

吸湿后复合材料层合板快速加热 分层扩展数值模拟

齐士杰, 张纪奎*, 程小全

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100083)

摘要: 为研究复合材料层合板吸湿后的分层现象, 首先建立了吸湿后复合材料层合板快速加热导致分层损伤的有限元模型, 并对 ABAQUS 有限元软件进行二次开发, 通过 UAMP 子程序模拟吸湿后复合材料快速加热时水分汽化引起的局部高压载荷作用下层合板分层扩展与载荷施加过程; 然后, 采用该模型预测了饱和吸湿 T650-35/HFPE-II-52 碳纤维聚酰亚胺复合材料层合板快速加热至 310 °C 时产生的分层现象, 并将数值模拟与文献实验结果对比; 最后, 运用该模型分析了树脂吸湿量和富脂区树脂聚集体积对层合板分层损伤面积的影响。结果表明: 建立的有限元模型有效; 快速加热后, 层合板的分层损伤面积随树脂吸湿量的增加而增加, 当富脂区树脂聚集体积较小时, 其对层合板快速加热后分层损伤面积影响较小, 但当富脂区树脂聚集体积增加到一定值后, 层合板分层损伤面积随富脂区树脂聚集体积的增加而显著增加。所得结论表明, 使用 ABAQUS 的 UAMP 子程序建立的有限元模型可以有效分析吸湿后复合材料层合板快速加热导致的分层现象。

关键词: 复合材料; 吸湿; 快速加热; 分层; 有限元模型

中图分类号: V258+.5

文献标志码: A

文章编号: 1000-3851(2016)08-1687-07

随着复合材料结构设计和制造水平的提高, 复合材料已经大量应用于飞行器主承力结构和表面结构。复合材料的应用环境也更为复杂多样, 给复合材料结构完整性设计带来了巨大挑战。例如在沿海地区, 复合材料导弹结构可能会受到潮湿空气的影响而受潮, 受潮后的导弹在使用中会受到气动摩擦作用, 使结构温度快速升高^[1], 从而导致内部缺陷快速扩展。飞机蒙皮在使用中会受到雨雪的作用而吸湿, 一旦遭受雷击, 也会使吸湿后的层合板受到快速加热^[2]。层合板内的水分汽化且不能及时溢出, 使层合板内部的富脂区或空穴内的压强急剧升高, 当层合板内部压强到达一定的数值时, 会推动层合板分层^[3-4]的产生和扩展。分层损伤严重影响复合材料结构的承载能力^[5], 给结构安全使用带来了巨大隐患。因此, 研究吸湿后复合材料结构快速加热时的分层现象有重要的意义。

复合材料层合板的吸湿过程和吸湿后的性能近年来受到了国内外众多学者的广泛关注。复合材料结构在潮湿的环境中使用, 水分会扩散进入复合

材料内部, 层合板基体在吸湿后水解, 原有大分子氢键发生破坏, 纤维和树脂吸湿膨胀的不匹配可能会引起微观开裂^[6-8]。孙丽^[9]对复合材料的吸湿行为进行了有限元研究, 并与实验结果进行了对比, 验证了 ABAQUS 软件模拟复合材料吸湿行为的可行性。黄远等^[10-11]等采用 Raman 光谱仪对碳纤维环氧树脂湿热残余应力进行了研究, 发现碳纤维环氧树脂复合材料在吸湿后会产生很大的残余拉应力。曾庆敦和何文佳^[12]对复合材料的吸湿与湿应力进行了进一步的研究, 研究结果表明最大湿应力出现在纤维最密集的区域。

近年来, 对复合材料层合板吸湿后力学性能的研究也越发完善。冯青等^[13]进行了碳纤维环氧树脂复合材料在 3 种湿热环境下的力学性能实验, 结果表明剪切性能主要由吸湿量决定。董安琪等^[14]研究了湿热环境对泡沫夹芯复合材料的影响, 发现在湿热环境下复合材料面板可以阻止水汽进入泡沫, 进而提高泡沫夹芯复合材料的耐湿性。封彤波

收稿日期: 2015-07-23; 录用日期: 2015-10-23; 网络出版时间: 2015-11-20 09:24

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.1801.TB.20151120.0924.004.html

基金项目: 国家自然科学基金(11472024); 教育部基本科研业务费(2013105037)

通讯作者: 张纪奎, 博士, 讲师, 研究方向为复合材料结构设计。 E-mail: zjk@buaa.edu.cn

引用格式: 齐士杰, 张纪奎, 程小全. 吸湿后复合材料层合板快速加热分层扩展数值模拟[J]. 复合材料学报, 2016, 33(8): 1687-1693.

