

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

谭焕成¹, 许善迎¹, 黄雄¹, 关玉璞¹, 陈伟^{*1, 2}

(1. 南京航空航天大学 能源与动力学院 江苏省航空动力系统重点实验室, 南京 210016;

2. 先进发动机协同创新中心, 北京 100191)

摘 要: 三维编织复合材料作为整体编织材料, 能够克服层合复合材料层间强度低、易分层的缺陷, 相对于金属材料, 还具有质量轻、高比刚、高比强度以及良好的抗冲击性能、较高的损伤容限, 在汽车、高铁、航海、航空及航天领域中具有广泛应用前景。使用空气炮发射系统开展了钢珠以约 210 m/s 速度冲击三维四向编织复合材料平板的不同位置试验, 基于宏观观察和细观观测, 分析了三维编织复合材料在受到钢珠高速冲击下的破坏模式和破坏机制。此外, 本文建立了三维四向编织复合材料宏观连续介质损伤(CDM)有限元模型, 其中模型计算剩余速度和试验测得剩余速度误差在 5% 以内, 试验和数值模拟的破坏形貌也高度一致, 验证了所建立的宏观 CDM 有限元模型的有效性。

关键词: 三维编织复合材料; 弹道冲击; 宏观有限元模型; 破坏模式; 数值仿真

中图分类号: TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2018)05-1139-10

Macro-scale finite element model for impact damage simulation and experimental verification of three-dimensional four-directional braided composites

TAN Huancheng¹, XU Shanying¹, HUANG Xiong¹, GUAN Yupu¹, CHEN Wei^{*1, 2}

(1. Jiangsu Province Key Laboratory of Aerospace Power System, College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Collaborative Innovation Center of Aero-Engine, Beijing 100191, China)

Abstract: With a distinct structure that is fully integrated, three-dimensional braided composites not only overcome the defects in laminated composites which have relatively poor mechanical properties in the thickness direction and are prone to interlaminar delamination, but also are superior in high strength-to-mass and stiffness-to-weight ratios, improved impact resistance and damage tolerance as compared with traditional metal materials. Owing to these merits, they also have broad potential applications in automobile, high-speed train, navigation, aviation, and aerospace industries. Plate specimens of three-dimensional four-directional braided composite(3D4DBCo) were designed and impacted at different locations by the steel ball with an approximate initial velocity of 210 m/s with the help of the air gun experiment system in this paper. On the basis of macroscopic and microscopic observation, the damage morphology and the failure mechanism of 3D4DBCo subjected to high speed impact of the steel balls were analyzed and summed up. What's more, the macro-level continuum damage mechanics (CDM) finite element model of 3D4DBCo was established, and the comparisons between numerical simulation and experiment results show highly agreement in residual velocity within 5%, as well as the damage characteristic, which validate the effectiveness of the macro-

收稿日期: 2017-05-11; 录用日期: 2017-08-01; 网络出版时间: 2017-08-21 18:33

网络出版地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170821.002>

基金项目: 国家自然科学基金(51475227; 51575262)

通讯作者: 陈伟, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为材料结构冲击损伤 E-mail: chenwei@nuaa.edu.cn

引用格式: 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, 35(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, 35(5): 1139-1148 (in Chinese).

scopic CDM finite element model.

Keywords: three-dimensional braided composites; ballistic impact; macroscopic finite element model; failure mode; numerical simulation

三维编织复合材料作为整体编织材料,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,利用其制造出来的风扇叶片抗振性能特别是抗颤振性能良好,目前在国外的民用航空发动机中已有了研究与应用^[1]。为防止风扇叶片受到外物冲击损伤造成严重后果,研究三维编织复合材料抗冲击能力能够为航空涡扇发动机风扇叶片应用三维四向编织碳纤维增强树脂基复合材料奠定一定基础,在航空发动机的应用上具有重要的现实意义和实用价值。

目前国内外对三维编织复合材料抗冲击能力的主要研究方法是试验^[2-6]和数值分析^[7-10],根据冲击速度不同分为低速冲击^[11]和高速冲击^[12],研究内容主要有以下几个方面:分析其损伤形貌和破坏模式、获得弹道极限及相关因子(编织角、冲击物种类、冲击物质量、冲击角度、冲击位置等)对其影响规律、分析能量吸收特性及得到纤维基体吸能比等。研究成果如下:杨灵敏等^[13]针对玻璃纤维增强环氧树脂基三维四向、三维五向和三维六向编织复合材料试样进行了低速冲击试验,三维六向编织复合材料发生损伤时较四向和五向需要更大的冲击载荷和冲击能量,而且主要损伤的持续时间最短;未穿透时,主要失效模式为基体开裂和纤维断裂。Sun等^[14]对树脂基碳纤维三维四向编织复合材料试验件进行低速冲击试验和仿真,试验发现试验件主要损伤模式为基体开裂、脱胶和纤维断裂。基于细观结构模型调用 VUMAT 子程序对试验工况下试验件力与位移曲线、力的峰值等有较好地预测。徐静怡等^[2]对两种类型三维编织复合材料进行弹道冲击测试,认为纤维拉伸断裂、抽拔和基体开裂是复合材料主要损伤和破坏形式;冲击破坏模式初步定为正面以纤维的压缩、剪切破坏为主,反面以纤维的拉伸破坏为主。练军等^[15-16]发现三维编织物预制件是弹道贯穿过程中能量吸收的主要承担者,树脂只是起固化编织物预制件的作用。弹体贯穿靶板过程中观察到纤维断裂、纤维抽拔、树脂碎裂等现象。López^[17]通过数值分析和试验研究碳纤维编织增强树脂复合材料层合板受正撞击和斜撞击下弹道冲击行为,研究发现在弹道极限速度下,无论是

