

# 热障涂层电磁/电容复合检测技术研究\*

陈棣湘<sup>1,2</sup>, 任远<sup>1</sup>, 王伟<sup>1</sup>

(1. 国防科技大学智能科学学院, 长沙 410073;

2. 装备综合保障国防科技重点实验室, 长沙 410073)

**[摘要]** 热障涂层能显著提升发动机叶片的耐高温能力,但由于其工作环境恶劣,容易发生裂纹、烧结、界面开裂、涂层脱落等失效现象。针对单一检测手段获取的信息量有限、难以实现热障涂层全面准确评估的现状,根据电磁法适合检测导电材料、电容法适合检测非导电材料的特点,提出了热障涂层电磁/电容复合检测技术,研究了所涉及的检测机理、复合式传感器设计以及涂层参数检测等关键问题。仿真和试验结果表明:传感器电磁检测单元和电容检测单元对涂层厚度的最大检测灵敏度分别达到  $0.1\Omega/\text{mm}$  和  $15\text{pF}/\text{mm}$ ,为涂层厚度及介电常数、电导率等参数的定量检测奠定了基础,为热障涂层全面准确的评估提供了有效的解决方案。

**关键词:** 热障涂层; 发动机叶片; 复合检测; 涡流; 平面电容器

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2020.14.041



陈棣湘

教授、博士生导师,主要从事智能传感、无损检测等研究。主持和承担国家重点研发计划、国家自然科学基金、装备预先研究等课题 20 余项,获部委级和军队科技进步奖 2 项、教学成果奖 4 项、国家发明专利授权 20 余项,合作出版专著 1 部、教材 4 部,发表学术论文 100 余篇,其中 SCI 论文 60 余篇。

热障涂层技术自 20 世纪 50 年代问世以来,就受到了各国研究人员的广泛关注。目前,热障涂层已被广泛应用于航空发动机和燃气轮机的热端部件,以达到降低高温部件的基体温度和提高基体抗腐蚀能力的目的。热障涂层主要由表面的陶瓷层 (Top Coating, TC) 以及与高温合金基底相连的黏结层 (Bond Coating, BC) 构成;在高温高压的工作环境下,在陶瓷层和黏结层之间还会产生热生长氧化层 (Thermally Grown Oxide, TGO),其在生长过程中界面应力的不均匀性很容易导致界面开裂和涂层脱落。此外,直接与高温燃气接触的陶瓷层很容易产生烧结和相变,导致涂层孔隙率降低、热导率增加、氧化层增厚等问题,并有可能

在内应力和外力的作用下产生裂纹甚至脱粘,导致涂层失效<sup>[1-3]</sup>。

针对热障涂层的检测需求,国内外学者开展了大量研究,除了传统的荧光渗透检测法<sup>[4]</sup>外,还对红外热波<sup>[5]</sup>、超声<sup>[6]</sup>、微波<sup>[7]</sup>、声发射<sup>[8]</sup>、交流阻抗谱<sup>[8]</sup>和涡流<sup>[9]</sup>等无损检测方法开展了深入研究。这些无损检测方法都有各自的特点,但也存在一些局限性。

(1) 红外热波法:检测面积大,检测速度快,检测结果直观,但分辨率有限,通常只能检测出尺寸在 1mm 以上的缺陷<sup>[10-11]</sup>。

(2) 超声法:检测结果受陶瓷层孔隙率的影响较大<sup>[12]</sup>。

(3) 微波法:由于微波遇到金属会反射,因此难以检测金属黏结层的内部缺陷。

(4) 声发射法:声发射信号具有

\* 基金项目:国家自然科学基金 (61671460)。

不确定性和不可逆性,很难用于损伤的定量检测。

(5) 交流阻抗谱法: 阻抗信号受测量电极大小以及相对位置的影响大。

(6) 涡流法: 由于涡流只能在导电材料中存在,因此通常只能检测黏结层的变化以及陶瓷层的厚度,难以检测陶瓷层中的裂纹以及由烧结和相变导致的物理特性变化。

可以看出,目前针对热障涂层的无损检测还存在检测手段单一、检测不全面、定量检测精度低等不足,发展新的无损检测技术具有十分重要的意义。鉴于此,本文根据热障涂层的特点,提出了一种基于电磁/电容复合传感器的新的检测方法。

