

文章编号:1001-5078(2020)10-1183-07

· 激光应用技术 ·

# 基于表面波增强效应的圆柱表面缺陷检测方法研究

徐志祥, 杨帆, 关守岩, 李连福  
(大连理工大学机械工程学院, 辽宁大连 116024)

**摘要:**激光照射金属圆柱表面激发出的声表面波,在沿圆柱表面传播过程中产生色散和相移,并在表面缺陷前沿处幅值会有显著增强的现象,为表面缺陷的检测提供了新途径。基于激光激发的声表面波这一现象,提出通过扫描检测点的方法确定缺陷的位置,给出了表面波在表面缺陷附近的传播路径和缺陷深度计算公式。数值研究表明:(1)相对于脉冲回波法,扫描检测点方法提高了缺陷检测的位置精度,有效减小了圆柱表面波传播过程的色散和频移现象对缺陷位置精度的影响。(2)当缺陷深度范围为1~2 mm,通过给出的缺陷深度计算公式得到仿真缺陷深度与实际缺陷深度之间的误差控制在6%以内,验证了提出的缺陷深度计算公式的有效性。以上研究结果为应用表面波检测圆柱类零件表面缺陷提供了有价值的参考。

**关键词:**激光超声;声表面波;数值研究;缺陷检测;增强效应

**中图分类号:**TN249 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2020.10.005

## Research on detection method of cylindrical surface defect based on laser ultrasonic surface wave enhancement effect

XU Zhi-xiang, YANG Fan, GUAN Shou-yan, LI Lian-fu  
(School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract:** The surface acoustic wave excited by the laser irradiating the surface of the metal cylinder generates dispersion and phase shift during the propagation along the surface of the cylinder, and the amplitude at the front edge of the surface defect is significantly enhanced, which provides a new way for the detection of surface defects. Based on the phenomenon of surface acoustic wave excited by laser, it is proposed to determine the position of the defect by scanning the detection point, and the formula of calculating the depth of surface defect and the propagation path near the surface defect are given. Numerical research show that: (1) Compared with the pulse echo method, the scanning detection point method improves the position accuracy of the detection of defect, and effectively reduces the influence of the dispersion and frequency shift phenomenon on the position accuracy of surface defects. (2) When the defect depth range is 1~2 mm, the error between the simulated defect depth and the actual defect depth is controlled within 6% by the given formula of calculating defect depth, and the validity of the proposed formula of calculating defect depth is verified. The above research results provide a valuable reference for applying the surface wave to detect surface defects of cylindrical parts.

**Keywords:** laser ultrasonic; surface acoustic wave; numerical research; defect detection; enhanced effect

**基金项目:**大连理工大学中央高校基本科研业务费专项项目(No. DUT15ZD110)资助。

**作者简介:**徐志祥(1965-),男,硕士,教授,主要从事测试与控制技术研究。E-mail:zxxu@dlut.edu.cn

**通讯作者:**杨帆(1994-),男,硕士,主要研究方向为激光超声无损检测。E-mail:1334842846@mail.dlut.edu.cn

**收稿日期:**2019-11-27; **修订日期:**2019-12-26

## 1 引言

金属圆柱作为主要的支撑传动类零件,其表面缺陷检测一直是检测领域重要的方向。在众多检测的方法中,激光超声无损检测能够实现非接触实时在线检测,且检测精度高,因此在检测领域受到了广泛的关注<sup>[1]</sup>。

许多研究学者将激光超声应用于微小缺陷的检测,并取得了多项研究成果<sup>[2-6]</sup>。陶程<sup>[7]</sup>通过有限元方法分析了声表面波与金属平板表面缺陷的作用机理,给出了能够定量表征表面缺陷的特征量。刘辉<sup>[8]</sup>通过数值仿真和实验验证了金属平板表面的反射瑞利波与表面缺陷深度之间存在时间依赖性。以上研究主要是将声表面波应用于平板类的表面缺陷检测,对于圆柱类表面缺陷检测还需要进一步的研究。

