复合材料学报 Acta Materiae Compositae Sinica
第29卷 第5期 10月 2012年
Vol. 29 No. 5 October 2012

文章编号：1000-3851(2012)05-0069-07

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

马 雯，刘福顺*
（北京航空航天大学 材料科学与工程学院，北京 100191）

摘 要： 在0.1～0.6 MPa热压压力条件下，制备了不同孔隙率含量的玻璃纤维布/618环氧树脂层压板试件。采用超声C扫描及烧蚀密度法测定了试件的超声衰减系数与平均孔隙率，并通过金相显微分析对孔隙的分布、形状及尺寸进行了表征。讨论了孔隙率对层压板拉伸、弯曲和层间剪切性能及超声衰减系数的影响规律，获得了使力学性能下降的临界孔隙率及衰减系数值。结果表明，随着固化压力减小，孔隙率从0.976%增加到5.268%，抗拉强度、弯曲强度和层间剪切强度均下降，衰减系数由1.460 dB·mm^{-1}增加到2.150 dB·mm^{-1}，使力学性能下降的临界衰减系数约为1.5 dB·mm^{-1}。

关键词： 玻璃纤维复合材料；孔隙率；超声检测；衰减系数；力学性能
中图分类号： TB332 **文献标志码：** A

Effect of porosity on the attenuation coefficient and mechanical properties of glass fiber reinforced composites

MA Wen, LIU Fushun*
(School of Materials Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: Glass fiber reinforced composites with different amounts of voids were prepared by applying different curing pressures (0.1～0.6 MPa). Ultrasonic C-scan and ablation density method were adopted to measure the attenuation coefficient and the average porosity. The distribution, shape and size of the voids were characterized by metallographic microscopic analysis. The effects of void content on the tensile, bending and interlaminar shear properties and the attenuation coefficient were investigated and discussed, and the critical value of void content and attenuation coefficient were also obtained. The results show that, with the decreasing of curing pressure, the voids content of specimen increases from 0.976% to 5.268%, the tensile strength, flexural strength and interlaminar shear strength decrease, the ultrasonic attenuation coefficient increases from 1.460 dB·mm^{-1} to 2.150 dB·mm^{-1}, and the critical attenuation coefficient is about 1.5 dB·mm^{-1}.

Keywords: glass fiber reinforced composites; porosity; ultrasonic inspection; attenuation coefficient; mechanical properties

孔隙是纤维增强复合材料中最常见的微小缺陷，其形成的原因[1-2]一般有两种：(1)在生产过程中纤维未被树脂完全浸润透，造成空气滞留在材料内部形成孔隙；(2)在固化循环过程中易产生挥发物(如环氧树脂挥发)而形成孔隙。孔隙的存在主要影响材料的纵向和横向拉伸强度与模量、弯曲强度与模量、层间剪切强度、压缩强度与模量等性能[2-3,7-9]，对复合材料的冲击性能和疲劳寿命[4]也有显著影响。Judd和Wright[2]认为孔隙率在小于4%时每增加1%层间剪切强度则会随之下降约7%。目前，风力发电叶片材料主要采用玻璃纤维复合材料，发电叶片长期承受强大的风载荷、气体冲刷等外界环境的作用[5]，复合材料内部的孔隙缺陷可能成为裂纹源[6]。因此，对应用在风力发电叶片中的玻璃纤维增强塑料的孔隙进行系统的研究是非常有必要的。

收到初稿日期： 2011-08-31；**收到修改稿日期：** 2012-01-05；**网络出版时间：** 2012-05-08 16:21:48
网络出版地址： www.cnki.net/kcms/detail/11.1801.TB.20120508.1621.009.html
基金项目： 国家自然科学基金(80977001，510730151)
通讯作者： 刘福顺，教授，研究方向为材料无损检测 E-mail：liufs@buaa.edu.cn

超声无损检测是复合材料缺陷检测最常用的无损检测技术。当复合材料中含有孔隙缺陷时，超声波的衰减会很厉害，会影响超声波的传播速度、材料的声阻抗及衰减系数等[11-12]，同时孔隙缺陷的存在会影响材料的力学性能，进而可以建立超声衰减系数与力学性能之间的关系。复合材料无损检测就是通过确立衰减系数等特征参数来预测材料孔隙率及力学性能。因此通过建立超声特征参数变化与孔隙含量之间的关系对复合材料孔隙含量及力学性能进行评估是可行的。

