

引文格式: 刘维伟, 侯嘉豪, 王战玺, 等. 航空发动机复合材料机匣包容环低速冲击性能研究[J]. 航空制造技术, 2025, 68(16): 46-55.

LIU Weiwei, HOU Jiahao, WANG Zhanxi, et al. Research on low-speed impact performance of containment ring of composite casing for aero-engine[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2025, 68(16): 46-55.

航空发动机复合材料机匣包容环低速冲击性能研究

刘维伟¹, 侯嘉豪¹, 王战玺¹, 桑晨¹, 靳可心²

(1. 西北工业大学, 西安 710072;

2. 北京遥感设备研究所, 北京 110000)

[摘要] 本文通过低速冲击试验,研究了芳纶纤维与玻璃纤维两种用于机匣包容环的复合材料在不同冲击能量下的破坏形式和失效机理。试验结果表明,当冲击能量为 36 J 时,芳纶纤维和玻璃纤维复合材料的吸能能力相近,两种复合材料损伤以基体开裂为主。当冲击能量增加至 117 J 时,复合材料的破坏形式主要为纤维拉伸断裂、分层损伤,在高能量冲击下,芳纶纤维复合材料通过纤维断裂以及分层展现更优的吸能能力。

关键词: 复合材料; 机匣包容环; 低速冲击; 芳纶纤维; 玻璃纤维

中图分类号: V25; TB33

文献标志码: A

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2025.16.046



刘维伟

研究员, 博士, 研究方向为复合材料、机械加工。

航空发动机中的转子通常以非常高的速度运作,在受到飞鸟或冰雹撞击时发动机的叶片易断裂,叶片碎片会撞击机匣包容环,若包容环强度不满足要求,碎片穿透机匣包容环,

可能造成飞机机舱、油箱、液压管路及控制线路等关键部位的损坏,严重危及飞行安全^[1],所以对航空发动机的机匣包容环提出了更高的性能要求^[2-3]。然而,由于机匣包容环包容能力不足而导致的非包容性事故时有发生^[4-5]。随着复合材料的不断发展,高强度纤维的力学性能得到进一步提升,预浸料的相关问题也逐步得到解决。越来越多的机匣包容环采用复合材料制作。相较于传统金属机匣包容环,复合材料机匣包容环具有可设计性好、抗冲击性能强、质量轻等优势。主要应用于机匣包容环制作的材料为芳纶纤维和玻璃纤维。芳纶纤维具有轻质、高强、高模、耐酸碱性等优良性能,还具有较高的断裂伸长率,抗损伤性和抗冲击性好,被广泛用于船舶、航空航天、弹道导弹等领域^[6-7];玻璃纤维相较于其他传统材料有更优异的性能,主要包

括质轻、高强度、高模量、抗疲劳性能好、可塑性强等物理特性,电绝缘性优异、热均匀性良好、隔热与阻燃性强等功能特性,以及吸音性强、使用寿命长等环境适应特性^[8]。

随着复合材料在航空航天领域的应用范围进一步扩大,其低速冲击性能愈发受到重视。复合材料在实际服役过程中会受到冲击力的作用造成结构损伤,一般将冲击速度大于 100 m/s 的冲击称为弹道事件,包括子弹的击穿或者其他破坏性武器的伤害。这种损伤肉眼可见,易进行修补。此外,还有可能受到鸟、冰雹等撞击,这种冲击的速度一般低于 100 m/s,称为低速冲击事件,由于其冲击速度低,一般不会在材料表面留下明显的损伤,反而在材料内部出现分层的情况,这种损伤几乎肉眼不可见,但会降低材料的刚度性能。

诸多学者针对复合材料高强度

力学特性下的冲击性能,展开了广泛研究。Boukar 等^[9]研究表明, $[\pm 45]_{3s}$ 层压板比 $[0/90]_{3s}$ 层压板具有更低的峰值力、更长的冲击持续时间和更高的吸收能量。Shaari 等^[10]发现,在玻璃纤维中添加芳纶纤维可以有效提高试件的承载能力、吸能能力。伍悦玥等^[11]研究了芳纶平纹机织物等结构的复合材料在不同能量下的低速冲击性能,结果表明,在低速冲击能量作用下,层间交替铺层复合材料的损伤程度和变形程度最小。牟浩蕾等^[12]研究发现,芳纶编织复合材料在弹道冲击下的失效模式主要为纤维拉伸断裂、纤维脱出等。孙颖等^[13]通过落锤冲击试验对比了不同的混杂结构,发现芳纶纤维的层间混杂层板冲击载荷峰值最大。魏程等^[14]对玻璃纤维/碳纤维混杂复合材料/硬质泡沫夹层结构进行了低速冲击试验,发现冲击能量在纤维脱出过程中被吸收,树脂中形成的孔洞数量相对较少,材料凹陷变形量小。

同时,复合材料在包容机匣中的应用研究进一步扩大。Roy 等^[15]采用连续介质建模方法对 Kevlar 纤维材料和泡沫铝组成的复合材料包容机匣进行了包容性仿真分析,结果表明该类机匣具有优异的包容性能。刘志强等^[16]通过比较不同材料包容环的包容能力,发现用高极限强度和 高延伸率的材料作为包容环材料能够实现明显减重。宋曼丽^[17]针对三维编织/机织复合材料机匣,采用连续介质模型对旋转打靶试验结果进行仿真计算。范晓敬^[18]对 U 形截面包容环展开仿真研究,得到了最优的 U 形包容环结构参数。诸多国内外学者采用不同类型的基体和纳米改性来提高层间断裂韧性^[19],减少冲击引起的损伤。

目前针对二维平纹编织芳纶/玻璃纤维复合材料层合板的研究还十分有限,玻璃纤维复合材料层合板的研究大多只针对铺层结构,或者针

对玻璃纤维和金属材料结合的层合板。目前关于芳纶纤维复合材料层合板的研究,大多聚焦于混杂纤维或低冲击能量能级的场景。本文主要对芳纶/玻璃纤维层合板低速冲击响应过程以及试件的损伤程度进行分析,通过落锤冲击系统开展低速冲击试验,研究两种材料制成的层合板在不同冲击能量下的响应情况。主要通过凹坑深度、载荷时间曲线、载荷-位移曲线、位移-时间曲线和能量吸收曲线对冲击响应过程进行深入分析。

1 试验及方法

采用落锤冲击试验来研究层合板对低速冲击事件的响应,即在层合板的法线方向上对其进行撞击,冲击头的形状为半圆形锤头,其直径在 15~25 mm 之间。冲击试验中的冲击能量为

$$E = 0.5mv^2 = mgh$$

式中, E 为落锤冲击时锤头的能量, J; m 为锤头的质量, kg; v 为锤头下落时的冲击速度, m/s; g 为牛顿引力常数, m/s^2 ; h 为锤头下落时的高度, m。

