

利用泄漏瑞利波成像检测陶瓷表面缺陷

Leaky Rayleigh Wave Imaging for the Inspection of Surface Flaws on Ceramics

北京航空材料研究院 史亦韦

Shi Yiwei (Institute of Aeronautical Materials, Beijing)

[摘要] 介绍了利用泄漏瑞利波成像检测陶瓷表面缺陷的方法,并通过实例讨论了采用高频聚焦探头激励泄漏瑞利波的特性以及泄漏瑞利波成像的规律。

关键词: 超声检测 陶瓷 表面缺陷 泄漏瑞利波

[Abstract] The method of leaky Rayleigh wave surface flaw imaging on ceramics using conventional high frequency ultrasonic C-scan system is described. Some testing examples are presented. The characteristics of leaky Rayleigh wave imaging with high frequency focusing transducer are discussed.

Keywords: ultrasonic testing ceramics surface defect leaky Rayleigh wave

1 前言

陶瓷等脆性材料表面与近表面的微小缺陷具有极大的危害性。因此,对其进行有效的检测在陶瓷材料应用中非常重要。长久以来,沿物体表面传播的超声瑞利波已被人们用来进行表面缺陷的检测。由于陶瓷材料所需检出的缺陷尺寸只有微米级,高频超声瑞利波及其成像技术近年也得到了广泛的研究与发展,如在超声显微镜技术中,利用表面直接反射声波与聚焦探头在表面所产生的泄漏瑞利波干涉,获得表面缺陷的图象^[1]。但这种方法受表面的微小不平整度影响很大,有时容易误判。R. S. Gilmore 等^[2]提出一种在超声显微镜中将泄漏瑞利波与直接反射声波相分离的技术,直接利用泄漏瑞利波进行成像,达到了较好的效果,但需要特殊的仪器和探头。

近年来,为了能对陶瓷零件表面进行较快速的检验,一些研究人员开始尝试利用常规高频超声 C 扫描装置进行泄漏瑞利波的表面缺陷成像。P. Jagnoux 和 A. Vincent^[3]的研究表明,采用 50MHz 聚焦探头进行泄漏瑞利波成像,可检出尺寸为 20 μm 左右的表面开口或不开口缺陷。由于瑞利波在表面沿一定方向传播,波的激励方式、传播方式、与缺陷的相互作用以及成像时信号的选取等,均与普通垂直入射超声 C 扫描有所不同。

本文通过几个典型试样的泄漏瑞利波成像实验,分析采用高频聚焦探头进行泄漏瑞利波成像的特点及其

影响因素。

2 泄漏瑞利波成象的原理和特征

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^[3~5],当一束纵波在液体中以瑞利入射角 θ_R ($\theta_R = \arcsin [C_w/C_R]$, 式中 C_w 为液体中的声速, C_R 为固体试样中瑞利波的速度) 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。

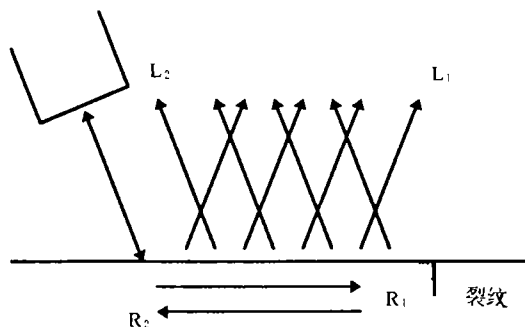


图 1 泄漏瑞利波示意图

在进行高频超声泄漏瑞利波成像时,通常都采用聚焦探头以提高分辨率与信噪比。在 H. A. Lindner^[6]以及本文作者^[7]的研究中发现,聚焦探头激励泄漏瑞利波有如下特点:

(1) 探头倾斜角在大于理论上的瑞利入射角 $2\sim 3^\circ$ 时,产生的泄漏瑞利波灵敏度最高;

