

热疲劳试验后 K465 合金低压涡轮叶片的组织及性能

周中波^{1,2} 杨明波¹ 张建中² 时来鑫¹

(1.重庆理工大学材料科学与工程学院; 2.重庆三耐科技有限责任公司)

摘 要 对某航空发动机 K465 合金低压涡轮叶片在 900 ℃ 及 950 ℃ 进行 100 次冷热循环试验,研究了叶片在热疲劳试验过程中的裂纹萌生及扩展,分析了热疲劳试验后叶片的微观组织及力学性能。结果表明,热疲劳裂纹首先从叶片工艺孔处萌生,垂直于叶片轴向方向扩展,工艺孔及缩松处的应力集中是热疲劳裂纹萌生的主要原因;冷热循环试验后枝晶干 γ' 相尺寸增大,立方形态 γ' 相边角变得圆滑不规则,且由于针状二次析出相的析出,叶片的伸长率大幅下降。

关键词 K465 合金;热疲劳;裂纹;组织;性能

中图分类号 TG115.6;TG249.5 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2022.07.027 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):** 

Microstructure and Properties of Low-pressure Turbine Blade of K465 Alloy after Thermal Fatigue Test

Zhou Zhongbo^{1,2}, Yang Mingbo¹, Zhang Jianzhong², Shi Laixin¹

(1.Materials Science and Engineering College, Chongqing University of Technology;
2.Chongqing Sannai Technology Co., Ltd.)

Abstract: Through the test at 900 ℃ and 950 ℃ for 100 cooling/heating cycles on the low-pressure turbine blade of K465 alloy an aeroengine, the crack initiation and propagation of the blade during the thermal fatigue test were investigated, and the microstructure and mechanical properties of the blade after thermal fatigue test were analyzed. The results indicate that the thermal fatigue crack is firstly originated from the process hole of the blade and extends perpendicularly to the axial direction of the blade. The stress concentration on the process hole and shrinkage is the main reason for the thermal fatigue crack initiation. After the cooling/heating cycle test, the dimension of γ' phase in the dendrite arm is increased, and the edges and corners of cubic γ' phase become smooth and irregular. Due to the precipitation of accicular secondary phase, the elongation of blade is decreased significantly.

Key Words: K465 Alloy, Thermal Fatigue, Crack, Microstructure, Performance

航空发动机涡轮叶片是发动机最为关键的零部件之一,由于在工作中要承受温度急剧变化的气流冲刷,导致叶片不同部位受热不均,产生的膨胀效应不一致,在叶片中产生瞬时的内应力与应变循环,导致在叶片的薄弱部位产生热疲劳裂纹,造成叶片失效而引起发动机故障甚至报废^[1~3]。采用热疲劳试验测试可以评估材料在冷热循环条件下裂纹萌生及裂纹扩展的速率,从而评估材料耐热冲击的能力。HB 6660-2011《金属板材热疲劳试验方法》详细规定了金属板材的试验程序,但对于以涡轮叶片为代表的零部件的热疲劳试验方法,目前还没有一个公认的标准试验程序或者试验方法。某发动机低压涡轮叶片在叶盆中间部位设计了一个 $\phi 3.25$ mm 的工艺孔,该孔有可能在冷热冲击下产生疲劳裂纹进而诱发叶片失效,本课题即采用冷热循环试验研究热疲劳裂纹的形成。

K465 合金是一种高 W、高 Co 的固溶强化型镍基高温合金,具有优异的热强性能和室温力学性能,在工作温度不高于 1 050 ℃ 的航空发动机涡轮叶片和导向叶片中得到大量应用^[4,5]。该型合金通过 γ' 相和碳化物析出进行强化,其形貌、尺寸及分布极大地影响着零部件的力学性能^[6,7]。涡轮叶片通过多次冷热循环后,其组织形态必然发生改变,同时,叶片尺寸较小,难以通过普通的方法测试冷热循环后的力学性能。因此,有关热疲劳试验完成后材料的组织及性能情况报道很少,本

