

基于 HyperWorks 的不同铺层方式复合材料 剪切强度有限元分析*

马玉钦¹, 陈 义¹, 许 威¹, 任晓雨², 靳 浩¹, 李开府¹, 王 杰¹, 赵亚涛¹, 李 飞¹

(1. 西安电子科技大学机电工程学院, 陕西 西安 710071;

2. 陕西职业技术学院汽车工程与通用航空学院, 陕西 西安 710038)

摘 要: 剪切强度和剪切韧性是反映复合材料构件在复合受力状态下承载能力及耗能能力的重要指标, 不同铺层方式的单向玻璃纤维与短切玻璃纤维混杂增强复合材料层合板的层间剪切性能有明显差异。文中基于 HyperWorks 商用有限元软件建立了精确的复合材料层合板模型, 通过数值模拟分析不同铺层方式复合材料层合板的层间剪切性能。研究表明, 铺层材料对复合材料层合板的层间剪切性能影响较大, 而铺层顺序对复合材料层合板的层间剪切性能影响较小。

关键词: 复合材料; 铺层方式; 层间剪切强度; 有限元分析

中图分类号: TB381 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-5300(2020)06-0050-04

Finite Element Analysis of Shear Strength of Composite with Different Laminate Methods Based on HyperWorks

MA Yuqin¹, CHEN Yi¹, XU Wei¹, REN Xiaoyu², JIN Hao¹, LI Kaifu¹,
WANG Jie¹, ZHAO Yatao¹, LI Fei¹

(1. School of Mechano-Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China; 2. School of Automotive Engineering and General Aviation, Shanxi Vocational and Technical College, Xi'an 710038, China)

Abstract: Shear strength and shear toughness are important indexes to reflect the bearing capacity and energy dissipation capacity of composite components under complex stress condition. The interlaminar shear properties of composite laminates reinforced by unidirectional glass fiber and short-cut glass fiber hybrid with different laminate methods are significantly different. Based on the HyperWorks commercial finite element software, an accurate composite laminate model is established and the interlaminar shear properties of composite laminates with different laminate modes are numerically analyzed in this paper. The results show that the interlaminar shear strength of the composite laminates is greatly affected by the lay-up materials but less affected by the lay-up sequence.

Key words: composite; laminate method; interlaminar shear strength; finite element analysis

引 言

玻璃纤维具有拉伸强度高、防火、防霉、耐高温、电绝缘性好等一系列优异的性能, 是目前使用量最大的一种增强纤维^[1-3]。受测试条件和测试方法等的限制, 在进行复合材料力学性能测试时, 剪切性能是最难进行测试的。

在过去几十年里, 研究者们发展的剪切试验方法

有几十种, 如 45° 拉伸法、V 开口轨道法、Iosipescu 法、短梁剪切法等^[14]。双切口剪切强度试验法是测量复合材料层合板层间剪切强度的一种有效方法, 被广泛应用于表征纤维增强树脂基复合材料的层间失效强度测试方面。文献[5]研究了厚度不超过 8.5 mm 的复合材料层合板在面外加载下的损伤特征; 文献[6]进行了玻璃纤维增强树脂复合材料层合板的纵向和横

* 收稿日期: 2020-08-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51705389); 教育部产学研合作协同育人项目 (201902004016); 中国博士后科学基金资助项目 (2017M613062); 西安电子科技大学新实验开发和新实验设备研制项目 (SY1954); 西安电子科技大学研究生创新基金资助项目 (5004-20109195867); 西安电子科技大学研究生创新基金资助项目 (5004-20109205867)

向剪切失效的试验研究, 得到了相应的剪切模量和剪切强度; 文献 [7] 利用回收的再生碳纤维复合材料进行 4 种层间剪切试验方法, 结果发现, 剪切行为取决于再生纤维复合材料的内部纤维结构。

