

文章编号: 1000-8055(2023)05-1198-12

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20230040

基于锥束 CT 的飞秒激光加工气膜孔几何特征测量及表征

杨泽南¹, 许俊杰¹, 赵婉蓉¹, 梁 威¹, 杨富强², 李志翔², 黄魁东²

(1. 中国航发北京航空材料研究院 先进高温结构材料重点实验室, 北京 100095;
2. 西北工业大学 航空发动机高性能制造工信部重点实验室, 西安 710072)

摘 要: 针对当前国内气膜孔加工存在的几何精度偏低、质量不稳定现状, 通过计算机断层成像技术利用气膜孔切片图像, 在特征分割、点云拟合基础上对不同工艺参数激光加工的气膜孔孔径及几何特征质量进行检测与评价。结果表明: 超快激光工艺参数的圆形气膜孔通孔入口直径略大于出口, 锥度在 $0.005^{\circ} \sim 0.020^{\circ}$ 之间, 位置度误差最大为 $\phi 0.072$ mm, 异型气膜孔入射角的范围在 $60^{\circ} \sim 70^{\circ}$ 之间。使用锥束 CT(computed tomography)测量方法对气膜孔几何特征进行检测与评价是可靠的, 具有重要工程应用价值。

关 键 词: 气膜孔; 单晶高温合金; 飞秒激光加工; 计算机层析成像技术; 几何特征

中图分类号: V263.1; V448; O353.5

文献标志码: A

Measurement and characterization of geometric features of femtosecond laser of film hole based on cone beam CT

YANG Zenan¹, XU Junjie¹, ZHAO Wanrong¹, LIANG Wei¹, YANG Fuqiang²,
LI Zhixiang², HUANG Kuidong²

(1. Science and Technology on Advanced High Temperature Structural Materials Laboratory,
Beijing Institute of Aeronautical Materials,
Aero Engine Corporation of China, Beijing 100095, China;
2. Key Laboratory of High Performance Manufacturing for Aero Engine,
Ministry of Industry and Information Technology,
Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: In view of the current situation of low geometric accuracy and unstable quality of film cooling holes at home, experiments with different process parameters of femtosecond laser were carried out. The film cooling holes were analyzed based on the feature segmenting and point cloud fitting from slice image through computed tomography technology. Diameter and geometric features were tested and evaluated. The results showed that the diameter of the inlet of the film holes was slightly larger than that of the outlet with the process parameters of ultrafast laser, where the taper was between 0.005° and 0.020° for the testing detected by cone beam CT (computed tomography). The maximum position error was 0.072 mm. The incident angle of the special-shaped hole was roughly between 60° and 70° . It is reliable to use cone beam CT measurement method to detect and evaluate the geometric features of film cooling holes.

收稿日期: 2023-01-20

基金项目: 青年托举人才工程项目(YESS20200408); 财政部稳定支持项目(KZ90220107); 国家科技重大专项项目(J2019-VII-0013-0153);
国家自然科学基金青年基金(52005415); 中国航空发动机集团产学研合作项目(HFZL2022CX024)

作者简介: 杨泽南(1990—), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事飞秒激光加工及检测技术研究。

引用格式: 杨泽南, 许俊杰, 赵婉蓉, 等. 基于锥束 CT 的飞秒激光加工气膜孔几何特征测量及表征[J]. 航空动力学报, 2023, 38(5): 1198-1209.
YANG Zenan, XU Junjie, ZHAO Wanrong, et al. Measurement and characterization of geometric features of femtosecond laser of film hole based on cone beam CT[J]. Journal of Aerospace Power, 2023, 38(5): 1198-1209.

Keywords: film hole; single crystal high-temperature alloy; femtosecond laser processing; industrial computed tomography; geometric features

随着飞机动力、寿命和可靠性对航空发动机性能需求的不断提升,对其制造工艺水平也提出了巨大的挑战。研究表明:发动机叶片的承温能力直接影响到发动机的推力,如何提高叶片高温服役性能是航空发动机发展的重要研究方向^[1]。高推重比航空发动机采用气膜冷却技术,气膜孔加工精度及质量直接影响发动机效能。目前,叶片上的气膜孔主要分为圆柱孔和异型孔两种,其中异型孔的设计进一步提高了冷却效果。气膜孔设计-制造符合性对叶片性能和可靠性有显著影响,若实际叶片气膜孔加工精度偏差较大,则可能导致叶片的疲劳性能的大幅下降^[2-3]。气膜孔检测与无损评估成为提升涡轮叶片安全服役的重要保障^[4-5],特别针对气膜孔尺寸一致性亟需形成完善的检测与评价方法。

对于气膜孔整体几何特征检测,一直缺乏有效的评价手段,塞规测量值实际是测量出气膜孔的最小边界值而非孔径,其结果往往是小于孔的实际直径,难以保证气膜孔的检验精度,只能做定性的判断^[6-11]。近年来发展了一些接触式测量的方法,包括基于微小探针系统获得孔轮廓,并采用数值转换法实现气膜孔几何参数的读取和内部形貌的评估。坐标测量机通过带探头的接触式探针(通常为光纤探针)多点测得孔壁轮廓,进而得到孔的尺寸与形貌。Magdziak^[12]提出了一种确定测量点分布的新方法,该方法可用于产品曲线表面的接触坐标测量,通过提高曲线曲面的测量策略规划的自动化程度以及提高产品自由曲面的测量精度来提高坐标测量的性能。Li等^[13]基于传感器介绍了一种微球形钨探针组成的微孔测量探头,该探头在三维方向上的重复性较好且实用性较强。Elfurjani等^[14]提出了一种新的探测方法来检测微尺度孔的内径,通过使用约 170 μm 的旋转线探针尖端的声发射进行接触检测来实现微孔测量。Murakami等^[15]提出了一种基于小直径光纤探针的微结构系统。在改进的测量系统中,棱镜安装在触针轴附近,以扩大可测量区域和深度。上述接触式测量在深孔径比微小孔的测量中有重要应用,但由于传统的接触式测量通常需要进行多点接触,测量速度较慢,具有难以满足工程化需求的缺点。

