

引文格式: 胡童童, 王江, 段方苗, 等. 大尺寸空心透平叶片全流程尺寸测量研究[J]. 航空制造技术, 2025, 68(14): 92-98.

HU Tongtong, WANG Jiang, DUAN Fangmiao, et al. Study on whole process dimension measurement of large size hollow turbine blades[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2025, 68(14): 92-98.

大尺寸空心透平叶片全流程尺寸测量研究*

胡童童¹, 王江¹, 段方苗², 帅三三¹, 玄伟东¹, 任忠鸣¹

(1. 上海大学材料科学与工程学院省部共建高品质特殊钢冶金与制备国家重点实验室, 上海 200444;

2. 中国联合重型燃气轮机技术有限公司, 北京 100016)

[摘要] 为提高燃气轮机空心透平叶片制备合格率, 利用计算机断层扫描技术(CT)、三维扫描技术、超声等无损检测技术对熔模铸造透平叶片过程中关键阶段展开尺寸测量, 实现了陶瓷型芯-蜡模-模壳-叶片铸件的全过程尺寸检测。通过三维扫描测量结果对CT测量技术进行精度校准, 结果表明, CT技术对陶瓷型芯、蜡模的检测精度可以满足测量精度要求, 并将CT技术进一步应用于模壳尺寸的检测。此外, 利用工业CT检测陶瓷型芯、蜡模、模壳内腔及壁厚尺寸精度的同时, 可以实现对其内部裂纹及缩孔等缺陷的检测和评估。本研究建立的空心透平叶片制备全流程尺寸测量方法为保障空心透平叶片制备, 提高大尺寸空心透平叶片精密铸造成品合格率提供了有力数据支撑。

关键词: 空心透平叶片; 全流程尺寸测量; 计算机断层扫描技术; 三维激光扫描技术; 超声法

中图分类号: V232.4; TG2 **文献标志码:** A **DOI:** 10.16080/j.issn1671-833x.2025.14.092

Study on Whole Process Dimension Measurement of Large Size Hollow Turbine Blades

HU Tongtong¹, WANG Jiang¹, DUAN Fangmiao², SHUAI Sansan¹, XUAN Weidong¹, REN Zhongming¹

(1. State Key Laboratory of Advanced Special Steels, School of Materials Science and Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

2. China United Heavy Gas Turbine Technology Co., Ltd., Beijing 100016, China)

[ABSTRACT] In order to improve the qualification rate of gas turbine hollow turbine blades, non-destructive testing technologies such as X-ray computed tomography (CT), three-dimensional scanning (3D) and ultrasound were used to carry out dimensional measurement of turbine blades in key stages of investment casting, and the whole process of ceramic core, wax mold, mold shell and blade castings was realized. The results show that the CT technology can meet the measurement accuracy requirements of ceramic core and wax mold, and is further applied to the measurement of mold shell size. In addition, the dimensional accuracy of ceramic core, wax mold and mold shell, inner cavity and wall thickness can be detected and evaluated by using CT. The dimensional measurement method of the whole process of hollow turbine blade preparation established in this study provides strong data support for ensuring the preparation of hollow turbine blades and improving the qualified rate of large-size hollow turbine blade precision casting products.

Keywords: Hollow turbine blades; Whole process dimension measurement; Computed tomography technology; Three dimensional laser scanning technology; Ultrasonic method

* 基金项目: 国家自然科学基金(52271035); 上海市青年科技启明星项目(20QA1403800, 21QC1401500); 上海市科委项目(21511103600, 20511107700)。

重型燃气轮机是目前效率最高的热-功转换类发电设备,它的研发制造水平代表了一个国家的重工业水平^[1],其关键热端核心部件-透平叶片,被誉为“制造业皇冠上的明珠”^[2]。由于透平叶片服役环境复杂,导致其具有复杂的型腔,通常采用熔模铸造(IC)工艺生产。熔模铸造可以生产具有复杂型腔以及高精度尺寸的零件,因此被广泛应用在航空航天领域。而在熔模铸造过程中,为了获得最终尺寸合格的成品铸件,需要设计尺寸合理的模具,但因熔模铸造产品具有变截面、多维度和不受约束的特征,使得熔模铸造工艺复杂,流程较多,且每一个环节都会对叶片铸件尺寸精度产生重要的影响,因此空心透平叶片的控形变得十分困难。目前评估叶片形状精度基本指标为外形轮廓精度及壁厚精度,其中壁厚精度决定了叶片的冷却效率及强度^[3],而通过统计4种不同类型叶片失效原因发现^[4],绝大多数叶片是因为壁厚超差导致叶片不合格。因此,精准控制壁厚精度是制备合格空心透平叶片的重要条件。