收稿日期:2021-12-05;修改稿收到日期:2022-02-20
第一作者简介:周中波,男,1983 年出生,正高级工程师,重庆(400054),E-mail:bopie@163.com
通信作者:杨明波,男,1971 年出生,教授,重庆(400054),E-mail:yangmingbo@cqut.edu.cn
引用格式:周中波,杨明波,张建中,等. 热疲劳试验后 K465 合金低压涡轮叶片的组织及性能[J]. 特种铸造及有色合金,2022,42(7):921-924.
ZHOU Z B, YANG M B, ZHANG J Z, et al. Microstructure and properties of low-pressure turbine blade of K465 alloy after thermal fatigue test[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(7):921-924.

课题即对上述问题进行研究,为正确评估叶片在接近服役条件下的组织及性能提供参考。

1 试验方法

采用 ZGL-25 三室真空精密铸造炉重熔 K465 母合金,浇注到经过充分预热的低压涡轮叶片熔模型壳中,经脱壳、脱芯、打磨、热处理、检验得到合格的低压涡轮叶片。从叶片内浇道处取样检测化学成分,结果见表 1。

表 1 K465 低压涡轮叶片化学成分

Tab.1 Chemical composition of K465 low pressure turbine blade								
turbine blade								
%								
WB								
C	Cr	Al	Mo	Ti	Co	Nb	W	S
0.16	8.70	5.74	1.82	2.64	9.24	0.98	9.76	0.002 7
P	Si	Ce	B	Mn	Fe	Zr	Ni	
0.000 51	0.025	0.002 6	0.011	0.005 7	0.037	0.025	余量	

将叶片放入 SRJX-8-13 型箱式电阻炉中升温至 900 ℃ 和 950 ℃,保温 300 s 后水冷叶片至室温,并进行不间断循环的冷热循环试验。热疲劳测试选用 900 ℃ 和 950 ℃ 两个温度、每个温度选用两片叶片进行测试,使用 10 倍放大镜检查叶片每次冷热循环后的裂纹萌生及裂纹扩展,循环 100 次后进行 X 光、荧光检查。

冷热疲劳试验结束后,在叶片榫头部位取片状微小拉伸试样,试样尺寸见图 1,试样厚度为 1.5 mm,在 Zwick/Roell Z5.0TN 拉伸试验机上进行室温拉伸。在叶片叶根处取显微组织试样,进行化学腐蚀,腐蚀剂组

成为 100 mL 的 HCl + 20 g 的 CuSO₄ + 100 mL 的 H₂O。然后在 ICX41M 型金相显微镜及 ISM-6301F 型冷场发射扫描电镜上观察其组织。

