

## 超高分子量聚乙烯纤维平纹织物-单向布混合堆叠板的防弹机制

袁子舜 陆振乾 许玥 徐望

### Ballistic mechanism of the hybrid panels with UHMWPE woven fabrics and UD laminates

YUAN Zishun, LU Zhenqian, XU Yue, XU Wang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210625.001>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 基于犰狳外壳仿生的SiC-超高分子量聚乙烯柔性防护板的试验测试和有限元模拟

Experimental testing and finite element simulation of SiC-ultrahigh molecular weight polyethylene flexible protective plate inspired by armadillo shell

复合材料学报. 2020, 37(10): 2561–2571 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200121.001>

#### 芳纶纤维和超高分子量聚乙烯纤维制备工程用纤维/水泥复合材料的适用性

Applicability of aramid fiber and ultra-high molecular weight polyethylene fiber for engineered fiber/cement composites

复合材料学报. 2019, 36(1): 245–253 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180417.001>

#### 超高分子量聚乙烯架桥纤维与裂缝的交互微观力学

Interfacial micromechanics analysis on the ultrahigh molecular weight polyethylene bridging fibers crossing cracks

复合材料学报. 2017, 34(7): 1505–1510 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20161024.004>

#### 超高分子量聚乙烯纤维/水性聚氨酯复合材料层压板抗软钢芯弹侵彻性能及其损伤机制

Ballistic performance of ultrahigh molecular weight polyethylene fiber/waterborne polyurethane composite laminate against mild-steel core projectile and its damage mechanism

复合材料学报. 2021, 38(5): 1455–1467 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200722.003>

#### 超高分子量聚乙烯(UHMWPE)纤维表面处理对UHMWPE/环氧树脂复合材料界面性能的影响机制

Influence mechanism of ultra high molecular weight polyethylene(UHMWPE) fiber surface modification on interfacial performance of UHMWPE/epoxy composites

复合材料学报. 2020, 37(3): 573–580 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190705.001>

#### SiC-超高分子量聚乙烯仿生柔性叠层结构防弹性能关键影响因素的仿真与试验

Simulation and experiment of key influencing factors on ballistic performance of SiC-ultra-high molecular weight polyethylene biomimetic flexible laminated structure

复合材料学报. 2020, 37(11): 2928–2940 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200222.001>

DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20210625.001

超高分子量聚乙烯纤维平纹织物-单向布  
混合堆叠板的防弹机制



分享本文

袁子舜<sup>1</sup>, 陆振乾<sup>\*2</sup>, 许玥<sup>3</sup>, 徐望<sup>4</sup>

(1. 广东工业大学 能源与材料学院, 广州 510006; 2. 盐城工学院 纺织服装学院, 盐城 224051; 3. 北京中科老专家技术中心, 北京 100190; 4. 北卡罗来纳州立大学 威尔逊纺织学院, 罗利 27606)

**摘 要:** 柔性防弹衣具有隐蔽性好、穿着舒适的优点, 而采用平纹与单向 (UD) 布杂化结构具有更好的防护效果。本文采用三层超高分子量聚乙烯 (UHMWPE) 纤维平纹织物 (A) 和两层 Dyneema<sup>®</sup> SB51 UD 布 (B) 组成 AAAB 和 BBAA 两种混合靶板, 通过弹道实验比较两种排列方式的防弹性能差异。结果表明, 将平纹织物在前 UD 布在后能大幅提升整块板的防弹性能, 能量吸收比后者高约 20%。进一步采用有限元模拟来阐明其防弹机制, 模拟结果表明将平纹织物放在面层不易被切断, 使得平纹织物层发生更大的形变, 也使后面的 UD 布发生大面积形变, 吸收大量能量。而 UD 布放在前面层易产生的切力破坏, 失去对后面层的作用。而平纹织物在后层容易发生滑移, 且形变纵深过大, 不利于防弹保护。该研究结果阐明了平纹织物和 UD 布不同顺序堆叠时的防弹机制, 为进一步优化设计该类柔性防弹衣提供了坚实的理论基础。

**关键词:** 超高分子量聚乙烯纤维; 平纹织物; 单向 (UD) 布; 混合堆叠板; 有限元模拟分析; 弹道冲击

**中图分类号:** TB332      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-3851(2022)06-2707-09

Ballistic mechanism of the hybrid panels with UHMWPE woven fabrics and UD laminates

YUAN Zishun<sup>1</sup>, LU Zhenqian<sup>\*2</sup>, XU Yue<sup>3</sup>, XU Wang<sup>4</sup>

(1. School of Materials and Energy, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China;  
2. School of Textile and Garment, Yancheng Institute of Technology, Yancheng 224051, China;  
3. Chinese Academy of Sciences Senior Expert Technology Center, Beijing 100190, China;  
4. Wilson College of Textiles, North Carolina state University, Raleigh 27606, United States of America)

**Abstract:** Soft body armour has the advantages of good concealment and high comfortability. Recent studies demonstrate that soft body armours made up of layers of woven fabrics and unidirectional (UD) laminates show better ballistic performance. However, the mechanism behind has not been clarified. This work utilized three layers of woven fabrics (A) made by ultrahigh molecular weight polyethylene (UHMWPE) yarns and two layers of Dyneema<sup>®</sup> SB51 UD laminates (B) to compose two types of hybrid panels, viz. AAAB and BBAA. Ballistic tests were carried out to evaluate their performance. The results show that the first type panel absorbs around 20% more energy than the second counterpart does. The finite element modelling is used to clarify the ballistic mechanism. The results illustrate that when the woven fabrics in front, they are not easier to be failed by shear, which results in more deformation of the fabric and therefore more deformation of the UD laminates behind, thereby giving rise to higher energy absorption. In contrast, when the UD laminates in front, they are easier to be damaged by the shear stress, failing to act on the followed layers. Moreover, when the woven fabrics at the rear, they tend to slip and meanwhile bring about more deformation in depth, which is detrimental to the protection. This study sheds light on the ballistic

收稿日期: 2021-05-12; 修回日期: 2021-05-30; 录用日期: 2021-06-09; 网络首发时间: 2021-06-25 14:42:47

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210625.001>

基金项目: 国家自然科学基金 (51478408)

通信作者: 陆振乾, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为纺织复合材料 E-mail: [luzhenqian2003@126.com](mailto:luzhenqian2003@126.com)

引用格式: 袁子舜, 陆振乾, 许玥, 等. 超高分子量聚乙烯纤维平纹织物-单向布混合堆叠板的防弹机制 [J]. 复合材料学报, 2022, 39(6): 2707-2715.

