微组织中并没有出现完整的 PPB, 沿晶界析出的碳化物保持断续点状, 未形成网状分布。

### 参考文献 References

- [1] Sun Li (孙黎), Shao Changxing(邵长星), Zeng Yingxue(曾莹雪). *China Science and Technology Information*(中国科技信息)[J], 2015(5): 205
- [2] Zhang Yiwen(张义文), Liu Jiantao(刘建涛). *Chinese Material* (中国材料进展)[J], 2013, 32(1): 1
- [3] Zhang Ying(张莹), Zhang Yiwen(张义文), Zhang Na(张娜) *et al. Journal of Aeronautical Materials*(航空材料学报)[J], 2008(6): 5
- [4] Liu Hao(刘浩), Bao Rui(鲍蕊), Yue Chenyang(岳晨阳) *et al. Journal of Aerospace Power*(航空动力学报)[J], 2016, 31(6): 1400
- [5] Liu Junbin(刘君滨). *China New Technology and New Products*(中国新技术新产品)[J], 2016(5): 72
- [6] Zhang Ying(张莹), Zhang Yiwen(张义文), Zhang Na(张娜) *et al. Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2010, 46(4): 444
- [7] Guo Weibin(郭伟彬). *Physical and Chemical Inspection*(理化检验-物理分册)[J], 2008(5): 231
- [8] Powell A, Bain K, Wessman A *et al. Proceedings of the 13th International Symposium of Superalloys*[C]. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc, 2016: 189
- [9] Hardy M C, Zirbel B, Shen G *et al. Proceedings of the 10th International Symposium on Superalloys*[C]. Champion, PA, USA: The Minerals, Metals & Materials Society, 2004: 83
- [10] Er Qiliang(佴启亮), Dong Jianxin(董建新), Zhang Maicang(张麦仓) *et al. Journal of Engineering Science*(工程科学学报)[J], 2016, 38(2): 248
- [11] Yao Caogen(姚草根), Meng Shuo(孟烁), Li Xiulin(李秀林) *et al. Powder Metallurgy Materials Science and Engineering* (粉末冶金材料科学与工程)[J], 2017, 22(1): 33
- [12] Bai Q, Lin J, Tian G *et al. Journal of Powder Metallurgy and Mining*[J], 2015, 4: 127
- [13] May J R, Hardy M C, Bache M R *et al. Advanced Materials Research*[J], 2011, 278: 265

## Fatigue Crack Growth Behavior of FGH97 P/M Superalloy

Xiao Lei<sup>1,2</sup>, Zhu Xiaomin<sup>1</sup>, Zhang Gaoxiang<sup>1</sup>, Wang Chong<sup>1</sup>

(1. Shenzhen Wedge Central South Research Institute Co., Ltd, Shenzhen 518000, China)

(2. Shenzhen Wedge Aviation Technology Responsibilities Co., Ltd, Shenzhen 518000, China)

**Abstract:** Fatigue crack growth behavior at 650 °C of a P/M superalloy FGH97, which was made by argon atomization (AA) + hot isostatic pressing (HIP) process, was investigated. Comparison tests were conducted using a Russian EP741NP disk made of plasma rotating electrode process (PREP) + HIP process. The effects of different powder making methods, oxygen content, grain size and gamma prime size on the fatigue crack growth rate were evaluated. The results reveal that the AA + HIP processed FGH97 test disk has a lower fatigue crack growth rate than EP741NP disk. Grain size is the dominant factor in the fatigue crack growth behavior; the larger the grain size, the lower the fatigue crack growth rate. While the  $\gamma'$  phase size takes the second place; in a certain range the crack growth rate decreases slightly with the increase of the  $\gamma'$  phase size. Oxygen content between 100~150  $\mu\text{g/g}$  has no significant effect on the crack growth rate.

**Key words:** FGH97 P/M superalloy; argon atomization process; plasma rotating electrode process; fatigue crack growth

---

Corresponding author: Xiao Lei, Ph. D., Shenzhen Wedge Central South Research Institute Co., Ltd, Shenzhen 518000, P. R. China, Tel: 0086-755-82731326, E-mail: catshaw@zju.edu.cn