

陶瓷及陶瓷基复合材料微缺陷的超声检测

Ultrasonic Inspection of Small Defects in Ceramics and Ceramics Matrix Composites

梁 菁, 史亦韦 (北京航空材料研究院, 北京 100095)

LIANG Jing, SHI Yi-wei (Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

摘要: 为研究陶瓷及陶瓷基复合材料微缺陷的超声检测能力, 针对一些人工缺陷试样进行了超声检测试验。试验主要采用了纵波垂直入射法和泄漏瑞利波法。通过试验结果, 比较了两种方法的检测能力。

关键词: 超声检测; 陶瓷; 陶瓷基复合材料; 微缺陷

中图分类号: TG115.28 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381 (2003) 04-0030-04

Abstract: Some specimens with artificial defects were tested ultrasonically for the investigation of the ultrasonic inspection ability. Longitudinal wave straight beam and leaky rayleigh wave methods were used. The results show the difference of ultrasonic inspection ability between these two methods.

Key words: ultrasonic testing; ceramics; ceramics matrix composite; small defect

陶瓷及陶瓷基复合材料以其优良的高温性能, 特别是它的高熔点、耐磨损和轻重量的特点, 成为发动机部件可选用的先进材料之一。其中陶瓷材料由于对微小缺陷过于敏感, 难以获得可再现的可靠制件, 目前已逐渐被陶瓷基复合材料所取代。陶瓷基复合材料是以陶瓷材料为基体, 以陶瓷、碳纤维或难熔金属的纤维、晶须或颗粒为增强体, 通过适当的复合工艺制成的复合材料。由于在陶瓷及陶瓷基复合材料的制造和使用过程中, 一方面可能出现一些影响使用性能的缺陷, 如微裂纹、孔隙和氧损伤等, 另一方面纤维-基体界面的结合情况也会对材料的力学性能产生影响。因此需要研究相应的无损检测技术, 一方面辅助进行工艺研究过程中的材料特性表征, 为工艺改进提供数据; 另一方面为构件的质量评定提供相应的检测手段。

微裂纹是陶瓷和层状陶瓷基复合材料易出现的缺陷。层状陶瓷基复合材料在制造和使用中, 可能会产生裂纹, 裂纹穿过基体层到达界面层时, 裂纹将沿着界面偏转, 成为界面裂纹, 在更大载荷的作用下, 裂纹会继续穿层扩展。裂纹的特征是在垂直表面和平行表面的方向上曲折前进。

本工作针对上述两种材料中存在的问题, 重点研究了超声波检测方法对于微小缺陷的检测能力。试验主要采用了纵波垂直入射法和泄漏瑞利波法。

1 试验原理

1.1 纵波垂直入射法

微缺陷的检测通常采用的是超声脉冲反射法, 即一定频率的超声波在材料中传播时, 如遇到具有与材料不同声特性阻抗的界面(缺陷或底面), 将产生反射信号, 该信号被探头接收, 并在荧光屏上显示出来。为了检测材料中的微小缺陷, 关键是要提高小缺陷反射的超声信号幅度和信噪比。因而常利用聚焦探头水浸法检验。

在普通平探头的声场中, 声束宽度在近场区约为换能器直径, 在远场区则随着距离的增大逐渐加宽。对小缺陷来说, 缺陷面积只占声束面积的一小部分, 因此, 缺陷反射信号较小; 另一方面, 声束穿过的材料体积较大, 相应引起散射噪声也较大, 使得信噪比较差。而带有聚焦透镜的探头, 由于透镜的聚焦作用, 使焦点附近能量高度集中, 衡量聚焦声场特性的主要参数焦区长度 L 和焦点直径 ϕ 由式(1)和(2)表示,

$$L = 4\lambda \left(\frac{F}{D}\right)^2 \quad (1)$$

$$\phi = \lambda \frac{F}{D} \quad (2)$$

式中 λ 为波长, F 为焦距, D 为换能器直径。例如, 对 10MHz、12mm 晶片直径、125mm 焦距的探头来说, 焦点处声束直径只有 1.5 mm, 焦区长度约 65mm。因此, 在焦区内可使小缺陷检测灵敏度大大提高, 同时, 由于声束变窄也使声场内组织散射信号明显减少, 从而提高了检测信噪比。在这里, 重要的是适当地选取探头与检测条件。