YUAN Zishun, LU Zhenqian, XU Yue, et al. Ballistic mechanism of the hybrid panels with UHMWPE woven fabrics and UD laminates[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(6): 2707-2715(in Chinese).

mechanism of hybrid panels with laying woven fabrics and UD laminates in different sequences. Such results, theoretically, pave the way for the design of the hybrid soft body amours.

**Keywords:** UHMWPE fiber; woven fabric; unidirectional (UD) laminate; hybrid panel; finite element analysis; ballistic impact

随着国内外针对平民的恐怖袭击日益增多, 防弹衣的柔软化、轻质化成为目前的研究热点。这样的防弹衣不仅要求有好的防弹性能, 而且需要轻质柔软, 不会阻碍被保护者的日常活动<sup>[1-4]</sup>。目前, 最常用的轻质防弹衣材料是超高分子量聚乙烯 (UHMWPE) 纤维, 该纤维具有超高模量 (80~120 GPa)、低密度 (970 kg/m<sup>3</sup>) 及高拉伸强度 (约 3.5 GPa) 的优点, 适合编织成织物或制成复合材料板用以防弹<sup>[5-7]</sup>。柔性防弹衣通常是通过将平纹结构织物或单向 (UD) 布堆叠起来, 这两种结构较稳定, 在受到冲击时, 不易松散, 能够起到很好的保护作用<sup>[1, 8-9]</sup>。

为了进一步提高柔性轻质防弹衣的防弹性能, 研究人员通过实验和计算的方法研究了防弹衣在受到子弹高速冲击时的破坏机制。**Chen** 等<sup>[10]</sup>发现, 当多层防弹衣在受到子弹冲击时, 前面层受到更大的切应力, 而后面层则受到更大拉应力。该发现启发后续研究人员在设计防弹衣时, 在前层用更抗剪切的纤维材料, 后层则用更好抗拉伸的材料。据此, 研究人员提出将平纹结构织物放在前层, 将正交柔性复合材料板放在后层, 该设计在保证防弹衣总质量不变的前提下, 大大提高了防弹性能。在穿透实验中, 提高了能量吸收, 在非穿透测试中大幅降低了背凸, 增加了冲击形变面积<sup>[11-14]</sup>。然而, 目前对于该类堆叠板防弹机制并未有很深刻的分析。**Guo** 等<sup>[15]</sup>总结了一系列混合堆叠的柔性防弹衣, 认为影响不同材料堆叠最重要的因素是材料的 **Cunniff** 速度, **Cunniff** 速度高的材料应该放在后面层, 这样能够最小化层间的相互干扰。但该分析未考虑纤维的断裂方式和织物或层合板结构的影响。另外, 不同的层间作用如何使混合板的防弹性能不同也需要进一步阐明。

本文采用 UHMWPE 平纹织物和 SB51 UD 布按不同顺序进行堆叠, 测试其弹道冲击性能, 并建立有限元模拟模型, 深入地分析了 UHMWPE 平纹织物和 SB51 UD 布不同顺序堆叠时各层的能量吸收机制, 为进一步优化设计混合材料板柔性防弹衣提供理论基础。

1 实验材料及方法

1.1 样品和测试方法

平纹织物由 UHMWPE 纱线 (型号为 Dyneema® SK75) 织成, 纱线的线密度为 175 tex。织物经纬密度均为 7 根/cm, 面密度为 252 g/m<sup>2</sup>, 厚度约为 0.58 mm。UD 布为 Dyneema® SB51 (DSM Dyneema, the Netherlands), 该 UD 布由六层单向纤维束相互正交排列构成, 与少量 (质量分数小于 20wt%) 的聚氨酯树脂复合而成, 厚度为 0.29 mm, 面密度为 260 g/m<sup>2</sup>。所有样品被裁剪为 240 mm×240 mm 的正方形。为了研究不同混合织物靶板的穿透机制, 设计了两组不同的混合结构板, 均由三层平纹织物和两层 UD 布组成, 具体细节如图 1 所示, 其中 A 代表平纹织物, B 代表 UD 布, 冲击过程中先接触到子弹的为第一层。五层的选择是为了方便后续研究。

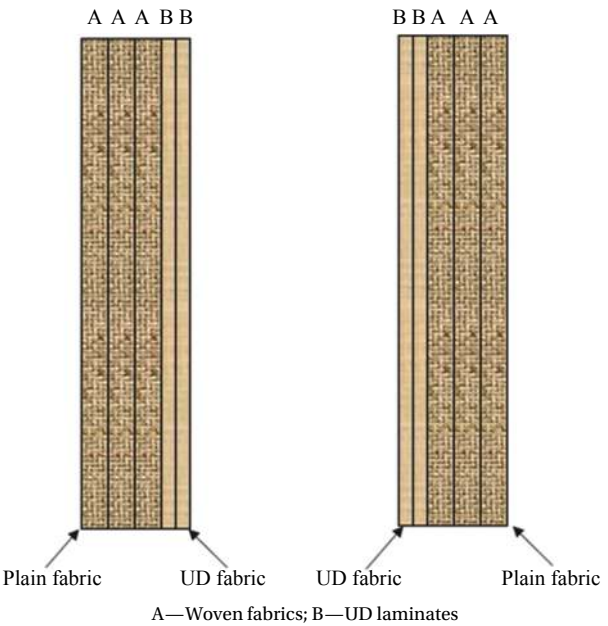


图 1 两组超高分子量聚乙烯 (UHMWPE) 纤维平纹织物-单向 (UD) 布杂化结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of two groups of hybrid structures with ultrahigh molecular weight polyethylene (UHMWPE) yarns woven fabrics and unidirectional (UD) laminates

样品的防弹性能测试主要通过测量子弹在穿透样品前后的速度获得。根据样品前后的探测器, 能够得到子弹的初速度  $V_i$  和剩余速度  $V_r$ , 靶板的

能量吸收通过下式可以求出：

$$\Delta E = \frac{1}{2}m(V_i^2 - V_r^2)$$

(1)

