文章编号:1004-2474(2017)01-0140-04

超声波脉冲在固-固界面传播的数值模拟分析

孙继华,赵 扬,马 健,南钢洋,刘 帅,巨 阳 (山东省科学院激光研究所/山东省无损检测工程技术研究中心,山东济南 250103)

摘 要:为了直观地显示超声波脉冲在固-固界面的传播规律,建立了两种玻璃组成的固-固界面有限元模型, 模拟了超声波脉冲在固-固界面的传播情况。通过不同时刻的波场快照图,清晰地显示出超声波脉冲在不同声学 参数的两种固-固界面的传播情况,模拟得到的结果与理论和实验结果相符。模拟结果表明,通过有限元模拟方法 正确的模拟了超声波脉冲在固-固界面中的传播过程,清晰地观察到了在界面上形成的复杂声场情况,模拟结果可 为超声无损检测技术在检测参数选择、缺陷特征提取等方面提供一定的参考。

关键词:固-固界面;超声波脉冲;有限元数值模拟;缝隙;波场快照

中图分类号:TN78;O426.2 文献标识码:A

Numerical Simulation of the Ultrasonic Pulse Wave Propagation at Solid-Solid Interface

SUN Jihua, ZHAO Yang, MA Jian, NAN Gangyang, LIU Shuai, JU Yang

(Laser Institute of Shandong Academy of Sciences/Center of Non-destructive Testing Engineering Technology Research in Shandong Province, Jinan 250103, China)

Abstract: In order to visually display the propagation of ultrasonic pulse wave along the solid-solid interface, a finite element model with two kinds of glass was developed to simulate the ultrasonic propagation at solid-solid interface. The snapshots clearly display the ultrasonic propagation along the solid-solid interface with two kinds of glass. The simulation results are in agreement with the theoretical and experimental results. The simulation showed that the finite element simulation method can properly display the propagation of ultrasonic pulse wave at the solid-solid interface, and can observe clearly the complex sound field formed at the interface, so it may offer some reference for ultrasonic nondestructive testing technology in selecting the best testing parameters and defects feature extraction.

Key words: solid-solid interface; ultrasonic pulse wave; finite element simulation; gaps; snapshots

0 引言

在实际应用的复合材料、粘接材料和层状结构 材料等组成的构件中,广泛存在着固-固界面结构, 而固-固界面由于粘结工艺不足、使用损坏等原因, 界面间易存在缝隙,严重影响材料的使用,所以为了 应用超声无损检测技术对固-固界面进行检测,有必 要了解固-固界面中超声波脉冲传播的情况。数值 模拟法可应用于复杂结构中超声波传播特性的研 究,并在某种程度上可验证理论计算和实验研究的 结果,是超声无损检测技术重要的验证手段。其中, 有限元模拟法的理论基础较成熟,具有通用性和灵 活性,在模拟声场方面具有独特的优点,可以正确模 拟固体中超声传播情况,是一种有效的数值模拟工 具^[1-3]。通过有限元模拟法可直观地显示超声波脉 冲在固体材料中的传播过程,并可作为超声无损检 测技术在选择检测参数,提取缺陷特征等方面的有 效参考手段。目前,有关应用有限元模拟法模拟超 声波脉冲在固-固界面传播情况未见有报道。

为了清晰地认识超声波脉冲在固-固界面的传播规律,验证已有的超声波脉冲在固体中传播理论和实验结果,本文从有限元数值模拟基本理论出发, 建立了有两种不同声学参数组成的固-固材料有限 元模型,模拟了超声波脉冲在固体材料中的传播情况。通过不同时刻的波场快照图,清晰显示了超声

收稿日期:2016-03-10

基金项目:山东省科学院杰出青年计划基金资助项目(201505);济南市高校院所自主创新基金资助项目(201401220、201401209);山东省 科学院青年基金资助项目(2015QN008)

作者简介:孙继华(1979-),男,山东泗水人,助研,硕士,主要从事材料的无损检测与评价方面的研究。

波脉冲在固-固界面的传播情况,模拟得到的结果与 理论和实验结果相符。

1 建立有限元模型

为了模拟固体材料中固-固界面的超声波脉冲 传播情况建立了有两种不同声学参数组成的有限元 模拟模型,模型的上、下半部分分别为两种声学参数 不同的玻璃材料,玻璃 I 的声速(纵波速度 $C_{P_1} =$ 4 260 m/s,横波速度 $C_{S_1} = 2560$ m/s)小于玻璃 II (纵波速度 $C_{P_2} = 5570$ m/s,横波速度 $C_{S_2} =$ 3 515 m/s)的声速。本文有限元模型根据固-固材 料的特点,采用边长为 0.1 mm 的四边形单元对 1 个长 30 mm、宽 60 mm 的方形区域进行剖分,建立 的有限元模型如图 1 所示。模型的左、右侧面采用 自由边界来模拟固体-空气界面,上、下表面采用吸 收边界来模拟无限大固体区域^[4]。



