

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2018.07.019

复合材料机翼前梁装配应力超声无损测量

葛恩德^{1,2}, 王伟³, 陈磊^{1,2}, 周玉锋³, 张宇民³

(1. 上海飞机制造有限公司航空制造技术研究所, 上海 201324; 2. 国家商用飞机制造工程技术研究中心, 上海 200436;

3. 哈尔滨工业大学特种环境复合材料技术重点实验室, 哈尔滨 150001)

摘要: 针对装配应力是影响飞机构件连接性能的重要因素,也是复合材料装配质量研究的难点所在的问题,通过考虑被测材料各向异性对超声波传播特性的影响,改进传统超声应力检测方法,得到适用于纤维增强类复合材料平面应力的检测方法。为了验证改进方法的可行性,对复合材料机翼中实际采用的碳纤维增强树脂基复合材料结构件进行了装配应力的检测。经可行性分析,确定复合材料结构件应力检测主要实验方案,为今后飞机复材结构件的内部应力检测试验提供基础。

关键词: 超声应力检测; 装配应力; 复合材料; LCR 波

中图分类号: TB33, V258 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2018)07-0096-05

Assembly Stress Measurement of Front Beam in Composite Wing Based on Ultrasonic Non-destructive Testing Method

Ge Ende^{1,2}, Wang Wei³, Chen Lei^{1,2}, Zhou Yufeng³, Zhang Yumin³

(1. Institute of Aeronautical Manufacturing Technology, Shanghai Aircraft Manufacturing Co., Ltd., Shanghai 201324, China;

2. National Engineering Research Center for Commercial Aircraft Manufacturing, Shanghai 200436, China;

3. Science and Technology on Advanced Composites in Special Environments Laboratory, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Aiming at the problems that assembly stress was an important factor affecting the connection performance of aircraft components, and it was also a difficult point for the study of the assembly quality of composite materials, by considering the influence of anisotropy of measured material on the propagation characteristics of ultrasonic waves, the traditional ultrasonic stress measuring method was improved, and the measuring method for plane stress of fiber reinforced composites was obtained. In order to verify the feasibility of the improved method, the assembly stress of carbon fiber reinforced polymer matrix composite structure was tested in composite wing. Through the feasibility analysis, the main test plan of stress measuring for composite structure components was determined, which provided a basis for the future internal stress test of aircraft composite structures.

Keywords: ultrasonic stress measuring method; assembly stress; composite; LCR wave

以碳纤维增强复合材料为代表的高强低密度复合材料具有优良的物理、力学特性。近年来随着航空工业的迅猛发展,复合材料作为大飞机主承力结构的使用量逐年增长^[1],并逐步取代金属材料成为主要飞机结构材料。复合材料已在大型客机平尾、方向舵等大型结构件获得应用,波音空客所生产最新机型的复合材料用量已达到50%^[2-3],复合材料已成为衡量现代飞机先进性的重要标志。飞机制造

不可避免要进行不同复材结构件的连接与装配,由于固化过程的零件变形以及加工误差的存在,造成了复材结构件在装配过程中产生不同程度的装配应力,并影响了飞机结构的装配质量和连接性能。

构件应力的检测技术发展至今已形成了数十种检测方法。根据是否对被测材料造成损坏,残余应力的检测方法可分为有损检测和无损检测方法。有损检测方法又称为机械方法,主要是通过机械的

基金项目: 国家973计划项目(2014CB046504, 2014CB046505)

通讯作者: 葛恩德, 博士后, 主要研究方向为航空材料加工与装配技术 E-mail: geende@163.com

收稿日期: 2018-04-16

引用格式: 葛恩德, 王伟, 陈磊, 等. 复合材料机翼前梁装配应力超声无损测量[J]. 工程塑料应用, 2018, 46(7):96-100, 106.

Ge Ende, Wang Wei, Chen Lei, et al. Assembly stress measurement of front beam in composite wing based on ultrasonic non-destructive testing method[J]. Engineering Plastics Application, 2018, 46(7):96-100, 106.