正撞击还是斜撞击,随着弹体冲击速度增加,损伤面积增加,而超过弹道极限,随着冲击速度增加,损伤面积减小;在正撞击下,最大损伤发生在弹道极限速度下;在弹道极限速度下,正撞击损伤面积比斜撞击大;随着弹体倾斜角度增加,弹道极限增加。杨永齐^[18]开展了三维编织复合材料弹道冲击试验,对于钢珠弹体,贯穿同一厚度三维编织复合材料后的剩余速度与入射速度呈线性关系;对损伤后的试验件进行观察,发现试验件背面损伤比前面要大,同时入射速度越大,平板损伤区域越大;对靶板损伤区域进行放大观察,发现靶板前面主要失效模式是压缩剪切破坏,背面主要失效模式是拉伸剪切破坏。练军^[19]构建三维四向编织复合材料细观结构几何模型,采用 ANSYS/LS-DYNA970 软件对三维四向编织复合材料靶板受弹道冲击过程进行数值计算,得到不同冲击速度正冲击靶板的子弹剩余速度。通过与试验结果进行分析和对比,发现有限元的计算值在中速时与试验值吻合很好,在低速与高速时略高于试验值,误差在3%以下。张超^[20]基于三单胞模型,考虑组分材料的应变率效应,结合 ABAQUS/Explicit 软件平台和材料用户定义子程序 VUMAT,开展了三维多向编织复合材料的高速冲击数值模拟。顾伯洪等^[21]将三维编织复合材料视为由四块单向板组合而成,对其中一块单向板的侵彻破坏过程用有限元进行数值模拟,并根据能量守恒原则得到三维编织复合材料弹道侵彻性能。沈怀荣^[22]采用国防科学技术大学的轻气炮对三维编织结构复合材料进行了高速对称碰撞试验和弹丸穿靶试验,研究了弹丸的冲击能量与损伤区穿透直径的关系。

本文通过试验研究三维四向编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,分析冲击位置对三维四向编织复合材料平板弹道极限和损伤形貌的影响。同时建立三维四向编织复合材料平板宏观连续介质损伤(CDM)模型,采用 MAT162 材料模型对试验过程进行数值模拟,通过仿真结果与试验结果对比分析,验证三维四向编织复合材料平板宏观 CDM 模型及其材料参数的可行性和有效性。

1 试 验

1.1 试验件与试验装置

三维四向编织复合材料平板见图 1, 长度为 174 mm, 宽度为 84 mm, 厚度为 4 mm, 编织角为 20°。该平板由天津工业大学复合材料研究所使用 T700-12K 碳纤维和 TDE-86 环氧树脂、采用树脂传递模塑(RTM)工艺生产制作, 碳纤维和树脂力学性能参数见表 1。

采用空气炮试验系统对三维四向编织复合材料平板进行打靶试验, 试验件采用悬臂板支撑方式, 夹持方式如图 2 所示, 夹持后平板试验件有效尺寸为 160 mm×84 mm×4 mm。试验时, 通过高速摄影拍摄的照片获得弹体的入射速度和剩余速度。

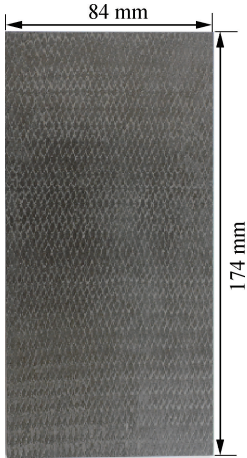


图 1 三维四向编织复合材料平板试验件示意图
Fig.1 Schematic of test specimen of three-dimensional four-directional braided composite(3D4DBCo) plate

表 1 T700-12K 碳纤维和 TDE-86 环氧树脂力学性能

Table 1 Mechanical properties of T700-12K carbon fiber and TDE-86 epoxy resin			
Carbon fibers T700-12K property	Value	Epoxy resin TDE-86 property	Value
Longitudinal tensile elastic modulus/GPa	230	Elastic modulus/GPa	3.45
Longitudinal compressive elastic modulus/GPa	130	Poisson's ratio	0.35
Transverse elastic modulus/GPa	15	Density/(g·cm ⁻³)	1.19
Longitudinal shear modulus/GPa	20	Shear modulus/GPa	1.2778
Transverse shear modulus/GPa	5.3571	Failure strength/MPa	80
Longitudinal Poisson's ratio	0.28		
Transverse Poisson's ratio	0.4		
Ultimate tensile strength/MPa	4900		
Cross sectional area/mm ²	0.44		
Density/(g·cm ⁻³)	1.76		

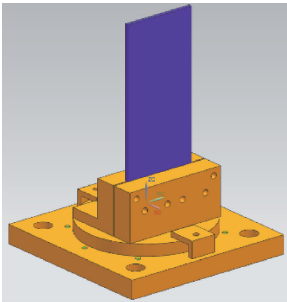


图 2 空气炮试验夹具和试验件示意图

Fig.2 Schematic of clamping apparatus and the test specimen for the air gun test

空气炮系统实物如图 3 所示。试验所发射的外物为钢珠, 使用圆柱弹托夹持以便进行发射, 钢珠底部采用泡沫填充, 弹托如图 4 所示, 其中钢珠直径为 10 mm。空气炮口径为 37 mm, 发射外物速度范围为 100~300 m/s。