QI S J, ZHANG J K, CHENG X Q. Numerical simulation of rapid heating induced delamination growth of composite laminates after moisture absorption[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2016, 33(8): 1687-1693 (in Chinese).

等^[15]研究了循环湿热环境中碳纤维双马树脂复合材料的吸湿脱湿行为,发现水分进入复合材料内部后会使得基体发生溶胀,纤维/基体界面发生不可逆的破坏,在层合板内部产生大量的空隙和裂纹。Michael 和 Alan^[16]对饱和吸湿的复合材料层合板快速加热引起的分层现象进行了实验研究,指出快速加热导致的水分汽化是层合板分层扩展的主要原因。目前,关于数值模拟吸湿后复合材料层合板在快速加热条件下分层的报道尚不多见。

笔者建立复合材料层合板快速加热分层的有限元模型,通过 ABAQUS 有限元软件 UAMP 子程序模拟水分汽化导致的分层产生与扩展现象,讨论树脂吸湿量和富脂区树脂聚集体积对分层损伤面积的影响。

1 有限元模型

文献^[16]的实验结果表明快速加热时,水分汽化导致的局部压强升高是引起复合材料层合板分层的主要原因,这与常规湿热环境下复合材料的损伤机制存在显著差异。笔者主要针对复合材料层合板

富脂区树脂吸湿后,在快速加热环境下的分层现象开展有限元数值模拟工作。

针对文献^[16]实验中的层合板进行数值模拟。层合板尺寸为 10 mm×10 mm×1.47 mm,由 4 层碳纤维聚酰亚胺 T650-35/HFPE-II-52 八宗缎纹布组成,铺层顺序等效为 $[0/90]_4$ 。310 ℃下,T650-35/HFPE-II-52 层合板的材料属性^[17]如表 1 所示,HFPE-II-52 树脂的材料属性^[18]如表 2 所示。层合板网格划分如图 1(a)所示,选用 ABAQUS 有限元软件三维实体单元(C3D8R)模拟复合材料层合板,厚度方向每层 1 个单元,在层合板中心网格加密,共 44 800 个单元。

文献^[16]重点关注了层合板中心处富脂区(其照片如图 1(b)所示)饱和吸湿后,在快速加热环境下的损伤扩展情况,笔者亦针对这种初始缺陷建立有限元模型。在层合板第 4 层与第 5 层之间有一块树脂聚集区域(如图 1(c)所示)。数值模拟中将此区域简化为直径为 0.560 mm、高度为 0.066 mm 的圆柱体,共采用 1 600 个 C3D8R 单元对此圆柱体进行有限元划分。

表 1 T650-35/HFPE-II-52 层合板的材料属性^[17]

Table 1 Material parameters of T650-35/HFPE-II-52 laminate^[17]

Material parameter	Elastic modulus/GPa			Poisson's ratio			Shear modulus/GPa			Coefficient of expansion/ 10^{-6}		
	E_{11}	E_{22}	E_{33}	ν_{12}	ν_{13}	ν_{23}	G_{12}	G_{13}	G_{23}	α_{11}	α_{22}	α_{33}
Value	153.7	4.3	4.3	0.348	0.348	0.382	1.49	1.49	2.14	8	20	20

表 2 HFPE-II-52 树脂的材料属性^[18]

Table 2 Material properties of HFPE-II-52 resin^[18]

Material parameter	Elastic modulus/GPa	Poisson's ratio	Coefficient of expansion	Maximum moisture content/wt%	Maximum moisture content
Value	4.33	0.3	40×10^{-6}	3.55	3.55