### 电磁/电容复合传感器

涡流法通常用于检测导电材料,而电容器通常用于检测非导电介质。由于热障涂层既包含非导电的陶瓷层,又包含导电的黏结层,单一的涡流检测或电容检测都不能对其进行全面评估,只有将两种检测方式集成在一起,设计制备出电磁/电容复合式传感器,才能同时对陶瓷层和黏结层进行检测。利用信息融合技术实现优势互补,有望实现热障涂层全面准确的检测。

传统的绕制式电磁线圈具有检测灵敏度高、响应速度快等优点,但由于体积相对较大且缺乏柔性,难以适应发动机叶片等具有复杂型面部件的检测,并且在检测范围较大、需要构成阵列时各检测单元的一致性难以保证。采用柔性印制电路板(Flexible Printed Circuit Boards, FPCB)或微机电系统(Microelectromechanical Systems, MEMS)技术在柔性基底材料上制备平面阵列式电磁检测单元,则可以有效解决这一问题。

传统的平行板电容器由两块极板构成,如果将两块极板转化为平面

上存在一定间距的两个电极,同样可以实现边缘电场覆盖范围内材料特性的检测。将多个电磁检测单元和电容检测单元集成在同一平面的同一区域内,就可以构成柔性阵列式电磁/电容复合传感器。

设计的电磁/电容复合式传感器结构如图1所示。其中单匝蜿蜒线圈既作为电磁激励线圈,同时也充当了平面电容器的驱动电极。平面电容器的检测电极与驱动电极位于同一平面,而电磁检测线圈位于背面。激励线圈在结构上具有周期性,在施加激励电流后能产生规则的激励磁场,有利于检测微小缺陷引起的信号变化。平面电容器的检测电极设计成U形结构,其目的是:(1)增加平面电容结构的面积,这样可以增大电容量并提高电容器的检测灵敏度;(2)在电磁检测时,由于检测电极采用U型结构,检测电极上不会形成闭合的涡流回路,可减小检测电极对电磁检测信号的影响<sup>[13]</sup>。

电磁/电容复合式传感器的工作原理如下:(1)复合式传感器采用分时工作模式,当工作在电磁检测模式时,外部电路给激励线圈通以正弦交流电流,在激励线圈周围产生交变磁场,同时在被检导电材料(例如热障涂层的黏结层及其连接的金属基底)中产生涡流;(2)涡流磁场与激励线圈产生的主磁场叠加,会在检测线圈上产生感应电压,根据其变化就

可以检测被测对象状态的变化;(3)当复合式传感器工作在电容检测模式时,在驱动电极和检测电极周围会形成边缘电场,电场覆盖范围内的介质变化就会导致平面电容器等效电容的变化;(4)将驱动电极与正弦交流电源连接,检测电极与放大电路连接,等效电容的变化就会转化为电信号输出。

采用柔性电路板制备的电磁/电容复合传感器实物如图2所示。其中蜿蜒激励线圈和U形检测电极的厚度为0.02mm,宽度及其间隔距离均为1mm,直线段长度均为5mm,弯曲处为半圆形;检测线圈的宽度和间隙均为0.1mm,每个检测线圈的匝数为10,传感器正面布置有激励线圈和6个电极,其中两端的哑元电极用于保证电场的均匀性,不向外引出信号,只有中间4个电极用于检测;与此类似,传感器反面布置有6个线圈,其中两端的哑元线圈用于保证磁场的均匀性,不向外引出信号,只有中间4个线圈用于检测。

采用COMSOL软件建立了包括复合传感器和热障涂层在内的检测模型,对传感器的检测特性进行有限元仿真分析。仿真模型中复合传感器的几何参数与图2所示的传感器实物完全相同。线圈和电极的材料为铜,其电导率设为59.98MS/m,相对磁导率为1,相对介电常数为1。传感器的基底材料为聚酰亚胺,厚度

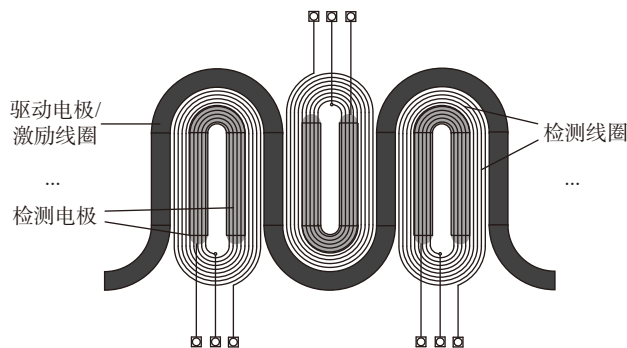


图1 电磁/电容复合式传感器结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of electromagnetic/capacitive composite sensor structure

