

激光超声表面波在表面缺陷上的反射与透射

杨连杰¹, 李阳^{1,2*}, 孙俊杰^{1,2}, 邹云^{1,2}

¹郑州大学机械工程学院, 河南 郑州 450001;

²抗疲劳制造技术河南省工程实验室, 河南 郑州 450001

摘要 采用激光超声可视化技术研究了脉冲激光激励的表面波在不同深度缺陷上的反射和透射, 实验得到了表面波在缺陷处的可视化声场。研究表明, 随着缺陷深度的增大, 表面波的反射系数先增大后平缓变化, 透射系数先减小后平缓变化。研究结果为裂纹深度的激光超声表面波检测奠定了实验基础。

关键词 激光技术; 激光超声可视化; 表面波; 表面缺陷; 反射; 透射

中图分类号 TB551

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.041203

Reflection and Transmission of Laser Ultrasonic Waves on Surface Defects

Yang Lianjie¹, Li Yang^{1,2*}, Sun Junjie^{1,2}, Zou Yun^{1,2}

¹School of Mechanical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou, Henan 450001, China;

²Henan Provincial Engineering Laboratory for Anti-Fatigue Manufacturing Technology, Zhengzhou, Henan 450001, China

Abstract The laser ultrasonic visualization technology is used to study the reflection and transmission of pulsed laser excited surface waves on the defects with different depths. The visualized sound field of the surface wave at the defects is obtained experimentally. The research results show that as the defect depth increases, the reflection coefficient of surface wave first increases and then changes steadily, and however the transmission coefficient first decreases and then changes smoothly. These research results lay an experimental foundation for the quantitative detection of cracks by laser ultrasonic surface waves.

Key words laser technology; laser ultrasonic visualization; surface wave; surface defects; reflection; transmission

OCIS codes 120.2040; 110.7170; 100.2000

1 引言

表层裂纹一旦出现, 裂纹底部的集中应力将会使缺口处的疲劳强度降低并最终导致构件失效^[1]。因此, 表面缺陷的无损检测在工业生产中具有很重要的意义。而超声表面波因具有传播距离远、灵敏度高的优点, 在表面缺陷的无损检测应用中占有重要地位。传统的超声检测主要通过压电超声探头实现信号的激励和接收, 由于耦合因素的影响, 压电探头在复杂曲面、高温构件等领域的应用受到一定的

限制。激光超声检测采用脉冲激光作为激励源, 可以实现非接触激发, 能一次性激发纵波、横波、表面波等不同模式的超声波, 且各种声波都具有较宽的频带, 这使得激光超声在无损检测和材料评价领域的应用越来越广泛^[2-4], 并成为目前无损检测技术中的研究热点^[5-6]。

表面波也被称之为瑞利波, 具有衰减小、激发效率高和易于检测等优点, 可以快速实现对表面缺陷的检测和定位。1978年, Domarkas等^[7]根据激光表面波在缺陷附近的回波声场来判定缺陷的长度和

收稿日期: 2018-09-05; 修回日期: 2018-09-13; 录用日期: 2018-09-18

基金项目: 国家自然科学基金(51705470)、河南省重点研发与推广专项(182102210009)、河南省高等学校重点科研项目(18A460032)

* E-mail: yangli@zzu.edu.cn

深度,但是并未对透射声场进行说明。美国西北大学的 Kromine 等^[8]提出了利用移动激光源扫描(SLS)探测表面微小缺陷的新技术,并且成功在实验中对近场进行探测。Choi 等^[9]利用混合边界元法模拟了不同模态和频率的弹性波在经过不同形状的表面缺陷时所产生的散射声波场,为根据声波特征进行缺陷检测提供了丰富的数据储备,但未能通过实验反映出表面波在不同缺陷的表面上的传播特性。激光超声技术的发展使超声波声场传播过程的可视化成为了可能,李立兵等^[10]提出了超声波的激光可视化检测方法,可用于材料和结构件的快速无损检测。日本的 Yashiro 等^[11]展示了一种激光超声成像技术,对接收到的信号进行可视化成像处理,利用所得到的传播图像、最大振幅图等多种图像实现了缺陷可视化检测。睢晓乐等^[12]在理想理论模型中引入了包含残余应力的等效弹性常数,研究了残余应力对激光激发超声表面波检测二氧化硅体材料杨氏模量的影响。朱洪玲等^[13]利用二阶微分算子对降噪后的图像进行图像增强,提出阈函数的图像处理方法,改善了激光超声可视化质量,凸显了缺陷信息。

