

DOI: 10.13382/j.jemi.B2408047

涡轮叶片热障涂层中微小缺陷的阵列超声瑞利波检测*

蔡苏阳¹ 陈振华¹ 冯 萍² 张浩喆² 何 喜² 方雨婷¹ 卢 超¹
(1. 南昌航空大学无损检测技术教育部重点实验室 南昌 330063; 2. 中国航发动力股份有限公司 西安 710021)

摘 要:航空涡轮叶片的热障涂层可降低叶片表面温度、防止表面高温腐蚀,涂层缺陷严重影响叶片使用性能,复杂的叶片曲面形状及其基体结构导致涂层缺陷的无损检测困难。鉴于瑞利波对表面应力和表面微裂纹等损伤变化敏感的特性,提出了基于广义瑞利波传播的涡轮叶片热障涂层表面微裂纹缺陷无损检测方法。设计了专用超声阵列换能器并搭建了瑞利波检测系统,提取沿叶片宽度方向上叶背涂层中传播的瑞利波检测信号,分析叶片幅度的分布特征与叶片内部复杂结构的关联;最后,分析叶片中人工窄槽对瑞利波传播特征的影响,并提出涂层缺陷的广义瑞利波检测方法。结果表明,涡轮叶片复杂表面轮廓、内腔导流结构导致对瑞利波幅度具有显著影响;将完好叶片涂层的瑞利波幅度分布与带窄槽(500 μm×80 μm×20 μm)的叶片涂层瑞利波幅度分布特征相对比表明,含窄槽路径上传播的超声波幅度明显上升,平均增大了 54.3 mV,该特征可用于涡轮叶片热障涂层表面微裂纹缺陷损伤的无损检测。

关键词: 涡轮叶片;热障涂层;瑞利波;微裂纹

中图分类号: TG115.28;TN95 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 430.25

Array ultrasonic Rayleigh wave detection of small defects in thermal barrier coatings of turbine blade

Cai Suyang¹ Chen Zhenhua¹ Feng Ping² Zhang Haozhe² He Xi² Fang Yuting¹ Lu Chao¹

(1. Key Laboratory of Nondestructive Testing of Ministry of Education, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China;
2. AECC Aviation Power Co., Ltd., Xi'an 710021, China)

Abstract: The thermal barrier coating of aviation turbine blades can reduce the surface temperature of the blades and prevent high temperature corrosion on the surface. The coating defects affect the performance of the blades seriously. The complex blade surface shape and its matrix structure lead to the difficulty of non-destructive testing of coating defects. In view of the sensitivity of Rayleigh wave to damage changes such as surface stress and surface micro-cracks, a non-destructive testing method for micro-crack defects on the surface of turbine blade thermal barrier coating based on generalized Rayleigh wave propagation is proposed. A special ultrasonic array transducer was designed and a Rayleigh wave detection system was built. The Rayleigh wave detection signal propagating in the back coating along the width direction of the blade was extracted, and the correlation between the distribution characteristics of the blade amplitude and the complex structure inside the blade was analyzed. Finally, the influence of artificial narrow slots in the blade on the propagation characteristics of Rayleigh waves is analyzed, and a generalized Rayleigh wave detection method for coating defects is proposed. The results show that the complex surface profile and the inner cavity diversion structure of the turbine blade have a significant effect on the amplitude of the Rayleigh wave. The Rayleigh wave amplitude distribution of the intact blade coating is compared with the Rayleigh wave amplitude distribution characteristics of the blade coating with a narrow groove (500 μm×80 μm×20 μm). The results show that the ultrasonic amplitude propagating on the path with a narrow groove increases significantly, with an average increase of 54.3 mV. This feature can be used for non-destructive testing of micro-crack defect damage on the surface of turbine blade thermal barrier coating.

Keywords: turbine blade; thermal barrier coatings; Rayleigh wave; micro-crack

收稿日期: 2024-12-16 Received Date: 2024-12-16

* 基金项目: 国家自然科学基金(12464059)、航发技术委托项目(HFDL-KYZ-JSZ-202308-40)资助

0 引言

热障涂层因具有熔点高、导热系数低、抗腐蚀性好等优点,能够对叶片基体起到卓越的隔热防护作用,广泛的应用于航空航天热防护领域^[1-2]。热障涂层系统(thermal barrier coatings, TBCs)已发展成为一种多层材料复合系统,包括陶瓷层(top coating, TC)、粘接层(bond coating, BC)和基体。陶瓷层主要降低高温金属基体的温度、延缓氧化,厚度一般在100~400 μm;粘接层是基体与陶瓷层的粘合剂,厚度一般在100 μm以内;在高温环境下,粘接层和陶瓷层之间形成一层厚度10 μm以内的致密氧化物,阻止高温金属材料进一步氧化^[3-5]。由于热障涂层长期处于高温、高压的工作环境中,在外物作用、内部生长应力、相变引起的体积膨胀等多方面因素的交叉作用下,极易萌生微裂纹并进一步延伸、扩展,引发剥落并导致最终失效^[6-8]。因此,采用合适的无损检测技术对叶片热障涂层进行定期检测十分必要^[9]。

