仿生鳞片式拼接柔性防护结构防弹性能研究

黄安畏,林禹^{*},李忠盛,韦禹,程时雨,吴道勋,吴永鹏,周富 (西南技术工程研究所,重庆 400039)

摘要:目的 根据仿生学原理,借鉴鳞甲类生物柔性拼接模式,设计出由碳化硼陶瓷和超高分子量聚乙烯(UHMWPE,PE)背板复合而成的仿生鳞片式拼接柔性防护结构,以提高防护装备的灵活性和抗多发弹性能。方法 首先通过高温热压成形工艺制备出复合鳞片,然后采用 95 式 5.8 mm 钢芯弹进行侵彻试验,最后结合有限元仿真对侵彻过程中的弹击损伤机制和能量耗散形式进行分析。结果 弹丸侵彻导致复合鳞片的陶瓷层发生了严重的碎裂现象,PE 背板发生了类圆状凹陷变形,但未被穿透;单次弹击损伤范围被限制在弹击鳞片及其相邻鳞片附近,未形成大面积损伤,表现出优异的抗多发弹性能;弹九的能量通过弹击鳞片扩散到与其相邻的鳞片上,降低了弹丸对弹击鳞片的损伤,提高了柔性结构的极限抗单发弹性能。结论 仿生鳞片式拼接柔性结构能够有效抵御 95 式 5.8 mm 钢芯弹的侵彻,具备柔性的同时还具有优异的抗多发弹性能,可应用于新一代单兵及武器装备的小口径枪弹防护装甲。 关键词: 仿生结构;鳞片拼接;复合鳞片;数值仿真;防弹性能 中图分类号: R852.8 文献标识码:A 文章编号:1001-3563(2023)21-0011-07 DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.21.002

Bulletproof Performance of Biomimetic Scale Spliced Flexible Protective Structure

HUANG An-wei, LIN Yu^{*}, LI Zhong-sheng, WEI Yu, CHENG Shi-yu, WU Dao-xun, WU Yong-peng, ZHOU Fu

(Southwest Institute of Technology and Engineering, Chongqing 400039, China)

ABSTRACT: The work aims to design a spliced flexible protective structure composed of boron carbide ceramics and ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE, PE) based on the principles of bionics with the flexible splicing mode of pholidota creators as a reference, so as to improve the flexibility and resistance to multiple rounds of protective equipment. Firstly, composite scales were prepared through high-temperature hot pressing molding process, and then shooting tests were conducted with a 95-type 5.8 mm steel core bullet. Finally, finite element simulation was used to analyze the mechanism of bullet damage and energy dissipation during the shooting process. The shooting of the bullet resulted in severe fragmentation of the ceramic layer of the scales, as well as circular deformation of the PE back plate, but it was not penetrated. The damage range of a single shot was limited to the vicinity of the shot scale and other adjacent scales, but no large-scale damage was formed, demonstrating excellent resistance to multiple rounds. The energy of the bullets diffuses through the shot scales to other adjacent scales, reducing the damage effect of the bullet on the shot scales and improving the ultimate single shot resistance performance of the flexible structure. The biomimetic scale spliced flexible structure can successfully resist the shooting of Type 95 5.8 mm steel core bullets, while possessing flexibility and excellent resistance to multiple rounds. It can be applied to the small caliber ammunition protective armor of the new generation of individual soldiers and weapons equipment.

KEY WORDS: biomimetic structure; scale splicing; compound scales; numerical simulation; bulletproof performance

现代战场以维和、反恐、地域争端等小规模作战 为主,士兵及武器装备主要受到轻武器小口径弹丸、 破片的攻击^[1]。抗弹防护装备是士兵及武器装备提高 战场生存的最后一道防线,因此受到研发人员的重点 关注。近年来,针对抗弹防护装备的研究主要集中在 传统材料的性能提升及新材料的运用等方面^[2-4],抗 弹防护装备在防护性能上取得了较大进步,但在抗多 发弹性能、轻量化、模块化、适配性等方面已经不能 满足需求,士兵及武器装备抗弹防护技术应朝着柔性 化、离散化方向发展^[5-6]。

