

## 表面窄缺陷深度的光声检测方法

李海洋<sup>1</sup>, 智斌亮<sup>1</sup>, 潘强华<sup>2</sup>, 安志武<sup>3</sup>, 于瑞恩<sup>1\*</sup><sup>1</sup>中北大学先进制造技术山西省重点实验室, 山西 太原 030051;<sup>2</sup>中国特种设备检测研究院, 北京 100029;<sup>3</sup>中国科学院声学研究所, 北京 100190

**摘要** 为实现对表面缺陷深度的激光超声定量检测,建立了与缺陷宽度有关的深度测量理论。建立了含有宽度修正项的深度测量公式,并定义了缺陷尺寸比值概念,划分了窄缺陷、极窄缺陷与宽缺陷三种缺陷类型,以及在这三种不同类型下缺陷深度测量方法的适用性,并采用有限元仿真加以验证;搭建了激光超声检测实验平台,对铝合金表面缺陷样品进行了深度检测。结果表明:引入宽度修正项可实现对窄缺陷深度的定量检测,该方法的平均测量误差不足 5%,很好地实现了缺陷深度的精确测量。

**关键词** 测量; 激光超声; 表面微缺陷; 尖端波形转换; 定量测量

中图分类号 TN249; O426.9

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0212001

## Photoacoustic Detection Method for Depth of Surface Narrow Defects

Li Haiyang<sup>1</sup>, Zhi Binliang<sup>1</sup>, Pan Qianghua<sup>2</sup>, An Zhiwu<sup>3</sup>, Yu Ruien<sup>1\*</sup><sup>1</sup>Shanxi Provincial Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technology, North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China;<sup>2</sup>China Special Equipment Inspection & Research Institute, Beijing 100029, China;<sup>3</sup>Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

**Abstract** This paper develops a depth measurement theory related to defect width for the quantitative laser ultrasonic detection of surface defect depth. A depth measurement formula with a width correction item is established, and a concept of defect size ratio is defined. Defects are divided into three types, namely narrow defects, extremely narrow defects, and wide defects. The applicability of the defect depth measurement method in measuring the three types of defects is discussed, and finite element simulation is adopted for verification. Finally, an experimental platform for laser ultrasonic detection is built to conduct depth detection of aluminum alloy samples with surface defects. The results show that quantitative detection of narrow defect depth can be achieved by introducing the width correction item. The average measurement error is less than 5%, which means that accurate measurement of the defect depth has been achieved.

**Key words** measurement; laser ultrasound; surface micro-defect; tip waveform conversion; quantitative measurement

收稿日期: 2021-05-28; 修回日期: 2021-06-13; 录用日期: 2021-07-19

基金项目: 国家重大科研仪器研制项目(61927087)、国家自然科学基金(11874386, 51902294)、山西省高等学校科技创新项目(20190304)、中北大学先进制造技术山西省重点实验室开放课题研究基金(XJZZ202006)、中北大学生物医学成像与影像大数据山西省重点实验室开放基金(KF2020-04)

通信作者: \*yuruien@nuc.edu.cn

# 1 引言

表面微缺陷的滋生会导致结构力学性能劣化,表面微缺陷若未被及时检测,会进一步扩展成为更大的缺陷,对结构的安全使用造成十分严重的后果。因此,对表面微缺陷的定量检测对于实现结构完整性的检测与评价具有重要意义。

激光超声激励表面波在传播过程中与缺陷相互作用,并发生反射、透射与散射现象,大量的研究工作<sup>[1-7]</sup>表明由此产生的声信号携带了缺陷的几何信息,可用于对表面缺陷的定量检测,其中利用表面声波传播的时间特征实现表面缺陷深度的检测是非常常见的方法。何存富<sup>[8]</sup>利用反射波、表面波、表面波回波三者到达的时间间隔实现了对材料表面刀痕缺陷的检测。王敬时等<sup>[9]</sup>发现了缺陷宽度的增大对表面波透射能量有明显的衰减作用,这为表面微缺陷的定位和缺陷深度的定量检测提供了理论依据。Cooper 等<sup>[10-11]</sup>利用裂纹尖端处散射声信号传播的时间特征建立了表面缺陷的深度检测方法。Cooper 在实验部分中指出了测量精度不仅与缺陷深度有关,也与缺陷宽度有关,并为检测结果添加了宽度修正项,但没有给出相应的检测理论。此外,Jeong 在实验中对深度范围为 0.3~5 mm 的缺陷进行了测量,但并没有考虑缺陷宽度的影响,由此得到深度为 0.3 mm 与 1 mm 的测量误差相对于深度为 2~5 mm 的测量误差更大的结论。这是由于在缺陷深度检测时,缺陷宽度对缺陷深度测量造成的影响不可忽略,而相比大缺陷,较小的缺陷受到的影响更大,随之带来的测量误差也更大。基于时域特征的方法多数采用声波传播的声程实现缺陷深度的检测,这就需要声波沿着缺陷表面传播足够多的时间,

该方法多用于检测深度更大的缺陷,现有的关于此问题的理论研究并不完整。此外,可将激光超声表面波检测技术分为时域检测法<sup>[12-16]</sup>和频域检测<sup>[17]</sup>。关建飞等<sup>[18]</sup>研究了不同深度的表面微缺陷对声表面波信号时域特征的定量影响,采用声表面波信号中振荡成分的时间间隔定量检测材料表面的微缺陷深度。李海洋等<sup>[19-20]</sup>提出了基于透射法检测与估计表面缺陷深度的方法,完成了缺陷处 B-scan 信号的采集与成像,由透射系数与表面缺陷深度拟合曲线估计了 0.3 mm 深度的表面缺陷。

本文分析了激光超声表面波在矩形缺陷尖端的波形转换现象,基于声波传播的时间特征建立了受缺陷宽度影响的定量测量表面缺陷深度的方法。根据缺陷几何特征提出了缺陷尺寸比值概念,由此划分了窄缺陷、极窄缺陷与宽缺陷三种不同的缺陷类型,并给出了测量方法的适用性;利用 COMSOL Multiphysics 有限元仿真软件对矩形缺陷底部发生的波形转换进行了仿真,对提出的缺陷类型划分与深度测量理论进行了验证;搭建了激光超声实验平台,基于缺陷尖端波型转换现象,结合不同缺陷类型,实现了样品表面缺陷的深度检测与评估。本文研究成果为激光超声表面缺陷深度检测方法提供了理论分析和实验依据。

## 2 窄缺陷深度检测理论的分析与仿真

### 2.1 测量理论

本文使用热弹激发原理激励表面波,实现表面缺陷的定量检测。图 1 描述了一个深度为  $d$ 、宽度为  $w$  的矩形表面缺陷与激光超声表面波的相互作用以及激光超声表面波的反射、透射以及尖端散射声场,其中 RR 是反射表面波,TR 是透射声波,RS