为0.2mm,其电导率设为0.004MS/m,相对磁导率为1,相对介电常数为4。热障涂层由顶部的陶瓷层(紧贴传感器基底材料)和底部的黏结层组成,其厚度和电磁参数的取值范围如表1所示。

本节主要研究了传感器转移阻抗随陶瓷层厚度和黏结层电导率的变化,以及平面电容器等效电容值随

陶瓷层厚度及其介电常数的变化,仿真结果与试验结果的对比见后文。

### 热障涂层检测试验

#### 1 热障涂层模拟试件设计

由于热障涂层材料体系和结构的复杂性,其制备具有较大的技术难度。目前,国内无损检测试件厂商还不能提供热障涂层标准试件。因此,

根据调研得到的数据,设计了与真实热障涂层物理属性相似的模拟试件来开展检测试验。

在对真实热障涂层的厚度、介电常数、电导率等参数及试验条件进行综合分析后,采用厚度为70~700 $\mu\text{m}$ 的硅片模拟热障涂层的陶瓷层,用厚度为100 $\mu\text{m}$ 的铝箔模拟黏结层,用厚度为10mm的紫铜板模拟发动机叶片。各层材料分别经过抛光和除尘处理后,被紧密贴合在一起。

#### 2 热障涂层检测系统

基于电磁/电容复合传感器与阻抗分析仪的热障涂层检测系统如图3所示,主要包括4个部分:平面阵列式电磁/电容复合传感器、多通道切换单元、阻抗分析仪和计算机。多通道切换单元在接到计算机通过串口传来的测量指令后,通过控制多个继电器的通道实现阵列式传感器中各个电磁检测单元和电容检测单元的依次切换,被选中的检测单元通过同轴电缆连接到阻抗分析仪的输入端口,由阻抗分析仪完成电磁检测单元阻抗信息和平面电容器等效电容的精密测量,将测量数据通过 GPIB 接口传回到计算机,并采用 LabView 软件编写程序进行分析和处理。

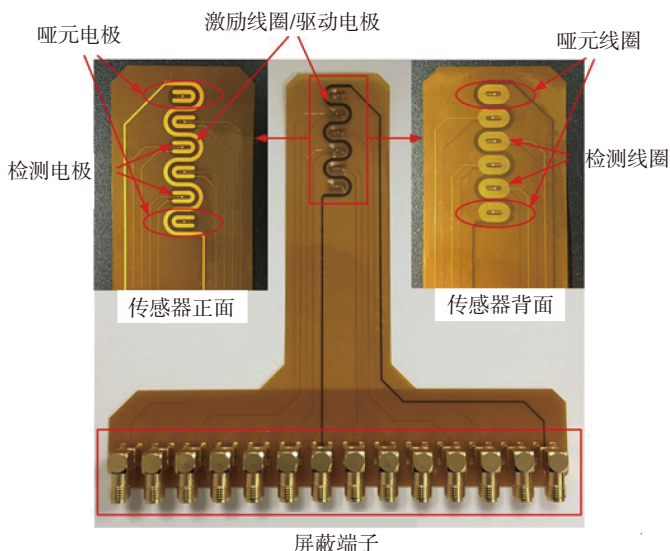


图2 电磁/电容复合式传感器实物  
Fig.2 Electromagnetic/capacitive composite sensor

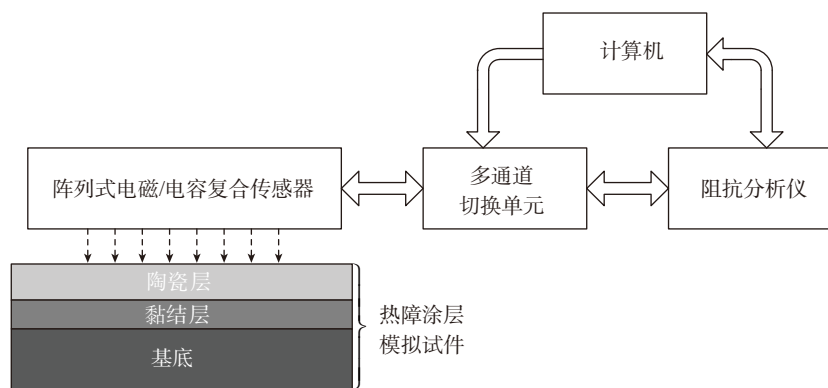


图3 热障涂层检测系统结构示意图  
Fig.3 Schematic diagram of thermal barrier coating detection system structure