手段释放被测材料局部的应力,利用弹性力学原理即可得到释放的应力值,比如切片法、轮廓法、盲孔法、环芯法等;无损检测方法又称为物理方法,主要是通过确定一些物理量与应力之间的联系,达到在不损坏材料的基础上检测残余应力的目的,比如 X 射线衍射法、中子衍射法、磁性测定法、扫描电子显微镜法和超声波法等^[4]。1953 年, D. S. Hughe 等^[5]基于 Murnaghan 有限变形原理和三阶应变能方程,并引入拉梅常数和 Murnaghan 常数,最终推导出各向同性材料的声弹性理论早期表达式,为声弹性技术奠定了理论基础。1995 年, D. E. Bray 等^[6]提出了基于声弹性技术的超声临界折射纵波 (LCR 波) 测量纵向应力的方法,该方法利用第一临界入射角产生平行于被测表面传播的纵波,从而测得波传播区域的切向应力。之后 D. E. Bray 等^[7]采用一发两收结构的 LCR 波探头对压力容器、管道等的焊接残余应力进行了检测,结果与盲孔法得到的数值基本吻合。自此以后,基于 LCR 波的应力检测逐渐成为各国研究的热点。A. Joseph 等^[8-10]在超声波法测量金属残余应力方面做了大量的工作,首先他们使用超声波法研究了低碳钢焊接接头残余应力的分布规律,之后研究了不锈钢板的亚表面残余应力和不同焊接管道厚度的残余应力变化。S. Sadeghi 等^[11]同样使用超声波法对铝板摩擦搅拌焊接中残余应力的分布进行了评价。

目前超声应力检测技术主要集中于金属结构件的研究,对于复合材料装配应力的研究报道较少。在复合材料应力检测方面,巴西学者 A. A. Dos Santos 等^[12]研究了单向碳纤维增强塑料测量应力的可行性,他们分别在 0° 、 45° 和 90° 的三个纤维方向上测量了声弹性系数。

通过考虑被测材料各向异性对超声波传播特性的影响,笔者开发了适用于纤维增强类复合材料平面装配应力的检测方法,并依托复合材料机翼项目开展了碳纤维复合材料机翼前梁的装配应力检测,为大型复合材料结构件的内部应力检测试验提供基础。

1 超声应力检测原理

复合材料尤其是纤维增强复合材料往往表现出明显的各向异性。超声波在各向异性材料中传播时,会由于材料的各向异性属性和内部应力的影响而发生声速的突变。针对被广泛应用的正交铺层碳纤维增强树脂基复合材料 (CFRP),建立如图 1 所示

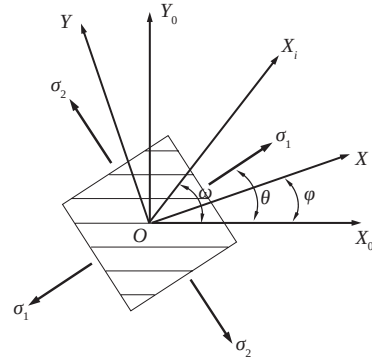


图 1 各向异性材料超声应力分析坐标系

正交各向异性材料超声应力分析坐标系,来分析纵波在受力材料中的传播特性。首先,在无应力状态下, XOY 平面内纵波的两个传播主方向为 X_0, Y_0 。

当材料处于与纤维方向呈 θ 角的平面主应力状态时,相对于无应力状态,纵波的传播声速和传播主方向会受加载应力的影响发生变化,此时主传播方向坐标系为 XOY , 与材料方向坐标系呈角 φ 。为方便分析,这里定义声速矩阵 $[V_{ij}]$:

$$V_{ij} = (V_{ij})_0 + \Delta V_{ij} \quad (1)$$

$$\Delta V_{ij} = \alpha_{ij} \sigma_{ij} \quad (2)$$

其中 $[\alpha_{ij}]$ 为设定的应力系数矩阵,其形式类似于柔度矩阵^[13] :

$$[\alpha_{ij}] = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} & & & \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23} & & & 0 \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} & \alpha_{33} & & & \\ & & & \alpha_{44} & & \\ & & & 0 & \alpha_{55} & \\ & & & & & \alpha_{66} \end{bmatrix} \quad (3)$$