由于复合材料剪切试验受诸多试验条件的限制, 因此许多学者也利用有限元分析方法对其进行数值模拟计算。文献 [8] 基于逐渐损伤失效分析方法对复合材料开孔加筋壁板进行了有限元应力分析, 计算得到壁板的最终失效载荷试验值误差为 12.3%; 文献 [9] 对复合材料层合板在纯剪切情况下的稳定性进行了数值模拟研究, 结果发现层合板的屈曲模式和屈曲临界载荷与分层直径密切相关; 文献 [10] 编写了基于 Puck 失效准则的 VUMAT 子程序, 对复合材料层合板横向剪切性能进行了数值预测和渐进失效分析, 其结果表明, 分析模型能较好地预测复合材料层合板剪切试验的力学响应和破坏模式。

本文利用有限元分析软件, 基于双切口拉伸剪切试验法研究玻璃纤维增强树脂基复合材料层合板的层间剪切强度与铺层材料以及铺层顺序之间的关系, 为不同增强材料树脂基复合材料的混杂方式和性能研究提供指导。

1 有限元建模及分析方法

1.1 复合材料建模方法

HyperMesh 支持考虑铺层材料及其铺层顺序的定义方式, 即 ply+stack 的复合材料铺层定义方式, 把各个设计好的铺层按照特定的铺层次序层叠起来, 形成完整的层合板。采用 ply+stack 顺序的建模技术, 可以很方便地对复合材料层合板进行建模和编辑, 三维显示和铺层方向显示等。Altair 独有的基于铺层的复合材料建模方式, 可以直观地显示复合材料的铺层形状、铺层顺序、材料方向等, 其高效精确的求解技术使得复合材料层合板的有限元分析求解变得更加可视化, 整体的分析流程如图 1 所示。模型的整体尺寸为 79.5 mm × 12.7 mm × 12.7 mm, 双切口详细尺寸如图 2 所示。复合材料的层间剪切性能由式 (1) 计算:

$$\tau = \frac{p}{wb}$$

(1)

式中: p 为极限失效载荷; w 为层合板宽度; b 为槽间距。

文中所涉及的复合材料是短切玻璃纤维织物 (以下简称 GF) 和单向玻璃纤维 (以下简称 UF), 有限元分析中所使用的复合材料层合板的 6 种有限元分析模型试件依次记为 A, B, C, D, E, F, 其中不同

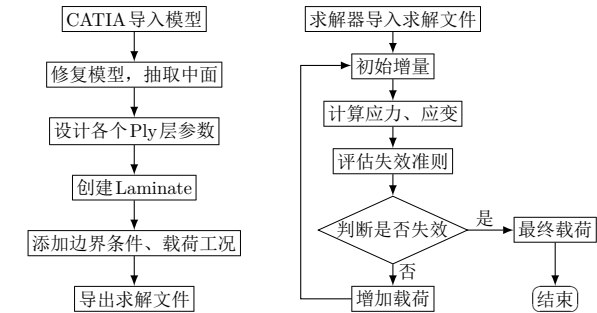


图 1 有限元分析求解步骤

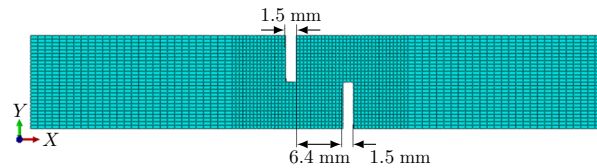


图 2 双切口剪切模型

铺层材料的试件分别表示为 U5(A), U3G2(B), U2G3(C, D, E), G5(F)。U 代表单向玻璃纤维复合材料, G 代表短切玻璃纤维织物复合材料, 下标数字表示层合板中 U 与 G 的层数。具体层合板的铺层方式和铺层结构见表 1, 有限元分析中使用到的详细材料参数见表 2 和表 3。

表 1 玻璃纤维复合材料层合板铺层结构

试件编号	铺层材料	铺层结构
A	U ₅	UF/UF/UF/UF/UF
B	U ₃ G ₂	UF/GF/UF/GF/UF
C	U ₂ G ₃	GF/UF/GF/UF/GF
D		UF/GF/GF/GF/UF
E		GF/UF/UF/GF/GF
F	G ₅	GF/GF/GF/GF/GF

