

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2024.04.003

碳纤维增强环氧树脂三维编织/单向织物混杂复合材料力学性能

陈燕荣¹, 孙琳¹, 王晓明¹, 张仁航¹, 查一斌², 李哲瑞², 刘勇², 程亚男¹, 孙厚礼¹, 张辉²

(1. 中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 山东青岛 266111; 2. 东华大学民用航空复合材料协同创新中心, 上海 201620)

摘要: 为研究层间混杂碳纤维三维编织/单向(3D/UD)织物增强环氧树脂复合材料的力学性能, 采用真空辅助树脂传递模塑(VARTM)成型工艺制备混杂复合材料层合板, 通过试验研究分析了不同混杂比、铺层角度以及铺层顺序对混杂复合材料静、动态力学性能的影响。结果表明, 单向碳纤维的加入显著提高了混杂复合材料的层间静态力学性能, 其层间剪切性能随织物铺层分散性的增加而提升。而随着UD织物铺层比例的增加, 混杂复合材料的弯曲性能和储能模量先升高后降低, 压缩性能则不断下降。单向碳纤维的铺层角度对混杂复合材料力学性能的影响也较大, 0°单向铺层混杂复合材料的静、动态力学性能均优于30°单向铺层混杂复合材料; 在相同混杂比下, 铺层顺序的不同对混杂复合材料的力学性能也有较大影响, 0°单向铺层的三明治结构U₀/3D/U₀, 其弯曲强度和弯曲弹性模量最高, 分别为1 210 MPa和117 GPa。此外, 混杂复合材料3D编织层的失效以丝束与树脂的界面破坏为主, 而单向层的失效以纤维断裂和分层破坏为主, 不同的失效形式导致了混杂复合材料力学性能的差异。

关键词: 三维编织; 层间混杂; 复合材料; 力学性能

中图分类号: TB333 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2024)04-0017-06

Mechanical properties of carbon fiber reinforced epoxy resin three-dimensional braided/unidirectional fabric hybrid composites

CHEN Yanrong¹, SUN Lin¹, WANG Xiaoming¹, ZHANG Renhang¹, ZHA Yibin², LI Zherui², LIU Yong², CHENG Yanan¹, SUN Houli¹, ZHANG Hui²

(1. CRRC Qingdao Sifang Co., Ltd., Qingdao 266111, China; 2. Center for Civil Aviation Composites, Donghua University, Shanghai 201620, China)

Abstract: In order to study the interlaminar mechanical properties of hybrid carbon fiber three-dimensional braided/unidirectional (3D/UD) fabric reinforced epoxy resin composites, hybrid composite laminates were prepared by vacuum assisted resin transfer molding (VARTM) molding process. The effects of different hybrid ratios, laying angle and layering sequences on the static and dynamic mechanical properties of hybrid carbon fiber reinforced plastic were studied. The results show that the addition of unidirectional carbon fiber significantly improves the interlayer static mechanical properties of the hybrid composites, and the interlayer shear properties increase with the increase of the dispersion of the fabric. With the increase of UD fabric lay-up ratio, the bending property and energy storage modulus of hybrid composites first increase and then decrease, while the compression property decreases continuously. The layering angle of unidirectional carbon fiber also has a great influence on the mechanical properties of hybrid composites. The static and dynamic mechanical properties of 0° unidirectional carbon fiber hybrid composites are better than those of 30° unidirectional carbon fiber hybrid composites. Under the same hybrid ratio, different layering sequences also have a great influence on the mechanical properties of hybrid composites. The sandwich structure U₀/3D/U₀ (0°) has the highest bending strength and bending modulus, which are 1 210 MPa and 117 GPa, respectively. In addition, the failure of three-dimensional braided layer of hybrid composites is mainly caused by the interface failure between fiber and resin, while the failure of unidirectional layer is mainly caused by fiber fracture and lamination.

Keywords: three dimensional braiding ; interlayer hybrid ; composite ; mechanical property

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFB3709603-01), 企业合作项目(SF/GY-梁字-2021-092)

通信作者: 孙琳, 博士, 正高级工程师, 硕士生导师, 研究方向为轨道交通轻量化与功能材料

收稿日期: 2023-11-26

引用格式: 陈燕荣, 孙琳, 王晓明, 等. 碳纤维增强环氧树脂三维编织/单向织物混杂复合材料力学性能[J]. 工程塑料应用, 2024, 52(4): 17-22.