通常情况下,声速的测量会使检测过程更加复杂,并引入更多误差。因此,引入物理量声时差 $T(\text{TOF})$,将声速的测量转化为声时差的测量。

$$T = \Delta t = - (L / V^2) \Delta V \quad (4)$$

其中 $K_0 = -L / V^2$, L 为检测过程中纵波的传播声程 (固定值),同时引入如下常数:

$$\left. \begin{aligned} m_1 &= K_0 (\alpha_{11} - \alpha_{22}) / 4 \\ m_2 &= K_0 (\alpha_{11} + \alpha_{22} + 2\alpha_{12}) / 4 \\ m_3 &= K_0 (\alpha_{11} + \alpha_{22} - 2\alpha_{12}) / 4 \\ m_4 &= K_0 \alpha_{66} / 4 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

将式 (3) 代入到式 (1) 和 (2),经推导得到检测

信号声时差 T 与材料所受主应力 σ_1, σ_2 的关系如下^[14]:

$$T = K_1 \sigma_1 + K_2 \sigma_2 \quad (6)$$

上式即为对于正交各向异性复合材料的超声应力关系表达式,其中 $K_1 = m_1(\cos 2\theta + \cos 2\omega) + m_2 + m_3 \cos 2\theta \cos 2\omega + m_4 \sin 2\theta \sin 2\omega$; $K_2 = -m_1(\cos 2\theta - \cos 2\omega) + m_2 - m_3 \cos 2\theta \cos 2\omega - m_4 \sin 2\theta \sin 2\omega$; m_1, m_2, m_3, m_4 为待确定参数,称为声应力系数; σ_1, σ_2 为材料所受主应力大小; θ 为最大主应力与碳纤维的夹角。

式(6)给出了检测物理量声时差与主应力的关系,然而对于处于平面应力状态的正交各向异性层合板,单单通过一次测量是不足以得到 σ_1, σ_2 和 θ 三个未知量,因此需同时进行三个不同方向 $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ 的声时差测量,得到对应的 T_1, T_2, T_3 ,通过联立进行求解,检测示意图如图2所示。

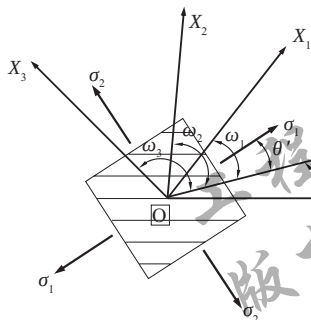


图2 平面应力超声检测示意图

为方便计算和表达,测量时取 $\omega_1=0^\circ, \omega_2=45^\circ, \omega_3=90^\circ$,根据公式(6)联立三个关系式求解得到主应力大小及方向的计算表达式为:

$$\sigma_1 = \frac{1}{2}(\sqrt{M^2 + N^2} + L) \quad (7)$$

$$\sigma_2 = \frac{1}{2}(L - \sqrt{M^2 + N^2}) \quad (8)$$

$$\theta = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{M}{N}\right) \quad (9)$$

其中,

$$L = \frac{(T_1 + T_3)m_3 - (T_1 - T_3)m_1}{2m_2m_3 - 2m_1^2} \quad (10)$$

$$N = \frac{(T_1 - T_3)m_2 - (T_1 + T_3)m_1}{2m_2m_3 - 2m_1^2} \quad (11)$$

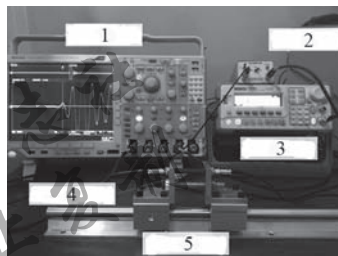
$$M = \frac{2T_2 - T_1 - T_3}{2m_4} \quad (12)$$

根据公式(7)~(12),即可根据三个方向的声时差测量值计算出被测材料所处的平面应力状态。

2 试验实施

2.1 声速测量及超声楔块的设计

为实现复合材料超声应力检测,首先设计超声楔块和搭建声速测量装置,通过超声楔块提供固定的人射角使得超声探头能够在被测材料内激发 LCR 波。设计超声楔块前,首先要明确被测材料不同方向的声速值。试验采用两个超声纵波探头进行信号的“一发一收”,分别测量三个角度纵波的传播速度。针对试验工况,设计了相应的滑轨和夹具,用来保持收发探头与试样的紧密接触,声速测量装置如图3所示。



