

激光超声结合电磁超声在铝板无损检测中的应用研究

谷艳红¹, 张振振^{2*}, 高先和¹, 石朝毅¹, 卢军¹, 张胜¹, 周泽华¹

¹合肥学院先进制造工程学院, 安徽合肥 230601;

²齐鲁工业大学(山东省科学院), 山东省科学院激光研究所, 山东济南 250103

摘要 为了检测金属材料生产、使用过程中的厚度损失及表面裂缝损伤,对比分析了激光干涉仪和电磁超声换能器(EMAT)对金属激光超声信号探测的准确度和实用性。采用激光干涉仪表面波信号与纵波信号相结合的方法探测了铝板厚度,并根据背面纵波信号测量了铝板表面裂痕缺陷深度;采用 EMAT 表面波信号确定铝板裂痕缺陷的位置,纵波信号确定铝板的厚度。结果表明,相比激光干涉仪的复杂激光超声信号接收光路,EMAT 铝板测厚及裂痕缺陷位置检测的误差均在 4% 以下,且裂痕缺陷位置的预测值不会随着表面裂痕缺陷深度的减小而增加。可见,采用激光超声与电磁超声相结合的方法可有效地降低检测条件的复杂性,提高激光超声的实用性。

关键词 测量; 激光超声; 电磁超声; 无损检测; 测厚; 缺陷

中图分类号 O426.9

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.0504002

Application of Nondestructive Detection of Aluminum Using Laser Ultrasonic Technology and EMAT Method

Gu Yanhong¹, Zhang Zhenzhen^{2*}, Gao Xianhe¹, Shi Chaoyi¹, Lu Jun¹,
Zhang Sheng¹, Zhou Zehua¹

¹Institute of Advanced Manufacturing Engineering, Hefei University, Hefei, Anhui 230601, China;

²Laser Institute, Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences), Jinan, Shandong 250103, China

Abstract In this study, we compare the accuracy and applicability of laser interferometer and electromagnetic acoustic transducer (EMAT) with respect to the detection of the metal laser ultrasonic signals to detect the thickness loss and surface-breaking cracks with respect to the metals during the production and usage processes. The surface and longitudinal wave signals were detected using the laser interferometer for predicting the thickness of the aluminum plate, and the longitudinal wave signal on the back of the aluminum plate was detected using the laser interferometer to detect the depth of the defect. Surface wave signal of EMAT is used to determine the position of crack defect of aluminum plate, and longitudinal wave signal of EMAT is used to determine the thickness of aluminum plate. The results show that, compared with the laser interferometer's complex laser ultrasonic signal receiving optical path, the errors of EMAT aluminum plate thickness measurement and crack defect location detection are less than 4%. And the prediction of the crack location will not increase with the decrease of the surface crack depth. Furthermore, the obtained results prove that the combination of the laser ultrasonic technology and the EMAT method can effectively reduce the complexity associated with the detection conditions and improve the applicability of laser ultrasonic technology.

Key words measurement; laser ultrasonic technology; electromagnetic acoustic transducer; nondestructive detection; thickness; defect

OCIS codes 120.4630; 280.3375; 170.7180; 170.7170; 110.7170

1 引言

人类文明的发展和社会的进步与金属材料的使

用密切相关。火车钢轨、航空航天、汽车制造等领域对生产加工的机械零件的厚度精准度有较高要求,同时随着时间的反复循环使用,零件上也会产生细小

收稿日期: 2019-11-22; 修回日期: 2019-12-18; 录用日期: 2019-12-24

基金项目: 安徽高校省级自然科学基金项目重点项目(KJ2018A0547)、合肥学院人才科研基金项目(18-19RC47)

* E-mail: 869027626@qq.com

裂痕甚至断裂,造成一定的经济损失甚至危害人身安全,因此需要对金属材料加工及使用过程中的厚度及裂痕损伤进行实时检测^[1-2]。激光超声技术是利用脉冲激光在样品中激励出较好方向性的超声波,再通过样品内部激光超声的检测实现对样品材料的无损检测及特性评价^[3-4]。相比于空气耦合超声、电磁超声,激光超声技术可以实现超声波的非接触产生和非接触接收,以及快速、实时、高精度探测分析^[5-6]。