其中， $m$  为子弹质量。本文中，子弹质量为 1 g，其长度和直径均为 5.5 mm。测试装置在之前的研究中有详细介绍<sup>[16-17]</sup>。每一种组合准备 3 块相同样品，重复 9 次实验，取平均值。采用高速摄像机来获取单层织物被穿透时的图像信息，以帮助单层模型的建立。高速摄像机拍摄每张照片的间隔设定为  $5.56\times10^{-6}$  s。

1.2 UHMWPE 纤维平纹织物-UD 布混合堆叠板弹道冲击有限元模型建立和验证

1.2.1 单层模型建立

有限元模拟可以获得更多的弹道冲击过程细节，以帮助深入研究穿透机制。ABAQUS 商用软件被用来实现模型的建立和数值运算。平纹织物的模型是由多根经纱和纬纱模型交织而成，根据实物的测量结果建立纱线几何模型，其尺寸如图 2 所示。每根纱线的截面被划分为 10 个 C3D8R 网格，在一个纱线波长上有 130 个网格，之前的研究已经证实了该网格有较好收敛性<sup>[18-19]</sup>。假设纱线模型各处力学性能一样。考虑到实际纱线中存在 77% 的孔隙率，纱线模型密度设置为  $750\text{ kg/m}^3$ 。

纱线模型的力学性能如表 1 所示，其破坏应变为 0.05<sup>[13, 20-23]</sup>。如图 3 所示，用 44 根长短不同的纱线模型组成一个直径为 240 mm 圆形的单层平纹织物模型，其经纬密度为 7 根/cm，厚度为 0.58 mm。平纹织物模型边缘被设置为固定。另外，为了便于后面的深入分析，每块织物被划分为两个区域，起始时子弹投影下方的纱线或纤维所在的区域称为主区域，其余地方称为副区域，如图 3 所示。主区域部分的能量吸收主要来自于子弹冲击对该区域的直接作用，而副区域的能量吸收主要来自于主区域形变的带动和上层板形变作用。该划分定义同样被应用于划分 UD 布。

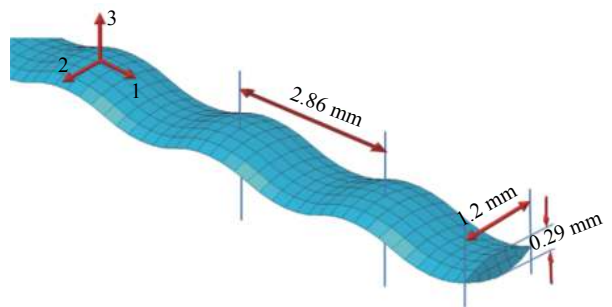


图 2 纱线模型尺寸、方向定义与网格划分  
Fig. 2 Size of yarn model, definition of yarn directions, and mesh development

表 1 UHMWPE 纱线模型弹性性质

Table 1 Elastic properties of UHMWPE yarn in modelling

| $E_1/\text{MPa}$ | $E_2/\text{MPa}$ | $E_3/\text{MPa}$ | $\nu_{12}$ | $\nu_{13}$ | $\nu_{23}$ | $G_{12}/\text{MPa}$ | $G_{13}/\text{MPa}$ | $G_{23}/\text{MPa}$ |
|------------------|------------------|------------------|------------|------------|------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 88 000           | 1 210            | 1 210            | 0.2        | 0.2        | 0.4        | 370                 | 370                 | 1 500               |

Notes:  $E_1, E_2, E_3$ —Young’s modulus in the 1, 2, 3-directions of the UHMWPE yarn model, respectively;  $\nu_{12}$ —Poisson’s ratio that characterizes the transverse strain in the 2-direction, when the yarn model is stressed in the 1-direction;  $\nu_{13}$ —Poisson’s ratio that characterizes the transverse strain in the 3-direction, when the yarn model is stressed in the 1-direction;  $\nu_{23}$ —Poisson’s ratio that characterizes the transverse strain in the 3-direction, when the yarn model is stressed in the 2-direction;  $G_{12}, G_{13}, G_{23}$ —Shear modulus in 12, 13, 23-directions of the yarn model.

图 4 为 UD 布模型尺寸和边缘条件设置。可知，UD 布模型是由六层单向预制复合材料板模型相互正交所组成，层与层插入一层很薄的粘胶层来模拟层间作用。每层预制板的厚度为 0.048 mm，粘结层厚度为 0.001 mm，整个 UD 布模型厚度为 0.293 mm。该模型也被做成一个圆形，其直径为 240 mm。为了加快运算效率，在模型中心部分 70 mm×70 mm 的面积内使用 0.5 mm×0.5 mm×0.048 mm 的 C3D8R 网格，粘结层所用网格为 COH3D8。单层预制板和粘结层的力学性能如表 2 和表 3 所示，其破坏应变为 0.042<sup>[21, 24-26]</sup>。

图 5 为子弹模型尺寸。可知，子弹模型是根

据上述子弹尺寸建模，假设其为刚体。设置全局的摩擦接触为硬接触补偿函数，摩擦系数为 0.05<sup>[27]</sup>。子弹速度设置为 500 m/s。最后设置平纹织物模型和 UD 布模型边缘都为固定。

1.2.2 单层模型验证

通过实验结果可以证实单层模型的可靠性，主要输出结果为能量吸收和穿透时间。如图 6 所示，单层平纹织物实验能量吸收为  $(13.16\pm1.2)\text{ J}$ ，有限元模型为 13.8 J。在实验结果的误差范围内。根据高速摄像，可以判断纱线断裂的时间在  $2.7\times10^{-5}\sim3.8\times10^{-5}$  s 之间<sup>[18]</sup>，而有限元模拟结果的断裂时间为  $2.7\times10^{-5}$  s，在实验所判定结果之内。

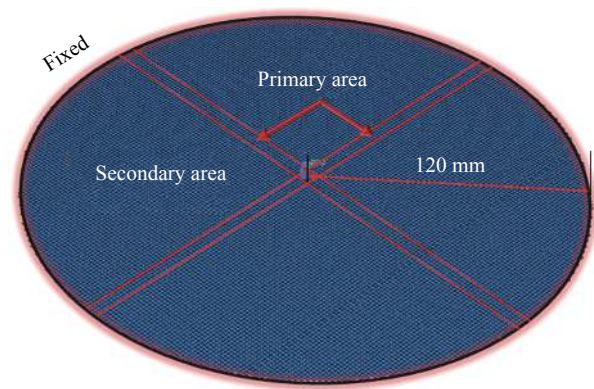


图3 平纹织物模型尺寸、边缘条件设置和主区域和副区域定义  
Fig. 3 Size of plain woven fabric model, setting of boundary condition, and definition of primary and secondary areas

