

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.04.014

螺旋铺层影响复合材料层合板冲击性能的数值模拟

田吉祥, 于佳宏, 张彦飞

(中北大学材料科学与工程学院, 太原 030051)

摘要: 为研究不同螺旋角度铺层对复合材料层合板抗冲击性的影响,使用了有限元软件 ABAQUS 对不同螺旋角铺层的复合材料层合板进行数值模拟,使用 VUMAT 子程序,运用三维 Hashin 失效准则对复合材料面内损伤进行模拟,使用 cohesive 单元对层间强度进行仿真,失效模型损伤准则使用二次名义应力准则,使用 10 J 和 25 J 的冲击能量对螺旋角度铺层的复合材料层合板进行数值模拟,得到复合材料损伤云图及落锤的能量变化等数据。结果表明,在纤维铺层总数相同的条件下,当螺旋角度小于 10° 时,随螺旋角度的增大,复合材料层合板的抗冲击性下降,受到冲击破坏的层合板能量吸收能力也随之下降,但螺旋角度过小导致纤维分布过于集中会使材料的变形程度加大;当螺旋角度大于 10° 时,由于纤维均匀分布到各个方向上,使应力可以沿纤维均匀传到基体中,避免由于纤维铺设方向集中导致的应力集中,从而产生大变形;增加螺旋周期可以使冲击力在多周期的作用下均匀分散,避免某一方向的应力集中,减少大变形。当铺层层数固定时,在保证纤维方向足够均匀时,螺旋角度越小,复合材料层合板小能量的能量吸收率越高,增加螺旋周期可以减少复合材料层合板的冲击破坏变形。

关键词: 螺旋铺层; 冲击损失; 数值分析; 复合材料; 落锤冲击

中图分类号: TQ327.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)04-0095-06

Numerical simulation of influence of spiral layup on impact performance of composite laminates

TIAN Jixiang, YU Jiahong, ZHANG Yanfei

(College of Materials Science and Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract : In order to study the influence of different helix angle layups on the impact resistance of composite laminates, the finite element software, ABAQUS, was used to numerically simulate the composite laminates with different helix angle ply, the VUMAT subroutine was used to simulate the in-plane damage of the composites using the three-dimensional Hashin failure criterion, the interlaminar strength was simulated by the cohesive element, and the quadratic nominal stress criterion was used for the failure model damage criterion. The impact energy of 10 J and 25 J were used to numerically simulate the composite laminate with spiral angle layer, and the damage contour of the composite material and the velocity change of the drop weight were obtained. The results show that when the total number of fiber layers is the same and the spiral angle is less than 10° , the impact resistance of the composite laminates decreases with the increase of the spiral angle, and the energy absorption capacity of the laminates damaged by the impact also decreases. However, if the spiral angle is too small, the fiber distribution is too concentrated, which will increase the deformation of the material. When the spiral angle is greater than 10° , because the fiber is evenly distributed in all directions, the stress can be evenly transmitted to the matrix along the fiber, so as to avoid the stress concentration perpendicular to the fiber direction due to the concentration of the fiber laying direction, so that the large deformation can be increased and the spiral period can make the impact force evenly dispersed under the action of multiple cycles, avoid the stress concentration in a certain direction, and reduce the large deformation. When the number of layers is fixed, the direction of the fibers is uniform enough, the smaller the spiral angle, the higher the energy absorption rate of the small energy of the composite laminate, but increasing spiral period can reduce the impact failure deformation of composite laminates.

Keywords : spiral lamination ; impact damage ; numerical simulation ; composite material ; drop weight impact

通信作者: 张彦飞, 博士, 硕士生导师, 主要研究方向为高性能复合材料

收稿日期: 2025-02-08

引用格式: 田吉祥, 于佳宏, 张彦飞. 螺旋铺层影响复合材料层合板冲击性能的数值模拟[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(4): 95–100.

TIAN Jixiang, YU Jiahong, ZHANG Yanfei. Numerical simulation of influence of spiral layup on impact performance of composite laminates [J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(4): 95–100.

