

热障涂层表面裂纹水浸超声检测

张 炯, 肖俊峰, 高 松, 高斯峰, 李永君, 唐文书, 南 晴
(西安热工研究院有限公司 燃气轮机技术部, 西安 710054)

摘 要: 为有效检测热障涂层(TBCs)表面裂纹,进行了热障涂层表面裂纹水浸超声检测技术的应用研究。以常用的大气等离子喷涂(APS)热障涂层作为试验材料,采用水浸超声检测回波声程差和 C 扫描图像对不同深度、宽度和长度的热障涂层表面裂纹进行了表征。结果表明:热障涂层基体材料对热障涂层表面裂纹的检测效果无明显影响;通过优化检测参数和合理选用仪器探头,利用水浸超声方法可实现对热障涂层表面深度为 0.1 mm、长度为 2 mm 裂纹的有效检测;水浸超声检测技术可以获得裂纹的长度、深度参数,是解决热障涂层表面裂纹检测问题的有效方法。

关 键 词: 热障涂层 (TBCs); 表面裂纹; 水浸超声检测; C 扫描; 回波声程差

中图分类号: V232.4 **文献标志码:** A

Immersion ultrasonic testing of surface cracks on thermal barrier coatings

ZHANG Jiong, XIAO Junfeng, GAO Song, GAO Sifeng,
LI Yongjun, TANG Wenshu, NAN Qing
(Gas Turbine Department,

Xi'an Thermal Power Research Institute Company Limited, Xi'an 710054, China)

Abstract: In order to effectively detect the surface cracks on thermal barrier coatings (TBCs), the applicability of immersion ultrasonic testing method was studied. The TBCs samples were fabricated by the air plasma spray (APS), which was most commonly used in the TBCs process. The surface cracks with different depth, width and length were characterized by echo path difference and C scan image. Results indicated that the substrate materials had no obvious influence on the immersion ultrasonic testing results. By optimizing the detection parameters and selecting the instruments and probes properly, the surface crack with the depth of 0.1 mm and the length of 2 mm can be detected effectively by the immersion ultrasonic testing method. The length and depth of the surface cracks on TBCs can also be achieved by immersion ultrasonic testing method, make it an effective way to solve the TBCs surface cracks detection problem.

Key words: thermal barrier coatings (TBCs); surface crack; immersion ultrasonic testing; C scan; echo path difference

收稿日期:2018-08-27

基金项目:华能集团总部科技项目(HNKJ18-H11)

作者简介:张炯(1987—),男,工程师,硕士,主要从事航空发动机和重型燃气轮机部件无损评价工作。

引用格式: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 Jiong,XIAO Junfeng,GAO Song,et al. Immersion ultrasonic testing of surface cracks on thermal barrier coatings[J]. Journal of Aerospace Power,2019,34(6):1217-1224.

热障涂层(TBCs)以其优良的隔热、耐磨和耐腐蚀性能被广泛的应用在燃气轮机和航空发动机的热端部件上^[1-2]。但由于热障涂层处于高温、高压的工作环境中,在交变载荷和热应力的作用下,热障涂层极易发生失效破坏^[3]。热障涂层的失效是由裂纹形核、扩展和聚结等一系列事件累积造成的^[4]。热障涂层的失效形式主要有陶瓷层表面垂直裂纹引起的涂层断裂、各层之间的界面裂纹导致的剥落^[5-7]。在轴向拉伸载荷作用下,热障涂层表面裂纹首先在陶瓷层中萌生并扩展,当表面裂纹扩展到一定尺寸和密度时,表面裂纹扩展到陶瓷层/黏接层界面,促进界面裂纹的萌生并扩展成为界面分层^[8-10],最终导致热障涂层剥落,影响热障涂层使用寿命和隔热效果。因此,对热障涂层表面裂纹的有效检测有助于预防热障涂层剥落引起的热端部件损伤,提高部件的使用寿命。

目前,国内外对于热障涂层状况的评价主要集中在对热障涂层陶瓷层厚度、热障涂层脱黏和热生长氧化物(thermally grown oxide, TGO)的检测^[11]。Fukuchi等利用太赫兹技术对热障涂层厚度进行了测量研究,可达到 $11\mu\text{m}$ 的绝对误差(或6%的相对误差)^[12-14]。Ma等利用超声反射系数幅度谱法对热障涂层TGO进行了评估^[15],Zhao等提出了一种利用超声反射系数幅度谱法一次性测得热障涂层陶瓷层厚度及其纵波声速方法,其厚度和纵波声速的检测相对误差均小于10%^[16]。Tang等研究了锁相红外技术对热障涂层脱黏缺陷的检测效果,提出了可获得更高全相位对比度的检测参数^[17]。Liu等通过线激光快速扫描热图像法与后处理算法相结合,通过数值模拟和试验验证,证明此方法可检出热障涂层直径最小为1mm的盲孔缺陷和直径为2mm的脱黏人工缺陷^[18]。Heeg等利用光-热响应相结合的方法,对热障涂层TGO厚度和涂层压应力进行了测量^[19]。何存富等对毫米波检测热障涂层脱黏和热生长氧化层的特性进行了仿真研究,结果表明利用毫米波反射系数的相位差可以对长脱黏的宽度、面脱黏的面积、大脱黏的脱黏深度以及TGO的厚度进行表征^[20]。郭兴旺等对热障涂层厚度及厚度不均的红外热波无损检测建模和基于有限元的数值模拟,为热障涂层厚度及厚度不均的红外无损检测及表征提供了基本理论依据^[21]。Yang等利用声发射技术对三点弯曲的热障涂层试样的断裂模式和涂层性能与声发射信号关系进行了研究,发现断裂过程中先出现表面裂纹,表面

