

基于激光超声衍射体波的缺陷定位定量检测

张进朋^{1,2}, 秦训鹏^{1,2*}, 袁久鑫^{1,2}, 汪小凯^{1,2}, 曾研^{1,2}

¹武汉理工大学现代汽车零部件技术湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430070;

²武汉理工大学汽车工程学院, 湖北 武汉 430070

摘要 针对大厚度材料内部缺陷的检测问题,利用缺陷对激光超声的衍射作用实现了内部缺陷的定位定量检测。首先利用 Comsol 软件研究了激光超声与内部缺陷的作用过程,建立了激光超声接收信号计算模型。通过激光超声检测系统,对 45 钢试块内部缺陷进行定位定量检测实验。实验结果表明:缺陷检测的定位相对误差在 5% 以内,定量相对误差在 10% 以内。该实验证明了利用激光超声缺陷衍射体波法检测内部缺陷位置和大小可行性,实现了真正意义上的激光激发和接收的非接触检测技术。

关键词 激光光学; 衍射体波; 缺陷检测; 定位定量

中图分类号 TN249

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1214002

Defect Location and Size Detection Based on Laser Ultrasonic Diffraction Bulk Wave

Zhang Jinpeng^{1,2}, Qin Xunpeng^{1,2*}, Yuan Jiuxin^{1,2}, Wang Xiaokai^{1,2}, Zeng Yan^{1,2}

¹Hubei Key Laboratory of Advanced Technology of Automotive Components, Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei 430070, China;

²School of Automotive Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei 430070, China

Abstract Aiming at addressing the problem in detecting the internal defects of large thickness materials, the locations and sizes of internal defects are detected through the diffraction effect of defects on laser ultrasonic. First, the Comsol software is used to study the interaction process between laser ultrasonic and internal defects and we establish the calculation model for received laser ultrasonic signals. Using the laser ultrasonic testing system, an experiment on detecting the locations and sizes of defects in a 45-steel block are conducted. The experimental results show that the relative position and size errors in defect detection are within 5% and 10%, respectively. This experiment proves the feasibility of detecting the locations and sizes of internal defects using the laser ultrasonic diffraction bulk wave method. Furthermore, it achieves a non-contact detection via laser excitation and reception.

Key words laser optics; diffraction bulk wave; defect detection; location and size

OCIS codes 140.3460; 110.7170; 120.4290

1 引 言

在机械零件制造过程中,内部缺陷的存在会极大地降低产品的可靠性,缩短产品的服役寿命,造成安全隐患,因此,对产品内部缺陷的检测就显得极为重要^[1]。目前,对零件内部缺陷的检测方法主要有涡流检测、射线检测及超声检测等^[2-5]。其中超声检测具有检测能力强、操作安全及成本低等优点,但传统的超声检测^[6]都是采用接触式压电换能器收发信号,必须接触被检对象,对检测环境要求严格,不易实

现自动化检测。激光超声^[7]是一种新型的超声检测技术,除具有传统超声的优点外,还可以实现非接触检测,便于自动化扫查,大大缩短了缺陷检测时间。

激光超声检测技术^[8]利用激光辐射材料表面激发出的表面波、体波(纵波和横波)及板波等超声波来检测材料缺陷。目前激光超声对缺陷的检测主要集中在表面缺陷和内部缺陷,前者多采用表面波检测^[9-11],后者则利用体波检测。孙凯华等^[12]提出反射横波双阴影检测法,该方法利用底面对横波的反射及缺陷对反射横波的衰减,实现内部缺陷的检出

收稿日期: 2020-02-12; 修回日期: 2020-03-17; 录用日期: 2020-03-25

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB1106503)

* E-mail: qxp915@hotmail.com

和深度定位。李海洋等^[13]通过搭建激光超声检测平台,利用点光源激发横波信号,完成对圆管型螺纹构件的 B-scan 成像,实现缺陷定位。孙继华等^[14]基于激光声磁检测原理,对有无缺陷的检测对象进行对比实验,获取实验接收信号并对其进行去噪处理,结果表明该方法可以实现缺陷的检测。Zhao 等^[15]采用激光-电磁超声的方法,利用具有热弹机制的横波对内部缺陷进行检测,并根据横波信号确定缺陷位置。Pei 等^[16]建立激光声磁检测系统,研究横波与内部缺陷的相互作用过程,通过接收不同位置的衍射横波来判断缺陷直径。蔡志超等^[17]利用有限元方法分析超声体波的波形转换以及传播,通过电磁超声激发体波的方式,实现了工件内部缺陷的定量检测。Liu 等^[18]通过分析电磁超声爬波的频散特性和衰减特性,研究爬波与空腔的作用过程,实现了基于爬波对构件内部空腔的检测。总之,激光超声在内部缺陷检测方面取得了大量研究成果,但多数采用电磁探头接收信号的形式,并未实现真正的非接触检测。为克服材料厚度过大而造成的底面反射波和透射波难以接收的问题,本文对大厚度材料内部缺陷进行定位定量检测。为实现真正的激光超声非接触检测,采用基于激光激发和接收信号的缺陷衍射体波法。

2 缺陷衍射体波法的分析与仿真

2.1 缺陷定位定量原理

缺陷衍射体波法的检测过程如下:首先选取合适的激发激光和接收激光的间距 W ,并将其固定;移动放置有试块的二维扫描台,实现激光对试块的扫描检测,在检测过程中,激光辐射试块表面,产生烧蚀效应,试块内部产生体波,若存在内部缺陷,则体波在缺陷处发生衍射,衍射体波传播至接收点被接收;最后根据接收信号,判断缺陷的位置和大小。

缺陷衍射体波法检测缺陷位置的原理如图 1 所示。随试块的移动,激光相对试块的位置分别为试块移动的起点、中点及终点。在检测过程中,产生的体波沿 $a_1/b_1/c_1$ 路径传播至缺陷处发生衍射,随后沿 $a_2/b_2/c_2$ 路径传播至接收点。A-scan 图包括沿试块表面传播的掠面纵波(SP 波)、表面波(R 波)及在试块内部传播的衍射体波组(包含多个模式的衍射体波)。由于间距 W 固定,即 SP 波和 R 波的到达时间 t_{SP} 和 t_R 始终保持不变。但随着试块的移动,激光与缺陷的相对位