试验中使用 0.9 MPa 压力的空气推动弹托加速钢珠冲击试验件, 分别冲击平板 50%、70%和

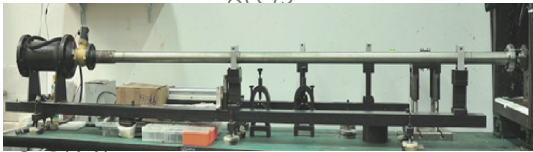


图 3 37 mm 空气炮实物图

Fig.3 37 mm air gun experiment system

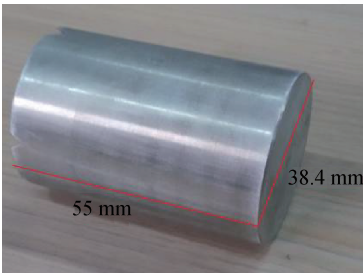


图 4 弹托示意图

Fig.4 Schematic of sabot

90%板高的位置, 试验结果相关参数见表 2。每种高度进行两次有效试验, 每种高度选取其中一组进

表 2 空气炮打靶试验记录表
Table 2 Air gun impact test record sheet

Test number	Braiding angle/(°)	Pressure/MPa	Ball diameter/mm	Angle of impact/(°)	Impact velocity/(m·s ⁻¹)	Residual velocity/(m·s ⁻¹)	Impact location	Result
P20-01	20	0.9 Air	10	0	203.89	129.53	50% plate height	Penetration
P20-02	20	0.9 Air	10	0	203.39	120.19	50% plate height	Penetration
P20-03	20	0.9 Air	10	0	214.37	128.13	70% plate height	Penetration
P20-04	20	0.9 Air	10	0	207.97	118.47	70% plate height	Penetration
P20-05	20	0.9 Air	10	0	206.88	121.02	90% plate height	Penetration
P20-06	20	0.9 Air	10	0	204.36	125.1	90% plate height	Penetration

行仿真和试验对比分析，选取的试验数据在表 2 中加粗显示。

1.2 破坏形态和破坏模式

图 5 为试验后所有三维四向编织复合材料平板冲击破坏区域的照片。试验编号为 P20-01 的三维四向编织复合材料平板被完全击穿，迎弹面弹痕尺寸约为 11 mm×17 mm，由于编织物内部断裂的纤维束充斥着弹孔，宏观上并未看到弹洞，同时在迎弹面弹痕周围，表面呈现白色损伤区域，这是由于高速运动的钢珠与三维四向编织复合材料平板进行碰撞时，冲击波对撞击位置周围的纤维束和基体造成的损伤，尤其是纤维束与基体界面处出现的损伤；背弹面出现约为 13 mm×30 mm 椭球形鼓包，鼓包由断裂的纤维束形成。试验编号为 P20-03 的三维四向编织复合材料平板的损伤形貌与 P20-01 的相似度很高，迎弹面和背弹面弹痕尺寸相差不大（见表 3）。试验编号为 P20-05 的三维四向编织复合材料平板在迎弹面造成 16 mm×18 mm U 型豁口，背弹面损伤尺寸为 18 mm×25 mm，与前面两个试验不同的是试验编号为 P20-05 的三维四向编织复合材料平板出现明显的弹孔和豁口。具体的破坏过程见高速摄影仪拍到的图像，如图 6 所示。

针对试验件损伤区域纤维束和基体细致观察，本文使用三维旋转显微镜型号为 HIROX KH-7700 系列数码显微镜，该设备主要包括 50x~400x 倍高分辨率 MX-5040SZ 镜头、具有微调及锁紧功能的精密支架、二维移动平台（带有 360°旋转功能）、CCD 摄像头、主控制器、15 英寸 TFT 彩色液晶显示器、照明光源及照明光纤等组成，如图 7 所示。

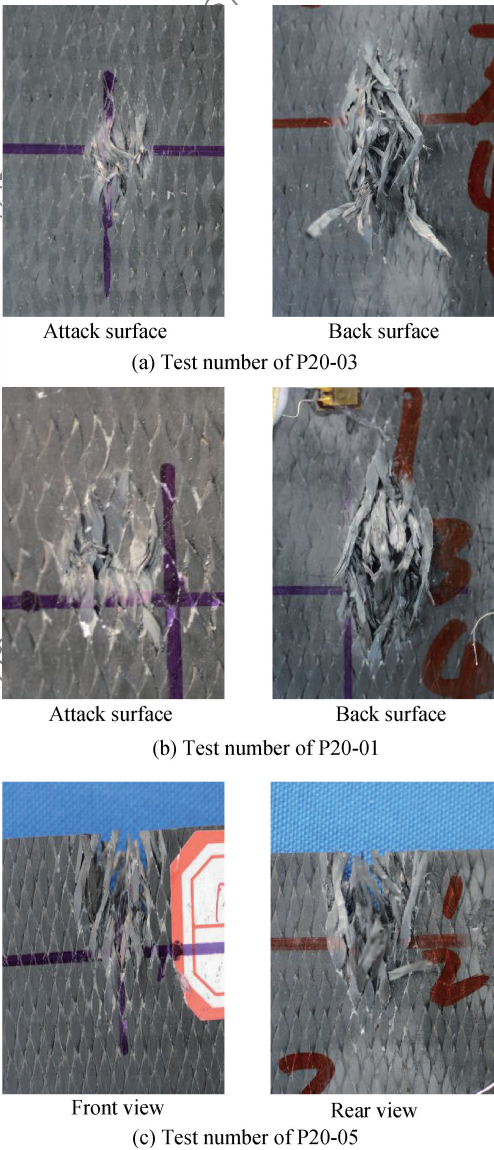


图 5 三维四向编织复合材料平板宏观损伤形态

Fig. 5 Macroscopic damage morphology of 3D4DBCo plates

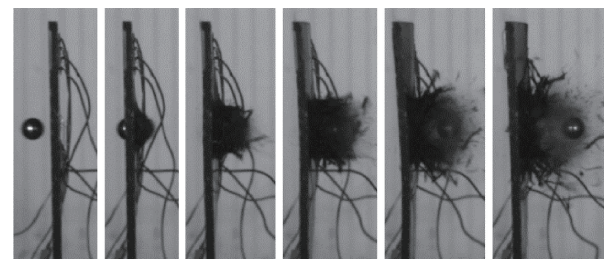


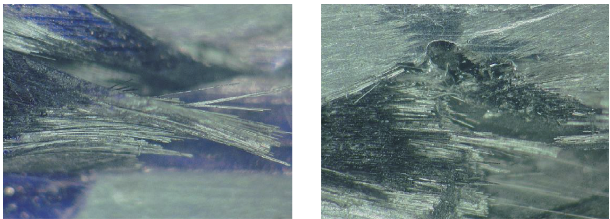
图 6 三维四向编织复合材料平板弹道冲击破坏过程示意图
Fig. 6 Destructive process of 3D4DBCo plates under ballistic impact



