复合材料学报
Acta Materiae Compositae Sinica
第 27 卷 第 6 期 12 月 2010 年
Vol. 27 No. 6 December 2010

文章编号：1000-3851(2010)06-0032-06

孔隙对碳纤维/环氧复合材料层合板层间剪切疲劳性能的影响

朱洪艳[1]，吴宝昌[2]，张东兴[1]，李地红[1]，陈玉勇*[1]

((1. 哈尔滨工业大学 材料科学与工程系，哈尔滨 150001；2. 哈尔滨飞机工业集团有限公司，哈尔滨 150060)

摘 要：研究了孔隙对碳纤维增强环氧树脂基复合材料层合板$[(\pm45)/0_4/(0,90)/0_2]_S$的静态层间剪切强度和层间剪切疲劳性能的影响。采用不同的热压罐压力制备了孔隙率为 0.4%～6.6%的试样。采用显微照相法和图像分析技术对孔隙率和孔隙的微观形貌进行了分析。研究结果表明，随着热压罐压力的降低，大孔隙($S>7.85\times10^{-3}$ mm^2)所占的比例逐渐增加，平均孔隙率增加。在孔隙率为 0.4%～6.6%时，每增加 1%，复合材料层压板的层间剪切强度下降 2.4%。随着孔隙率的增加，层压板的疲劳寿命降低。与静态试验相比，孔隙率对层压板疲劳性能的影响比对静态性能的影响大。大孔隙的存在促进了疲劳裂纹的产生和扩展。

关键词：聚合物基复合材料；孔隙率；疲劳；层间剪切强度；孔隙尺寸

中图分类号：V258，TB332 **文献标志码**：A

Effect of void on the interlaminar shear fatigue of carbon fiber/epoxy composite laminates

ZHU Hongyan[1], WU Baochang[2], ZHANG Dongxing[1], LI Dihong[1], CHEN Yuyong*[1]

(1. School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001,
2. Harbin Aircraft Industry Co., Ltd., Harbin 150060)

Abstract: The effect of void content on the static interlaminar shear strength and interlaminar shear fatigue properties of carbon fiber reinforced epoxy $[(\pm45)/0_4/(0,90)/0_2]_S$ composite laminates was studied. The laminates with void volume fraction 0.4% ～ 6.6% were prepared by applying different autoclave pressure. The void content and microstructure characteristics of voids were studied using optical image analysis. The results show that the fraction of large voids($S>7.85\times10^{-3}$ mm^2) and mean void content increase with the decreasing autoclave pressure. Each 1% increase in void content with the void volume fraction in the range 0.4% ～ 4.6% induces a 2.4% reduction in interlaminar shear strength. The interlaminar shear fatigue life decreases with the increasing void content. The effect of voids on fatigue is more significant than on static failure. Large voids promote the initiation and propagation of cracks.

Keywords: polymer-matrix composites; porosity; fatigue; interlaminar shear strength; void size

孔隙是聚合物基复合材料制备过程产生的常见缺陷之一。近年来，为了理解孔隙对聚合物基复合材料力学性能的影响，进行了大量的研究。结果表明，孔隙对纤维为主的拉伸性能影响不大[1-2]，但是对基体为主的性能，如层间剪切[3-5]、弯曲[6-7]、压缩[8-9]、断裂韧性[10-12]、疲劳[13-14]等影响比较大，孔隙对聚合物基复合材料的吸湿性能的影响也比较大[15-16]。

Wisnom 等人[5]通过在单向玻璃纤维和碳纤维增强环氧树脂层压板内放置 PTFE 研究了孔隙的尺寸对其力学性能的影响。结果表明，随着孔隙尺寸的变化层间剪切强度降低 8%到 31%。Chambers[13]等人研究了孔隙对单向碳纤维复合材料的静态弯曲和弯曲疲劳失效的产生和扩展的影响。他们发现：当孔隙率从 1.6%增加到 3.1%时，疲劳寿命从 10^6 次变化到 2000 次，孔隙率的增加促进了失效的产生和扩展，从而降低了弯曲强度和弯曲疲劳性能。