置发生改变,因此衍射体波的声程变化为远($a_1 + a_2$)—近($b_1 + b_2$)—远($c_1 + c_2$),到达时间的变化为长(t_1)—短(t_2)—长(t_3)。当试块位于图 1(b)位置时,衍射体波声程最近,到达时间最短,此时缺陷位于激发激光和接收激光中点正下方,由此确定了缺陷的横向位置 l ;通过衍射体波的到达时间 t_2 及声速 c_b ,根据固定间距 W 和衍射体波入射路程 b_2 ,即可确定缺陷的深度位置 h 。

$$\begin{cases} b_1 = (c_b t_2) / 2 \\ h = \sqrt{b_1^2 - (W/2)^2} + \Phi / 2 \end{cases}, \quad (1)$$

式中: Φ 为缺陷直径。

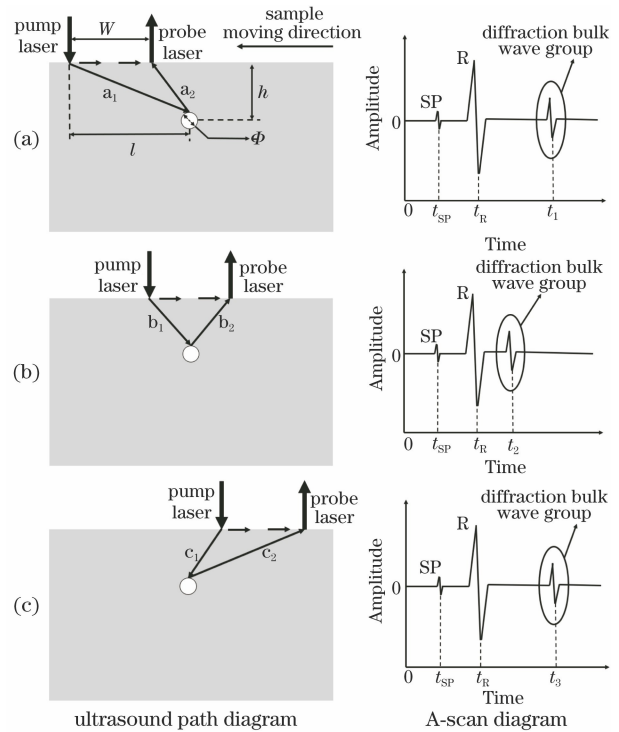


图 1 缺陷位置检测原理图。(a)起点;(b)中点;(c)终点
Fig. 1 Schematic of defect location detection. (a) Starting point; (b) middle point; (c) terminal point

缺陷衍射体波法检测缺陷大小的原理如图 2 所示。激光辐射试块表面,试块内部产生多种模式的衍射体波。其中衍射体波 A 沿 b_1 和 b_2 路径传播;衍射体波 B 沿 d_1/e_1 路径传播至缺陷处,再沿缺陷表面 d_3/e_3 传播,随后沿 d_2/e_2 路径传播至接收点。由于二者声程不同,但声速相近,因此存在到达时间差 Δt 。如图 2 所示,随缺陷直径 Φ 增大,衍射体波 A 的声程和到达时间基本不变,而衍射体波 B 的声程和到达时间均明显增大,因此可根据 Δt 确定缺陷大小。

2.2 激光超声接收信号计算模型

为建立激光超声接收信号计算模型,首先要研

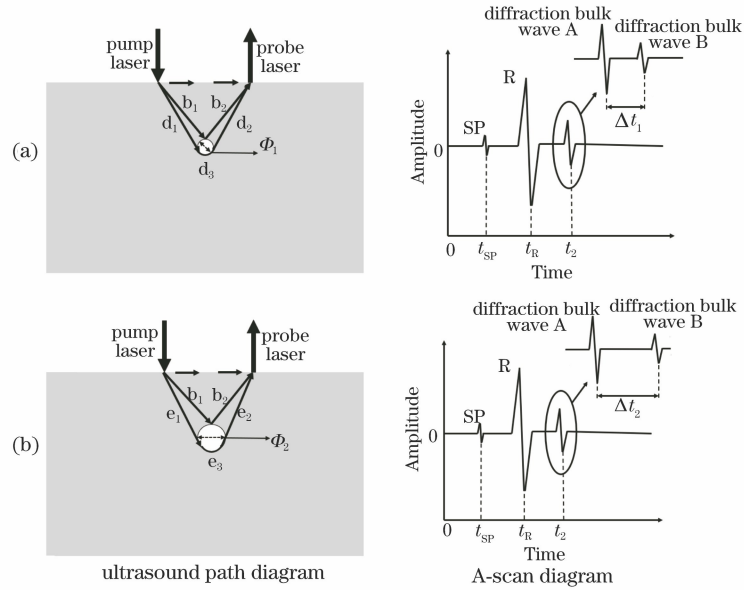


图 2 缺陷大小检测原理图。(a) 直径为 Φ_1 的缺陷检测；(b) 直径为 Φ_2 的缺陷检测

Fig. 2 Schematic of defect size detection. (a) Detection of defect with diameter Φ_1 ; (b) detection of defect with diameter Φ_2

究激光超声与内部缺陷的作用过程,了解激光超声在试块中的传播途径。建立如图 3 所示的 Comsol 有限元仿真模型,以激发激光为原点建立平面直角坐标系,其中激光的脉冲能量为 50 mJ,光源半径为 0.2 mm,脉宽为 10 ns。材料参数为 Comsol 默认的钢材料参数,45 钢试块的长和高分别为 70 mm 和 40 mm。激发点坐标为 (0,0),缺陷圆心坐标为 (7.5,10),缺陷直径为 1 mm。

仿真结果如图 4 所示,其中 L 波表示纵波,S 波表示横波,LL 波表示纵波转纵波,LS 波表示纵波转横波,SS 波表示横波转横波,SL 波表示横波转纵波,SC 波表示横波转爬波,SCS 波表示横波转爬波再转横波。首先 L 波传播至缺陷处发生衍射,产生衍射 LL 波和 LS 波;随后 S 波传播至缺陷处,产生

