

文章编号:1674-8190(2018)04-599-04

层间混杂层合板弹道冲击损伤对比研究

陈战辉, 万小鹏, 王文智, 李沛城

(西北工业大学 航空学院, 西安 710072)

摘要: 降低树脂基碳纤维层合板的弹道冲击损伤范围对降低飞行器的易损性有重要意义。分别对表面铺覆玻璃纤维和芳纶纤维构成层间混杂的复合材料层合板进行气炮冲击试验, 运用超声无损检测方法测量层合板的弹道冲击损伤范围, 并进行对比研究。结果表明: 与非混杂层合板相比, 给碳纤维层合板表面铺覆玻璃纤维或芳纶纤维均可减小弹道冲击穿透性损伤的范围, 混杂玻璃纤维效果更好, 但混杂界面均容易发生大范围分层损伤, 应避免将玻璃纤维等韧性铺层铺覆在冲击背面。

关键词: 玻璃-碳纤维增强环氧树脂材料; 芳纶-碳纤维增强环氧树脂材料; 层间混杂复合材料层合板; 弹道冲击损伤; 实验研究

中图分类号: V257

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2018.04.019

An Experimental Investigation on the Damaged Behavior of Hybrid Composite Laminates under Ballistic Impact

Chen Zhanhui, Wan Xiaopeng, Wang Wenzhi, Li Peicheng

(School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: The aim of this paper is to investigate the impact damaged behavior of hybrid composite laminates under bullet impact, a series of glass-carbon/epoxy and Kevlar-carbon/epoxy inter laminated hybrid plates are tested by using steel projectile propelled by gas gun, and the damage zones is inspected by use of ultrasonic non-destructive test method. Through the analysis of the experimental results obtained, some understandings of the regularity are obtained as follows: compared with the common composite laminates, hybrid composite laminates could improve the impact damage resistant performance observably. Furthermore, the glass-carbon/epoxy hybrid plates show a better effect in reducing the damage zone than the Kevlar-carbon/epoxy plates. But the delamination propagation happened between the layers of different materials, the stacking sequence should be further considered.

Key words: glass-carbon/epoxy; Kevlar-carbon/epoxy; inter laminated hybrid composites; ballistic impact damage; experimental investigation

0 引言

碳纤维复合材料层合板是飞行器常用的复合材料结构形式。在砂石、弹丸、战斗部破片等的高速冲击下形成的层合板弹道冲击损伤严重影响着

飞行器的结构安全。

20世纪90年代以来,研究人员以混杂效应系数为依据,发现玻璃纤维和芳纶纤维对碳纤维层合板冲击韧性有着较为明显的提高^[1-3]。近年来,利用混杂效应提高层合板抗冲击特性的铺层设计与优化工作仍在持续进行。这些研究发现,不同材料体系与混杂位置对层合板冲击阻抗特性均有影响^[4-8]。采用芳纶纤维、玻璃纤维、高强聚乙烯纤维等增强材料形成混杂层合板是提高碳纤维层合板抗冲击能力的一种有效方法。

收稿日期:2018-04-20; 修回日期:2018-07-03

基金项目:上海航天科技创新基金(2018ME010128)

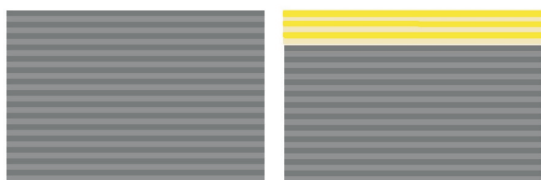
通信作者:陈战辉, sanlang867@sohu.com

然而,已有研究或集中于对层合板材料低速冲击响应的分析^[1-5],或以提高防弹效果为目标,以冲击物速度衰减百分比、靶板吸收的总能量和弹道极限速度等作为抗冲击能力的表征参数^[6-10],而对混杂层合板自身的损伤模式及程度却不甚关注。