目前,针对热障涂层中存在的缺陷,检测手段有声发射检测、红外热成像检测、太赫兹检测^[10-15]。声发射检测技术可有效实时监测涂层内部或界面处裂纹的萌生,扩展和传播,但现有的声发射检测平台接收到的检测信号噪声较大,裂纹信号难以区分;红外热成像可用于检测热障涂层厚度、分层、裂纹和脱粘,但空间分辨力弱,对垂直裂纹和界面裂纹识别率低,且红外检测精度测试前需要对测试件进行加热,检测程序复杂;太赫兹检测主要用于对热障涂层厚度的测量,对热障涂层中微裂纹的检测鲜有研究。热障涂层各层材料厚度小,常规超声脉冲回波方法存在层间反射信号混叠、检测结果难以评定等问题^[16-18]。鉴于瑞利波具有对表面应力和表面微裂纹等损伤变化敏感的特点,越来越多的国内外学者开始致力于热障涂层表面缺陷的超声瑞利波检测技术研究。吴时红等^[19]采用超声显微系统在热障涂层中激励瑞利波,经试验验证可检出Φ0.2 mm孔洞和Φ3 mm脱粘缺陷。Zhang等^[20]采用数值模拟方法研究了电磁超声瑞利波在热障涂层中的传播特性以及与分层缺陷的相互作用,从理论上阐明了瑞利波EMAT检测热障涂层分层缺陷的可行性。Qian等^[21]通过有限元数值模拟激光超声瑞利波透过热障涂层中脱粘缺陷的传播过程,并通过试验验证了脱粘缺陷定量误差低于5%,实现了脱粘缺陷的非接触光声成像。

热障涂层体系属于均匀半空间介质上覆盖一薄层结构,在陶瓷层、粘接层以及基体界面附近产生频散、多模态的瑞利波^[22-24]。鉴于现有无损检测方法普遍存在对热障涂层中微裂纹缺陷检测能力不足、可靠性差等问题,提出一种基于广义瑞利波传播及线性超声特征的热障涂层

表面微裂纹缺陷无损检测方法,分析涡轮叶片热障涂层表面产生微裂纹缺陷前后特征参数(瑞利波信号峰值)的变化,实现对涡轮叶片热障涂层表面微裂纹缺陷的识别。

1 超声瑞利波检测技术原理

1.1 超声瑞利波检测原理

瑞利波是在半无限弹性介质表面传播的界面弹性波,由纵波纵向振动和横波横向振动叠加而成,具有能量集中于固体表面、传播距离远且能量随深度增加而迅速衰减等特点。根据Snell原理,当发射换能器入射角超过瑞利角,第二介质中的折射纵波与横波全部消失,只存在沿表面传播的瑞利波。瑞利角 θ_R 计算公式为:

$$\theta_R = \arcsin \frac{C_{L1}}{C_R} \quad (1)$$

式中: C_{L1} 为第一介质中纵波声速; C_R 为第二介质中瑞利波声速。

瑞利波(非频散)传播和振动状态的理论,是对固体介质的一侧为真空或气体时才成立。但在均匀半空间介质上覆盖一层均匀各向同性的薄层情况下,层状介质中将出现频散多模态的勒夫波与广义瑞利波。由于勒夫波的振幅较瑞利波要小得多,且压电换能器不易激发水平剪切波,故对于半无限基体上层状材料的检测多采用广义瑞利波。广义瑞利波是由纵波与SV波耦合在固体表面形成,质点运动轨迹是垂直于波传播方向竖直平面内的逆时针椭圆,导波模式通常称为瑞利—兰姆模式(R-L型)。与通常意义的无频散的表面波相比,广义瑞利波在传播过程中受多层介质的影响,产生频散现象;而与导波能量分布与整个介质厚度区域不同,瑞利波的主要能量集中在检测对象的近表面。广义瑞利波在热障涂层中传播的声速随着频率的增大愈趋近于陶瓷层材料自身的瑞利波声速,并以非频散的形式传播。瑞利波(非频散)波速 C_R 可表示为:

$$C_R = \frac{0.87 + 1.12\sigma}{1 + \sigma} \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1 + \sigma)}} \quad (2)$$

式中: E 为介质的杨氏弹性模量; ρ 为介质的密度; σ 为介质的泊松比。

1.2 数值模拟

建立超声瑞利波在涡轮叶片热障涂层中传播的数值仿真模型,分析热障涂层以及叶片不同内壁结构对瑞利波声场及检测信号的影响。模型由热障涂层、水域、水浸换能器、吸收层组成,陶瓷层厚度100 μm,粘接层厚度30 μm,基体厚度1 000 μm,换能器频率4 MHz,入射角度为35°,如图1所示。由图1可知瑞利波主要传播路径经

过隔肋、扰流肋,因此在基体内壁添加隔肋和扰流肋,隔肋厚度 5 mm,扰流肋长宽均为 0.4 mm。热障涂层模型各部分材料的物理参数如表 1 所示。

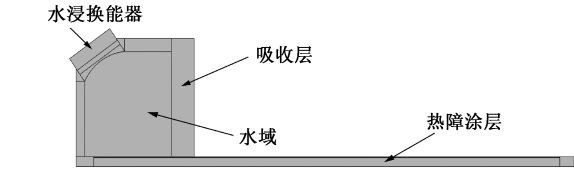


图 1 仿真模型
Fig. 1 Simulation model diagram

表 1 热障涂层材料物理参数

Table 1 Physical parameters of materials

组分	材料	杨氏模量/GPa	泊松比	密度/(kg·m ⁻³)
陶瓷层	93 ZrO2-7 Y2O3 (mol%)	45	0.11	6 070
粘接层	NiCoCrAlY	119.4	0.3	7 380
基体	DZ125	206	0.3	8 595