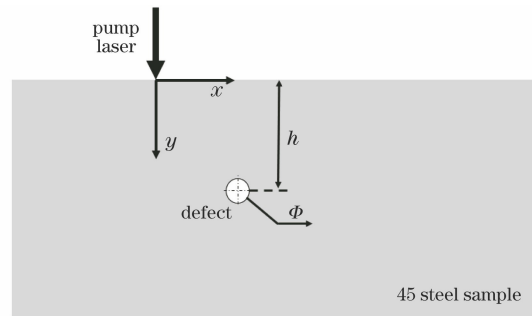


图 3 Comsol 有限元仿真模型示意图

Fig. 3 Schematic of Comsol finite element simulation model

衍射 SS 波和 SL 波,另外部分 S 波会沿缺陷表面传播产生 SC 波;SC 波沿缺陷表面传播一段距离后离开缺陷表面,传播至试块中形成 SCS 波^[17]。

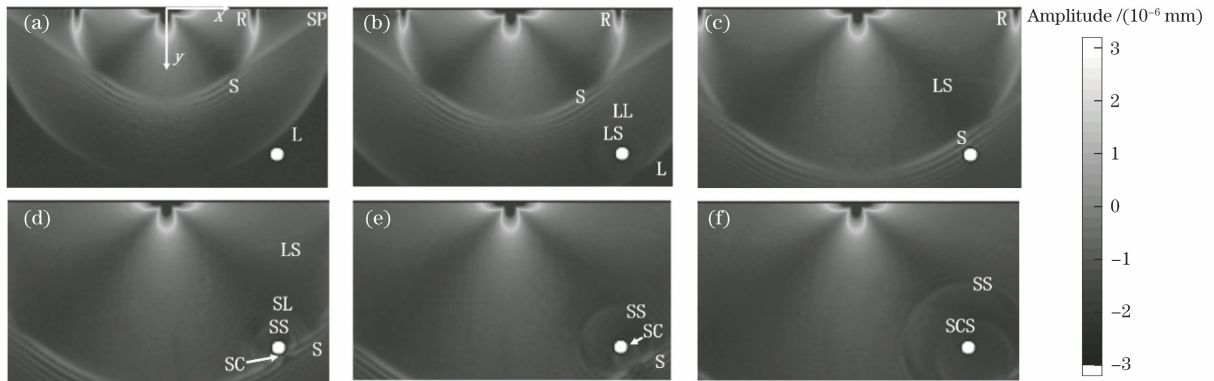


图 4 激光超声与内部缺陷作用过程。(a) $t=2.05 \mu\text{s}$; (b) $t=2.50 \mu\text{s}$; (c) $t=3.60 \mu\text{s}$; (d) $t=4.15 \mu\text{s}$; (e) $t=4.50 \mu\text{s}$; (f) $t=5.00 \mu\text{s}$

Fig. 4 Interaction process between laser ultrasonic and internal defect. (a) $t=2.05 \mu\text{s}$; (b) $t=2.50 \mu\text{s}$; (c) $t=3.60 \mu\text{s}$; (d) $t=4.15 \mu\text{s}$; (e) $t=4.50 \mu\text{s}$; (f) $t=5.00 \mu\text{s}$

根据上述对激光超声与内部缺陷作用过程的分析,可得各模式声波传播示意图,如图 5 所示,由此建立激光超声接收信号计算模型。声波有三条传播路径,其中 SP 波和 R 波经路径 1 传播,LL 波、LS 波、SS 波及 SL 波经路径 2 传播,SCS 波经路径 3 传播。根据各模式声波传播的声程和声速,计算各模式声波的到达时间,即可得出激光超声接收信号的结果。

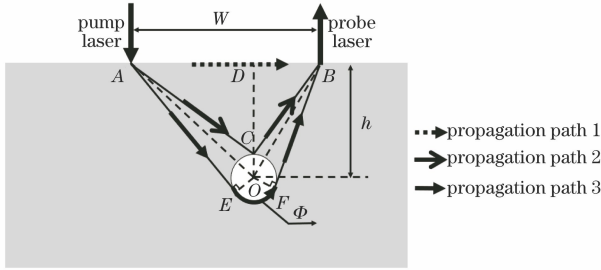


图 5 各模式声波传播示意图

Fig. 5 Schematic of each-mode ultrasonic wave propagation

假设缺陷的位置和大小已知,即缺陷与激发激光的横向距离 L_{AD} 、纵向距离 h 及缺陷直径 Φ 已知,则各模式声波的声程的表达式为

$$\left\{ \begin{array}{l} L_{AO} = \sqrt{L_{AD}^2 + h^2} \\ L_{BO} = \sqrt{(W - L_{AD})^2 + h^2} \\ L_{AC} = \sqrt{L_{AD}^2 + (h - \Phi/2)^2} \\ L_{CB} = \sqrt{(W - L_{AD})^2 + (h - \Phi/2)^2} \\ L_{AE} = \sqrt{L_{AO}^2 - (\Phi/2)^2} \\ L_{FB} = \sqrt{L_{BO}^2 - (\Phi/2)^2} \\ L_{EF} = \left[2\pi - \arctan \frac{L_{AE}}{\Phi/2} - \arccos \left(\frac{L_{AO}^2 + L_{BO}^2 - W^2}{2L_{AO}L_{BO}} \right) - \arctan \frac{L_{FB}}{\Phi/2} \right] \times (\Phi/2) \end{array} \right. \quad (2)$$

各模式声波的到达时间的表达式为

$$\left\{ \begin{array}{l} t_{SP} = W/c_L \\ t_R = W/c_R \\ t_{LL} = (L_{AC} + L_{CB})/c_L \\ t_{LS} = L_{AC}/c_L + L_{CB}/c_S \\ t_{SS} = (L_{AC} + L_{CB})/c_S \\ t_{SL} = L_{AC}/c_S + L_{CB}/c_L \\ t_{SCS} = (L_{AE} + L_{EF} + L_{FB})/c_S \end{array} \right. \quad (3)$$

