

基于场聚焦的 E- 形谐振传感器对热障涂层的厚度检测定位

吴小华¹ 杨晓庆¹

WU Xiaohua YANG Xiaoqing

摘要

提出一种基于场聚焦的 E- 形谐振传感器, 可以实现对热障涂层陶瓷层厚度的检测和定位。通过 CST 软件对所设计的 E- 形谐振传感器进行了仿真分析, 重点验证了传感器对热障涂层厚度变化 (0~0.5 mm) 的响应特性, 并通过参数优化确保了传感器设计的有效性和实用性。通过仿真结果, 发现传感器的谐振频率随热障涂层厚度的变化而发生偏移, 每增加 0.1 mm, 频偏在 100 MHz 左右, 证实了其测量能力。通过实验, 验证了传感器对热障涂层厚度检测定位的能力。实验结果与仿真分析一致, 再次证明了该传感器设计的可行性和高灵敏度特点。同时通过验证实验发现检测误差可达 0.8%, 具有优异的检测精度。

关键词

谐振传感器; 微波; 无损检测; 热障涂层

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2024.06.036

0 引言

热障涂层 (thermal barrier coatings, TBCs) 对现代航空发动机的性能至关重要, 特别是对于高压涡轮部件, 这些部分通常由镍基高温合金制成, 能在高达约 1100℃ 的温度下正常工作。热障涂层主要由金属粘结层和陶瓷隔热层组成, 其中金属粘结层的材料主要是 MCrAlY (M: Ni or/and Co) 或 NiPtAl, 起到高温抗氧化的作用; 陶瓷层一般为氧化钇部分稳定氧化锆材料 (ZrO₂-8%Y₂O₃, 8YSZ), 主要起到延缓热传导作用。热障涂层在服役环境中不仅承受着高温、高压的燃气, 而且承受着高热流输入、高温度梯度、应力梯度、离心力等的作用^[1-3]。

针对热障涂层生产过程中的质量控制和服役过程中的维修问题, 目前热障涂层无损检测研究主要集中在厚度测量、分层缺陷检测和涂层剩余寿命评估方面。热障涂层的厚度主要集中在 300~620 μm 之间, 缺陷种类则是有组织结构退化、微裂纹萌生扩展 (分层)、热物性和力学性能退化、涂层减薄、TGO 生长、应力水平变化等^[4-5]。同时, 针对涂层损伤的定量化测试技术可分为荧光应力法 (PLPS)^[6]、声发射法 (AE)^[7]、基于结合强度劣化方法^[8]等检测手段。这些无损检测技术虽然已经取得了一些研究成果, 但是依旧存在一定程度的局限性。比如荧光应力法在测量时, 需要激光在热喷涂制备的 TBCs 孔穴和晶界处易发生散射作用, 反射的信号较弱, 无法实现精确测量, 同时其检测结果的准确性还有待提高, 还需要通过降低激光入射距离、减小仪器噪

声干扰等手段来提高精确度。而声发射法技术存在采集的信号信息复杂、数据处理困难和理论分析不够完善等问题, 因此热障涂层检测的工程化应用尚存在一定的距离。声发射法技术未来在热障涂层检测的发展应用需要更先进的传感器和更先进的信号分析系统。而基于结合强度劣化方法, 从纯力学的角度分析, 热障涂层界面损伤实际上造成了陶瓷层与金属黏结层之间结合强度 (也称界面韧性、黏附力、剥落抗力等) 的下降, 涂层单轴压缩试验并不满足轴对称球泡型屈曲假设, 屈曲计算过程未考虑陶瓷层初始残余应力的影响, 采用目视判定涂层压缩剥落临界应变随机性过大等。同时, 从试验结果看, 拉拔法引起了陶瓷层本身的断裂, 所得到的结合强度实际上并不能准确表征陶瓷层与黏结层界面处的力学性能, 这给界面损伤评价带来了额外误差。

对比以上各种检测方法, 微波无损检测方法目前属于探索阶段, 但是具有非接触性、无需耦合剂、破坏性、实时检测性等优点。本文设计了一款实用性更强、设备复杂度更低的场聚焦的锯齿 E- 形结构谐振器, 可以有效检测定位热障涂层平整面的厚度变化。

1 检测原理

该微带线传感器采用的 E- 形槽设计, 利用了电磁理论中的基本概念来实现其工作原理。E- 形槽的设计影响了微带线的电磁场分布, 从而实现了对薄材料厚度的感知测量。以下是结合电磁理论公式对 E- 形槽进行分析的基础。