前人的研究主要针对航空用碳纤维增强复合材料孔隙率对力学性能的影响[6-10]，对玻璃纤维增强复合材料孔隙缺陷的研究还较少。本文作者通过设置不同的热压压力得到不同孔隙率含量的玻璃纤维增强复合材料试件，并对孔隙的微观特征、孔隙率对玻璃纤维复合材料的超声衰减系数及力学性能的影响进行了试验研究。

1　实验部分

1.1　玻璃纤维复合材料层压板制备

采用热压成型工艺制作玻璃纤维复合材料层压板。原料为正交的玻璃纤维布、618 环氧树脂、四乙烯五胺固化剂，树脂与固化剂的质量比为 10∶1，纤维质量分数为 51%～62%。

复合材料层压板采用手工铺层，铺层层数为 9 层。在 0.1～0.6 MPa 热压压力下，固化温度为 70 ℃(2 h)，后处理温度为 120 ℃(2 h)，制作 6 块层压板，尺寸为 320 mm×250 mm。

1.2　超声波检测

将实验制作的每块层压板进行超声 C 扫描，用以确定孔隙率均匀分布的区域及计算超声特征参数。扫描方式为水浸一次脉冲反射法，超声检测系统中设定超声波的声速为水的声速，选用 2.25 MHz，1.9 inch 的聚焦探头，分辨率 0.8，检测过程中采用欧宁航宇检测有限公司生产的型号为 MZ-03 超声 C 扫描检测仪。扫描图像与试样尺寸为 1∶1。

1.3　孔隙率测量

根据超声 C 扫描结果，在每块板的图像均匀区域分别取 6 个试样，测定试样的密度(GB/T 1463－2005)及树脂含量(GB/T 2557－2005)，最后采用烧蚀密度法计算每块层压板的体积孔隙率，计算公式如下：

$$P_v(\%) = 100\% - \rho_c\left(\frac{w_r}{\rho_r} + \frac{w_f}{\rho_f}\right) \tag{1}$$

式中：P_v 为试样的体积孔隙率；ρ_c为试样的密度；w_r和 w_f分别为树脂和纤维的质量分数；ρ_r和 ρ_f分别为树脂和纤维的密度。

1.4　显微结构分析

根据超声 C 扫描结果，每块板取 3 个 10 mm×10 mm 的试样，根据 GB 3365－82，将试样用环氧树脂镶嵌，然后用 500#、800#、1200#、1500# SiC 防水砂纸对试样进行打磨，最后在抛光机上用 1.0 μm金刚石抛光剂进行抛光，并用超声清洗。应用光学显微镜(OLYMPUS BX51M)和金相图像分析软件分析孔隙的分布、尺寸和形状。

1.5　力学性能测试

采用 INSTRON 8801 电子试验机(50 kN)，根据 GB/T 1447－2005 测定层压板的拉伸性能。试样尺寸选择I型尺寸，厚度为板的厚度，拉伸速度为 2 mm/min，当引伸计应变量为 0.09 时取下引伸计。

采用 INSTRON 5565 电子试验机(5 kN)，根据 GB/T 1449－2005 测定层压板的弯曲性能。试样尺寸 80 mm×15 mm，厚度为板的厚度，跨距为 55 mm，加载速度为 2 mm/min。

采用 INSTRON 5565 电子试验机(5 kN)，根据 ASTM D2344 测定层压板的层间剪切强度。试样尺寸为 25 mm×8 mm，厚度为板的厚度，跨距为 17 mm，加载速度为 1 mm/min。

2　结果与讨论

2.1　固化工艺对孔隙率及显微形貌的影响

图 1 给出了热压压力为 0.1 MPa、0.3 MPa 和 0.5 MPa 时玻璃纤维布/618 环氧树脂层压板的显微形貌。可以看出：热压压力为 0.1 MPa 时，孔隙的形状以球形为主，部分孔隙呈现拉长形状，孔隙尺寸较大，并且分布相对均匀，小孔隙主要分布于树脂富余区和纤维束之间，大孔隙主要分布在树脂富余区域；热压压力为 0.5 MPa 时，孔隙的形状基本呈球形，尺寸比较小，分布不均匀，主要分布在纤维束之间。由于热压成型的温度为 70 ℃，环氧树脂固化时产生的挥发物少，因此孔隙主要是由铺层时树脂中裹入的空气及铺层时树脂分布不均匀导致纤维浸润不完全造成的。当热压压力越大时，压实力越大，气泡容易随着树脂排出，纤维也更容易浸润，因此孔隙率越小。