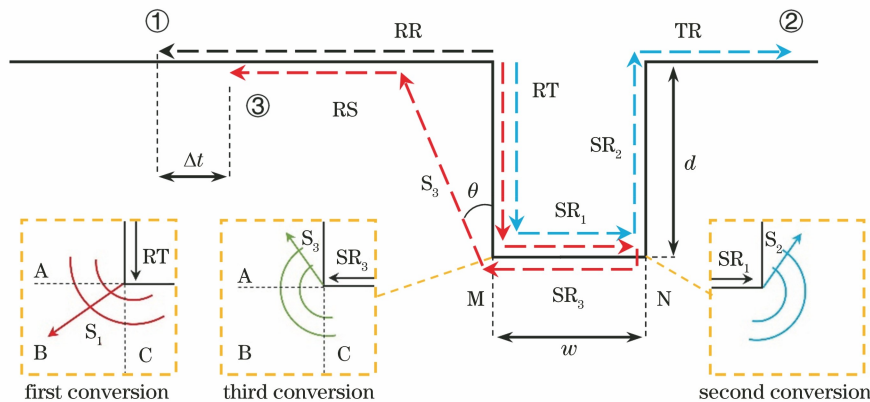


图 1 表面缺陷处尖端波形转换现象

Fig. 1 Waveform conversion phenomenon at tip of surface defect

是由缺陷尖端处发生散射后的横波信号  $S_3$  在材料表面形成的表面波。

为了更清楚地分析缺陷尖端处波形转换现象,将表面波传播过程分为三条线路。线路①表示表面波被缺陷反射形成反射声波 RR;线路②表示直达表面波经过矩形缺陷散射之后,所生成的表面波分量沿着矩形缺陷表面继续传播,依次在矩形缺陷的左侧表面、缺陷底部和缺陷右侧表面生成的表面波为 RT、 $SR_1$  和  $SR_2$ ,最终形成透射声波 TR;线路③表示表面波在缺陷底部第一次遇到 M 点发生了第一模态转换,在第一次遇到 N 点发生第二次模态转换,第二次遇到 M 点发生了第三次模态转换,依次生成表面波 RT、 $SR_1$ 、 $SR_3$ 、 $S_3$ ,最终在材料表面形成表面波 RS。线路①中的反射表面波 RR 是遇到缺陷左侧表面直接反射的表面波声信号,而线路③中的尖端散射表面波 RS 是表面波沿着缺陷表面传播并在底部尖端 M 和 N 点发生反射和散射产生的表面波声信号。那么接收线路①中的反射表面波 RR 和接收线路③中的尖端散射表面波 RS 之间必然存在一定的时间差,而该时间差与表面缺陷的深度和宽度都有关系,这为表面缺陷几何参数的定量检测提供了思路。本文正是利用了线路①和线路③中不同声信号的时间差实现了表面缺陷深度的测量。

下面对线路③中的三次模态转换过程进行分析。为了更清晰地表述缺陷尖端处的散射声场分布,沿着缺陷底部水平线和垂直线将缺陷尖端所处的区域分为 A、B 和 C 三个区域,如图 1 所示。线路③的第一次模态转换是沿着缺陷表面传播的表面波 RT 第一次遇到缺陷尖端左侧 M 点发生散射的过程。此时,被作用的 M 点相当于一个声源,这种声源与激光激发声源类似但又有所区别。相似的地方是: B、C 区域内部的声场与脉冲激光在材料内部激发的声场一样都生成了横波  $S_1$  与表面波  $SR_1$ ,且两者激励的声场指向性相似,文献[21]也说明了这一点。不同的地方是:在缺陷尖端散射过程中,沿着缺陷表面传播的表面声信号的大部分能量以与原来传播方向相同的横波信号向固体材料内部辐射。也就是说在第一次模态转换时, B、C 区域中声波能量大于 A 区域声波能量。同理,第三次模态转换时, A、B 区域声波能量大于 C 区。这一点对于确定散射声波 RS 是由第三次模态转换产生的横波信号  $S_3$  转化而成十分重要。该现象也在文献[21]中被分析过。该检测方法利用线路①中的反射表面波 RR 和接收线路③中第三次模态转换产生的表面波 RS 的

接收时间差实现表面缺陷的深度检测,因此其检测效果不仅与缺陷深度有关,也与缺陷宽度有关。此外,线路③中的模态转换发生了多次,但是后续的几次模态转换能量逐渐减弱,本文只采用前三次模态转换测量缺陷深度。根据缺陷尖端波形散射原理,结合反射回波中表面波 RR 与 RS 的声程时间差,利用三角函数可以建立缺陷深度  $d$  与时间延迟  $\Delta t$  的关系式:

$$d = \frac{\cos \theta \nu_r \nu_s \Delta t}{(\cos \theta - \sin \theta) \nu_s + \nu_r} - 2w, \quad (1)$$

式中:  $\nu_r$  和  $\nu_s$  分别是表面波和横波的波速;  $\theta$  是第三次模态转换时 M 点处声场中横波  $S_3$  的传播方向角,  $\theta = 30^\circ$ 。由于发生模态转换时被作用的 M 点相当于一个声源,且其声场的指向性与激光激发声场类似,所以两声场中横波的传播方向也保持一致。在激光激发声场中,横波的方向性是关于表面法向对称的,横波在法线两侧以双瓣的形式向外辐射,主瓣约在  $30^\circ$  时最大<sup>[22]</sup>。相似地,横波  $S_3$  的传播方向是关于 A、B 区域的交界对称的,其在 A、B 两区域内沿区域交界以双瓣的形式向两区域辐射,主瓣同样在  $30^\circ$  时最大,所以在这里  $\theta$  取  $30^\circ$ 。

由(1)式可见,本文基于缺陷尖端散射声波的时域特征对缺陷深度的检测效果与缺陷的宽度有关。文献[11]也是利用散射声信号实现缺陷深度的检测,但是并没有考虑  $2w$  这一影响因素。这就存在一个问题:采用尖端散射法实现表面缺陷深度的定量测量时,表面缺陷的宽度对深度定量检测会造成什么影响?为了更清晰地分析这个问题,根据  $2w/d$  的比值,即表面缺陷宽度与深度比值,定义了窄缺陷、极窄缺陷和宽缺陷的概念。在对这三种不同类型缺陷的深度进行检测时,(1)式的适用范围是不同的。当缺陷尺寸满足  $0.1 < 2w/d \leq 2$  时,将其定义为窄缺陷,对窄缺陷进行检测时,不可忽略缺陷宽度的影响,即(1)式中  $2w$  项不可忽略;当缺陷尺寸满足  $2w/d \leq 0.1$  时,缺陷尺寸超出窄缺陷范围下限,将其定义为极窄缺陷,对极窄缺陷进行检测时,可以忽略缺陷宽度的影响,即忽略(1)式中的  $2w$  项;当缺陷尺寸满足  $2w/d > 2$  时,缺陷尺寸超出窄缺陷范围上限,将其定义为宽缺陷,对宽缺陷进行检测时,缺陷宽度对缺陷深度测量造成的影响过大,无法准确使用声程差对表面缺陷深度进行定量检测,基于(1)式的检测方法不再适用。

## 2.2 有限元仿真模型建立与声场分析

采用有限元仿真软件 COMSOL Multiphysics



建立激光超声缺陷检测的二维模型。矩形模型尺寸为  $30\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ ，并采用铝合金作为仿真材料，缺陷尺寸为  $0.5\text{ mm} \times 0.5\text{ mm}$ 。在二维模型中，利用空间-时间函数模型对线光源进行描述，其中光源的半径是  $100\text{ }\mu\text{m}$ ，激光脉冲的上升时间是  $15\text{ ns}$ 。设置激光源坐标为  $(10\text{ mm}, 5\text{ mm})$ ，接收源坐标为  $(17\text{ mm}, 5\text{ mm})$ ，缺陷坐标为  $(20\text{ mm}, 5\text{ mm})$ 。为满

足有限元仿真的收敛性，仿真总时长为  $10\text{ }\mu\text{s}$ ，时间步长为  $10\text{ ns}$ 。网格划分采用自由三角形网格，缺陷及缺陷附近区域的网格大小为  $10\text{ }\mu\text{m}$ ，其余区域的网格大小为  $100\text{ }\mu\text{m}$ 。图 2(a)~(d) 分别是  $3.77, 3.95, 4.26, 4.51\text{ }\mu\text{s}$  4 个不同时刻下材料内部表面缺陷处的声场。(1) 式中所使用的表面波波速  $v_r$  与横波波速  $v_s$  分别取  $2.9400 \times 10^3\text{ m/s}$  与  $3.0900 \times 10^3\text{ m/s}$ 。

