

航空发动机涡轮叶片故障检测荧光线性显示分析

余 郅,王清艳

(中国航发航空科技股份有限公司,成都 610503)

摘 要:某型航空发动机试车后故障荧光渗透检测时,发现某级涡轮叶片存在线性显示。为了确定该线性显示的形成原因,对显示部位进行剖切及理化检测分析后确定:该线性显示为热裂纹,裂纹产生于铸造过程,且在试车过程中未出现扩展。结合该结论,针对涡轮叶片在制造阶段 X 射线检测工序和荧光渗透检测工序没有检出裂纹及裂纹形成的原因进行了分析,制订了相应的铸造工艺和无损检测工艺改进措施。

关键词:涡轮叶片;荧光渗透检测;裂纹;改进措施

中图分类号: TG115.28 **文献标志码:** B **文章编号:** 1000-6656(2023)07-0081-04

Fluorescent linear indication analysis for fault detection of aero-engine turbine blades

YU Zhi, WANG Qingyan

(AECC Aero Science and Technology Co., Ltd., Chengdu 610503, China)

Abstract: During the fault detection after the test run of an aero-engine, the linear indication of a stage turbine blade was found by fluorescent penetrate testing. In order to determine the formation reason of the linear indication, the indication area was cut and it can be determined by physical and chemical analysis that the linear indication was a hot crack, which was generated in the casting process and did not expand during the test run. Combined with this conclusion, the reason was analyzed why crack was not detected in the X-ray inspection process and fluorescent penetrate testing process in the manufacturing stage of turbine blades and the reasons for the formation of cracks. Corresponding improvement measures for casting process and nondestructive testing process were formulated.

Key words: turbine blade; fluorescent penetrate testing; crack; improvement measure

涡轮叶片是直接利用高温、高速燃气做功的关键零件,工作温度高、负荷大、应力状态复杂、工作环境恶劣,故叶片材料需具有足够好的热高低周疲劳、蠕变及其交互性能^[1]。涡轮叶片是航空发动机最重要的部件之一,航空发动机涡轮叶片的故障检测、故障分析对飞机的飞行安全意义重大。

笔者对某型航空发动机涡轮叶片故障检测时的荧光线性显示进行了分析,并制订了相应的工艺改进措施。

1 问题描述

某型航空发动机按照试车大纲进行试车后,需要

按照分解检查技术要求对涡轮叶片进行故障检测。涡轮叶片在进行荧光渗透检测时,其中一件叶片发现一处荧光线性显示,该显示出现在离叶冠 30 mm 处的叶背中部,高度位置约在 3/4 叶身高度处,叶展方向位置大致在叶片弦向中部位置,且对应的叶盆面未见显示。荧光显示与叶片轴向呈一定的斜角,且扩展曲折,长度约为 2 mm。涡轮叶片荧光线性显示如图 1 所示。

2 理化分析

为了分析荧光线性显示的形成原因,对显示部位进行了理化分析检测。

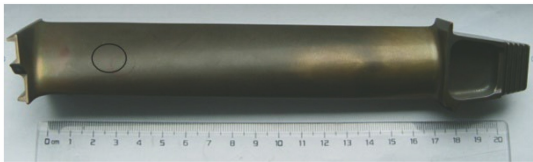
2.1 宏观及微观观察

体视显微镜下观察,荧光显示处可见裂纹,裂纹与叶片轴向呈一定的斜角,且扩展曲折,长度约为 2 mm,如图 2 所示。

收稿日期:2022-10-22

作者简介:余 郅(1980—),男,高级工程师,主要从事航空发动机以及燃气轮机零部件无损检测技术的研究工作

通信作者:余 郅,yuzhi888999@163.com



(a) 荧光线性显示



(b) 荧光线性显示局部放大

图 1 叶片荧光线性显示



图 2 叶片裂纹形貌

扫描电镜下观察,裂纹弯曲扩展,且有一定的不连续性,高倍观察裂纹内有一定的氧化填充,如图 3 所示。

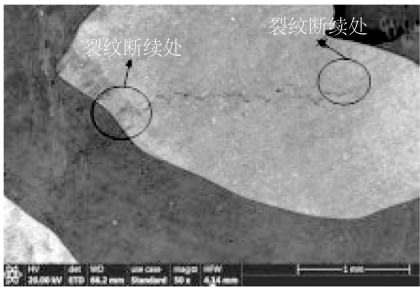


图 3 叶片裂纹微观形貌

2.2 断口观察和能谱分析

将裂纹打开进行断口观察。从打开的断口上看,裂纹断口断面和人为打断的断面有明显的颜色分界,裂纹断口有明显的高温氧化色,整体呈灰黑色,颜色均匀一致,氧化严重,人为打开的断口则为银灰色金属光泽;此外,从断口上看,裂纹深度约 1.27 mm,但裂纹在深度末端的长度(约 4.16 mm)明显大于裂纹在表面的长度(约 2.2 mm),裂纹断口宏观形象如图 4 所示。在扫描电镜下观察,除宏观颜色差异外,裂纹断口和人为打断的断面粗糙度和断裂形貌上并无明显差异,断面均粗糙,起伏较大,

