

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2018.11.013

铺层参数对玻璃钢层合板力学性能的影响

张成林¹,李丽君²,董抒华¹,李安邦³,焦学健²,谭洪生¹

(1. 山东理工大学材料科学与工程学院, 山东淄博 255049; 2. 山东理工大学交通与车辆工程学院, 山东淄博 255049;

3. 山东北汽海华汽车部件股份有限公司, 山东淄博 255202)

摘要: 采用手糊成型工艺, 分别制备了单向铺层取向 $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$ 的玻璃钢层合板和双向铺层 $[-45^\circ/+45^\circ]$ 、 $[0^\circ/90^\circ]$ 玻璃钢层合板。研究了铺层角度、铺层层数和铺层方式对玻璃钢层合板力学性能的影响。结果表明, 铺层参数对玻璃钢层合板的性能有显著的影响, 单向铺层取向时, 3层 $[90]_3$ 和6层 $[90]_6$ 玻璃钢层合板的弯曲强度最大; $[0]_3$ 和 $[0]_6$ 层合板拉伸性能最好, 6层的玻璃钢层合板力学性能优于3层玻璃钢层合板。采用对称双向铺层 $[0^\circ/90^\circ]_3$ 层合板拉伸强度比 $[-45^\circ/+45^\circ]_3$ 层合板高出2.7倍, 比 $[0]_6$ 层合板高21%; $[0]_6$ 层合板弯曲强度比对称双向铺层 $[-45^\circ/+45^\circ]_3$ 层合板弯曲强度高3倍, 比 $[0^\circ/90^\circ]_3$ 层合板高13%。 $[0^\circ/90^\circ]_3$ 层合板的拉伸强度和弯曲强度均大于 $[-45^\circ/+45^\circ]_3$ 层合板的对应强度。

关键词: 玻璃钢; 铺层角度; 力学性能; 层合板

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2018)11-0058-04

Effect of Ply Parameters on Mechanical Properties of GFRP Laminates

Zhang Chenglin¹, Li Lijun², Dong Shuhua¹, Li Anbang³, Jiao Xuejian², Tan Hongsheng¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China; 2. School of Transportation and Vehicle Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China; 3. Shandong Beiqi Haihua Automobile Parts Co. Ltd., Zibo 255202, China)

Abstract: Laminates with ply orientations of $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$ and bidirectional laminates of $[-45^\circ/+45^\circ]$ and $[0^\circ/90^\circ]$ were fabricated by hand lay-up molding. The effects of ply orientations, ply layer's number and ply mode on the mechanical properties of GFRP laminates were studied. The results show that the lamination parameters have a significant effect on the mechanical properties of GFRP laminates. The bending strength of three-layer $[90]_3$ and six-layer $[90]_6$ GFRP laminates is the highest when the laminates are unidirectionally oriented. $[0]_3$ and $[0]_6$ oriented GFRP laminates have the best tensile properties, and the tensile strength of six-layer GFRP laminates is better than three-layer GFRP laminates. The tensile strength of symmetrical bidirectional $[0^\circ/90^\circ]_3$ laminates is 2.7 times higher than that of $[-45^\circ/+45^\circ]_3$, and 21% more than that of $[0]_6$ laminates. The bending strength of $[0]_6$ laminates is 3 times higher than that of symmetrical bidirectional $[-45^\circ/+45^\circ]_3$ laminates, and 13% more than that of $[0^\circ/90^\circ]_3$ laminates. The tensile strength and bending strength of $[0^\circ/90^\circ]_3$ laminates are more than those of $[-45^\circ/+45^\circ]_3$ laminates.

Keywords: glass fiber reinforced plastics; ply orientation; mechanical property; laminates

玻璃钢复合材料具有高的比刚度、比强度、抗疲劳性能、耐腐蚀性能和良好的减震性能等而广泛应用于飞机、汽车、风力发电机叶片、游艇、建筑和桥梁等^[1-6]。层合板一般是由不同角度的单层板铺敷而成, 在铺层结构设计中, 铺层的层数、厚度、角度和

铺层方式等因素均会影响层合板的最终性能, 通过调整这些铺层参数可实现复合材料的可设计性。合理的铺层结构设计, 是玻璃钢层合板性能得以保障的前提^[7]。

目前国内外学者针对铺层设计开展了相关研

基金项目: 国家自然科学基金项目(51505261), 山东省自然科学基金项目(ZR2015AM013), 淄博市校城融合发展计划项目(2018ZBXC005)

通讯作者: 董抒华, 博士, 副教授, 主要研究方向为先进树脂基复合材料的制备及应用 E-mail: 54747302@qq.com

收稿日期: 2018-08-22

引用格式: 张成林, 李丽君, 董抒华, 等. 铺层参数对玻璃钢层合板力学性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2018, 46(11): 58-61.