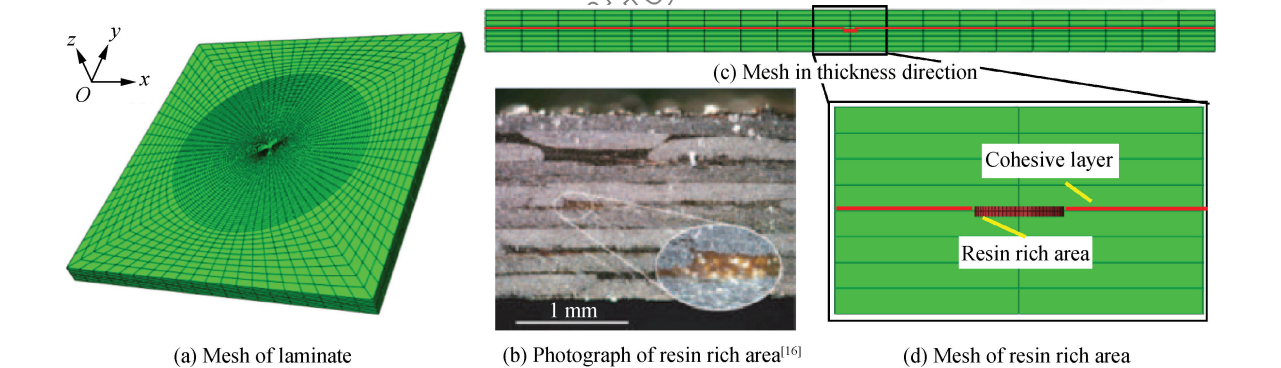


图 1 吸湿后 T650-35/HFPE-II-52 复合材料层合板快速加热导致分层的有限元模型

Fig. 1 Finite element model for rapid heating induced delamination of T650-35/HFPE-II-52 composite laminates after moisture absorption

为模拟吸湿后层合板快速加热时富脂区水分汽化引起的局部压强升高导致的分层，在层合板的第 4 层和第 5 层之间布置一层零厚度的 Cohesive

单元(如图 1(b)所示)，单元类型为 COH3D8，共 5 600 个单元模拟第 4 层和第 5 层之间的分层，Cohesive 单元材料属性^[17-18]如表 3 所示。

表 3 Cohesive 单元材料属性^[17-18]
Table 3 Material properties of Cohesive elements^[17-18]

Parameter	Stiffness/(GPa·mm ⁻¹)	Critical strain energy release rate of type I crack/(J·m ⁻²)	Interface strength of type I crack/MPa
Value	433	1 350	60

高压水蒸气引起的分层以 I 型张开型分层占主导地位，因此选择 I 型裂纹的法向最大应力准则为 Cohesive 单元的分层起始准则^[19]：

$t_n/N = 1$ (1)

式中： t_n 为 Cohesive 单元计算的层间法向应力； N 为 I 型开裂方式下的界面强度。与之对应的分层扩展准则^[19]为

$G_I/G_I^c = 1$ (2)

式中： G_I 为 I 型开裂的应变能释放率； G_I^c 为 I 型开裂的临界应变能释放率。

2 水分汽化引起的高压载荷模拟

吸湿后层合板在快速加热环境下的层合板内分层过程是一个较为复杂的过程。假设层合板中有树脂聚集的部位在受热时会成为分层的起始点。此假设有 2 个根据：① 在受热之后，树脂和纤维都会发生热膨胀，但由于树脂的热胀系数大于纤维的热胀系数，富脂区的体积膨胀会大于周围的体积膨胀，促使层合板分层；② 树脂的吸湿量大于层合板的吸湿量，受热后，富脂区会产生更多的水蒸气，对空隙内侧存在压强，推动分层产生和扩展。采用 ABAQUS 有限元软件 UAMP 子程序模拟快速加热时水分汽化引起的局部高压随分层扩展变化的加载过程，UAMP 子程序模拟快速加热后层合板分层扩展流程图如图 2 所示。

程序执行过程主要包括以下几步。
第 1 步：吸湿后，层合板在快速加热作用下，富脂区树脂内的水分在高温作用下发生汽化，在层合板局部产生高压载荷：

$P_0 = P^\ominus \frac{V_m}{n} \cdot \frac{T}{T_0} \cdot \frac{V_0}{V_{\max}}$ (3)

式中： $P^\ominus$ 为标况下的大气压， $P^\ominus = 1.01 \times 10^5$ Pa； V_m 为标况下气体摩尔体积， $V_m = 22.4$ L/mol； n 为水的相对分子质量， $n = 18$ g/mol； T 为当前温度； T_0 为标况温度， $T_0 = 273.15$ K； V_0 为富脂区所含

