

航空发动机涡轮叶片气膜孔微裂纹检测

秦基展¹ 敖波¹ 杨会敏² 周炜璐² 张晓峰²

(1.南昌航空大学无损检测技术教育部重点实验室; 2.核工业工程研究设计有限公司)

摘要 以加工人工模拟缺陷的涡轮叶片及含微裂纹缺陷的涡轮导向叶片为对象,研究微焦点射线成像方法对气膜孔微裂纹的检出能力。通过光学显微镜对涡轮叶片人工模拟缺陷标定实际尺寸,使用微焦点射线成像方法能有效检出涡轮叶片中 7 条人工模拟缺陷。对人工模拟缺陷进行尺寸测量,微焦点射线成像检测尺寸测量结果与标定结果一致。另外,设计了涡轮导向叶片微焦点射线成像检测试验,采用微焦点放大成像方法能够检出涡轮导向叶片后缘中长度为 392 μm、宽度为 21 μm 的微裂纹。结果表明,微焦点成像方法能满足气膜孔微裂纹工程检测需要。

关键词 涡轮叶片;气膜孔;微焦点成像;微裂纹

中图分类号 TG249.5;TG247 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.08.027

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Detection of Microcracks around Film Holes in Aeroengine Turbine Blade

Qin Jizhan¹, Ao Bo¹, Yang Huimin², Zhou Weilu², Zhang Xiaofeng²

(1.Key Laboratory of Nondestructive Testing, Ministry of Education, Nanchang Hangkong University;
2.Nuclear Industry Research and Engineering Co., Ltd.)

Abstract: The detection ability of film hole microcracks by microfocus X-ray imaging method was analyzed for turbine blade machined with artificial simulated defects and turbine guide blade with microcracks. The actual size of artificial simulated defects in turbine blade was calibrated by optical microscope, and seven artificial simulated defects in turbine blade can be effectively detected by the microfocus X-ray imaging method. In addition, the size of artificial simulated defects was measured, and the size measurement results of artificial simulated defects are consistent with the calibration ones. In addition, the microfocus X-ray imaging experiment was designed for turbine guide blade, and the microcracks with length of 392 μm and width of 21 μm in the trailing edge of the turbine guide blade was detected by the microfocus amplification imaging method. The results show that the microfocus imaging method can meet the needs of engineering detection of microcracks in the film hole.

Key Words: Turbine Blade, Film Hole, Microfocus Imaging, Microcrack

涡轮叶片是航空发动机的核心部件之一,工作温度高、应力复杂、工作环境恶劣,是故障多发的零件之一,严格控制涡轮叶片的制造品质是发动机生产企业叶片制造中的关键问题^[1,2]。为了使涡轮叶片在更高温度下工作,需要采取多种冷却手段,气膜冷却是涡轮叶片常用冷却方式之一^[3,4]。目前气膜孔的加工方式主要分为两种^[5]:基于实体工具的特种加工,如电火花加工;利用高能束流的特种加工,如飞秒激光、电液束流加工。使用电火花加工或者激光打孔技术,在加工过程中均可能会产生不同程度的重铸层和微裂纹。气膜孔微裂纹的存在对涡轮叶片安全服役造成极大的隐患,在高温蠕变与疲劳作用下可能会引起叶片断裂^[6~8]。因此,对涡轮叶片微裂纹进行无损检测具有重要意义。

涡轮叶片微裂纹进行无损检测具有重要意义。

为了检测涡轮叶片裂纹,于霞等^[9]设计了一种差激励涡流探头,采用镜像延拓经验模态分解(EMD)重构与小波奇异性检测相结合的方法能够检测出长度最短为 3 mm、宽度为 0.1 mm、深度为 0.3 mm 的预制裂纹。李永君等^[10]通过数字 X 射线影像(CR)检测试验,实现了透平叶片前缘和后缘深度≥0.6 mm、长度≥2 mm 裂纹缺陷的有效检测。马立印等^[11]使用超声相控阵检测技术检出了叶片上的人工模拟裂纹缺陷,缺陷长度为 5 mm、宽度为 0.2 mm、深度为 0.2 mm。深度和宽度是影响裂纹缺陷检测的重要参数,由于微裂纹尺度更小,涡流检测、CR 检测与超声检测方法难以满足涡轮叶片