表 2 单向玻璃纤维复合材料单层板材料参数^[11]

材料参数	值	材料参数	值
纵向拉伸模量 E_1 /GPa	38.6	纵向压缩强度 X_C /MPa	610
横向拉伸模量 E_2 /GPa	8.27	横向拉伸强度 Y_T /MPa	31
剪切模量 G_{12} /GPa	4.14	横向压缩强度 Y_C /MPa	118
泊松比 ν_{12}	0.26	剪切强度 S_{12} /MPa	72
纵向拉伸强度 X_T /MPa	1 062		

表 3 短切玻璃纤维织物复合材料单层板材料参数^[12]

材料参数	值	材料参数	值
纵向拉伸模量 E_1 /GPa	23.1	纵向压缩强度 X_C /MPa	337
横向拉伸模量 E_2 /GPa	6.87	横向拉伸强度 Y_T /MPa	442
剪切模量 G_{12} /GPa	1.8	横向压缩强度 Y_C /MPa	337
泊松比 ν_{12}	0.25	剪切强度 S_{12} /MPa	40
纵向拉伸强度 X_T /MPa	442		

1.2 复合材料失效准则

Tsai-Wu 失效理论^[13] 是复合材料经典的失效准则, 它考虑空间应力中破坏面的存在性, 修正了文献

[14] 提出的张量多项式理论, 其目的是克服 Tsai-Hill 准则的缺点。具体的失效形式可表示为:

$$f_i \sigma_i + f_{ij} \sigma_i \sigma_j + f_{ijk} \sigma_i \sigma_j \sigma_k - 1 \geq 0 \quad (2)$$

$$(i, j, k = 1, 2, \dots, 6)$$

式中: f_i , f_{ij} 和 f_{ijk} 分别是 2 阶、4 阶和 6 阶的强度张量系数; σ_i , σ_j 和 σ_k 分别是 x , y 和 s 方向的强度张量。

对于平面应力状态, $i, j, k = x, y, s$, 且复合材料层合板中取张量多项式的前两项, 将所有多项式展开以后进行计算, 则 Tsai-Wu 判据可写成:

$$f_x \sigma_x + f_y \sigma_y + f_{xx} \sigma_x^2 + f_{yy} \sigma_y^2 + f_{ss} \tau_{xy}^2 + 2f_{xy} \sigma_x \sigma_y - 1 \geq 0 \quad (3)$$

Tsai-Wu 判据可以用来预估复合层的失效, 式中强度张量系数的表达式^[15]为: 纵向强度系数 $f_x = \frac{1}{\sigma_{XT}} - \frac{1}{\sigma_{XC}}$, $f_{xx} = \frac{1}{\sigma_{XT}\sigma_{XC}}$; 横向强度系数 $f_y = \frac{1}{\sigma_{YT}} - \frac{1}{\sigma_{YC}}$, $f_{yy} = \frac{1}{\sigma_{YT}\sigma_{YC}}$; 抗剪强度系数 $f_{ss} = \frac{1}{\tau_{xy}^2}$; 相互作用系数 $f_{xy} = -\frac{1}{2} \sqrt{f_{xx}f_{yy}}$ 。

2 结果与分析

2.1 剪切性能分析

图 3 为通过有限元分析软件计算的位移-载荷曲线。通过有限元分析结果观察, 铺层方式为 U_5 的试件的层间破坏载荷要远高于其他铺层结构的试件, 而铺层方式为 G_5 的层合板试件则表现出相对较差的层间失效行为。铺层方式为 U_5 的试件极限载荷明显高于其他 5 种试件, 其主要原因是单向玻璃纤维的剪切强度高于短切玻璃纤维的剪切强度。从图 3 可以看出, 编号为 A 的试件位移-载荷曲线到达最高点后便开始下降, 不同于其他 5 种铺层方式, 其主要原因是短切玻璃纤维在承受最大失效载荷后, 大部分受力区域已经发生剪切破坏, 但仍有小部分短切玻璃纤维丝彼此相连, 并在后续的拉力下仍能承受相应的荷载。

