DOI: 10.3901/JME.2015.12.001

空气耦合 Lamb 波在单晶硅中的传播特性和缺陷检测研究*

何存富 刘岳鹏 刘增华 吴 斌

(北京工业大学机械工程与应用电子技术学院 北京 100124)

摘要: 单晶硅是制造硅太阳能电池的主要材料之一,但其中的各类缺陷对其光电转换效率影响颇大。针对这些问题,采用空气耦合 Lamb 波检测方法对单晶硅产品的质量进行快速评价。理论计算 Lamb 波在各向异性的单晶硅中的频散曲线,得到 Lamb 波在不同方向上的理论速度分布;利用空气耦合超声传感器在(001)晶面的单晶硅中激励出 A_0 模态的 Lamb 波,研究 200 kHz 频率下 Lamb 波的入射角度与信号幅值的关系,确定最优入射角度为 13° 。采用相位谱的方法计算 A_0 模态的相速度,试验结果与理论值吻合良好。利用波包幅值法和相关函数法分别计算 A_0 模态的群速度,结果说明相关函数法测得的群速度与理论值误差更小;采用扫描方法对单晶硅进行缺陷检测,通过计算接收信号与参考信号的相关系数,确定出缺陷的位置和大小。

关键词: 单晶硅; 空气耦合; Lamb 波; 相关系数; 缺陷检测

中图分类号: TB553

Air-coupled Lamb Waves Propagation Characteristics and Defect Detection in Monocrystalline Silicon

HE Cunfu LIU Yuepeng LIU Zenghua WU Bin

(College of Mechanical Engineering and Applied Electronics Technology,
Beijing University of Technology, Beijing 100124)

Abstract: Monocrystalline silicon is one of the main materials that is used to make silicon solar cells. However, all kinds of defects existing in monocrystalline silicon have a great influence on the photoelectric conversion efficiency. In order to solve this problem, air-coupled Lamb waves testing method is proposed to achieve rapid quality evaluation of monocrystalline silicon products. The dispersion curves of Lamb waves in anisotropic monocrystalline silicon are calculated theoretically. The velocity distribution of Lamb waves at different directions is obtained. A_0 mode of Lamb waves is excited in the monocrystalline silicon of (001) crystal plane by the air-coupled transducers. The relationship between the incident angle of Lamb waves and the amplitude of signal at 200 kHz is investigated, by which 13° is chosen as the optimal incident angle. The phase velocity is calculated by phase spectrum method. Experiment results show a great agreement with those theoretical values. The group velocity is measured by amplitude of wave packet method and the correlation function method. The deviation by the latter method is smaller to acquire the group velocity. Scanning method is used to detect the defect in the monocrystalline silicon. The location and size of the defect is reconstructed by calculating the correlation coefficient of the received signals and reference signals.

Key words: monocrystalline silicon; air-coupled; Lamb waves; correlation coefficient; defect detection

0 前言

近年来,随着新能源产业的逐步发展,太阳能电池因具有无污染、不受地域限制、安全可靠等优

势,成为全球研究的热点与重点,其中硅电池的应用最为广泛,总产量占太阳能电池的 95%以上,且光电转换效率逐年提升。但单晶硅材料在制造和加工的过程中,不可避免地产生不良产品,其中出现的缺陷(如裂纹、气孔等)会导致晶硅电池的光电转换效率降低,因此对于产品的质量检测也非常关键^[1]。

目前,国内外对于太阳能晶硅材料有多种检测

* 国家自然科学基金(11372016, 51235001, 11272021)和北京市属高等学校高层次人才引进与培养计划(CIT&TCD201304048)资助项目。
20140828 收到初稿, 20150201 收到修改稿

方法, HAUNSCHILD 等^[2]利用光致荧光成像法研究了多晶硅切割时的质量问题。FUYUKI 等^[3]采用电致发光法区分出晶硅的内部和外部缺陷, 对裂纹或断栅进行识别和定位。BALOGUN 等^[4]研究了激光激励与接收的 GHz 高频声学显微镜技术, 实现对 70 μm 厚、(100)方向的单晶硅圆的次表面缺陷特征检测。BELYAEV 等^[5]提出使用超声谐振技术对单晶硅片进行缺陷检测, 通过谐振频率的漂移量和带宽就可确定裂纹尺寸。但这些方法因价格昂贵、检测速度慢、精度低等问题, 大部分只能在实验室中使用, 很少应用于实际工程检测之中。