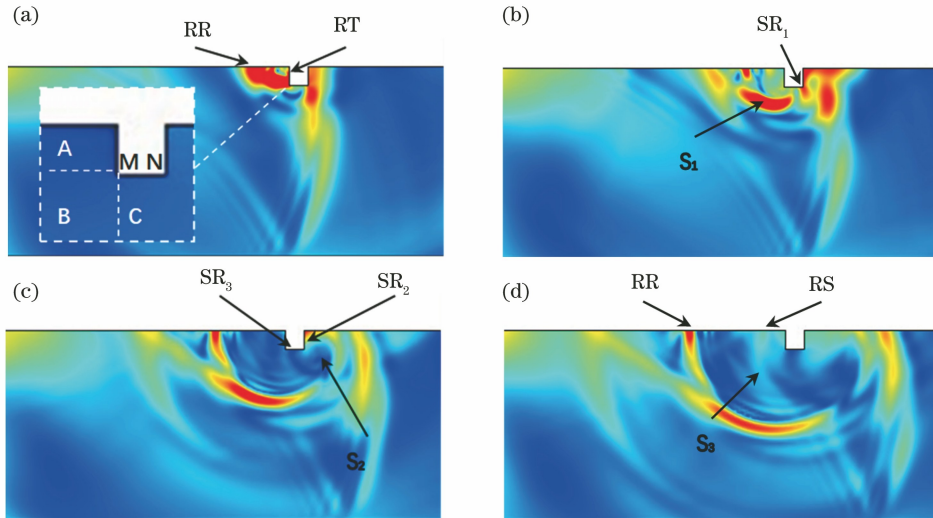


图 2 不同时刻的表面缺陷处超声场。(a)  $3.77\text{ }\mu\text{s}$ ;(b)  $3.95\text{ }\mu\text{s}$ ;(c)  $4.26\text{ }\mu\text{s}$ ;(d)  $4.51\text{ }\mu\text{s}$

Fig. 2 Ultrasonic field of surface defect at different moments. (a)  $3.77\text{ }\mu\text{s}$ ; (b)  $3.95\text{ }\mu\text{s}$ ; (c)  $4.26\text{ }\mu\text{s}$ ; (d)  $4.51\text{ }\mu\text{s}$

分析图 2(a) 可以发现，表面波 R 在传输过程中与缺陷发生相互作用，产生了表面波 RR 与 RT。反射生成的表面波 RR 沿材料表面传输，经过一段时间之后到达图 2(d) 中表面波 RR 所在位置，引起反射波中第一个较大的峰值，这部分波形的传播路径即为图 1 中的线路①。表面波 RT 沿缺陷侧壁继续向缺陷底部传输，并在 M 点发生了首次模态转换，产生了表面波分量  $SR_1$  与横波分量  $S_1$ ，如图 2(b) 所示。可以看到表面波  $SR_1$  沿着缺陷底部 M、N 所在平面向 N 点传输，横波  $S_1$  在材料内部传输。与第 2.1 节中有关散射波形能量的分析结果一致，横波  $S_1$  的绝大部分能量在 B、C 区域内部传输，只有极少能量通过 A 区域传输至缺陷表面。这说明了上述理论分析的正确性，同时也表明后续生成表面波分量 RS 的并不是表面波 RT，而是其他波。表面波  $SR_1$  在后续传输至 N 点时发生第二次模态转换[图 2(c)]，生成了反射表面波  $SR_3$ ，同时生成表面波  $SR_2$  与横波  $S_2$ ，这部分分量与表面波 RT、 $SR_1$  共同构成了图 1 中的线路②。表面波  $SR_3$  沿缺陷底部 M、N 所在平面反射，在传输至 M 点时发生第三次模态转换，生成了在材料内部传播的横波分量  $S_3$ ，如图 2(d) 所示。与前文第 2.1 节中的理论分析一

致，横波  $S_3$  的绝大部分能量继续沿表面波  $SR_3$  传播方向在 A、B 区域内部传输，在到达材料表面时转换为表面波 RS，作为反射波中第二个较大的峰值被检测到。M 点产生的声场与激光超声激发出的声场类似，所以横波  $S_3$  的传播方向角同样在  $30^\circ$  时最大。对比图 2(b) 与 (d)，可以看到表面波 RS 在此前的传播过程中一直未出现，直到横波  $S_3$  到达材料表面时，表面波 RS 才生成。所以可以证明，表面波 RS 的来源是横波  $S_3$ ，这两部分分量与表面波 RT、 $SR_1$ 、 $SR_3$  共同构成了图 1 中的线路③。

图 2 中的仿真结果是基于尺寸为  $0.5\text{ mm} \times 0.5\text{ mm}$  的缺陷所得到的，与之对应的缺陷尺寸满足  $2\omega/d=2$ ，该缺陷属于(1)式中定义的窄缺陷，因此可以采用缺陷深度测量理论实现缺陷深度的检测。仿真结果显示了缺陷处的波形产生与传播及模态转换过程，论证了第 2.1 节所提出的缺陷深度测量理论的正确性，这表明缺陷的深度可以通过表面波 RR 与 RS 到达时间的差值来分析与评估。为了进一步分析第 2.1 节中提出的测量理论的正确性，以及对窄缺陷、极窄缺陷和宽缺陷三种不同尺寸比值缺陷类型下测量理论及测算公式的适用性，设计实验对不同缺陷模型进行仿真研究。

### 2.3 窄缺陷仿真与结果分析

窄缺陷满足  $0.1 < 2w/d \leq 2$ , 设置 5 组不同窄缺陷进行仿真, 缺陷尺寸  $d \times w$  分别是  $0.2 \text{ mm} \times 0.1 \text{ mm}$ 、 $0.2 \text{ mm} \times 0.2 \text{ mm}$ 、 $0.3 \text{ mm} \times 0.2 \text{ mm}$ 、 $0.4 \text{ mm} \times 0.2 \text{ mm}$ 、 $0.5 \text{ mm} \times 0.2 \text{ mm}$ , 其中前 2 组数据的缺陷深度保持一致, 均为  $0.2 \text{ mm}$ , 后 3 组数据的缺陷宽度保持一致, 均为  $0.2 \text{ mm}$ , 缺陷尺寸逐步增大。这 5 组缺陷的  $2w/d$  分别是 1, 2, 1.33, 1, 0.8, 均属于窄缺陷。仿真模型其余参数与 2.2 节中模型保持一致, 采集到的表面缺陷处的时域波形如图 3 所示。