式中: c_L 、 c_R 、 c_S 分别为 L 波、R 波、S 波声速。因 SP 波和 L 波、SCS 波和 S 波声速相近,故假设 $c_{SP} = c_L$ 、

$$c_{SCS} = c_S^{[18]}。$$

设待检测对象为含缺陷的 45 钢试块,扫查形式如图 6(a) 所示,其中 $l = 7.5 \text{ mm}$, $h = 10 \text{ mm}$, $\Phi = 1 \text{ mm}$,固定激发激光位置,移动接收激光使 W 在 $0 \sim 20 \text{ mm}$ 内变化。根据表 1 中 45 钢的声速,在 Matlab 中联合(2)、(3)式,即可得出图 6(b) 所示的计算结果。

表 1 45 钢各模式声波的声速

Table 1 Sound speed of each-mode ultrasonic wave in 45 steel

Wave	L wave	S wave	R wave
Speed / (m·s ⁻¹)	5900	3200	2900

在 Comsol 中对 45 钢试块进行同样激发固定接收移动的有限元仿真,仿真结果如图 7(a) 所示。对比图 7(a) 和图 6(b) 可知,除图 7(a) 中 LS 波和 SL 波因被 R 波掩盖而区分不明显外,其他声波一致性较高。为排除 R 波对 LS 波和 SL 波的干扰,在 Comsol 中对无缺陷的 45 钢试块进行同样的有限元仿真,仿真结果如图 7(b) 所示。将有缺陷的 B-scan 仿真结果与无缺陷的 B-scan 仿真结果作差,即可消去 SP 波和 R 波,避免 R 波对 LS 波和 SL 波的干扰,结果如图 7(c) 所示,图中 LS 波和 SL 波清晰可见,且与图 6(b) 保持一致。综上所述,计算结果与有限元仿真结果具有高度一致性,所建立的激光超声接收信号计算模型可以为实验检测参数的选取提供可靠保证。

2.3 检测参数的选取及仿真分析

利用衍射体波对试块内部缺陷进行定位定量检测时,首先要选择合适的定位检测声波和定量检测声波。定位检测声波在时间上必须与其他模式的声波有明显的时间差,以便与其他声波区分;在幅值上必须有高幅值和高信噪比,以便被观测到。综合以上两点,从图 6(b) 和图 7 可知,SS 波与其他声波有明显时间差,且与其他衍射体波相比,具有较高的幅值和信噪比,因此选择 SS 波作为定位检测声波。由前面理论介绍可知,定量检测声波除满足定位检测声波的要求外,还必须是沿缺陷表面传播的声波,因此选择 SCS 波作为定量检测声波。

对于间距 W 的选取,考虑检测声波到达时间与其他声波(主要是 R 波)到达时间的差越大越好,根据图 6(b) 可知, W 越小越好;但 W 过小时,会发生干涉,并产生强烈的干涉波,无法对其进行检测,因此 W 不能过小。综合以上两点,取间距 W 为 5 mm。

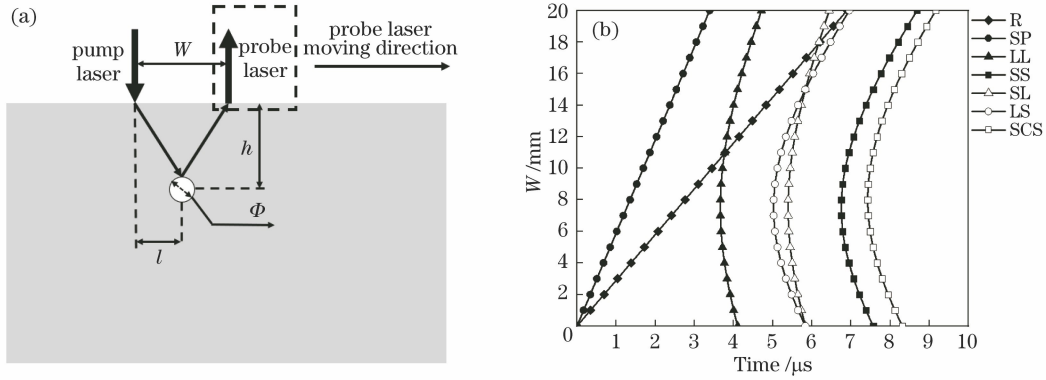


图 6 激发激光固定和接收激光移动的扫查示意图和计算结果。(a)扫查形式示意图;(b)接收信号计算结果

Fig. 6 Scanning schematic and calculation results when pump laser fixed and probe laser movable.

(a) Schematic of scanning form; (b) calculation results of received signals

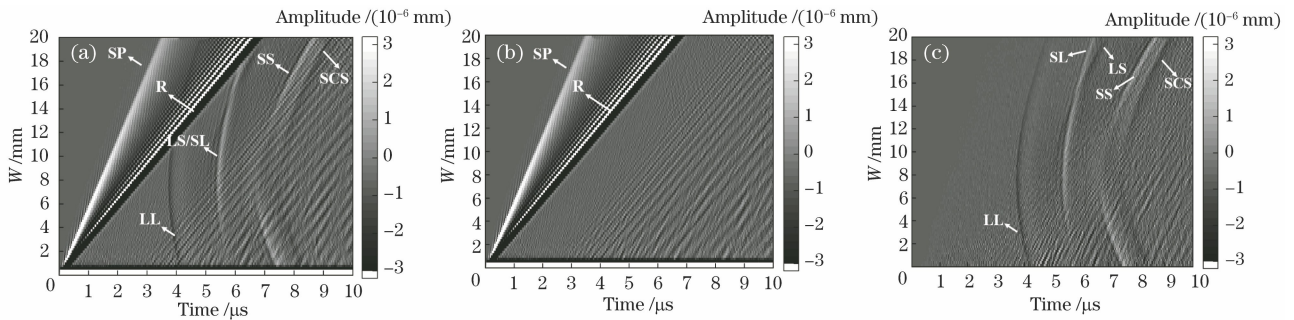


图 7 激发激光固定和接收激光移动的有限元仿真结果。(a)有缺陷的 B-scan 结果;(b)无缺陷的 B-scan 结果;

(c)有与无缺陷的 B-scan 结果的差

Fig. 7 Finite element simulation results when pump laser fixed and probe laser movable. (a) B-scan result with defects;

(b) B-scan result without defects; (c) difference between B-scan results with and without defects