随着非接触式检测技术的推进,基于机器视

觉和图像分析的气膜孔测量方法也得到发展。鲍晨兴等^[16]基于电耦合装置(charge-coupled device, CCD)图像采集处理方法和 Halcon 算法研制了一台四轴专用检测设备,可以实现气膜孔轴线和孔径的自动化快速检测,轴线角度测量精度为 $\pm 0.5^\circ$,重复性误差为 0.2°,孔径测量误差为 $\pm 0.05\text{ mm}$,然而该系统中的 CCD 视觉通常会受到待测件表面状态(光洁度)的影响导致测量误差。毕超等^[17]设计了一种基于三轴滑动和两轴回转的联动测量装置,通过改变待测件与图像采集装置的位置关系和对准姿态,可用于获取涡轮叶片冷却气膜孔的孔径大小、轴线角度和中心坐标等特征参数,但该技术需在待测腔体内提前设置光源,操作上具有一定的局限性。Hu等^[18]通过将安装在相机上的可调镜头与图像采集和图案投影精确同步来捕获 3D 形状的图像测量,提出一种基于干涉光谱分析技术的测量方法,有望用于其他需要高深径比微孔测量的领域中。Tao等^[19]介绍了一种用于深度实时 3D 形状测量的自适应深度约束(adaptive depth constraint, ADC)方法,根据当前重构的几何形状,自适应更新几何约束下的深度测量结果。李其等^[20]采用激光干涉测距原理,将测杆深入气膜孔内部对内壁按圆柱体进行孔径、位置、方向的评定。通过大量密集取点,获得了气膜孔内表面的轮廓,按圆柱进行计算评价,以解决气膜孔形状、位置和方向的检测难题。

近些年,X 射线断层扫描等检测手段不断涌现,为气膜孔的测量技术发展带来了新的方向^[21]。锥束 CT 利用锥形束射线源和面阵探测器采集被测物体不同角度的一系列投影图像,并根据相应的重建算法重建出连续的序列切片图像。与传统的二维 CT 相比,锥束 CT 具有扫描速度快、射线利用率高、切片内和切片间的空间分辨率相同、精度高等特点。汪文虎等^[22]利用工业 CT 扫描得到异型孔轮廓三维点云坐标,通过剔除非轮廓点、坐标变化、截面积分、三维配准等运算处理,提取了异型孔几何尺寸、形状与轮廓度等评定参数。蒋其麟等^[23]对加工的叶片进行工业计算机层析成像 CT 分析,测量了气膜孔的整体孔型,确保加工的气膜孔内壁无交叉。CT 测量与三坐标比较,其采集的测量点的量十分巨大,可应用于零件或材料内部缺陷监测,机械零件内部结构分析,装

配正确性分析与逆向工程等方面,不但可以检测内部缺陷、型面尺寸、壁厚尺寸,同时可实现小孔的测量,而且一次扫描所得的数据可以覆盖整个零件,是一种先进的无损检测技术,已应用于复杂构件的综合无损检测^[24-25]。

本文面向当前国内气膜孔检测精度偏低、质量不稳定的现状,通过计算机断层成像技术,在特征分割、点云拟合基础上对不同激光参数下气膜孔 CT 图像孔径及锥角等几何特征的测量与分析,对涡轮叶片气膜孔的无损测量和工艺改良有实际应用价值。

1 气膜孔几何特征工业 CT 检测

图 1 为典型带有气膜冷却结构的涡轮导向叶片/工作叶片,其表面通常设计大量孔径约 0.3~0.7 mm 的小孔,部分孔深度可达 3 mm 以上^[2]。面对结构细小、数量众多的气膜孔,传统的接触式测量速度慢,其中探针最细也在 0.2 mm 以上,测球最小只能到 0.3 mm(如图 2),难以满足测量需求。而工业 CT 测量技术作为一种新型无损检测手段,可以完成零件内部尺寸、内形貌的检测,如图 3 所示。

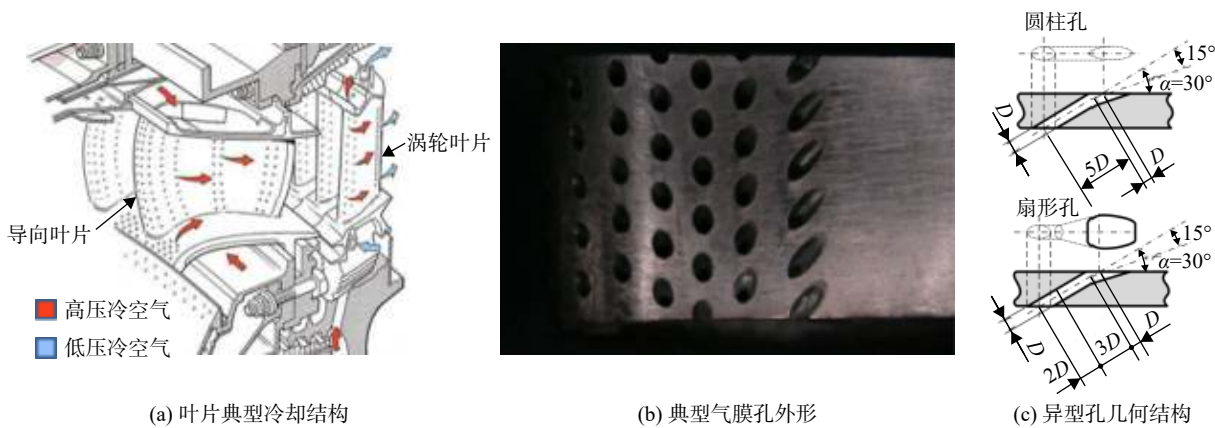


图 1 航空发动机涡轮叶片气膜孔示意图

Fig. 1 Schematic diagram of film holes on turbine blades of aero-engine

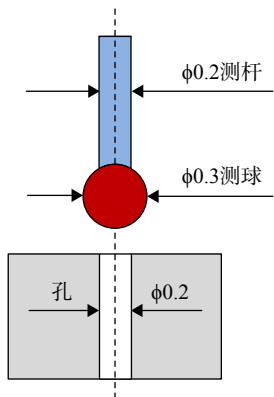


图 2 测球与被测孔示意图

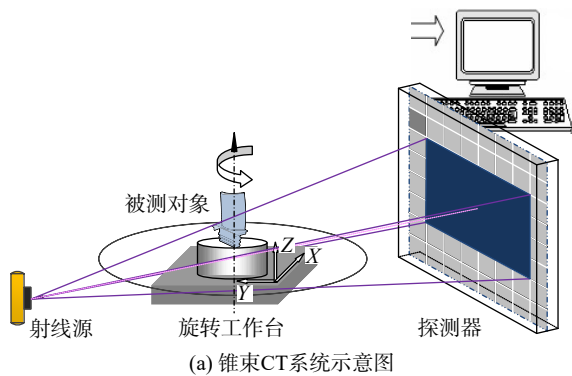
Fig. 2 Diagram of measuring ball and measured hole

利用工业 CT 对飞秒激光不同工艺参数加工的气膜孔进行扫描,重建获取气膜孔切片图像,然后对气膜孔特征进行分割,得到气膜孔轮廓三维点云。通过剔除非轮廓点、坐标变化等运算处理,提取气膜孔几何尺寸与形状等评定参数。如图 4 所示。