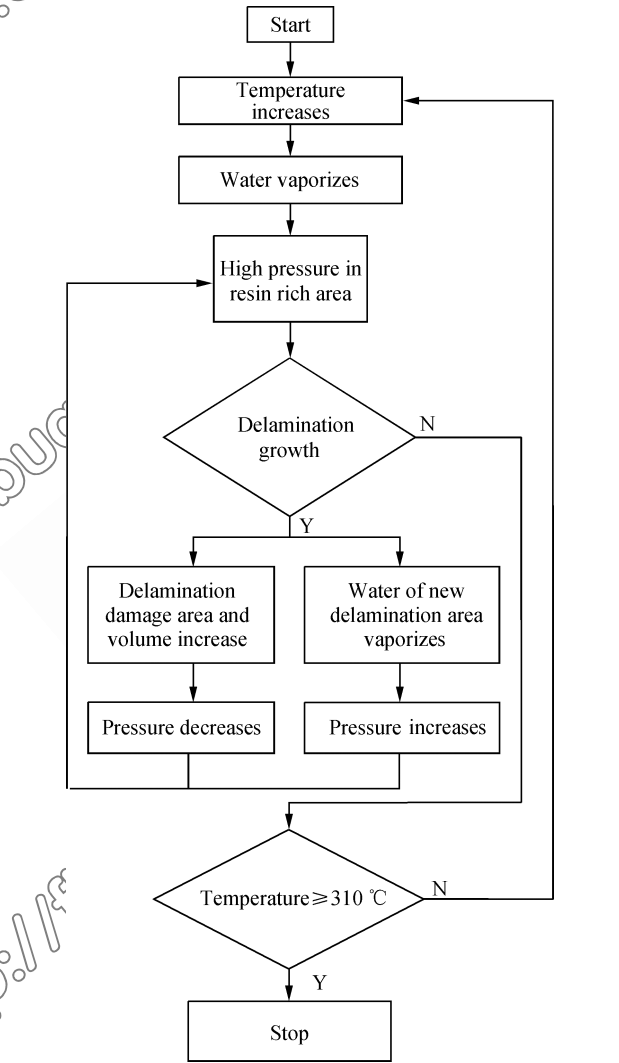


图 2 UAMP 子程序模拟快速加热后层合板分层扩展流程图
Fig. 2 Flow-chart for delamination growth of laminates after rapid heating simulated by UAMP subroutine

水分的体积； $V_{\max}$ 为饱和吸湿情况下，富脂区含有的水分的体积。饱和吸湿时， $\frac{V_0}{V_{\max}} = 1$ 。

第 2 步：根据式(3)判定水分汽化产生的局部高压是否推动 Cohesive 单元产生破坏和分层扩展。

第 3 步：若 Cohesive 单元不发生破坏，则温度

继续升高。

第 4 步:如果 Cohesive 单元发生破坏,则表示层合板将发生分层。层合板的分层会产生 2 方面的影响:① 分层扩展使分层损伤面积和体积增加,减小损伤区域内的压强;② 新产生的分层区域内所含水分汽化增加损伤区域内的压强。分层后压强为

$$P = P_0 \frac{V_{\max}}{\Delta V + V_{\max}} \cdot \frac{V_r + \Delta V_r}{V_r}$$
 (4)

式中: ΔV 为分层区域的体积; V_r 为富脂区树脂聚集体积; ΔV_r 为分层过程中损坏的胶层中所含树脂的体积。

第 5 步:需重新根据式(3)判定局部压强是否足以推动分层扩展。

第 6 步:直至分层停止扩展后,进一步升高温度,温度升高至设定温度(310 °C)后程序终止运行。

3 计算结果分析与验证

3.1 分层机制模拟

图 3 为数值模拟得到的 Cohesive 单元在分层过程中的应力云图。当温度快速上升时,富脂区树脂中所含水分发生汽化,造成局部高压,富脂区树脂承受拉应力,如图 3(a)中红色区域所示。此时, Cohesive 单元的最大应变能释放率接近 1 300 J/m²。此后,随着温度的上升,局部高压载荷导致富脂区受拉的树脂发生破坏,产生分层,分层区域不再承受载荷(层合板中心由图 3(a)中的红色区域变为图 3(b)中的蓝色区域);分层随温度的升高进一步扩展,此时高压载荷引起的层间拉应力主要由未分层区域的最内侧单元承受(图 3(c)中红色区域),分层损伤面积增加;达到目标温度(310 °C)后,汽化水分导致的高压随分层的扩展而逐渐降低,即 Cohesive 单元所受拉应力随分层损伤面积增加逐

