复合材料学报 Acta Materiae Compositae Sinica
第30卷 第3期 6月 2013年
Vol. 30 No. 3 June 2013

文章编号：1000-3851(2013)03-0149-05

微波无损检测热障涂层下金属表面裂缝的参数优化

杨玉娥[1,2]，何存富[*1]，吴 斌[1]

（1. 北京工业大学 机械工程与应用电子技术学院，北京 100124；2. 山东省济宁学院 物理与信息工程系，山东 曲阜 273155）

摘 要： 基于微波在介电材料中的传播理论及其对金属界面特性的敏感性，利用CST-微波工作室(computer simulation technology-microwave studio)对微波检测热障涂层下金属的裂缝进行了仿真计算，研究了热障涂层的厚度、裂缝方向对检测结果的影响，仿真计算了热障涂层厚度为400 μm、裂缝长边方向平行于矩形波导探头长边的不同宽度的裂缝。结果表明：热障涂层厚度不同时，微波检测金属表面裂缝的敏感工作频率不同；裂缝方向与波导口长边的夹角为50°～55°时检测敏感度低。裂缝宽度小于8 μm时用本研究中的频率范围无法检测，裂缝宽度在10～30 μm时检测效果不明显，裂缝宽度在30 μm～1 mm范围内，裂缝越宽微波的反射系数相位差越大。因此，在合适的工作频率下能利用微波无损检测技术对热障涂层下金属表面的裂缝进行无损检测。

关键词： 微波无损检测；热障涂层；金属；裂缝；相位差

中图分类号： TB330.1；TM931 **文献标志码：** A

Optimization of evaluating surface crack on the substrate under thermal barrier coatings using microwave

YANG Yu'e[1,2], HE Cunfu[*1], WU Bin[1]

(1. College of Mechanical Engineering and Applied Electronics Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. Physics and Information Engineering Department, Jining University, Qufu 273155, Shandong, China)

Abstract: Based on the propagation characteristics of microwave and the microwave sensitivity to the interface, the phase difference at the interface of thermal barrier coating(TBC) and waveguide probe was used to characterize the long crack on the metal substrate surface under TBC using computer simulation technology-microwave studio (CST-MWS). The influences of top coating thickness and crack direction were studied. Besides, microwave evaluation of cracks with different width and the crack length direction parrallel to the long brim of the rectangular waveguide probe were studied when the thickness of TBC is 400 μm. The results show that the top coating thickness affects the sensitive frequency, and that the carck direction influences the evaluation sensitive, and the evaluation sensitive is the minimum when the angle between the rack length direction and the long brim of the rectangular waveguide probe is 50°-55°. It is also observed that the crack can not be detected when the crack width is less than 8 μm, and the effect of detection is not obvious when the crack width is 10-30 μm, and the wider the cracks, the greater the phase difference of the reflection coefficient when crack width is in the range of 30 μm-1 mm. Therefore, it is feasible to evaluate the crack on the metal substrate surface using microwave non-destruction evaluation.

Keywords: microwave non-destructive; thermal barrier coatings; metal substrate; long crack; phase difference

发动机叶片耐高温能力的上限限制了发动机推重比的提高，因此，提高发动机叶片的耐高温能力就成为近空间高超声速远程飞行器的关键基础科学问题。当前解决该问题的主要手段之一是在发动机叶片表面采用热障涂层技术。自20世纪70年代以来，采用热障涂层技术进行热防护逐渐成为航空发动机热防护的重要选择。目前主要通过等离子喷涂和电子束物理气相沉积两种制备方法，在叶片表面涂覆具有一定厚度和耐久性的绝热陶瓷层薄膜，即热障涂层(thermal barrier coating，TBC)，将叶片

收到初稿日期： 2012-04-21；**收到修改稿日期：** 2012-07-03；**网络出版时间：** 2013-01-09 11:19:00
网络出版地址： http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1801.TB.20130109.1119.008.html
基金项目： 国家自然科学基金(11072010)
通讯作者： 何存富，博士，教授，博士生导师，主要从事现代测控技术与方法、无损检测与健康评价、智能仪器与虚拟仪器技术等方面的研究
E-mail：hecunfu@bjut.edu.cn