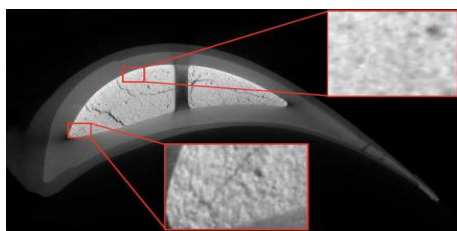
1.1 孔径测量

在气膜孔几何特性中,气膜孔直径对其使

用性能影响较大,需要对气膜孔直径进行检测评估,因此将圆形气膜孔的孔径作为其几何精



(a) 锥束 CT 系统示意图



(b) 内部结构与缺陷

图 3 锥束 CT 无损检测

Fig. 3 Non-destructive testing using cone beam CT

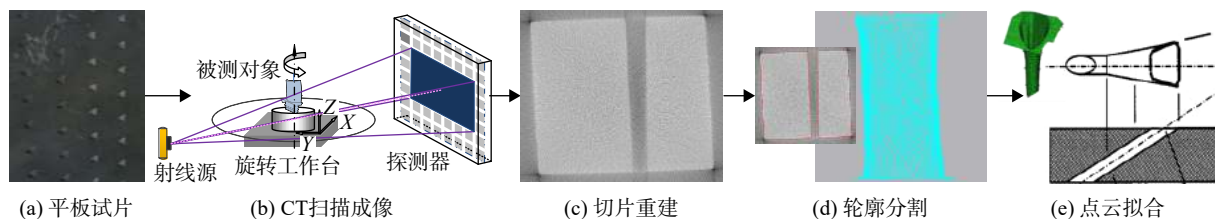


图4 基于工业微焦点 CT 扫描的气膜孔测量流程图

Fig. 4 Flow chart of measurement of film hole based on industrial microfocus CT scanning

度的一个重要表征参数。常用的对圆孔孔径的拟合方法有最小二乘法、最小外接法、最大内切法、固定圆心法以及固定半径法等。如图 5(a) 所示, 其中 D 是气膜孔的拟合直径, 最小二乘法是使被测圆轮廓上所有数据点至圆周距离的平方和最小; 如图 5(b) 所示, 最小外接圆是指包容实际轮廓时, 半径为最小的圆; 如图 5(c) 所示,

最大内切圆是指内切于被测轮廓, 且半径为最大的圆; 固定圆心法和固定半径法适用于已知圆的圆心或半径的情况, 与实际情况不符。由于利用最小二乘法拟合得到的孔径参数最接近满足流量及冷效控制诉求, 因此, 选用最小二乘法进行圆形气膜孔的出入口圆拟合, 并计算获取其出入口孔径。

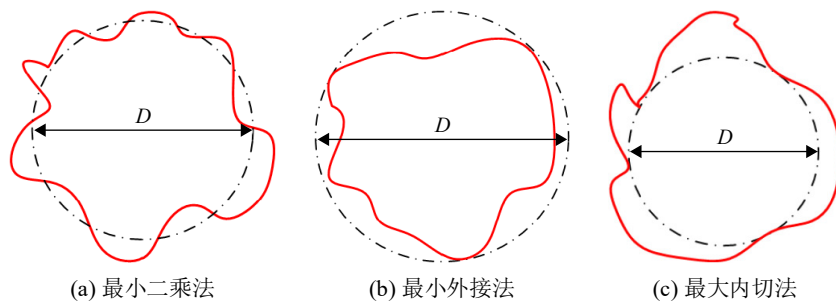


图5 气膜孔直径尺寸拟合

Fig. 5 Diameter fitting of film hole

1.2 锥度测量

对于带有一定锥度的孔, 其侧壁轮廓呈现为圆台形, 如图 6 所示。由于气膜孔锥度的存在会降低其制造符合性, 进而对涡轮叶片的气冷效率及疲劳性能造成影响, 因此气膜孔的锥度也是描述其几何特征符合性的重要参数。

圆形气膜孔锥度使用 θ 表示, 其计算公式为

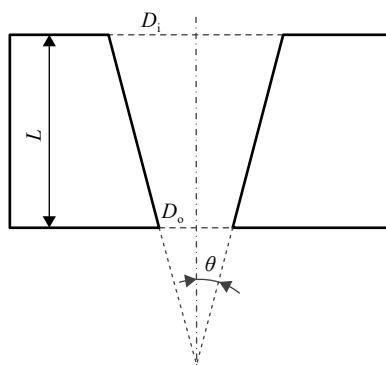


图6 气膜孔锥度检测

Fig. 6 Taper testing of film hole

$$\theta = \arctan \frac{D_i - D_o}{2L} \quad (1)$$

其中 D_i 为气膜孔入口直径; D_o 为气膜孔出口直径; L 为气膜孔的深度。

1.3 位置度测量

目前气膜孔位置度的公差要求一般为 $\phi 0.10 \text{ mm} \sim \phi 0.20 \text{ mm}$, 轴线矢量方向一般控制在 $\pm 1^\circ$ 。针对平板试样气膜孔位置度评价, 通常选择板件的上表面为基准, 如图 7 所示, 以锥束 CT 点云拟合技术获取三维气膜孔轴线位置度可以进一步评价以涡轮叶片为典型代表的复杂曲面类零件气膜孔位置度, 其中 h 表示板的厚度, δ 表示实际孔轴线与标定孔轴线的偏差角度, ψ 表示气膜孔轴线位置度误差。

1.4 异型孔测量

相比于简单直圆孔气膜孔, 复杂异型孔带有更多的结构特征, 本文针对簸箕形的异型气膜孔倾角进行评定, 如图 8 所示。根据气膜孔轴线与入口平面 A 之间的夹角获取气膜孔的入射角 α 。

设轴线的方向向量 $s_0(m_0, n_0, p_0)$, 入口平面 A 法向量 $\eta(1, 0, 0)$, 则入射角 α 的计算公式为

$$\alpha = \arcsin \frac{|s_0 \cdot \eta|}{|s_0| \cdot |\eta|} \quad (2)$$

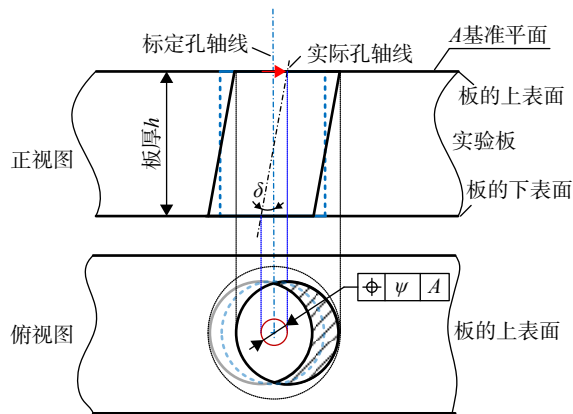


图 7 气膜孔轴线位置度检测

Fig. 7 Axis position detecting of film hole

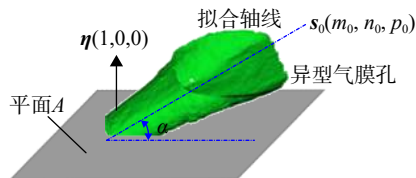


图 8 簸箕孔倾斜度测量示意图

Fig. 8 Diagram of obliquity measurement of dustpan hole

2 飞秒激光制孔工艺验证

2.1 实验方法

选用镍基单晶高温合金 DD6 铸造而成的板状试样(材料化学成分质量百分比如表 1 所示), 使用线切割制成尺寸为 25 mm × 20 mm × 3 mm 的平板试片并对上下表面进行抛光处理, 试片编号分别为 1#、2#、3#、4#, 气膜孔的孔位设计及制孔试片实物照片如图 9 所示。然后将气膜孔部分切割成 3 mm × 3 mm × 8 mm 的小试样件, 进行 CT 几何特征检测。