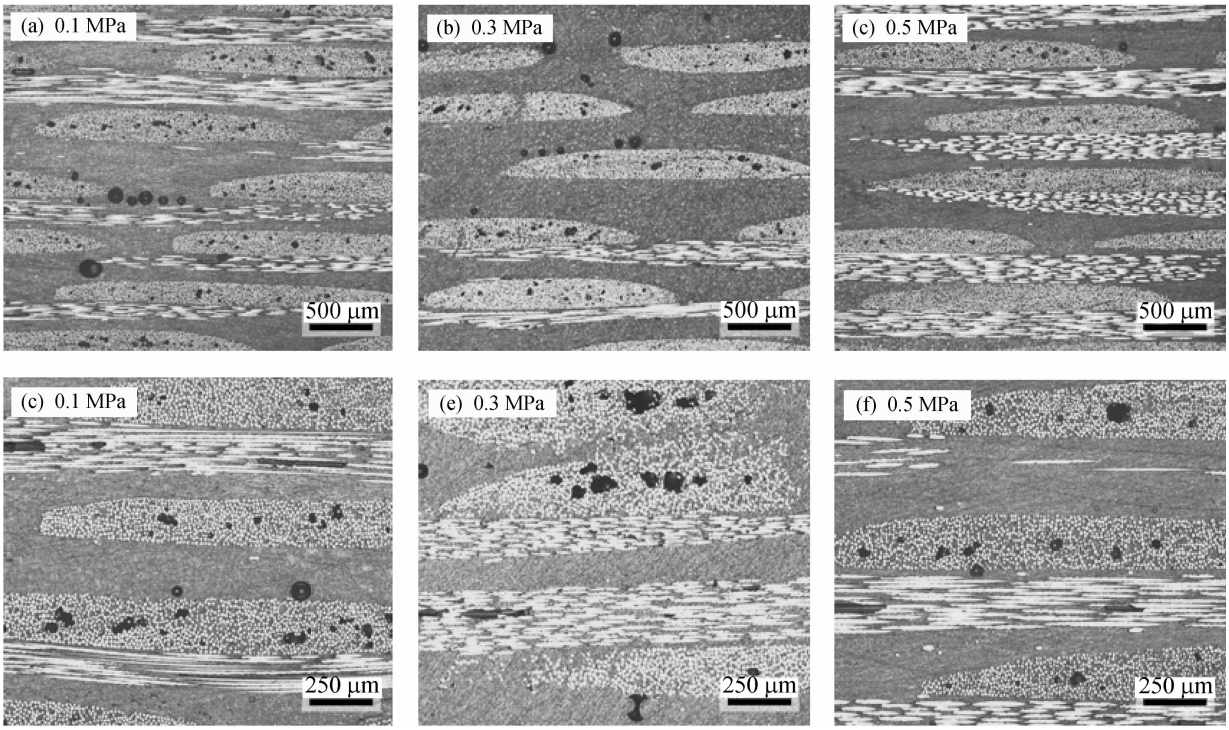

图 1　玻璃纤维布/618 环氧树脂层压板在不同压力下孔隙的金相显微照片

Fig. 1　Metallographical micrographs of voids of glass cloth/618 epoxy resin laminates in different pressures

玻璃纤维布/618 环氧树脂层压板在不同热压压力的平均孔隙率如表 1 所示。可以看出，当固化压力为 0.1 MPa 时，孔隙率最大，为 5.268%，随着固化压力增大，孔隙率减小，当固化压力为 0.6 MPa时，孔隙率为 0.976%，压力与孔隙率基本呈线性关系，如图 2 所示。固化压力越大时，成型过程中受到的压实压力越大，树脂在压力的作用下分布越均匀，材料内部的空气含量也越少，这样能有效防止孔隙的形成及长大。

在前人[2,7-9]的很多研究中，孔隙率与力学性能并不呈线性关系，不能仅考虑孔隙率的大小，还要考虑孔隙的分布、形状和尺寸等因素。Zhu[6]等得出当孔隙的长轴尺寸大于 400 μm 时，孔隙周围更容易形成裂纹。因此，应用显微镜分析可以辅助分析孔隙率对力学性能的影响。

