

DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20200222.001

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

朱德举*, 彭恋

(湖南大学 土木工程学院 绿色先进土木工程材料及应用技术湖南省重点实验室, 长沙 410082)

摘 要: 基于仿生学原理构建一种鱼鳞状的柔性叠层防护装具, 仿生鳞片为中间厚边缘薄的双层复合结构, 上下层分别为 SiC 陶瓷和超高分子量聚乙烯 (UHMWPE)。采用 ANSYS LS-DYNA 软件的显式分析方法模拟了 SiC-UHMWPE 柔性叠层结构的防弹性能, 主要从装具变形量、应力传递规律、能量耗散机制和子弹残余速度展开分析, 重点研究了支撑点数量、曲率半径及覆盖角对防护性能的影响。鳞片单排与多排排列时背面垫料的凹陷深度仿真结果分别为 32.52 mm 和 24.73 mm。本文依据 NIJ 标准Ⅲ级要求对柔性防护装具进行实弹测试。结果表明, 试件在多发子弹侵彻后, 出现局部两点支撑的不利情形。该成果将对新型柔性防护装具的设计和制备具有重要意义。

关键词: 柔性叠层结构; 防弹性能; 复合鳞片; 超高分子量聚乙烯; 有限元仿真

中图分类号: Q66; TB391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2020)11-2928-13

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

ZHU Deju*, PENG Lian

(Key Laboratory for Green & Advanced Civil Engineering Materials and Application Technology of Hunan Province, College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Based on the principle of bionics, a fish scale like flexible laminated protective device was built. The bionic scale is a double-layer composite with thick central region and thin edges. The upper and lower layers of the bionic scale were made of SiC ceramic and ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE), respectively. The explicit analysis method in the ANSYS LS-DYNA software was used to simulate the ballistic performance of the SiC-UHMWPE flexible laminated structure. The analysis included the deformation, stress transfer pattern and energy dissipation mechanism of the device and the residual velocity of bullet, and mainly focused on the effects of the number of support points, the radius of curvature and the overlapping angle. The simulated backface signatures for the protective device with one row scales and multiple rows scales are 32.52 mm and 24.73 mm, respectively. Ballistic tests were conducted on the bio-inspired flexible protection device according to the requirements of level Ⅲ of the NIJ standard. The results show that there is an unfavorable mode of two-point support at the local area after multiple impacts of bullets. This study will be valuable for the design and manufacture of new flexible protective devices.

Keywords: flexible laminated structure; ballistic performance; composite scales; ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE); finite element simulation

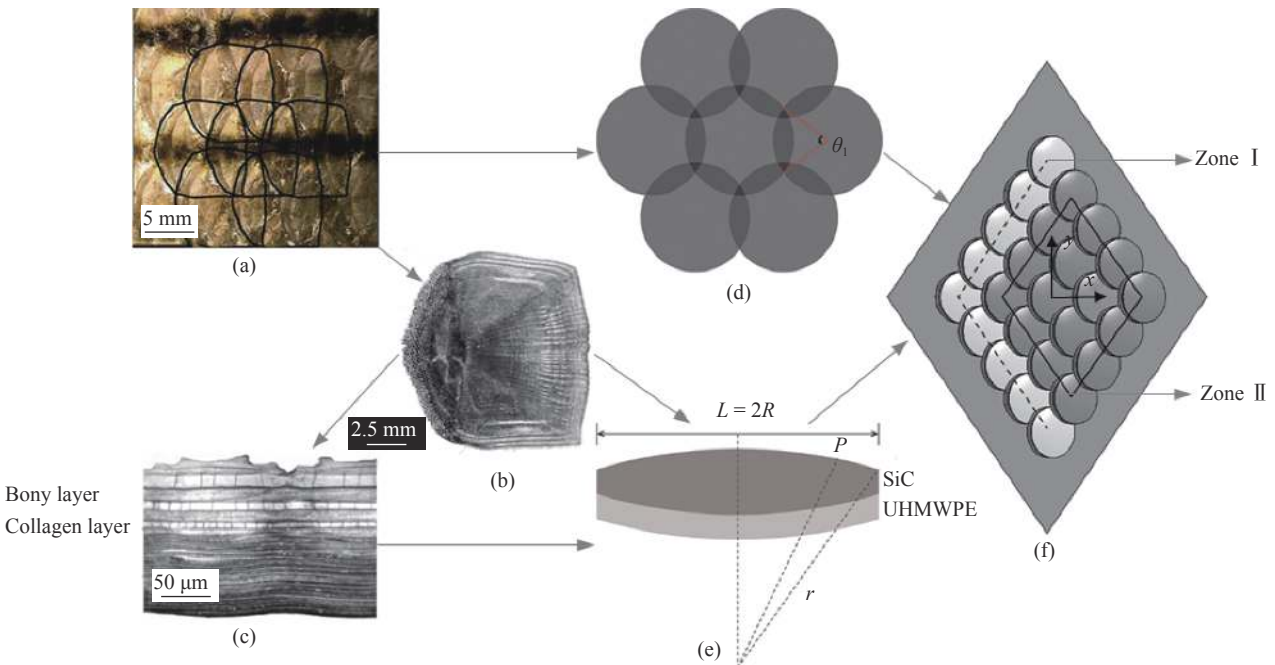
收稿日期: 2019-12-31; 录用日期: 2020-02-15; 网络首发时间: 2020-02-22 16:18:49
网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200222.001>
基金项目: 国防科技创新特区项目 (19-H863-03-ZT-003-033-01); 湖南省重点研发计划项目 (2017GK2130); 湖湘高层次人才聚集工程-创新人才 (2018RS3057); 长沙市科学计划项目 (kq1907115)
通信作者: 朱德举, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为生物材料多尺度力学行为及仿生设计制备、高性能纤维织物增强水泥基和树脂基复合材料、防弹高性能纤维布的力学特性和有限元分析 E-mail: dzhu@hnu.edu.cn
引用格式: 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).

个人防护装具的进步对于单兵作战能力的提升具有重要意义。依据防护装具的发展历史,其性能提升大多由材料进步而驱动,如从早期的棉麻织布、动物皮革逐步发展到铜块铸铁等金属制品及现代多种高性能合金、纤维织物和防弹陶瓷^[1-2]。同时为了充分发挥新型材料的优势,与之相匹配的装甲结构装具也在不断革新。研究实践表明,采用自然防御结构的防护装甲有助于充分发挥现代防护材料的性能,如类似鱼类鳞片的模块化叠层防护装具^[3]。由于这种鱼鳞状的防护结构综合了大多数硬防护系统和软防护系统的优点,近年来逐渐成为相关领域的研究热点。

Zhu 等^[4-5]采用针尖穿透试验对条纹鲈鱼鳞片的抗穿透性进行了研究,并分析了复合鳞片结构抗穿透能力的协同作用。结果表明,单个鱼鳞片的抗穿透性优于聚苯乙烯和聚碳酸酯薄片。Yang 等^[6]通过试验研究了巨骨舌鱼鳞片不同结构层的功能,并分析了高度矿化的外层对其力学性能的影响。Vernerey 等^[7-8]通过试验和模型分析讨论了鱼皮在抗穿刺过程中的作用及鳞片结构的弯曲响应。Funk 等^[9]依据条纹红鲮鱼鳞片结构制备了基于人造复合材料的仿生鱼皮,并通过实验验证了其理

论变形模型。White 等^[10]基于硬骨鱼皮肤结构制作了仿生鳞片,准静态穿透测试结果表明,鳞片的表面形貌对叠层装具的防护性能有重要影响。刘鹏等^[11-12]通过试验研究了草鱼鳞片的多级结构及力学性能,并在此基础上设计并优化了等厚度复合鳞片叠层防护结构平面排列下的厚度比与覆盖率。上述研究通过实验或理论建模的方法重点分析了自然界中各种鱼鳞结构装具的受力变形机制,为后来的研究奠定了坚实基础。鱼鳞结构对于冲击力的缓冲作用有助于进一步发挥现代防护材料的性能优势,进而提升现代防护装甲抗高速弹道侵彻的能力,对这种极具潜力的防护装具进行高速弹道试验和仿真研究具有重要的理论和实际价值。

本文借鉴硬骨鱼鳞片结构,设计了采用软硬结合的双层复合鳞片及其周期性排列的叠层复合装甲,建立了有限元分析模型,针对该柔性可变形装具进行了人体工程学分析,并将数值模拟结果与试验进行对比分析,验证了模型的可靠性。同时该研究重点讨论了支撑点数量、曲率半径及覆盖角对其防弹性能的影响。



θ_1 —Overlapping angle; L —Bionic scale diameter; R —Bionic scale radius; P —Contact point of bionic scale; r —Radius of arc of bionic scale
图 1 SiC-超高分子量聚乙 烯 (UHMWPE) 仿生柔性防护装具结构设计示意图: (a) 真实鱼鳞片排列模式; (b) 单个鱼鳞片; (c) 鳞片截面; (d) 仿生鳞片排列; (e) 仿生复合鳞片截面; (f) 仿生防护装具

Fig. 1 Schematic diagram of structural design of SiC-ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) bionic flexible protection device: (a) Arrangement structure of the real fish scale; (b) Demonstration of an individual scale; (c) Cross-section of a scale; (d) Bionic scale arrangement pattern; (e) Cross-section of a bionic composite scale; (f) Bionic protection device

