

基于微焦点工业 CT 的高压涡轮叶片缺陷检测技术

李新越¹, 杨 龙², 孙春贵¹, 李兴捷¹, 刘 洋¹

(1. 中国机械总院集团沈阳铸造研究所有限公司 高端装备铸造技术全国重点实验室, 辽宁沈阳 110022;

2. 深海精密科技(深圳)有限公司, 广东深圳 518107)

摘要: 高压涡轮叶片是航空航天用发动机的核心部件, 其铸造质量是影响发动机性能的主要因素之一。由于叶片结构复杂, 铸造缺陷多, 成品合格率低, 必须对其进行高精度的无损检测。本文采用微焦点工业CT对铸造高压涡轮叶片进行CT扫描与重建, 通过投影图像使用滤波反投影算法得到了叶片的三维数据和断层图像, 分析了透照间隔角度对缺陷识别的影响, 对内部结构缺陷如疏松等进行可视化分析。

关键词: 工业CT; 高压涡轮叶片; 疏松

航空航天用发动机涡轮叶片作为涡轮段的重要组成部件, 高温高压燃气在涡轮中膨胀, 推动涡轮高速旋转以带动压气机产生动力^[1]。在长期高温、高压、应力复杂的条件下, 通过锻造成形的变形高温合金已经无法满足需求, 铸造高温合金逐步取代了上述工艺成为目前涡轮叶片制造的主要技术手段^[2]。涡轮叶片在高温高压燃气包围下工作, 承受热应力、气动力、离心力以及振动载荷等多种循环应力作用。铸造缺陷导致的高压涡轮叶片故障成为航空发动机失效的主要原因之一^[3], 因此准确地检测出涡轮叶片内部的铸造缺陷, 提高涡轮叶片的制造质量, 对于改进涡轮叶片铸造工艺, 保证航空发动机的飞行稳定性具有重大意义。

高压涡轮叶片的内部结构复杂, 工作环境恶劣, 对使用寿命和力学性能要求较高, 必须进行全面、准确的无损检测, 严格控制缺陷的种类和数量。传统的X射线检测方法由于二维图像检测灵敏度低, 对微小缺陷的检测能力不足, 导致缺陷不可见或不易见, 且不能进行量化分析, 无法对叶片内部的缺陷进行准确的定位和分级, 容易发生误检和漏检^[4]。

工业CT检测可以提供高精度的三维图像数据, 能够检测到微小的气孔、裂纹、夹杂等缺陷, 并对涡轮叶片内部缺陷进行准确的定量分析, 有效解决了缺陷的尺寸测量、密度测定以及空间定位等问题^[5]。通常情况下, 由于传统射线检测方法的灵敏度较低, 在叶片经过精加工前、后共需要两次射线照相法检测以提高叶片良品率, 以避免铸件检测未发现的废品精加工成本浪费。而在涡轮叶片铸造完成后直接进行高精度的CT检测筛选出质量合格的产品, 可以节约加工成本和检测时间, 提高生产效率, 加快产品研制进度。随着工业生产中的工件质量要求越来越高, CT检测技术逐渐成为生产工艺改进和产品质量监测的必要方法, 是理想的无损检测手段。

1 铸件结构及检测要求

以K24高压涡轮叶片材质为镍基高温合金。涡轮叶片由叶身、叶根以及榫头三部分组成。涡轮叶片整体重量约30 g, 铸件轮廓尺寸40 mm × 30 mm × 10mm。榫头厚度约5~10 mm, 叶身长度为30 mm, 弦长约15 mm, 厚度0.5~3 mm。选取一片铸造涡轮

作者简介:

李新越(1998-), 女, 主要研究方向为基于锥束CT的复杂构件快速三维重建方法。

通讯作者:

李兴捷, 男, 研究员, 硕士生导师。电话: 13704016509, E-mail: lixj@chinasrif.com

中图分类号: TG247

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2023)

07-0904-05

基金项目:

中央引导地方科技发展专项资金(2022JH6/100100011)。

收稿日期:

2023-03-14 收到初稿,

2023-06-01 收到修订稿。

叶片以及三片精加工涡轮叶片作为试验对象。

叶片各部位尺寸差异较大，在服役过程中，榫头受到轴疲劳应力的影响，严重影响叶片的服役时间。根据高压涡轮叶片检验标准中规定：叶片不允许有任何铸造缺陷。

采用传统射线检测方法如数字射线检测方法和射线照相法对叶片部分进行二维成像，如图1所示。在数字射线检测方法中，榫头部分榫齿的厚度差较大，由

于图像重叠和厚度原因导致无法检测出缺陷。在射线照相法中，叶片排布方式对缺陷成像效果影响较大，例如叶背向下平放时，射线透照角度不能对叶片排气边保持垂直透照，导致部分线性缺陷无法检出。

在工业CT检测中，通过重建算法得到切片序列，可以在不同切片位置观察到内部缺陷，所以本次检测试验将对高压涡轮叶片进行CT检测，并重点关注榫头部位缺陷情况。

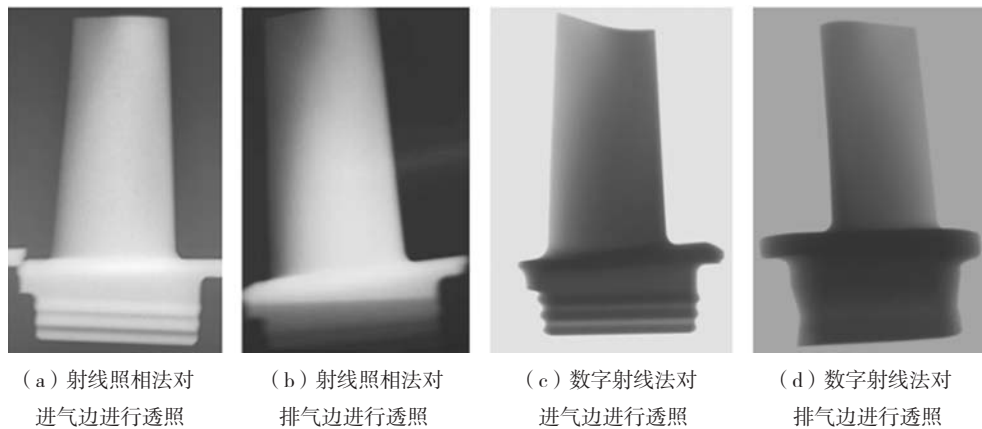


图1 射线照相法成像和数字射线成像

Fig. 1 Radiographic imaging and digital radiography

2 微焦点工业CT检测试验

试验用微焦点工业CT系统的型号为Seamaster Standard 500 DT，如图2所示。X射线发射装置由英国高美Gulmay小焦点500 kV射线机和德国Finetec微焦点225 kV开放式射线机构成，探测器为高美GMD4343HR



图2 微焦点工业CT检测设备

Fig. 2 Micro-focus industrial CT inspection equipment

高动态范围数字平板探测器，CT设备中的射线管和探测器的主要性能参数如表1所示。

开启工业CT系统，对射线源系统进行训机及预热20 min。首先完成暗场校准，暗场校准完成后，确保转台上无工件，调节射线源输出功率，连续进行三次不同射线强度下的明场校准。将叶片放置于转台中央，扫描前首先对叶片进行DR照射成像，通过2D采集调整好合适的扫描参数。开启射线源，同步调整射线源和探测器位置使得叶片成像位于探测器中心位置处。

保证射线源、转台、探测器中心在同一直线上，继续将探测器向射线源方向移动，确定合适的焦距和图像放大比，使得叶片图像与整幅CT图像占比在2/3左右。调整射线剂量使得X射线将叶片榫头最厚处约25 mm穿透，同时，叶身最薄处约3 mm不能被过曝。选择去噪叠加图像数量为4，采取多帧叠加的方式降低投影噪声水平。确定扫描参数如表2所示，设置好描参

表1 Seamaster Standard 500 DT设备参数

Table 1 Seamaster Standard 500 DT main component parameters

射线管	电压范围/kV	电流控制精度/mA	最大输出功率/W	JIMA分辨率/ μm
FineTec-225	20~225	0.01	300	2
探测器	成像区域/mm	像素矩阵	像素尺寸/ μm	A/D转换 (bits)
GMD4343HR	4302	30 722	139	16