与 2.1 节理论分析及 2.2 节的仿真结果一致, 图 3 中的缺陷反射波形有两个较大的峰值, 二者按

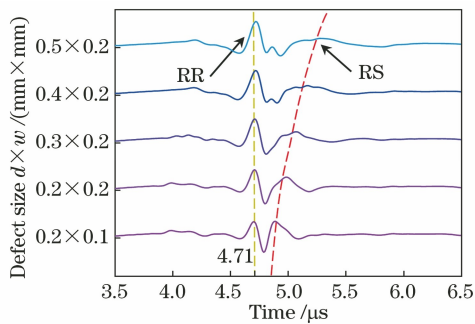


图 3 窄缺陷仿真波形

Fig. 3 Simulation waveforms of narrow defect

照时间上的先后顺序依次为表面波 RR 与 RS。对于表面波 RR, 在不同的缺陷尺寸下, 表面波 RR 的到达时间  $t_{RR}$  不变, 始终保持在  $4.71 \mu\text{s}$ 。在理论分析提出的线路①中, 表面波 RR 是由表面波 R 被缺陷直接反射产生的, 这个过程与缺陷深度及宽度均无关, 所以 5 组不同缺陷数据中的  $t_{RR}$  保持不变。从图 3 中可以看出表面波 RS 的到达时间  $t_{RS}$  有明显不同,  $t_{RS}$  的值随着缺陷尺寸的增加而逐渐增大, 两峰值之间的时间差  $\Delta t$  也随之逐渐增大。在前 2 组相同深度缺陷数据中,  $t_{RS}$  随着缺陷宽度的增加而逐渐增大, 从第 1 组数据中的  $4.91 \mu\text{s}$  增大到了第 2 组数据中的  $5.01 \mu\text{s}$ 。在后 3 组相同宽度缺陷数据中,  $t_{RS}$  随着缺陷深度的增加而逐渐增大, 从第 2 组数据中的  $5.01 \mu\text{s}$  增大到了第 5 组缺陷数据中的  $5.18 \mu\text{s}$ 。这种现象与理论分析保持一致, 表面波 RS 是在理论分析中所提出的线路③中产生的, 此线路的声程包含了缺陷深度  $d$  与缺陷宽度  $w$ , 缺陷尺寸的变化会引起线路③声程的变化, 进而影响表面波 RS 的产生及传播时间, 所以出现图 3 中所示的表面波 RS 到达时间随缺陷尺寸增大而逐渐延后的现象。在图 3 中提取反射回波两峰值 RR 与 RS 间的时间差  $\Delta t$ , 采用(1)式对仿真模型的表面缺陷深度进行估计, 得到的测量结果如表 1 所示。

表 1 窄缺陷仿真数据

Table 1 Simulation data of narrow defects

Defect size / (mm × mm)	0.2 × 0.1	0.2 × 0.2	0.3 × 0.2	0.4 × 0.2	0.5 × 0.2
$t_{RR} / \mu\text{s}$	4.71	4.71	4.71	4.71	4.71
$t_{RS} / \mu\text{s}$	4.91	5.01	5.08	5.12	5.18
$\Delta t / \mu\text{s}$	0.20	0.30	0.37	0.41	0.47
Measuring depth / mm	0.1865	0.1798	0.3150	0.3924	0.5083
Error / mm	-0.0135	-0.0202	0.0150	-0.0076	0.0083
Error rate / %	6.74	10.12	5.02	1.91	1.66

表 1 中数据与图 3 所显示的波形一致, 表面波 RR 的到达时间都为  $4.71 \mu\text{s}$ 。表面波 RS 的到达时间随缺陷尺寸的增加逐渐延后, 时间差  $\Delta t$  也随之增大。仿真中所设置的 5 组缺陷的  $2w/d$  分别是 1, 2, 1.33, 1, 0.8, 缺陷均属于窄缺陷, 可使用 2.1 节中的测量理论对缺陷深度进行估计。但由于此时的缺陷宽度相对深度不可忽略, 所以使用未忽略  $2w$  项的(1)式进行缺陷深度测量。从表 1 中可以看出, 根据(1)式测量出的表面缺陷深度贴近真实值, 测量误差最大不超过  $0.03 \text{ mm}$ , 测量效果好。测量的最大误差率为  $10.12\%$ , 最小误差率为  $1.66\%$ , 得到的缺陷深度测量值精确。

### 2.4 极窄缺陷仿真与结果分析

极窄缺陷所对应的缺陷尺寸满足  $2w/d < 0.1$ , 设置 5 组不同极窄缺陷进行仿真, 缺陷尺寸  $d \times w$  分别是  $1 \text{ mm} \times 0.05 \text{ mm}$ 、 $2 \text{ mm} \times 0.1 \text{ mm}$ 、 $3 \text{ mm} \times 0.1 \text{ mm}$ 、 $4 \text{ mm} \times 0.1 \text{ mm}$ 、 $5 \text{ mm} \times 0.1 \text{ mm}$ , 缺陷尺寸逐步增大。5 组缺陷的  $2w/d$  分别是 0.1, 0.1, 0.07, 0.05, 0.04, 缺陷均属于极窄缺陷。仿真模型其余参数与 2.2 节中模型保持一致, 采集到的表面缺陷处的时域波形如图 4 所示。

图 4 中的缺陷反射波形有两个较大的峰值, 这与 2.1 节理论分析一致, 按照时间上的先后顺序两个较大的峰值依次对应表面波 RR 与 RS。表面波

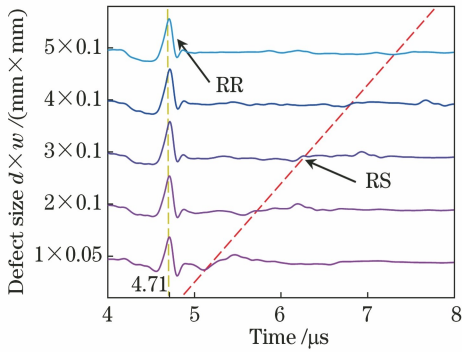


图 4 极窄缺陷仿真波形

Fig. 4 Simulation waveforms of extremely narrow defects  
RR 在不同的缺陷尺寸下的到达时间始终保持在  $4.71 \mu\text{s}$ , 这与 2.2 节中的结果保持一致。同样, 从图 4 中可以看出表面波 RS 的到达时间明显随着

缺陷尺寸的增加而逐渐延后, 从第 1 组数据中的  $5.27 \mu\text{s}$  延后到了第 5 组缺陷数据中的  $7.45 \mu\text{s}$ 。在极窄缺陷情况下, 缺陷宽度相对缺陷深度要小得多, 导致测量理论中线路③的声程受缺陷宽度影响小, 此时接收到的表面波 RS 到达时间中包含缺陷深度的信息准确, 可忽略缺陷宽度对其的影响。因此缺陷深度测算公式[(1)式]中的  $2w$  项可以忽略, 直接使用不经宽度修正的公式[(1)式]也能对缺陷深度进行精确测量。在图 4 中提取反射回波两个峰的时间差, 采用(1)式对仿真模型的表面缺陷深度进行估计, 得到的测量结果如表 2 所示。表 2 中 measuring depth 1、error 1、error rate 1 为忽略  $2w$  项的结果, measuring depth 2、error 2、error rate 2 为考虑  $2w$  项的结果。

表 2 极窄缺陷仿真数据

Table 2 Simulation data of extremely narrow defects

Defect size / (mm × mm)	1 × 0.05	2 × 0.1	3 × 0.1	4 × 0.1	5 × 0.1
$t_{RR} / \mu\text{s}$	4.71	4.71	4.71	4.71	4.71
$t_{RS} / \mu\text{s}$	5.27	5.74	6.28	6.86	7.45
$\Delta t / \mu\text{s}$	0.56	1.03	1.57	2.15	2.74
Measuring depth 1 / mm	1.0822	1.9905	3.0341	4.1550	5.2952
Error 1 / mm	0.0822	-0.0095	0.0341	0.1550	0.2952
Error rate 1 / %	8.22	0.47	1.14	3.88	5.90
Measuring depth 2 / mm	0.9822	1.7905	2.8341	3.9550	5.0952
Error 2 / mm	-0.0178	-0.2095	-0.1659	-0.0450	0.0952
Error rate 2 / %	1.78	10.47	5.53	1.12	1.90