微带线是一种传输线, 可以支持电磁波沿其结构传播。其基本工作原理可以通过麦克斯韦方程组描述, 这组方程描述了电场和磁场如何随时间和空间变化:

1. 四川大学电子信息学院 四川成都 610065

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (3)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (4)$$

式中： E 是电场强度， H 是磁场强度， B 是磁通密度， D 是电位移， J 是电流密度， ρ 是电荷密度。

E-形槽的作用具有电容效应和电感效应。E-形槽在微带线中引入了额外的电容效应。由于电场在 E-形槽的尖端处集中，增加了槽附近的电位移量，从而增加了局部电容。这可以通过电容的基本公式理解。

E-形槽微带线传感器的共振频率由其等效电路的电感 L 和电容 C 决定，共振频率的计算公式为：

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (5)$$

当材料厚度发生变化时，覆盖在 E-形槽上的材料会改变电容 C 和电感 L 的值，进而导致共振频率 f_r 的变化。这是因为材料的电磁属性（如介电常数）影响了电场和磁场的分布，从而影响了电容和电感。通过监测共振频率的变化，可以精确测量材料的厚度。这种方法的优势在于其非破坏性和高灵敏度，使其适用于热障涂层等薄厚度的精确测量。

2 传感器结构及其仿真分析

本文所设计的双端口微带 E-形传感器如图 1 所示，它包括一个主机和一个灵敏度部分。主区是一个简单的微带线，传感区是一个创新的拓扑结构，包括两个高灵敏度的小尺寸的 E-形槽。该传感器的工作原理是根据被测材料厚度的变化，将谐振频率频偏。

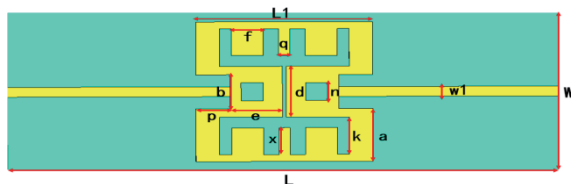


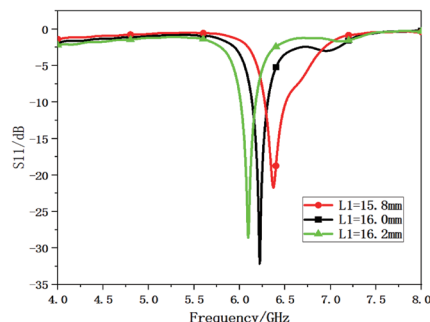
图 1 E-形谐振传感器结构尺寸（正面）

使用了一个 $50\ \Omega$ 的微带线作为主体和输入输出连接。双 E-形槽以对称方式设计，用于生成共振条件，并作为传感部分。

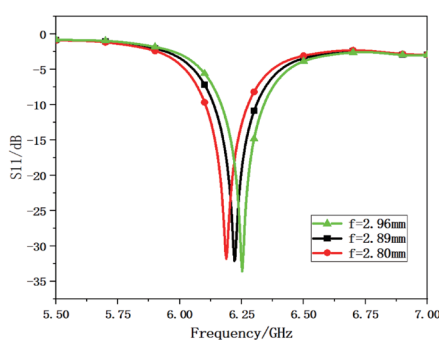
本文所描述的是一个设计于 PTFE 介质基板上（长 $L=50\text{ mm}$ ，宽 $W=18\text{ mm}$ ）的单端口微带线传感器。该基板的厚度定为 $h_1=2\text{ mm}$ ，以确保端口之间的匹配。基板上的微带线宽被调整至 $w_1=1.8\text{ mm}$ 。在 E-形谐振结构开相应的锯齿，长为 f 、 q 的不等长锯齿，再利用 CST 进行参数优化，调整电场分布，使得电场聚焦于中心小矩形锯齿边缘。这样的设计有助于定位检测热障涂层厚度缺陷位置。为了有效检测缺陷，E-形结构在谐振状态下应当能够使电磁场在特定位置的

