

温度对薄板中零群速度 Lamb 波的影响

许薇^{1**}, 沈中华^{1*}, 倪辰荫², 袁玲¹, 阚威威¹

¹南京理工大学理学院, 江苏 南京 210094;

²南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094

摘要 研究了温度对铝合金薄板中零群速度(ZGV)Lamb 波频率的影响。建立了基于多普勒测振仪的全光学探测与脉冲激光激发不同温度的铝合金薄板中 S_1 -ZGV 模式的实验系统,得到铝合金薄板中 S_1 -ZGV 模式频率随温度的变化。随着温度从 20 °C 升高到 370 °C,实验结果表明 S_1 -ZGV 模式频率减小了 10.4%,理论计算结果表明 S_1 -ZGV 模式频率减小了 10.9%,实验结果与理论结果比较吻合。进一步从理论上分析了铝合金薄板的厚度、泊松比和横波波速对 S_1 -ZGV 模式频率的影响,结果表明:当温度从 20 °C 升高到 370 °C 时,厚度对 S_1 -ZGV 模式频率的影响最小,横波波速对 S_1 -ZGV 模式频率的影响最大。

关键词 激光技术; 激光超声; 零群速度; 数值模拟; 温度; 铝合金薄板

中图分类号 TB533

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.1202005

Influence of Temperature on Zero-Group-Velocity Lamb Waves of Thin Plate

Xu Wei^{1**}, Shen Zhonghua^{1*}, Ni Chenyin², Yuan Ling¹, Kan Weiwei¹

¹College of Science, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China;

²School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China

Abstract Herein, the effect of temperature on the frequency of the zero-group-velocity (ZGV) Lamb wave of an aluminum alloy sheet is studied. Further, an experimental system is established for the all-optical detection and excitation of the S_1 -ZGV mode in an aluminum alloy sheet under different temperatures using a pulsed laser based on Doppler vibrometer. The S_1 -ZGV mode frequency is observed to vary with the temperature in an aluminum alloy sheet. Subsequently, the experimental results denote that the frequency of the S_1 -ZGV mode decreases by 10.4% when the temperature increases from 20 °C to 370 °C, whereas the theoretical results denote that the frequency of the S_1 -ZGV mode decreases by 10.9%. Therefore, the experimental results are observed to be consistent with the theoretical results. In addition, when the temperature increases from 20 °C to 370 °C, the effects of the sheet thickness and shear wave velocity on the frequency of the S_1 -ZGV mode are observed to be the smallest and largest, respectively, by considering the influences of the sheet thickness, Poisson ratio, and shear wave velocity of the aluminum alloy sheet on the frequency of the S_1 -ZGV mode.

Key words laser technique; laser ultrasound; zero group velocity; numerical simulation; temperature; aluminum alloy sheet

OCIS codes 160.3900; 280.3375; 120.6780

1 引 言

Lamb 波是在板状固体材料中传播的一种超声波。当横波和纵波在板状材料中传播时,会在上、下边界处发生反射和折射,它们会不断地耦合并产生

波包,从而形成了 Lamb 波。后退波表示相速度与群速度方向相反的模式波,当前进波与后退波相互作用时,在 Lamb 波中会存在波数不为零、群速度为零的特殊模式,这些模式被称作 ZGV Lamb 模式^[1-2]。ZGV Lamb 模式由于群速度为零,因此不

收稿日期: 2019-07-04; 修回日期: 2019-08-01; 录用日期: 2019-08-07

基金项目: 国家自然科学基金(61975080,11974186,11604153)

