

# 三维机织复合材料弹道冲击 试验研究



刘志强<sup>1</sup>,王祯鑫<sup>1</sup>,宣海军<sup>2</sup>,何泽侃<sup>2</sup>

1.中国航发商用航空发动机有限责任公司,上海 201306

2.浙江大学,浙江 杭州 310027

**摘要:**先进复合材料具有高比强度、高比模量等优点,是航空发动机应用研究的热点。本文通过弹道冲击试验研究三维机织复合材料平板在高速物体冲击下的损伤失效机制及其力学行为,采用高速相机记录下了靶板受冲击损伤变化过程,分析了不同速度对三维机织复合材料平板损伤形貌的影响。试验结果表明,三维机织复合材料具有优异的抗裂纹萌生和扩展性,冲击表面的主要破坏模式是纤维剪切破坏和基体破碎,在出口表面主要破坏模式是纤维拉伸断裂和基体开裂。本研究可用于支撑验证碳纤维增强树脂基复合材料包容性,为航空发动机复合材料机匣研制提供基础。

**关键词:**三维机织;复合材料;弹道冲击试验;高速摄像;破坏模式

中图分类号:V231.91

文献标识码:A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2023.02.007

民用飞机需考虑经济性,其中发动机减重是一个需要考虑的问题。复合材料(简称复材)密度小、强度大,近年来,碳纤维增强树脂基复合材料在国外的飞机、发动机中已经得到较为广泛的应用<sup>[1-3]</sup>。通用电气航空公司为波音787研制的GENx发动机的风扇机匣即为碳纤维全复合材料结构,这是第一次将复合材料用于大型发动机机匣,该复合材料机匣在满足包容性要求的前提下,比金属机匣轻154kg,可使一架飞机减轻质量363kg,而且不会被腐蚀,便于维护。LEAP发动机是第二种采用全复合材料风扇机匣的发动机,斯奈克玛公司将三维机织树脂转移成形技术用于制造风扇叶片、机匣<sup>[4]</sup>,轻质复合材料的使用可以使装该发动机的飞机每架减重约450kg。可见,碳纤维增强树脂基复合材料风扇包容机匣是新一代航空发动机的重要应用方向。风扇叶片、机匣是航空发动机的关键部件,包容性设计是航空发动机安全可靠工作必须考虑的问题,适航条款和军用规范都对其提出了要求<sup>[5-6]</sup>。碳纤维增强树脂基复合材料包容性研究对航空发动机研制具有重要意义<sup>[7]</sup>。

通常聚合物基复合材料在受到冲击载荷时可能的失效模式包括基体变形和起裂、界面脱黏、剪切充塞、分层、纤维

断裂和纤维拔出<sup>[8]</sup>。层合结构复材受到冲击时分层损伤现象最明显但是吸收能量极低,而三维机织能够克服层合复合材料层间强度低、易分层的缺陷,还具有良好的抗冲击、较高的损伤容限、耐疲劳以及耐磨损、耐烧蚀的能力。

对于高性能纤维三维机织结构,目前国内外对其力学行为和数值仿真方法的研究仍处于起步发展阶段,积累的试验数据、仿真技术和对其损伤失效机理的阐释还比较欠缺<sup>[9-10]</sup>。练军<sup>[11]</sup>采用芳纶制作了两种规格的三维编织平板进行打靶试验,发现正面以压缩和剪切破坏为主,反面以拉伸破坏为主,仿真结果显示,机织物预制件是主要的吸能体,并且弹道侵彻过程中预制件和基体同时达到能量的最大值,说明二者经过复合后具有结构整体性。谭焕成等<sup>[12]</sup>进行了碳纤维三维机织平板打靶试验,研究圆柱弹体撞击平板不同高度的影响。结果发现,平板背弹面因纤维断裂形成鼓包,在平板高度90%处,弹体在迎弹面形成U形豁口,并且随着撞击高度的增高,弹道极限增加。张超<sup>[13]</sup>对纱线轨迹进行分析,将三维机织复合材料划分为内胞、面胞和角胞,建立了三单胞模型,引入失效模式的Tsai-Wu张量准则,对三维四向复合材料进行单向拉伸损伤分析及强度预

收稿日期:2022-07-18;退修日期:2022-12-18;录用日期:2023-01-10

基金项目:国家科技重大专项(2017-Ⅶ-0011-0106, J2019-Ⅷ-0009-0170);上海市青年科技英才扬帆计划(20YF1454100)

引用格式: Liu Zhiqiang, Wang Zhenxin, Xuan Haijun, et al. Research on 3D woven composites ballistic impact test[J]. Aeronautical Science & Technology, 2023, 34(02): 49-55. 刘志强, 王祯鑫, 宣海军, 等. 三维机织复合材料弹道冲击试验研究[J]. 航空科学技术, 2023, 34(02): 49-55.

