

# 平纹机织可展收层合壳弹道冲击特性研究<sup>\*</sup>

## STUDY ON BALLISTIC IMPACT CHARACTERISTICS OF BISTABLE LAMINATED SHELLS OF PLAIN WEAVED COMPOSITES

唱忠良<sup>\*\*1</sup> 张志俊<sup>\*\*\*1</sup> 吴晨晨<sup>\*\*\*\*2,3</sup> 邹广平<sup>1</sup> 吴松阳<sup>1</sup> 闫安石<sup>1</sup> 李寅辰<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨工程大学 航天与建筑工程学院, 哈尔滨 150001)

(2. 中国科学院沈阳自动化研究所 机器人学国家重点实验室, 沈阳 110016)

(3. 中国科学院机器人与智能制造创新研究院, 沈阳 110169)

CHANG ZhongLiang<sup>1</sup> ZHANG ZhiJun<sup>1</sup> WU ChenChen<sup>2,3</sup> ZOU GuangPing<sup>1</sup>

WU SongYang<sup>1</sup> YAN AnShi<sup>1</sup> LI YinChen<sup>1</sup>

(1. College of Aerospace and Civil Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

(2. State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

(3. Institute of Robotics and Intelligent Manufacturing, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110169, China)

**摘要** 可展收层合壳具有可变形、轻质、成形工艺简单、力学性能均匀等特点,在智能可变形结构上有潜在的应用价值。为了研究可展收层合壳的弹道冲击特性,使用一级轻气炮对三种不同材料制备的可展收层合壳进行弹道冲击试验,获得了不同速度下的冲击试验结果,分析了不同材料下可展收层合壳破坏形式的差异,并计算了相应铺层下可展收层合壳的弹道冲击试验中的总吸收能大小。对可展收层合壳侵彻试验进行了仿真模拟,并与试验结果相对比,验证了该仿真模型的准确性。使用验证后的仿真模型,分析了侵彻过程中弹丸的速度和加速度变化以及层合壳的破坏过程,计算了不同铺层层合壳的弹道极限速度。

**关键词** 复合材料层合壳 可展收 弹道行为 仿真分析

**中图分类号** TB332

**Abstract** The deployable laminated shell has the characteristics of deformable, lightweight, simple molding process, uniform mechanical properties, etc., and has great application value in intelligent deformable structure. In order to study the ballistic impact characteristics of the deployable laminated shell, the ballistic impact test of the deployable laminated shell of three different layup materials was carried out using a one-stage light air gun, and the impact test results at different speeds were obtained, the differences in the failure form of the deployable laminated shell under different layups were analyzed, and the ballistic limit speed of the corresponding substation deployable laminated shell and the total absorption energy in the ballistic impact test were calculated. The ballistic experiment of the deployable laminated shell was simulated, and the accuracy of the simulation model was verified by compared with the test results. Using the verified simulation model, the effects of different bullet types on the ballistic limit of the deployable laminated shell and its total absorption energy were calculated and analyzed.

**Key words** Composite laminated shell; Deployable; Ballistic behavior; Simulation analysis

**Corresponding author:** WU ChenChen, E-mail: wuchenchen@sia.cn, Tel: +86-24-23970012, Fax: +86-24-23970552

The project is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51905527, 11972127), and the Natural Science Foundation of Liaoning Province (No. 2019-MS-345).

Manuscript received 20220920, in revised form 20221020.

<sup>\*</sup> 20220920 收到初稿, 20221020 收到修改稿。国家自然科学基金项目 (51905527, 11972127), 辽宁省自然基金项目 (2019-MS-345) 资助。

<sup>\*\*</sup> 唱忠良, 男, 1982 年生, 吉林敦化人, 汉族, 哈尔滨工程大学讲师, 博士, 硕士研究生导师, 主要研究方向为复合材料抗冲击性能、金属橡胶隔振技术。

<sup>\*\*\*</sup> 张志俊, 男, 1997 年生, 江西赣州人, 汉族, 哈尔滨工程大学硕士研究生, 主要研究方向为空间可展开结构。

<sup>\*\*\*\*</sup> 吴晨晨 (通信作者), 女, 1990 年生, 河南商丘人, 汉族, 中国科学院沈阳自动化研究所机器人学国家重点实验室副研究员, 博士, 硕士研究生导师, 主要研究方向为离轨帆、柔性太阳能电池阵、基于折纸艺术的新型可展开空间结构与机构。

## 0 引言

采用平纹机织碳纤维增强树脂基复合材料制备的可展收层合壳具有可变形、轻质、成形工艺简单、力学性能均匀等特点,并且不需要额外的收纳装置即可在收拢及展开时自发保持稳定状态,具有极高的收纳效率,在空间可展开结构及智能可变形结构领域具有潜在的应用价值。

