

# 粉末高温合金 FGH97 疲劳裂纹扩展行为

佴启亮<sup>✉</sup>, 董建新, 张麦仓, 郑磊, 姚志浩

北京科技大学材料科学与工程学院, 北京 100083

<sup>✉</sup>通信作者, E-mail: naiqiliang@126.com

**摘要** 测定不同晶粒尺寸、 $\gamma'$ 相以及不同 Hf 含量的粉末高温合金 FGH97 在 650 °C 高温条件下的疲劳裂纹扩展速率, 并将其与 FGH95 和 FGH96 两代粉末合金的疲劳裂纹扩展速率进行对比。用定量分析的方法对 FGH97 合金在疲劳断裂各个阶段的行为特征进行分析。较大晶粒尺寸的 FGH97 合金具有较低的裂纹扩展速率, 合理的二次和三次  $\gamma'$  相匹配析出, 可以获得较高的疲劳寿命; Hf 元素的添加使合金的整体疲劳寿命增大; FGH97 合金与 FGH95 和 FGH96 相比, 具有较高的疲劳裂纹萌生抗力, 更低的高温疲劳裂纹扩展速率。

**关键词** 镍基高温合金; 粉末冶金; 疲劳裂纹扩展速率; 钽

**分类号** TG146.1 + 5

## Fatigue behavior of powder metallurgy superalloy FGH97

NAI Qi-liang<sup>✉</sup>, DONG Jian-xin, ZHANG Mai-cang, ZHENG Lei, YAO Zhi-hao

School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

<sup>✉</sup>Corresponding author, E-mail: naiqiliang@126.com

**ABSTRACT** The fatigue crack growth rates of powder metallurgy (P/M) superalloy FGH97 with different grain sizes,  $\gamma'$  phase sizes and Hf contents were measured at a 650 °C high temperature condition and compared with those of FGH95 and FGH96 alloys. The fatigue fracture behavior characteristic of FGH97 alloy in each stage was analyzed by the quantitative analysis method. It is found that FGH97 alloy with coarser grains has a lower fatigue crack growth rate. Reasonable match of secondary and tertiary  $\gamma'$  phases and Hf addition can get a higher fatigue life. Compared with FGH95 and FGH96 alloys, FGH97 alloy has the highest fatigue crack initiation resistance and exhibits the lowest fatigue crack propagation rate at high temperature.

**KEY WORDS** nickel base superalloys; powder metallurgy; fatigue crack growth rate; hafnium

目前高推重比航空发动机的发展对高温合金的性能要求越来越高。粉末高温合金由于具有较高的高温强度、良好的抗疲劳性能、低的裂纹扩展速率、较好的抗氧化性能及高温使用时良好的组织稳定性等综合性能, 成为制造先进航空发动机涡轮盘、压气机盘、涡轮轴、涡轮盘挡板等零部件的首选材料<sup>[1-2]</sup>。

我国粉末高温合金的研究起步于 20 世纪 70 年代后期, 经过几十年的发展, 研制出以 FGH95 为代表的第一代粉末高温合金, FGH96 为代表的第二代粉末高温合金, 并随后研发了 FGH97 等一系列粉末高

温合金。FGH95 合金采用等离子旋转电极工艺 (PREP) 制粉 + 热等静压 (HIP) 直接成形, 使用温度为 650 °C,  $\gamma'$  相数量高达 50% ~ 55%, 属于高强型粉末高温合金, 但其损伤容限较低。在此基础上研发了第二代高损伤容限型镍基粉末高温合金 FGH96, 采用等离子旋转电极工艺 (PREP) 制粉 + 热等静压 (HIP) 制坯 + 锻造成形工艺, 优化了成分和制造工艺,  $\gamma'$  相数量为 35% 左右, 强度低于 FGH95。FGH97 为我国研制的与 EP741NP 牌号相近的合金<sup>[3]</sup>, 采用等离子旋转电极工艺 (PREP) 制粉 + 热等静压 (HIP)

直接成形,优化了成分设计,使合金在 650~750 °C 具有优异的性能<sup>[4]</sup>. 疲劳性能作为粉末高温合金服役过程中一项重要指标,长期以来都是一个备受关注的重要内容. FGH95、FGH96 和 FGH97 合金的制造工艺、组织成分等存在差异,因此造成三种合金具有不同的疲劳特征. 目前,关于 FGH95、FGH96 合金疲劳性能的研究已有一些报道,而对 FGH97 疲劳特征的研究报道却甚少. 本文通过对不同晶粒尺寸、 $\gamma'$  相以及不同 Hf 含量的 FGH97 合金,在疲劳及保载 90 s 两种不同状态下进行 650 °C 高温疲劳裂纹扩展速率

试验,并与 FGH95 和 FGH96 合金的疲劳性能进行对比,通过定量对比分析揭示了 FGH97 合金的疲劳行为特征,并对疲劳过程进行深入的分析与探讨,为 FGH97 合金的设计研究和发展提供一些思路和看法.

## 1 实验材料及方法

本实验所采用的镍基粉末高温合金 FGH97 标准化学成分如表 1 所示. 具体的热处理工艺: 1200 °C, 8 h 炉冷 + 1170 °C, 空冷 + 870 °C, 24 h 空冷.

表 1 FGH97 合金的化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of FGH97 alloy

Cr	Co	Mo	W	Al	Ti	Nb	Zr	B	C	Hf	Ni	%
9.02	15.69	3.76	4.96	4.91	1.74	2.59	0.017	0.012	0.045	0.30	余量	

为研究晶粒尺寸对 FGH97 合金疲劳裂纹扩展行为的影响,在组分相同的条件下,延长一个试样的固溶时间到 10 h,之后采用相同的热处理工艺,使其具有不同的晶粒尺寸,并保证析出相等其他条件变化不大; 为研究  $\gamma'$  相对 FGH97 合金疲劳裂纹扩展行为的影响,在 900~700 °C 进行不同时间的时效处理,获得不同的  $\gamma'$  相析出特征. 为研究 Hf 元素对 FGH97 合金低周疲劳行为的影响,在 FGH97 合金标准成分的基础上添加 0%、0.15%、0.6% 和 0.9% 的 4 种不同质量分数的 Hf 进行实验. 将机械抛光后的试样进行化学侵蚀以观察其晶粒组织,侵蚀剂为 5 g CuCl<sub>2</sub> + 100 mL HCl + 100 mL C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH,试样在溶剂中浸蚀 30~90 s. 对试样进行电解抛光+电解侵蚀以观察其强化相形貌. 电解抛光制度: 电压 30 V 下在 20% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + CH<sub>3</sub>OH 抛光液中浸蚀 5~10 s. 电解侵蚀制度: 电压 5 V 下在 15 g CrO<sub>3</sub> + 10 mL H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + 150 mL H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> 侵蚀液中浸蚀 3~6 s.

