

# 涡轮叶片薄壁叶尖激光熔覆修复裂纹分析及控制

符素宁, 任寿伟, 邹文, 武德安, 冯力争

(国营四达机械制造有限公司, 陕西 武功 712203)

**摘要:** 某型航空发动机高压涡轮工作叶片叶尖磨损后, 采用激光熔覆技术进行修复, 经 X 光探伤检查发现熔覆层与基体结合面上有纵向显微裂纹, 其不合格率达到 20% 左右。通过基体材料成分分析、金相观察、扫描电镜、工业 CT 等手段分析裂纹产生原因, 结果表明: 裂纹为激光熔覆过程中应力过大产生的热裂纹, 通过增加预热、调整激光出光模式等方式可有效降低裂纹故障率。控制措施实施后, 继续跟踪检查 24 台叶片激光熔覆修复情况, 其合格率达到 99% 以上。

**关键词:** 涡轮叶片; 激光熔覆; 热裂纹; 合格率

中图分类号: TQ639 文献标志码: B 文章编号: 1007-9548(2024)07-0042-04

## Analysis and Control of Cracks in Laser Cladding Repair of Thin-walled Blade Tips of Turbine Blades

FU Su-ning, REN Shou-wei, ZOU Wen, WU De-an, FENG Li-zheng

(State Owned Sida Machinery Manufacturing Company, Wugong 712203, Shaanxi, China)

**Abstract:** After a certain type of aircraft engine high-pressure turbine blade tip was worn, laser cladding technology was used for repair. Through X-ray inspection, longitudinal micro cracks were found on the interface between the cladding layer and the substrate, with an unqualified rate of about 20%. By analyzing the composition of the matrix material, observing metallography, scanning electron microscopy, industrial CT and other methods, the causes of cracks were analyzed. The results showed that cracks were thermal cracks caused by excessive stress during laser cladding. Increasing preheating and adjusting the laser output mode can effectively reduce the failure rate of cracks. After the implementation of control measures, we continued to track and inspect the laser cladding repair of 24 blades, with a qualification rate of over 99%.

**Key words:** turbine blades; laser cladding; hot crack; qualification rate

### 0 引言

在航空发动机长寿命服役工作过程中, 涡轮叶片作为发动机服役的动力装置部件, 为发动机工作提供动力, 同时也在承受高温燃气、冷热疲劳以及离心力的作用, 长时间使用后, 叶片就会产生裂纹、磨损及腐蚀等损伤, 这些损失无法修复的话, 就会导致大量叶片报废。某型航空燃气涡轮发动机经过一个使用寿命周期后, 高压涡轮叶片叶尖一般磨损严重, 磨损量大多在

0.5~1.5 mm 之间。由于叶尖磨损往往造成涡轮转子外径尺寸超差, 叶尖间隙增大, 发动机性能下降, 甚至导致大量叶片报废。为恢复叶片使用性能, 需采用激光熔覆修复技术对叶片喷射熔覆材料, 熔覆材料经高密度的激光照射使之和基体表层同时熔化, 并快速凝固后形成稀释率极低并与基体材料形成冶金结合的表面熔覆层, 从而实现基体尺寸再增长或表面材料耐磨、耐腐蚀等的工艺方法。与目前普遍采用的等离子弧堆焊、氧乙炔堆焊等技术相比, 激光熔覆技术具有自动化程度高、熔覆精度高、热影响区小、熔覆层及基体结合强度高的优点, 以及在恢复损伤零件基体性能方面的优势, 现已逐渐成为航空飞机、发动机零部件修复的主要方法之一<sup>[1-3]</sup>。

收稿日期: 2024-01-19

作者简介: 符素宁(1988—), 女, 本科, 工程师, 主要从事航空零部件焊接、激光熔覆修复以及金属激光增材制造技术研究和管理工作。E-mail: 879562544@qq.com。