低速冲击试验在 INSTRON Ceast 9350 落锤试验机上进行,环境温度为 24 °C,湿度为 45%。试件按照试验标准 ASTM D7136 进行状态调节,冲头直径为 20 mm,质量为 3.837 kg,

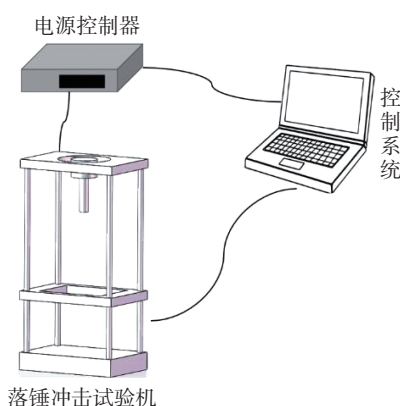


图1 落锤冲击试验平台示意图
Fig.1 Schematic diagram of drop hammer impact test platform

如图 1 和 2 所示。

本次试验采用的试件大小为 150 mm × 100 mm,分别针对芳纶纤维和玻璃纤维两种材料设置 12 件试样,试件厚度为 5 mm。其中,玻璃纤维预浸料材料牌号为 SW280F-90a/602,芳纶纤维预浸料材料牌号为 F-8H3/602。设置 4 个不同的冲击能量梯度对两种材料制成的层合板进行冲击,依据 ASTM D7136 的试验标准,当层合板厚度为 5 mm 时,相应的冲击能量在 36 J 左右,取 27 J 为能量梯度,以此递增 3 次,得到本次试验冲击能量依次为 36 J、63 J、90 J 和 117 J。

2 结果与讨论

2.1 层合板损伤进程分析

在复合材料低速冲击试验过程中,由于冲击头和层合板表面接触的时间很短,所以破坏之后依靠直接目视几乎看不到破坏的全部过程。如果需要详细观察宏观层面层合板的冲击过程,需要进一步慢放试验过程中拍摄的视频。

复合材料由多相材料构成,因此层合板的冲击损伤为复合式损伤,大致会经历以下 4 个阶段(图 3)。

(1) 冲头接触层合板阶段: 冲头接触到层合板表面,但层合板还未发生形变。

(2) 拉伸阶段: 当冲击头以较高的速度冲击层合板表面时,层合板内部的纤维首先会产生拉伸变形。

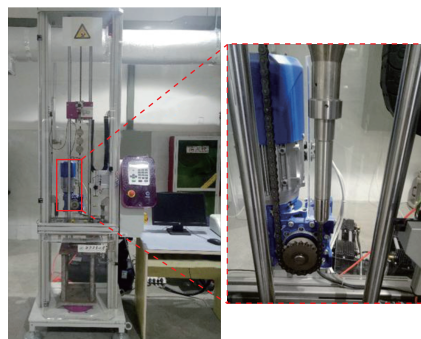


图2 落锤冲击试验机和冲击头
Fig.2 Drop hammer impact machine and impact head

(3) 剪切阶段: 当冲击头的位移进一步变大, 层合板的表面在冲击头的压力作用下进一步被侵切, 出现纤维剪切破坏的情况, 此时层合板受到冲击头的剪切作用, 进一步吸收冲击头的冲击能量, 出现层间劈裂的情况。

(4) 层合板分层破坏阶段: 在冲击头进一步侵切层合板内部时, 冲击头会在每一铺层表面发出应力波, 应力波进一步产生反射波, 反射波会与相邻的下一层应力波产生反方向作用力, 这种作用力会使层合板相邻铺

层发生撕裂。

除了上述复合式损伤之外, 低速冲击试验中层合板还有其他形式的损伤。比如, 受冲击面会出现凹坑, 而背离冲击面则会发生纤维断裂和基体开裂。这些损伤都是肉眼可见的, 还有一些目视不可见的损伤存在于层合板内部, 工程上称为目视几乎不可见损伤。虽然在低速冲击下层合板表面有时会出现轻微的凹坑, 但其背离冲击面已经出现了劈裂等现象, 这些损伤在结构服役中不可忽略, 如果继续使用会降低层合板的刚度。

2.2 损伤模式分析

利用相机拍摄获得两种试件在受冲击区域的损伤状态。芳纶纤维试件在不同冲击能量下的损伤如表 1 所示。可以看出, 当能量较低时, 芳纶纤维层合板正面受冲击点附近只有一个很浅的凹坑。随着冲击能

量的增加, 凹坑深度也越来越大, 试件正面的凹坑附近也出现了纤维断裂, 试件背面逐渐出现纤维断裂和明显裂纹。在冲击能量为 117 J 时甚至出现了穿透破坏, 试件正面的凹坑出现裂纹, 试件背部出现“十”字形裂纹。因此, 当冲击能量较低时, 试件的损伤以基体开裂为主, 随着冲击能量的增加, 试件逐渐出现分层损伤, 最后穿透失效。

玻璃纤维试件冲击损伤如表 2 所示。可以看出, 层合板受冲击面出现十字形裂纹损伤, 十字中心有一处环形白点。在较长裂纹的伸长方向, 会看到试件内部半透明的分层。试件背部的损伤表现为一个明显的白色半透明区域, 白色区域中心会出现少许纤维断裂。随着冲击能量的增加, 纤维断裂的数量也增加, 在冲击能量为 117 J 时甚至出现了轻微的穿透现象。随

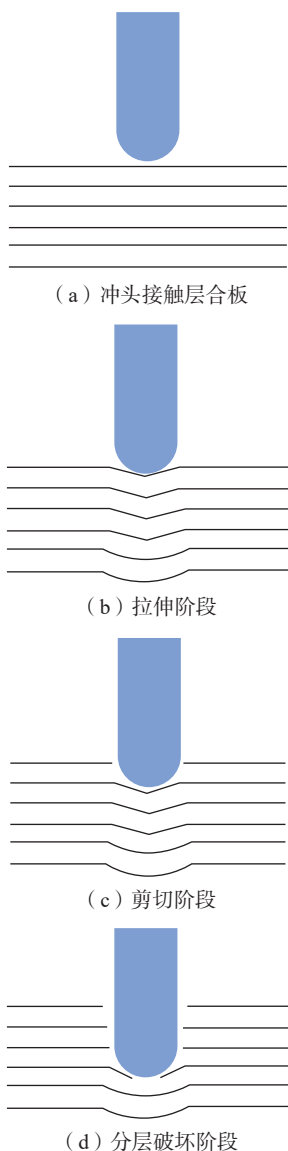


图 3 落锤冲击试验拉伸阶段示意图
Fig.3 Schematic diagram of the tensile phase in drop hammer impact test