1 结构设计与防护性能影响因素

本研究借鉴的硬骨鱼鳞片的尺度结构如图1所示,宏观上鳞片整体排列为叠瓦状的覆盖模式及微观上单个鳞片中间厚边缘薄、上下层软硬结合的复合材料结构。基于上述结构,采用现代高性能防弹材料^[13-14]制备新型复合鳞片,圆形复合鳞片的上层和下层分别为SiC陶瓷层和超高分子量聚乙烯(UHMWPE)层;相比于等厚度鳞片,这种中间厚边缘薄的飞碟状设计可以有效降低装具的整体厚度及增加其柔性变形的能力;另一方面,当防护装具在承受子弹侵彻时,鳞片会发生一定程度的偏转,具有弧度的鳞片底部可起到部分缓解应力集中作用。叠层结构采用凯夫拉(Kevlar)纤维布将结构连接起来形成一个整体,类似于鱼皮的功能。

根据刘鹏^[15]对复合鳞片的模拟分析和优化结果,选取复合鳞片具体尺寸为:弧面曲率半径 $r=89\text{ mm}$,直径 $L=51\text{ mm}$,等效厚度为 14 mm ,SiC层与UHMWPE层的等效厚度比为 $1:1$ 。所有鳞片倾斜角度一致,且其最低点与Kevlar层共用节点,除了y轴左侧边缘两排鳞片为单鳞片支撑,其余鳞片下方均有两个直接支撑鳞片,因此区域I为两点支撑,区域II为三点支撑(如图1(f)所示)。靶鳞片的支撑点数量会直接影响其与周边相邻鳞片相对位置的稳定性和协同作用,并在一定程度上保证了结构承受多发子弹侵彻的能力。因此,有必要对该仿生柔性防护装具的单鳞片接触两点支撑的情形进行分析。此外,为研究鳞片间相互滑动以适应人体运动产生变形后的弯曲状态下的防弹性能,还需建立防护装具变形状态下的有限元分析模型。

2 防护装具有限元模拟及结果分析

本文采用ANSYS(LS-DYNA)软件建立有限元分析模型分析单鳞片的接触作用和鳞片结构在弯曲状态的防护能力。采用MATLAB建立了有限元分析模型参数化命令程序,构建了四个有限元模型:a0c80、a0c100、5x5a0c80、a4c100,其中,a表示旋转角 α (表征柔性防护装具的弯曲程度),如图2所示, S_1 与 S_2 为相邻鳞片中心,O为各鳞片中心所在大圆心;c表示覆盖角 θ_1 (如图1(d)所示),a和c后的数字表示其值;5x5表示横纵向各5个鳞片整体排列的平面模型,且所有模型中

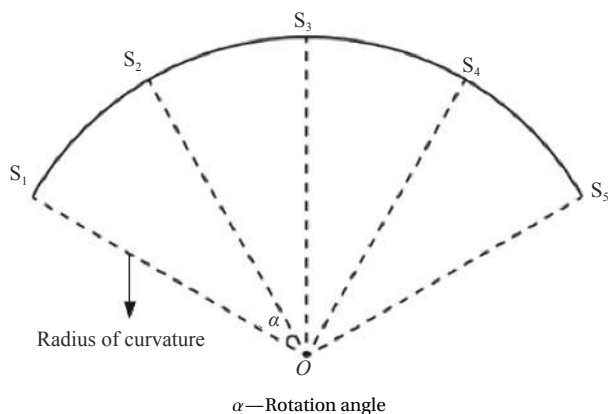


图2 防护装具旋转角示意图

Fig. 2 Diagram of rotation angle of protection device

子弹的初始位置均位于靶鳞片几何中心的正上方 10 mm 处。为方便分析讨论,将a0c80、a0c100、5x5a0c80、a4c100四个模型分别用A、B、C、D表示,如图3所示。四个有限元模型命名如表1所示。特别说明:当 $\alpha=0$ 时,模型即为平面排列,选取a4c100为对象来研究曲率半径对防护装具防弹性能的影响,是由于其较大的柔度允许值(使防护装具呈弯曲状态而不产生空隙时对应的 α 值)和弯曲曲率(曲率半径为 584 mm)更符合人体工程学设计,具有典型参考意义。

2.1 材料参数与有限元模型

四个模型采用相同的材料模型参数,均为上层为SiC硬层、下层为UHMWPE的双层复合鳞片,各鳞片的底端用Kevlar纤维布层连接起来。SiC采用*MAT_JOHNSON_HOLMQUIST_CERAMICS,其材料参数^[16]如表2所示。UHMWPE采用自定义材料模型*MAT_USER_DEFINED_MATERIAL_MODELS,材料参数^[17]如表3所示。Kevlar纤维布材料模型采用*MAT_DRY_FIBER,材料参数^[18]如表4所示。

根据美国防弹衣防护标准NIJ III级($847\text{ m/s} \pm 9.1\text{ m/s}$),子弹的初速度采用 856.1 m/s 进行侵彻模拟分析。子弹弹壳及弹芯均采用塑性强化模型即*MAT_PLASTIC_KINEMATIC材料模型,其具体材料参数^[19]如表5所示。

复合鳞片的SiC层和UHMWPE层均采用SOLID164单元(全积分的六面体单元)。由于子弹形状不规则且在侵彻过程容易发生大变形,为避免发生负体积现象,对弹壳和弹芯采用单点积分的四面体单元;而对Kevlar纤维布层则采用SHELL163薄壳单元,单元积分形式为默认的Belytshko-Tsay显式动力学单元。子弹的单元边长尺寸为 0.1

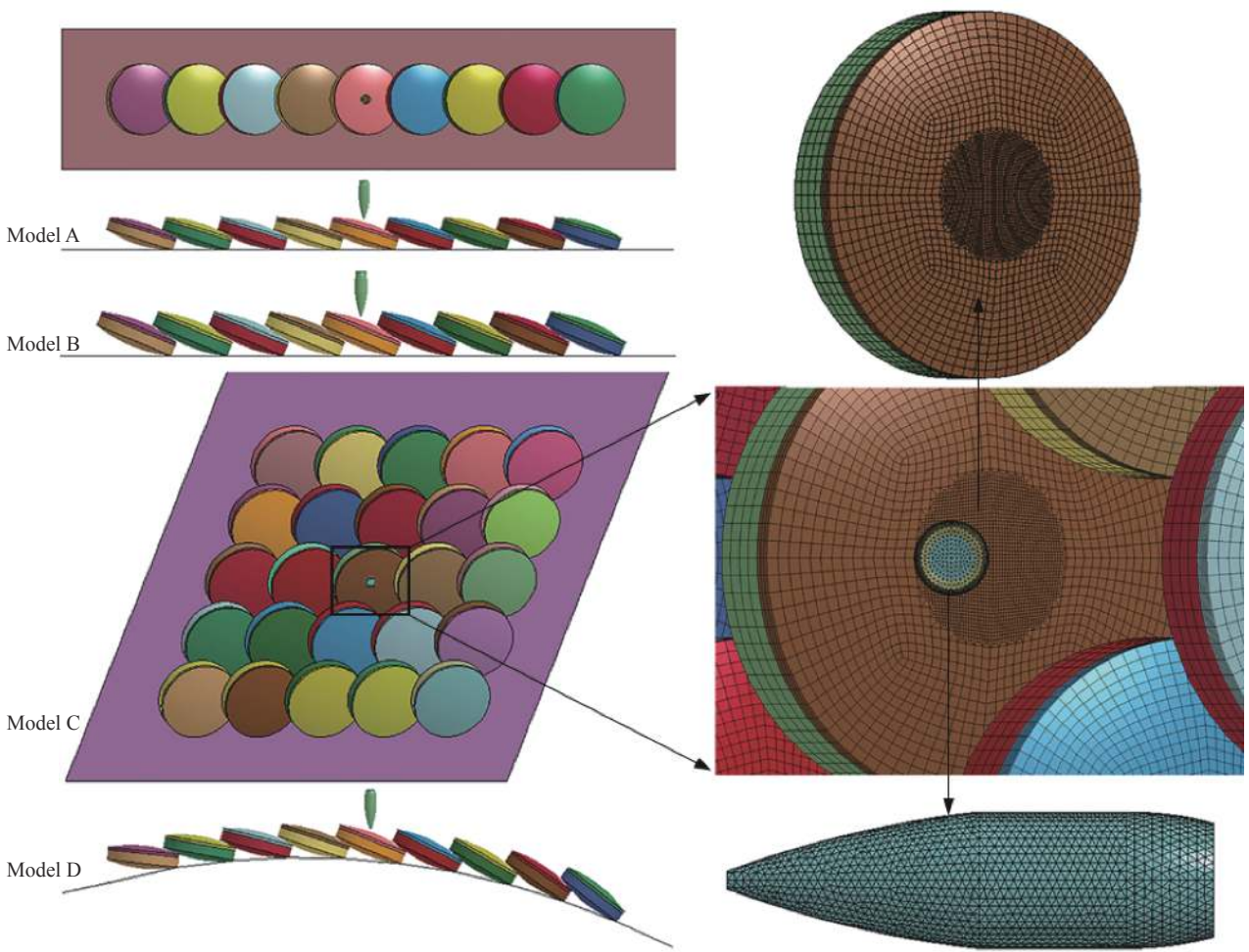


图3 SiC-UHMWPE 柔性防护装具的有限元模型及网格划分示意图

Fig. 3 Demonstration of finite element model and meshing of SiC-UHMWPE protection device