但相对于人为断面,裂纹断口表面可见明显的氧化物覆盖,且整个裂纹断口区断面氧化现象和程度基本一致,整体呈现枝晶断裂轮廓。

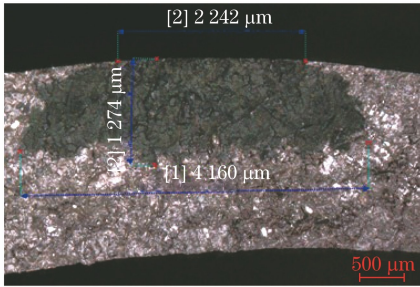


图 4 叶片裂纹断口宏观形貌

在裂纹部位选取近表面的裂纹断面区域(1[#])、裂纹断口中间区域(2[#])、靠近末端的裂纹断口区域(3[#])、人为打断区域(4[#])共 4 个区域,用能谱检测断面成分,其能谱检测结果如表 1 所示(表中为质量分数)。从能谱检测结果看,裂纹断口有明显的氧化产物(以氧化铝为主),且从深度上看,从表面到末端,其氧含量的变化不明显,说明整个裂纹的氧化程度基本一致。

表 1 裂纹不同位置能谱分析结果 %

编号	元素								
	C	O	Al	Ti	Cr	Co	Ni	Nb	W
1 [#]	8.93	30.49	16.97	5.04	9.19	4.17	20.07	1.21	3.93
2 [#]	9.42	28.43	11.75	7.39	7.93	5.04	21.22	2.68	6.14
3 [#]	—	25.57	11.55	7.80	9.98	6.03	29.12	2.71	7.24
4 [#]	—	—	3.26	6.28	6.78	9.23	57.20	4.67	12.60

2.3 断口截面金相及组织检查

在打开的裂纹断口长度方向上的一侧裂纹末端截取纵剖面,抛磨裂纹断口截面金相,在金相上可看到裂纹断口和人为打断区的裂纹走向和特征,裂纹位置未见疏松夹杂等冶金缺陷。裂纹断口表面不仅有氧化现象,在断口下方还可见其他微裂纹,且微裂纹和主断面在此位置相互独立,无连通现象,主裂纹断面和下方微裂纹有明显的沿枝晶间开裂的特征。经腐蚀后观察,此位置的组织未见过热过烧现象,但裂纹内可见明显的氧化现象,且裂纹的两侧可见一定的合金贫化特征。

在另一侧裂纹匹配断口上看到主裂纹下方还有平行裂纹,因此也在匹配断口上的一侧裂纹末端截取纵剖面,抛磨裂纹断口截面金相,在金相截面上可以清晰地看到主断口下方的开裂形貌,微裂纹张口较大,曲折扩展,同样在内部主断口下方还可见其他类似不连续的微裂纹。这些裂纹特征均一致,裂纹两侧氧化且出现明显的合金贫化,且裂纹附近还可

见针状相析出。裂纹处的组织 γ 相正常, 和基体其他位置无明显差异, 未见过热过烧现象。

2.4 理化分析结论

涡轮叶片试车后出现荧光线性显示, 形貌观察确定为裂纹显示, 且裂纹曲折扩展, 断口粗糙, 断面氧化, 整个裂纹断口呈现枝晶过载断裂形貌, 未见疲劳特征, 因此该裂纹性质为过载开裂。

从主裂纹断口上看, 裂纹在深度末端的长度明显大于裂纹在表面的长度, 且从断口上的高温氧化色看, 整个深度上的氧化程度一致, 说明裂纹在试车过程中并没有发展的趋势; 从断口上的高温氧化色看, 其呈现灰黑色, 明显超出了试车时此位置叶身温度下的氧化色, 因此认为该裂纹在试车前就已经存在。此外, 这些裂纹还具有沿枝晶间开裂、氧化严重、多裂纹、断续、裂纹两侧合金贫化等特点, 因此可以判断裂纹性质为热裂纹。结合裂纹出现的位置、氧化程度以及针状相分布特点, 判断该热裂纹应该产生于铸造过程中。