测,发现小机织角材料呈脆性断裂特征,具有较高的拉伸强度;大机织角材料拉伸模量和破坏强度均小于小机织角材料,应力—应变曲线呈现一定的非线性,材料具有一定的延展性。

本文通过弹道冲击试验研究三维机织复合材料平板在高速物体冲击下的损伤失效机制及其力学行为,采用高速相机记录靶板受冲击产生的损伤变化过程,分析了不同速度对三维机织复合材料平板损伤形貌的影响。

## 1 试验件

三维机织复合材料平板由 T700-12k 碳纤维和双马来酰亚胺树脂 BMI-x 组成。T700 是一种高强度纤维,具有很高的拉伸强度。BMI 树脂是高性能热固性聚合物,固化 BMI 系统的典型特性包括高玻璃转化温度(230~380°C)、良好的热湿性能、恒定的电气特性和低可燃性<sup>[14]</sup>。碳纤维和树脂性能参数见表 1。

表 1 碳纤维和树脂性能参数

Table 1 Performance parameters of carbon fiber and resin

属性	纤维	树脂
材料类型	T700-12k	BMI-x
密度/(g/cm <sup>3</sup> )	1.8	1.27
轴向模量/GPa	230	4.03
横向模量/GPa	15	4.03
剪切模量/GPa	24(轴向)/5.03(横向)	—
拉伸强度/GPa	4900	107.1
单根纤维细丝直径/ $\mu\text{m}$	7	—
玻璃化温度/°C	—	250

采用不同的织造方式使碳纤维在空间中产生不同的走向,会对复合材料性能造成很大影响。本试件尺寸为 150mm×150mm×8mm(长×宽×高),三维机织结构由平面方向的经纱、纬纱和厚度方向的接结纱组成,三者互相正交,平板实物如图 1 所示,详细参数见表 2。

## 2 试验方案

三维机织复材平板的弹道冲击试验主要设备为一级空气炮试验系统,原理如图 2 所示。

试验采用钝头圆柱弹,直径为 15mm,高 25.43mm,顶端半径为 65mm,材料为 TC4 钛合金,质量约为 19.7g。使用圆柱弹托夹持以便进行发射,弹体底部采用泡沫填充,如图 3 所示,在炮管出口安装有弹托分离器,可以在弹体冲击靶板前将弹体与弹托分离,弹托分离器如图 4 所示。靶板通过

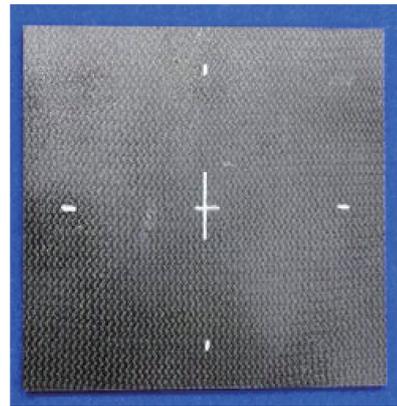


图 1 三维机织复材平板

Fig.1 3D woven composites plate

表 2 复材机织平板结构参数

Table 2 Structural parameters of woven composites plate

参数	数值
纤维体积含量/%	54
单块板质量/g	278.5
经密/(yarns/cm)	4
纬密/(yarns/cm)	3.8

相框式工装压紧,实现四边固支,安装后靶板有效尺寸为 140mm×140mm×8mm,如图 5 所示。试验中采用了三台高速相机,如图 6 所示,相机 1 位于靶板正上方,用来测量弹体入射速度和剩余速度,相机 2 和相机 3 分别位于靶板的斜前方和斜后方,用来拍摄弹体撞入入射面和弹体击穿靶板的情况。