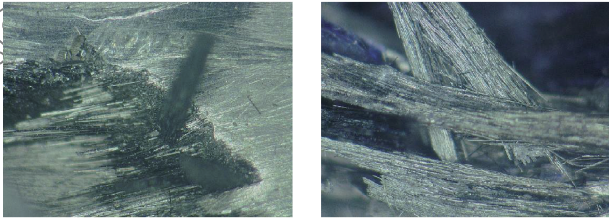
图 7 三维旋转显微镜
Fig. 7 Three-dimensional rotating microscope

其工作原理为实物光线通过高分辨率 SZ 镜头透射到高精度 CCD 上, CCD 曝光后, 光信号转换为电信号, 电信号通过放大器传送到 ADC, ADC 再将电信号转换为数字信号, 数字信号再经过 DSP 处理, 传输到显示器以图形的形式显示出来。同时, 可以通过鼠标控制器对所拍摄的图片进行测量和三维成像, 并将图像储存于硬盘中。

图 8 为三维四向编织复合材料平板(P20-03)损伤区域局部 50 倍放大形貌图。可以看出, 高速运动的钢珠冲击三维四向编织复合材料平板过程中, 迎弹面被钢珠挤压, 挤压区域表面的基体首先断裂, 纤维束和基体交界处出现分离, 交界处损伤的基体滞留于试验件中, 在迎弹面表现为白色痕迹; 靠近冲击核心区域, 纤维束也出现断裂现象, 这是由于纤维束遭受挤压剪切破坏引起的。背弹面断裂的纤维束形成鼓包, 这是由于背弹面纤维束拉伸破坏和纤维束抽拔引起的。再结合图 5 和表 3 中三维四向编织复合材料平板损伤尺寸可以看出, 50%板高和 70%板高试验工况下, 钢珠高速击穿平板, 90%板高工况下虽然钢珠也击穿平板, 但是由于冲击位置靠近上端自由边界, 导致平板在高速钢珠冲击下, 上自由端出现较大豁口, 大量纤维束被撞断击飞, 从而背弹面断裂纤维束仅下端形成鼓包。表



(a) Front view



(b) Rear view

图 8 三维四向编织复合材料平板(P20-03)损伤区域局部 50 倍放大形貌

Fig. 8 Local failure mode with magnification of 50x for 3D4DBCo plate(P20-03)

4 为钢珠冲击三维四向编织复合材料平板不同位置的速度参数。可以看出, 随着冲击位置从 50%板高增加到 70%板高时, 相同工况下三维四向编织复合材料平板吸收能量增加, 平板弹道极限增加; 而冲击位置为 90%板高时, 与冲击位置为 70%板高对比可以发现, 平板吸收能量略有减小, 平板弹道极限略有减小, 这可能由于当冲击位置为 90%板高时, 冲击位置靠近上自由端, 三维四向编织复合材

表 3 钢珠冲击三维四向编织复合材料试验件不同位置的损伤尺寸

Table 3 Failure size of 3D4DBCo plates impacted by steel ball at different locations

Test number	Bullet hole size of attack surface/mm	Bullet hole size of back surface/mm
P20-01	11×17	13×30
P20-03	11×20	13×30
P20-05	16×18	18×25

表 4 钢珠冲击三维四向编织复合材料平板不同位置的速度参数

Table 4 Velocities for steel ball in the impact process of 3D4DBCo plates at different locations

Test number	Impact velocity V_i / ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	Residual velocity V_o / ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	Kinetic energy loss/J	Ballistic limit velocity $V_{0.5}$ / ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
P20-01	203. 89	129. 53	55. 38	157. 46
P20-03	214. 37	128. 13	65. 97	171. 86
P20-05	206. 88	121. 02	62. 88	167. 79

料存在切边效应,从而根据公式 $V_{0.5} = \sqrt{V_i^2 - V_o^2}$ 求得的弹道极限值略偏低。

2 宏观有限元模型

2.1 三维编织复合材料平板几何模型和材料模型

建立 20°编织角的三维编织复合材料平板宏观几何模型,尺寸为 160 mm×84 mm×4 mm;钢珠弹体则建立直径为 10 mm 的球型几何模型,两者几何模型见图 9。分别对钢珠弹体和三维四向编织复合材料平板进行六面体网格划分,其中钢珠有限元模型由 17 920 个单元、18 755 个节点组成;三维四向编织复合材料平板宏观几何模型在进行网格划分时,冲击位置进行局部加密,有限元模型共包含 542 640 个单元、615 276 个节点,两者有限元模型如图 10 所示。

三维四向编织复合材料平板按连续介质体考虑,不涉及织物细观结构,并假定:(1)三维四向编织复合材料为正交各向异性,在三维方向定义相应的材料性能参数;(2)三维四向编织复合材料应力-应变关系是线弹性的,所有非线性行为由内部损伤及其演化引起;(3)三维四向编织复合材料力学性

能损伤演化通过材料弹性模量的弱化来表征,刚度的减小能用一组相关的失效参数来表达。

三维四向编织复合材料平板采用 ANSYS/LS-DYNA 商用软件中* MAT_COMPOSITE_DMG_MSC(MAT162)模型^[23],该模型属于连续损伤力学模型,以 Hashin^[24]准则描述纤维拉伸和压缩失效、纤维挤压失效、基体损伤和分层行为,通过引进单元失效删除准则减少模型在高速冲击时单元大变形而有可能导致的数值不稳定现象。三维四向编织复合材料平板的基本参数如表 5 所示,9 个弹性常数和 6 个失效强度来自于静态力学性能试验数据,其余则参考文献[25]。钢珠弹体材料采用* MAT_PLASTIC_KINEMATIC (MAT3)模型描述,其材料参数如表 6 所示,从材料手册获得。