Olivier 等人[11]观察到 I 型断裂韧性对孔隙是非常敏感的：孔隙率为 5%时，I 型断裂韧性下降

收稿日期：2009-11-30；**收修改稿日期**：2010-04-07

通讯作者：陈玉勇，博士，教授，主要从事钛合金及复合材料制备工艺的研究 E-mail：yychen@hit.edu.cn

大约为 22%。Mouritz[17]研究了高孔隙率(孔隙率达 30%)对玻璃纤维增强聚合物基复合材料的 I 型层间断裂韧性进行了研究，试验方法为双悬臂梁。结果表明层间断裂韧性随着孔隙率的增加迅速下降，但是，当孔隙率高于 15%时，裂纹起始和裂纹扩展的临界应变能释放率(SERR)保持在低值上并且几乎恒定不变。Ricotta 等人[10]提出了一个适合于描述含孔隙试样在 I 型载荷作用下的双悬臂梁的 SERR 的分析模型，采用参数研究法分析了孔隙的尺寸、位置和形状的作用。结果表明，孔隙尺寸的增加、孔隙相对于裂纹尖端的接近程度以及拉长形状的孔隙都会促进 SERR 的增加。

孔隙对聚合物基复合材料层压板疲劳性能的影响的研究较少。本文中对孔隙对层压板$[(\pm 45)/0_4/(0,90)/0_2]_S$的层间剪切疲劳进行了研究。

1 实 验

1.1 复合材料层压板的制备

实验所用的材料为 T300/914 环氧预浸碳纤维布，含胶量 42%，该材料由哈尔滨飞机工业集团有限公司提供。层合板的制备工艺为真空袋-热压罐技术。真空袋的压力为 0.06 MPa。通过施加较高的热压罐压力可以使孔隙溶解，从而降低孔隙率。本文中研究了孔隙率对层间剪切疲劳的影响。为了获得一定范围的孔隙率，采用不同的热压罐固化压力制备试样：0 MPa、0.1 MPa、0.3 MPa、0.4 MPa，其中 0.4 MPa 是制造商推荐的压力。复合材料层压板的铺层采用手工铺层，铺层为$[(\pm 45)/0_4/(0,90)/0_2]_S$。根据超声扫描结果，在孔隙率水平相一致的位置切割试样用于力学性能试验和显微镜分析。

1.2 显微镜分析

为了评价孔隙对复合材料层合板层间剪切疲劳性能的影响，采用显微镜分析方法对试样进行分析。因为这种方法不仅可以评价孔隙的尺寸和形状，而且是测量孔隙率最精确的方法。从 400# 碳化硅防水砂纸开始对试样进行打磨，并将打磨后的试样在抛光机上用 1 μm 金刚石抛光膏抛光，抛光后用超声波进行清洗。最后，在显微镜下观察试样的形貌。采用图像分析软件对所得到的照片的孔隙率、孔隙的形状和尺寸进行分析。

1.3 力学性能测试

静态层间剪切试验根据 JC/T 773－82(96)采用短梁剪切方法在 AUTOGRAPH AG－5 试验机上进行测定，跨深比为 5∶1。加载速度为 1.5 mm/min。每一种固化压力取 5 个试样以确定层间剪切强度的平均值，并用这些值建立疲劳试验的参数。

层压板的层间剪切疲劳试验没有标准。因此，试样的尺寸根据 JC/T 773－82(96)(静态层间剪切)，试验在 MTS 810 Material Test System 试验机上进行。工作频率为 8 Hz，应力比为 0.1，峰值应力分别为静态平均应力的 80%、70%、60%。

2 实验结果与分析

2.1 热压罐压力对孔隙的影响

为了研究孔隙对复合材料层压板层间剪切疲劳性能的影响，采用显微镜对层压板内孔隙的微观形貌特征进行了详细的分析。图 1 所示为不同热压罐压力制备的层压板内孔隙的典型形貌。可以看出，孔隙主要分布于层间区域，当热压罐压力 0.4 MPa 时孔隙最小，随着热压罐压力下降孔隙增大，而且当热压罐压力为 0 MPa 时层内孔隙最多。