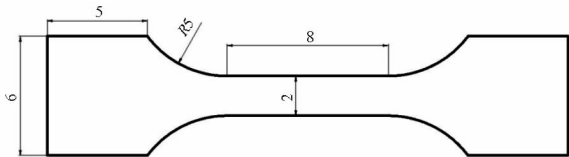


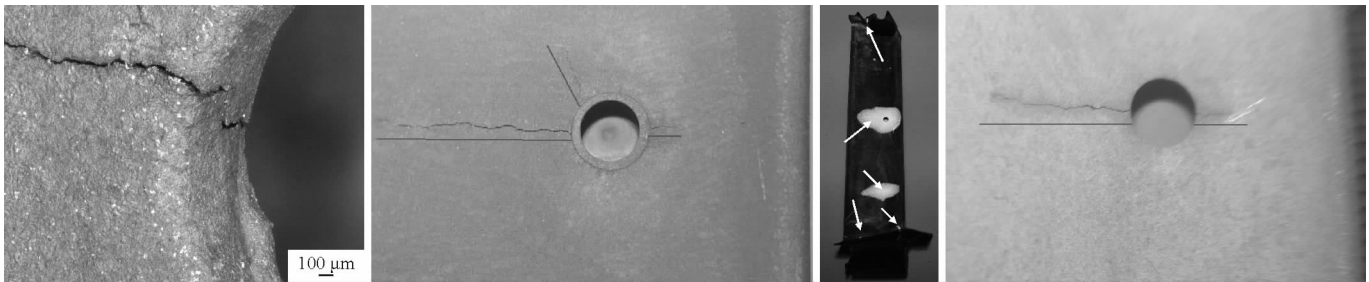
图 1 微小拉伸试样

Fig.1 Schematic diagram of micro tensile specimen

2 试验结果及分析

2.1 热疲劳裂纹生长形貌

图 2 为低压涡轮叶片在冷热循环过程中裂纹萌生及扩展形貌。从图 2a 看出,在 900 ℃ 第 56 次冷热循环时,首次在工艺孔处发现裂纹,该裂纹垂直于叶片轴线方向,随后逐渐扩展。在第 89 次冷热循环后,在叶片工艺孔处观察到新增两条裂纹,其中一条裂纹相对于第一条裂纹呈 45° 夹角,另一条裂纹相对于第一条裂纹呈 180° 分布,见图 2b。从图 2c 可以发现,除工艺孔附近的裂纹外,叶盆中靠近下缘板处发现一条较长裂纹,在上下缘板转接 R 处也出现了细小的裂纹(见图 2c 箭头处)。从图 2d 可以看出,在工艺孔处仅产生两条垂直于叶片轴线的裂纹。900 ℃ 及 950 ℃ 冷热循环 100 次后的裂纹扩展路径曲折,但扩展过程中无分叉,这可能是裂纹沿着晶界进行扩展形成的。



(a) 900 ℃ 冷热循环 56 次 (b) 900 ℃ 冷热循环 89 次 (c) 900 ℃ 冷热循环 100 次荧光检查 (d) 950 ℃ 冷热循环 100 次

图 2 低压涡轮叶片冷热循环试验后的裂纹形貌

Fig.2 Crack morphologies of low-pressure turbine blades after cooling/heating cycle test

叶片热疲劳失效过程的影响因素较多,有材料本身内部组织的因素,有叶片本身冶金缺陷的影响,也有服役环境的影响。由于本课题选用的低压涡轮叶片在叶盆中部存在工艺孔,该孔就成为应力集中部位。随着冷热循环的持续进行,热应变在工艺孔附近不断累积,同时由于试验过程需要夹住榫头进行淬火,这变相的在叶片上施加了一个外力,使得裂纹优先萌生于工艺孔部位。同时,从图 2c 也发现在冷热循环后期叶片其他部

位产生了热裂纹。与叶片试验前 X 光照片对比后发现,叶盆靠近下缘板处的长裂纹是由于该处存在轻微的缩松缺陷,该缺陷的存在是热疲劳裂纹产生的根本原因。而上下缘板转接 R 处产生的裂纹是由于此处壁厚差大,本身的热胀冷缩不协调导致应力集中和应变累积造成的裂纹。在裂纹扩展方向上,可以发现由于内部热应力与重力的作用,使得裂纹扩展优先垂直于叶片轴线方向,其次是与轴向 45° 夹角方向。由于等轴晶叶片晶

粒尺寸较大,且含有大量晶界强化元素,不易观察到裂纹从晶界进行扩展,多晶合金中裂纹易沿着析出的碳化物扩展,这与文献[8,9]相一致。

2.2 冷热循环对 K465 合金叶片显微组织影响

图 3 为冷热循环试验前后的 K465 合金低压涡轮叶片榫头部位的金相组织。可以看出,冷热循环前后的

叶片组织均主要由枝晶组成,其中一次枝晶较为发达,尺寸较大,二次枝晶尺寸较小,不同方向上枝晶生长不均匀,尺寸相差较大。在枝晶间分布着大量白色块状析出物,分布较为均匀,但尺寸相差较大,这是枝晶生长完成后形成的残余共晶。对比组织发现,冷热循环前后枝晶相貌、枝晶尺寸、残余共晶相的分布相差不大,900 ℃