裂纹的扩展形成界面裂纹^[22]。Chen等利用超声检测技术对不同服役时间的热障涂层脱黏和陶瓷层劣化进行了有效表征^[23]。上述国内外的研究仅是对热障涂层的陶瓷层厚度、脱黏、TGO厚度等的检测技术进行研究,而对于会造成脱黏缺陷的热障涂层表面裂纹的检测国内外尚鲜见到相关报道。

本文针对热障涂层破坏初始阶段的表面裂纹检测问题,研究热障涂层水浸超声检测过程中的超声波传播和反射特征,分析了影响检测精度的因素。通过利用水浸超声脉冲反射技术对热障涂层表面人工裂纹槽进行了检测试验,获得了不同裂纹槽深度情况的超声反射声时差和C扫描图像,初步验证了利用水浸超声脉冲反射法检测热障涂层表面裂纹的技术可行性,为热障涂层表面裂纹的检测问题提供了技术基础。

1 表面裂纹水浸超声检测理论分析

1.1 检测频率的影响

涡轮叶片热障涂层表面裂纹缺陷深度较浅(一般不超过陶瓷层厚度),在检测过程中热障涂层表面裂纹缺陷底部反射回波与热障涂层表面反射回波声程差很小(最大为 $0.5\mu\text{s}$),导致两个回波发生叠加而无法识别,因此反射回波的区分与识别是热障涂层表面裂纹缺陷检测的关键。

在不考虑晶片材质、声透镜对水浸超声检测效果影响的情况下,探头频率的提高可增强探头的纵向分辨力,有利于反射回波在时域上的区分。但检测频率提高的同时超声波长变短,热障涂层孔隙对超声声束的散射变大,不利于反射回波在幅值上的识别。探头频率的降低虽可减少热障涂层孔隙对超声声束的散射,但同时亦会降低探头纵向分辨力。因此,水浸超声探头频率的选择,应综合考虑纵向分辨力和热障涂层散射的影响。

若要检测出深度为 h 的热障涂层表面裂纹缺陷(图1),需使热障涂层表面裂纹缺陷底部回波与热障涂层表面回波完全区分开,即满足

$$2f \geq nc_w/h$$

式中 f 为水中纵波频率; n 为脉冲周期数; c_w 为水中纵波声速; h 为裂纹缺陷深度。

取水中纵波声速 $c_w=1500\text{ m/s}$,脉冲周期数 $n=4$,裂纹缺陷深度 $h=0.1\text{ mm}$,代入 $2f \geq nc_w/h$ 得 $f=30\text{ MHz}$ 。此频率为完全区分开热障涂层表面裂纹缺陷底部反射波和热障涂层表面反射波的最小频率。

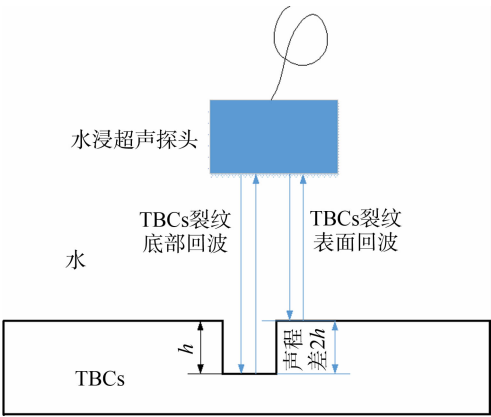


图 1 热障涂层表面裂纹缺陷检测回波声程差
Fig. 1 Echo path difference of TBCs surface cracks testing

由以上理论可知,选择中心频率为 15 MHz 的水浸超声探头对深度为 0.1 mm 的热障涂层表面裂纹缺陷进行检测时,热障涂层表面裂纹缺陷底部反射波和热障涂层表面反射波会有 1/2 的重叠。试验发现,通过适当选择超声成像软件的闸门位置,可在 C 扫描图像上对热障涂层表面裂纹缺陷底部反射波和热障涂层表面反射波进行有效辨识。