CHEN Yanrong, SUN Lin, WANG Xiaoming, et al. Mechanical properties of carbon fiber reinforced epoxy resin three-dimensional braided/unidirectional fabric hybrid composites[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(4): 17-22.

近年来,碳纤维增强聚合物基复合材料(CFRP)凭借其高比强度、高比模量、良好的耐疲劳性能以及可设计性强等优点被广泛应用于航空、航天和轨道交通等领域^[1]。目前,CFRP多以层合板材的形式应用,层内的碳纤维沿面内方向排布,层间主要由树脂基体连接^[2]。由于树脂基体的性能远低于层内的碳纤维,CFRP往往具有较低的层间性能,成为限制其应用的主要因素。三维(3D)编织碳纤维复合材料具有抗分层能力强和结构整体性优异等优势,近几年得到快速发展。然而,由于3D编织织物的纤维取向更均匀,导致复合材料面内力学性能低于相同体积分数下单向复合材料的力学性能,无法满足某些特定领域的工程需要。对此,有研究者在编织过程中引入轴向纱线,通过提高轴向方向纤维含量来增强复合材料的承载作用^[3-8]。但此种方式会使预成型体的织造成本上升、生产效率下降,且对复合材料轴向力学性能提升幅度有限。因此,研究如何提高碳纤维3D编织复合材料的轴向力学性能,并保持3D编织结构整体的力学性能优势对CFRP的应用具有非常重要的意义。

研究发现,混杂复合材料能结合各组分纤维的性能优势,通过合理的设计,可以实现混杂组分的强度、刚度和韧性的协同效应,产生积极的混杂效应^[9-10]。目前,对不同种类纤维混杂复合材料的研究已被大量报道^[11-13],而对同种纤维、不同织物形态混杂形式的研究较少。此外,采用同种纤维的不同织物结构进行混杂铺层,还能降低各织物因不同渗透率对复合材料灌注成型过程的影响,使混杂复合材料的成品率上升。程小全等^[14]将碳纤维单向(UD)织物与平纹织物进行混杂铺层,发现混杂复合材料较好地结合了碳纤维UD织物和平纹织物的优点,使其复合材料具有较高的单钉连接强度和剩余压缩强度。Sapozhnikov等^[15]在全碳纤维3D铺层的层压板中,将高模量碳纤维织物与低模量碳纤维织物进行层间混杂,实现了混杂复合材料从脆性断裂向渐进失效的转变,产生了良好混杂效应,提升了复合材料的力学性能。Liu等^[16]比较碳纤维UD/二维编织混杂复合材料层合板和等效铺层的碳纤维UD织物增强复合材料层合板对低速冲击的响应,发现混杂碳纤维增强树脂基复合材料具有更好的抗冲击性能,在层合板的顶层和底层使用碳纤维二维编织层可以减少冲击载荷下复合材料的损伤程度。

为了制备兼具优异面内和层间性能的复合材料,笔者采用碳纤维3D编织织物与碳纤维UD织物

进行层间混杂铺层的形式制备混杂复合材料,并对其结构与力学性能进行了研究。

1 实验部分

1.1 主要原材料

碳纤维3D编织预成型体:丝束为T700-12K,织物克重为1 200 g/m²,江苏高路复合材料有限公司;

UD碳纤维织物:丝束为T700-12K,织物克重为200 g/m²,台丽碳纤维(广东)有限责任公司;

环氧树脂:ME306R-A,实验室自制;

固化剂(间苯二胺-乙烯混合物):ME306R-B,实验室自制。

1.2 主要仪器及设备

真空烘箱:NJ303-12,慈溪市峻航电器设备有限公司;

树脂收集装置:RCA-244,江苏世尔特环保设备有限公司;

树脂镶嵌机:MT-1H,特鲁利(苏州)材料科技有限公司;

电子万能试验机:LD23,深圳市兰博三思材料检测有限公司;