1.2 泄漏瑞利波法

1. 2. 1 泄漏瑞利波的激励

关于泄漏瑞利波的理论实验研究证明^[1-3]，当一束纵波在液体中以瑞利入射角 θ_R ($\theta_R = \arcsin(C_W/C_R)$ ， C_W 为液体中的纵波速度， C_R 为固体试样中瑞利波的速度) 入射至固体试样表面时，即可在试样表面产生瑞利波。如图 1 所示，该瑞利波 (R_1) 沿试样表面以瑞利波速度传播，并以接近瑞利入射角的角度将一部分能量辐射至液体中，即泄漏瑞利波 (L_1)。这部分泄漏到水中的能量加上固体表面结构对声波的吸收与散射，使得沿试样表面传播的瑞利波能量在传播过程中逐渐衰减。

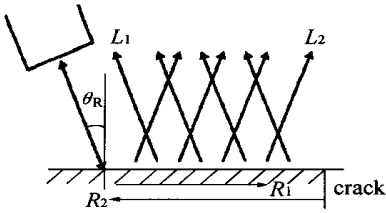


图 1 泄漏瑞利波原理示意图

Fig. 1 Sketch map of principle of leaky rayleigh wave method

1. 2. 2 缺陷回波信号的获得

当瑞利波在试样表面传播过程中遇到一声特性阻抗发生变化的微小界面时，则在此界面处可产生一反射波 (图 1 中 R_2)，沿与原传播方向相反的方向传播，同时，一部分能量按瑞利入射角进入水中 (L_2)，被探头所接收。一典型的泄漏瑞利波检测的 A 扫描波形如图 2 所示。在发射脉冲之后，经过一定的水程距离 (时间 t_1)，在试样表面通常所具有的粗糙度状况下，探头可接收到一由试样表面直接散射的界面散射波。当探头扫描至接近一表面缺陷时，在界面散射波之后出现一位置随探头与缺陷间距离而变化的缺陷回波，该信号与界面散射波之间的时间差 (t_2) 为瑞利波在表面往返传播的时间。因此，为在 C 扫描中采集反射泄漏瑞利波的信号，必须将时间门设在紧贴界面散射波之后。

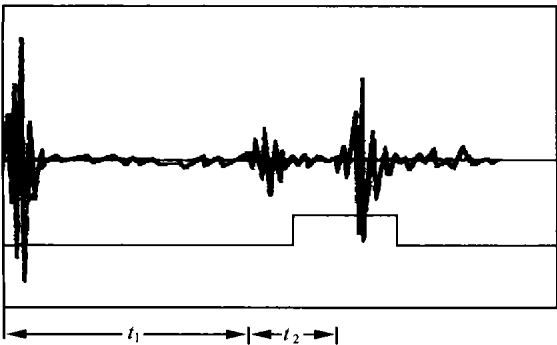


图 2 泄漏瑞利波波形示意图

Fig. 2 Waveform of leaky rayleigh wave testing

关于瑞利波回波幅度与缺陷的关系尚无确定的理论结果，但一些研究也证明了反射信号幅度与缺陷在垂直于波的传播方向上的面积也是相关的^[4]。

2 试验方法和结果

2. 1 试样准备

通过材料声特性的试验，认为连续纤维编织复合材料的声衰减十分严重，不适宜采用超声波方法检测，因此微缺陷试样选用了层状复合材料和陶瓷材料制作。在试样厚度方向上采用激光或超声波方法加工了人工缺陷。试样情况见表 1。其中 S-1 试样中的长条形和环形缺陷为人工槽，其余缺陷均为人工孔。