根据孔隙面积的不同及对不同热压罐压力制备的层压板内孔隙的统计分析结果将孔隙定义为以下 3 种：孔隙面积 $S>7.85\times10^{-3}$ mm^2 的定义为大孔隙(Large void)；孔隙面积 $S<1.96\times10^{-3}$ mm^2 的定义为小孔隙(Small void)；其余的定义为中等孔隙(Medium void) 1.96×10^{-3} mm$^2<S<7.85\times10^{-3}$ mm^2。图 2 为不同热压罐压力下的孔隙类型的分布。从图 2 可以看出，当热压罐压力为 0.4 MPa 时，层压板中小孔隙是主要的类型，大孔隙几乎没有，随着热压罐压力的降低，大孔隙所占的比例逐渐增加。这是由于热压罐压力的作用是压实层压板并且使孔隙溶解。较低的热压罐压力就会使孔隙迅速长大。图 3 为热压罐压力对孔隙率和孔隙类型的影响。随着热压罐压力的降低，平均孔隙率增加，大孔隙对平均孔隙率的贡献随着热压罐压力的降低增加，而另外两种孔隙对孔隙率的贡献变化不大，这说明采用大孔隙的含量来评价孔隙对层压板性能的影响是可行的。

2.2 孔隙率对复合材料层压板层间剪切强度的影响

图 4 为层间剪切强度随着孔隙率的变化。可以看出，随着孔隙率的增加，层压板的层间剪切强度

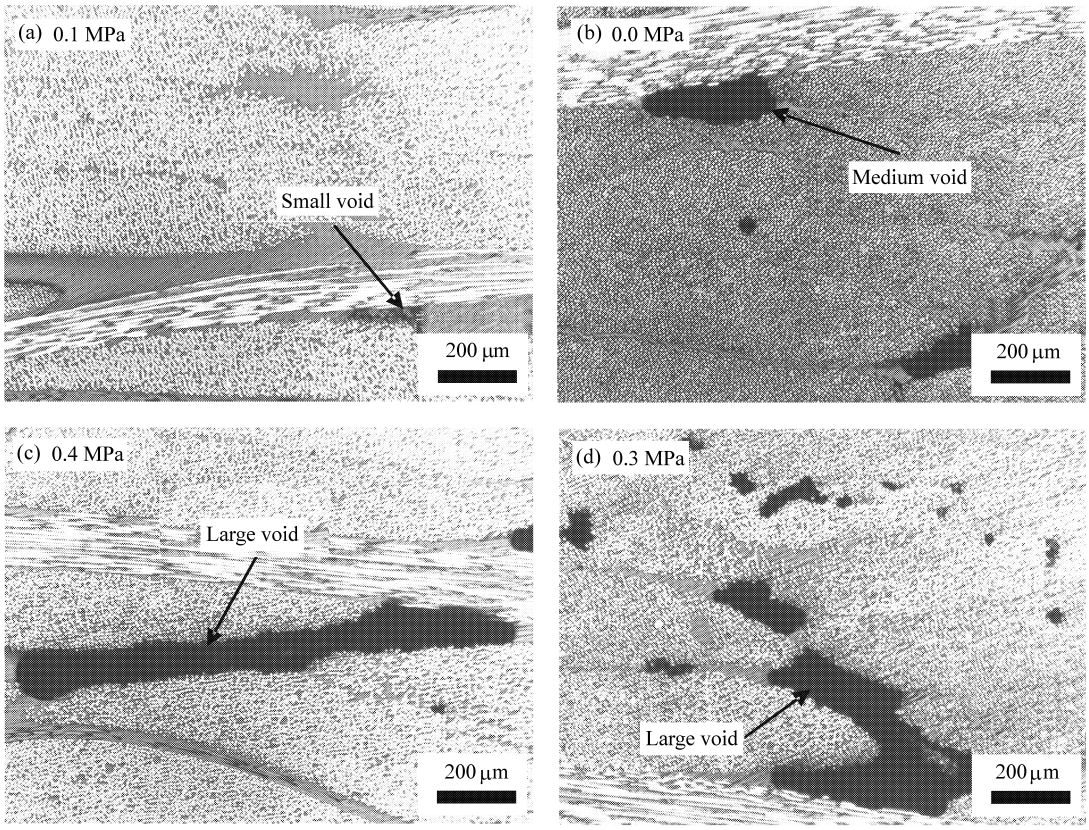


图 1　不同热压罐压力制备的碳纤维/环氧层压板内孔隙的典型形貌

Fig. 1　Typical morphology of voids in carbon fiber/epoxy laminates at different autoclave pressures