动态热分析仪:DMA-1,苏州市美信检测技术有限公司。

1.3 复合材料的制备

3D编织预成型体织物采用352锭环形编织机制备而成。其中,3D编织预成型体是由4排纱锭相互运动交织成3D角联锁结构编织物,编织角为30°,单层厚度为1.33 mm,面密度为1 200 g/m²。碳纤维UD织物的单层厚度为0.22 mm,面密度为200 g/m²,因此6层UD织物与1层3D织物具有相近的厚度和纤维体积分数。选用碳纤维3D编织织物与UD织物进行混杂铺层,通过改变各混杂织物铺层的比例、铺层顺序以及UD织物铺层角度来改变其混杂比和铺层结构,铺层方案见表1。其中,如试件3D/U₀/3D(±30°)表示结构为2层3D织物层分别铺设在上下表面,中间夹杂6层纤维角度为±30°交叉铺设UD织物的标准试件。

3D/UD混杂复合材料层合板制备流程如图1所示。采用真空辅助树脂传递模塑(VARTM)工艺制备混杂层合板,基体树脂为环氧树脂ME306R,为双组分环氧树脂。树脂与固化剂的比例为1:1,固化工艺为95℃,1 h+135℃,3 h。

1.4 复合材料的测试与表征

通过电子万能试验机按ASTM D7264-2015测试3D/UD混杂复合材料的弯曲性能,弯曲强度测试

表1 3D/UD 混杂复合材料铺层方案

Tab. 1 Layer scheme of 3D/UD hybrid composites

Sample	3D/UD hybrid ratio	Layer sequence	Fiber volume fraction/%
3D ₃		[3D] ₃	53.4
3D/U ₆ /3D(0°)	2:1	[3D/0 ₆ /3D]	54.2
3D/U ₆ /3D(±30°)		[3D/30 ₆ /3D]	54.0
U ₂ /3D/U ₂ /3D/U ₂ (0°)	2:1	[0 ₂ /3D/0 ₂ /3D/0 ₂]	54.2
U ₂ /3D/U ₂ /3D/U ₂ (±30°)		[30 ₂ /3D/30 ₂ /3D/30 ₂]	54.0
U ₆ /3D/U ₆ (0°)	1:2	[0 ₆ /3D/0 ₆]	54.9
U ₆ /3D/U ₆ (±30°)		[30 ₆ /3D/30 ₆]	54.8
3D/U ₁₂ (0°)	1:2	[3D/0 ₁₂]	54.9
3D/U ₁₂ (±30°)		[3D/30 ₁₂]	54.8
UD ₁₈ (0°)		[0] ₁₈	55.7
UD ₁₈ (±30°)		[30] ₁₈	55.5

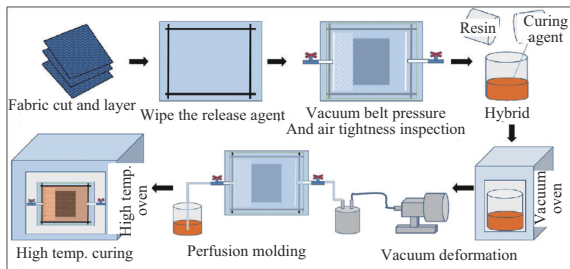


图1 3D/UD 混杂复合材料层合板制备流程示意图
Fig. 1 Preparation process diagram of 3D/UD hybrid composite laminates

速度为 1.0 mm/min;按 ASTM D2344-2016 测试其层间剪切性能;按 ASTM D7136/D7136M-2015 测试其冲击性能;按 ASTM D7137-2017 测试其冲击后压缩性能,冲击能量为 26.7 J,冲击后压缩测试的加载速率为 1.25 mm/min。按 GB/T 40396-2021 测试其动态热机械性能,温度测试范围为 0~180°C,升温速率为 5 °C/min。

2 结果与讨论

2.1 碳纤维 3D/UD 混杂复合材料静态力学性能

2.1.1 弯曲性能

复合材料在弯曲作用下,以中性轴为界限,界限以下的部分承受拉应力,界限以上的部分承受压应力,因此弯曲性能是结合拉伸和压缩的面内综合性能指标。研究表明,中性轴面上下两侧结构的刚度和延伸率对复合材料的弯曲性能影响较大,因此研究铺层顺序、铺层角度以及混杂比对 3D/UD 混杂复合材料弯曲性能的影响。

