

# K465 高温合金叶片扰流柱的渗透检测

肖雄晖<sup>1,2,3,4</sup>,胡岚明<sup>1,2,3,4,5</sup>,王树志<sup>1,2,3,4</sup>,王晓英<sup>1,2,3,4</sup>,高文博<sup>1,2,3,4</sup>,宋欣<sup>1,2,3,4</sup>

(1. 中国航发北京航空材料研究院,北京 100095;2. 航空材料检测与评价北京市重点实验室,北京 100095;3. 中国航空发动机集团材料检测与评价重点实验室,北京 100095;  
4. 材料检测与评价航空科技重点实验室,北京 100095;  
5. 航空工业失效分析中心,北京 100095)

**摘要:**针对某型号空心涡轮叶片叶尖和榫齿外侧扰流柱表面有荧光显示的问题,使用 ZL-27A 型渗透液对其进行渗透检测,后用丙酮擦拭笔对荧光显示进行擦拭,确定并标记出有缺陷的扰流柱;最后利用体视显微镜和扫描电镜观察和分析缺陷的宏观和微观特征。结果表明,扰流柱表面不平整是存在荧光显示的主要原因,经过擦拭后扰流柱上的线性荧光显示为裂纹,圆形荧光显示为疏松,缺陷是铸造工艺造成的;对于扰流柱位置有荧光显示的零件,应拒绝验收。

**关键词:**空心涡轮叶片; 荧光渗透检测; 扰流柱

中图分类号: TG146.15;TG115.28

文献标志码: A

文章编号:1000-6656(2024)04-0031-04

## Penetrant testing of K465 high temperature alloy blade spoiler columns

XIAO Xionghui<sup>1,2,3,4</sup>, HU Lanming<sup>1,2,3,4,5</sup>, WANG Shuzhi<sup>1,2,3,4</sup>, WANG Xiaoying<sup>1,2,3,4</sup>, GAO Wenbo<sup>1,2,3,4</sup>, SONG Xin<sup>1,2,3,4</sup>

(1. AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China;  
2. Beijing Key Laboratory of Aeronautical Materials Testing and Evaluation, Beijing 100095, China;  
3. Key Laboratory of Aeronautical Materials Testing and Evaluation, Aero Engine Corporation of China, Beijing 100095, China; 4. Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Materials Testing and Evaluation, Beijing 100095, China; 5. AVIC Failure Analysis Center, Beijing 100095, China)

**Abstract:** This paper analyzed the fluorescent indications problem on the surface of the spoiler columns on the tip and tenon of a certain model of hollow turbine blades. The ZL-27A penetrant was used to detect the turbine blades, and then acetone wipes were used to wipe off the fluorescent indications, identifying and marking the defective spoiler columns. Finally, the macroscopic and microscopic characteristics of the defects were observed and analyzed using a borescope and scanning electron microscope. The results showed that the uneven surface of the spoiler columns was the main cause of fluorescent indications. After wiping, linear fluorescent indications on the spoiler columns indicated cracks, while circular fluorescent indicated looseness. The defects were caused by casting process. For parts with fluorescent indications on the spoiler column location, acceptance should be rejected.

**Key words:** hollow turbine blade; fluorescent penetration detection; spoiler column

针对长期服役在高温高压高转速下的航空发动机空心涡轮叶片,常使用扰流柱结构来改善发动机

叶片气冷结构,提高涡轮叶片的承温能力<sup>[1-2]</sup>。某型心涡轮叶片采用等轴晶 K465 合金铸造。K465 合金是一种等轴晶镍基铸造高温合金,W、Mo、Nb 等难溶元素含量高,具有较高的承温能力、高强度和耐腐蚀性能,广泛应用于航空发动机涡轮叶片的制造<sup>[3]</sup>。K465 合金涡轮叶片、导向叶片等航空发动机

收稿日期:2023-11-25

作者简介:肖雄晖(1996—),男,硕士,工程师,主要从事航空材料表面无损检测技术的研究工作

通信作者:肖雄晖,15970480198@163.com

关键件,受制备与铸造工艺,以及热处理工艺等因素影响,会存在残余应力甚至出现裂纹等缺陷<sup>[4-7]</sup>。

对于航空发动机零部件,常采用射线检测和渗透检测对涡轮叶片内部和外表面进行质量控制<sup>[8-10]</sup>。扰流柱结构存在于叶片内腔中,其结构复杂,受空心结构、渗透液施加方法等因素的影响,扰流柱周围会截留渗透液,造成荧光背景干扰。

笔者对某型 K465 高温合金涡轮叶片进行了渗透检测,并利用体视显微镜和扫描电镜等方法对扰流柱荧光显示进行了分析,探讨了渗透检测对扰流柱缺陷检测的可行性,为该型涡轮叶片生产研制和使用过程中的缺陷检测及其检测工艺的制定奠定了基础。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验方法