复合材料产品因针对不同的使用环境,须具备适应环境的特殊性能,所以需要对其进行设计。与各向同性材料(即在各个方向上力学性能以及其他理化性能相同的材料)相比,复合材料的诸多特性有较大差异,因此在设计复合材料制品时所采用的方法也有所不同^[1-2]。复合材料产品设计涵盖性能设计、结构设计、工艺设计3个部分。尤其在结构设计方面,需综合考虑强度、刚度和稳定性3个方面。其中,结构设计取决于使用条件及所承受的载荷工况,通过设计使材料在使用寿命内能够抵抗变形且不出出现损伤,确保性能可靠、使用安全^[3]。结构设计依托于复合材料层合板的设计,即铺层设计。层合板是由许多单向板通过胶黏剂结合而成。众多性能相同或不同的材料依据一定的设计准则层层堆叠组成层合板,以达到使用要求。目前复合材料层合板主要采用准各向同性铺层以及正交铺层设计,这些铺层设计方法将纤维铺层方向确定在 $0^\circ/90^\circ$ 或 $\pm 45^\circ$ 等几个主要方向,通过改变其层数和均衡对称性以满足不同工况。近年来发现,在面对冲击等面外力学破坏工况时,传统铺层无法将外部载荷分散到面内以减少面内破坏,并获得更大的承载力,而螺旋铺层能将纤维平均分散到整个平面,使面外载荷可沿纤维传递到材料内部,避免了部分区域过载破坏而部分区域远未达到极限载荷的现象发生^[4]。

复合材料层合板的抗冲击性一直是层合板力学性能研究的重要课题之一,许多国内外学者对其进行了深入的研究。传统的复合材料铺层设计原则在抗冲击性方面并没有多大的优势,近些年,学者们通过仿生学研究得到了更多的铺层设计灵感,比如螺旋铺层是指复合材料层合板的纤维方向以一定角度螺旋增加的复合材料铺层设计方法,如图1所示。螺旋铺层在抗冲击过程中能够将载荷均匀传递到面内,使螺旋铺层的抗冲击破坏能力得到显著提高。Ginzburg等^[5]通过在螳螂虾身上找到的灵感发现螺旋铺层对于提升纤维增强复合材料层合板的抗冲击性有着显著作用,与传统的准各项同性

铺层以及正交铺层相比,在冲击后的压缩强度上螺旋铺层有显著的提升,在能量吸收率上也有很大的改善。Shang等^[6]和Cheng等^[7]发现更小的螺旋铺层角度设计可以使应力分布得到优化,提高复合材料层合板的承载能力,螺旋铺层相较于正交铺层的峰值载荷得到了显著提高。Grunenfelder等^[8]的研究则发现大螺旋角度可以显著提高层合板受冲击后的剩余强度,减小厚度方向上的裂纹扩展。隆中亮^[9]对不同螺旋角度及不同厚度的螺旋铺层复合材料层合板进行了抗冲击性研究,并对其冲击后的剩余压缩强度进行了研究,对混杂纤维螺旋铺层也做了实验研究,都得到了良好的效果。Yin等^[10]对双螺旋铺层进行了大量研究,发现双螺旋复合材料纤维取向对失效模式的影响不大,这种属性使其具有更强的性能可设计性。大部分专家学者对螺旋铺层的研究一直追求完整螺旋周期的铺层,其结果不能定量分析,只对几种层数的铺层进行集中研究,并没有对螺旋铺层的螺旋角度对复合材料层合板的抗冲击性影响进行准确及普适的分析^[11]。

复合材料层合板的铺层设计及强度验证已经有许多学者做出了深入的研究,使用数值模拟的方法可以避免大量的材料消耗,更方便对大量样本进行分析^[12-13]。复合材料层合板的数值模拟主要考虑到复合材料层内的损伤情况与复合材料层间的损伤情况^[14]。笔者使用数值分析方法对微小螺旋角铺层进行数值模拟,并对结果进行分析,以求得到螺旋铺层在抗冲击过程中对复合材料层合板强化的具体规律。为保障模拟结果的精确性,在模拟过程中详细考虑了材料的应变率效应及刚度退化方案,以三维Hashin失效准则^[15]作为复合材料层合板层内损伤判据,以便准确界定层合板面内的具体损伤类型。对于复合材料层合板的层间损伤则使用cohesive单元,损伤准则使用二次名义应力准则^[16]。借助数值仿真方法,对复合材料层合板在落锤冲击下的抗冲击表现和损伤特征进行了全面剖析,并进一步探讨了小角度铺层角度对分析结果产生的具体影响。