国内外许多研究学者针对平纹机织复合材料可展收层合壳的跳转特性以及层合板的抗冲击性能开展了研究。BRINKMEYER A 等<sup>[1]</sup>研究了长期卷收状态对可展收结构的影响,其分析建模和试验表明,长时间的卷收装载和温度变化所引起的应力过度松弛情况,会使可展收结构失去自主展开的能力。张征等<sup>[2]</sup>通过 Python 编程语言,对仿真软件 Abaqus 进行二次开发,建立了能够实现可展收复合材料圆柱壳快速、参数化建模与自动后处理的插件。赵巧莉等<sup>[3]</sup>对碳纤维平纹机织复合材料进行了低速冲击试验,并通过构建多尺度等效模型对复合材料层合板受冲击后的压缩性能进行了预测分析。李玺等<sup>[4]</sup>基于连续损伤力学模型,对碳纤维复合材料结构的失效和损伤演化过程进行了有限元分析,并通过试验验证了模型的准确性。邓云飞等<sup>[5]</sup>进行了半球形弹头不同角度冲击下平纹机织复合材料板的侵彻特性研究,分析了不同角度下侵彻试验中复合材料靶板弹道极限速度以及能量吸收率的差异,并观察记录了侵彻角度对靶板失效形式的影响。张如灏等<sup>[6]</sup>采用三维 Hashin 失效准则和刚度线性退化模型研究了铺层结构和铺层角度对亚麻-玄武岩纤维层合板抗低速冲击性能的影响,结果表明采用复合结构能够有效提升层合板的抗冲击性能。冯振宇等<sup>[7]</sup>进行了平纹机织与 2.5D 机织复合材料平板弹道冲击特性对比研究,分别获得了碳纤维平纹机织和碳纤维 2.5D 机织复合材料平板的弹道冲击响应及失效模式的相关试验结果。KUMAR D M 等<sup>[8]</sup>利用锥头弹对芳纶环氧树脂基平纹机织复合材料进行正向和斜向冲击,建立了一种适用于凯夫拉和碳纤维复合材料的多尺度仿真模型。马耀辉等<sup>[9]</sup>制备了多种不同结构形式的纤维金属层合板,对层合板结构的弯曲和低速冲击性能进行试验测试;并通过仿真模型研究了纤维铺层方式对层合板抗低速冲击性能的影响,结果表明添加纤维层能明显提升结构的抗冲击性能。ABAROTIN C A 等<sup>[10]</sup>进行了双稳态层合壳构型对层合碳纤维增强塑料(Carbon Fibre Reinforced Plastic, CFRP)复合材料低速冲击性能的影响的研究,得出双稳态结构通过增加能量吸收和试件动能,提高了层合 CFRP 复合材料的抗低速冲击损伤能力的结论。国内

外学者的相关研究大多集中在双稳态跳转特性以及层合板的抗冲击性能方面。

中国科学院沈阳自动化研究所研制的“天帆一号”太阳帆以及英国萨里大学萨里空间中心研制的 InflateSail 离轨帆均在近地轨道采用可展收碳纤维环氧复合材料杆验证了帆膜的展开和支撑技术。考虑到在轨展开之后的支撑杆可能会受到太空碎片的冲击性破坏,进而影响薄膜航天器的正常运行,因此本文对可展收层合壳结构进行了弹道冲击试验,分析了碳纤维复合材料支撑杆的抗冲击性能。本文利用一级轻气炮发射球形弹冲击三种不同铺层的可展收复合材料层合壳,通过弹道极限速度、吸能总量、损伤机制等方面进行层合壳的弹道冲击特性分析。

## 1 弹道冲击试验

### 1.1 试验设备

本试验所用到的试验设备是以压缩气体作为动力源的一级轻气炮,以实现可对展收复合材料层合壳的弹道冲击试验。试验装置包括轻气炮、发射管、激光测速装置、靶板固定装置、剩余速度测速装置、防护装置、示波器、子弹回收装置、信号采集器等。通过调节轻气炮的气室气压来控制子弹速度。试验装置简图如图 1 所示。

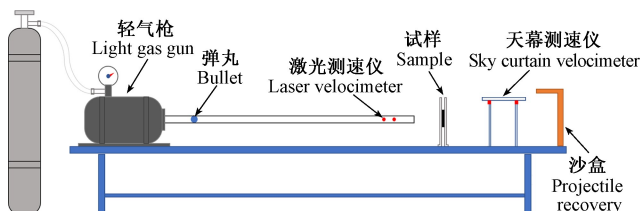


图 1 弹道冲击试验装置简图

Fig. 1 Schematic diagram of devices for the ballistic impact test

### 1.2 靶板材料

本文采用平纹机织碳纤维(东丽 T300-1K)预浸料以及平纹机织凯夫拉纤维(F2181C 1000 D)预浸料,运用真空袋压成形工艺制备了具有可展收性能的三种层合壳:碳纤维/碳纤维双层可展收层合壳(记为 CC),碳纤维/凯夫拉双层可展收层合壳(记为 CK),凯夫拉/凯夫拉双层可展收层合壳(记为 KK)复合材料层合结构,如图 2 所示。