热障涂层中广义瑞利波传播的瞬态图如图 2 所示,每个结构分别提取了 13、28 μs 的超声波传播瞬态图。图 2(a)、(b)为排气边上的瑞利波传播瞬态图,排气边为薄板结构,瑞利波传播能量主要集中在表面,同时也会受到底面的影响、但影响较弱,传播过程体现出一定的频散效应。图 2(c)、(d)为隔肋上的瑞利波传播瞬态图,隔肋为厚板结构,瑞利波传播能量主要集中在表面(涂层内),很少受底面的影响,传播过程体现出一定的频散效应、幅度较高。图 2(e)、(f)为扰流肋上的瑞利波传播瞬态图,扰流肋结构复杂、瑞利波传播能量主要集中在表面(涂层内),但受扰流肋的影响严重,在扰流肋上出现散射衰减,传播过程体现出一定的频散效应、幅度较低。

在排气边、隔肋、扰流肋上传播的瑞利波仿真信号如图 3 所示,在扰流肋上传播的瑞利波信号幅值低,信号脉冲拉长,主要原因是瑞利波传播到扰流肋时发生散射。隔肋因自身厚度较大且底面平滑,对瑞利波传播的阻碍作用小,故接收到的信号幅度高。排气边上下表面平滑,也可接收到高幅值瑞利波信号。

综上,中心频率 4 MHz、入射角度 35°的阵列探头布置于涡轮叶片热障涂层表面会形成沿叶片宽度方向的各异的瑞利波检测信号,其差异是由叶片内壁结构引起的。

2 试验方法

2.1 试样制备

试验是某型含热障涂层的涡轮叶片,叶片基体厚度约 1 000 μm、涂层厚度约 150 μm、叶片长 75 mm、宽 48 mm,叶片表面为复杂曲面结构,如图 4 所示。通过激

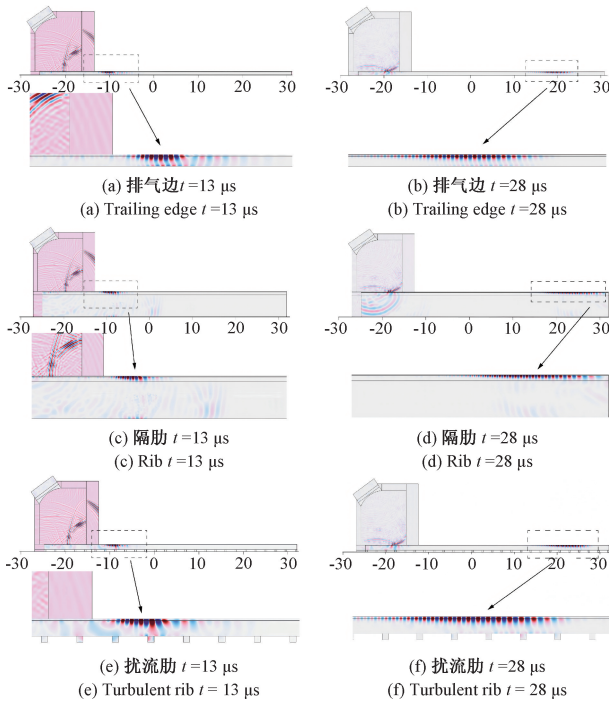


图 2 热障涂层超声瑞利波传播瞬态图
Fig. 2 Transient diagram of ultrasonic Rayleigh wave propagation in thermal barrier coatings

光加工方法垂直于热障涂层表面加工 500 μm×80 μm×20 μm 窄槽、模拟涂层的表面微裂纹缺陷;试样 2 上制备了一条距离叶片边缘 10.5 mm 的窄槽(图 4(a)),试样 2 上制备了两条分别距离叶片边缘 10.5 和 17 mm 的窄槽(图 4(b))。

2.2 试验方法

1) 专用超声阵列换能器设计

在复杂曲面涡轮叶片热障涂层表面很难形成稳定的声学耦合状态,导致检测信号干扰大、检测结果不稳定。由此,设计专用超声阵列换能器(图 5)高效提取叶背表面涂层的超声瑞利波检测信号。由图 5 可以看到,专用超声阵列换能器由专用工装和 6 对水浸探头组成,6 对水浸探头的晶片直径 3 mm、外部直径 5 mm;专用检测工装的检测面曲面与叶片曲面形状一致,并在工装上制作了 6 对直径 5.2 mm 的圆柱形探头舱,探头舱轴线与工装检测面法线成 35°夹角;6 对水浸探头分别安装于探头舱中可形成 35°斜入射纵波声束、探头舱中探头水距 10 mm。据式(1)可知,该角度可在叶背涂层上激发和接收广义超声瑞利波;专用超声阵列换能器中各水浸探头的叶宽方向间距 6.5 mm、叶片长度方向的间距 40 mm,探头发射广义瑞利波可完全覆盖叶背大部区域。