传统激光超声技术采用激光干涉仪接收激光超声波信号,可实现金属样品的厚度测量及裂痕缺陷检测^[7-8]。但激光干涉仪内部结构复杂,对检测环境稳定性要求较高,一定程度上限制了激光超声技术的应用^[9]。采用电磁超声换能器(EMAT)的超声信号接收部分接收脉冲激光激励样品产生的超声波,可降低激光超声技术光路的复杂性,降低检测费用^[10-11]。目前,电磁超声技术已被较为广泛地应用于多种金属材料的质量检测中^[12-14]。Finkel等^[15]利用激光超声技术对薄金属板进行了裂痕缺陷检测,验证了电磁超声对金属薄板缺陷的检测能力。Ribichini等^[16]利用多种电磁超声换能器分析了超声波在钢材中的传输方式,建立了不同换能器的有限元传输模型,并利用仿真结果验证了模型的准确性。杨理践等^[17]研究了电磁超声在铝板裂痕缺陷检测中的应用,为超声波接收的优化提供了理论依据。

本文采用脉冲激光激励铝板样品产生激光超声波,再采用激光干涉仪和 EMAT 两种信号接收方式搭建铝板样品激光超声接收系统,优化激光超声接收参数,对比分析激光干涉仪和 EMAT 两种信号接收方式下的铝板厚度及表面损伤的检测精度,探索在复杂环境下基于激光超声的样品厚度及损伤等性能在线检测的最佳方法。

2 实验系统

高功率的脉冲激光垂直入射至样品表面,部分脉冲激光能量被样品材料表面吸收并转化为其内部热能,样品表面的温度迅速升高,受到热膨胀的影响样品中会产生对应的应变场和应力场,进而激发产生超声波,通过分析超声波波速与传播时间来反演超声波传播距离,反演测量样品厚度及表面损伤位置。本文实验采用的激光超声激励源为 1064 nm 脉冲激光,能量为 80 mJ,脉冲宽度为 15 ns,聚焦透镜焦距为 100 mm,聚焦光斑直径约为 1 mm。当脉冲激光入射至待测样品表面时,样品中将产生激光超声表面波及纵波信号,实验对比分析激光干涉仪

和 EMAT 两种激光超声信号接收方式下,激光超声对铝板厚度及表面损伤的检测精度。

图 1 为两种不同超声信号接收方式下,铝板表面损伤超声波信号探测装置示意图。图中:为了减小激光脉冲对待测铝板样品的损伤,铝板样品放置于步进电机平台上,由数字延迟脉冲发生器(DG535)控制步进电机与激光脉冲的运动;EMAT 是由电磁铁、高频线圈组成的集成信号接收器,当待测样品表面质点因超声波传输而产生振动时,EMAT 产生感应电压,进而将接收信号转化成对应的激光超声信号;激光干涉仪内部的连续光纤激光器产生的激光波长为 1550 nm,经由分束镜平分为探测光和参考光,分别入射至样品表面和光折变晶体内部。探测光经由样品表面反射后成为物光,在光折变晶体内部与参考光发生相干叠加,形成折射率光栅。当折射率光栅接收到超声波信号时,物光相位发生变化从而与参考光发生干涉,干涉信号经激光超声检测探头探测后传输至示波器。

3 结果与讨论

3.1 激光干涉仪接收激光超声信号

为了提高激光超声信号的稳定性和信噪比,本文实验测量的激光超声信号数据为 64 次激光脉冲信号的平均数据。图 2 所示为激光干涉仪接收的铝板样品激光超声测厚信号。由图 2 可以看出,0~4 μs 内的信号是激发脉冲电磁信号,4 μs 之后的第一个峰值信号是激光干涉仪接收的样品表面波传输信号,第二个峰值信号则是激光干涉仪接收的样品纵波反射信号。

激光干涉仪物光聚焦点的位置会影响表面波信号的幅值大小,图 3 为表面波幅值大小随着物光聚焦点位置(LTSD)的变化,其中,聚焦透镜平面位置被设置为 0。由图 3 可以看出,当聚焦透镜距离样品 88 mm 时,表面波信号幅值最大,因此在实验探测样品厚度和损伤位置时聚焦透镜距离样品的位置被固定为 88 mm。