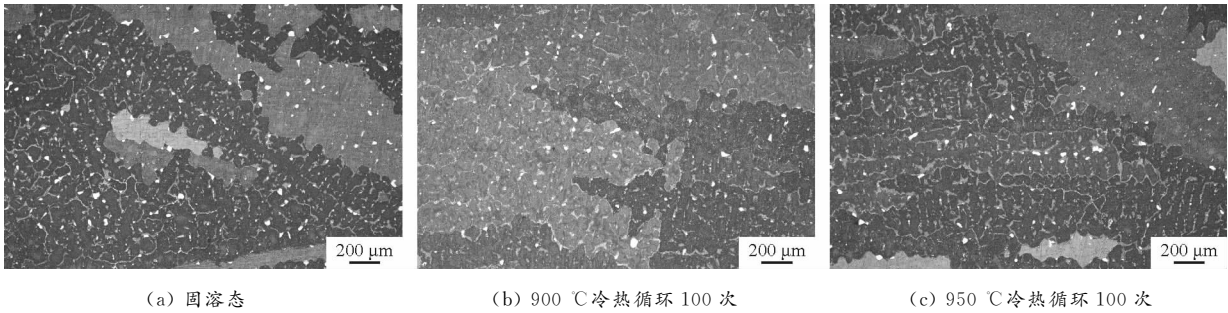


图 3 冷热循环试验前后 K465 合金叶片金相组织

Fig.3 Metallographic structure of K465 alloy turbine blades before and after cooling/heating cycle test

及 950 ℃ 的冷热循环对铸造初始组织的影响不大。

图 4 为冷热疲劳试验前后的 K465 合金叶片的扫描电镜照片。可以看出,K465 合金固溶处理及随后的冷热循环试验后的组织主要由 γ 基体相、 γ' 强化相、 $(\gamma+\gamma')$ 共晶相和碳化物组成,枝晶间碳化物主要以颗粒状及短棒状弥散分布,枝晶干内的碳化物主要由块状或短棒状组成。由于 K465 合金主要由 γ' 析出强化, γ' 的形态、尺寸及分布决定了合金的力学性能。从图 4a 可以看出,叶片通过固溶处理后,枝晶干的 γ' 相呈规则的立方形,排列比较规则,枝晶间区 γ' 相尺寸较粗大,

边角变得圆滑,边界不规则,且枝晶间 γ' 相尺寸明显大于枝晶干的 γ' 相尺寸。这是由于合金在固溶过程中,枝晶干中凝固冷却过程形成的 γ' 相充分溶解,在随后的固溶处理的冷却过程再次析出 γ' 相,此时 γ' 相细小而规则;而枝晶间的 γ' 相由于溶解不完全,在热处理冷却过程中进一步长大,边角变得不规则^[10]。固溶态 K465 合金经 900 ℃、100 次冷热循环后,枝晶干 γ' 相逐渐长大,边界开始变得不规则,枝晶间 γ' 相尺寸基本不变,见图 5b;当经 950 ℃、100 次冷热循环后,枝晶干及枝晶间 γ' 相相互连接、聚合,尺寸进一步变大,并出现

