

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2017.06.020

弹击对环氧树脂/芳纶复合材料结构性能的影响*

李英建^{1,2}, 甄建军^{1,2}, 魏汝斌^{1,2}, 王慧军², 翟文^{1,2}, 李锋^{1,2}, 梁勇芳^{1,2}

(1. 山东三达科技发展有限公司, 济南 250031; 2. 山东非金属材料研究所, 济南 250031)

摘要:采用层压工艺制备了环氧树脂/芳纶纤维复合材料板,对复合材料板用12.7 mm弹道枪1.1 g碎片模拟弹进行抗弹测试。在弹击的相邻区域取样,测试弹击点附近材料拉伸性能和弯曲性能的变化,研究弹击对复合材料结构性能的影响。结果表明,弹击对环氧树脂/芳纶纤维复合材料的拉伸和弯曲性能有不同程度的影响,相对于拉伸性能,弯曲性能的下降幅度更大。相对于离弹击区域最远的部位,材料离弹击区域最近的部位拉伸强度和拉伸弹性模量分别降低了14.6%和6.4%,弯曲强度和弯曲弹性模量分别降低了45.3%和57.3%。距离弹击点30~60 mm外的区域,材料结构性能基本不受影响。

关键词:弹击;复合材料;结构性能;芳纶;环氧树脂

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2017)06-0101-04

Effect of Bullet Penetration on Structural Properties of Epoxy Resin/Aramid Composites

Li Yingjian^{1,2}, Zhen Jianjun^{1,2}, Wei Ruben^{1,2}, Wang Huijun², Zhai Wen^{1,2}, Li Feng^{1,2}, Liang Yongfang^{1,2}

(1. Shandong Sanda Scientific and Technological Development Co. Ltd., Jinan 250031, China;

2. Shandong Institute of Non-metallic Materials, Jinan 250031, China)

Abstract: Epoxy resin/aramid fiber composite plate was prepared by laminating process. The ballistic performance of the composite plate was tested by 12.7 mm ballistic gun with 1.1 g debris simulation bomb. The effects of bullet penetration on the structural properties of the composites were investigated by sampling the adjacent areas of the hammering, testing the tensile properties and bending properties of the material near the hammering point. The results show that the tensile properties and bending properties of the composites are affected to varying degrees after bullet penetration, the bending properties are decreased more seriously than the tensile properties. Compared with the area being farthest away from the hammering point, the tensile strength and tensile modulus of the area being nearest away from the hammering point are reduced by 14.6% and 6.4% respectively, and the flexural strength and flexural modulus are decreased by 45.3% and 57.3% respectively. At the region being more than 30–60 mm away from the hammering point, the structural properties of the composite is not affected.

Keywords: bullet penetration; composite; structural property; aramid; epoxy resin

结构复合材料具有强度高、刚度好、质轻,以及兼具一定防护性能的优点,被广泛应用于坦克、装甲车辆及警用车辆、方舱等设施中。芳纶复合材料是一种常用的结构复合材料,是由芳纶纤维(织物)增强树脂基体制成的一类复合材料,以其低密度、高强度、高模量、较宽的使用温度以及能自熄、不熔化、耐多种溶剂等优良特性而被广泛使用^[1-3]。与其它高性能纤维相比,芳纶纤维具有较好的综合力学性能,在相同面密度情况下,芳纶复合材料的抗弹能力是玻璃纤维复合材料的2~3倍,是钢的5倍左右,在防护能力相同的情况下,其质量比玻璃纤维复合材料可减少近1/3,在很多领域可全面替代玻璃纤维复合材料^[4-5]。

随着军事科学技术的发展,反装甲武器弹药毁

伤能力的不断提高,装甲车辆面临的威胁越来越大。在弹丸冲击芳纶纤维复合材料板时,纤维在高应变率下的失效应变会相应提高,进而能够明显提高破坏应变能,可吸收大量的冲击能量,但该结构材料受冲击损伤后,性能降低明显,容易出现“后破坏效应”^[6]。为了避免弹击后结构出现毁灭性的破坏,以提高坦克装甲车辆的生存能力,需要对结构损伤进行评估,为芳纶纤维复合材料结构抗战伤设计和修补技术提供依据和参考^[7]。