表 5 三维四向编织复合材料平板材料参数

Table 5 Material parameters of 3D4DBCo plate

Material property	Value
Young's modulus E_x /MPa	94750
Young's modulus E_y /MPa	8560
Young's modulus E_z /MPa	8560
Poisson's ratio ν_{xy}	0.08
Poisson's ratio ν_{zx}	0.08
Poisson's ratio ν_{yz}	0.338
Shear modulus G_{xy} /MPa	17300
Shear modulus G_{yz} /MPa	5130
Shear modulus G_{zx} /MPa	17300
Longitudinal tensile strength S_{xt} /MPa	835
Longitudinal compressive strength S_{xc} /MPa	486
Transverse tensile strength S_{yt} /MPa	84
Transverse compressive strength S_{yc} /MPa	185
Through thickness tensile strength S_{zt} /MPa	84
Crush strength S_{crush} /MPa	251
Fiber mode shear strength S_{Fshear} /MPa	300
Matrix mode shear strength S_{Mxy} /MPa	69
Matrix mode shear strength S_{Myz} /MPa	69
Matrix mode shear strength S_{Mxz} /MPa	69
Scale factor P_{scale}	0.3
Mass density ρ /($\text{kg} \cdot \text{mm}^{-3}$)	1565

三维四向编织复合材料平板采用悬臂梁固支约束,具体如图 11 所示。设定钢珠弹体与三维四向编织复合材料平板的接触类型为面面侵蚀触* CONTACT_ERODING_SURFACE_TO_SUR-

表 6 钢珠材料参数

Table 6 Material parameters of steel ball

Mass density/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	Tangent modulus/ MPa	Young's modulus/ MPa	Poisson's ratio	Yield stress/ MPa	Hardening parameter	Strain rate parameter/ s^{-1}
7820	763	210000	0.30	310	0.1	40000

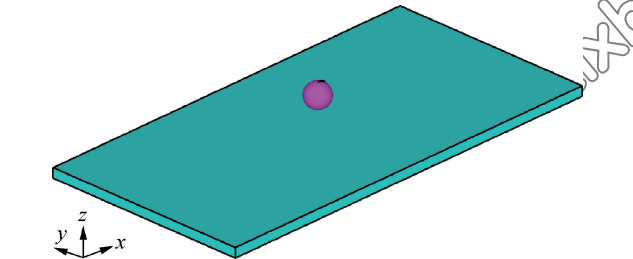


图 9 三维四向编织复合材料平板和钢珠几何模型示意图
Fig. 9 Sketches for geometric model of 3D4DBCo plate and steel ball

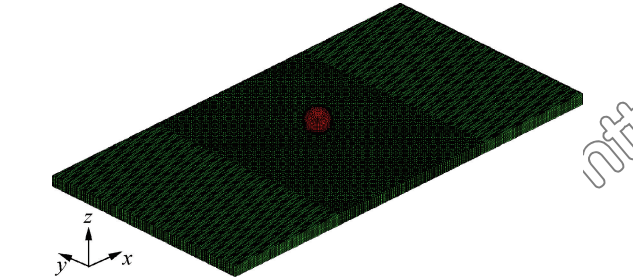


图 10 三维四向编织复合材料平板和钢珠有限元模型
Fig. 10 Finite element model of 3D4DBCo plate and steel ball

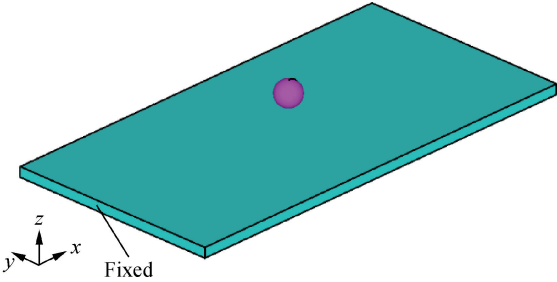


图 11 三维四向编织复合材料弹道冲击试验边界条件

Fig. 11 Boundary condition for ballistic impact tests of 3D4DBCo plates

FACE, 初始状态下, 弹体中心和靶板中心位于坐标系的 z 轴上, 赋予弹体 z 轴负方向的初速度。本文设定三维四向编织复合材料平板长度方向为 x 方向, 宽度方向为 y 方向, 厚度方向为 z 方向。数值模拟的载荷和冲击位置参数如表 7 所示。

2.2 有限元和实验结果比较与分析

根据表 7 中三维四向编织复合材料平板不同高度冲击的工况进行相应的数值仿真, 再结合之前的

表 7 三维四向编织复合材料弹道冲击试验
宏观模型数值模拟工况

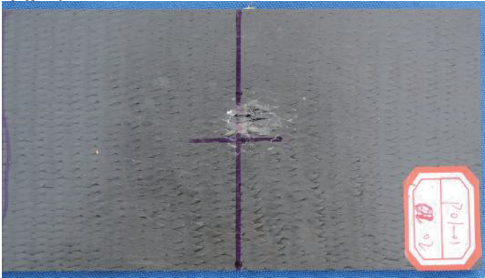
Table 7 Simulative conditions of macro models for ballistic impact tests of 3D4DBCo plates

Braiding angle/(°)	Ball diameter/mm	Angle of impact/(°)	Impact velocity/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	Impact location
20	10	0	203.89	50% plate height
20	10	0	214.37	70% plate height
20	10	0	206.88	90% plate height