因此，单层平纹织物的弹道冲击模型可以被认为是可靠的。如图7所示，UD布模型的单层能量吸收为6.2 J，在实验结果误差范围内。单层被穿透时间在 $1.1\times10^{-5}\sim1.65\times10^{-5}$  s之间，而模型的穿透时

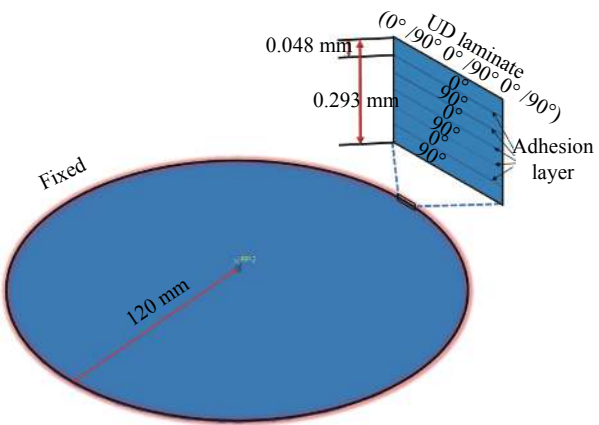


图4 UD布模型尺寸和边缘条件设置  
Fig. 4 Dimension of UD laminate model and setting of boundary condition

间为 $1.3\times10^{-5}$  s，也在实验所测范围内。因此，该UD布模型也可以被认为是可靠的。

表2 UD布模型弹性性质  
Table 2 Elastic properties of a UD ply

| $E_1/\text{MPa}$ | $E_2/\text{MPa}$ | $E_3/\text{MPa}$ | $\nu_{12}$ | $\nu_{13}$ | $\nu_{23}$ | $G_{12}/\text{MPa}$ | $G_{13}/\text{MPa}$ | $G_{23}/\text{MPa}$ |
|------------------|------------------|------------------|------------|------------|------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 110 000          | 3 600            | 3 600            | 0.07       | 0.07       | 0.07       | 420                 | 420                 | 420                 |

表3 粘结层的弹性性质  
Table 3 Elastic properties of the adhesive ply

| $E/E_{\text{nn}}/\text{MPa}$ | $G_1/E_{\text{ss}}/\text{MPa}$ | $G_2/E_{\text{tt}}/\text{MPa}$ |
|------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 850                          | 850                            | 850                            |

Notes:  $E/E_{\text{nn}}$ —Nominal traction in the normal direction;  $G_1/E_{\text{ss}}$  and  $G_2/E_{\text{tt}}$ —Nominal tractions in the two local shear directions.

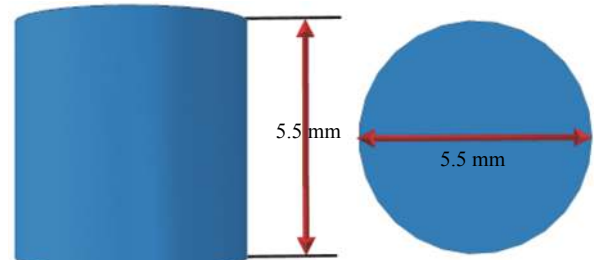


图5 子弹模型尺寸  
Fig. 5 Dimension of the projectile

2 结果与讨论

2.1 UHMWPE 纤维平纹织物-UD 布混合堆叠板弹道冲击实验结果

两种不同结构混合板的能量吸收实验结果如图8所示，AAABB型混合板能量吸收为 $(38.87\pm$

2.7) J，比BBAAA型混合板的能量 $(32.63\pm2.3)$  J吸收高出约19.12%。根据Chen等<sup>[10]</sup>的研究，这样的结果是由于平纹结构有更好的抗剪切能力，而UD布有更好的抗拉伸能力<sup>[10, 13]</sup>。然而，两种混合板在被穿透过程中的作用机制还需要进一步通过有限元模拟结果进行分析。

2.2 UHMWPE 纤维平纹织物-UD 布混合堆叠板弹道冲击模拟结果分析

2.2.1 不同层的能量吸收机制

在模拟结果中，内能代表材料发生形变和受到破坏时所吸收的总能量。将相同层织物或UD布的内能吸收放在一起对比分析，来说明每一层在内能吸收中的具体作用。图9为两组混合板的每层内能吸收大小。可以发现，第一组中的前两层能量吸收为4.4 J和5.9 J，比第二组中前两层面板的内能吸收分别高了50.7%和58.2%。图10为第一组和第二组中前两层主区域和副区域的内能大小，第一组前两层的能量吸收优势主要来自于主区域。这是由于平纹织物放在前面两层时，主区域的纱线完全被破坏的时间为 $1.5\times10^{-5}$  s，而前两层是UD布时，第一层在 $1\times10^{-6}$  s就出现了破坏，