由于声表面波在圆柱表面传播会产生色散和相移现象<sup>[9-11]</sup>,这与声表面波在平板上的传播规律不同,一定程度影响了检测表面缺陷的位置精度。针对上述问题,通过扫描检测点的方式,当表面波传播至表面缺陷前沿时,入射波和缺陷反射波产生叠加干涉会使缺陷前沿的表面波幅值出现显著增强的现象,刘学坤<sup>[12]</sup>通过实验已经验证了表面波增强效应。本文利用表面波增强效应确定圆柱表面缺陷的位置,分析表面波在缺陷附近的传播路径得到缺陷深度计算公式。通过分析比较,此方法能够有效提高检测圆柱表面缺陷的位置精度并能定量表征缺陷深度。

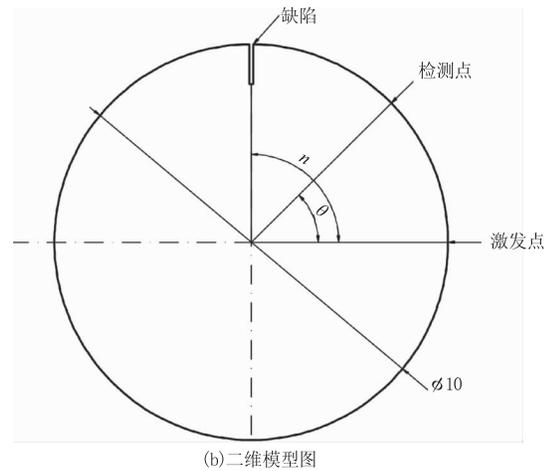
## 2 数值模型的建立

### 2.1 圆柱几何模型的建立

本文建立三维圆柱几何模型,如图1(a),激光以线光源加载在圆柱表面上,由于文中主要研究圆柱周向表面波和表面缺陷的作用,因此将三维模型简化为二维模型,如图1(b)。



(a) 三维模型图



(b) 二维模型图

图1 带缺陷圆柱几何模型

Fig. 1 Geometric model of cylinder with defects

图中, $\theta$ 为检测点与线源激发点之间的周向角度; $\eta$ 为缺陷与线源激发点之间的周向角度;圆柱直径为10 mm。

### 2.2 激光加载方式的选择

基于热弹性理论,文中通过有限元方法分析激光加载在圆柱表面产生超声波的过程。脉冲激光通过圆柱透镜汇聚成线激发源加载在圆柱表面,一部分激光能量被圆柱材料吸收,由于热传导作用会在激光加载区域形成温度梯度场,受热区域会产生热膨胀应力波在体内和圆柱表面传播。数值仿真模型中采用高斯热源模拟激光加载方式,其中热通量加载方程为:

$$Q(\phi, t) = I_0 R f(\phi) g(t) \quad (1)$$

其中, $I_0$ 表示高斯热源入射光斑中心处的最大功率密度; $R$ 为铝圆柱材料表面吸收率,值为0.06; $f(\phi)$ 和 $g(t)$ 分别为高斯热源在空间和时间能量分布方程,表示能量分别在极坐标角度方向上和时间轴上呈高斯分布。其中:

$$f(\phi) = \exp(- (r\phi)/a_0^2) \quad (2)$$

$$g(t) = t/t_0 \exp(- t/t_0) \quad (3)$$

式中, $r$ 为圆柱半径; $a_0$ 为激光光斑半径; $t_0$ 为脉冲激光的上升时间; $\phi$ 为线源激光在圆弧上的辐照区域。

### 2.3 网格的划分和时间步长的选取

数值仿真实验中,激光激发能量 $E$ 为1 mJ,激光激发半径 $a_0$ 为0.1 mm,脉冲激光上升时间 $t_0$ 为10 ns。为了满足激光作用后弹性波的传播精度要求和足够的空间和时间分辨率<sup>[13]</sup>,根据公式:

$$\lambda_{\min} = \pi a_0 / \sqrt{2} \quad (4)$$

$$Le = \lambda_{\min} / 10 \quad (5)$$

$$\Delta t = 1 / 180 f_{\max} \quad (6)$$

选用自由三角形网格类型,在激光激发点和缺陷附近处网格大小为 12 μm,其余网格大小为 60 μm,时间步长为 5 ns。数值仿真模型中选用铝圆柱材料物性参数如表 1。

