

RTM 玻璃纤维/E51 环氧树脂复合材料 孔隙含量对超声特征参数的影响

陆铭慧*, 刘磨, 张雪松, 张毅萍, 郑善朴, 江淑玲

(南昌航空大学 无损检测技术教育部重点实验室, 南昌 330063)

摘 要: 在 0.1~0.35 MPa 的树脂注射压力条件下, 制备了孔隙含量不同的玻璃纤维连续毡/E51 环氧树脂的树脂传递模塑(RTM)工艺试件, 采用超声法、金相法和密度烧失法测量试件的孔隙含量。讨论了孔隙含量随树脂注射压力变化以及孔隙含量对 RTM 玻璃纤维/环氧树脂复合材料超声参数和力学性能的影响规律。结果表明, 树脂注射压力的变化对孔隙含量产生明显影响, 注射压力由 0.1 MPa 增加到 0.35 MPa 过程中, 玻璃纤维连续毡/E51 环氧树脂复合材料的孔隙含量从 9.95% 减小至 3.73%。超声特征参数随孔隙含量的增加呈近于线性递增, 尤其是超声非线性特征参数的变化更加明显, 超声特征参数的变化可评价复合材料孔隙含量。

关键词: RTM 工艺; 注射压力; 孔隙含量; 密度烧失法; 超声特征参数

中图分类号: TB332; TG15.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-3851(2018)02-0291-07

Effect of void content on ultrasonic characteristic parameters of RTM glass fiber/epoxy composites

LU Minghui*, LIU Mo, ZHANG Xuesong, ZHANG Yiping, ZHENG Shanpu, JIANG Shuling

(Key Laboratory of Nondestructive Testing, Ministry of Education, Nanchang Hangkong University,
Nanchang 330063, China)

Abstract: The RTM process specimens of glass fiber continuous mat/E51 epoxy resin with different void content were prepared by applying different injection pressure (0.1—0.35 MPa). The void content of the specimen was measured by ultrasonic method, metallography and density measurement/resin burnout method. The relationship between void content and resin injection pressure was investigated. Effect of void content on ultrasonic parameters and mechanical property of RTM composites was discussed. The results show that, the change of resin injection pressure has a significant effect on the void content. The injection pressure increases from 0.1 MPa to 0.35 MPa, and the void content of glass fiber continuous mat/E51 epoxy resin composites decreases from 9.95% to 3.73%. Ultrasonic characteristic parameters are nearly linearly increased with the increasing of void content, and especially the change of ultrasonic nonlinear characteristic parameters are more obvious. The change of ultrasonic parameters can evaluate void content of composite materials.

Keywords: RTM process; injection pressure; void content; density ablative method; ultrasonic characteristic parameters

树脂传递模塑(RTM)玻璃纤维/环氧树脂复合材料具有成本低、成型速度快、强度高、耐腐蚀性好、电绝缘性能好等优点而被广泛应用于军工、航空、

汽车、船舶、建筑等领域^[1], 而 RTM 复合材料在成型过程中产生的孔隙微缺陷会影响材料的力学性能、冲击性能和疲劳寿命^[2]等。Judd 和 Wright^[3]

收稿日期: 2017-01-19; 录用日期: 2017-03-23; 网络出版时间: 2017-04-26 12:30

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1801.TB.20170426.1230.002.html>

基金项目: 国家自然科学基金(61062010)

通讯作者: 陆铭慧, 博士, 教授, 研究方向为超声检测研究及教学 E-mail: lunara@163.com

引用格式: 陆铭慧, 刘磨, 张雪松, 等. RTM 玻璃纤维/E51 环氧树脂复合材料孔隙含量对超声特征参数的影响[J]. 复合材料学报, 2018, 35(2): 291-297.

LU Minghui, LIU Mo, ZHANG Xuesong, et al. Effect of void content on ultrasonic characteristic parameters of RTM glass fiber/epoxy composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(2): 291-297 (in Chinese).