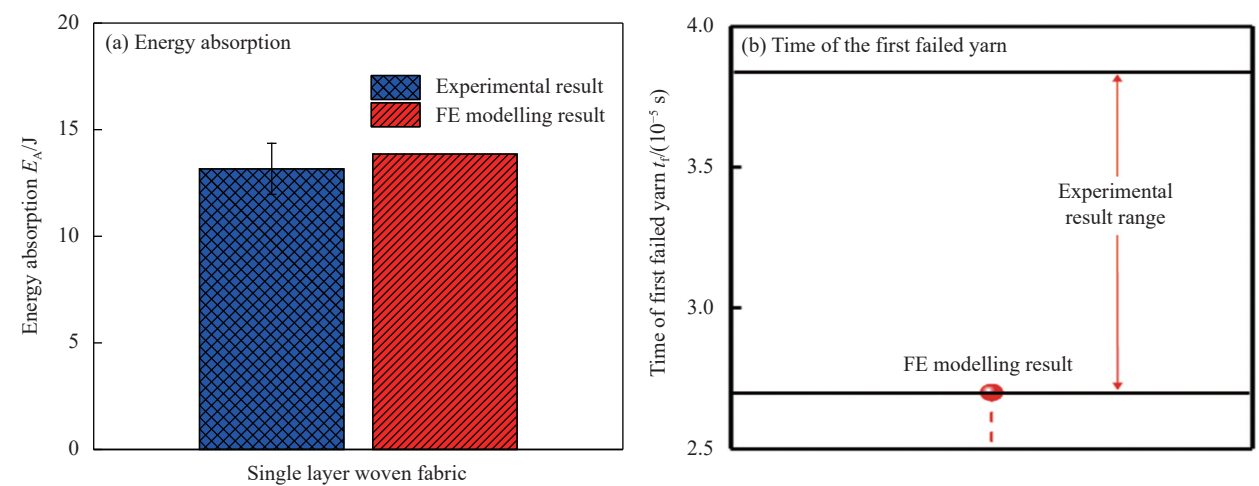


图 6 单层 UHMWPE 纤维平纹织物能量吸收和第一根纱线断裂的实验和模拟数据对比

Fig. 6 Energy absorption and time of first failed yarn of single UHMWPE fiber woven fabric from experiments and modelling

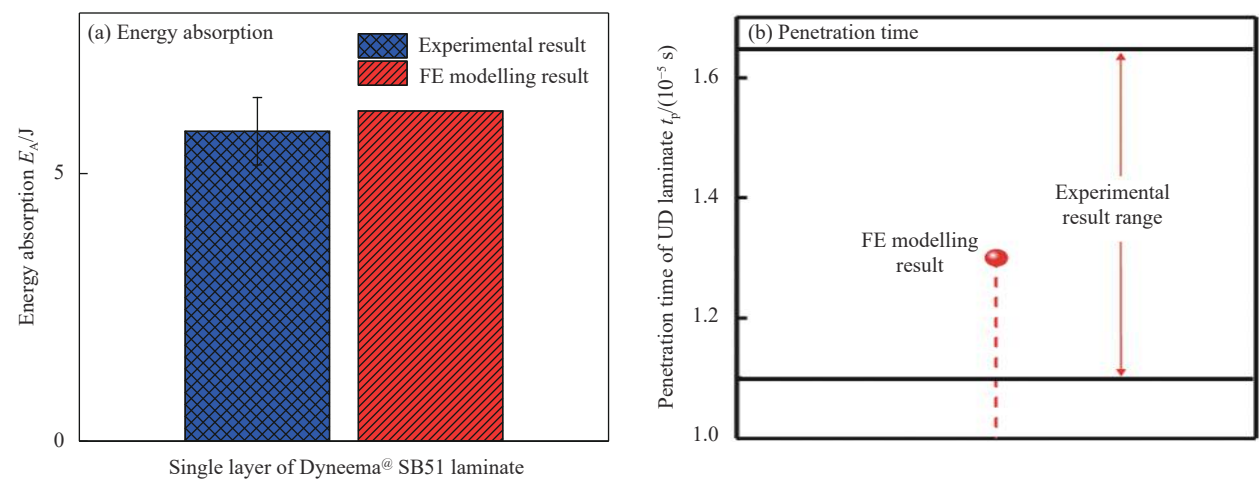


图 7 单层 Dyneema® SB51 UD 布能量吸收和穿透时间的实验和模拟数据对比

Fig. 7 Energy absorption and penetration time of single Dyneema® SB51 UD fabric from experiments and modelling

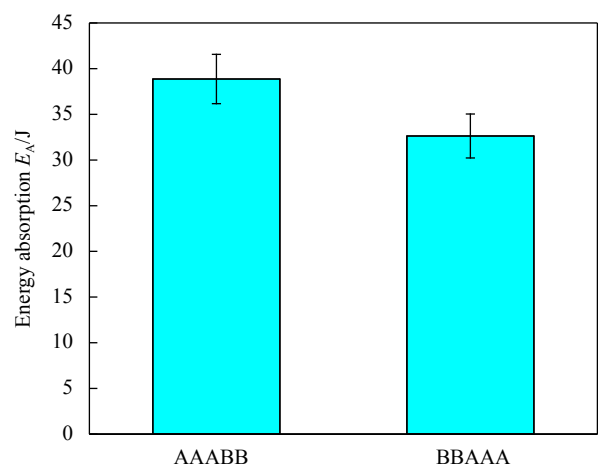


图 8 AAABB 和 BBAAA 型混合板的能量吸收

Fig. 8 Energy absorption of AAABB and BBAAA hybrid panels

被完全穿透时间为  $7 \times 10^{-6} s$ 。图 11 为  $1 \times 10^{-6} s$  时，第一组前两层和第二组前两层的拉应力大小云图。在该时刻，平纹织物受到的最大拉应力为 2.65 GPa，约为 UD 布的 2 倍，然而，此时 UD 布已经产生了大量破坏，而平纹织物未产生任何破坏。在纤维的破坏过程中，主要是拉应力和切应力作用，根据上面结果可以推断，拉应力在 UD 布破坏过程中并不起主要作用，而起主要作用的应该是子弹边缘所造成的切应力<sup>[10]</sup>。这是由于 UD 布中的纤维被树脂固定，在平面内几乎没有移动空间，而平纹织物在受到切力时有一定移动空间，受到的切应力较小。

从图 9 可以看到，两组试样后面两层的总内能吸收差别并不是很大，第二组仅比第一组高约

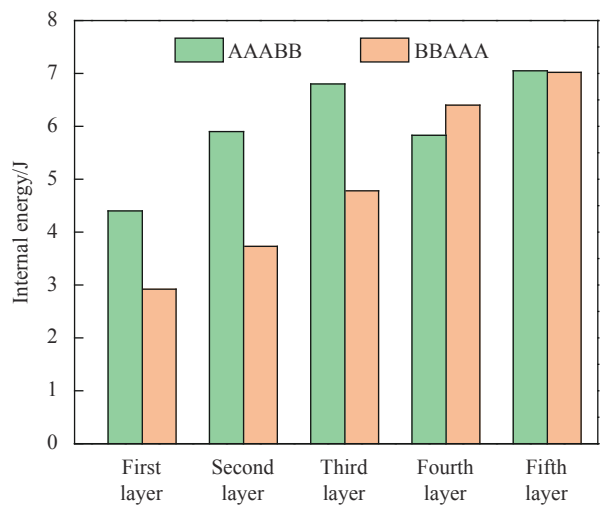


图9 两组 UHMWPE 纤维平纹织物-UD 布混合板每层的内能吸收

Fig. 9 Energy absorption of internal energy of each layer in the two hybrid panels with UHMWPE yarn woven fabrics and UD laminates