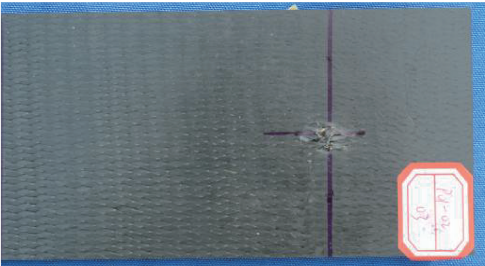
试验结果及图 12 的三维四向编织复合材料平板受冲击后损伤计算结果与试验结果对比。可知, 从三维四向编织复合材料平板最后的损伤形貌来看, 宏观模型并未能完全真实反映出试验件受钢珠冲击后造成的椭圆形洞痕和鼓包, 但是在一定程度也能够反映出其损伤情况。表 8 为钢珠剩余速度的对比分析, 发现仿真钢珠剩余速度与试验钢珠剩余速度误



(a) 50% plate height



(b) 70% plate height



(c) 90% plate height



图 12 三维四向编织复合材料弹道冲击数值模拟和试验结果

Fig. 12 Simulation and experiment results of ballistic impact tests of 3D4DBCo plates

差在5%以内,证明了基于宏观模型采用表5的材料模型及参数在一定程度上能够较好地预测三维四向编织复合材料抗钢珠冲击性能。

图13为各个工况下钢珠与三维四向编织复合材料平板动能、内能、总能量及钢珠速度、接触力历程曲线。可以看出,当钢珠与三维四向编织复合材料平板初步接触时,接触力迅速增加,钢珠速度减小,钢珠动能及总能量减小,钢珠内能、三维四向编织复合材料平板的内能、动能及总能量均增加。随后钢珠逐渐与三维四向编织复合材料平板接

触面积加大,三维四向编织复合材料平板受钢珠冲量传递产生运动,使钢珠与三维四向编织复合材料平板作用力下降,在钢珠完全穿透三维四向编织复合材料平板之前,钢珠速度一直减小,动能下降,三维四向编织复合材料平板的内能增加。钢珠完全穿过三维四向编织复合材料平板,钢珠和三维四向编织复合材料平板各种参数保持稳定值。

表9为钢珠能量损失与三维四向编织复合材料平板吸收能量对比。图14为三维四向编织复合材料弹道冲击试验各个工况下平板吸能及钢珠耗能时

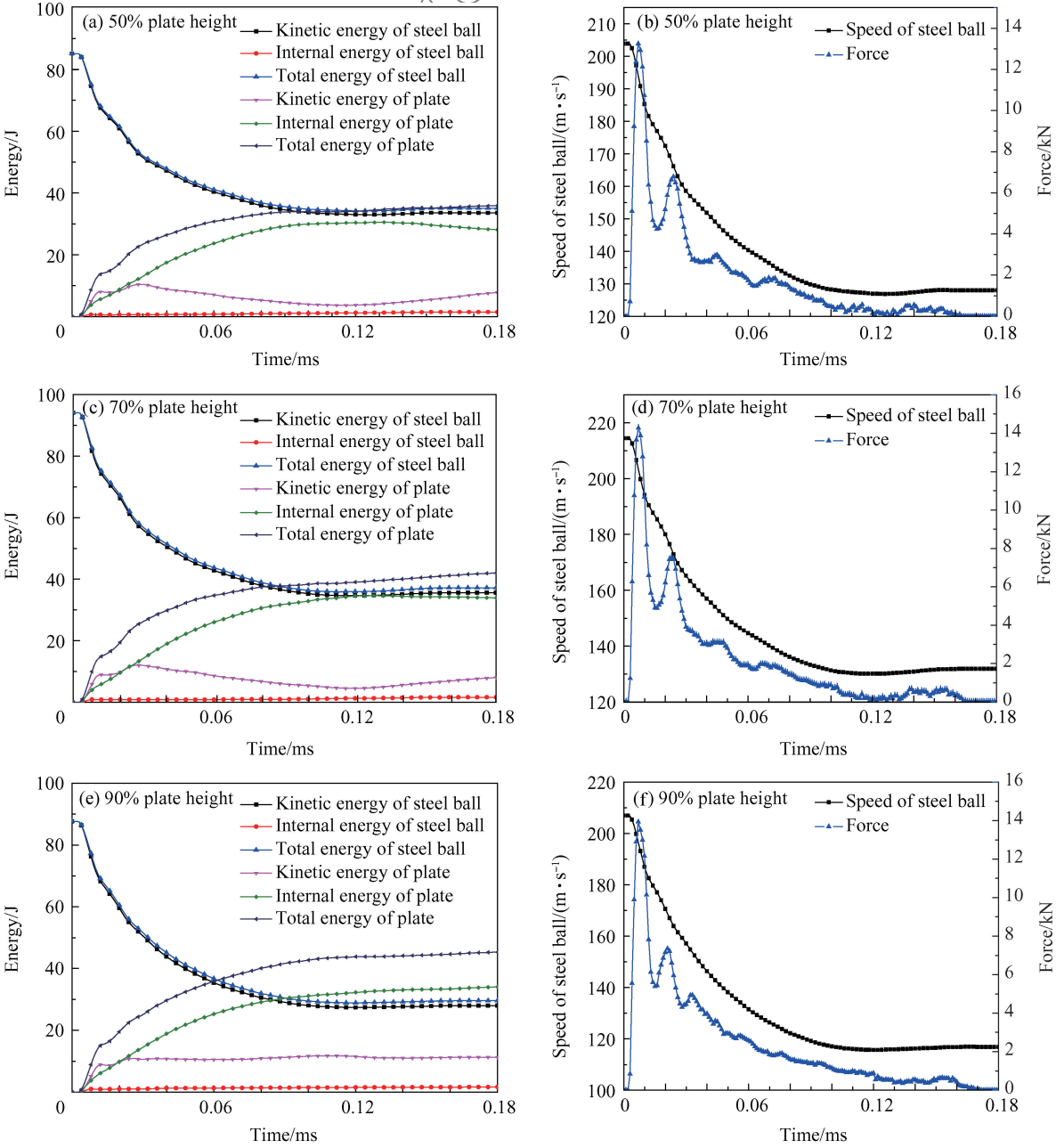


图13 三维四向编织复合材料弹道冲击试验各个工况下仿真结果曲线

Fig. 13 Simulation results under different conditions of ballistic impact tests of 3D4DBCo plates