在受到弹击后,复合材料着弹点附近区域的结

* 国家重点研发计划项目(2016YFC0800300),山东省济南市天桥区科技发展计划项目(TQ201510)

联系人:翟文,研究员,主要从事高效抗冲击与功能防护材料研究

收稿日期:2017-03-20

构性能会受到一定影响。考虑到拉伸性能和弯曲性能是结构复合材料力学性能的典型体现形式,较高的拉伸、弯曲性能对保证复合材料结构件整体性能的稳定发挥具有重要参考意义,因此笔者制备了环氧树脂/芳纶纤维复合材料测试板,在弹击的相邻区域进行了取样,并考察了弹击后复合材料的拉伸性能和弯曲性能变化趋势,以评估弹击对复合材料整体性能的影响。

1 实验部分

1.1 主要原材料

芳纶纤维: K129 型,美国杜邦公司;

环氧树脂: 北京天德玻璃钢制品有限公司;

二氨基二苯砜: 山东天茂新材料科技股份有限公司。

1.2 主要仪器及设备

压机: XLB-D400×400×1 型,上海齐才液压机械有限公司;

微机控制电子万能试验机: 5966 型,英斯特朗公司。

1.3 试样制备

将芳纶纤维编织成面密度为 410 g/m^2 的方格布并在固化剂二氨基二苯砜质量分数为 40% 的环氧树脂中浸渍,将 6 层浸胶织物铺放在压机上,采用层压成型工艺制备成复合材料靶板,芳纶纤维的质量分数为 45.4%。层压成型工艺参数为: 室温下放置 1 h,然后升温至 100°C ,在 3 MPa 的压力下,保温保压 1 h 后自然冷却降至室温。最后将复合材料板置于 50°C 烘箱内后固化 12 h。

1.4 性能测试

(1) 弹击。

采用 12.7 mm 弹道枪 1.1 g 碎片模拟弹进行抗弹试验,将测试板打穿。

其中拉伸测试板弹击 7 发,弯曲测试板弹击 6 发,弹击距离为 4 m,弹速为 350 m/s,均贯穿,弹击后的靶板形态如图 1 所示。

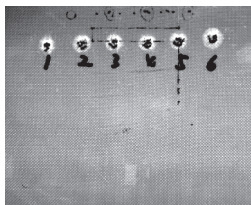


图 1 弹击后的复合材料靶板

(2) 拉伸性能测试。

沿弹击点连线的法线方向依次切割拉伸试样,

试样型式为 I 型,试样宽度 20 mm。按照 GB/T 1447-2005 测试复合材料板的拉伸强度和拉伸弹性模量,沿试样轴向匀速施加静态拉伸载荷,加载速度为 2 mm/min 。试样编号按照与弹击区域的距离 (20, 40, 60, 80, 100, 120 mm),由近及远依次记为 1, 2, 3, 4, 5, 6, 如图 2 所示。

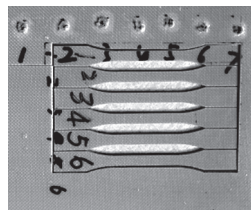


图 2 拉伸试样取样规则及编号

(3) 弯曲性能测试。

沿弹击点连线的法线方向依次切割弯曲试样,试样宽度 15 mm。按照 GB/T 1449-2005 测试复合材料板的弯曲强度和弯曲弹性模量,采用无约束支撑,三点弯曲方式,以 2 mm/min 的加载速率进行测试。试样编号按照与弹击区域的距离 (15, 30, 45, 60, 75, 90 mm),由近及远依次记为 1, 2, 3, 4, 5, 6, 如图 3 所示。