与高温环境隔开，从而保护叶片，降低叶片温度，使得发动机在高温环境中运行以提高发动机的热效率。在热障涂层的制备过程中由于不同的制备参数会使热障涂层对金属基底的力学性能产生一定的影响[1]，并且热障涂层原材料中不同的氧化物掺杂会对热障涂层的热物理性能及对金属基底产生的温降比产生一定的影响[2-3]，从而使得金属表面产生裂缝、腐蚀等缺陷。为了保证发动机叶片的质量，需要对热障涂层下的金属基体进行无损检测。

微波无损检测技术作为一种新的检测技术，由于微波信号可以穿透到介电材料内部，并且检测时无需耦合，适合对热障涂层下金属表面的裂缝等缺陷进行检测。利用微波无损检测技术对金属表面缺陷的检测已有研究，主要包括对金属表面的微小缺陷检测[4-5]、疲劳缺陷检测[6-7]以及薄介质层下金属的状况检测[8-11]。其中薄膜介质下金属状况的微波检测为本研究提供了理论依据和技术参考。

本文中利用 CST-微波工作室(computer simulation technology-microwave studio)对微波检测热障涂层下金属表面的裂缝进行了仿真计算，利用反射系数相位差表征裂缝特性。

1　理论基础

微波检测原理实际上就是研究微波与物质之间的相互作用，通过微波的物理特性(如反射、散射、衍射、透射及多普勒效应等)以及被检测材料的电磁特性(如介电常数和损耗的相对变化)来测量微波基本参数的变化，实现对被测材料的性能、缺陷等非电量的检测。图 1 为微波在热障涂层系统中电场的传播和反射：矩形波导探头 1 中的 TE_{10} 型微波入射信号(E_0^i)传播进入热障涂层 2 中，称为热障涂

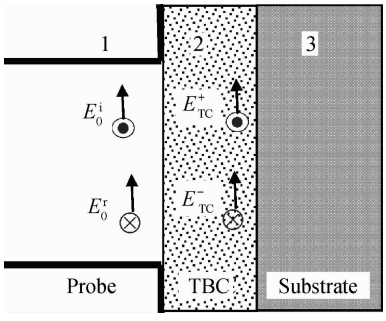

图 1　微波在热障涂层系统中的电场传播和反射原理

Fig. 1　Microwave incident and reflected electric fields traveling in thermal barrier coatings(TBCs) systems

层到金属基底的入射信号(E_{TC}^+)，当遇到金属基体 3 时发生全反射，经反射的微波信号(E_{TC}^-)已经携带了金属表面的特性，即金属表面有缺陷或缺陷不同时会对微波信号产生一定的影响，微波信号经由热障涂层传输回矩形波导探头内作为检测的微波反射信号(E_0^r)。波导探头内微波反射信号与入射信号的比值称为反射系数 Γ，反射系数的相位 φ 为反射系数实部(lm)与虚部(Re)比值的反正切，计算公式如下：

$$\Gamma = \frac{E_0^r}{E_0^i}$$

$$\varphi = \tan^{-1}\left[\frac{\mathrm{lm}(\Gamma)}{\mathrm{Re}(\Gamma)}\right] \tag{1}$$

本文中利用反射系数的相位差来表征金属表面的裂缝，相位差($\Delta\varphi$)为金属表面有裂缝时的反射系数相位($\varphi_{\mathrm{withcrack}}$)与无裂缝时反射系数的相位($\varphi_{\mathrm{withoutcrack}}$)之差，计算公式如下：

$$\Delta\varphi = \varphi_{\mathrm{withcrack}} - \varphi_{\mathrm{withoutcrack}} \tag{2}$$