飞秒激光制孔参数对孔质量具有重要影响, 表 2 所列为 1.4、0.4 mm 通孔、表 3 所列为 1 mm 盲孔、表 4 所列为异型孔扩张段对应的加工工艺参数, 其他参数与各试片圆孔工艺相同。

2.2 实验结果

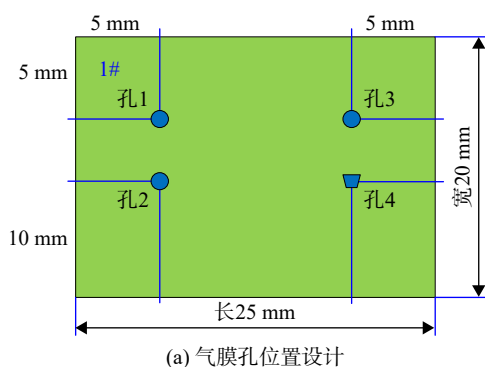
采用西北工业大学自主研发的锥束 CT 无损检测装备(图 10)对气膜孔几何尺寸进行检测, 利用 240 kV 微焦点射线源, 扫描电压 110 kV, 电流

表 1 DD6 镍基高温合金化学成分质量百分比

Table 1 Chemical composition of DD6 nickel-based superalloy by mass

%

C	Cr	Ni	Co	W	Mo	Al	Nb	Ta	Re	Hf
0~0.04	3.8~4.8	其余	8.5~9.5	7.0~9.0	1.5~2.5	5.2~6.2	0~1.2	6.0~8.5	1.6~2.4	0.05~1.5



(a) 气膜孔位置设计

板件正面



板件反面



(b) 气膜孔板件



(c) 气膜孔局部切割样件

图 9 DD6 镍基单晶高温合金气膜孔平板试片

Fig. 9 Testing piece of DD6 nickel based single crystal superalloy film hole

表 2 飞秒激光制孔实验（1#板/2#板孔径 1.4 mm/0.4 mm 工艺参数）

Table 2 Experiment for femtosecond laser drilling (process parameters for 1# board/2# board aperture of 1.4 mm/0.4 mm)

序号		加工				修孔			
		功率/W	进给量/mm	单扫时间/ms	圈数	功率/W	进给量/mm	单扫时间/ms	圈数
1#板 (1.4 mm 通孔)	圆孔 1	30	0.03	1 000	80	15	0.02	500	40
	圆孔 2	30	0.03	1 000	80				
	圆孔 3	15	0.02	1 000	80				
2#板 (0.4 mm 通孔)	圆孔 1	30	0.03	500	40	15	0.04	200	40
	圆孔 2	30	0.03	500	40				
	圆孔 3	15	0.015	500	40				

表 3 飞秒激光制孔实验（3#板/4#板孔径 1 mm 工艺参数）

Table 3 Experiment for femtosecond laser drilling (process parameters for 3# board/4# board aperture of 1 mm)

序号		加工					修孔				
		功率/W	进给量/mm	单扫时间/ms	圈数	层数	功率/W	进给量/mm	单扫时间/ms	圈数	层数
3#板 (1 mm 盲孔)	圆孔 1	30	0.03	1 000	40	5	15	0.02	500	40	9
	圆孔 2	30	0.03	1 000	40	10					
	圆孔 3	30	0.03	1 000	40	15					
4#板 (1 mm 盲孔)	圆孔 1	30	0.03	1 000	40	5	15	0.02	500	40	17
	圆孔 2	30	0.03	1 000	40	10					
	圆孔 3	30	0.03	1 000	40	15					

表 4 飞秒激光制孔实验（异型孔孔 4 制孔工艺参数）

Table 4 Experiment for femtosecond laser drilling (process parameters for irregular holes drilling for hole 4)

因素	1#板	2#板	3#板	4#板
功率/W	20	15	10	5
分割层数	145	145	145	145
扫描速度/(r/min)	2 000	2 000	2 000	2 000



图 10 锥束 CT 无损检测设备

Fig. 10 Equipment of cone beam CT for non-destructive testing

0.09 mA, 射线源至旋转中心 40 mm, 射线源至探测器 1 080 mm, 成像分辨 2 048 像素 × 2 048 像素。

2.2.1 孔位置度

对于圆形气膜孔,采用最小二乘法完成了圆孔出入口圆拟合,并计算其出入口孔径,获得了气膜孔的平均直径 D ,根据测量数据计算了对应气膜孔的锥度 θ ,同时对圆孔轴线进行拟合,进而计算孔位置度。

按照表 2 所列工艺参数完成 1.4、0.4 mm 通孔加工,孔 1 与孔 2 实验采用的功率、进给量、扫描时间、圈数均相同,孔 3 的工艺参数为孔 1 加工功率、进给量的一半。对 1#板和 2#板的气膜孔板件进行微焦点锥束 CT 扫描,得到不同工艺参数下气膜孔切片图像,如图 11 所示,在重建切片的基础上,采用二维水平集亚像素分割算法对气膜孔轮廓进行分割,得到气膜孔入口和出口表面的三维坐标点数据,然后对这些数据进行预处理,提取气膜孔的孔周轮廓,完成对 1#板和 2#板中 6 个圆柱通孔 CT 图像分割点云的拟合。根据上述的数据处理方法,分别计算出气膜孔的平均直径、出入口直径及气膜孔的锥度(1#板的孔 1~孔 3,2#板的孔 1~孔 3),计算结果如表 5 所示。