表 1 有限元模型命名

Table 1 Finite element model naming

Mark	Name	Named annotation
Model A	a0c80	Flat model of single-row arrangement of scales with rotation angle $\alpha=0^\circ$ and coverage angle $\theta_1=80^\circ$.
Model B	a0c100	Flat model of single-row arrangement of scales with rotation angle $\alpha=0^\circ$ and coverage angle $\theta_1=100^\circ$.
Model C	5x5a0c80	Flat model of 5 scales in the horizontal and vertical directions with the rotation angle $\alpha=0^\circ$, coverage angle $\theta_1=80^\circ$.
Model D	a4c100	Curved model of single-row arrangement of scales with rotation angle $\alpha=4^\circ$ and coverage angle $\theta_1=100^\circ$.
Model E	a0c80gel	Flat model of single-row arrangement of scales with rotation angle $\alpha=0^\circ$, coverage angle $\theta_1=80^\circ$, and backing materials (gel) at bottom.
Model F	5x5a0c80gel	Flat model of 5 scales in the horizontal and vertical directions with rotation angle $\alpha=0^\circ$, coverage angle $\theta_1=80^\circ$, and backing materials (gel) at bottom.

mm；对位于子弹正下方的复合鳞片，以正中心为原点、半径为 10 mm 范围的圆柱形区域进行网格加密，单元边长为 0.1 mm，而其他区域则采用相对较粗的网格(单元边长尺寸为0.5 mm，如图 3 所示)；将靶鳞片下方 Kevlar 连接层局部区域进行

网格加密，加密区域单元边长尺寸为 0.1 mm，其他区域为 0.5 mm。

根据有限元模型中各部分之间的相对位置关系及侵彻过程中可能发生的接触，采用不同形式的接触定义。对复合鳞片的 SiC 层和 UHMWPE 层采用

表 2 SiC 陶瓷材料模型参数
Table 2 Material model parameters of SiC

$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	G/GPa	A	B	C	M	N
3.163	127	0.96	0.35	0	1.0	0.65
E_{PSI}	Tensile strength / GPa	Normalized fracture strength	H_{EL}/GPa	H_{EL} pressure/GPa	H_{EL} vol. strain	H_{EL} strength/GPa
1.0	0.37	0.8	14.567	5.9	—	13.0
D_1	D_2	K_1/GPa	K_2/GPa	K_3/GPa	Beta	PSFAIL
0.48	0.48	204.785	0	0	1.0	—

Notes: ρ —Density; G —Shear modulus; A —Intact normalized strength parameter; B —Fractured normalized strength parameter; C —Strength parameter (for strain rate dependence); M —Fractured strength parameter (pressure exponent); N —Intact strength parameter (pressure exponent); E_{PSI} —Reference strain rate; H_{EL} —Hugoniot elastic limit; vol.—Volumetric; D_1 —Parameter for plastic strain to fracture; D_2 —Parameter for plastic strain to fracture (exponent); K_1 —First pressure coefficient (equivalent to the bulk modulus); K_2 —Second pressure coefficient; K_3 —Elastic constants; Beta—Fraction of elastic energy loss converted to hydrostatic energy; PSFAIL—Effective plastic strain at failure.

表 3 超高分子量聚乙烯 (UHMWPE) 材料特性参数
Table 3 Material model parameters of ultra-high molecular weight polyethylene(UHMWPE)

$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6
0.97	5.796	5.796	6.12561	0.025	3.58889	0.41368
P_7	P_8	P_9	P_{10}	P_{11}	P_{12}	P_{13}
0.25	3.709	2.884	1	0.05	6.6939	0.05
P_{14}	P_{15}	P_{16}	P_{17}	P_{18}	P_{19}	P_{20}
2.29	2.29	0.025	0.2645	0	0.185	1.3328
P_{21}	P_{22}	P_{23}	P_{24}	P_{25}	P_{26}	P_{27}
0.28285	4.63	0.28285	4.63	0.28285	2.25	−0.005

Notes: P_1, P_2, P_3 —Moduli of elasticity in x, y and z directions; P_4 —Stretching poisson’s ratio in xy plane; P_5 —Shear modulus in xy plane; P_6 —Yield stress in xy plane; P_7 —Failure strain in xy direction; P_8, P_9 —Linear buckling parameters; P_{10} —Unloading modulus factor in xy plane; P_{11} — xy plane; P_{12} —Unloading modulus in z direction; P_{13} —Tensile modulus factor in z direction; P_{14}, P_{15}, P_{16} —Shear moduli in yz, zx and xy planes; P_{17} —Compression failure strain in z direction; P_{18} —Tensile failure strain in z direction; P_{19} —Local strain of area 1 in z direction; P_{20} —Modulus of elasticity of area 1 in z direction; P_{21}, P_{22} — C, P parameters of area 2; P_{23}, P_{24} — C, P parameters of area 1; P_{25}, P_{26} — C, P parameters in xy plane; P_{27} —Parameter of strain rate.

表 4 凯夫拉 (Kevlar) 材料模型参数
Table 4 Material model parameters of Kevlar

$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	E_{a}/GPa	E_{b}/GPa	$G_{\text{ab1}}/\text{GPa}$	$G_{\text{ab2}}/\text{GPa}$	$G_{\text{ab3}}/\text{GPa}$	G_{bc}/GPa
0.8	32.69	32.69	0.004	0.042	0.349	0.349
G_{ca}/GPa	G_{amab1}	G_{amab2}	$E_{\text{a,crimpfac}}$	$E_{\text{b,crimpfac}}$	$\varepsilon_{\text{a,crimp}}$	$\varepsilon_{\text{b,crimp}}$
0.349	0.25	0.35	0.06	0.20	0.007	0.0025
$E_{\text{a,softfac}}$	$E_{\text{b,softfac}}$	$E_{\text{unloadfac}}$	E_{compfac}	$\varepsilon_{\text{a,max}}$	$\varepsilon_{\text{b,max}}$	$\sigma_{\text{post}}/\text{GPa}$
−2.20	−5.60	1.5	0.005	0.023	0.02	0.01
C_{CE}	P_{CE}	C_{SE}	d_{fac}	ε_{max}	$\varepsilon_{\text{a,fail}}$	$\varepsilon_{\text{b,fail}}$
0.005	40.00	0.005	0.30	0.035	0.20	0.20

Notes: $E_{\text{a}}, E_{\text{b}}$ —Moduli of elasticity in the longitudinal and transverse directions; $G_{\text{ab1}}, G_{\text{ab2}}, G_{\text{ab3}}$ —Shear moduli G_{abi} correspond to the slope of the i th segment; $G_{\text{bc}}, G_{\text{ca}}$ —Shear moduli in bc and ca directions; $G_{\text{amab1}}, G_{\text{amab2}}$ —Shear strains G_{amabi} correspond to the slope of the i th segment; $E_{\text{a,crimpfac}}, E_{\text{b,crimpfac}}$ —Factors for crimp region modulus of elasticity in longitudinal and transverse directions; $\varepsilon_{\text{a,crimp}}, \varepsilon_{\text{b,crimp}}$ —Crimp strains in longitudinal and transverse directions; $E_{\text{a,softfac}}, E_{\text{b,softfac}}$ —Factors for post-peak region modulus of elasticity in longitudinal and transverse directions; $E_{\text{unloadfac}}, E_{\text{compfac}}$ —Factors for unloading and compression zone modulus of elasticity; $\varepsilon_{\text{a,max}}, \varepsilon_{\text{b,max}}$ —Strains at peak stress in longitudinal and transverse directions; σ_{post} —Stress value in post-peak region at which nonlinear behavior begins; $C_{\text{CE}}, P_{\text{CE}}, C_{\text{SE}}$ —Cowper-Symonds factors; d_{fac} —Damage factor; ε_{max} —Erosion strain of element; $\varepsilon_{\text{a,fail}}, \varepsilon_{\text{b,fail}}$ —Erosion strains in longitudinal and transverse directions.

表 5 弹壳及弹芯材料模型参数

Table 5 Material model parameters of bullet jacket and core

Material parameter	Density/(g·cm ⁻³)	Young's modulus/GPa	Poisson's ratio	Yield stress/GPa	Tagent modulus/GPa	Hardening parameter	Strain rate parameter (SRC)	Strain rate parameter (SRP)	Failure strain
Bullet jacket	8.858	117	0.4	0.345	0	0	0	0	1.0
Bullet core	11.270	17	0.4	0.008	0.015	0.2	0.6	3.0	3.0