* E-mail: shenzh@mail.njust.edu.cn; ** E-mail: 1918283135@qq.com

传播能量,在板状材料激发区域内形成一个尖锐的共振峰,这一性质使得 ZGV Lamb 波在很多领域具有广阔的应用前景。2007 年, Clorennec 等^[3]发现泊松比可由 S_1 -ZGV(零群速度的对称模态)模式频率和 A_2 -ZGV(零群速度的反对称模态)模式频率的比值来评估。当板厚已知时,纵波波速和横波波速分别可由 S_1 -ZGV 模式频率和 A_2 -ZGV 模式频率来评估。2011 年, Cès 等^[4]将 ZGV Lamb 波应用于沉积在板上的薄层厚度的检测,结果发现由薄层引起的板中 ZGV Lamb 波的频移取决于沉积层的质量、力学性能以及板的力学性能。2014 年, Mezil 等^[5]发现通过薄层耦合的两板之间的垂直刚度可通过 Lamb 波的对称模态 ZGV 点处的频率来评估,而两板之间的切向刚度可通过 Lamb 波的反对称模态 ZGV 点处的频率来评估。前人对板状材料中 ZGV Lamb 波的研究都是在常温下进行的,但板状材料也会被应用于高温环境,温度会影响板状材料中 Lamb 波的 ZGV 点,因此有必要研究温度对板状材料中 ZGV Lamb 波的影响。本文分析了温度对铝合金薄板中 ZGV Lamb 波频率的影响,然后进行铝合金薄板中 S_1 -ZGV 模式频率随温度变化的实验,并将实验结果与数值模拟结果进行比较,讨论温度对铝合金薄板中 ZGV Lamb 波频率的影响。

2 ZGV Lamb 波的理论分析

Rayleigh-Lamb 频率方程可写成对称模态和反对称模态^[6]的形式,即

$$\Omega_{\text{sym}} = \frac{\tan(dq)}{\tan(dp)} + \frac{4k^2 pq}{(q^2 - k^2)^2} = 0, \quad (1)$$

$$\Omega_{\text{asym}} = \frac{(q^2 - k^2)^2 \tan(dp)}{4k^2 p} + q \tan(dq) = 0, \quad (2)$$

式中: Ω 为函数,下标 sym 和 asym 表示对称、反对称; d 为板厚; k 为波数, $k = \omega/c_p$, ω 为圆频率, c_p 为 Lamb 波相速度; $q = \sqrt{(\omega/c_s)^2 - k^2}$, $p = \sqrt{(\omega/c_l)^2 - k^2}$, c_s 、 c_l 分别为横波波速和纵波波速。

通过联立(1)式和(2)式可计算得到 Lamb 波频散曲线。由于 ZGV 点处群速度为零,因此再联立(3)、(4)式,就可以找到 ZGV 点。

$$-\frac{d\Omega_{\text{sym}}}{dk} \left(\frac{d\Omega_{\text{sym}}}{d\omega} \right)^{-1} = \frac{d\omega}{dk} = c_G = 0, \quad (3)$$

$$-\frac{d\Omega_{\text{asym}}}{dk} \left(\frac{d\Omega_{\text{asym}}}{d\omega} \right)^{-1} = \frac{d\omega}{dk} = c_G = 0, \quad (4)$$

式中: c_G 为 Lamb 波的群速度。

图 1 所示为常温下(20 °C)1 mm 厚的铝合金薄板中 Lamb 波低阶模式的频散曲线,横轴坐标为波数与厚度的乘积 kd ,纵轴坐标为频率与厚度的乘积 fd , f 是 Lamb 波频率,对称模态 S_n 和反对称模态 A_n 分别满足(1)式和(2)式, n 是各模态的阶数。 S_1 模式和 S_3 模式的频散曲线中存在波数不为零、群速度为零的点,这些点就是 ZGV 点。通过三次样条插值拟合找到 S_1 模式和 S_3 模式频散曲线零群速度点处的频率,得到 S_1 -ZGV 模式的频率为 2.828 MHz, S_3 -ZGV 模式的频率为 9.260 MHz。