(2) 激励泄漏瑞利波的入射角有较大的范围。例如:80MHz 频率、焦距 25mm 的探头,在 Si_3N_4 表面激励瑞利波的倾斜角范围为 $12\sim 19^\circ$ (理论值 θ_R 为 14.5°)。

2.2 缺陷回波信号的获得

瑞利波在试样表面传播过程中遇到声阻抗发生变化的一微小界面时,在此界面处产生一与原传播方向相反传播的反射波(图 1 中 R_2),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。图 2 为典型的泄漏瑞利波检测的 A 扫描波形,发射脉冲经过一定的水程距离(时间 t_1),由于试样表面粗糙度不同,探头可接收到自该试样表面直接散射的界面散射波。当探头扫查至一表面缺陷近旁时,在界面散射波之后便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。

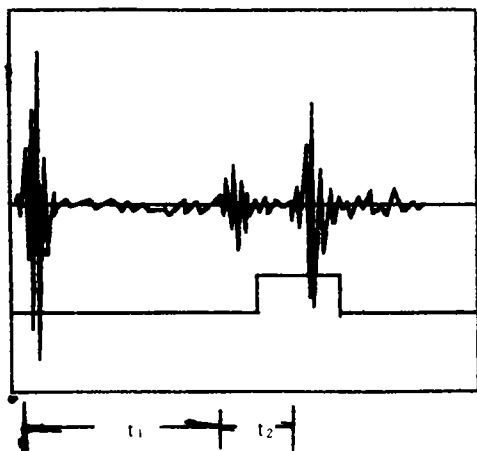


图 2 泄漏瑞利波波形示意图

关于瑞利波回波幅度与缺陷的关系尚无确定的理论结果,但一些研究证明,反射信号幅度与缺陷在垂直于波传播方向上的面积是相关的^[8]。

3 实验装置

采用德国 Fraunhofer 无损检测研究所的高频超声

检测系统进行检测实验。该系统可发射上升时间为 $3\sim 10\text{ns}$ 的宽带激励脉冲,接收放大器频率范围在 $1.5\sim 150\text{MHz}$ 之间。由计算机控制的 XYZ 扫描器可进行 X 方向最小步长为 $7.5\mu\text{m}$ 、Y 方向最小步长 $10\mu\text{m}$ 的扫查。接收信号通过门电路与峰值探测器送入计算机进行 C 扫描成像。另配有一转动系统,可使圆柱体绕其轴线转动。探头夹持装置可使探头在 $0\sim 45^\circ$ 范围内倾斜。所用 PVDF 探头频率为 80MHz,水中焦距 25mm,换能器直径为 $\phi 3\text{mm}$ 。

4 检测实验

4.1 Al_2O_3 试样上人工模拟大裂纹的检测

将一 $\phi 55\text{mm}$ 的 Al_2O_3 圆片碎裂为数片并还原拼贴成圆形后。在部分碎片上找出未断开的裂纹。将探头角度调节至约为 14° 入射角进行 C 扫描成像。考虑到瑞利波是在表面内沿一定方向传播而且只对缺陷延伸方向垂直于传播方向的缺陷敏感,因此检测时进行两次扫查,二次扫查的相对方向呈 90° 度角。

图 3a、b 分别为两次扫查的结果,瑞利波传播方向指向图的上方。图中 c_1, c_2, c_3 为三条未断开的裂纹,其余为碎片间的拼缝。图 3 的结果说明,对开口宽的裂纹(拼缝),从两个相互垂直的方向上均可获得较强的反射。而开口较细的裂纹,则对瑞利波传播方向比较敏感。垂直于传播方向的裂纹可获得较清晰的图象。