本试验中裁切后用于弹道冲击试验的层合壳试样几何参数是:长为 200 mm,曲率半径为 22.5 mm,弧长为 50 mm。试样夹持情况和靶板的固定工况分别如图 2(c)和图 3 所示。子弹弹体选用高碳铬钢制成的球形弹丸,质量为 12 g,直径为 14.3 mm,具有较高的硬度和韧性,且弹体材料的强度远高于靶板材料,因此可以忽略试验过程中弹体的变形。

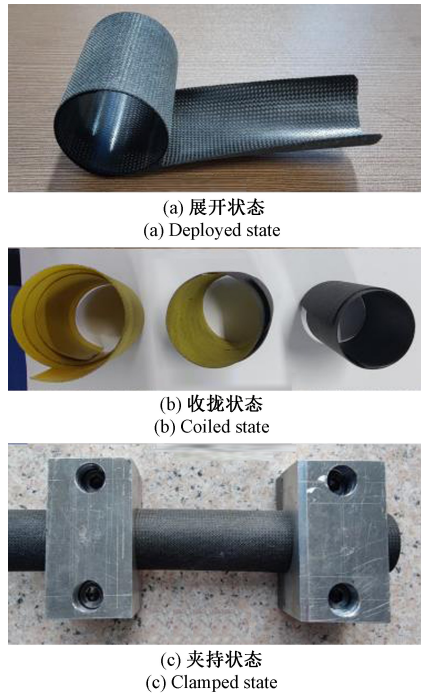


图 2 可展复合材料试件及夹持情况

Fig. 2 Composite specimens at deployed, coiled and clamped states

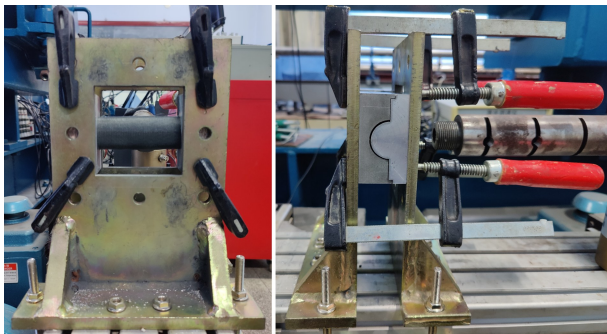


图 3 靶板固定工况

Fig. 3 Installation working condition of the target frame

## 2 试验结果分析

### 2.1 弹道冲击试验结果

本文共进行了 9 发有效试验, 每种试样共 3 发, 气压室气压分别设置为 0.25、0.5、1 MPa, 进行了内壳面弹道冲击试验, 所得试验结果如表 1 所示。此外, 为了更好地评估不同材料的层合壳相应的弹道冲击性能, 本文将根据所得的试验结果计算可展收层合壳的弹道极限速度以及弹道冲击试验中的总吸收能。

根据文献[11-12], 由于所有试验中子弹足够坚硬, 忽略试验过程中产生的变形, 所有的试样在弹道冲击试验中均被穿透, 总吸能  $E_a$  可以通过以下计算得到:

$$E_a = \frac{1}{2}mV_s^2 - \frac{1}{2}mV_r^2 \quad (1)$$

式中,  $V_s$  为初始速度;  $V_r$  为剩余速度;  $m$  为子弹质量。

表 1 弹道冲击试验结果

Tab. 1 Results of the ballistic impact test

| 试样类型<br>Specimen<br>type | 气压 Air<br>pressure/MPa | 初始速度<br>Incident<br>velocity/(m/s) | 剩余速度<br>Residual<br>velocity/(m/s) |
|--------------------------|------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| CC                       | 0.25                   | 81.6                               | 78.8                               |
|                          | 0.5                    | 99.8                               | 97.5                               |
|                          | 1                      | 156.2                              | 153.4                              |
| KK                       | 0.25                   | 75.1                               | 65.5                               |
|                          | 0.5                    | 112.1                              | 105.8                              |
|                          | 1                      | 138.1                              | 130.3                              |
| CK                       | 0.25                   | 77.6                               | 73.0                               |
|                          | 0.5                    | 103.6                              | 99.8                               |
|                          | 1                      | 155.8                              | 150.8                              |