收稿日期:2020-10-20;修改稿收到日期:2020-11-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(JCKY2019401D001);国家自然科学基金资助项目(51561025)

第一作者简介:秦基展,男,1997 年出生,硕士研究生,南昌(330063),E-mail:1046829976@qq.com

通信作者:敖波,男,1979 年出生,教授,南昌(330063),E-mail:aobo0328@163.com

引用格式:秦基展,敖波,杨会敏,等. 航空发动机涡轮叶片气膜孔微裂纹检测[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(8):1 053-1 056.

QIN J Z, AO B, YANG H M, et al. Detection of microcracks around film holes in aeroengine turbine blade[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(8):1 053-1 056.

气膜孔微裂纹检测要求。PARISH R W 等^[12]利用焦点尺寸为 15 μm 的射线照相检测系统,在 12 倍放大成像条件下检测出叶身背侧直径为 20 μm 的金属丝,同样试验条件下对涡轮叶片叶身切片进行检测,能够观测到直径为 30 μm 的微孔缺陷。张祥春等^[13]使用工业 CT 对航空发动机涡轮叶片进行检测,能够有效检出宽度为 112.03 μm 的线型夹渣缺陷。与射线照相检测技术、工业 CT 技术相比,微焦点射线成像技术能实现更小尺度裂纹的检测。由于涡轮叶片气膜孔微裂纹检测难度大,工程上要求气膜孔周边能发现长度为 500 μm 、宽度为 22 μm 的微裂纹。而对于气膜孔微裂纹检测,目前相关报道很少。

本课题以含人工模拟线型缺陷的某型涡轮叶片、含微裂纹缺陷的某型涡轮导向叶片为对象,针对长度为 500 μm 、宽度为 22 μm 范围内微裂纹,使用微焦点放大成像方法研究其检测能力。

1 试验材料及方法

1.1 微焦点射线 DR 放大成像原理

射线 DR 成像原理:射线机发射的 X 射线束透过被检工件后以不均匀的射线强度照射在平板探测器上,平板探测器的闪烁体层将射线转换为荧光发射,荧光被非晶硅光电二极管接收,经光电转换为电荷存储在薄膜晶体管电容内,通过读出电路将电信号转换为数字信号传输至计算机,形成数字图像。