另外,需考虑到热障涂层孔隙对超声波的散射作用,当孔隙直径达到超声波波长的 1/10 以上时^[24],便会产生强烈的散射作用,从而大大降低反射回波的幅度。频率 $f=30\text{ MHz}$ 的超声波波长 $\lambda=0.05\text{ mm}$,而热障涂层平均孔隙直径约为 $10\text{ }\mu\text{m}$,见图 2。此时热障涂层孔隙对超声波散射很大,极大影响热障涂层表面裂纹缺陷的检测。频率 $f=15\text{ MHz}$ 的超声波波长 $\lambda=0.1\text{ mm}$,热障涂层平均孔隙直径与其波长比值约为 1/10,理论散射强度较小。

在综合考虑水浸超声探头纵向分辨力和热障

涂层孔隙散射作用下,最终选择中心频率为 15 MHz 的点聚焦水浸超声探头对热障涂层表面裂纹缺陷进行检测。

1.2 检测原理

热障涂层表面裂纹缺陷水浸超声检测法原理如下:当点聚焦水浸超声探头扫描被检叶片热障涂层表面无裂纹区域时,最高回波为被检叶片热障涂层表面的反射波 S;当点聚焦水浸超声探头扫描到被检叶片热障涂层表面裂纹缺陷正上方时,最高回波 F 由热障涂层表面反射波 S1 和热障涂层表面裂纹缺陷底部反射波 F1 叠加而成,最高回波 F 的能量较无裂纹处降低,相位发生后移,见图 3。利用超声波 C 扫描系统,将被检叶片热障涂层表面回波波幅以能量的方式通过图像显示出来,就可绘制出被检叶片热障涂层表面裂纹缺陷的 C 扫描图像,结合 A 扫描声时差来确定裂纹缺陷的尺寸,实现对热障涂层表面裂纹缺陷的检测。

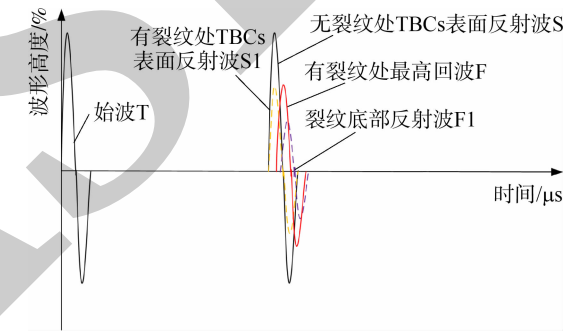


图 3 热障涂层材料表面裂纹水浸超声检测原理
Fig. 3 Immersion ultrasonic testing principle of TBCs surface cracks

2 热障涂层表面裂纹试样及水浸超声检测系统

2.1 热障涂层表面裂纹试样制备

热障涂层表面裂纹试样由陶瓷层、黏接层和基体组成,具体结构如图 4 所示。陶瓷层厚度为 200~300 μm ,成分为含质量分数为 7%~8% Y_2O_3 的稳定氧化锆。黏接层厚度为 200~300 μm ,成分为 Ni-22Cr-9Al-37Co-0.5Y。为研究基体材料对检测结果的影响,分别制备了以等轴晶镍基高温合金(以下简称等轴合金)为基体和以定向柱晶镍基高温合金(以下简称定向合金)为基体的热障涂层表面裂纹试样,等轴合金牌号为 K438(国外相近牌号为 IN738),定向合金牌号为 DZ411(国外相近牌号为 GTD111)。

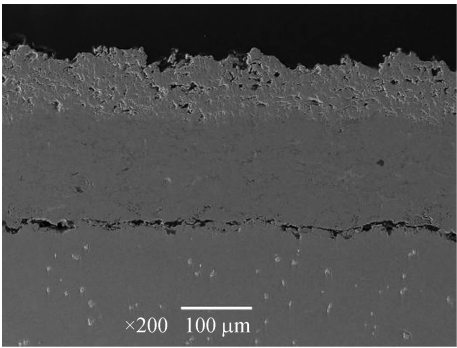


图 2 热障涂层扫描电镜(SEM)照片(200×)
Fig. 2 Scanning electron microscope (SEM) image of TBCs (200×)