研究表明,孔隙率在小于5%时,每增加1%,层间剪切强度则会随之下降7%,弯曲强度则以约10%的比例下降,弯曲模量则以约5%的比例下降^[4]。

超声检测是复合材料缺陷检测中最常用的无损检测技术^[5]。超声波在材料中传播时,遇到孔隙微缺陷会发生散射、折射、波形畸变等现象,造成能量散失、传播速度改变和非线性效应的产生,因此可以利用声速法、声衰减法、声阻抗法和非线性法等评价复合材料孔隙含量。D E W Stone 和 Clarke 等^[6]认为孔隙含量的不同引起的声波穿透时间变化很小,对超声检测设备的要求很高。Ki-Bok Kim 等^[7]利用超声背散射信号及其小波变换测量了复合材料的孔隙含量。马雯等^[8]的研究认为超声衰减系数随孔隙率的升高呈上升趋势,且在一定的范围内二者近似呈线性关系。Ishii 等^[9]认为声速和声衰减系数随孔隙含量单调改变,且声衰减系数和孔隙含量的关系也和孔隙的尺寸大小有关。Duong 等^[10]认为在低孔隙含量下复合材料超声衰减系数和孔隙含量成线性关系。

前人主要针对碳纤维/玻璃纤维增强树脂基复合材料层压板的孔隙含量对超声衰减系数和力学性能的影响进行研究^[5, 8-14],对 RTM 玻璃纤维/环氧树脂复合材料孔隙含量的超声非线性评价方法研究较少。本文分别测量了不同成型压力下的玻璃纤维连续毡/E51 环氧树脂的超声衰减系数、非线性系数和孔隙含量,并研究了孔隙含量与超声衰减系数、超声非线性系数和材料力学性能变化的关系。

1 材料的声学特征参数

1.1 超声衰减系数

造成超声波衰减的主要原因是波束扩散、晶粒散射和介质吸收^[15]。

对于表面光洁、厚度小、上下底面互相平行的薄板试块或工件,可用直探头脉冲反射法产生的多次底波计算材料衰减系数^[16]。超声衰减系数计算公式:

$$a = \frac{20\lg(B_m/B_n) - \delta}{2(n-m)x} \tag{1}$$

式中: m 和 n 分别为底波的反射次数; B_m 和 B_n 分别为第 m 、 n 次底波高度; δ 为反射损失,每次反射约为 0.5~1.0 dB; x 为薄板的厚度。

1.2 超声相对非线性系数

非线性超声检测是利用声波在材料中传播时介质或微小缺陷与其相互作用的非线性响应信号进行

材料性能的评估和微小缺陷的检测,本质上反映的是微小缺陷对材料非线性的影响,检测的特征参数并不受限于缺陷和损伤的大小^[17]。

本文利用有限振幅法激发材料的非线性效应,对材料特性进行表征^[18]。评价有限振幅声波非线性产生程度的一个重要参数是相对非线性系数^[19],其表达式如下:

$$\beta = \frac{A_2}{A_1^2} \tag{2}$$

式中: β 为二阶相对非线性系数; A_2 和 A_1 分别为超声波二次谐波幅值和基波幅值。

2 孔隙样品制备及测试

2.1 RTM 玻璃纤维/环氧树脂复合材料试件的制备

采用 RTM 成型工艺制作玻璃纤维/环氧树脂复合材料试件。原料有表面密度为 450 g/m² 的玻璃纤维连续毡、E51 环氧树脂和固化剂三乙烯四胺,环氧树脂与固化剂的质量比为 100:11.4。在模具中制作好 6 个预制体,毡的铺层层数为 3 层,树脂注射压力为 0.1~0.35 MPa,常温固化 7 天,厚度均是 8.3 mm,尺寸为 200 mm×200 mm。

2.2 超声 C 扫描成像检测

利用超声 C 扫描特征成像方法,确定 RTM 复合材料试样的孔隙均匀分布区域。扫描方式为水浸式脉冲反射法,选择中心频率为 5 MHz、1.0 inch 的聚焦探头,检测设备由南昌华油航空技术检测工程有限公司提供。检测范围与试样尺寸一致。