小锯齿区域集中。

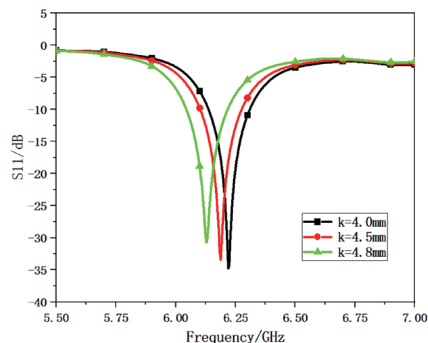
对 E-形谐振传感器进行参数优化，分别对 L_1 、 q 、 k 几个关键参数进行优化，所得结果如图 2 所示。



(a) E-形谐振传感器参数 L_1



(b) E-形谐振传感器参数 f



(c) E-形谐振传感器参数 k

图 2 E-形谐振传感器参数优化

从以上的仿真结果可以得出，不同的参数尺寸对 E-形谐振传感器的谐振频率有影响。从图 2(a) 可以看出，传感区的 E-形槽长度 L_1 越长，谐振频率越往左偏移；越短，则谐振频率越往右偏移，呈现反比状态。同时，从图 2(b) 可以得出，随着参数中心处锯齿 f 的宽度增大，谐振频率变小；随着 q 的减小，则其谐振频率变大，也呈现反比变化。最后从图 2(c) 可以看出，E-形谐振传感器的谐振频率还与空隙宽度 k 有关，具体表现为：随着宽度 k 的增大，谐振频率不断减小；随着 k 的减小，谐振频率增大，也呈现反比。

对于呈现上述参数变化的原因，从其等效电路图（图 3）来分析，从公式 (1) ~ (7) 得到，其谐振频率与等效电路图中的电感 L 和电容 C 有关。

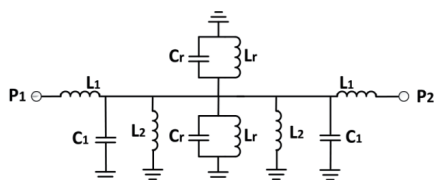


图3 E-形谐振传感器等效电路图

E-形谐振传感器包括电感 (L_1) 和电容 (C_1)，共两对，用于模拟输入和输出的微带线。同时，E-形谐振器由于结构的对称性，通过并联的电感 (L_r) 和电容 (C_r) 来表示。电路模型还包含一个插入馈电部分，通过两个电感 (L_2) 表示。电路模型的参数需要满足一定的方程，其中 Z_0 是输入输出微带线的特性阻抗， f_r 是传感器的谐振频率。其计算公式为：

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}} \quad (6)$$

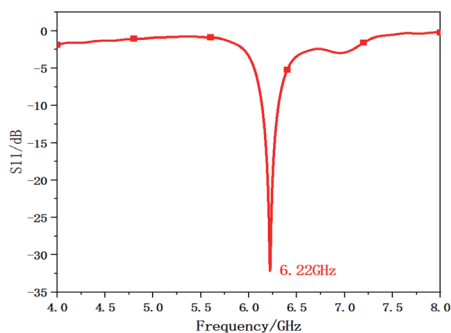
$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_r C_r}} \quad (7)$$

当对 E-形谐振参数进行优化变化时，其实是在对 L_r 、 C_r 进行调整变化，从而导致其谐振频率进行偏移。最终通过对 E-形谐振传感器各参数的详细优化，得到具体尺寸如表 1 所示。

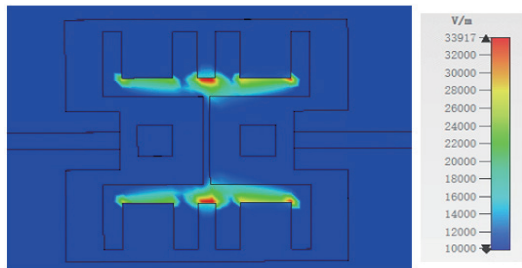
表 1 E-形谐振传感器结构尺寸

L	L_1	W	W_1	f	q	b
50 mm	16 mm	18 mm	1.1 mm	2.89 mm	1 mm	3.79 mm
d	n	p	e	x	k	a
5.68 mm	2 mm	3.08 mm	4.74 mm	3 mm	4.2 mm	5.92 mm

当传感器处于共振频率 (6.22 GHz) 时，对应的反射参数 S11 和电场分布在图 4 所示。



(a) E-形谐振传感器 S11



(b) E-形谐振传感器电场分布图

图 4 E-形谐振传感器 S11 及电场图

采用场聚焦的 E-形槽谐振传感器，对热障涂层陶瓷的厚度进行测量，CST 软件中展示了涂层测量的仿真模型，如图 5 所示。该传感器紧贴热障涂层表面，通过调整涂层的厚度来进行测定。

