● 材料改性 Material Propertiest ●
DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2020.04.016

固溶处理和疲劳保载时间对 FGH96 合金高温疲劳裂纹扩展速率的影响

曾维虎,周晓明,冯业飞,王超渊,邹金文
(中国航发北京航空材料研究院 先进高温结构材料重点实验室,北京 100095)

摘　要:测定了 FGH96 合金在 650 ℃空气环境中的疲劳裂纹扩展速率,研究了合金显微结构、固溶冷却速率及保载时间对 FGH96 合金裂纹扩展速率的影响。结果表明,控制固溶后以适当的方式冷却,使得二次和三次 γ' 相均匀匹配析出,可以获得具有良好疲劳裂纹扩展抗力的合金组织。FGH96 合金的高温疲劳裂纹扩展速率随保载时间的增加而增加,其断裂模式为沿晶断裂。

关键词:FGH96;裂纹扩展;热处理

中图分类号:TG156　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2020)04-0366-04

Effects of Solid Solution Treatment and Fatigue Load Holding Time on Fatigue Crack Growth Rate of FGH96 Superalloy at High Temperature

ZENG Weihu, ZHOU Xiaoming, FENG Yefei, WANG Chaoyuan, ZOU Jinwen
(Science and Technology on Advanced High Temperature Structural Materials Laboratory, Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

Abstract: The fatigue crack growth rate of FGH96 alloy was measured in 650 ℃ and air conditions. The effects of microstructure, solid solution cooling rate and fatigue load holding time on the crack growth rate of FGH96 alloy were investigated. The results show that the alloy microstructure with good fatigue crack growth resistance can be obtained by controlling the cooling of the solid solution treatment and making the uniform matching precipitation of the second and third order γ' phase. The high temperature fatigue crack growth rate of FGH96 alloy increases with the increase of load holding time, and its fracture mode is intergranular fracture.

Key words: FGH96; crack growth; heat treatment

粉末镍基高温合金具有组织均匀细小、强度高等优良性能,正逐渐应用于高推重比先进飞机的发动机涡轮盘等重要部件上。但随着航空发动机设计使用要求和推重比的不断提高,追求强度和损伤容限性能的平衡发展,因此,对合金裂纹扩展行为的研究是合金安全使用和进一步改进的基础。近几年,众多研究表明,合金的裂纹扩展行为受相关的内因和外因的影响,比如合金的显微组织[1,2]、温度[3]和保载时间[4-6]等。FGH95 合金有关疲劳保载时间和固溶处理对其高温裂纹扩展速率的影响已有报道[7],而对 FGH96 合金的高温裂纹扩展速率的研究不多。因此,本研究通过改变 FGH96 合金固溶冷却速率得到不同的显微组织,着重分析了固溶冷却速率及保载时间对合金裂纹扩展速率的影响规律。

1　试验材料及方法

FGH96 合金由热等静压+等温锻造工艺制得,其化学成分见表 1。

利用热电偶测定了空冷及不同厚度保温筒密封冷却的冷却速率,各冷却速率见图 1,经计算不同的冷却方式对应的平均降温速率如表 2 所示。选定了空冷(235 ℃/min)、3 mm 厚保温筒密封(130 ℃/min)、15 mm 厚保温筒密封(50 ℃/min)的冷却速率,并对 FGH96 合金材料进行 1 150 ℃下保温 2 h 热处理后,分别采用空冷、3 mm 厚保温筒冷却、15 mm 厚保温筒冷却至室温后,再进行统一的时效热处理。

裂纹扩展速率试验在高温裂纹扩展试验机上进行,标准紧凑拉伸试样形状及尺寸如图 2。试验温度 650 ℃,加载方式为三角波(1.5～1.5 s)和梯形波(1.5～45.0～1.5 s、1.5～90.0～1.5 s),最大载荷

收稿日期:2020-02-21
作者简介:曾维虎(1984-),江西南昌人,工程师,硕士研究生.主要从事高温合金研究方面的工作.
电话:15811157346,E-mail:zengweihu_2016@163.com