1—数字示波器;2—前置放大器;3—信号发生器;
4—被测 CFRP 材料;5—声速测量卡具

图3 CFRP材料声速测量装置

为保证测量数据的重复性及准确性,每个角度的条形试样各加工5件进行声速测量。试验所用 CFRP 材料的声速值如表1所示。可明显看出,纵波沿纤维方向传播速最快,大约是垂直于纤维方向的3倍。根据斯涅耳定律,选择声速较低的聚四氟乙烯(声速为1422 m/s)作为楔块材料,并分别计算对应的第一临界角。研究表明,当入射角比第一临界角大 1° 左右时,LCR 波的振幅是最大的^[15]。测量得到的入射角列于表1。

表1 CFRP材料声速值

测量角度 / ($^\circ$)	声速 / ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	入射角 / ($^\circ$)
0	9259	10
45	6503	14
90	2890	30

为了同时检测拉伸试样三个方向的声时差,并降低由接触面耦合层滑动、角度及收发探头间距变化引起的测量误差,设计了如图4所示正八边形超声楔块。该楔块根据表1中不同测量角度预制相应的入射角斜面,确保在材料内部该检测方向激发 LCR 波。超声探头与超声楔块间通过螺纹连接,探头和聚四氟乙烯楔块间预留空腔,并填充耦合剂。

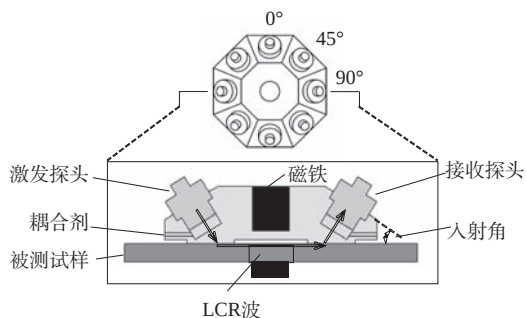


图4 三向超声楔块示意图

为了保持楔块与被测材料间紧密接触,楔块中部镶嵌了一组钕铁硼磁铁。

2.2 声时差检测系统

为了检测 CFRP 材料沿纤维三个不同方向声弹性关系,搭建了如图 5 所示实验系统。用于输出超声信号的是 RIGOL 公司的 DG1022 信号发生器,它在输出脉冲正弦波的同时也输出同步信号,用于触发示波器。使用设计的超声楔块,三路脉冲正弦波信号依次激励三个激发探头,产生的超声纵波以第一临界角入射进入聚四氟乙烯楔块,并在楔块与被测试样的接触面处发生折射。另外,选用 Tektronix 公司的 MSO4104B 数字示波器来采集接收到的信号,该型号的示波器具有最大 2.5 GS/s 的采样频率,足以满足检测精度的需求。同时为了保证接收信号的强度,选用 OLYMPUS 的 5660B 前置放大器对接收信号进行放大,增益选择为 60 dB。示波器采集到的信号经计算机数据处理后即可得到由应力引起的声时差。使用的探头为频率 2.5 MHz 的压电陶瓷换能器,压电晶片直径为 6 mm。

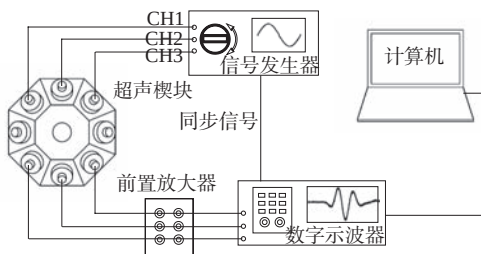
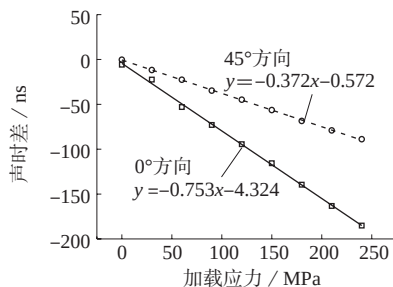