表 2 中数据与图 4 所示的波形一致, 表面波 RR 的到达时间都为  $4.71 \mu\text{s}$ 。表面波 RS 的到达时间随缺陷尺寸的增加逐渐延后, 时间差  $\Delta t$  也随之增大。仿真中所设置的 5 组缺陷的  $2w/d$  分别是 0.1, 0.1, 0.07, 0.05, 0.04, 均属于极窄缺陷, 可使用 2.1 节中的测量理论对缺陷深度进行估计。由于此时的缺陷宽度相对深度极小甚至可忽略, 即(1)式中的  $2w$  项可忽略, 所以使用加入  $2w$  项前后的(1)式进行缺陷深度测量及结果比对。从表 1 中可以看出, 由考虑  $2w$  项的(1)式得到的表面缺陷深度贴近真实值, 最大误差率为 10.47%, 最小误差率为 1.12%, 得到的缺陷深度测量值较精确。而由忽略  $2w$  项的(1)式得到的测量结果也贴近真实值, 最大误差率为 8.22%, 最小误差率为 0.47%。虽然误差相较之前有变化, 但是仍在误差允许范围内, 可得到精确的缺陷深度测量值。由此可见, 在极窄缺陷下, 缺陷宽度对缺陷深度测量的影响可忽略, 即(1)式中的  $2w$  项可忽略, 此时不论是否考虑缺陷宽度的影响, 都能得到精确的缺陷深度测量值。

### 2.5 宽缺陷仿真与结果分析

宽缺陷尺寸满足  $2w/d > 2$ , 设置 5 组不同宽缺陷进行仿真, 缺陷尺寸  $d \times w$  分别是  $0.1 \text{ mm} \times 0.2 \text{ mm}$ 、 $0.1 \text{ mm} \times 0.25 \text{ mm}$ 、 $0.2 \text{ mm} \times 0.25 \text{ mm}$ 、 $0.2 \text{ mm} \times 0.3 \text{ mm}$ 、 $0.2 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$ , 其中前 2 组的缺陷深度均为  $0.1 \text{ mm}$ , 后 3 组的缺陷深度均为  $0.2 \text{ mm}$ , 缺陷尺寸逐步增大。5 组缺陷的  $2w/d$  分别是 4, 5, 2.5, 3, 5, 均属于宽缺陷。仿真模型其余参数与 2.2 节中模型保持一致, 采集到表面缺陷处的时域波形如图 5 所示。

与 2.1 节理论分析一致, 图 5 中的缺陷反射波形有两个较大的峰值, 两个峰值按照时间上的先后顺序依次对应表面波 RR 与 RS。表面波 RR 在不同的缺陷尺寸下的到达时间始终保持在  $4.71 \mu\text{s}$ , 与第 2.2 节中的仿真结果保持一致。同样地, 从图 5 中可以看出表面波 RS 的到达时间明显随着缺陷尺寸的增加而逐渐延后, 从第 1 组数据中的  $4.92 \mu\text{s}$  延后到了第 5 组缺陷数据中的  $5.19 \mu\text{s}$ 。缺陷尺寸的变化会影响表面波 RS 的生成与传播, 传播路径



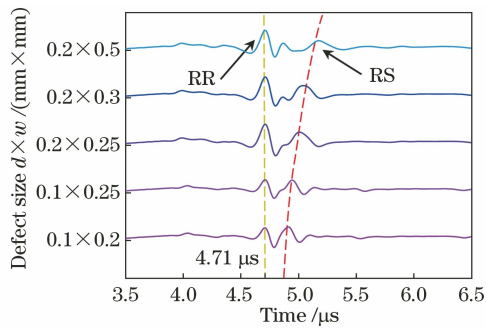


图 5 宽缺陷仿真波形

Fig. 5 Simulation waveforms of wide defects

会变长,即测量理论中线路③的声程会变长。但对于宽缺陷来说,缺陷宽度大于缺陷深度,影响声程变化的因素中宽度影响逐渐明显,导致表面波 RS 到达时间受缺陷宽度的影响,误差变大,其中包含相应的缺陷深度信息也不再准确。在图 5 中提取反射回

表 3 宽缺陷仿真数据

Table 3 Simulation data of wide defects

Defect size / (mm × mm)	0.1 × 0.2	0.1 × 0.25	0.2 × 0.25	0.2 × 0.3	0.2 × 0.5
$t_{RR} / \mu s$	4.71	4.71	4.71	4.71	4.71
$t_{RS} / \mu s$	4.92	4.95	5.01	5.06	5.19
$\Delta t / \mu s$	0.21	0.24	0.30	0.35	0.48
Measuring depth / mm	0.0058	-0.0362	0.0798	0.0764	-0.0724
Error $\delta$ / mm	-0.0942	-0.1362	-0.1202	-0.1236	-0.2724
Error rate / %	94.16	136.19	60.12	61.80	136.19

### 3 实验检测与结果分析

本文采用热弹激发原理和线源聚焦方式搭建了激光超声检测平台,该系统主要包括硬件系统和软件系统两部分,如图 6 所示。激光超声检测平台采用 CFR200 激光发生器作为激光激发部分,发射的激光波长为 1064 nm,脉宽为 11 ns,脉冲重复频率为 20 Hz。采用基于迈克耳孙干涉仪原理的 QUARTET-500 mV 激光超声接收仪作为接收部分,检测灵敏度为  $1 \times 10^{-5}$  nm/Hz<sup>1/2</sup>,激光器波长为 532 nm,带宽为 100 kHz~20 MHz。激发部分发射的激光经焦距为 200 mm 的柱面透镜在样品表面形成线源以激发声表面波,并由激光干涉部分接收回波信号。该激光超声检测平台配有自动扫查架,可以完成对检测样品的 A-Scan 声信号接收和 B-Scan 成像。固定激发点与接收点,通过 LU Scan 软件设置放置样品的自动扫查架,实现步进为 0.05 mm 且扫查距离为 15 mm 的水平方向扫查。初始扫查时,激发点与接收点的距离为 50 mm,接收点与缺陷的距离为 7 mm,如图 4 所示。本文共准备了 5 组缺陷深度分别为 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 mm 的待测样品且

波两个峰的时间差,采用(1)式对仿真模型的表面缺陷深度进行估计,得到的测量结果如表 3 所示。

表 3 中数据与图 5 所显示的波形数据一致,表面波 RR 的到达时间都为 4.71  $\mu s$ 。表面波 RS 的到达时间随缺陷尺寸的增大逐渐延后,时间差  $\Delta t$  也随之增大。仿真中所设置的缺陷尺寸比值分别是 4, 5, 2.5, 3, 5, 均属于宽缺陷,前文 2.1 节中的测量理论不再适用,不可以使用(1)式对缺陷深度进行估计。从表 3 中可以看出,由(1)式得到的表面缺陷深度与真实值有很大偏差,最小误差率为 60.12%,最大误差率为 136.19%。在宽缺陷情况下,影响声程的主要因素变为缺陷宽度,缺陷深度对声程的影响变小,由此导致根据时间差所测量出的缺陷深度误差极大,无法实现缺陷深度的精确测量。

缺陷宽度均为 0.2 mm。待检测样品及尺寸如图 6 所示,试件材料为铝,激光在铝材中激发的纵波波速  $C_L = 6.4400 \times 10^3$  m/s,横波波速  $C_S = 3.0900 \times 10^3$  m/s,表面波波速  $C_R = 2.9400 \times 10^3$  m/s。