表 1 铝的材料属性

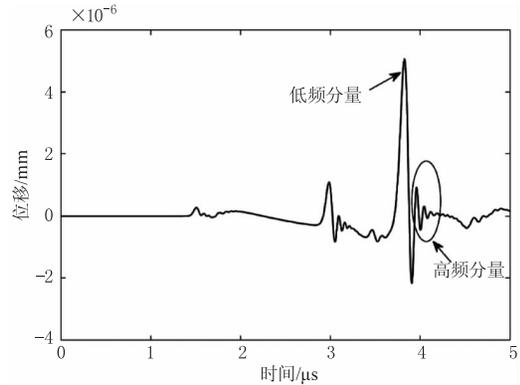
Tab. 1 Material properties of the aluminum

参数	值
密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	2700
杨氏模量 $E / \text{GPa}$	70
泊松比 $\nu$	0.33
热膨胀系数 $\alpha / \text{K}^{-1}$	$2.34 \times 10^{-5}$
导热系数 $K / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	238
常压比热容 $C_p / (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	900

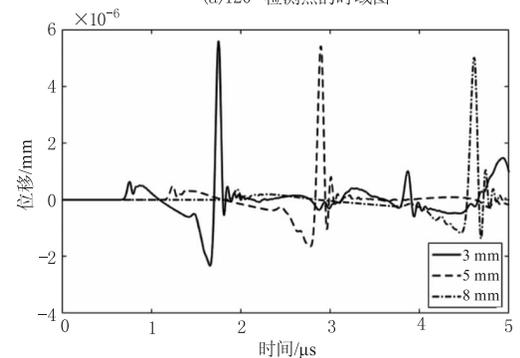
### 3 表面波在周向圆柱表面的传播规律

#### 3.1 圆柱周向表面波的频散现象

由于激光激发的声表面波频带较宽,不同频率的声表面波在圆柱表面的传播速率差异性较大,即会出现频散现象,影响表面波频散的因素主要有表面波的频率和圆弧表面的曲率半径。在圆弧表面上,表面波的低频分量传播速率大,高频分量传播速率小。在曲率半径为 5 mm 的无缺陷圆柱表面上,距离激发点 120° 检测点的时域图如图 2(a),图中可以看到表面波中的低频分量和高频分量会出现分离。表面波的频散情况可以用表面波速度  $c$  和 Rayleigh 波速度  $C_R$  的比值表示,比值与 1 差值的绝对值越大,表面波在圆柱表面的频散越明显<sup>[11]</sup>。文献[14]中给出材料铝中  $C_R$  的速度约为 2810 m/s,为了分析表面波在圆弧表面传播的频散情况,图 2(b)是曲率半径分别为 3 mm、5 mm、8 mm 的圆柱表面距离激发点 90° 位置的时域图。通过脉冲反射回波方法计算得到分别为  $C_R$  分别为 2847 m/s、2825 m/s、2817 m/s。可以看出曲率半径较小时表面波速度和  $C_R$  差异较大,频散较为明显,随着曲率半径的增大频散现象有所减弱,当曲率半径趋于无穷时,即为平面状态时,几何频散现象消失。



