

双合金整体叶盘连接界面的超声检测实验研究

沙正骁^{1,2}, 梁菁^{1,3}, 韩波^{1,3}

(1. 中国航发北京航空材料研究院, 北京, 100095; 2. 航空材料检测与评价北京市重点实验室, 北京, 100095; 3. 中国航空发动机集团材料检测与评价重点实验室, 北京, 100095)

摘要: 扩散焊连接的双合金整体叶盘可能会在界面处产生缺陷, 采用超声检测是控制界面缺陷的最佳方案, 然而声阻抗差异和复杂的几何结构给超声检测的准确性和可靠性带来极大困难。本文提出一种利用90°声反射镜将超声波信号入射到盘件内孔孔壁的检测方法, 实现了双合金整体叶盘连接界面的检测。在灵敏度、信噪比等方面实验研究了该方法对于双合金整体叶盘界面的检测能力。结果表明, 本文方法的检测灵敏度可以达到 $\Phi 2.0$ mm平底孔当量, 在实际盘件的检测中超声检测结果与金相分析结果吻合较好, 验证了本方法的可靠性。

关键词: 双合金整体叶盘; 扩散焊; 超声检测

中图分类号: TG115.28; TG441.7 **文献标志码:** A

Experiment on Ultrasonic Evaluation of Bonding Interface of Dual-alloy Blisk

SHA Zhengxiao^{1,2}, LIANG Jing^{1,3}, HAN Bo^{1,3}

(1. AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing, 100095, China; 2. Beijing Key Laboratory of Aeronautical Materials Testing and Evaluation, Beijing, 100095, China; 3. Key Laboratory of Science and Technology on Aeronautical Materials Testing and Evaluation, Aero Engine Corporation of China, Beijing, 100095, China)

Abstract: Defects may sometimes develop within the interface of a diffusion bonded dual-alloy blisk and the ultrasonic evaluation is the best method of controlling the interface defects. However, the acoustic impedance difference and complex geometry bring great difficulty to the accuracy and reliability of ultrasonic evaluation. An evaluation method is proposed in this paper, in which the ultrasonic signal is introduced into the inner hole wall of the blisk with a 90° acoustic mirror, realizing the ultrasonic evaluation of bonding interface of dual-alloy blisk. Experiments are conducted to study the evaluation capability of the proposed method for bonding interface of dual-alloy blisk in terms of sensitivity and SNR, etc. Results show that the evaluation sensitivity of the proposed method can reach a flat-bottomed hole equivalent of $\Phi 2.0$ mm, and the ultrasonic evaluation results are in good agreement with those of metallographic analysis, verifying the reliability of the proposed method.

Key words: dual-alloy blisk; diffusion bonding; ultrasonic evaluation

引言

国内正在研制的新型发动机中采用了双合金整体叶盘结构, 其中叶片部位采用定向凝固或单晶合

金制造,而盘心部位采用粉末冶金或变形高温合金制造。由于叶、盘材料不同,因此成型后采用扩散连接或线性摩擦焊技术^[1-2]将两者可靠连接。

双合金整体涡轮叶盘在具备一定先进性的同时,也存在很大的制备难度。在制造过程中,如果双合金界面洁净度、过盈度、粗糙度、装配方式以及热等静压工艺参数控制不当,均有可能在界面处形成夹杂物和未完全复合连接形成的不良连接区等界面缺陷,这些缺陷^[3]会促进疲劳裂纹的萌生并加速疲劳裂纹的扩展,成为双合金整体叶盘应用的主要障碍。因此,为了保证双合金整体叶盘的使用寿命和安全可靠性,在不断优化工艺避免缺陷产生的同时,也需建立相应的无损检测方法^[4-6]对结合面质量进行有效检测和准确评价。