#### 3.1 实验结果分析

采集到的表面缺陷处的时域波形如图 7 所示。扫查过程中,激发点与接收点间的距离固定为 50 mm,根据表面波在材料中传播的波速,图 6 中  $t = 18.06 \mu s$  处所对应的波形即激光激发的直达声表面波信号波形。接收点与缺陷的初始距离为 7 mm,由此可以计算出缺陷反射回波的首个峰值,即表面波 RR 大致出现在 20.06  $\mu s$  处。由图 7 可以看出,5 组实验数据中反射波的首个峰值均在 20.52  $\mu s$  处出现,可以确定此峰值对应表面波 RR。根据第 2.1 节中提出的缺陷尖端波形散射现象,缺陷反射回波中共有两个峰值,分别对应表面波 RR 和 RS,现已确定表面波 RR 所处时刻,那么其出现后的第一个较大峰值对应表面波 RS。根据计算结果与尖端波形散射理论,得出直达表面波和缺陷处反射回波中表面波 RR、RS 的到达时间与实验检测到的两波形的到达时间一致的结论。

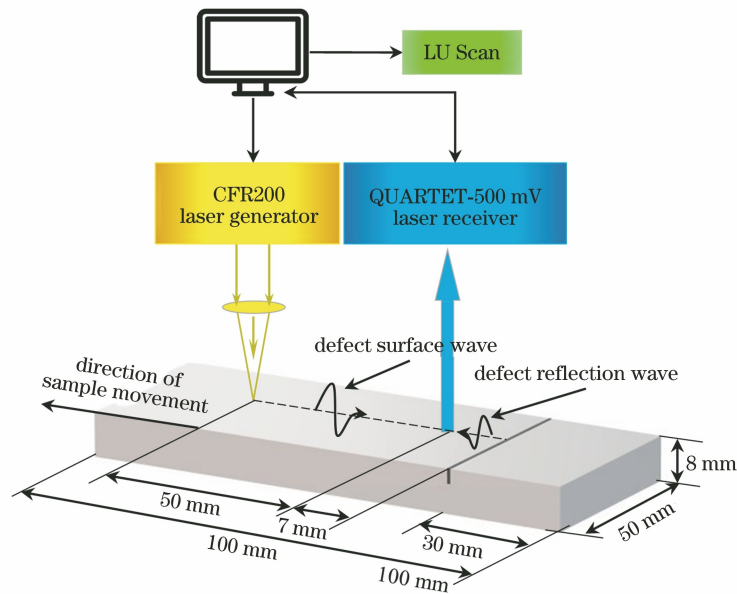


图 6 激光超声实验平台及样品

Fig. 6 Experimental platform of laser ultrasound and sample

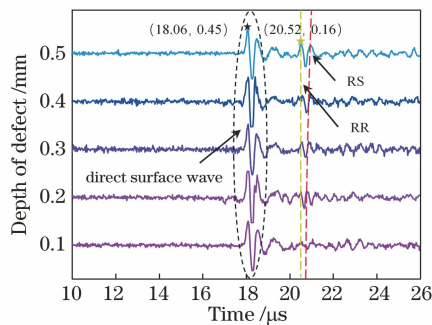


图 7 实验检测波形

Fig. 7 Experimental detection waveforms

结合第 2.1 节提出的尖端波形散射理论可以得出,缺陷反射回波中的第一个峰值对应表面波 RR,第二个峰值对应表面波 RS。5 组数据中表面波 RR 的到达时间都为  $20.52 \mu\text{s}$ 。根据 2.1 节中线路①的产生与传播过程,表面波 RR 被缺陷反射,这个过程与缺陷深度无关,所以不同的缺陷深度不会对表面波 RR 的到达时间造成影响。而表面波 RS 的到达时间则有明显不同,在  $d=0.1 \text{ mm}$  时其到达时间为  $20.73 \mu\text{s}$ ,在  $d=0.5 \text{ mm}$  时其到达时间延后到了  $21 \mu\text{s}$ 。可以看出表面波 RS 的到达时间随缺陷深度的增加逐渐延后,这个结果与 2.3 节窄缺陷仿真中得到的结果保持一致。这是因为表面波 RS 的产生与缺陷深度及宽度都有关,根据 2.1 节中线路③的产生与传播过程,表面波 RS 的产生过程中三次模态转换的声程受缺陷深度与宽度共同影响。5 组实验数据的缺陷宽度值

都为  $0.2 \text{ mm}$ ,所以缺陷深度的不同就成为了影响表面波 RS 到达时间的唯一因素。在图 6 中提取反射波中两峰值 RR 与 RS 间的时间差,采用(1)式对实验样品的表面缺陷深度进行估计,得到的测量结果如表 4 所示。

如表 4 所示,缺陷深度  $d=0.1 \text{ mm}$  的测量深度误差率为  $94.16\%$ 。本组样品的缺陷尺寸满足  $2\omega/d=4$ ,根据第 2.1 节中对缺陷的分类定义,该缺陷属于宽缺陷。那么基于(1)式的深度测量理论不再适用,导致  $d=0.1 \text{ mm}$  的表面缺陷深度测量误差极大。本组数据与前文 2.5 节中宽缺陷仿真结果中的第一组数据保持一致,两组数据中表面波 RR 与 RS 的到达时间相同,验证了实验结果与仿真结果的一致性,同时两组数据均表明宽缺陷情况下缺陷深度测算理论不再适用,不能使用(1)式对缺陷深度进行测量。其余 4 组缺陷的  $2\omega/d$  分别是  $2, 1.33, 1, 0.8$ ,缺陷均属于窄缺陷,使用(1)式得到缺陷深度。测量误差如表 4 所示,最大误差率为  $10.12\%$ ,最小误差率为  $1.43\%$ ,平均误差率不超过  $5\%$ ,表明缺陷深度被精确测量。这 4 组数据与第 2.3 节中窄缺陷仿真结果中的后 4 组数据保持一致,数据中表面波 RR 与 RS 的到达时间保持一致,最大误差不超过  $0.01 \mu\text{s}$ ,实验结果与仿真结果一致且准确性较高。同时仿真结果与实验结果均表明窄缺陷情况下缺陷深度测算理论适用,利用(1)式可实现缺陷深度的精确测量。



表 4 表面缺陷实验数据

Table 4 Experimental data of surface defects

$d / \text{mm}$	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
$t_{\text{RR}} / \mu\text{s}$	20.52	20.52	20.52	20.52	20.52
$t_{\text{RS}} / \mu\text{s}$	20.73	20.82	20.88	20.94	21
$\Delta t / \mu\text{s}$	0.21	0.3	0.36	0.42	0.48
Measuring depth / mm	0.0058	0.1798	0.2957	0.4117	0.5276
Error $\delta / \text{mm}$	-0.0942	-0.0202	-0.0043	0.0117	0.0276
Error rate / %	94.16	10.12	1.43	2.92	5.53

### 3.2 对 Cooper 等<sup>[10]</sup>实验结果的分析

文献[10]中的观点是,表面波 RT 在首次到达 M 点时就激发了横波  $S_3$ ,所以文中给出的是并未考虑缺陷宽度影响的公式,即忽略了(1)式中的  $2\tau w$  项。但在测量缺陷深度时,根据实验数据从数学角度进行了修正,给出了考虑缺陷宽度影响的公式,即(1)式,并没有说明其中的原理。文中所研究的缺陷宽度均为 0.1 mm,深度分别为 0.1,

0.15, 0.2, 0.25, 0.5, 0.75, 1 mm, 对应的  $2\tau w/d$  分别为 2, 1.33, 1, 0.8, 0.4, 0.27, 0.2。这些缺陷按照本文的定义均属于窄缺陷,此时缺陷深度测算理论适用,且缺陷深度测算公式[(1)式]中的  $2\tau w$  项不可忽略。现基于 Cooper 的实验数据,将加入  $2\tau w$  修正项前后的测量结果进行对比,以证实在窄缺陷情况下,(1)式中的  $2\tau w$  项不可忽略。实验数据如表 5 所示。

