2.5D 交织铺层结构复合材料抗低速冲击性能研究

张 吴^{1,2} 孙宏杰¹ 张建宝^{1,2} 刘永位^{1,2} 赵忠祥^{1,2} (1 航天材料及工艺研究所,北京 100076) (2 功能性碳纤维复合材料国家工程研究中心,北京 100076)

文 摘 为探究 2.5D 交织铺层结构复合材料的抗低速冲击性能,制备了 2.5D 交织铺层结构试样、常规 交织铺层结构试样及相同铺层层合试样,通过落锤试验及冲击后压缩探究了两种交织铺层复合材料结构及层 合结构复合材料低速冲击损伤下的性能表现。结果表明:落锤冲击下,2.5D 交织铺层结构相较于层合结构其 表面冲击变形面积缩小了 73.79%,内部损伤投影区域缩小了 21.66%,冲击后压缩强度提升了 10.53%,表现 出优异的抵抗低速冲击变形及损伤的能力。

关键词 交织铺层结构,2.5D 交织,表面冲击变形,内部损伤投影,低速冲击,冲击后压缩 中图分类号:TB332 DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2025.03.007

2. 5D Interleaved Laminated Composite for Low-speed Impact Resistance

ZHANG Hao^{1,2} SUN Hongjie¹ ZHANG Jianbao^{1,2} LIU Yongjiao^{1,2} ZHAO Zhongxiang^{1,2} (1 Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076)

 $(2\quad National \ Engineering \ Research \ Center \ for \ Functional \ Carbon \ Fiber \ Composites \ , Beijing \quad 100076 \)$

Abstract In order to explore the low-velocity impact resistance of 2. 5D interleaved laminated structure composites, 2. 5D interleaved laminated structure test panels, conventional interleaved laminated structure test panels and same laminate laminate test panels were prepared. The performance of two interleaved laminated composite structures and laminated composites under low-velocity impact damage was investigated by drop weight test and post-impact compression. The results show that under the impact of the falling weight, compared with the laminated structure, the surface impact deformation area of the 2. 5D interleaved laminated structure is reduced by 73. 79%, the internal damage projection area is reduced by 21. 66%, and the compressive strength after impact is increased by 10. 53%. The 2. 5D interleaved laminated structure exhibits excellent resistance to low-speed impact deformation and damage.

Key words Interleaved laminate, 2. 5D interleaved, Surface impact deformation, Internal damage projection, Low-speed impact, Compression after impact

0 引言

交织铺层结构是一种基于自动铺放工艺 (Automated Fibre Placement, AFP)的先进复合材料 铺层结构,通过预浸丝束间隔交织铺放构建复合材 料层间的交织状态。对比二维三轴编织结构和三维 编织/机织结构,交织铺层结构具备制造成本低、工艺 可靠性高、制造周期可控等优势,在航空航天、交通 运输等领域具有广阔的应用前景。

NAGELSMIT 最早于 2010 年提出 AP-PLY (Advanced Placed Ply)的概念^[1],并对其冲击后压缩 强度(Compression After Impact, CAI)及其他力学性 能展开了表征与分析^[2]。ZHENG 等人^[3]提出了一种

适用于弯剪载荷下 AP-PLY 结构分层扩展的预测模型。RUTGER 等人^[4]对比了单轴拉伸状态下交织铺 层结构层合板与常规层合板力学响应的差异,并构 建了计算成本相对较小的 AP-PLY 有限元预测模型。 国内方面,航天材料及工艺研究所、西北工业大学等 研究机构对交织铺层结构展开了一系列研究,张建 宝等人^[5]提出了一种基于纤维架构主导的复合材料 纤维层合增韧结构及方法,通过逐级穿插交织构建 纤维丝束交织单元,实现跨铺层界面的强耦合载荷 传递,孙文文等人^[6]制备了不同的交织铺层结构复合 材料板,并对其常规力学性能进行了探究。曹俊超 等人^[7]开展了自动铺放混杂纤维增强环氧树脂复合