虽然表面缺陷的激光超声检测已有诸多研究,但这些研究大多侧重于有限元数值模拟,关于表面波在裂纹上传播特性的实验论证较少。本文利用激光超声可视化检测(LUVI)系统,研究了表面波不同深度裂纹上的传播特性,观察不同裂纹深度时的反射波声场和透射波声场,探讨了缺陷尺寸与表面波反射系数和透射系数的对应关系,为激光超声定量检测缺陷尺寸奠定了一定的实验基础。

2 实验装置及方法

2.1 实验装置

激光超声设备采用西安金波检测仪器有限责任公司研制的 LUVI-LL2 系统,实验装置如图 1 所示。为了得到更大的带宽信号,提高脉冲信号对深度变化的敏感性,激发光源选择 Wedge HB 系列的短脉冲调 Q 激光器,激光器波长为 1064 nm,单脉冲输出能量为 2 mJ,脉冲宽度为 2 ns。当脉冲激光由激发源激发并进入电动小镜后,会通过柱面镜聚焦,调节激光源焦距,使其焦点位于样品表面。通过调节电动小镜的偏转角度实现脉冲激光的扫描。超声波接收器采用 Quartet-FH 系列激光超声干涉仪,其参数为:波长 532 nm,检测频率 1~20 MHz,光斑直径 100~500 μm ,焦点距离 100 mm,激光能

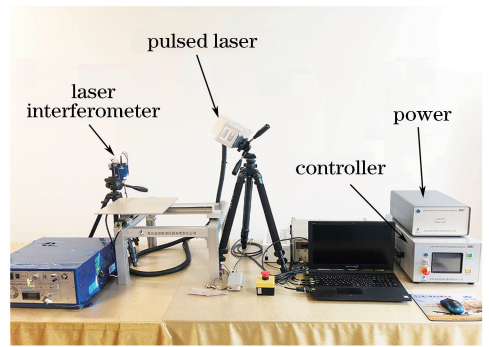


图 1 实验装置

Fig. 1 Experimental equipment

量 1 W。实验时,调节光纤头和样品表面的相对距离,使样品上光斑直径最小,并调节激光束垂直于样品表面。激光超声检测设备通过激励和接收超声波信号,根据声波互易性原理,实现超声波点源激励并可得表面波随时间传播的动态图像。

2.2 实验试样及方法

实验试样选用型号为 6061 的铝合金块,试样规格为 100 mm \times 50 mm \times 15 mm,在试样长度为 60 mm 处,线切割预制宽度为 0.2 mm 的裂纹,深度(D)经超景深三维显微镜测量分别为 485, 930, 1482, 1865, 2517, 3125, 4905, 7094 μm 。

实验时,调整激光接收点与缺陷的相对距离为 10 mm,设定激光扫描区域为 40 mm \times 40 mm,扫描间隔为 0.15 mm,并保证扫描范围覆盖预制人工裂纹和激光接收点,激光点源扫描缺陷样品三维检测过程如图 2(a)所示。固定激发点和接收点(点 M 和点 N)的相对距离,获得典型 A 扫信号,A 扫描二维检测如图 2(b)所示,其中 M 、 N 距缺陷边缘的距离均为 5 mm,激光接收点位于 N 点右边 5 mm 处。

3 实验结果与讨论

3.1 可视化图像

通过如图 2(a)所示的扫描方式,利用激光超声设备可得到表面波在不同缺陷深度试样上随时间传播的动态图像,这里选取缺陷深度为:485, 1482, 1865, 3125 μm ,第 6.08 μs 超声波在不同深度裂纹的可视化动态图像如图 3 所示。

图 3(a)中,能量最强的波动(acoustic)是激光照射在试样上产生的空气振动,在空气中传播后被激光干涉仪接收。由于波动在空气中传播,因此其传播速度较慢。R 表示脉冲激光在样品表面激励出的表面波;RR 表示由于表面波遇到缺陷后,经缺陷反射后形成的反射波;TR 表示表面波经缺陷后的