1 螺旋铺层落锤冲击模型的建立

笔者采用ABAQUS软件,并结合VUMAT子程序进行仿真模拟。以 $100\text{ mm}\times 100\text{ mm}\times 2\text{ mm}$ 的碳纤维/环氧复合材料为研究对象,通过改变纤维的铺设角度获得不同螺旋角的复合材料层合板。建立一个尺寸为 $100\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 的平板作为第一层

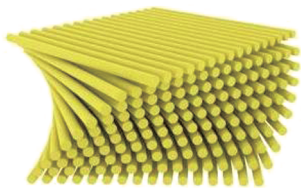


图1 螺旋铺层结构示意图

Fig. 1 Spiral laminate structure diagram

铺层,对其做网格划分,整体网格布置为2 mm,冲击区域网格大小为0.5 mm。利用网格偏置方法建立0厚度的cohesive单元及其他的层单元,通过改变各层单元的铺设方向构建不同螺旋角的复合材料层合板。分别对铺层单元与cohesive单元设置网格属性。铺层单元的网格单元为C3D8R,采用Enhanced的方法避免减缩积分可能引起的沙漏变形,材料属性见表1,采用三维Hashin失效准则作为复合材料层合板层内损伤判据。Cohesive网格单元类型设为COH3D8单元,材料参数见表2,损伤准则使用二次名义应力准则。再建立冲头,冲头直径16 mm,通过参考点控制质量来控制冲击能量,网格类型为刚体单元R3D4,网格大小为0.5 mm。夹具设置为刚体单元R3D4,网格大小均为0.5 mm,通过设置参考点限制自由度。该模型用于探究螺旋铺层对复合材

料层合板抗冲击性的影响,一共建立10层铺层,铺层角度由下至上线性递增,例如 $[1^\circ/2^\circ/3^\circ/4^\circ/5^\circ/6^\circ/7^\circ/8^\circ/9^\circ/10^\circ]$,其螺旋角为1,下文记为P1。冲头与复合材料板的接触及夹具与复合材料板的接触均设置为通用接触,同时为了使结果更精确,冲头与复合材料板内部设置了接触,接触属性法向设置为“硬”接触,切向为“罚”接触,摩擦系数设置为0.3。上下夹具固定,通过参考点限制所有的自由度;冲头限制其他方向自由度,仅保留Z方向的自由度,并对冲头的参考点施加预定义场,定义冲头的冲击速度,冲头速度设置为10 m/s。建模完成后的复合材料层合板冲击仿真模型如图2所示。

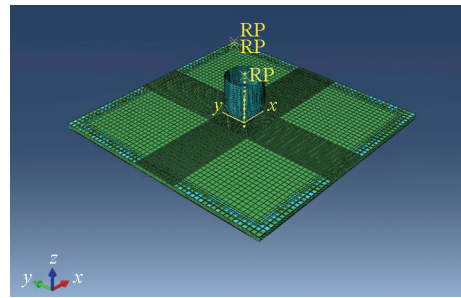


图2 复合材料层合板冲击仿真模型

Fig. 2 Impact simulation model of composite laminates

复合材料层合板材料采用宜兴市华恒高性能纤维织造有限公司的T700/H-USN25000碳纤维/环氧预浸料,所制备的复合材料具体性能参数参考文献[11],复合材料层合板层内采用三维Hashin失效准则,相关参数详见表1。

复合材料层间分层采用Cohesive单元来模拟,具体参数见表2。

2 结果与讨论

2.1 不同能量冲击复合材料应力应变场分析

共设计了15种铺层结构,其螺旋铺层角分别为:1°,2°,3°,4°,5°,6°,7°,8°,9°,10°,20°,30°,40°,45°,60°,分别命名为P1,P2,P3,P4,P5,P6,P7,P8,P9,P10,P20,P30,P40,P45,P60,并分别以10 J与25 J的冲击能量对板材进行冲击仿真分析,仿真结果如图3所示,该图为冲击板材背面的冲击破坏云图,在铺层设计时以底面第一层(0°铺层)为基准进行螺旋铺层设计,故无论螺旋角度为多少,背面第一层的纤维方向都一样。当冲击能量为10 J时,可以明显观察到P1铺层的破坏程度最小。当螺旋角在10°以下时,随着螺旋角度的变大,层合板的冲击缺口越大。当螺旋角度大于10°之后破坏程度又突