Zhang Chenglin, Li Lijun, Dong Shuhua, et al. Effect of ply parameters on mechanical properties of GFRP laminates[J]. Engineering Plastics Application, 2018, 46(11): 58-61.

究。刘诚等^[8]研究了不同铺层取向角度对黄麻纤维布增强环氧树脂复合材料力学性能的影响,通过优选不同铺层取向角度使得复合材料的拉伸和弯曲性能得到提高。为了研究螺旋桨桨叶铺层角度对桨叶位移的影响,张建国等^[9]对碳纤维复合材料螺旋桨进行铺层设计和分析,并对设计的铺层方案中的主铺层角进行了修正,结果表明 0° 铺层角有利于大变形桨叶设计, 90° 铺层角有利于小变形桨叶设计; -45° 铺层角有利于阻止变形, 45° 铺层角有利于变形。陈巧峰等^[10]对不同铺层角度的形状记忆复合材料层合板的微屈曲及形状记忆性能进行研究。结果表明,铺层角度和铺层方式对层合板的微屈曲程度及形状记忆回复率都有显著影响。H. S. Sas等^[11]证实铺层方式和铺层角度对织物厚度方向渗透性能有重要影响。以上研究表明,复合材料具有较强的可设计性,调整制件的铺层顺序、铺层厚度、铺层数和铺层角度等参数可使复合材料表现出不同的性能,设计人员可通过调整不同的铺层参数来获得不同的材料性能。笔者通过手糊成型制备了不同铺层取向 0° , 15° , 30° , 45° , 60° , 75° , 90° , $[-45/45]$ 和 $[0/90]$ 玻璃钢层合板,研究了铺层角度、铺层层数和铺层方式对玻璃钢层合板弯曲强度和拉伸强度的影响,这对层合板的性能优化具有重要意义。

1 实验方法

1.1 原材料

玻璃纤维布:淄博鲁燕复合材料有限公司;

不饱和聚酯:淄博乐天化工有限公司;

引发剂:淄博天盛化工有限公司;

促进剂:齐鲁石化公司研究院试剂厂。

1.2 主要仪器及设备

电子万能试验机:WDW1020型,中国科学院长春新科公司;

扫描电子显微镜(SEM):Quanta250型,美国FEI公司。

1.3 试样制备

取向角为玻璃纤维平纹布纬向和取样长度方向之间的夹角,两者重合一致为 0° 方向,分别裁剪若干块 0° , 15° , 30° , 45° , -45° , 60° , 75° , 90° 玻璃纤维布,尺寸为 $20\text{ cm}\times 20\text{ cm}$ 。将不饱和聚酯、引发剂与促进剂按一定质量比配制成树脂胶液,再将裁剪好的玻璃纤维布平铺在铺有保鲜膜的玻璃板上,把配制好的树脂胶液均匀地铺敷在玻璃纤维布上,用辊子滚压使树脂溶液完全浸渍纤维布,然后再铺

下一层,最后用玻璃板压实,使其常温固化得到层合板。将已经固化好的层合板进行切割加工,制得测试力学性能的试样。

1.4 性能测试与表征

拉伸强度按GB/T 1040-1992测试,拉伸速率为 10 mm/min ;

弯曲强度按GB/T 9341-2008测试,弯曲速率为 10 mm/min 。

2 结果与讨论

2.1 促进剂用量对不饱和聚酯树脂凝胶时间影响

促进剂是指在聚酯树脂固化过程中能够降低引发剂引发温度,促使引发剂在室温下产生游离基的物质。促进剂用量对树脂胶液凝胶时间有重要的影响。表1是促进剂用量对不饱和聚酯树脂凝胶时间的影响。从表1可看出,随着促进剂用量的增加树脂胶液凝胶速度加快。促进剂用量太少会导致凝胶速度变慢而使得固化周期变长,从而影响生产效率;用量太大则来不及完整手糊成型树脂已凝胶,使得树脂胶液不能充分浸透纤维布或出现干斑现象。因此,需要选用合适的饱和聚酯、引发剂和促进剂的比例。选用的饱和聚酯树脂、引发剂和促进剂的比例是 $100:2:0.5$ 。