选用带有荧光显示的扰流柱报废叶片进行试验,使用后乳化三级灵敏度渗透液对零件进行检测,使用丙酮擦拭后确定显示位置;后对有显示部位进行 2 次机加工切割,再次检测确定其是否为非相关显示;使用体视显微镜对扰流柱缺陷位置和特征进行宏观形貌分析;在扫描电子显微镜下分别对扰流柱缺陷特征进行微观分析。扰流柱结构如图 1 所示。

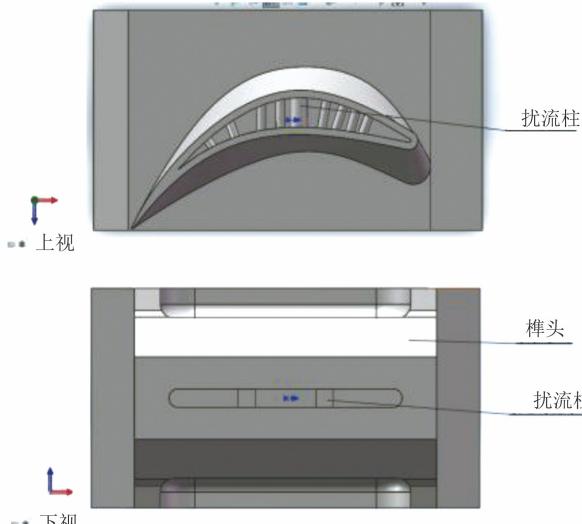


图 1 扰流柱结构示意

### 1.2 渗透检测试验

选用的叶片为 K465 等轴高温合金毛坯铸件,表面平整且有空心内腔,渗透检测工艺应选用静电喷涂方法施加高灵敏度型后乳化荧光渗透液,选择 I 类 D 法,具体工艺参数如表 1 所示。

表 1 荧光渗透检测工艺参数

工艺名称	工艺参数
预清洗	水基清洗剂,超声波震荡清洗 10 min
渗透	ZL-27A 型渗透液,渗透时间 20 min 静电喷涂法施加渗透液
去除	去离子水,水压为 0.25 MPa
乳化	ZR-10B 型乳化剂,乳化时间为 1 min
烘干	55 °C 烘箱,烘干 20 min
显像	ZP-4B 干粉显像 30 min
检验	黑光灯,38 cm 处黑光强度 > 1 500 μW · cm⁻²

干粉显像结束后,在黑光灯下进行渗透检测,发现在扰流柱上有大量荧光显示,由于叶尖至显示位置距离约为 3 cm,无法使用毛刷等常用工具对其进行有效擦拭,为对显示进行进一步判断,故对叶尖进行线切割,使扰流柱位于叶尖下方 1 cm 处。使用酒精-丙酮混合液对零件进行超声波清洗,确保将内腔的残留油污去除,再次使用表 1 工艺对零件进行渗透检测,线切割后的渗透检测结果如图 2 所示。

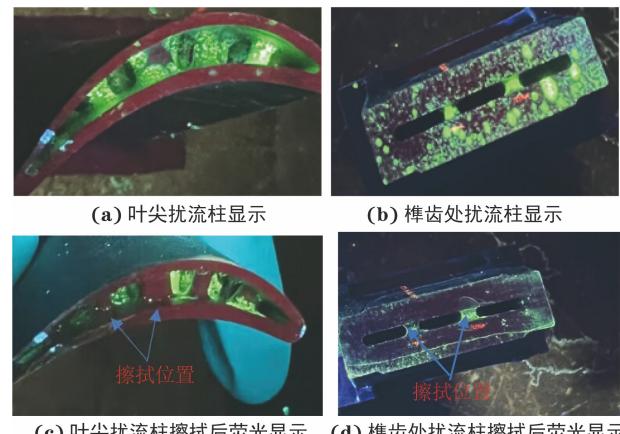


图 2 叶片零件线切割后的渗透检测结果

去除叶尖和榫头多余部分后再次进行渗透检测发现扰流柱显示位置和大小和原始状态保持一致,即线切割并没有干扰扰流柱表面状态,扰流柱上的缺陷没有发生变化。

分析图 2(a),(c)发现,对叶尖荧光显示擦拭后,在扰流柱和叶片连接处仍然有点状显示,可以确定为缺陷;但是靠近进气边的扰流柱仍然有显示,无法判断是否为相关显示,下层扰流柱的荧光显示仍会影响判断。

分析图 2(b),(d)发现,对榫头荧光显示擦拭后,扰流柱有线性显示,可以确定为缺陷,但是无法对该线性显示进行定性判断,需要借助体视显微镜和电子显微镜进行进一步的观察分析。