收稿日期:2023-01-04

第一作者简介:张昊,1998年出生,硕士研究生,主要从事树脂基结构复合材料的研制工作。E-mail:zhang_hao_0912@163.com

材料层合板高速冲击损伤机理和失效模式的研究。

交织铺层结构通过构建面内纤维交织架构以提 高其抗冲击性能,然而,对于多循环交织铺层结构复 合材料而言,其铺层循环相邻面仍表现为层合面,在 复合材料发生破坏时,铺层循环相邻面相较于铺层 循环内交织面更易发生破坏,带来复合材料力学性 能的降低。针对交织铺层结构特点与工艺特性,发 展出一种交织铺层的变式结构—2.5D交织铺层结 构^[8],其通过调整铺层循环相邻面附近的铺层顺序, 使得交织铺层结构铺层循环之间相互交织,杜绝了 复合材料内部层合面的存在,使复合材料整体表现 出2.5D交织状态。然而,目前并没有针对2.5D交织 铺层结构复合材料抗冲击性能的系统研究,铺层结 构上的改变对复合材料性能的影响和影响机理尚不 明确,仍需进一步地研究与分析。 本文采用自动铺放-热压罐固化成型工艺制备 2.5D交织铺层结构试验板、常规交织铺层结构试验 板及相同铺层顺序层合结构试验板,并对制备的3种 复合材料试验板进行落锤低速冲击及冲击后压缩实 验,通过激光扫描成像及超声C扫描成像表征低速 冲击下复合材料板的表面形貌变形及内部损伤状 态,探讨失效机理,分析2.5D交织结构复合材料剩 余压缩强度与力学响应的变化。

1 实验

1.1 原材料

采用国产TG800碳纤维/603B热熔法预浸料,预 浸料面密度(165±5)g/m²,树脂含量34%±3%,单层预 浸料厚度0.16 mm。TG800碳纤维/603B复合材料单 向板力学性能见表1。

表1 TG800/603B 复合材料单向板典型力学性能 Tab.1 Typical mechanical properties of TG800/603B composite

0°拉伸		0°压缩		0°弯曲		0°层间剪切	纤维
强度/MPa	模量/GPa	强度/MPa	模量/GPa	强度/MPa	模量/GPa	/MPa	/%(体积分数)
2 775	165	1 410	159	1 760	135	106	61

1.2 试验板制备

采用预浸料分切装置将TG800/603B 预浸料裁 切为宽度(6.35±0.15)mm的预浸丝束,经自动铺丝 成型系统铺放、热压罐固化,制备交织铺层结构复合 材料试验板。

1.2.1 常规交织铺层结构试验板

根据交织铺层结构的铺放规则,铺放过程中每 个完整铺层被拆分成A、B两个子铺层,其中A铺层 的铺放方式为预留一定间隔铺放预浸丝束(本实验 间隔距离为一个预浸丝束带宽6.35 mm),B铺层则 补齐A铺层预留的间隔区域,A、B两子铺层共同构成 一个完整铺层。在一个铺层循环内,先铺放各角度A 铺层,之后依次铺放各角度B铺层,从而形成一个完 整的交织铺层循环。如铺层顺序为[45°/0°/-45°/ 90°],则在交织铺层结构铺放过程中具体铺层顺序 应拆分为[45°A/0°A/-45°A/90°A/45°B/0°B/-45°B/90° B],如图1所示。



Fig. 1 The forming process of the conventional interwoven layup structure

常规交织铺层结构试验板原材料为TG800碳纤 维/603B预浸丝,整体铺层顺序[45°/0°/-45°/90°]_{4*}。 采用单丝束(丝束宽度6.35 mm)铺放的形式完成交 织铺层结构试验板的铺放。

1.2.2 2.5D 交织铺层结构试验板

2.5D 交织铺层结构试验板的整体铺层顺序为 [45°/0°/-45°/90°],,同时考虑构建2.5D交织状态, 通过调换每个铺层循环最后一个子铺层与下一铺层 循环第一个子铺层的铺放顺序以构建铺层循环间的 交织状态,如为了消除第1个铺层循环与第2个铺层 循环之间的层合面,需互换第1个铺层循环内最后一 个子铺层90°B与第2个铺层循环内第一个子铺层 45°A的铺放顺序,构建1、2铺层循环之间交织状态, 依次类推,使复合材料内部每个铺层循环之间彼此 交织。由铺层顺序可知,2.5D 交织铺层结构试验板 共存在8个铺层循环且铺层沿中心对称,第4、5个铺 层循环的铺层顺序同样沿中心对称,为消除中心对 称对2.5D交织造成的影响,消除中心层合面,需要 调整交织方案,调整第4个循环中90°B铺层与第5个 铺层循环中0°B铺层的铺放顺序,构建4、5铺层循环 间的交织状态,从而实现复合材料的整体2.5D交 织。