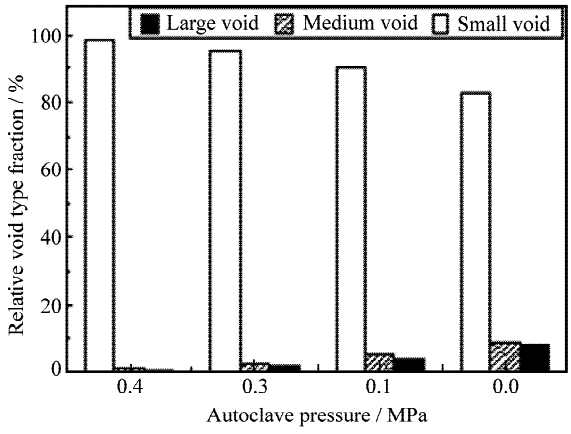


图 2　不同热压罐压力下碳纤维/环氧层压板内孔隙类型的分布

Fig. 2　Void type distribution in carbon fiber/epoxy laminates at different autoclave pressures

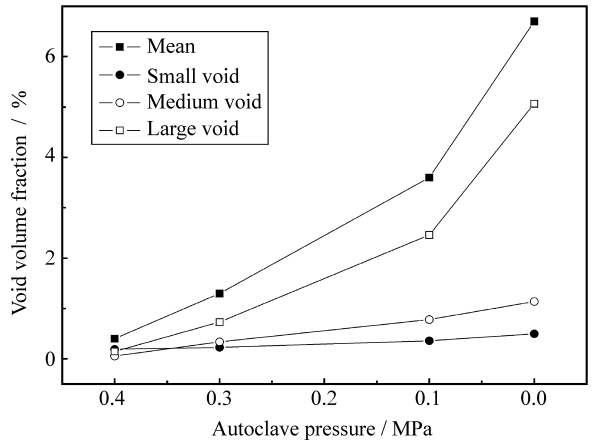


图 3　热压罐压力对碳纤维/环氧层压板内孔隙率和孔隙类型的影响

Fig. 3　Effect of autoclave pressure on void volume fraction and type in carbon fiber/epoxy laminates

线性的下降，在孔隙率为 4.6%时，层间剪切强度保持率为 89%，下降了 11%。孔隙率在 0.4%到 4.6%范围内，每增加 1%，层间剪切强度平均下降 2.4%。

为了研究孔隙对复合材料层压板静态失效机制的影响，对孔隙率为 0.4%和 4.6%的层间剪切试验破坏的试样进行抛光，并在光学显微镜下进行观察。图 5 为层压板层间剪切试验破坏后的显微照片。从图 5 可以看出，当孔隙率为 0.4%时，裂纹主要产生于层间，而当孔隙率为 4.6%时，裂纹从大孔隙产生。这说明大孔隙影响了静态层间剪切试验中裂纹的产生和扩展。

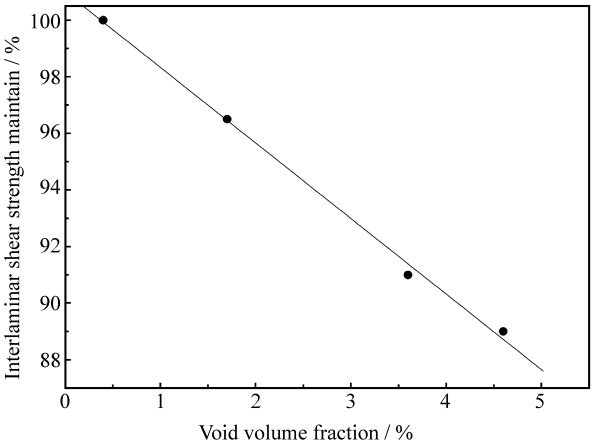


图 4 孔隙率对碳纤维/环氧层压板层间剪切强度的影响

Fig. 4 Interlaminar shear strength of carbon fiber/epoxy laminates as a function of void volume fraction