表1 铺层材料属性

Tab. 1 Laminate material properties

Parameter	Value	Parameter	Value
E_{11}/GPa	130	G_{23}/GPa	3.8
E_{22}/GPa	7.7	X_T/MPa	1 950
E_{33}/GPa	7.7	X_C/MPa	1 015
μ_{12}	0.3	Y_T/MPa	75
μ_{13}	0.3	Y_C/MPa	220
μ_{23}	0.33	S_{12}/MPa	150
G_{12}/GPa	4.8	S_{13}/MPa	150
G_{13}/GPa	4.8	S_{23}/MPa	150

Notes: Subscript 1 represents direction of fiber of the material; subscript 2 represents direction perpendicular to fiber in the plane; 3 represents direction perpendicular to the fiber outside the plane; E is modulus of elasticity; μ is Poisson's ratio; G is shear modulus; X_T is tensile strength in fiber direction; X_C is compressive strength in fiber direction; Y_T is tensile strength in matrix direction; Y_C is compressive strength in matrix direction; S is shear strength.

表2 Cohesive单元材料参数

Tab. 2 Material parameters of Cohesive element

Parameter	Value
$K_n/(\text{GPa}\cdot\text{mm}^{-1})$	120
$K_s=K_t/(\text{GPa}\cdot\text{mm}^{-1})$	43
N/MPa	30
$S=7/\text{MPa}$	50
$G_{IC}/(\text{J}\cdot\text{m}^{-2})$	520
$G_{IIC}=G_{IIIC}/(\text{J}\cdot\text{m}^{-2})$	920

Notes: K_n , N and G_{IC} denote stiffness of cohesive force model, interfacial strength and breaking energy in direction of material fibers respectively; K_s , S and G_{IIC} denote stiffness of cohesive force model, interfacial strength and breaking energy in direction perpendicular to fibers in plane respectively; K_t , T and G_{IIIC} denote stiffness of cohesive force model, interfacial strength and breaking energy in direction perpendicular to fibers outside plane respectively.

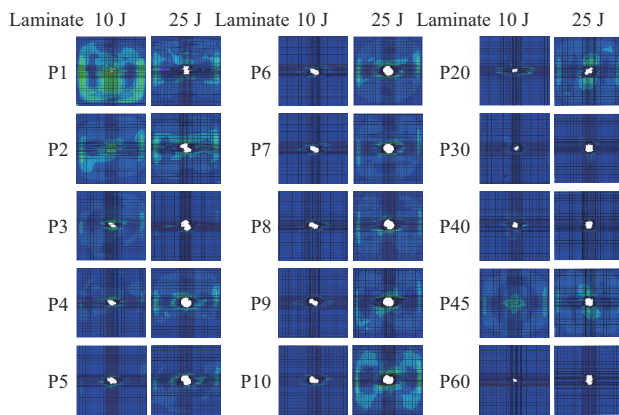


图3 不同冲击能量冲击时不同螺旋角度层合板背面破坏云图

Fig. 3 Damage cloud diagram of laminates back with different spiral angles under different impact energy impact

然变小。对于螺旋角度小于 10° 的铺层,其纤维强度主要分布在1,3象限,垂直于纤维方向的强度低,所以受冲击破坏的形状会沿着纤维方向扩散,这一点在铺层P60也可以得到验证,螺旋角为 60° 时有 $2/5$ 的纤维方向为 0° ,所以破坏形状为沿 0° 方向的长条状,同时冲击能量为25 J时的破坏形状也可以验证这一观点。在受到冲击时纤维集中受力,当螺旋角度很小时,强度集中所以不易击穿,随着螺旋角度变大,纤维的增强能力被分散,更容易击穿。当螺旋角度大于 10° 时,在整个平面都有纤维的增强,所以破坏形状更趋向于中心对称。螺旋角大于 10° 时并没有出现像螺旋角小于 10° 时破坏程度随着螺旋角的单向变化,层合板的破坏程度逐渐增大。这是由于当螺旋角度发生变化时,纤维对整个层合板的增强次数并不相同。如P20时,一共铺满 180° ,铺层顺序为 $[0^\circ/20^\circ/40^\circ/60^\circ/80^\circ/100^\circ/120^\circ/140^\circ/160^\circ/180^\circ]$,为一个螺旋周期;而铺层P40时,铺满 360° ,铺层顺序为 $[0^\circ/40^\circ/80^\circ/120^\circ/160^\circ/20^\circ/60^\circ/100^\circ/140^\circ/180^\circ]$,铺设了两个螺旋周期,两者相比只是将铺层顺序改变了,但P20铺层的破坏程度始终小于P40铺层。铺层P30与铺层P45的纤维方向相较于其他铺层要更加均匀,所以损坏面积明显更小,这是由于在受到冲击破坏时,纤维会将面外冲击力沿纤维方向传递,当纤维分布不均匀时,纤维含量相对较低的地方会产生应力集中,进而发生冲击破坏。