1.2.3 层合结构试验板

为减小成型方法对复合材料性能带来的影响, 采用自动铺放工艺构建层合结构复合材料试验板, 通过全丝束无间隔的铺放形式,按照[45°/0°/-45°/ 90°]₄的铺放顺序制备得到层合结构复合材料试 验板。

1.3 试验方法

根据 GB/T 21239—2007《纤维增强塑料层合板 冲击后压缩性能试验方法》制备试样,尺寸为150 mm×100 mm×δ(δ为试验板厚度),2.5D交织铺层结 构复合材料试样(简称2.5D交织铺层结构)、常规交 织铺层结构复合材料试样(简称常规交织铺层结 构)、层合结构复合材料试样(简称常规交织铺层结 构)、层合结构复合材料试样(简称层合结构)各 10块。 根据GB/T 21239—2007,依次对3种试样进行落 锤冲击后压缩试验,落锤冲击能量按照6.67 J/mm 标定。

1.4 性能表征

(1)落锤冲击试验前,采用扫描电子显微镜表征 试样微观结构。

(2)落锤冲击试验后,激光扫描表征试样在低速 冲击下的表面冲击变形区域面积。

(3) 落锤冲击试验后, 超声C扫描成像表征试样 内部损伤情况。

(4)冲击后压缩试验至发生破坏,记录试样破坏 模式、试样剩余压缩强度。

2 结果与讨论

2.1 试验前试样微观结构

2.5D 交织铺层结构复合材料试样的微观形貌如 图 2(a) 所示, 常规交织铺层结构复合材料试样的微 观形貌如图2(b)所示,层合结构复合材料试样的微 观形貌如图2(c)所示。比较而言,2.5D交织铺层结 构复合材料试样的纤维表现出更高的卷曲程度,但 纤维卷曲的规律性不突出,这是因为在铺层循环相 邻面附近变更了不同角度纤维层的铺放顺序,使得 厚度方向上纤维铺放的规律被打乱;同时,铺放顺序 的改变使得2.5D交织铺层结构内部纤维卷曲具有 更高的穿插层级。在纤维的铺放过程中,穿插层级 的提高意味着局部"架桥"现象影响的增大。当纤维 铺放至具有高度差的交织节点处时,压辊的压力与 常温下预浸丝束的黏度不足以促使预浸丝束完全贴 合节点表面,纤维丝束在阶梯处被拉直构成一块未 贴合区域,从而形成局部"架桥"现象,局部"架桥"现 象使得交织节点区域相对高度逐渐增大,与铺放平 面形成明显高低差,从而放大了预浸丝束铺放过程 中的卷曲程度。本实验采用单丝束四向交织的形 式,交织方向多,丝束宽度窄,"架桥"现象较为明显。 局部"架桥"现象的存在直接影响了铺放过程中纤维 的直线度,增加了交织铺层结构的空间结构复杂 程度。



(a) 2.5D交织铺层结构





(c) 层合结构

图 2 3 种铺层结构微观形貌图 Fig. 2 Microscopic topography of three layup structures

(h)

常规交织铺层结构

2.2 试样抗低速冲击性能

2.2.1 表面冲击变形

复合材料试样经低速冲击试验后,其表面冲击变 形区域见图3,表面变形区域面积如表2所示。2.5D试 样表面变形区域面积的平均值为14.67 mm²,常规交织 铺层结构复合材料试样表面变形区域面积的平均值为 21.42 mm²,层合结构复合材料试样表面变形区域面积 的平均值为61.28 mm²。相较于层合结构,2.5D交织 铺层结构的表面变形区域缩小了73.79%。



层合结构

图3 复合材料试样典型冲击后表面激光扫描图

Fig. 3 Laser scanning images of the typical surface of composite material specimens after impact

Tab. 2 The area of the impact deformation zone on					
	the sample surface mm ²				
试样	2.5D交织铺层结构	常规交织铺层结构	层合结构		
1#	13.3	20.4	53.5		
2#	11.6	22.4	46.8		
3#	13.2	24.1	-		
4#	18.2	21.8	42.0		
5#	12.6	23.9	69.5		
6#	18.3	19.4	41.7		
7#	12.8	18.0	99.7		
8#	14.4	24.6	66.9		
9#	15.3	18.4	78.8		
10#	17.0	21.2	52.6		
亚均值	14 67	21 42	61.28		