为了提高抗弹防护装备的机动性和抗多发弹性 能,从鳞甲类生物的鳞片拼接结构受到启发,研究人 员提出了一种离散化的仿生鳞甲拼接式防弹结构^[7-9], 采用数字化仿真分析和试验测试等手段从结构优化 设计、防弹性能和防护机制等方面开展了系列研究, 积累了一定的基础。Connors 等^[10]系统地分析了石鳖 环带鳞片的特征,结合逆向设计方法对不同区域的鳞 片进行了几何参数化设计,并通过 3D 打印手段制造 出多种尺寸规格的柔性拼接结构,为仿生鳞片式防护 装备的设计和制造奠定了基础。Martini 等^[11]借鉴鱼 类生物鳞片与皮层连接模式,将氧化铝鳞片黏结在柔 性硅胶层上,制作出手指关节鳞片防护结构,通过穿 刺试验和弯曲试验验证了仿生鳞片式防护结构同时 兼具防穿刺性和灵活性。刘鹏^[12]分析了草鱼鳞片的材 料、结构和性能特征,设计出一种由碳化硅陶瓷和超 高分子量聚乙烯复合而成的圆形鳞片,并对鳞片尺寸 和拼接参数进行了设计,通过有限元仿真分析计算 出鳞片总厚度为14 mm、鳞片半径为89 mm、片材 覆盖率为 0.35 时,其防护结构的防护性能最佳。Kim 等[13]采用芳纶布模拟生物表皮,用金属六边形薄片 模拟生物鳞片,使用铝球进行高速冲击,发现这种 结构可有效减小弹丸高速冲击带来的损伤。He 等^[14] 借鉴鱼鳞和鱼皮的拼接结构,使用激光烧结技术将 半球状单元复合到具有固定形状的柔性背衬上,制 作出一种新的装甲防护结构,在防穿透性能上,其 面密度降低了 37%。彭恋^[15]设计了一种飞碟状仿生 复合鳞片,并且按照鱼鳞状的排列方式拼接了一种 可变形的叠层结构,分析了鳞片支撑点数、曲率半 径、覆盖角、着弹位置对防护性能的影响。结果表 明,当鳞片为三点支撑、覆盖角度为 80°时具有更好 的能量耗散效率。朱德举等[16]借鉴鱼鳞的多级结构, 提出了一种由硬质复合鳞片和多层软质无纺布垫层 组成的双层柔性防护结构,分析了复合鳞片中陶瓷 与复合材料的厚度比对防弹性能的影响,并指出叠 加鳞片结构的能量耗散和垫层的能量分散作用是防 护结构的重要能力。

针对仿生鳞片式柔性防护结构的研究,目前主要 集中在鳞甲类生物模型的提取及简单典型结构方案 的探索试验,研究对象主要以典型圆形鳞片为主,还 需持续对鳞片形状设计、叠层参数设计、弹道试验验 证等方面进行深入研究。文中根据仿生学原理,借鉴 鳞甲类生物鳞片柔性拼接模式,结合抗弹陶瓷和支撑 背板在侵彻过程中的损伤特征,设计了一种由六边形 碳化硼陶瓷和圆形超高分子量聚乙烯(UHMWPE, PE)背板复合而成的仿生鳞片式拼接柔性防护结构, 开展了有限元仿真和弹道性能测试,分析了柔性防护 结构在 95 式 5.8 mm 钢芯弹射击下的侵彻过程、损伤 机制及能量耗散行为,拟为新一代抗多发小口径弹的 防护装备研发奠定基础。

1 试验

1.1 试样制备

采用碳化硼陶瓷和超高分子量聚乙烯 (UHMWPE, PE)背板作为复合鳞片的主要防护材料,材料层之间使用聚氨酯树脂通过高温热压成形工 艺进行黏合,再借鉴鳞甲类生物鳞片的拼接原理,将 复合鳞片进行叠层拼接,鳞片之间通过高强度纤维线 进行绳结。