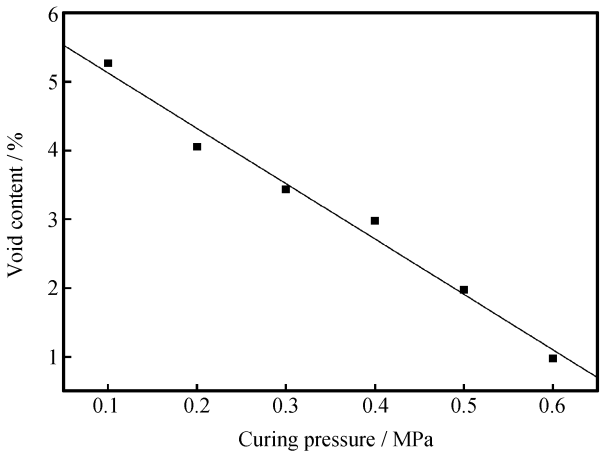

图 2　玻璃纤维布/618 环氧树脂层压板孔隙率和固化压力的关系

Fig. 2　Plot of void content and curing pressure of glass cloth/618 epoxy resin laminates

表 1　玻璃纤维布/618 环氧树脂层压板在不同压力下孔隙率、力学性能

Table 1　Porosity and mechanical properties of glass cloth/618 epoxy resin laminates in different pressures

Curing Pressure/MPa	Void content P_v/%	Tensile strength/MPa	Tensile modulus/GPa	Flexural strength/MPa	Flexural modulus/GPa	ILSS/MPa
0.1	5.268	336.38	17.33	483.33	15.62	37.65
0.2	4.059	349.41	18.04	494.35	16.76	40.59
0.3	3.439	365.80	18.88	526.57	17.32	41.70
0.4	2.979	386.63	19.93	534.25	18.21	43.69
0.5	1.975	402.13	20.63	570.63	19.61	44.36
0.6	0.976	412.33	21.56	594.10	21.33	45.45

2.2　孔隙率对力学性能的影响

成型过程中的固化压力对孔隙率有很大的影响，孔隙率又会影响层压板的力学性能。图 3 为玻璃纤维布/618 环氧树脂层压板孔隙率与强度、模量的关系曲线，其中强度和模量与0.6 MPa层压板相比较。可以看出，当孔隙率增加时，层压板的强度和模量都降低，但下降的比例不同，其中，弯曲强度下降的比例最大，弯曲弹性模量较拉伸弹性模量下降的比例大。当热压压力从 0.1 MPa 升到 0.6 MPa时，孔隙率从 5.268%降低到 0.976%，抗拉强度增加了 18.42% ，弯曲强度增加了 18.65%，层间剪切强度增加了 17.16%，拉伸模量和弯曲模量分别增加了 19.62%、26.77%。

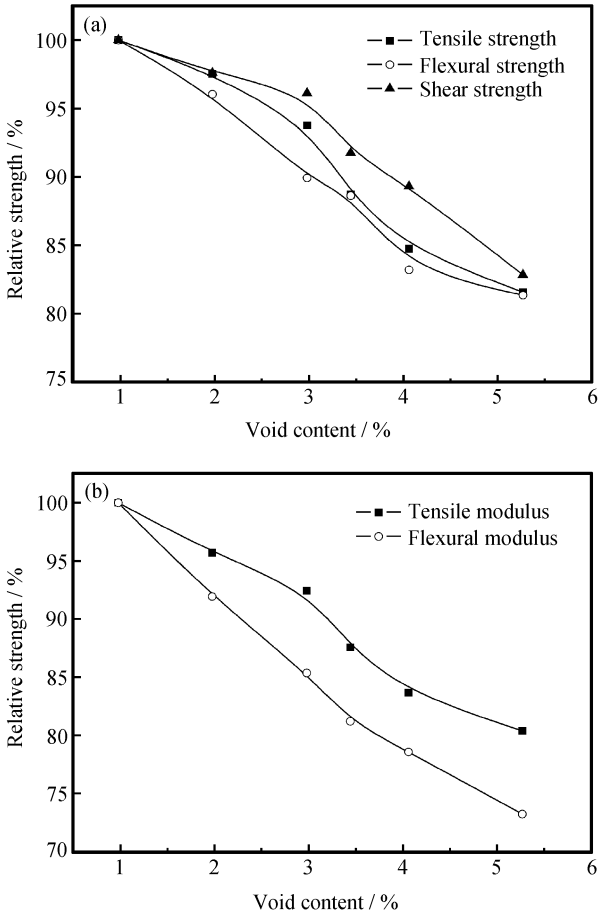

图 3　玻璃纤维布/618 环氧树脂层压板孔隙率与强度、模量的关系

Fig. 3　Relationship between strengths, modulus and void content of glass cloth/618 epoxy resin laminates

