纤维混杂铺层对无伞空投箱抗冲击性的影响

史永胜,孙文泽

(中国民航大学 航空工程学院, 天津 300300)

摘要:目的 对无伞空投箱所用的碳纤维、玻璃纤维、芳纶纤维/环氧树脂体系纤维混杂铺层的复合材料 层合板进行研究,以在低成本下提高实现效果。方法 复合材料层合板分为 10 层,采用层间混杂结构, 通过改变混杂比、铺层角度及铺层顺序,设计 148 种铺层方案,利用 ANSYS-APDL 软件分析 3 种参 数变量对层合板拉伸性能及抗弯性能的影响。结果 沿主要受力方向铺设纤维,碳纤维层在外侧、玻璃 纤维层集中在中心,且玻璃纤维层体积分数为 40%时,材料具有最高的性价比。结论 针对混杂纤维复 合材料层合板,通过调整混杂比得出碳/玻璃混杂纤维复合材料性能较好,通过调整铺层角度得出纤维 铺设角度越接近受力方向其性能效果越好,通过调整铺层顺序得出不同混杂比、铺层角度下的最佳性 能结构。

关键词: 混杂纤维复合材料; 无伞空投箱; 层间混杂; 拉伸弹性模量; 抗弯弹性模量 中图分类号: TB484.9 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2023)01-0300-09 DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.01.035

Effects of Fiber Hybrid Layer on Impact Resistance of Airdrop Box without Parachute

SHI Yong-sheng, SUN Wen-ze

(College of Aeronautical Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

ABSTRACT: The work aims to study the composite laminates with carbon fiber, glass fiber, aramid fiber/epoxy resin system fiber hybrid layers used in the airdrop box without parachute to improve the realization effect at low cost. Composite laminates were divided into ten layers with interlaminar hybrid structure. By changing the hybrid ratio, laying angle and laying sequence, 148 laying schemes were designed. The effects of the three kinds of parameter variables on the tensile and bending properties of laminates were analyzed with ANSYS-APDL. The results showed that when the fiber was laid along the main force direction, the carbon fiber layer was on the outside, the glass fiber layer was concentrated in the center, and the volume of the glass fiber layer accounted for 40%, the material had the highest cost performance ratio. For the hybrid fiber composite laminates, it is concluded that the carbon/glass hybrid fiber composite obtained by adjusting the laying angle, it is found that the closer the fiber laying angle is to the force direction, the better the performance effect is. And the best performance structure under different hybrid ratio and laying angle is obtained by adjusting the laying sequence.

KEY WORDS: hybrid fiber composite; airdrop box without parachute; interlaminar hybrid; modulus of elasticity in tension; modulus of elasticity in bending

收稿日期: 2022-09-14

作者简介:史永胜(1965—),男,博士,教授,主要研究方向为结构智能化设计、故障诊断与结构修理、专家系统、知 识表示。

近几年来,空降空投技术因其方便、快捷的特性 得以快速发展和广泛应用。无伞空投是指设备、物资 不系降落伞情况下的空投,具备简易封装、成本低廉、 受冲击强等特性,对材料力学性能要求较高。赵西友 等^[1]应用于缓冲包装的材料为热塑性聚氨酯,以此设 计出的液体盛装袋可在 200 米高度完成液体类物资 的无伞空投。耿小凯等^[2]使用 3 种不同性能的聚乙烯 设计出三层式复合结构的滚塑包装箱,进行无伞空投 的高度可达 200 m。张宇婷等^[3]设计了罐壁材料层为 聚乙烯-发泡-聚乙烯的无伞空投储液罐,可以在液体 类应急物资的无伞空投缓冲包装中应用。在众多无伞 空投类的设计和研究之中,使用复合材料来设计和制 作的比重越来越大。