表2 试样表面冲击变形区域面积

在落锤实验中,表面冲击变形面积2.5D 交织铺 层结构(14.67 mm²)以及常规交织铺层结构(21.42 mm²)均表现出明显小于层合结构(61.28 mm²),这说 明交织铺层结构交织穿插的空间结构特征在落锤试 验中有效抑制了复合材料的表面冲击变形,表现出 更高的损伤阻抗。同时,由于2.5D 交织铺层结构仅 改变了铺层循环相邻面的铺放顺序,其外表面的铺 - 58 - 层顺序仍保持一致,因此2.5D交织铺层结构与常规 交织铺层结构具有相同的表面特征,在落锤实验中 表现出相似的表面冲击变形特征。由图3可知,在落 锤试验中,相较于层合结构所表现出的较为规则的 圆形冲击损伤变形,两种交织铺层结构试验板的表 面冲击变形区域的形状及面积表现出与该处表面纤 维分布特征一定的相关性。2.5D 交织铺层结构与常 规交织铺层结构的表面损伤区域整体表现为较为规 则的圆形,由于交织铺层结构表面状态不一致,部分 试样表面冲击损伤区域存在不同纤维走向方向的延 展,当落锤落点位置位于纤维走向一致的区域时,冲 击造成的表面损伤区域更加趋向于形成规整的圆 形,冲击变形区域相对较小;当落锤落点位置位于不 一致的区域时,不同走向纤维交界处在冲击下更容 易产生延展变形,从而增大表面冲击变形区域。在 图 3(b)中,冲击落点位于试样最外层的 45°A上,冲 击区域表面状态一致,变形区域呈规则圆形且冲击 变形面积更小,而在图3(a)中,冲击区域同时存在多 个方向的纤维铺层,变形区域沿不同角度纤维铺层 边界方向发生明显延展变形。

宇航材料工艺 http://www.yhclgy.com 2025年 第3期

2.2.2 内部损伤

两种交织铺层结构试验件及层合结构试验件落锤 冲击后的超声C扫描无损检测结果如图4所示,两种交 织铺层结构试验板内部损伤投影区域以冲击点为中心, 整体形状接近规则圆形,部分试样存在沿纤维走向的 延展损伤区域。内部损伤投影面积如表3所示,2.5D 交织铺层结构的内部损伤投影面积平均值为672.1 mm², 常规交织铺层结构的内部损伤投影面积平均值为730.8 mm²。相较于层合结构,2.5D 交织铺层结构的内部损 伤投影区域缩小了21.66%。





Tab. 3	Projected a	rea of internal damage of the specimen
	表3	试样内部损伤投影面积

 mm^2

试样	2.5D交织铺层结构	常规交织铺层结构	层合结构
1#	695	810	888
2#	724	597	897
3#	650	900	982
4#	633	661	976
5#	696	882	921
6#	589	781	800
7#	660	494	853
8#	782	823	905
9#	578	719	848
10#	714	641	946
平均值	672.1	730.8	901.6

在落锤冲击实验中,受到落锤冲击后所表现出的内部损伤面积2.5D交织铺层结构(672.1 mm²)及常规交织铺层结构(730.8 mm²)明显小于层合结构(901.6 mm²),这说明交织铺层结构在低速冲击下具 宇航材料工艺 http://www.yhclgy.com 2025年 第3期 有良好的抵抗分层破坏的能力,当锤头撞击至交织 铺层试样表面时,得益于试样的交织铺层结构特征, 在相同的内部损伤投影面积下,交织铺层结构内部 裂纹扩展的实际路径更长,裂纹产生、扩展需要更多 的能量,整体表现出更优异的吸能效果。

2.3 试样冲击后压缩性能

2.3.1 破坏模式

冲击试验后2.5D 交织铺层结构试样、常规交织 铺层结构试样、层合结构试样进行压缩试验至发生 破坏,试验结果如图5所示。2.5D 交织铺层结构试 样、常规交织铺层结构试样呈横向截断式破坏,绝大 多数铺层发生了纤维断裂破坏与分层破坏,试样表 面由于破坏区域两侧纤维交叉挤压产生表面凸起。 层合结构试样表现出较大的分层破坏,破坏区域有 较大的分层扩展。2.5D 交织铺层结构试样、常规交 织铺层结构试样的破坏区域均集中在冲击损伤区域 外较窄的范围区间内,裂纹纵向扩展趋势不明显,这 表明交织铺层结构具有良好的抑制裂纹扩展的 能力。