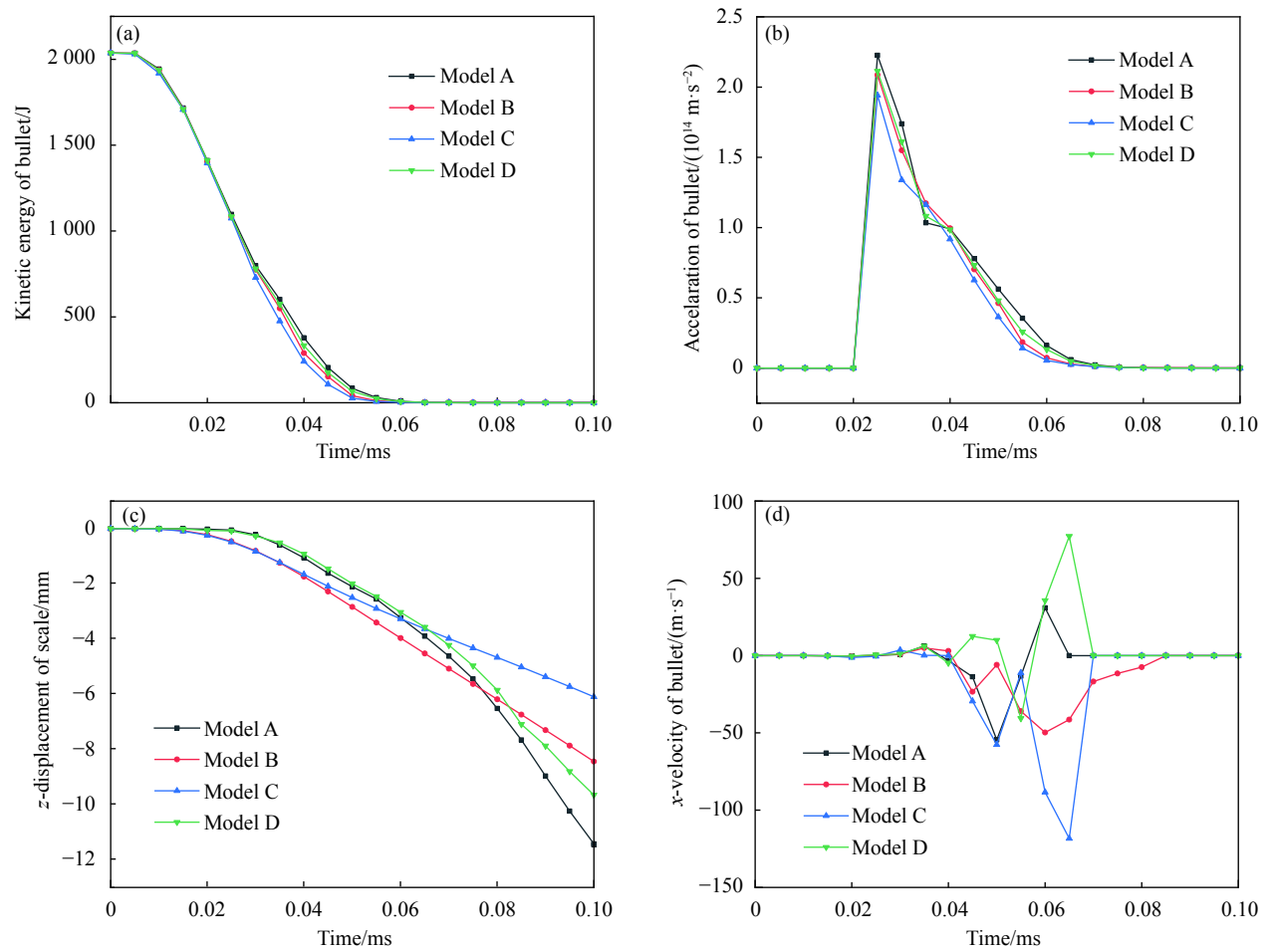
*CONTACT_TIEBREAK_SURFACE_TO_SURFACE 来定义彼此之间的接触。将所有的复合鳞片与 Kevlar 的连接层定义为一个集 (SET_PART)，弹壳和弹芯作为一个集 (SET_PART)，两集之间采用 *CONTACT_ERODING_SURFACE_TO_SURFACE 来定义侵彻接触。而复合鳞片与 Kevla 层则采用 *CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE 自动面-面接触。

2.2 支撑点数量对 SiC-UHMWPE 柔性防护装具防弹性能的影响

2.2.1 子弹侵彻过程的动力响应

图 4 为 SiC-UHMWPE 柔性防护装具各模型随

时间的动力响应曲线。图 5 为模型 A 和模型 C 靶鳞片 UHMWPE 层和子弹变形图。由图 4(b) 可知，模型 A 与模型 C 的曲线变化趋势非常接近。在 25 μs 之前和 60 μs 之后甚至基本重合，但在 25~60 μs 之间的任一时刻，模型 A 的加速度均小于模型 C(包括峰值加速度)，且曲线斜率也更大。结合图 4(a) 可知，这是由于模型 A 中子弹残余动能比模型 C 大，模型 C 比模型 A 耗散了子弹更多的能量。可将加速度-时间曲线分为三个阶段来分析：第一阶段 (0~20 μs)，曲线基本处于水平段，这是由于高速运动的子弹作用于复合鳞片上层高压压缩强度与高硬度的 SiC 时，产生的反作用力会造成



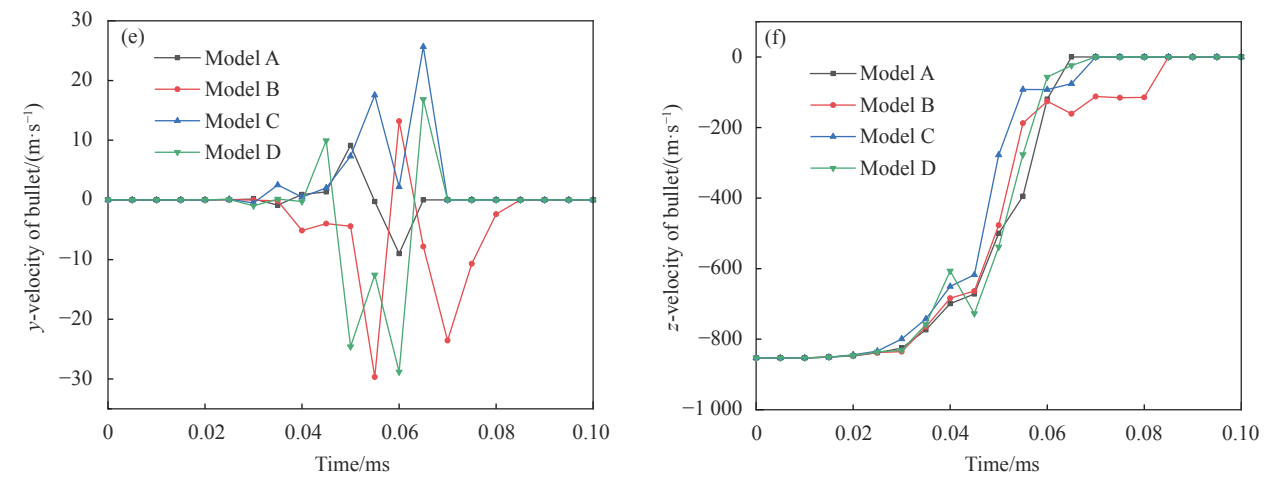


图 4 SiC-UHMWPE 柔性防护装置各模型随时间的动力响应曲线

Fig. 4 Dynamic response curves of each model over time of SiC-UHMWPE protection device

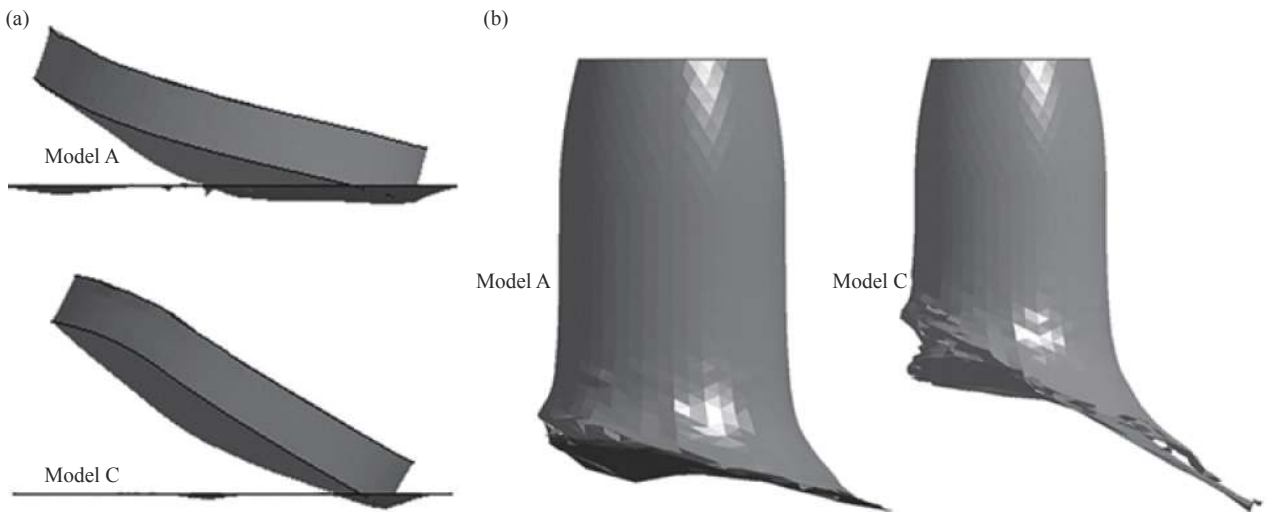


图 5 模型 A 和模型 C 靶鳞片 UHMWPE 层和子弹变形图: (a) 靶鳞片 UHMWPE 层 ($t=50\ \mu\text{s}$); (b) 子弹 ($t=20\ \mu\text{s}$)

Fig. 5 Simulated deformation patterns of target scale with UHMWPE layer and bullet in model A and model C:

(a) Target scale with UHMWPE layer ($t=50\ \mu\text{s}$); (b) Bullet ($t=20\ \mu\text{s}$)