3 无损检测分析

该叶片在制造阶段共经过两次 X 射线检测和 3 次荧光渗透检测, 在两种无损检测方法的检测过程中均未发现该裂纹的存在, 因此对检测过程进行了分析。

3.1 射线检测分析

叶片在制造过程中共进行了两次 X 射线检测, 第一次检测时叶片为铸件毛坯状态, 第二次检测时为机加状态, 由于叶身部位为非机加面, 所以两次检测时叶身部位的状态一致。每次检测叶身部位都进行两次透照, 采用天津 III 型和天津 V 型双胶片进行双胶片技术组合检测。X 射线机型号为 ISOVOLT 320M2, 焦点尺寸为 5.5 mm, 自动洗片机型号为 NDT SECO。复查该叶片铸件毛坯状态和机加状态的底片, 底片黑度均控制在 2.0~4.0, 灵敏度符合 X 射线检测标准 HB 20160—2014《X 射线照相检测》B 级(最高级)技术要求, 底片质量满足零件检测工艺的规定, 底片上均未发现裂纹的显示影像。

叶身发现裂纹处的材料厚度约 2~3 mm, 按照 HB 20160 B 级技术的要求, 检测灵敏度能识别 0.063 mm(63 μm) 细丝即达到要求, 标准还规定: 1.5 mm 以下材料检测灵敏度能识别 0.05 mm(50 μm) 细丝即达到要求, 0.05 mm 也是国际上所有型号像质计最细的丝径, 传统胶片式 X 射线检测

能较清晰识别的影像尺寸大致维持在该水平。

在检测零件时, 凝固组织的晶粒结构对 X 射线会产生衍射^[2], 在底片上形成衍射斑纹, 衍射斑纹的影像也会降低真实缺陷影像的对比度。该叶片为粗晶铸件, 底片上存在的衍射斑纹降低了缺陷影像的对比度。

检测部位与胶片紧贴, 缺陷影像尺寸和缺陷实际尺寸近似于 1:1, 从图 2 可以估算裂纹的宽度尺寸约为 10 μm , 所以缺陷影像的宽度尺寸大致也是该尺寸。X 射线底片评定采用的是人眼观察的方式, 用肉眼识别 10 μm 的细节尺寸评定难度极大。

由上述分析可知, 该裂纹的宽度尺寸约为 10 μm , 远小于 0.05 mm, 加上晶粒衍射的影响造成对比度极低, 因此在底片上该裂纹不会呈现清晰的影像, 且影像已超出人眼的识别能力。综上可得, 常规胶片式 X 射线检测技术的检测能力限制了该缺陷的检出。

3.2 荧光渗透检测分析

叶片在制造过程中共进行了 3 次荧光渗透检测, 第一次和第二次检测时叶片为铸件毛坯状态, 第三次检测时为机加状态, 3 次检测均采用后乳化法荧光渗透检测, 检测灵敏度 3 级。毛坯状态和机加状态的检测在两条不同的荧光渗透检测线上进行, 毛坯状态渗透前叶片采用 741 金属洗涤剂进行清洗预处理, 机加状态渗透前叶片采用 ARDROX 6333A 洗涤剂进行清洗预处理, 其余检测材料和检测控制方法完全一致。渗透剂采用 ZL-27A(渗透时间为 10 min, 滴落时间为 20 min), 乳化剂采用 ZR-10B(乳化时间为 1.5 min), 干粉显像剂采用 ZP-4B(显像时间控制在 10 min 到 3 h 之间), 检测材料均为美国磁通公司生产。检测过程中水压不大于 0.27 MPa, 气压不大于 0.17 MPa, 水洗过程均在黑光灯监控下进行, 以防止过清洗, 缺陷评定在黑光辐照度 1 200 $\mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$ ~5 000 $\mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$, 环境白光不大于 20 lux 的环境下进行, 3 次荧光渗透检测均未发现该叶片存在裂纹显示。

发动机试车后的故障检测时, 该叶片的荧光渗透检测与机加状态下检测为同一条荧光渗透检测线, 发现叶片叶身部位存在裂纹显示。结合该裂纹产生于铸造过程, 且在试车过程中未出现扩展的金相分析结论, 对制造过程中裂纹产生和荧光渗透检测未检出的原因进行了分析。通过复查发现, 该批叶片叶身内浇口采用手工黏接, 根部转角 R 采用毛