由于整体叶盘的连接界面主要为沿界面分布的面积型缺陷,因此超声检测^[7]是最佳的检测方案。双合金盘界面缺陷的检测难度主要来源于界面组织和盘件结构两个方面:一方面,盘心部位合金组织一般为粉末冶金的细晶组织,而叶环部位合金则为铸造组织,由于声阻抗存在差异,当超声波束入射到两种合金界面^[8]时可能产生较强的反射信号,影响缺陷信号的识别。此外,界面处的铸造合金的粗大晶粒^[9-10]也可能成为声波散射或反射源,产生类似缺陷的信号,干扰缺陷的检出。另一方面,整体叶盘的复杂结构使超声探头没有合适的摆放空间,造成有利方向的超声束很难入射到界面部位,由于厚度大和结合面垂直于表面的原因,射线检测也难以实施,因此双合金盘结合面的缺陷检测具有很大的技术难度。

本文实验方法研究了双合金整体叶盘的组织 and 几何形状对于超声检测的影响。首先在平面焊接试样上加工了平底孔用于模拟界面的缺陷,进而研究超声的界面反射。而后在实际的双合金盘基础上加工了模拟盘型试样,并在焊缝处加工了不同尺寸的人工缺陷。利用一个90°的声反射镜,将超声波垂直入射到双合金盘的内孔表面,并进入盘件内部。实验研究了该方法的信噪比和分辨力。该方法最终用于模拟盘试样和实际双合金整体叶盘的焊缝检测,并与金相分析结果对比以验证方法的可靠性。

1 实验准备

1.1 平面焊接试样

为了模拟双合金结合面处的界面性质,以及材料因素对超声检测过程的影响,首先制作平面双合金试样。制作过程是将盘心和叶环两种材料制成等直径的锭料,通过热等静压(Hot isostatic pressing, HIP)将两种材料首尾相接连接在一起,而后在铸造合金一侧加工平底孔至结合面处,试样的结构示意图如图1所示。这种平面试样排除了盘件的曲率等结构因素,单独模拟了双合金母材和结合面部位的材料因素,可以在一个简化的条件下研究检测的信噪比、衰减等参数的影响。

1.2 模拟盘试样

除了上述两种试样外,还在实际的双合金盘件上加工了模拟试样。制作方法是将连接后的双合金盘上的叶片和台阶加工掉,只留下连接好的盘芯和叶片环。从外圆周方向加工平底孔,使孔底位于结合面处,孔径分别为0.8、1.2、2.0和3.2 mm,如图2所示(单位为mm)。这一试样将用于实际检测能力的验证试验。

1.3 仪器设备及检测布置

所用的仪器为GE公司的USIP40,配合探头操纵和盘件夹持旋转装置实现内圆柱面C扫描成像。实验采用了不同频率的小晶片直径水浸纵波探头以及配套的90°声反射镜,探头具体参数见表1。

检测时将探头前端固定90°声反射镜,伸入双合金盘的内孔中。通过盘件自身的旋转实现扫查,通过探头的上下运动实现步进,两者组合实现二维的C扫描成像,如图3所示。

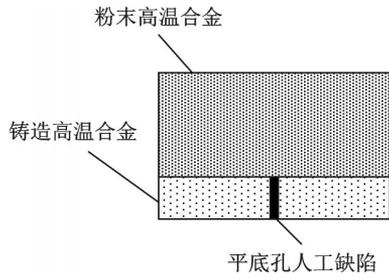
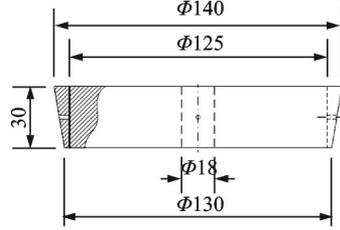