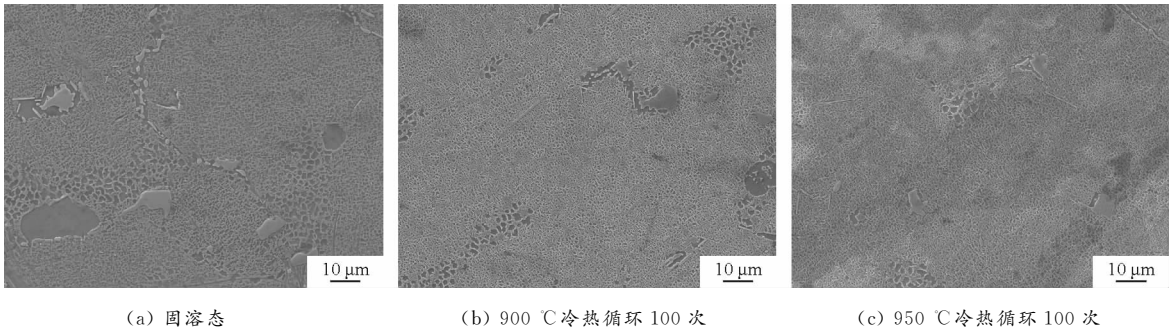


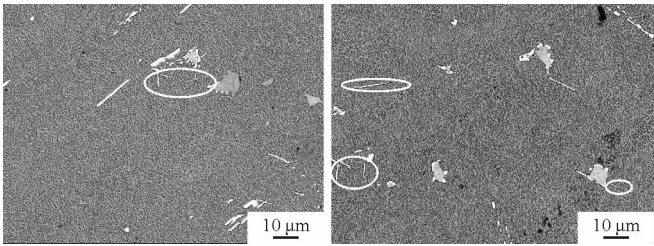
图 4 冷热疲劳试验前后 K465 合金叶片的 SEM 形貌

Fig.4 SEM images of K465 alloy turbine blades before and after cooling/heating cycle test

“筏排”趋势。

图 5 为冷热疲劳试验后 K465 合金叶片背散射成像照片,可清晰分辨出 K465 合金碳化物类型。灰色块状碳化物能谱分析表明,主要成分(质量分数):Ti 为 25.08%、Nb 为 17.09%、W 为 40.98%、Cr 为 1.08%、C 为 12.36%,W、Ti、Nb 和 C 含量较高,可以断定为 MC 型碳化物。由于固溶处理及冷热循环的作用,在块状 MC 碳化物周边析出白亮色的 M_6C 型碳化物,周围还

包覆了一层 γ' 膜,分布在枝晶干及枝晶间分散的短棒状及点状 MC 碳化物已完全转变为 M_6C 型碳化物。另外还可以看出,K465 合金叶片在冷热循环试验过程中二次析出了针状析出相,且 950 ℃ 冷热循环后的针状析出相长度更长,数量更多。K465 合金在高温时效时会析出 M_6C 型碳化物或者 TCP 相^[11], M_6C 型碳化物一般呈短棒状,TCP 相两端呈针尖状且细而长,但二者的成分相似,需要通过进一步研究确定针状二次析出物。



(a) 900 °C 冷热循环 100 次 (b) 950 °C 冷热循环 100 次

图 5 冷热疲劳试验后 K465 合金叶片的背散射照片

Fig.5 Back scattering images of K465 alloy turbine blades after cooling/heating cycle test

2.3 冷热循环过程对 K465 合金叶片力学性能的影响

表 2 为冷热疲劳试验前后的 K465 合金叶片榫头部位室温力学性能。可以看出,叶片经固溶处理后本体抗拉强度平均达到 905.4 MPa,伸长率达到 6.11%,均大幅高于标准要求。固溶态叶片经过 900 °C 或 950 °C、100 次冷热循环后,K465 合金的抗拉强度随温度的升高先增加后减小,但都高于固溶态的。由于针状二次相的析出割裂了基体,以及 γ' 相长大且变得不规则,冷热循环后的叶片伸长率随着试验温度的升高逐渐降低。同时可以看到,叶片经 950 °C 冷热循环后,其本体力学性能依然可以达标,但伸长率的差距较大,一组伸长率低至 3.66%,已触及标准要求的下限,这说明叶片经高温冷热循环后组织局部针状二次析相析出不均匀。