2.3 超声衰减系数的测量

图 1 是测量声衰减系数的系统实物图,该系统是由奥林巴斯公司的 5077PR 超声脉冲发射/接收仪、泰克公司的 TDS3032B 数字示波器和发射接收

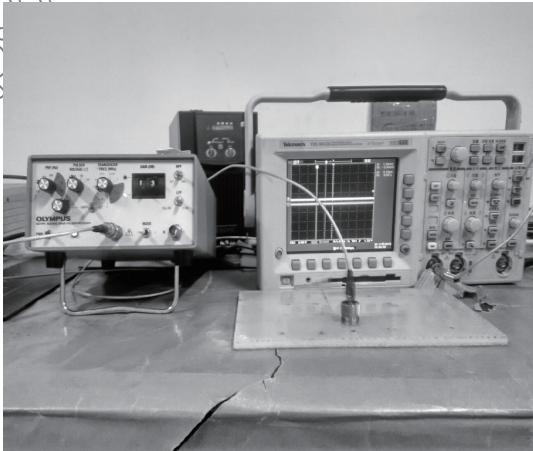


图 1 超声衰减系数测量系统

Fig. 1 Ultrasonic attenuation coefficient measurement system

换能器组成。

实验中根据材料的特点选择合适的超声探头。利用脉冲反射法, 测量一次底波和二次底波的幅值, 用相应的公式计算出材料的声衰减系数。

2.4 超声相对非线性系数测量

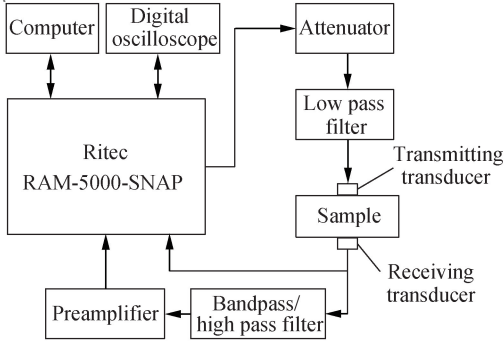
图 2 是非线性系数测量系统原理图与实物图。其中包括 Ritec RAM-5000-SNAP 非线性超声测试

系统、衰减器、低通滤波器等。试验系统采用声波穿透法测量基波和高次谐波幅值, 发射换能器采用频率为 2.5 MHz 的铌酸锂晶片, 接收换能器采用频率为 5 MHz 的宽带探头。

在每个试件中孔隙分布均匀的区域取 3 个点, 利用非线性测试系统测量试件每个点的基波和二次谐波幅值, 代入计算公式可得试件的二阶相对非线性系数。



(a) Real figure of the system



(b) Principle diagram of the system

图 2 相对非线性系数测量系统
Fig. 2 Relative nonlinear coefficient measurement system

2.5 孔隙含量测量

根据超声 C 扫描结果, 在每块玻璃纤维连续毡/E51 环氧树脂复合材料的图像均匀区域选取 3 个 10 mm×10 mm 大小的试样。依据标准 GB/T 2577—2005^[20] 及 GB/T 1463—2005^[21] 测量材料的密度和树脂含量, 用密度烧失法测定玻璃纤维连续毡/E51 环氧树脂复合材料中的孔隙含量。计算公式如下:

$$V = 1 - \left(\frac{\omega_f}{\rho_f} \times \rho_c + \frac{\omega_r}{\rho_r} \times \rho_c \right)$$
 (3)

式中: V 为材料的孔隙含量; ρ_c 为材料试样的密度; ω_r 和 ω_f 分别为纤维和树脂的质量分数; ρ_r 和 ρ_f 分别为纤维和树脂的密度。

2.6 力学性能测试

根据标准 GB/T1449—2005^[22] 和标准 GB/T1451—2005^[23] 分别测量玻璃纤维连续毡/E51 环氧树脂复合材料的弯曲强度和冲击强度。

2.7 金相分析

将树脂注射压力分别为 0.1 MPa、0.2 MPa 和 0.3 MPa 的玻璃纤维连续毡/E51 环氧树脂的 RTM 工艺试件切割成尺寸为 10 mm×10 mm, 厚度为 8.3 mm, 并用环氧树脂将试样镶嵌成圆柱形, 用金相显微镜(XJP-300, 南京)观察每个试样的孔隙形状、大小和数量, 放大倍数均为 100 倍。