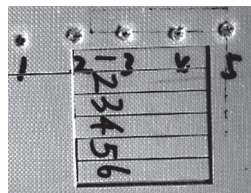


图 3 弯曲试样取样规则及编号

2 结果与讨论

2.1 弹击对拉伸性能的影响

弹击后,沿弹击点连线的法线方向取样,测试不同弹击区域试样的拉伸强度变化趋势,结果如图 4 所示。

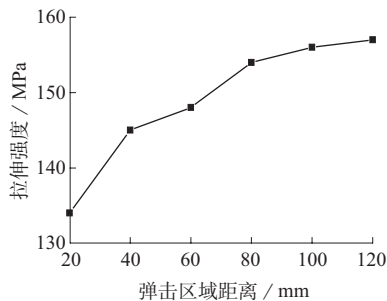


图 4 不同弹击区域试样的拉伸强度

由图 4 可见,距离弹击区域最近的 1 号试样拉伸强度较低,仅为 134 MPa。远离弹击区域的各试样,拉伸强度逐渐增加。其中,4 号、5 号、6 号试样的拉伸强度趋于稳定,分别为 154, 156, 157 MPa,

表明该部分区域的拉伸强度受弹击效应已经不明显。1~3号试样所处的区域为受弹击效应明显的区域,该区域距离弹击点约60 mm。与6号区域相比,距离弹击点最近的1号区域,拉伸强度仅为6号区域的85.4%,降低14.6%。

不同弹击区域试样的拉伸弹性模量的变化趋势如图5所示。由图5可见,各试样拉伸弹性模量的变化趋势与拉伸强度略有不同。距离弹击区域最近的1号试样拉伸弹性模量也较低,仅为17.5 GPa。而远离弹击区域的2~6号试样,拉伸弹性模量逐渐基本稳定。其中,2号、3号、4号、5号、6号试样的拉伸弹性模量分别为18.7、19.3、19.2、18.8、18.7 GPa,表明该部分区域的拉伸弹性模量受弹击效应不明显。与6号区域相比,距离弹击点最近的1号区域,拉伸弹性模量为6号区域的93.6%,降低6.4%。

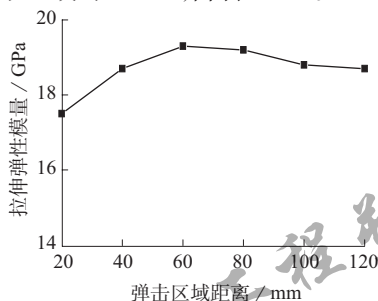


图5 不同弹击区域试样的拉伸弹性模量

2.2 弹击对弯曲性能的影响

沿弹击点连线的法线方向取样,测试不同弹击区域试样的弯曲强度变化趋势,结果如图6所示。由图6可见,距离弹击区域最近的1号试样弯曲强度最低,仅为83.2 MPa。远离弹击区域的各试样,弯曲强度逐渐增加。其中,3号、4号、5号、6号试样的弯曲强度趋于稳定,分别为156、152、149、152 MPa,表明该部分区域的弯曲强度受弹击效应已经不明显。1号、2号区域为受弹击效应明显的区域,该区域距离弹击点约30 mm。与6号区域相比,距离弹击点最近的1号区域,弯曲强度仅为6号区域的54.7%,降低45.3%。

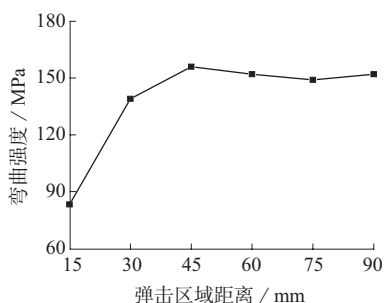


图6 不同弹击区域试样的弯曲强度

不同弹击区域试样的弯曲弹性模量变化趋势如图7所示。由图7可见,各试样弯曲弹性模量的变化趋势与弯曲强度基本一致。距离弹击区域最近的1号试样弯曲弹性模量也较低,仅为5.93 GPa。远离弹击区域的各试样,弯曲弹性模量逐渐增加。其中,远离弹击区域的3~6号试样,弯曲弹性模量基本稳定。其中,3号、4号、5号、6号试样的弯曲弹性模量分别为14.6、14.9、13.9、13.9 MPa,表明该部分区域的弯曲弹性模量受弹击效应不明显。与6号区域相比,距离弹击点最近的1号区域,弯曲弹性模量为6号区域的42.7%,降低57.3%。