碳纤维力学性能优良,但具有较低的延伸率、抗冲 击性和断裂韧性^[4];玻璃纤维制备成本低,但相比其 他纤维强度较低^[5];芳纶纤维具有断裂伸长率高、冲 击性能优异等优点,但制备成本高且在潮湿环境中易 老化^[6]。为平衡单纤维复合材料的优点和缺陷,人们基 于高分子材料"共混与改性"的理念提出了混杂纤维复 合材料的概念[7]。该类复合材料由2种或2种以上的纤 维增强同一种基体,从而均衡不同纤维的力学性能,提 高材料的强度、刚度及吸能性能等。由于混杂效应的存 在,通过调节混杂比、铺层角度及铺层顺序,可以扩展 材料的可设计性,达到降低成本或者减量的要求^[8]。王 海雷等[7]从混杂比、混杂方式等因素入手探究了碳/玻璃 混杂纤维复合材料拉伸性能的变化规律。Friedrich 等^[9] 在研究中发觉到碳/芳纶混杂纤维复合材料拥有很好的 耐磨性。Pandya 等^[10]发现纤维的合理混杂能够提高复 合材料的性能。鲍子贺等[11]通过实验研究验证了单一碳 纤维复合材料力学性能最佳,碳/玻璃混杂纤维结构性 能总体优于碳/芳纶混杂纤维结构。Hosseinzadeh 等^[12] 在落锤实验中对碳/玻璃混杂纤维复合材料进行了研 究,结果表明,在不同能量强度的冲击下,纤维混杂可 以有效地改善单纤维的性能缺陷。从上述参考文献中可 以看出,当前国内外学者对混杂纤维复合材料的性能研 究比较单一,缺乏不同材料间的横向比较,层间混杂结 构差异对性能的影响分析仍存在一定缺陷和不足,因此 文中从该角度着手进行研究分析。

文中针对可在无伞空投箱中使用的碳纤维玻璃纤 维芳纶纤维/环氧树脂体系的混杂纤维复合材料层合 板,采用层间混杂结构,通过改变混杂比、铺层角度及 铺层顺序来研究各参数变量对混杂纤维复合材料拉伸 性能及抗弯性能的影响,并总结相关规律,对设计具备 高抗冲击性能的无伞空投箱具有重要的现实意义。

1 有限元模型设计

1.1 仿真原理

1.1.1 混杂纤维复合材料的混合效应

在当前的研究情况下,对于纤维混杂复合材料的

混合效应,只有针对不同情况的拟合公式而没有统一的 结论,如A、B2种纤维混杂,如仅考虑纤维而不考虑 基体对材料刚度的影响,则模量在0°方向的混合率有:

 $E_{\rm Ht} = (1 - c_{\rm m})(E_{\rm A}c_{\rm A} + E_{\rm B}c_{\rm B})$ (1)

式中: $E_{\rm Ht}$ 为混杂纤维复合材料的纵向拉伸模量; $c_{\rm m}$ 为基体的体积分数; $c_{\rm A}$ 为纤维材料 A 的体积分数; $c_{\rm B}$ 为纤维材料 B 的体积分数; $E_{\rm A}$ 为纤维材料 A 的拉 伸模量; $E_{\rm B}$ 为纤维材料 B 的拉伸模量^[13]。

1.1.2 单元选择

在 ANSYS-APDL 中,根据复合材料的三维结构 理论,单元确定为三维固体单元。在这类单元中,复 合材料结构中的每个铺层都作为一个三维体进行数 值仿真和模拟计算,但并不需要针对材料性能沿厚度 方向上发生的变化而提出特别的假设。因为在复合材 料结构模型中,材料的铺层尺寸低于结构尺寸,所以 这类有限元模型单元的网格需要极度精细,这也就大大 增加了设计者对计算机资源性能的需求^[14]。Solid46、 Solid 191、Shell 91、Shell 99 和 Shell 181 等单元可用于 复合材料建模,文中使用 Shell 181 单元。该单元是一 种壳体单元,用于划分面网格,不使用实常数定义单元 厚度,而是使用 Section 进行各铺层的厚度及角度定义, 因此可以应用于多层结构的材料建模。

1.2 材料属性

文中以碳纤维/玻璃纤维/芳纶纤维的环氧树脂基 复合材料作为混杂纤维复合材料的基本组成要素,材料 参数取自参考文献[15-17],其各项参数见表1。其中, 下标1、2、3分别代表3个主应力方向(后文中如果无 额外说明,则出现的1、2、3均保持相同含义,分别指 代x、y、z方向),上标T和C分别代表拉伸和压缩。