力学性能随着孔隙率增加而下降，但两者并不呈线性关系，这是因为影响玻璃纤维复合材料层压板力学性能的因素除了孔隙率的大小，还与孔隙的分布、形状及大小有关。除此之外，压实力的下降也会导致力学性能的下降。孔隙率的增加会影响层压板的有效承载面积，而热压压力的下降则会使层压板的树脂含量增加，从而使复合材料层压板在较低的载荷下发生失效。因此，为了获得较好的力学性能，需要在制备复合材料层压板结构时采用较高的固化压力。

2.3　超声波检测

图 4 为热压压力为 0.5 MPa 时玻璃纤维布/618 环氧树脂层压板试件的超声检测图片。可以看到，当热压压力较大时，超声 C 扫描图像颜色分布均匀，孔隙率较小，超声波的衰减也小。

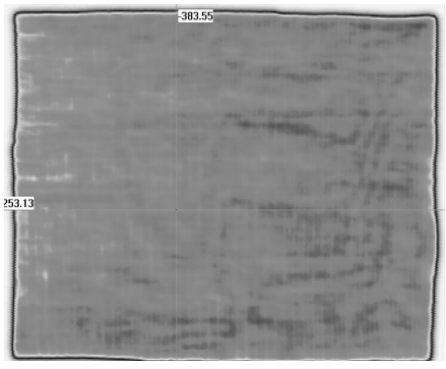

图 4　固化压力为 0.5 MPa 的玻璃纤维布/618 环氧树脂层压板超声波检测图片

Fig. 4　Ultrasonic testing picture of glass cloth/618 epoxy resin laminates with curing pressure 0.5 MPa

这是因为热压压力大时，孔隙较小，超声波在材料中可以绕过孔隙，衰减较小，C 扫描图像的颜色会比较均匀。从 C 扫描图中可以看出：试件中孔隙分布较均匀，用于孔隙率和性能测试的试样结果基本能代表整块试样。

表 2 为不同热压压力条件下玻璃纤维布/618 环氧树脂层压板试件的超声声速、声阻抗、反射系数及衰减系数的平均值。一次脉冲反射法中超声波在试件中的传播的时间 t 为

$$t = \frac{2d_c}{v_c} = \frac{2d_w}{v_w} \tag{2}$$

式中：d_c 为试件的厚度；v_c 为超声波在试件中的速度；d_w 为超声 A 扫描图中得到的厚度；v_w 为超声波在水中传播的速度，由此可以得到

$$v_c = \frac{d_c}{d_w} \times v_w \tag{3}$$

由 A 扫描及 C 扫描图可以得到试件上任何一点的表面波反射幅值及底波反射幅值，根据 Almeida 等的研究[10]，超声能量衰减 A_T 为

表 2　玻璃纤维布/618 环氧树脂层压板超声特征参数

Table 2　Ultrasonic characteristic parameters of glass cloth/618 epoxy resin laminates

Curing pressure/MPa	Void content/%	Acoustic volecity/(m · s^{-1})	Acoustic impedance	Attenuation coefficient/(dB · mm^{-1})
0.1	5.268	2790	4371.930	2.150
0.2	4.059	2812	4575.124	1.949
0.3	3.439	3031	5131.483	1.750
0.4	2.979	3109	5434.532	1.710
0.5	1.975	3127	5606.711	1.612
0.6	0.976	3220	5960.220	1.460

$$A_T = A_f + A_b + A_t \approx A_t = 20\lg\left(\frac{V_F}{V_B}\right) \tag{4}$$

推导出一次脉冲反射法中衰减系数 α 与 A_T 之间的关系为[14]

$$\alpha = \frac{10}{d_c} \times [\lg(1 - R^2) + A_T] \tag{5}$$

式中：V_F 为试样前表面反射回波幅度；V_B 为试样后表面反射回波幅度；A_f 为试样前表面的能量衰减(dB)；A_b 为试样后表面的能量衰减(dB)；A_t 为试样内部的衰减(dB)。