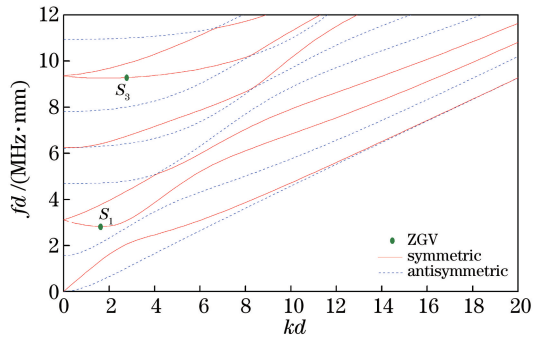


图 1 1 mm 厚铝合金薄板中 Lamb 波低阶模式的频散曲线
Fig. 1 Frequency dispersion curves of Lamb wave low-order modes in 1 mm aluminum alloy sheet

在某一特定温度下,当铝合金薄板中 Lamb 波频散曲线的横坐标、纵坐标分别用 $kd/(2\pi)$ 、 fd/c_s 表示时,泊松比就成为影响 ZGV 点的唯一参数^[7],即

$$\frac{f_{\text{ZGV}} d}{c_s} = F(\nu), \quad (5)$$

式中: f_{ZGV} 为 Lamb 波 ZGV 点处的频率; ν 为泊松比; $F(\nu)$ 为泊松比的函数。

当温度发生变化时,铝合金薄板的杨氏模量 E 、泊松比 ν 和密度 ρ 等物理参数都将随温度发生变化,如表 1 所示(T 表示温度)。当温度从 20 °C 升高到 370 °C 时,杨氏模量减小了 24.3%,密度减小了 2.7%,泊松比增大了 5.7%,可见,温度对密度的影响小于对杨氏模量、泊松比的影响。

横波波速 c_s 与杨氏模量 E 、泊松比 ν 和密度 ρ 有关:

$$c_s = \sqrt{\frac{E}{2(1+\nu)\rho}}, \quad (6)$$

且铝合金薄板的厚度也受温度的影响,因此板厚 d 、泊松比 ν 和横波波速 c_s 随温度的变化使得铝合金薄板中 ZGV 点随温度发生变化。

表 1 铝合金材料的物理参数^[8-11]
Table 1 Physical parameters of aluminum alloy material^[8-11]

Parameter	Temperature /°C	Formula
Young modulus /GPa	20-370	$77.7+2.04\times 10^{-3}T-1.89\times 10^{-4}T^2$
Poisson ratio	20-370	$0.324+3.75\times 10^{-6}T+2.21\times 10^{-7}T^2$
Density /($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	20-370	$2737-6.012\times 10^{-3}T-7.012\times 10^{-4}T^2$
Thermal expansion coefficient /°C ⁻¹	20-337	$5.76\times 10^{-6}+1.71\times 10^{-7}T-6.55\times 10^{-10}T^2$
	337-370	$1.95\times 10^{-5}+9.63\times 10^{-9}T+9.46\times 10^{-13}T^2$

3 铝合金薄板中 S_1 -ZGV 模式频率随温度的变化

图 2 所示为脉冲激光在铝合金薄板(尺寸为 $1\text{ mm}\times 150\text{ mm}\times 100\text{ mm}$)中激发 S_1 -ZGV 模式的实验装置。实验装置分为激发和探测两部分,其中激发装置采用 Nd:YAG 激光器,脉冲激光器的波长为 1064 nm ,脉宽为 10 ns ,重复频率为 5 Hz 。脉冲激光经过分光镜后,一小部分光被反射到触发器作为触发信号,大部分光透射后经过反射镜、小孔光阑,最后经凸透镜聚焦成直径为 2 mm 的圆形光斑倾斜入射到样品表面。探测装置采用激光多普勒测振系统,该系统由 OFV-5000 型振动模数控制仪和波长为 633 nm 的 OFV-50X 型激光振动传感探头组成。 633 nm 激光由激光传感探头发射,经过可滤除 1064 nm 散射光的滤波片后再经过反射镜、凸透镜垂直入射到样品表面,并在样品表面的激发区域内被系统自聚焦成微小的光点,最后通过探测样品表面的微小离面位移获得超声信号。将探测装置中的反射镜安装在可移动平台上,通过移动反射镜来改变探测点的位置。反射镜和样品之间放置凸透镜是为了增加对探测光束的收集,提高探测信号的信噪比。