表 1 芳纶纤维试件冲击损伤

Table 1 Impact damage of aramid fibre specimens

能量	第 1 组		第 2 组		第 3 组	
	正面	背面	正面	背面	正面	背面
36 J	FL-36-1		FL-36-2		FL-36-3	
63 J	FL-63-1		FL-63-2		FL-63-3	
90 J	FL-90-1		FL-90-2		FL-90-3	
117 J	FL-117-1		FL-117-2		FL-117-3	

着冲击能量的进一步增加,试件内部分层损伤的面积也逐渐增加。

3 不同损伤参数与冲击能量的变化规律

3.1 冲击损伤凹坑分析

冲击后试件表面凹坑的形貌以及凹坑深度可以直观反映出冲击的损伤效果。本试验利用凹坑深度计对冲击后试件表面的凹坑深度进行测量,测量时不断移动深度计直至屏幕出现最大值,该数值为此冲击能量下的凹坑深度值。

图4为凹坑深度随冲击能量的变化曲线。可以看出,两种材料在低速冲击下的凹坑深度随着冲击能量的增加呈线性增长。不同层合板对应不同的分层起始能量,对于厚度为5 mm左右的层合板来说,分层起始能

量一般为5~10 J之间,当冲击能量较大时,试件内部开始发生分层损伤。

低能量下分层损伤主要取决于树脂基体的性能。在36 J时,低速冲击未引起分层,仅有面外变形和内部少许纤维断裂,两种层合板的凹坑深度接近。当冲击能量变大时,纤维发挥了抵抗冲击的作用。可以看出玻璃纤维层合板的凹坑深度明显小于芳纶纤维的凹坑深度,因为高能量时层合板需要通过纤维断裂的形式来吸收冲击能量,而芳纶纤维受低速冲击后会通过更多的纤维断裂吸收能量,因此吸收冲击能量优于玻璃纤维。

3.2 冲击裂纹分析

试件受到冲击后被冲击面会出现一个凹坑,在冲击能量较大的情况下试件会微微隆起,背离冲击面会出现一定数量的裂纹,表3统计了层合

板正面在下面不同冲击能量下的损伤裂纹。

根据Cantwell等^[20]的研究可知,低速冲击时层合板的状态从受拉伸转变为受弯曲,其背部的损伤由弯曲应力造成,在冲击能量达到一定值时,层合板损伤机理发生变化,此时层合板有可能出现贯穿破坏。另外,因为玻璃纤维层合板比较脆,在受到冲击力时更容易劈裂,因此在表3中,玻璃纤维层合板的分层、纤维断裂多于芳纶纤维层合板。

4 冲击能量对冲击响应过程的影响

4.1 冲击载荷-时间曲线

典型的冲击力-时间曲线类似一条二次曲线,在曲线延伸过程中伴随不间断的简谐振荡。Cartié等^[21]明确定义了冲击过程中的3个关键载荷 P_{cr} 、 P_c 和 P_{max} 。其中, P_c 是临界分层载荷,指第1次载荷骤降时的最高点,表示能够检测出试样损伤的初始值; P_{cr} 为第1次载荷骤降的终点,称为剩余载荷,前、后两者的差代表了试件第1次明显损伤的程度; P_{max} 为试件冲击过程中的最大载荷,此时,试件吸收的能量为 E_{max} 。

图5为试件FL-63-3的载荷-时间曲线,在加载初始阶段,曲线的斜率与冲击能量成正比。能量较低时,曲线的振荡频率较低,并且幅度较小,这是因为此时试件并未出现明显的冲击损伤;在临界冲击载荷处,曲线发生大幅度振荡,试件内部出现

表2 玻璃纤维试件冲击损伤

Table 2 Impact damage of glass fibre specimens

能量	第1组		第2组		第3组	
	正面	背面	正面	背面	正面	背面
36 J	BL-36-1 		BL-36-2 		BL-36-3 	
63 J	BL-63-1 		BL-63-2 		BL-63-3 	
90 J	BL-90-1 		BL-90-2 		BL-90-3 	
117 J	BL-117-1 		BL-117-2 		BL-117-3 	

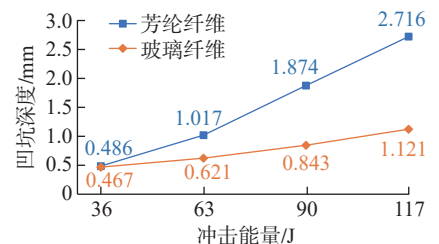


图4 凹坑深度随冲击能量变化曲线线性拟合
Fig.4 Linear fitting of the curves of pit depth variation with impact energy

表3 低速冲击层合板正面损伤状态统计

Table 3 Statistics of damage state of front surface of low-speed impact laminated plates

材料	冲击能量/J	裂纹	底部分层	纤维劈裂	纤维断裂	贯穿失效
玻璃纤维	36	宽度方向	✓	✓	✓	×
	63	长度方向	✓	✓	✓	×
	90	十字裂纹	✓	✓	✓	×
	117	十字裂纹	✓	✓	✓	✓
芳纶纤维	36	×	×	×	✓	×
	63	长度方向	✓	×	✓	×
	90	长度方向	✓	×	✓	×
	117	十字裂纹	✓	×	✓	✓

玻璃纤维试件曲线振荡幅度未发生明显增加,而芳纶纤维试件曲线出现了剧烈的振荡,即前者损伤程度未发生明显变化,而后者出现了明显的分层损伤。两者均出现了明显的临界分层载荷,说明试件内部分层损伤开始发生。

当冲击能量达到 117 J 时,两种层合板载荷时间曲线的振荡幅度更为剧烈,二者均在达到最大载荷后骤降,此时试件背部出现明显裂纹,部分出现纤维断裂的情况,可以发现芳纶纤维层合板损伤更严重。