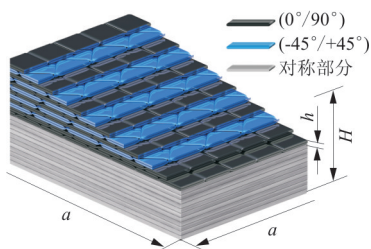
本文以降低碳纤维复合材料层合板弹道冲击损伤范围为目标,以空气炮为工具对表面铺覆韧性材料的层合板进行弹道冲击试验;以入射面、出射面和分层的损伤范围作为损伤程度的标志,对比分析表面层间混杂玻璃纤维与芳纶纤维对碳纤维树脂基复合材料层合板弹道冲击损伤程度的影响,并从损伤机理出发对试验结果出现差别的原因进行分析。

1 复合材料层合板弹道冲击试验

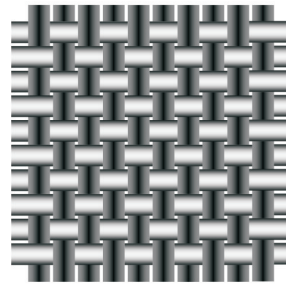
以树脂基碳纤维编织层合板为基础,通过给其表面分别铺覆玻璃纤维编织铺层和芳纶纤维编织铺层形成两种层间混杂复合材料层合板,用非混杂碳纤维层合板作为对照试件。所有试件厚度均为5 mm,其中混杂铺层厚度根据文献^[11]取为推荐厚度的最小值1 mm,基体材料为环氧树脂,采用真空辅助树脂渗透成型工艺制成。其混杂方式如图1(a)所示;各种纤维织物均采用 $0^\circ/90^\circ$ 和 $-45^\circ/+45^\circ$ 铺层交叠,试验件铺层结构如图1(b)所示;织物均为平纹编织预浸料,编织纹理如图1(c)所示。利用一级气炮进行弹道冲击试验,所用弹丸均为8 g钢质圆柱,其直径为7.7 mm,冲击试验初速度范围为200~400 m/s,速度方向与靶板垂直。试验件所用增强材料型号分别是:碳纤维为T-300,玻璃纤维为S-2,芳纶纤维为Kevlar-49,其拉伸力学性能如表1所示^[2]。



(a) 混杂方式



(b) 试验件铺层结构



(c) 平纹编织预浸料纹理

图1 试验件的铺层组成示意图

Fig. 1 Schematic of trial targets's layers structure

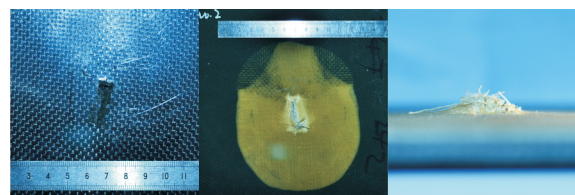
表1 三种纤维材料的拉伸力学性能参数

Table 1 Properties and parameters of three materials

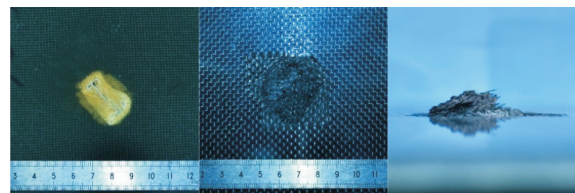
纤维类型	拉伸强度/MPa	拉伸模量/GPa	断裂应变/%
T-300	2 870	230	1.2
S-2	2 760	85	3.3
Kevlar-49	2 950	122	2.4

2 试验结果及对比分析

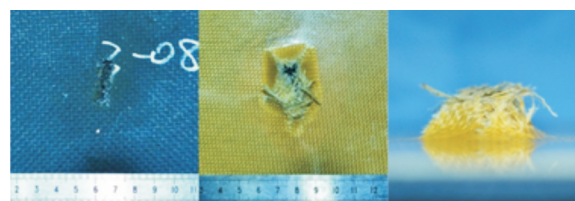
弹丸分别从混杂层合板的两个面冲击,其典型穿透性损伤情况如图2所示,从左至右依次为入射面、出射面和损伤的侧视情况。