表 2 K465 合金低压涡轮叶片本体的力学性能

Tab.2 Mechanical properties of entity of K465

low-pressure turbine blade			
叶片状态	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%
标准要求	—	835	3.00
固溶态	S1	752.9	910.1
	S2	797.1	900.7
	平均	775.0	905.4
固溶+900 °C 冷热循环	S1	792.2	919.9
	S2	791.4	932.8
	平均	791.8	926.4
固溶+950 °C 冷热循环	S1	788.8	927.1
	S2	773.4	899.5
	平均	781.1	913.3

3 结 论

(1)低压涡轮 K465 合金叶片叶盆中的工艺孔在热冲击过程中是最薄弱的部位,由于热应力及应变的积累,容易首先萌生热疲劳裂纹,热疲劳裂纹扩展路径曲折。除工艺孔外,缩松缺陷处及转接角等薄厚不均的位置均易产生热疲劳裂纹。

(2)K465 合金叶片经 900 °C 及 950 °C、100 次冷热循环对铸造初始组织的影响不大,但均有针状二次相的

析出;热循环试验温度越高,枝晶干 γ' 相尺寸越大,立方形态 γ' 相边角变得圆滑不规则。

(3)经 900 °C 及 950 °C、100 次冷热循环后的 K465 合金的强度及伸长率均能满足标准要求,但针状二次相的析出割裂了基体,以及 γ' 相长大且变得不规则,冷热循环后的叶片伸长率随着试验温度的升高逐渐降低。

参 考 文 献

[1] 宋若康,马东,吴素君.K417G 服役涡轮导向叶片的组织性能及热疲劳损伤机理分析[J].稀有金属材料与工程,2019,48(5): 1 517-1 522.

[2] 金哲学.试样缺口形状对冷热疲劳性能与裂纹形貌影响的研究[J].钢铁研究总院学报,1985,5(2): 205-211.

[3] 王海清.铸造涡轮叶片热疲劳性能研究[J].航空材料,1979(3): 19-25.

[4] 严志,王振江,桑志茹,等.浇注温度对 K465 合金组织与力学性能的影响[J].特种铸造及有色合金,2021,41(8): 1 001-1 006.

[5] 郭小童,郑为为,李龙飞,等.冷却速率导致的薄壁效应对 K465 合金显微组织和持久性能的影响[J].金属学报,2020,56(12): 1 654-1 666.

[6] 郑行,杨伟,张丽攀,等.时效温度对非平衡凝固 K424 合金析出相及硬度的影响[J].特种铸造及有色合金,2020,40(2): 147-151.

[7] 吴凯西,刘宏宣,彭真,等.浇注工艺对 K403 合金初生碳化物及持久性能的影响[J].特种铸造及有色合金,2019,39(1): 52-56.

[8] 刘源,于金江,徐岩,等.单晶高温合金的冷热疲劳裂纹生长行为研究[J].稀有金属材料与工程,2009,38(1): 59-63.

[9] WOODFORD D A, MOWBRAY D F. Effect of material characteristics and test variables on thermal fatigue of cast superalloys. A review[J]. Materials Science and Engineering, 1974, 16(1-2): 5-43.

[10] 彭志江,贾淑芹,于颖,等.熔铸工艺对 K465 合金组织性能的影响[J].铸造,2010,59(6): 563-567.

[11] 任维鹏,李相辉,关心光,等.固溶及时效热处理对 K465 合金组织的影响[J].材料开发与应用,2016,31(6): 38-42.

(编辑:刘卫)

欢迎关注
“特种铸造”
微信公众号

- 微官网
- 微商城
- 本刊会议
- 收录动态
- 稿件系统

- 行业动态
- 铸造前沿
- 经典案例
- 铸造学堂
- 专利与发明

- 联系我们
- 免费推广
- 铸造职场
- 产品库
- 企业库