表1 促进剂用量对不饱和聚酯树脂凝胶时间的影响

不饱和聚酯 用量/份	引发剂用 量/份	促进剂用 量/份	凝胶时间/ min
100	2	0.25	30
100	2	0.5	20
100	2	1	15

2.2 铺层角度对玻璃钢层合板弯曲性能的影响

图1是单向铺层角度对玻璃钢层合板弯曲强度的影响。从图1可看出,随着单向角度的增加,3层和6层的层合板的弯曲强度先降低后增加,当铺层角度是 30° 时弯曲强度最小,而在 90° 时弯曲强度最大。这主要是因为织物铺层角度不同时,由于织物经纬向密度不同、纤维层内纤维间距等参数不同而使织物承受应力破坏的程度不同。从图中还可看出,6层层合板比3层层合板的弯曲强度在 0° 时高出11%,6层层合板比3层层合板的弯曲强度在 90° 时高28%。原因是当试样受力弯曲时,随着作用力的增加裂纹主要沿着试样厚度和平面方向逐渐扩展,裂纹在扩展过程中受到抗弯强度比基体大的增强体的阻挡,扩展方向将会改变,织物铺层层数越多,裂纹扩展过程中裂纹转向的次数也越多,试样被破坏所需的载荷也就越大^[12]。另外,在弯曲破坏过

程中,应力破坏基体也会破坏织物及织物和基体间的界面,织物的弯曲强度比基体的弯曲强度及界面粘结强度大很多时,复合材料的抗弯强度主要取决于织物,因此,在一定的范围内,织物铺层层数越多复合材料的弯曲强度也越大。

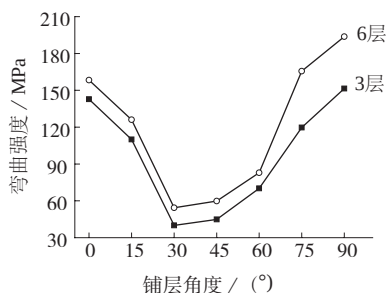


图1 铺层角度对层合板弯曲强度的影响

2.3 铺层角度对层合板拉伸性能的影响

图2是单向铺层角度对玻璃钢层合板拉伸强度的影响。

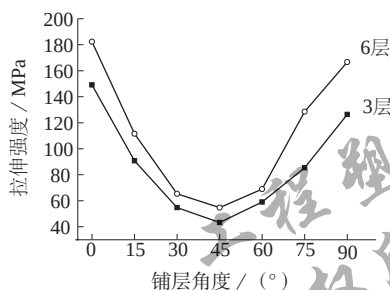


图2 铺层角度对层合板拉伸强度的影响

从图2可看出,随着单向角度的增加,3层和6层的层合板的拉伸强度均先降低后增加,呈近凹抛物线式变化,当铺层角度是45°时拉伸强度最小,而在0°时拉伸强度最大,3层的层合板拉伸强度为149 MPa,而6层的层合板拉伸强度为182 MPa,比3层的层合板拉伸强度高出22%。纤维的取向角度直接影响到载荷在纤维和基体间的分布^[13-15],0°取向铺层层合板在受到拉应力时,纤维和基体同时承受轴向拉伸应力,载荷主要由纤维承担,随着拉伸应力的增加纤维变形增加,当达到纤维断裂强度时纤维断裂,而基体不能支撑整个载荷随之被破坏;随着纤维取向角度的增加,基体承担应力增加,拉应力通过界面层传递到玻璃纤维上,相对较小的应力就会引起复合材料基体的破坏、纤维与基体的脱离,因此拉伸强度降低直至取向角度为45°。当超过45°后层合板拉伸强度增加,铺层角度是90°时经向纤维与拉伸方向一致,纤维主要承担应力又达到最大。从图中还可看出6层比3层的层合板拉伸强度大,在75°时比45°时最多高出50.6%。层合板承受拉

伸载荷时,当外加载荷增大到某处纤维与基体过载失效,首先层板中某一层被破坏,接着载荷将重新分配到其余诸层中,并会使第二层、第三层等依次破坏,因此随着层数的增加层合板承载能力增强。