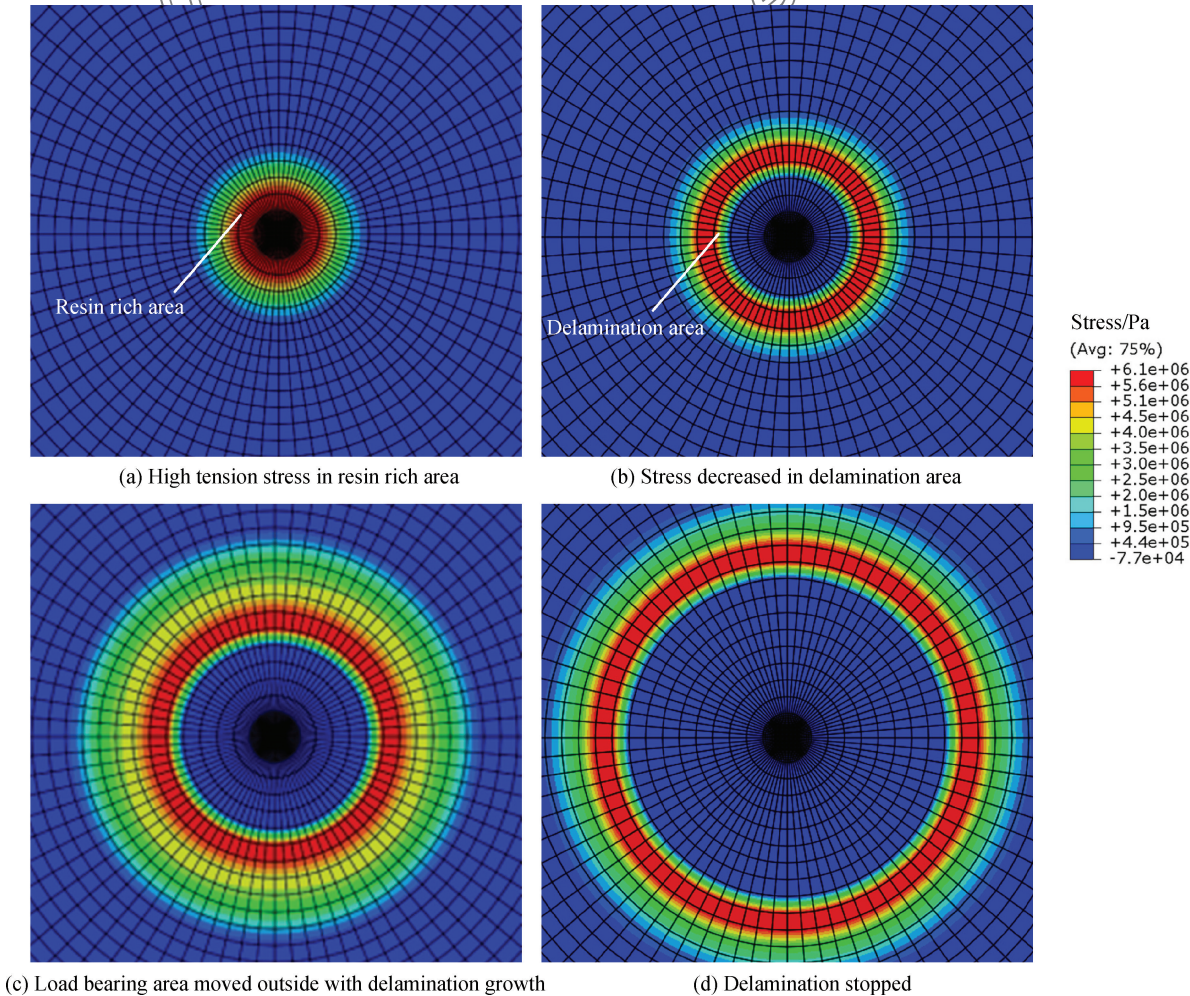


图 3 数值模拟得到的 Cohesive 单元在分层过程中的应力云图

Fig. 3 Stress contour of Cohesive elements during delamination process obtained by numerical simulation

渐减小，最大应变能释放率降低，最终导致分层停止扩展(如图 3(d)所示)。

由图 3 中 Cohesive 单元受力随分层的变化过程可知，建立的有限元模型可以模拟文献[16]中吸湿后层合板快速加热时水分汽化导致的局部高压引起的分层现象。

3.2 分层损伤面积对比

T650-35/HFPE-II-52 层合板快速加热后预测分层损伤面积与实验结果对比如图 4 所示。数值模拟得到饱和吸湿层合板快速加热至 310 ℃时的分层如红色区域所示，其面积为 36.684 mm²，半径为 3.418 mm。计算所得预测分层损伤面积稍大于文献[16]中实验得到的分层损伤面积(图 4 中白色圆圈内区域，半径为 2.910 mm，面积为 26.590 mm²)。数值模拟结果与实验结果的半径相差 14.9%，证明了数值模拟结果的合理性。造成这种差异的原因在于实验中水分汽化后会有一定体积的气体溢出，使分层区域内部压强减小；而数值模拟中并未考虑气体逸出对分层的减小效应。