### 检测结果与分析

#### 1 陶瓷层厚度检测

热障涂层在服役过程中,如果陶瓷层减薄甚至脱粘,隔热效果就会大打折扣,甚至导致严重事故,因此陶瓷厚度的检测至关重要。图4(a)所示是电磁检测模式下,激励频率为1MHz时传感器转移阻抗(感应电压与激励电流之比,由于其实部变化不

表1 热障涂层的参数取值范围

Table 1 Parameter range of thermal barrier coating

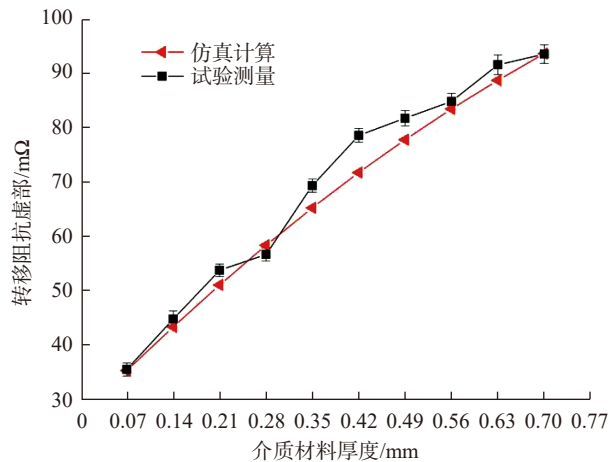
组成	厚度/ $\mu\text{m}$	电导率/( $\text{MS}\cdot\text{m}^{-1}$ )	相对磁导率	相对介电常数
陶瓷层	70~700	0	1	1~15
黏结层	100	4~40	1	1

明显,因此通常取与频率成正比的虚部)随陶瓷层厚度的变化,可以看出,转移阻抗虚部随介质材料厚度的增加而近似线性增大,对应的检测灵敏度约为  $0.1 \Omega/\text{mm}$ 。图 4 (b) 所示是电容检测模式下,激励频率为  $100\text{kHz}$ ,介质材料相对介电常数为 4 时传感器等效电容值随陶瓷层厚度的变化,可以看出,等效电容值随陶瓷层厚度的增加而减小;当陶瓷层厚度小于  $0.21\text{mm}$  时,平面电容传感器对陶瓷层厚度具有较高的检测灵敏度,约为  $15\text{pF}/\text{mm}$ ;当陶瓷层厚度在  $0.21\sim 0.42\text{mm}$  之间时,检测灵敏度约为  $3.6\text{pF}/\text{mm}$ ;当陶瓷层厚度大于  $0.42\text{mm}$  时,检测灵敏度约为  $2.55\text{pF}/\text{mm}$ 。由于仿真模型没有考虑寄生电容和杂散电容的影响,等效电容的仿真计算值略小于试验测量值。

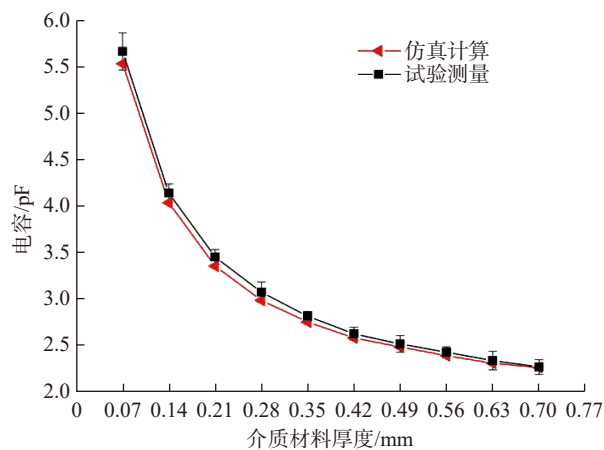
## 2 陶瓷层介电常数检测

陶瓷层的孔隙率是影响热障涂层隔热性能的一个重要因素,但直接对孔隙率进行准确测量非常困难。由于陶瓷层的孔隙率变化必然导致其介电常数发生改变,因此,可以建立陶瓷层孔隙率与其介电常数的关系,利用平面电容器检测涂层的介电常数,就可以间接了解陶瓷层孔隙率的变化<sup>[14]</sup>。