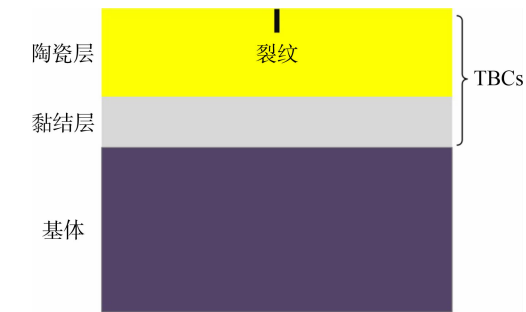


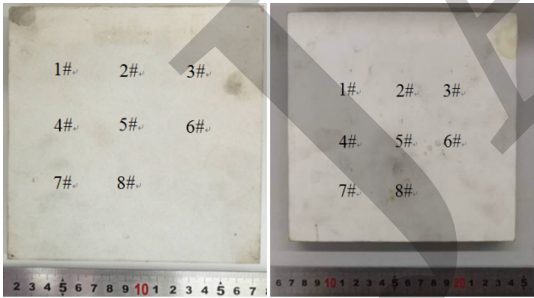
图 4 热障涂层表面裂纹试样结构图

Fig. 4 Structure diagram of TBCs surface crack samples

表 1 热障涂层表面裂纹尺寸

Table 1 Dimensions of TBCs surface cracks

检测试件 基体	裂纹 编号	裂纹尺寸/mm			检测试件 基体	裂纹 编号	裂纹尺寸/mm		
		长度	宽度	深度			长度	宽度	深度
等轴 合金	1#	2	0.2	0.05	定向 合金	1#	2	0.2	0.05
	2#	2	0.2	0.1		2#	2	0.2	0.1
	3#	2	0.2	0.2		3#	2	0.2	0.2
	4#	1	0.2	0.1		4#	1	0.2	0.1
	5#	3	0.2	0.1		5#	3	0.2	0.1
	6#	2	0.2	0.1		6#	2	0.2	0.1
	7#	2	0.1	0.1		7#	2	0.1	0.1
	8#	2	0.3	0.1		8#	2	0.3	0.1



(a) 等轴合金基体 (b) 定向合金基体

图 5 热障涂层表面裂纹试样实物图

Fig. 5 Photos of TBCs surface crack samples

2.2 水浸超声检测试验系统

本研究采用搭载 TecView UT 2 超声成像软件的 TecScan 水浸超声检测系统(图 6),TecScan 水浸超声检测系统主要由数据采集及处理软件、扫查系统、TecScan 超声探伤仪、点聚焦水浸超声探头、水槽等组成。扫查系统控制探头做扫查运动,其最小的扫描间距为 1 μm。超声探伤仪用于发射和接收脉冲信号,发射脉冲波形为尖波,脉冲重复频率为 44 Hz,采样精度为 14 bit,采样频率为 125 MHz。水浸超声探头聚焦形式为点聚焦,中心频率为 15 MHz。

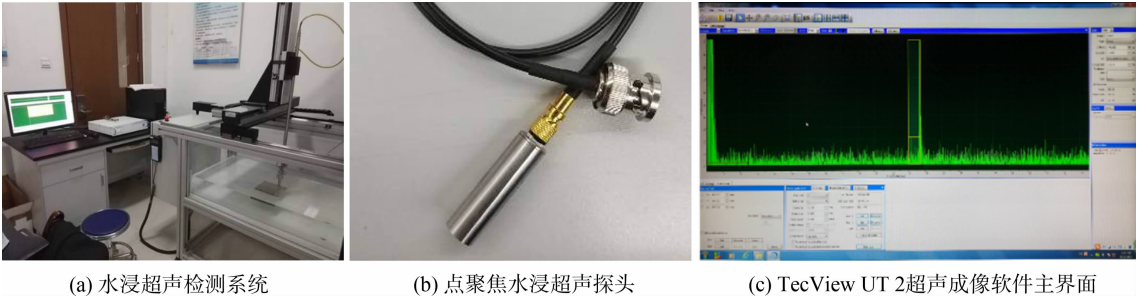


图 6 TecScan 水浸超声检测系统

Fig. 6 TecScan immersion ultrasonic testing system

3 试验研究

3.1 基体材料对检测结果的影响

对相同规格尺寸的等轴合金基体和定向合金基体的热障涂层表面裂纹进行检测试验,确定基体材料对检测结果的影响。分别对两个试板上的 2#、3#、4# 和 5# 裂纹缺陷进行水浸超声检测,点聚焦水浸超声探头扫描方向与裂纹缺陷长度方向垂直,具体检测参数见表 2,检测结果见表 3 和图 7。检测结果表明:①热障涂层表面相同深度裂纹缺陷的声时差无明显差异;②热障涂层表面相同深度裂纹缺陷的幅值无明显差异;③基体材质对热障涂层表面裂纹缺陷水浸超声检测结果无明显影响。