水浸探头发射超声波经探头舱中的水耦合介质入射至涂层形成广义瑞利波,在涂层中传播后经接收探头舱

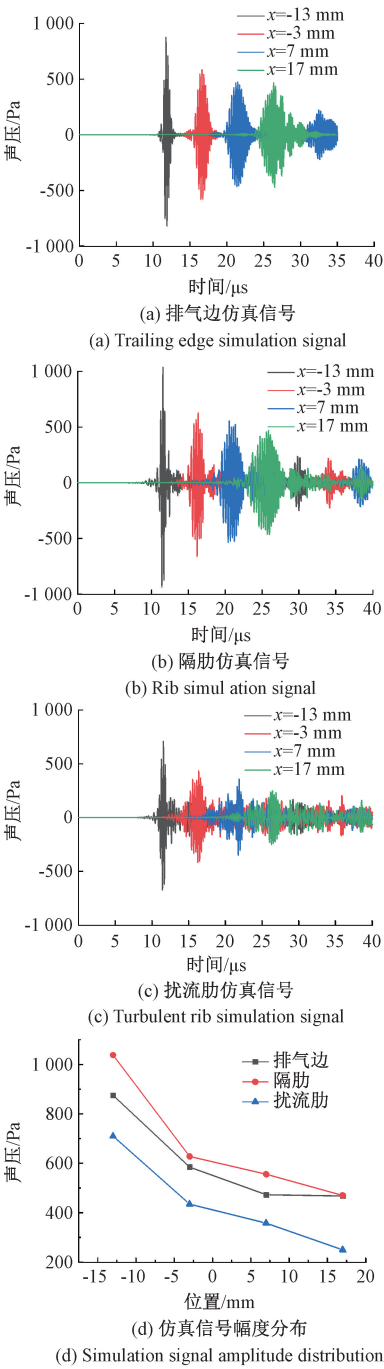


图 3 不同内壁结构仿真信号

Fig. 3 Simulation signals of different inner wall structures

中的水耦合介质,到达接收探头的时间 t 为:

$$t = \frac{L}{C_R} + \frac{2H}{C_1} \quad (3)$$

式中: L 为瑞利波传播距离; H 为探头舱中水距; C_R 为热障涂层瑞利波声速; C_1 为水中纵波声速。其中 $C_R=2\,500$ m/s。

2) 超声检测平台搭建

涡轮叶片热障涂层的超声瑞利波检测系统由超声脉

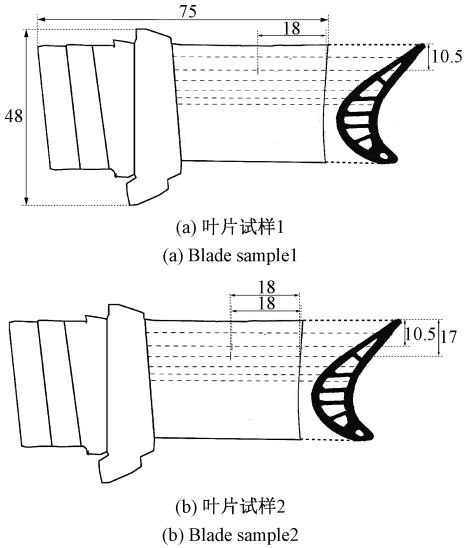


图 4 试样结构图

Fig. 4 Sample structure

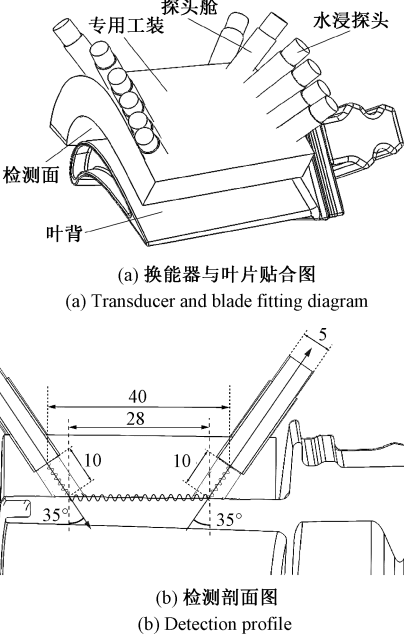
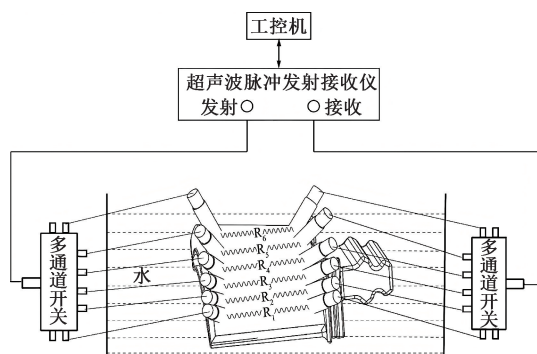


图 5 阵列换能器结构

Fig. 5 Structure diagram of array transducer

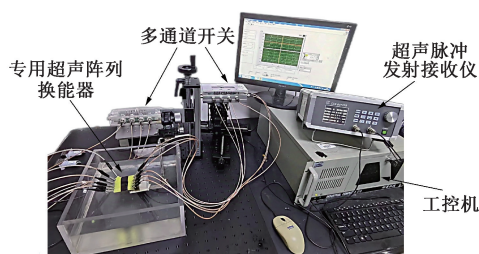
冲发射接收仪、多通道阵列换能器开关、专用超声阵列换能器和工控机组成,如图 6 所示。计算机控制超声脉冲发射接收仪发射激励信号,通过多通道阵列换能器开关控制各水浸探头反射-接收瑞利波。阵列发射水浸探头通过基于叶背曲面仿形的固定装置与叶片检测面保持良好的水耦合,发射的超声波以 35° 倾角入射至涡轮叶片热障涂层表面发生波型转换,激发出在热障涂层表面传播的瑞利波;瑞利波传播一定距离后被水浸探头接收。专用超声阵列换能器中的发射与接收水浸探头中心频率