疲劳裂纹扩展试验在高温裂纹扩展试验机上进行,试样按 JB/T8189—1999 并参照 ASTM-E647—81 制成标准紧凑拉伸试样(CT)试样,试样尺寸如图 1 所示. 试验前,用钼丝切割出缺口.

为接近实际服役环境,设定实验温度为 650 °C,应力比  $R$  设为 0.05,最大载荷为 4230 N,在空气环境进行试验,加载波形图如图 2 所示. 采用直流电位法测量裂纹长度,本试验中 FGH97 合金裂纹长度变化  $\Delta a$  与电位变化  $\Delta V$  关系为  $\Delta a = 3.335 \Delta V$ . 利用扫描电子显微镜观察其微观组织变化及断口形貌.

## 2 实验结果

### 2.1 晶粒尺寸的影响

两种不同晶粒尺寸 FGH97 合金的组织如图 3 所示. 细晶试样平均晶粒尺寸约为 100  $\mu\text{m}$ ,粗晶试样平均晶粒尺寸约为 170  $\mu\text{m}$ . 图 4 为两种试样在 650 °C 空

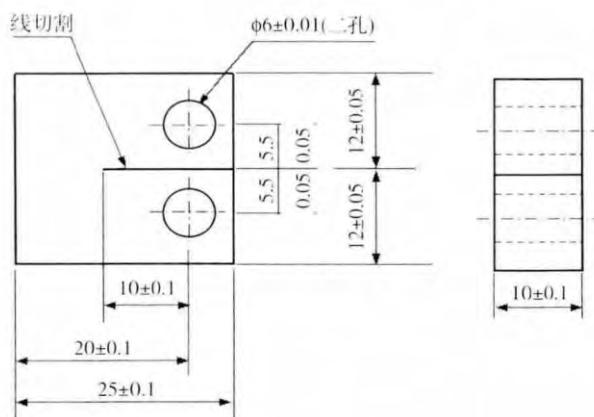


图 1 CT 疲劳裂纹扩展标准试样(单位: mm)

Fig. 1 Compact tension specimen for crack propagation test

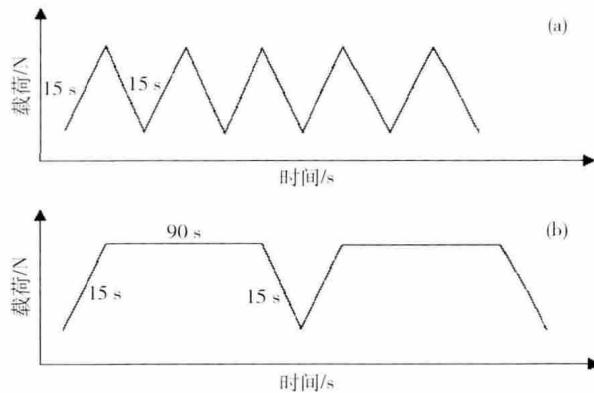


图 2 恒载荷载荷谱: (a) 疲劳; (b) 保载 90 s

Fig. 2 Load spectra under constant load: (a) fatigue; (b) holding for 90 s

气环境中,疲劳加载下的  $da/dN-\Delta k$  曲线( $da/dN$  为裂纹扩展速率,  $\Delta k$  为应力强度因子范围)和  $a-N$  曲线( $a$  为裂纹长度,  $N$  为循环加载周期). 由图 4(a) 可知,无论是在疲劳裂纹扩展的萌生阶段还是稳定扩展阶段,粗晶试样较细晶试样都有着较低的疲劳裂纹扩展速

率。由  $a-N$  曲线可知, 细晶试样疲劳裂纹断裂的循环周次较粗晶试样的循环周次少, 疲劳寿命短。另外, 从

图 4(b) 中可以看出细晶试样的裂纹萌生周次较粗晶试样多, 说明细晶组织的裂纹萌生抗力高。

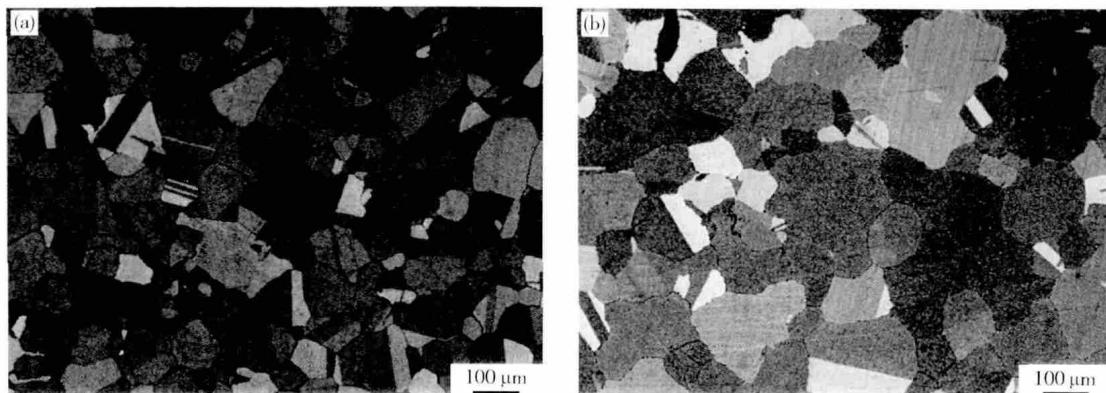


图 3 两种不同晶粒尺寸的 FGH97 合金试样的微观组织. (a) 细晶试样; (b) 粗晶试样

Fig. 3 Microstructures of two FGH97 alloy specimens with different grain sizes: (a) fine grains; (b) coarse grains