复合材料金相实验方法包括磨光、抛光、浸蚀和观察等四步^[24]。

3 玻璃纤维/E51 环氧树脂测试结果与分析

3.1 超声 C 扫描成像

利用超声 C 扫描特征成像方法对 6 种不注射同压力下的玻璃纤维连续毡/E51 环氧树脂复合材料试件进行成像。图 3 所示为注射压力为 0.35 MPa 下的玻璃纤维连续毡/E51 环氧树脂的 RTM 工艺试件的超声 C 扫描成像图。可知, 树脂注射压

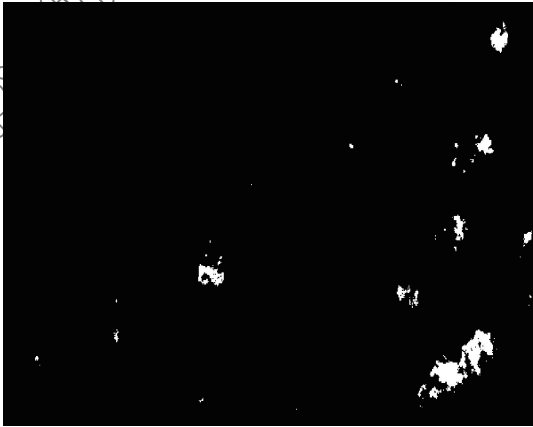


图 3 注射压力为 0.35 MPa 的玻璃纤维连续毡/E51 环氧树脂复合材料超声 C 扫描成像

Fig. 3 Ultrasonic C-scanning image of glass mat/E51 epoxy composites with injection pressure of 0.35 MPa

力为 0.35 MPa 的玻璃纤维复合材料的孔隙较少，且图像颜色分布均匀。

3.2 树脂注射压力对试样孔隙含量的影响

根据超声 C 扫描特征成像结果，选择颜色分布均匀的区域用于测量试件的孔隙含量、超声特征参数和力学性能。通过实验测量不同树脂注射压力下的玻璃纤维连续毡/E51 环氧树脂的 RTM 工艺试

件的平均孔隙含量、超声特征参数和力学性能。测量数据如表 1 所示。可以看出，在 0.1 MPa 注射压力下，材料的孔隙含量最大，为 9.95%，0.35 MPa 的注射压力下，材料的孔隙含量最小，为 3.73%。随着注射压力的增大，材料的孔隙含量减少。树脂注射压力与材料孔隙含量的关系曲线如图 4 所示。

表 1 玻璃纤维连续毡/E51 环氧树脂复合材料在不同注射压力下的孔隙含量、超声特征参数及力学性能
Table 1 Void content, ultrasonic parameters and mechanical properties of glass mat/E51 epoxy composites in different injection pressures

Injection pressure/MPa	Void content/%	Acoustic velocity/(m·s ⁻¹)	Attenuation coefficient/(dB·mm ⁻¹)	Nonlinear coefficient/10 ⁻³	Flexural strength/MPa	Impact strength/MPa
0.10	9.95	2 610	1.083	1.611	39.45	30.46
0.15	8.23	2 634	0.962	1.306	43.97	39.63
0.20	6.77	2 654	0.895	1.122	55.84	40.15
0.25	5.82	2 660	0.841	1.013	71.46	46.43
0.30	4.69	2 667	0.817	0.925	97.25	50.19
0.35	3.73	2 681	0.783	0.830	115.79	60.65

气泡的排出和纤维的浸润受树脂流动速率的影响，而树脂流动速率又和注射压力有关。注射过程中树脂的流动包括在纤维束间和纤维束内两种方式，压力较低时树脂流动缓慢，使纤维束间与纤维束内的流动不均匀，气泡不易从排气孔中排出，试样中滞留了很多气泡，因此材料中的孔隙含量较大。相反，当注射压力比较大时，树脂流动较快，使纤维束间与纤维束内的气泡更易排出，因此试样中的孔隙含量较低。