表1 FGH96合金化学成分 w(%)
Tab.1 Nominal composition of FGH96 alloy

C	Cr	W	Mo	Al	Ti	Co	B	Nb	Ni
0.04～0.06	15.0~16.5	3~4	3~4	1.5~2.3	3.5~4.0	12~14	0.01~0.02	0.6~0.8	余

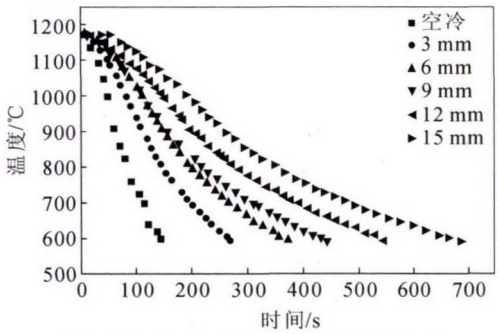


图 1 不同冷却方式下的冷却速率曲线
Fig.1 Cooling rate curve under different cooling modes

表2 不同冷却方式的平均降温速率
Tab. 2 Average cooling rate of different cooling methods

冷却方式	空冷	3 mm	6 mm	9 mm	12 mm	15 mm
平均降温速率(℃/min)	235	130	94.3	79.0	61.9	50

为 9 kN，应力比 R 为 0.05，试样宽度 W 为 40 mm，厚度 B 为 10 mm。采用直流电位法测量裂纹长度，用单试样多点法对电位变化与裂纹长度进行标定。

2 结果与分析

2.1 冷却速率的影响

经 1 150 ℃保温 2 h 热处理后，分别采用空冷

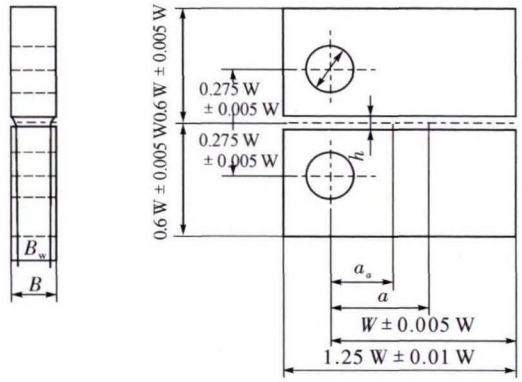
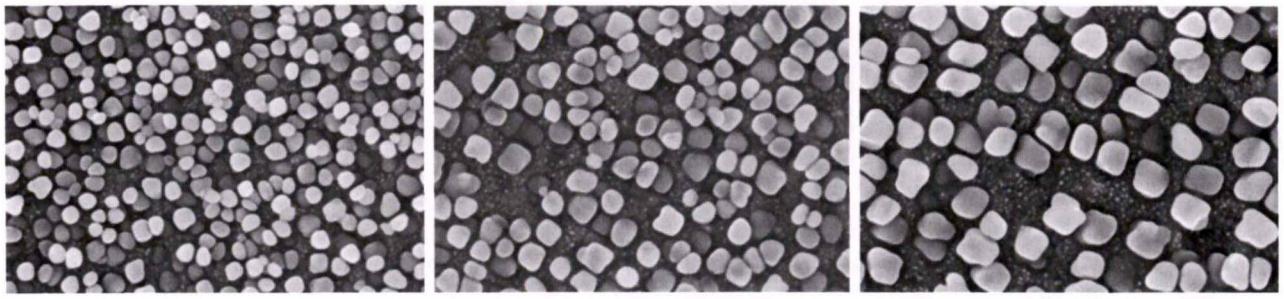