### 2.2 总吸收能

根据式(1)可以得出各试样的总吸收能, 如表 2 所示。

表 2 弹道冲击试验各试样总吸收能

Tab. 2 Total absorption energy of each specimen in the ballistic impact test

| 试样类型<br>Specimen<br>type | 初始速度<br>Incident<br>velocity/(m/s) | 剩余速度<br>Residual<br>velocity/(m/s) | 总吸收能<br>Absorption<br>energy /J |
|--------------------------|------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|
| CC                       | 81.6                               | 78.8                               | 2.69                            |
|                          | 99.8                               | 97.5                               | 2.72                            |
|                          | 156.2                              | 153.4                              | 5.20                            |
| KK                       | 75.1                               | 65.5                               | 8.10                            |
|                          | 112.1                              | 105.8                              | 8.24                            |
|                          | 138.1                              | 130.3                              | 12.56                           |
| CK                       | 77.6                               | 73.0                               | 4.16                            |
|                          | 103.6                              | 99.8                               | 4.63                            |
|                          | 155.8                              | 150.8                              | 9.20                            |

由表 2 可以看出, 使用凯夫拉纤维预浸料代替碳纤维预浸料制作可展收层合壳可以明显提高层合壳的抗弹能力。此外, 初始侵彻速度越大, 层合壳试样的吸收能越大, 相比于 100 m/s 以内的侵彻速度, 在初始速度为 150 m/s 范围内层合壳的吸收能得到明显的提升。

### 2.3 材料失效模式

可展收层合壳在弹道冲击作用下, 其失效模式主要取决于纤维材料的种类。其中, 碳纤维层的失效模式主要为由机织纤维沿损伤区域一周的脆断造成的冲塞破坏; 而凯夫拉纤维层的失效模式主要为入射弹丸侵彻过程中造成的纤维拔伸断裂。图 4(a) 所示为 CC 试样在受到弹丸的冲击侵彻时, 层合壳的材料失效过程。由图 4(a) 可以看出, 发生弹丸侵彻时, 碳纤维直接沿侵彻区域碎裂, 产生冲塞现象。图 4(b) 所示为 CK 试样在受到弹丸的冲击侵彻时, 层合壳的材料失效过程。由图 4(b) 可以看出, 在侵彻过程中, 碳纤维层

受侵彻区域碎裂成多块,凯夫拉纤维被拔伸后断裂,产生开花现象。

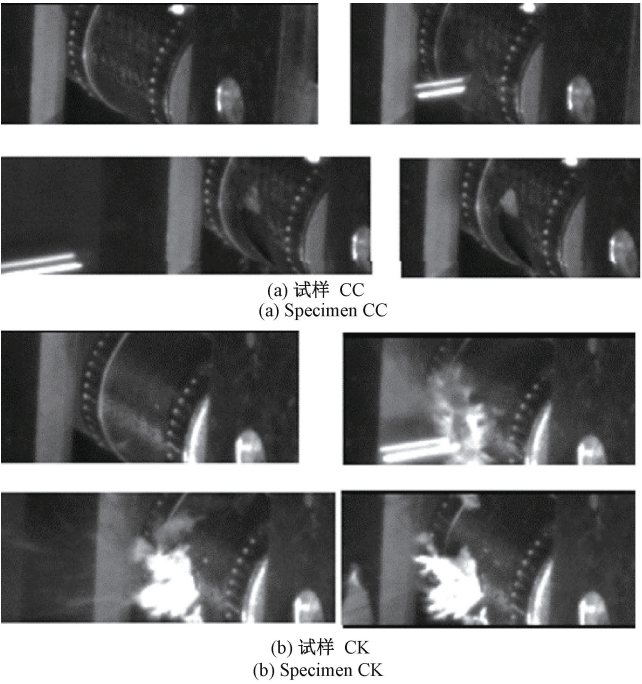


图 4 试样典型侵彻过程示意图  
Fig. 4 Typical ballistic process diagram of specimens

碳纤维层的吸能作用主要体现为纤维的脆断所需的断裂能,而凯夫拉纤维层的吸能作用主要体现为纤维拔伸过程中的应变能吸收以及之后产生断裂所需的断裂能。由于凯夫拉纤维本身具有更高的断裂能及纤维变形所需的更多能量,所以在可展收层合壳的制备中,添加凯夫拉纤维层能大幅提升层合壳的抗弹性能。

3 可展收层合壳弹道性能仿真研究

3.1 仿真模型建立

运用 Ls-Dyna 软件建立层合壳的弹道冲击模型(图 5),模拟结构在展开状态时的弹道冲击试验。

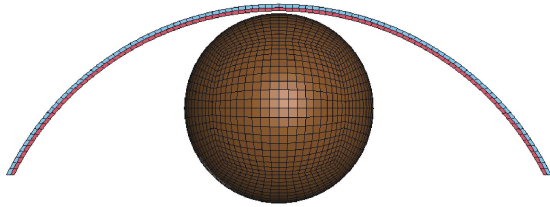


图 5 层合壳的弹道冲击有限元模型  
Fig. 5 Finite element model of laminated shells' ballistic impact