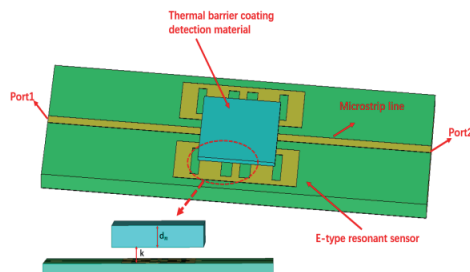


图 5 E-形谐振传感器检测模型图

将热障涂层陶瓷层 (Al_2O_3) ($10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times d_n$) 置于传感器上方，在微带线的两端添加波端口激励，验证该传感器检测热障涂层厚度的能力。将待测物厚度进行变化，保持待测物与天线的距离 $k=0.2\text{ mm}$ 不变，将 d_n 从 $0.1 \sim 0.5\text{ mm}$ 进行仿真结果，记录对应的 S11 曲线变化情况，如图 6 所示，频偏量如表 2 所示。

表 2 厚度检测频偏量

d_n/mm	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
$\Delta f/\text{MHz}$	0	190	320	430	520	590

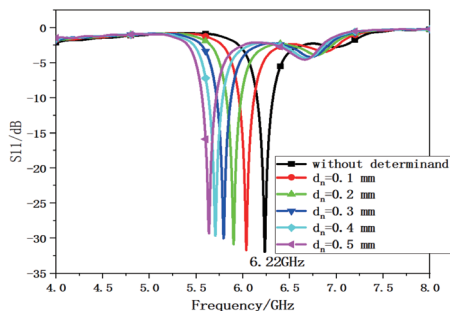


图 6 测厚仿真结果

接着，对 E-形谐振传感器的定位检测功能进行仿真分析，将待测物设置为 $5\text{ mm} \times 5\text{ mm} \times 0.3\text{ mm}$ 的尺寸，利用 E-形谐振传感器的中间锯齿进行定位扫描检测，其仿真实验如图 7，结果如图 8 所示，证实在中心锯齿 $\pm (3 \sim 4\text{ mm})$ 处具有定位功能。

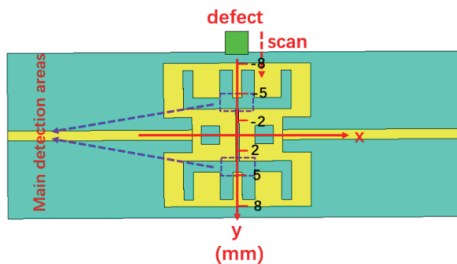


图 7 E-形谐振传感器锯齿定位仿真

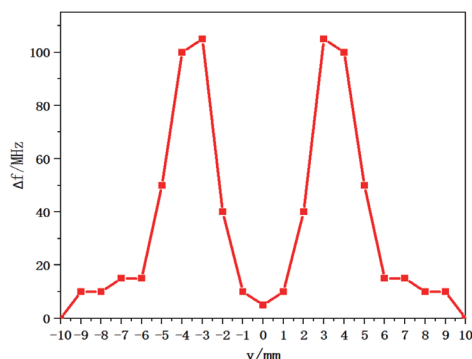


图 8 E- 形谐振传感器定位检测

3 实验验证

该场聚焦的 E- 形谐振传感器是通过印刷电路加工而成，两端是微带线馈电，中间是 E- 形传感区，两个面都是采用铜材料，厚度为 0.038 mm，中间的介质层是 PTFE ($\epsilon=2.2$)，介质基板的厚度为 2 mm。使用该传感器对陶瓷 (Al_2O_3) 进行厚度检测定位，如图 9 和图 10，实测结果如图 11 所示。



图 9 E- 形谐振传感器实物正面

该热障涂层检测系统主要包括矢量网络分析仪（简称矢网）、同轴线缆、固定架、传感器、待检测的对象以及滑台。可以把待检测的物体放到滑台上，然后利用滑台的调节旋钮，在水平的 xoy 面内移动待测物。通过同轴线缆，将传感器的 SMA 接口连接至矢网。使用固定架来稳定同轴线缆和传感器，并且可以通过固定架上的旋钮调整传感器的高度，确保传感器与待检物的上表面恰好接触。