表 2 水浸超声检测参数

Table 2 Parameters of immersion ultrasonic testing

检测频率/ MHz	扫描间距/ mm	步进间距/ mm	扫描速度/ (mm/s)
15	0.01	0.2	0.4

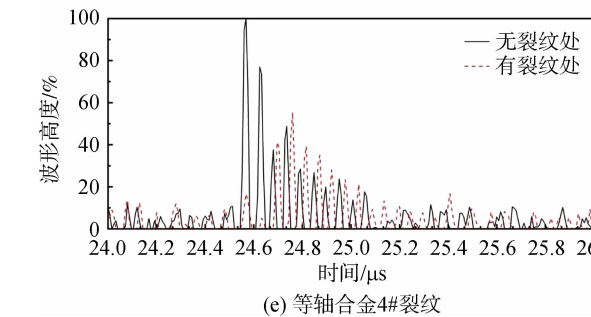
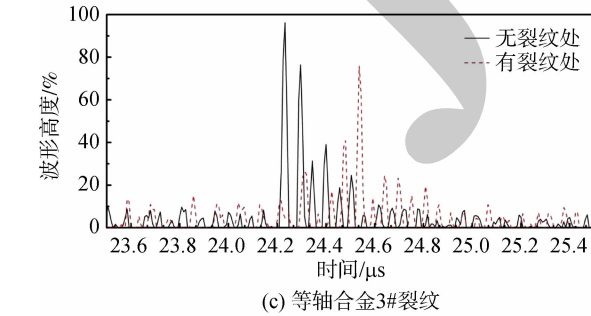
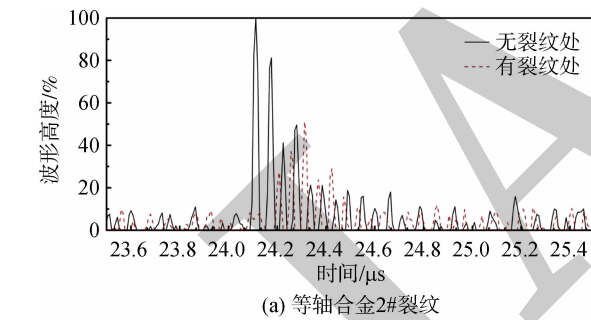


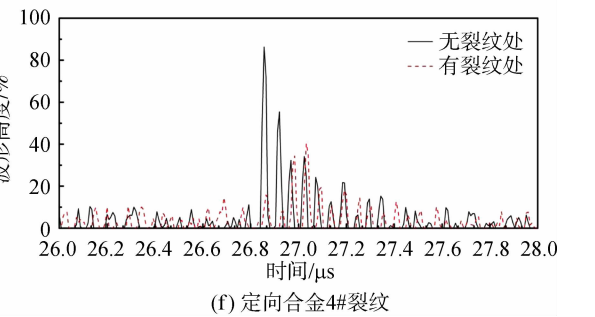
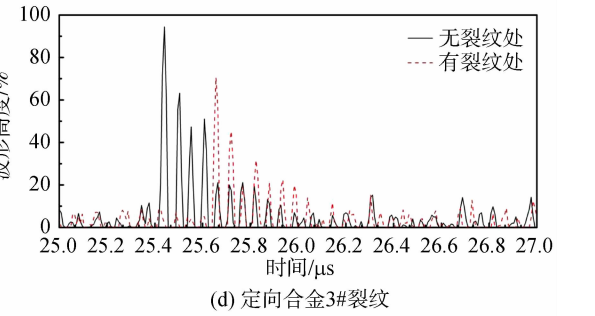
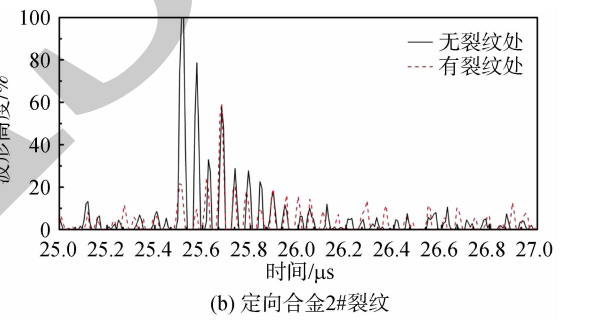
表 3 水浸超声检测结果

Table 3 Results of immersion ultrasonic testing

裂纹缺陷编号	声时差/ μm
K-2 #	0.20
D-2 #	0.18
K-3 #	0.30
D-3 #	0.27
K-4 #	0.20
D-4 #	0.18
K-5 #	0.18
D-5 #	0.21

3.2 裂纹尺寸对检测结果的影响

采用中心频率为 15 MHz 的点聚焦水浸超声探头对等轴合金基体和定向合金基体检测试件热障涂层 表面不同尺寸裂纹缺陷进行检测,检测结果见表 4、表 5 和表 6,裂纹 C 扫描显示见图 8。