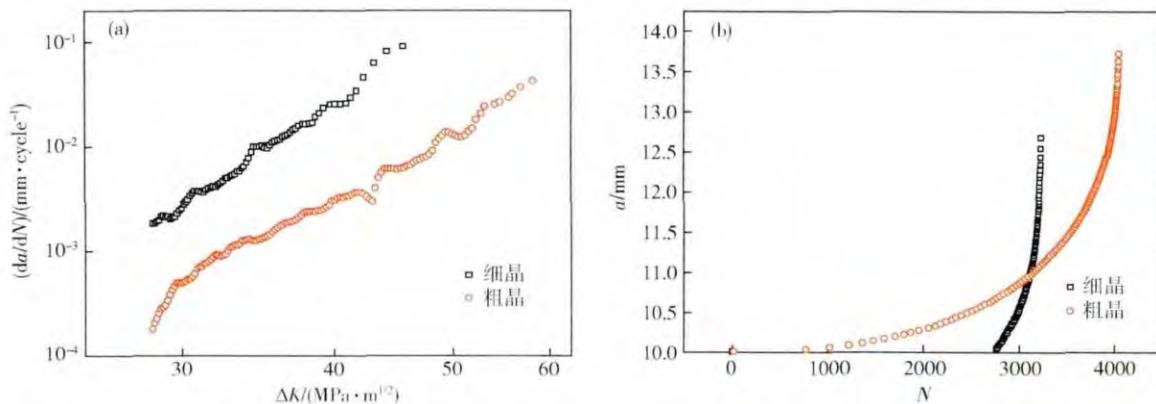


图 4 两种不同晶粒尺寸的 FGH97 合金试样的疲劳寿命和裂纹扩展速率曲线. (a)  $da/dN-\Delta K$  曲线; (b)  $a-N$  曲线

Fig. 4 Lifetime and fatigue crack growth rate curves of two FGH97 alloy specimens with different grain sizes: (a)  $da/dN-\Delta K$ ; (b)  $a-N$

## 2.2 $\gamma'$ 相的影响

选取 A、B 两个试样, 进行相同的固溶处理, 改变时效时间, 使其  $\gamma'$  相发生改变, 晶粒尺寸保持不变, 其组织形貌如图 5 所示。两者的主要差别在于强化相的尺寸分布。在同样的放大倍数下, A 试样中  $\gamma'$  相尺寸分布在 100~200 nm 之间, 且由于尺寸细小, 分布极为

紧密。B 中的  $\gamma'$  相尺寸大约是 A 的 2~3 倍, 约为 300~400 nm 左右, 主要呈方块状, 比较均匀有序地排列, 空隙之间还有细小的三次  $\gamma'$  相补充析出。

试验温度接近于使用条件, 为 650 °C, 应力比  $R = 0.05$ , 初始应力强度因子  $\Delta K = 30 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。试验后得到的  $da/dN-\Delta K$  和  $a-N$  曲线如图 6 所示。

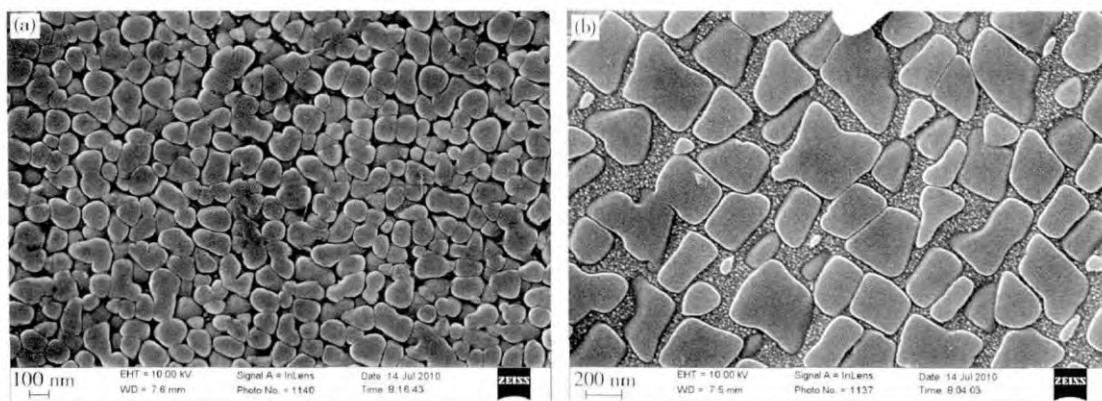
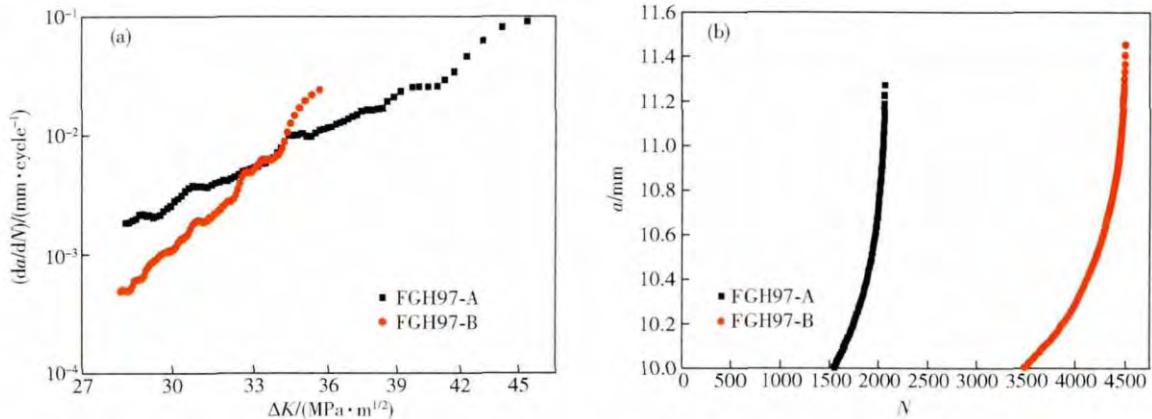


图 5 两种不同  $\gamma'$  相尺寸的 FGH97 合金试样的微观组织形貌. (a) FGH97-A; (b) FGH97-B

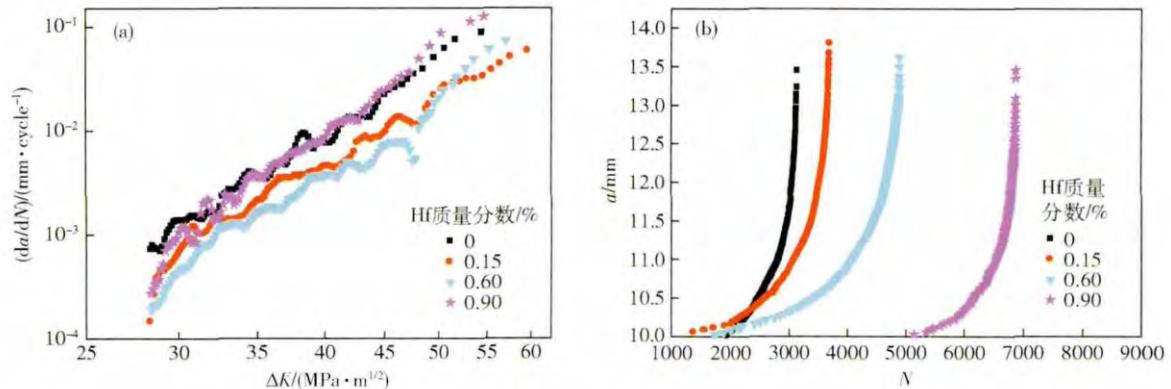
Fig. 5 Microstructures of FGH97 alloy specimens with different  $\gamma'$  phase sizes: (a) FGH97-A; (b) FGH97-B