图5 三向声时差测试系统示意图

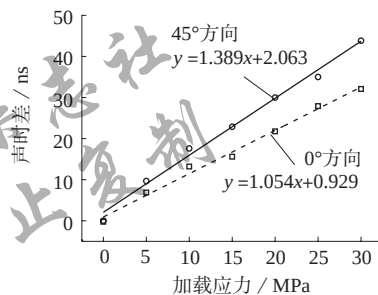
2.3 应力系数标定

针对试验所用 CFRP 材料,利用单轴力学试验对公式 (6) 中所需的应力系数进行标定。标定实验选取 0° 和 45° 单向拉伸试样,使用万能力学试验机对试样进行等应力间隔阶梯加载,每个加载间隔中使用上述检测系统记录下声时差数据。实验中将拉伸试样以 30 MPa 为间隔加载,每个加载阶段保持

20 s 以便进行声时差测量。分别记录与加载方向呈 0° 和 45° 方向的声时差变化。图 6 所示为单轴拉伸实验加载时,与加载方向呈 0° 和 45° 方向的声时差-应力曲线。图中曲线的斜率分别为应力系数 K_1 和 K_2 ,斜率绝对值的大小也可表示声时差对应力的敏感程度。



(a)



a—0°拉伸试样;b—45°拉伸试样

图6 应力系数标定实验数据

3 试验过程

3.1 检测现场工况

根据现场实际检测状况,被测结构件为某型号飞机机翼局部段,主体结构由 CFRP 组成,由于上壁板和下壁板均已完全喷涂涂料,不满足超声透射条件,因此检测以前梁腹板为对象,如图 7 所示。被测 CFRP 前梁腹板为条形层合板,长约 3 m,宽约 0.5 m,厚度满足检测条件,由螺栓与其他构件连接,同时也将前梁腹板分为 5 个检测区域。加工误差势必会在螺栓连接处引起局部装配应力,试验将分别检测 5 个区域螺栓周边的应力状态。



图7 复材机翼装配现场超声应力测量

3.2 检测方案

由于无法找到与被测件相同性能的随炉件作

为声时基准,以每个检测区域远离螺栓连接区域的中心点为零应力基准点,并忽略该点存在的应力状态,沿螺栓连接区域进行周边逐点检测,检测点区域为直径 20 mm,检测示意图如图 8 所示。同时为了便于检测,建立如图 XOY 所示坐标系,楔块三个通道分别与 X 轴成 0° 、 45° 和 90° 放置。

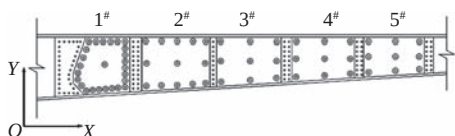
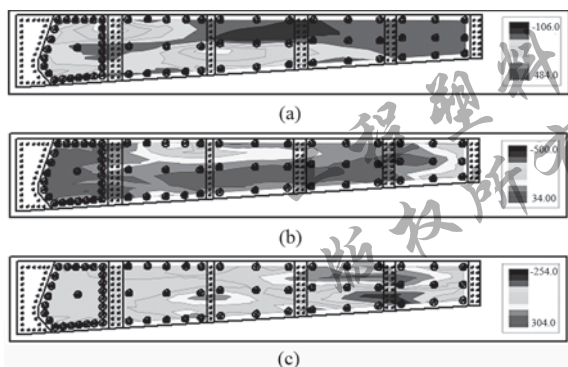


图 8 前梁腹板检测示意图及测点分布

4 试验结果及分析

检测时每点测量三次,以满足试验重复性和降低误差的要求。根据公式 (7)~(12),即可计算得到每个测点处的主应力大小和方向。为便于对所有测量点统一分析,将主应力分解为 X 轴和 Y 轴的正应力和切应力,并绘制应力场分布,如图 9 所示。



a—X 轴方向正应力;b—Y 轴方向正应力;c—切应力

图 9 被测结构件应力场分布

由图 9a 可知, X 轴方向正应力集中区主要在 1[#] 和 2[#] 板上交接处及 2[#] 和 3[#] 板的下交接处;另外在 3[#] 和 4[#] 的上交接处在 X 轴方向出现了较大的压应力。由图 9b 可知, Y 轴方向较大应力主要集中在 2[#] 和 3[#] 板上交接处,以及 5[#] 板右半边部分,而且应力主要体现为压应力。由图 9c 可知,切应力主要集中在 2[#] 和 3[#] 板的中部连接处,以及 4[#] 和 5[#] 板的连接处大部,且呈现上正下负趋势,即上部切应力沿 Y 轴正向,反之下部沿 Y 轴负向。