熔模铸造工艺主要包括陶瓷型壳制备、蜡模压制、铸件浇注等环节,其中还包括陶瓷型芯的压制与烧结、蜡模冷却、模壳挂浆与脱蜡、铸件脱芯等,早在20世纪70年代,英国Morgan Certech、LED和美国Ross Ceramic已在氧化铝型芯的控形技术方面取得了显著的成效,并用于共晶合金的浇铸^[5-7];GE公司将其核心控形技术视为高度核心技术^[8];随后俄罗斯在超复杂冷却结构陶瓷型芯的制造方面克服种种困难,成功开发了一种能精确控形的制造工艺^[9]。但国外将透平叶片控形技术视为绝密,国内控形技术亟需开展。近几十年来,国内中国航发北京航空材料研究院、西北工业大学等单位经过多年的探索和研究,已在单晶透平叶片尺寸精度、尺寸稳定性及性能控制等方面取得了大量研究成果^[4,10],但针对空心透平叶片制备全流程尺寸测量方面研究较少。开展燃气轮机空心透平叶片全流程尺寸测量,有利于健全叶片制备过程全流程检测技术,掌握叶片熔模铸造过程中尺寸变化情况和误差传递规律,突破燃气轮机高温合金叶片制备过程控形难题,为制备质优形准的大尺寸空心透平叶片提供技术支撑。基于此,本文提出了基于X射线断层扫描(CT)、三维激光扫描、超声测厚等无损测量技术的空心透平叶片全流程尺寸测量和控制方法,对叶片制备过程中陶瓷型芯、蜡模、模壳、叶片等关键环节进行尺寸测量和缺陷评价,以此建立空心透平叶片全流程尺寸测量和控制方法。

1 空心透平叶片全流程尺寸测量方法

目前常用几何尺寸测量方法分为破坏性测量方法以及非破坏性测量方法,国内常见的测量方法有标准样

板法、三坐标测量机(CMM)、三维激光法、超声法、工业CT法等。标准样板法操作简单、方便,常用于现场批量生产,然而人工操作检测精度低、误差大,无法定量研究尺寸变形量且无法完成叶片熔模铸造全流程测量的数据累积。三坐标测量机(CMM)是目前国内外最常用的叶片尺寸检测方法,具有较高的精度和自动化水平,适合对具有复杂曲面的零件进行检测。但对于大尺寸叶片,三坐标测量机检测速度较慢、成本高且对测量表面有一定的限制,操作复杂。三维激光法检测精度较高,速度较快,但其要求测量物体表面对激光有较好的反射,由于蜡型是保证壁厚的关键,在使用三维激光法时,需在测量物体表面粘贴标记点,对蜡模后续挂浆会产生一定的影响。超声法检测精度较高、成本低,但由于超声法为手动测量,测量角度需要垂直于测量点,测量误差较大,操作复杂,且需要在测量物体表面涂抹耦合剂作为传导介质,对蜡模挂浆会产生一定的影响,最终导致铸件尺寸精度不合格。

近年来,计算机断层扫描(Computed tomography, CT)技术在无损检测领域备受关注,其应用领域十分广泛,在汽车制造领域用于检测零件内部缺陷、失效分析,在电子行业中用于芯片封装多余物检测、封装工艺改进和逆向设计,在航空航天领域中用于叶片尺寸、质量检测等。工业CT作为唯一一种可以同时检测任意形状零件内外部尺寸、缺陷的测量手段,利用X射线360°扫描待检测物品,根据X射线在被检测物体中的减弱与吸收特性、通过探测器采集投影数据,得到待测样品的二维投影图,并利用三维重构软件得到待测物品三维立体图像。其检测精度高、速度快、无污染、无破坏、可做批量检测,同时测量信号动态范围较高,数字化的测量结果更有利于信息的传输、处理等,其原理如图1所示。

如图2所示,本试验以某燃气轮机空心透平叶片为例,对烧结后陶瓷型芯、蜡模、模壳及叶片铸件的尺寸展开全流程检测,选用计算机断层扫描技术可同时实现对陶瓷型芯、蜡模及模壳内外部检测,利用三维激光法对

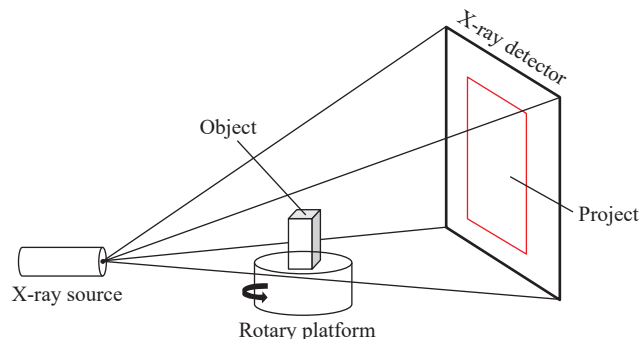


图1 计算机断层扫描原理示意图
Fig.1 Schematic diagram of computed tomography



图2 某燃气轮机空心透平叶片蜡模工业 CT 检测原理图
Fig.2 Schematic of industrial CT detection of hollow gas turbine blade wax mold