首先,采用如图 2 所示的实验装置对常温下的铝合金薄板进行实验,探测光在激发光区域内。激光能量控制在以热弹机制激发超声波以内,并保证

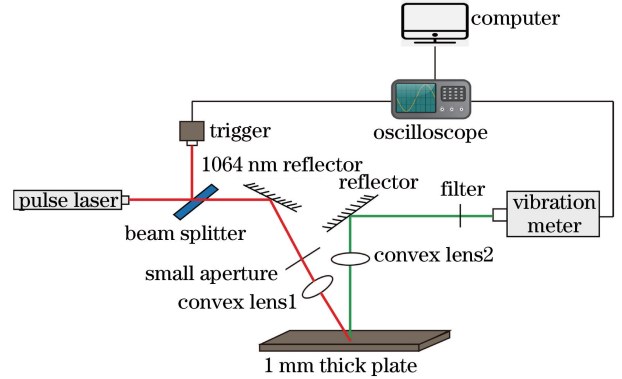
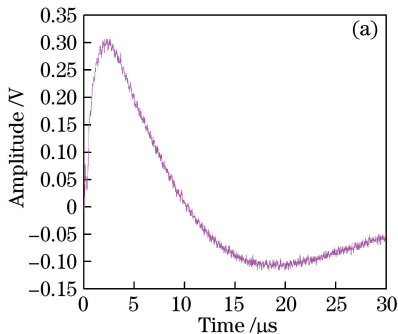


图 2 脉冲激光激发 S_1 -ZGV 模式装置示意图
Fig. 2 Schematic of device for pulsed laser exciting S_1 -ZGV mode

能产生具有较高信噪比的信号,时域信号如图 3(a)所示,横轴为时间,纵轴为幅值,接收到信号的时间步长为 2 ns ,可以看出 S_1 -ZGV 模式耦合在幅值较大的低频信号中。分别对时域信号进行 0.5 MHz 和 20 MHz 的带通滤波处理,消除热信号、电信号的影响,然后进行快速傅里叶变换,得到频域波形,结果如图 3(b)所示,横轴为频率,纵轴为幅值。

为了验证该共振峰是由 S_1 -ZGV 模式产生的,利用其能量无法传播的性质,固定激发点位置,沿一个方向以每步 0.5 mm 移动探测点(一共得到 17 组时域波形),分别进行带通滤波和快速傅里叶变换处理,得到如图 4 所示的样品表面的 B-scan 图,其中横轴为探测点与激发点之间的距离,纵轴为信号频

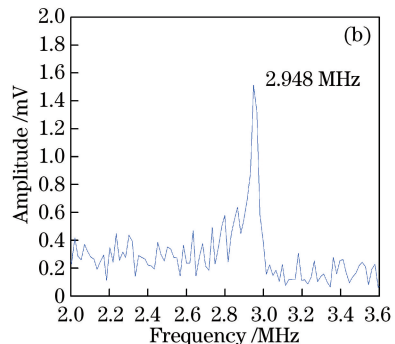


图 3 1 mm 厚铝合金薄板中的 S_1 -ZGV 模式。(a)时域波形;(b)频域波形

Fig. 3 S_1 -ZGV mode in 1 mm aluminum alloy sheet. (a) Time domain waveform; (b) frequency domain waveform