4 MHz,瑞利波传播距离 28 mm,探头舱中水距 10 mm;试验时将专用超声阵列换能器的检测面与叶背曲面相贴合并浸没于水中,通过超声波脉冲发射接收仪激励 6 对水浸探头,在叶背表面激发沿 6 条路径(标示为 $R_1 \sim R_6$)传播的超声瑞利波,如图 6(a)所示。超声波在水中的纵波传播速度 1 480 m/s,探头舱中水距 10 mm;热障涂层瑞利波声速 2 500 m/s,瑞利波在热障涂层中传播距离 28 mm,代入式(3)求得理论瑞利波信号接收时间 24.71 μs ,与实际检测信号的 24.12 μs 基本一致(图 6(c))。



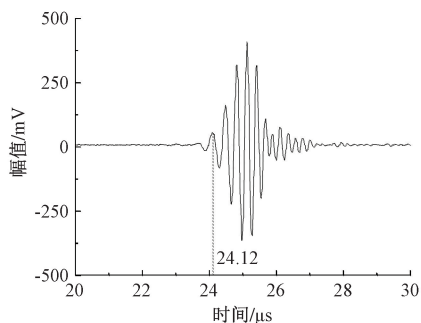
(a) 线性超声检测平台框图

(a) Block diagram of linear ultrasonic testing platform



(b) 线性超声检测平台照片

(b) Linear ultrasonic testing platform photos



(c) 典型检测信号

(c) Typical detection signal

图 6 线性超声检测平台及典型检测信号

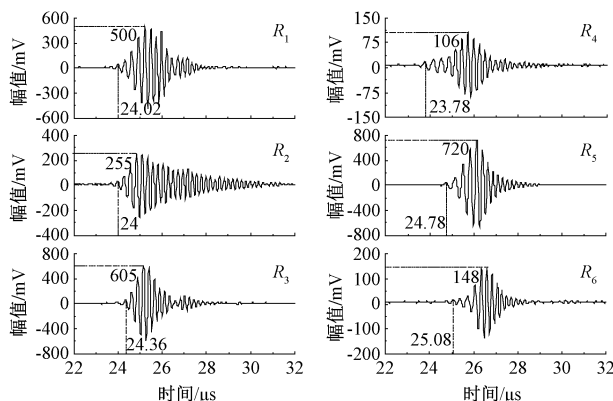
Fig. 6 Linear ultrasonic detection platform and typical detection signals

3 涂层缺陷的超声检测结果分析

3.1 超声检测结果分析

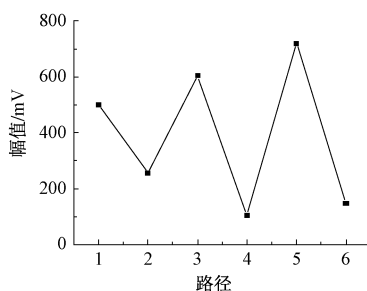
1) 检测信号受结构的影响

叶背上各瑞利波传播路径上的检测信号如图 7 所示。由于叶背瑞利波传播路径 $R_1 \sim R_6$ 内壁结构及表面曲率具有一定差异,检测信号的幅度及脉冲宽度各不相同,但其到达时间均为 24.5 μs 左右。



(a) 完好叶片各路径信号分布

(a) Signal distribution in each path of intact blades



(b) 完好叶片各路径幅度分布

(b) Amplitude distribution of each path of intact blades

图 7 线性检测信号

Fig. 7 Linear detection signal

叶片内壁结构如图 8 所示,除多个空腔外,还包括排气边、扰流肋、隔肋、扰流柱,这些结构特征均会引起瑞利波检测信号的变化。进一步分析瑞利波路径与叶片内壁结构特征的关联性可知:瑞利波传播路径 R_1 、 R_2 分别位于腔 7 的排气边和扰流柱; R_3 位于腔 6 和腔 7 间的隔肋上, R_4 位于腔 6 上, R_5 位于腔 6 和腔 5 间的隔肋上, R_6 位于腔 5 扰流肋上。瑞利波传播路径 R_2 、 R_4 、 R_6 主要位于腔体内壁的扰流肋上,其内壁扰流肋对瑞利波具有散射作用,使该路径的瑞利波脉冲被拉长、幅度下降;瑞利波传播路径 R_3 、 R_5 主要位于隔肋上,因隔肋厚度大并与叶盆相连、衰减较小,瑞利波在传播路径 R_3 、 R_5 上幅度较高;瑞利波传播路径 R_1 在排气边上、较为平滑,传播的瑞