设待检测对象为 3 个含不同缺陷的 45 钢试块, 缺陷参数如表 2 所示, 扫查形式如图 8(a) 所示, 间距 W 固定为 5 mm, 激发激光的起始位置与缺陷的横向距离 l 为 12.5 mm, 同时移动激发激光和接收激光, 移动距离为 0~20 mm。结果如图 8(b)~(d) 所示, 其中激发和接收激光移动距离 d 为扫查距离。当 SS 波到达时间最短时, 缺陷位于激发激光和接收激光中点正下方, 由此可以确定缺陷的横向位置; 随缺陷深度的增大, SS 波的到达时间增大, 由此可以确定缺陷的深度位置; 随缺陷直径的增大, SS 波和 SCS 波到达的时间差增大, 由此可以确定缺陷的直径。综上所述, 此检测参数可以实现缺陷的定位定量检测。

表 2 45 钢试块内部缺陷参数

Table 2 Parameters of internal defects in 45 steel block

Block No.	1	2	3
h /mm	10	5	10
Φ /mm	1	1	2

3 实验验证与结果分析

3.1 缺陷衍射体波检测实验

利用激光超声衍射体波法对试块内部缺陷进行定位定量检测的实验系统如图 9 所示。激光激发源是一个 Nd:YAG 激光器, 可以产生波长为 1064 nm、脉宽为 10 ns 的脉冲激光, 通过激发控制器将其脉冲能量和重复频率设置为 50 mJ 和 50 Hz, 该激光经过反光镜和聚焦镜后成为线激光, 辐射在试块上激发声波。激光接收源是一个 QUARTET 接收器, 可以产生波长为 532 nm 的持续激光, 实现声波的接收。待检测试块放置在移动平台上, 实现移动的扫查。

c_s 对缺陷检测结果的影响较大, 为保证结果的准确性, 首先利用透射法来测量 c_s 。将激发激光和接收激光分置于厚度 h_s 为 11.80 mm 的 45 钢试块两侧, 激发激光固定在点 O , 接收激光从 O 点正对点 A 的左侧 10 mm 处开始从左向右扫查, 扫查距离为 20 mm, 如图 10(a) 所示, 结果如图 10(b) 所

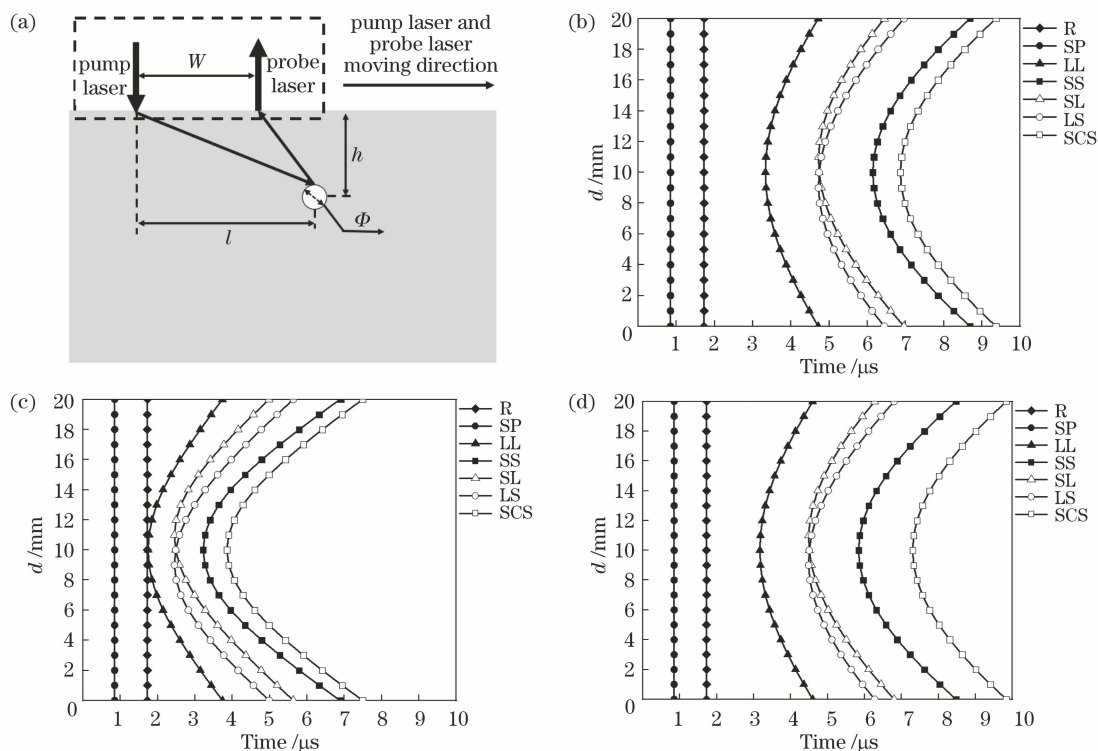


图 8 激发激光和接收激光同时移动的扫描示意图和接收信号计算结果。(a)扫描形式示意图；(b)试块 1；(c)试块 2；(d)试块 3

Fig. 8 Scanning schematic and calculation results of received signals when pump laser and probe laser simultaneously movable.

(a) Schematic of scanning form; (b) block 1; (c) block 2; (d) block 3

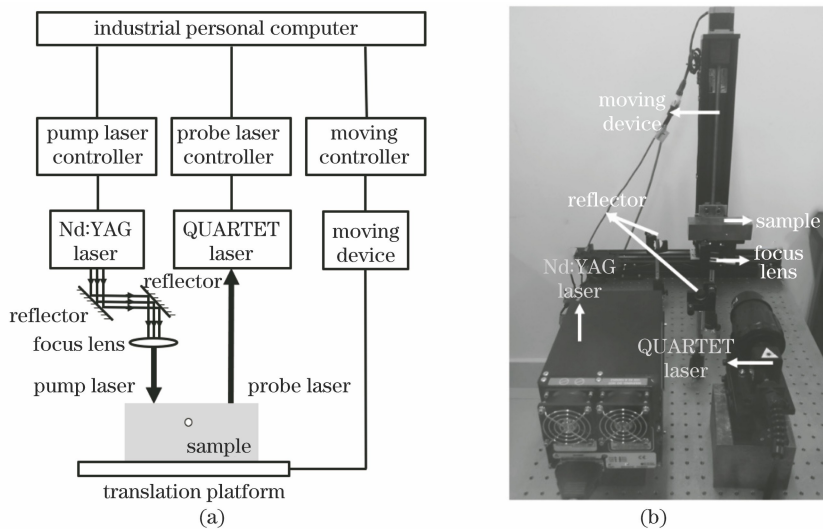


图 9 激光超声检测系统。(a)系统示意图；(b)系统实验图

Fig. 9 Laser ultrasonic detection system. (a) Schematic of system; (b) experimental image of system