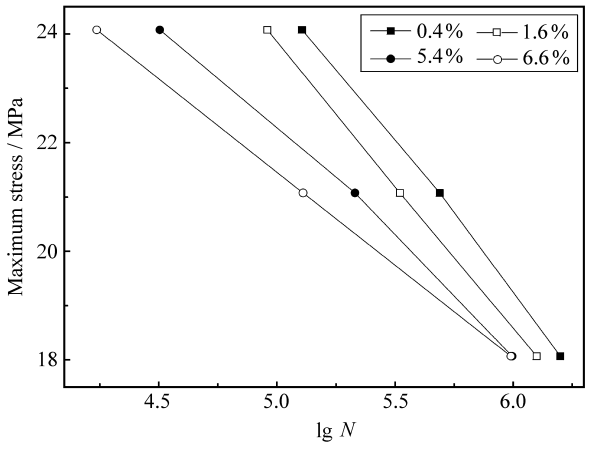


图 6 孔隙率对碳纤维/环氧层压板疲劳寿命的影响

Fig. 6 Effect of void content on fatigue performance of carbon fiber/epoxy laminates

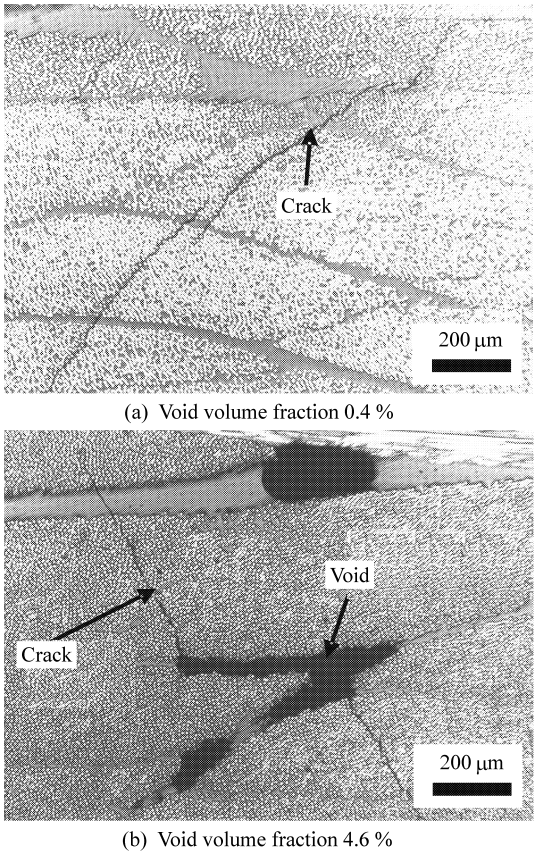


图 5 碳纤维/环氧层压板层间剪切破坏的显微照片

Fig. 5 Micrographs of damaged carbon fiber/epoxy laminates

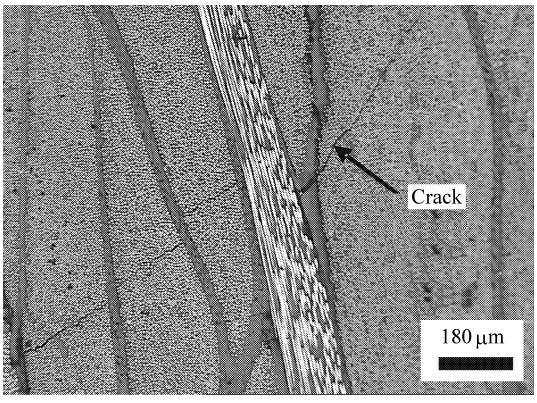
2.3 孔隙率对复合材料层压板层间剪切疲劳性能的影响

图 6 所示为孔隙率对层压板疲劳寿命的影响。从图 6 可以看出，随着孔隙率的增加，层压板的疲劳寿命不断降低，这可能是由于孔隙对疲劳裂纹的产生和扩展产生了影响。这些结果与静态力学性能试验结果一致。在应力水平分别为 0.8、0.7 和 0.6 时，孔隙率在 6.6%时，复合材料层压板的疲劳寿命分别下降了 17%、10%、3.4%，孔隙率每增加 1%，层间剪切疲劳寿命平均下降 2.7%、1.6%、0.5%。在不同应力水平下，孔隙率对疲劳性能的影响是不同的，在高应力水平下，孔隙率的影响较大，而在较低的应力水平下，孔隙率的影响相对较小。与静态试验相比，当应力水平较高时，孔隙率对复合材料层压板疲劳性能的影响比对静态性能的影响要大，这与 Almeida 等人[14]的研究是一致的，他们的研究也证实了孔隙对疲劳性能的影响比静态性能的大。