利波也具有较高的幅度。因此,沿叶身长度方向传播的瑞利波脉冲宽度及幅度受叶片内部空腔结构的影响,能够体现叶片内部空腔的结构特征。

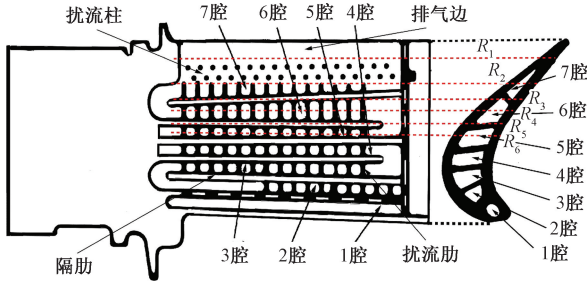
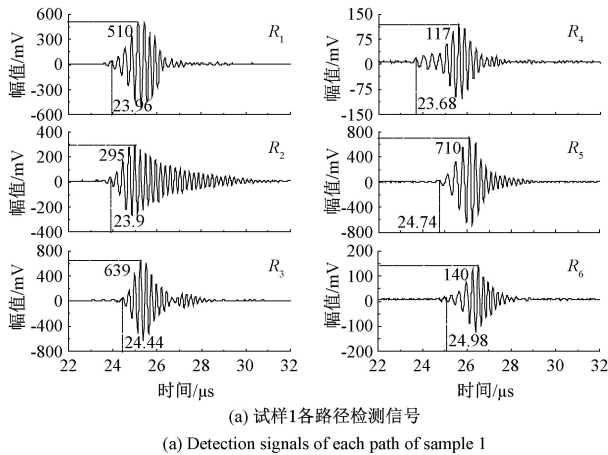


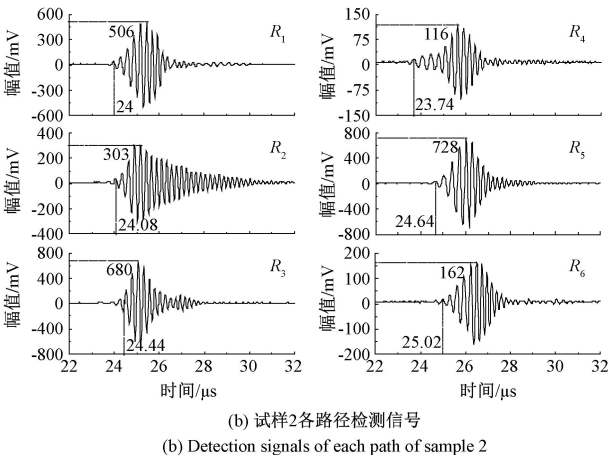
图 8 叶片内部结构
Fig. 8 Internal structure of blades

2) 表面窄槽分析

提取含窄槽缺陷叶片试样 1、试样 2 的检测信号如图 9 所示,含窄槽缺陷的叶片瑞利波检测信号与完好叶片瑞利波检测信号具有相同的分布特征,其到达时间均为 $24.5\ \mu\text{s}$ 左右,幅度分布有一定差异。



(a) 试样 1 各路径检测信号
(a) Detection signals of each path of sample 1



(b) 试样 2 各路径检测信号
(b) Detection signals of each path of sample 2

图 9 窄槽试样线性检测信号

Fig. 9 Linear detection signal of narrow groove sample

提取完好叶片、试样 1、试样 2 上的瑞利波检测信号幅度,并对比各试样上瑞利波幅度沿叶片宽度方向的分布,如图 10 所示。此外,定义加工窄槽后各路径上瑞利波幅度变化的绝对值 ΔA 为:

$$\Delta A = |A_1 - A_2| \quad (4)$$

式中: A_1 为完好叶片试样各路径瑞利波幅度; A_2 为窄槽试样各路径瑞利波幅度。

在试样 1 及试样 2 的 R_2 和 R_3 路径上加工有窄槽,两路径上瑞利波检测信号幅度有明显升高;完好试样 R_2 和 R_3 处信号幅度分别为 255、605 mV,试样 1 的 R_2 路径瑞利波信号幅度为 295 mV、幅度上升 40 mV;试样 2 的路径 R_2 和 R_3 处瑞利波信号幅度为 303 和 680 mV、幅度分别上升了 48 和 75 mV,其他完好路径的瑞利波幅度变化绝对值均小于 15 mV。

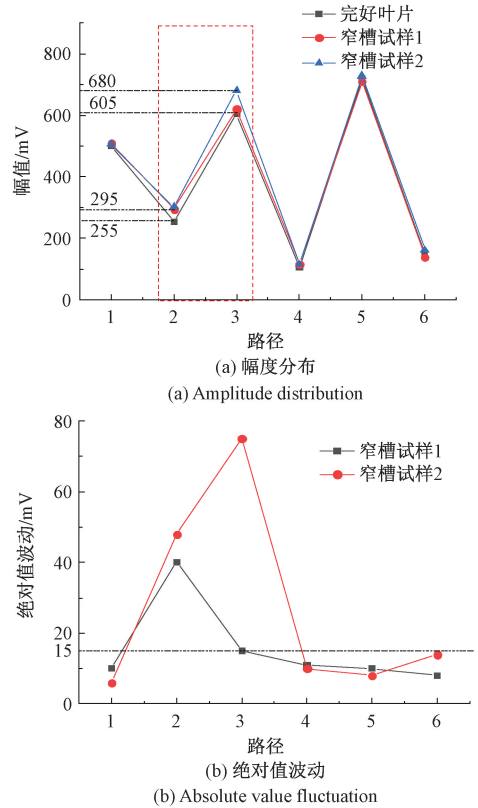


图 10 各试样瑞利波检测信号幅度分布
Fig. 10 The amplitude distribution of Rayleigh wave detection signal of each sample

由于热障涂层的微观结构为垂直于叶片表面的柱状晶组织,超声瑞利波在其中传播会产生剧烈的散射衰减,涂层金相的柱状晶结构如图 11 所示。当涂层中出现裂纹后,瑞利波绕过裂纹在基体界面传播,其遇到的柱状晶散射降低,使得接收到的瑞利波幅度上升。因此,可基于瑞利波幅度变化检测涂层缺陷,检测灵敏度达到 $500\ \mu\text{m} \times 80\ \mu\text{m} \times 20\ \mu\text{m}$ 表面窄槽尺寸。