另外, 也有诸多学者提出采用 Lamb 波检测技术实现对单晶硅的检测。Lamb 波是指在板状结构中传播的超声波, 根据质点振动位移的方向, 又可分为对称模态和反对称模态。这种方法具有检测范围大、效率高等优势^[6]。MEIER 等^[7]用斜探头在硅电池板中激励出 Lamb 波, 研究了接收信号与材料屈服强度的关系。

但常规 Lamb 波检测需要使用耦合剂, 会影响检测速度, 而且耦合剂的耦合效果也会对信号有一定影响^[8-9], 为了避免这种影响, 可以考虑采用无需耦合剂的非接触式 Lamb 波检测方法。SONG 等^[10]采用激光激励的方法, 在单晶硅中激励出 Lamb 波, 通过缺陷反射回波的幅值来确定缺陷的大小。CHAKRAPANI 等^[11]采用空气耦合超声传感器产生 A_0 模态的 Lamb 波, 对单晶硅和多晶硅中的裂纹缺陷进行了扫描检测, 但以上文献中都没有对单晶硅的各向异性特性进行分析。

针对单晶硅的快速检测问题, 提出利用空气耦合的方式, 在(001)晶面的单晶硅片上激励出 A_0 模态 Lamb 波的方法, 研究空气耦合超声传感器入射角与信号的关系, 并通过相位谱方法获得不同方向上 Lamb 波的相速度分布特性, 采用相关函数法计算群速度分布特性, 并与理论结果进行对比。最终对单晶硅进行缺陷扫描检测, 分析计算相关系数的方法对缺陷检测和定位的能力。

1 单晶硅中 Lamb 波传播理论

单晶硅属于晶体, 其基本特点是具有方向性, 沿不同方向晶体性质不同。图 1a 所示为单晶硅中常见的几种晶面类型和晶向, 图 1b 为(001)晶面的单晶硅片表面方向分布。其中标出了 4 个方向, 而且 [100]和[010]方向的性质和特点相同, 同属<100>晶向; [110]和 $[\bar{1}10]$ 方向性质相同, 同属于<110>晶向^[12]。

(a) 单晶硅常见晶面和晶向

(b) (001) 晶面单晶硅片表面方向分布

图 1 单晶硅方向

(001)晶面的单晶硅的密度 $2\,330\text{ kg/m}^3$, 泊松比 0.28。因单晶硅属于正交各向异性材料, 在笛卡尔坐标系中, 其弹性矩阵 $\mathbf{C}$ 中包含 9 个独立的弹性常数^[13], 形式如式(1)所示

$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中, C_{mn} 对应单晶硅材料的各个弹性常数($m, n=1, 2, 3, 4, 5, 6$), 且 $C_{11}=C_{22}=C_{33}=165.7\text{ GPa}$, $C_{12}=C_{13}=C_{23}=63.9\text{ GPa}$, $C_{44}=C_{55}=C_{66}=79.6\text{ GPa}$ 。

单晶硅因其各向异性的特点, Lamb 波在其中传播的特性也随方向的不同而变化。利用以上参数, 在专业软件中计算单晶硅的理论频散曲线, 图 2 所示为沿<100>方向的 Lamb 波频散曲线。

由于空气耦合超声传感器接收到的信号是从单晶硅表面泄漏出来的波, S_0 模态以面内位移为主^[14], 离面位移较小, 较难被空气耦合超声传感器接收到, 而 A_0 模态的位移分布中, 以离面位移为主。因此, 空气耦合超声传感器更适合于激励和接收 A_0

模态的 Lamb 波。

图2 <100>方向单晶硅频散曲线

分别计算 $0^\circ \sim 90^\circ$ 不同方向上的频散曲线, 提取 200 kHz 频率下, A_0 模态的相速度和群速度, 得到沿不同方向上, 该模态速度分布曲线, 如图 3 所示。

图3 单晶硅不同方向上 A_0 模态的速度分布

图 3a 和图 3b 中的实线分别对应的是理论相速度和群速度, 其中, 0° 和 90° 对应的是单晶硅的 <110> 方向, 45° 对应的是 <100> 方向, 图 3 中看出, A_0 模态的 Lamb 波在 <110> 方向相速度和群速度最大, <100> 方向相速度和群速度最小。相速度变化范围是 1 400~1 462 m/s, 群速度变化范围为 2 672~2 784 m/s。