1.3 层合板结构设计

影响混杂纤维复合材料特性的各类因素繁多, 文 中重点从混杂比、铺层角度及铺层顺序三方面进行考 虑。除特别需求外,为避免材料固化后出现翘曲变形, 一般采用均衡对称式层合板形状,可有效降低拉-弯、 拉--剪耦合作用带来的不利影响。文中的混杂纤维复合材 料层合板拟设计为10层,每层厚为1mm、长为800mm、 宽为 600 mm, 总尺寸为 800 mm×600 mm×10 mm, 建 立的三维模型见图 1。为了探究层合板相邻铺层角度差 值对其性能的影响,综合文献和铺层定向原则、铺设顺 序原则、铺层最小比例原则等基本要求,以方向1为0° 指向,角度为平面12自方向1顺时针旋转的角度,根 据铺层角度的不同,分成以下4种铺层角度类型:铺层 角度类型 I,即[0°/0°/0°/0°/0°/0°/0°/0°/0°/0°],相邻铺层 角度差值 0°; 铺层角度类型II, 即[0°/30°/0°/30°/0°/ 30°/0°/30°/0°/30°],相邻铺层角度差值±30°;铺层角度 类型III,即[0°/60°/0°/60°/0°/60°/0°/60°/0°/60°],相邻铺 层角度差值±60°; 铺层角度类型IV, 即[0°/90°/0°/90°/0°/ 90°/0°/90°/0°/90°],相邻铺层角度差值±90°。

Tab.1 Material properties						
项目	参数	碳纤维增强环氧树脂基	玻璃纤维增强环氧树脂	芳纶纤维增强环氧树脂		
		复合材料	基复合材料	基复合材料		
密度 p/ (kg·m ⁻³)	ρ	1 600	1 750	1 440		
弹性模量 E/MPa	E_1	130 000	54 000	50 000		
	E_2	7 700	14 000	50 000		
	E_3	7 700	3 200	1 000		
泊松比 μ	μ_{12}	0.33	0.24	0.3		
	μ_{23}	0.35	0.3	0.3		
	μ_{13}	0.33	0.3	0.3		
剪切模量 G/MPa	G_{12}	4 800	3 900	5 200		
	G_{23}	3 800	3 900	8 600		
	G_{13}	3 800	3 900	8 600		
拉伸强度 T/MPa	1^{T}	2 080	1 318.93	2 000		
	2 ^T	60	50.47	2 000		
	3^{T}	60	50.47	2 000		
压缩强度 C/MPa	1^{C}	-1 250	-795.82	-240		
	$2^{\rm C}$	-140	-171.93	-240		
	3 [°]	-140	-171.93	-240		
剪切强度 S/MPa	<i>S</i> ₁₂	110	51.55	80		
	S ₂₃	110	50	80		
	S_{13}	110	50	80		

表 1 材料属性



图 1 混杂纤维复合材料层合板三维模型图 Fig.1 Three-dimensional model of hybrid fiber composite laminates

以铺层角度类型I(后文简称为类型I)为例,3 种不同纤维的层合板任选其中2种组合成混杂纤维 复合材料层合板,采用层间混杂结构,通过调整混杂 比及铺层顺序,基于以下2点考虑。

由文献[6]可知,在碳纤维层成为背板层时,因为碳纤维复合材料本身拥有相对较高的刚度、模量,可以提高对层间开裂和缺陷扩展过程的质量控制效果,减少分层缺陷面积^[6],因此在碳-玻璃混杂纤

维复合材料和碳--芳纶混杂纤维复合材料中,保证碳 纤维层始终处于最外层背板位置。

2)由文献[5]可知,芳纶纤维的分散程度越低, 缓冲能力越强^[5],因此在碳-芳纶混杂纤维和玻璃-芳纶 混杂纤维复合材料中,无论混杂比如何变化,始终保持 全部芳纶纤维层集中在一起,达到最佳性能效果。