图1 平面双合金试样
Fig.1 Flat dual-alloy sample



(a) 结构图
(a) Illustration



(b) 实物图
(b) Object

图2 模拟试样

Fig.2 Mock-up sample

表1 探头参数

Table 1 Probe parameters

探头编号	频率 / MHz	晶片直径 / mm	焦距 / mm
1	25	6.3	平探头
2	15	6.3	76
3	10	6.3	51
4	5	6.3	25

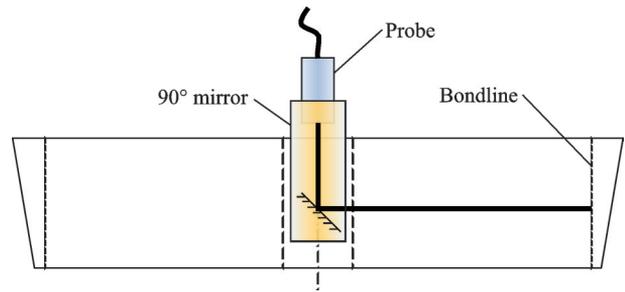


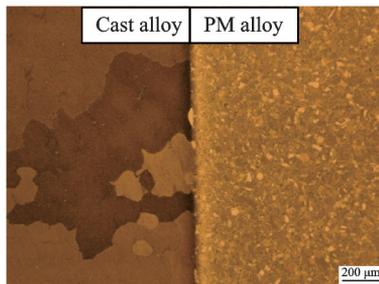
图3 利用90°声反射镜实现整体叶盘超声检测

Fig.3 Implementation of ultrasonic evaluation of a blisk using 90° acoustic mirror

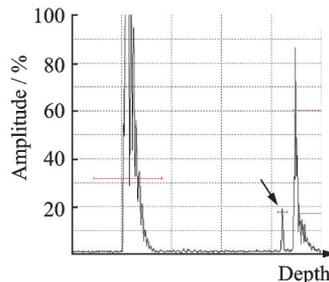
2 界面本底反射

为了掌握两种合金的材料特性和界面结合处的过渡情况,对平面的模拟双合金盘试样进行了解剖并观察了其金相组织,结果如图4(a)所示。从图4(a)可以看出,两侧的合金组织晶粒尺寸存在巨大差异,铸造组织晶粒粗大且分布不均匀(中间粗边缘细),晶粒可达1~2 mm;粉末端晶粒均匀细小,50~100 μm 。两侧材料的不均匀会产生一定的声阻抗差,使超声传播到界面处时存在本底反射信号,如图4(b)所示。

当采用低灵敏度检测时,它对检测效果的影响不大。而当灵敏度提高时,本底反射信号幅度会随之提高,当它的幅度达到80%或更高时,则会使C扫描图像上所需检测的缺陷信号被本底反射信号所掩盖,造成检测能力的不足。因此本底反射信号是影响检测能力、灵敏度和信噪比的主要因素。



(a) 显微观察图
(a) Metallography



(b) 超声本底反射
(b) Background reflection of the interface

图4 双合金组织显微观察图和超声本底反射

Fig.4 Metallography of the bonding interface and an example of background reflection

利用平面的双合金模拟试样研究了本底反射信号对超声C扫描检测效果的影响,结果如图5所示。在HIP连接的平面双合金试样上加工了不同直径的平底孔,孔底位于双合金界面处(图5(a)),模拟不同尺寸的缺陷。试验时采用水浸聚焦探头从粉末一侧对试样进行C扫描检测,获得如图5(b)所示的C扫描图像。从图中可以看出,不同尺寸的平底孔人工缺陷具有不同的颜色,这表示其回波信号幅度不同。此外,除平底孔外其他位置的信号也具有不同的幅度,这些就是由界面的本底反射引起的。

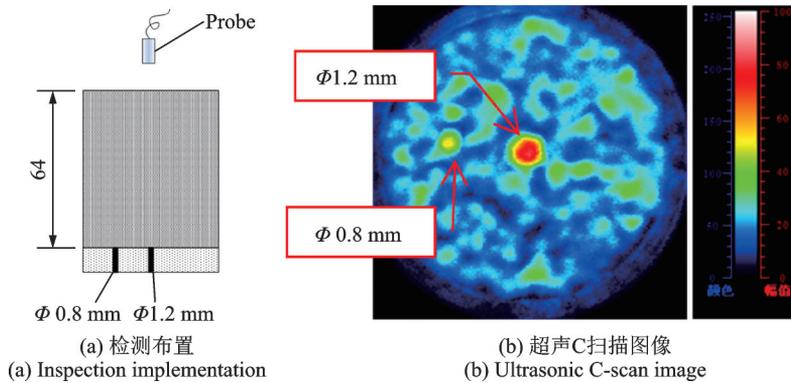


图5 平面试块的检测布置和2号探头的C扫描检测图像

Fig.5 The implementation and outcome of C-scan inspection on the flat surface sample using probe No.2