表 5 中的几何误差为平均直径与设计孔径之

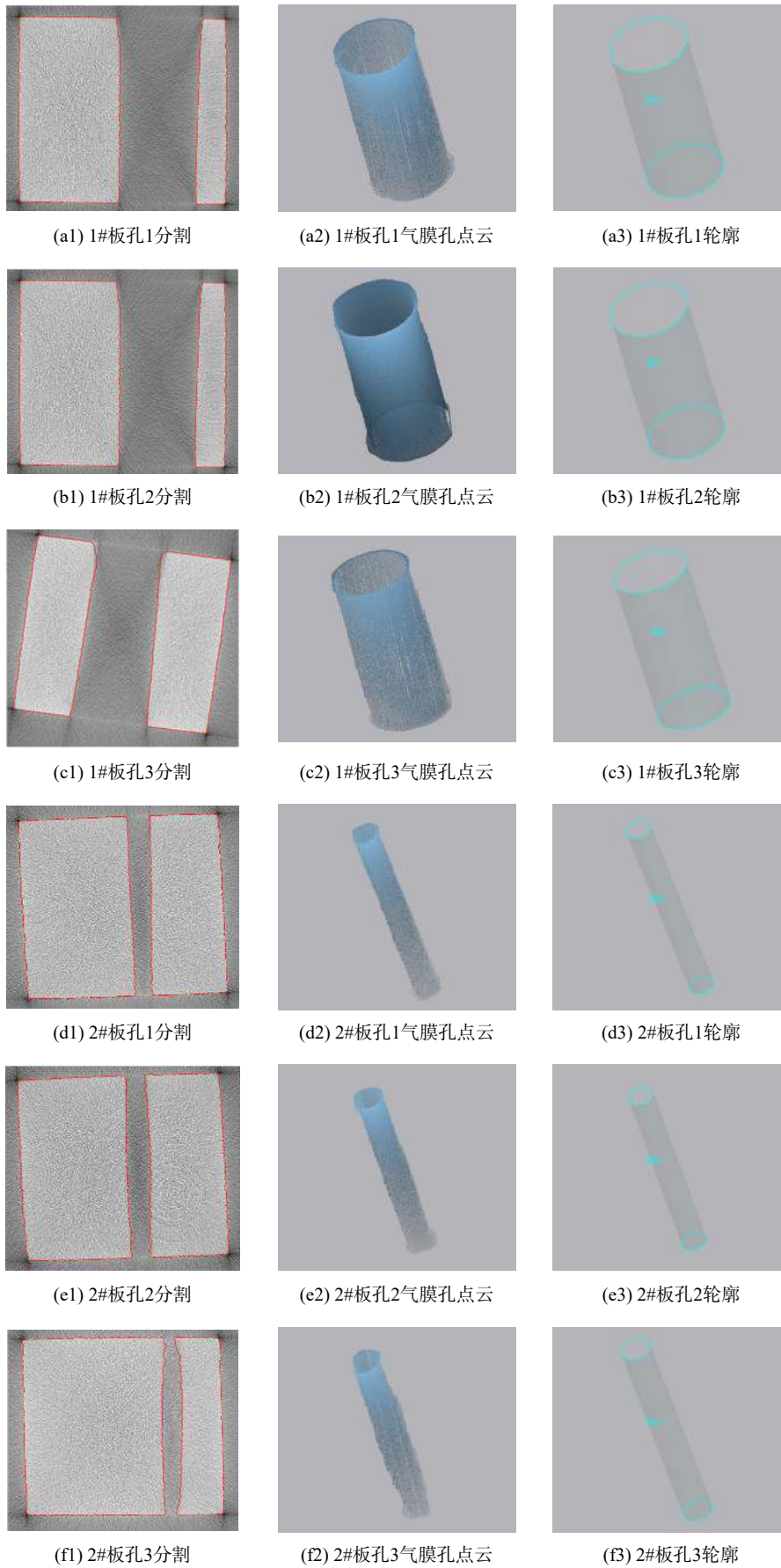


图 11 圆形气膜孔轮廓分割与点云拟合

Fig. 11 Segmentation and point cloud fitting of circular film hole

差,几何误差的相对误差 E_r 按照式(3)计算

$$E_r = \frac{D_a - D_d}{D_d} \times 100\%$$

(3)

其中 D_a 是平均直径, D_d 是设计直径。

经过计算,1#板对应工艺参数加工的圆孔入口直径平均为 1.370 mm,出口直径平均为 1.261 mm,几何误差的相对误差平均在 3%。由于超快激光加工过程中等离子体云散射激光能量反复辐照孔入口侧,造成最终所形成的孔入口直径略大于出口。2#板对应工艺参数加工的圆孔入口直径平均为 0.341 mm,出口直径平均为 0.303 mm,几何误差的相对误差平均在 11%,同样入口直径略大于出口。对比表 5 中 $\phi 1.4$ mm 和 $\phi 0.4$ mm 通孔特征数值可以发现在增加修孔情况下,气膜孔的锥度及几何误差小于无修孔的工艺,同时,当激光功率从 30 W 降到 15 W 时,气膜孔的几何尺寸误差增大。

气膜孔轴线位置度误差按照式(4)计算。

$$\psi = h \tan \delta$$

(4)

表 6 列出了飞秒激光加工通孔轴线位置度所测结果,图 12 为对气膜孔轴线位置度拟合的方法示意图。

不难发现,修孔情况下气膜孔的位置度误差明显小于无修孔工艺,而低功率条件下,气膜孔

的位置度误差增大。1#板和 2#板的圆形通孔存在约 $0.005^\circ \sim 0.020^\circ$ 之间的锥度,平均值为 0.012° ,位置度平均误差为 $\phi 0.020$ mm。

2.2.2 动态分层孔径

按照表 3 中不同工艺参数进行单晶平板试片制孔的动态分层实验(盲孔阶段),1#板和 2#板的工艺参数相同,区别为 1#板无修孔工艺,2#板有修孔工艺。其中孔 1~孔 3 实验采用的功率、进给量、扫描时间、圈数均相同,层数由孔 1~孔 3 分别为 5、10、15。对不同功率参数异型气膜孔进行深度测量,图 13 给出了 3#板~4#板中盲孔(孔 1~孔 3)的 CT 分割点云及面片显示结果。进一步通过特征分割点云拟合,对圆形盲孔气膜孔直径进行测量。

对 3#板孔 1~孔 3 和 4#板孔 1~孔 3 的平均直径进行测量。3#板工艺参数加工的圆形气膜孔盲孔的平均直径为 0.875 mm,相对误差在 13% 左右;4#板工艺参数加工的圆形气膜孔盲孔的平均直径为 0.890 mm,相对误差在 11% 左右。同样可以看出,在增加修孔情况下,4#板的孔 1、孔 2、孔 3 较 3#板的孔 1、孔 2、孔 3 的几何误差相对较小,说明修孔工艺可以提升气膜孔加工质量,同时修孔层数越多,几何误差越小。表 7 列出了相应拟合计算结果。