综上所述,1[#]、2[#]、3[#] 板在交接处存在较大的应力集中,4[#] 和 5[#] 板的交接处存在着较大的切应力。

5 结论

(1) 首先从原理上改进了传统超声应力检测方法,使其适用于纤维增强类复合材料平面应力检测;

(2) 通过同时测量 0° 、 45° 和 90° 三个方向的声时差变化,计算得到了测点处的主应力,进而可以得到测点处任意方向的正应力和切应力;

(3) 通过绘制正应力和切应力分布场图,检测得到 1[#]、2[#]、3[#] 板在交接处存在较大的应力集中,4[#] 和 5[#] 板的交接处存在着较大的切应力的结论。

参考文献

- [1] 张涵英,刘明. 碳纤维复合材料的发展及应用[J]. 工程塑料应用, 2015,43(11):132-135.
Zhang Hanying, Liu Ming. Development and applications of carbon fiber reinforced polymer[J]. Engineering Plastics Application, 2015,43(11):132-135.
- [2] 乌云其格,张连鸿,廖子龙. 碳纤维复合材料性能研究及应用[J]. 工程塑料应用,2009,37(10):37-39.
Wuyun Qiqige, Zhang Lianhong, Liao Zilong. Study on properties of carbon fiber composite and its application[J]. Engineering Plastics Application, 2009,37(10):37-39.
- [3] 曹春晓. 一代材料技术,一代大型飞机[J]. 航空学报,2008,29(3):701-706.
Cao Chunxiao. One generation of material technology, one generation of large aircraft[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2008,29(3):701-706.
- [4] 宋文涛. 残余应力超声无损检测与调控技术研究[D]. 北京:北京理工大学,2016.
Song Wentao. Study on technology of ultrasonic nondestructive testing and regulation of residual stress[D]. Beijing:Beijing Institute of Technology, 2016.
- [5] Hughes D S, Kelly J L. Second-order elastic deformation of solids[J]. Physical review, 1953,92(5):1 145.
- [6] Bray D E, Junghans P. Application of the LCR ultrasonic technique for evaluation of post-weld heat treatment in steel plates[J]. NDT & E International, 1995,28(4):235-242.
- [7] Bray D E. Ultrasonic stress measurement and material characterization in pressure vessels, piping, and welds[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2002,124(3):326-335.
- [8] Joseph A, Palanichamy P, Jayakumar T. Evaluation of residual stresses in carbon steel weld joints by ultrasonic LCR wave technique[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2015,34(1):266.
- [9] Javadi Y. Investigation of clamping effect on the welding residual stress and deformation of monel plates by using the ultrasonic stress measurement and finite element method[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2015,137(1):011 501.
- [10] Javadi Y, Krolczyk G M, Hloch S. Evaluation of hoop residual stress variations in the thickness of dissimilar welded pipes by using the LCR ultrasonic waves[J]. Tehnički vjesnik, 2016,23(2):329-335.

(下转第 106 页)