3.3 孔隙含量对试样超声特征参数的影响

材料中存在的孔隙微缺陷会影响超声波在材料

中的传播特性，因此当材料中孔隙含量发生变化时，其声学特征参数也会随之发生改变。本文通过测量材料的声速、声衰减系数和二阶相对非线性系数对材料孔隙含量的多少进行表征，并比较孔隙含量对声学参数的影响大小。图 5 为玻璃纤维连续毡/E51 环氧树脂复合材料孔隙含量与声衰减系数，非线性系数和声速之间的关系曲线，其中纵坐标参数进行了归一化处理。

材料中的孔隙微缺陷越多，对超声的阻碍作用越大，波形畸变越严重，因此材料的超声衰减也就越大，非线性效应越明显。由图 5 可知，随着材料

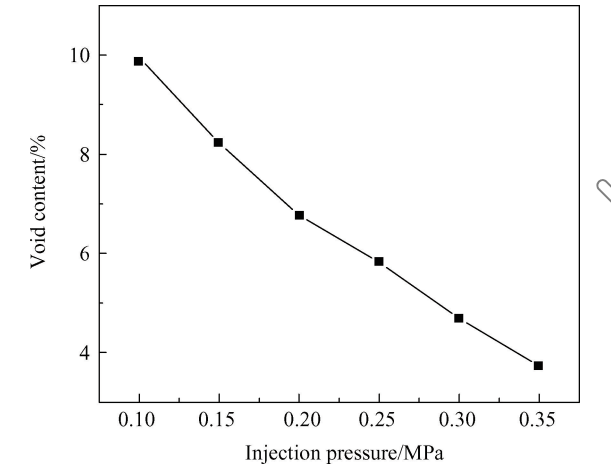


图 4 玻璃纤维连续毡/E51 环氧树脂复合材料孔隙含量和注射压力的关系
Fig. 4 Relationship between void content and injection pressure of glass mat/E51 epoxy resin composites

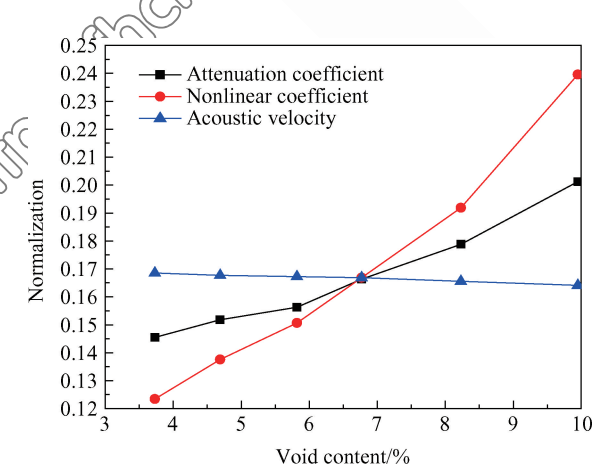


图 5 玻璃纤维连续毡/E51 环氧树脂复合材料孔隙含量与超声特征参数的关系
Fig. 5 Relationship between void content and ultrasonic characteristic parameters of glass mat/E51 epoxy resin composites

中孔隙含量的增加, 衰减系数和二阶相对非线性系数随之增加, 近于线性递增, 且二阶相对非线性系数的变化比超声衰减系数的递增更加明显。声速随着孔隙含量的增加而减小, 这与马雯等^[8]研究的声速与孔隙含量关系一致, 不同的是, 本文中声速随孔隙含量变化不明显, 这是由于所用纤维和树脂种类不同的原因造成的。结果表明: 材料中孔隙含量的变化对超声的特征参数产生明显影响, 尤其是对非线性参数的影响更大。因此可以采用材料的超声特征参数来评价其孔隙含量的多少。

3.4 孔隙含量对试样力学性能的影响

材料中存在孔隙缺陷时, 材料的力学性能和超声特征参数都会受到很大影响。马雯等^[8]研究了玻璃纤维复合材料孔隙率对超声衰减系数和力学性能的影响, 其测试结果为: 当材料孔隙率增大时, 材料的拉伸、弯曲及剪切强度均减小, 超声衰减系数增大。图 6 为玻璃纤维连续毡/E51 环氧树脂的 RTM 工艺试件孔隙含量与其弯曲强度和冲击强度之间的关系曲线。可以看出, 材料的弯曲强度和冲击强度随着孔隙含量的增加而下降, 但两者是非线性关系, 主要是由于不仅孔隙含量的多少会影响 RTM 复合材料的力学性能, 孔隙的大小、形状及分布也同样会影响材料的力学性能。除此之外, 固化温度、纤维铺层及注胶时间等都会影响材料孔隙含量的多少, 进而影响材料的力学性能。