采用空气耦合超声传感器在单晶硅板中激励的 Lamb 波, 满足 Snell 定律^[15], 见式(2)

$$\sin \theta = \frac{\lambda_{\text{air}}}{\lambda_p} = \frac{c_{\text{air}}}{c_p} \quad (2)$$

式中, θ 为 Lamb 波的入射角; λ_{air} 和 λ_p 表示在空气中和单晶硅片中 Lamb 波的波长; c_{air} 为空气中声速; c_p 为 Lamb 波的相速度。依此关系, 可以得到如图 4 所示的单晶硅 <110> 方向的 Lamb 波入射角频散曲线。 S_0 模态因在低频区域速度高、频散小, 所以入射角小, 始终在 $2^\circ \sim 3^\circ$ 范围内; 而 A_0 模态速度低, 频散大, 因此入射角变化较明显。

图4 单晶硅<110>方向 Lamb 波入射角频散曲线

2 单晶硅中 Lamb 波试验研究

2.1 试验装置

试验对象采用直径 20.32 cm、厚度 $725 \mu\text{m} \pm 10 \mu\text{m}$ 的 P 型单晶硅片, (001) 晶面, 图 2 中的所示的方向为硅片的晶向分布。试验中采用无缺陷试件做 A_0 模态 Lamb 波传播特性研究, 有缺陷试件进行缺陷检测及定位试验。

图 5 为试验系统的示意图, 包括空气耦合超声传感器、功率放大器、计算机、示波器和四轴运动平台。试验采用 Ultrason 公司的非聚焦超声传感器 NCG200-D13, 按一激一收的方式布置。传感器固定在 XYZ-R 四轴运动扫描平台上, 用计算机控制 RETIC 公司的 SNAP RAM-5000 功率放大器, 激励和接收 Lamb 波, 并通过 DPO4054 数字示波器进行

信号的采集。

图 5 试验系统示意图

2.2 传感器入射角度对信号影响

从图 4 中可以看出, 空气耦合超声传感器的入射角跟激励信号的频率有着密切关系。将传感器固定在四轴运动平台的夹持装置上, 夹具可以带动传感器沿不同的方向和角度倾斜。图 6 为传感器的布置方式, 使激励传感器和接收传感器沿对侧倾斜相同的角度, $\theta_R = \theta_T$, 从 0° 变化到 30° , 步进角为 1° 。空气耦合超声传感器之间的距离 $L = 70 \text{ mm}$, 激励信号采用 5 周期汉宁窗调制的正弦信号, 中心频率 200 kHz。

图 6 空气耦合超声传感器布置

图 7 为随入射角度变化时的扫描结果。图中 x 轴是接收信号的时间轴, y 轴是传感器的倾斜角度, 颜色深度表示信号希尔伯特包络幅值, 图中标出部分是 A_0 模态的直达波幅值^[16]。图中虚线选中区域显示, 在 $11^\circ \sim 16^\circ$ 范围内, 直达波幅值较大, 与图 4 中选中的区域相一致, 所以 200 kHz 频率时的最优入射角为 $13^\circ \sim 14^\circ$ 。

2.3 Lamb 波相速度测量原理

运用一种基于傅里叶变换提取相位谱的方法^[17], 测量单晶硅中 A_0 模态对应频率下的相速度, 操作简便且准确性高。

图 7 入射角度扫描结果

在单晶硅片中, 假定激励和接收两个传感器的初始距离为 L , 固定激励传感器, 接收传感器初始位置为 x_0 , 接收信号为 $s_0(t)$, 逐步向后移动接收传感器, 设定移动的步长为 Δx , x_n 为每个接收点的位置, 并采集该点的时域信号 $s_n(t)$, 假设每点相对于初始位置的相位差为 $\Delta \varphi_n$, 对时域信号经傅里叶变换, 由式(3)计算出 $\Delta \varphi_n$

$$\frac{\text{FT}[s_n(t)]}{\text{FT}[s_0(t)]} = \left| \frac{S_n(f)}{S_0(f)} \right| \exp(ik(x_n - x_0)) = \left| \frac{S_n(f)}{S_0(f)} \right| \exp(i\Delta \varphi_n) \quad (3)$$