平面电容器等效电容值随陶瓷层介电常数的变化如图 5 所示。可以看出,电容值随陶瓷层介电常数的增加而增加,但具有一定的非线性。通过仿真分析陶瓷层相对介电常数在  $1\sim 15$  范围内变化时的等效电容值,发现相对介电常数每增加 1 时,等效电容值大约增大  $0.22\text{pF}$ 。在实际测试过程中由于受到条件限制,只采用了相对介电常数分别为 4 和 12.5 的两种介电材料来模拟陶瓷层介电常数的变化。从图 5 中可以看出,这两个测量值与对应的理论值(仿真分析结果)基本一致。



(a) 转移阻抗与陶瓷层厚度的关系



(b) 等效电容与陶瓷层厚度的关系

图4 转移阻抗和等效电容随陶瓷层厚度的变化

Fig.4 Variation of transfer impedance and equivalent capacitance with ceramic layer thickness

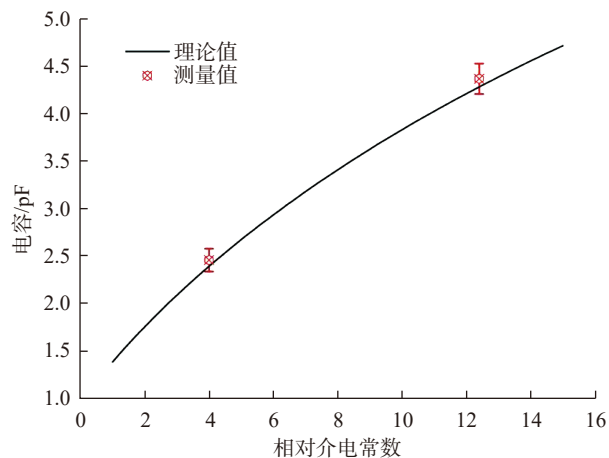


图5 等效电容随陶瓷层介电常数的变化

Fig.5 Variation of equivalent capacitance with dielectric constant of ceramic layer

### 3 黏结层电导率检测

热障涂层在服役过程中,在高温高压的环境下,黏结层中的铝离子会与陶瓷层中的氧离子结合,形成主要成分为  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的氧化层。氧化层会随着服役时间的增加而变厚,成为导致涂层脱落的主要原因,但由于氧化层通常只有几微米厚且位于涂层内部,直接测量起来非常困难。在氧化层增厚的过程中,消耗的铝离子会越来越多,因此黏结层中的铝离子会越来越少,从而导

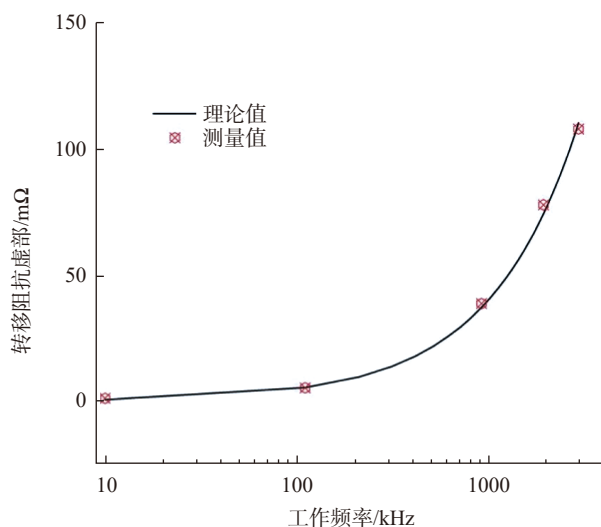
致黏结层的电导率发生变化。再加上黏结层自身的电导率较低,铝离子浓度的变化引起的电导率变化较大。因此,准确检测出黏结层电导率的变化,对热障涂层的状态评估具有重要意义。

当陶瓷层和黏结层的厚度分别为  $350\mu\text{m}$  和  $100\mu\text{m}$  时,改变传感器的工作频率并测试传感器的转移阻抗。图 6 (a) 和 (b) 所示为黏结层电导率分别为  $11.4\text{MS/m}$  和  $37.74\text{MS/m}$  时转移阻抗虚部随传