6.4%。图 12 为后两层主区域与副区域内能吸收对比，第一组后面两层的主区域能量吸收为 1.13 J 和 1.85 J 远远小于第二组的 4.82 J 和 3.62 J。而相应的，第二组中副区域的能量吸收为 4.7 J 和 5.2 J，比第二组中相应层的相应位置高出约 197% 和 53%。这说明，平纹织物和 UD 布分别在后层时的能量吸收机制完全不同，平纹织物更多是靠主区域纱线的形变和破坏吸收能量，而 UD 布则更多是通过副区域的形变吸收能量。而因为 UD 布主区域并未有太多内能吸收，所以主区域所造成副区域的形变并不大，因此，UD 布副区域的形变吸收主要来自于前层的作用。即，AAABB 形式混合堆叠能够使平纹织物层的形变对后面的 UD 布层有很大作用力，而使其发生大范围形变。而第二组 BBAAA 形式的配置，前面层对于后面层没有很好

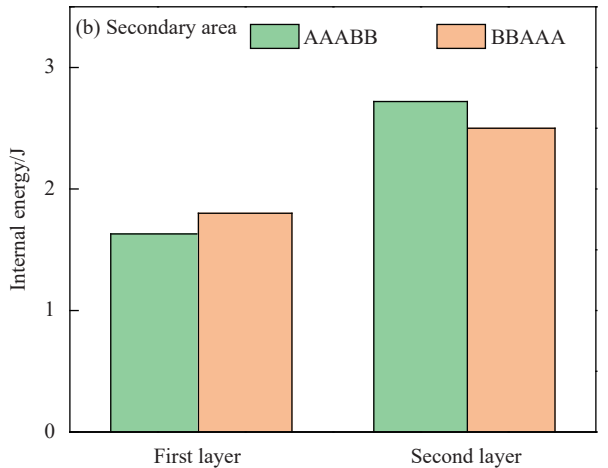
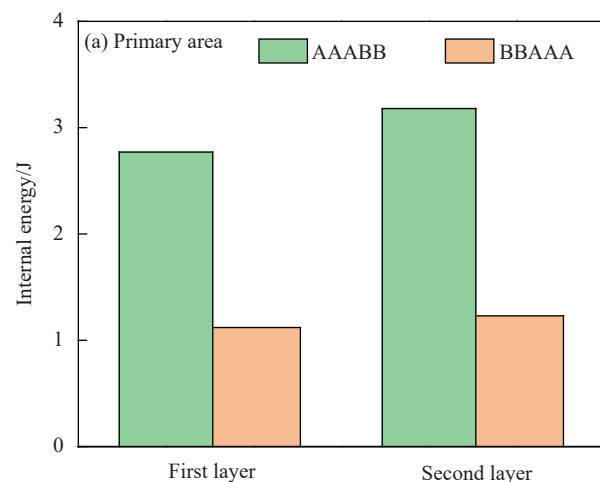
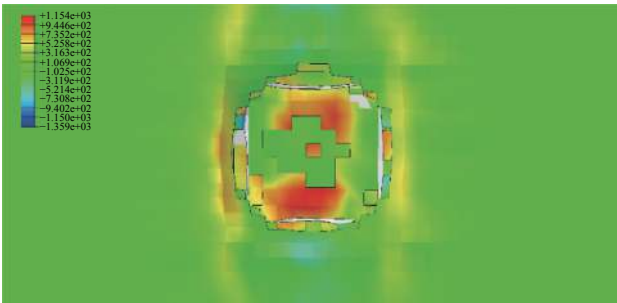
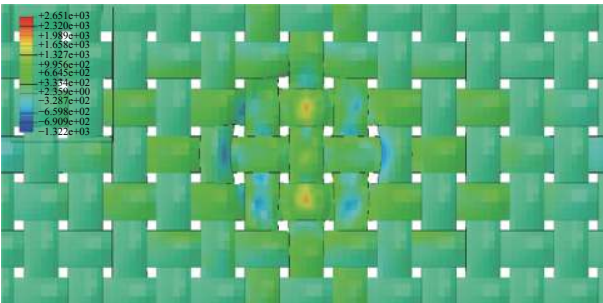


图 10 两组 UHMWPE 纤维平纹织物-UD 布混合板前两层主区域和副区域的内能吸收

Fig. 10 Internal energy of primary area and secondary area of the first two layers in the two hybrid panels with UHMWPE yarn woven fabrics and UD laminates



(a) Plain woven fabric (b) SB51 laminate

图 11 在  $1 \times 10^{-6}$  s 时 AAABB 中第一层与 BBAAA 中第一层所受拉应力分散图

Fig. 11 Contours of tensile stress distributions on the first layer of AAABB and BBAAA at  $1 \times 10^{-6}$  s

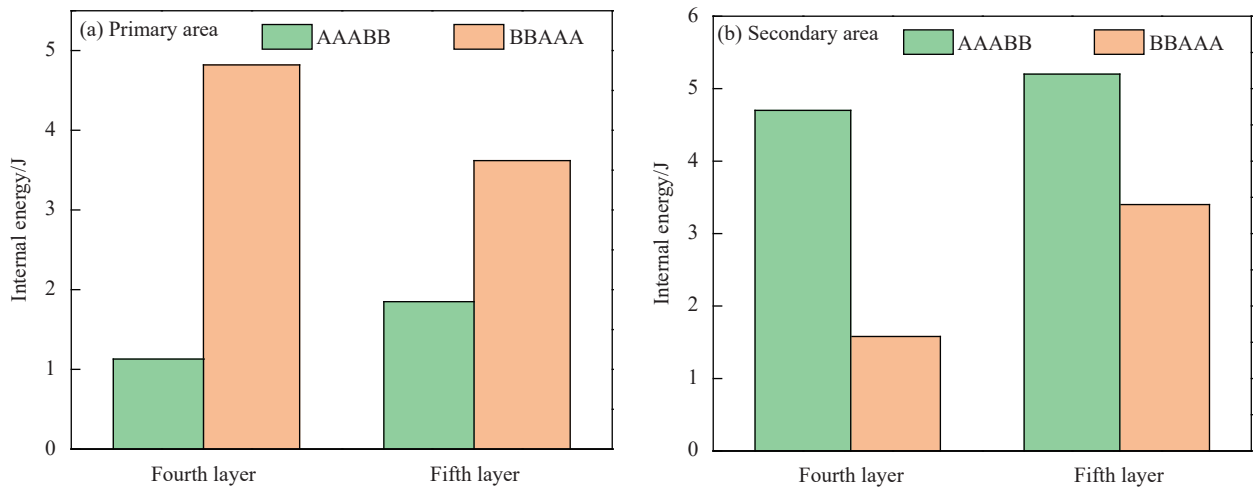


图 12 两组 UHMWPE 纤维平纹织物-UD 布混合板后两层主区域和副区域的内能吸收

Fig. 12 Internal energy of primary and secondary areas of the first two layers in the two hybrid panels with UHMWPE yarn woven fabrics and UD laminates