### 1 故障现象

某型叶片叶尖激光熔覆修复流程为：叶片叶身涂层去除→叶尖磨抛→荧光探伤检查→激光熔覆修复→目视检查→叶尖磨抛→荧光探伤检查→X光探伤检查→交付使用。某型叶片在小批量激光熔覆修复过程中,发现在X光探伤检查工序不合格率较高,即X光探伤检查,熔覆层存在垂直于熔覆方向的裂纹。经统计,故障率达20%左右,严重影响该型发动机正常交付使用。

### 2 故障分析

#### 2.1 故障情况

对4台叶片故障情况进行统计,包括目视检查结果、荧光探伤检查等,前两道工序检查均为合格。在X光探伤工序检查发现,部分叶片叶尖激光熔覆接长部位存在裂纹,裂纹均位于叶片叶尖熔覆层与基体结合面上,由熔覆层延伸至基体,长度为1.0~2.0 mm,具体统计见表1。为排除X光探伤结果的不准确性和影响因素,对有缺陷叶片进行了工业CT扫描检查,进一步确定叶尖激光熔覆部位存在裂纹,结果表明裂纹垂直于熔覆层和叶片基体结合面部位,与X光探伤检查结果一致。

表1 4台高压I级涡轮叶片故障统计

批次	数量/件	目视检查	荧光探伤检查	X光探伤检查	缺陷情况	不合格率/%
1	69	合格	合格	60	纵向裂纹	13
2	38	合格	合格	32	纵向裂纹	16
3	56	合格	合格	48	纵向裂纹	14
4	66	合格	合格	58	纵向裂纹	12

#### 2.2 宏观检查

如图1所示,故障叶片开裂部位位于叶尖基体与熔覆层结合面以上,沿叶身方向开裂,距离进气边约13 mm,裂纹长约0.8 mm,未裂穿叶尖端面,裂纹附近熔覆层未见损伤。平磨叶尖熔覆层端面,裂纹呈脆性开裂特征。

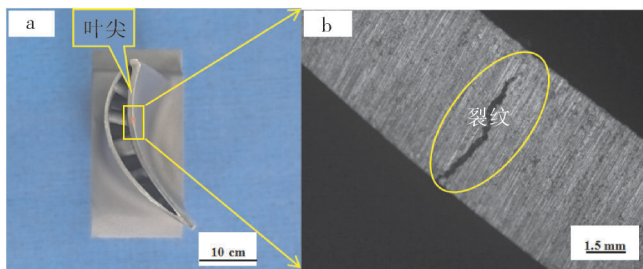


图1 叶片裂纹部位形貌

#### 2.3 断口扫描电镜检查

对裂纹断口进行SEM检查(图2~3),发现裂纹的断口比较光滑,有明显的穿晶发展的特征,且断口呈脆性断裂特征,未见疲劳形貌;表面氧化较重,整体断面氧化均匀;断面能谱检测含有Ni、O、Al元素,含量分别为56.1%、34.1%、9.8%。能谱分析结果表明,裂纹中部仍然以氧化物和碳化物为主。

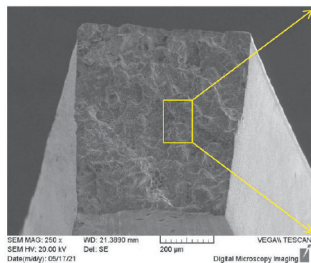


图2 叶片断口形貌

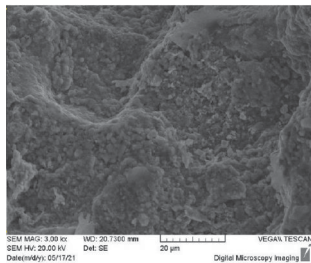


图3 断面氧化特征

#### 2.4 叶片结构分析

该叶片为不带冠空心结构,内腔直接铸造成型气流通道的,激光熔覆接长部位为叶片叶盆一侧,熔覆叶尖为宽0.6~0.8 mm的弧面,进气边部位较宽,排气边部位较窄,且修复端面水平度不是很一致,即排气边端高、进气边端低。熔覆过程中,Z轴会有上下浮动,影响熔覆层成型效果,因此在叶尖部位激光熔覆出和叶片型面一致的熔覆层,难度较大。