图 2 为 3D/UD 混杂复合材料的弯曲载荷-挠度曲线图。从图 2a 可以看出,0° UD 层混杂复合材料在弯曲作用下随着混杂比和铺层顺序的不同呈现出不同弯曲效应。当 3D/UD 混杂比为 2:1 时,混

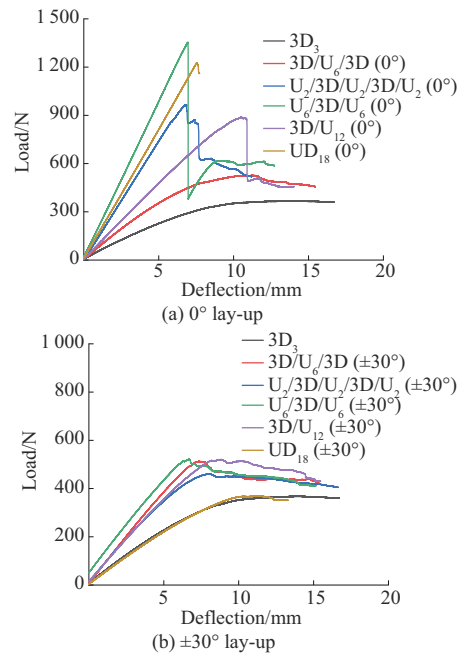


图 2 不同 3D/UD 结构混杂叠层复合材料的弯曲载荷-挠度曲线
Fig. 2 Flexural load curves of hybrid laminated composites with different 3D/UD structures

复合材料总体上表现出较好的韧性,而当 3D/UD 混杂比为 1:2 时,可以明显看出混杂复合材料表现出 UD 复合材料常见的脆性。和 0° UD 层混杂复合材料结果不同,30° UD 层混杂复合材料对弯曲应力的响应差异较小,均表现出较好的韧性,如图 2b 所示。

图 3 为 3D/UD 混杂复合材料弯曲性能的测试结果。从图 3 可以看出,随着 UD 织物铺层比例的上升,弯曲失效逐渐由韧性破坏转变为脆性破坏,混杂复合材料的弯曲强度和弯曲弹性模量呈现出先增大后减小的趋势,表现出正混杂效应。其中,U₆/3D/U₆(0°)试样的弯曲强度和弯曲弹性模量最高,分别为 1 210 MPa 和 117 GPa,比相同混杂比下的 3D/U₁₂(0°)试样的弯曲强度和弯曲弹性模量分别高出

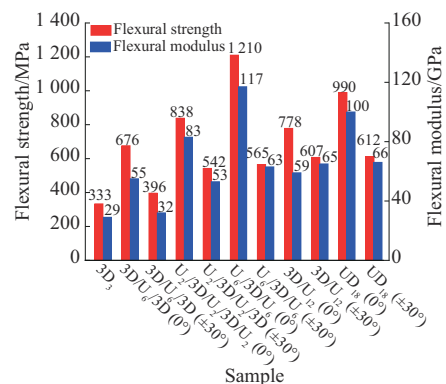


图 3 不同 3D/UD 结构混杂叠层复合材料的弯曲性能
Fig. 3 Flexural properties of hybrid laminated composites with different 3D/UD structures

了55.5%和98.3%。表明同混杂比下,对称夹心结构的混杂复合材料弯曲性能优于非对称结构。这可能是因为该夹芯结构的3D编织层处于中间夹心层,具有低模量和高延伸率的特性,而 0° UD层为远离中性轴面的外层,受载时上下两刚度较大的外层分别产生压应力和拉应力,夹心编织层能起到分散剪切载荷的作用。3D/UD混杂比为2:1的 $U_2/3D/U_2/3D/U_2$ 试样可看作由两个 $U_6/3D/U_6$ 夹芯层构成,因此其弯曲强度和弯曲弹性模量比3D/ $U_6/3D$ 试样高。