的作用力。

2.2.2 平纹织物在不同位置的能量吸收机制

为了进一步研究平纹织物在不同位置的能量吸收机制，对比了三层平纹织物的内能吸收和形变形态。图 13 展示了两组混合板中每层平纹织物的内能吸收。研究发现，BBAAA 组中平纹织物的能量吸收要比 AAABB 中的平纹织物能量吸收高约 10%。图 14 分别为在  $2.8\times10^{-5}$  s 时 (该时间为 AAABB 完全穿透时间)，两组混合板中每层平纹织物的受力形变图。第一组中平纹织物更多的纱线被破坏 (13 根)，而第二组中只有少数纱线断裂 (5 根)，更多的纱线发生了滑移。但能量吸收并未有太大差别。这是由于虽然平纹织物放于前层相较于 UD 布放置前层更抗剪切，但是由于后面 UD 布的阻碍作用，没有经过充分拉伸就发生断裂；而平纹织物放在后层，虽然有一部分产生了

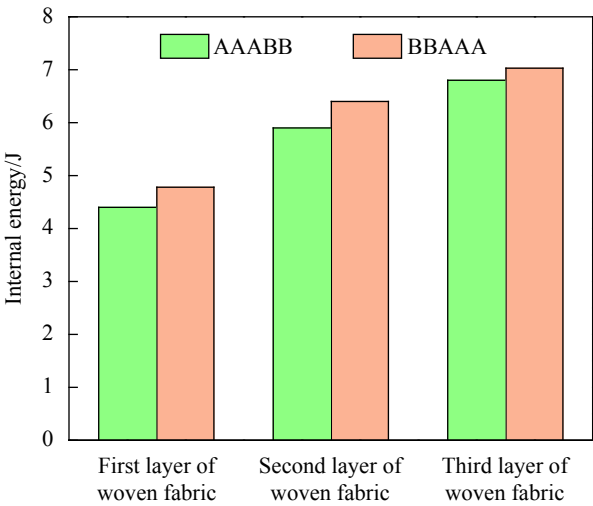


图 13 两组 UHMWPE 纤维平纹织物-UD 布混合板中每层平纹织物层的内能吸收

Fig. 13 Internal energy of each layer in the two hybrid panels with UHMWPE yarn woven fabrics and UD laminates

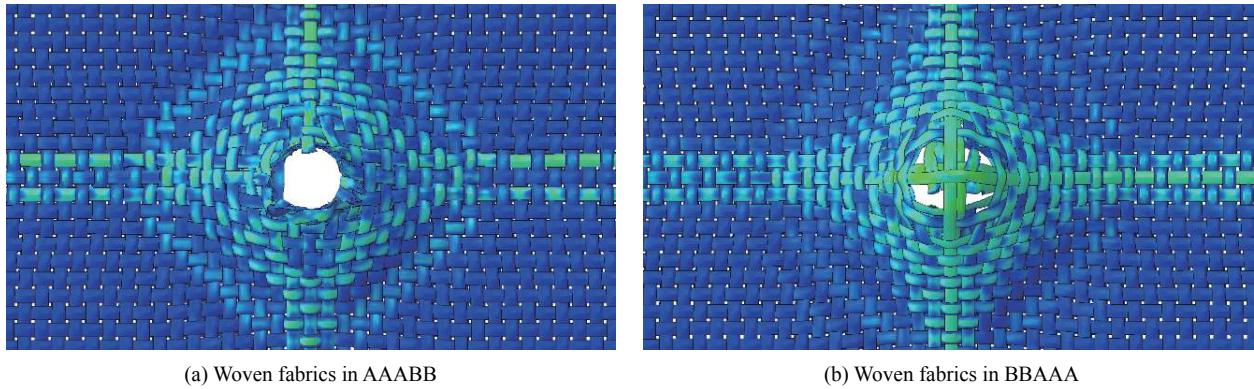


图 14 两组 UHMWPE 纤维平纹织物-UD 布混合板中的平纹织物 Mises 应力分散图

Fig. 14 Contours of Mises stress distributions of woven fabrics in the two hybrid panels with UHMWPE yarn woven fabrics and UD laminates

滑移,但是剩下的纱线在充分抽拔和形变后还是能够吸收足够多的能量,因此能量吸收整体上稍大于AAABB中的平纹织物。但按照上述结果,能够推断这样的堆叠方式在非穿透实验中会对后面物体造成更深的伤害,Yang等<sup>[12]</sup>和Chen等<sup>[13]</sup>的非穿透实验结果也证实了该推断。因此,BBAAA的后层平纹织物依靠更大纵深拉伸来吸收能量的方式对安全防护还是存在很大的隐患。

### 3 结论

(1)通过弹道实验对比发现,平纹织物与单向(UD)布的堆叠顺序对防弹性能影响明显,AAABB(三层超高分子量聚乙烯(UHMWPE)纤维平纹织物(A)和两层Dyneema<sup>®</sup>SB51单向(UD)布(B))混合堆叠板的能量吸收比BBAAA混合堆叠板高约20%。

(2)通过有限元分析发现,平纹织物在前UD布在后的防弹优势在于平纹织物不易被切断,而可以吸收更多的冲击能量,这样更长的作用时间能够带动平纹织物层有更大的形变,使后面的UD层的副区域发生大量形变,吸能更多。而UD布放在前面层很快会被子弹冲击所产生的切力所破坏,失去作用。