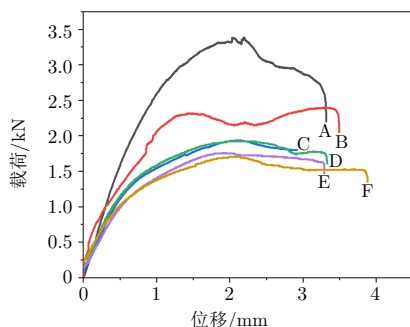


图 3 不同铺层方式复合材料位移-载荷曲线

图 4 为 6 组玻璃纤维复合材料分析试件的剪切强度值。从图 4 可以看出, 铺层方式为 $UF/UF/UF/UF/UF$ 的复合材料剪切强度值达到最高的 41.55 MPa, 而铺层方式为 $GF/GF/GF/GF/GF$ 的复合材料剪切强度为最低的 20.71 MPa。

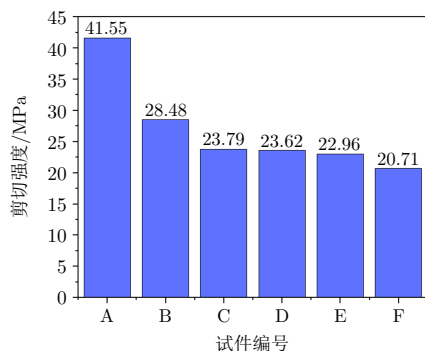
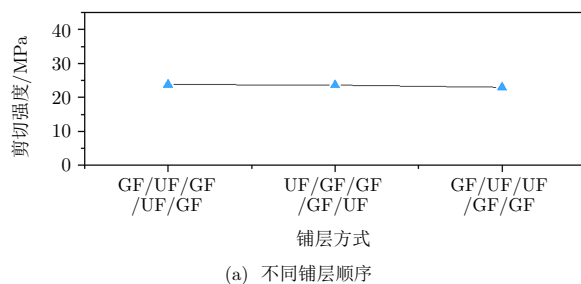
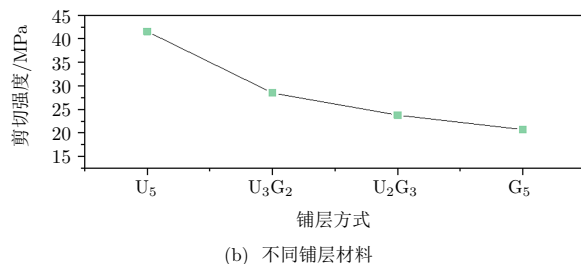


图 4 不同铺层方式复合材料的剪切强度

图 5 为不同铺层材料与铺层顺序分别对玻璃纤维复合材料剪切强度的影响趋势。从图 5 可以看出: 随着玻璃纤维复合材料层合板中单向玻璃纤维层数的减少, 铺层材料为 U_5 (A), U_3G_2 (B), U_2G_3 (C, D, E), G_5 (F) 的分析试件的剪切强度逐渐减小, 最高为 41.55 MPa, 最低为 20.71 MPa, 说明铺层材料对复合材料层合板的层间剪切强度影响较大; 铺层材料为 U_2G_3 (C, D, E) 的 3 组试件的剪切强度分别为 23.79 MPa, 23.62 MPa, 22.96 MPa, 这 3 组试件的剪切强度基本相同, 说明铺层顺序对复合材料层合板的层间剪切强度影响较小。



(a) 不同铺层顺序



(b) 不同铺层材料

图 5 铺层材料与铺层顺序对剪切强度的影响

文中通过有限元分析得到的结论, 与文献[16]进

行的混杂单向玻璃纤维布/短切毡的双切口剪切试验得到的试验结果基本吻合,这验证了有限元分析的准确性。

2.2 剪切失效断口形貌

图6为不同铺层方式玻璃纤维复合材料拉剪失效断口形貌。从图6可以看出,6组分析试件的拉

剪失效断口形貌基本相同,都是在2个切口之间形成断口并向切口外侧呈45°方向延伸。铺层方式为UF/UF/UF/UF/UF的A组试件失效断口较大,而且在切口外侧45°方向形成贯通裂纹,而铺层方式为GF/GF/GF/GF/GF的F组试件失效断口较小,只是在2个切口之间形成裂纹。