模型网格类型均为 Solid164,弹丸选用线弹性材料(MAT001-ELASTIC),平纹机织层合壳选用基于经典层合理论和 Chang-Chang 失效准则<sup>[13-14]</sup>的复合材料模型(MAT022-COMPOSITE\_DAMAGE)。参数具体设置<sup>[15]</sup>如表 3~表 5 所示。

表 3 弹丸模型材料参数

Tab. 3 Material parameters of bullet model

| $\rho/(\text{g}/\text{cm}^3)$ | $E/\text{GPa}$ | $\mu$ |
|-------------------------------|----------------|-------|
| 7.8                           | 200            | 0.27  |

表 3 中, $\rho$  为密度; $E$  为弹性模量; $\mu$  为泊松比。

表 4 凯夫拉层合壳材料参数

Tab. 4 Material parameters of Kevlar laminated shell

| $\rho/(\text{g}/\text{cm}^3)$ | $E_1/\text{GPa}$    | $E_2/\text{GPa}$ | $E_3/\text{GPa}$    |
|-------------------------------|---------------------|------------------|---------------------|
| 1.35                          | 210                 | 210              | 4.6                 |
| $\mu_{12}$                    | $\mu_{13}$          | $\mu_{23}$       | $G_{12}/\text{GPa}$ |
| 0.31                          | 0.14                | 0.14             | 1.2                 |
| $G_{13}/\text{GPa}$           | $G_{23}/\text{GPa}$ | $K_F/\text{GPa}$ | $S_C/\text{GPa}$    |
| 1.2                           | 1.2                 | 2                | 0.8                 |
| $X_T/\text{GPa}$              | $Y_T/\text{GPa}$    | $Y_C/\text{GPa}$ | $T_N/\text{GPa}$    |
| 1.5                           | 1.5                 | 0.8              | 1.65                |
| $G_{xz}/\text{GPa}$           | $G_{yz}/\text{GPa}$ | $\alpha$         | $A_{OPT}$           |
| 1.5                           | 1.5                 | 0.5              | 3                   |

表 5 碳纤维层合壳材料参数

Tab. 5 Material parameters of Carbon fiber laminated shell

| $\rho/(\text{g}/\text{cm}^3)$ | $E_1/\text{GPa}$    | $E_2/\text{GPa}$ | $E_3/\text{GPa}$    |
|-------------------------------|---------------------|------------------|---------------------|
| 1.48                          | 50                  | 50               | 6.9                 |
| $\mu_{12}$                    | $\mu_{13}$          | $\mu_{23}$       | $G_{12}/\text{GPa}$ |
| 0.04                          | 0.15                | 0.15             | 19.5                |
| $G_{13}/\text{GPa}$           | $G_{23}/\text{GPa}$ | $K_F/\text{GPa}$ | $S_C/\text{GPa}$    |
| 2.7                           | 2.7                 | 1.5              | 0.666               |
| $X_T/\text{GPa}$              | $Y_T/\text{GPa}$    | $Y_C/\text{GPa}$ | $T_N/\text{GPa}$    |
| 0.72                          | 0.72                | 0.55             | 1                   |
| $G_{xz}/\text{GPa}$           | $G_{yz}/\text{GPa}$ | $\alpha$         | $A_{OPT}$           |
| 0.125                         | 0.125               | 0.4              | 3                   |

表 4、表 5 中, $E_1$ 、 $E_2$ 、 $E_3$  为各向弹性模量; $\mu_{12}$ 、 $\mu_{13}$ 、 $\mu_{23}$  为各向泊松比; $G_{12}$ 、 $G_{13}$ 、 $G_{23}$  为各向剪切模量; $K_F$  为材料损伤体积模量; $S_C$  为面内剪切强度; $X_T$ 、 $Y_T$  分别为纵向和横向拉伸强度; $Y_C$  为横向压缩强度; $T_N$  为单元法向拉伸强度; $G_{xz}$ 、 $G_{yz}$  为横向剪切强度; $\alpha$  为非线性剪切应力修正系数; $A_{OPT}$  为材料主轴设置参数。

3.2 仿真模型可靠性验证

将仿真计算结果和试验数据进行对比(表 6),仿真值与试验值的最大相对误差不超过 10%,在工程误差要求范围内,因此该仿真模型的计算结果是可靠的。

3.3 侵彻过程分析

对 CC、CK 和 KK 复合材料层压壳进行侵彻仿真分析,弹丸初始速度设置为 100 m/s,得到侵彻破坏过程中弹丸的速度变化曲线、加速度变化曲线分别如图 6(a)和图 6(b)所示,弹丸速度方向上的位移云图如图 7 所示。

