DOI: 10.3901/JME.2013.20.158

组织特征对粉末高温合金 FGH96 疲劳裂纹扩展速率的影响*

姚志浩 董建新 张麦仓 郑磊
(北京科技大学材料科学与工程学院 北京 100083)

摘要:通过对不同热处理后获得3种典型显微组织的粉末高温合金 FGH96 合金试样在 650 °C 进行保载 90 s 和 5 s 并恒载荷循环应力作用下的疲劳试验, 研究组织特征对疲劳裂纹扩展速率的影响规律, 确定不同载荷条件下孕育期、萌生期、扩展期及瞬断期所占的比率。结果表明, γ' 相特征显著影响疲劳裂纹扩展速率; 疲劳行为对保载时间存在敏感性, 随保载时间的延长, 在疲劳-蠕变的交互作用下会明显加快合金疲劳裂纹扩展; 在整个疲劳破坏过程中, 萌生比率均高于扩展比率, 说明该合金抗裂纹萌生的能力要高于抗裂纹扩展的能力; 此外, 该合金疲劳裂纹扩展四个阶段在整个断裂周次所占的比率分配上, 孕育期比率一般较小, 萌生期和扩展期比率较大, 瞬断期的比率很小, 表明该合金裂纹扩展一旦失稳将高速扩展并迅速断裂。

关键词: 粉末高温合金 裂纹扩展速率 组织特征 保载时间

中图分类号: TG135

Effects of Microstructure Characteristics on Fatigue Crack Growth Rate of Powder Metallurgy Superalloy FGH96

YAO Zhihao DONG Jianxin ZHANG Maicang ZHENG Lei

(School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083)

Abstract: Fatigue crack growth rate is investigated at 650 °C and constant stress for holding times for 90 s and 5 s in powder metallurgy(P/M) superalloy FGH96 with three microstructure characteristics. Microstructure effects on fatigue crack growth rate of P/M superalloy FGH96 are obtained and the fatigue ratios of different stages, such as Incubation, Initiation, Extension and Interruptions periods, also are determined. The results indicate that crack growth rate is affected significantly by γ' characteristics. Fatigue behavior is found to be sensitive to holding time, and fatigue crack growth rate is evidently accelerated by the interaction of fatigue and creep behaviors with the increase of holding time. Initiation period of a crack is observed to be longer than crack propagation, indicating that the alloy has a better capability of crack propagation resistance than crack initiation resistance. Besides, the comparison of the ratios of four periods, including incubation, initiation, propagation and interruption, on the whole fatigue process shows that incubation and interruption periods are shorter but initiation and propagation periods are relatively longer. In other words, crack propagation is mainly responsible for the rapid failure of the alloy.

Key words: Powder metallurgy superalloy Crack growth rate Microstructure characteristics Holding time

0 前言

伴随着航空发动机推重比和涡轮前燃气温度及压气机增压比的不断提高, 对用于制造涡轮盘等发动机热端关键部件的高温合金的工作温度和性能

的要求也就越高^[1-4]。由于构件在高温高压下长期承受循环载荷的作用, 因此疲劳损伤不断积累, 导致最终断裂失效。在实际服役条件下, 作用于高温合金的载荷水平远远小于其屈服强度, 裂纹萌生扩展过程并没有发生明显的塑性变形, 危险很难提前预料到, 造成严重的后果。因此, 如何从损伤容限的角度评估高温合金的损伤程度以及剩余寿命等, 为结构件安全使用进行预测, 是目前关注的重点。

* 国家自然科学基金资助项目(51071017)。20130330 收到初稿, 20130610 收到修改稿

高温下的疲劳裂纹扩展速率是损伤容限的重要性能指标, 它受到极其复杂的综合因素控制, 包括制备工艺带来的组织缺陷, 热处理过程对晶粒尺寸、强化相、晶界等微观特征的影响, 以及外界因素应力大小、温度等。PANG 等^[5-10]对裂纹扩展行为进行了研究, 但由于高温合金体系多, 影响因素多, 交互作用复杂, 裂纹萌生、扩展和瞬断各个阶段都有不同的特征。因此, 关于高温合金的疲劳裂纹扩展问题还需要大量的理论和试验研究, 进一步完善和深入, 为提高损伤容限性能提供一定的依据。