笔刷蜡而成,易形成直角、尖角,而在合金凝固收缩过程中因应力集中会产生铸造裂纹^[3]。故障件裂纹与叶身内浇口根部位置(见图 5)对应。由于内浇口位置非叶片最大应力区,因此试车过程中并未扩展。由于本批叶片铸件采用大气消应力,裂纹内部可能存在氧化物填充导致裂纹表面开口堵塞,在制造过程中荧光渗透检测无法有效检出缺陷,而后续发动机试车的高强度振动导致氧化填充物逐渐脱落,裂纹表面开口打开后分解而在荧光渗透检测中呈线性显示。

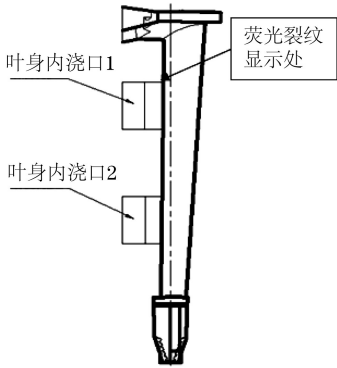


图 5 叶身内浇口对应位置

4 改进措施

为了尽量避免内浇口位置产生应力裂纹,以及保证裂纹在后续荧光渗透检测过程中的可检出性,对蜡模工艺、热处理工艺和荧光渗透检测前的表面处理工艺进行了相关改进。

4.1 蜡模工艺改进

针对蜡模内浇口采用手工黏接,黏接部位与叶

身转接不圆滑,合金凝固收缩过程中因应力集中产生铸造裂纹的问题,后续已对模具该部位进行修模,蜡模内浇口连接部位采用模具成型,从源头降低应力裂纹产生的可能性。

4.2 热处理及叶片表面状态改进

为了避免大气消应力过程中产生氧化物堵塞缺陷表面开口,将涡轮叶片由大气消应力更改为真空消应力^[4];荧光渗透检测前的吹砂由干吹砂处理改为水吹砂处理,改善叶片荧光渗透检测前的表面状态,尽可能充分暴露缺陷表面开口。

5 结语

采取上述改进措施后,在制造过程和按照试车大纲对多台发动机进行故障检测时,涡轮叶片相关位置未再发现荧光线性显示。试验结果也表明,进行荧光渗透检测前应改善零件的表面状态,使缺陷的表面开口充分暴露才能保证荧光渗透检测结果的可靠性。

参考文献:

[1] 郝红利,王明贞,胡宗纯,等. 镍基单晶涡轮叶片弹塑性应力晶体取向优化[J]. 材料导报,2014,28(增 1): 379-382.
[2] 郑世才. 射线检测[M]. 北京:机械工业出版社, 2004.
[3] 王自明. 无损检测综合知识[M]. 北京:机械工业出版社,2005.
[4] 徐亚亚,李泽,刘兴勇. 某机高压涡轮叶片荧光渗透检测工艺改进[J]. 无损检测,2015,37(9):69-71.

(上接第 6 页)

[5] TOTEMEIER T C, WRIGHT J K. Residual stress determination in thermally sprayed coatings—a comparison of curvature models and X-ray techniques [J]. Surface and Coatings Technology, 2006, 200 (12/13):3955-3962.
[6] BETZ B, RAUSCHER P, HARTI R P, et al. In-situ visualization of stress-dependent bulk magnetic domain formation by neutron grating interferometry [J]. Applied Physics Letters, 2016, 108 (1): 012405.
[7] 沈功田, 郑阳, 蒋政培, 等. 磁巴克豪森噪声技术的发展现状[J]. 无损检测, 2016, 38(7):66-74.

[8] HOFFMANN J, MEYENDORF N, ALTPETER I. Characterization of softmagnetic thin layers using barkhausen noise microscopy[J]. Mrs Proceedings, 2001, 674:6.
[9] 蒋政培, 凌张伟, 王敏. 磁巴克豪森噪声技术在应力评估中的研究进展[J]. 无损检测, 2018, 40(8):67-74.
[10] 何存富, 丁冬冬, 刘秀成, 等. 65Mn 钢板电镀镍层厚度的增量磁导率检测方法[J]. 北京工业大学学报, 2020,46(7):727-733.
[11] CALLEGARO L, PUPPIN E. Stress dependence of coercivity in Ni films; thin film to bulk transition[J]. Applied Physics Letters, 1996, 68(9):1279-1281.