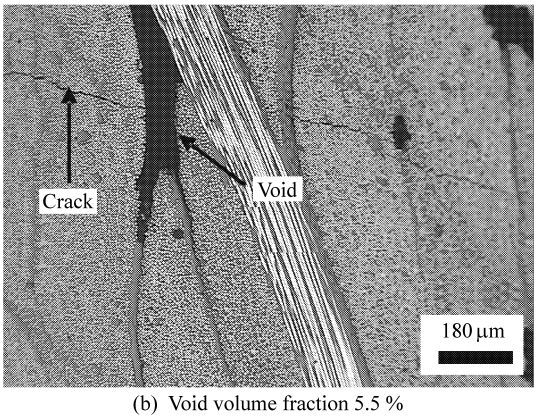
2.4 层间剪切疲劳损伤机制及孔隙的影响

为了研究复合材料层压板在疲劳载荷作用下的失效机制，对孔隙率为 0.4%和 5.5%层压板疲劳 10^6 次未破的试样进行抛光，并在光学显微镜下进行观察。图 7 为层压板疲劳 10^6 次未破坏的显微照片。从图中可以看出，虽然试样在疲劳 10^6 次后没有破坏，但是层压板内已经出现很多损伤。当孔隙率为 0.4%时，主要的损伤模式是分层、基体裂纹和分枝裂纹(图 7(a))，裂纹主要从层间树脂富集区产生；当孔隙率为 5.5%时，主要的损伤模式是分层、基体裂纹和分枝裂纹以及孔隙裂纹(图 7(b))。裂纹主要从大孔隙产生，有些裂纹沿着孔隙的方向扩展。大孔隙影响了裂纹的产生和扩展，这与静态试验的结果一致。

图 8 所示为层压板的位移变化曲线。从图中可



(a) Void volume fraction 0.4 %



(b) Void volume fraction 5.5 %

图 7　疲劳 10^6 次未破坏碳纤维/环氧层压板的显微照片

Fig. 7　Micrographs of undamaged carbon fiber/epoxy laminates after 10^6 cycles

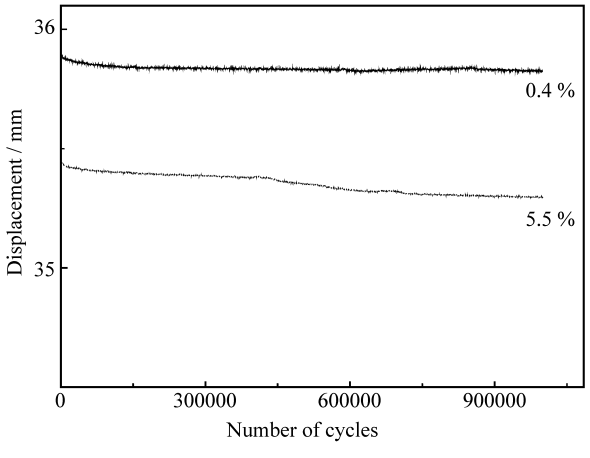


图 8　碳纤维/环氧层压板的位移变化曲线

Fig. 8　Displacement curve of carbon fiber/epoxy laminates

以看出，孔隙率为 0.4%的试样在整个循环周次内都比较平稳，而孔隙率为 5.5%的试样在曲线开始阶段比较平稳，当循环周次为 433275 次时，位移有一个明显的降低，并从此开始，位移曲线出现了逐渐降低的趋势。这说明孔隙的存在促进了层间树脂富集区的裂纹的产生和扩展。