(a) 120° 检测点的时域图



(b) 半径为 3 mm、5 mm、8 mm 的频散情况

图 2 波形图

Fig. 2 waveform

#### 3.2 圆柱周向表面波的相移现象

文献[11]表明表面波在圆弧凸起外表面会发生相移,图 3 是表面波在曲率半径为 5 mm 的圆弧表面上不同角度检测点的相位。从图中可以看到,不同的检测点的相位不同,且圆弧表面相移现象相对于频散更加明显。图 4 是表面波在曲率半径为 5 mm 圆柱上距离激发点不同检测角度得到的时域图,图中不同角度检测点的曲线极性发生了变化<sup>[15]</sup>,在 30° 到 90° 之间由双极性逐渐转化为单极性,90° 之后又逐渐转化为双极性,因此通过分析不同检测点的极性变化趋势,选择出现单极性波的角度作为信号检测点的位置能够提高信号的信噪比。

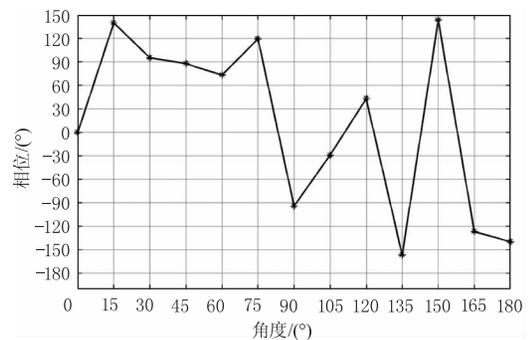


图 3 不同角度检测点的相位变化

Fig. 3 Phase change at different detection points

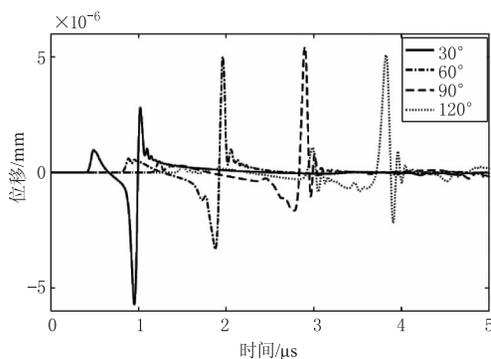


图4 不同角度检测点的极性变化

Fig. 4 Polarity change at different detection points

### 4 圆柱表面缺陷的检测方法

#### 4.1 脉冲回波法

圆柱表面确定缺陷是通过计算表面入射波和反射波的时间差确定表面缺陷距离检测点的位置,计算缺陷底端表面反射回波和缺陷顶端散射回波之间的时间差确定缺陷深度。文中建立半径为 5 mm 圆柱模型,为了更好的实现入射波和反射波分离,表面缺陷位置在圆柱表面与激发点周向相距 90°,检测点位于激发点与缺陷之间,与激发点周向相距 45°,缺陷深度为 1 mm,缺陷宽度为 0.1 mm。在检测点 45°得到的时域图如图 5 所示。

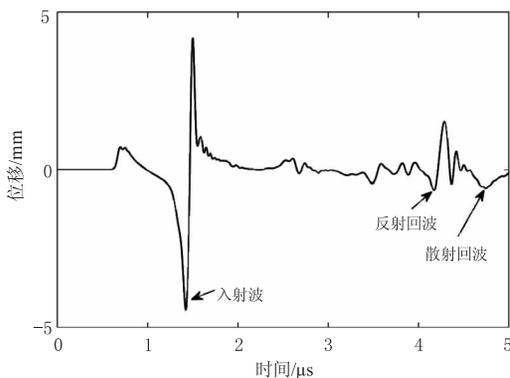


图5 45°检测点时域图

Fig. 5 Time domain diagram of the angle of 45°

#### 4.2 扫描检测点法

由于表面波在圆柱表面传播会发生频散,检测点接收到反射回波成分较为复杂,对于脉冲回波法确定缺陷的位置和深度会受到一定的影响。文中采用扫描检测点的方式,当扫描到缺陷前沿时入射波和反射波会产生叠加干涉现象,幅值明显增大,有利于确定缺陷位置。图 6 为扫描到不同角度的波形图,图中可以看出当检测点接近缺陷前沿时,幅值显著增大,扫描过缺陷后,幅值急剧减小,因此可以通过幅值突变位置确定缺陷位置。图 7 是缺陷距离激发点 90°时圆