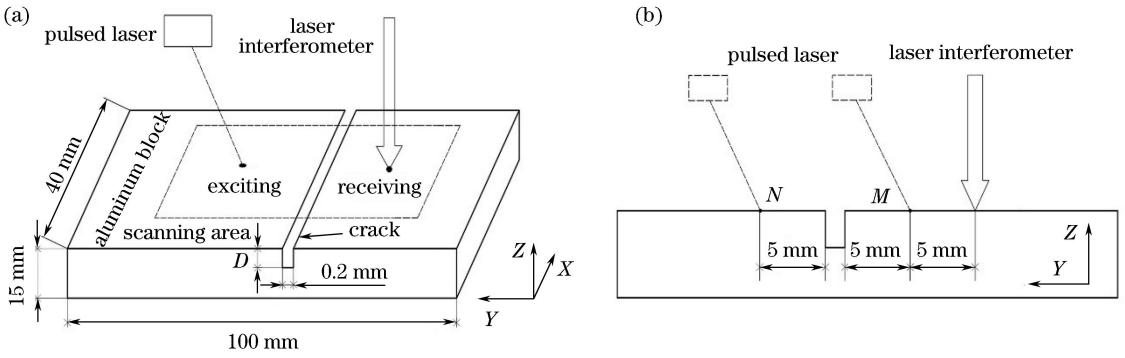


图 2 检测过程示意图。(a)激光点源扫描缺陷样品三维检测过程;(b) A 扫描二维检测

Fig. 2 Schematic of detection process. (a) Three-dimensional detection process of defect samples by laser point source scanning; (b) two-dimensional detection by A-scan

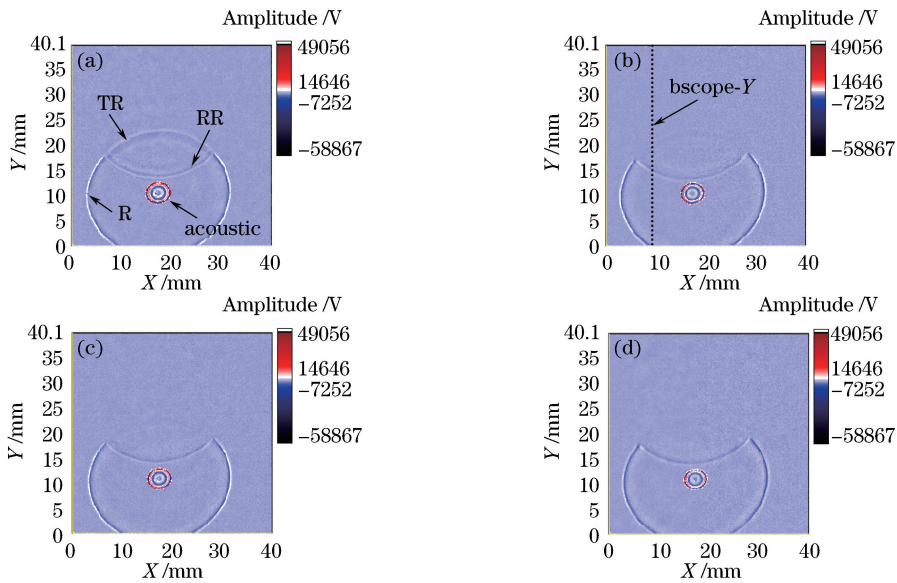


图 3 第 6.08 μs 超声波在不同深度裂纹的可视化动态图像。(a) 485 μm ; (b) 1482 μm ; (c) 1865 μm ; (d) 3125 μm

Fig. 3 Visualized dynamic images of ultrasonic wave at 6.08 μs in cracks with different depths.

(a) 485 μm ; (b) 1482 μm ; (c) 1865 μm ; (d) 3125 μm

透射波。伴随表面波的产生常会出现一些掠面纵波、表面横波^[14],但是其幅度都比较小,因此在超声波动态传播图中很难被观察到。比较图 3(a) (485 μm 深缺陷)和图 3(b) (1482 μm 深缺陷)可知,当表面波传播至缺陷时,随着缺陷深度的增加,反射表面波的能量越来越强,而透射表面波的能量越来越弱。比较图 3(c) (1865 μm 深缺陷)和图 3(d) (3125 μm 深缺陷)可知,当缺陷深度达到一定程度时,表面波反射和透射的能量不再随深度而变化,透射波几乎不可见。这是由于当缺陷深度大于表面波的传播深度时,表面波能量几乎全部被反射而无透射波。