截取了当前灵敏度下,不同位置的超声波信号波形图,如图6所示。可以看出:界面的本底反射信号达到约40%时, $\Phi 1.2\text{ mm}$ 平底孔(Flat bottom hole, FBH)的回波幅度为85%,C扫描图像上孔和周围界面可以较好地分辨出来;而 $\Phi 0.8\text{ mm}$ 平底孔的回波幅度则只有55%,C扫描图中孔和周围界面连在一起不易分辨。

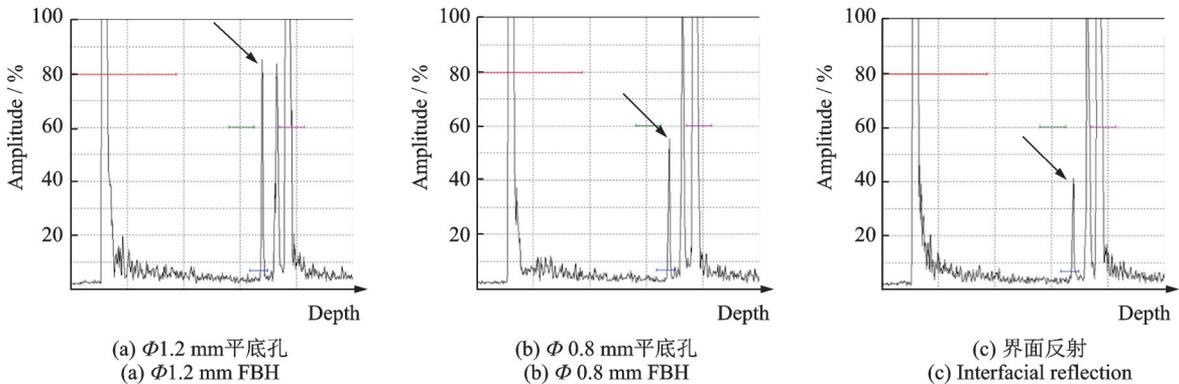


图6 不同位置的超声波信号波形图

Fig.6 Waveform of ultrasonic signals at different positions

采用信噪比评价超声检测的能力,在不同的检测条件和灵敏度下,信噪比情况如表2所示。可以看出,采用探头2检测效果最好,对于 $\Phi 0.8\text{ mm}$ 灵敏度,信噪比为2.5 dB;对于 $\Phi 1.2\text{ mm}$ 灵敏度,信噪比为6 dB。一般认为有效分辨出缺陷的信噪比至少需要3 dB,因此可以得出结论:在

表2 不同探头检测的幅度和信噪比

Table 2 Amplitude and SNR of different probes

探头 编号	幅度 / %			SNR / dB	
	$\Phi 0.8\text{ mm}$	$\Phi 1.2\text{ mm}$	界面	$\Phi 0.8\text{ mm}$	$\Phi 1.2\text{ mm}$
1	不可分辨	不可分辨	不可分辨	—	—
2	55	85	41	2.5	6
3	不可分辨	80	52	—	2.5
4	不可分辨	80	80	—	1

平面状态下,采用目前的检测手段可以有效检测出 $\Phi 0.8\text{ mm}$ 当量以上的缺陷。

3 曲面的影响

在超声波水浸检测时,零件的入射表面曲率会影响超声波在零件内部的声场分布。对于本项目中双合金盘件的结构,中心孔的直径只有 $\Phi 16\sim\Phi 18\text{ mm}$,如此小的孔径势必会使超声传播时具有不同于平面结构的传播特性,进而使检测时的灵敏度、声束尺寸和横向分辨力等都受到影响。

为了研究零件表面曲率对检测的影响,研究人员首先利用软件模拟了实际盘件检测时不同探头在材料中的声场分布情况。在进行声场模拟计算前首先利用软件对检测场景进行了描述,描述过程中实际的检测过程被简化成如图7所示。