柱上表面的 B 扫图,图中可以明显看到在 90°附近会出现反射纵波和反射表面波,并且能观察到入射表面波在 90°附近的幅值增大的现象。

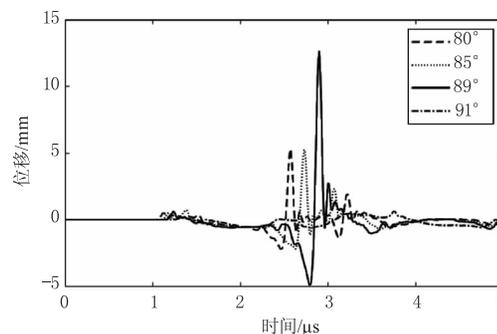


图6 缺陷附近检测点的时域图

Fig. 6 Time domain diagram of detection points near defects

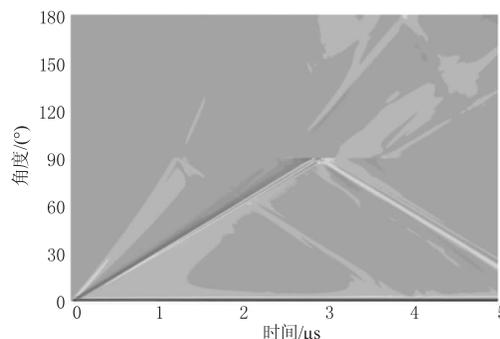


图7 带缺陷圆柱表面的 B 扫图

Fig. 7 B-scan with defective cylindrical surface

由于缺陷宽度为 0.1 mm,因此缺陷前沿在 89.43°附近处。图 8 分别为有缺陷和无缺陷 89°检测点的波形图,在有缺陷波形图中的 2.79 μs 和 3.49 μs 出现了两个表面波,经过仿真实验分析,第一个表面波为入射表面波和缺陷反射表面波产生叠加干涉的复合波,其幅值显著大于无缺陷时的直达表面波幅值,第二个表面波是缺陷顶端散射波沿缺陷前沿传播至检测点的表面波。

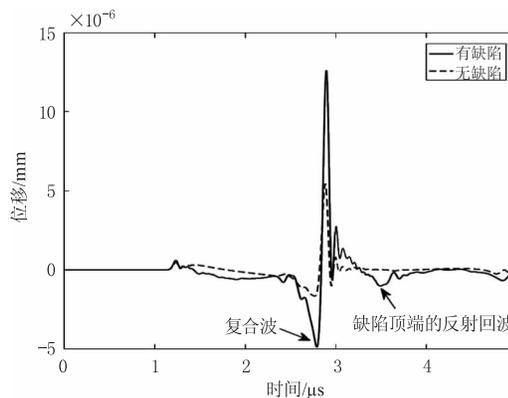


图8 89°检测点在表面有缺陷和无缺陷的时域图

Fig. 8 Time domain diagram of the angle of 89° on the surface with defects and no defects