粉末高温合金是 20 世纪 60 年代诞生的新一代高温合金, 用精细的金属粉末作为成形材料, 经过热加工处理得到的合金组织均匀, 无宏观偏析, 晶粒细小, 且具有屈服强度高和疲劳性能好等一系列优点, 很快成为高推重比航空发动机涡轮盘等关键部件的首选材料^[11]。FGH96 合金是在第一代粉末高温合金 FGH95 的基础上发展而来的新一代 γ' 相沉淀强化型粉末高温合金, 其提高了 Ti、Cr、Co、W、Mo 的质量分数, 降低了 Al、Nb、C 的质量分数, 从而降低 γ' 相和碳化物的质量分数, 降低了合金的强度; W 和 Co 质量分数的增加可以有效提高合金的热强性; Cr 质量分数的增加可以提高合金的抗氧化性, 加入 Ce 后净化了晶界, 提高了晶界的强韧化效果。本文将典型的第二代粉末高温合金 FGH96 作为研究对象, 在不同组织下进行接近使用条件的裂纹扩展速率试验, 分析合金的组织特征与裂纹扩展速率的关系; 力图建立微观组织影响因素与疲劳性能之间的关联性, 为进一步明确裂纹扩展机制和新型粉末高温合金的研制, 以及疲劳性能的评估等提供理论依据。

1 试验材料和试验方案

1.1 试验材料

随着合金成分的优化和设备工艺的提高, 国内已成功制备出第一、二两代粉末高温合金。为系统地研究组织特征对粉末高温合金裂纹扩展行为的影响, 选用了国产 FGH96 合金进行裂纹扩展速率试验, 其化学成分如表 1 所示。根据该合金成分, 通过 Thermo-Calc 软件计算得到 FGH96 合金的 γ' 相完全溶解温度为 1 110 $^{\circ}\text{C}$, 液相析出温度为 1 268 $^{\circ}\text{C}$, 如图 1 所示。

表 1 FGH96 合金的化学成分 %

元素	C	Cr	Co	Al	Ti	Mo
质量分数	0.035	16.00	13.00	2.10	3.70	4.00
元素	W	Nb	Zr	B	Hf	
质量分数	4.00	0.70	0.033	0.011	—

图 1 粉末高温合金 FGH96 相图

通常 FGH96 粉末高温合金所采用的标准热处理制度为 1 150 $^{\circ}\text{C} \times 2 \text{ h}$ /600 $^{\circ}\text{C}$ 盐淬 + 760 $^{\circ}\text{C} \times 16 \text{ h}$ /炉冷至 550 $^{\circ}\text{C}$ /空冷。本试验通过对固溶冷却制度进行适当调整, 获得晶粒尺寸相同、 γ' 相尺寸不同的 FGH96 合金试样(如图 2 所示的三种显微组织, 其对应的热处理编号分别为 TH3、DH5、QH8), 以分析 γ' 相尺寸与合金裂纹扩展行为之间的关系。由图 2 可知, 由于本试验是在 γ' 相完全溶解温度以上进行的固溶处理, 在液态凝固过程中析出的一次 γ' 相已被完全溶解, 因此, FGH96 合金中没有一次 γ' 相。二次 γ' 相是在固溶处理冷却过程中较高温析出的 γ' 相, 其析出尺寸受固溶处理温度、冷却速率及冷却途径等因素的影响。根据不同的冷却速率或者冷却途径, 二次 γ' 相可能呈方形、蝶形、八角状和不规则形状。三次 γ' 相在较低温度析出, 其尺寸更加细小, 主要呈球形分布在晶内。文献[11-12]研究表明, γ' 相的尺寸和形貌对合金的性能影响较大, 且其形貌变化规律也较复杂。如图 2 所示, 经过本文 TH3、DH5、QH8 热处理后, 获得二次 γ' 相的平均尺寸分别约为 150 nm、164 nm 和 195 nm; 同时, 三次 γ' 相尺寸则依次降低, 而数量则依次增加。