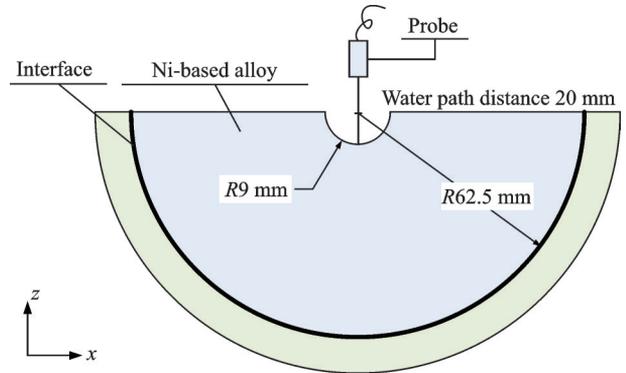


图7 双合金整体叶盘超声检测模拟

Fig.7 Ultrasonic evaluation simulation of dual-alloy blisk

具体的模拟实验配置为:材料为Ni基高温合金,声速和密度分别为 $6\ 000\text{ m/s}$ 和 8.3 g/cm^3 ,探头与被检材料之间采用水耦合,耦合距离为 20 mm 。入射面为盘件的内孔,孔直径为 18 mm 。焊缝面为直径 125 mm 的环形,与盘件内孔同心。所用的探头为表1中所列的1~4号探头。模拟结果如图8—11所示。