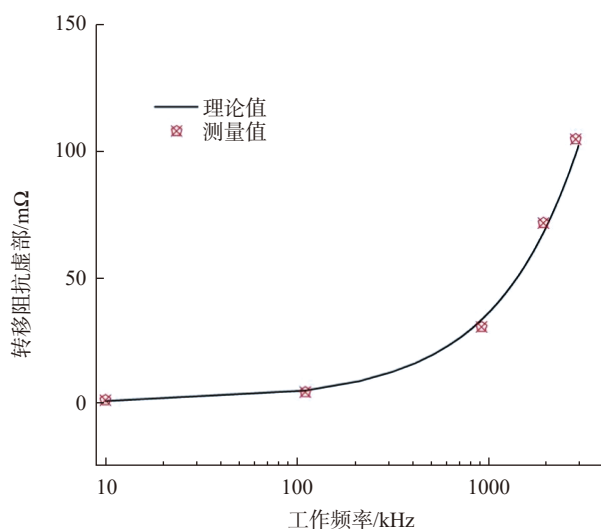
感器工作频率(取  $10\text{kHz}$ 、 $100\text{kHz}$ 、 $1\text{MHz}$ 、 $2\text{MHz}$ 、 $3\text{MHz}$  这 5 个频率)的变化,可以看出,随着工作频率的增加,转移阻抗虚部也随之增加。转移阻抗虚部随黏结层电导率的变化不是很明显,但通过对仿真结果和测量值的分析可以发现:在同一工作频率下,传感器的转移阻抗虚部随黏结层电导率增大而减小。当工作频率为  $10\text{kHz}$  时,黏结层电导率为  $37.74\text{MS/m}$  时对应的转移阻抗虚部比电导率为  $11.4\text{MS/m}$  时小  $0.04\text{m}\Omega$ ; 当工作频率为  $100\text{kHz}$  时,两者的差别为  $0.61\text{m}\Omega$ ; 当工作频率为  $1\text{MHz}$  时,两者的差别扩大到  $4.86\text{m}\Omega$ 。因此,为保证对黏结层电导率的检测灵敏度,传感器应采用较高的工作频率。

### 4 检测结果分析

从上述的检测试验结果可以看出,利用电磁/电容复合传感器的电磁检测单元可以完成陶瓷层厚度和黏结层电导率的检测,利用传感器的电容检测单元可以完成陶瓷层厚度和介电常数的检测。由于热障涂层的复杂性,无论是传感器电磁检测单元的转移阻抗还是平面电容器的等效电容,都会受到多个因素的影响,而前面这些检测结果都是在其他参数不变的情况下得到的,因此传感器的标定必不可少<sup>[15]</sup>。由于陶瓷层厚度的变化既会导致复合传感器转移阻抗的变化,又会导致等效电容值的变化,因此可以利用信息融合技术,首先将两种工作模式下获取的检测信息进行融合,反演得到准确的陶瓷层厚度值。在此基础上,可以认为电磁检测单元的转移阻抗只随黏结层电导率变化,而平面电容器的等效电容只随陶瓷层介电常数变化,这样就可以根据测量结果进一步实现这两个参数的反演。有关热障涂层的多参数反演算法已取得了初步进展<sup>[16]</sup>,还有待更深入的研究。



(a) 黏结层电导率为  $11.4\text{MS/m}$



(b) 黏结层电导率为  $37.74\text{MS/m}$

图6 转移阻抗虚部随传感器工作频率的变化

Fig.6 Variation of imaginary part of transfer impedance with operating frequency of sensor

## 结论

本文提出了一种基于电磁/电容复合传感器的热障涂层检测技术,对电磁/电容复合检测机理、复合传感器设计方法和热障涂层参数检测等方面的研究进展进行了详细介绍,主要结论如下。

(1) 根据电磁涡流适合检测导电材料的特性以及非导电材料的厚度、平面电容器适合检测非导电材料的厚度和介电常数这一特点,将两种检测方法结合,可以实现优势互补,增强传感器的检测能力。

(2) 设计了平面阵列式电磁/电容复合式传感器,具有结构紧凑、可检测复杂曲面等优点,并搭建了基于高精度阻抗分析仪和多通道切换单元的热障涂层检测系统。

(3) 分别在电磁和电容两种检测模式下完成了传感器转移阻抗和等效电容的测量,分析了测量结果与陶瓷层厚度及介电常数、黏结层电导率之间的关系,发现传感器电磁检测单元和电容检测单元对涂层厚度的最大检测灵敏度分别达到  $0.1 \Omega/\text{mm}$  和  $15\text{pF}/\text{mm}$ , 为热障涂层的多参数定量检测奠定了基础。

## 参考文献

[1] CURRY N, VANEVERY K, SNYDER T, et al. Thermal conductivity analysis and lifetime testing of suspension plasma-sprayed thermal barrier coatings[J]. *Coatings*, 2014, 4(3): 630–650.