文中只考虑层间混杂而不考虑层内混杂,各纤维 所占的层数均设为该种纤维的含量。针对类型 I,在 满足上述 2 点考虑的前提下,通过调整混杂比及铺层 顺序可设计出 37 种材质。(后文中如果无额外说明, c、g、a 分别代表碳纤维、玻璃纤维、芳纶纤维增强 环氧树脂基复合材料所制的单层铺层板)。铺层角度 类型II、III、IV(后文简称为类型II、III、IV)调整 混杂比及铺层顺序可得到与类型I混杂方式相同的各 37 种材质排序。后文中碳/玻璃混杂纤维复合材料简 称为 C/G 混杂复合材料,碳/芳纶混杂纤维复合材料 简称为 C/A 混杂复合材料,玻璃/芳纶混杂纤维复合 材料简称为 G/A 混杂复合材料。

1.4 有限元仿真工况加载

1.4.1 混杂纤维复合材料层合板的建模

为简化无伞空投箱跌落运算过程,将无伞空投箱

(9)

箱体模型简化成悬臂复合材料层合板模型,一端固定,另一端添加约束,通过计算不同层合板的拉伸性 能及抗弯性能来反映用该材质制得的无伞空投箱性 能的优劣。

按照文件 GJB 6854—2009《空降兵装备空投要 求》规定,进行抗冲击试验的空投装备质量为 40 kg 左右,所能达到的无伞空投高度应在 200 m 以上^[2]。 取跌落高度 h_{β} 为 200 m,初始速度 $v_0=0$,在不考虑 空气阻力可能带来的影响的情况下,由式(2)—(3):

$$h_{\rm first} = v_0 t + \frac{1}{2} g t^2 \tag{2}$$

$$v = v_0 + gt \tag{3}$$

可得, 坠地瞬间速度可达 62.61 m/s。假设无伞空投 箱连带箱内物体总质量为 40 kg, 仅考虑落地瞬间发 生的受力情况而不再考虑后续可能发生的触地反弹 情况, 受力情况瞬间的时间变化Δt 取 0.1 s, 由式(4):

$$F \times \Delta t = mv - mv_0 \tag{4}$$

可得,物体受力约为25 kN,预留安全余量,令F=30 kN。

1.4.2 拉伸弹性模量

通过对拉伸弹性模量的分析,文中提出了一种于 自由端添加正向拉力的研究方法,令 *F*=30 000 N,加 载约束及载荷见图 2,分析板的受力情况可以发现, σ₂、σ₃与σ₁相比,数量级太小,完全可以忽略不计。 模型简化成单轴拉伸情况,有:

$$E = \frac{\sigma_1}{\varepsilon_1} \tag{5}$$

$$\sigma_1 = \frac{30\ 000\ \text{N}}{0.6\ \text{m} \times 0.01\ \text{m}} = 5\ \text{MPa} \tag{6}$$

如图 3 所示,根据仿真得出应变值 ε₁后,可通 过式(5)得到拉伸弹性模量值。在一定的应力作用 下,发生的弹性变形越小,其材料刚度越大,*E*值就 越大。



图 2 拉伸弹性模量有限元计算过程 Fig.2 Finite element calculation process of modulus of elasticity in tension



图 3 拉伸弹性模量有限元计算结果 Fig.3 Finite element calculation results of modulus of elasticity in tension

1.4.3 抗弯弹性模量

通过对抗弯弹性模量的分析,文中提出了一种于自 由端添加均布向下的径向力的研究方法,将该力施加到 自由端的 31 个节点中,每个点加载数值为 967 N,加 载约束及载荷见图 4。已知抗弯变形与载荷的关系为:

$$f_{\rm max} = -\frac{Fl^3}{3EI} \tag{7}$$

则有:

Ε

$$=-\frac{Fl^3}{3f_{\max}I}\tag{8}$$

式中: *F* 为载荷; *l* 为板的长度; *f*_{max} 为最大挠度; *I* 为惯性矩。由 Ansys 有限元软件计算施加的载荷和 板的形状尺寸可知:

 $F = 30\,\,000\,\,\mathrm{N}$

$$bd^3$$

$$I = \frac{12}{12} \tag{10}$$

式中: b 为板的宽度, b=600 mm; d 为板的厚度, d=10 mm。如图 5 所示, 根据仿真得出最大挠度值 f_{max} 后, 可通过式(8)得到抗弯弹性模量值。在一定应 力作用下, 自由端挠度越小, 其材料抗弯性能越好。



图 4 抗弯弹性模量有限元计算过程 Fig.4 Finite element calculation process of modulus of elasticity in bending



图 5 抗弯弹性模量有限元计算结果 Fig.5 Finite element calculation results of modulus of elasticity in bending

2 结果与分析

2.1 不同混杂比相同铺层顺序下模量变化 趋势

不同铺层角度类型下单一纤维复合材料的性能 参数经 ANSYS-APDL 计算得到的结果见表 2。

表 2	单纤维复合材料性能参数
Tab.2 Performance	e parameters of single fiber composites

材质	铺层角度	拉伸弹性模量/	抗弯弹性模量/
	类型	MPa	MPa
	Ι	129 450	130 312
单一碳纤维	II	75 901	75 237
复合材料	III	68 143	66 620
	IV	67 568	67 487
	Ι	53 981	54 372
单一玻璃纤维	II	36 364	36 569
复合材料	III	32 520	33 532
	IV	33 898	33 964
	Ι	50 188	52 189
单一芳纶纤维	II	38 462	41 649
复合材料	III	38 462	41 649
	IV	50 188	52 189

图 6 反映了拉伸弹性模量和抗弯弹性模量降低 率与 C/G 混杂复合材料内 g 体积分数的关系,最初材 料的十层全部为 c,后从中心 2 层依次往外由 c 换为 g,每次更替 2 层。由图可知,随着 C/G 混杂复合材 料内 g 比例的增加,材料的拉伸弹性模量降低比例呈 线性上升,抗弯弹性模量降低比例呈指数上升。由于 不同角度类型下的材料力学性能变化趋势基本相同, 结合表 2 不同角度类型下单一碳纤维复合材料的性 能差异,基于降低质量(降低g比例)和成本(提高 g比例)的考虑,铺层角度为类型 I、C/G 混杂复合 材料内g体积分数为40%的情况下的性价比较高。





图 7 反映了拉伸弹性模量和抗弯弹性模量降低率 与 C/A 混杂复合材料内 a 体积分数的关系,最初材料 的 10 层全部为 c,后从中心 2 层依次往外由 c 换为 a, 每次更替 2 层。由图 7 可知,随着 C/A 混杂复合材料 内 a 体积分数的提高,材料的拉伸弹性模量降低率呈 升高趋势,而抗弯弹性模量降低率存在波动,但总体 亦呈升高趋势。由于相同混杂比下各模量降低率从大 到小为类型 I、类型II、类型II、类型IV,结合表 2 不同角度类型下单一碳纤维复合材料的性能差异,基 于降低质量(提高 a 的体积分数)和成本(降低 a 的 体积分数)的考虑,铺层角度为类型 I、C/A 混杂复 合材料内 a 体积分数为 20%或 40%的情况值得推荐。







图 8 反映了拉伸弹性模量和抗弯弹性模量降低 率与 G/A 混杂复合材料内 a 体积分数的关系,最初材 料的 10 层全部为 g,后从中心 2 层依次往外由 g 换 为 a,每次更替 2 层。由图 8 可知,随着 G/A 混杂复 合材料内 a 体积分数的增加,类型 I 时材料的拉伸弹 性模量降低率呈线性上升,抗弯弹性模量降低率呈指 数上升,2 种模量值均在降低。对类型II、类型III、 类型IV而言,其降低率为负数,该数值越低对应的模 量值越高,即拉伸弹性模量值呈线性上升,抗弯弹性 模量值呈指数上升。结合表2 不同角度类型下单一玻 璃纤维复合材料的性能差异,基于降低质量(提高 a 的体积分数)和成本(降低 a 的体积分数)的考虑, 铺层角度为类型 I、G/A 混杂复合材料内 a 体积分数 为 20%或 40%或 60%的情况值得推荐。