图 2 CT 裂纹扩展速率标准试样
Fig.2 Standard sample of CT crack growth rate

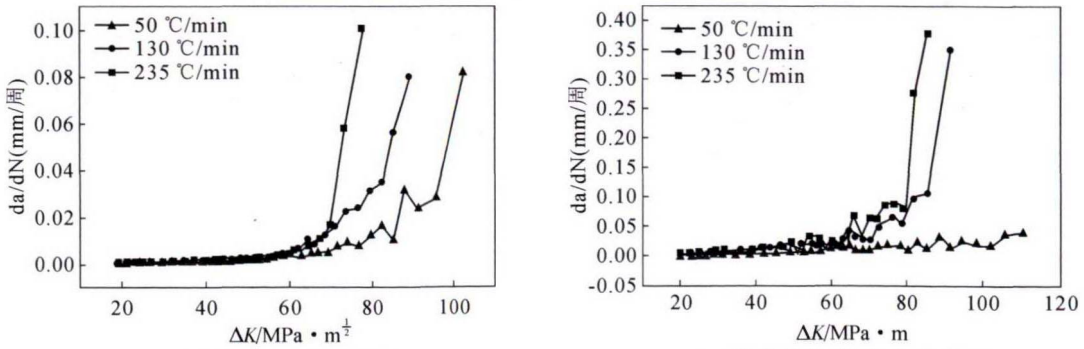
(KL)、3 mm 厚保温筒冷却、15 mm 厚保温筒冷却至室温后，再进行统一的时效热处理后的 FGH96 合金的显微组织如图 3 所示。可见，随着冷却速率的降低，FGH96 合金的 γ' 相发生了一定程度的长大，使位错绕过沉淀相，导致弯曲滑移，产生均匀切变，降低了裂纹扩展速率，从而可以更好地容纳疲劳损伤。

图 4 为分别在三角波加载方式和梯形波保载 90S 加载方式下，不同的固溶冷却速率对 FGH96 合金疲劳裂纹扩展速率的影响，由图可知，随着冷却速



(a)235 ℃/min冷却速率　(b)130 ℃/min冷却速率　(c)50 ℃/min冷却速率

图 3 不同固溶冷却速率 FGH96 合金的 γ' 相析出特征
Fig.3 γ' phase characteristics of FGH96 alloy under different solid solution cooling rate



(a)三角波加载方式　(b)梯形波加载方式，保载90 s

图 4 不同冷却速率对 FGH96 合金裂纹扩展速率的影响
Fig.4 Effect of different cooling rates on crack growth rate of FGH96 alloy

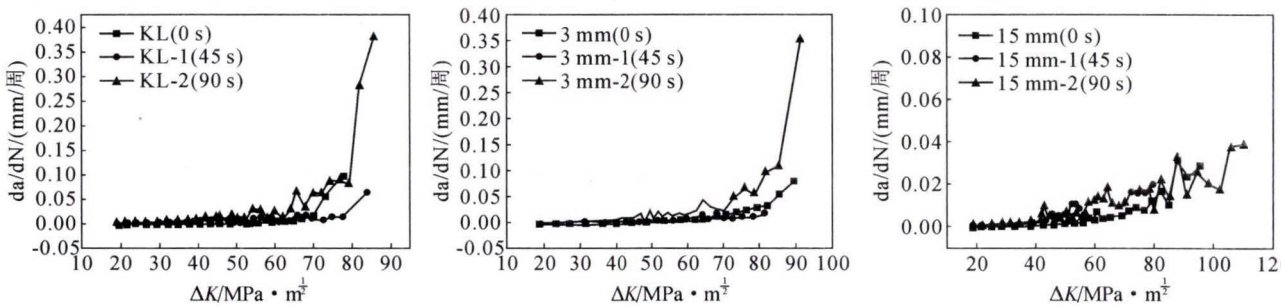
率的降低，裂纹扩展速率也在一定程度上降低，这主要是由于固溶冷却速率降低，使得合金 γ' 相尺寸增大，导致位错在绕过沉淀相，发生了弯曲滑移，产生均匀切变，从而降低了裂纹扩展速率。

2.2 保载时间的影响

图 5 为在不同的冷却速率下，FGH96 合金分别在三角波(1.5～1.5 s)、梯形波(1.5～45.0～1.5 s)保载 45 s 和梯形波(1.5～90.0～1.5 s)保载 90 s 的加载方式下的疲劳裂纹扩展曲线，由图可知，随着保载时间的延长，疲劳裂纹扩展速率加大，这主要是由于随着保载时间的延长，空气中的氧造成晶界脆化，而且氧的作用会提高晶界孔洞的形核和长大，同时氧原子可以在晶界偏聚，这些氧和其它活泼元素在晶界会形成氧化物，这些氧化物在拉伸载荷下可能萌生孔洞，总体上加速裂纹的扩展。