3　结　论

(1) 当热压罐压力为 0.4 MPa 时，层压板中小孔隙($S<1.96\times10^{-3}$ mm^2)为主要类型，大孔隙($S>7.85\times10^{-3}$ mm^2)几乎没有，随着热压罐压力的降低，大孔隙所占的比例逐渐增加，平均孔隙率增加。

(2) 孔隙率在 0.4%～4.6%时，每增加 1%，复合材料层压板的层间剪切强度平均下降2.4%。大孔隙促进了裂纹的产生和扩展。

(3) 随着孔隙率的增加，层压板的疲劳寿命降低，这些结果与静态力学性能试验的结果一致。在应力水平分别为 0.8、0.7 和 0.6 时，孔隙率为 0.4%～6.6%，每增加 1%，层间剪切疲劳寿命平均下降 2.7%、1.6%和 0.5%。在不同应力水平下，孔隙率对疲劳性能的影响不同，在高应力水平下，孔隙率的影响较大，而在较低的应力水平下，孔隙率的影响相对较小。与静态试验相比，当应力水平较高时，孔隙率对层压板疲劳性能的影响比对静态性能的影响要大。大孔隙的存在促进了疲劳裂纹的产生和扩展。

参考文献：

[1] 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.

[2] Bureau M N, Denault J. Fatigue resistance of continuous glass fiber/polypropylene composites: Consolidation dependence [J]. Composite Science and Technology, 2004, 64(12): 1785-1794.

[3] 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]. Composite Science and Technology, 2001, 61(14): 2101-2108.

[4] Costa M L, Almeida S F M, Rezende M C. Critical void content for polymer composite laminates [J]. AIAA Journal, 2005, 43(6): 1336-1341.

[5] Wisnom M R, Reynolds T, Gwillam N. Reduction in interlaminar shear strength by discrete and distributed voids [J]. Composite Science and Technology, 1996, 56(1): 93-101.

[6] Olivier P, Cottu J P, Ferret B. Effects of cure cycle pressure and voids on some mechanical properties of carbon/epoxy laminates [J]. Composites, 1995, 26(7): 509-515.

[7] Hagstrand P O, Bonjour F, Måson J A E. The influence of

void content on the structural flexural performance of unidirectional glass fibre reinforced polyprolylene composites [J]. Compos Part A: Appl S, 2005, 36(5): 705-714.

[8] Suarez J C, Molleda F, Güemes A. Void content in carbon fiber/epoxy resin composites and its effects on compressive properties [C] // Miravete A. 9th International Conference on Composite Materials: Properties and Applications. Spain: Universidad Politecnica, 1993: 589-596.

[9] Cinquin J, Triquenaux V, Rousne Y. Porosity influence on organic composite material mechanical properties [C] // 16th International Conference on Composite Materials. Kyoto: [s. n.], 2007.

[10] Ricotta M, Quaresimin M, Talreja R. Mode Ⅰ strain energy release rate in composite laminates in the presence of voids [J]. Composites Science and Technology, 2008, 68(13): 2616-2623.

[11] Olivier P A, Mascaro B, Margueres P, Collombet F. CFRP with voids: Ultrasonic characterization of localized porosity, acceptance criteria and mechanical characteristics [C] // 16th International Conference on Composite Materials. Kyoto: [s. n.], 2007.

[12] Rizov V I. Voids and their effects on the fatigue fracture behavior of long glass fiber reinforced injection molded polypropylene [C] // 12th European Conference on Composite Materials. Biarritz: [s. n.], 2006.

[13] 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.

[14] Almeida S F M, Neto Z S N. Effects of void content on the strength of composite laminates [J]. Composite Structures, 1994, 28(2): 139-148.

[15] Costa M L, Rezende M C, Almeida S F M. Effect of void content on the moisture absorption in polymeric composites [J]. Polymer-Plastics Technology and Engineering, 2006, 45(6): 691-698.

[16] Thomason J L. The interface region in glass fibre-reinforced epoxy resin composites 2: Water absorption, voids and interface [J]. Composites, 1995, 26(7): 477-485.

[17] Mouritz A P. Ultrasonic and interlaminar properties of highly porous composites [J]. Journal of Composite Materials, 2000, 34(3): 218-239.