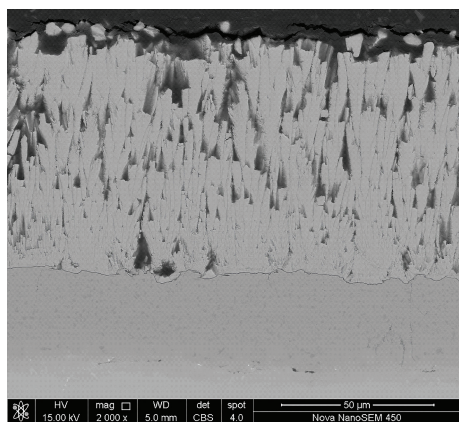


图 11 热障涂层组织结构特征

Fig. 11 Microstructure characteristics of thermal barrier coatings

4 结 论

基于阵列超声瑞利波检测技术深入研究瑞利波特征参数对叶片内部空腔结构及涂层表面微裂纹缺陷的表征能力。结果表明,本文设计的叶片热障涂层专用超声阵列换能器具有与叶背曲面一致的检测面,包含的探头阵列能够在曲面热障涂层中形成稳定、大范围的瑞利波声场,可有效提高检测效率和检测结果的可靠性;瑞利波检测信号在叶片宽度方向的幅度分布能够反映叶片内壁结构特征,沿隔肋与排气边传播的瑞利波信号幅度较高、沿内表面凸起物较多的扰流肋传播的瑞利波信号幅度较小;叶片表面热障涂层是垂直于叶片表面的柱状晶组织,对瑞利波传播具有衰减作用;涂层窄槽或缺陷破坏了涂层完整性,会使该路径上传播的瑞利波幅度上升,基于瑞利波幅度分布变化可检测叶片热障涂层表面微裂纹缺陷,检测灵敏度达到 $500\ \mu\text{m} \times 80\ \mu\text{m} \times 20\ \mu\text{m}$ 表面窄槽尺寸。

参考文献

- [1] MAHADE S, VENKAT A, CURRY N, et al. Erosion performance of atmospheric plasma sprayed thermal barrier coatings with diverse porosity levels [J]. Coatings, 2021, 11(1), 86.
- [2] 刘嘉航, 吕哲, 周艳文, 等. 热障涂层先进陶瓷材料研究进展[J]. 表面技术, 2022, 51(7): 42-52.
LIU J H, LYU ZH, ZHOU Y W, et al. Research progress of advanced ceramic materials for thermal barrier coatings [J]. Surface Technology, 2022, 51(7): 42-52.
- [3] 刘雨薇, 李淳, 冯世钊, 等. 长寿命热障涂层失效机制、材料选择及结构设计研究进展[J]. 中国表面工程, 2024, 37(5): 1-18.
LIU Y W, LI CH, FENG SH ZH. Research progress on failure mechanism, material selection and structural

- design of long-life thermal barrier coatings [J]. China Surface Engineering, 2024, 37 (5): 1-18.
- [4] 贾宜委, 王鹤峰, 王宇迪, 等. 航空发动机涡轮叶片热障涂层研究现状[J]. 表面技术, 2023, 52(11): 139-154.
JIA Y W, WANG H F, WANG Y D, et al. Research status of thermal barrier coatings for aeroengine turbine blades [J]. Surface Technology, 2023, 52 (11) : 139-154.
- [5] 宋佳楠, 李少林, 齐红宇, 等. 热障涂层失效行为与寿命预测研究进展[J]. 航空制造技术, 2019, 62(3): 34-40.
SONG J N, LI SH L, QI H Y, et al. Research progress on failure behavior and life prediction of thermal barrier coatings [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62 (3): 34-40.
- [6] 闫维亮, 杨丽, 周益春, 等. 热障涂层服役环境模拟试验方法的研究进展[J]. 航空制造技术, 2023, 66(17): 38-45.
YAN W L, YANG L, ZHOU Y CH, et al. Research progress on service environment simulation test method of thermal barrier coatings [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66 (17): 38-45.
- [7] 王铁军, 范学领, 孙永乐, 等. 重型燃气轮机高温透平叶片热障涂层系统中的应力和裂纹问题研究进展[J]. 固体力学学报, 2016, 37(6): 477-517.
WANG T J, FAN X L, SUN Y L, et al. Research progress on stress and crack problems in thermal barrier coating system for high temperature turbine blades of heavy-duty gas turbines [J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2016, 37(6): 477-517.
- [8] 陈举, 苏倩, 耿永祥, 等. 热障涂层失效行为及其修复再制造研究进展[J]. 航空工程进展, 2021, 12(4): 25-35.
CHEN J, SU Q, GENG Y X, et al. Research progress on failure behavior and repair and remanufacturing of thermal barrier coatings [J]. Aeronautical Engineering Progress, 2021, 12 (4): 25-35.
- [9] 李建超, 何箐, 吕玉芬, 等. 热障涂层无损检测技术进展[J]. 中国表面工程, 2019, 32(2): 16-26.
LI J CH, HE Q, LYU Y F, et al. Nondestructive testing technology progress of thermal barrier coatings [J]. China Surface Engineering, 2019, 32(2): 16-26.
- [10] 曹枝军, 袁建辉, 苏怀宇, 等. 声发射技术在热障涂层失效机理中的研究进展及展望[J]. 中国表面工程, 2023, 36(2): 34-53.
CAO ZH J, YUAN J H, SU H Y, et al. Research progress and prospect of acoustic emission technology in the failure mechanism of thermal barrier coatings [J].