在测厚检测定位实验中，通过调节滑台的水平旋转按钮，使得待测物可以在水平方向移动，对比待测物中厚度变化或位置变化时矢网上显示的反射系数 S_{11} 变化情况，从而实现对接厚度的检测定位。

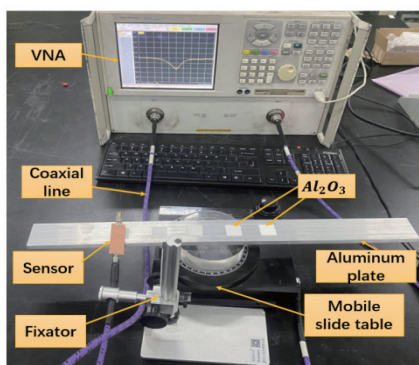
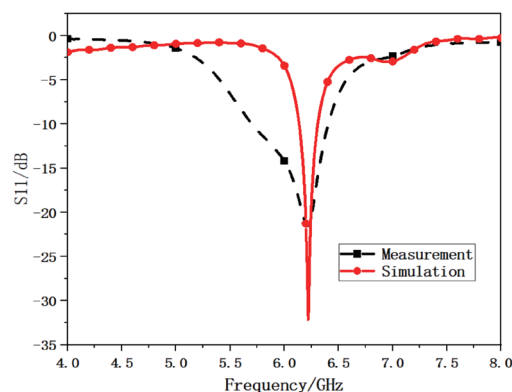
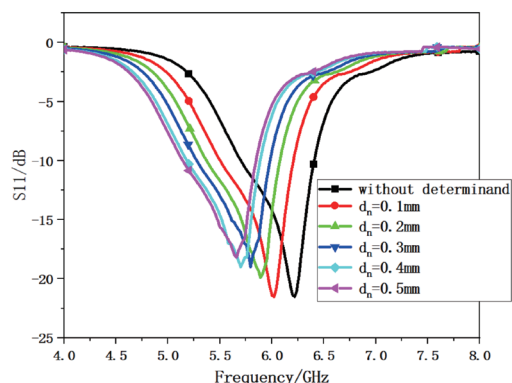


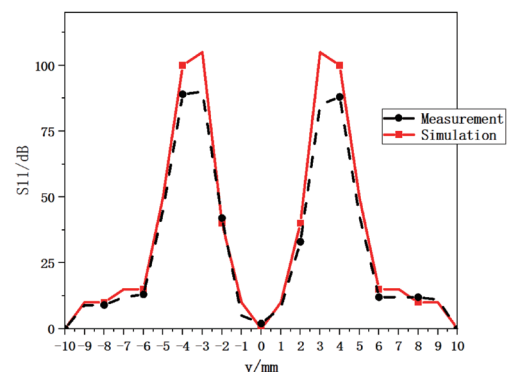
图 10 E- 形谐振传感器实验系统



(a) E- 形谐振传感器实测 S_{11} 与仿真 S_{11}



(b) E- 形谐振传感器实测结果



(c) E- 形谐振传感器定位检测实测与仿真

图 11 E- 形谐振传感器实测结果

综合上述两组实验结果来看，所设计的场聚焦 E- 形谐振传感器实测结果基本上与仿真结果吻合，这也进一步证明本文所设计的传感器具有对热障涂层陶瓷层厚度检测定位的能力。

再将实测数据通过 MATLAB 分别进行多项式 (8)、四参数 (9) 曲线拟合模型构建，得到方程，其拟合模型如图 12 所示。

$$y = 4.15 + 2076.26x - 2551.59x^2 + 1342.59x^3 \quad (8)$$

$$y = \frac{1403.36}{1 + \left(\frac{x}{0.74}\right)^{-0.90}} - 3.57 \quad (9)$$

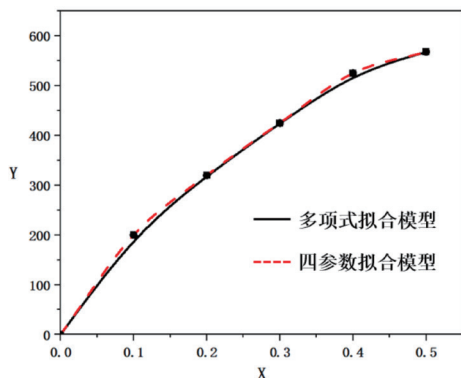


图 12 多项式、四参数拟合模型

之后为了验证拟合模型，将之前未用于曲线拟合的实验数据，另外单独定制加工的模拟器件厚度，具体数据为 $d_n=0.25\text{ mm}$, 0.35 mm , 0.45 mm 进行对比验证，其数据结果如表 3 所示。