表 1 试样情况
Table 1 Specimens

编号	成型工艺	材料	纵波速度 / (10 ³ m/s)	试样厚度 / mm	人工缺陷	
					尺寸 / mm	类型
1 [#]	层压	SiC 基结构增强复合材料	10.4	1.76	A 区: 0.331-0.367; B 区: 0.219-0.279; C 区: 0.115-0.140	孔
2 [#]	烧结	SiC 陶瓷	11.6	5.03	0.309, 0.315	孔
3 [#]	烧结	SiC 陶瓷	12.4	5.02	0.159 ~ 0.277	孔
4 [#]	烧结	Si ₃ N ₄ 陶瓷	10.7	10.05	F: 0.053 ~ 0.200	孔
					A: 0.043, B: 0.053, C: 0.058, D: 0.068, E: 0.087, G: 0.063, H: 0.072 ~ 0.149, I: 0.067	人工槽

注: 表中人工缺陷尺寸指的是人工孔孔径或人工槽宽度。人工槽的深度与其宽度相近。对于一个区域中分布的多个人工缺陷, 表中给出了缺陷尺寸的范围

2. 2 试验方法

采用了纵波垂直入射法和泄漏瑞利波法两种方法进行试验。纵波垂直入射法采用水浸聚焦探头进行超声 C 扫描成像，入射面选择为打孔面和其相对面两种，通过水程的选择，使焦点位于人工伤上。泄漏瑞利波法采用与纵波垂直入射法同样的探头，将探头从与试样表面垂直的位置调至入射角接近计算所得的瑞利波入射角 (14 左右)，进行 C 扫描成像。检测条件为:

仪器: USIP-12 型超声检测仪

探头: I2-2504-R (25M Hz, 晶片直径 6mm, 焦距 50mm)

2. 3 试验结果

2. 3. 1 纵波垂直入射法检测结果

检测结果见图 3~5，图像比例为 2:1。其中图

3b、图 4 和图 5 均为声束入射面为打孔面的检测结果。图 3a 为声束入射面为打孔面的相对面的检测结果。

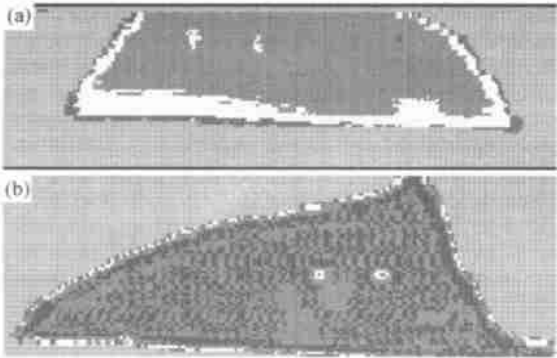


图 3 2 号试样纵波垂直入射法检测结果
Fig. 3 Result of Longitudinal wave straight beam testing on 2[#] specimen

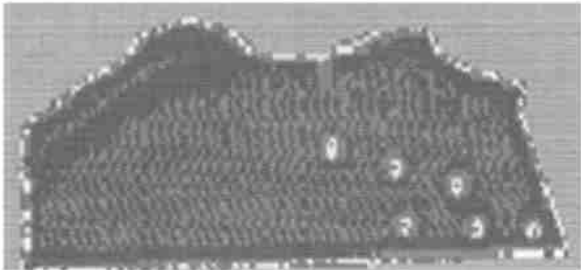


图 4 3 号试样纵波垂直入射法检测结果
Fig. 4 Result of Longitudinal wave straight beam testing on 3[#] specimen

2. 3. 2 泄漏瑞利波法检测结果
检测结果见图 6~8，图像比例为 2 : 1。

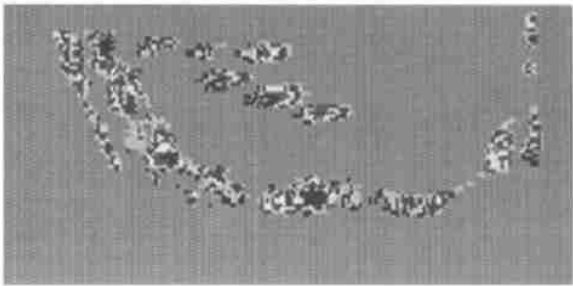


图 6 3 号试样泄漏瑞利波法检测结果
Fig. 6 Result of leaky rayleigh wave testing on 3[#] specimen