## 3 试验结果与分析

本文一共进行了 10 次平板打靶试验,结果见表 3,复材平板产生了不同的损伤破坏和剩余速度,其中 7 次弹体回弹,3 次靶板被击穿,最低击穿速度的吸收能量略低于回弹情况下最高吸收能量。入射动能和吸收动能关系如图 7 所示(其中“·”为回弹,“▪”为击穿),在靶板被击穿前,靶板能量吸收与入射动能基本呈线性关系,7 次弹体回弹的结果入射动能和吸收动能线性拟合优度  $R^2$  为 0.9276。图 8、图 9 为所有试验靶板的表面损伤情况汇总。10 次试验靶板损伤相似,通常在靶板入射面上有一个与圆柱弹大小相同的干净圆形损伤区域,说明入射面的主要破坏模式是纤维剪切破坏和和基体压溃失效。试验后 BMI-x 树脂在入射面和出射面的损坏区域颜色变为浅黄色,树脂基体在入射表面沿 90° 方向有明显失效,沿机织方向同样出现了基体颜色变化。出射面损伤呈椭圆形鼓包,大量的纱线拉出,基体沿着机织

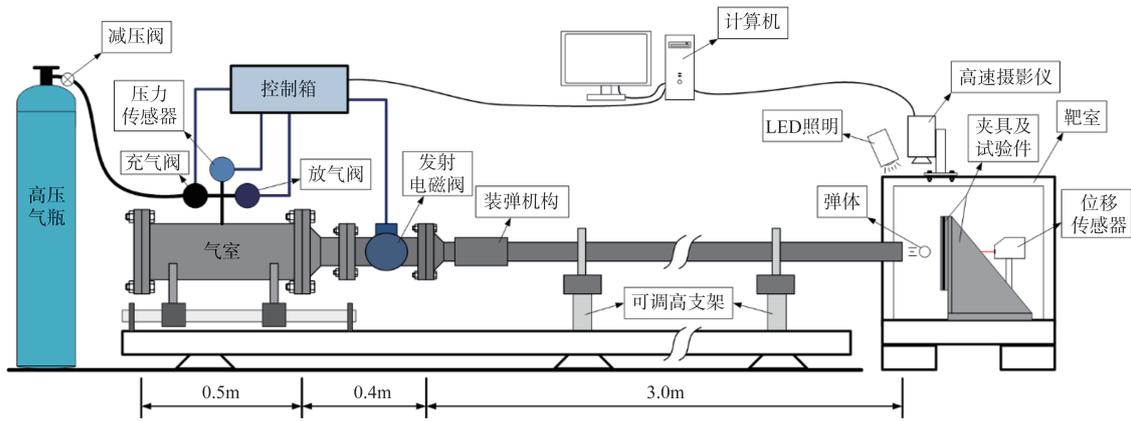


图2 一级空气炮原理图

Fig.2 Structural schematic diagram of one-stage gas gun

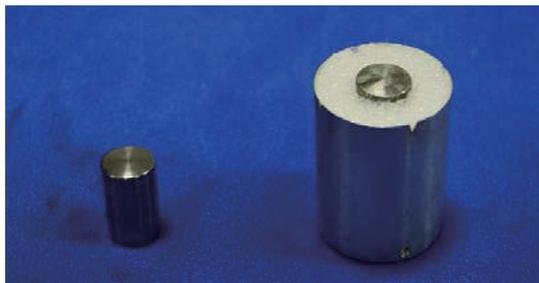


图3 弹体和弹托

Fig.3 Missile and slot

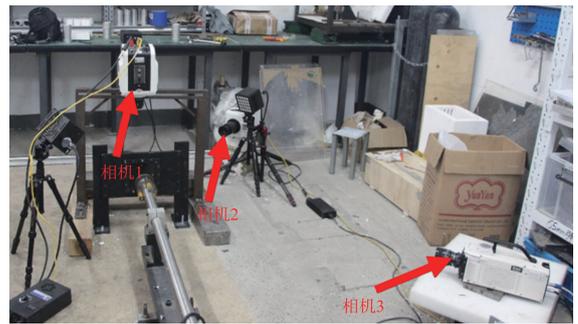


图6 试验现场高速相机安置

Fig.6 Distribution of high speed cameras at testing site

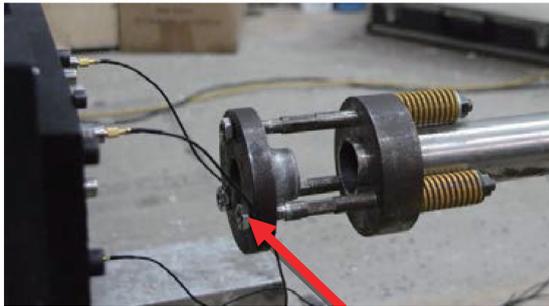


图4 弹托分离器

Fig.4 Slot separator

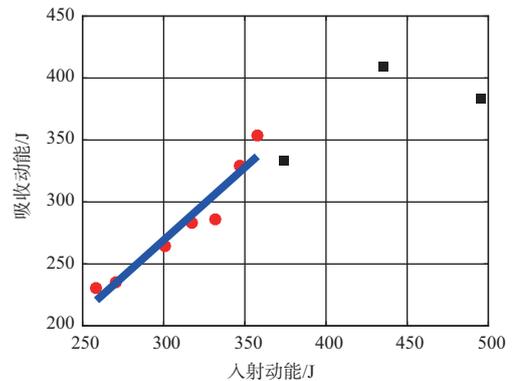


图7 入射动能—吸收能量变化趋势