为 ATP 和 WF 基体中缠绕形成的纤维网络构架对热量传导起到了阻碍作用。

参考文献

- [1] Pedrazzolia D, Khumalo V M, Karger-Kocsis J, et al. Thermal, viscoelastic and mechanical behavior of polypropylene with synthetic boehmite alumina nanoparticles[J]. *Polymer Testing*, 2014, 35:92–100.
- [2] Li N, Xia Y, Mao Z, et al. Influence of antimony oxide on flammability of polypropylene / intumescent flame retardant system[J]. *Polym Degrad Stab*, 2012, 97:1 737–1 744.
- [3] Ding H L, Guo L Y. Effect of annealing temperature on low-temperature toughness of β -nucleated polypropylene randomcopolymer / ethylene-propylened-diene terpolymer blends[J]. *Chinese Journal of Polymer Science*, 2015, 33:256–264.
- [4] Rupesh A K, Bhattacharyya A R, Kulkarni A R. Melt mixed polypropylene / acrylonitrile-butadiene-styrene blends with multiwall carbon nanotubes:effect of compatibilizer and modifier on morphology and electrical conductivity[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2011, 120:2 663–2 672.
- [5] Xia Y, Zhu Y, Zhou Y, et al. Improved dispersion of attapulgite in polypropylene by grap oxide and the enhanced mechanical properties[J]. *Polymer Composites*, 2016, 39(2):560–568.
- [6] 柳峰,徐冬梅,刘琼琼,等. 纳米凹凸棒土对 PP/EPDM/EP 性能的影响[J]. *工程应用塑料*, 2012, 40(5):33–35.
- Liu Feng, Xu Dongmei, Liu Qiongqiong, et al. Influence of nanoattapulgite on properties of PP / EPDM / EP composites[J]. *Engineering Plastics Application*, 2012, 40(5):33–35.
- [7] Morandim-Giannetti A A, et al. *Carbohydrate Polymers*, 2012, 87(4):2 563–2 568.
- [8] Nenkova S, Dobrilova C, Natov M, et al. Modification of wood flour with maleic anhydride for manufacture of wood-polymer composites[J]. *Polymer Composites*, 2006, 14(2):185–194.
- [9] Faruk O, Matuana L M. Nanoclay reinforced HDPE as a matrix for wood-plastic composites[J]. *Composites Science and Technology*, 2008, 68(9):2 073–2 077.
- [10] Saheb M S M D, Tambe P, Malathi M. Influence of halloysite nanotubes(HNTs) on morphology, crystal-lization, mechanical and thermal behaviour of PP / ABS blend and their composites in presence and absence of dual compatibilizer[J]. *Composites Interfaces*, 2016, 5:433–451.
- [11] 高翔,毛立新,张猛响,等. 凹凸棒土 / 聚丙烯 / 聚碳酸酯三元复合材料的力学性能及增韧机理[J]. *复合材料学报*, 2005, 22(3):1–8.
- Gao Xiang, Mao Lixin, Zhang Mengxiang, et al. Mechanical properties and toughening mechanism of ternary AT / PP / PC composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2005, 22(3):1–8.
- [12] 周团元,梁基照. 多壁碳纳米管含量对 PP / 多壁碳纳米管复合材料热稳定性和结晶的影响[J]. *塑料工业*, 2015, 43(11):81–84.
- Zhou Tuanyuan, Liang Jizhao. Effects of multi-walled carbon nanotubes content on the thermal stability and crystallization of PP / multi-walled carbon nanotube composites[J]. *China Plastics Industry*, 2015, 43(11):81–84.
- [13] Krache R, Debbah I. Some mechanical and thermal properties of PC / ABS blends[J]. *Materials Sciences and Applications*, 2011(2):404–410.
- [14] Xu X, He Z, Lu S R, et al. Enhanced thermal and mechanical properties of lignin / polypropylene wood-plastic composite by using flexible segment-containing reactive compatibilizer[J]. *Macromolecular Research*, 2014, 22(10):1 084–1 089.
- [15] Zhao L, Liu P. The origin of the curing behavior, mechanical and thermal properties of surface functionalized attapulgite / bismaleimide / diallylbisphenol composites[J]. *Applied Surface Science*, 2014, 288:435–443.
- [11] Sadeghi S, Najafabadi M A, Javadi Y, et al. Using ultrasonic waves and finite element method to evaluate through-thickness residual stresses distribution in the friction stir welding of aluminum plates[J]. *Materials & Design*, 2013, 52:870–880.
- [12] Dos Santos A A, Ambiel L B, Garcia R H, et al. Stress analysis in carbon / epoxy composites using LCR waves[J]. *Journal of composite materials*, 2014, 48(27):3 425–3 434.
- [13] Okada K. Stress-acoustic relations for stress measurement by ultrasonic technique[J]. *Journal of the Acoustical Society of Japan (E)*, 1980, 1(3):193–200.
- [14] Wang W, Zhang Y, Zhou Y, et al. Plane stress measurement of orthotropic materials using critically refracted longitudinal waves[J]. *Ultrasonics*, 2018, 32(2):89–96..
- [15] Chaki S, Ke W, Demouveau H. Numerical and experimental analysis of the critically refracted longitudinal beam[J]. *Ultrasonics*, 2013, 53(1):65–69.

(上接第 100 页)