图 7 展示了在某一单一能量下

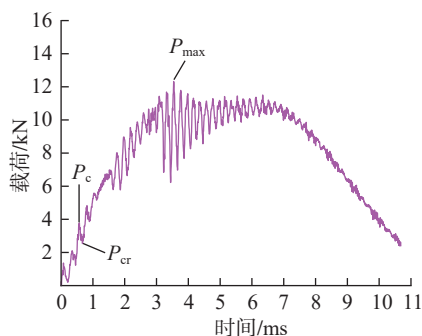


图5 试件 FL-63-3 载荷-时间曲线

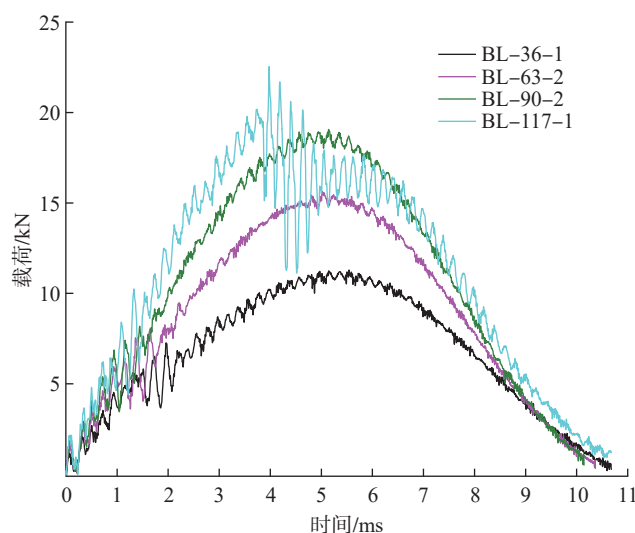
Fig.5 Specimen FL-63-3 load-time curve

初始分层损伤,此时载荷被称为临界分层载荷;达到临界分层载荷后,载荷-时间曲线的振荡频率以及幅度增加,这是由于内部损伤进一步扩展造成的。另外,最大载荷 P_{max} 随着冲击能量的增加也会不断增加^[22]。

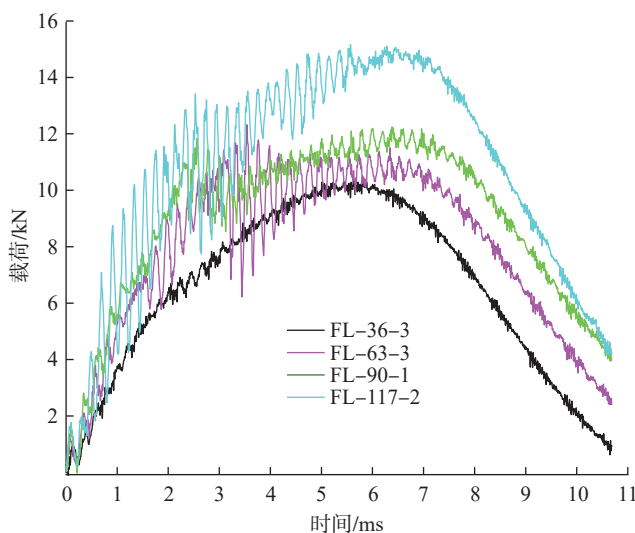
图 6 为两种层合板的时间-载荷曲线,随着冲击能量增加,振幅不断增加。其中,曲线的振荡频率与落锤冲击试验使用冲击头的刚度、试件本身的刚度、落锤冲击系统的夹具有很大关系。振荡下降的幅度可以表征试件的损伤量,试件损伤程度与曲线下降次数成正比,振荡幅度同量^[21]。

当冲击能量为 36 J 时,两种层合板的时间-载荷曲线较为平滑,未出现剧烈振动。此时试件内部只有微小的基体开裂以及微裂纹扩展的微小损伤,并未出现明显分层损伤。

当冲击能量达到 63 J 和 90 J 时,



(a) 玻璃纤维试件



(b) 芳纶纤维试件

图 6 4 种冲击能量下试件时间-载荷曲线

Fig.6 Specimen time-load curves for four kinds of impact energy

玻璃纤维层合板和芳纶纤维层合板的载荷-时间曲线。曲线的振荡频率与冲击头的刚度、试件本身的刚度以及夹具有很大关系。振荡时,曲线下降的幅度一定程度上可以表征试件发生损伤时的损伤量,随着试件损伤程度的增加,曲线载荷下降次数会进一步增加,曲线振荡幅度也会进一步增大。

当冲击能量为 36 J 时,玻璃纤维层合板和芳纶纤维层合板的载荷-时间曲线较为平滑,未出现剧烈振动的情况,仅玻璃纤维层合板载荷-时间曲线出现了明显的临界分层载荷。此时试件内部只有微小的基体开裂以及微裂纹扩展的微小损伤,并未出现明显的分层损伤。

当冲击能量达到 63 J 和 90 J 时,玻璃纤维层合板载荷-时间曲线振

荡幅度并未发生明显增加,而芳纶纤维层合板载荷-时间曲线出现了剧烈的振荡。即玻璃纤维层合板的损伤程度未发生明显变化,而芳纶纤维层合板内部出现了明显的分层损伤。两者均出现了明显的临界分层载荷,说明试件内部分层损伤开始发生。

当冲击能量达到 117 J 时,玻璃纤维层合板载荷-时间曲线载荷振荡幅度明显增加,而芳纶纤维层合板载荷-时间曲线载荷振荡的更剧烈。二者均在达到最大载荷后骤降,此时试件背部出现明显裂纹,部分出现纤维断裂的情况,可以发现芳纶纤维层合板损伤更为严重。

为了进一步研究同种工艺下两种纤维制成层合板的抗冲击性能,选择载荷-时间曲线上的临界冲击载荷以及最大冲击载荷进行讨论。

由图 8 可知,临界分层载荷和冲击能量的关系并不大,在能量较低时,芳纶纤维层合板发生起始分层所需的能量高于玻璃纤维;在能量较高时则相反。在整个冲击试验能量范围内,最大冲击载荷与冲击能量呈正相关,且芳纶纤维层合板的最大冲击载荷略低于玻璃纤维层合板,随着冲击能量的增加,二者间的差距增大。

在图 9 中,冲击能量为 36 J 时,两种层合板位移达到最大值的时刻非常接近,说明该冲击能量下两种试件几乎同时发生最大面外变形,而在 63 J、90 J、117 J 时,芳纶纤维层合板最大位移时刻大于玻璃纤维。在低能量时两种材料的吸能能力相近,在能量较高时芳纶纤维有更优的吸能能力,表现在通过更多次数的纤维断裂或分层来吸收能量。