Fig.7 Variation tendency between incident kinetic energy and absorbed energy



图5 靶板工装

Fig.5 Fixtures of target plate

走向失效呈锐角十字形,说明主要破坏方式是纤维拉伸断裂和基体开裂。比较10次试验的侧视图,显示出出射面的鼓包高度随着弹体入射速度的增大而增大,但是入射面和出射面的损伤区域却没有扩大,说明损坏都非常局部化,这表明三维机织复合材料具有优异的抗裂纹萌生和扩展能力。

表3 弹道冲击试验结果汇总

Table 3 Summary sheet of ballistic impact test results

编号	弹体质量/g	入射动能/J	剩余动能/J	能量吸收/J	测试结果
1	19.9	258.6	28.1	230.5	回弹
2	19.7	270.4	34.8	235.5	回弹
3	19.9	300.5	36.0	264.5	回弹
4	19.9	317.6	34.7	282.9	回弹
5	19.8	331.5	45.7	285.8	回弹
6	19.8	346.8	18.0	328.9	回弹
7	19.9	357.6	3.7	353.9	回弹
8	19.7	374.1	41.1	333.0	击穿
9	19.9	435.4	26.6	408.8	击穿
10	19.8	495.3	112.0	383.3	击穿

通过高速摄像记录弹体对平板的破坏过程,以试验 1 为例,弹体接触到靶板后,以弹体与靶板接触面为圆心,产生了一个浅黄色圆形损伤区,随后树脂沿纤维机织方向形成了两条浅黄色损伤区域,同时靶板整体以弹体为中心凹陷,90°方向出现了明显的大面积损伤区域,说明靶板正面受到弹体冲击后,首先沿着机织走向失效,之后随着靶板整体变形,靶板横向受到了主要冲击。通过高速摄像拍摄的靶板背面破坏过程,可以看到在对应入射面弹体击中位置平板背面首先出现了一个浅黄色圆形损伤区,随后喷射出大量树脂和纤维碎片,并且树脂迅速随着纤维机织方向形成了两条浅黄色损伤区域,说明靶板背面首先是沿着机织