图 6 两种不同  $\gamma'$  相尺寸的 FGH97 合金试样的疲劳寿命和裂纹扩展速率曲线. (a)  $da/dN-\Delta K$ ; (b)  $a-N$ Fig. 6 Lifetime and fatigue crack growth rate curves of FGH97 alloy specimens with different  $\gamma'$  phase sizes: (a)  $da/dN-\Delta K$ ; (b)  $a-N$ 

从图 6(a) 可知, A 试样初始扩展速率较高, 而 B 试样裂纹扩展速率的增速较快。B 试样在相对较低的应力强度下, 疲劳裂纹进入瞬断区扩展。由  $a-N$  曲线可知, B 试样的启裂周次较高。从两个试样的曲线对比可知, 对于 FGH97 合金,  $\gamma'$  相尺寸的增大、三次的析出以及  $\gamma'$  相有序的排列有利于裂纹萌生抗力的提高, 因此 B 试样的启裂周次明显高于 A 试样, 但是 B 所承受的应力强度因子范围比 A 要窄。

### 2.3 Hf 含量影响

不同 Hf 含量的试样疲劳裂纹扩展速率曲线和循

图 7 不同 Hf 含量 FGH97 合金疲劳寿命和裂纹扩展速率曲线. (a)  $da/dN-\Delta K$ ; (b)  $a-N$ Fig. 7 Lifetime and fatigue crack growth rate curves of FGH97 alloy with different Hf contents: (a)  $da/dN-\Delta K$ ; (b)  $a-N$ 

## 3 讨论

### 3.1 FGH97 合金疲劳特性

为了进一步研究 FGH97 合金疲劳裂纹扩展行为特征, 将第一代、第二代粉末高温合金 FGH95 和 FGH96 合金的疲劳行为与其进行对比。FGH95 合金采用等离子旋转电极制粉 + 热等静压成形工艺, FGH96 采用等离子旋转电极制粉 + 热等静压制坯 + 锻造成形工艺, FGH97 合金的制造工艺则与 FGH95 合金相近。在成分设计上, FGH97 合金与 FGH95、FGH96 合金相比降低了 Cr 含量, 提高了 Co 含量, 使得合金的高温强

环周次曲线如图 7 所示。随着 Hf 的质量分数从 0 增加到 0.60%, 试样的疲劳裂纹扩展速率降低。当 Hf 质量分数达到 0.90% 时, 试样疲劳裂纹的扩展速率增加。图 7(b) 为 FGH97 合金试样的疲劳寿命曲线。由图 7 可以看出, 随 Hf 含量的增加, 试样的疲劳寿命整体呈逐渐增大趋势, Hf 质量分数在 0~0.6% 时, 疲劳裂纹的启裂周次相当, 当 Hf 质量分数提高到 0.9% 时, 启裂周次较高。

度得到一定的提高, 优化了 Al/Ti 比并添加了一定量的 Hf 元素, Hf 元素增加了  $\gamma'$  相含量并且适量的降低了  $\gamma/\gamma'$  晶格错配度, 有利于提高材料的高温持久寿命, 并且析出的晶界碳化物数量增多, 提高了晶界强度<sup>[5-11]</sup>。

从微观组织(图 8)上来看, FGH95 合金晶界和晶内具有粗大的一次  $\gamma'$  相。这是由于 FGH95 采用亚固溶处理,  $\gamma'$  相没有完全回溶, 在随后的热处理中仍残留晶界和晶内, 并且具有较大尺寸。FGH96 和 FGH97 合金采用过固溶处理,  $\gamma'$  相完全回溶, 基体上没有粗大的一次  $\gamma'$  相存在。FGH96 和 FGH97 全金中细小的三次

$\gamma'$ 相弥散分布在二次  $\gamma'$  相之间, 这种二次和三次  $\gamma'$  相的匹配析出提高了材料疲劳裂纹扩展的抗力。另外,

FGH97 合金  $\gamma'$  的析出数量约 60% 较 FGH96 合金 (35% 左右) 多, 提高了合金的强度。

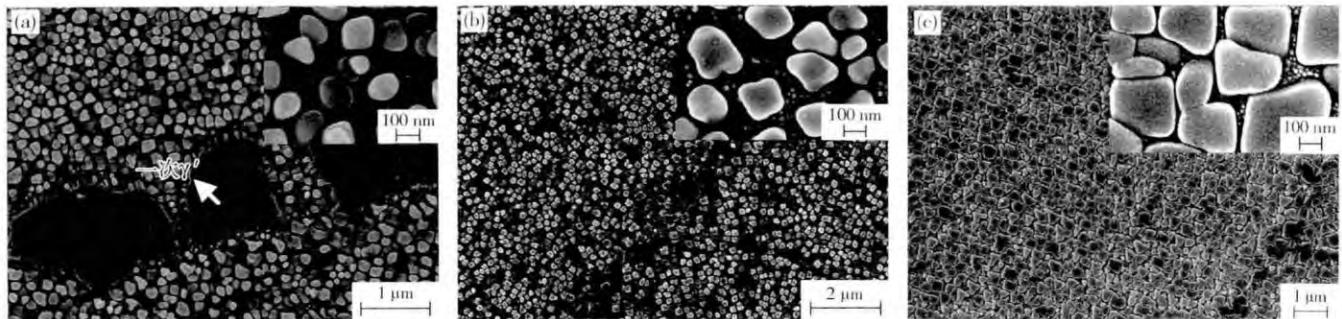


图 8 高温合金的微观组织形貌. (a) FGH95; (b) FGH96; (c) FGH97  
Fig. 8 Microstructures of three alloys: (a) FGH95; (b) FGH96; (c) FGH97