检测结果予以验证。某燃气轮机透平叶片高度约 365 mm、宽度约 190 mm、最大厚度约 90 mm,由于某燃气轮机透平叶片尺寸较大、X 射线无法完全穿透大尺寸叶片铸件,无法利用工业 CT 对其壁厚进行检测,因此选用超声法对关键位置壁厚展开测量,采用解剖法予以验证结果,同时利用三维激光法对铸件外形轮廓进行检测。最终实现大尺寸空心透平叶片陶瓷型芯-蜡模-模壳-叶片铸件的全流程测量,其检测流程如图 3 所示。

本试验所用 CT 设备为美国北极星 NSI 工业 CT X-5000,其主要参数为管电压 20~450 kV、射线焦点尺寸小于 500 nm、最优空间分辨率 0.5 μm、探测器的最大尺寸 400 mm×400 mm、探测器单元尺寸 0.2 mm×0.2 mm、像素矩阵 2048×2048 (16bit)。三维激光扫描设备为 ScanTech,其扫描范围为 0~10 m、测量精度 0.03 mm、分辨率 0.020 mm。超声波壁厚仪为 Olympus,厚度测量范围 0.08~635 mm、探头标准分辨率 0.01 mm、探头频率 4 MHz。

2 空心透平叶片全流程尺寸测量

2.1 陶瓷型芯的尺寸测量及分析

空心透平叶片采用熔模铸造工艺,其中陶瓷型芯是形成叶片复杂内腔的关键。陶瓷型芯的传统制备工艺为:首先将陶瓷粉料与矿化剂、增塑剂(一般为各种蜡)混合后制成浆料,然后采用热压铸在适当的压力和温度下将浆料注入金属的型芯模具中成形,经过脱模、校正后放入高温炉中焙烧强化,最后得到陶瓷型芯^[11]。而在烧结过程中,陶瓷型芯会产生收缩、裂纹等影响最终铸件叶片尺寸精度。

本研究利用计算机断层扫描、三维激光扫描等无损检测技术对陶瓷型芯内部裂纹等缺陷及外形轮廓进行检测。

图 4 为陶瓷型芯工业 CT 扫描切片图,采用步进式

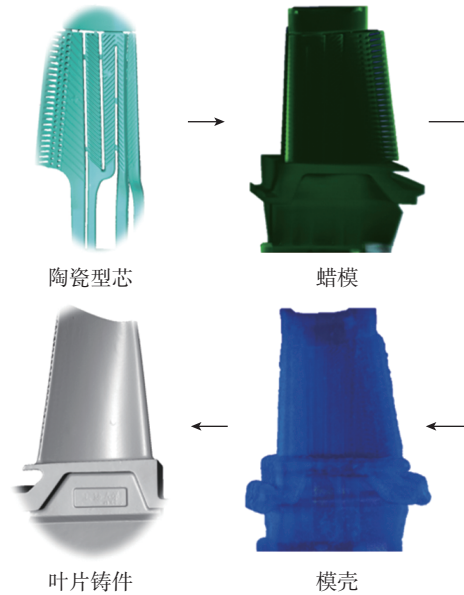


图3 空心透平叶片尺寸测量流程
Fig.3 Measurement process of hollow turbine blade size

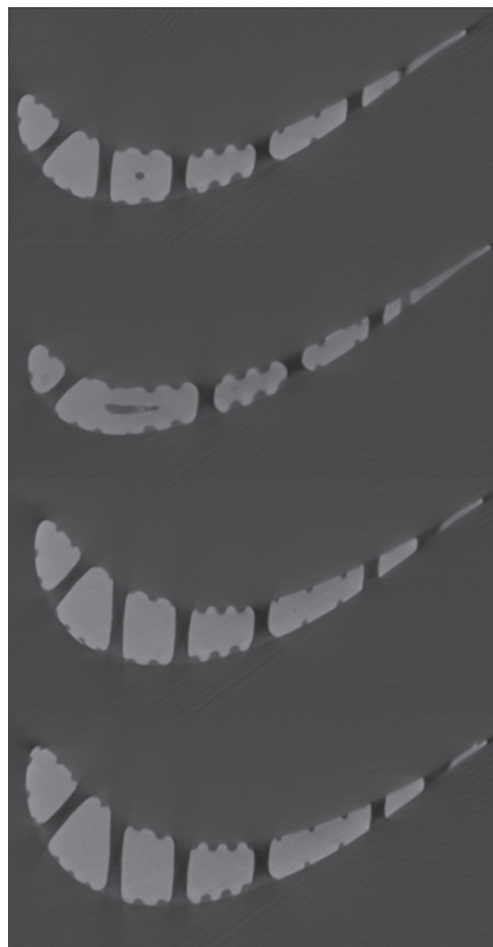


图4 陶瓷型芯不同高度 CT 扫描三维切片图
Fig.4 3D slice images of ceramic cores scanned by CT at different heights