2　CST 模型建立

CST 微波工作室是三维高频电磁仿真的特殊工具，是基于有限积分法的电磁场数字仿真软件，在建立复杂 3D 模型中有着友好的用户图形界面，具有独特的网格生成技术，如理想边界拟合(perfect boundary approximation，PBA)和薄片技术(thin sheet technology，TST)等。在计算时间、生成网格和计算误差方面优于同类仿真软件，其全参量化结构建模为结构优化设计提供了方便[12]。图 2 为 CST 仿真模型，微波检测探头为带法兰的矩形波导 WR28，工作频率为 26.5～40 GHz；热障涂层尺寸为 100 mm×100 mm×H，其中 H 为热障涂层的厚度；金属的尺寸为 100 mm×100 mm×4 mm。热障涂层选用氧化钇(Y_2O_3)稳定氧化锆陶瓷粉末，其中 Y_2O_3 的体积分数为 7%。Li 等[13]在研究 Y_2O_3 体积分数对氧化锆陶瓷微波介电性能的影响时得出 Y_2O_3 体积分数为 7%时涂层的复介电常数为 23.6－j1.645[13]。热障涂层的制备方法选择等离子喷涂。裂缝为金属表面与热障涂层的界面处的长方体，裂缝内定义为空气，裂缝的大小和方向在不同测量中取不同的值。图 3 为裂缝的相对位置和尺寸。

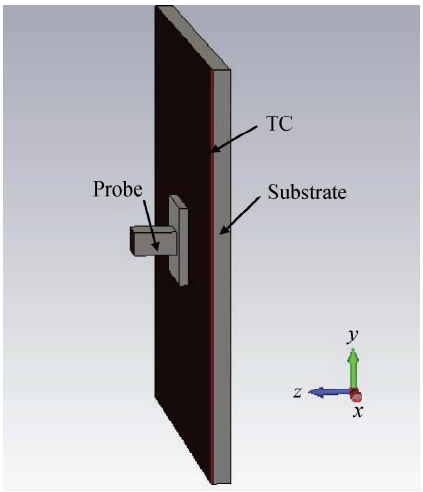

图 2　CST 仿真模型

Fig. 2　CST simulation model

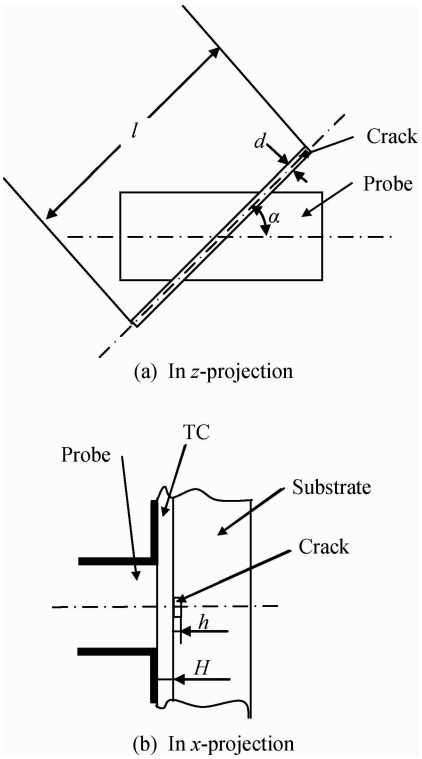

图 3　裂缝的相对位置及尺寸

Fig. 3　Location and size of cracks

为了研究热障涂层厚度和裂缝方向对检测的影响，以及研究微波检测不同宽度的金属基体裂缝，仿真检测过程分为三组。

(1)热障涂层厚度影响的检测，裂缝尺寸为 $l=10$ mm，$h=1$ mm，$d=0.08$ mm，裂缝的中心在 z 方向上投影与波导探头的中心重合，裂缝长边与波导口长边的夹角 $\alpha=0°$。热障涂层的厚度 H 取多个不同的水平。

(2)裂缝方向影响的检测，热障涂层的厚度 H 为 400 μm，裂缝尺寸为 $l=10$ mm，$h=1$ mm，$d=0.1$ mm，α 取七个水平：0°、30°、45°、50°、55°、60°、90°。

(3)微波检测热障涂层下金属表面不同宽度的裂缝，热障涂层厚度 H 为 400 μm，$\alpha=0°$，裂缝尺寸为 $l=10$ mm，$h=1$ mm，d 取不同的值，范围为 1 μm～1 mm。

其中：l 为裂缝的长度；h 为裂缝的深度；d 为裂缝的宽度；H 为热障涂层的厚度；α 为裂缝与波导口长边中心线的夹角。

3　结果与分析

3.1　热障涂层厚度的影响

微波检测热障涂层下金属表面的裂缝时，微波信号需要传播进入热障涂层后到达金属基体表面来实现对金属基体表面的健康状况进行检测，因此热障涂层的性能对检测有一定的影响。图 4 为微波工作频率在 26.5～40 GHz 和 40～50 GHz 范围内利用微波无损检测技术对热障涂层下金属表面的裂缝