由图 6 可以看出, KK 试样的剩余速度最低, CK 试样次之, CC 试样剩余速度最大,表明采用凯夫拉铺层能有效提高碳纤维复合材料试件的抗弹性能。

表 6 仿真值与试验值相对误差

Tab. 6 Relative error of simulation value and experiment value

| 试样类型<br>Specimen type | 初始速度<br>Incident velocity/<br>(m/s) | 试验剩余速度<br>Residual velocity of experiment/<br>(m/s) | 仿真剩余速度<br>Residual velocity of simulation/<br>(m/s) | 相对误差<br>relative error/% |
|-----------------------|-------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|--------------------------|
| CC                    | 81.6                                | 78.8                                                | 78.9                                                | 0.13                     |
|                       | 99.8                                | 97.5                                                | 97.5                                                | 0                        |
|                       | 156.2                               | 153.4                                               | 154.4                                               | 0.74                     |
| KK                    | 75.1                                | 65.5                                                | 61.1                                                | 6.72                     |
|                       | 112.1                               | 105.8                                               | 105.1                                               | 0.66                     |
|                       | 138.1                               | 130.3                                               | 133.4                                               | 2.38                     |
| CK                    | 77.6                                | 73.0                                                | 72.7                                                | 0.41                     |
|                       | 103.6                               | 99.8                                                | 100.3                                               | 0.50                     |
|                       | 155.8                               | 150.8                                               | 153.3                                               | 1.66                     |

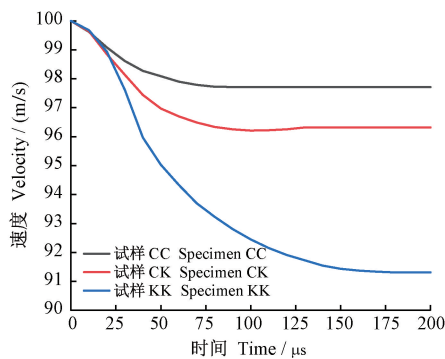
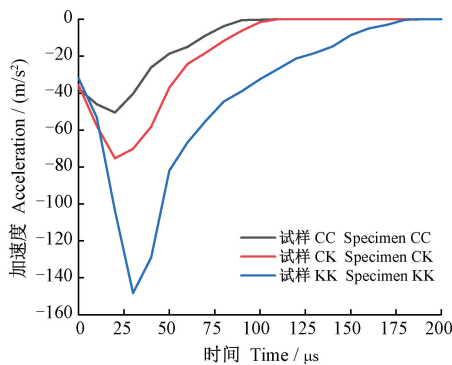
(a) 弹丸速度变化曲线  
(a) Velocity-time curve of projectiles(b) 弹丸加速度变化曲线  
(b) Acceleration-time curve of projectiles

图 6 弹丸以 100 m/s 速度穿透不同试样的速度和加速度变化

Fig. 6 Velocity and acceleration variations of the projectile penetrating different samples for  $V_s = 100$  m/s

由图 7(a) 可知, 对于 CC 试样, 弹丸的减速主要取决于着弹区域材料的碎裂过程, 随着弹丸撞击的进行, 弹丸和层合壳的接触面积先增大后减少, 造成了弹丸加速度的凹形。由图 7(b) 可知, 对于 CK 试样, 由于凯夫拉纤维的包裹作用, 外层碳纤维的破坏模式呈以弹着点为中心逐渐扩散碎裂的趋势, 凯夫拉纤维被拉伸到最大时, 弹丸加速度也到达峰值, 随后越来越多的凯夫拉纤维被拉断, 加速度开始下降。由图 7(c) 可知, 对于 KK 试样, 弹丸加速度的剧增来源于凯夫拉纤维的不断拉伸, 较多的弹丸动能转化为凯夫拉纤维的应

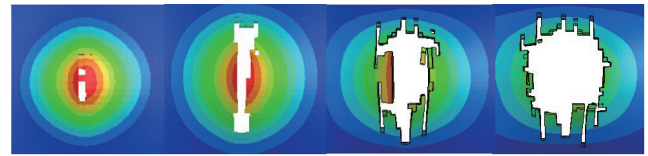
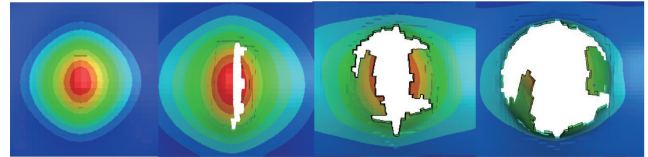
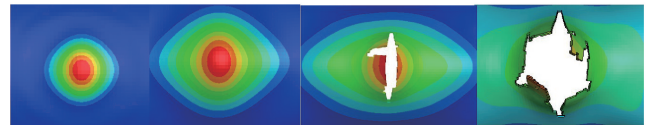
(a) CC 试样层合壳位移云图  
(a) Displacement nephogram of specimen CC(b) CK 试样层合壳位移云图  
(b) Displacement nephogram of specimen CK(c) KK 试样层合壳位移云图  
(c) Displacement nephogram of specimen KK