#### 2.5 叶片材料分析

叶片基体材料的俄罗斯牌号是ЖС6У,国内牌号是K465,该镍基铸造高温合金,其主要合金元素含量见表2,Al、Ti成分含量较高,达到7%~9%,属于难焊金属。因此该材料在熔覆过程中,如果工艺控制不当,就极易产生裂纹等缺陷。由于该合金主要用于制作工作温度低于1050℃的发动机涡轮工作叶片和导向叶片<sup>[4-7]</sup>,本次故障叶片即为K465合金材料,每台叶片数量为80件。

表2 K465合金主要元素含量

元素	含量/%	元素	含量/%
Co	9.0~10.5	Ti	2.0~2.9
W	9.5~11.0	Nb	0.8~1.2
Mo	1.2~2.4	Cr	8.0~9.5
Al	5.1~6.0	Ni	余量

#### 2.6 熔覆工艺分析

采用IPG激光器功率为1000 W的C600激光熔覆设备对叶片叶尖磨损进行修复,熔覆粉末为和基体

性能匹配的镍基合金粉末,粒度为 35~150  $\mu\text{m}$ ,粉末球形度好,粒度均匀,含有少量的卫星粉和异形粉。粉末使用前,先取适量粉末放入真空干燥箱中进行烘干处理,烘干温度 120  $^{\circ}\text{C}$ ,保温时间 2 h。熔覆前对成型仓进行洗气,使成型仓内水含量和氧含量为  $1.0 \times 10^{-3}$  以下,熔覆工艺参数为:激光功率 450~480 W;离焦量 5.0 mm;光斑尺寸 1.0 mm;送粉速率 1.0~1.2 r/min;熔覆速率 260~280 mm/min;Z 轴抬高尺寸 0.3 mm;保护气流量 8 L/min;约束气流量 8 L/min;载粉气流量 6 L/min;熔覆层数 10~15 层。设备激光器出光模式为连续出光,使单道熔覆时瞬间热输入大,且整个工艺参数中无焊前预热要求,会引起叶片基体和熔覆层温梯度差大,从而使叶片熔覆层出现热应力大的现象。

## 2.7 叶片金相分析

### 2.7.1 试样准备

选用报废涡轮叶片,按正常工艺流程和工艺参数对叶片叶尖进行激光熔覆接长,接长高度为 2.0~3.0 mm。对叶片叶尖任意熔覆部位进行取样,取样尺寸约为 8 mm $\times$ 8 mm,试样应包含叶片基体和熔覆部位。

### 2.7.2 微观组织检查

对激光熔覆接长叶片,任选一个切面进行取样、制样、磨样工作,再采用叶片熔覆层专用腐蚀液,即腐蚀液  $\text{CuSO}_4(1.5 \text{ g}) + \text{浓 HCl}(40 \text{ mL}) + \text{酒精}(20 \text{ mL})$ ,对叶片熔覆层和基体进行腐蚀 8~10 s 后检查,光学显微镜下形貌见图 4,熔覆层组织与叶片基体相比非常细小和致密,未发现显微裂纹,由图 4a 可以看出,热影响区宽度差异很大,说明前几道熔覆层热输入很不均匀,因此可能会导致产生热裂纹。

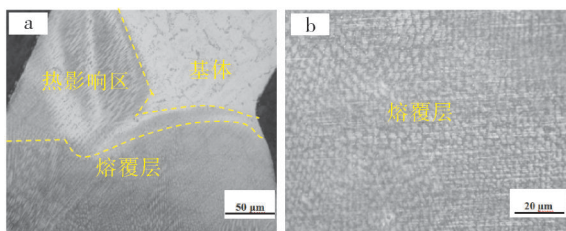


图 4 叶片激光熔覆部位微观组织(措施实施前)