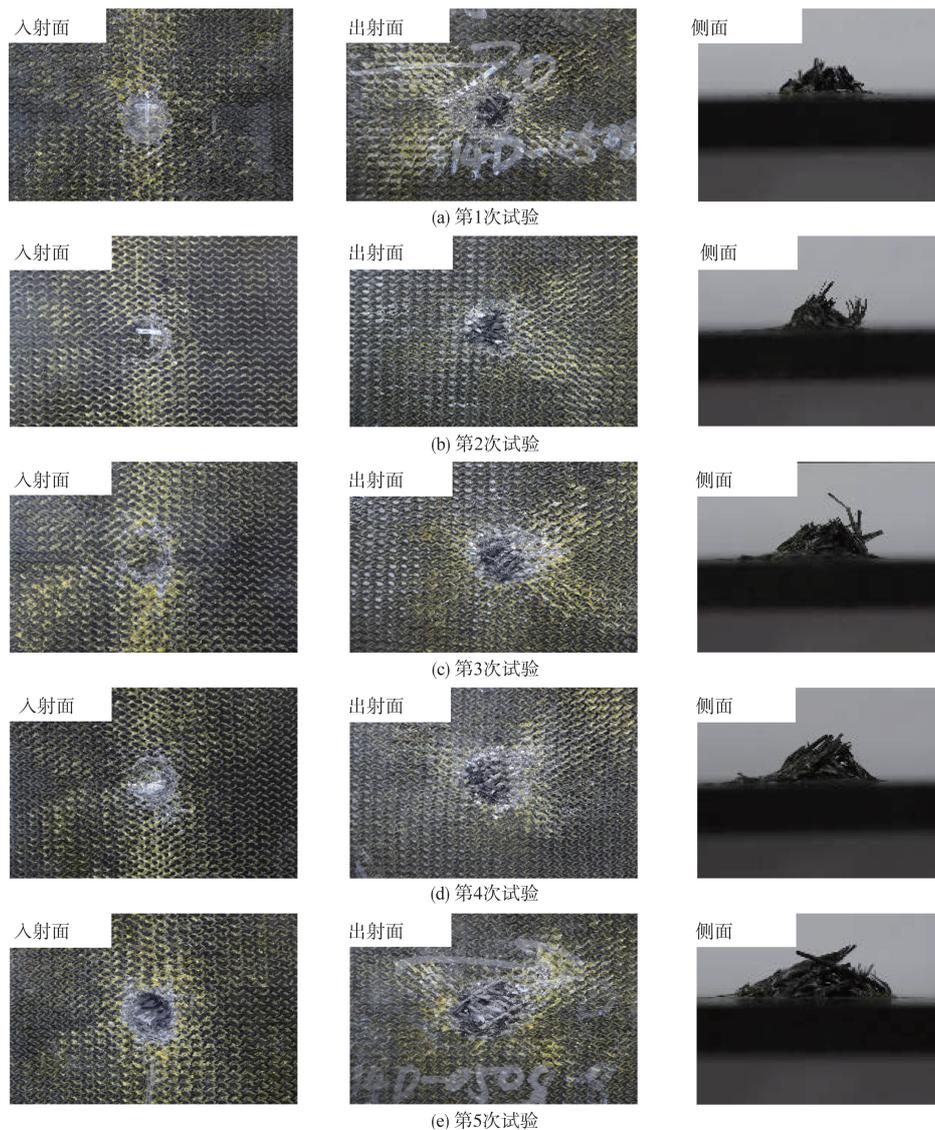


图8 靶板损伤结果汇总

Fig.8 Summary sheet of target plate damages

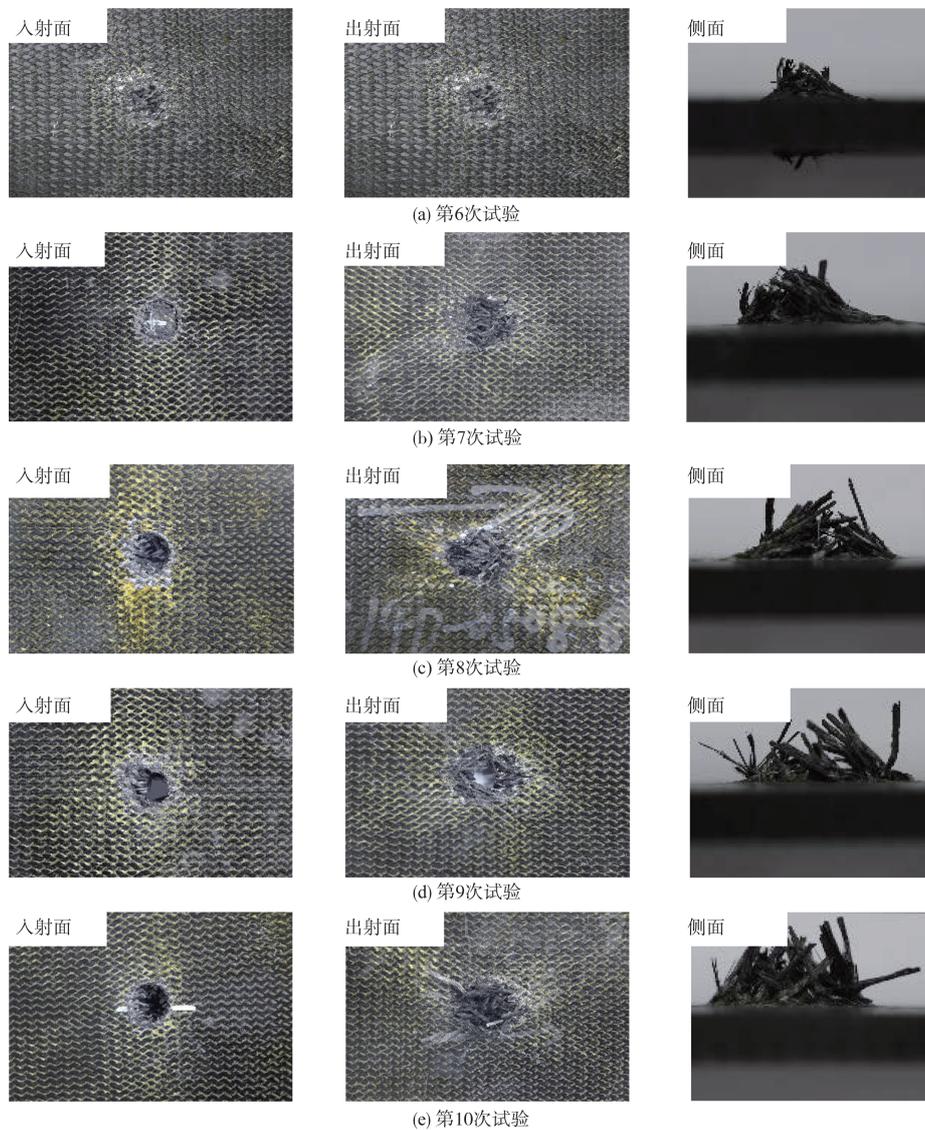


图9 靶板损伤结果汇总(6~10次试验)

Fig.9 Summary sheet of target plate damages(test of 6~10)

方向产生破坏。

#### 4 结束语

三维机织复合材料提供了显著的面内强度和面外特性。当遭受冲击载荷时,损伤非常局部化,表明三维机织复合材料具有优异的抗裂纹萌生和扩展性。发现冲击表面的主要破坏模式是纤维剪切破坏和基体破碎;在出口表面,主要破坏模式是纤维拉伸断裂和基体开裂。

高速相机的记录显示了靶板受冲击时沿着纤维机织方向损伤,并且靶板正面沿90°方向出现了更严重的损伤,说明靶板主要受到横向冲击。击中位置平板背面首先出现了

一个浅黄色圆形损伤区,随后喷射出大量树脂和纤维碎片,并且树脂迅速随着纤维机织方向形成了两条浅黄色损伤区域,说明靶板背面首先是沿着机织方向产生破坏。

未来的工作包括通过X射线CT扫描、光学显微镜等手段观测三维机织平板材料的内部、表面及边缘的纤维机织结构,分析冲击的破坏形态和破坏模式,对复合材料和树脂开展一系列静态和动态测试,研究树脂基体对三维机织复合材料的损伤失效和力学行为的影响,建立有限元模型进行仿真分析。