压缩破坏现象是多种因素综合作用导致的结果,在冲击后压缩试验中,2.5D交织铺层结构表现为 帚式压缩破坏,如图6(a)所示,得益于2.5D交织铺 层结构的整体交织特征,试样内部纤维主导的层间 耦合在压缩过程中对纤维丝束的空间位置起到约束 作用,2.5D交织铺层结构冲击压缩破坏受到纤维正 向压溃以及斜向纤维剪切的共同作用,靠近破坏区 域的纤维屈曲弯曲引起少量分层破坏,但试样整体 断裂破坏区域集中,纤维之间的相对位移较小,2.5D

— 59 —

交织铺层结构试样破坏区域纤维纵向劈裂长度为 1.4 cm。层合板结构表现为剪切式压缩破坏,如图 6(b)所示,在层合结构试样中,落锤冲击产生的屈曲 区域的纤维层面在压缩载荷的作用下产生相对位 移,从而诱发层面间纤维劈裂的蔓延,该过程中,纤 维主要受到剪切应力集中影响,试样在破坏区域形 成斜向剪切带,层合结构试样破坏区域纤维纵向劈 裂长度为3.2 cm,明显高于2.5D交织铺层结构。由 于常规交织铺层结构内部同时存在交织面与层合 面,常规交织铺层结构的冲击后压缩破坏模式表现 为"帚式"与"斜向剪切式"破坏模式的综合型,常规 交织铺层结构的冲击后压缩破坏以纤维的斜向剪切 破坏为主导,但受到交织铺层结构交织特征的影响, 纤维之间的相对位移较小,分层区域被控制在较小 的范围之内。



2.3.2 剩余压缩强度

3种试样的压缩强度结果见表4。相较于层合结构及常规交织铺层结构,2.5D 交织铺层结构的冲击后压缩强度值明显提高,最高可达362 MPa。相较于常规交织铺层结构提高了7.83%,相较于层合结构提高了10.53%,表现出良好的损伤容限能力。这是因为2.5D 交织铺层结构在相同条件的落锤冲击中产生的损伤最小。跨层面的交织穿插结构有效提高了试样厚度方向的纤维比例,从而带来复合材料面外性能的提升,2.5D 交织铺层结构的纤维卷曲程度高,其抵抗面外冲击损伤的能力强,最终产生的冲击一60 —

损伤小,从而表现出高的冲击后压缩强度。在常规 交织铺层结构中,常规交织铺层的纤维具有小的偏 转角度,但铺层循环之间仍然有层合面的存在,在压 缩载荷作用下,这些层合面的存在避免了部分纤维 失稳后裂纹在层间剪应力的作用下沿厚度方向延展 的趋势,从而表现出与层合结构相似的压缩强度。

	表4 试样剩余压缩强度	
Tab. 4	Compressive strength of the specimen after impac	t
	MF	Pa

试样	2.5D交织铺层结构	常规交织铺层结	层合结构	
1#	326	345	319	
2#	338	303	326	
3#	319	315	319	
4#	362	297	321	
5#	347	264	314	
6#	342	309	326	
7#	323	287	325	
8#	330	339	256	
9#	330	347	258	
10#	343	310	276	
平均值	336	311.6	304	

对比交织铺层结构与层合结构在落锤冲击实验 中的表现,交织铺层结构的引入显著提高了复合材 料试样的抗冲击损伤能力,但冲击后压缩试验结果 显示 2.5D 交织铺层结构试样、常规交织铺层结构试 样压缩强度提升并不明显,这大概是因为交织铺层 结构纤维卷曲特征的引入对其压缩性能的表现产生 了的负面影响。在复合材料压缩的研究中,轴向层 纤维的微屈曲被视为影响复合材料压缩强度表现的 重要影响因素。考虑2.5D交织铺层结构的空间特 征,为构建铺层循环间的交织状态,2.5D 交织铺层结 构相邻铺层循环面附近的纤维具有更高的穿插层 级,从而表现出更大角度的纤维偏转。这种纤维偏 转会在压缩过程中进一步诱发轴向纤维产生微屈 曲,从而导致纤维产生失稳破坏。2.5D交织铺层结 构表现出最优异的抗低速冲击性能,2.5D整体交织 状态的引入在常规交织铺层的基础上进一步提高了 复合材料结构的损伤阻抗特性以及损伤容限特性, 从而进一步提高了其抗低速冲击性能表现。