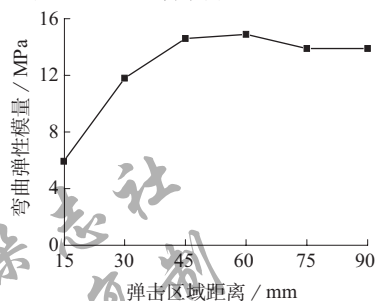


图7 不同弹击区域试样的弯曲弹性模量

2.3 原因分析

在受到弹击后,芳纶复合材料着弹点附近区域的结构性能受到了不同程度的影响。弹击对材料拉伸性能的影响分布在着弹点60 mm内的区域,但拉伸性能损伤相对较小。弹击对材料弯曲性能的影响分布在着弹点30 mm内的区域,但弯曲性能损伤相对较大,弹击点附近的弯曲性能降低达一半以上。

当复合材料板受到弹丸冲击时,弹丸的能量在靶板中主要分解为3种作用,即压缩、剪切和拉伸。当弹体冲击纤维复合材料板时,产生的应力波沿纤维轴向传播,纤维通过环氧树脂基体及交错点的相互作用,将应力波在大量的纤维上扩散开来,使能量在相当大的面积上被吸收;而沿靶板纵向的传播会形成拉应力,当拉应力大于纤维与树脂基体之间的粘结强度时,导致靶板分层^[8-10]。随着弹体更加深入靶板,纤维受到拉伸变形,由于环氧树脂体系的断裂伸长率较低,层间基体的小变形,限制了芳纶纤维的大变形,而芳纶纤维的变形,特别是纵向撕裂变形正是弹击能量吸收的主要机理之一。距离弹击点越近,层合板的层间破坏就越严重,这可能是复合材料板弯曲性能损伤较大的原因之一。

3 结论

(1) 弹击对环氧树脂/芳纶纤维复合材料的拉伸性能和弯曲性能有不同程度的影响。相对于离弹击

区域最远的部位,材料离弹击区域最近部位的拉伸强度和拉伸弹性模量分别降低了14.6%和6.4%,弯曲强度和弯曲弹性模量分别降低为了45.3%和57.3%。

(2) 距离弹击点30~60 mm外的区域,材料结构性能基本不受影响。

(3) 弹击对材料拉伸性能损伤相对较小,但对弯曲性能损伤相对较大,层合板的层间破坏可能是复合材料弯曲性能损伤较大的原因之一。

参考文献

- [1] 魏忠仁,杜文泽,王树伦,等.芳纶纤维抗弹复合材料研究进展[J].工程塑料应用,2009,37(1):75-78.
Guo Zhongren, Du Wenzhe, Wang Shulun, et al. Research development in aramid antiballistic composite[J]. Engineering plastics application, 2009, 37 (1):75-78.
- [2] 嵇培军,王国勇,赵亮,等.树脂基结构复合材料的研究进展[J].宇航材料工艺,2015,45(4):1-5.
Ji Peijun, Wang Guoyong, Zhao Liang, et al. Developments of resin matrix structural composites[J]. Aerospace Materials & Technology, 2015, 45(4):1-5.
- [3] Shim V P W, Lim C T, Foo K J. Dynamic mechanical properties of fabric armour[J]. International Journal of Impact Engineering, 2001, 25(1):1-15.
- [4] 王善元,张汝光.纤维增强复合材料[M].上海:中国纺织大学出版社,1998:11-31.
Wang Shanyuan, Zhang Ruguang. Fiber reinforced composites[M]. Shanghai:China Textile University Press, 1998:11-31.
- [5] 韩辉,李楠.防弹纤维复合材料及其在武器装备中的应用[J].高科技纤维与应用,2005,30(1):40-43.
Han Hui, Li Nan. Bullet-proof composite materials and their applications in weaponry[J]. Hi-Tech Fiber & Application, 2005, 30(1):40-43.
- [6] 黄英,刘晓辉,李郁忠. Kevlar 织物增强复合材料层合板冲击损伤特性研究[J].西北工业大学学报,2002,20(3):486-491.
Huang Ying, Liu Xiaohui, Li Yuzhong. On improving bulletproof properties of kevlar weave-fabric reinforced composite laminated plate[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2002, 20(3):486-491.
- [7] 古兴瑾,许希武.不同形状弹体高速冲击下复合材料层板损伤分析[J].工程力学,2013,30(1):432-440.
Gu Xingjin, Xu Xiwu. Analysis of damage in composite laminates under high velocity impact by projectiles of different shapes[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(1):432-440.
- [8] Kuehn F E, Scherbaum A, Herrmann W A. Wave propagation in lightweight composite armor[J]. Journal De Physique IV, 2003, 110(9):657-662.
- [9] Tasdemir A, Hall I W. The effects of plastic deformation on stress wave propagation in multi-layer materials[J]. International Journal of Impact Engineering, 2007, 34(11):1 797-1 813.
- [10] 周成飞.纤维-聚合物复合防弹材料的能量耗散机制及其调控技术研究进展[J].上海塑料,2013(3):7-14.
Zhou Chengfei. Research progress of bullet-proof fiber-polymer composite in the energy-dissipation mechanism and its control technology[J]. Shanghai Plastics, 2013(3):7-14.