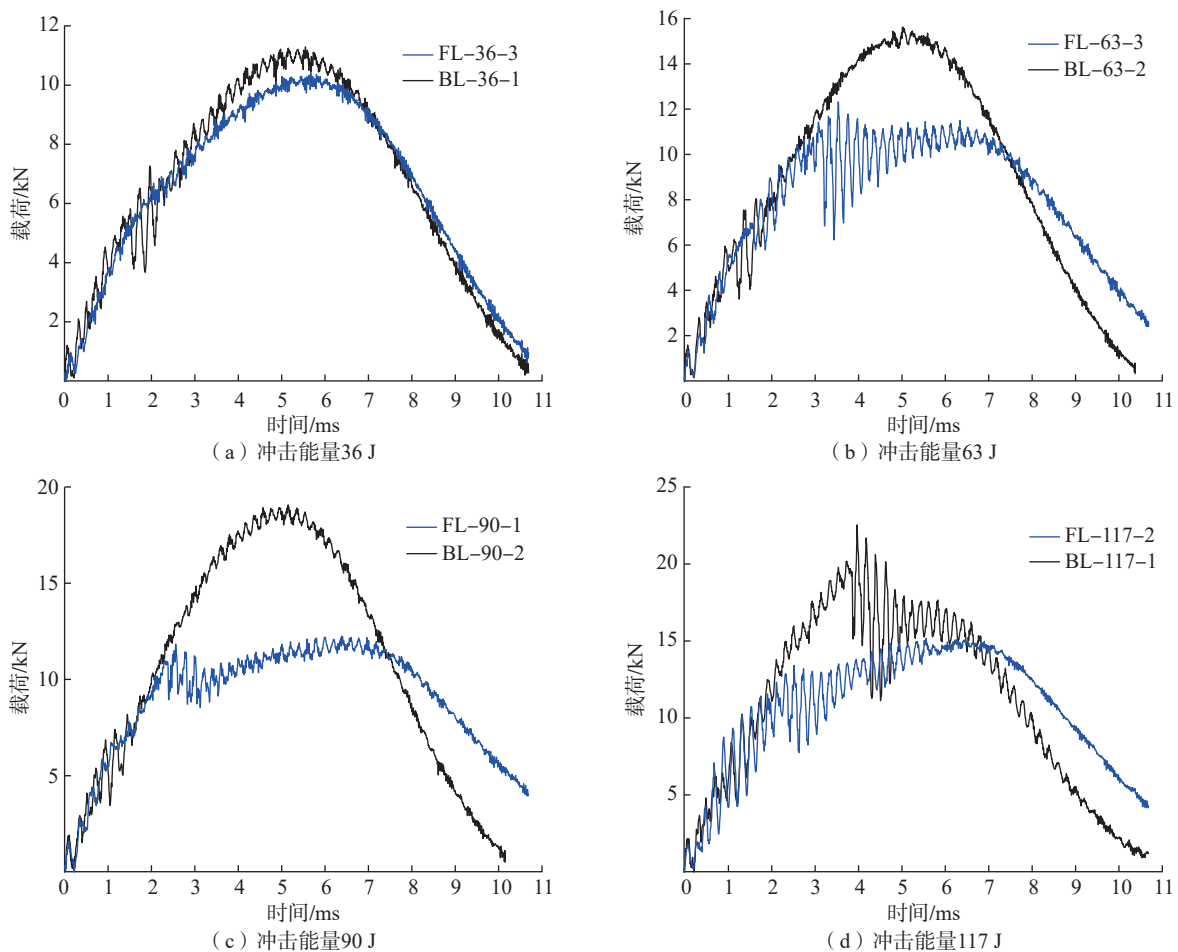


图 7 单一冲击能量下玻璃/芳纶纤维试件载荷-时间曲线

Fig.7 Load-time curve of glass/aramid fibre specimens under single impact energy

另外,冲击能量增加与最大位移时刻呈线性关系,冲击能量越高,材料发生最大面外变形的时间更长,对试件造成的破坏更严重。冲击能量

为 63 J、90 J、117 J 时,两种层合板最大冲击载荷比最大冲击变形先出现,这意味着在达到最大冲击载荷后试件并没有出现反弹,试件面外变形继

续增加,冲击载荷反而出现了下降,造成这种现象的原因是高能量冲击后试件损伤,随后发生严重的刚度退化。而在低能量 36 J 时,冲击头回弹较快,且试件损伤程度小,几乎没有出现刚度退化。同时,在冲头达到最大位移后,玻璃纤维试件冲头反弹更为快速,可以推断出玻璃纤维试件刚度退化程度要低于芳纶纤维试件,即后者冲击损伤比前者更严重,吸收了更多的能量。

4.2 冲击载荷位移曲线

图 10 展示了在 4 种不同冲击能量下两种层合板的载荷-位移曲线,曲线的包围面积随着冲击能量的增加而增加。由于试件出现刚度退化,曲线斜率在到达临界分层载荷之后有减小的趋势,在曲线到达最大冲击载荷之前,芳纶纤维层合板斜率明显低于玻璃纤维层合板,即芳纶纤维层合板的弯曲模量较低。冲击能量较高时,曲线在最大冲击载荷附近出现了剧烈振荡且迅速下降,此时试件损伤扩展最为严重,刚度退化十分明显。

当冲头达到最大位移后发生反弹,试件的弹性应变能得以释放,造成冲击头反向运动。当冲击头回弹

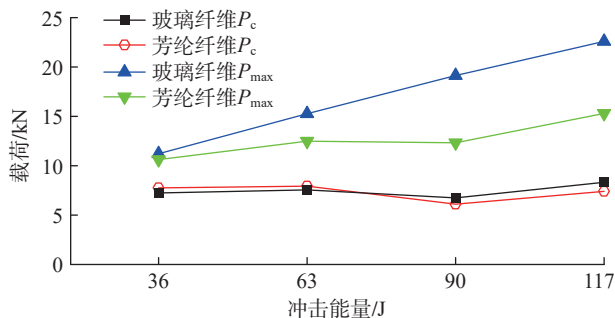
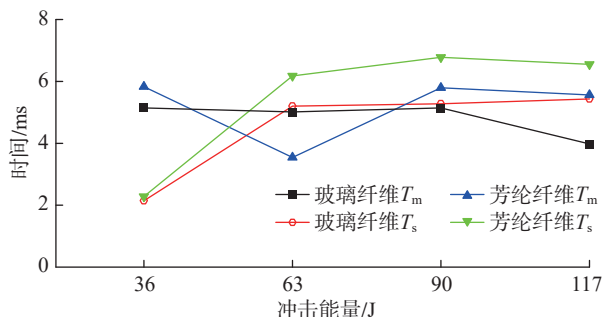


图 8 4 种冲击能量下临界分层载荷与最大冲击载荷变化图

Fig.8 Variation diagram of critical delamination load versus maximum impact load under four kinds of impact energy



注: T_m 为载荷达到最大值时对应的时刻; T_s 为位移达到最大值时对应的时刻。

图 9 4 种冲击能量下临界分层载荷与最大冲击载荷的时间图

Fig.9 Time diagram of critical delamination load versus maximum impact load under four kinds of impact energy