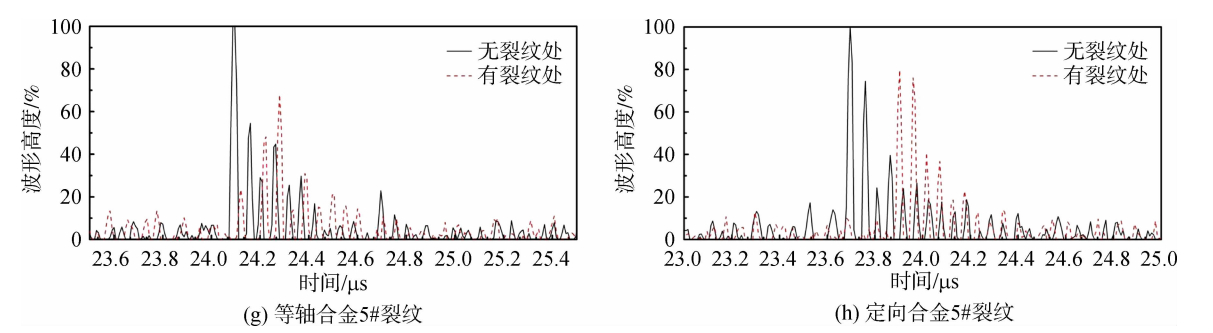


图7 无裂纹处与有裂纹处反射回波声时差

Fig. 7 Echo time difference at crackfree areas and cracking areas

检测结果表明:①采用中心频率为 15 MHz 的点聚焦水浸超声探头可检出的热障涂层表面最小裂纹缺陷尺寸为深度为 0.1 mm,宽度为 0.2 mm,长度为 2 mm;②裂纹缺陷深度和宽度相同时,裂纹缺陷越长,C 扫描图像越清晰,裂纹缺陷越容易辨识;③裂纹缺陷长度和深度相同时,裂纹缺陷越宽,C 扫描图像越清晰,裂纹缺陷越容易辨识;④裂纹缺陷长度和宽度相同时,裂纹缺陷越深,C 扫描图像越清晰,裂纹缺陷越容易辨识,热障涂层表面裂纹缺陷底部反射波和热障涂层表面反射波声时差越大;⑤热障涂层表面裂纹缺陷深度为 0.05mm 时,C 扫描图像不能有效辨识裂纹

表 4 不同长度热障涂层表面裂纹缺陷检测结果

Table 4 Testing results of TBCs surface cracks with different lengths					
检测试件 基体	裂纹缺陷 编号	裂纹缺陷尺寸/mm			声时差/ μs
		长度	宽度	深度	
等轴合金	4 #	1	0.2	0.1	0.20
	2 #	2	0.2	0.1	0.20
	5 #	3	0.2	0.1	0.18

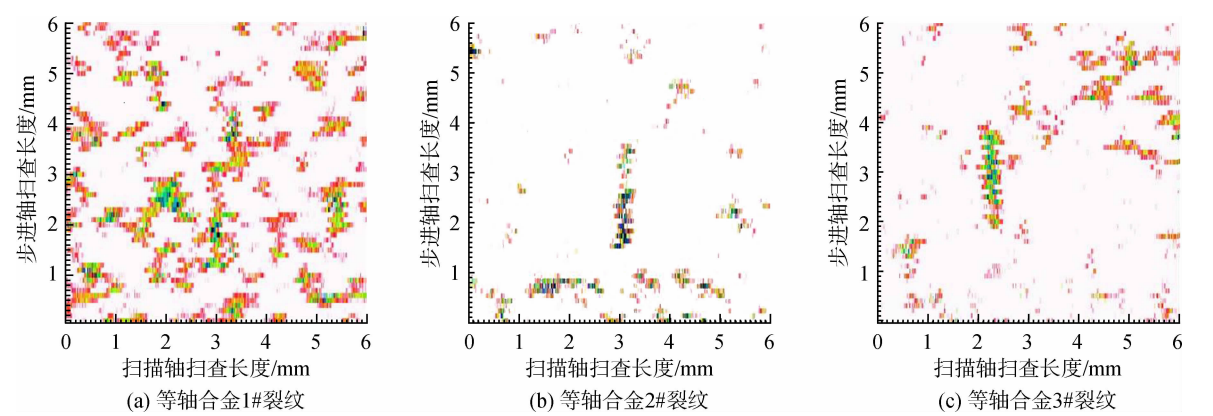
表 5 不同宽度热障涂层表面裂纹缺陷检测结果

Table 5 Testing results of TBCs surface cracks with different widths					
检测试件 基体	裂纹缺陷 编号	裂纹缺陷尺寸/mm			声时差/ μs
		长度	宽度	深度	
等轴合金	7 #	2	0.1	0.1	0.18
	2 #	2	0.2	0.1	0.20
	8 #	2	0.3	0.1	0.18

表 6 不同深度热障涂层表面裂纹缺陷检测结果

Table 6 Testing results of TBCs surface cracks with different depths					
检测试件 基体	裂纹缺陷 编号	裂纹缺陷尺寸/mm			声时差/ μs
		长度	宽度	深度	
等轴合金	1 #	2	0.2	0.05	0
	2 #	2	0.2	0.1	0.20
	3 #	2	0.2	0.2	0.30