实验采用激光干涉仪探测了厚度分别为 16, 20, 23, 25, 30 mm 的 5 种铝板样品的激光超声信号。测量得表面波在铝板中的传播速度 v_1 相对固定为 3000 m/s,纵波在铝板中的传播速度 v_2 为 6460 m/s。通过第一个表面波峰值信号的探测时间 t_1 可以计算出激光干涉仪与脉冲激光的间隔 l_0 ,纵波信号在底部界面反射后被接收为第二个峰值信号,对应时间 t_2 ,铝板厚度 d 的计算式为

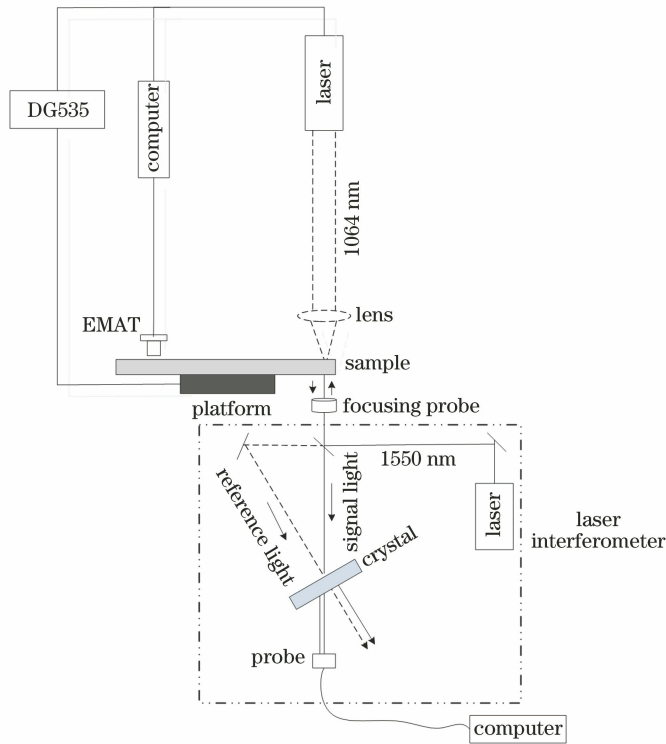


图 1 两种不同激光超声信号接收方式的实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of experimental setup with two different laser ultrasonic receiving methods

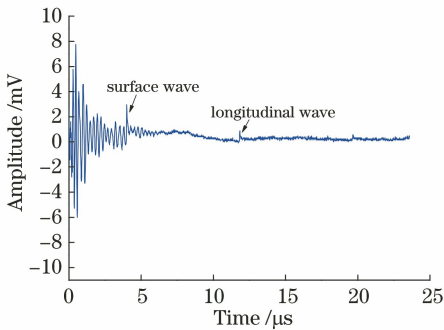


图 2 激光干涉仪接收到的典型铝板测厚激光超声信号
Fig. 2 Typical laser ultrasonic signal of aluminum plate thickness measurement by laser interferometer

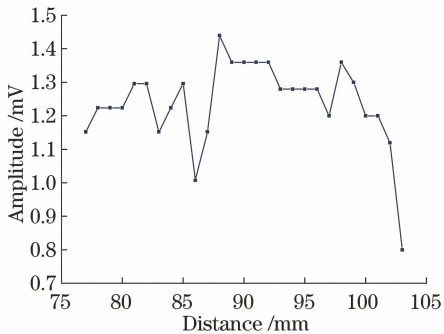


图 3 表面波幅值与物光聚焦点位置的关系曲线
Fig. 3 Relation curve between surface wave amplitude and LTSD

$$d = \frac{1}{2} \times \sqrt{(v_2 \times t_2)^2 - (v_1 \times t_1)^2} \quad (1)$$

表 1 为 5 种铝板样品的厚度测量结果及相对误差。由表 1 可知,利用激光干涉仪接收激光超声信号可实现铝板厚度的准确测量,测量相对误差随着铝板厚度的增加而逐渐减小,即铝板越厚,厚度测量的精度越高。

表 1 激光干涉仪铝板厚度测量结果

Table 1 Thickness measurement results for the aluminum plates by laser interferometer