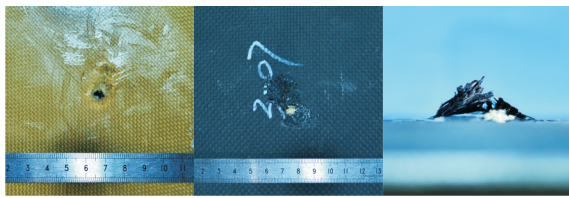
(a) 弹丸从玻璃纤维混杂板的碳纤维面入射



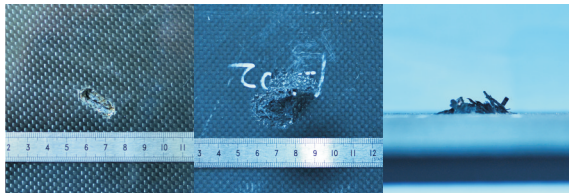
(b) 弹丸从玻璃纤维混杂板的玻璃纤维面入射



(c) 弹丸从芳纶纤维混杂板的碳纤维面入射



(d) 弹丸从芳纶纤维混杂板的芳纶纤维面入射

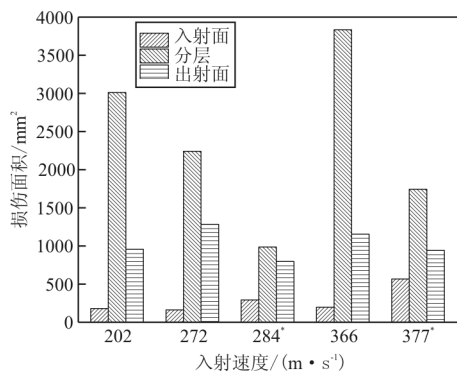


(e) 非混杂层合板

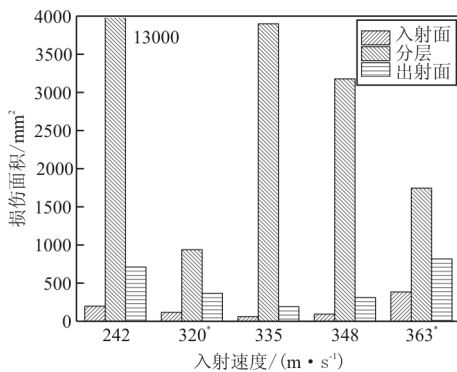
图 2 层合板弹道冲击穿透损伤典型外貌

Fig. 2 Typical appearances of penetrating damage in composite laminates under ballistic impact

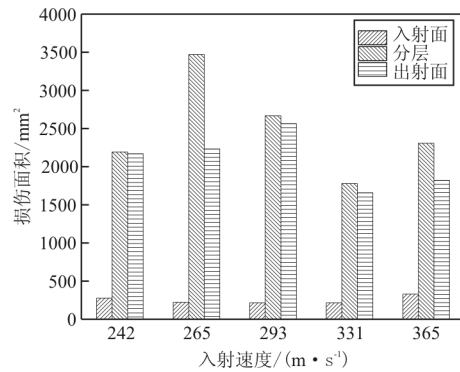
对冲击损伤后的试验件进行水浸超声 C 扫描,确定其内部分层范围,对两种混杂试验件和非混杂对照试验件的入射面和出射面的表面损伤面积及分层损伤面积分别进行测量,不同弹丸入射速度下损伤面积的大小如图 3 所示。