图 7 弹丸速度方向上的位移云图

Fig. 7 Displacement nephogram of projectiles in the direction of speed

变能, 随后凯夫拉纤维开始断裂, 弹丸动能转化为纤维断裂能。

对比图 7 与图 4 可以看出, 仿真过程中凯夫拉纤维的拉伸断裂现象与试验结果基本一致。

### 3.4 弹道极限速度与吸收能

本文采用 RECHT R F 等<sup>[16]</sup>提出的  $R-I$  公式计算弹道极限速度, 其原式为

$$v_r = a(v_i^p - v_{bl}^p)^{(1/p)} \quad (2)$$

式中,  $v_r$  为弹丸剩余速度;  $v_i$  为入射速度;  $v_{bl}$  为弹道极限速度;  $a, p$  为模型参数。

则弹道极限速度  $v_{bl}$  可由式(3)求得:

$$v_{bl} = (v_i^p - \frac{1}{a}v_r^p)^{(1/p)} \quad (3)$$

通过仿真模型获得不同试件在不同入射速度下的弹丸剩余速度, 运用数值拟合方法求出式(2)中的模型参数与弹丸极限速度, 拟合曲线如图 8 所示。CC 试样的  $R-I$  拟合曲线中, 模型参数  $a = 0.995, p = 2.517$ , 弹道极限速度  $v_{bl} = 28.938$  m/s; CK 试样的  $R-I$  拟合曲线中, 模型参数  $a = 0.835, p = 2.983$ , 弹道极限速度  $v_{bl} = 34.547$  m/s; KK 试样的  $R-I$  拟合曲线中, 模型参数  $a = 0.997, p = 2.229$ , 弹道极限速度  $v_{bl} = 43.965$  m/s。其中, CK 试样比 CC 试样弹道极限速度提升了 19.38%, KK 试样比 CK 试样弹道极限速度提升了 27.26%, 由此可知, 凯夫拉铺层能有效提升层合壳的弹道极限速度。

本文还研究了初始侵彻速度对不同复合材料层合结构吸能效果的影响, 如图 9 所示, 给出了在入射速度分别为 50、100、150 m/s 时, CC、CK、KK 层合壳的吸收能。由图 9 可知, KK 试样吸能性能远高于 CK 试样及

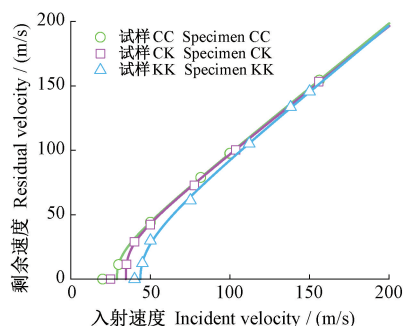


图8 弹道极限速度拟合曲线

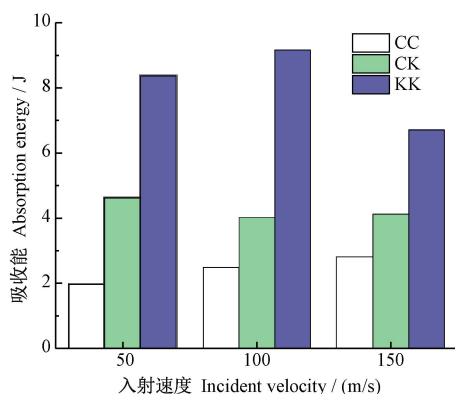
Fig. 8  $R-I$  fitting curve of the ballistic ultimate velocity

图9 不同入射速度下吸收能对比

Fig. 9 Comparison of absorption energy at different incident speeds

CC 试样。CC 试样的吸收能大小与入射速度成正比, CK 试样与 KK 试样则无此现象。

## 4 结论

本文对不同铺层的可展收层合壳进行了弹道冲击试验,根据试验数据计算了三种层合壳的弹道极限速度,并进行了仿真分析,得到以下结论:

1) 使用凯夫拉纤维材料制作可展收层合壳虽然会引起螺旋现象,但能有效提升结构的抗弹吸能性能。

2) 两种铺层材料中,碳纤维层的破坏形式主要表现为材料脆断,而凯夫拉纤维的破坏形式主要表现为纤维拉伸断裂。

3) CC 试样的弹道极限速度  $v_{bl} = 28.938$  m/s, CK 试样的弹道极限速度  $v_{bl} = 34.547$  m/s, KK 试样的弹道极限速度  $v_{bl} = 43.965$  m/s。含凯夫拉层的试样弹道极限速度明显提升,纯凯夫拉试样弹道极限速度相比纯碳纤维弹道极限速度提升 51.92%,使用凯夫拉复合材料制备可展收层合壳可提升结构的抗侵彻性能。

## 参考文献 (References)

[1] BRINKMEYER A, PELLEGRINO S, WEAVER P M. Effects of long-term storage on the deployment of bistable tape springs[J]. Journal of Applied Mechanics, 2016, 83(1):011008.  
[2] 张 征,虞筱琛,孙 敏,等.基于可伸展变形的双稳态圆柱壳计算模型[J].计算机集成制造系统,2022,28(2):518-525.