2.1.2 层间剪切性能

不同3D/UD结构混杂叠层复合材料层间剪切强度如图4所示。从图4可以看出,对于 $\pm 30^\circ$ 的全UD铺层结构而言,3D编织的加入使结构混杂复合材料的层间剪切强度增高,这与3D编织使纤维层与树脂间的界面数量降低有关。同时,3D编织的抗分层能力也对提高层间剪切强度起到一定作用。当混杂结构的UD铺层角度为 $\pm 30^\circ$ 时,与全UD铺层

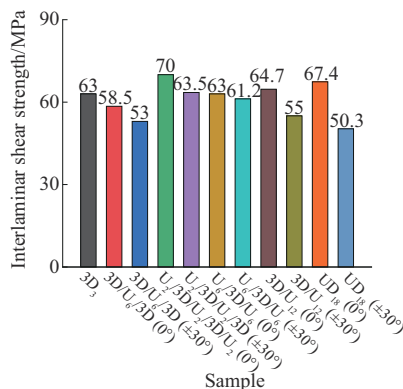


图4 不同3D/UD结构混杂叠层复合材料的层间剪切强度

Fig. 4 Interlaminar shear strength of hybrid laminated composites with different 3D/UD structures

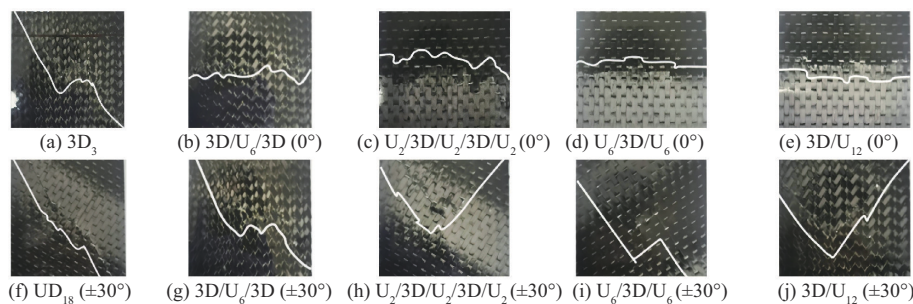


图5 不同3D/UD结构混杂叠层复合材料的冲击后压缩典型表现形貌破坏图

Fig. 5 Typical apparent morphology damage maps of post-impact compression of hybrid laminated composites with different 3D/UD structures

图6为不同混杂比和结构的3D/UD结构混杂叠层复合材料CAI载荷-位移曲线。由图6可以看出,3D编织的引入能明显改善UD复合材料的冲击性能,随着3D编织/UD的混杂比越高,混杂复合材料的极限冲击载荷越高。 0° UD和 30° UD混杂复合

结构相比,3D₃,3D/ $U_6/3D$, $U_2/3D/U_2/3D/U_2$, $U_6/3D/U_6$,3D/ U_{12} 的层间剪切强度分别上升了25.2%,5.3%,26.2%,21.6%,9.3%,表现出正混杂效应。

对于 0° UD的混杂复合材料而言, 0° UD碳纤维的引入使结构混杂叠层CFRP的层间剪切强度变化明显, $U_2/3D/U_2/3D/U_2$ 结构的层间剪切强度最高,为70 MPa,比同种混杂比的3D/ $U_6/3D$ 结构的层间剪切强度高19.6%,说明 0° UD纤维的进一步分散铺层会使复合材料层间剪切强度增大;各混杂结构中,UD铺层角度为 0° 的CFRP的层间剪切强度均高于同结构下的UD铺层角度为 $\pm 30^\circ$ 的CFRP。

2.2 碳纤维3D/UD混杂复合材料动态力学性能

2.2.1 冲击后压缩性能

在实际工程应用中,通常以低速冲击后的剩余压缩强度(CAI)作为复合材料损伤容限设计中的参照值。不同结构混杂叠层复合材料CAI测试后的表面破坏形貌照片如图5所示,通过观察其破坏形式、位置及区域发现,不同比例和不同叠层结构混杂复合材料的破坏均不同。从图5b~图5e可以看出,随着 0° UD碳纤维的加入,混杂复合材料主要在冲击损伤区域的中央位置发生横向破坏;图5a以及图5f~图5j分别为 30° 编织角的3D编织叠层结构和全 $\pm 30^\circ$ UD铺层或混杂结构,由于其冲击载荷破坏了复合材料内表面,使得原损伤区纤维发生弯折并导致刚度下降不均,在受到压缩载荷时,层合板损伤区刚度严重不对称,裂纹均沿着丝束编织或铺层的方向延伸,并在冲击损伤区域转折,伴随有一定凸起的现象。