表 5 锥束 CT 对通孔的测量结果
Table 5 Measurement results of through holes by cone beam CT

孔类型	编号	平均直径/mm	入口直径/mm	出口直径/mm	锥度 $\theta/(^\circ)$ (计算)	几何误差/mm	$E_r/\%$
圆形通孔($\phi 1.4$ mm)	1#板孔 1	1.354	1.366	1.258	0.018 0	-0.046	3.286
	1#板孔 2	1.366	1.376	1.265	0.017 5	-0.034	2.429
	1#板孔 3	1.352	1.348	1.239	0.018 2	-0.048	3.429
圆形通孔($\phi 0.4$ mm)	2#板孔 1	0.354	0.348	0.314	0.005 7	-0.046	11.500
	2#板孔 2	0.356	0.331	0.301	0.005 0	-0.044	11.000
	2#板孔 3	0.351	0.344	0.296	0.008 1	-0.049	12.250

表 6 通孔轴线位置度几何特征锥束 CT 测量结果
Table 6 Measurement results of through hole axis position and geometric characteristics by cone beam CT

孔类型	编号	实测轴线向量 (a, b, c)	ψ/mm
圆形通孔($\phi 1.4$ mm)	1#板孔 1	(0.467 6, 0.323 4, 0.822 7)	0.014
	1#板孔 2	(0.244 5, 0.169 5, 0.954 7)	0.021
	1#板孔 3	(0.172 2, 0.161 8, 0.971 7)	0.016
圆形通孔($\phi 0.4$ mm)	2#板孔 1	(0.380 0, 0.282 7, 0.880 7)	0.028
	2#板孔 2	(0.207 2, 0.157 4, 0.965 6)	0.013
	2#板孔 3	(0.259 0, 0.151 2, 0.954 0)	0.029

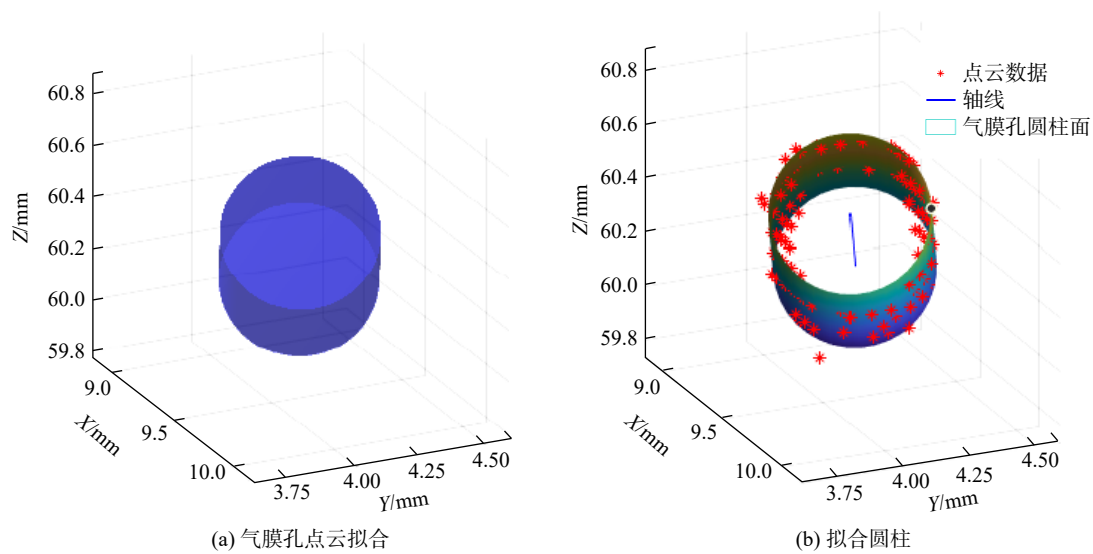
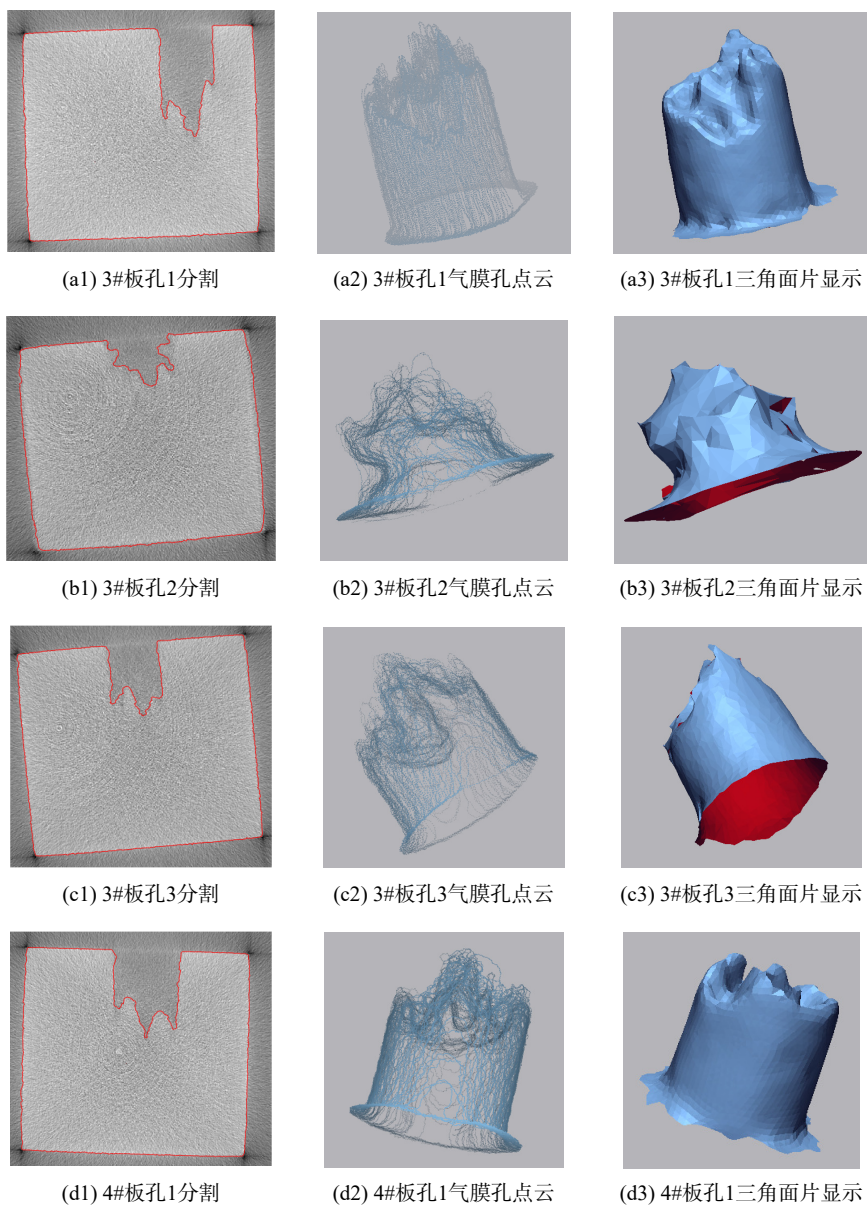