式中, FT 表示对信号进行傅里叶变换; t 为时间; f 为频率; k 为波数。

为了提高测量精度, 对每个接收点的时域信号 $s_n(t)$ 计算对应 200 kHz 频率点下相对于初始位置的相位差, 就可以获得相位差 $\Delta \varphi_n$ 与位移 x 的分布, 通过最小二乘法对离散的数据点进行线性拟合, 提取拟合后的直线斜率, 即 $\Delta \varphi_n / (x_n - x_0)$, 然后由式(4)即可计算得到该频率点下的相速度

$$c_p = \frac{2\pi f}{k} = \frac{2\pi f(x_n - x_0)}{\Delta \varphi_n} \quad (4)$$

试验测量时, 线性扫描步长应远小于该频率下, A_0 模态 Lamb 波的波长, 取扫描步长为 0.5 mm, 移动距离在一个波长范围内^[18], 图 6 中所示为扫描示意图, 设置传感器的入射角度为 13° , 固定激励传感器 T , 接收传感器 R 按扫描步长移动。

接收传感器接收到的时域信号如图 8 所示, 图 8a 为激励信号, 图 8b 为接收信号。

为了避免非 A_0 模态波对结果产生干扰, 用矩形窗截取信号的 A_0 模态直达波部分, 通过傅里叶变换, 提取 200 kHz 频率下的频谱特性, 利用式(3)计算出相位差 $\Delta \varphi_n$ 随位移变化的分布, 图 9 为 $\langle 110 \rangle$ 方向上相位差随位移的变化, 方框为试验结果, 实

线是最小二乘法的拟合结果, 提取直线的斜率, 即 $\Delta \varphi_n / (x_n - x_0)$, 再按式(4)计算出相速度 c_p 的值。将单晶硅片以原点为中心旋转, 以 4.5° 为步进角旋转运动平台, 计算出不同方向上 A_0 模态 Lamb 波的相速度分布曲线, 如图 3a 所示。方框为采用相位谱分析法计算的试验结果, 从结果中看出, 试验数据与理论曲线吻合度较好, 说明这种提取相位谱方法计算相速度的可靠性。

图 8 单晶硅中空气耦合 Lamb 波信号

图 9 单晶硅<110>方向相速度测量结果

2.4 Lamb 波群速度测量方法

Lamb 波的群速度, 一般是采用波包的传播时间来计算, 但要获得较准确的群速度结果, 计算波包的时延就要求有较高的精度。传播时间的精确测量一方面是由测量系统决定, 另一方面也是由信号后期处理中时延估计方法决定的。波包幅值法是超声无损检测中最常用的时延计算方法, 通过两信号的包络最大幅值的时间差计算传播时间。但因为 Lamb 波的频散和多模态特点, 用这种方法计算的传播时间误差往往较大, 一般只能用作粗略的估计。

相关函数法是在对比波形相似程度的基础上

计算信号时间延迟的一种方法, 其基本思想是: 将接收信号沿时间轴以 Δt 为增量逐级平移, 之后分别与激励信号进行互相关运算。当所得相关系数最大时, 所平移的量值即等于该接收信号与激励信号之间的时间延迟。这种方法具有算法简单、抗白噪声干扰能力强等特点, 因此得到了广泛的应用^[19-20], 式(5)所示为信号的相关系数计算公式。

$$\rho = \frac{\text{Cov}(s_j, s_k)}{\text{Cov}(s_j, s_j) \cdot \text{Cov}(s_k, s_k)} \quad (5)$$

式中, s_j 和 s_k 分别为要计算时间差的两时域信号; $\text{Cov}(s_j, s_k)$ 为两信号的协方差; $\text{Cov}(s_j, s_j)$ 和 $\text{Cov}(s_k, s_k)$ 分别为信号 s_j 和 s_k 的标准差。

对试验获得的信号, 分别采用波包幅值法和相关函数法计算群速度的值, 同样以 4.5° 为步进角, 对不同方向上的群速度进行计算, 如图 3b 所示为两种方法的试验结果, 图 3 中菱形是采用的波包幅值法处理的试验结果, 但波动较大, 试验与理论结果的相关性为 93.71%。图 3 中方框表示用相关函数的方法计算的群速度, 试验与理论结果的相关性为 97.29%。对比说明, 虽然两种方法都可以反映出群速度的变化趋势, 但采用相关函数法计算时间延迟, 可以获得更接近理论值得结果, 所求出的群速度更可靠。