在弹丸侵彻后, PE 背板会向后发生圆形的凹陷 变形^[17],参与防护的区域主要为发生凹陷变形的圆 形区域,因此将 PE 背板设计为圆形;经拼接后,鳞 片之间有多层重叠区,为了减轻防护结构的整体重 量,同时在 PE 背板上预留出连接孔位置,将鳞片中 碳化硼陶瓷设计为六边形,鳞片的形状及柔性结构 试验样件如图 1 所示。根据《军用防弹衣安全技术 性能要求》^[18],任意 2 发有效射击弹丸的中心距离 须不小于 51 mm。为了保证柔性防护结构的抗多发 弹性能,确保相邻两发有效命中弹丸不击中同一鳞 片,将鳞片圆形 PE 背板的直径设计为 51 mm,将六 边形陶瓷对边尺寸设计为 40 mm,将六边形陶瓷底 部的 2 个顶点与圆形 PE 背板的边缘贴合,同时在 PE 背板上陶瓷未覆盖区域设计了 4 个连接孔,用于鳞 片之间的绳结。



图 1 试验样件结构设计 Fig.1 Structural design of test sample

1.2 试验方案

参考《军用防弹衣安全技术性能要求》^[18-19], 测试方式如图 2 所示,采用 95 式 5.8 mm 弹道枪配 5.8 mm 普通钢芯弹进行测试,在常温条件下,射距 为 15 m,弹丸初始速度为 920 m/s,共进行 4 次射击。



图 2 弹道测试示意图 Fig.2 Schematic diagram of ballistic testing

2 有限元仿真

2.1 材料参数

考虑到弹丸在侵彻过程中会发生弹体弹塑性变 形,这里选用 Johnson-Cook 材料本构模型描述弹丸, 其材料参数见表 1。其中, ρ 为密度,E为弹性模量, v为泊松比, T_r 为参考温度, T_m 为熔点, ε_0 为参考应 变率, χ 为塑性功转热系数, c_p 为定压比热容,A为 屈服强度,B为应变硬化常数,n为应变硬化指数, C为应变率常数,m为温度软化系数, D_1 、 D_2 、 D_3 为材料损伤参数。

表 1 弹丸材料参数 Tab.1 Parameters of bullet material

ρ/ (g·cm ⁻³)	E/ GPa	v	$T_{\rm r}/{\rm K}$	$T_{\rm m}/{ m K}$	$\varepsilon_0/\mathrm{s}^{-1}$	χ	$\frac{c_{\rm p}}{({\rm J}\cdot{\rm kg}^{-1}\cdot{\rm K}^{-1})}$
7.85	210	0.3	294	1 760	2.1×10^{-3}	0.9	452
A/MPa	<i>B</i> /MPa	n	С	т	D_1	D_2	D_3
1 269	810	0.479	0.04	1	0.239	8.593	7.857

采用 JH-2 本构模型, 描述碳化硼陶瓷的脆性断 裂和压力敏感现象。PE 背板采用 AUTODYN 材料数 据库的 Shock 状态方程, 添加 Von Mises 本构模型, 具体参数见表 2~3。其中, K_1 为体积模量, K_2 、 K_3 为拟合模量参数, F 为静水拉力, $\sigma_{f,max}^*$ 为最大损伤 强度系数, β 为体胀系数, A_1 为完整强度常数, B_1 为断裂强度常数, N 为完整强度指数, M 为断裂强度指数, Γ 为 Gruneisen 系数, C_1 为初始声速, G 为剪 切模量, Y 为屈服强度。

表 2 碳化硼陶瓷材料参数 Tab.2 Material parameters of boron carbide ceramics

$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	K ₁ /GPa	K ₂ /GPa	K ₃ /GPa	F/GPa	$\sigma^*_{f,\max}$	β
2 510	233	-593	2 800	0.26	0.5	1.0
A_1	B_1	Ν	С	М	D_1	D_2
0.927	0.7	0.67	0.005	0.85	0.001	0.5

表 3 PE 背板材料参数 Tab.3 Material parameters of PE backboard

$ ho/(g \cdot cm^{-3})$	Г	$C_1/({\rm m}\cdot{\rm s}^{-1})$	G/GPa	Y/MPa
0.98	1.64	2 901	2.6	41.3

2.2 有限元模型建立与网格划分

选用 AUTODYN 软件建立柔性防护结构和弹丸 的有限元模型,如图 3 所示。其中,靶板网格尺寸设 置为 1 mm,弹丸网格尺寸设置为 0.5 mm,仿真分析 的初始条件与试验条件保持一致,采用侵蚀接触算法 来描述接触过程中弹靶的损伤破坏行为。