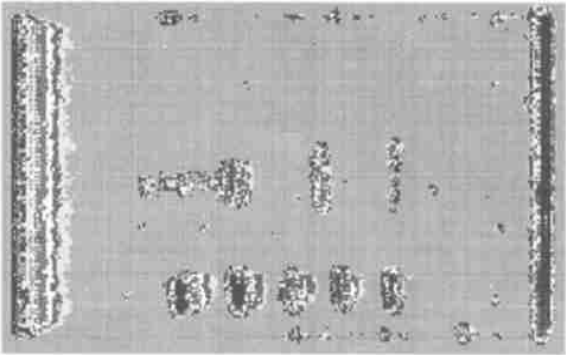


图 7 4 号试样泄漏瑞利波法检测结果
Fig. 7 Result of leaky rayleigh wave testing on 4[#] specimen

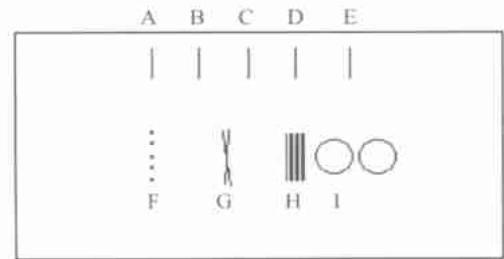


图 5 3 号试样试样缺陷分布及纵波垂直入射法检测结果
Fig. 5 Distribution of artificial flaws and result of Longitudinal wave straight beam on 4[#] specimen

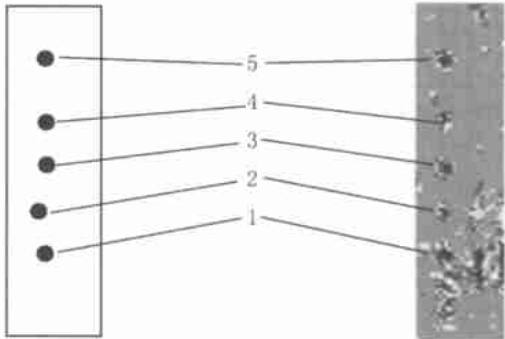


图 8 1 号试样 C 区试样缺陷分布及泄漏瑞利波法检测结果
Fig. 8 Distribution of artificial flaws and result of leaky rayleigh wave testing on section C of 1[#] specimen

3 结果分析

3. 1 泄漏瑞利波检测信号的确认和图像的特点

泄漏瑞利波检测信号的确认可以用试样的边缘反射信号作为参考，波形图见图 9。当入射声束在试样中产生瑞利波时，可在声入射点位于边缘处 ($X = 0$)，得到幅度最高的瑞利波反射信号 (如图 9c)。随着声入

射点沿声传播方向的反方向逐渐离开边缘,可观察到该反射信号幅度逐渐减弱,且声程逐渐增大(见图9d、9e),直至消失。如果声入射点沿声传播方向逐渐离开边缘,则可观察到该反射信号幅度迅速降低(见图9b)。由此瑞利波波形特点,可以确认试样中瑞利波的产生。

从以上各扫描图可以看到,泄漏瑞利波产生的缺陷图像总是从某处突然开始,然后延伸一定长度,或

逐渐消失,或在某处突然中断。这主要和泄漏瑞利波的传播特点有关。当声入射点沿声传播方向的反方向逐渐离开缺陷,使缺陷回波信号进入门的前沿,这时即开始产生缺陷图像,随着距离的增大,缺陷信号幅度逐渐衰减,信号在门内的位置逐渐后移。小缺陷可能在门宽范围内已衰减至消失,形成近似三角形的图像(见图6、7)。因此,从图像的特征亦可判断是否泄漏瑞利波产生的图像。