表2 CT检测扫描参数
Table 2 CT detection scan parameters

扫描电压/kV	扫描电流/mA	投影间隔角/(°)	切片间距/mm	SOD/SDD
210	0.7	0.5	0.15	97/825 mm

数后, 切换3D模式, 采用锥束CT扫描方式采集投影数据, 完成叶片扫描与数据采集, 采集不同角度下的投影图像如图3所示, 通过FDK重建算法对投影图像进行重建得到高压涡轮叶片重建三维模型如图4所示。

3 检测结果及分析

3.1 缺陷的定位及测量

将采集的投影数据导入CT重建软件中, 结合叶片尺寸大小, 综合考虑帧率最佳放大比、扫描角度等扫描参数对重建质量的影响, 选择合适的重建参数, 根据滤波反投影算法对投影数据进行三维重建, 通过三维分析软件对CT切片图像进行可视化和后处理, 得到叶片 $1\ 024 \times 1\ 024 \times 1\ 024$ 三维体数据信息, 以及 $xy/yz/xz$ 三个方向各1 024张的16位灰度断层图像。调节窗宽窗位改善图像的对比度和清晰度, 得到叶片三维数据在 xy 平面上的不同位置缺陷断层图像如图5所示, 叶片榫头处的疏松缺陷数量众多, 分布密集, 叶身存在少量气孔缺陷。

试验结果采用DeepPRECISION三维CT重建及可视化软件, 可以在三维CT图像数据上进行内部缺陷定位、测量和任意角度切面成像。

在高压涡轮叶片铸造成形过程中, 容易造成孔洞

类、裂纹类、夹杂类缺陷, 减少叶片服役寿命, 引发叶片高温疲劳断裂。分别对精加工后和加工前的铸造

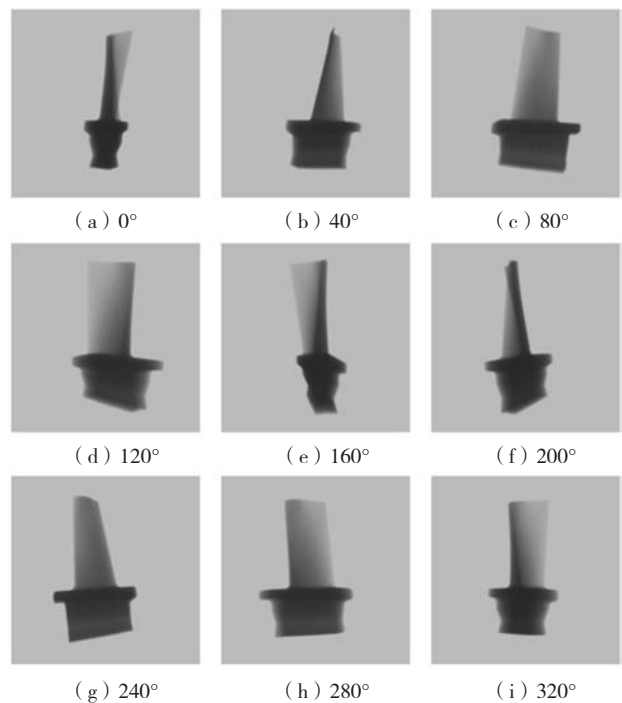


图3 铸造高压涡轮叶片投影图像

Fig. 3 Casting high-pressure turbine blade projection image

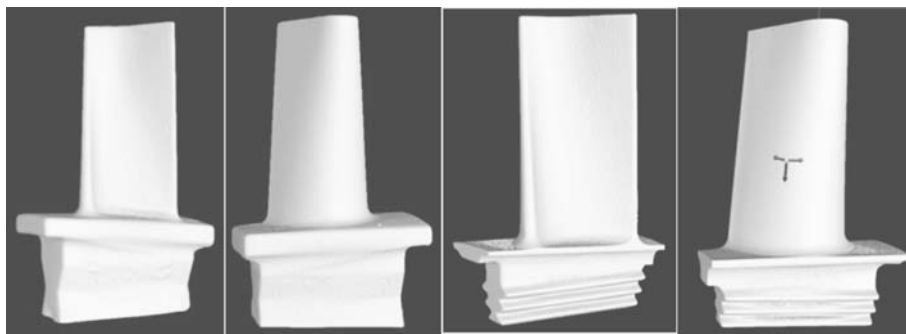


图4 高压涡轮叶片三维模型

Fig.4 3D model of high-pressure turbine blade

叶片进行CT扫描和图像重建, 获取涡轮叶片内部结构与缺陷情况, 沿Z轴截取断层图像。对比两枚叶片榫头处的缺陷灰度图像如图5所示。图5a为铸造叶片缺陷CT图像, 榫头处缺陷的灰度值显著低于周围区域, 呈现细小的空隙状, 符合疏松缺陷特征, 尺寸较小, 但足