扫描方式,使用的管电压为 130 kV,管电流为 30 μ A,曝光时间为 1000 ms,探测器的投影图像采集频率为 1 帧/s,几何不清晰度 U_g 为 0.0238 pixels,放大倍数为 2.22,旋转 360° 范围内拍摄 1440 张投影图,在探测器得到陶瓷型芯二维投影图后导入 efx-CT (NSI 工业 CT X-5000 三维重构软件)进行陶瓷型芯三维立体重构,得到陶瓷型芯三维信息。重构后得到的体素尺寸大小为 87.2 μ m,符合该型号燃气轮机陶瓷型芯的检测精度。从图 4 中可以看出,陶瓷型芯边界较清楚,可以明显看到陶瓷型芯内部缩孔、裂纹等缺陷,利用 3 种不同角度的切片可以确定缩孔、裂纹位置,为后续工艺参数的改进提供实际数据支撑,提高陶瓷型芯制备合格率。

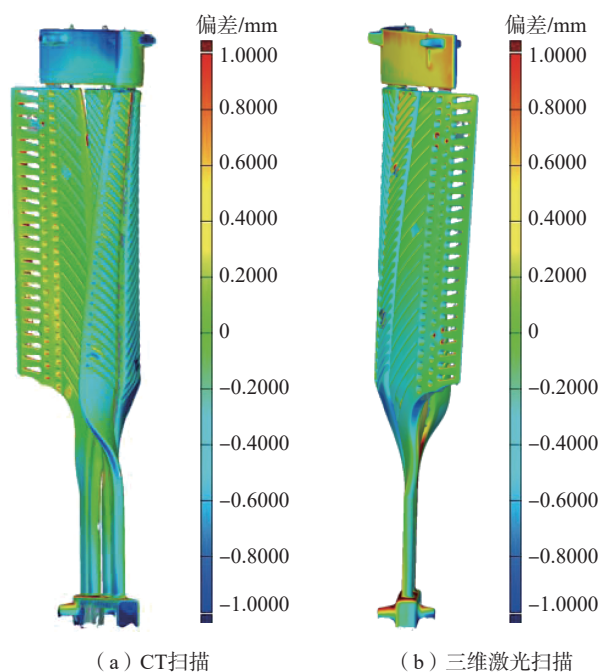


图 5 CT 扫描和三维激光扫描陶瓷型芯拟合结果图

Fig.5 Ceramic core fitting result diagram by CT scan and 3D laser scanning

利用分水岭阈值分割算法提取 CT 扫描数据中陶瓷型芯结构,导出陶瓷型芯三维模型,如图 5 (a) 所示。其中,红色代表陶瓷型芯轮廓变大区域,蓝色代表陶瓷型芯轮廓变小区域,绿色代表陶瓷型芯的轮廓度符合设计模型要求,在公差许可范围内。使用 GOM Inspect 软件做模型拟合分析发现,陶瓷型芯榫头及叶身的叶背位置局部稍有偏小,可能是模具设计存在问题,可通过改进模具来减少此类误差。为验证 CT 扫描结果的准确性,进一步采用三维激光扫描仪对陶瓷型芯外形尺寸进行检测 (图 5 (b)),并与 CT 扫描结果和理论模型进行比较,发现分别利用工业 CT 与三维激光扫描技术得到的陶瓷型芯模型,均可完成陶瓷型芯轮廓度的检测。

为了进一步确认 CT 扫描结果的准确性,取榫头某一平面为基准,分别选取距此平面 250 mm、200 mm、150 mm 处截面做偏差分析,陶瓷型芯截面偏差分析图如图 6 所示。结果表明,在同一工艺参数条件下压制烧结的陶瓷型芯,截面偏差趋势基本一致,叶背区域呈蓝绿色,表明轮廓度稍有偏小,叶盆区域大多呈现黄色,表明轮廓度稍有偏大。

2.2 蜡模的尺寸测量及分析

叶片熔模铸造的蜡模阶段,是将反映叶片内部结构的陶瓷型芯置于模具中,经过一系列工艺环节获取最终精铸蜡型,蜡模是保证叶片壁厚及外形尺寸的关键,有研究表明,蜡模阶段最大程度上决定了叶片成品尺寸精度,蜡模压制过程对最终成品叶片的尺寸影响占 50%。张振宇等^[12]基于熔模铸件的设计尺寸,证明蜡模尺寸超差对铸件最终尺寸超差的影响占 40% 以上。由此可见,蜡模制备过程对最终熔模铸件的精度具有决定性的影响^[13]。因此,对蜡模展开尺寸检测是十分有必要的。赵代银等^[14]以某型重型燃机叶片为研究对象,对熔模、型壳与叶片的尺寸精度分别进行了分工序测量,并进行了优化处理,最终叶片的叶身尺寸误差在 ± 0.3 mm 范围