材料的规律相同,而 30° UD混杂复合材料的整体性能低于 0° UD混杂复合材料性能。

图7为不同混杂比和结构的3D/UD结构混杂叠层复合材料CAI强度柱状图。从图7可以看出,当铺层角度与编织角一致时,全3D编织叠层复合材

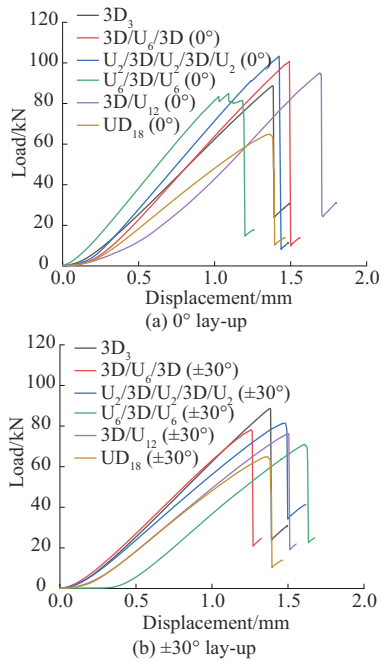


图6 不同3D/UD结构混杂叠层复合材料CAI载荷-位移曲线
Fig. 6 CAI load-displacement curves of hybrid laminated composites with different 3D/UD structures

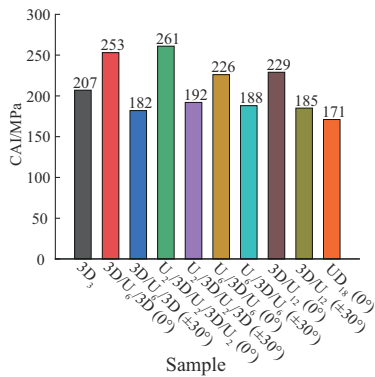


图7 不同3D/UD结构混杂叠层复合材料CAI强度
Fig. 7 CAI strength of hybrid laminated composites with different 3D/UD structures

料的CAI最高,为207 MPa,这是因为3D编织结构具有较高的损伤容限。在结构中引入0° UD碳纤维后,相比于纯3D₃结构,3D/U₆/3D, U₂/3D/U₂/3D/U₂, U₆/3D/U₆和3D/U₁₂的CAI强度各自增加了22.2%, 26.1%, 9.1%, 10.6%;随着3D编织层在混杂比中的减少,混杂比为2:1的结构混杂叠层CFRP比混杂比为1:2的平均CAI值高13%,且同混杂比下的不同结构的CAI强度差异较小,这都充分说明了在铺层结构中加入容限损伤较高的3D编织复合材料能提高复合材料的抗冲击性能。

2.2.2 动态热机械性能

通过动态热机械分析3D/UD结构混杂叠层复合材料的弹性刚度和能量耗散对低应变周期变形

的响应,复合材料试样储能模量与损耗因子 $\tan\delta$ 在1 Hz的弯曲振动模式下与温度的关系曲线如图8所示。通常来说,复合材料的储能模量受纤维取向的影响较大, $\tan\delta$ 受界面结合、频率等因素的影响较大。图8a和图8b为储能模量随温度的变化趋势,图8c和图8d为 $\tan\delta$ 随温度的变化趋势。由图8a和图8b可知,在常温下随着结构混杂叠层复合材料中的UD纤维比例的增加,主方向上起承载作用的纤维增加,起承载作用的树脂含量减少,造成储能模量上升。各混杂结构中,夹心混杂U₆/3D/U₆的储能模量均最高,显示出与弯曲性能相似的规律。由于复合材料的界面结合与内耗角峰面积成反比,由图8c