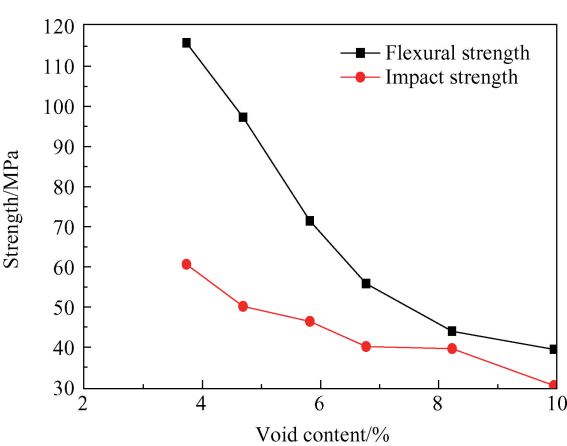


图 6 玻璃纤维连续毡/E51 环氧树脂复合材料
孔隙含量与力学性能的关系
Fig. 6 Relationship between void content and mechanical
properties of glass mat/E51 epoxy resin composites

3.5 金相对比

图 7 为三种不同注射压力下的试样金相显微图。可知, 孔隙大都分布在纤维束内, 纤维束间的孔隙较少, 这主要是由于纤维束间的树脂流动速度大于纤维束内的树脂流动速度, 使纤维束中的孔隙不能及时排出。注射压力为 0.1 MPa 下的 RTM 玻璃纤维连续毡/E51 环氧树脂试样横截面的孔隙含量最多, 孔隙较大且不规则, 注射压力为 0.3 MPa 下试样的孔隙含量最少, 孔隙较小且基本上成球形。三种注射压力条件下试样的孔隙含量依次减少, 和超声表征结果基本一致, 因此验证了用超声特征参数评价复合材料孔隙含量的准确性。

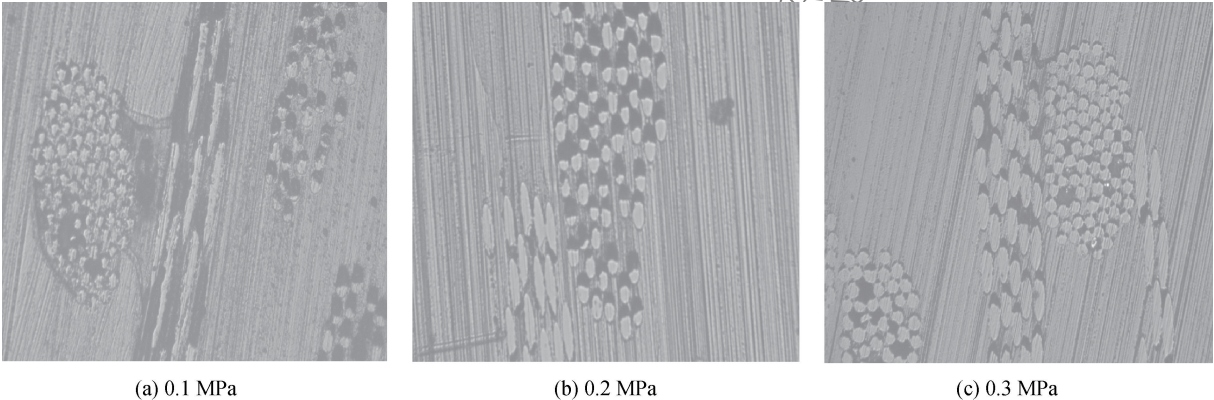


图 7 玻璃纤维连续毡/E51 环氧树脂复合材料在不同注射压力下孔隙的金相显微图像
Fig. 7 Metallographic micrographs of voids of glass mat/E51 epoxy resin composites in different injection pressures