2.2 不同能量冲击复合材料冲击深度分析

图4为冲击能量10 J时不同螺旋角度铺层层合板的最大位移曲线,由图4可见,当螺旋角比较小的时候,纤维受力集中,形变量大但并未达到载荷极限,故而冲击深度更大;螺旋角度增大时,纤维分

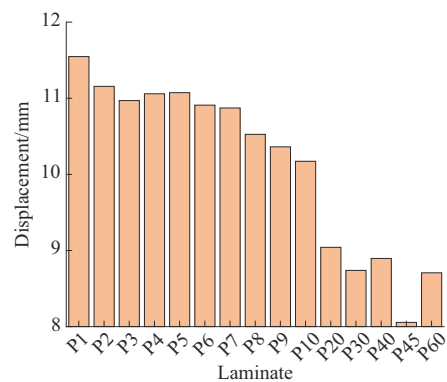


图4 冲击能量为10 J时不同螺旋角度层合板的最大位移

Fig. 4 Maximum displacement of laminate at different spiral angles under 10 J impact energy

散,受到的应力分散,故而变分量小,冲击深度下降。但铺层P4~P7并没有单调变化,铺层P4的最大位移比铺层P3还要大,这是由于铺层P3中心并没有完全被破坏,最大位移为中心部位弹性应变,P4铺层中心被冲击破坏,最大位移为冲击边缘弹性应变,所以出现了反常。当螺旋角大于 10° 时,纤维将应力向各个方向传递,所以形变量急剧减小,相应地,落锤冲击深度也显著减少。

图5为不同冲击能量冲击时不同螺旋角度层合板侧面破坏云图,由图5可见,能量足够大时,层合板完全被贯穿。其中,当螺旋角度小于 10° 时,由于铺层数量限制,垂直于纤维方向的层合板没有纤维增强,所以发生明显破坏,如图5中P1铺层所示,螺旋角度为 1° ,纤维比较集中,所以在25 J冲击能量下出现条状破坏。小螺旋角度变形破坏严重,纤维不能起到很好的连接基体的作用,只有纤维分散在所有方向上才能对基体起到比较好的连接加强作用,所以当螺旋角度大于 20° 时,多螺旋周期增强,可以

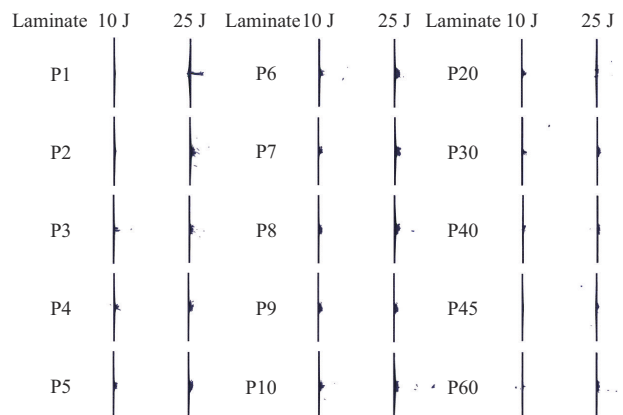


图5 不同冲击能量冲击时不同螺旋角度层合板侧面破坏云图

Fig. 5 Damage cloud diagram on side surfaces of laminates with different spiral angles under varying impact energies

有效分散面外冲击到面内,层层减弱冲击,使得层合板破坏减小。从10 J冲击能量对层合板侧面冲击破坏云图可以观察到,随着螺旋周期的增加,对于底面的冲击破坏以及整个复合材料板材的冲击破坏变形都会变小,在螺旋周期增加的过程中,各个方向的冲击会被均匀抵消,减少应力集中,避免某个方向被率先破坏,将面外力均匀的传递到各个纤维上,并传导到面内,使层合板的抗冲击性能得到增强。