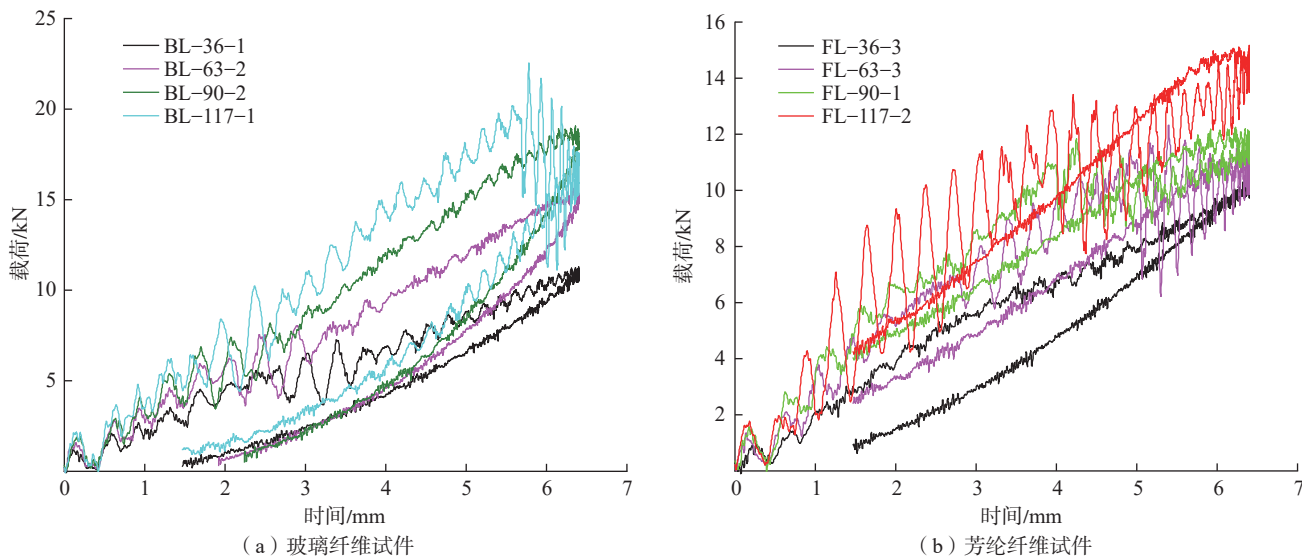


图 10 4 种冲击能量下试件载荷-位移曲线

Fig.10 Load-displacement curves of specimens under four kinds of impact energy

到一定位置时,此时的载荷明显低于在冲击加载阶段同一位置对应的载荷,因为试件在经历最大冲击载荷之后出现一定的刚度退化,并且冲击能量越大,前后两次载荷差距越大,回弹阶段曲线的斜率有增大的趋势。因为能量越高试件受损程度越大,吸收的冲击能量就越大,曲线围成的包络面积就越大。对于芳纶纤维层合板载荷-位移曲线来说,其形状类似“∞”型,并且曲线在达到最大位移后回弹时的斜率相近,这是因为芳纶纤维层合板的刚度较差,在冲击能量较高时容易被穿透,因此在回弹时试件的剩余刚度几乎在一个固定的数值附近。

在图 11 中观察不同冲击能量下的载荷-位移曲线,冲击能量为 36 J 时,未达到最大冲击载荷。同一时

刻,玻璃纤维层合板的冲击载荷总是大于芳纶纤维层合板。在达到最大冲击载荷后,出现了相反情况,因为达到最大冲击载荷之后,芳纶纤维层合板内部损伤更严重,吸收了更多能量,表现为层合板的分层破坏,最终背面出现裂纹,甚至贯穿失效。并且,玻璃纤维层合板的面外变形总是小于芳纶纤维层合板。两种层合板的载荷-位移曲线最大区别在于曲线的线型不同,可以看出玻璃纤维层合板的刚度更好,而芳纶纤维层合板具有更优的吸能效果。

4.3 冲击能量曲线

在整个试验过程中,由于试件被不断侵蚀,冲头速度不断减小,在冲击载荷未达到最大载荷之前,冲击头的动能被转化成试件的弹性应变能,在能量-时间曲线中具体表现为曲

线的快速上升,当达到试件局部强度时,一部分能量通过不可逆损伤,诸如纤维断裂、分层等的形式被耗散。当试件变形程度达到最大时,冲击头也达到最大位移所在位置,此时冲击头的速度降低到 0。进一步地,之前存储在试件内部的动能以弹性应变能的形式传回给冲击头,再次获得动能的冲头速度不断变大并且逐渐离开试件表面,冲击头的能量得到进一步释放,能量-时间曲线开始逐渐下降并且逐渐趋于平稳。所有试验曲线的能量峰值并没有达到试验预设能量值,这是因为在试验过程中,冲头接触试件时,试验设备夹具和试件振动时所产生的阻尼耗散掉了一部分冲头携带的能量。