3 缺陷检测试验研究

将 Lamb 波技术引入到单晶硅的生产和质量控制过程, 最终目的还是实现对其中可能存在的缺陷进行检测。以裂纹缺陷作为研究对象, 在单晶硅表面制备一人工刻槽, 模拟裂纹缺陷, 如图 10 所示, 缺陷长 15 mm, 宽 1 mm, 深为 0.1~0.2 mm。试验装置与第 2 节中完全一致。采用一激一收的方法对硅片进行检测, 激励传感器 T 和接收传感器 R 分别置于缺陷的两侧, 沿裂纹方向进行扫描检测, 传感器扫描的方向和范围见图 10。其中, 扫描距离为 50 mm, 扫描步长为 2 mm。

激励信号仍采用 5 周期汉宁窗调制的正弦信号, 图 11 给出了在缺陷位置和无缺陷位置接收到的信号, 由于缺陷尺寸较小, 从结果看出, 有无缺陷的直达波信号幅值差异并不明显。

考虑计算信号的相关系数确定缺陷对信号的影响^[21]。将整个扫描过程中接收到的时域信号, 提取 A_0 模态 Lamb 波的直达波信号, 均与无缺陷处的参考信号计算相关系数, 并与扫描距离建立关系绘制图 12, 扫描范围中 15~30 mm 区域对应为缺陷

位置。结果显示,有缺陷位置接收到的信号的相关系数较低,说明 Lamb 波在通过缺陷后,波形产生了一定程度的畸变,根据经验,对归一化的相关系数为 0.6 作为阈值,确定缺陷的大小,图 12 中虚线选中区域为按此阈值确定的裂纹尺寸约 12 mm,且位置与实际缺陷位置吻合,说明试验结果能很好地反映出单晶硅中的裂纹缺陷。

图 10 缺陷扫描试验布置

图 11 缺陷检测试验接收信号

图 12 相关系数法缺陷检测结果

4 结论

针对单晶硅的各向异性特点,对其各个方向上 Lamb 波的传播特性进行研究,并实现缺陷检测。得到的结论如下。

(1) 采用空气耦合超声传感器,实现了单晶硅非接触式 Lamb 波检测,无须使用任何耦合剂,相比接触法更加方便快捷。同时,还避免了耦合效果不同对试验结果的影响。

(2) 根据 Snell 定律,计算得到了中心频率 200 kHz 时,激励 A_0 模态 Lamb 波时的传感器最优入射角度为 13° ,并从试验中,通过改变入射角,验证了频散曲线的理论结果。

(3) 采用相位谱分析法对试验数据进行分析,能够得到准确的 A_0 模态 Lamb 波的相速度值,在不同方向上的试验结果与理论结果完全吻合。在单晶硅的 $\langle 110 \rangle$ 方向上相速度大,在 $\langle 100 \rangle$ 方向相对较小。为了计算准确的 A_0 模态 Lamb 波的群速度,采用波包幅值法和相关函数法计算波包时延,从结果发现,两种方法均能反映出群速度在单晶硅的 $\langle 110 \rangle$ 和 $\langle 100 \rangle$ 方向的差异,但相关函数法计算的结果,与理论群速度结果更为接近。从试验的角度,验证了单晶硅材料的各向异性对 Lamb 波的传播特性的影响。

(4) 在单晶硅缺陷检测试验中,采用一激一收的方法对单晶硅进行扫描检测,利用 A_0 模态的直达波进行缺陷识别。无法采用波包幅值重构缺陷,但计算接收信号与无缺陷参考信号的相关系数,能够很好地反映出缺陷在扫描范围内的大小和位置,证明了这种方法在单晶硅缺陷检测中的作用。

参 考 文 献

- [1] 张舞杰,李迪,叶峰. 硅太阳能电池视觉检测方法研究[J]. 计算机应用, 2010, 30(1): 249-252.
ZHANG Wujie, LI Di, YE Feng. Investigation of visual inspection method for silicon solar cell[J]. Journal of Computer Applications, 2010, 30(1): 249-252.
- [2] HAUNSCHILD J, GLATTHAAR M, DEMANT M, et al. Quality control of as-cut multicrystalline silicon wafers using photoluminescence imaging for solar cell production[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2010, 94(12): 2007-2012.
- [3] FUYUKI T, KITAYANAN A. Photographic diagnosis of crystalline silicon solar cells utilizing electroluminescence[J]. Applied Physics A, 2009, 96(1): 189-196.