用超声波扫描检测孔隙率时，得到的声速、声阻抗、反射系数及衰减系数是所检测区域的平均值，由表 2 可以看出，随着热压压力的增大，声速、声阻抗及反射系数增大，衰减系数减小，与预期的趋势相一致。对于该玻璃纤维复合材料，由烧蚀密度法得到的孔隙率在 0.976%～5.268%之间，与超声衰减系数之间的关系如图 5 所示。在复合材料超声无损检测中，孔隙率的变化会引起材料的声速、声阻抗、反射系数及衰减系数的变化，因此可以用衰减系数等特征参数来表征孔隙率的大小。

2.4　力学性能与衰减系数的关系

超声波衰减法是目前孔隙率无损检测中使用最广泛的方法，通过建立能量衰减值或衰减系数与孔隙率之间的关系式可以对复合材料中的孔隙进行评估。刘玲等[9]研究了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，其测试结果为：当试件的孔隙率下降时，试件的剪切、弯曲及拉升强度均升高，衰减系数降低。本实验中，当试件的孔隙率由 0.976% 增加到 5.268% 时，衰减系数由 1.46 dB · mm^{-1}增加到2.15 dB · mm^{-1}。

Almeida 等修改 Mar-Lin 方程用于分析含孔隙的复合材料，得到可以用来预测复合材料层压板强度的方程[10]：

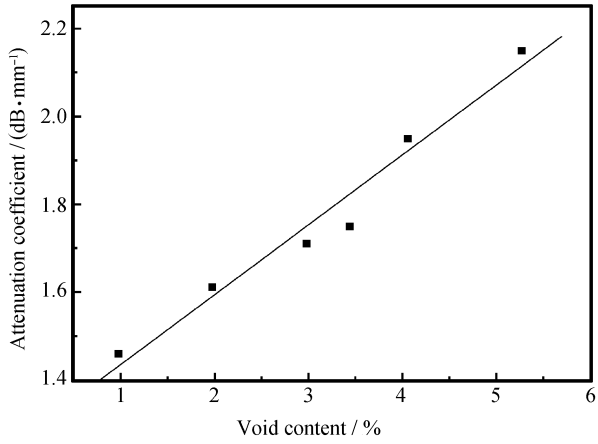

图 5　超声衰减系数与玻璃纤维布/618 环氧树脂层压板孔隙率的关系

Fig. 5　Relationship between attenuation coefficient and void content of glass cloth/618 epoxy resin laminates

$$\sigma_f = \begin{cases} \sigma_{f_0} & \alpha \leqslant \alpha_{cr} \\ H\alpha^{-m} & \alpha > \alpha_{cr} \end{cases} \tag{6}$$

式中：σ_f 为断裂应力(MPa)；σ_{f_0} 为低孔隙层压板的强度(MPa)；H 为层压板的韧性(MPa (dB · mm^{-1}))；α 为衰减系数(dB · mm^{-1})；α_{cr} 为衰减系数的临界值(dB · mm^{-1})；$-m$ 为应力奇点级数。

方程(6)表明：当孔隙率低于某个临界值时，即对应临界衰减系数 α_{cr}，孔隙的存在不影响层压板的强度。这是因为孔隙在其周围有限区内可以引起一个较高的应力集中，而对于复合材料层压板而言，允许在其局部小区域内出现较高的应力集中。当孔隙率低于某个临界值时，层压板的强度不会因为孔隙的出现而降低；但是当孔隙率高于某个临界值时，应力集中在较大的区域出现，即使加载一个较低的载荷水平也可能引发断裂。前人的研究也得出：当孔隙率低于某个临界值时，孔隙率对碳纤维复合材料的拉伸、弯曲及层间剪切强度无明显影响[10,13]。