图3是层合板的表面形貌和拉伸断口SEM照片。从图3a可看出,在未受到拉应力前纤维束之间有树脂粘连包裹,纤维与树脂界面结合较好;从图3b可看出,层合板受到拉伸破坏时其纤维断面较平整,纤维断裂,部分纤维脱粘拔出,纤维束之间部分树脂基体断裂和脱落,说明层合板在承受拉伸应力时产生的裂纹在基体内扩展,界面起到传递应力的作用,裂纹分叉转向平行于纤维扩展,随着载荷的增加纤维断裂。

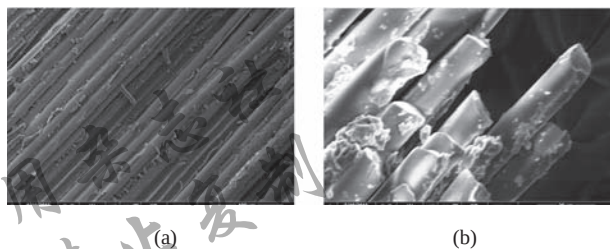


图3 层合板的SEM图

2.4 不同铺层方式对层合板力学性能的影响

图4是0°取向铺层角度的 $[0]_6$ 层合板和采用对称铺层的 $[-45/+45]_3$ 和 $[0/90]_3$ 的层合板拉伸强度和弯曲强度对比图。

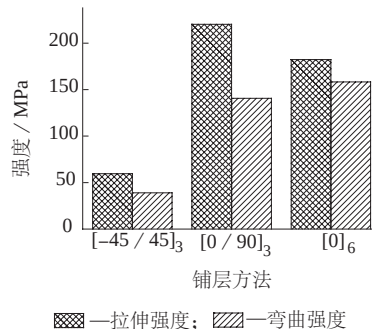


图4 不同铺层方式的层合板拉伸强度和弯曲强度

3种铺层方式不同,总层数相同。从图4可看出,层合板拉伸强度关系是 $[0/90]_3 > [0]_6 > [-45/+45]_3$,层合板弯曲强度关系是 $[0]_6 > [0/90]_3 > [-45/+45]_3$ 。采用对称铺层 $[0/90]_3$ 层合板拉伸强度比 $[-45/+45]_3$ 层合板拉伸强度高出2.7倍,比 $[0]_6$ 层合板拉伸强度高21%; $[0]_6$ 层合板弯曲强度比对称铺层 $[-45/+45]_3$ 层合板弯曲强度高出3倍,比 $[0/90]_3$ 层合板弯曲强度高13%。其中可看出 $[0/90]_3$ 层合板的拉伸强度和弯曲强度均大于 $[-45/+45]_3$

层合板对应强度。这说明当载荷作用于与层压板中较多纤维方向一致时,层压板中纤维起到的分散和承载载荷破坏能力更佳;采用 $[-45/+45]$ 方式铺层时,层合板在承受拉伸载荷时,纤维与树脂界面受到层间剪切而使得应力集中导致层间易被破坏,因此加速层合板的失效。

3 结论

(1) 单向铺层角度为 $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$ 的层合板中单向铺层角度为 90° 时层合板弯曲强度最大,6层层合板比3层层合板 90° 时高28%,6层的层合板力学性能优于3层层合板,其中单向铺层角度为 0° 时层合板拉伸强度最大,6层的 0° 层合板拉伸强度比3层的 0° 层合板拉伸强度高出22%。

(2) 采用对称双向铺层 $[0/90]_3$ 层合板拉伸强度比 $[-45/+45]_3$ 高出2.7倍,比 $[0]_6$ 层合板高21%; $[0]_6$ 层合板弯曲强度比对称双向铺层 $[-45/+45]_3$ 层合板弯曲强度高出3倍,比 $[0/90]_3$ 高13%。 $[0/90]_3$ 层合板的拉伸强度和弯曲强度均大于 $[-45/+45]_3$ 层合板的拉伸强度和弯曲强度。