Sample thickness / mm	$t_1/\mu\text{s}$	$t_2/\mu\text{s}$	Calculated thickness / mm	Relative error / %
16	4.12	5.51	16.69	4.31
20	4.12	6.72	20.81	4.04
23	4.12	7.63	23.86	3.73
25	4.12	8.25	25.92	3.68
30	4.12	9.81	31.08	3.59

为了研究激光超声在样品损伤探测中的应用,实验探测了具有 3 个人工缺陷铝板样品的激光超声信号,其中铝板样品为 100 mm×100 mm×36 mm 的立方体,人工缺陷均位于铝板样品表面,分别距离左边缘 22 mm,50 mm 和 88 mm,三个人工缺陷分别是 16 mm×16 mm×6 mm、12 mm×12 mm×4 mm 及 6 mm×6 mm×2 mm 的立方空心槽,缺陷

实际位置如图 4 所示。

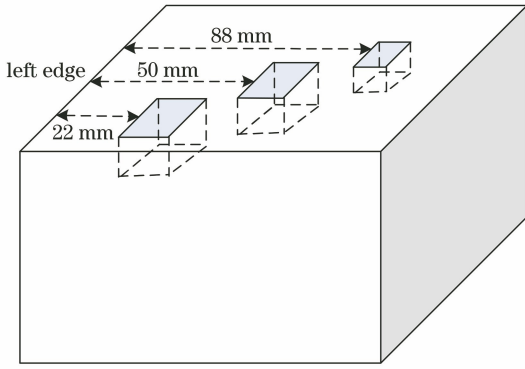


图 4 人工缺陷铝板样品示意图

Fig. 4 Schematic of artificial defective aluminum plate sample

为了更直观探测人工缺陷的激光超声信号,采用激光干涉仪背面探测铝板激光超声纵波信号。图 5 为在 16 mm×16 mm×6 mm 人工缺陷背面探测到的激光超声纵波信号,由图 5 可知,激光超声纵波信号将在铝板样品中来回反射直至强度衰减为 0。由于相邻激光超声纵波信号的传播路程相同,因此相邻激光超声纵波信号的时间差相同,但纵波信号在铝板样品中的衰减率较高,一般只能探测到 1 个激光超声纵波信号。人工缺陷预测值 d_r 满足的关系式为

$$d_r = d - vt, \quad (2)$$

式中: d 表示待测样品厚度; v 表示激光超声纵波传播速度; t 表示纵波信号探测时间。根据所测得的激光超声纵波信号,采用(2)式计算得到人工缺陷深度,结果如表 2 所示。由表 2 可知,随着人工缺陷深度的逐渐增加,计算深度的相对误差迅速降低,这可能与纵波的传输衰减及铝板的不均匀性有关。

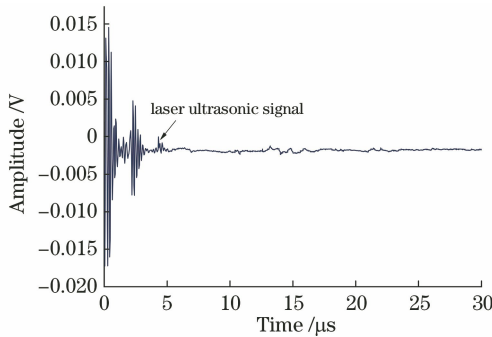


图 5 16 mm×16 mm×6 mm 人工缺陷的激光超声纵波信号

Fig. 5 Laser ultrasonic longitudinal wave signal of 16 mm×16 mm×6 mm artificial defect

表 2 激光干涉仪测得的铝板表面裂痕缺陷深度结果

Table 2 Depth of cracks on aluminum plate by laser interferometer

Sample depth / mm	$t / \mu s$	Calculated depth / mm	Relative error / %
2	5.23	2.21	10.71
4	4.92	4.22	5.42
6	4.60	6.28	4.73

3.2 EMAT 接收激光超声信号

由于激光干涉仪对光路稳定性以及检测环境的稳定性要求较高,因此在实际工业生产环境应用中具有局限性。EMAT 由高频线圈、永磁铁等较为稳固的器件组成,高频线圈被置于永磁铁磁场中,区别于 EMAT 自发自收的小范围区域信号检测方式,本文利用脉冲激光作为激发源,待测样品表面质点在有超声信号传送时发生振动,高频线圈感应出与超声波信号对应的电压,通过探测激光超声纵波信号检测待测样品的厚度,通过探测激光超声表面波信号检测待测样品的缺陷。