作为一种结构层面上的优化形式,2.5D 交织铺 层结构通过结构调控避免了铺层循环间层合面的存 在,使得交织铺层结构沿厚度方向由先前的循环内 二维交织堆叠的状态提升至整体层面的2.5D 交织 状态。这种结构形式的改变一方面提高了复合材料 内部纤维丝束的穿插层级,使得纤维丝束具有更高

宇航材料工艺 http://www.yhclgy.com 2025年 第3期

的纤维卷曲状态,另一方面,在2.5D交织铺层结构 的铺放过程中,纤维铺放顺序的改变也使得局部"架 桥"现象更加突出,在一定程度上提高了纤维的卷曲 程度以及复合材料纤维铺放的空间复杂程度,提高 了结构内部厚度方向纤维的比例,使得交织铺层结 构显出更加优异的抗面外冲击性能,表现出良好的 损伤阻抗与损伤容限能力。交织铺层结构通过铺放 顺序的调整,既在常规交织铺层结构中表现出了类 似于二维三轴编织结构的二维面内交织特征,也在 2.5D交织铺层结构中表现出类似于三维编织结构的 整体交织特征,表现出优越的结构可设计性。通过 预浸带宽度、铺层间隔、铺层角度等工艺参数的调 控,交织铺层结构可表现出丰富的空间结构,进而表 现出不同的性能特征,这也为交织铺层结构的进一 步研究提供了广阔的空间。

3 结论

(1)2.5D交织铺层结构及常规交织铺层结构受 到落锤冲击后产生近似圆形的冲击变形区域,变形 区域具体外观受到具体纤维交织状态的影响,相较 于层合结构,2.5D交织铺层结构的表面变形区域缩 小了73.79%,表现出良好的损伤阻抗能力。

(2)2.5D交织铺层结构及常规交织铺层结构受 到落锤冲击后产生的内部损伤投影呈近似圆形,相 较于层合结构,2.5D交织铺层结构的内部损伤投影 区域缩小了21.66%。

(3)2.5D交织铺层结构的冲击后压缩强度值明显提高,相较于常规交织铺层结构提高了7.83%,相较于层合结构提高了10.53%,表现出良好的损伤容限能力。

参考文献

[1] NAGELSMIT M, KASSAPOGLOU C, GURDAL Z. AP-PLY: A new fibre placement architecture for fabric replacement[J]. Sampe Journal, 2011,47(2): 36-45. [2] NAGELSMIT M H. Fibre Placement Architectures for Improved Damage Tolerance[D]. Technische Universiteit Delft: Sieca Repro, 2013.

[3] ZHENG W, KASSAPOGLOU C. Prediction of delamination onset and growth for AP-PLY composite laminates using the finite element method[J]. Composites Part A-Applied Science And Manufacturing, 2017, 101: 381-393.

[4] RUTGER K, MARTINEZ-HERGUETA F, TEIXEIRA-DIAS F. Tensile response of AP-PLY composites: A multiscale experimental and numerical study [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2022, 159: 106989.

[5]张建宝,刘永佼,孙建波,等.一种基于纤维主导的 复合材料纤维层合增韧结构及方法:CN 109703113 A[P], 2019-05-03[2023-03-02].

ZHANG J B, LIU Y J, SUN J B, et al. A fiber-dominated fiber laminated toughening structure and method for composite materials; CN 109703113 A[P]. 2019-05-03[2023-03-02].

[6] 孙文文, 张建宝, 孙宏杰, 等. 一种交织铺层结构层 合板性能[J]. 宇航材料工艺, 2019, 49(3): 61-66.

SUN W W, ZHANG J B, SUN H J, et al. Mechanical properties of composite material with new laminate mode [J]. Aerospace Materials & Technology, 2019,49(3): 61-66.

[7] 曹俊超, 孙建波, 曹勇, 等. 混杂纤维增强环氧树脂 复合材料高速冲击损伤行为[J]. 复合材料学报, 2022, 39 (10):4935-4948.

CAO J C, SUN J B, CAO Y, et al. High-velocity impact damage behavior of hybrid fiber reinforced epoxy composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022,39(10):4935-4948.

[8] 刘永佼,张建宝,孙文文,等.一种复合材料交织结构及其铺层方法:CN 107891631 A[P]. 2018-04-10[2023-03-02].

LIU Y J, ZHANG J B, SUN W W, et al. A kind of composite material interweaving structure and laying method thereof: CN 107891631 A[P]. 2018-04-10[2023-03-02].