子弹外壳及铅弹芯的三分之一部分被迅速钝化侵蚀，子弹被钝粗后的形状如图 5(b) 所示；第二阶段 (20~25 μs)，加速度急剧增大，并在 25 μs 时达到峰值加速度，这是由于子弹在前一阶段已被 SiC 层消耗部分动能，穿透力下降，而被钝粗的弹头也使子弹穿透力进一步被削弱，因此侵彻阻力迅速增大；第三阶段 (25~100 μs)，加速度逐渐由峰值下降至 0，下降速度由快到慢，到 60 μs 后基本趋于水平段，由于随着侵彻的进行，子弹的动能逐渐被防护装置吸收耗散直至完全停止。

从图 4(d) 和图 4(e) 可以看出，模型 A 与模型 C 的动力响应曲线在 x 和 y 方向均为两端平缓发展中间段剧烈震荡的情形，震荡时间区间为 40~

70 μs 之间。这是由于鳞片本身沿 x 负方向倾斜，侵彻过程靶鳞片会发生滑移与偏转，因此子弹在 x 和 y 方向的速度无规律可循。由于模型 C 采用整体排列形式且其支撑点数量明显多于模型 A，因此模型 C 在 z 方向的速度缓冲作用比模型 A 显著增强，如在 $t=50\ \mu\text{s}$ 时，模型 C 中子弹在 z 方向的残余速度仅为 -277.43 m/s，而模型 A 中子弹在 z 方向的残余速度为 -499.78 m/s，同时从图 5(a) 可以看出，同一时刻模型 C 的靶鳞片 UHMWPE 背层变形明显小于模型 A 的变形。从图 4(a) 可看出，模型 A 中子弹残余动能比模型 C 大，说明同一时刻模型 C 对子弹能量的耗散能力比模型 A 更显著。因此，在 60 μs 前任意时刻，模型 C 的位移量比模型 A 稍大。当子弹残余速度为 0 m/s 时，

子弹侵彻过程产生的巨大压缩应力波仍会在靶鳞片、产生协同作用的鳞片及 Kevlar 连接层之间传递,而模型 C 比模型 A 拥有更多的支撑鳞片及支撑点,子弹残余能量能够更好地被耗散,因此最终模型 C 的位移量远小于模型 A。

从图 4(d)~4(f) 可知,模型 A 和模型 C 的残余速度都为 0 m/s,说明模型 A 和模型 C 的结构都成功抵挡住了子弹的侵彻。但模型 A 靶鳞片的位移量为 11.3 mm,远大于模型 C 的位移量 (6.09 mm),且由图 4(c) 可以看到,模型 A 的曲线比模型 C 要陡峭很多,因此整体排列有助于进一步提升防弹性能,同时也说明在鳞片整体排列方式下,其中边缘的两排两点支撑的鳞片为其薄弱区域。

2.2.2 能量耗散机制及鳞片协同作用

在侵彻过程中,子弹巨大的冲击动能在靶鳞片 SiC 层产生压缩波,并使 SiC 内部的压应力急速增大。同时应力波会以着弹点为中心向四周分散,当增加的压应力达到 SiC 的临界应力值时, SiC 被破坏形成破碎的陶瓷锥。当压缩波由 SiC 层传递至柔性 UHMWPE 层时,由于材料阻抗不同会在接触面发生反射和透射,而两种材料较大的

阻抗差 ($SiC > UHMWPE$) 使反射波强于透射波,有利于提高复合鳞片抗弹能力^[20]。随后 UHMWPE 层将子弹残余动能一部分转变为变形能吸收,另一部分通过支撑鳞片向周围紧密联系的相邻鳞片传递,控制了 SiC 裂缝的扩展,使侵彻仅发生于局部区域。图 6 为各模型靶鳞片应力分布。可知,当 $t=50\ \mu s$ 时,模型 A 中 SiC 层已被侵彻穿透形成一个小孔,而模型 C 还未被完全穿透,尽管 SiC 层被子弹穿透,且在子弹着点中心区域形成了大量形状及大小不一的陶瓷碎块,但消耗了子弹的大部分动能,同时 UHMWPE 层起到支撑包裹弹丸和陶瓷碎片的作用。

图 7 为模型 A 和模型 C 的应力分布。图 8 为模型 C 与模型 A 的应力传递规律。从图 7(a) 可以看出,应力集中在子弹侵彻的正下方区域,并由中心向四周发散开来,离中心处距离越远的区域相应应力越小。表明 Kevlar 层增加了鳞片间协同作用的效果。从图 7(b) 可以看到,子弹在侵彻过程中模型 C 的应力传递范围比模型 A 更广。分析原因为:模型 A 为两点支撑情形,应力首先由靶鳞片传递到下方起直接支撑作用的相邻鳞片,然后再继续向下一级间接支撑鳞片传递,应力传递

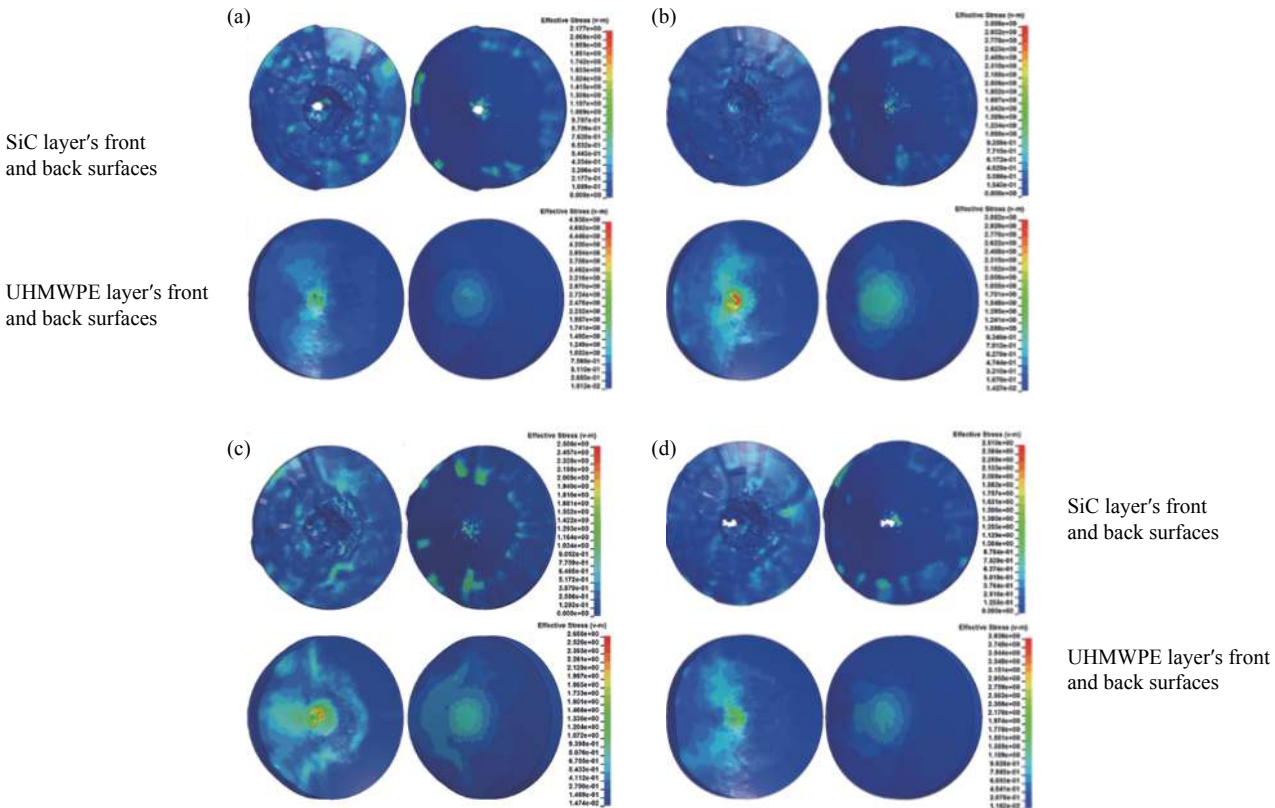


图 6 SiC-UHMWPE 各模型靶鳞片应力分布 ($t=50\ \mu s$): (a) 模型 A; (b) 模型 B; (c) 模型 C; (d) 模型 D

Fig. 6 Von Mises stress distribution of target scale in each model of SiC-UHMWPE ($t=50\ \mu s$): (a) Model A; (b) Model B; (c) Model C; (d) Model D

路径为单一直线型。从图 8(b) 可以看到，在模型 A 中，子弹动能主要被靶鳞片吸收，而支撑鳞片 中基本只有第一级的直接支撑鳞片有明显的耗能 效果。这是由于在侵彻过程中直接支撑鳞片发生 绕 y 轴顺时针旋转，支撑鳞片与其自身下方鳞片 产生空隙，应力传递路径被阻断。而在模型 C 中， 由于接触鳞片和支撑点数量更多，鳞片之间的联 系更加紧密，应力传递给一级支撑鳞片后会继续 往 x 负方向的二级、三级等间接支撑鳞片传递， 有效分担了靶鳞片耗散子弹冲击能的作用。在子 弹侵彻过程中，模型 C 比模型 A 鳞片之间的协同 作用更好，虽然靶鳞片下方支撑鳞片也会发生偏

转，但没有在与所有次级支撑鳞片中产生空隙。 同时子弹的冲击作用下离靶鳞片较近五个鳞片 会朝 x 轴聚拢紧缩，在这种牵扯作用下，远端 的三个鳞片会失去与影响区域中其他鳞片的紧密 联系，应力传递路径为多个方向的交叉型(如图 8(a) 所示)。