由表 1 得到的强度测量的结果及表 2 得到的超声衰减系数，应用方程(6)可以确定该材料体系的断裂应

力 σ_{f_0} 及临界衰减系数 α_{cr}。图 6(a)为对拉伸强度测量值的拟合结果。拟合得到 $m=0.624$，$H=534.402$ MPa(dB·mm^{-1})，$\alpha_{cr}=1.515$ dB·mm^{-1}(性能下降的临界超声衰减系数，对应图中的曲线拐点，以下同)。图 6(b)为弯曲伸强度测量值的拟合结果，拟合得到 $H=804.132$ MPa(dB·mm^{-1})，$m=0.742$，$\alpha_{cr}=1.504$ dB·mm^{-1}。图 6(c)为层间剪切伸强度测量值的拟合结果，拟合得到 $H=55.275$ MPa(dB·mm^{-1})，$m=0.480$，$\alpha_{cr}=1.503$ dB·mm^{-1}。可以看到，对于该玻璃纤维环氧复合材料，使力学性能下降的临界超声衰减系数都在 1.5 dB·mm^{-1}左右，对应的孔隙率的值为 1.4%左右。对于碳纤维环氧复合材料，前人研究所得出的应力奇点级数 m 的范围为 0.16～0.37[9-10,13]。对于该玻璃纤维复合材料，本文中所得到的力学性能的应力奇点级数 m 的范围为 0.480～0.742，较碳纤维复合材料的 m 值偏大。影响 m 的因素有材料的性质、孔隙的分布、形状及大小、纤维的排列方向、铺层层数、纤维体积分数和试验条件等。与前人的研究相比[9]，本试验中 m 值较大的主要原因可能有两个：一是玻璃纤维的强度较碳纤维的小；二是热压成型工艺得到的层压板的性能较热压罐等成型工艺得到的层压板的性能差；根据公式(6)可以得出：层压板的断裂强度 σ_f 小，则应力奇点级数 m 大。因此，本文中研究的玻璃纤维环氧复合材料可以借鉴碳纤维环氧复合材料孔隙率的研究模型，但也存在自己的临界区间。

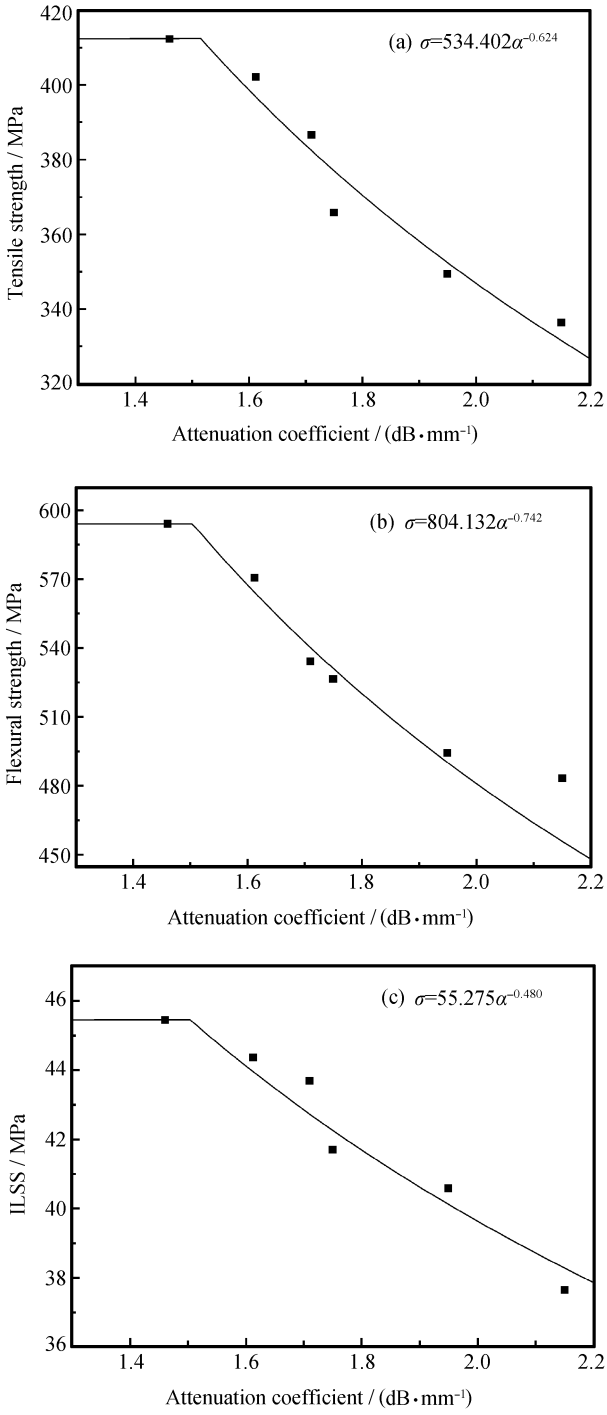

图 6　拉伸强度、弯曲强度及剪切强度作为超声衰减系数的函数

Fig. 6　Correlations of attenuation coefficient with tensile strength, flexural strength, shear strength