AST

#### 参考文献

[1] 任晓华.航空复合材料制造技术发展[J].航空科学技术,2010

- (4):2-5.
- Ren Xiaohua. Manufacturing technological development of aero composite materials[J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2010(4):2-5. (in Chinese)
- [2] 付裕,刘牧东,吴堂珍,等. 直升机复合材料结构疲劳寿命评定技术的研究进展与发展趋势[J]. *航空科学技术*, 2021, 32(1):83-88.
- Fu Yu, Liu Mudong, Wu Tangzhen, et al. Development and trend on fatigue life evaluation of helicopter composite structure[J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2021, 32(1): 83-88. (in Chinese)
- [3] Marsh G. Aero engines lose weight thanks to composites[J]. *Reinforced Plastics*, 2012, 56(6): 32-35.
- [4] Gardiner G. 3D preformed composites: the leap into LEAP[Z]. *Composites World*, 2014.
- [5] 中国民用航空局. CCAR-33-R2:航空发动机适航规定[S]. 中国民用航空局, 2011.
- Civil Aviation Administration of China. CCAR-33-R2 :Airworthiness standards: Aircraft engines[S]. CCAR, 2011. (in Chinese)
- [6] 黎飞龙,吴宝勤,范志强. 航空发动机叶片包容性瞬态响应的数值仿真[J]. *兵工自动化*, 2010, 29(7):22-24+27.
- Li Feilong, Wu Baoqin, Fan Zhiqiang. Numerical simulation of transient responses of aero-engine blade containment[J]. *Ordnance Industry Automation*, 2010, 29(7): 22-24+27. (in Chinese)
- [7] 李杰. 复合材料在新一代商用发动机上的应用与发展[J]. *航空科学技术*, 2012(1):18-22.
- Li Jie. Application and development of composite materials for new generation of civil aircraft engines[J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2012(1):18-22. (in Chinese)
- [8] Sudhir Sastry Y B, Budarapu P R, Krishna Y, et al. Studies on ballistic impact of the composite panels[J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2014, 72:2-12.
- [9] 谭焕成,覃文源,刘升旺,等. 三维编织复合材料细观几何建模及动态力学性能的研究进展[J]. *机械工程材料*, 2021, 45(8):1-7.
- Tan Huancheng, Qin Wenyuan, Liu Shengwang, et al. Research progress on establishment of meso-scale geometrical model and dynamic mechanical properties of 3D braided composite [J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2021, 45(8): 1-7. (in Chinese)
- [10] 解江,迟琪琳,刘亚婷,等. 碳纤维2.5D机织复合材料弹道冲击性能及仿真分析[J]. *航空科学技术*, 2021, 32(12):57-65.
- Xie Jiang, Chi Qilin, Liu Yating, et al. Ballistic impact performance of carbon fiber 2.5D woven composite and simulation analysis [J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2021, 32(12): 57-65. (in Chinese)
- [11] 练军. 三维编织复合材料弹道侵彻的数值模拟[D]. 上海: 东华大学, 2006.
- Lian Jun. Finite element analysis for ballistic impact of 3D braided composites[D]. Shanghai: Donghua University, 2006. (in Chinese)
- [12] 谭焕成,许善迎,黄雄,等. 三维四向编织复合材料宏观有限元模型冲击损伤仿真及试验验证[J]. *复合材料学报*, 2018(5): 1139-1148.
- Tan Huancheng, Xu Shanying, Huang Xiong, et al. Macro-scale finite element model for impact damage simulation and experimental verification of three-dimensional four-directional braided composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2018 (5):1139-1148. (in Chinese)
- [13] 张超. 三维多向编织复合材料宏细观力学性能及高速冲击损伤研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2013.
- Zhang Chao. Research on macro-meso-mechanical properties and high velocity impact damage of 3D multi-directional braided composites[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013. (in Chinese)
- [14] Iredale R J, Ward C, Hamerton I. Modern advances in bismaleimide resin technology: A 21st century perspective on the chemistry of addition polyimides[J]. *Progress in Polymer Science*, 2017, 69: 1-21.

## Research on 3D Woven Composites Ballistic Impact Test

Liu Zhiqiang<sup>1</sup>, Wang Zhenxin<sup>1</sup>, Xuan Haijun<sup>2</sup>, He Zekan<sup>2</sup>

1. AECC Commercial Aircraft Engine Co., Ltd., Shanghai 201306, China

2. Zhejiang University, Hangzhou 310027, China

**Abstract:** Advanced composite material has become a hot applied research topic of aero engine for its excellent, such as specific strength and module. This paper studies the damage and failure mechanism and mechanism behavior of the 3D woven composite plate under high speed ballistic impact, records the damage procedure of target plate under impact with high speed camera, and analyzes the effects of different speeds on the damage morphology of 3D woven composite plate. The results show that 3D woven composite has good performance of crack initiation resistance and extensibility, the main failure modes of impact surface are fiber shear damage and matrix smash and the main failure modes exit surface are fiber tension failure and matrix crack. The research can be used to support the containment performance verification of carbon fiber reinforced resin composites, and provide the basis for developed composite aero engine case.

**Key Words:** 3D woven; composites material; ballistic impact test; high speed camera; failure modes

---

**Received:** 2022-07-18; **Revised:** 2022-12-18; **Accepted:** 2023-01-10

**Foundation item:** National Science and Technology Major Project(2017- VII -0011-0106, J2019- VIII -0009-0170) ; Shanghai Sailing Program(20YF1454100)