参考文献

- [1] Zhang Shaohua, Caprani C, Heidarpour A. Influence of fibre orientation on pultruded GFRP material properties[J]. Composite Structures, 2018, 204:368–377.
- [2] 蔡应强,陈清林,赵云宝,等.玻璃钢游艇 VARI 工艺参数优化研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2018(4):39–44.
Cai Yingqiang, Chen Qinglin, Zhao Yunbao, et al. Optimization of vari process parameters for FRP yacht[J]. Fiber Reinforced Plastics / Composites, 2018(4):39–44.
- [3] 郑吉良,彭明军,孙勇.等腰梯形蜂窝芯玻璃钢夹芯板的面外压缩性能[J]. 材料工程, 2017, 45(2):72–79.
Zheng Jiliang, Peng Mingjun, Sun Yong. Out-plane compressive properties for isosceles trapezoid honeycomb core of FRP sandwich panel[J]. Journal of Materials Engineering, 2017, 45(2):72–79.
- [4] 严世成,梁克瑞. 玻璃钢/复合材料的发展、应用与展望[J]. 广东化工, 2014, 41(24):72–73.
Yan Shicheng, Liang Kerui. Development, application and prospect of FRP / composite[J]. Guangdong Chemical Industry, 2014, 41(24):72–73.
- [5] 薛忠民. 中国玻璃钢/复合材料发展回顾与展望[J]. 玻璃钢/复合材料, 2015(1):5–12.
Xue Zhongmin. Retrospect and prospect of development of FRP / CM in China[J]. Fiber Reinforced Plastics / Composites, 2015(1):5–12.
- [6] Fraisse A, Bech J I, Borum K K, et al. Impact fatigue damage of coated glass fibre reinforced polymer laminate[J]. Renewable Energy, 2018, 126:1 102–1 112.
- [7] Kumari N B V L, Mehar A, Abdulrahman M, et al. Performance analysis of ply orientation in composite laminates[J]. Materials Today:Proceedings, 2018, 5(2):5 984–5 992.
- [8] 刘诚,范豪,花军,等. 铺层取向角度对黄麻纤维复合材料性能的影响[J]. 东北林业大学学报, 2016, 44(2):52–55.
Liu Cheng, Fan Hao, Hua Jun, et al. Influence of ply orientated angles on the jute fiber reinforced composites[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2016, 44(2):52–55.
- [9] 张建国,岳金,宋春生,等. 碳纤维复合材料螺旋桨铺层角度研究[J]. 武汉理工大学学报:信息与管理工程版, 2014, 36(2):207–210.
Zhang Jianguo, Yue Jin, Song Chunsheng, et al. Ply angle of carbon fiber composite propeller[J]. Journal of Wuhan University of Technology:Information & Management Engineering Edition, 2014, 36(2):207–210.
- [10] 陈巧峰,李文晓,房光强,等. 铺层角度对形状记忆复合材料层合板性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2014, 42(4):40–44.
Chen Qiaofeng, Li Wenxiao, Fang Guangqiang, et al. Effects of ply angles on properties of shape memory composite laminates[J]. Engineering Plastics Application, 2014, 42(4):40–44.
- [11] Sas H S, Wurtzel E B, Simacek P, et al. Effect of relative ply orientation on the through-thickness permeability of unidirectional fabrics[J]. Composites Science and Technology, 2014, 96(6):116–121.
- [12] 俞巧珍. 织物铺层铺式对水泥基复合材料力学性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2005, 8(4):378–382.
Yu Qiaozhen. Influence of laying style of fabric layer on mechanical properties of cement composites[J]. Journal of Building Materials, 2005, 8(4):378–382.
- [13] 赖家美,鄢冬冬,刘榆华,等. VARTM 工艺铺层取向对复合材料力学性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2015, 43(1):43–47.
Lai Jiamei, Yan Dongdong, Liu Yuhua, et al. Influence of different ply orientations on mechanical properties of composite with VARTM technique[J]. Engineering Plastics Application, 2015, 43(1):43–47.
- [14] 武文红,牛恒茂,赵燕茹,等. 基于图像处理的纤维分布与取向分布对水泥基材料弯曲性能的影响[J]. 材料导报, 2017, 31(6):140–146.
Wu Wenhong, Niu Hengmao, Zhao Yanru, et al. Effects of fiber distribution based on image processing on bending properties of PVA fiber reinforced cementitious composites[J]. Materials Review, 2017, 31(6):140–146.
- [15] 陈毓焘,李文晓,金世奇. 铺层角度对碳纤维/形状记忆环氧树脂层合板形状回复性能的影响[J]. 材料导报, 2017, 31(20):11–16.
Chen Yutao, Li Wenxiao, Jin Shiqi. Shape recovery properties of carbon fiber / shape memory epoxy resin laminates with diverse ply angles[J]. Materials Review, 2017, 31(20):11–16.