ENGEL 集团实现全球增长—— 亚洲增速高于全球平均增速

奥地利注塑机制造商、自动化专家和系统供应商 ENGEL 集团按惯例在 Chinaplas 2017 展会上公布其年度业绩。首席销售官 Christoph Steger 博士在广州表示:“亚洲市场的增速高于上财年平均增速,主要动力源于中国市场,同时也得益于东南亚市场强劲的发展势头。”

主要增长动力:定制化解决方案

ENGEL 集团面向全球提供注塑机单机和一体化交钥匙解决方案,后者在其全球新订单中的比例越来越大。Steger 表示,公司目前的主要增长动力是定制化解决方案,亚洲尤其中国的增速高于全球平均增速。除注塑机、机器人和其它自动化解决方案外,根据应用的特定需求而量身定制的系统解决方案还包括加工技术、外围系统、模具以及数字化和网络化软件解决方案。ENGEL 从生产源头就将制造单元的所有组件相互协同,得以充分挖掘提高效率和质量的可能,从而提高客户竞争力。

美洲、亚洲的行业专长得以加强

定制化注塑解决方案的开发不仅需要特别高深的技术知识,还需了解特定的行业,ENGEL 通过其业务部门结构满

足了这两项要求。ENGEL 在其奥地利总部设有全心致力于满足汽车、技术注塑、电子、包装和医疗等行业特定需求的独立团队。两年多前,ENGEL 也开始在客户端巩固当地行业专门技术。作为第1步,ENGEL 任命了北美5个业务部门的部门经理。目前,ENGEL 正在亚洲建立其业务部门结构。恩格尔机械(上海)有限公司销售和售后服务总裁魏迈络先生表示:“随后,我们也将通过上海公司向亚洲提供行业技术专长,从而进一步提高我们在五大业务部门中的市场地位,这是我们巩固亚洲技术专长的重要一步。”(工程塑料应用)

道康宁推出聚酰胺新型阻燃协效剂

道康宁在 Chinaplas 2017 展会上推出聚酰胺新型阻燃协效剂 Dow Corning® 43-821 添加剂,这是一种可用于解决有机磷等传统阻燃添加剂含量过高造成的聚酰胺力学性能下降和腐蚀性问题的先进有机硅技术。该新产品不仅可优化高填充阻燃聚酰胺,还可通过3种主要方式提供成本优势:减少有机磷添加剂的所需量,以极低负载提供较高的阻燃性能,避免了材料阻燃性能的过度设计。该新型阻燃协效剂能以较少用量(1%~2%)提高阻燃性能,从而将 PA6 和 PA66 化合物所含有机磷添加剂减少40%,为改性料生产企业和电气/电子元件厂商带来重要优势。(工程塑料应用)