2.2 相同混杂比不同铺层顺序下模量变化 趋势

图9为拉伸弹性模量和抗弯弹性模量随C/G混杂

复合材料($V_c: V_g=8:2$)铺层顺序的变化图,混杂 纤维层合板整体 10 层的情况下,对g分布位置的划 分命名如下:1为g排在第5、6层,其余为c;2为 g排在第4、7层,其余为c;3为g排在第3、8层, 其余为c;4为g排在第2、9层,其余为c。在类型 I的情况下拉伸弹性模量不受到g分布位置的影响, 而抗弯弹性模量随着g的外移呈线性下降的趋势;其 余3种铺层类型的情况下,当g排在第3、8层时拉 伸弹性模量值最大,排在第2、9层时拉伸弹性模量 值最小,而抗弯弹性模量随着g的外移在过程中数值 存在波动,但整体仍呈线性下降的趋势。C/A 混杂复 合材料($V_c: V_a=8:2$)的拉伸弹性模量和抗弯弹性 模量随铺层顺序的变化趋势与 C/G 混杂复合材料的 情况相同。



a 体积分数的关系 Fig.8 Relationship between the proportion of modulus reduction and the proportion of a volume fraction in G/A hybrid composites





图 10 为拉伸弹性模量和抗弯弹性模量随混杂纤 维(V_c: V_a=6:4) 铺层顺序的变化图, 混杂纤维层 合板整体十层的情况下,对 a 分布位置的划分命名如 下: 1为 a 排在第 4—7 层, 其余为 c; 2为 a 排在第 3-4、7-8层,其余为c;3为a排在第2-3、8-9 层,其余为 c。在类型 I 的情况下拉伸弹性模量不受 到 a 分布位置的影响, 而抗弯弹性模量随着 c 的外移 呈下降的趋势;在类型Ⅱ的情况下,当 a 排在第 3-4、7-8层时拉伸弹性模量最大,排在第2-3、8-9 层时拉伸弹性模量最小,且抗弯弹性模量随着 a 的外 移而下降;其余2种铺层类型的情况下,当a排在第 2-3、8-9 层时拉伸弹性模量和抗弯弹性模量最大, 排在第 2—3、8—9 层时拉伸弹性模量和抗弯弹性模 量最小。C/G 混杂复合材料($V_c: V_g=6:4$)的拉伸 弹性模量随铺层顺序的变化趋势与 C/A 混杂复合材 料的情况相同, 而抗弯弹性模量在4种铺层类型的情 况下,均随着g的外移呈下降趋势。





图 11 为拉伸弹性模量和抗弯弹性模量随混杂纤 维(V_c : V_g =4:6) 铺层顺序的变化图,混杂纤维层 合板整体 10 层的情况下,对g分布位置的划分命名 如下:1为g排在第3—8 层,其余为c;2为g排在 第2—4、7—9 层,其余为c。在类型I的情况下拉伸 弹性模量不受到g分布位置的影响而抗弯弹性模量 随着g的外移呈下降趋势;其余3种铺层类型的情况 下,g排在第3—8 层时的拉伸弹性模量和抗拉弹性 模量大于排在第2—4、7—9 层时的。C/A 混杂复合 材料(V_c : V_g =4:6)的拉伸弹性模量和抗弯弹性模 量随铺层顺序的变化趋势与C/G 混杂复合材料的情 况相同。

G/A 混杂复合材料由于二者纵向拉伸性能极为 接近,在铺层角相同的情况下,改变铺层顺序不会对 拉伸弹性模量值产生较大影响,在极小区间内细微波 动。对抗弯弹性模量而言,类型I时,在同比例g和 a 混杂时,随着 a 的外移,模量值呈下降趋势;其余 3 种铺层类型的情况下,在同比例g和a混杂时,随着a的外移,模量值呈上升趋势。



图 11 模量随 C/G 混杂复合材料($V_c: V_g=4:6$) 铺层顺序变化曲线图 Fig.11 Plot of modulus change with laying sequence of C/G hybrid composites ($V_c: V_g=4:6$)