缺陷,热障涂层表面裂纹缺陷底部反射波和热障涂层表面反射波声时差为零。



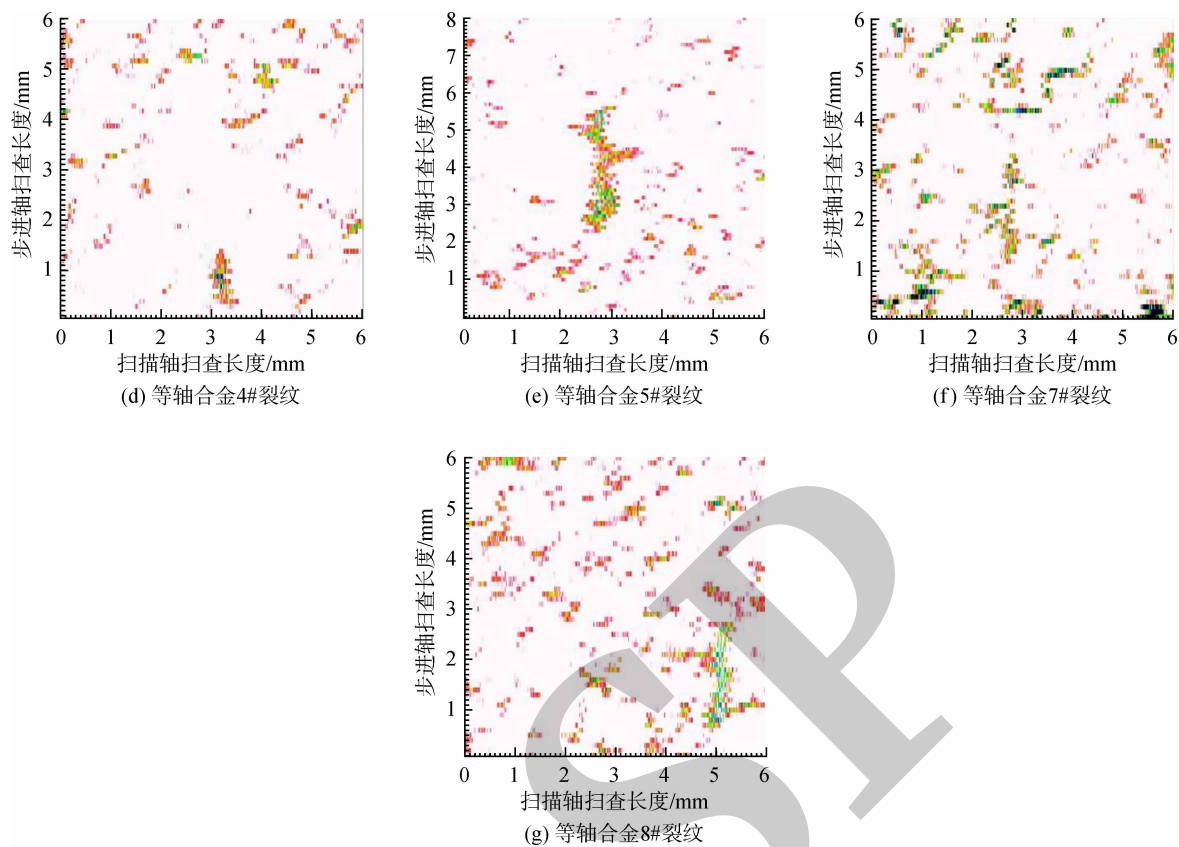


图 8 热障涂层表面裂纹 C 型显示
Fig. 8 C scan of TBCs surface cracks

4 结 论

1) 热障涂层基体材料对热障涂层表面裂纹的检测效果无明显影响,对热障涂层表面裂纹进行水浸超声检测时无需考虑基体材料的组织结构。

2) 通过优化检测参数和合理选用仪器探头,利用水浸超声方法可实现对热障涂层表面深度为 0.1 mm、长度为 2 mm 的裂纹的有效检测。

3) 水浸超声检测技术可以获得裂纹的长度、深度参数,是解决热障涂层表面裂纹检测问题的有效方法。

参考文献:

[1] PADTURE N P,GELL M,JORDAN E H. Thermal barrier coatings for gas-turbine engine applications[J]. Science, 2002,296(5566):280-284.

[2] 郭洪波,宫声凯,徐惠彬. 新型高温/超高温热障涂层及制备技术研究进展[J]. 航空学报,2004,35(10):2722-2732.

GUO Hongbo, GONG Shengkai, XU Huibin. Research progress of new high/ultra-high temperature thermal barrier casting and processing technologies[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(10): 2722-2732. (in

Chinese)

[3] 钟志春. 热障涂层表面开裂与界面剥离失效的声发射定量评价[D]. 湖南 湘潭:湘潭大学,2013.

ZHONG Zhichun. Quantitative failure assessment for surface cracking and interface delamination of thermal barrier coatings by acoustic emission[D]. Xiangtan Hunan:Xiangtan University,2013. (in Chinese)

[4] EVANS A G, MUMM D R, HUTCHINSON J W, et al. Mechanisms controlling the durability of thermal barrier coatings[J]. Progress in Materials Science, 2011, 46(5): 505-553.