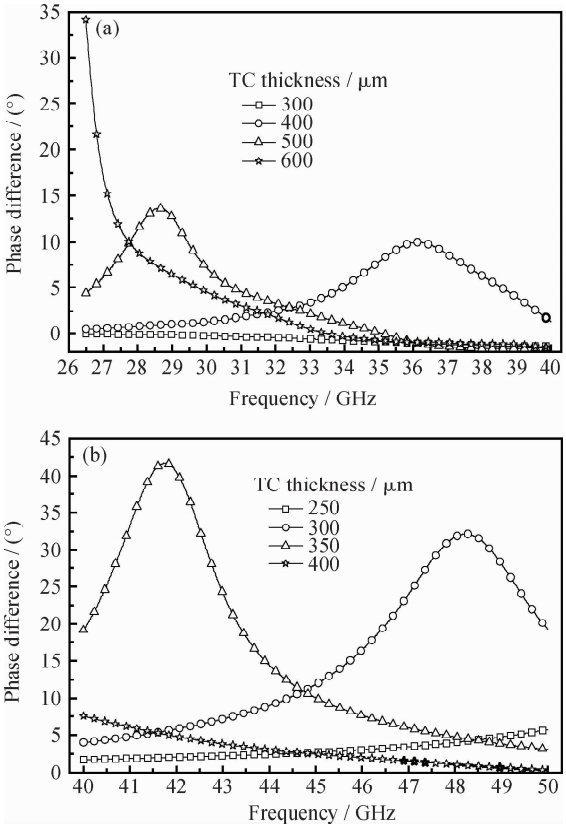

图 4　热障涂层厚度对裂缝检测的影响

Fig. 4　Influence of thermal barrier coating thickness to evaluation

检测时，热障涂层的厚度对检测结果的影响。

图 4(a)结果显示在热障涂层厚度为 400 μm 和 500 μm 时相位差曲线有极值点，图 4(b) 结果显示在热障涂层厚度为 300 μm 和 350 μm 时相位差曲线有极值点，极值点处对应的工作频率为敏感工作频率，因为在此工作频率下进行检测时，检测的灵敏度最高，即相同的裂缝造成的相位差值最大。另外可以看出，热障涂层的厚度越大，所对应的敏感工作频率越低。这主要是因为微波的工作频率越低，所用的微波在热障涂层中传播的工作波长越长。热障涂层的厚度范围为 300～500 μm，检测热障涂层下金属表面的裂缝时，敏感频率可根据检测的热障涂层的厚度来选择，并选择合适的终端开口矩形波导作为检测探头。由检测结果可知，如果检测较小厚度的热障涂层下的金属时，需要选择更高的工作频率范围，即选择尺寸更小的终端开口矩形波导作为检测探头，相反，如果检测较大厚度的热障涂层下的金属时，需要选择更低的工作频率范围，即选择尺寸更大的终端开口矩形波导作为检测探头。

3.2　裂缝与波导口相对方向的影响

图 5 为金属表面裂缝的方向对检测结果的影响。结果显示，当裂缝的长边与波导口长边的夹角不同时，相位差曲线上对应的敏感工作频率基本不变；但是夹角越大时，相位差越小，在夹角为55°～60°附近时相位差接近零，即无法对裂缝进行灵敏的检测，当夹角大于等于 60°时相位差小于零，夹角小于等于 55°时相位差大于零，当裂缝长边与波导口长边夹角为 0°时即裂缝长边平行于波导口长边时相位差的值最大，检测灵敏度最高。在检测过程中，由于裂缝在热障涂层下，裂缝的方向未知，因此在检测过程中为了更准确的检测出热障涂层下金属表面的裂缝，需要调整波导探头相对于被检测试样的波导口方向。在实际检测过程中，扫描检测一遍后，可以把波导探头在波导口平面上旋转 45°再进行扫描检测，便于检测出不同方向的裂缝。