由图 8(b) 可知，当子弹残余速度为 0 m/s 时， 模型 C 和模型 A 的峰值应力分别为 0.768 GPa 和 0.239 GPa，且峰值应力出现的位置均为靶鳞片下 直接接触的支撑点处，在模型 C 中支撑点处两个 鳞片的应力分布大致相同。上述结果再次验证了 模型 C 比模型 A 具有更好的应力传递和分散效率。

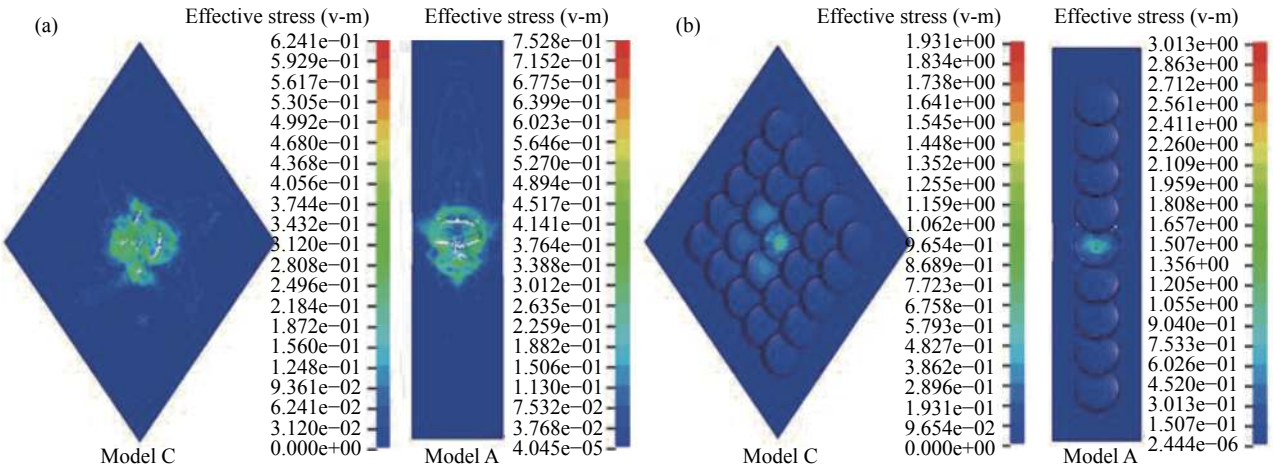


图 7 SiC-UHMWPE 模型 C 和模型 A 的应力分布: (a) Kevlar 层; (b) 整个防护装具

Fig. 7 Von Mises stress distribution of model C and model A for SiC-UHMWPE : (a) Kevlar layer; (b) Whole protection device

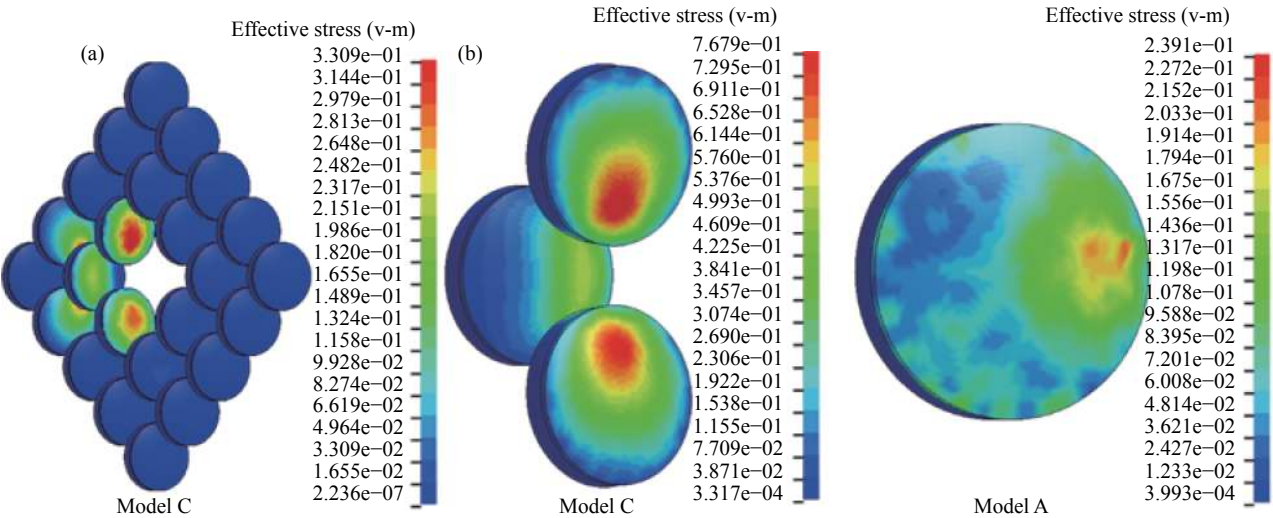


图 8 SiC-UHMWPE 模型 C 与模型 A 的应力传递规律: (a) 模型 C 应力影响区域图; (b) 子弹残余速度为 0 时模型 C 和模型 A 支撑鳞片等效应力图

Fig. 8 Stress transfer patterns of model C and model A for SiC-UHMWPE: (a) Stress affected region in model C; (b) Von Mises stress contour of supporting scales in model C and model A when bullet's residual velocity is zero

2.3 曲率半径及覆盖角对 SiC-UHMWPE 柔性防护装具防弹性能的影响

模型 A 和模型 B 具有相同的鳞片尺寸和叠加模式,同时模型 B 比模型 A 的覆盖角度大。当残余速度均为 0 m/s 时,模型 A 和模型 B 中靶鳞片位移量分别为 11.3 mm 和 8.43 mm。结果表明,增大覆盖角能够有效提高叠层结构的防弹性能,与鳞片整体排列时结论一致^[21]。模型 A 和模型 B 在 60 μs 之前 z 方向的速度-时间曲线有很高的重合度,其在竖直方向的下降趋势非常相近。从图 4(a) 和图 4(b) 可以看出,模型 A 与模型 B 的能量-时间曲线和加速度-时间曲线基本重合,但在子弹侵彻过程的最主要阶段,模型 B 中子弹残余动能和残余加速度(包括峰值加速度)均小于模型 A,说明模型 B 对子弹动能的消耗能力比模型 A 强。这是由于模型 B 具有更高的覆盖率,从而使鳞片间联系更加紧密,加强了防护装具中各鳞片的协同作用。

模型 B 和模型 D 具有相同的鳞片尺寸、叠加模式和一致的覆盖角度,同时模型 D 处于曲面状态,而模型 B 表示平面状态。当残余速度均为 0 m/s 时,模型 B 靶鳞片的位移量为 8.43 mm,小于模型 D 的位移量(9.67 mm),因此当装具由平面状态变为弯曲状态时,装具的防弹性能稍有降低。模型 D 在 65 μs 时残余速度降为 0 m/s,模型 B 在 85 μs 时残余速度才为 0 m/s,这是由于在相同覆盖角下,随着旋转角 α 的增加,鳞片间的接触点 P 越靠近鳞片边缘(如图 1(e) 所示),造成相邻鳞片中心的

距离越远,子弹在侵彻过程中越容易使靶鳞片脱离与相邻支撑鳞片的联系,相当于间接降低了装具的覆盖率。图 9 为模型 B 和模型 D 直接支撑鳞片的应力分布。可知,模型 D 靶鳞片下的支撑鳞片应力最大区域比模型 B 更靠近鳞片边缘。

由图 6 可知,当 t=50 μs 时,模型 D 中靶鳞片的 SiC 层已经被子弹穿透,出现一个小孔。而模型 B 中还未出现侵彻破坏情况。说明模型 D 耗散子弹动能的效果弱于模型 B。模型 B 与模型 D 的能量-时间曲线和加速度-时间曲线几乎重合,但总体上 B 模型中子弹的残余动能和残余加速度均稍小于模型 D,因此模型 D 耗散子弹冲击动能的能力稍小于模型 B。结果表明,当初始覆盖角一定时,增加装具的弯曲程度虽然会使装具的防弹能力稍有降低,但在一定弯曲程度内影响并不大,这种柔性叠层结构在保证一定防护能力的同时兼具弯曲变形能力,以实现人体工程学设计。

3 模型与试验的凹陷深度对比

在模型 A 和模型 C 的基础上建立带有胶泥背面垫料的有限元模型 a0c80gel 和 5x5a0c80gel,将两个模型简记为 E 和 F,模型命名如表 1 所示,并通过与实验结果对比进行分析。胶泥材料的有限元材料模型采用不可压缩连续橡胶模型*MAT_BLATZ_RUBBER 进行定义,材料参数^[22]为:密度为 1 g/cm³,剪切模量为 50 kPa,泊松比 0.462。图 10 为模型 E 和模型 F 的有限元模型及仿真结果。