微焦点射线 DR 放大成像是采用微米级焦点的射线源发射射线束,与射线 DR 成像原理一样,以平板探测器接收射线获取数字图像,见图 1。与一般射线 DR

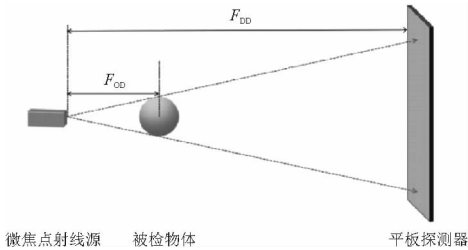


图 1 微焦点放大成像示意图

Fig.1 Schematic diagram of microfocus imaging

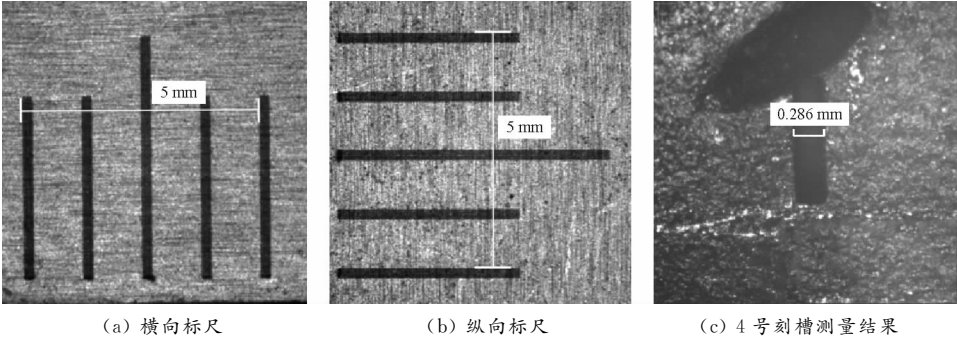


图 3 光学显微镜测试结果

Fig.3 Optical microscope test results

成像方法相比,由于射线机焦点尺寸更小,成像时被检工件可以靠近射线源得到更高放大倍数的图像,由于几何不清晰度可忽略,也能获得清晰成像。成像放大倍数由射线源焦点到平板探测器的距离(F_{DD})与射线源焦点到被检工件的距离(F_{OD})的比值确定。

1.2 试验对象

检测对象选用某型空心涡轮叶片、某型涡轮导向叶片。叶身是涡轮叶片的主要部分,主要包括前缘、后缘、叶盆、叶背 4 个部分,叶身表面通常为扭曲的变截面曲面,形状复杂。采用冷却技术能有效提升涡轮叶片的耐高温性能,气膜冷却即在涡轮叶片叶身设计制造大量的气膜孔,冷却空气从叶片冷却流道内顺着小孔流出到叶片外表面,形成一层气膜,将叶片表面与高温燃气隔开,从而达到冷却涡轮叶片的目的。

1.3 人工模拟缺陷加工

为研究射线检测对叶片气膜孔微裂纹的检测能力,在某航空发动机涡轮叶片气膜孔周加工人工刻槽模拟裂纹缺陷,叶片形貌及模拟缺陷编号见图 2。在涡轮叶片表面加工 7 条人工模拟裂纹,其中叶盆侧 3 条,叶背侧 4 条。

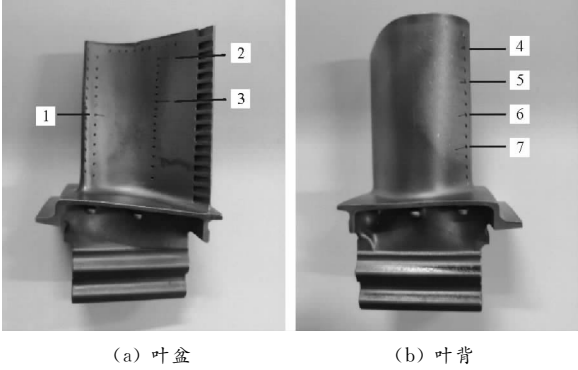


图 2 人工模拟缺陷分布

Fig.2 Distribution of artificial simulated defects

采用 Carl-Zeiss Axioscope vario 正置光学显微镜对人工模拟裂纹缺陷宽度进行测定,其宽度(1~7 号)实际测量结果分别为 0.200、0.178、0.180、0.286、0.233、0.188、0.177 mm。显微照相定标见图 3。图像分辨率

为2 048×2 040,图中线条表征实际距离为 5 mm。测量 5 次取平均值,根据软件计算得到标尺为 3.16 $\mu\text{m}/\text{pix}$ 。图 3c 为 4 号人工模拟缺陷单次测量结果。

1.4 试验设备

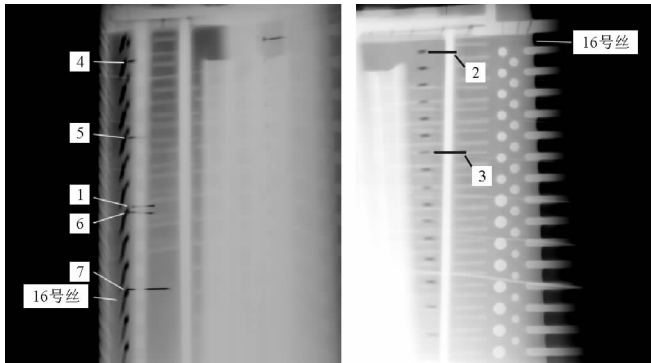
对加工后的涡轮叶片以及含微裂纹缺陷的涡轮导向叶片进行微焦点射线成像检测。试验中采用射线检测设备如下:射线源为 FineTec 公司 225 kV 微焦点射线源,最小焦点尺寸为 5 μm ;平板探测器为 XRPad2 4336 型平板探测器,闪烁体为碘化铯晶体,单个探测器单元尺寸为 100 $\mu\text{m}\times 100\ \mu\text{m}$,成像矩阵为 3 524×4 288。