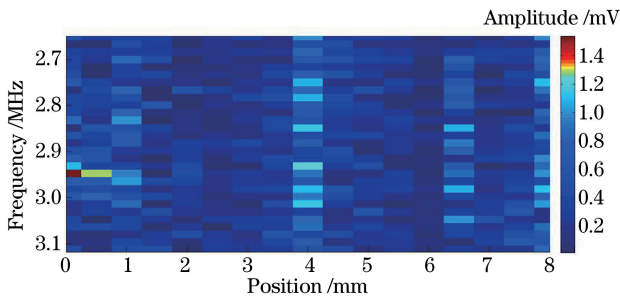


图 4 S_1 -ZGV 模式在铝合金薄板表面的 B-scan 图

Fig. 4 B-scan diagram of spatial distribution of S_1 -ZGV mode on the surface of aluminum alloy sheet

率,颜色表示幅值的大小。从图 4 可以看出,在 2.948 MHz 频率处的幅值衰减很大。

采用图 2 所示的实验装置激发出常温下铝合金薄板中 S_1 -ZGV 模式后,对频域波形进行三次样条插值拟合,得到 S_1 -ZGV 模式的频率为 2.953 MHz。然后将薄板放入高温炉内加热,通过测温精度为 $\pm 2^\circ\text{C}$ 的测温仪探测铝合金薄板在激发点处的温度,能探测到以 50°C 为步长从 20°C 逐渐升高到 370°C 的 7 个温度值,分别记录每个温度值对应的时域波形,对其进行带通滤波和快速傅里叶变换处理后得到频谱图,对频域波形进行三次样条插值拟合,找到 S_1 -ZGV 模式的频率。

温度引起铝合金薄板中 S_1 -ZGV 模式频率变化的实验结果与理论计算结果如图 5 所示,横轴表示温度,纵轴表示不同温度的铝合金薄板中 S_1 -ZGV 模式频率和 20°C 铝合金薄板中 S_1 -ZGV 模式频率的差值。采用数值模拟的方式对不同温度的 1 mm 厚铝合金薄板进行频散曲线求解,通过三次样条插值拟合找到由材料参数随温度变化引起的 S_1 -ZGV 模式频率随温度的变化。此外,由于热膨胀, S_1 -ZGV 模式频率也会随温度发生变化,然后得到图 5

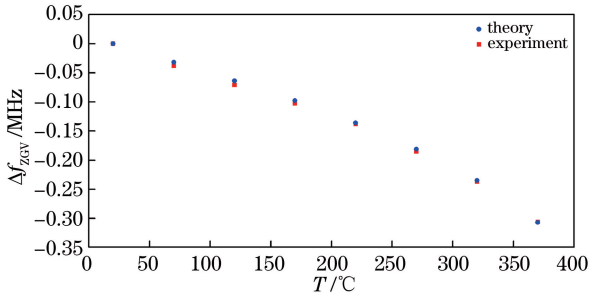


图 5 实验和理论得到的温度引起的铝合金薄板中 S_1 -ZGV 模式频率的变化

Fig. 5 Experimentally and theoretically obtained variations of S_1 -ZGV mode frequency in aluminum alloy sheet with temperature

中 S_1 -ZGV 模式频率随温度变化的理论计算结果。随着温度从 20°C 升高到 370°C ,实验结果表明 S_1 -ZGV 模式频率减小了 10.4%,理论计算结果表明 S_1 -ZGV 模式频率减小了 10.9%,实验结果与理论计算结果比较吻合。

另外,随着温度从 20°C 升高到 370°C ,材料参数和板厚都会发生变化,导致 S_3 -ZGV 模式频率减小了 12.1%。理论结果表明,温度对 S_3 -ZGV 模式频率的影响更大。

4 温度相关参数对 ZGV Lamb 波频率的影响

根据前面的理论分析可知,板厚 d 、泊松比 ν 和横波波速 c_s 随温度的变化会使得铝合金薄板中 ZGV 点随温度发生变化。下面分别分析板厚 d 、泊松比 ν 和横波波速 c_s 对铝合金薄板中 ZGV Lamb 波频率的影响。