ZHANG Zheng, YU XiaoChen, SUN Min, et al. Computational model of bistable cylindrical shell based on extensible deformations [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2022, 28(2): 518-525 (In Chinese).  
[3] 赵巧莉,侯玉亮,刘泽仪,等.碳纤维平纹机织复合材料低速冲击及冲击后压缩性能多尺度分析[J].中国机械工程,2021,32(14):1732-1742.  
ZHAO QiaoLi, HOU YuLiang, LIU ZeYi, et al. Multi-scale analysis of the LVI and CAI behaviors of plain woven carbon-fiber-reinforced composites[J]. China Mechanical Engineering, 2021, 32(14): 1732-1742 (In Chinese).  
[4] 李 玺,李亚智,磨承杰,等.基于连续损伤力学的复合材料多钉连接失效分析和试验研究[J].机械强度,2022,44(4):911-920.  
LI Xi, LI YaZhi, MO ChengJie, et al. Failure analysis and experimental study of composite multi-pin connections based on continuum damage mechanics[J]. Journal of Mechanical Strength, 2022, 44(4): 911-920 (In Chinese).  
[5] 邓云飞,袁家俊,徐建新.半球形头弹不同角度冲击下编织复合材料板的侵彻特性[J].复合材料学报,2018,35(4):843-849.  
DENG YunFei, YUAN JiaJun, XU JianXin. Penetration characteristics of woven composite laminates impacted by hemispherical-nosed projectiles at different angles[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(4): 843-849 (In Chinese).  
[6] 张如灏,崔 岸,陈 宠,等.亚麻-玄武岩纤维层合板低速冲击性能及应用研究[J].机械强度,2022,44(6):1350-1356.  
ZHANG RuHao, CUI An, CHEN Chong, et al. Low speed impact performance and application of flax-basalt fiber composites[J]. Journal of Mechanical Strength, 2022, 44(6): 1350-1356 (In Chinese).  
[7] 冯振宇,迟琪琳,崔怀天,等.平纹机织与 2.5D 机织复合材料平板弹道冲击特性对比[J].航空学报,2022,43(5):558-569.  
FENG ZhenYu, CHI QiLin, CUI HuaiTian, et al. Comparison of ballistic impact behavior of plain woven and 2.5D woven fabric composite plates[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(5): 558-569 (In Chinese).  
[8] KUMAR D M, PANIGRAHI S K. FEA of plain woven kevlar/epoxy composites subjected to normal and oblique impact with multi-scale modelling[J]. Fibers and Polymers, 2020, 21(12): 2927-2937.  
[9] 马耀辉,崔 岸,刘芳芳,等.纤维金属层合板低速冲击性能研究[J].机械强度,2022,44(4):795-800.  
MA YaoHui, CUI An, LIU FangFang, et al. Study on low speed impact performance of fiber-metal laminates [J]. Journal of Mechanical Strength, 2022, 44(4): 795-800 (In Chinese).  
[10] ABAROTIN C A, MYERS O J, PATAKY G J. Low velocity impact of bistable laminated cfrp composites [J]. Journal of Dynamic Behavior of Materials, 2019, 5(4): 432-443.  
[11] FELLOWS N A, BARTON P C. Development of impact model for ceramic-faced semi-infinite armour [J]. International Journal of Impact Engineering, 1999, 22(8): 793-811.  
[12] JAMBARI S, YAHYA M Y, ABDULLAH M R, et al. Woven Kenaf/Kevlar Hybrid Yarn as potential fiber reinforced for anti-ballistic composite material [J]. Fibers and Polymers, 2017, 18(3): 563-568.  
[13] CHANG F K. Post-failure analysis of bolted composite joints in tension or shear-out mode failure [J]. Journal of Composite Materials, 1987, 21(9): 809-833.  
[14] CHANG F K. A progressive damage model for laminated composites containing stress concentrations [J]. Journal of Composite Materials, 1987, 21(9): 834-855.  
[15] 唐昌州,智小琦,高峰,等.钨球侵彻防弹衣加红松木复合靶的研究[J].爆炸与冲击,2021,41(6): 84-97.  
TANG ChangZhou, ZHI XiaoQi, GAO Feng, et al. Investigation on tungsten spheres penetrating into pine target covered with body armor [J]. Explosion and Shock Waves, 2021, 41(6): 84-97 (In Chinese).  
[16] RECHT R F, IPSON T W. Ballistic perforation dynamics [J]. Journal of Applied Mechanics, 1963, 30(3): 384-390.