对镍基高温合金 FGH95、FGH96、FGH97 在 650 °C 下进行疲劳和保载 90 s 条件下的裂纹扩展速率试验, 得到的  $da/dN - \Delta K$  曲线和  $a - N$  曲线(如图 9 和 10 所示)。疲劳加载下, FGH95 合金的裂纹扩展速率最高, FGH97 与 FGH96 合金裂纹扩展速率相当, 但 FGH97 合金的启裂周次较 FGH96 高, 因此呈现出最高的疲劳寿命。在疲劳-蠕变交互作用下(保载 90 s), 各种合金

的疲劳裂纹扩展速率呈明显增大的趋势。FGH95 依然呈现出最高的裂纹扩展速率, FGH97 在低的强度因子范围  $\Delta K$  裂纹扩展速率与 FGH96 相近, 随着  $\Delta K$  增加, FGH97 的裂纹扩展速率则显示出较低的扩展速率, 使得应力循环周次增加, 大幅度地提高了疲劳寿命, 加上启裂周次远远高于 FGH96 和 FGH95 合金, FGH97 合金的依旧呈现出最高的疲劳寿命。

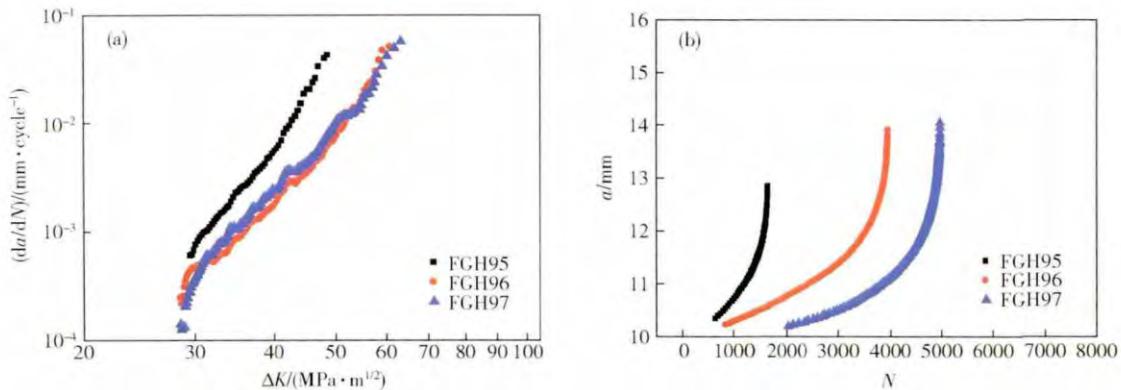


图 9 纯疲劳下三种合金疲劳寿命和裂纹扩展速率曲线. (a)  $da/dN - \Delta K$ ; (b)  $a - N$   
Fig. 9 Lifetime and fatigue crack growth rate curves of three alloys under pure fatigue: (a)  $da/dN - \Delta K$ ; (b)  $a - N$

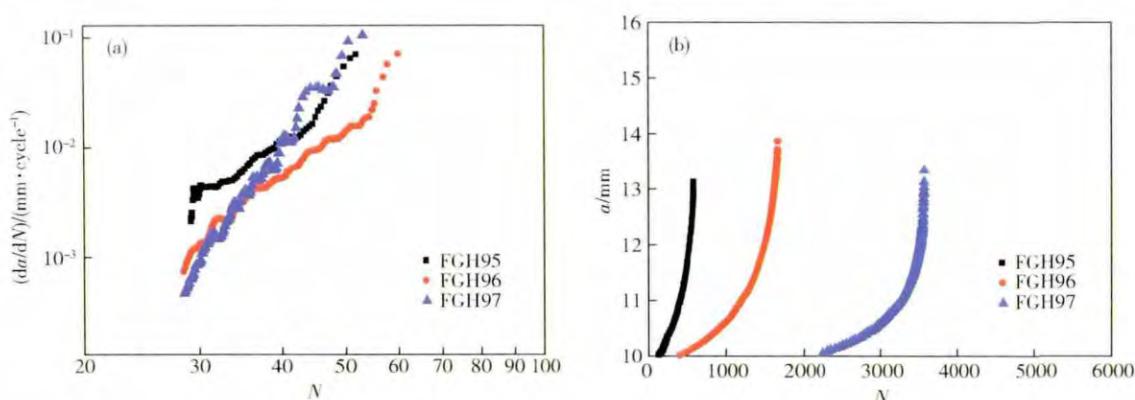


图 10 保载 90 s 下疲劳寿命和裂纹扩展速率曲线. (a)  $da/dN - \Delta K$ ; (b)  $a - N$   
Fig. 10 Lifetime and fatigue crack growth rate curves of three alloys with a 90 s hold time: (a)  $da/dN - \Delta K$ ; (b)  $a - N$

为了更深入研究 FGH97 的疲劳特性, 利用 Zhang 等<sup>[12]</sup>的方法将疲劳过程分成瞬断区、扩展区和萌生区(本文将文献中提到的孕育期和萌生区合并为萌生区)三个阶段分别与 FGH95 和 FGH96 合金进行对比分析。图 11 为三种粉末高温合金在疲劳和保载 90 s 两种不同循环载荷作用下的疲劳裂纹萌生、扩展和瞬断三个阶段的周次对比图。可以看出, 在疲劳作用下, FGH97 疲劳裂纹萌生期的周次较 FGH95 和 FGH96 高, 甚至超过 FGH95 合金的整个疲劳寿命, 并且在整个疲劳寿命中所占比例较高。FGH97 的疲劳裂纹萌生

抗力与 FGH95 和 FGH96 相比较高。扩展阶段 FGH97 和 FGH96 的应力循环周次均比 FGH95 高, 高的裂纹扩展抗力可以避免合金快速进瞬断区而降低其使用寿命。由于萌生期和扩展期所占疲劳寿命的比例增大, 导致瞬断期的周次减小, 提高了材料的疲劳性能。在保载 90 s 下, 三种合金疲劳裂纹扩展相互之间的关系与疲劳下的关系类似。与疲劳条件下相比, 合金的裂纹扩展速率增大, 合金的疲劳寿命均有不同程度的降低。