为了进行体式观察,将扰流柱进行二次切割,对切割后的零件进行渗透检测,擦拭掉扰流柱上的多

余渗透液后可以清晰看见点状显示和线性显示,切割后的渗透检测结果如图 3 所示。

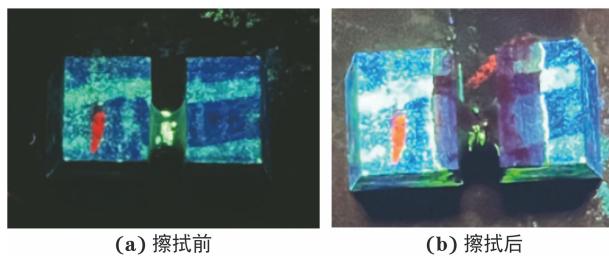


图 3 扰流柱二次切割后的渗透检测结果

### 1.3 荧光显示擦拭方法

针对不确定的荧光显示,常采用酒精或丙酮擦拭的方法,若擦拭后仍然有反渗现象,则判断该显示为缺陷。常用的擦拭工具有棉球、毛刷等。

棉球常用于擦拭表面渗透剂,由于棉花的松散特性,其附着的丙酮少,可以获得良好的背景,缺点是只能对平整表面进行擦拭,无法对复杂结构进行擦拭。

毛刷蘸取丙酮可以对复杂结构进行擦拭,其缺点是难以控制丙酮的蘸取量,且丙酮被污染后会出现荧光背景干扰。

由于扰流柱位于叶片内部,笔者采用的是描金笔中灌入丙酮的擦拭工具。描金笔笔头长度为 3 cm,可以深入复杂结构中进行擦拭,笔头的书写方式控制了每次擦拭时丙酮的溢出量,可以做到擦拭后具有良好的荧光背景。

## 2 试验结果分析

### 2.1 缺陷宏观形貌观察和分析

根据渗透检测结果对含有缺陷的扰流柱进行分析,在体视显微镜下观察扰流柱转角处有荧光显示的区域,其检测结果如图 4 所示,可以观察到,扰流柱上布满不规则凸起和凹坑,同时可以观察到裂纹和孔洞的形貌,裂纹长度约为 0.5 mm。

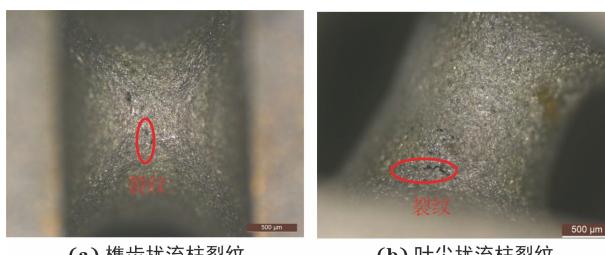


图 4 扰流柱荧光显示区域体视显微镜检测结果

### 2.2 缺陷微观形貌观察和分析

开口显示区电子显微镜扫描结果如图 5 所示,

打开具有缺陷的扰流柱断口,将开口放大可见缺陷显示开口,可见靠近柱体表面荧光显示部分为不规则的孔洞,孔洞表面为熔融特征,未见断裂痕迹,判断荧光显示原因为孔洞出现在零件表面。内部断口电子显微镜扫描结果如图 6 所示,可见扰流柱内部断口大部分区域为沿枝晶断裂及部分不规则孔洞,孔洞表面形貌与表面荧光显示处孔洞的一致,认为该不规则孔洞为铸造缺陷。而 K465 高温合金铸件采用的是铝基型芯浇筑的方法,会使得扰流柱产生较大的铸造应力<sup>[11]</sup>,分析开口显示区和断口特性,可知铸造缺陷为疏松和裂纹。