3.2 典型 A 扫信号分析

提取 485 μm 深裂纹产生的位移-时间响应曲

线,得到信号分析结果如图 4 所示。图 4(a)为距离激发点 5 mm 处,也即 M 点(靠近激发源)接收到的反射波信号波形。从图中可以看出,激光源激发的声表面波包括掠面纵波(sP)、表面横波(sS)及表面波(R)3 种模式,这一结果与文献[14]所报道的仿真结果一致;声表面波经过缺陷反射后会在 M 点再次收到超声波,该信号在时间上滞后表面波 R 信号 3.45 μs ,行程为 10 mm,计算出该超声波速度为 2898.5 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,大致等于表面波速度,从而可证明该超声波为反射表面波。对表面波进行傅里叶变换得到其频谱图,如图 4(b)所示。由图 4(b)可知,脉冲激光激励出的表面波为一个宽频信号,中心频率为 3 MHz。根据 -6 dB 原理,信号的

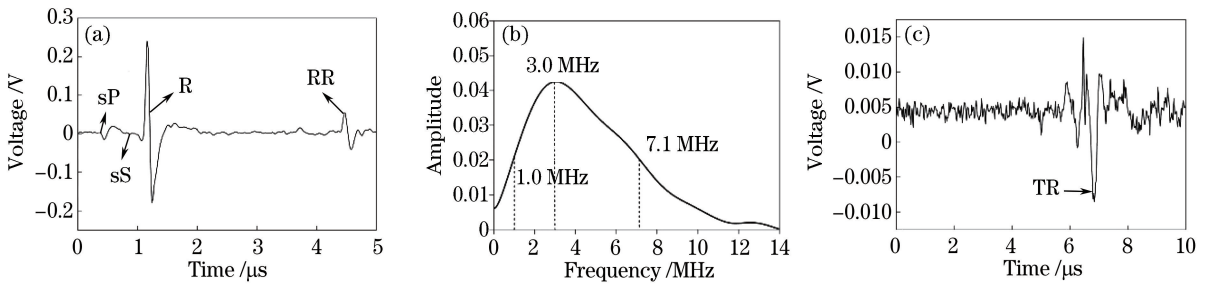


图4 信号分析结果。(a) M 点处接收到的反射波信号;(b)对应图4(a)的频谱图;(c) N 点的透射波信号
Fig. 4 Results of signal analysis. (a) Reflected wave signal received at point M ; (b) spectrogram corresponding to (a); (c) transmitted wave signal at point N

带宽为 $1\sim 7.1$ MHz,则表面波波长所对应的范围为 $2.9\sim 0.41$ mm,表明表面波的传播深度约为一个波长,即 $2.9\sim 0.41$ mm。 N 点的透射波信号如图4(c)所示,该图给出了距离激发源 15 mm处(远离激发源)提取到的经过缺陷后的波形,从图中可看出,表面波经过 $485\ \mu\text{m}$ 深的裂纹后,透射波 TR 信号幅值大幅度降低。

反射系数和透射系数可定义为:反射波或透射波的峰峰值除以入射波的峰峰值^[15]。因此,通过 M 点的 A 扫数据可得到表面波的反射系数;通过 N 点的 A 扫数据可得到表面波的透射系数。表面波的反射系数、透射系数随表面缺陷深度之间的关系如图5所示。

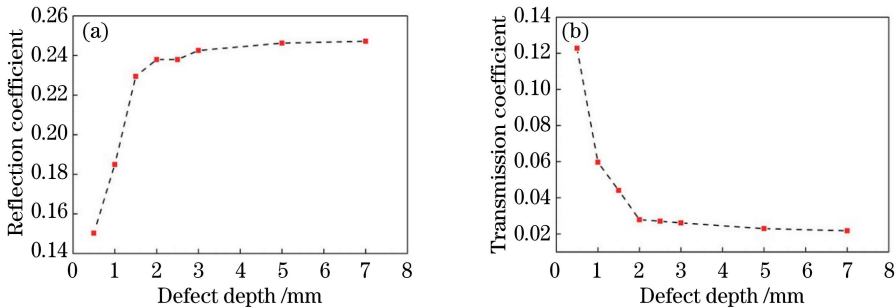


图5 表面波参数与缺陷深度之间的关系。(a)反射系数;(b)透射系数

Fig. 5 Relationship between surface wave coefficients and defect depth. (a) Reflection coefficient; (b) transmission coefficient