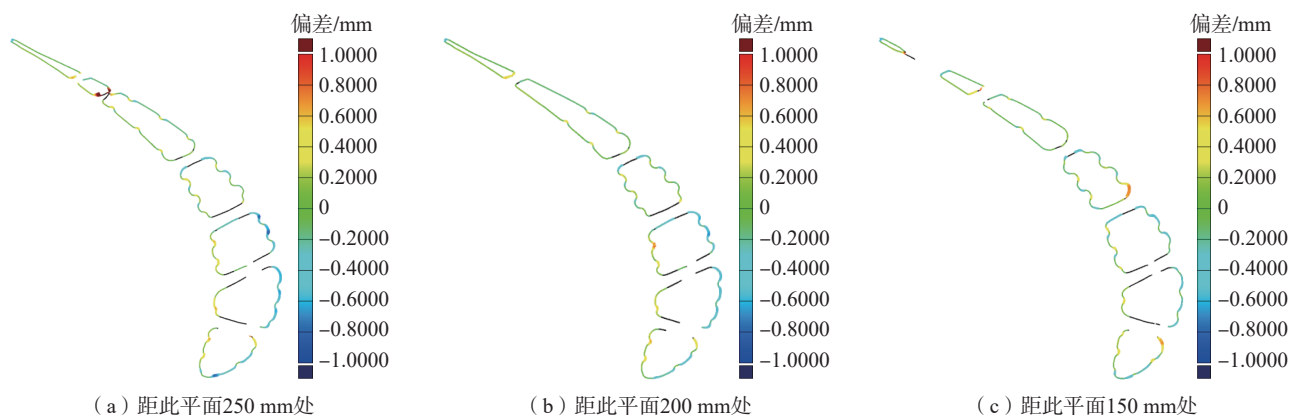


图 6 陶瓷型芯截面偏差分析

Fig.6 Cross section deviation analysis of ceramic core

内,满足了技术要求^[13]。

目前蜡模检测方式有专用测具测量、电感测量、光学投影检测、三坐标机测量和蓝光扫描测量等^[13],但这些测量方法只能对外形轮廓进行检测,而无法实现对蜡模壁厚以及其与陶瓷型芯匹配情况进行分析。

工业 CT 是唯一可以同时测量零件外部及内部轮廓的无损式测量方法。利用工业 CT 对实际蜡型进行检测,不仅可以获得实际蜡型内外截面轮廓数据,同时还可以得到实际蜡型与内部陶芯的位置匹配关系^[3],利用图像分割技术可获取蜡模壁厚信息。

如图 7 (a)为工业 CT 扫描蜡模三维切片图,采用步进式扫描方式,使用的管电压为 180 kV,管电流为 60 μ A,曝光时间为 1000 ms,图像采集频率为 1 帧/s,几何不清晰度 U_g 为 0.0103 pixels,放大倍数为 1.57,旋转 360° 拍摄 1440 张投影图,重构后得到的体素尺寸大小为 127.4 μ m,符合该型号燃气轮机蜡模阶段的检测精度。从图 7 (a)中可以非常清晰地看出蜡模层与空气层的边界、蜡模层与陶瓷型芯的边界,利用分水岭阈值分割算法得到图 7 (b)的分割结果。结果显示,此方法可以较好地分割蜡模壁厚,接着利用图像分割技术提取蜡模层做壁厚分析,蜡模层模型如图 7 (c)所示,将提取出的蜡模模型导入 GOM 软件,利用最大内切圆原理分析蜡模壁厚,其结果如图 8 所示。可以发现,蜡模内部陶瓷型芯略有偏芯,位于前缘部分的偏移较排气边区域稍大,而通过壁厚分析发现,叶背区域的壁厚整体偏大,陶瓷型芯在压蜡阶段有向叶盆方向偏移的趋势,可通过改进注蜡参数修正。

2.3 型壳的检测及内部壁厚分析

陶瓷型壳由多层的耐火材料加粘结剂组成,必须具备 3 个功能:良好的抗热冲击性能、脱除模料时的抗胀裂性能及避免铸件在浇注液态金属过程中产生热裂。

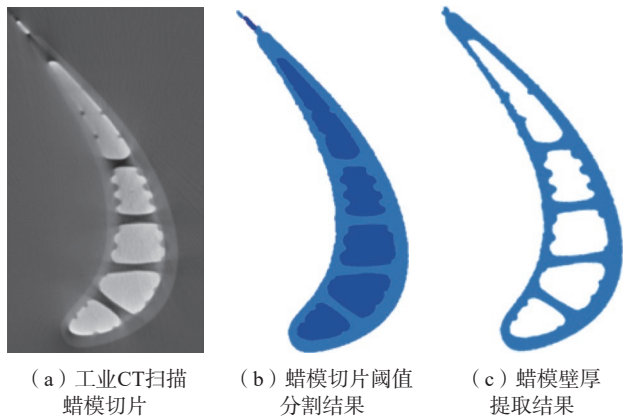


图 7 工业 CT 扫描蜡模结果

Fig.7 Results of industrial CT scanning wax mold

型壳的制作过程是将蜡模阶段获取的精铸蜡型浸渍涂料,撒砂后晾干。反复浸涂、撒砂、晾干,重复多次,直至达到要求的厚度即成模组。之后采用热水清洗或高压蒸汽脱除的方式去除模料,然后经高温焙烧获得型壳,通过该方式获得的型壳具有较高的高温强度和高温稳定性^[15]。熔模铸造型壳的过程包括涂挂、制壳、脱蜡、焙烧及浇注过程,由于此过程中受到热、力及其他因素的作用,型壳会发生尺寸和形状的变化^[15]。因此,需要在脱蜡、浇注前对模壳内部尺寸进行检测,同时观察内部陶瓷型芯是否发生偏芯、断裂等,但在传统制备工艺过程中,无法对模壳阶段进行检测及控制。