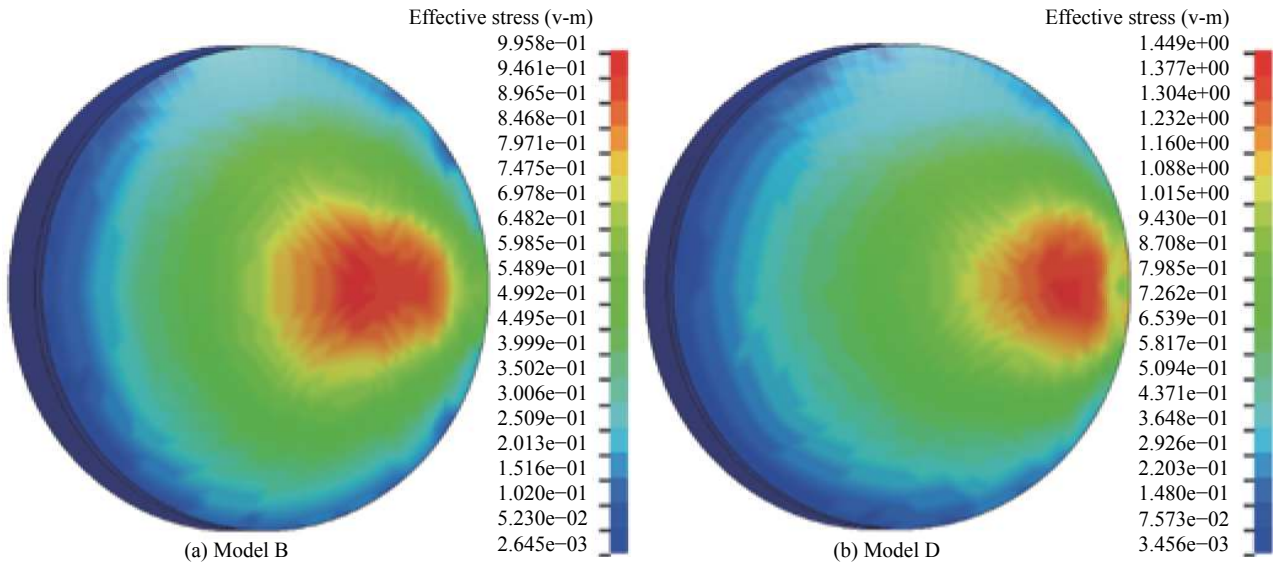


图 9 SiC-UHMWPE 模型 B 和模型 D 直接支撑鳞片的应力分布

Fig. 9 Effective stress distribution of direct supporting scale in model B and model D of SiC-UHMWPE

有限元模型中胶泥垫料网格划分如图 10(a) 所示。由前述分析可知，靶鳞片在子弹高速冲击作用下会发生偏转和滑移，可能造成鳞片发生过大偏转，形成局部区域两点支撑的情形。

试验样品所用材料和结构尺寸与前述一致，试验样品制备方法详见文献 [21]。测试中采用了 M14 步枪发射的 7.62 mm FMJ 铅芯弹 (初速度为 (845 ± 10) m/s)，所进行的六发测试中四发穿透，两发未穿透，未穿透的两发子弹造成的背面垫料的凹陷深度分别为 36.9 mm 和 36.7 mm。图 11(a) 为测试前和测试后样品的 X 光照片，其目的是为了确认样件是否达到预期覆盖率及测试后样件整

体的破坏形态。图 11(b) 为试验和仿真得到的靶鳞片下背面垫料的凹陷外貌。

图 12 为模型 E 和模型 F 靶鳞片在子弹侵彻作用下产生的凹陷深度随时间变化的曲线。可知，模型 E 的垫料凹陷深度为 32.52 mm，模型 F 的凹陷深度为 24.73 mm，模型 E 的结果与试验测试结果更接近，说明样件在测试过程中靶鳞片确实发生了较大偏转，以至于形成靶鳞片周边区域两点支撑甚至单点支撑的不利情况。从测试后样品的 X 光照片也可看出，多发子弹侵彻后，影响区域的鳞片排列呈松散状态。但对覆盖在靶鳞片上方不起支撑作用的鳞片，其覆盖率与测试前并无区

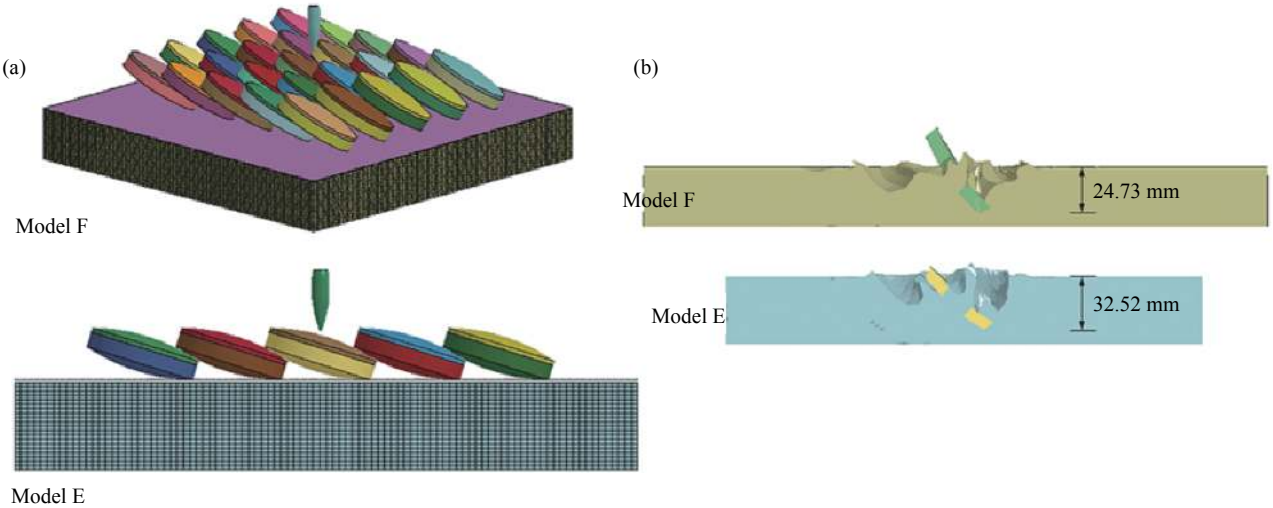
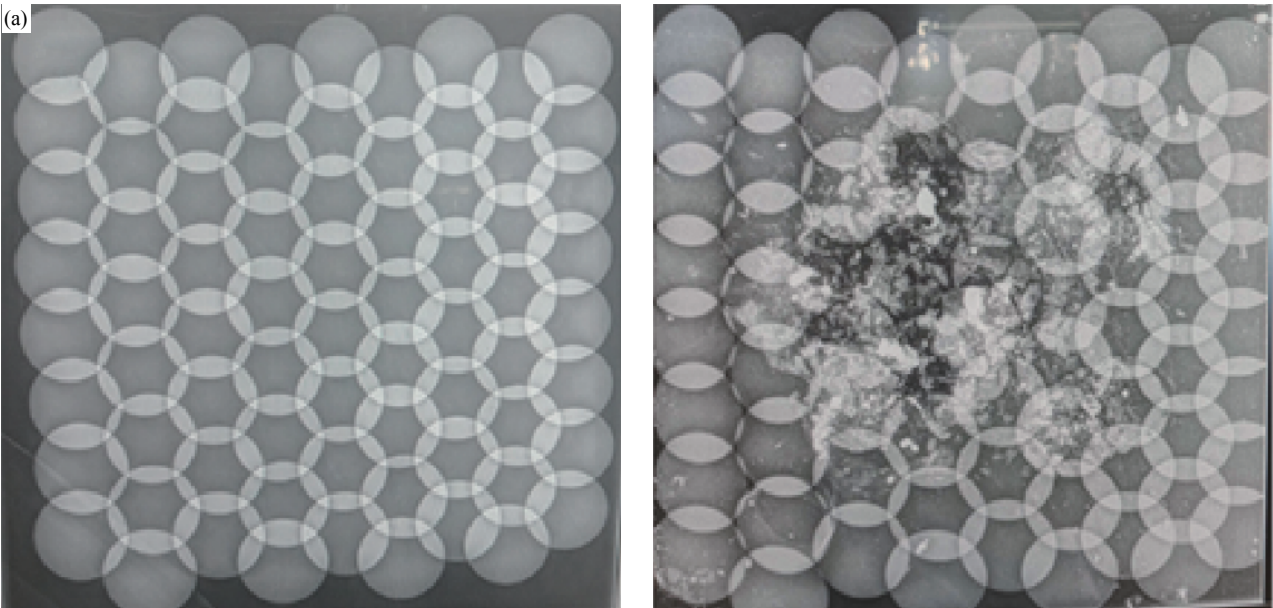


图 10 SiC-UHMWPE 模型 E 和模型 F 的有限元模型及仿真结果: (a) 有限元模型; (b) 凹陷深度

Fig. 10 Finite element model and simulation results of model E and model F for SiC-UHMWPE: (a) Finite element model; (b) Backface signature