示。为保证 c_s 的准确性，取 A、B、C 三点处的信号计算，三点间隔 l_s 为 4 mm。由实验结果可知，A、B、C 三点横波到达的时间依次是 $3.79 \mu s$ 、 $3.90 \mu s$ 、 $4.42 \mu s$ ，且已知 OA、OB、OC 的距离，计算三点的声速，再取平均值，得 c_s 为 3177.87 m/s 。

待检测试块如图 11 所示，材料为 45 钢，长宽高

分别为 150 mm、50 mm、40 mm，在试块上钻有三个间隔为 30 mm 的横通孔，用游标卡尺多次测量缺陷的深度和直径，从左向右缺陷的平均深度为 9.98、5.92、10.32 mm，平均直径为 1.18、1.14、2.24 mm。

利用缺陷衍射体波法检测试块内部缺陷的扫描方式如图 12 所示。以检测第一个缺陷为例，首

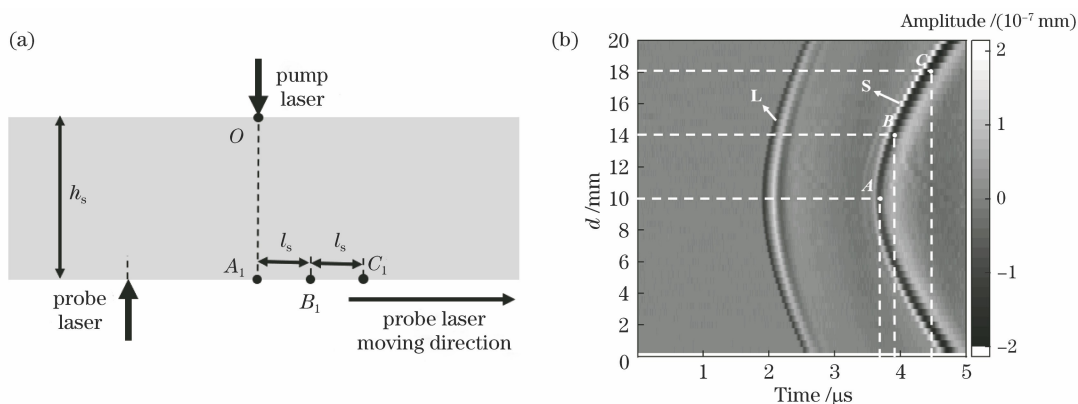


图 10 横波波速测量实验。(a)实验示意图;(b)实验结果

Fig. 10 Experiment on shear wave velocity measurement. (a) Experimental diagram; (b) experimental result

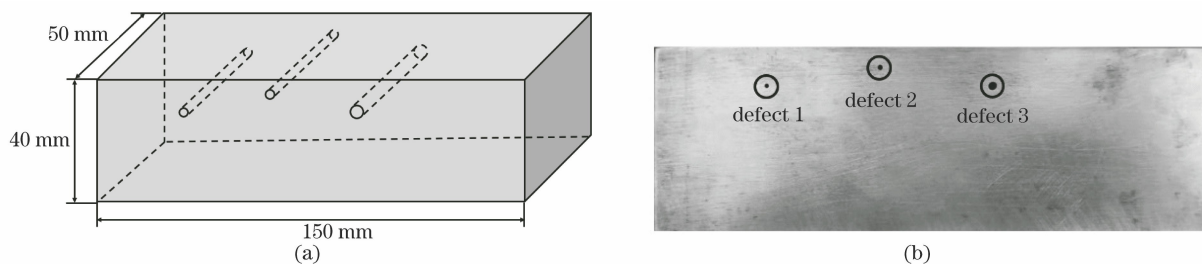


图 11 待检测 45 钢试块图。(a)三维示意图;(b)实物图

Fig. 11 Diagram of 45 steel block to be detected. (a) Three-dimensional diagram; (b) physical diagram

先将激发激光和接收激光的间距 W 固定为 5 mm, 同时使得激发激光与缺陷中心的横向距离 l_1 为 12.5 mm, 固定激光不动, 按图示方向利用二维扫查仪移动试块实现试块的扫查检测, 其中扫查步长

为 0.02 mm, 总距离为 20 mm, 在检测过程中每个扫查点采集 50 次信号后, 对结果进行平均再记录, 从而提高信噪比, 最后根据记录的数据绘制 B-scan 结果图。

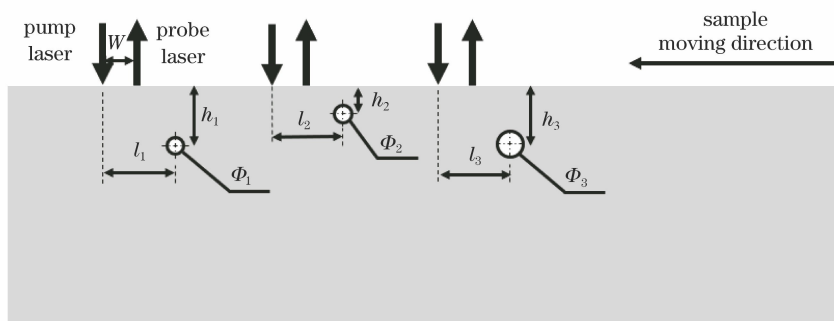


图 12 激光超声衍射体波法检测缺陷的扫查示意图

Fig. 12 Scanning schematic of defects detected by laser ultrasonic diffraction bulk wave method

3.2 实验结果分析

对试块缺陷进行定位定量检测实验的结果如图 13 所示。对比图 8 的计算结果和图 13 的实验结果可知, 除缺陷 1 的 LS 波与 SL 波交杂在一起而难以区分外, 其余声波均可观察到, 由于计算时的缺陷参数与实际实验时的缺陷参数有所差别, 因此声波的到达时间略有不同, 但声波的形状保持高度一致, 再次证明激光超声接收信号计算模型的准确性。