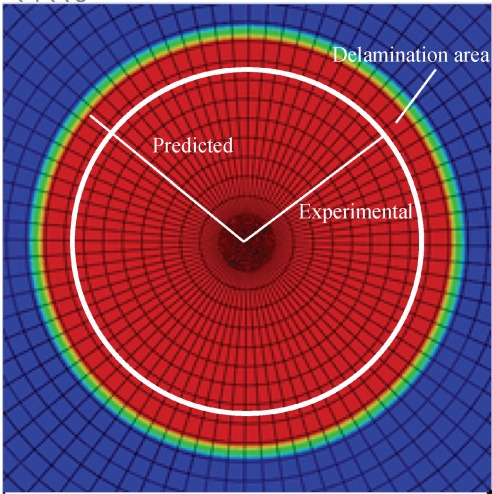


图 4 T650-35/HFPE-II-52 层合板快速加热后预测分层损伤面积与实验结果对比

Fig. 4 Comparison between predicted delamination damage area and experimental results of T650-35/HFPE-II-52 laminates after rapid heating

4 分层损伤面积影响因素

4.1 吸湿量

对于 T650-35/HFPE-II-52 层合板，HFPE-II-52 聚酰亚胺树脂的饱和吸湿量为 3.55%(对应层合板的饱和吸湿量为 1.70%)。对于低吸湿量聚酰亚胺树脂，其饱和吸湿量一般在 1%左右^[20]。故计算

了富脂区树脂聚集体积为 $1.66 \times 10^{-2} \text{ mm}^3$ 、吸湿量由 1.00%~3.55%变化时 T650-35/HFPE-II-52 层合板快速加热后分层损伤面积与吸湿量的关系，如图 5 所示。预测结果表明，树脂吸湿量由 1.00%~3.55%变化时，快速加热导致的分层损伤面积随层合板吸湿量的增加而显著增加。

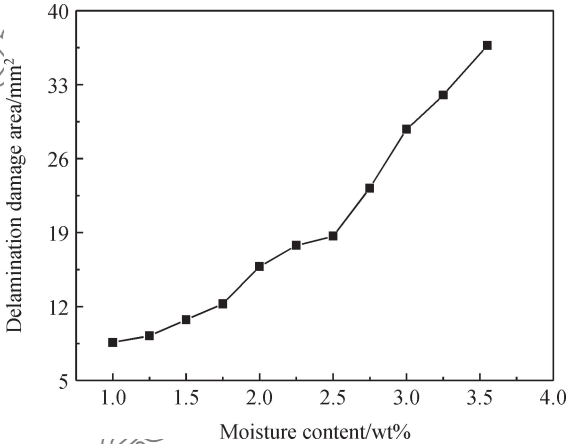


图 5 T650-35/HFPE-II-52 层合板快速加热后分层损伤面积与吸湿量的关系

Fig. 5 Relationship between delamination damage area and moisture content of T650-35/HFPE-II-52 laminates after rapid heating

4.2 富脂区树脂聚集体积

层合板内的富脂区是复合材料层合板的固有缺陷之一。3.2 节的预测结果表明，富脂区树脂在快速加热时会导致层合板产生较大的分层。图 6 为 T650-35/HFPE-II-52 层合板快速加热后分层损伤

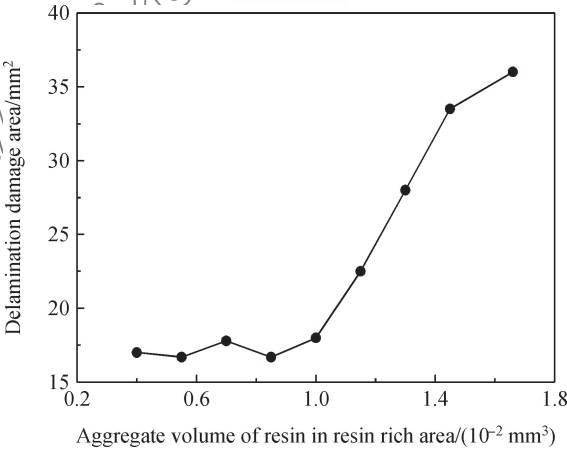


图 6 T650-35/HFPE-II-52 层合板快速加热后分层损伤面积与富脂区树脂聚集体积的关系

Fig. 6 Relationship between delamination damage area and aggregate volume of resin in resin rich area for T650-35/HFPE-II-52 laminates after rapid heating

面积与富脂区树脂聚集体积的关系。当富脂区树脂聚集体积由 $1.66 \times 10^{-2} \text{ mm}^3$ 减小至约 $1.00 \times 10^{-2} \text{ mm}^3$ 时,快速加热导致的分层损伤面积随富脂区树脂聚集体积的减小而显著减小;但当富脂区树脂聚集体积减小到一定值($1.00 \times 10^{-2} \text{ mm}^3$)后,富脂区树脂聚集体积减小对分层损伤面积的影响几乎可以忽略。