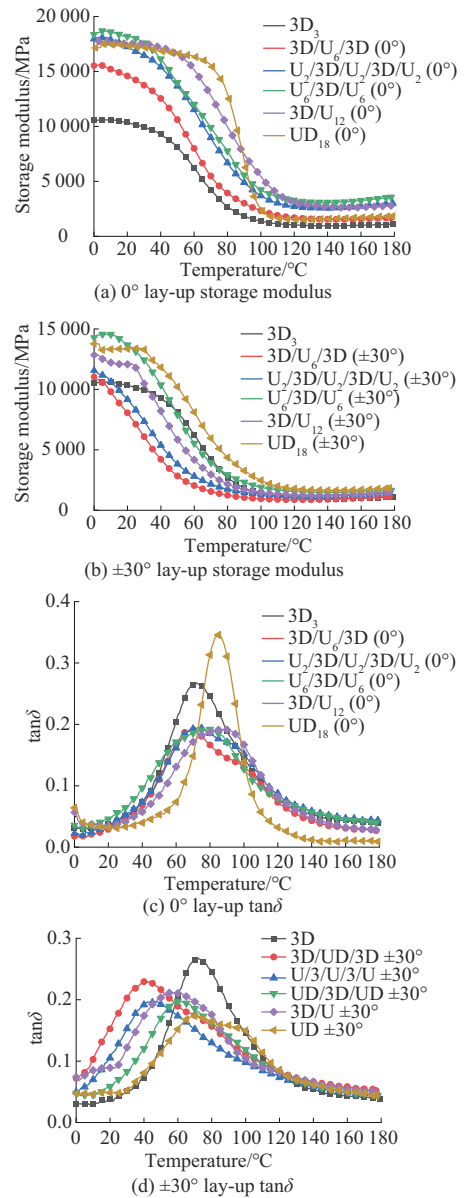


图8 不同混杂结构复合材料动态热机械性能
Fig. 8 Dynamic thermo-mechanical properties of composites with different hybrid structures

和图 8d 可知,在玻璃转变温度下各混杂结构相比纯 3D 编织结构的 $\tan\delta$ 值较低,说明在 3D 编织中加入单向碳纤维能在界面处发生优异的协同效应。

3 结论

(1)3D/UD 混杂复合材料的弯曲强度和弯曲弹性模量随着 3D/UD 混杂比和铺层结构的改变有较大变化。当 UD 铺层角度为 0° 时, $U_0/3D/U_0$ (0°) 夹芯结构的弯曲强度最高,为 1 210 MPa,弯曲弹性模量为 117 MPa,说明 3D 编织层铺层在中性轴附近能起到分散剪应力的作用,能很好地提高结构混杂复合材料的弯曲性能。

(2)混杂复合材料的层间剪切强度随着 0° UD 纤维铺层分散性增大而增大,单向铺层角度为 0° 的 CFRP 的剪切强度均高于同结构下的单向铺层角度为 $\pm 30^\circ$ 的混杂复合材料。

(3)混杂复合材料中 3D 编织层的失效以丝束与树脂的界面破坏为主,而单向层的失效以纤维断裂和分层破坏为主。

(4)在 3D 编织结构中加入按一定混杂比和铺层结构 0° 单向织物能大幅增加复合材料的静、动态力学性能,产生较好的混杂效应。其中,夹心混杂结构的 $U_0/3D/U_0$ (0°) 具有良好的力学性能:弯曲强度为 1210 MPa,层间剪切强度为 63 MPa,冲击后压缩强度为 226 MPa。