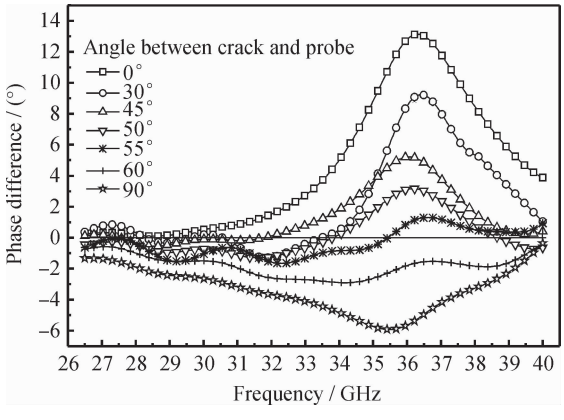

图 5　金属表面裂缝方向对裂缝检测的影响

Fig. 5　Influence of the direction of crack on evaluation

3.3　微波检测不同宽度的裂缝

微波检测热障涂层下金属表面不同宽度的裂缝，用相位差来表征裂缝的特性。图 6 为检测不同

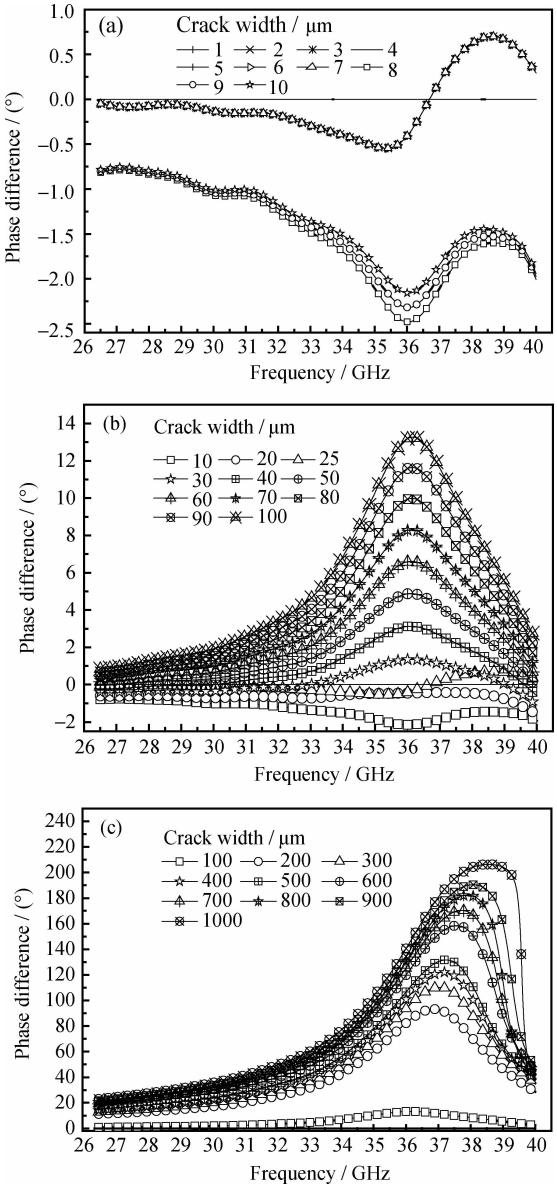

图 6　金属表面不同裂缝宽度时反射系数相位差与工作频率的关系

Fig. 6　Relationship between phase difference and frequency evaluating crack with different width

裂缝宽度时相位差与工作频率的关系。可以看出，裂缝的宽度小于 8 μm 时，从相位差无法看出不同宽度裂缝的特性，并且相位差值的绝对值小于 1°。经过多次反复计算可知，在裂缝宽度为7.112 μm附近时，反射系数相位差有突变现象，可能是由微波信号在较小尺寸的裂缝内传播及反射时的特殊性造成。当裂缝的宽度大于等于 8 μm 时，裂缝宽度越大时反射系数的相位差值越大，但当裂缝宽度约为 20 μm 时，反射系数相位差接近零。当裂缝的宽度大于等于 30 μm 时，裂缝的宽度越大，检测到的微波信号反射系数相位差越大。结果显示，在裂缝宽度不同时，相位差曲线对应的敏感工作频率基本没变，只是在裂缝宽度大于 200 μm 的相位差曲线的敏感工作频率逐渐变大。因此利用本研究中的矩形波导探头(工作频率 26.5～40 GHz)检测厚度为 400 μm 的热障涂层下金属表面上的长 10 mm 深 1 mm的裂缝时，在敏感工作频率点可以准确测量裂缝宽。