(3)对比平纹织物所放位置,将其放在前面层吸收能量的主要方式是形变直至被破坏,而放在后面层吸收能量的主要方式是长时间的拉伸和抽拔,同时伴随大量的纱线滑移。因此将平纹织物放在后层会造成更深的冲击形变,不利于防弹保护。

### 参考文献:

- [1] CHEESEMAN B A, BOGETTI T A. Ballistic impact into fabric and compliant composite laminates[J]. *Composite Structures*, 2003, 61(1-2): 161-173.
- [2] 顾伯洪. 织物弹道贯穿性能分析计算[J]. *复合材料学报*, 2002, 19(6): 92-96.  
GU Bohong. Analytical modelling of woven fabric under ballistic perforation[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2002, 19(6): 92-96(in Chinese).
- [3] 朱德举, 彭恋. SiC-超高分子量聚乙烯仿生柔性叠层结构防弹性能关键影响因素的仿真与试验[J]. *复合材料学报*, 2020, 37(11): 2928-2940.  
ZHU Deju, PENG Lian. Simulation and experiment of key influencing factors on ballistic performance of SiC-ultra-high molecular weight polyethylene biomimetic flexible laminated structure[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2020, 37(11): 2928-2940(in Chinese).
- [4] GU B. Analytical modeling for the ballistic perforation of planar plain-woven fabric target by projectile[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2003, 34(4): 361-371.
- [5] 何业茂, 焦亚男, 周庆, 等. 弹道防护用先进复合材料弹道响应的研究进展[J]. *复合材料学报*, 2021, 38(5): 1331-1348.  
HE Yemao, JIAO Ya'nan, ZHOU Qing, et al. Research progress on ballistic response of advanced composite for ballistic protection[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2021, 38(5): 1331-1348(in Chinese).
- [6] 陈晓钢. 纺织基防弹防穿刺材料的研究回顾[J]. *纺织学报*, 2019, 40(6): 158-164.  
CHEN Xiaogang. Trend of research in textile-based protective materials against ballistic and stabbing[J]. *Journal of Textile Research*, 2019, 40(6): 158-164(in Chinese).
- [7] 周熠, 陈晓钢, 张尚勇, 等. 超高分子量聚乙烯平纹织物在柔性防弹服中的应用[J]. *纺织学报*, 2016, 37(4): 60-64.  
ZHOU Yi, CHEN Xiaogang, ZHANG Shangyong, et al. Application of ultra-high molecular-weight polyethylene plain weave on soft body armour[J]. *Journal of Textile Research*, 2016, 37(4): 60-64(in Chinese).
- [8] TABIEI A, NILAKANTAN G. Ballistic impact of dry woven fabric composites: A Review[J]. *Applied Mechanics Reviews*, 2008, 61(1): 1-13.
- [9] NILAKANTAN G, GILLESPIE J W. Ballistic impact modeling of woven fabrics considering yarn strength, friction, projectile impact location, and fabric boundary condition effects[J]. *Composite Structures*, 2012, 94(12): 3624-3634.
- [10] CHEN X, ZHU F, WELL G. An analytical model for ballistic impact on textile based body armour[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2013, 45(1): 1508-1514.
- [11] YANG Y, CHEN X. Study of energy absorption and failure modes of constituent layers in body armour panels[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2016, 98: 250-259.
- [12] YANG Y, CHEN X. Determination of materials for hybrid design of 3D soft body armour panels[J]. *Applied Composite Materials*, 2018, 25(4): 861-875.
- [13] CHEN X, ZHOU Y, WELL G. Numerical and experimental investigations into ballistic performance of hybrid fabric panels[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2014, 58: 35-42.
- [14] BAJYA M, MAJUMDAR A, BUTOLA B, et al. Ballistic performance and failure modes of woven and unidirectional fabric based soft armour panels[J]. *Composite Structures*, 2021, 255: 112941.
- [15] GUO Z, CHEN W. A merit parameter to determine the stacking order of heterogeneous diphasic soft armor systems[J]. *Composite Structures*, 2020, 241: 112086.
- [16] WANG Y, CHEN X, YOUNG R, et al. An experimental study

of the effect of ply orientation on ballistic impact performance of multi-ply fabric panels[J]. [Textile Research Journal](#), 2016, 86(1): 34-43.

[17] LU Z, YUAN Z, CHEN X, et al. Evaluation of ballistic performance of STF impregnated fabrics under high velocity impact[J]. [Composite Structures](#), 2019, 227: 111208.

[18] YUAN Z, CHEN X, ZENG H, et al. Identification of the elastic constant values for numerical simulation of high velocity impact on dyneema® woven fabrics using orthogonal experiments[J]. [Composite Structures](#), 2018, 204: 178-191.

[19] WANG Y, CHEN X, YOUNG R, et al. A numerical and experimental analysis of the influence of crimp on ballistic impact response of woven fabrics[J]. [Composite Structures](#), 2016, 140: 44-52.

[20] HUANG W, WANG Y, XIA Y. Statistical dynamic tensile strength of UHMWPE-fibers[J]. [Polymer](#), 2004, 45(11): 3729-3734.

[21] PISANOVA E, ZHANDAROV S, MÄDER E. How can adhesion be determined from micromechanical tests?[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2001, 32(3): 425-434.

[22] GRUJICIC M, ARAKERE G, HE T, et al. A ballistic material model for cross-plyed unidirectional ultra-high molecular-weight polyethylene fiber-reinforced armor-grade composites[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2008, 498(1-2): 231-241.

[23] YUAN Z, WANG K, QIU J, et al. A numerical study on the mechanisms of Dyneema® quasi-isotropic woven panels under ballistic impact[J]. [Composite Structures](#), 2020, 236: 111855.

[24] MIN S, CHU Y, CHEN X. Numerical study on mechanisms of angle-plyed panels for ballistic protection[J]. *Materials & Design*, 2016, 90: 896-905.

[25] VAN DINGENEN J L J. High performance dyneema fibres in composites[J]. *Materials & Design*, 1989, 10(2): 101-104.

[26] ONG CW, BOEY CW, HIXSON R S, et al. Advanced layered personnel armor[J]. [International Journal of Impact Engineering](#), 2011, 38(5): 369-383.

[27] ATTWOOD J P, FLECK N A, WADLEY H N G, et al. The compressive response of ultra-high molecular weight polyethylene fibres and composites[J]. [International Journal of Solids and Structures](#), 2015, 71: 141-155.