4.1 板厚对 ZGV Lamb 波频率的影响

当温度发生变化时,由于热膨胀,铝合金薄板的厚度会发生变化,公式为

$$\alpha \Delta T = \frac{\Delta d}{d_0}, \quad (7)$$

式中: α 为热膨胀系数; ΔT 为温度的变化; Δd 为板厚的变化; d_0 为初始温度下铝合金薄板的厚度。

根据表 1 及(7)式可得当温度从 20°C 逐渐升高到 370°C 后,板厚增加了 0.7%。

再由(8)式计算得到板厚变化引起的铝合金薄板中 ZGV Lamb 波频率的变化。

$$-\frac{\Delta d}{d_0} = \frac{\Delta f_{ZGV}}{f_0 + \Delta f_{ZGV}}, \quad (8)$$

式中: f_0 为初始温度下铝合金薄板中 Lamb 波 ZGV 点处的频率; Δf_{ZGV} 为 Lamb 波 ZGV 点处频率的变化。因此,当温度从 20°C 逐渐升高到 370°C 时,板厚增加 0.7% 导致 S_1 -ZGV 模式频率和 S_3 -ZGV 模式频率都减小了 0.7%。

综上所述,由于热膨胀,板厚随温度的变化引起的铝合金薄板中 ZGV Lamb 波频率的变化非常小。

4.2 泊松比对 ZGV Lamb 波频率的影响

当温度从 20°C 逐渐升高到 370°C 时,由(5)式可计算得到不同温度下对应的 $F(\nu)$ 。当只考虑泊松比对 ZGV Lamb 波频率的影响时,假定(5)式中的板厚和横波波速一定(板厚为 1 mm,横波波速为 3121 m/s),得到泊松比引起的铝合金薄板中 S_1 -ZGV 模式频率和 S_3 -ZGV 模式频率的变化如

图 6 所示。可见：当温度从 20 °C 逐渐升高到 370 °C 时，泊松比引起的 S_1 -ZGV 模式频率增大了 2.5%， S_3 -ZGV 模式频率增大了 1.0%，其中当温度从 20 °C 升高到 120 °C 时，ZGV Lamb 波频率先

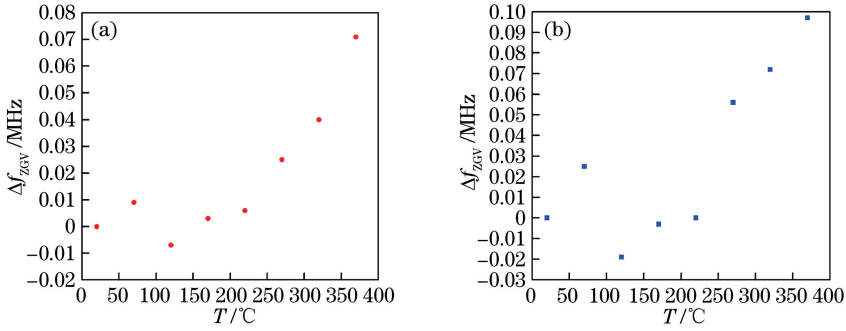


图 6 泊松比引起的铝合金薄板中 ZGV Lamb 波频率的变化与温度的关系。

(a) S_1 -ZGV 模式频率的变化与温度的关系；(b) S_3 -ZGV 模式频率的变化与温度的关系

Fig. 6 Variation of frequency of ZGV Lamb wave in aluminum alloy sheet caused by Poisson ratio with temperature.

(a) Variation of frequency of S_1 -ZGV mode with temperature; (b) variation of frequency of S_3 -ZGV mode with temperature

4.3 横波波速对 ZGV Lamb 波频率的影响

随着温度从 20 °C 升高到 370 °C，当只考虑横波波速对 ZGV Lamb 波频率的影响时，由(5)式可知，假定厚度和 $F(\nu)$ 一定[厚度为 1 mm, S_1 -ZGV 模式对应的 $F(\nu)$ 为 0.906, S_3 -ZGV 模式对应的 $F(\nu)$ 为 2.967]，横波波速减小了 16%，则 S_1 -ZGV 模式频率和 S_3 -ZGV 模式频率都减小了 16%。