4 结 论

(1)热障涂层的厚度影响检测中的敏感工作频率，因此，厚度不同时应选择不同工作频率的波导探头用以提高检测灵敏度。

(2)裂缝长边与波导口的相对位置影响检测结果，当裂缝长边与波导口长边的夹角为 55°左右时检测效果最差，在实际检测过程中应避免这种情况发生。因此，在实际检测中应改变波导探头的方位进行多次扫描检测以达到对金属表面裂缝的非漏检。

(3)微波检测热障涂层下金属表面裂缝时，可以区分不同宽度的裂缝。在 26.5～40 GHz 的工作频率范围内可以对长 10 mm 深 1 mm 不同宽度的裂缝进行检测。当裂缝的宽度大于等于 30 μm 时，裂缝的宽度越大，检测到的微波信号反射系数相位差越大。用微波无损检测技术的相位差法可以对热障涂层下金属表面的裂缝进行检测。

参考文献：

[1] Teixeira V. Numerical analysis of the influence of coating porosity and substrate elastic properties on the residual stresses in high temperature graded coatings[J]. Surface and Coatings Technology，2001，146/147：79-84.

[2] 宫文彪，白 晶，刘 威，等.掺杂纳米 CeO_2 对 $ZrO_2-Y_2O_3$ 热障涂层隔热性能的影响[J].复合材料学报，2009，26(1)：96-102.
Gong Wenbiao，Bai Jing，Liu Wei，et al. Effect of doped nano-CeO_2 on thermal insulation properties of $ZrO_2-Y_2O_3$ thermal barrier coatings [J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2009，26(1)：96-102.

[3] 张丹华，王 璐，郭洪波，等.多元稀土氧化物掺杂二氧化锆基陶瓷材料的热物理性能[J].复合材料学报，2011，28(2)：179-184.
Zhang Danhua，Wang Lu，Guo Hongbo，et al. Thermophysical properties of multiple rare earth oxide co-doped zirconia-based ceramic materials[J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2011，28(2)：179-184.

[4] Kerouedan J，Quéffélec P，de Blasi S，et al. Theoretical and experimental demonstration of the feasibility of metallic surface cracks detection using microwaves techniques [J]. IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation，2006，12：7-8.

[5] Kerouedan J，Quéffélec P，Talbot P，et al. Detection of micro-cracks on metal surfaces using near-field microwave dual-behavior resonator filters[J]. Measurement Science & Technology，2008，19(10)：105701-105710.

[6] Qaddoumi N，Ranu E，McColskey J D，et al. Microwave detection of stress-induced fatigue cracks in steel and potential for crack opening determination [J]. Research in Nondestructive Evaluation，2000，12(2)：87-103.

[7] Zoughi R，Kharkovsky S. Microwave and millimetre wave sensors for crack detection [J]. Fatigue Fracture Engineering Material Structure，2008，31：695-713.

[8] Kleismit R A，Kazimierczuk M K. Evanescent microwave sensor scanning for detection of sub-surface defects in wires [J]. Proceedings of the Electrical/Electronics Insulation Conference，2001：245-250.

[9] Wang N，Donnell K，Castle M，et al. Microwave detection of covered surface cracks in metals [J]. AIP Conference Proceedings，2001，557A：430-437.

[10] Hughes D，Zoughi R，Austin R，et al. Near-field microwave detection of corrosion precursor pitting under thin dielectric coatings in metallic substrate [J]. AIP Conference Proceedings，2003，657A：462-469.

[11] Li Y，Tian G Y，Bowring N，et al. A microwave measurement system for metallic object detection using swept-frequency radar [J]. The International Society for Optical Engineering，2008，7117(13)：1-13.

[12] CST Microwave Studio. Computer simulation technology[EB/OL].(2000-12-01)[2012-04-21]. https：//www.cst.com/Content/Products/MWS/Solvers.aspx.

[13] Li P，Luo F，Wang X Y，et al. Effect of Y_2O_3 content on microwave dielectric properties of zirconia ceramics[J]. Rare Metal Materials and Engineering，2007，36(3)：623-626.