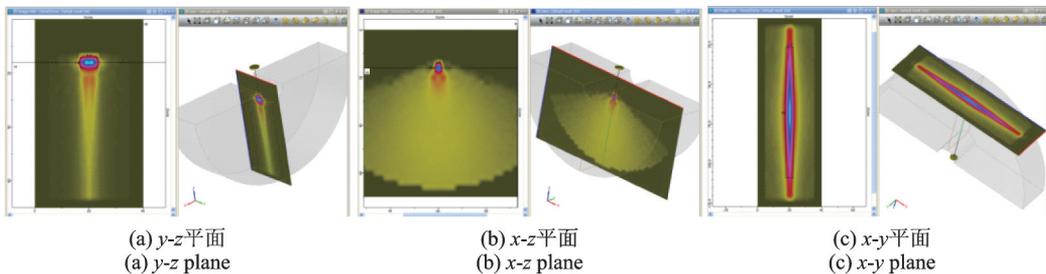


图8 1号探头的声场模拟

Fig.8 Sound field simulation of probe No.1

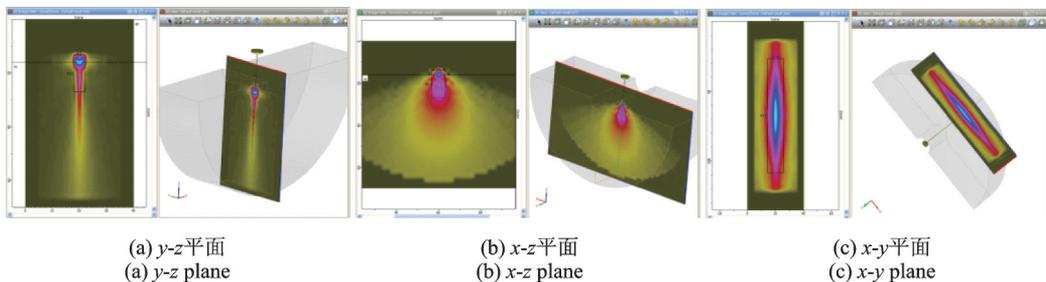


图9 2号探头的声场模拟

Fig.9 Sound field simulation of probe No.2

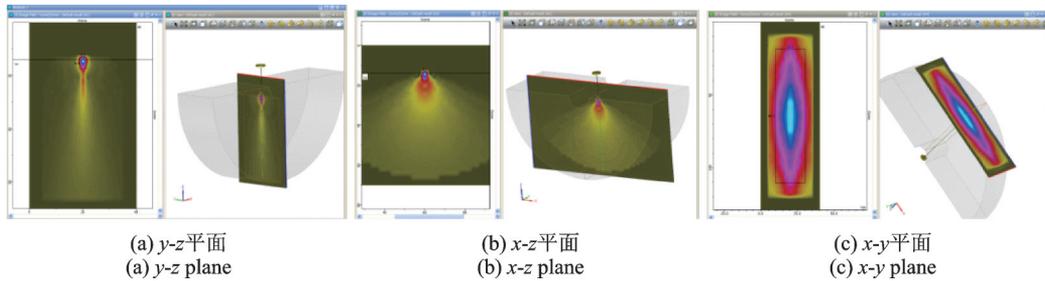


图10 3号探头的声场模拟

Fig.10 Sound field simulation of probe No.3

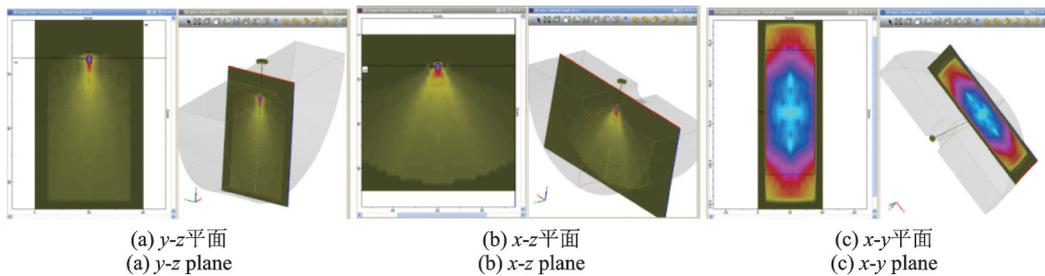


图11 4号探头的声场模拟

Fig.11 Sound field simulation of probe No.4

比较4个探头的声场模拟情况可以发现:同一探头相比, $x-z$ 平面(有曲率方向)的声场明显更加发散,能量分布在很大的扇形区域内; $y-z$ 平面(无曲率方向)则还保持了探头声场的正常形态,并未发生明显的变形;不同探头相比,2号探头(15 MHz)的声场在曲面的影响下保持了更好的指向性,更适合于检测。

4 实验验证

在实际的双合金试样上进行了纵波中心孔检测试验,以验证本方法的检测能力。试验采用15 MHz探头进行,试验结果如图12,13所示。需要说明的是,焊缝本身为环形分布的条带状结构,是三维结构。经超声检测后获得的是二维平面图,相当于焊缝本身铺平展开,而图中的颜色反映了反射信号的强弱,对应于相应的色标。

可以看出:现有检测条件下,双合金模拟试样上的 $\Phi 3.2$ mm和 $\Phi 2.0$ mm平底孔都能够有效发现,并达到6 dB以上的名义信噪比;而 $\Phi 1.2$ mm平底孔则较模糊,虽然能够勉强分辨出,但其名义信噪比只有不到3 dB,无法达到实际检测对信噪比的要求; $\Phi 0.8$ mm平底孔未发现。

综上,本研究用于检测双合金盘界面质量的超声纵波中心孔检测方法的检测能力能够实现 $\Phi 2.0$ mm平底孔当量缺陷的有效检测。

为了验证实际检测效果,对实际的双合金盘件进行了超声检测,并与解剖分析结果进行了对比。首先沿虚线位置将盘件试样纵向切开,将焊缝位置连同附近的被焊材料一并切下制作金相试样。如图13所示,试样中的位置1~5对应于不同的金相观测图。其中位置5为焊接完好区域,金相图中被焊材

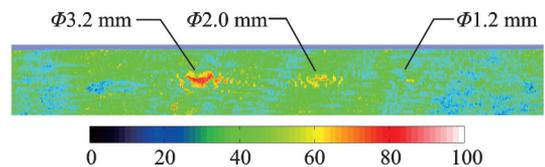


图12 模拟盘试样的C扫描图像

Fig.12 C-scan image of the mock-up sample

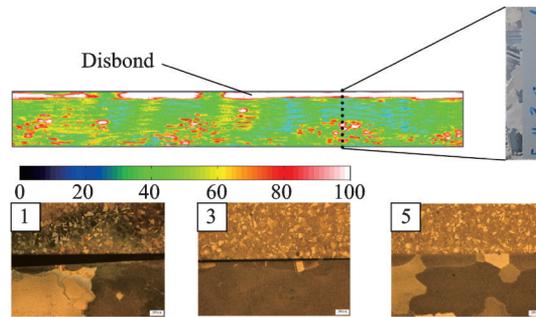


图13 双合金整体叶盘实际盘件的超声检测结果和对应的金相分析结果

Fig.13 Ultrasonic evaluation results of a real blisk and the corresponding metallography for dual-alloy blisk