3　结　论

(1) 通过施加不同的热压压力(0.1～0.6 MPa)，得到玻璃纤维布/618 环氧树脂层压板孔隙率含范围为 0.976%～5.268%，热压压力与孔隙率近似呈线性关系，层压板的力学性能随孔隙率的升高呈下降趋势。

(2) 层压板的超声声速、声阻抗随孔隙率的升高呈下降趋势，而超声衰减系数随孔隙率的升高呈上升趋势。其中，当试件的孔隙率由 0.976%增加到 5.268%时，衰减系数由1.46 dB·mm^{-1}上升到 2.15 dB·mm^{-1}，并且平均超声衰减系数与烧蚀密度法得到的孔隙率在这个范围内近似呈线性关系。

(3) 应用 Mar-Lin 修正方程，对超声衰减系数及力学性能数据进行最优拟合得到应力奇点级数 m 的范围为 0.480～0.742，较碳纤维复合材料的 m 值偏大，并得到引起性能下降的临界衰减系数的值在 1.5 dB·mm^{-1}左右，对应的孔隙率约为 1.4%。

(4) 本实验所研究的对象为玻璃纤维复合材料层压板，其孔隙率与力学性能及超声特征参数之间的变化趋势与前人所研究的碳纤维复合材料相一致。因此在对玻璃纤维复合材料孔隙率进行研究

时，可以借鉴碳纤维复合材料的基本研究模型。

参考文献：

[1] 张立功，张佐光. 先进复合材料中主要缺陷分析[J]. 玻璃钢/复合材料，2001(2)：41-45.
Zhang Ligong，Zhang Zuoguang. Analysis of defects in advanced composites [J]. GFRP/Composites ，2001(2)：41-45.

[2] Judd N C W，Wright W W. Voids and their effects on the mechanical properties of composites — An appraisal [J]. SAMPE Journal，1978，14：10-14.

[3] Tang J M，Lee I W，Springer G S. Effects of cure pressure on resin flow，voids，and mechanical properties [J]. J Comp Mater，1987，21(11)：421-440.

[4] Chambers A R，Earl J S，Squires C A，Suhot M A. The effect of voids on the flexural fatigue performance of unidirectional carbon fiber composites developed for wind turbine applications [J]. International Journal of Fatigue，2006，28：1389-1398.

[5] 冯消冰，王　伟. 2MW 风机复合材料叶片材料及工艺研究[J]. 玻璃钢/复合材料，2010(7)：84-88.
Feng Xiaobing，Wang Wei. Materials and process research of 2 megawatt wind turbine blade [J]. GFRP/Composites，2010(7)：84-88.

[6] Zhu Hongyan，Wu Baochang，Li Dihong，et al. Influence of voids on the tensile performance of carbon/epoxy fabric laminates [J]. J Mater Sci Technol，2011，27(1)：69-73.

[7] 朱洪艳，李地红，张东兴，等. 固化压力对碳纤维复合材料层压板的孔隙和力学性能的影响 [J]. 固体火箭技术，2009，32(6)：694-697.
Zhu Hongyan，Li Dihong，Zhang Dongxing，et al. Effect of curing pressure on voids and mechanical properties of carbon fiber reinforced composite laminate [J]. Journal of Solid Rocket Technology，2009，32(6)：694-697.

[8] Liu Ling，Zhang Boming，Wang Dianfu，et al. Effects of cure cycles on void content and mechanical properties of composite laminates [J]. Composite Structures，2006，73：303-309.

[9] 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.

[10] Almeida S F M，Nogueira N Z S. Effects of void content on the strength of composite laminates [J]. Comp Struct，1994，28(8)：139-148.

[11] Stone D E，Clarke B. Ultrasonic attenuation as a measure of void content in carbon fiber reinforced plastics [J]. NDT，1975，8(3)：137-145.

[12] 林　莉，罗　明，郭广平，等. 碳纤维复合材料孔隙率超声声阻抗法检测 [J]. 复合材料学报，2009，26(3)：105-110.
Lin Li，Luo Ming，Guo Guangping，et al. Ultrasonic determination of carbon fiber composite porosity using acoustic impedance [J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2009，26(3)：105-110.

[13] Costa M L，Almeida S F M，Rezende M C. The influence of porosity on the interlaminar shear strength of carbon/epoxy and carbon/bismaleimide fabric laminates [J]. Comp Sci Technol，2001，61(14)：2101-2108.

[14] 李家伟，陈积懋. 无损检测手册 [M]. 北京：机械出版社，2004：232-234.