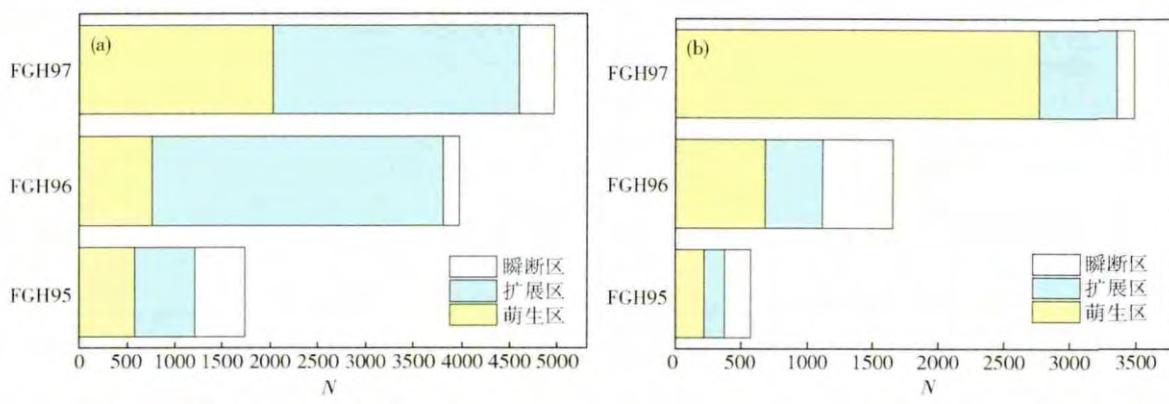


图 11 疲劳断裂各阶段对比. (a) 疲劳; (b) 保载 90 s

Fig. 11 Comparison of fatigue fracture in different stages: (a) pure fatigue; (b) 90 s hold time

### 3.2 组织特征对 FGH97 疲劳行为的影响

晶粒尺寸是影响高温合金疲劳裂纹的扩展速率的重要原因之一。从实验数据可知, 晶粒尺寸大小对于 FGH97 合金疲劳裂纹的影响贯穿整个断裂过程。在裂纹的萌生阶段, 细晶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, 提高了裂纹的萌生周次<sup>[13]</sup>。另外, 高温合金层错能较低, 晶粒越小, 裂纹传播的第一阶段的阻力就越大, 导致第一阶段的循环周次就越高。在裂纹扩展阶段, 大晶粒可以增加反复滑移的平面滑移特征, 阻碍裂纹的扩展, 并且在循环应力的作用下, 断裂表面粗糙度较高, 引起裂纹提起闭合, 导致裂纹扩展速率下降; 另一方面, 细晶材料由于具有较多的晶界暴露在空气中, 在应力诱导下加快氧沿晶界扩展, 加重晶界氧化, 弱化晶界, 从而增加了疲劳裂纹扩展速率<sup>[14]</sup>。

另外, 对于 FGH97 合金来说, 无论是粗晶还是细晶组织, 裂纹萌生的循环周次在整个断裂周次中占有较高的比重。以往的研究更多局限在晶粒度对裂纹扩展速率的研究上。因此, 我们在研究晶粒尺寸对 FGH97 合金疲劳裂纹的影响时, 不能仅仅关注其对裂纹扩展速率的影响, 还应结合疲劳裂纹扩展各个阶段综合研究, 协调各个阶级循环周次从而极大地提高合

金的疲劳寿命。

不同的热处理方式及化学成分的改变可使 FGH97 中的  $\gamma'$  相具有不同形态、尺寸及分布<sup>[15]</sup>, 其对 FGH97 合金疲劳裂纹扩展速率有着较大的影响。从图 6 可以看出具有较大强化相尺寸的试样裂纹扩展速率整体较低。为进一步研究不同  $\gamma'$  相特征对疲劳裂纹扩展各阶段有何影响, 转换数据得到  $da/dN-a$  曲线如图 12 所示。

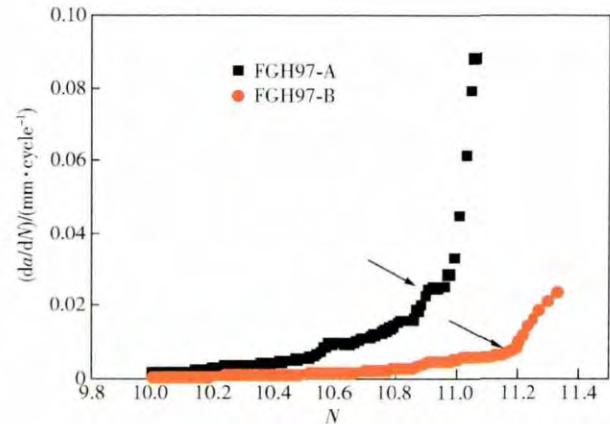


图 12 不同  $\gamma'$  相特征  $da/dN-a$  曲线

Fig. 12  $da/dN-a$  curves of FGH97 alloy different  $\gamma'$  features

由 FGH97 合金的  $da/dN-a$  曲线(图 12)可以得到两种组织特征下疲劳裂纹进入瞬断区时裂纹扩展

速率快速增大的拐点,其对应着疲劳裂纹进入瞬断区时的长度,由此可知A试样进入瞬断区时的裂纹长度小于B,在一定程度上反映A的疲劳裂纹扩展抗力较低。裂纹一旦进入瞬断区,扩展速率就会快速增大,十分危险。因此为了使用安全,更应关注于裂纹扩展的前两个阶段,尤其是萌生区,FGH97的裂纹萌生比例占整个寿命的80%以上,相比之下B试样具有更长的萌生周期,约86.4%,这是安全使用所追求的,尽可能延长裂纹的萌生期,一旦进入扩展期,速率加快,材料很快失效。对于裂纹尖端的应力强度因子,两者的初始值一样( $\Delta K = 30$ ),但各个阶段B试样的变化范围较小,说明B试样的组织能缓解裂纹尖端的应力集中,从而提高材料的疲劳寿命。综上

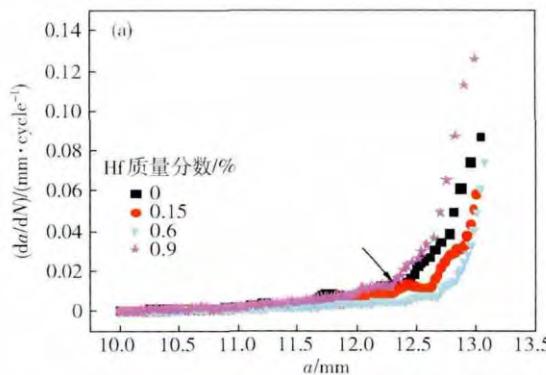


图13 不同Hf含量FGH97疲劳断裂特征。(a)  $da/dN - a$

Fig.13 Fatigue fracture characteristics of FGH97 alloy with different Hf contents: (a)  $da/dN - a$ ; (b) comparison of different stages