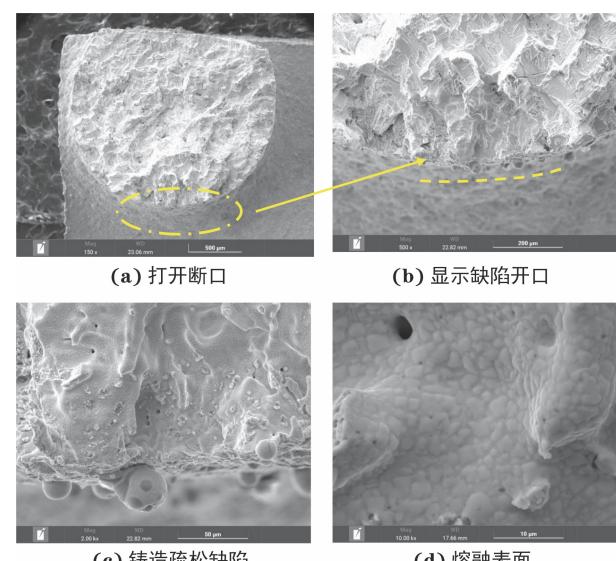


图 5 扰流柱开口显示区电子显微镜扫描结果

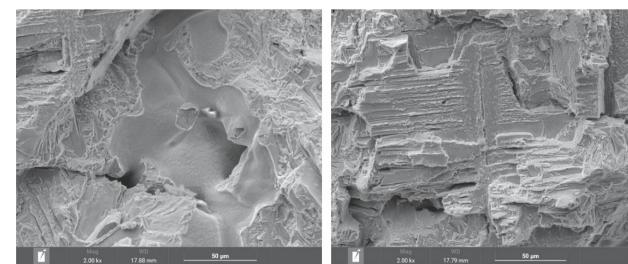


图 6 扰流柱内部断口电子显微镜扫描结果

## 3 结语

针对某型号空心涡轮叶片叶尖和榫齿外侧扰流柱表面有荧光显示的问题,首先对其渗透检测结果进行分析,然后采用扫描电镜观察其微观形貌进行验证,发现 K465 等轴高温合金涡轮叶片扰流柱上的荧光显示,部分为扰流柱结构造成的非相关显示,也有缺陷带来的真实显示,需要使用合适的擦拭手段对显示进行判断。对比几种擦拭方法得出结论,

使用丙酮擦拭笔对扰流柱显示进行擦拭可以获得良好的背景, 同时能明显观察到缺陷处的反渗现象。

试验结果表明, 此型号高温合金叶片扰流柱表面大面积荧光显示主要是铸造工艺造成的表面不连续, 圆形显示为疏松, 线性显示为裂纹。对于空心涡轮叶片扰流柱等内腔结构的荧光渗透检测, 若发现内腔结构有荧光显示, 应进行擦拭后再判断, 避免缺陷的漏检。

## 参考文献:

- [1] 郭文, 王鹏飞. 涡轮叶片冷却技术分析[J]. 航空动力, 2020(6):55-58.
- [2] 赵振, 高建民, 徐亮, 等. 某型高温涡轮叶片冷却性能的试验研究[J]. 西安交通大学学报, 2024(1):1-12.
- [3] 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.
- [4] 孙旭波, 刘丽玉, 杨瑞宁, 等. K465合金涡轮叶片叶身开裂分析[J]. 失效分析与预防, 2023, 18(1):62-66.

- [5] 李继宏, 全琼蕊, 张国军, 等. K465 低压涡轮叶片叶冠失效分析[J]. 中国铸造装备与技术, 2021, 56(2):75-79.
- [6] 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):1654-1666.
- [7] 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.
- [8] 乔海燕, 任学冬, 史亦伟, 等. GH4169高温合金涡轮盘表面径轴向裂纹的渗透检测可行性[J]. 航空材料科学报, 2016, 36(6):92-96.
- [9] 王树志, 刘广华, 王本志, 等. IC10单晶高温合金叶片荧光渗透检测的缺陷显示[J]. 无损检测, 2017, 39(1):35-37.
- [10] 马海全, 甘勇, 张卫, 等. 高温合金叶片常见缺陷的射线检测[J]. 失效分析与预防, 2020, 15(3):159-163.
- [11] 王树森, 舒德龙, 王振江, 等. 大尺寸K465镍基高温合金母合金铸锭表面缺陷形成机理[J]. 铸造, 2021, 70(5):547-553.

(上接第30页)

## 6 结语

提出一种多层次复杂结构工件超声无损检测分区合成C扫描成像方法, 该方法在扫查的过程中能根据设置好的工件区域划分信息, 动态加载当前点需要抓取的超声信号, 并在需要时对信号进行补偿, 最终将处于不同位置、深度的检测区域信号合成到一张C扫图中显示, 提高了单次检测的覆盖范围, 降低了漏检率, 提高了检测效率。

该方法支持实时成像和数据后处理成像两种方式, 搭配自动化系统使用, 可在扫查结束后自动输出合成后的C扫描图像。该图像可用于留档, 供检测人员目视判定, 也可以结合图像识别算法进行自动判定, 进一步提升检测效率。

这些优势使得分区合成C扫描成像方法具有广阔的应用空间。

## 参考文献:

- [1] 任述科, 郭建中, 张晗, 等. 基于仪器集成的超声C扫检测成像系统[J]. 压电与声光, 2012, 34(5):801-805, 810.
- [2] 徐海峰, 苏林, 盛雷. 液冷板电池组散热性能仿真及优化[J]. 制冷技术, 2019, 39(2):23-28, 39.
- [3] 赵孟, 葛长青, 刘洁, 等. 一种电动汽车动力电池水冷系统及采用其的电动汽车: CN206432354U[P]. 2017-08-22.
- [4] 刘海强, 董德秀. 钎焊超声C扫描图像缺陷面积计算方法[J]. 无损检测, 2014, 36(2):53-55, 59.