因此表面波沿缺陷前沿往返传播的时间差就是两个波谷相距的时间,通过表面波的速度和两波谷之间的时间差可以计算得到表面缺陷深度。

图 9 分别为入射表面波到达缺陷底端检测点、表面波沿缺陷前沿传播和缺陷前沿散射表面波传播到缺陷底端检测点三个不同时刻的全场波形图。

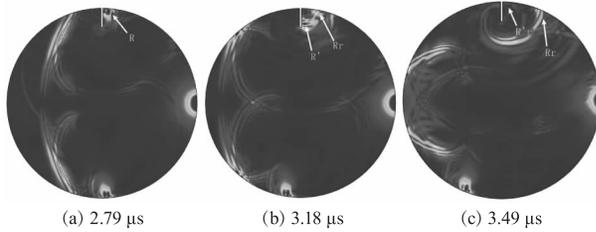


图 9 不同时刻全场波形图

Fig.9 Full field waveform at different times

### 5 数值仿真结果分析

#### 5.1 圆柱表面缺陷位置的确定

由于频散和相移现象,在圆柱表面通过脉冲回波法确定圆柱表面缺陷位置相对于平面,其位置精度会有所下降。本文基于检测点在缺陷前沿处出现的表面波增强效应,利用扫描检测点的方式确定缺陷的位置信息,一定程度上能减小频散和相移的影响。通过脉冲回波方法确定缺陷位置的公式为  $s = c_1 \times \Delta t_1 / 2$ , 其中  $s$  为检测点与缺陷前沿的距离,  $c_1$  为表面波的传播速度,  $\Delta t_1$  为入射波和缺陷底端反射波之间的时间差,通过公式计算得到表面缺陷的位置误差为  $1.16^\circ$ 。如图 6 所示,通过扫描检测点方式确定表面缺陷的位置误差小于  $0.5^\circ$ 。因此通过扫描检测点的方式有利于提高确定圆柱表面缺陷的位置精度。

#### 5.2 圆柱表面缺陷深度的确定

时间飞行散射法 (TOFD) 通过缺陷低端的反射回波和缺陷顶端散射回波之间的时间差和表面波传播速度确定缺陷深度。当检测点位于缺陷和激发点之间时,各类型反射波和转换波成分较多,得到检测点的波形较复杂,不易分辨出缺陷前沿顶端的散射回波。通过扫描检测点方式确定缺陷位置后,得到缺陷前沿检测点的波形如图 8 中有缺陷的波形图。

图中可以计算得到复合波和缺陷顶端散射回波的时间差和缺陷前沿的表面波速度,由缺陷深度计算公式  $h = c_2 \times \Delta t_2 / 2$  可以得到表面缺陷深度,其中  $h$  为缺陷深度、 $c_2$  为缺陷前沿的表面波速度、 $\Delta t_2$  为复合波和缺陷顶端散射回波的时间差。图 10 为表

面波在缺陷附近的传播路径图,入射表面波 R 沿路径 1 传播至缺陷前沿底端,一部分在缺陷底端形成反射回波  $R_r$  沿路径 2 传播,另一部分表面波  $R'$  沿路径 3 在缺陷前沿传播,表面波  $R'$  传播至缺陷前沿顶端时发生散射,散射回波  $R'r$  沿路径 4 传回缺陷前沿底端的检测点,另一部分散射波透过缺陷,沿路径 5、6、7 传播。

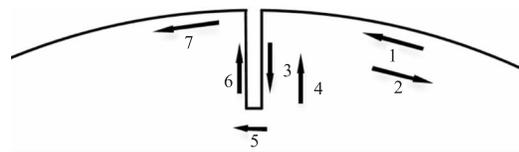


图 10 缺陷附近表面波的传播路径

Fig.10 Surface wave propagation path near the defect

为了验证图 10 缺陷附近表面传播路径和缺陷深度计算公式的有效性。分析在不同缺陷深度下,通过缺陷深度计算公式得到的仿真缺陷深度与实际缺陷深度的误差。图 11 是在不同缺陷深度下,缺陷前沿检测点的时域特征。

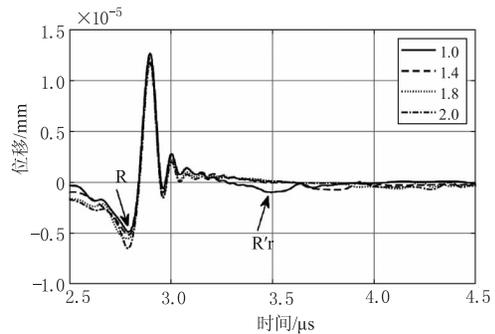


图 11 缺陷前沿检测点在不同缺陷深度的时域特征

Fig.11 Time domain characteristics of defect front detection points at different defect depths