1.5 透照布置及参数选择

涡轮叶片叶身属于变截面工件,厚度变化较大,且涡轮叶片人工模拟缺陷取向不同,一次透照无法实现对所有人工模拟缺陷的检测^[14]。对含人工模拟缺陷涡轮叶片进行射线照相试验,用两次透照完成对叶身不同位置的人工模拟缺陷检测,第 1 次透照叶身前缘区域,第 2 次透照叶身后缘区域。涡轮叶片射线照相试验中射线源管电压为 160 kV,管电流为 300 μA ,探测器积分时间为 2 000 ms,采集 30 帧做平均处理,叶片与射线源距离为 100 mm,焦距为 800 mm,放大倍数为 8 倍。涡轮导向叶片微焦点放大成像试验中,透照参数如下:管电压为 120 kV,管电流为 150 μA ,积分时间为 4 000 ms,焦距为 800 mm。

2 试验结果与分析

依据上述透照参数对微焦点射线源与平板探测器进行设置,将得到的原始图像进行处理^[15],得到透照结果见图 4。7 条人工模拟缺陷分别能清晰检出,见图 4a、图 4b,像质计灵敏度通过 Ni 丝型像质计(HB 7684-2000)评价。在图 4a 中可识别 16 号丝,检测灵敏度高,可检出第 1、4、5、6、7 号人工模拟缺陷;在图 4b 中可识



(a) 前缘

(b) 后缘

图 4 涡轮叶片叶身透照结果

Fig.4 Radiographic results of turbine blade

别 16 号丝,可检出第 2、3 号人工模拟缺陷。为实现人工模拟缺陷检测结果定量处理,需先计算图像标尺,以此对人工模拟缺陷宽度进行测量。为了减小标定误差,以像质计 10 号丝为基准计算标尺,根据图像中缺陷形貌对人工模拟缺陷宽度进行测量。

由于 10 号丝的直径为 0.4 mm,在图像中测量其直径方向所占像素点个数,测量 5 次取平均值,结果约为 30 个像素,计算得到标尺为 13.33 $\mu\text{m}/\text{pix}$ 。在图像中沿人工模拟缺陷宽度方向进行测量得到测试值,将通过光学显微镜测定的人工模拟缺陷宽度作为实际值,计算检测结果同模拟缺陷实际宽度的绝对误差与相对误差,结果见表 1。结果表明,在 7 组数据中,最大绝对误差为 0.013 mm,最大相对误差为 6.50%,最小绝对误差为 0.004 mm,最小相对误差为 2.10%。

表 1 人工模拟缺陷测量值与误差

Tab.1 Measurement value and error of artificial simulated defects

序号	宽度测试值/mm	实测宽度/mm	绝对误差/mm	相对误差/%
1	0.213	0.200	0.013	6.50
2	0.187	0.178	0.009	5.06
3	0.173	0.180	0.007	3.89
4	0.280	0.286	0.006	2.10
5	0.240	0.233	0.007	3.00
6	0.197	0.188	0.009	4.79
7	0.181	0.177	0.004	2.26

涡轮叶片人工模拟缺陷尺寸偏大,为了研究微焦点放大成像检测方法对微裂纹缺陷的检测能力,针对含微裂纹的某涡轮导向叶片进行微焦点射线照相试验,叶身后缘边缘有数量较多、排列密集的微裂纹群。为了研究不同放大倍数下对微裂纹检出影响,在相同透照工艺参数下,放大倍数分别为 5、10、15 和 20 倍。选取同一位置的微裂纹,将不同放大倍数下成像结果均放大 4 倍,截取 200×200 像素范围的局部结果,见图 5。平板探测器单元尺寸为 100 $\mu\text{m}\times 100\ \mu\text{m}$,放大倍数为 5 时,单个探元表征实际尺寸为 20 μm ,此时宽度小于 30 μm 的微裂纹几乎不可见,当放大倍数为 10 时,单个探元表征实际尺寸为 10 μm ,试验结果较为清晰。随透照放大倍数继续提高,图像质量明显提升,微裂纹缺陷更容易被检出。