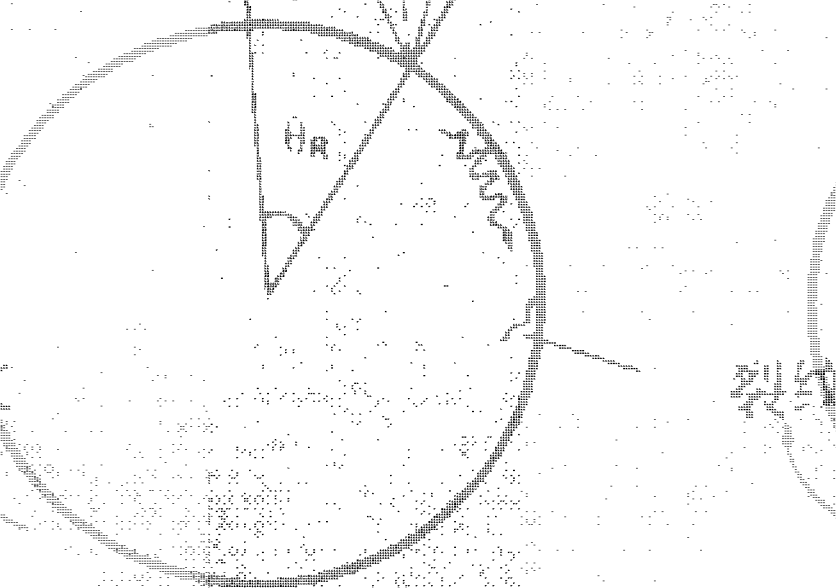
4.2 表面加工缺陷的检测

在边长约 60mm 的 SiC 方形试样上,采用不同磨削工艺参数加工出三条深 1mm、宽约 8mm 的平行条带槽。通过评估各条带的加工质量,可以协助确定最佳工艺参数。加工方向与槽的长度方向平行,磨削裂纹应与槽的长度方向垂直。扫查时,将探头倾斜方向调至使泄漏瑞利波沿槽的长度方向传播,入射角约为 $14\sim 15^\circ$ 。

图 4a 是在整块试样上扫查的结果。可以看到,三条带中微裂纹的数量明显不同。图 4b 是在图 4a 中左边条带上局部更精细的扫描图,单个缺陷显示之外的大量微小的显示信号,可能是更小的微裂纹的图象,也可能是表面微结构产生的信号。该图示于封一,试验条件为,探头频率:80MHz;焦距:25mm; a) 扫描范围: $55\text{mm} \times 55\text{mm}$; b) 扫描范围: $10\text{mm} \times 10\text{mm}$ 。

4.3 圆柱面表面裂纹的检测

在 $\phi 7\text{mm}$ 陶瓷零件(Si_3N_4)圆柱面的一端有一长约 4mm 的表面裂纹。为产生沿周向传播的泄漏瑞利波,将探头如图 5a 所示进行调整,使入射声束偏离圆柱轴线 X 距离,以使入射角等于 θ_R (约为 14.5°)。扫查时,使



(a)

(b)

检测示意图及检测结果 圆柱面
探头长度 0.1m 探头直径 0.1m 探头角度

5 讨论

5.1 泄漏瑞利波图象的特点

从以上各扫描图可以看到,泄漏瑞利波产生的缺陷图象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。这一方面和 C 扫描成像时门的设置有关,另一方面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象,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,相应的图象亮度逐渐减小。小缺陷可能在门宽范围内已衰减至消失,形成三角形的图象(见图 4)。幅度高的大缺陷则可能到门的后沿仍存在,形成突然中断的图象,如图 3 中部的大裂纹。因此,从图象的特征亦可判断是否由泄漏瑞利波所产生。

5.2 泄漏瑞利波成像的适用条件

从瑞利入射角表达式很容易看出,激励泄漏瑞利波的前提条件是 $C_w < C_R$ 。以上实验中各试样均是致密度较高的陶瓷材料,特点是声速大,通常在 $10000 \sim 12000 \text{ m/s}$,水中瑞利入射角在 $13 \sim 15^\circ$ 之间,实现起来比较容易。对声速在 6000 m/s 左右的金属材料而言,瑞利入射角约在 30° 左右,尚可进行泄漏瑞利波的检测。而对某些声速为 3000 m/s 左右的复合材料,这种方法则不适用。