(a) 芳纶纤维混杂层合板的损伤程度



(b) 玻璃纤维混杂层合板的损伤程度



(c) 非混杂层合板的损伤程度

图 3 不同速度下三种层合板的损伤程度对比

Fig. 3 Comparison for three damage zones under different impact velocities

速度值带 * 号的数据为弹丸从芳纶或玻璃纤维一侧入射,其余均为从碳纤维侧入射。图 3(b)中,速度 242 m/s 时试件的分层面积为 13 000 mm²,为了协调将其截断显示。

从图 3 可以看出:在试验条件下,表面铺覆芳纶纤维和玻璃纤维均可使弹道冲击损伤出射面的损伤范围大幅缩小,大部分入射面的损伤范围也有所降低。其原因是:冲击试验中靶板背面的材料在弹丸冲击下发生拉伸破坏,玻璃纤维和芳纶纤维的韧性较好,其拉伸断裂应变分别为 3.3% 和 2.4%,均高于碳纤维的 1.2%^[1];混杂层合板受冲击时,拉伸断裂应变低的碳纤维首先发生断裂破坏,其断裂成短纤维后,仍能在刚度和强度上发挥一定作用,并产生多次断裂,吸收更多的冲击能量^[12]。因此,混杂韧性铺层提高了层合板的整体断裂应变,抑制了冲击背面的裂纹扩展,冲击背部损伤区域明显减小。

试验表明,混杂铺层材料特性对冲击损伤具有显著影响。从图 3(a)和图 3(b)可以看出:入射面和出射面铺覆玻璃纤维时,弹道冲击的损伤范围都较铺覆芳纶纤维铺层结构小,这与“玻璃纤维对碳纤维层合板韧性的改善效果优于芳纶纤维”的结论^[2]相一致,这主要是由于玻璃纤维和芳纶纤维刚度特性的差异所导致的^[13-14]。虽然 S-2 玻璃纤维断裂应变比芳纶大,但拉伸强度和拉伸模量均比碳纤维和芳纶小,且对应变率敏感性强,无屈服现象。铺覆在出射面的玻璃纤维更容易产生拉断破坏,从而失去承载能力,其层内损伤范围相对较小,对末速度影响也较弱;而芳纶纤维由于垂直纤维轴向的

分子间的力很弱,受拉时会劈裂为更细的微纤维,不容易直接断裂,因此层内损伤范围相对较大。

与将韧性铺层铺覆在出射面相比,弹丸从铺覆韧性铺层面入射时分层损伤范围相对较小。其原因是:韧性铺层位于出射面时,弹丸穿透碳纤维层之后,推着混杂铺层向前方变形,界面上产生拉应力,两种铺层刚度不同,变形不协调。当面外拉应力大于混杂面的抗拉强度时,混杂面上就会出现分层。而弹丸从韧性材料铺层面入射时,冲击背面的碳纤维铺层刚度较大,限制了韧性材料的拉伸变形,故界面分层相对较小。

图3(a)、图3(b)与图3(c)相比,分层损伤面积有的变大的有的变小,表明混杂韧性铺层对降低分层损伤不一定有效。

对混杂层合板冲击损伤试验件进行超声B扫描,玻璃纤维铺层在出射面时的B扫描结果如图4所示,可以看出:大范围分层损伤发生在混杂界面,在使用混杂方式降低层合板弹道冲击损伤的设计中,应特别关注混杂界面的分层问题。

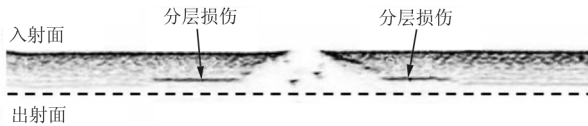


图4 混杂玻璃纤维层合板分层区域超声B扫描图片

Fig. 4 Corresponding B-scan results near the delamination zone of the glass-carbon/epoxy hybrid plates