在放大倍数为 20 的条件下,在叶身放置 Ni 丝型像质计进行试验,依据灰度分布图像计算标尺,图 6 为试验结果。基于线灰度分布图计算标尺,以 10 号丝为基准计算标尺,根据线灰度分布图和软件计算得到标尺为 5.71 $\mu\text{m}/\text{pix}$ 。对微裂纹尺寸进行测量,结果保留到微米级。图 6b 中 1 号微裂纹长度为 392 μm 、宽度为 21 μm ,2 号微裂纹长度为 470 μm 、宽度为 29 μm 。结果表明,使用微焦点放大成像方法能够有效检出长度为 500 μm 、宽度为 22 μm 以内的微裂纹。

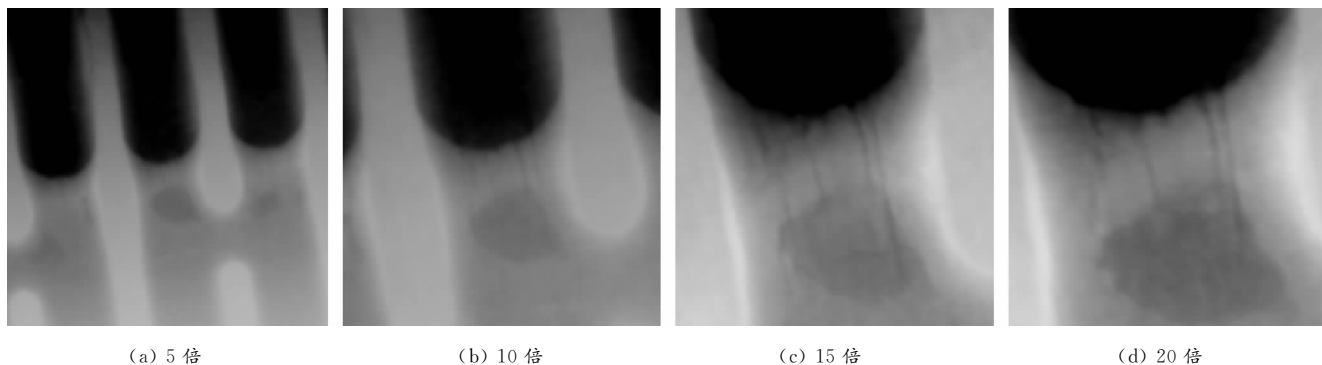


图 5 不同放大倍数下涡轮导向叶片透照结果

Fig.5 Radiographic results of turbine guide blade under different magnification

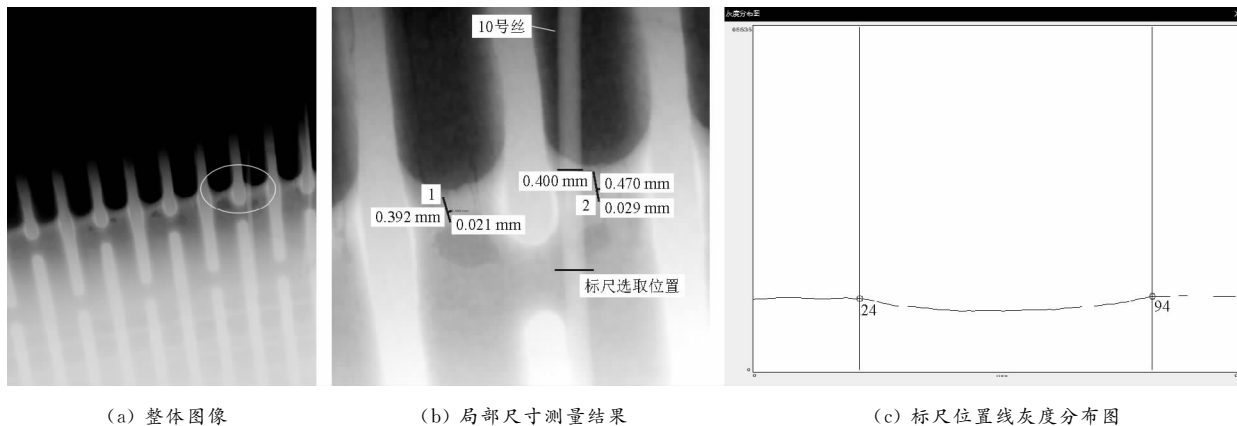


图 6 微裂纹尺寸测量结果

Fig.6 Size measurement of microcracks

3 结 论

(1) 涡轮叶片人工模拟缺陷检测结果表明,微焦点放大成像方法能有效检出 7 条人工模拟缺陷,试验结果测量值与实际尺寸绝对误差不大于 0.013 mm,相对误差不超过 6.50%。

(2) 涡轮导向叶片微焦点放大成像试验结果表明,微焦点射线成像方法能够有效检出长度为 392 μm 、宽度为 21 μm 的微裂纹,能满足涡轮叶片气膜孔微裂纹工程检测需要。

参 考 文 献

[1] 敖波,周笔文,王婵,等.精铸涡轮叶片 X 射线 CR 成像[J].特种铸造及有色合金,2016,36(5):508-512.

[2] 黄冬琴.航空发动机精密铸件射线 CR 工艺研究[D].南昌:南昌航空大学,2010.

[3] 卫海洋,徐敏,刘晓曦.涡轮叶片冷却技术的发展及关键技术[J].飞航导弹,2012(2):61-64.

[4] TENG S, HAN J C, POINSATTE P E. Effect of film-hole shape on turbine-blade film-cooling performance[J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 2001, 15(3): 257-265.