通过各缺陷的扫查结果来看, 各缺陷衍射体波在 B-scan 图中为开口向右的抛物线状, 由理论分析可知, 仅需确定 SS 波和 SCS 波在某一扫查距离下的到达时间, 即可计算出缺陷的位置和大小。考虑计算的简单性和准确性, 取 SS 波和 SCS 波抛物线的顶点进行计算, 即图 13 中的点 A 和点 B, 其中点 A 和点 B 的纵坐标代表扫查距离, 点 A 和点 B 的横坐标分别代表该扫查距离下 SS 波和 SCS 波的到

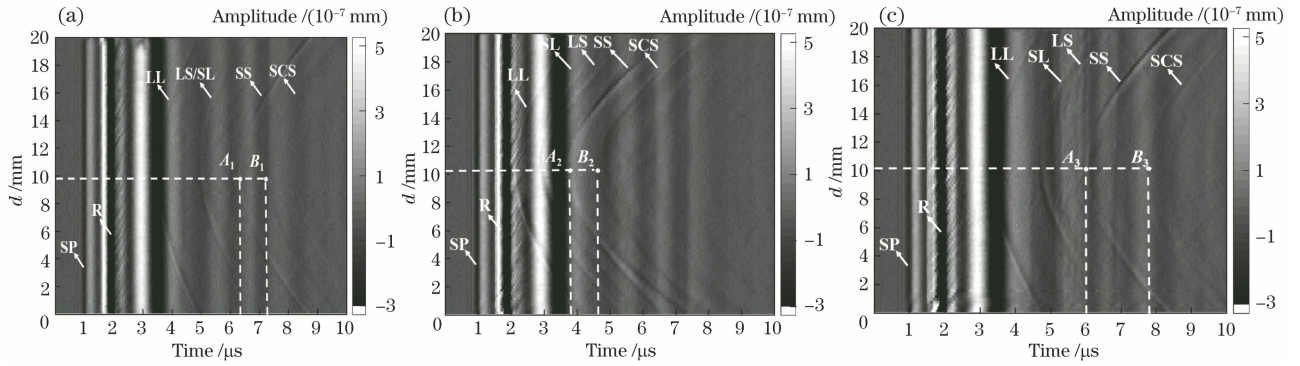


图 13 各缺陷 B-scan 实验结果图。(a)缺陷 1;(b)缺陷 2;(c)缺陷 3

Fig. 13 Experimental results of B-scan for each defect. (a) defect 1; (b) defect 2; (c) defect 3

达时间。具体数据如表 3 所示。

表 3 不同扫描距离下 SS 波和 SCS 波到达时间

Table 3 Arrival time of SS wave and SCS wave at different scanning distances

Defect No.	1	2	3
d / mm	9.80	10.20	10.10
$t_{SS} / \mu\text{s}$	6.32	3.82	6.00
$t_{SCS} / \mu\text{s}$	7.26	4.66	7.80

在该扫描距离下,缺陷位于激发激光和接收激光中点的正下方,即图 14 所示位置。通过表 3 中的扫描距离 d 及 SS 波、SCS 波的到达时间 t_{SS} 、 t_{SCS} ,已知固定间距 W 和声速 c_s ,根据(4)式,即可求出缺陷的横向位置 l 、深度位置 h 和直径 Φ 。

$$\begin{cases} l = d + W/2 \\ (c_s t_{SS}/2)^2 = (W/2)^2 + (h - \Phi/2)^2 \\ L_{AO} = \sqrt{(W/2)^2 + h^2} \\ c_s t_{SCS}/2 = \sqrt{L_{AO}^2 - (\Phi/2)^2} + \left[\pi - \arccos \frac{h}{L_{AO}} - \arccos \frac{\Phi}{2L_{AO}} \right] (\Phi/2) \end{cases} \quad (4)$$

根据上述理论对各参数进行计算,结果如表 4 所示,最后将测量结果与实际数值进行比较,并计算相对误差,结果如图 15 所示。实验结果表明:基于激光超声缺陷衍射体波法的缺陷定位定量检测具有可行性,缺陷的横向位置、深度位置及直径均可检测得出,其中定位相对误差(包括横向位置误差和深度位置误差)在 5% 以内,定量相对误差(直径误差)在 10% 以内。

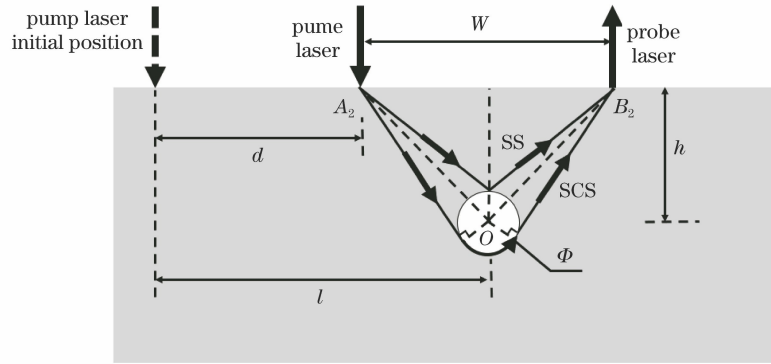


图 14 缺陷位置和大小计算示意图

Fig. 14 Schematic of calculation of defect location and size

表 4 缺陷衍射体波法检测实验计算结果

Table 4 Experimental results from defect diffraction bulk wave detection method

Defect No.	1	2	3
l / mm	12.30	12.70	12.60
h / mm	10.37	6.15	10.41
Φ / mm	1.28	1.24	2.43

根据上述检测原理和实验过程,可以看出,激光超声缺陷衍射体波法能够实现直径为 1 mm 以上缺陷的定位定量检测,但当缺陷直径过小时,SS 波与 SCS 波发生混叠,缺陷定量检测存在困难。造成缺陷检测误差的原因是激发激光和接收激光间距 W 、激发激光初始激发位置和缺陷的横向距离 l 并非绝对精确。对于定量误差过大的问题,一方面是因为缺陷的直径在 1~2 mm,而位置均大于 5 mm,在绝