图 12 气膜孔轴线拟合示意图

Fig. 12 Diagram of the axis fitting of film hole



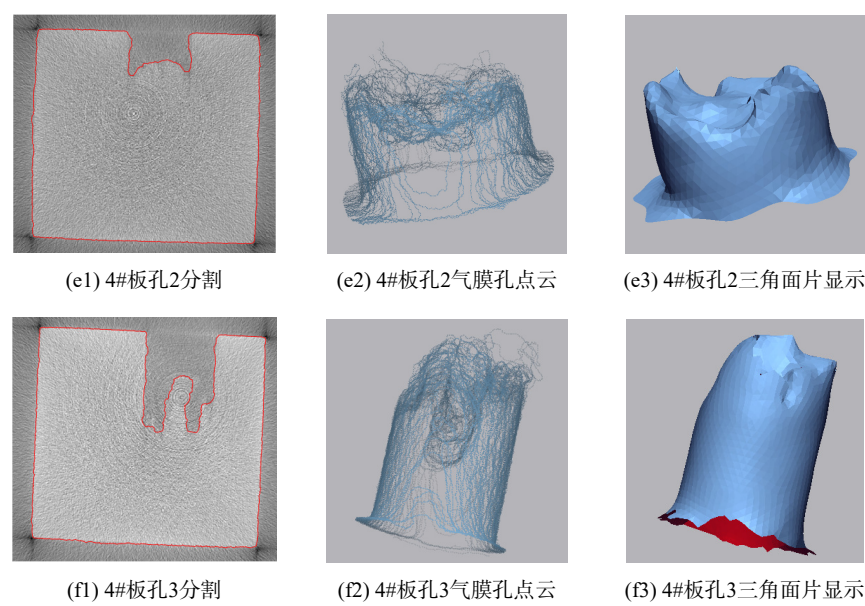


图 13 盲孔分割结果及面片显示
Fig. 13 Blind hole segmentation results and patch display

表 7 锥束 CT 对盲孔直径几何特征的测量结果
Table 7 Measurement results of geometric characteristics of blind hole diameter by cone beam CT

孔类型	编号	平均直径/mm	几何误差/mm	$E_t/\%$
圆形盲孔 (1 mm)	3#板孔 1	0.872 0	-0.128 0	12.80
	3#板孔 2	0.834 9	-0.165 1	16.51
	3#板孔 3	0.874 8	-0.125 2	12.52
	4#板孔 1	0.887 7	-0.112 3	11.23
	4#板孔 2	0.889 6	-0.110 4	11.04
	4#板孔 3	0.894 0	-0.106 0	10.60

2.2.3 异型孔尺寸轮廓

按照表 4 中不同工艺参数完成单晶平板试片 1#板~4#板(孔 4)异型气膜孔加工,其中不同板件的 4 个异型孔扩张段激光加工功率分别选择 20、15、10 W 和 5 W,其余参数保持不变,扫描速度为 2 000 mm/s,分割层数 145 层。对 1#板~4#板的异型气膜孔(孔 4)进行分析,分别提取样板气膜孔的出入口数据,分别求出所有测量模型入口数据与理论模型入口数据之间的距离,结果如图 14 所示,取其最大值,即可获得扇形气膜孔的出入口轮廓度误差。

根据上述几何特征,对簸箕形气膜孔的入射角、入口轮廓度进行检测与评定。首先对气膜孔试件进行 CT 扫描,得到气膜孔的三维点云数据,然后利用上述数据处理方法对这些三维点云数据进行处理,即可计算出簸箕孔的几何精度,表 8 中

给出了计算结果。

经过分析,上述 1#板~4#板的异型气膜孔的入射角的范围在 $60^{\circ}\sim 70^{\circ}$ 之间,入口轮廓度在 $0.03\sim 0.07\text{ mm}$ 之间,由于气膜孔入口能量较大,导致超快激光加工在气膜孔入口出现诸多非线性现象,导致入口材料的损伤较大,而产生的大的轮廓度误差,随着能量的降低,异型孔入口轮廓度误差减小。

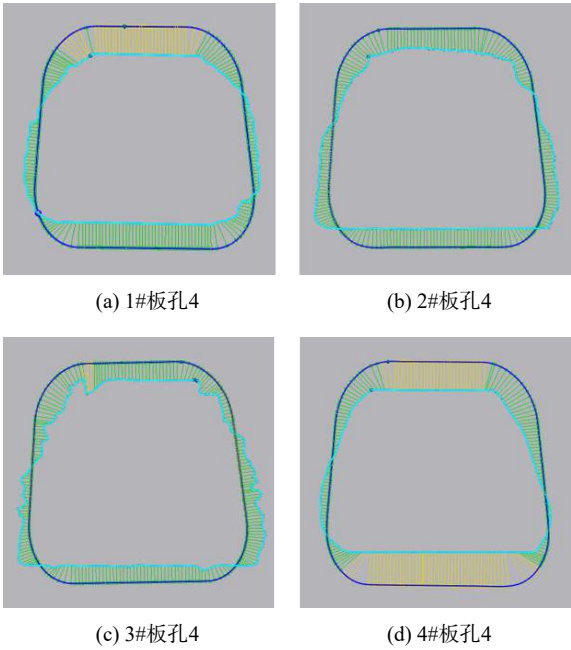


图 14 簸箕形气膜孔入口平面数据提取结果
Fig. 14 Data extraction from the inlet plane of the dustpan-shaped film hole

表8 簸箕孔几何精度计算结果
Table 8 Calculation results of geometric accuracy of dustpan hole

编号	入射角/(°)	入口轮廓度特征/mm
1#板孔 4	69.64	0.069 6
2#板孔 4	66.82	0.059 8
3#板孔 4	63.13	0.039 9
4#板孔 4	70.65	0.035 8

3 结 论

锥束 CT 无损检测技术在单晶涡轮叶片气膜孔几何特征测量与分析中有着巨大的优势,可以实现内部几何特征评估。通过锥束 CT 对不同工艺参数条件下微小气膜孔进行几何特征测量,本文所测激光制孔的孔入口直径略大于出口,锥度在 $0.005^\circ \sim 0.02^\circ$ 之间,位置度平均误差为 $\phi 0.028 \text{ mm}$ 。同时,相同工艺参数下,修孔工艺条件下的气膜孔轴线位置度误差较小。异型气膜孔的入射角的范围在 $60^\circ \sim 70^\circ$ 之间。激光功率对气膜孔的入口直径影响较大,小功率条件下异型气膜孔的入口轮廓度误差减小。使用锥束 CT 测量方法对气膜孔几何特征进行检测与评价是可靠的,具有重要的工程应用价值。

参考文献:

- [1] 孙黎. 气膜冷却孔飞秒激光加工技术与设备[J]. 航空动力, 2018, 5: 61-64.
SUN Li. Film hole femtosecond laser processing technology and equipment[J]. Aerodynamics, 2018, 5: 61-64. (in Chinese)
- [2] 董一巍, 吴宗璞, 李效基, 等. 叶片气膜孔加工与测量技术的现状及发展趋势[J]. 航空制造技术, 2018, 61(13): 16-25.
DONG Yiwei, WU Zongpu, LI Xiaoji, et al. Status and development trend of blade air film hole processing and measurement technology[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2018, 61(13): 16-25. (in Chinese)
- [3] 郭文, 王鹏飞. 轮叶片冷却技术分析[J]. 航空动力, 2020, 6: 55-58.
GUO Wen, WANG Pengfei. Analysis of turbine blade cooling technology[J]. Aerodynamics, 2020, 6: 55-58. (in Chinese)
- [4] ZHOU J, WANG X, LI J, et al. Effects of diameter ratio and inclination angle on flow and heat transfer characteristics of sister holes film cooling[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2019, 110: 1-14.
- [5] CAO N, LI X, WU Z Y, et al. Effect of film hole geometry and blowing ratio on film cooling performance[J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 165: 1-12.
- [6] 周君辉, 张靖周. 孔局部堵塞对叶片压力面冲击-扰流柱-气膜结构综合冷却效率的影响[J]. 航空学报, 2016, 37(9): 2729-2738.
ZHOU Junhui, ZHANG Jingzhou. Effect of partial blockage of air film orifice on the integrated cooling efficiency of blade pressure surface impact-disturbance column-air film structure[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2016, 37(9): 2729-2738. (in Chinese)
- [7] 周杨, 张扬, 苏欣荣, 等. 一种抵抗旋流扰动的端壁气膜孔分布[J]. 工程热物理学报, 2016, 37(12): 52-56.
ZHOU Yang, ZHANG Yang, SU Xinrong, et al. An end-wall air film pore distribution that resists cyclonic disturbances[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2016, 37(12): 52-56. (in Chinese)
- [8] BASHIR M H, SHIAU C C, HAN J C. Film cooling effectiveness for three-row compound angle hole design on flat plate using PSP technique[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 115(3): 918-929.
- [9] 赵丹, 刘存良, 朱惠人, 等. 涡轮叶片前缘对冲孔排气膜冷却特性的数值研究[J]. 航空动力学报, 2017, 32(11): 56-65.
ZHAO Dan, LIU Cunliang, ZHU Hui ren, et al. Numerical study of cooling characteristics of turbine blade leading edge to punched exhaust film[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2017, 32(11): 56-65. (in Chinese)
- [10] WANG C, ZHANG J, FENG H, et al. Large-eddy simulation of film cooling flow from a fan-shaped hole[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 129(3): 855-870.
- [11] 陈大为, 朱惠人, 李华太, 等. 尾迹对涡轮动叶全表面气膜冷却效率的影响[J]. 航空学报, 2019, 40(3): 101-109.
CHEN Dawei, ZHU Hui ren, LI Huatai, et al. Effect of wake traces on the cooling efficiency of the full-surface air film of turbine dynamic blades[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2019, 40(3): 101-109. (in Chinese)
- [12] MAGDZIAK M. Selection of the best model of distribution of measurement points in contact coordinate measurements of free-form surfaces of products[J]. Sensors, 2019, 19(24): 1-16.
- [13] LI R J, XU P, TANG S T, et al. High-precision probe for measuring micro-holes[J]. Acta Metrologica Sinica, 2018, 39(5): 598-604.
- [14] ELFURJANI S, KO J, JUN M. Micro-scale hole profile measurement using rotating wire probe and acoustic emission contact detection[J]. Measurement, 2016, 89: 215-222.
- [15] MURAKAMI H, KATSUKI A, SAJIMA T, et al. Development of measurement system for microstructures using an optical fiber probe: Improvement of measurable region and depth[J]. Measurement Science and Technology, 2020, 31(7): 1-10.
- [16] 鲍晨兴, 王磊, 李凯, 等. 基于 CCD 的叶片气膜孔快速检测技术研究[J]. 航空精密制造技术, 2017, 53(2): 52-55, 59.
BAO Chenxing, WANG Lei, LI Kai, et al. Research on rapid detection technology of gas film hole based on CCD[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2017, 53(2): 52-55, 59. (in Chinese)
- [17] 毕超, 房建国, 孙永春, 等. 一种用于测量气膜孔形位参数的五轴影像测量装置: 中国, 201711414874.1[P]. 2020-06-05.
- [18] HU X W, WANG G J, ZHANG Y J, et al. Large depth-of-field 3D shape measurement using an electrically tunable lens[J]. Optics Express, 2019, 27(21): 29697-29709.
- [19] TAO T Y, CHEN Q, FENG S J, et al. High-speed real-time 3D shape measurement based on adaptive depth constraint[J]. Optics Express, 2018, 26(17): 22440-22456.
- [20] 李其, 马毅力, 张丽. 基于激光测距原理的叶片气膜孔检测技术探讨[J]. 科学与信息化, 2021, 3: 94-96.
LI Qi, MA Yili, ZHANG Li. Discussion on blade film hole detection technology based on laser ranging principle[J]. Technology and information, 2021, 3: 94-96. (in Chinese)

- [21] WEN Z, PEI H, ZHANG C, et al. Analysis of surface quality of multi-film holes in nickel-based single crystal superalloy[J]. Metal Science Journal, 2016, 32(18): 1845-1854.
- [22] 汪文虎, 张展飞, 蒋睿嵩, 等. 基于工业CT扫描的异型气膜孔几何结构检测与评定方法: 中国, 201910970716.7[P]. 2021-11-16.
- [23] 蒋其麟, 曹凯强, 陈龙, 等. 涡轮叶片气膜孔的纳秒-飞秒双波段激光加工[J]. 航空制造技术, 2021, 64(18): 53-61. JIANG Qilin, CAO Kaiqiang, CHEN Long, et al. Nanosecond-femtosecond dual-band laser processing of turbine blade airfoil holes[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2021, 64(18): 53-61. (in Chinese)
- [24] 傅健, 张昌盛, 朱国港, 等. X射线分层层析成像技术及在航空航天领域的应用[J]. 航空制造技术, 2019, 62(14): 49-54. FU Jian, ZHANG Changsheng, ZHU Guogang, et al. X-ray layered tomography and its application in aerospace[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2019, 62(14): 49-54. (in Chinese)
- [25] 敖波, 邬冠华. 涡轮叶片热障涂层三维成像研究进展[J]. 航空制造技术, 2021, 64(4): 20-27. AO Bo, WU Guanhua. Advances in 3D imaging of sheet thermal barrier coatings[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2021, 64(4): 20-27. (in Chinese)

(编辑: 张 雪)