[5] 贾海妮.航空叶片异型气膜孔飞秒激光加工方法研究[D].西安:中国科学院研究生院(西安光学精密机械研究所),2013.

[6] 李洋,佟文伟,张开阔,等.发动机高压涡轮导向叶片裂纹失效分析

[A]. 中国科学技术协会、贵州省人民政府.第十五届中国科协年会第 13 分会场:航空发动机设计、制造与应用技术研讨会论文集[C]. 贵阳,2013.

[7] 胡霖,佟文伟,高志坤,等.DD6 镍基单晶涡轮转子叶片失效分析[J].航空发动机,2016,42(4):81-86.

[8] 史亦韦,梁菁,何方成.航空材料与制作无损检测技术新进展[M].北京:国防工业出版社,2012.

[9] 于霞,张卫民,邱忠超,等.航空发动机涡轮叶片裂纹检测信号特征提取[J].兵工学报,2014,35(8):1 267-1 274.

[10] 李永君,肖俊峰,高松,等.燃气轮机透平叶片射线 CR 检测技术研究[J].特种铸造及有色合金,2018,38(9):985-987.

[11] 马立印,李洋,周正干.整体叶盘叶片焊缝裂纹相控阵超声检测[J].北京航空航天大学学报,2017,43(9):1 900-1 908.

[12] PARISH R W, CASON D W J. High definition radiography of cast turbine blades as a method of detecting and evaluating the incidence of microporosity[J]. NDT International, 1977, 10(4): 181-185.

[13] 张祥春,周言贤,刘安,等.航空发动机涡轮叶片的三维 CT 检测[J].无损检测,2017,39(8):34-36,40.

[14] 李兵,李章兵,陈磊.燃气轮机透平叶片数字射线检测分区及透照参数确定方法[J].西安交通大学学报,2019,53(10):31-39.

[15] HASSLER U, REHAK M, EZRT F. An image processing approach for radiosopic inspection of turbine blades[A].2011 International symposium on digital industrial radiology and computed tomography[C]. Berlin, Germany, 2011.

(编辑:刘卫)