2.3 裂纹扩展断口分析

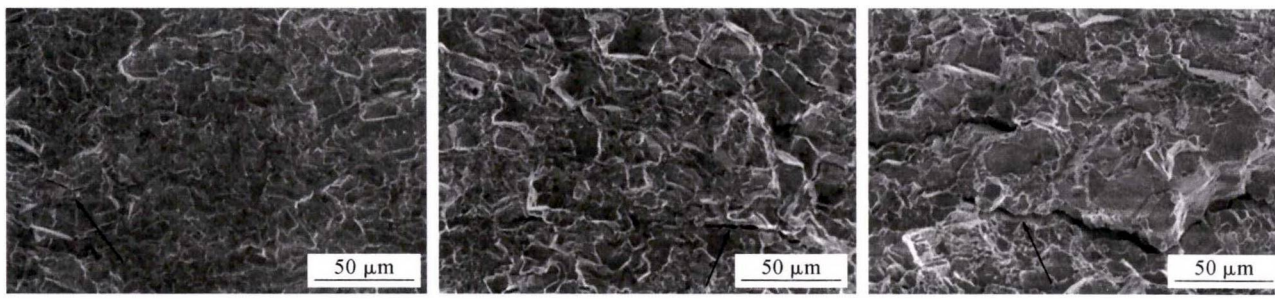
图 6 为无保载时间不同固溶冷却速率的裂纹扩展断口图，由图所示，FGH96 合金在高温疲劳作用下的断口呈沿晶断裂，二次裂纹也均在三角晶界处产生。图 7 为保载 90 s 时间不同固溶冷却速率的裂纹扩展断口图，由图所示，FGH96 合金在高温蠕变疲劳作用下的断口呈沿晶断裂，由图可见晶内存在大量的 γ' 相痕迹，晶内强度高，容易形成沿晶裂纹，与环境有害作用相互促进，时间因素更突出。



(a)235 ℃/min冷却速率　(b)130 ℃/min冷却速率　(c)50 ℃/min冷却速率

图 5 不同冷却速率下，保载时间对 FGH96 合金裂纹扩展速率的影响

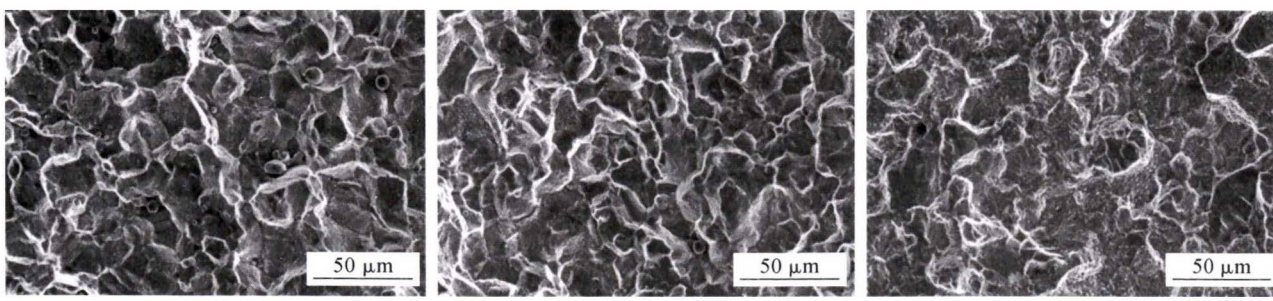
Fig.5 Effect of dwell time on crack growth rate of FGH96 alloy under different cooling rates



(a)235 ℃/min冷却速率　(b)130 ℃/min冷却速率　(c)50 ℃/min冷却速率

图 6 三角波加载下，不同固溶冷却速率下 FGH96 合金裂纹扩展断口图

Fig.6 Image of fracture surface of crack growth of FGH96 alloy under triangle wave loading and different solid solution cooling rates