对于 25 mm 厚的铝板样品,由 EMAT 接收的典型测厚激光超声纵波信号及纵波信号幅值随着 EMAT 与样品提离距离(EMAT 探测模块与样品之间的距离)变化的趋势图如图 6 所示。由图 6(a)可以看出,EMAT 可以较明显地测量出多个激光超声纵波信号,纵波信号在铝板样品中的传播时间越长,测量误差越小,因此可以利用多个测量信号相互检验和验证待测铝板厚度。由图 6(b)可知,随着提离距离的增加,纵波信号振幅最大值逐渐减小并呈现负值,且幅值(纵波信号最大值与最小值之差)的变化呈指数减小,因此在保证信号检测的可行性的同时,需使 EMAT 与待测样品间的提离距离最小,因此确定最佳提离距离为 1.5 mm。

采用 EMAT 接收激光超声纵波信号测量待测样品厚度时,待测铝板样品厚度的计算式为

$$d = \frac{1}{2} \sqrt{(vt)^2 - D_s^2}, \quad (3)$$

式中: d 表示待测铝板的厚度; v 表示激光超声纵波在铝板中的传播速度; D_s 表示 EMAT 与激发脉冲激光的距离; t 表示纵波信号探测时间。

激光超声在待测样品中的传播距离随着 D_s 的增加而增加,传播距离的远近影响样品厚度测量的精度。为了提高样品厚度测量的精度,图 7 给出了 25 mm 铝板样品厚度测量精度的相对标准偏差(RSD)随 EMAT 与激发脉冲激光距离的变化。由

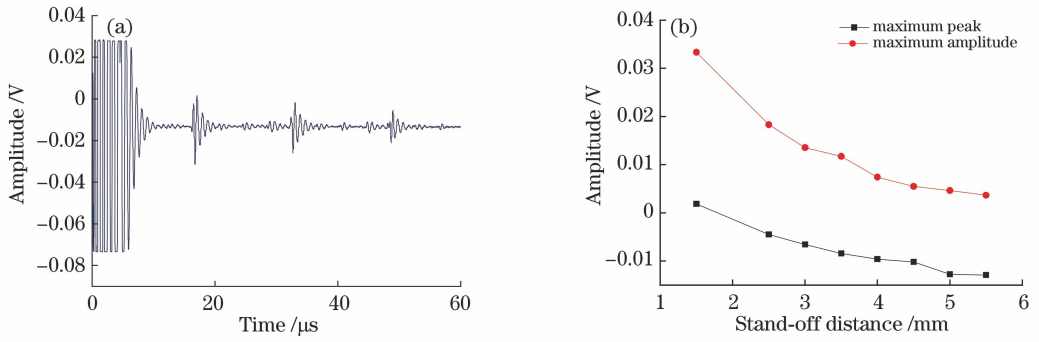


图 6 EMAT 探测方式的结果。(a)典型铝板测厚激光超声信号;(b)纵波幅值与提离距离的关系曲线

Fig. 6 Results of EMAT detection method. (a) Typical laser ultrasonic signal of aluminum plate thickness measurement; (b) longitudinal wave amplitude versus stand-off distance

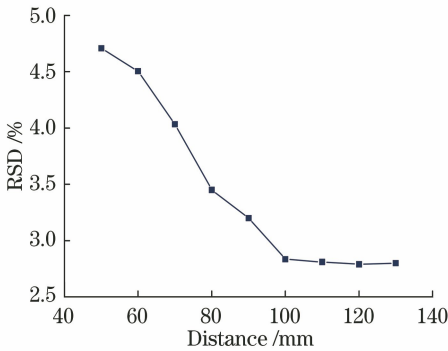


图 7 铝板厚度测量精度与 EMAT 探测距离的关系曲线

Fig. 7 Measurement accuracy for aluminum plate thickness versus EMAT measurement distance