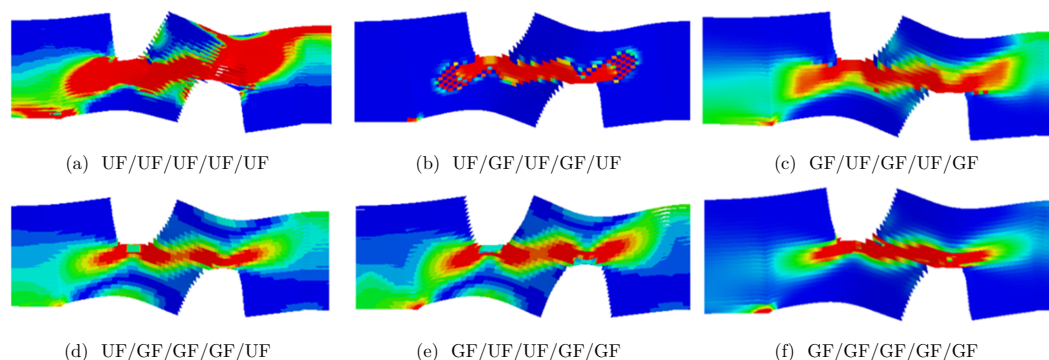


图6 不同铺层方式复合材料的剪切断口形貌

3 结束语

本文基于Tsai-Wu失效理论,结合双切口拉剪试验方法,对不同铺层方式玻璃纤维复合材料层合板的层间剪切强度进行了数值模拟研究。结果表明:不同的铺层材料对复合材料层合板层间剪切性能的影响较大;不同的铺层顺序对复合材料层合板的层间剪切性能影响较小;而不同铺层方式玻璃纤维复合材料层合板的失效断口形貌基本相同。本文主要对玻璃纤维增强树脂基复合材料宏观下的层间剪切性能进行了数值模拟分析,对其微观结构下的层间剪切、层内剪切等力学性能及其层合板失效破坏情况的具体分析还需进一步深入研究。

文中的数值建模方法和铺层研究方法皆可为玻璃纤维复合材料在航空航天领域的推广应用研究提供重要的参考。

参考文献

- [1] WŁOCH M, BAGIŃSKI F, KOZIŃSKI P, et al. Submicron inorganic particles as an additional filler in hybrid epoxy matrix composites reinforced with glass fibres[J]. *Polymers & Polymer Composites*, 2020, 28(7): 484–491.
- [2] VINOTH K S, ANSARI M M, BEGUM S, et al. Effect of fibre loading on tensile strength of kenaf/glass fibre epoxy hybrid composite for insulator application [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2020, 29: 123–126.
- [3] KUMAR U A, ALAM S M, LAXMINARAYANA P. Influence of abrasive water jet cutting on glass fibre reinforced polymer (GFRP) composites [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2020, 27: 1651–1654.
- [4] HODGHINSON J M. 先进纤维增强复合材料性能测试 [M]. 白树林, 译. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [5] WAGIH A, MAIMI P, GONZALEZ E V, et al. Damage sequence in thin-ply composite laminates under out-of-plane loading [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2016, 87: 66–77.
- [6] TAHERI-BEHROOZ F, ESMKHANI M, YAGHOUBI-CHATROODI A, et al. Out-of-plane shear properties of glass/epoxy composites enhanced with carbon nanofibers [J]. *Polymer Testing*, 2016, 55: 278–286.
- [7] KUMAR K K, HUTCHINSON A R, BROUGHTON J G. Static shear response of recycled carbon fibre composites for structural applications [J/OL]. [2020-09-12]. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112358>.
- [8] 赵娜, 张博平, 刘向东. 复合材料开孔加筋壁板剪切试验与数值分析 [J]. *科学技术与工程*, 2012, 12(13): 3155–3159, 3165.
- [9] 孙中雷, 赵美英, 万小朋. 含分层复合材料层合板剪切稳定性数值模拟研究 [J]. *机械强度*, 2013, 35(5): 641–645.
- [10] 贾利勇, 廖斌斌, 于龙, 等. 基于Puck理论的复合材料层合板横向剪切失效分析 [J]. *复合材料学报*, 2019, 36(10): 2286–2293.
- [11] 王耀先. 复合材料力学与结构设计 [M]. 上海: 华东理工大学出版社, 2012.
- [12] XIN S H, WEN H M. A progressive damage model for fiber reinforced plastic composites subjected to impact (下转第64页)