本研究选用工业 CT 对其进行检测,采用步进式扫描方式,使用的管电压为 440 kV,管电流为 1500 μ A,曝光时间为 1000 ms,图像采集频率为 6 帧/s,几何不清晰度 U_g 为 0.0107 pixels,放大倍数为 1.47,旋转 360° 拍摄 2160 张投影图,重构后得到的体素尺寸大小为 135.9 μ m。检测结果如图 9 所示。图 9 (a)为工业 CT 扫描切片图,可以很明显看出模壳内部陶瓷型芯发生了偏芯,叶背位置壁厚偏小、叶盆位置壁厚偏大,利用 GOM 软件进行截面偏差分析,实际数据也表明叶背位置壁厚偏小、叶盆位置壁厚偏大,如图 10 所示。可能是蜡模阶段已发现陶瓷型芯向叶盆方向偏移,导致在模壳阶段陶瓷型芯有了更大的偏移量,因此需要精准控制蜡模壁厚。

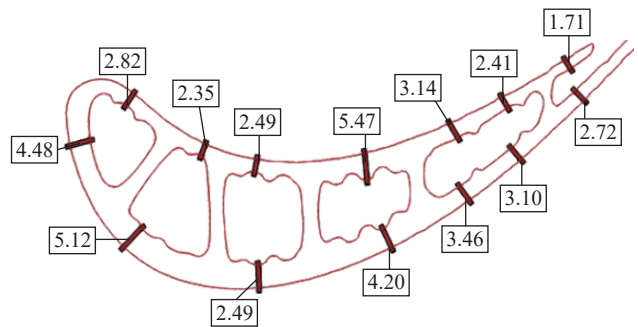


图 8 蜡模壁厚分析 (mm)

Fig.8 Wall thickness analysis of wax molds (mm)

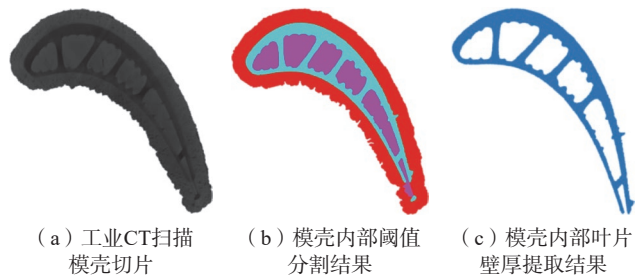


图 9 工业 CT 检测型壳结果

Fig.9 Results of industrial CT test shell

2.4 叶片铸件的尺寸测量及分析

涡轮叶片熔模铸造最后环节为型壳的浇注、开模、铸件脱芯等,最终叶片铸件,由于此试验叶片尺寸较大,工业 CT 无法穿透叶片铸件,传统上通常采用解剖法检测叶片壁厚,但解剖法结果不可逆,因此选用三维激光法、超声法、三坐标测量机等无损检测方法。图 11 为三