3 结 论

(1) 在树脂基碳纤维层合板表面混杂芳纶或玻璃等延伸性好的纤维铺层,可以减小层合板的穿透性冲击损伤范围,有利于降低飞行器复合材料层合板结构的损伤程度。

(2) 弹道冲击作用下,混杂层合板的混杂界面容易产生分层损伤。当玻璃纤维铺覆在出射面时,混杂界面分层尤为严重。

(3) 与混杂芳纶相比,在树脂基碳纤维层合板入射面混杂玻璃纤维铺层能更好的减小冲击损伤范围。

参考文献

[1] 张佐光,宋焕成. 混杂纤维复合材料的冲击特性[J]. 航空学报, 1989, 10(5): 268-273.
Zhang Zuoguang, Song Huancheng. The impact properties

of hybrid composites[J]. Aeronautica et Astronautica Sinica, 1989, 10(5): 268-273. (in Chinese)

- [2] 张佐光,宋焕成. 混杂化是改善CFRP韧性的有效途径[J]. 北京航空航天大学, 1990(4): 71-77.
Zhang Zuoguang, Song Huancheng. Hybridizing-a effective way of improving CFRP toughness[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1990(4): 71-77. (in Chinese)
- [3] 宋焕成,张佐光. 混杂纤维复合材料的界面[J]. 北京航空航天大学, 1990(4): 17-21.
Song Huancheng, Zhang Zuoguang. Interface of hybrid composite[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1990(4): 17-21. (in Chinese)
- [4] Metin Sayer, Numan B Bektas, Onur Sayman. An experimental investigation on the impact behavior of hybrid composite plates[J]. Composite Structures, 2010(92): 1256-1262.
- [5] 赵士成,王振清,郭建明,等. 混杂方式对CF/GF/环氧混杂复合材料低速冲击性能的影响[J]. 哈尔滨工程大学, 2015, 36(11): 1476-1480.
Zhao Shicheng, Wang Zhenqing, Guo Jianming, et al. Effect of hybrid style on the performance of CF/GF/epoxy hybrid composites subjected to low-velocity impact [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2015, 36(11): 1476-1480. (in Chinese)
- [6] 金子明,隋金玲,张菡英,等. 纤维增强复合防弹板研究进展及抗弹性能研究[J]. 玻璃钢, 2001(1): 1-6.
Jin Ziming, Sui Jinling, Zhang Hanying, et al. The development of fiber-reinforced composites armor and bullet-proof property study[J]. Fiber Reinforced Plastics, 2001(1): 1-6. (in Chinese)
- [7] 梅志远,朱锡,刘燕红. 混杂纤维增强材料板抗侵彻数值仿真及实验验证[J]. 兵工学报, 2003, 24(3): 373-377.
Mei Zhiyuan, Zhu Xi, Liu Yanhong. Numerical simulation on the penetration of hybrid fibre reinforced composite laminates by fragments and its experimental verification[J]. Acta Armamentarii, 2003, 24(3): 373-377. (in Chinese)
- [8] 梅志远,谭大力,朱锡,等. 层合板抗弹混杂结构优化试验研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2005, 28(4): 38-40.
Mei Zhiyuan, Tan Dali, Zhu Xi, et al. Experimental study on the structure optimization of anti-ballistic composite laminates [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2005, 28(4): 38-40. (in Chinese)
- [9] 王晓强,朱锡,梅志远. 纤维增强复合材料抗侵彻研究综述[J]. 玻璃钢/复合材料, 2008(5): 47-56.
Wang Xiaoqiang, Zhu Xi, Mei Zhiyuan. The development of fiber-reinforced composites under ballistic impact[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2008(5): 47-56. (in Chinese)
- [10] Aswani Kumar Bandaru, Lakshmi Vetiyatil, Suhail Ahmad. The effect of hybridization on the ballistic impact behavior of hybrid composite armors[J]. Composites Part B, 2015(76): 300-319.