[2] 赵扬, 马志远, 陈建伟, 等. 热障涂层失效的无损检测与评价研究进展[J]. *河北科技大学学报*, 2013, 34(6): 494–500.

ZHAO Yang, MA Zhiyuan, CHEN Jianwei, et al. Research progress on nondestructive testing and evaluation of TBC failure[J]. *Journal of Hebei University of Science and Technology*, 2013, 34(6): 494–500.

[3] 段力, 姬中林, 翁昊天, 等. 航空发动机热障涂层导电性能研究[J]. *航空制造技术*, 2019, 62(17): 81–87.

DUAN Li, JI Zhonglin, WENG Haotian,

et al. Study of electrical properties of TBC coated on aero-engine turbine blade[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2019, 62(17): 81–87.

[4] 徐亚亚, 刘兴勇. 某机涡轮叶片热障涂层表面裂纹检测方法的改进[J]. *无损检测*, 2019, 41(6): 71–73.

XU Yaya, LIU Xingyong. Improved test method for surface crack of TBC of engine turbine blade[J]. *Nondestructive Testing*, 2019, 41(6): 71–73.

[5] 李永君, 肖俊峰, 朱立春, 等. 红外热波技术在热障涂层厚度检测上的应用研究[J]. *红外技术*, 2017, 39(7): 669–674.

LI Yongjun, XIAO Junfeng, ZHU Lichun, et al. Applications of the infrared thermal wave technology in thermal barrier coating thickness testing[J]. *Infrared Technology*, 2017, 39(7): 669–674.

[6] 刘勋丰, 李杨杨, 黄勇. 基于超声特征成像技术的铝硅热障涂层脱粘缺陷检测[J]. *无损检测*, 2017, 39(10): 49–53.

LIU Xunfeng, LI Yangyang, HUANG Yong. Testing for debonding defects of thermal barrier coatings based on ultrasonic feature scan imaging[J]. *Nondestructive Testing*, 2017, 39(10): 49–53.

[7] 杨玉娥, 赵东, 安延涛, 等. 微波检测热障涂层孔隙率的可行性研究[J]. *仪器仪表学报*, 2015, 36(6): 1215–1220.

YANG Yu'e, ZHAO Dong, AN Yantao, et al. Feasibility study for detecting the porosity of thermal barrier coating using microwave[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2015, 36(6): 1215–1220.

[8] 李建超, 何箐, 吕玉芬, 等. 热障涂层无损检测技术研究进展[J]. *中国表面工程*, 2019, 32(2): 16–26.

LI Jianchao, HE Qing, LÜ Yufen, et al. Research progress on nondestructive testing method of thermal barrier coatings[J]. *China Surface Engineering*, 2019, 32(2): 16–26.

[9] 李达, 李勇, 闫贝, 等. 航空发动机叶片热障涂层厚度的无损定量评估[J]. *空军工程大学学报(自然科学版)*, 2015, 16(6): 22–26.

LI Da, LI Yong, YAN Bei, et al. Quantitative nondestructive evaluation of thermal barrier coatings of aero-engine blades[J]. *Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition)*, 2015, 16(6): 22–26.

[10] 刘战伟, 朱文颖, 石文雄, 等. 热

障涂层无损检测技术进展[J]. *航空制造技术*, 2016, 59(4): 43–47.

LIU Zhanwei, ZHU Wenyong, SHI Wenxiong, et al. Progress in the nondestructive testing of thermal barrier coatings[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2016, 59(4): 43–47.

[11] 陈林, 杨立, 范春利, 等. 基于相位的热障涂层厚度及其脱粘缺陷红外定量识别[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(7): 2050–2056.

CHEN Lin, YANG Li, FAN Chunli, et al. Quantitative identification of coating thickness and debonding defects of TBC by pulse phase technology[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(7): 2050–2056.

[12] 王林, 丁坤英, 林小娉, 等. 8YSZ 双层热障涂层缺陷演变与微裂纹水浸超声宏观检测[J]. *无机材料学报*, 2019, 34(12): 1265–1271.

WANG Lin, DING Kunying, LIN Xiaoping, et al. Defect evolution and microcracks of 8YSZ double-layer thermal barrier coatings by water immersion ultrasound macroscopic detection[J]. *Journal of Inorganic Materials*, 2019, 34(12): 1265–1271.