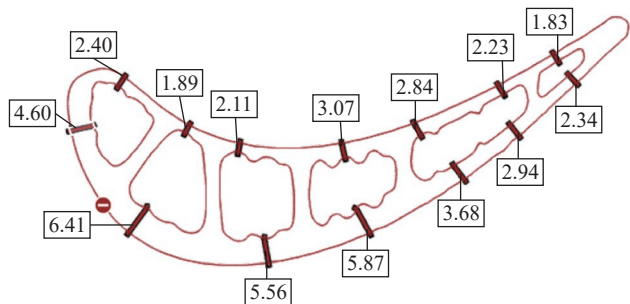


图 10 模壳内部壁厚截面分析

Fig.10 Cross section analysis of internal wall thickness of the mold shell

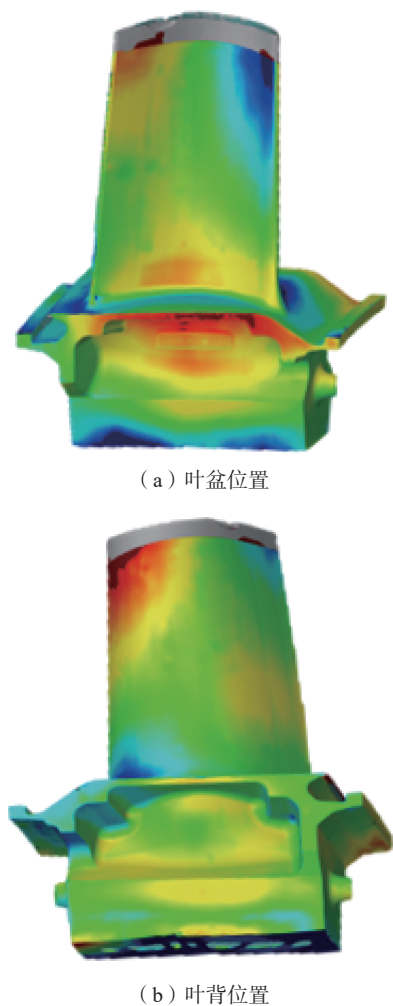


图 11 三维激光法检测叶片铸件

Fig.11 3D laser method for detecting blade castings

维激光法检测铸件,可以很明显观察叶片轮廓精度的偏差,其中叶尖进气侧、排气侧存在变形,叶身与缘板位置交接 R 附近及进气边缘板下侧收缩较大。

图 12 为超声法测壁厚,由于超声法为手动测量,不可避免出现人为误差,采用多次采样取平均值的方式可以有效减少人为误差。其中,偏差在 ± 0.4 mm 内的壁厚值为绿色,即符合图纸设计要求,而此检测结果显示大部分位置的偏差超出 0.4 mm,可判断此叶片壁厚超差严重,不符合设计要求,应改进相关工艺参数获取尺寸合格的叶片铸件。

检测结果证明,采用工业 CT 法可以实现对熔模铸造叶片过程中的烧结后陶瓷型芯、蜡模及模壳展开测量,其检测速度快,图像化的处理结果更有利于批量数

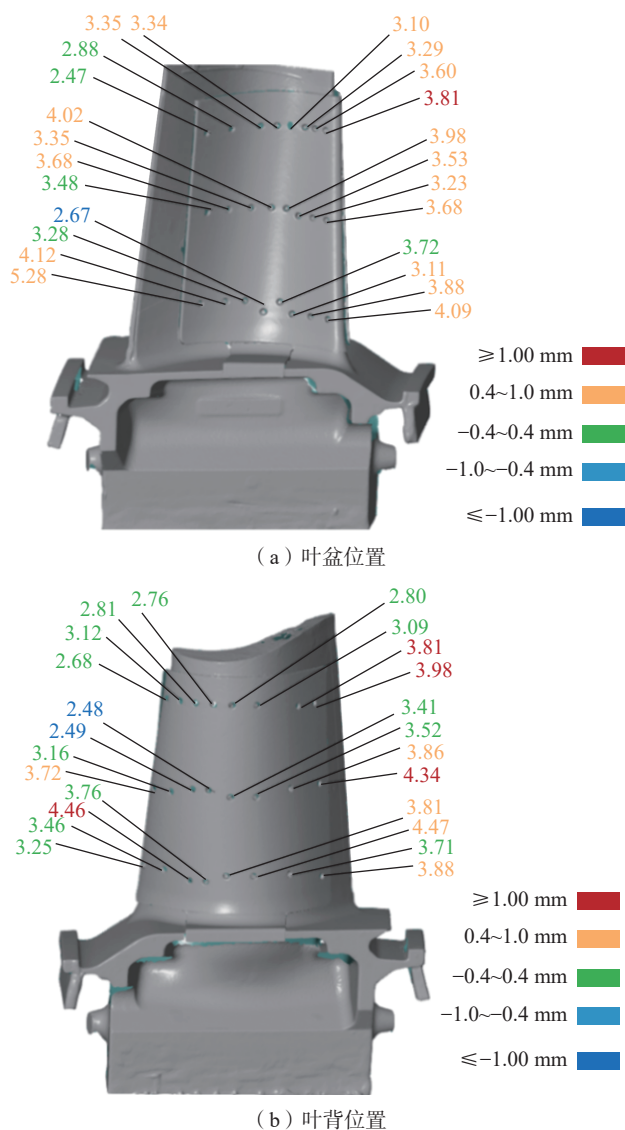


图 12 超声法测叶片铸件壁厚 (mm)

Fig.12 Ultrasonic method for measuring the wall thickness of blade castings (mm)

据的累积和比较,较好地实现了空心透平叶片尺寸测量的阶段性与传递性。同时利用三维激光检测法、超声法等检测方式对最终叶片铸件展开尺寸测量,可获取叶片外形轮廓精度及壁厚精度,以此顺利开展空心透平叶片陶瓷型芯-蜡模-模壳-叶片铸件的全流程测量,为制备质优形准的大尺寸高温合金叶片提供技术支撑。

3 结论

基于燃气轮机柱晶/单晶透平叶片的结构特征及其铸造工艺特点,对精密铸造的全流程进行尺寸精度控制,是叶片铸造过程非常关键的环节。运用计算机断层扫描技术、三维激光扫描、超声波壁厚仪等技术可以完成空心透平叶片全流程尺寸测量,其中工业CT法不仅可以对烧结后陶瓷型芯外形轮廓精度进行检测,还可以对蜡模及模壳阶段中内部的陶瓷型芯缺陷进行检测,并同时利用图像分割技术提取蜡模壁厚模型,进而分析壁厚偏差,但在CT检测技术标准方面,国内可供借鉴的航空行业标准仅有HB5647—98和HB20126—201。因此,亟需开展健全透平叶片全流程检测体系的工作。