以影响叶片的性能和使用寿命。图5b为加工叶片缺陷CT图像, 榫头处缺陷由相互连通的空隙组成, 无明显的边界特征, 其分布面积较大, 定性为海绵状疏松缺陷, 且集中在用于装配叶片的榫头凹槽处, 严重影响叶片的机械性能, 在高温高压、复杂应力条件下极易

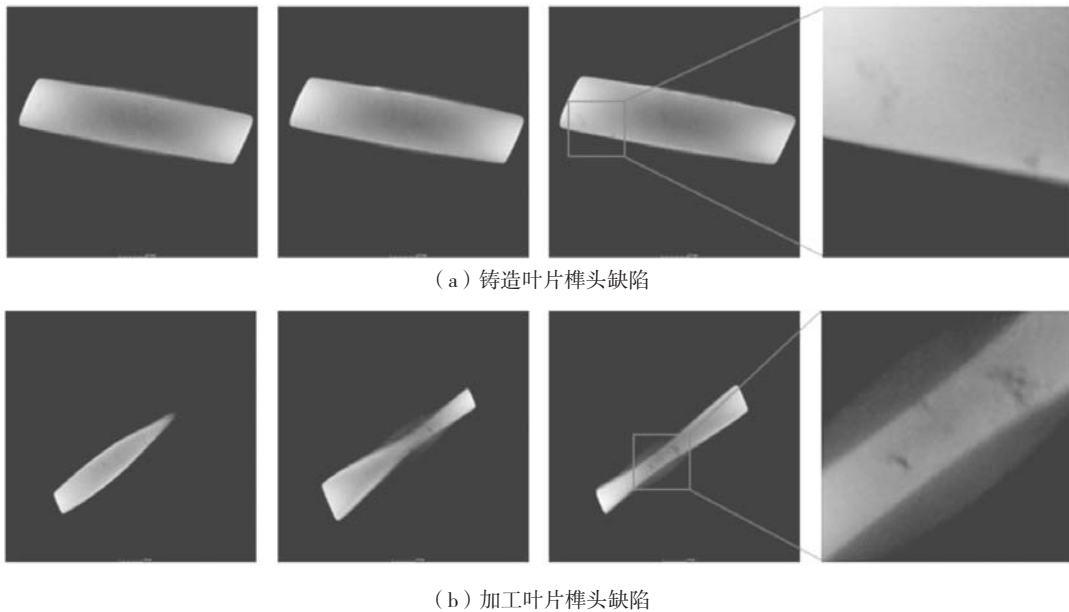


图5 铸造叶片榫头缺陷及加工叶片榫头缺陷
Fig. 5 Cast blade tenon defects and processing blade tenon defects

发生疲劳断裂，增加发动机的故障风险。因此，若使用射线检测法，为了避免漏检缺陷，必须在精加工后再进行一次检测，筛选掉具有微小缺陷的不合格件，增加加工成本和检测成本。CT检测能够在叶片铸造阶段完成后筛选出所有含有缺陷的叶片，降低叶片加工成本和时间成本。

3.2 CT 透照角度对于缺陷检测的影响

为了获得质量较好的重建图像，大多数情况对物体进行间隔角度较小的密集扫描，在实际射线检测中，由于扫描时间过长，为了提高基于锥束CT方法的检测效率，多采用稀疏视角的方式进行锥束CT的扫

描。

对高压涡轮叶片进行锥形束扫描过程中，分别采集角度间隔为 0.5° 、 1° 、 2° 、 5° 的投影数据。在投影数量足够多的情况下，如图6d，缺陷的尺寸、位置清晰可见。随着投影数据的减少，重建断层图像中的伪影更加严重，图像噪声对铸件检测的干扰能力逐渐增强。当间隔角度为 5° 时，如图6a，缺陷处和铸件的灰度值差距缩小，稀疏角扫描产生的图像伪影和噪声将部分微小缺陷湮没。因此选择采集间隔角为 2° ，能够在保证重建图像质量的条件下，减少CT扫描时间，提高检测效率。