## 2.8 应力分析

通过对故障情况、叶片结构、叶片材料、熔覆工艺等方面分析,裂纹主要是熔覆过程中热输入不均匀以及叶片和熔覆层之间温差大而形成。由叶片叶尖端面分析裂纹情况,裂纹位于进气边 13 mm 左右,是叶片叶尖弧度曲率最大的部位,且正对叶片内腔的加强筋部位,说明此处正是熔覆过程中应力最大和温差最大的位置,温度差会使熔覆层与基材之间的热膨胀不一

致,使其相互影响,在熔覆层与基体结合部位中形成内应力。内应力如果超过叶片基体抗拉强度时,会在熔覆件内产生裂纹。如果要解决该故障,就需进一步改进和完善工艺,从而降低热应力和温度梯度,实现叶片叶尖高质量修复。

## 3 分析结论

1)断口分析表明:叶片叶尖裂纹属应力导致的脆性开裂,断口表面氧化较重。根据裂纹特征、断口形貌和修理流程,裂纹为应力导致的过载开裂,叶尖熔覆接长后端面需进行磨削,磨削裂纹产生于表面,裂纹方向为纵向,说明裂纹非工作应力产生。此类叶片激光熔覆接长后热应力较大,易产生应力裂纹,说明裂纹为一次性开裂。

2)通过对叶片结构、叶片基体材料以及熔覆工艺分析可知:在激光熔覆过程中,由于材料的熔化及凝固行为都在极快的条件下进行,待修复的叶片易于在激光修复过程中形成裂纹、气孔、夹杂、层间结合不良等冶金缺陷,因此,工艺参数控制不当,熔覆部位容易产生显微裂纹。

3)由叶片熔覆部位金相组织图片分析可知:熔覆层组织与叶片基体相比非常细小和致密,未发现显微裂纹,由叶片结构特点和激光熔深、热影响区宽度差异大,可知激光熔池及其附近局部温度分布不均匀,是产生热应力和裂纹的主要原因。

## 4 工艺改进及控制

结合故障分析结论,针对性采取以下处置措施进行故障排除:

1)激光熔覆过程中,增加预热工艺,即采用小功率在叶片叶尖加热(不加粉末)两遍,再进行叶片叶尖激光熔覆接长,从而减少熔池的局部温度梯度,减小热应力。

2)将设备激光出光模式改为脉冲模式,设置合适的频率、脉宽比等参数并与熔覆参数匹配合适,以最小的热输入达到最佳冶金结合。

3)叶片叶尖尽可能打磨平整和宽度一致,减少尺寸突变对熔覆质量的影响。

改进措施落实后,对试验件叶片进行微观组织检查,见图 5。

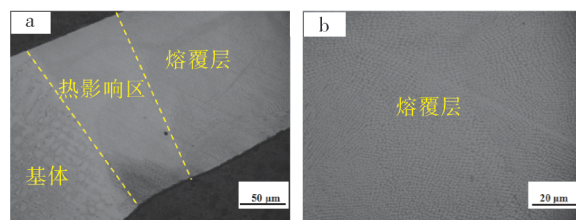


图 5 叶片激光熔覆部位微观组织(措施实施后)

由图5可以看出,热影响区宽度和熔深均匀一致,晶粒尺寸及方向更加均匀。工厂批量修复了24台高压涡轮I级叶片,经X光探伤检查,其合格率达到99%以上,故障情况整体得到控制。