由图5(a)可见,当缺陷深度为 $0.5\sim 2$ mm时,表面波的反射系数随着表面缺陷深度的增大而单调递增,而当缺陷深度大于 2 mm时,随缺陷深度的增加,反射系数无固定的变化趋势。由图5(b)可见,当缺陷深度为 $0.5\sim 2$ mm时,表面波的透射系数会随着表面缺陷深度的增大而递减,而当缺陷的深度大于 2 mm时,透射系数会维持在一个极低的水平而不发生明显的变化,此时缺陷的深度已经超过中心频率表面波的传播深度,因此缺陷深度的进一步增大将不会对表面波的传播造成显著的影响。对于一定深度的裂纹,可以通过比较反射和透射系数与缺陷深度之间的关系达到在线监测的目的。

3.3 典型 B 扫信号分析

为了更清楚地看出表面波传播至裂纹的反射和透射特性,在 $X=10$ mm处[图3(b)的虚线]取 Y 方向上的 B 扫描图像。不同裂纹深度的 Y 方向的 B 扫描图像如图6所示。

由图6可知,点激励的表面波在 $X=10$ mm处的 Y 方向上接收到的波前呈双曲线分布,并在 $Y=19$ mm处的缺陷发生反射和透射,反射波和透射波呈对称分布。由于传播过程的能量损失,反射波和透射波能量相对于入射波能量较小,清晰度相对较低。从图6(a)、(b)可知,当缺陷深度小于 $1482\ \mu\text{m}$ 时,随着缺陷深度增大,反射波能量越来越强,透射波能量越来越弱。从图6(c)、(d)可知,当缺陷深度大于 $1865\ \mu\text{m}$ 时,随着缺陷深度增大,反射波和透射波能量没有明显的变化,这是由于缺陷深度已经超过了中心频率表面波的传播深度,大部分能量都被反射,透射波基本不存在,与可视化动态图像的结果相同。

4 结 论

通过激光超声可视化技术研究了表面波在裂纹上的反射和透射特性,实验结果表明,激光超声可视

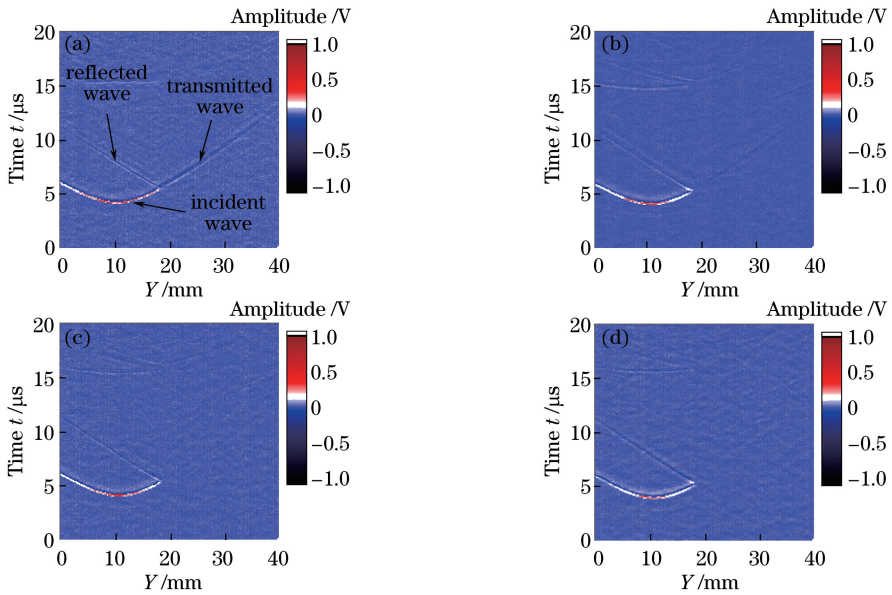


图6 在 $X=10$ mm 处,不同裂纹深度的 Y 方向的 B 扫描图像。(a) $485 \mu\text{m}$; (b) $1482 \mu\text{m}$; (c) $1865 \mu\text{m}$; (d) $3125 \mu\text{m}$

Fig. 6 B-scanning images of cracks with different depths in Y direction and at $X=10$ mm. (a) $485 \mu\text{m}$;
(b) $1482 \mu\text{m}$; (c) $1865 \mu\text{m}$; (d) $3125 \mu\text{m}$