4 结 论

(1) 在 0.10~0.35 MPa 的注射压力下, 玻璃纤维连续毡/E51 环氧树脂的 RTM 工艺试件的孔

隙含量为 9.95%~3.73%, 树脂注射压力越大, 孔隙含量越小, 并且力学性能随孔隙含量的增加而下降。

(2) 随着孔隙含量的增加, 玻璃纤维连续毡/E51 环氧树脂的声速呈下降趋势, 而超声衰减系数和超声相对非线性系数呈近于线性递增趋势, 且孔隙对二阶相对非线性系数的影响比对超声衰减系数的影响更加显著。其中, 试件的声速和声衰减系数随孔隙含量的变化关系与前人研究的层压板材料相一致。因此用材料的声学特征参数可有效表征其孔隙含量的多少。

(3) RTM 复合材料的工艺参数影响孔隙含量的多少, 而孔隙含量影响材料的声学参数的变化。因此, 可以通过材料的声学特征参数评价材料的质量, 判断工艺参数的优劣, 进而优化工艺参数。

参考文献:

- [1] 邓洪. 玻璃纤维连续毡技术发展及产品应用前景[J]. 玻璃纤维, 2002(5): 12-15.
DENG Hong. Technology development and application prospect of glass fiber continuous felt[J]. Fiber Glass, 2002(5): 12-15 (in Chinese).
- [2] CHAMBERS A R, EARL J S, SQUIRES C A, et al. The effect of voids on the flexural fatigue performance of unidirectional carbon fibre composites developed for wind turbine applications[J]. International Journal of Fatigue, 2006, 28(10): 1389-1398.
- [3] JUDD N C W, WRIGHT W W. Voids and their effects on the mechanical properties of composites—An appraisal[J]. SAMPE Journal, 1978, 14(1): 10-14.
- [4] 何方成. 复合材料孔隙率的超声检测方法探讨[J]. 材料工程, 2009(S1): 57-60.
HE Fangcheng. Research on ultrasonic methods for porosity measurement[J]. Journal of Materials Engineering, 2009(S1): 57-60 (in Chinese).
- [5] 刘玲, 路明坤, 张博明, 等. 孔隙率对碳纤维复合材料超声衰减系数和力学性能的影响[J]. 复合材料学报, 2004, 21(5): 116-121.
LIU Ling, LU Mingkun, ZHANG Boming, et al. Effects of porosity on the ultrasonic absorption coefficient and mechanical strength of carbon/epoxy composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2004, 21(5): 116-121 (in Chinese).
- [6] STONE D E W, CLARKE B. Ultrasonic attenuation as a measure of void content in carbon-fibre reinforced plastics[J]. Non-Destructive Testing, 1975, 8(3): 137-145.
- [7] KIM K B, HSU D K, BARNARD D J. Estimation of porosity content of composite materials by applying discrete wavelet transform to ultrasonic backscattered signal[J]. Ndt & E International, 2013, 56(11): 10-16.
- [8] 马雯, 刘福顺. 玻璃纤维复合材料孔隙率对超声衰减系数及力学性能的影响[J]. 复合材料学报, 2012, 29(5): 69-75.
MA Wen, LIU Fushun. Effect of porosity on the attenuation coefficient and mechanical properties of glass fiber reinforced composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2012, 29(5): 69-75 (in Chinese).
- [9] ISHII Y, BIWA S, KURAISHI A. Influence of porosity on ultrasonic wave velocity, attenuation and interlaminar interface echoes in composite laminates: Finite element simulations and measurements[J]. Composite Structures, 2016, 152: 645-653.
- [10] DUONG N T, DUCLOS J, BIZET L, et al. Relation between the ultrasonic attenuation and the porosity of a RTM composite plate[J]. Physics Procedia, 2015, 70: 554-557.
- [11] 周晓军, 游红武, 程耀东. 含孔隙碳纤维复合材料的超声衰减模型[J]. 复合材料学报, 1997, 14(3): 99-106.
ZHOU Xiaojun, YOU Hongwu, CHENG Yaodong. Ultrasonic attenuation model of void contained carbon-fibre reinforced plastics[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 1997, 14(3): 99-106 (in Chinese).
- [12] 李钊. 碳纤维复合材料孔隙率超声检测与评价技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
LI Zhao. Research on ultrasonic detection and evaluation technique for porosity of carbon fiber composites[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014 (in Chinese).
- [13] 张冬梅, 叶金蕊, 刘奎, 等. 孔隙微观特征影响 CFRP 力学性能的细观综述[J]. 复合材料学报, 2013(S1): 118-123.
ZHANG Dongmei, YE Jinrui, LIU Rui, et al. Effects of void micro-characteristics on the mechanical behavior of CFRP by micromechanical method[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2013(S1): 118-123 (in Chinese).
- [14] 罗明. 碳纤维增强树脂基复合材料孔隙率超声无损检测[D]. 大连: 大连理工大学, 2007.
LUO Ming. The ultrasonic non-destructive test on the porosity of the carbon fiber reinforced polymer matrix composite[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2007 (in Chinese).
- [15] 郑晖, 林树青. 超声检测[M]. 北京: 中国劳动社会保障出版社, 2008: 50-53.
ZHENG Hui, LIN Shuqing. Ultrasonic testing[M]. Beijing: China Labour & Social Security Publishing House, 2008: 50-53 (in Chinese).
- [16] 朱颖. 纤维增韧陶瓷基复合材料超声检测关键问题研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2014.
ZHU Ying. Investigation on key problems of ultrasonic detection for fiber-reinforced ceramic matrix composites[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2014 (in Chinese).
- [17] 陆铭慧, 林娜. RTM/纺织复合材料孔隙率非线性超声方法研究[J]. 航空制造技术, 2013(5): 89-93.
LU Minghui, LIN Na. Research on non-linear ultrasonic tes-