#### 参考文献:

- [1] 武德安.某型发动机高压涡轮叶片磨损修复技术研究[C].航空装备维修技术及应用研讨会论文集,2015:576-582.
- [2] Sexton L,Lavin S,Byrne G,et al.Laser cladding of aerospace material [J].Journal of Materials Processing Technology,2022,122(1):63-68.
- [3] 李嘉宁,陈传忠.激光熔覆技术在航空领域中的研究现状[J].航空制造技术,2010(5):51-54.
- [4] 陈国良,高温合金[M].北京:冶金工业出版社,1988.
- [5] Bakhtiari R,Ekrami A.The effect of gap size on the microstructure and mechanical properties of the transient liquid phase bonded FSX-414 superalloy [J].Materials and Design,2012(40):130-137.
- [6] 梁海,毛唯,孙计生.K465铸造高温合金高温钎焊接头的显微组织[J].材料工程,2005(9):7-10.
- [7] 潘晖,赵海生,张学军.某型发动机涡轮叶片钎焊修复[C].第十七次全国焊接学术会议论文集,2012.

## 《现代涂料与涂装》征稿启事

《现代涂料与涂装》期刊是由中昊北方涂料工业研究设计院有限公司(原化工部涂料工业研究设计院)主办的全国性科技期刊,国内外公开发行人,国际连续出版物号:ISSN 1007-9548;国内统一连续出版物号:CN 62-1135/TQ;广告经营许可证号:6200004000037。本刊是中国学术期刊综合评价数据库来源期刊;《中国学术期刊(光盘版)》、《中国期刊网》、《万方数字化期刊群》全文收录期刊;美国《化学文摘》(CA)收录期刊。

本刊主要报道涂料、颜料及辅助材料的研究、开发、产业化及应用的创新情况,侧重报道国内外涂装行业的最新进展。开设的栏目:试验研究与应用、特种功能型涂料、低污染化发展、建筑涂料与涂装、专论与综述、技术与经验交流、涂料检测、现代涂装、涂装技艺等。本刊内容丰富、新颖,信息量大,覆盖面广,是涂料与涂装企业、科研机构、工程技术人员、施工人员及大专院校相关专业师生的良师益友。

#### 征稿范围:

- ★ 涂料涂装行业关键核心技术自主创新及进口替代进展
- ★ 最新涂料涂装政策、标准解读及应对措施
- ★ 环境友好型涂料及特种功能型涂料的研发及创新应用
- ★ 涂装行业 VOC 源头控制、过程管理、末端治理技术及设备,涂料涂装废水处理技术及设备
- ★ 涂料涂装行业安全生产管理创新
- ★ 传统制造业(汽车、工程机械、轨道交通、船舶)、战略性新兴产业和新型基础设施涂装智能化及新工艺、新材料和新设备

#### 征稿要求:

- 1) 来稿涉及技术保密问题需通过作者单位审查;来稿请注明作者单位、简介、通讯地址、邮编、电话、电子邮件等。
- 2) 请勿一稿多投,如欲改投,请提前告知本编辑部。稿件收到后即发回执,稿件一经刊发,即按规定付给稿酬,并赠送期刊3本。来稿一般不退,请作者自留底稿,半年内未接到通知,作者可自行处理。
- 3) 稿件要求内容新颖、主题明确、逻辑严谨、文字精炼、格式规范、数据真实,正文字数不少于3000字,相似度不高于10%,附50~200字的摘要和3~8个关键词,并提供题目、作者、单位及摘要、关键词的英文翻译;附作者简介,内容包括:姓名(出生年—)、性别、学历、职称、主要从事的工作或研究方向、联系方式及身份证号。
- 4) 稿件用电子文档投稿,一律采用法定标准计量单位名称和符号。
- 5) 文章标题以3级为限,文题简洁,表格一律为三线表,文中插图要清晰。
- 6) 参考文献勿省略,置于文末,并在文中注明序号,排好次序。常用参考文献的规范著录格式如下:  
专著:[序号] 作者.书名[M].版次.出版地:出版者,出版年:起止页码.  
论文:[序号] 作者.题名[D].出版地:出版者,出版年:起止页码.  
期刊:[序号] 作者.文题[J].刊名,出版年,卷次(期次):起止页码.  
专利:[序号] 专利申请者.专利名称:专利国家,专利号[P]:发布日期.