5 结 论

(1) 开发的 UAMP 子程序能够模拟吸湿后复合材料快速加热至 310°C 时水分汽化引起的高压作用下层合板分层扩展与载荷施加过程。

(2) 树脂吸湿量由 1.00% 增至 3.55% 时,快速加热导致的碳纤维聚酰亚胺 T650-35/HFPE-II-52 复合材料层合板分层损伤面积随层合板吸湿量的增加而显著增加。

(3) 当富脂区树脂聚集体积由 $1.00 \times 10^{-2} \text{ mm}^3$ 增至 $1.66 \times 10^{-2} \text{ mm}^3$ 时,快速加热导致的碳纤维聚酰亚胺 T650-35/HFPE-II-52 复合材料层合板分层损伤面积随富脂区树脂聚集体积的增加而显著增加。当富脂区树脂聚集体积小于 $1.00 \times 10^{-2} \text{ mm}^3$ 时,富脂区树脂聚集体积减小对分层损伤面积的影响很小。

参考文献:

- [1] 石毓铨,梁国正,兰立文. 树脂基复合材料在导弹雷达天线罩中的应用[J]. 材料工程, 2000, 35(5): 36-39.
SHI Y T, LIANG G Z, LAN L W. Research of poly-matrix composites for missile radomes[J]. Journal of Materials Engineering, 2000, 35(5): 36-39 (in Chinese).
- [2] 张纪奎,张江,齐士杰,等. 复合材料层合板雷击损伤数值模拟研究[J]. 高科技纤维与应用, 2014, 39(1): 36-39.
ZHANG J K, ZHANG J, QI S J, et al. Numerical simulation of lightning strike damage on composite laminates[J]. Hi-Tech Fiber & Application, 2014, 39(1): 36-39 (in Chinese).
- [3] YOSHIYASU H, SHINGO K, YUTAKA I, et al. Artificial lightning testing on graphite/epoxy composite laminate[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2010, 41(10): 1461-1470.
- [4] TOSHIO O, YOSHIYASU H, AKINORI Y. Coupled thermal-electrical analysis for carbon fiber/epoxy composites exposed to simulated lightning current[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2010, 41(8): 973-981.
- [5] 朱伟垚,许希武. 复合材料层合板低速冲击损伤的有限元模拟[J]. 复合材料学报, 2010, 27(6): 200-207.
- ZHU W Y, XU X W. Finite element simulation of low velocity impact damage on composite laminates[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2010, 27(6): 200-207 (in Chinese).
- [6] 王冰,李玲. 聚合物基复合材料吸湿性能研究进展[J]. 中国塑料, 2013, 27(2): 14-18.
WANG B, LI L. Research progress in moisture absorption behavior of polymer-matrix composites[J]. China Plastics, 2013, 27(2): 14-18 (in Chinese).
- [7] HAZIZAN M A, CHENG L W, MOLHD I Z A, et al. Water absorption study on pultruded jute fiber reinforced unsaturated polyester composites[J]. Composites Science and Technology, 2009, 69(11): 1942-1948.
- [8] XUE Y, VEAZIE D R, GLINSEY C, et al. Environmental effects on the mechanical and thermomechanical properties of aspen fiber-polypropylene composites[J]. Composites Part B: Engineering, 2007, 38(2): 152-158.
- [9] 孙丽. 纤维增强环氧树脂基复合材料吸湿性为有的有限元研究[D]. 天津: 天津大学, 2007.
SUN L. Study on moisture absorption behavior of fiber-reinforced epoxy resin composites with finite element analysis [D]. Tianjin: Tianjin University, 2007 (in Chinese).
- [10] 黄远,何芳,万怡灶,等. 碳纤维增强环氧树脂复合材料湿热残余应力的微 Raman 光谱测试表征[J]. 复合材料学报, 2009, 26(4): 22-28.
HUANG Y, HE F, WAN Y Z, et al. Testing and characterization of hygrothermal stresses in carbon-fibers reinforced epoxy composites using Raman spectroscopy[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2009, 26(4): 22-28 (in Chinese).
- [11] 黄远,万怡灶,何芳,等. 碳纤维/环氧树脂单向复合材料的吸湿残余应力研究[J]. 航空材料学报, 2009, 29(4): 57-62.
HUANG Y, WAN Y Z, HE F, et al. Study on residual stresses induced by moisture absorption in unidirectional carbon fiber/epoxy resin composites[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2009, 29(4): 57-62 (in Chinese).
- [12] 曾庆敦,何文佳. 超高分子量聚乙烯纤维/环氧复合材料的吸湿行为及吸湿应力分析[J]. 复合材料学报, 2013, 30(5): 151-158.
ZENG Q D, HE W J. Analysis of hygroscopic behavior and moisture-induced stress in ultra-high molecular weight polyethylene fiber/epoxy composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2013, 30(5): 151-158 (in Chinese).
- [13] 冯青,李敏,顾铁卓,等. 不同湿热条件下碳纤维/环氧复合材料湿热性能实验研究[J]. 复合材料学报, 2010, 27(6): 16-20.
FENG Q, LI M, GU Y Z, et al. Experimental research on hygrothermal properties of carbon fiber/epoxy resin composite under different hygrothermal conditions[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2010, 27(6): 16-20 (in Chinese).
- [14] 董安琪,段跃新,肇研,等. 湿热环境对 PMI 泡沫夹芯复合材料性能的影响[J]. 复合材料学报, 2012, 29(2): 46-52.