将缺陷深度在  $1.0 \sim 2.0$  mm 范围内的数值仿真结果经缺陷深度计算公式计算得到仿真缺陷深度与实际缺陷深度的关系如图 12 所示。

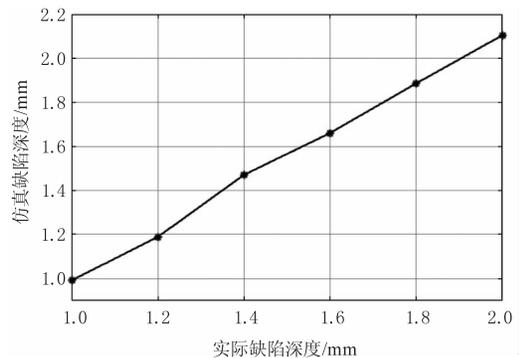


图 12 仿真缺陷深度与实际缺陷深度之间的关系

Fig.12 Relationship between simulated defect depth and actual defect depth

由图 12 计算得到仿真缺陷深度与实际缺陷深度的误差如表 2。表 2 中可以看出缺陷深度在 1.0 ~ 2.0 mm 范围内,仿真计算结果得到的误差百分比控制在 6% 以内。表明了当检测点扫描至缺陷前沿时,利用表面波增强效应检测圆柱表面缺陷的可行性。同时也验证了图 10 表面波在缺陷附近的传播路径图和缺陷深度计算公式的有效性。

表 2 仿真缺陷深度与实际缺陷深度的误差

Tab. 2 Difference between simulated defect depth and actual defect depth

实际缺陷深度 /mm	仿真缺陷深度 /mm	误差绝对值 /mm	误差百分比
1.0	0.9923	0.0077	0.0077
1.2	1.1894	0.0106	0.0089
1.4	1.4709	0.0709	0.0506
1.6	1.6609	0.0609	0.0380
1.8	1.8861	0.0861	0.0478
2.0	2.1042	0.1042	0.0521

## 6 结 论

本文探究表面波在圆柱周向表面的传播规律和与缺陷的作用方式,提出了一种基于表面波增强效应的圆柱表面缺陷检测方法。文中采用数值仿真的方法,通过扫描检测点的方式确定圆柱表面缺陷的位置和深度。研究表明:

(1) 当检测点扫描至缺陷前沿时,入射表面波和缺陷前沿的反射表面波发生叠加干涉使检测点表面波幅值增加。通过表面波增强效应确定表面缺陷的位置,减小了表面波在圆柱表面传播的频散现象对表面缺陷的位置精度影响,提高了检测圆柱表面缺陷的位置精度。

(2) 文中给出了基于表面波增强效应的缺陷深度检测方法。在缺陷深度范围为 1 ~ 2 mm 时,结合表面波在缺陷附近的传播路径和缺陷深度计算公式,计算得到数值仿真缺陷深度与实际缺陷深度的误差百分比控制在 6% 以内,验证了该缺陷深度检测方法的有效性。该方法能够为定量表征圆柱表面缺陷深度提供了解决手段。

## 参考文献:

[1] Zhou Zhenggan, Sun Guangkai. New progress of the study

and application of advanced ultrasonic testing technology [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(22): 1 - 10. (in Chinese)

周正干,孙广开. 先进超声检测技术的研究应用进展 [J]. 机械工程学报, 2017, 53(22): 1 - 10.

[2] Guo Haiyang, Xu Zhixiang, Liu Zhiyi, et al. Laser ultrasonic test for defects of metal plate with coating [J]. Laser & Infrared, 2017, 47(5): 541 - 547. (in Chinese)

郭海洋,徐志祥,刘志毅,等. 带涂层金属板件缺陷的激光超声检测研究 [J]. 激光与红外, 2017, 47(5): 541 - 547.