[5] POMEROY M J. Coatings for gas turbine material and long term stability issues[J]. Materials and Design, 2005, 26(3):223-231.

[6] MERCER C, FAULHABER S, EVANS A G, et al. A delamination mechanism for thermal barrier coatings subject to calcium-magnesium-alumino-silicate(CMAS) infiltration [J]. Acta Materialia, 2005, 53(4): 1029-1039.

[7] JIANG Peng, FAN Xueling, SUN Yongle, et al. Competition mechanism of interfacial cracks in thermal barrier coating system[J]. Materials and Design, 2017, 132: 559-566.

[8] ZHOU Yichun, TONOMORI T, YOSHIDA A, et al. Fracture characteristics of thermal barrier coatings after tensile and bending tests[J]. Surface and Coatings Technology, 2002, 157(2/3): 118-127.

- [9] CHEN Zhubing, WANG Zhongguang, ZHU Shijie. Tensile fracture behavior of thermal barrier coatings on superalloy [J]. Surface and Coatings Technology, 2011, 205 (15): 3931-3938.
- [10] QIAN Lihe, ZHU Shijie, KAGAWA Y, et al. Tensile damage evolution behavior in plasma-sprayed thermal barrier coating system [J]. Surface and Coatings Technology, 2003, 173(2/3): 178-184.
- [11] FUKUCHI T, OZEKI T, OKADA M, et al. Nondestructive inspection of thermal barrier coating of gas turbine high temperature components [J]. IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2016, 11(4): 391-400.
- [12] FUKUCHI T, FUSE N, FUJII T, et al. Measurement of topcoat thickness of thermal barrier coating for gas turbines using terahertz waves [J]. Electrical Engineering in Japan, 2013, 183(4): 1-9.
- [13] FUKUCHI T, FUSE N, OKADA M, et al. Measurement of refractive index and thickness of topcoat of thermal barrier coating by reflection measurement of terahertz waves [J]. Electronics and Communications in Japan, 2013, 96 (12): 37-45.
- [14] FUKUCHI T, FUSE N, OKADA M, et al. Topcoat thickness measurement of thermal barrier coating of gas turbine blade using terahertz wave [J]. Electrical Engineering in Japan, 2014, 189(1): 1-8.
- [15] MA Zhiyuan, ZHAO Yang, LUO Zhongbing, et al. Ultrasonic characterization of thermally grown oxide in thermal barrier coating by reflection coefficient amplitude spectrum [J]. Ultrasonics, 2014, 54(4): 1005-1009.
- [16] ZHAO Yanan, LIN Li, LI Ximeng, et al. Simultaneous determination of the coating thickness and its longitudinal velocity by ultrasonic nondestructive method [J]. Ndt & E International, 2010, 43(7): 579-585.
- [17] TANG Qingju, DAI Jingmin, BU Chiwu, et al. Experimental study on debonding defects detection in thermal barrier coating structure using infrared lock-in thermographic technique [J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 107: 463-468.
- [18] LIU Zhanwei, JIAO Dacheng, SHI Wenxiong, et al. Linear laser fast scanning thermography NDT for artificial disbond defects in thermal barrier coatings [J]. Optics Express, 2017, 25: 31789-31800.
- [19] HEEG B, CLARKE D R. Non-destructive thermal barrier coating (TBC) damage assessment using laser-induced luminescence and infrared radiometry [J]. Surface and Coatings Technology, 2005, 200(5/6): 1298-1302.
- [20] 何存富, 杨玉娥, 杨申, 等. 毫米波检测热障涂层缺陷的方法研究 [J]. 机械工程学报, 2013, 49(20): 16-21.
- HE Cunfu, YANG Yu'e, YANG Shen, et al. Feasibility study on defects detection of thermal barrier coatings using millimeter wave [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(20): 16-21. (in Chinese)
- [21] 郭兴旺, 丁蒙蒙. 热障涂层厚度及厚度不均热无损检测的数值模拟 [J]. 航空学报, 2010, 31(1): 198-203.
- GUO Xingwang, DING Mengmeng. Simulation of thermal NDT of thickness and its unevenness of thermal barrier coatings [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2010, 31(1): 198-203. (in Chinese)
- [22] YANG Li, ZHONG Zhichun, YOU Jingsong, et al. Acoustic emission evaluation of fracture characteristics in thermal barrier coatings under bending [J]. Surface and Coatings Technology, 2013, 232: 710-718.
- [23] CHEN H L R, ZHANG Binwei, ALVIN M A, et al. Ultrasonic detection of delamination and material characterization of thermal barrier coatings [J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2012, 21(6): 1184-1194.
- [24] BOUDA A B, LEBAILI S, BENCHALA A. Grain size influence on ultrasonic velocities and attenuation [J]. Ndt & E International, 2003, 36(1): 1-5.

(编辑:王碧珺)