另外,虽然通常认为瑞利波沿弯曲表面亦可传播,但扫描需逐点进行,以确保探头相对于入射面的角度恒定。因此,与通常的 C 扫描一样,除非系统具有曲面跟踪的能力,否则仍无法进行曲面扫描。而 C 扫描对于小缺陷的检验是很有必要的,由于采用了高频聚焦探头,使得焦点附近可以集中较高的能量,同时也带来了焦点以外能量的迅速扩散,由上面的图中亦可看出,小缺陷反射回波的能量衰减极快。

5.3 成像的影响因素

门宽度的选取对成像有直接的影响,在图 3 和图 4 的 C 扫描图上方均可看到较宽的亮带,这是由于边缘强反射而产生的盲区,其宽度与门的宽度直接相关。减小门宽,可减小盲区,但门宽过小使得图象的特征不能充分显示出来,也会影响到对缺陷的判断。

水浸法检测中对水程距离的选择,一方面要考虑焦点位置对成像结果的影响,防止由于水程与焦距相差过大而影响图象的分辨。另一方面,考虑到高频超声在水中的衰减很大,水程应尽可能地小。

试样表面粗糙度对检测也有较大影响。试样表面粗

糙度较低时,直接的界面散射波很弱,往往不足以作为门触发信号实现门的界面跟踪。这时,对试样表面的平整度和试样与探头扫描平面的平行度要求较高。而试样表面粗糙时,由于界面直接散射波较宽,使门的前沿无法与入射点靠近,因而接收到的缺陷信号幅度较低。另外,粗糙表面也增大了声波的散射与衰减,使信噪比降低。

6 结论

利用高频超声泄漏瑞利波成像技术,可以有效地对陶瓷材料进行表面缺陷快速检测。根据泄漏瑞利波的特点,适当地选择检测参数,可使成像结果达到较好的效果。不利的因素是检测灵敏度受缺陷在表面内的取向影响较大,通常对同一个面至少在相互垂直的两个方向上进行扫描。另外,边缘的盲区也影响到缺陷的检出。利用该技术对缺陷进行定量评价的方法尚在研究之中。

作者感谢 U. Netzelmann 博士(Fraunhofer-Institute for Non-destructive Testing)对研究工作的指导。

参考文献

- 1 W. Arnold, U. Netzelmann, S. Pangraz. 'Characterization of surfaces by acoustical imaging techniques. ASM Handbook, Vol.18 Friction, lubrication and wear technology, ed. by S. D. Henry. ASM International Inc., Materials Park, OH, 1992, 406
- 2 R. S. Gilmore, et al., Acoustic Microscopy from 10 to 100 MHz for Industrial Applications. Phil. Trans. R. Soc. Lond., 1986, A320: 215
- 3 P. Jagnoux and A. Vincent. Ultrasonic Imaging by Leaky Rayleigh Waves. NDT International, Dec. 1989, 339
- 4 Victorov, L. A. Rayleigh and Lamb Waves. Plenum Press, New York, 1967
- 5 Brekhovskikh, M. Waves in Layered Media. Academic Press, New York, 1973
- 6 H. A. Lindner, et al. Betriebsorientierte zerstörungsfreie Prüfung von Bauteilen aus Hochleistungskeramik, Teil 1. Untersuchungen zur Ultraschall-Prüfung. cfi/Ber. DKG 69, 1992, 338
- 7 Y. Shi, U. Netzelmann. High Frequency Ultrasound Testing of small defects in Si_3N_4 Ceramics, 待发表
- 8 P. Lemaitre, et al. Non-Destructive Ultrasonic Characterization of Cracks in Reaction bonded Silicon Nitride (RBSN). European Ceramic Society, Second conference, 11 ~ 14, September, 1991, Augsburg