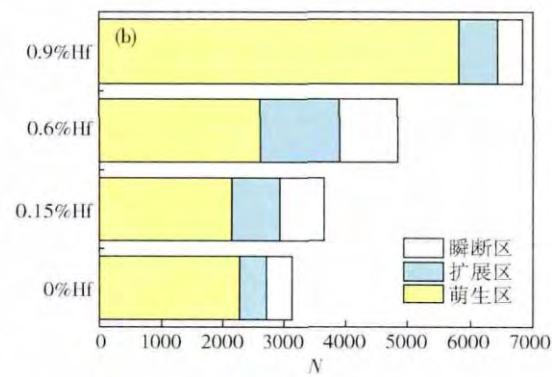
图14是4种不同Hf含量的FGH97合金在扩展阶段的断口形貌。从图14可以看出:当Hf质量分数 $w(Hf)=0\%$ 时,合金断口呈现明显的穿晶和沿晶混合断裂的模式,并且在断口边缘处伴随较多的二次裂纹;当Hf的质量分数在 $0\% \sim 0.6\%$ 时,随着Hf含量的增多,断口表面穿晶解理断裂的比例增大,沿晶断裂与穿晶断裂相比对裂纹扩展阻碍较小,裂纹扩展速率较快,所以随着Hf含量的增加,裂纹扩展速率呈逐渐降低的趋势;当Hf质量分数达到 $0.90\%$ 时,断口上的二次裂纹较少,晶界强度高,因此其对疲劳裂纹的萌生具有较高的抗力,试样的断口呈现明显的沿晶断裂为主的特征,这种断裂方式又导致裂纹扩展速率加速。

本文通过研究影响FGH97合金疲劳寿命的三个重要因素——晶粒尺寸、 $\gamma'$ 相及Hf含量,发现各因素对合金在疲劳断裂过程中的影响是错综复杂的。大的晶粒尺寸降低了疲劳裂纹扩展速率,但也降低了裂纹萌生的抗力。如果晶粒尺寸过小,虽提高了循环应力下裂纹萌生的周次,但也促进了裂纹的扩展速率导致整体寿命下降。晶粒尺寸过大,必然导致抗萌生能力的降低,亦会使疲劳寿命下降。因此在实际生产中因选取合适的晶粒尺寸,兼顾其对裂纹萌生和扩展的抗力,

所述,B试样的 $\gamma'$ 相特征提高了疲劳裂纹萌生的抗力。

### 3.3 Hf元素对FGH97疲劳行为的影响

图13为不同Hf含量合金疲劳特征对比图。由图13可以看出,随着Hf含量的增加,合金整体疲劳寿命延长,疲劳裂纹的进入瞬断区时的裂纹长度呈增加的趋势,并且使得疲劳裂纹扩展区的寿命呈增加趋势。当Hf质量分数达到 $0.90\%$ 时,试样临界裂纹尺寸骤降至最底,但极大地增加了萌生区的寿命,萌生区的周期占整个疲劳寿命的84.9%。除 $0.9\%$ Hf的合金外,其他试样随Hf含量的增加,扩展区的比率增大,可见适当Hf元素的添加,可以延长扩展区在整体寿命中的比率。



调整两者之间的关联性,进而极大地提高合金的使用寿命。同样对 $\gamma'$ 相来说,其尺寸大小,分布情况对疲劳断裂过程的影响也各不相同,合适尺寸、规则排列的二次 $\gamma'$ 相并且伴有细小的三次 $\gamma'$ 相虽然增大了裂纹在瞬断区的扩展速度,但大幅度地增加裂纹萌生的抗力,并且降低了疲劳裂纹的扩展速率,而这种对疲劳寿命的有益作用远远高于其对瞬断区的有害作用。Hf元素的添加整体上提升了合金的疲劳寿命,尤其是在疲劳裂纹的扩展区。通过三种合金疲劳行为的对比发现,在粉末高温合金中,疲劳裂纹的萌生寿命在整个疲劳寿命中占据比较大的比例,因此提高粉末高温合金的裂纹萌生抗力对增加合金的疲劳寿命至关重要。FGH97与FGH96、FGH95相比,大幅度提高了裂纹在循环应力下的萌生周次并降低了瞬断区在疲劳断裂过程中的比例;在提高裂纹萌生周次的前提下,适当的提高合金扩展区的比例,可以使合金呈现出较高的疲劳寿命。