参考文献

- [1] 蔡富刚,王硕,郭福海,等.高性能复合材料在轨道交通领域的发展现状[J].高科技纤维与应用,2020,45(2):22-29.
CAI Fugang, WANG Shuo, GUO Fuhai, et al. Current status of high performance composite materials in the field of mass transit [J]. Hi-Tech Fiber and Application, 2020, 45(2):22-29.
- [2] 李政宁,陈革,FRANK Ko. 三维编织工艺及机械的研究现状与趋势[J].玻璃钢/复合材料,2018(5):109-115.
LI Zhengning, CHEN Ge, FRANK Ko. The development and tendency of 3D braiding technology and machinery[J]. Fiber Reinforced Plastic/Composites, 2018(5):109-115.
- [3] 李翠敏,阎建华,刘丽芳,等.三维编织碳纤维复合材料剪切性能研究[J].纤维复合材料,2014,31(2):45-49,44.
LI Cuimin, YAN Jianhua, LIU Lifang, et al. Shearing properties of 3D braided carbon fiber composites[J]. Fiber Composites, 2014, 31(2):45-49,44.
- [4] 熊信发,王校培,王坤,等.三维编织复合材料圆管轴向压缩性能及破坏机理[J].南京航空航天大学学报,2023,55(4):702-710.
XIONG Xinfu, WANG Xiaopei, WANG Kun, et al. Axial compressive properties and failure mechanism of 3D braided composite tube [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2023, 55(4):702-710.
- [5] DAI S, CUNNINGHAM P R, MARSHALL S, et al. Influence of fibre architecture on the tensile, compressive and flexural behaviour of 3D woven composites[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2015, 69:195-207.
- [6] ZUO H M, LI D S, JIANG L. Experimental study on compressive fatigue behavior and failure mechanism of 3D five-directional braided composites[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2020, 139. DOI: 10.1016/j.compositesa.2020.106097.
- [7] AI J, DU X B, LI D S, et al. Parametric study on longitudinal and out-of-plane compressive properties, progressive damage and failure of 3D five-directional braided composites[J]. Composites Part A: Applied science and manufacturing, 2022, 156. DOI: 10.1016/j.compositesa.2022.106840.
- [8] 孙梦尧,张典堂,钱坤.三维五向编织复合材料低速冲击损伤区域的量化表征[J].复合材料学报,2023,40(9):5 411-5 422.
SUN Mengyao, ZHANG Diantang, QIAN Kun. Quantitative characterization of low-velocity impact damage in three dimensional five-directional braided composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(9):5 411-5 422.
- [9] MAROM G, FISCHER S, TULER F R, et al. Hybrid effects in composites: Conditions for positive or negative effects versus rule-of-mixtures behaviour[J]. Journal of Materials Science, 1978, 13(7): 1 419-1 426.
- [10] ZUO P, SRINIVASAN D V, VASSILOPOULOS A P. Review of hybrid composites fatigue[J]. Composite Structures, 2021, 274:11-43,58.
- [11] WAN Y Z, WANG Y L, HE F, et al. Mechanical performance of hybrid bismaleimide composites reinforced with three-dimensional braided carbon and Kevlar fabrics[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2007, 38(2):495-504.
- [12] BUKHARI S M, KANDASAMY J, MANZOOR HUSSAIN M. Investigations on drilling process parameters of hybrid composites with different stacking sequence[J]. Materials Today: Proceedings, 2017, 4(2):2 184-2 193.
- [13] SUBADRA S P, GRISKEVICIUS P, YOUSEF S. Low velocity impact and pseudo-ductile behaviour of carbon/glass/epoxy and carbon/glass/PMMA hybrid composite laminates for aircraft application at service temperature[J]. Polymer Testing, 2020, 89. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2020.106711.
- [14] 程小全,杨琨,汪源龙,等.平面编织混杂铺层层合板单钉连接拉伸性能[J].力学学报,2010,42(5):901-908.
CHENG Xiaoquan, YANG Kun, WANG Yuanlong, et al. Study on tension properties of hybrid-laminated plain woven fabric composite with single bolt joint[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2010, 42(5):901-908.
- [15] SAPOZHNIKOV S B, SWOLFS Y, LOMOV S V. Pseudo-ductile unidirectional high modulus/high strength carbon fibre hybrids using conventional ply thickness prepregs[J]. Composites Part B: Engineering, 2020, 198:108-213.
- [16] LIU H, FALZON B G, TAN W. Experimental and numerical studies on the impact response of damage-tolerant hybrid unidirectional/woven carbon-fibre reinforced composite laminates[J]. Composites Part B: Engineering, 2018, 136:101-118.
- [17] 武海鹏.复合材料阻尼性能的测试与分析[J].纤维复合材料, 2015, 32(1):26-30.
WU Haipeng. Damping test and analysis of fibre composites[J]. Fiber Composites, 2015, 32(1):26-30.