2.3 不同能量冲击复合材料剩余能量分析

图6、图7分别为10 J和25 J冲击能量损伤后不同螺旋角度层合板的剩余能量对比。由图6可知,当螺旋角度小于 10° 时,落锤并没有完全击穿板材,随着螺旋角度的增大,落锤的剩余能量越小,纤维越集中这种趋势越明显。说明在冲击过程中落锤的主要能量先转化为板材的弹性应变能,在落锤回升的过程中又返还给了落锤,其中铺层P5~P10由于层数限制,纤维分布区域较小,不能将面外冲击分散到整个平面内,使得受冲击过程中能量损耗大部

分为中心处的纤维与基体破坏,能量损耗相差不大。纤维集中时,冲击强度高,落锤未能破坏大量纤维,所以落锤的能量损耗小。螺旋角度大于 10° 时,纤维分布趋于均匀,落锤的能量损失变小。落锤的能量损耗主要来源于纤维和基体的破坏,当板材未完全击穿时,纤维损伤越少,能量损耗就越少。纤维均匀分布时,在受冲击过程中能量均匀分散到了各层纤维上,纤维损伤的比例也会减少,所以剩余能量多。纤维分散不均匀就会导致部分纤维受冲击过大,会率先受到破坏,使落锤的能量明显减少。但对比铺层P20与铺层P40,相同的铺层,改变铺层顺序,前者纤维密集,后者却完成了两个完整螺旋,在低能量未击穿时,P20铺层的能量吸收率高于P40铺层。这种均匀密集纤维的吸能现象与螺旋角小于 10° 时的现象相反,可能是由于当纤维分布不均匀时,层合板回优先从脆弱处破坏,部分加强区并未起到加强作用,而纤维均匀分布时,面内均匀传导,所以破坏吸能还附带了层间滑移。如图7所示,对比25 J冲击损伤后不同螺旋角铺层剩余能量,由于板材被完全击穿,落锤的能量主要转化为层合板的纤维与基体的破坏,故铺层P3~P10的能量吸收相差不大。P1和P2铺层由于纤维的过分集中,还发生了纤维增强区域与无纤维区域的分离破坏,所以能量吸收率更高。对比螺旋角大于 10° 的铺层,纤维将面外冲击均匀传到到面内,使得面内破坏以及层间破坏吸收能量,所以能量吸收率高。

3 结论

对于不同螺旋角度的复合材料层合板的低速冲击进行了有限元仿真分析,得到如下结论。

(1)分析螺旋角小于 10° 的铺层可知,随着螺旋角度的增大,复合材料层合板的抗冲击性下降,受到冲击破坏的能量吸收能力也在下降,但螺旋角度过小导致纤维过于集中会加大材料的变形程度。

(2)分析螺旋角度大于 10° 的铺层可知,要优化抗冲击性需要将纤维均匀分布到各个方向上,使应力可以沿纤维均匀传到到基体中,避免由于纤维方向的不均匀铺设导致垂直纤维方向的部分区域应力集中,使抗冲击性下降,增加螺旋周期可以使冲击力均匀传递给纤维,避免了某一方向的应力集中。

(3)对螺旋铺层复合材料层合板抗冲击性优化时,当铺层层数固定时,在保证纤维方向足够均匀

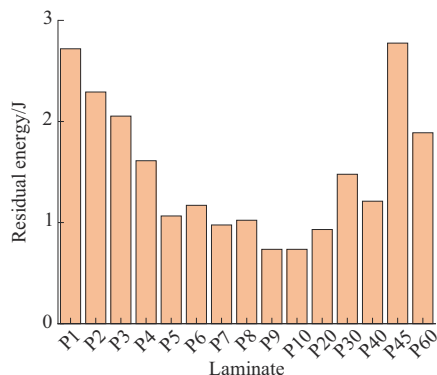


图6 10 J冲击能量损伤后不同螺旋角层合板的冲击剩余能量

Fig. 6 Impact residual energy of laminates with different spiral angles after 10 J impact energy damage

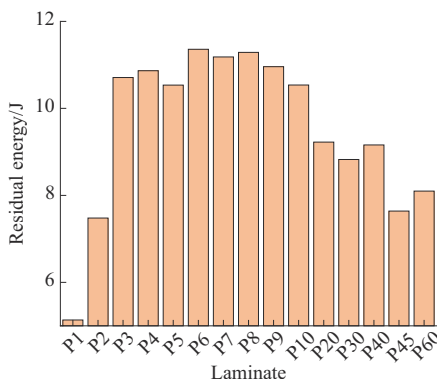


图7 25 J冲击能量损伤后不同螺旋角层合板冲击剩余能量

Fig. 7 Impact residual energy of laminates with different spiral angles after 25 J impact energy damage