表 5 Cooper 实验数据分析

Table 5 Cooper's experimental data analysis

$d / \text{mm}$	0.1	0.15	0.2	0.25	0.5	0.75	1
$t_{\text{RR}} / \mu\text{s}$	4.71	4.71	4.71	4.71	4.71	4.71	4.71
$t_{\text{RS}} / \mu\text{s}$	4.86	4.88	4.9	4.93	5.08	5.23	5.32
$\Delta t / \mu\text{s}$	0.15	0.17	0.19	0.22	0.37	0.52	0.61
Measuring depth 1 / mm	0.2899	0.3285	0.3672	0.4252	0.7150	1.0049	1.1789
Error 1 / mm	0.1899	0.1785	0.1672	0.1752	0.2150	0.2549	0.1789
Error rate 1 / %	189.88	119.02	83.59	70.07	43.01	33.99	17.89
Measuring depth 2 / mm	0.0899	0.1285	0.1672	0.2252	0.5150	0.8049	0.9789
Error 2 / mm	-0.0101	-0.0215	-0.0328	-0.0248	0.0150	0.0549	-0.0211
Error rate 2 / %	10.12	14.31	16.41	9.93	3.01	7.32	2.11

从表 5 中不难看出,忽略  $2\tau w$  项所测量出的缺陷深度误差极大,最大误差率达到了 189.88%,最小误差率为 17.89%,测量效果差,可见忽略  $2\tau w$  项影响不能完成缺陷深度的精确测量。考虑  $2\tau w$  项所测量出的缺陷深度误差则明显变小,最大误差率为 14.31%,最小误差率为 2.11%,测量深度接近真实值,表明缺陷深度被精确测量。根据第 2 节中的定义,表 5 中缺陷均为窄缺陷,此时缺陷深度测量理论适用,但不能忽略缺陷宽度对测量结果的影响,即(1)式中的  $2\tau w$  项不可忽略。此时使用(1)式可以对缺陷深度进行精确测量。根据表 5 中的数据绘制了测量深度与实际深度的对比图,如图 8 所示。

图 8 中圆形数据点所代表的值为基于(1)式的测量值,三角形数据点所代表的值为忽略缺陷宽度影响的测量值,直线为(1)式测量值的拟合线,虚线为忽略缺陷宽度影响的测量值的拟合线。两条拟合

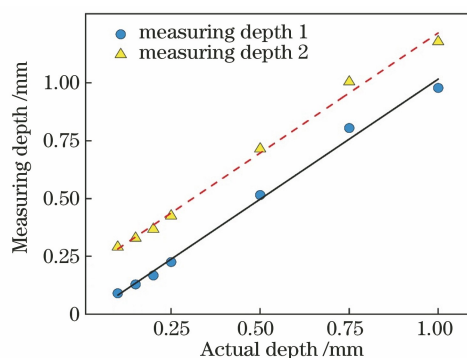


图 8 窄缺陷深度测量结果

Fig. 8 Depth measurement results of narrow defects

线斜率相同,间距为 0.2 mm,即两倍缺陷宽度,直线拟合结果更贴近真实值。可以明显看出,圆形数据点都分布在直线附近,且较三角形数据点更靠近该拟合直线。这表明基于(1)式的测量值更贴近真实值,测量更加精确。而三角形数据点均

分布在直线上方的虚线两侧,距直线的距离约为 0.2 mm。这表明这组测量值均大于真实值,测量结果不准确。对于相同的缺陷深度,加入缺陷宽度影响前后缺陷深度测量值之间的差值为 0.2 mm,即两倍缺陷宽度  $2w$ 。这证明了当缺陷属于窄缺陷时,应采用(1)式进行缺陷深度测量。同时也补充说明了文献[10]中的实验数据需要  $2w$  修正项的原因:表面波 RS 的产生与缺陷宽度有着密不可分的关系,在进行缺陷深度测算时必须考虑其影响。

### 3.3 对 Jeong<sup>[11]</sup>实验结果的分析

文献[11]中的观点与文献[10]一致,都认为横波  $S_3$  是表面波 RT 激发出的,所以文献[11]中给出

表 6 Jeong 实验数据分析

Table 6 Data analysis for Jeong's experiment

$d$ /mm	0.3	1	2	3	4	5
$t_{RR}/\mu\text{s}$	4.71	4.71	4.71	4.71	4.71	4.71
$t_{RS}/\mu\text{s}$	4.96	5.32	5.84	6.32	6.87	7.45
$\Delta t / \mu\text{s}$	0.25	0.61	1.13	1.61	2.16	2.74
Measuring depth 1 /mm	0.4831	1.1789	2.1838	3.1114	4.1743	5.2952
Error 1 /mm	0.1831	0.1789	0.1838	0.1114	0.1743	0.2952
Error rate 1 /%	61.05	17.89	9.19	3.71	4.36	5.90
Measuring depth 2 /mm	0.2831	0.9789	1.9838	2.9114	3.9743	5.0952
Error 2 /mm	-0.0169	-0.0211	-0.0162	-0.0886	-0.0257	0.0952
Error rate 2 /%	5.62	2.11	0.81	2.95	0.64	1.90

表 6 中前 2 组数据属于窄缺陷,应使用(1)式进行缺陷深度测量。观察这两组数据,可以看出忽略  $2w$  项测量出的结果与真实值相差极大,误差率分别达到了 61.05% 和 17.89%,考虑  $2w$  项的测量结果则更加贴近真实值。这再次证实当缺陷属于窄缺陷时,缺陷宽度的影响不可忽略,应该基于(1)式进行缺陷深度测量。表 6 中后 4 组数据均属于极窄缺陷,可以看出忽略缺陷宽度影响后也能实现缺陷深度的精确测量。基于(1)式测量出的缺陷深度误差极小,误差率最大不超过 3%,最小仅为 0.81%,测量结果精确。而忽略宽度影响测量出的缺陷深度最大误差不超过 10%,最小为 3.71%,均在误差允许范围内,也可以实现缺陷深度的精确测量。根据表 6 中的数据绘制了测量深度与实际深度对比图,如图 9 所示。

图 9 中圆形数据点所代表的值为基于(1)式的测量值,三角形数据点所代表的值为忽略缺陷宽度影响的测量值,直线为基于(1)式得到的测量值的拟合线,虚线为忽略缺陷宽度影响的测量值的拟合线。两组数据的间距为 0.2 mm,即两倍缺陷宽度,直线

的公式也未考虑缺陷宽度影响,即忽略了(1)式中的  $2w$  项。但其之后的实验虽未进行宽度修正,测量误差也在允许范围内。从实验数据来看,两篇文献中研究的表面缺陷宽度都为 0.1 mm。但与 Cooper 不同,Jeong 采用的缺陷深度分别为 0.3,1,2,3,4,5 mm,对应的  $2w/d$  分别为 0.67,0.2,0.1,0.07,0.05,0.04。按照本文的定义,前 2 组数据属于窄缺陷,后 4 组数据均属于极窄缺陷。猜测正是因为研究对象的不同,即使基于未进行宽度修正的(1)式进行测量,Jeong 也取得了准确的结果。现基于 Jeong 的实验数据,将加入  $2w$  修正项前后的测量结果进行对比,以证实在极窄缺陷情况下,(1)式中的  $2w$  项可忽略。实验数据如表 6 所示。