间历程曲线。由表 9 和图 14 可以看出, 随着冲击位置从 50% 向 70%, 进而到 90% 板高改变时, 三维四向编织复合材料平板吸收总能增加, 钢珠耗能增加。不过 90% 板高工况相对于 70% 板高工况的能量增量比 70% 板高工况相对于 50% 板高工况的能量增量小一些。从图 12 可以看出, 钢珠冲击三维四向编织复合材料平板 90% 位置时造成三维四向编织复合材料平板的损伤与破坏面积比 70% 板高工况下大, 从而仿真计算结果显示 90% 板高工况下三维四向编织复合材料平板吸收的能量更多一些。由于 90% 板高工况下三维四向编织复合材料平板切边效应导致其自由端在钢珠冲击下容易出现较大豁口, 因此三维四向编织复合材料未来实际应用于航空发动机风扇叶片时, 需要对叶片边缘进行包边加强处理, 增强其抗损伤能力。

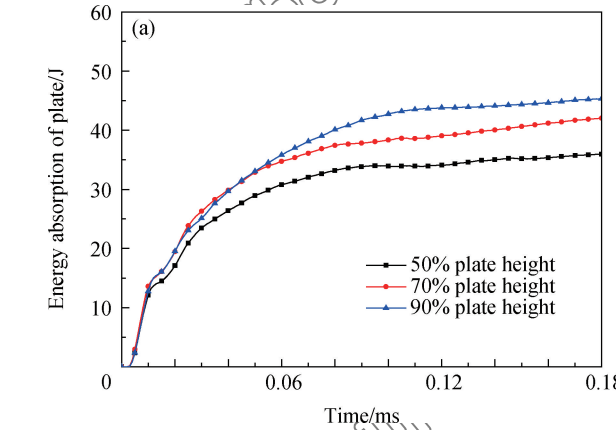


图 14 三维四向编织复合材料弹道冲击试验各个工况下平板吸能及钢珠耗能时间历程曲线

Fig. 14 Curves of energy absorption of plate and energy consumption of steel ball under various conditions of the ballistic impact test of 3D4DBCo plates

3 结 论

使用空气炮发射系统开展了钢珠以约 210 m/s 速度冲击三维四向编织复合材料平板的不同位置试验, 通过建立的三维四向编织复合材料的宏观连续介质损伤(CDM)模型数值模拟了钢珠冲击三维四向编织复合材料平板不同位置的过程, 得出以下结论:

- (1) 钢珠冲击三维四向编织复合材料平板过程中, 迎弹面被钢珠挤压, 挤压区域表面的基体首先断裂破坏飞出, 靠近冲击核心区域的碳纤维束出现断裂破坏现象, 主要由于纤维束遭受剪切破坏引起; 而背弹面断裂的纤维束形成鼓包, 主要破坏模式为纤维束拉伸破坏和抽拔。
- (2) 冲击位置是影响三维四向编织复合材料冲

表 8 钢球的试验剩余速度与仿真剩余速度对比

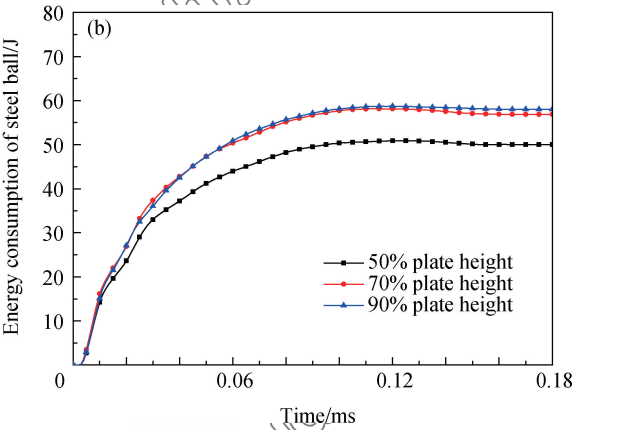
Table 8 Comparison of residual velocities of steel ball from simulations and experiments

Test number	Residual velocities/(m·s ⁻¹)		Error/%
	Experiment	Simulation	
P20-01	129.53	127.9904	1.188
P20-03	128.13	131.8645	2.914
P20-05	121.02	116.8661	3.430

表 9 钢珠能量损失与三维四向编织复合材料平板吸收能量对比

Table 9 Comparison of energy loss of steel ball and the absorbed energy of 3D4DBCo plates

Test number	Energy loss of steel ball/J	Absorbed energy of plate/J
P20-01	50.06	35.9
P20-03	56.86	42.0
P20-05	58.04	45.3



击损伤形貌的因素之一。特别是在冲击 90% 板高工况下三维四向编织复合材料平板切边效应导致其自由端在钢珠冲击下容易出现较大豁口, 因此三维四向编织复合材料未来实际应用于航空发动机风扇叶片时, 需要对叶片边缘进行包边加强处理, 增强其抗损伤能力。

(3) 在数值仿真计算中, 钢珠剩余速度结果与试验结果误差在 5% 以内, 三维四向编织复合材料平板宏观冲击损伤形貌与试验结果吻合较好, 表明 MAT162 宏观模型能够较好地模拟钢珠冲击三维四向编织复合材料平板过程。

参考文献:

[1] 梁军, 方国东. 三维编织复合材料力学性能分析方法[M].