1.2 试验方案

将获得的三种粉末高温合金组织的样品用线切割加工成裂纹扩展速率试样。裂纹扩展试样按 JB/T8189-1999 并参照 ASTM 标准 E647-1981 制成标准紧凑拉伸试样(CT)试样。试验前用钼丝切割出缺口, 试样形状如图 3 所示。

为了接近合金实际的工作条件, 裂纹扩展速率试验温度为 650 $^{\circ}\text{C}$, 并采用恒幅载荷法, 保载时间分别为 5 s 和 90 s, 波形如图 4 所示。试验用高温环境试验机自带电炉加热和保温, 控温精度为 ± 1 $^{\circ}\text{C}$, 通过直流电位(DC)法测量裂纹长度。试样电位变化 ΔV 与裂纹长度变化 Δa 之间关系的确定, 采用在同一块试样上线切割的方法, 获得多组不同裂纹长度, 并测定其对应的长度在试验温度下的电位, 从而最终得出该合金在试验温度下裂纹长度变化与相应电位变化之间的线性关系(Δa - ΔV 曲线)。

图2 不同热处理后获得的 FGH96 合金初始微观组织形貌

图3 CT 裂纹扩展速率标准试样图

合金晶粒度通过金相光学显微镜分析观察,其化学浸蚀剂如下:纯盐酸+少量铬酐(其中铬酐主要用作催化剂),浸蚀时间:3~5 s。合金 γ' 强化相和晶界碳化物(MC, $M_{23}C_6$),通过场发射扫描电子显微镜观察,用20%硫酸+80%甲醇溶液电解抛光,然后用150 mL磷酸+10 mL硫酸+15 g 铬酐溶液电解浸蚀,直流电压5 V,浸入5 s左右。利用Image Tool、Photoshop等

图4 两种不同保载时间的载荷谱

软件对合金热处理后的组织进行统计分析。

2 试验结果与分析

2.1 组织特征对裂纹扩展速率的影响

对上述如图2所示的三种 γ' 相尺寸不同的FGH96合金,在650℃初始应力强度因子 $\Delta K=30$

$\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, 应力比 $R=0.05$ 的条件下保载 5 s 的循环载荷作用下的疲劳裂纹扩展速率试验, 具体得到的 $da/dN-\Delta K$ 曲线和 $a-N$ 曲线, 如图 5 所示。可以看出, 经过 QH8 热处理后的合金, 具有较好的裂纹扩展速率, 主要原因是其析出了较多的三次强化相。

图 5 FGH96 保载 5 s 裂纹扩展 $da/dN-\Delta K$ 及 $a-N$ 曲线

在同样的试验条件下进行保载 90 s 的疲劳裂纹扩展试验, 得到的 $da/dN-\Delta K$ 曲线和 $a-N$ 曲线, 如图 6 所示。

作为在固溶处理冷却过程中较高温度析出的 γ' 相, 其尺寸和体积分数与合金的力学性能之间的关联性是非常大的, 通过对比可以看出, 保载 5 s 的情况下, 裂纹扩展速率变化不是很明显; 但保载 90 s 时, 随着 γ' 相尺寸的逐渐增大, 合金整体的裂纹扩展速率呈明显下降的趋势。当晶粒尺寸相当时, 二次 γ' 相尺寸较小、形貌呈球形和方形等规则形状、均匀有序分布、取向一致, 再加上三次细小 γ' 相的补充析出, 能降低疲劳裂纹扩展速率, 提高裂纹萌生抗力。

2.2 裂纹扩展过程分析

由上述 $da/dN-\Delta K$ 和 $a-N$ 通过曲线变换分别得到了保载 5 s 和 90 s 两种情况下的 $\lg a-\lg N_i/N_f$ 曲线 (N_i 为任意循环周次, N_f 为断裂周次)、 $da/dN-a$ 曲线以及 $da/dN-N$ 曲线(图 7 和图 8)以及裂纹孕育、萌生、