- Surface Engineering of China, 2023, 36 (2): 34-53.
- [11] YANG L, YANG T T, ZHOU Y C, et al. Acoustic emission monitoring and damage mode discrimination of APS thermal barrier coatings under high temperature CMAS corrosion [J]. Surface & Coatings Technology, 2016, 304: 272-282.
- [12] SHRESTHA R, KIM W. Evaluation of coating thickness by thermal wave imaging: A comparative study of pulsed and lock-in infrared thermography-part I: Simulation[J]. Infrared Physics & Technology, 2017, 83: 124-131.
- [13] TANG Q J, DAI J, LIU J, et al. Quantitative detection of defects based on Markov-PCA-BP algorithm using pulsed infrared thermography technology [J]. Infrared Physics & Technology, 2016, 77: 144-148.
- [14] KRIMI S, KLIER J, JONUSCHEIT J, et al. Self-calibrating approach for terahertz thickness measurements of ceramic coatings[C]. 41st International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Wave. IEEE, 2016.
- [15] 叶东东, 王卫泽. 热障涂层太赫兹无损检测技术研究进展[J]. 表面技术, 2020, 49(10): 126-137, 197.
- YE D D, WANG W Z. Research progress in terahertz nondestructive testing technology for thermal barrier coatings[J]. Surface Technology, 2020, 49(10): 126-137+197.
- [16] JIA J M, YU ZH, KAI SH ZH, et al. Quantitative detection and evaluation of Rayleigh ultrasonic wave for fatigue crack on turbine blade surface [J]. Applied Acoustics, 2023, 211: 109558.
- [17] 张炯, 肖俊峰, 高松, 等. 热障涂层表面裂纹水浸超声检测 [J]. 航空动力学报, 2019, 34 (6): 1217-1224.
- ZHANG J, XIAO J F, GAO S, et al. Water immersion ultrasonic testing of surface cracks in thermal barrier coatings[J]. Journal of Aeronautical Dynamics, 2019, 34(6): 1217-1224.
- [18] 甄雨. 叶片微裂纹的超声瑞利波检测技术研究[D]. 长春: 吉林大学, 2022.
- ZHEN Y. Study on ultrasonic Rayleigh wave detection technology for micro cracks in leaves [D]. Changchun: Jilin University, 2022.
- [19] 吴时红, 陈颖, 何双起. 超声显微检测系统在涂层检测中的应用研究[J]. 宇航材料工艺, 2005, 35(4): 55-57.
- WU SH H, CH Y, HE SH Q. Application of ultrasonic microscopic detection system in coating detection [J]. Aerospace Material Technology, 2005, 35(4): 55-57.
- [20] ZHANG Y G, PEI C X, DENG J, et al. Detection mechanism of delamination in thermal barrier coatings of turbine blade using a Rayleigh wave EMAT [J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2024, 74(4): 405-413.
- [21] QIAN CH, PEI C X, KOU X, et al. Debonding defect imaging of thermal barrier coating with grating laser acoustic spectroscopy [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2025, 224: 112184.
- [22] 贾璐, 阎守国, 张碧星, 等. 分层半空间表面非线性瑞利波的激发 [J]. 应用声学, 2022, 41 (2): 278-284.
- JIA L, YAN SH G, ZHANG B X, et al. Excitation of nonlinear Rayleigh waves on the surface of layered half-space [J]. Application Acoustics, 2022, 41 (2): 278-284.
- [23] 刘昊楠, 张致付, 陈凯. 瑞利面波频散曲线贝叶斯反演及其在活断层调查中的应用[J]. 地球物理学进展, 2020, 35(4): 1584-1589.
- LIU H N, ZHANG ZH F, CHEN K. Bayesian inversion of Rayleigh surface wave dispersion curve and its application in active fault survey [J]. Progress in Geophysics, 2020, 35(4): 1584-1589.
- [24] SAFANI J, HAMIMU L, FIRDAUS, et al. Novel depiction of love wave dispersion and inversion for inversely dispersive medium by full SH-wavefield reflectivity method-part I: numerical example [C]. 9th International Conference on Physics and Its Applications (ICOPIA), 2018.

作者简介



蔡苏阳, 2022 年于南昌航空大学获得学士学位, 现为南昌航空大学硕士研究生, 主要研究方向为超声波无损检测技术。

E-mail: 3194755023@qq.com

Cai Suyang received his B. Sc. degree from Nanchang Hangkong University in 2022.

Now he is a M. Sc. candidate of Nanchang Hangkong University. His main research interest includes ultrasonic nondestructive testing technology.



陈振华 (通信作者), 2004 年于江西师范大学获得学士学位, 2010 年于北京工业大学获得博士学位, 现为南昌航空大学教授, 主要研究方向为超声波无损检测技术及其系统、测控技术及仪器。

E-mail: zhenhuachen@yeah.net

Chen Zhenhua (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Jiangxi Normal University in 2004, Ph. D. degree from Beijing University of Technology in 2010, respectively. Now he is a professor in Nanchang Hangkong University. His main research interest includes ultrasonic nondestructive testing and related instrument, the measurement and control technology and instrument.