图 12 统计了两种试件在 4 种冲击能量下的能量吸收情况。可以看

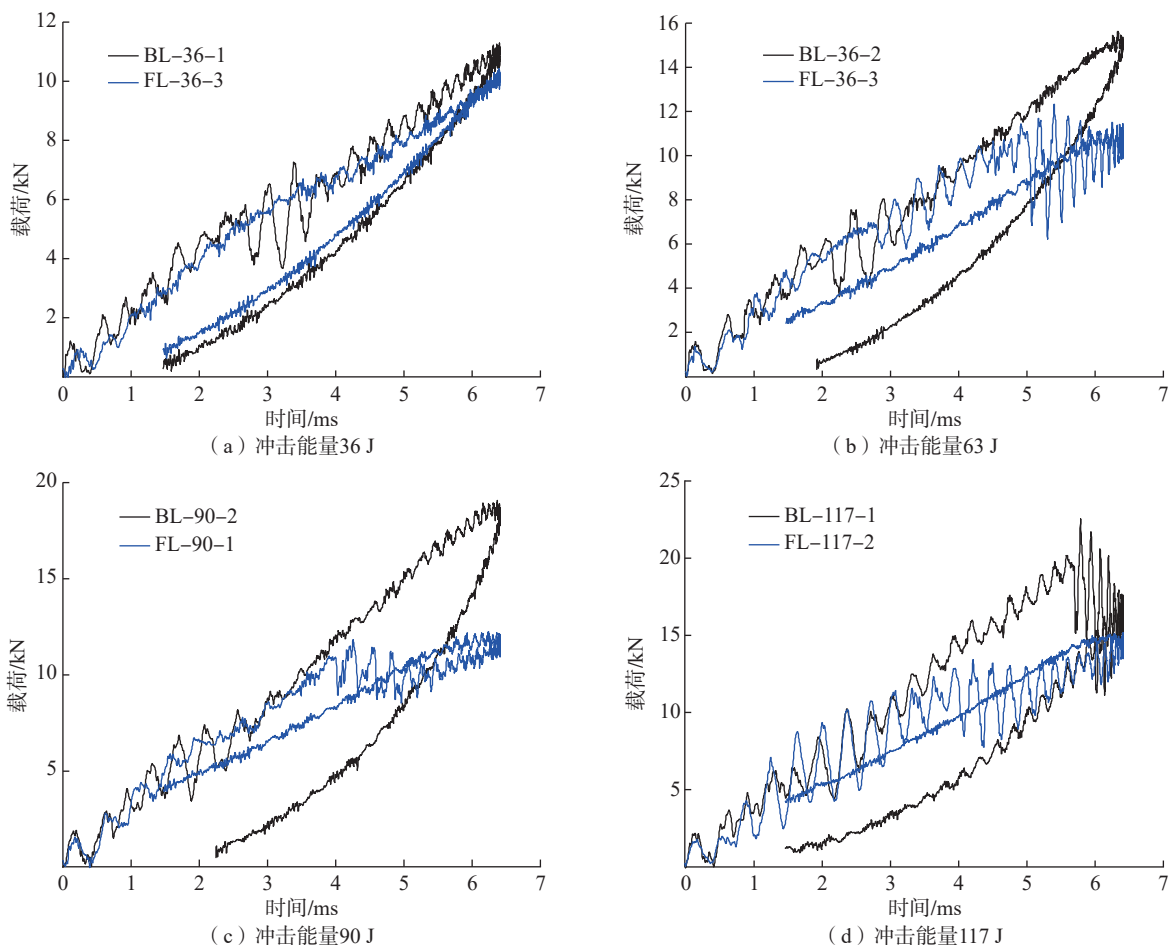


图 11 单一冲击能量下玻璃/芳纶纤维试件载荷-位移曲线

Fig.11 Load-displacement curve of glass/aramid fibre specimens under single impact energy

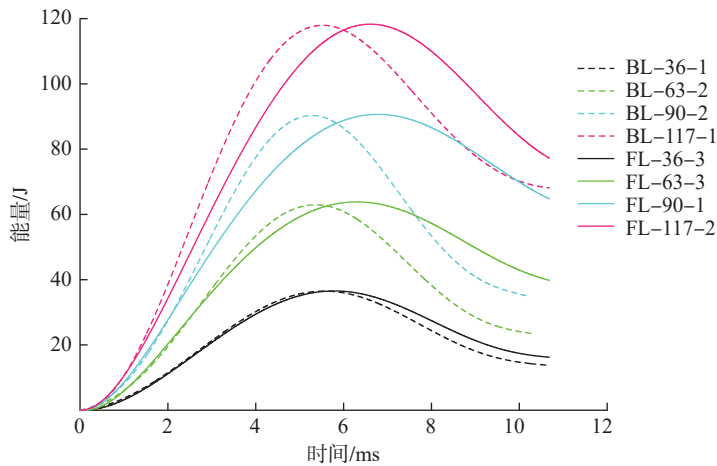


图 12 4 种冲击能量下玻璃 / 芳纶纤维试件能量吸收曲线

Fig.12 Energy absorption curves of glass/aramid fibre specimens under four kinds of impact energy

出随着冲击能量的增加,玻璃纤维层合板和芳纶纤维层合板吸收的能量均增加。在能量较低时(36 J),两种层合板能量吸收曲线基本重合,这是因为此时试件内部的损伤以基体损伤为主,纤维的强化作用并未表现出明显的差异,冲击能量仅吸收了 60% 左右。当冲击能量较高时,两种材料层合板内部损伤的表现形式不同,试件出现了不同程度的刚度退化,因此能量吸收曲线在弹性应变能释放阶段表现的水平不同。对于玻璃纤维而言,在冲击能量为 63 J、90 J 时,玻璃纤维层合板吸收的能量基本在 60% 左右。而当冲击能量为 117 J 时,玻璃纤维层合板吸收的能量降到 40% 左右,这说明在冲击能量小于 90 J 时,玻璃纤维层合板受冲击力的破坏形式以基体损伤、纤维断裂和分层为主,冲击能量还未达到其损伤容限,层合板还可以继续发挥其吸能作用。而当冲击能量大于 90 J 时,玻璃纤维层合板易出现穿透破坏的损伤形式,此时层合板已经不能再继续吸收能量承受载荷。对于芳纶纤维而言,在冲击能量为 63 J、90 J、117 J 时,芳纶纤维层合板吸收的能量降至 40% 左右,这是因为芳纶纤维的韧性较大,制成的层合板刚度较低,在能量较高时层合板内部纤维大量断裂,导致其刚度下降,表现在试件

表面的损伤有大裂纹、贯穿破坏等。

5 结论

本文主要对芳纶纤维和玻璃纤维层合板低速冲击响应过程以及试件的损伤程度进行了分析。通过落锤冲击系统开展低速冲击试验,研究两种材料制成的层合板在不同冲击能量下的响应情况。主要通过凹坑深度、损伤面积、载荷-时间曲线、载荷-位移曲线、位移-时间曲线和能量吸收曲线对冲击响应过程进行深入分析,得到如下结论。

(1) 对于芳纶纤维层合板而言,当能量较低时,层合板正面受冲击点附近只有一个很浅的凹坑,试件的损伤以基体开裂为主。冲击能量增加,凹坑深度增加,试件背面出现纤维断裂和明显裂纹,内部出现分层损伤,最后直至穿透失效。对于玻璃纤维层合板而言,层合板受冲击面出现十字形裂纹的损伤,随着冲击能量的增加,裂纹的长度逐渐增加。试件背部的损伤表现为一个明显的白色半透明区域,中心会出现少许纤维断裂,随着冲击能量的增加,纤维断裂的数量也会增加,在冲击能量为 117 J 时甚至出现了轻微的穿透现象。

(2) 两种材料在低速冲击下的凹坑深度变化趋势基本相近,深度随着冲击能量线性增加。玻璃纤维层

合板受低速冲击后的凹坑深度明显小于芳纶纤维。

(3) 随着冲击能量的增加,两种层合板冲击载荷-时间曲线的初始斜率、振荡频率和幅度均增加,且最大载荷与冲击能量呈正相关。芳纶纤维层合板的最大冲击载荷略低于玻璃纤维层合板,且两者差距随冲击能量增加而增大。

(4) 在低能量冲击下,芳纶纤维和玻璃纤维层合板的吸能能力相近。但在高能量冲击下,芳纶纤维层合板通过更多次数的纤维断裂或分层展现更优的吸能能力,尽管其刚度较低,但凭借良好的吸能效果,仍适宜作为机匣包容环的内衬层材料。