3 结语

文中将无伞空投箱跌落模型转换为悬臂复合材 料层合板拉伸和弯曲模型,在ANSYS – APDL 有限元 软件环境下,建立更简洁的模型进行计算进而评估更 适合制作无伞空投箱的混杂纤维复合材料的混杂比、 铺层角度及铺层顺序,根据第2节共计6组数据图得 出结论如下。

 1)单一碳纤维复合材料由于只有碳纤维而没有 混杂其他纤维,因为碳纤维的刚度和强度均明显高于 玻璃纤维和芳纶纤维,对外力导致的损伤与破坏具备 更好的抑制作用,所以其弹性模量最大。各混杂试样 的压拉伸弹性模量和抗弯弹性模量均介于构成混杂 纤维的2种纯纤维复合材料之间。在单一玻璃纤维复 合材料或单一芳纶纤维复合材料中加入少许碳纤维 便可大幅提高材料的拉伸弹性模量和抗弯弹性模量。

2)针对混杂纤维复合材料层合板,在相同铺层 顺序、相同铺层角度、不同混杂比的情况下,当其受 到向外拉力呈现拉伸态势和受到向下压力呈现弯曲 态势时,C/G 混杂复合材料性能优于 C/A 混杂复合材 料性能优于 G/A 混杂复合材料性能,并且基于玻璃 纤维的价格远小于碳纤维及芳纶纤维的原因,在部分 强度要求、使用环境要求不高的情况下,C/G 混杂复 合材料是一个不错的选择。

3)相同铺层角度、相同混杂比下不同纤维的铺 层顺序会对材料性能产生较大影响,且相同铺层角 度、不同混杂比下不同纤维的铺层顺序对性能的影响 规律不完全相同。

4) 铺层角度越接近受力方向其效果越好,文中 类型 I 对应的铺层角度更贴近受力方向,因此在相同 混杂比相同铺层顺序的条件下,此类混杂纤维复合材 料具有更好的性能。

文中虽然对模拟过程进行了详细的分析说明,但 只是在有限元软件 ANSYS 环境下的模拟,可能存在 些许不足之处,在以下几方面需要进一步研究:文中 所采用的有限元模型忽视了层合板的分层失效、层间 开裂及其引发的刚度退化现象,可能会对结果产生一 些偏差,但是混杂纤维复合材料的层间界面状况复杂 多变,各种纤维对基体的黏结能力也存在差异,所以 应开展更深层次的机理研究,并结合实验对模型加以 修改;材料的属性选择也会对结果造成一定的影响。

参考文献:

- 赵西友,王宏,许涛,等.无伞空投缓冲包装材料及 技术研究[J].包装工程,2016,37(3):54-57.
 ZHAO Xi-you, WANG Hong, XU Tao, et al. Free Drop Buffering Packing Material and Technology[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(3): 54-57.
- [2] 耿小凯,李彦平,宋洪锁,等.用于无伞空投的滚塑 包装箱:中国,207292755U[P].2018-05-01.
 GENG Xiao-kai, LI Yan-ping, SONG Hong-suo, et al. Rolling Plastic Packing Box for Airdrop without Parachute: China, 207292755U[P].2018-05-01.
- [3] 张宇婷, 耿小凯, 任春华, 等. 无伞空投储液罐的高

空跌落仿真分析[J]. 包装工程, 2022, 43(1): 66-74. ZHANG Yu-ting, GENG Xiao-kai, REN Chun-hua, et al. Simulation Analysis of Liquid Storage Tank for Free Drop[J]. Packaging Engineering, 2022, 43(1): 66-74.

- [4] 李汶蔚,梅杰,黄威.碳纤维增强复合材料层合板的 抗冲击性能[J].高压物理学报,2020,34(2):1-8.
 LI Wen-wei, MEI Jie, HUANG Wei. Impact Resistance of Carbon Fiber Reinforced Composite Laminates[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2020, 34(2):1-8.
- [5] 苏波,张抟,于国军,等. 平纹织物混杂纤维复合材料低速冲击性能试验研究[J]. 玻璃钢/复合材料,2019(11):59-63.
 SU Bo, ZHANG Tuan, YU Guo-jun, et al. Experimental Study on Low Speed Impact Performance of Plain Fa-

bric Hybrid Fiber Composites[J]. Composites Science and Engineering, 2019(11): 59-63.