图 1 有限元模型

为了使模拟结果与实际超声检测时直径为 Ø10 mm压电超声探头产生的平面纵波声场一致, 本文在有限元模型左侧面中心 10 mm 区域内加载 高斯分布的应力边界条件以模拟发射超声波脉 冲^[5],发射的波形如图 2 所示。为了对透射信号进 行分析,在右侧面中心与发射源对应位置的 10 mm 区域设置了模拟接收源,用于接收透射超声波脉冲 信号并以 A 扫描形式显示。



2 有限元模拟结果及分析

2.1 超声波脉冲在无缝隙固-固界面的传播情况

图 1(a)中,无缝隙固-固界面模型左侧激发出超 声波脉冲,并向右传播。为了记录超声波脉冲在固-固界面的传播情况,对超声波脉冲传播到 2 µs、 4 µs、6 µs、10 µs 时刻的全波场 y 方向位移波场快 照,所得数据如图 3 所示。



图 3 不同时刻波场快照图

由图 3 可见,模拟激发的超声波脉冲从左侧向 右传播,在 2 μs 时已形成上、下两个不同声速的超 声波脉冲 P₁ 和 P₂,此时刻在固-固界面上 P₁ 和 P₂ 相连;由图 3(b)可看出,P₁、P₂ 分开,按照各自的速 度独立向前传播,此时观察到在界面上形成了较复 杂的声场;由图 3(c)可见,P₂ 由于速度快,已传播到 右侧面(底面),P₁ 因速度慢仍在材料中继续传播; 由图 3(d)可见,P₁ 和 P₂ 两组超声波脉冲分别传播 到右侧面后形成的反射波 P_{1R}和 P_{2R}的传播情况。

为了将理论和实验结果进行对比,对图 3(b)中的 波形进行了详细分析。按照模型尺寸,把图 3(b)中的 各个波形的波阵面简化成一条直线,如图 4 所示。



图 4 波形示意图 由图 4 可看出, P₁ 和 P₂ 在材料的传播过程中

产生了不同的头波, $H_{P_1S_2}$ 和 $H_{P_1S_1}$ 是 P_1 产生的头 波, $H_{P_2P_1}$ 、 $H_{P_2S_2}$ 和 $H_{P_2S_1}$ 是 P_2 产生的头波。经测算, $H_{P_1S_1}$ 与界面间的夹角 $\theta_1 = 36.51^\circ$, $H_{P_2S_2}$ 与界面间的 夹角 $\theta_2 = 38.87^\circ$ 。按照文献[6]中所述的理论计算, 头波与界面的夹角 θ 应等于头波所对应的临界角, 即满足 $\sin \theta_1 = C_{S_1} / C_{P_1}$,所以代入 C_{S_1} 和 C_{P_1} 的数 值可计算出 $\theta_1 = 36.94^\circ$,同样代入 C_{S_2} 和 C_{P_2} 的数值 可计算出 $\theta_2 = 39.13^\circ$,经对比可知,上述模拟结果与 理论和实验数据基本一致^[6-7],证明采用本文模拟方 法可与理论计算和实验进行相互验证。

2.2 超声波脉冲在有缝隙固-固界面的传播情况

超声波脉冲在有缝隙固-固界面传播时,由于超 声波传到缝隙前和无缝隙时的传播情况相同。为了 更好地显示超声波脉冲传播受缝隙的影响情况,对 传播到 3 µs、4.32 µs、6 µs、7 µs 时刻的全波场 y 方 向位移波场进行快照、分析,所得数据如图 5 所示。



图 5 有缝隙时不同时刻波场快照图

由图 5(a)可见,上、下两个不同声速的超声波 脉冲在传播过程中已遇到了缝隙, P_1 和 P_2 沿缝隙 向前传播, P_2 在玻璃 I 中形成的头波由于缝隙的隔 断,强度已减弱;由图 5(b)可见, P_1 在玻璃 II 中形成 的头波由于缝隙的隔断,强度已非常微弱,而此时 P_2 已传到了缝隙右端点并发生散射,形成散射波 P_2C_2 ,此刻还能观察到 P_1 和 P_2 在缝隙左端点产生 的散射波 P_1C_1 和 P_2C_1 ;由图 5(c)、(d)可见,缝隙 左、右端点产生的散射波 P_1C_2 和 P_2C_2 继续四周传 播, P_1 和 P_2 按照自己的速度传播及遇到右侧面后 反射情况等现象。