可见，当温度从 20 °C 升高到 370 °C 时，横波波速对铝合金薄板中 ZGV Lamb 波频率的影响最大。

5 结 论

理论分析表明，板厚 d 、泊松比 ν 和横波波速 c_s 随温度的变化会使得铝合金薄板中 Lamb 波 ZGV 点随温度升高而发生变化。随着温度从 20 °C 升高到 370 °C，实验结果表明 S_1 -ZGV 模式频率减小了 10.4%，理论计算结果表明 S_1 -ZGV 模式频率减小了 10.9%，实验结果与理论计算结果比较吻合。从理论结果看，当温度从 20 °C 升高到 370 °C 时，板厚的增加和横波波速的减小使得 ZGV Lamb 模式频率减小，而泊松比的增大使得 ZGV Lamb 模式频率增大，其中板厚引起的 ZGV Lamb 模式频率的变化几乎可以忽略不计，横波波速对铝合金薄板中 ZGV Lamb 波频率的影响最大，横波波速减小了 16%，导致 ZGV Lamb 波频率也减小了 16%。 S_3 -ZGV 模式频率减小的程度大于 S_1 -ZGV 模式频率减小的程度，这是因为横波波速的减小使得 S_1 -ZGV 模式频率和 S_3 -ZGV 模式频率都减小了 16%，而泊松比的

增大后减小。

随着温度升高，与板厚增大引起 ZGV Lamb 波频率减小不同，泊松比使得 ZGV Lamb 波频率先增大后减小，然后再增大。

增大又使得 S_1 -ZGV 模式频率增大了 2.5%， S_3 -ZGV 模式频率增大了 1.0%。

参 考 文 献

- [1] Prada C, Clorennec D, Royer D. Power law decay of zero group velocity Lamb modes[J]. Wave Motion, 2008, 45(6): 723-728.
- [2] Prada C, Clorennec D, Royer D. Local vibration of an elastic plate and zero-group velocity Lamb modes [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2008, 124(1): 203-212.
- [3] Clorennec D, Prada C, Royer D. Local and noncontact measurements of bulk acoustic wave velocities in thin isotropic plates and shells using zero group velocity Lamb modes[J]. Journal of Applied Physics, 2007, 101(3): 034908.
- [4] Cès M, Clorennec D, Royer D, et al. Thin layer thickness measurements by zero group velocity Lamb mode resonances [J]. Review of Scientific Instruments, 2011, 82(11): 114902.
- [5] Mezil S, Laurent J, Royer D, et al. Non contact probing of interfacial stiffnesses between two plates by zero-group velocity Lamb modes [J]. Applied Physics Letters, 2014, 105(2): 021605.
- [6] Grünsteidl C M, Veres I A, Murray T W. Experimental and numerical study of the excitability of zero group velocity Lamb waves by laser-ultrasound[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2015, 138(1): 242-250.
- [7] Royer D, Clorennec D, Prada C. Lamb mode spectra versus the Poisson ratio in a free isotropic elastic plate

- [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2009, 125(6): 3683-3687.
- [8] Naimon E R, Ledbetter H M, Weston W F. Low-temperature elastic properties of four wrought and annealed aluminium alloys[J]. Journal of Materials Science, 1975, 10(8): 1309-1316.
- [9] Sakai K, Matsumuro A, Senoo M. Elastic moduli of Al-Li alloys treated at a high pressure of 5.4 GPa[J]. Journal of Materials Science, 1996, 31(12): 3309-3313.
- [10] Sharma S C. Effect of albite particles on the coefficient of thermal expansion behavior of the Al6061 alloy composites [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2000, 31(3): 773-780.
- [11] Lalpoor M, Eskin D G, Katgerman L. Cold-cracking assessment in AA7050 billets during direct-chill casting by thermomechanical simulation of residual thermal stresses and application of fracture mechanics [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2009, 40(13): 3304-3313.