[3] Song Chao, Zheng Bin, Guo Hua ling, et al. Analysis of influence of light source on laser ultrasonic signal [J]. Journal of Applied Optics, 2017, 38(3): 494 - 498. (in Chinese)

宋潮,郑宾,郭华玲,等. 光源对激光超声信号特性的影响分析 [J]. 应用光学, 2017, 38(3): 494 - 498.

[4] Li Haiyan, Wei Zhuangzhuang, Pan Qianghua. Laser ultrasonic technique for surface defects detection of 6061 aluminum alloy [J]. Journal of Measurement Science and Instrumentation. 2019, 10(3): 293 - 298.

[5] Wang Wei, Zhong Zheng, Pan Yongdong. Scattered echo of surface defect in the far field of Rayleigh wave generated by laser [J]. Laser Technology, 2015, 39(2): 157 - 165. (in Chinese)

王威,仲政,潘永东. 激光远场激发表面波在开口缺陷处的散射回波 [J]. 激光技术, 2015, 39(2): 157 - 165.

[6] Li Junyan, Shen Zhonghua, Ni Xiaowu, et al. Laser-ultrasonic non-destructive detection based on synthetic aperture focusing technique [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(9): 0904003. (in Chinese)

李俊燕,沈中华,倪晓武,等. 基于合成孔径聚焦技术的激光超声无损检测方法研究 [J]. 中国激光, 2018, 45(9): 0904003.

[7] Tao Cheng, Yin Anming, Wang Yufan, et al. Numerical study of depth gauging of surface defects using laser-generated surface acoustic waves [J]. Laser & Infrared, 2019, 49(1): 42 - 50. (in Chinese)

陶程,殷安民,王煜帆,等. 激光激发表面波测量表面缺陷深度的数值研究 [J]. 激光与红外, 2019, 49(1): 42 - 50.

[8] Liou Hui, Zheng Bin, Wang Zhao ba, et al. Time depend-

- ence of laser-induced Rayleigh wave for detecting surface defect depth[J]. *Laser & Infrared*, 2017, 47(6): 669 – 673. (in Chinese)
- 刘辉, 郑宾, 王召巴, 等. 激光瑞利波的时间依赖性探测表面缺陷深度[J]. *激光与红外*, 2017, 47(6): 669 – 673.
- [9] Kenderian, Shant. Phase and dispersion of cylindrical surface waves [J]. *Research in Nondestructive Evaluation*, 2010, 21(4): 224 – 240.
- [10] Sobieszczyk P, Gałazka M, Zieliński P. Effect of radius on propagation of surface waves in coated cylindrical cavities [J]. *Phase Transitions*, 2014, 87(10 – 11): 1018 – 1023.
- [11] Mineo C, Cerniglia D, Pantano A. Surface waves on cylindrical solids: Numerical and experimental study[J]. *Ultrasonics*, 2013, 53(4): 913 – 921.
- [12] Liu Xuekun. Research on detection method based on laser thermoelasticity for surface defect of mechanical parts [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019: 57 – 71. (in Chinese)
- 刘学坤. 基于激光热弹效应的机械零件表面缺陷检测方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019: 57 – 71.
- [13] Shen Zhonghua, Yuan Ling, Zhang Hongchao, et al. *Laser ultrasound in solids* [M]. Beijing: Post & Telecom Press, 2015: 57 – 68. (in Chinese)
- 沈中华, 袁玲, 张宏超, 等. 固体中的激光超声[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2015: 57 – 68.
- [14] Shi Yiwei. *Ultrasonic testing* [M]. Beijing: China Machine Press, 2005: 12 – 14. (in Chinese)
- 史亦韦. 超声检测[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005: 12 – 14.
- [15] Liu X, Yang S, Liu Y, et al. Surface crack identification on a cylinder using the signal enhancement of the scanning laser line source method [J]. *Applied Sciences*, 2018, 8(10): 1796.