6) 焊接前, 要设置合理的预热温度, 要综合考虑零件材料和镀层的耐温性。

本文针对某大电流高热容量汇流板的通孔透锡率进行了比较全面的工艺研究, 解决了产品实际需求, 对电子设备软钎焊接工艺具有一定的普适性指导意义。但本研究所针对的对象和焊接方法还有必要进一步深入, 在焊接手段的实现上, 除了采用波峰焊接设备之外, 还需探索别的实现手段, 多层叠加印制板焊接厚度的极限等问题还需要进一步的研究。

参考文献

- [1] 李佳宾, 白邈, 杨京伟, 等. 通孔器件引脚与过孔间距对焊点透锡的影响分析[J]. 航天制造技术, 2016, 10(5): 41-43.

41-43.

- [2] 贾忠中. 波峰焊接常见不良情况及改进措施[J]. 电子工艺技术, 2019, 40(2): 120-124.
[3] 孙德松. 平基底 DIP 元件波峰焊气孔不良的研究[J]. 电子工艺技术, 2018, 39(6): 352-354.
[4] 王晓敏, 史建卫, 杨翼丰, 等. 无铅波峰焊不同板厚通孔焊点的填充性研究[J]. 电子工业专用设备, 2008(10): 36-42, 60.
[5] 焦超锋, 任康, 姜红明, 等. 通孔元器件引脚断裂分析[J]. 电子机械工程, 2011, 27(1): 15-18.

孙东梅 女, 1977 年生, 工程师, 主要从事电子装联和汇流环制造工艺研究与设计工作。

(上接第 53 页)

loading[J]. International Journal of Impact Engineering, 2015, 75: 40-52.

- [13] TSAI S W, WU E M. A general theory of strength for anisotropic materials[J]. Journal of Composite Materials, 1971, 5(1): 58-80.
[14] GOL' DENBLAT, KOPNOV V A. Strength of glass reinforced plastic in the complex stress state[J]. Polymer Mechanics, 1966, 1(2): 54-59.

- [15] DANIEL I M, ISHAI O. Engineering Mechanics of Composite Materials [M]. New York: Oxford University Press, 1995.

- [16] 周磊, 黎大胜, 侯锐钢. 铺层结构对树脂基复合材料层间剪切强度影响的研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2016(9): 44-48.

马玉钦 男, 1986 年生, 博士, 硕士生导师, 讲师, 主要研究方向为先进材料成型与制造技术。

(上接第 60 页)

参考文献

- [1] SJ 20813—2002 铝和铝合金化学转换膜规范[S]. 北京: 中国电子技术标准化研究所, 2002.
[2] 任万滨. 新型触点材料接触电阻自动测量系统的研究[J]. 电工材料, 2013(4): 39-42.
[3] 韩萌. 接触电阻测试稳定性研究[J]. 中国高新技术企业, 2011(9): 41-42.
[4] 王珩. 触点材料接触电阻测试方法研究综述[J]. 电器与

能效管理技术, 2018(23): 1-6.

- [5] 余方方. 气动精密减压阀开发现状及研究方法探讨[J]. 液压气动与密封, 2013(8): 1-2.

王旭敏 男, 1966 年生, 高级工程师, 主要从事工装和非标设备设计工作。

张正兵 男, 1983 年生, 高级工程师, 主要从事特种装备结构设计工作。

欢迎投稿, 期刊网站: www.dzjxgc.cn

邮箱: dzjxgc@126.com, 咨询电话: 025-51821082