料连接紧密无缝隙,在C扫描图中对应绿色位置;位置1为未焊合区域,界面中有较大的间隙,对应C扫描图中白色区域;位置3为部分焊合区域,界面中有间隙但间隙较小且有断续,对应C扫描图中红色区域。表明超声检测出的缺陷位置与解剖分析结果吻合。

5 结束语

本文提出一种利用90°声反射镜将超声波信号入射到盘件内孔孔壁的检测方法,经过实验研究可以得出如下结论:

(1) 本底反射信号是影响检测能力、灵敏度和信噪比的主要因素。

(2) 零件内孔曲面会使声束沿盘件的周向方向被拉伸,进而影响该方向的横向分辨率。

(3) 采用纵波中心孔检测方法时,在考虑了信噪比和曲面影响的情况下,2号探头效果最佳。

(4) 在模拟双合金盘试样上的验证试验表明,本方法可有效发现不小于 $\Phi 2.0$ mm平底孔当量的缺陷。

(5) 采用该方法在实际双合金盘件上检测,可以识别出焊合区、未焊合区和部分焊合区,与解剖后的金相分析结果表现出较好的一致性。

参考文献:

- [1] LOH N L, WU Y L, KHOR K A. Shear bond strength of nickel/alumina interfaces diffusion bonded by HIP[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1993, 37: 711-721.
- [2] ASHWORTH M, JACOBS M, DAVIES S. Basic mechanisms and interface reactions in HIP diffusion bonding[J]. Materials & Design, 2000, 21(4): 351-358.
- [3] LUAN Y, SUN T, FENG J, et al. Ultrasonic evaluation of TiAl and 40Cr diffusion bonding quality based on time-scale characteristics extraction[J]. Ndt & E International, 2011, 44(8): 789-796.
- [4] LEE B C, PALACZ M, KRAWCZUK M, et al. Wave propagation in a sensor/actuator diffusion bond model[J]. Journal of Sound and Vibration, 2004, 276(3/4/5): 671-687.
- [5] CHENG A, DEUTSCH W. Characterization of diffusion bonds of titanium plates using transmitted ultrasonic signals[J]. NDT & E International, 1998, 31(3): 175-182.
- [6] CHINN D J, THOMAS G. Signal analysis approach to ultrasonic evaluation of diffusion bond quality[C]//Proceedings of the Ninth International Symposium on Nondestructive Characterization of Materials. Sydney, Australia: American Institute of Physics, 1999: 536-542.
- [7] BAIK J M, THOMPSON R B. Ultrasonic scattering from imperfect interfaces: A quasi-static model[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 1984, 4(3/4): 177-196.
- [8] 卢超, 于润桥, 彭应秋. 焊接缺陷超声检测回波信号的双谱分析[J]. 数据采集与处理, 2003, 18(1): 57-61.

LU Chao, YU Runqiao, PENG Yingqiu. Bispectrum analysis on ultrasonic testing for echo signal of welding flaw[J]. *Journal of Data Acquisition and Processing*, 2003, 18(1): 57-61.

[9] MARGETAN F J, THOMPSON R B, GRAY T A. Interfacial spring model for ultrasonic interactions with imperfect interfaces: Theory of oblique incidence and application to diffusion-bonded butt joints[J]. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 1988, 7(3/4): 131-152.

[10] 马驰, 岳艳侠, 肖兴明. 超声波检测中的小波降噪[J]. *数据采集与处理*, 2006, 21(S1): 44-46.

MA Chi, YUE Yanxia, XIAO Xingming. Denoising with wavelet technology in ultrasonic testing[J]. *Journal of Data Acquisition and Processing*, 2006, 21(S1): 44-46.

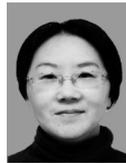
作者简介:



沙正骁(1985-),男,工程师,研究方向:金属及非金属材料无损检测,E-mail: shazhengxiao@163.com。



梁菁(1965-),女,研究员,研究方向:无损检测、超声检测, E-mail: ljing621@163.com。



韩波(1969-),女,高工,研究方向:超声无损检测、材料评价。

(编辑:王静)