(a)235 ℃/min冷却速率　(b)130 ℃/min冷却速率　(c)50 ℃/min冷却速率

图 7 保载 90 s 时间，不同固溶冷却速率下 FGH96 合金裂纹扩展断口图

Fig.7 Image of fracture surface of crack growth of FGH96 alloy under dwell time of 90S and different solid solution cooling rates

3 结论

(1)随着固溶冷却速率的降低，FGH96 合金的 γ' 相发生了一定程度的长大，降低了裂纹扩展速率，从而可以更好地容纳疲劳损伤。

(2)环境因素和与时间相关的蠕变因素对 FGH96 合金的高温蠕变疲劳裂纹扩展起重要作用，延长疲劳保载时间，裂纹扩展速率升高。

(3)FGH96 合金在高温疲劳 / 蠕变疲劳作用下的断口呈沿晶断裂，二次裂纹在三角晶界处产生。

参考文献：

[1] Mc Bagonluri F, Akpan E, Mercer C, et al. An investigation of the effects of microstructure on dwell fatigue crack growth in Ti-6242 [J]. Mater Sci Eng A, 2005,405:111-34.

[2] Ghonem H. Microstructure and fatigue crack growth mechanisms in high temperature titanium alloys [J]. Int J Fatigue, 2010,32: 1448-60.

[3] Pineau A, Antolovich SD. High temperature fatigue of nickel-base superalloys-a review with special emphasis on deformation modes and oxidation [J]. Eng Fail Anal, 2009,16:2668-97.

[4] Tong J, Dalby S, Byrne J, et al. Creep、fatigue and oxidation in crack growth in advanced nickel base superalloys [J]. Int J Fatigue, 2001,23:897-902.

[5] Leo Prakash DG, Walsh MJ, Maclachlan D, Korsunsky AM. Crack growth micro-mechanisms in the IN718 alloy under the combined influence of fatigue,creep and oxidation[J]. Int J Fatigue, 2009,31: 1966-77.

[6] Roy AK, Chatterjee S, Hasan MH, et al. Crack-growth behavior of alloy 230 under creep-fatigue conditions[J]. Mater Sci Eng A,2010, 527:4830-6.

[7] Li Xiao, Guo Weimin, Dong Jianxin, et al. Acta Metallurgica Sinica [J], 2001,37(5):1059.

招贤纳士

襄阳聚力新材料科技有限公司

一、招聘销售工程师

任职要求：

1. 本科及以上学历，铸造、耐火材料、冶金、有色金属专业，熟悉二维、三维绘图软件者优先考虑。
2. 2 年以上铸造行业耐火材料销售或铸造涂料销售经验者。
3. 2 年以上铸造行业用中频炉或压铸行业工业炉销售经验者。
4. 2 年以上铸造行业铁合金生产或销售经验者。
5. 2 年以上耐火材料技术研发或产品应用经验者。
6. 2 年以上铸造涂料技术研发或产品应用经验者。
7. 2 年以上有在铸造厂工作经验，对中频炉熔炼或造型工艺熟悉者。
8. 在压铸厂或铝厂工作 2 年以上，对有色金属铜铝熔炼工艺流程熟悉者。

二、招聘销售经理

任职要求：

1. 大专及以上学历，铸造、耐火材料、冶金、有色金属专业，熟练掌握办公软件，懂产品市场宣传，营销策划者优先考虑。
2. 5 年以上铸造行业耐火材料销售、铸造涂料或类似工业品销售经验者。
3. 5 年以上铸造行业用中频炉或压铸行业工业炉销售经验者。
4. 性格外向，诚信可靠，乐观向上，抗压力强。
5. 逻辑思维清晰，做事干净利落，工作效率高。
6. 善于多部门或多层次沟通协调。

三、销售助理

任职要求：

1. 男性，30 岁以下，本科学历，身体健康，适合经常出差。
2. 性格外向，诚信可靠，乐观向上，抗压力强。
3. 逻辑思维清晰，做事干净利落，工作效率高。
4. 善于多部门或多层次沟通协调。

有意向者请将简历发送至邮箱 wuhaiyan@xyjllc.com