- [6] 易凯,孙建波,杨智勇,等. 混杂纤维复合材料层板的抗弹冲击性能[J]. 宇航材料工艺,2019(1): 82-85.
 YI Kai, SUN Jian-bo, YANG Zhi-yong, et al. Ballistic Impact Resistance of Hybrid Composite Materials[J]. Aerospace Materials & Technology, 2019(1): 82-85.
- [7] 王海雷,段跃新,王维维,等.玻璃纤维与碳纤维混杂复合材料的拉伸及低速冲击性能研究[J].复合材料 科学与工程,2021(2):102-109.

WANG Hai-lei, DUAN Yue-xin, WANG Wei-wei, et al. Study on Tensile and Low Speed Impact Properties of Glass Fiber and Carbon Fiber Hybrid Composites[J]. Composites Science and Engineering, 2021(2): 102-109.

- [8] WAN Y Z, LIAN J J, HUANG Y, et al. Preparation and Characterization of Three-Dimensional Braided Carbon/Kevlar/Epoxy Hybrid Composites[J]. J Mater Sci, 2007, 42(4): 1343-1350.
- [9] FRIEDRICH K, JACOBS O. On Wear Synergism in Hybrid Composites[J]. Composites Science and Technology, 1992, 43(1): 71-84.
- [10] PANDYA K S, POTHNIS J R, RAVIKUMAR G, et al. Ballistic Impact Behavior of Hybrid Composites[J]. Materials and Design, 2013, 44: 128-135.
- [11] 鲍子贺, 牛一凡, 严炎, 等. 混杂纤维复合材料力学 性能及其低速冲击性能研究[J]. 塑料工业, 2018, 46(8): 80-84.

BAO Zi-he, NIU Yi-fan, Yan Yan, et al. Investigation on the Mechanical and Low Velocity Impact Properties of Hybrid Composite Materials[J]. China Plastics Industry, 2018, 46(8): 80-84.

- [12] HOSSEINZADEH R, SHOKRIEH M M, LESSARD I. Damage Behavior of Fiber Reinforced Composite Plates Subjected to Drop Weight Impacts[J]. Composites Science and Technology, 2006(66): 61-68.
- [13] 陈庆林. 混杂纤维复合材料力学性能与仿真应用研究
 [D]. 常州: 江苏理工学院, 2018: 13-14.
 CHEN Qing-lin. Study on Mechanical Properties and Simulation Application of Hybrid Fiber Composites[D].
 Changzhou: Jiangsu University of Technology, 2018: 13-14.
- [14] 祁立波. 碳纤维与玻璃纤维混杂复合结构的参数分析
 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2008:20-40.
 QI Li-bo. Parametric Analysis of Carbon Fiber and Glass Fiber Hybrid Composite Structure[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008: 20-40.
- [15] 张华伟, 邵延汤, 向陈世, 等. 碳纤维复合材料层合 板低速冲击影响因素[J]. 塑性工程学报, 2021, 28(12): 222-229.

ZHANG Hua-wei, SHAO Yan-tang, XIANG Chen-shi, et al. Influencing Factors of Carbon Fiber Composite Laminate in Low Speed Impact[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2021, 28(12): 222-229.

[16] 余芬, 党梦鑫, 王轩, 等. 褶皱偏移角度对玻璃纤维 复合材料层合板拉伸性能的影响[J]. 科学技术与工 程, 2021, 21(10): 3950-3957.
YU Fen, DANG Meng-xin, WANG Xuan, et al. Effect of Deflection Weighted Levers on Tensile Properties of

of Deflection Wrinkled Layers on Tensile Properties of Glass Fiber Composite Laminates[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(10): 3950-3957.

 [17] 刘晓宇,李哲,翟奋楼.平纹芳纶织物/环氧树脂复合 材料抗冲击性能研究[J]. 航空制造技术, 2018, 61(7): 89-92.

LIU Xiao-yu, LI Zhe, ZHAI Fen-lou. Ballistic Performance of Aramid Fabric/Epoxy Resin Composite[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(7): 89-92.

责任编辑:曾钰婵