- 哈尔滨: 哈工业大学出版社, 2014.
- LIANG J, FANG G D. Method of mechanical properties analysis of 3D braided composites[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2014 (in Chinese).
- [2] 徐静怡, 顾伯洪. 编织复合材料弹道冲击破坏形态及模式[J]. 弹道学报, 2002, 14(2): 39-43.
- XU J Y, GU B H. Damage pattern and failure mode of 3D braided composites under ballistic impact[J]. Ballistic Journal, 2002, 14(2): 39-43 (in Chinese).
- [3] ROSSO S D, IANNUCCI L, CURTIS P T. On the ballistic impact response of microbraid reinforced polymer composites[J]. Composite Structure, 2016, 137: 70-84.
- [4] 武鲜艳. 三维编织复合材料圆管轴向冲击压缩破坏细观结构和温度效应[D]. 上海: 东华大学, 2017.
- WU X Y. Microstructure and temperature effects on axial impact compressive damage of 3D braided composite circular tubes[D]. Shanghai: Donghua University, 2017 (in Chinese).
- [5] 蒋欢, 潘忠祥, 张威, 等. 低温场下三维编织复合材料的冲击压缩性能[J]. 东华大学学报, 2015, 41(6): 756-759.
- JIANG H, PAN Z X, ZHANG W, et al. Impact compressive properties of 3D braided composites at low temperature[J]. Journal of Donghua University, 2015, 41(6): 756-759 (in Chinese).
- [6] PAN B, YU Q F, YANG Y Q, et al. Full-field transient 3D deformation measurement of 3D braided composite panels during ballistic impact using single-camera high-speed stereo-digital image correlation[J]. Composite Structures, 2016, 157: 25-32.
- [7] GU B H. A microstructure model for finite-element simulation of 3D rectangular braided composite under ballistic penetration[J]. Philosophical Magazine, 2007, 87(30): 4643-4669.
- [8] ZHANG C, CURIEL-SOSA J L, DUODUE A, et al. Finite element analysis of the damage mechanism of 3D braided composites under high-velocity impact[J]. Journal of Materials Science, 2017, 52(8): 4658-4674.
- [9] PAN Z X, SUN B Z, GU B H. Thermo-mechanical numerical modeling on impact compressive damage of 3D braided composite materials under room and low temperatures[J]. Aerospace Science and Technology, 2016, 54: 23-40.
- [10] LI Y Y, GU B H, SUN B Z. Energy absorption of three-dimensional braided composites under impact punch shear loading[J]. Textile Research Journal, 2016, 86(19): 2080-2095.
- [11] JIAO Y N, LI J L. Impact and compression-after-impact performance of 3D braided glass/epoxy beam[J]. Journal of Materials Engineering, 2008(s1): 98-103.
- [12] GU B H, XU J Y. Finite element calculation of 4-step 3-dimensional braided composite under ballistic perforation[J]. Composites Part B: Engineering, 2004, 35(4): 291-297.
- [13] 杨灵敏, 焦亚男, 高华斌. 三维编织复合材料低速冲击试验与分析[J]. 纺织学报, 2009, 30(5): 63-67.
- YANG L M, JIAO Y N, GAO H B. Low-velocity impact experiment and analysis of 3-D braided composites[J]. Textile Journal, 2009, 30(5): 63-67 (in Chinese).
- [14] SUN B Z, ZHANG Y, GU B H. Low-velocity impact response and finite element analysis of four-step 3-D braided composites[J]. Applied Composite Materials, 2013, 20(4): 397-413.
- [15] 练军. 三维编织复合材料弹道侵入的数值模拟[D]. 上海: 东华大学, 2006.
- LIAN J. Numerical simulation of ballistic penetration of 3D braided composites[D]. Shanghai: Donghua University, 2006 (in Chinese).
- [16] 练军, 顾伯洪. 三维编织复合材料弹道冲击细观结构模型的有限元计算[J]. 弹道学报, 2006, 18(3): 79-83.
- LIAN J, GU B H. Microstructure model for finite element calculation of 4 steps 3-D rectangular braided composites under ballistic impact[J]. Ballistic Journal, 2006, 18(3): 79-83 (in Chinese).
- [17] LÓPEZ J. Experimental and numerical analysis of normal and oblique ballistic impacts on thin carbon/epoxy woven laminates[J]. Composites Part A: Applied Science & Manufacturing, 2008, 39(2): 374-387.
- [18] 杨永齐. 三维编织复合材料的冲击破坏分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- YANG Y Q. The impact damage analysis of 3D braided composites[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014 (in Chinese).
- [19] 练军. 动力有限元在三维编织复合材料弹道冲击性能研究中的应用[J]. 玻璃钢/复合材料, 2006(2): 14-17.
- LIAN J. Application of dynamic finite element method in ballistic property study of 3D braided composites[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2006(2): 14-17 (in Chinese).
- [20] 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 C. 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).
- [21] 顾伯洪, 徐静怡. 三维编织复合材料弹道侵入准细观层次有限元计算[J]. 复合材料学报, 2004, 21(3): 84-90.
- GU B H, XU J Y. Finite element calculation of a 3-D braided composite under ballistic penetration at quasi-microstructure hierarchy[J]. Journal of composites, 2004, 21(3): 84-90 (in Chinese).
- [22] 沈怀荣. 三维编织复合材料冲击实验与分析[J]. 装备指挥技术学院学报, 2002, 13(2): 84-86.
- SHEN H R. Impact experiment and analysis of three braided composite materials[J]. Journal of Equipment Command and Technology College, 2002, 13(2): 84-86 (in Chinese).
- [23] Livermore Software Technology Corporation. LS-DYNA keyword user's manual volume II: Material models, Version 971[M]. Livermore: Livermore Software Technology Corporation, 2013.
- [24] HASHIN Z. Failure criteria for unidirectional fiber composites[J]. Journal of Applied Mechanics, 1980, 47(6): 329-334.
- [25] 刘璐璐. 二维三轴编织带缠绕碳纤维复合材料机匣包容性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- LIU L L. Study on the containment of carbon fiber triaxial braided composite casing[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014 (in Chinese).