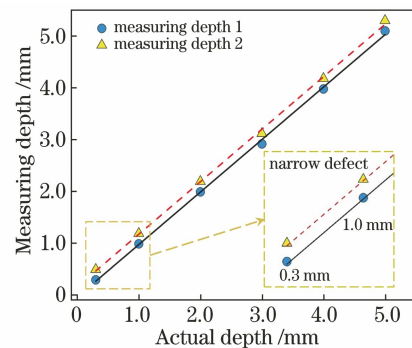


图 9 窄缺陷与极窄缺陷的深度测量结果

Fig. 9 Depth measurement results of narrow defect and extremely narrow defect

更加贴近真实值。观察前两组窄缺陷数据,发现这两组数据中圆形数据点均以极小的偏差分布在拟合线上。而三角形数据点均分布在直线上方 0.2 mm 处的虚线上,这段距离就是两倍缺陷宽度  $2w$ ,相对这两组数据的缺陷深度不可忽略。这表明圆形数据点更贴近缺陷实际值,而三角形数据点则有较大误差。这两组缺陷为窄缺陷,导致  $2w$  项相较缺陷深度不可忽略。这表明只有考虑了  $2w$  项影响的(1)

式才能完成窄缺陷深度的精确测量。观察后 4 组极窄缺陷数据,发现这 4 组数据均分布在拟合直线附近,且两条拟合直线均贴近真实值。这表明忽略缺陷宽度影响前后的测量值均贴近缺陷实际值。考虑到此时的缺陷尺寸极窄,缺陷  $2w/d$  中的  $2w$  项,也就是这里三角数据点的误差值相较缺陷深度可忽略。这表明忽略缺陷宽度影响前后均能完成极窄缺陷深度的精确测量。以上的理论证实了第 2 节中有关缺陷类型定义及缺陷深度测算公式的适用范围,同时也补充了 Jeong 文中的实验数据分析,证明了其文中实验数据中的前 2 组缺陷深度测量值有着不可忽略的误差,其余 4 组的数据测量结果准确。

## 4 结 论

基于激光超声激发出的声表面波在矩形缺陷尖端的波形转换现象,推导了定量测量表面缺陷深度的方法及测算公式。根据缺陷几何尺寸对反射波形的影响,提出了缺陷尺寸比值概念,对表面缺陷的类型进行了划分,并基于此给出了测量方法及测算公式的适用范围。当缺陷尺寸满足  $0.1 < 2w/d \leq 2$  时,其为窄缺陷,可使用(1)式进行缺陷深度测量;当缺陷尺寸满足  $2w/d \leq 0.1$  时,其为极窄缺陷,可用未经宽度修正的(1)式进行缺陷深度测量;当缺陷尺寸满足  $2w/d > 2$  时,其为宽缺陷,理论不再适用,不能用测量公式对缺陷深度进行测量。搭建了激光超声检测实验平台,对实验样品的表面缺陷进行了检测,结果证明缺陷深度的测量值与实际值之间的相对误差极小,得到的缺陷深度测量结果精确。最后基于文献[10]与文献[11],补充了文中的实验数据,证实了所提出理论的正确性。在时域对表面缺陷深度进行了测量与评估,并给出了定量测量表面缺陷深度的方法、测算公式以及适用范围,实验与仿真证明此方法有着简单、方便、准确性高、可靠性好等特点,本文方法可被广泛应用于实际工业检测当中。

## 参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] Zhou Z G, Sun G K, Li Z, et al. Application of laser ultrasonic testing technique on the detection of composite structures [J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2012, 17(6): 119-122.
- [3] Hiraó M, Fukuoka H, Miura Y. Scattering of Rayleigh surface waves by edge cracks: numerical simulation and experiment [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1982, 72(2): 602-606.
- [4] Song W J, Popovics J S, Aldrin J C, et al. Measurement of surface wave transmission coefficient across surface-breaking cracks and notches in concrete [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2003, 113(2): 717-725.
- [5] Shi Y F. Study on nondestructive evaluation of surface defect and residual stress on metal by laser ultrasonic technology [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2009.
- [6] Hutchins D A, Nadeau F, Cielo P. A pulsed photoacoustic investigation of ultrasonic mode conversion [J]. Canadian Journal of Physics, 1986, 64(9): 1334-1340.
- [7] Shan Q, Dewhurst R J. Surface-breaking fatigue crack detection using laser ultrasound [J]. Applied Physics Letters, 1993, 62(21): 2649-2651.
- [8] He C F. Laser ultrasonic techniques and applications [D]. Beijing: Tsinghua University, 1995.
- [9] Wang J S, Xu X D, Liu X J, et al. Low pass effect of surface defect metal based on laser ultrasonic [J]. Acta Physica Sinica, 2008, 57(12): 7765-7769.
- [10] Cooper J A, Crosbie R A, Dewhurst R J, et al. Surface acoustic wave interactions with cracks and slots: a noncontacting study using lasers [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 1986, 33(5): 462-470.
- [11] Jeong H. Finite element analysis of laser-generated ultrasound for characterizing surface-breaking cracks [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2005, 19(5): 1116-1122.
- [12] Kromine A K, Fomitchov P A, Krishnaswamy S, et al. Applications of scanning laser source technique for detection of surface-breaking defects [J]. Proceedings of SPIE, 2000, 4076: 252-259.
- [13] Ni C Y, Wang L J, Shen Z H, et al. A study of surface breaking crack evaluating by using scanning



- laser source-dual laser source technique [J]. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 2010, 25(2): 111-123.
- [14] Hess P, Lomonosov A M. Noncontact, nondestructive evaluation of realistic cracks with surface acoustic waves by scanning excitation and detection lasers [J]. *International Journal of Thermophysics*, 2013, 34(8/9): 1367-1375.
- [15] Zhang J P, Qin X P, Yuan J X, et al. Defect location and size detection based on laser ultrasonic diffraction bulk wave [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(12): 1214002.  
张进朋, 秦训鹏, 袁久鑫, 等. 基于激光超声衍射体波的缺陷定位定量检测 [J]. *光学学报*, 2020, 40(12): 1214002.
- [16] Zheng J, Shen Z H, Ni C Y. Experimental study on simulated crack closure using laser ultrasonic [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(12): 1212003.  
郑杰, 沈中华, 倪辰荫. 模拟裂纹闭合的激光超声实验研究 [J]. *光学学报*, 2019, 39(12): 1212003.
- [17] Moura A, Lomonosov A M, Hess P. Depth evaluation of surface-breaking cracks using laser-generated transmitted Rayleigh waves [J]. *Journal of Applied Physics*, 2008, 103(8): 084911.
- [18] Guan J F, Shen Z H, Ni X W, et al. Numerical study on depth evaluation of micro-surface crack by laser generated ultrasonic waves [J]. *Journal of Test and Measurement Technology*, 2010, 24(1): 15-21.  
关建飞, 沈中华, 倪晓武, 等. 激光超声探测铝板表面微缺陷深度的数值研究 [J]. *测试技术学报*, 2010, 24(1): 15-21.
- [19] Li H Y, Li Q X, Wang Z B, et al. Study on laser ultrasonic testing of metal material surface defects [J]. *Fire Control & Command Control*, 2019, 44(8): 61-64.  
李海洋, 李巧霞, 王召巴, 等. 金属材料表面缺陷的激光超声检测技术 [J]. *火力与指挥控制*, 2019, 44(8): 61-64.
- [20] Li H Y, Li Q X, Wang Z B, et al. Detection and evaluation of surface defects based on critical frequency method by laser ultrasonic [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(7): 0712003.  
李海洋, 李巧霞, 王召巴, 等. 基于激光超声临界频率的表面缺陷检测与评价 [J]. *光学学报*, 2018, 38(7): 0712003.
- [21] Wang Z G. Numerical study of surface crack of plate with step by laser ultrasonic detection [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019.  
王铮恭. 激光超声检测阶梯板表面裂纹的数值研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
- [22] Hutchins D A, Dewhurst R J, Palmer S B. Directivity patterns of laser-generated ultrasound in aluminum [J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1981, 70(5): 1362-1369.