- DONG A Q, DUAN Y X, ZHAO Y, et al. Effects of hydro-thermal condition on properties of polymethacrylimide (PMI) foam cores sandwich structure[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2012, 29(2): 46-52 (in Chinese).
- [15] 封彤波, 肇研, 罗云峰, 等. 循环湿热环境中 CCF300/5405 复合材料的吸湿脱湿行为[J]. *复合材料学报*, 2011, 28(5): 77-82.
- FENG T B, ZHAO Y, LUO Y F, et al. Moisture absorption and desorption behavior of CCF300/5405 composites in cyclic hygrothermal environment [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2011, 28(5): 77-82 (in Chinese).
- [16] MICHAEL W C, ALAN T Z. Blistering of moisture saturated graphite/polyimide composites due to rapid heating[J]. *Journal of Composite Materials*, 2009, 24(9): 151-159.
- [17] BHARGAVA P, ZEHNDER A T. High temperature shear strength of T650-35/HPPE-II-52 polyimide matrix unidirectional composite [J]. *Composite Experimental Mechanics*, 2006, 46(2): 245-255.
- [18] PETER A G, ANTHONY M W. T650/AFR-PE-4/FM680-1 Mode I critical energy release rate at high temperatures: Experiments and numerical models [C] // AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC 48th Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. Reston: AIAA, 2007: 7360-7377.
- [19] ZHANG J K, ZHANG X. Simulating low-velocity impact induced delamination in composites by a quasi-static load model with surface-based cohesive contact [J]. *Composite Structures*, 2015, 125: 51-57.
- [20] 熊磊. 含硅脂环组二酐与可溶性、低吸湿性聚酰亚胺的合成与性能研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2011.
- XIONG L. Synthesis and property research on siloxane-containing alicyclic dianhydride and polyimides with good solution and low water adsorption[D]. Nanchang: Nanchang University, 2011 (in Chinese).

Numerical simulation of rapid heating induced delamination growth of composite laminates after moisture absorption

QI Shijie, ZHANG Jikui*, CHENG Xiaoquan

(School of Aeronautic Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to investigate the delamination phenomenon of composite laminates after moisture absorption, finite element model for the delamination of composite laminates after moisture absorption caused by rapid heating was established, and ABAQUS finite element software was second developed, the delamination growth under the local high pressure loading effect induced by the vaporized water after moisture adsorption when rapid heating as well as the load applied process were simulated through UAMP subroutine. Then, the delamination phenomenon of saturated moisture absorbed T650-35/HPPE-II-52 carbon fiber polyimide composite laminates when rapidly heating to 310 °C was predicted by the model, and the numerical simulation and reference experimental results were contrasted. Finally, the influences for the moisture content of resin and the aggregate volume of resin in resin rich area on the delamination damage area were analyzed by the model. The results show that the finite element model established is valid. After rapid heating, the delamination damage area increases with the moisture content of resin increases. When the aggregate volume of resin in resin rich area is relatively small, the influence of it on delamination damage area of laminates after rapid heating is relatively small, while when the aggregate volume of resin in resin rich area increasing to a certain value, the delamination damage area increases significantly with the aggregate volume of resin in resin rich area increasing. The conclusions obtained show that the finite element model established by UAMP subroutine of ABAQUS can analyze the delamination phenomenon of moisture absorbed composite laminates due to rapid heating effectively.

Keywords: composites; moisture absorption; rapid heating; delamination; finite element model