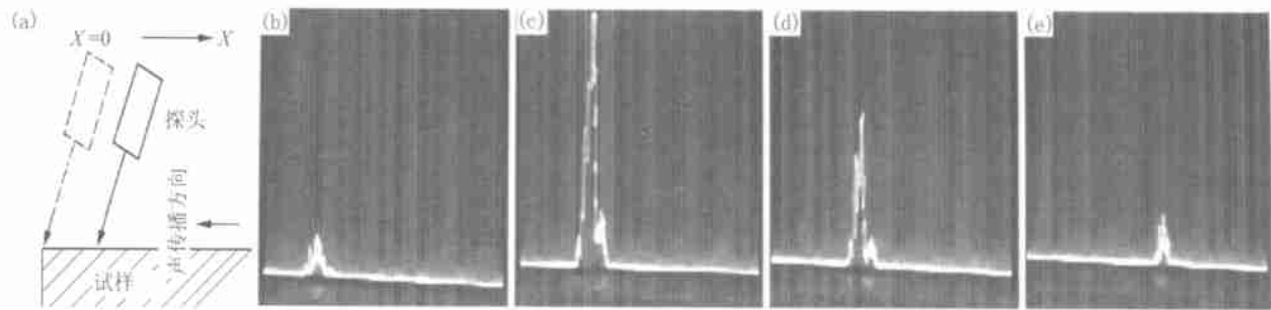


图9 泄漏瑞利波波形图

(a) schematic of transducer movement; (b) $X = -0.5\text{mm}$; (c) $X = 0\text{mm}$; (d) $X = 2.2\text{mm}$; (e) $X = 0.6\text{mm}$

Fig.9 Waveforms of leaky rayleigh wave testing

3.2 关于检测能力的分析

对于纵波垂直入射,如果入射波垂直于孔的底面,其反射幅度与孔底面面积有关;对于人工槽,如果槽底平面垂直入射声束,焦点直径不大时,槽宽决定反射幅度。对于泄漏瑞利波,人工孔或人工槽的侧面起反射作用,具体来说,对于孔侧面,主要与孔径有关,对于人工槽,则与槽深有关,与槽宽关系不大。

由上述试验结果得到的各检测方法在不同类型材料中可检出的人工缺陷最小尺寸见表2。可以看出,泄漏瑞利波法对表中的各种材料各种类型的人工缺陷均具有最好的检测灵敏度;纵波垂直入射表面聚焦(打孔面入射)比底面聚焦(打孔面的相对面入射)检测效果好。在层状结构陶瓷基复合材料中可检出直径

115 μm 的人工孔。

4 结论

泄漏瑞利波法,对层状结构陶瓷基复合材料和陶瓷材料中孔型及槽型人工缺陷均具有更好的检测灵敏度,在层状结构陶瓷基复合材料中可检出直径115 μm 的人工孔;在陶瓷材料中,可检出直径为53 μm 的人工孔和宽度为43 μm 的人工槽。

参考文献

[1] P Jagnoux and A Vincent, Ultrasonic Imaging by Leaky Rayleigh Waves [J] . NDT International, 1989, 12: 339- 346.
[2] Victorov L A. Rayleigh and Lamb Waves [M] .New York: Plenum Press, 1967.
[3] Brekhovskikh M. Waves in Layered Media[M]. New York: Academic Press, 1973.
[4] P Lemaitre, et al. Non-Destructive Ultrasonic Characterization of Cracks in Reaction bonded Silicon Nitride (RBSN) [C] . European Ceramic Society, Second conference, Augsburg , 1991, 9: 11- 14.

收稿日期: 2002-06-25; 修订日期: 2002-10-20
作者简介: 梁菁 (1965-), 女, 高级工程师, 联系地址: 北京 81 信箱 6 分箱 (100095)。

表2 各检测方法可检出的人工缺陷最小尺寸 (μm)

Table 2 minimum size of the artificial flaws detected by the two methods (μm)

材料	纵波垂直入射 表面聚焦		纵波垂直入射 底面聚焦		泄漏瑞利波法	
	人工孔	人工槽	人工孔	人工槽	人工孔	人工槽
层状复合材料	219	-	-	-	115	-
SiC 陶瓷	159	-	309	-	159	-
Si ₃ N ₄	145	43	-	51	53	43