图 6 FGH96 有保载 90 s 裂纹扩展 $da/dN-\Delta K$ 及 $a-N$ 曲线

(a) $\lg a-\lg N_i/N_f$ 曲线

(b) $da/dN-a$ 曲线

(c) da/dN - N 曲线

图7 FGH96合金保载5 s曲线分析

(a) $\lg a$ - $\lg N_i/N_f$ 曲线 (b) da/dN - a 曲线 (c) da/dN - N 曲线

图8 FGH96合金保载90 s曲线分析

扩展及最后瞬断对应的各个阶段的裂纹长度和循环周次,如表2~5所示,该分析原理方法及符号说明见文献[10]。

表2 FGH96合金保载5 s各阶段裂纹长度

试样 编号	裂纹长度/mm				
	a_0	a_n	a_s	a_i	a_e
TH3	10	10.601	13.296	0.601	2.695
DH5	10	10.878	13.203	0.878	2.325
QH8	10	10.554	13.742	0.554	3.188

表3 FGH96合金保载5 s各阶段循环周次

试样 编号	循环周次						
	N_0	N_n	N_s	N_{ci}	N_{ce}	N_{ct}	N_f
TH3	33	2 029	3 437	1 996	1 408	21	3 458
DH5	922	3 182	4 356	2 260	1 174	31	4 387
QH8	23	2 028	4 039	2 005	2 011	6	4 045

表4 FGH96合金保载90 s各阶段裂纹长度和循环周次

试样 编号	裂纹长度/mm				
	a_0	a_n	a_s	a_i	a_e
TH3	10	11.324	12.879	1.324	1.555
DH5	10	11.386	12.988	1.386	1.602
QH8	10	10.554	13.373	0.554	2.819

表5 FGH96合金保载90 s各阶段裂纹长度和循环周次

试样 编号	循环周次						
	N_0	N_n	N_s	N_{ci}	N_{ce}	N_{ct}	N_f
TH3	981	1 484	1 640	503	156	15	1 655
DH5	787	1 328	1 510	541	182	17	1 527
QH8	11	955	1 620	944	665	46	1 666

对于FGH96而言,对比保载5 s和保载90 s两种不同情况下,可以明显看出,保载5 s的裂纹扩展期的长度要明显长于裂纹萌生期的长度,保载时间对该合金裂纹的萌生和扩展过程会产生很大的影响。随着保载时间的延长,将会出现蠕变和疲劳的交互作用,从而进一步促进了裂纹的萌生和扩展,因而在裂纹的萌生阶段和扩展阶段保载时间增加到90 s的情况下的速率曲线都明显高于保载5 s的速率曲线。

通过计算裂纹扩展速率在不同扩展阶段的比率,在两种不同的加载条件下,合金疲劳过程中各阶段的比率也是各不相同的,如图9所示。保载5 s的循环载荷作用下,随着晶内强化相 γ' 相尺寸的增大,萌生期和瞬断期的比率是逐步下降的趋势,而孕育期和扩展期呈现相反的变化,在保载90 s时,随着强化相 γ' 尺寸的增大,除合金的孕育期比率明显下降,其萌生比率、扩展比率及瞬断比率都呈上升趋势。

图 9 FGH96 合金疲劳过程各阶段比率

与此同时,由图 9 可知,合金在保载 90 s 和 5 s 两种不同的加载条件下,保载 90 s 的情况下孕育比率较大。随着保载时间的延长萌生比率有所降低;合金的扩展比率随保载时间的延长而下降;瞬断比率所占比例都较小。由此可以得出:FGH96 合金的裂纹的孕育、萌生和扩展对保载时间的敏感性更强;同时,粉末高温合金中 γ' 相的数量对裂纹扩展过程中的蠕变、疲劳交互作用则更为复杂,需要进一步深入研究。

3 结论

通过试验分析得出,三种组织特征的 FGH96 合金粉末高温合金的疲劳过程是受多种因素影响的,随着外部加载条件的改变,内部组织参数的调整,可以对合金的整个疲劳过程中的孕育、萌生、扩展以及断裂的抗力进行综合控制与调节。获得如下结论。