图 7 可知,随着 EMAT 与激发脉冲激光距离的增加,铝板厚度测量的精度逐渐减小并趋于稳定,因此

确定最佳的探测距离为 100 mm。

实验采用 EMAT 探测了厚度为 16, 20, 23, 25, 30 mm 的 5 种铝板样品的激光超声纵波信号,提取 2 个纵波峰值信号时间,利用(3)式计算出的 5 种铝板样品的厚度如表 3 所示。由表 3 可知,EMAT 结合激光超声对铝板厚度测量的平均相对标准偏差几乎均在 4% 以下,有效地提高了铝板厚度测量的准确性,且利用第一个纵波信号得到的铝板厚度的测量精度更准确,这可能与 EMAT 和激发脉冲激光之间的距离有关,纵波信号在铝板中的传播时间较长(相对激光干涉仪测量),时间探测误差减小,从而 EMAT 测厚的精度得到了提高。因此,在利用 EMAT 测量待测样品厚度时,应该根据待测样品的整体厚度调整 EMAT 与激发脉冲激光之间的探测距离。

表 3 EMAT 方式的铝板厚度测量结果

Table 3 Thickness measurement results for the aluminum plates by EMAT

Sample thickness /mm	$T_1/\mu\text{s}$	Calculated thickness /mm	Relative error /%	$T_2/\mu\text{s}$	Calculated thickness /mm	Relative error /%	Average relative error /%
16	16.30	16.49	3.06	32.64	16.70	4.34	3.70
20	16.72	20.41	2.05	33.45	20.45	2.23	2.16
23	17.12	23.62	2.69	34.32	23.92	4.00	3.34
25	17.21	24.29	2.84	34.35	24.04	3.84	3.34
30	18.00	29.67	1.10	9.81	30.33	1.09	1.10

同样,实验采用 EMAT 正面探测了人工缺陷铝板样品的激光超声表面波信号,其中触发激光光源距离铝板边缘 1 mm。图 8 为 6 mm × 6 mm × 2 mm 缺陷槽的激光超声表面波信号,基于缺陷信号的时间信息($t_{di}, i=1, 2, 3$)利用声速传输公式即可计算出缺陷与激光光源的间距 L_{di} 。

由(2)式可得:

$$L_{d1} = c \times t_{d1} = 3000 \text{ m/s} \times 6.91 \mu\text{s} = 20.73 \text{ mm}, \quad (4)$$

$$L_{d2} = c \times t_{d2} = 3000 \text{ m/s} \times 16.83 \mu\text{s} = 50.49 \text{ mm}, \quad (5)$$

$$L_{d3} = c \times t_{d3} = 3000 \text{ m/s} \times 28.11 \mu\text{s} = 84.33 \text{ mm}. \quad (6)$$

3 个缺陷距离铝板边缘的预测值分别为 21.73, 51.49, 85.33 mm, 测量相对误差分别为 3.32%、2.98%、3.03%, EMAT 测量误差产生的主要原因是 EMAT 测量一定范围区间内的超声波信号时产生了一定的误差,但误差在测量误差允许范围内,因此

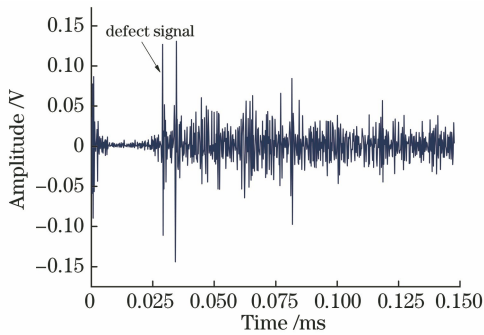


图 8 EMAT 测得的人工缺陷激光超声表面波信号

Fig. 8 Laser ultrasonic surface wave signal of artificial defect detected by EMAT

该方式可用于铝板缺陷位置检测,当缺陷较小时也可以实现缺陷位置较为准确的预估。

4 结 论

本文采用脉冲激光作为激光超声信号激励源,对比分析了激光干涉仪和 EMAT 两种超声波信号探测方式在铝板无损检测中的准确度和实用性。通过优化实验确定了不同信号接收方式下的最佳探测参数,在最佳实验参数条件下:激光干涉仪对铝板厚度测量的预测相对误差均小于 4.31%,在对铝板表面裂痕缺陷深度进行预测时,预测结果的相对误差随着铝板表面裂痕缺陷深度的减小而增大;采用 EMAT 预测铝板样品厚度时,预测相对误差均小于 3.1%,采用 EMAT 预测铝板裂痕缺陷位置时,预测相对误差均小于 3.4%。由结果可知,在铝板样品的无损检测中,采用激光超声与电磁超声相结合的方法可以提高铝板测厚及表面裂痕检测的精度,同时 EMAT 检测方式的系统结构简单,对检测条件的稳定性要求较低,可作为金属在线无损检测的备选方法。