参考文献

- [1] 谭毅,杨书仪,左建华,等. 面向包容性的航空发动机机匣研究综述[J]. 航空工程进展, 2022, 13(6): 17-28.
- [2] TAN Yi, YANG Shuyi, ZUO Jianhua, et al. Review of aero-engine casing containment research[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2022, 13(6): 17-28.
- [3] The Aviation Herald. Accident: American MD83 at New York on Mar 11th 2009, uncontained engine failure[EB/OL]. (2009-05-12)[2021-10-21]. <https://avherald.com/h?article=41650f96>.
- [4] The Aviation Herald. Accident: Southwest B737 near Pensacola on Aug 27th 2016, uncontained engine failure[EB/OL]. (2016-08-27)[2021-10-21]. <https://avherald.com/h?article=49d2d7e3&lang=en>.
- [5] The Aviation Herald. Accident: American B763 at Chicago on Oct 28th 2016, rejected takeoff, fire at right hand wing due to uncontained engine failure[EB/OL]. (2018-02-06)[2021-10-21]. <https://avherald.com/h?article=49ffa115>.
- [6] The Aviation Herald. Accident: Southwest B737 near Philadelphia on Apr 17th 2018, uncontained engine failure takes out passenger window[EB/OL]. (2018-04-17)[2021-10-21]. <https://avherald.com/h?article=4b7725fb>.
- [7] SHARMA S, PATHAK A K, SINGH V N, et al. Excellent mechanical properties of long multiwalled carbon nanotube bridged Kevlar fabric[J]. Carbon, 2018, 137: 104-117.

- [7] CHAKRABORTY D, SAHA S, DEY S, et al. Enhanced mechanical toughness of carbon nanofibrous-coated surface modified Kevlar reinforced polyurethane/epoxy matrix hybrid composites[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2020, 137(33): 48802.
- [8] 宋宇翔. 玻璃纤维增强复合材料铣削性能的研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2023.
- SONG Yuxiang. Research on milling performance of glass fibre reinforced composites[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2023.
- [9] BOUKAR A, CORN S, SLANGEN P R L, et al. Finite element modelling of low velocity impact test applied to biaxial glass fiber reinforced laminate composites[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2022, 165: 104218.
- [10] SHAARI N, NADARAJAH D, et al. Impact strength of glass/Kevlar fiber hybrid composites with various stacking sequences and impact energies[J]. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 2019, 8(6): 4286-4293.
- [11] 伍悦玥, 吴铠, 王萍, 等. 芳纶平纹机织/非织造混杂结构复合材料低速冲击性能的有限元分析[J]. *产业用纺织品*, 2023, 41(6): 30-41.
- WU Yueyue, WU Kai, WANG Ping, et al. Finite element analysis of low-velocity impact properties of aramid plain woven/nonwoven hybrid structural composites[J]. *Technical Textiles*, 2023, 41(6): 30-41.
- [12] 牟浩蕾, 李仪, 宋东方, 等. 芳纶平纹编织复合材料平板弹道冲击特性及损伤分析[J]. *复合材料科学与工程*, 2024(1): 89-97, 104.
- MOU Haolei, LI Yi, SONG Dongfang, et al. Ballistic impact characteristics and damage analysis of aramid plain woven composite plates[J]. *Composites Science and Engineering*, 2024(1): 89-97, 104.
- [13] 孙颖, 史宝会, 李涛涛, 等. 芳纶/高强聚乙烯纤维混杂复合材料低速冲击实验研究[J]. *固体火箭技术*, 2016, 39(5): 709-714.
- SUN Ying, SHI Baohui, LI Taotao, et al. Experimental research on the impact properties of aramid/UHMWPE fiber hybrid composite laminates[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2016, 39(5): 709-714.
- [14] 魏程, 王威力, 吴伟萍, 等. 复合材料/硬质泡沫夹层结构的低速冲击损伤研究[J]. *纤维复合材料*, 2023, 40(1): 33-35, 44.
- WEI Cheng, WANG Weili, WU Weiping, et al. Low-speed impact damage in composite/foam sandwich structures[J]. *Fiber Composites*, 2023, 40(1): 33-35, 44.
- [15] ROY P A, MEGUID S A. Containment and arrest of blade shedding in gas turbine engines using novel dual-ring design[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2021, 143(7): 071015.
- [16] 刘志强, 鞠晓蓉, 宣海军, 等. 高能转子轮盘包容机理和包容环结构优化[J]. *高压物理学报*, 2022, 36(6): 70-76.
- LIU Zhiqiang, JU Xiaorong, XUAN Haijun, et al. Containment mechanism and structural optimization research for disk containment of high-energy rotor[J]. *Chinese Journal of High Pressure*, 2022, 36(6): 70-76.
- [17] 宋曼丽. 三维编织/机织复合材料机匣包容性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
- SONG Manli. Inclusive research on three-dimensional woven/woven composite magazine[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020.
- [18] 范晓敬. U形截面包容环包容性仿真研究与结构优化研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
- FAN Xiaojing. Inclusive simulation study and structural optimisation of U-shaped cross-section accommodating ring[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021.
- [19] BHUDOLIA S K, JOSHI S C. Low-velocity impact response of carbon fibre composites with novel liquid Methylmethacrylate thermoplastic matrix[J]. *Composite Structures*, 2018, 203: 696-708.
- [20] CANTWELL W J, CURTIS P T, MORTON J. An assessment of the impact performance of CFRP reinforced with high-strain carbon fibres[J]. *Composites Science and Technology*, 1986, 25(2): 133-148.
- [21] CARTIÉ D D R, IRVING P E. Effect of resin and fibre properties on impact and compression after impact performance of CFRP[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2002, 33(4): 483-493.
- [22] ZHANG X, HOUNSLOW L, GRASSI M. Improvement of low-velocity impact and compression-after-impact performance by z-fibre pinning[J]. *Composites Science and Technology*, 2006, 66(15): 2785-2794.

Research on Low-Speed Impact Performance of Containment Ring of Composite Casing for Aero-Engine

LIU Weiwei¹, HOU Jiahao¹, WANG Zhanxi¹, SANG Chen¹, JIN Kexin²

(1. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. Beijing Remote Sensing Equipment Research Institute, Beijing 110000, China)

[ABSTRACT] In this paper, the damage forms and failure mechanisms of two kinds of composite materials, aramid fibres and glass fibres, used for the casing containment ring under different impact energy are investigated through low-speed impact tests. The test results show that when the impact energy is 36 J, the energy absorption capacity of aramid fibre and glass fibre composites is similar, and the damage of the two kinds of composites is dominated by matrix cracking. When the impact energy is increased to 117 J, the failure forms of the composites are mainly in the form of fibre tensile fracture and delamination damage, and the aramid fibre composites show better energy-absorbing ability through fibre fracture and delamination under high energy impact.

Keywords: Composites; Casing containment ring; Low velocity impact; Aramid fiber; Glass fiber

(责编 七七)