(1) 由于粉末高温合金的 γ' 相数量较多,因此 γ' 相的特征在很大程度上影响疲劳裂纹扩展速率,细小 γ' 相量越多则合金裂纹扩展速率越低。

(2) 该粉末高温合金的疲劳行为对保载时间的长短存在一定敏感性,随保载时间的延长,在疲劳-蠕变的交互作用下会明显加快合金疲劳裂纹扩展速率。

(3) 该粉末高温合金在整个疲劳破坏过程中,萌生比率均高于扩展比率,说明该合金一般情况下抗裂纹萌生的能力要高于抗裂纹扩展的能力。

(4) 该合金在疲劳过程的四个阶段在整个断裂

周次各自所占的比率分配上,孕育期比率一般较小,萌生期和扩展期比率较大,瞬断期的比率很小,表明该合金裂纹扩展一旦失稳将高速扩展迅速断裂。

参 考 文 献

- [1] MANDY L B, ANDREW H R. Evaluation of the influence of grain structure on the fatigue variability of waspaloy[C]//Superalloy 2008, 2008: 535-540.
- [2] YAO Z H, ZHANG M C, DONG J X. Stress rupture fracture model and microstructure evolution for waspaloy[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2013, 44(7): 3084-3098.
- [3] LIU X B, SHALINI R, EVER B B, et al. Fatigue crack propagation behaviors of new development Allvac 718 plus superalloys[C]//Superalloys 2004, 2004: 269-274.
- [4] 姚志浩, 董建新, 张麦仓. GH738 高温合金热变形过程显微组织控制与预测 I. 组织演化模型的构建[J]. 金属学报, 2011, 47(12): 1581-1590.
YAO Zhihao, DONG Jianxin, ZHANG Maicang. Microstructure control and prediction of GH738 superalloy during hot deformation I. Construction of microstructure evolution model[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2011, 47(12): 1581-1590.
- [5] PANG H T, REED P A S. Effects of microstructure on room temperature fatigue crack initiation and short crack propagation in Udimet 720Li Ni-base superalloy[J]. International Journal of Fatigue, 2008, 30: 2009-2020.
- [6] HARDY M C, ZIRBE B, SHEN G, et al. Developing tolerance and creep resistance in a high strength nickel alloy for disc applications[C]//Superalloys 2004, 2004: 83-90.
- [7] LIU X B, XU J, EVER B, et al. Effect of thermal treatment on the fatigue crack propagation behavior of new Ni-based alloy[J]. Materials Science and Engineering, 2008, 474: 30-38.
- [8] ZHAI T, WILKINSON A J. Crystallographic mechanism for fatigue crack propagation through grain boundaries[J]. Acta Materialia, 2000, 48: 4917-4927.
- [9] CHANG D R, KRUEGER D D, SPRAGUE R A. Superalloy powder processing, properties and turbine disk applications[C]//Superalloys 1992, 1992: 245-273.
- [10] 姚志浩, 董建新, 张麦仓. GH864 合金组织特征对裂纹扩展速率的影响[J]. 北京科技大学学报, 2011, 33(12): 1501-1507.

- YAO Zhihao, DONG Jianxin, ZHANG Maicang. Effect of microstructure characteristics on the fatigue crack propagation rate of GH864 alloy[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2011, 33(12): 1501-1507.
- [11] MAO J, CHANG K M, YANG W H, et al. Cooling precipitation and strengthening study in powder metallurgy superalloy René88DT[J]. Materials Science and Engineering A, 2002, 332: 318-329.
- [12] LIU X B, KANG B, CHANG K M. The effect of hold-time on fatigue crack growth behaviors of WASPALOY alloy at elevated temperature[J]. Materials Science and Engineering, 2003, 340: 8-14.
-
- 作者简介:** 姚志浩(通信作者), 男, 1982 年出生, 博士, 讲师。主要研究方向为高温合金组织与性能关联性。
E-mail: zhihao-yao@163.com
- 董建新, 男, 1965 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为高温合金及耐蚀耐热合金。
E-mail: jxdong@ustb.edu.cn