- ting of void content in RTM/textile composites[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013(5): 89-93 (in Chinese).
- [18] TEN CATE J A. New nonlinear acoustic techniques for NDE [J]. AIP Conference Proceedings, 2001, 557(1): 1229-1236.
- [19] 陆铭慧,李沛芮,王旭. 复合材料孔隙含量超声多参量评价方法研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2016(3): 55-59.
LU Minghui, LI Peirui, WANG Xu. The study of composites voids content ultrasonic multi-parameter evaluation method[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2016(3): 55-59 (in Chinese).
- [20] 全国纤维增强塑料标准化技术委员会. 玻璃纤维增强塑料树脂含量试验方法: GB/T 2577—2005[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
National Technical Committee on Fiber Reinforced Plastic of Standardization Administration of China. Test method for resin content of glass fiber reinforced plastics: GB/T 2577—2005[S]. Beijing: Standards Press of China, 2005 (in Chinese).
- [21] 全国纤维增强塑料标准化技术委员会. 纤维增强塑料密度和相对密度试验方法: GB/T 1463—2005[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
National Technical Committee on Fiber Reinforced Plastic of Standardization Administration of China. Test methods for density and relative density of fiber reinforced plastics: GB/T 1463—2005[S]. Beijing: Standards Press of China, 2005 (in Chinese).
- [22] 全国纤维增强塑料标准化技术委员会. 纤维增强塑料弯曲性能试验方法: GB/T 1449—2005[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
National Technical Committee on Fiber Reinforced Plastic of Standardization Administration of China. Fiber-reinforced plastic composites—Determination of flexural properties: GB/T 1449—2005[S]. Beijing: Standards Press of China, 2005 (in Chinese).
- [23] 全国纤维增强塑料标准化技术委员会. 纤维增强塑料简支梁式冲击韧性试验方法: GB/T 1451—2005[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
National Technical Committee on Fiber Reinforced Plastic of Standardization Administration of China. Fiber-reinforced plastic composites—Determination of charpy impact properties: GB/T 1451—2005[S]. Beijing: Standards Press of China, 2005 (in Chinese).
- [24] 侯彩云,常丽萍,张荣秀,等. 复合材料金相试验方法研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2002, 25(5): 60-63.
HOU Caiyun, CHANG Liping, ZHANG Rongxiu, et al. Investigation on micro-structures of composites with metallographic tests[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2002, 25(5): 60-63 (in Chinese).