此外,基于大数据和数值模拟来研究误差累计和传递,也将成为健全该检测体系过程中未来发展的一个重要方法。这为提高空心透平叶片制备合格率提供了重要保障。

参考文献

[1] 刘蕾,刘尚明.某燃气轮机控制系统改造调试研究[J].热力透平,2017,46(4):279-283,287.
 LIU Lei, LIU Shangming. Improvement and debugging of control system for a certain gas turbine[J]. Thermal Turbine, 2017, 46(4): 279-283, 287.
 [2] 蒋洪德.加速推进重型燃气轮机核心技术研究开发和国产化[J].动力工程学报,2011,31(8):563-566.
 JIANG Hongde. Promote heavy duty gas turbine core technology development and industrial application in China[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2011, 31(8): 563-566.
 [3] 崔康.空心涡轮叶片精铸蜡型壁厚控制方法研究[D].西安:西北工业大学,2018.
 CUI Kang. Research on wall thickness control method for precision casting wax mold of hollow turbine blades[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2018.
 [4] 李世峰,张定华,卜昆.单晶空心涡轮叶片精确控形技术的研究进展[J].稀有金属材料与工程,2012,41(3):559-564.
 LI Shifeng, ZHANG Dinghua, BU Kun. Research progress in precise shape-controlling technology of single crystal hollow turbine blades[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2012, 41(3): 559-564.
 [5] SYNNERGREN P, SJÖDAHL M. A stereoscopic digital speckle photography system for 3-D displacement field measurements[J]. Optics and Lasers in Engineering, 1999, 31(6): 425-443.
 [6] 赵红亮,翁康荣,关绍康,等.空心叶片用陶瓷型芯[J].特种

铸造及有色合金,2004,24(5):38-40,3.
 ZHAO Hongliang, WENG Kangrong, GUAN Shaokang, et al. Ceramic core for hollow blades[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2004, 24(5): 38-40, 3.
 [7] 杨耀武,曹腊梅,才广慧.强化处理对单晶叶片用氧化铝基陶瓷型芯的影响[J].航空材料学报,1995,15(3):33-38.
 YANG Yaowu, CAO Lamei, CAI Guanghui. The effect of strengthening treatment on alumina-base ceramic cores for single-crystal blades[J]. Journal of Aeronautical Materials, 1995, 15(3): 33-38.
 [8] TAI Q, MOCELLIN A. Review: High temperature deformation of Al₂O₃-based ceramic particle or whisker composites[J]. Ceramics International, 1999, 25: 395-408.
 [9] 顾国红,曹腊梅.熔模铸造空心叶片用陶瓷型芯的发展[J].铸造技术,2002,23(2):80-83.
 GU Guohong, CAO Lamei. Development of ceramic cores for investment casting hollow blades[J]. Foundry Technology, 2002, 23(2): 80-83.
 [10] 刘畅辉.复杂薄壁件熔模铸造误差流建模与稳健控制方法研究[D].上海:上海交通大学,2016.
 LIU Changhui. Research on error flow modeling and robust control method for investment casting of complex thin wall parts[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2016.
 [11] 孙冬,陈双,史玉升,等.陶瓷型芯壳激光增材制造研究进展[J].中国激光,2022,49(12):1202002.
 SUN Dong, CHEN Shuang, SHI Yusheng, et al. Research progress of ceramic cores and shells prepared by laser additive manufacturing[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(12): 1202002.
 [12] 张振宇,梁补女.制模过程中影响铸件尺寸精度的因素[J].机械研究与应用,2002,15(2):15-16.
 ZHANG Zhenyu, LIANG Bunv. The factors influencing the casting's dimension precision of molten mould during the process of making mould[J]. Mechanical Research & Application, 2002, 15(2): 15-16.
 [13] 罗强,李飞,马鑫,等.蜡模误差与叶片精度控制技术的研究进展[J].特种铸造及有色合金,2022,42(8):944-950.
 LUO Qiang, LI Fei, MA Xin, et al. Research progress in controlling technologies of wax pattern error and blade accuracy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(8): 944-950.
 [14] 赵代银,杨照宏,杨功显,等.某型重型燃机实心动叶片的精密铸造过程尺寸控制[J].特种铸造及有色合金,2020,40(11):1265-1268.
 ZHAO Daiyin, YANG Zhaohong, YANG Gongxian, et al. Dimension control of X-type heavy duty gas turbine solid blade in investment casting process[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2020, 40(11): 1265-1268.
 [15] 郑翠侠.大尺寸空心叶片精密铸造工艺研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2016.
 ZHENG Cuixia. Research on precision casting process of large size hollow blade[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.

通信作者:王江,教授,博士,研究方向为电磁冶金、高温合金定向凝固技术。

(责编 阳光)