50-54. (in Chinese)

- [8] 索双富, 邢敏杰, 薛庆, 等. W形金属密封环轴向刚度影响因素研究[J]. 润滑与密封, 2016, 41(2): 15-17.
Suo Shuangfu, Xing Minjie, Xue Qing, et al. Research on effect factors of axial stiffness of metallic W-ring[J]. Lubrication and Sealing, 2016, 41(2): 15-17. (in Chinese)
- [9] 崔晓杰. 金属密封技术的研究进展及密封机理分析[J]. 石油机械, 2011, 39(增刊1): 102-105, 108.
Cui Xiaojie. Metal sealing technology research progress and sealing mechanism analysis[J]. China Petroleum Machinery, 2011, 39(S1): 102-105, 108. (in Chinese)

(上接第 584 页)

- [15] 李锋, 白鹏. 飞行器低雷诺数空气动力学[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2017.
Li Feng, Bai Peng. Aerodynamics of aircraft at low Reynolds number [M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2017. (in Chinese)

作者简介:

孙凯军(1986—),男,硕士,工程师。主要研究方向:飞行器气

作者简介:

陈京名(1991—),男,硕士研究生。主要研究方向:航空密封与润滑。

王云(1966—),男,博士,教授。主要研究方向:宇航推进理论。

李齐飞(1988—),男,硕士,高级工程师。主要研究方向:航空发动机密封设计、试验。

力宁(1967—),男,硕士,高级工程师。主要研究方向:航空发动机密封设计、试验。

(编辑:马文静)

作者简介:

(编辑:赵毓梅)

(上接第 602 页)

- [11] Alemi-Ardakani M, Milani A S, Yannacopoulos S. A rapid approach for predication and discrete lay-up optimization of glass fiber/polypropylene composite laminates under impact [J]. International Journal of Impact Engineering, 2015 (84): 134-144.
- [12] 黄博生, 商和财, 彭亚萍. 碳/玻混杂纤维的混杂效应及其受力性能研究[J]. 高科技纤维与应用, 2005, 30(6): 39-41.
Huang Bosheng, Shang Hecai, Peng Yaping. Study on the hybrid effect of fibers and the load-carrying capacity of concrete component wrapped with HFRP[J]. Hi-Tech Fiber & Application, 2005, 30(6): 39-41. (in Chinese)
- [13] Reddy P R S, Reddy T S, Madhu V, et al. Behavior of E-glass composite laminates under ballistic impact[J]. Materials and Design, 2015, 84: 79-86.
- [14] Jia Xin, Huang Zhengxiang, Zu Xudong, et al. Effect of mesoscale and multiscale modeling on the performance of

动布局设计、螺旋桨设计。

包晓翔(1990—),男,硕士,工程师。主要研究方向:飞行器气动布局设计。

付义伟(1980—),男,硕士,高级工程师。主要研究方向:飞行器气动布局设计。

Kevlar woven fabric subjected to ballistic impact: a numerical study[J]. Applied Composite Materials, 2013, 20(6): 1195-1214.

作者简介:

陈战辉(1977—),男,博士研究生。主要研究方向:飞行器复合材料结构设计。

万小鹏(1962—),男,博士,教授,博导。主要研究方向:飞行器结构设计等。

王文智(1984—),男,博士,副教授。主要研究方向:复合材料结构设计等。

李沛城(1987—),男,博士研究生。主要研究方向:飞行器复合材料结构设计。

(编辑:马文静)

(上接第 610 页)

methods of composite scarf repair for primary-load bearing structures[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2016, 88: 27-38.

作者简介:

刘星(1990—),男,硕士,助教。主要研究方向:飞行器设计和结构的力学性能测试技术。

刘斌(1986—),男,博士,助理研究员。主要研究方向:复合

材料胶接及胶接修理。

卢智先(1959—),男,高级实验师。主要研究方向:材料力学性能试验技术、疲劳与断裂。

赵桐(1989—),男,硕士,工程师。主要研究方向:高能束流加工技术。

(编辑:赵毓梅)