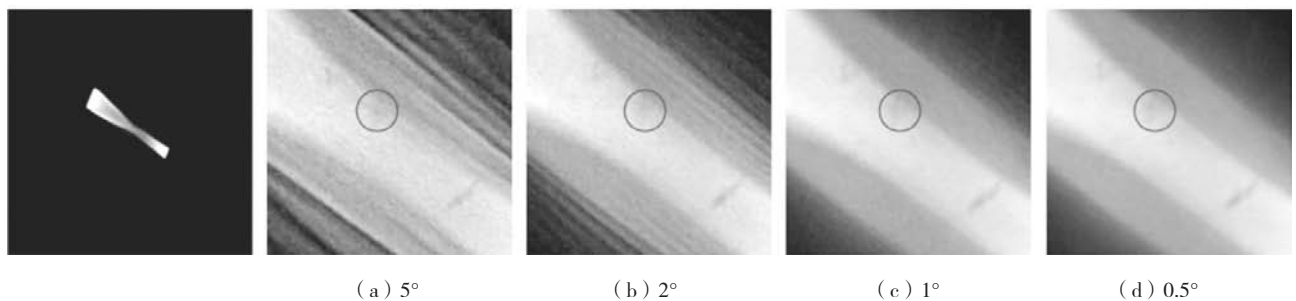


图6 投影数量对重建图像的影响
Fig. 6 Effect of projection quantity on reconstructed image

4 结语

试验采用微焦点工业CT设备，对精加工前后的

高压涡轮叶片分别进行缺陷检测，优化并选择合适的CT扫描参数，通过FDK重建算法重建出缺陷的断层图

像。分析了透照角度对缺陷图像的影响,在保证重建质量的前提下,减少扫描时间,实现缺陷的精准识别和定位,检测结果能够满足高压涡轮叶片的缺陷无损

检测需求,为高压涡轮叶片的铸造工艺改进提供了精准的质量信息。

参考文献:

- [1] 宣海军, 洪伟荣, 吴荣仁. 航空发动机涡轮叶片包容试验及数值模拟 [J]. 航空动力学报, 2005, 20 (5): 762-767.
- [2] 刘维伟. 航空发动机叶片关键制造技术研究进展 [J]. 航空制造技术, 2016, 59 (21): 50-56.
- [3] 马楠楠, 陶春虎, 何玉怀, 等. 航空发动机叶片多轴疲劳试验研究进展 [J]. 航空材料学报, 2012, 32 (6): 44-49.
- [4] 陈立明. 工业CT与二维X-Ray检测能力差异对比研究 [J]. 铸造, 2021, 70 (12): 1453-1456.
- [5] 蒋绍青, 栾传彬, 满月娥, 等. 工业 CT 在大型复杂机匣检测中的应用 [J]. 无损检测, 2017, 39 (2): 18-21.

High-Pressure Turbine Blade Defect Detection Technology Based on Micro-Focus Industrial CT

LI Xin-yue¹, YANG Long², SUN Chun-gui¹, LI Xing-jie¹, LIU Yang¹

(1. National Key Laboratory of Advanced Casting Technologies, Shenyang Research Institute of Foundry Co., Ltd., CAM, Shenyang 110022, Liaoning, China; 2. Deep Sea Precision Technology (Shenzhen) Co., Ltd., Shenzhen 518107, Guangdong, China)

Abstract:

High-pressure turbine blades are the core components of aerospace engines, and their casting quality is one of the main factors affecting engine performance. Due to the complex structure of blade, many casting defects and low qualified rate of finished product, it is necessary to carry out high-precision nondestructive testing. In this paper, micro-focus industrial CT was used to conduct CT scanning and reconstruction of cast high-pressure turbine blades. Three-dimensional data and tomography images of blades were obtained through projection images and filtered back projection algorithm. The influence of transmittance interval Angle on defect identification was analyzed, and the internal structural defects such as porosity were visually analyzed.

Key words:

industrial CT; high pressure turbine blades; porosity