2.3 透射信号分析

为了进一步对模拟结果进行分析,我们分别在 有、无缝隙模型右侧面接收源处模拟接收到达的超 声波透射信号,对 y 方向位移以 A 扫描形式显示, 如图 6 所示。



图 6 透射波 A 扫描曲线

由图 6 可见,无论固-固界面有无缝隙,接收的 透射波 A 扫描曲线都不规则,符合波场快照图显示 的情况,即当超声波脉冲在固-固界面上传播时会产 生很多不同类型的超声波,这些不同类型的超声波 都会传到右侧面,造成接收的透射波信号不规则。 同时,固-固界面有、无缝隙时接收到的透射波 A 扫 描区别很大,这是由固-固界面上缝隙散射波造成 的,可通过透射波分析来识别固-固界面是否有缝隙 等缺陷。

图 6 中接收的透射波信号不管固-固界面有无 缝隙,模型中第一个到达右侧面的超声波信号都是 声速较快的玻璃 II 的纵波。将图 6 中最早传到的波 形时间 $t=5.3 \mu s$ 代入 $l=t \times C_{P_2}$ 中,可计算出模型 长度 l=29.5 mm,这数据与实际模型长度(30 mm) 误差仅为 1.6%,在合理范围内,进一步验证了本文 所建立的模型的正确性。

上述仅在时域内对接收的透射波 A 扫描曲线 进行了分析,而在频域内的超声信号中通常携带了 大量的结构信息,不同结构其时频特性不同^[8]。通 过对超声信号进行频谱分析可获得频域中的各种超 声特征,分别截取透射波 A 扫描曲线上包含超声透 射波的部分进行频谱分析,得到幅度谱如图 7 所示。



图 7 透射波幅度谱

由图 7 可看出,无论固-固界面有无缝隙,接收 到的透射波幅度谱都有多个极值。在低频部分,界 面有缝隙比无缝隙时多了几个极值,其他部分除了 幅度有差别,幅度谱基本一致,这也反映了固-固界 面的缝隙对不同超声频谱特性的影响。通过频谱分 析可为固-固界面的缺陷识别提供参考。

3 结束语

本文建立了不同声学参数材料玻璃组成的固-固界面有限元模型,模拟了超声波脉冲传播情况。 通过不同时刻的有、无缝隙超声波脉冲传播情况波 场快照图,可以直观地显示超声波脉冲在不同声学 参数的固-固界面传播情况,并清晰地观察到在界面 上形成了较复杂的声场情况,经分析可知模拟得到 的数据与理论和实验结果相符。

通过模拟接收的时域 A 扫描信号透射波到达 时间计算出的传播长度与模型长度一致,说明采用 有限元模拟法可有效模拟超声波在材料中的传播, 同时通过频谱分析得到了固-固界面中有、无缝隙时 对超声传播频谱特性的影响,为固-固界面的缺陷识 别提供了参考。 通过以上分析可知,采用有限元法模拟超声波 在固-固界面的传播可行,模拟结果可为理论和实验 研究提供参考。

参考文献:

- [1] 孙朝明. 超声横波检测的有限元模拟计算与分析[J]. 压电与声光,2014,36(6):1018-1021.
 SUN Chaoming. Calculation and analysis of ultrasonic transverse wave testing with angle probe by finite element method [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2014, 36(6):1018-1021.
- [2] FELICE M V, VELICHKO A, WILCOX P D, et al. Obtaining geometries of real cracks and using an efficient finite element method to simulate their ultrasonic array response [J]. Insight: Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 2014, 56(9):492-498.
- [3] 赵军辉,魏勤,袁媛,等. Lamb 波检测板中裂纹的有限 元模拟[J]. 压电与声光,2013,35(3):320-324.
 ZHAO Junhui, WEI Qin, YUAN Yuan, et al. Finite element simulation of crack damage of a metal sheet with Lamb waves[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2013,35(3):320-324.
- [4] 李树榜,李书光,刘学锋.裂纹超声散射的有限元模拟 [J].无损检测,2007,29(1):27-31.
- [5] 韩秀甫,滕永平,吴迪,等.超声换能器暂态声场的理论 分析与计算[J].安庆师范学院学报(自然科学版), 2004,10(3):25-28.
- [6] 应崇福,张守玉,沈建中. 超声在固体中的散射[M]. 北京:国防工业出版社,1994.
- [7] 诸国桢,孙耀,傅德永.用动态光弹法记录的超声脉冲 沿固——固界面的传播过程[J].应用声学,2004, 23(2):7-10.
- [8] 艾春安,蔡笑风,刘继方,等.短时傅里叶变换声-超声 检测信号缺陷识别[J].中国测试,2015,41(4):29-31.