条件下,螺旋角度越小,复合材料层合板的冲击能量吸收率越高,增加螺旋周期可以减少复合材料板的冲击破坏变形。

参考文献

- [1] 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.
WANG Yaoxian. Mechanics and structural design of composite materials[M]. Shanghai: East China University of Science and Technology Press, 2012.
- [2] 肇研, 孙铭辰, 张思益, 等. 连续碳纤维增强高性能热塑性复合材料的研究进展[J]. 复合材料学报, 2022, 39(9): 4 274–4 285.
ZHAO Yan, SUN Mingchen, ZHANG Siyi, et al. Advance in continuous carbon fiber reinforced high performance thermoplastic composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(9): 4 274–4 285.
- [3] 丁运亮. 结构优化设计的一种新方法——改进的可行方向法[J]. 南京航空航天大学学报, 1981, 13(1): 67–78.
DING Yunliang. A new method of structural optimization design—Modified feasible direction method[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 1981, 13(1): 67–78.
- [4] DASGUPTA K. Role of carbon nanotubes in the ballistic properties of boron carbide/carbon nanotube/ultrahigh molecular weight polyethylene composite armor[J]. Ceramics International, 2020, 46(4): 4 137–4 141.
- [5] GINZBURG D, PINTO F, IERVOLINO O, et al. Damage tolerance of bio-inspired helicoidal composites under low velocity impact[J]. Composite Structures, 2017, 161: 187–203.
- [6] SHANG J S, NGERN N H H, TAN V B C. Crustacean-inspired helicoidal laminates[J]. Composites Science and Technology, 2016, 128: 222–232.
- [7] CHENG L, THOMAS A, GLANCEY J L, et al. Mechanical behavior of bio-inspired laminated composites[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2011, 42(2): 211–220.
- [8] GRUNENFELDER L K, SUKSANGPANYA N, SALINAS C, et al. Bio-inspired impact-resistant composites[J]. Acta Biomaterialia, 2014, 10(9): 3 997–4 008.
- [9] 隆中亮. 螺旋铺层复合材料抗冲击性能研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2022.
- LONG Zhongliang. Research on impact resistance of spiral layup composites[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2022.
- [10] YIN S, YANG R H, HUANG Y, et al. Toughening mechanism of coelacanth-fish-inspired double-helicoidal composites[J]. Composites Science and Technology, 2021, 205. DOI: 10.1016/j.compscitech.2021.108650.
- [11] 高春赞. 高刚度抗冲击结构复合材料制备及性能研究[D]. 太原: 中北大学, 2023.
GAO ChunYun. Study on preparation and properties of high stiffness impact-resistant structural composites[D]. Taiyuan: North University of China, 2023.
- [12] IQBAL M A, SENTHIL K, SHARMA P, et al. An investigation of the constitutive behavior of Armox 500T steel and armor piercing incendiary projectile material[J]. International Journal of Impact Engineering, 2016, 96: 146–164.
- [13] RODRÍGUEZ-MILLÁN M, ITO T, LOYA J A, et al. Development of numerical model for ballistic resistance evaluation of combat helmet and experimental validation[J]. Materials & Design, 2016, 110: 391–403.
- [14] HE W T, YAO L, MENG X J, et al. Effect of structural parameters on low-velocity impact behavior of aluminum honeycomb sandwich structures with CFRP face sheets[J]. Thin-Walled Structures, 2019, 137: 411–432.
- [15] ZHANG Y, PAEPEGEM W V, CORTE W D. An enhanced progressive damage model for laminated fiber-reinforced composites using the 3D hashin failure criterion: A multi-level analysis and validation materials[J]. 2024, 17(21). DOI: 10.3390/ma17215176.
- [16] HAN Q G, LI H M, CHEN X H, et al. Impact resistant basalt fiber-reinforced aluminum laminate with Janus helical structures inspired by lobster and mantis shrimp[J]. Composite Structures, 2022, 291. DOI: 10.1016/j.compstruct.2022.115551.
- [17] ZHANG Y C, VAN PAEPEGEM W, DE CORTE W. An enhanced progressive damage model for laminated fiber-reinforced composites using the 3D hashin failure criterion: A multi-level analysis and validation[J]. Materials, 2024, 17(21). DOI: 10.3390/ma17215176.