表 3 曲线拟合模型对比

涂层厚度 /mm	Δf 频偏量 /MHz	多项式拟合模型		四参数拟合模型	
		拟合计算 /mm	误差	拟合计算 /mm	误差
0.25	378	0.243	2.8%	0.248	0.8%
0.35	450	0.319	8.8%	0.326	6.8%
0.45	555	0.469	4.2%	0.467	3.8%

从上述拟合结果可知，本文所设计的 E- 形谐振传感器在测厚方面具有独特的优势，其检测精度较高，对热障涂层厚度检测具有可实施性。

4 总结

本文创新性的提出了一种基于场聚焦的 E- 形谐振传感器，该传感器可以实现对热障涂层陶瓷层厚度的检测和定位。实现谐振频率为 6.22 GHz ，同时提高传感器对热障涂层陶瓷层厚度变化的敏感度。通过 CST 软件对所设计的 E- 形谐振传感器进行了仿真分析，验证了传感器对热障涂层厚度变化 ($0 \sim 0.5\text{ mm}$) 的响应特性，并通过参数优化确保了传感器设计的有效性和实用性。通过仿真结果，我们发现传感器的谐振频率随热障涂层厚度的变化而发生偏移，每增加 0.1 mm ，频偏在 100 MHz 左右，最大可达 590 MHz ，证实了其测量能力。同时进行了验证实验，四参数拟合曲线其误差值更小，最小误差在计算 $d_n=0.25\text{ mm}$ ，时仅为 0.8% ，具有优异的检测精度。

参考文献:

[1]JAMES A R, ANDI B, MARCUS P, et al.Strength degradation and failure mechanisms of electron-beam physical-vapor-deposited thermal[J].Journal of the American ceramic society, 2001, 84(7):1545-1552.

[2] 师俊东, 何箐. 热障涂层服役环境模拟实验方法 [J]. 航空材料学报, 2018,38(2):32-42.

[3] 程玉贤, 王璐, 袁福河. 航空发动机涡轮叶片热障涂层应用的关键技术和问题 [J]. 航空制造技术, 2017,60(15):28-34.

[4]CHEN C, LEE D J, POLLOCK T, et al.Terahertz characterization of interfacial oxide layers and voids for health monitoring of ceramic coatings[C]//2009 34th International Conference on Infrared,Millimeter,and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2009),[v.1].Piscataway: IEEE, 2009: 33-34.

[5]FUKUCHI T, FUSE N, MIZUNO M, et al.Measurement of surface roughness of dielectric materials using terahertz waves[J].IEEJ transactions on fundamentals and materials, 2015, 135(8):450-455.

[6]JIANG P, YANG L, SUN Y, et al.Nondestructive measurements of residual stress in air plasma-sprayed thermal barrier coatings[J].Journal of the American ceramic society, 2021(3): 1455-1464.

[7]YANG L, YANG T, ZHOU Y, 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.

[8]MOHAN P, YUAN B, PATTERSON T, et al. Degradation of yttria stabilized zirconia thermal barrier coatings by molten CMAS($\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$) deposits[J].Materials science forum,2008,595/598(Pt.1):207-212.

[9]BOYBAY M S, RAMAHI O M.Non-destructive thickness measurement using quasi-static resonators[J].IEEE microwave&wireless components letters,2013,23(4):217-219.

[10]GABRIEL G, HERRAIZ-MARTINEZ J, MARTA J, et al. Submersible printed split-ring resonator-based sensor for thin-film detection and permittivity characterization[J].IEEE sensors journal, 2016,16(10):3587-3596.

[11]VARSHNEY P K, AKHTAR M J.Permittivity estimation of dielectric substrate materials via enhanced SIW sensor[J]. IEEE sensors journal,2021,21(10):12104-12112.

[12]MOHAMMADI P, TEIMOURI H, MOHAMMADI A, et al.Dual band,miniaturized permittivity measurement sensor with negative-order SIW resonator[J].IEEE sensors journal, 2021, 21(20):22695-22702.

【作者简介】

吴小华 (1993—)，男，四川雷波人，硕士研究生，研究方向：微波检测。

(收稿日期：2024-03-23)