[13] 代守强, 陈棣湘, 田武刚, 等. 平面电容传感器热障涂层缺陷检测系统[J]. *中国测试*, 2017, 43(1): 78–83.

DAI Shouqiang, CHEN Dixiang, TIAN Wugang, et al. Thermal barrier coatings based on planar capacitive sensor defect detection system[J]. *China Measurement & Test*, 2017, 43(1): 78–83.

[14] REN Y, PAN M C, CHEN D X, et al. An electromagnetic/capacitive composite sensor for testing of thermal barrier coatings[J]. *Sensors*, 2018, 18(5): 1630–1643.

[15] REN Y, CHEN D X, WAN C B, et al. Calibration of micro-capacitance measurement system for thermal barrier coating testing[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2018, 89(6): 4703–4708.

[16] WANG W, CHEN D X, PAN M C, et al. Inversion of multi-layer structure parameters based on an electromagnetic/capacitive dual-mode sensor[J]. *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 2019, 61(6): 331–336.

通讯作者: 陈棣湘, E-mail: chendixiang@163.com.

## Research on Electromagnetic/Capacitive Composite Testing Method of Thermal Barrier Coatings

CHEN Dixiang<sup>1,2</sup>, REN Yuan<sup>1</sup>, WANG Wei<sup>1</sup>

(1. College of Intelligence Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;  
2. Laboratory of Science and Technology on Integrated Logistics Support, Changsha 410073, China)

**[ABSTRACT]** Thermal barrier coating can significantly improve the high temperature resistance of engine blades, but due to its harsh working environment, it is easy to produce cracks, sintering, interface cracking, coating loss and other failures. In view of the limited amount of information obtained by a single detection method and the difficulty in realizing a comprehensive and accurate evaluation of thermal barrier coatings, according to the characteristics that electromagnetic method is suitable for detecting conductive materials and capacitive method is suitable for detecting non-conductive materials, an electromagnetic/capacitive composite detection technology for thermal barrier coatings is proposed, and key issues involved such as detection mechanism, composite sensor design and coating parameter detection are studied. The simulation and experimental results show that the maximum detection sensitivity of the sensor electromagnetic detection unit and the capacitance detection unit to the coating thickness reach  $0.1\Omega/\text{mm}$  and  $15\text{pF}/\text{mm}$  respectively, which lays a foundation for quantitative detection of coating thickness, dielectric constant, conductivity and other parameters, and provides an effective solution for comprehensive and accurate evaluation of thermal barrier coatings.

**Keywords:** Thermal barrier coatings; Engine blade; Composite testing; Eddy current; Planar capacitor

(责编 古系)

(上接第40页)

## Hot Corrosion Behavior of Typical Bond Coats in Thermal Barrier Coatings Systems

YANG Yingfei<sup>1,2</sup>, REN Pan<sup>1,2</sup>, BAO Zebin<sup>2</sup>, DENG Chunming<sup>3,4</sup>, LI Wei<sup>1</sup>

(1. Institute of Advanced Wear & Corrosion Resistant and Functional Material,  
Jinan University, Guangzhou 510632, China;

2. Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;

3. National Engineering Laboratory for Modern Materials Surface Engineering Technology, Guangdong Institute of New Materials, Guangzhou 510650, China;

4. The Key Lab of Guangdong for Modern Surface Engineering Technology, Guangzhou 510650, China)

**[ABSTRACT]** In order to investigate the hot corrosion behavior of the commonly-used bond coats for thermal barrier coating system, four typical bond coats (i.e., plain NiAl coating, NiCoCrAlY coating, Pt modified NiAl coating and Pt+Hf co-modified NiAl coating) were comparably evaluated in the mixed salts of  $\text{Na}_2\text{SO}_4/\text{NaCl}$  (mass fraction 75% : 25%) at  $900^\circ\text{C}$ . The phase constitution evolution and microstructure change during hot corrosion were analyzed by scanning electron microscope (SEM), electron probe micro-analyzer (EPMA) and X-ray diffractometer (XRD). The results showed that plain NiAl coating degrades fastest during hot corrosion test. In contrast, the degradation rate of NiCoCrAlY coating is slower. The hot corrosion resistance of the two modified NiAl coatings is satisfactory, Pt modified NiAl is the best among the four coatings. It seems that the addition of Hf does not benefit the hot corrosion resistance of Pt-Al coating.

**Keywords:** Thermal barrier coatings; Bond coats; Hot corrosion; Microstructure evolution; Failure mechanism

(责编 古系)