- [4] BALOGUM O, COLE G D, HUBER R, et al. High-spatial- resolution sub-surface imaging using a laser-based acoustic microscopy technique[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2011, 58(1): 226-233.
- [5] BELYAEV A, POLUPAN O, DALLAS W, et al. Crack detection and analyses using resonance ultrasonic vibrations in full-size crystalline silicon wafers[J]. Applied Physics Letters, 2006, 88(11): 111907.
- [6] ROSE J L. A baseline and vision of ultrasonic guided wave inspection potential[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2002, 124(3): 273-282.
- [7] MEIER R, ZELLER U. Lamb wave based yield strength characterization of solar cell interconnectors [C]// 2013 ICU Organisers, Proceedings of the 2013 International Congress on Ultrasonics. Singapore: Research Publishing, 2013: 112-117.
- [8] 周正干, 魏东. 空气耦合式超声波无损检测技术的发展[J]. 机械工程学报, 2008, 44(6): 10-14.
- ZHOU Zhenggan, WEI Dong. Progress of air-coupled ultrasonic non-destructive testing technology[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(6): 10-14.
- [9] LIU Zenghua, YU Hongtao, HE Cunfu, et al. Delamination detection in composite beams using pure Lamb mode generated by air-coupled ultrasonic transducer[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2014, 25(5): 541-550.
- [10] SONG M, JHANG K. Crack detection in single-crystalline silicon wafer using laser generated Lamb wave[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2013(2): 1-6.
- [11] CHAKRAPANI S K, PADIYAR M J, BALASUBRAMANIAM K. Crack detection in full size Cz-Silicon wafers using Lamb wave air coupled ultrasonic testing (LAC-UT)[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2012, 31(1): 46-55.
- [12] HOPCROFT M A, NIX W D, KENNY T W. What is the Young's modulus of silicon[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2010, 19(2): 229-238.
- [13] TURLEY J, SINES G. The anisotropy of Young's modulus, shear modulus and poisson's ratio in cubic materials[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1971, 4(2): 264-271.
- [14] SU Zhongqing, YE Lin, LU Ye. Guided Lamb waves for identification of damage in composite structures: A review[J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 295(3-5): 753-780.
- [15] SOLODOY I, DÖRING D, BUSSE G. Air-coupled Lamb and Rayleigh waves for remote NDE of defects and material elastic properties[J]. Strojnicki Vestnik-Journal of Mechanical Engineering, 2010, 56(9): 557-564.
- [16] LIU Zenghua, YU Hongtao, HE Cunfu, et al. Delamination damage detection of laminated composite beams using air-coupled ultrasonic transducers[J]. Science China Physics, Mechanics and Astronomy, 2013, 56(7): 1269-1279.
- [17] CASTAINGS M, HOSTEN B. Lamb and SH waves generated and detected by air-coupled ultrasonic transducers in composite material plates[J]. NDT&E International, 2001, 34(4): 249-258.
- [18] 刘增华, 余锋祥, 于洪涛, 等. 基于群速度校准的超声导波技术及在复合材料缺陷检测中的应用[J]. 机械工程学报, 2012, 48(20): 8-15.
- LIU Zenghua, YU Fengxiang, YU Hongtao, et al. Ultrasonic guided wave technology based on group velocity calibration and its application for defect detection in composite plates[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(20): 8-15.
- [19] HAY T R, ROYER R L, GAO H, et al. A comparison of embedded sensor Lamb wave ultrasonic tomography approaches for material loss detection[J]. Smart Materials and Structures, 2006, 15(4): 946-951.
- [20] OZAKI Y, KAWAGUCHI T, TAKEDA Y, et al. High time resolution ultrasonic velocity profiler[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2002, 26(2): 253-258.
- [21] CEPEL R, HO K, RINKER B, et al. Spatial correlation coefficient images for ultrasonic detection[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2007, 54(9): 1841-1850.

作者简介: 何存富(通信作者), 男, 1958 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为机械测试理论、方法及技术、超声无损检测新技术、传感器测试技术等。

E-mail: hecunfu@bjut.edu.cn

刘岳鹏, 男, 1990 年出生。主要研究方向为计算机测试与控制技术、无损检测与健康评价。

E-mail: liuyuepeng@emails.bjut.edu.cn