参 考 文 献

- [1] Lee E, Kim T, Suh H, et al. Effect of metal thickness on the sensitivity of crack-based sensors [J]. *Sensors*, 2018, 18(9): 2872.
- [2] Zhao L, Li C J, Duan Z X, et al. The metal thickness detection using pulsed eddy-current computation and detection method [J]. *Cluster Computing*, 2019, 22: 6551-6562.
- [3] Kravcov A, Shibaev I A, Blokhin D I, et al. Examination of structural members of aerial vehicles by laser ultrasonic structuroscopy [J]. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 2018, 9(11): 2258-2265.
- [4] Kusano M, Hatano H, Watanabe M, et al. Mid-infrared pulsed laser ultrasonic testing for carbon fiber reinforced plastics [J]. *Ultrasonics*, 2018, 84: 310-318.
- [5] Yan G Q, Raetz S, Chigarev N, et al. Characterization of progressive fatigue damage in solid plates by laser ultrasonic monitoring of zero-group-velocity lamb modes [J]. *Physical Review Applied*, 2018, 9(6): 061001.
- [6] Zarubin V, Bychkov A, Zhigarkov V, et al. Model-based measurement of internal geometry of solid parts with sub-PSF accuracy using laser-ultrasonic imaging [J]. *NDT & E International*, 2019, 105: 56-63.
- [7] Zhou Z G, Zhang K S, Zhou J H, et al. Application of laser ultrasonic technique for non-contact detection of structural surface-breaking cracks [J]. *Optics & Laser Technology*, 2015, 73: 173-178.
- [8] 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.
- [9] Sun G K, Zhou Z G, Li G H, et al. Development of an optical fiber-guided robotic laser ultrasonic system for aeronautical composite structure testing [J]. *Optik*, 2016, 127(12): 5135-5140.
- [10] Zhang C, Liu C L, Liu S Z, et al. Ultrasonic detection of aluminum stress based on electromagnetic loading [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2018, 39(8): 169-177.
- [11] 张闯, 刘成立, 刘素贞, 等. 基于电磁加载的铝板应力超声检测 [J]. *仪器仪表学报*, 2018, 39(8): 169-177.
- [12] He J P, Dixon S, Hill S, et al. A new electromagnetic acoustic transducer design for generating and receiving S₀ lamb waves in ferromagnetic steel plate [J]. *Sensors*, 2017, 17(5): 1023.
- [13] Murav'eva O V, Len'kov S V, Murashov S A. Torsional waves excited by electromagnetic-acoustic transducers during guided-wave acoustic inspection of pipelines [J]. *Acoustical Physics*, 2016, 62(1): 117-124.
- [14] Zhang Y, Huang S L, Wang S, et al. Direction-controllable electromagnetic acoustic transducer for SH waves in steel plate based on magnetostriction [J]. *Progress In Electromagnetics Research M*, 2016, 50: 151-160.

- [14] Huang S L, Zhang Y, Wang S, et al. Multi-mode electromagnetic ultrasonic lamb wave tomography imaging for variable-depth defects in metal plates[J]. Sensors, 2016, 16(5): 628.
- [15] Finkel P, Godinez V. Electromagnetic stimulation of the ultrasonic signal for nondestructive detection of ferromagnetic inclusions and flaws [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2004, 40 (4): 2179-2181.
- [16] Ribichini R, Cegla F, Nagy P, et al. Study and comparison of different EMAT configurations for SH wave inspection [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 2011, 58(12): 2571-2581.
- [17] Yang L J, Xing Y H, Zhang J, et al. Crack defect detection of aluminum plate based on electromagnetic ultrasonic guided wave [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(4): 150-160.
杨理践, 邢燕好, 张佳, 等. 基于电磁超声导波的铝板裂纹缺陷检测方法[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(4): 150-160.