化技术可动态显示表面波在裂纹上的传播过程,裂纹上的反射波和透射波关于裂纹呈对称分布;在一定的缺陷深度范围内,反射系数和透射系数与缺陷深度呈近似的线性关系;当缺陷深度大于表面波的传播深度时,反射系数和透射系数将不再变化。最后,根据建立的缺陷深度与反射和透射系数的关系,采用激光超声可视化设备实现了裂纹深度的无损测量。

参 考 文 献

- [1] Schijve J. Fatigue of structures and materials [M]. Dordrecht: Springer Netherlands, 2009.
- [2] Clorennec D, Royer D, Walaszek H. Nondestructive evaluation of cylindrical parts using laser ultrasonics [J]. Ultrasonics, 2002, 40(1/2/3/4/5/6/7/8): 783-789.
- [3] Bernstein J R, Spicer J B. Hybrid laser/broadband EMAT ultrasonic system for characterizing cracks in metals [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2002, 111(4): 1685-1691.
- [4] Arias I, Achenbach J D. A model for the ultrasonic detection of surface-breaking cracks by the scanning laser source technique [J]. Wave Motion, 2004, 39(1): 61-75.
- [5] Zhan Y, Liu C S, Kong X W, *et al.* Experiment and numerical simulation for laser ultrasonic measurement of residual stress [J]. Ultrasonics, 2017, 73: 271-276.
- [6] Manzo A J, Kenderian S, Helvajian H. Application of laser ultrasonic non-destructive evaluation technique to additive manufacturing [J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9738: 973810.
- [7] Domarkas V, Khuri-Yakub B T, Kino G S. Length and depth resonances of surface cracks and their use for crack size estimation [J]. Applied Physics Letters, 1978, 33(7): 557-559.
- [8] Kromine A K, Fomitchov P A, Krishnaswamy S, *et al.* Laser ultrasonic detection of surface breaking discontinuities: scanning laser source technique [J]. Materials Evaluation, 2000, 58(2): 173-177.
- [9] Cho Y, Rose J L. An elastodynamic hybrid boundary element study for elastic guided wave interactions with a surface breaking defect [J]. International Journal of Solids and Structures, 2000, 37(30): 4103-4124.
- [10] Li L B, Li L B, Hu H S, *et al.* Ultrasonic field laser visual inspection method [C] // China Western Acoustical Academic Exchange Conference, Dunhuang: [s. n.], 2013.
李立兵, 李立兵, 胡灏石, 等. 超声场的激光可视化检测方法 [C] // 中国西部声学学术交流会. 敦煌: [出版者不详], 2013.
- [11] Yashiro S, Takatsubo J, Miyauchi H, *et al.* A novel technique for visualizing ultrasonic waves in general solid media by pulsed laser scan [J]. NDT & E

- International, 2008, 41(2): 137-144.
- [12] Sui X L, Xiao X, Qi H Y, *et al.* Influence of residual stress on young modulus detection of SiO₂ bulk materials by laser-induced surface ultrasonic wave technique [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(12): 121202.
睢晓乐, 肖夏, 戚海洋, 等. 残余应力对激光激发超声表面波技术检测二氧化硅体材料杨氏模量的影响 [J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(12): 121202.
- [13] Zhu H L, Liu C, Zhang B, *et al.* Research on laser ultrasonic visual image processing [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(1): 0104004.
朱洪玲, 刘畅, 张博, 等. 激光超声可视化图像处理研究 [J]. 中国激光, 2018, 45(1): 0104004.
- [14] Guan J F, Shen Z H, Xu B Q, *et al.* Finite element analysis of laser-generated Rayleigh wave scattering by cracks in a plate [J]. Acta Photonica Sinica, 2005, 34(8): 1128-1132.
关建飞, 沈中华, 许伯强, 等. 激光激发声表面波在缺陷板材中散射过程的有限元分析 [J]. 光子学报, 2005, 34(8): 1128-1132.
- [15] Li Y, Cai G X, Dong R Q. The reflection and transmission of Lamb waves at overlap joints [J]. Acta Acustica, 2017, 42(4): 495-503.
李阳, 蔡桂喜, 董瑞琪. 兰姆波在搭接焊缝上的反射和透射 [J]. 声学学报, 2017, 42(4): 495-503.