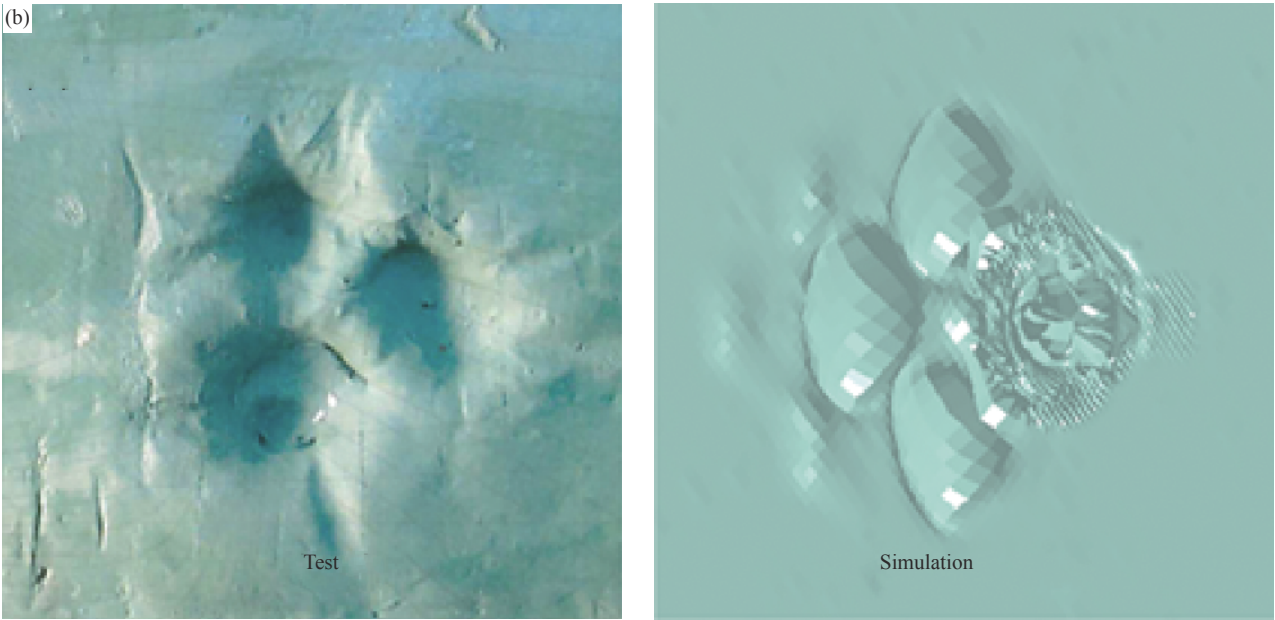


图 11 试验样品及局部区域凹陷外貌: (a) 试验前后防护装具 X 光照片; (b) 试验和仿真的靶鳞片下背面垫料凹陷外貌
Fig. 11 Test sample and concave appearance of local area: (a) X-ray pictures of armor sample before and after test;
(b) Signature of backing material under target scale obtained by test and simulation

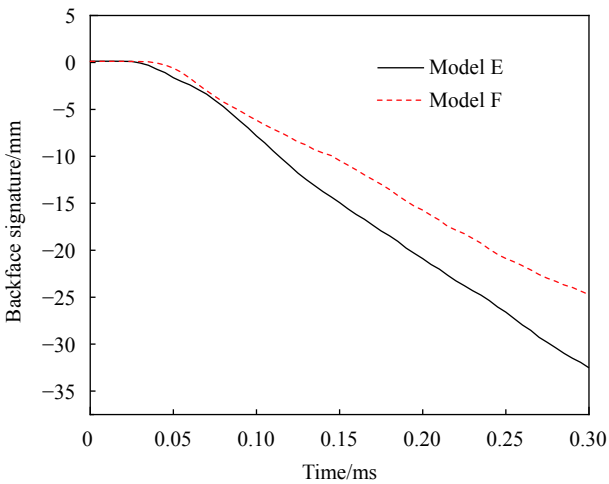


图 12 模型 E 和模型 F 靶鳞片 UHMWPE 层位移-时间曲线
Fig. 12 Displacement-time curves of UHMWPE layer of target scale in model E and model F

别,表明其在试验过程中并未被破坏,与有限元模拟分析结果一致,即破坏仅仅发生在局部范围。从图 11(b)可知,试验和仿真得到的靶鳞片下背面垫料凹陷外貌大致相同,均能反映出应力传递至靶鳞片下支撑鳞片。

4 结论

采用控制变量分析的方法建立了仿生鱼鳞片 SiC-超高分子量聚乙烯 (UHMWPE) 叠层结构的有

限元模型,并进行了数值模拟和试验测试分析。

(1) 支撑点数量对防护装具的防弹性能有显著影响。鳞片整体排列时,位于边缘两排的两点支撑区域为装具薄弱区域;装具在两点支撑时应力传递规律为单一直线型,三点支撑时为多路径交叉型,后者比前者具有更好的能量耗散能力。

(2) 鳞片单排排列时,增加覆盖角能够提升防护装具的防弹性能,与鳞片整体排列时结论一致。

(3) 当初始覆盖角一定时,增加装具的弯曲程度虽然会使装具的防弹能力稍有降低,但在一定弯曲程度内影响不大;曲率半径对装具防弹性能的影响主要是支撑点的移动间接改变鳞片间的覆盖率。

(4) 在遭受多发子弹连续打击时,鳞片容易发生滑移和偏转,改变结构局部鳞片支撑点数量,产生两点支撑甚至单点支撑的不利情况。本研究可为新型防弹装具封装工艺的改进提供重要依据。

参考文献:

[1] ABTEW M A, BOUSSU F, BRUNIAUX P, et al. Ballistic impact mechanisms: A review on textiles and fibre-reinforced composites impact responses[J]. *Composite Structures*, 2019, 223: 110966.

[2] CROUCH I G. Body armour: New materials, new systems[J]. *Defence Technology*, 2019, 15(3): 241-253.

- [3] WHITE Z W, VERNEREY F J. Armours for soft bodies: How far can bioinspiration take us[J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2018, 13(4): 041004.
- [4] ZHU D, SZEWCW L, VERNEREY F, et al. Puncture resistance of the scaled skin from striped bass: Collective mechanisms and inspiration for new flexible armor designs[J]. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2013, 24: 30-40.
- [5] ZHU D, ORTEGA C F, MOTAMED R, et al. Structure and mechanical performance of a “Modern” fish scale[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2012, 14(4): 185-194.
- [6] YANG W, SHERMAN V R, GLUDOVATZ B, et al. Protective role of Arapaima gigas fish scales: Structure and mechanical behavior[J]. *Acta Biomaterialia*, 2014, 10(8): 3599-3614.
- [7] VERNEREY F J, BARTHELAT F. Skin and scales of teleost fish: Simple structure but high performance and multiple functions[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2014, 68: 66-76.
- [8] VERNEREY F J, BARTHELAT F. On the mechanics of fish-scale structures[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2010, 47(17): 2268-2275.
- [9] FUNK N, VERA M, SZEWCW L J, et al. Bioinspired fabrication and characterization of a synthetic fish skin for the protection of soft materials[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2015, 7(10): 5972-5983.
- [10] WHITE Z, SHEN T, VOLK E M, et al. The role of surface properties on the penetration resistance of scaled skins[J]. *Mechanics Research Communications*, 2019, 98: 1-8.
- [11] 刘鹏, 汪俊文, 朱德举. 草鱼鳞片的多级结构及力学性能[J]. *复合材料学报*, 2016, 33(3): 657-665.
LIU P, WANG J W, ZHU D J. Hierarchical structure and mechanical properties of scales from grass carp[J]. *Acta Materialia Composita Sinica*, 2016, 33(3): 657-665(in Chinese).
- [12] LIU P, ZHU D, YAO Y, et al. Numerical simulation of ballistic impact behavior of bio-inspired scale-like protection system[J]. *Materials & Design*, 2016, 99: 201-210.
- [13] SHEN Z, HU D, YANG G, et al. Ballistic reliability study on SiC/UHMWPE composite armor against armor-piercing bullet[J]. *Composite Structures*, 2019, 213: 209-219.
- [14] HU D, ZHANG Y, SHEN Z, et al. Investigation on the ballistic behavior of mosaic SiC/UHMWPE composite armor systems[J]. *Ceramics International*, 2017, 43(13): 10368-10376.
- [15] 刘鹏. 鳞片多级结构、力学性能及其仿生研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2017.
LIU Peng. The research on hierarchical structure mechanical behavior and biomimetic of fish scales[D]. Changsha: Hunan University, 2017(in Chinese).
- [16] FLORES-JOHNSON E A, SHEN L, GUIAMATSIA I, et al. Numerical investigation of the impact behaviour of bio-inspired nacre-like aluminium composite plates[J]. *Composites Science and Technology*, 2014, 96: 13-22.
- [17] DHANDAPANI K. Experimental investigation and development of a constitutive model for ultra high molecular weight polyethylene materials[D]. Phoenix: Arizona State University, 2009.
- [18] AUDIBERT C, ANDREANI A S, LAINÉ É, et al. Mechanical characterization and damage mechanism of a new flax-Kevlar hybrid/epoxy composite[J]. *Composite Structures*, 2018, 195: 126-135.
- [19] KRISHNAN K, SOCKALINGAM S, BANSAL S, et al. Numerical simulation of ceramic composite armor subjected to ballistic impact[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2010, 41(8): 583-593.
- [20] 孙素杰, 赵宝荣, 王军, 等. 不同背板对陶瓷复合装甲抗弹性能影响的研究[J]. *兵器材料科学与工程*, 2006, 29(2): 70-72.
SUN Sujie, ZHAO Baorong, WANG Jun, et al. Study on the penetration performance of ceramic armors with different backing plate[J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2006, 29(2): 70-72(in Chinese).
- [21] 朱德举, 赵波. 仿生柔性防护装具的设计及防弹性能测试[J]. *复合材料学报*, 2020, 37(6): 1411-1417.
ZHU Deju, ZHAO Bo. Design and ballistic performance testing of bio-inspired flexible protection devices[J]. *Acta Materialia Composita Sinica*, 2020, 37(6): 1411-1417(in Chinese).
- [22] SHEN W, NIU Y, BYKANNOVA L, et al. Characterizing the interaction among bullet, body armor, and human and surrogate targets[J]. *Journal of Biomechanical Engineering*, 2010, 132(12): 121001.