## 4 结论

(1) 粉末高温合金FGH97较FGH95和FGH96具有较高的疲劳裂纹萌生抗力,更低的高温疲劳裂纹扩展速率,并且稳定扩展阶段占疲劳寿命的比例高。

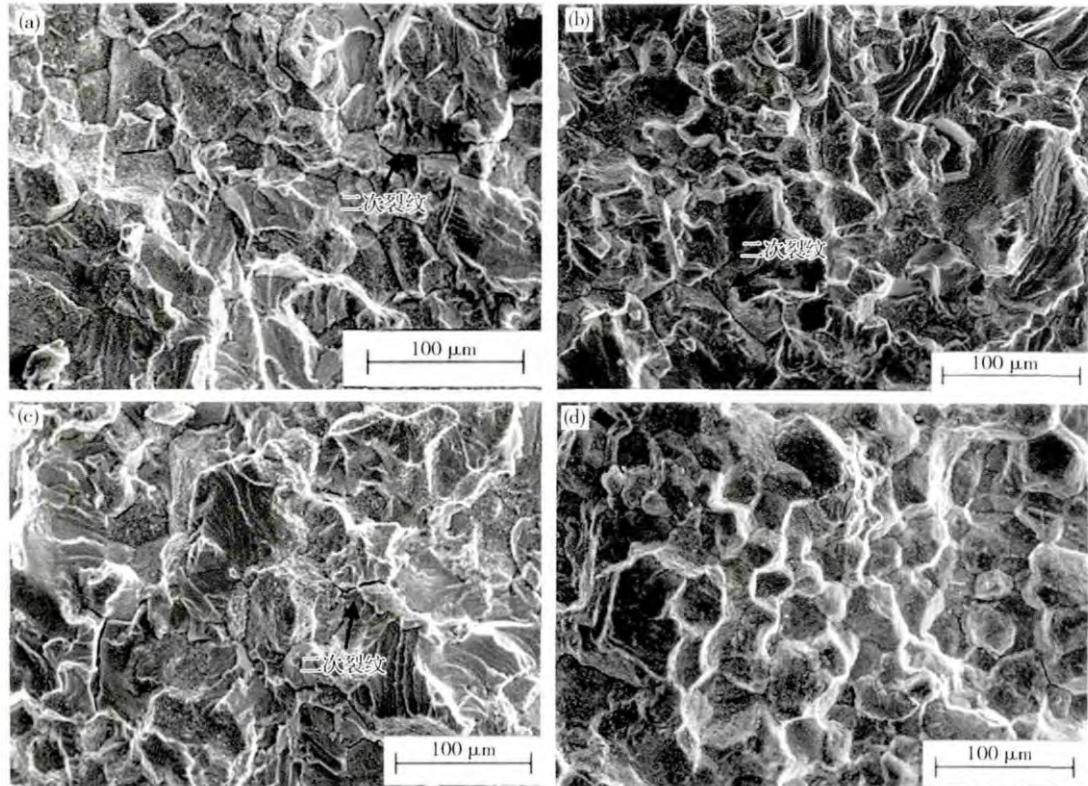


图 14 FGH97 合金断口形貌. (a) 0% Hf; (b) 0.15% Hf; (c) 0.60% Hf; (d) 0.90% Hf

Fig. 14 Fracture morphology of FGH97 alloy: (a) 0% Hf; (b) 0.15% Hf; (c) 0.60% Hf; (d) 0.90% Hf

(2) 对于 FGH97 合金 细晶组织可以提高其对裂纹萌生的抗力 粗晶组织则有利于降低其在稳定扩展阶段的裂纹扩展速率 二次  $\gamma'$  相有序的排列并与三次  $\gamma'$  相匹配析出有利于裂纹萌生抗力的提高。

(3) 随着 Hf 含量的增加 疲劳裂纹在扩展区寿命增加 合金的疲劳寿命延长。当 Hf 含量填到一定量时 会降低材料对疲劳裂纹扩展的抗力 但也极大地增加了裂纹萌生的抗力。

## 参 考 文 献

- [1] Wang R G , Gao K H. *New Technology of Aero Engine*. Beijing: Aviation Industry Press , 2003  
(王如根, 高坤华. 航空发动机新技术, 北京: 航空工业出版社, 2003)
- [2] Zhou J W , Wang W X. Development and application of P/M superalloy. *J Aeronaut Mater* , 2006 , 26( 3) : 244  
(周金文, 汪武祥. 粉末高温合金研究进展与应用. 航空材料学报, 2006 , 26( 3) : 244)
- [3] Zhang Y , Zhang Y W , Zhang N , et al. Heat treatment processes and microstructure and properties research on P/M superalloy FGH97. *J Aeronaut Mater* , 2008 , 28( 6) : 5  
(张莹, 张义文, 张娜, 等. FGH97 粉末冶金高温合金热处理工艺和组织性能的研究. 航空材料学报, 2008 , 28( 6) : 5)
- [4] Zhang Y W , Shangguan Y H. Reserch and development in P/M superalloy. *Power Metall Ind* , 2004 , 14( 6) : 30
- [5] Han S B , Zhang Y W , Chi Y , et al. Effect of C and Hf thermodynamic equilibrium phase precipitation in FGH97 PM superalloy. *Powder Metall Ind* , 2009 , 19( 6) : 21  
(韩寿波, 张义文, 迟锐, 等. C 和 Hf 对 FGH97 粉末冶金高温合金热力学平衡相析出的影响. 粉末冶金工业, 2009 , 19( 6) : 21)
- [6] Zhang Y W , Wang F M , Hu B F. Partition of Hf among the phases and its effects on precipitates in PM Ni-based superalloy FGH97. *Acta Metall Sin* , 2012 , 48( 2) : 187  
(张义文, 王福明, 胡本英. Hf 在粉末冶金镍基高温合金中的相间分配及对析出相的影响. 金属学报, 2012 , 48( 2) : 187)
- [7] Zhang Y , Liu M D , Zhang G X , et al. Structure and properties of FGH4097 alloy large disc. *J Iron Steel Res* , 2011 , 23( 2) : 506  
(张莹, 刘明东, 张国星, 等. FGH4097 合金大型盘件的组织性能研究. 钢铁研究学报, 2011 , 23( 2) : 506)
- [8] Zhang Y W , Wang F M , Hu B F. Estimation of the effect of hafnium on equilibrium phases in FGH97 PM superalloy. *J Univ Sci Technol Beijing* , 2011 , 33( 8) : 978  
(张义文, 王福明, 胡本英. 铥对 FGH97 合金平衡相影响的评估. 北京科技大学学报, 2011 , 33( 8) : 978)
- [9] Zhang Y W , Wang F M , Hu B F. Effects of hafnium content on  $\gamma/\gamma'$  misfit in FGH97 PM superalloy. *Rare Met Mater Eng* , 2012 , 41( 6) : 989  
(张义文, 王福明, 胡本英. Hf 含量对 FGH97 合金  $\gamma/\gamma'$  晶格错配度的影响. 稀有金属材料与工程, 2012 , 41( 6) : 989)

(张义文, 上官永恒. 粉末高温合金的研究与发展. 粉末冶金工业, 2004 , 14( 6) : 30)

- [10] Guo W M , Wu J T. Microstructure properties and heat treatment process of powder metallurgy superalloy FGH95. *J Iron Steel Res Int* , 2006 , 13( 5) : 65
- [11] Zhang M J , Li F G , Wang S Y , et al. Effect of powder preparation technology on the hot deformation behavior of HIPed P/M nickel-base superalloy FGH96. *Mater Sci Eng A* , 2011 , 528 ( 12) : 4030
- [12] Zhang L N , Dong J X. Microstructures' effects on high temperature fatigue failure behavior of typical superalloys. *Mater Sci Eng A* , 2013 , 587: 168
- [13] Xu J , Zhang G P. Effects of grain size and initial immobile dislocation density on fatigue behavior of polycrystalline metals. *Mater Sci Eng A* , 2014 , 590: 194
- [14] Yang J , Dong J X , Zhang M C , et al. High temperature fatigue crack growth behavior of a novel powder metallurgy superalloy FGH98. *Acta Metall Sin* , 2013 , 49( 1) : 71  
( 杨健 , 董建新 , 张麦仓 等. 新型镍基粉末高温合金 FGH98 的高温疲劳裂纹扩展行为研究. *金属学报* , 2013 , 49( 1) : 71)
- [15] Wang P , Dong J X , Zhang Y W. Effect of time aging treatment on the  $\gamma'$  phase evolution of FGH97 P/M superalloy. *Rare Mater Eng* , 2014 , 43( 5) : 1111  
( 王璞 , 董建新 , 张义文. 长期时效过程中 FGH97 合金  $\gamma'$  相演化规律. *稀有金属材料与工程* , 2014 , 43( 5) : 1111)