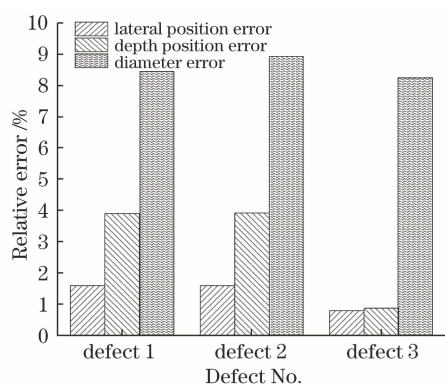


图 15 缺陷衍射体波法检测的相对误差结果图

Fig. 15 Relative errors from defect diffraction bulk wave detection method

对误差一样的情况下,定量的相对误差大于定位的相对误差;另一方面是 c_{scs} 难以测量,在计算定量误差时,只能将 c_{scs} 近似为 c_s ,但实际上二者略有不同,后续将进一步研究 SCS 波声速的实验方法,并进行实验验证。

由上可见,激光超声缺陷衍射体波法能够实现大厚度工件内部缺陷的非接触检测,而且检测结果可以满足缺陷的定位定量精度要求。随着激光超声检测技术的发展,与其他常规超声检测方法相比,所提方法更易实现工件的自动化检测,且无需与工件接触,大大提高了工件的在线检测效率,在工业无损检测领域有非常广阔的应用前景。

4 结 论

采用激光激发和接收信号的非接触检测形式,基于缺陷衍射体波的原理,实现了大厚度材料内部缺陷的定位定量检测。在 Comsol 中建立了激光超声与内部缺陷相互作用的有限元仿真模型,分析了激光超声与内部缺陷的作用过程和传播路径,初步证明了利用缺陷衍射体波法检测内部缺陷的可行性。根据有限元仿真结果,建立了激光超声接收信号的计算模型,通过计算模型,将 SS 波和 SCS 波分别确定为定位检测声波和定量检测声波,并且确定了激发激光和接收激光的最佳间距为 5 mm,同时计算结果再次证明了缺陷衍射体波法检测内部缺陷的可行性。通过激光超声检测系统对 45 钢试块内部缺陷进行了定位定量检测实验,实验结果表明,缺陷检测的定位相对误差在 5% 以内,定量相对误差在 10% 以内。

参 考 文 献

[1] Zhang Y L, Zhang H C, Zhao J X, et al. Review of

non-destructive testing for remanufacturing of high-end equipment [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(7): 80-90.

张元良, 张洪潮, 赵嘉旭, 等. 高端机械装备再制造无损检测综述 [J]. *机械工程学报*, 2013, 49(7): 80-90.

- [2] Hamia R, Cordier C, Dolabdjian C. Eddy-current non-destructive testing system for the determination of crack orientation [J]. *NDT & E International*, 2014, 61: 24-28.
- [3] Chen G L, Zhang W M, Pang W H. Koch curve fractal geometry excitation probe for eddy current non-destructive testing [J]. *Measurement*, 2018, 124: 470-478.
- [4] Wu G H, Xiong H J. Radiography testing in China [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2016, 37(8): 1683-1695.
- 邬冠华, 熊鸿建. 中国射线检测技术现状及研究进展 [J]. *仪器仪表学报*, 2016, 37(8): 1683-1695.
- [5] Lyonnet F, Cassereau D, Cugnet M F. Parametric study of an ultrasonic non-destructive testing problem based on the reciprocity principle and a hybrid numerical method [J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2015, 138(3): 1939.
- [6] Trtnik G, Gams M. Recent advances of ultrasonic testing of cement based materials at early ages [J]. *Ultrasonics*, 2014, 54(1): 66-75.
- [7] Lévesque D, Asaumi Y, Lord M, et al. Inspection of thick welded joints using laser-ultrasonic SAFT [J]. *Ultrasonics*, 2016, 69: 236-242.
- [8] Sun K H, Shen Z H, Shi Y F, et al. Non-destructive detection of small blowholes in aluminum by using laser ultrasonics technique [J]. *International Journal of Thermophysics*, 2015, 36(5/6): 1181-1188.
- [9] 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.
- [10] Guo R P, Liu J H, Wang H T. Application of laser ultrasonic technique for non-contact detection of angled surface defects [J]. *Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 2018, 35(5): 858-865.
- [11] Guo H L, Zheng B, Liu H. Numerical simulation and experimental research on interaction of micro-defects and laser ultrasonic signal [J]. *Optics & Laser Technology*, 2017, 96: 58-64.
- [12] Sun K H, Shen Z H, Li Y L, et al. Inspection of material internal defects using double shadow method

- based on laser ultrasonic reflected shear waves [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(7): 0710001.
孙凯华, 沈中华, 李远林, 等. 材料内部缺陷的激光超声反射横波双阴影检测方法 [J]. 中国激光, 2018, 45(7): 0710001.
- [13] Li H Y, Li Q X, Wang Z B, et al. Positioning detection of defects in thread of tubular member by laser ultrasonic [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(10): 101202.
李海洋, 李巧霞, 王召巴, 等. 圆管构件螺纹处缺陷的激光超声定位检测 [J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(10): 101202.
- [14] Sun J H, Zhao Y, Ma J, et al. Research on laser-EMA ultrasonic detection system for the defects of rail screw hole [J]. Journal of Optoelectronics•Laser, 2014, 25(6): 1165-1170.
孙继华, 赵扬, 马健, 等. 钢轨螺孔伤损激光声磁检测系统研究 [J]. 光电子•激光, 2014, 25(6): 1165-1170.
- [15] Zhao Y, Sun J H, Ma J, et al. Application of the hybrid laser ultrasonic method in rail inspection [J]. Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 2014, 56(7): 360-366.
- [16] Pei C X, Fukuchi T, Zhu H T, et al. A study of internal defect testing with the laser-EMAT ultrasonic method [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 2012, 59(12): 2702-2708.
- [17] Cai Z C, Zhang C. Research on internal hole-type defect detecting by electromagnetic ultrasonic bulk wave [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2017, 30(1): 64-70.
蔡智超, 张闯. 电磁超声体波方法对内部孔洞缺陷检测研究 [J]. 传感技术学报, 2017, 30(1): 64-70.
- [18] Liu S Z, Dong S, Zhang Y W, et al. Defect detection in cylindrical cavity by electromagnetic ultrasonic creeping wave [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2017, 54(3): 6200305.