图 3 有限元模型示意图 Fig.3 Schematic diagram of finite element model

3 结果与分析

3.1 弹道测试结果

试样弹道测试结果见表 4,共进行了 4 发射击试 验。其中,有效防御 3 发,另有 1 发出现穿透现象, 未穿透靶位背后胶泥背凸最小值为 25.7 mm、最大值 为 31.9 mm。穿透靶位是因击中了试样的边缘区域。 4[#]弹击鳞片和弹丸的损伤情况如图 4 所示。由图 4 可 知,弹击鳞片表面的陶瓷出现严重碎裂,且与 PE 背板

表 4 靶试结果

Tab.4 Shooting test results					
靶点编号	弹速/(m·s ⁻¹)	胶泥背凸值/mm	_		
1#	927		_		
$2^{\#}$	937	25.7			
3#	943	30.5			
4#	934	31.9			





a 正面损伤情况

b 背面损伤情况

图 4 着弹鳞片损伤情况 Fig.4 Damage situation of scales hit

发生脱离, PE 背板出现明显分层破损现象, 且整体向 射击方向形成圆形凹陷, 但未形成贯穿性损伤, 证明单 片鳞片能有效抵御 95 式 5.8 mm 钢芯弹的射击。

着弹区的 X 光图像如图 5 所示,在着弹鳞片上 陶瓷发生了严重破碎情况,与着弹鳞片相邻的鳞片仅 出现局部轻微损伤,未出现大面积损伤失效现象。表 明在拼接式柔性结构中,鳞片能够限制单次弹击损伤 的扩散,表现出优异的抗多发弹性能。

着弹区域背后胶泥的凹陷形貌如图 6 所示,可以 看出,着弹鳞片在子弹的冲击下发生了凹陷变形。同



图 5 着弹区 X 光图像 Fig.5 X-ray image in the impact area



图 6 着弹区胶泥凹陷形貌 Fig.6 Morphology of coated adhesive in the impact area

时,着弹区域局部向后发生一定位移,在试样后的胶 泥上形成变形凹陷和压痕凹陷。从凹陷特点可以看 出,着弹鳞片形成的凹陷区面积和深度均最大,与其 相邻的鳞片形成的压痕凹陷区较小。由于防弹鳞片单 片尺寸相对较小,不足以抵抗高能量弹丸的冲击,此 次设计的拼接式鳞片之间的相互牵连作用有效地将 弹丸的冲击能量从着弹鳞片上分散到与其相邻的鳞 片上,降低了弹丸对单片鳞片的损伤,提高了单片鳞 片的防护性能,表现出明显的缓冲吸能效果。

3.2 仿真结果与测试结果吻合性分析

弹丸和 PE 背板试验与仿真模拟的损伤形貌对比 分别如图 7~8 所示。弹丸和 PE 背板在侵彻后的破坏 形貌与仿真模拟结果的吻合性较高,弹丸均呈现出前 部粉碎、中间向后溃缩翻边的损伤形貌; PE 背板均 向弹击方向发生明显的凹陷变形,且出现了严重的分 层现象。在仿真模拟中,弹丸剩余质量和背凸值分别 为 713 mg、29.2 mm,试验得到的弹丸剩余质量和背 凸值分别为 746 mg、31.9 mm,仿真模拟和试验所得 的数据误差较小。综上说明,仿真分析与试验测试的 吻合性较高。



图 7 弹丸试验与仿真模拟损伤形貌对比 Fig.7 Comparison of damage morphology of projectiles in experiment and simulation results





图 8 PE 背板试验与仿真模拟损伤形貌对比 Fig.8 Comparison of damage morphology of PE backboard in experiment and simulation results

3.3 分析与讨论

在侵彻过程中,鳞片、陶瓷、PE 背板及弹丸外 观形貌的变化过程如表 5 所示,在侵彻过程中弹丸速 度的变化情况如图 9 所示,在侵彻过程中着弹鳞片的 位移如图 10 所示。结合各层材料的损伤特性,弹丸对 柔性拼接结构的侵彻过程总体上可以分为 3 个阶段。



表 5 弹丸侵彻过程演变示意 Tab.5 Evolution of bullet shooting







shot during shooting

1)侵彻初始阶段。弹丸与鳞片表面的陶瓷接触, 陶瓷和弹丸均发生了破损。一方面,开始侵彻后,在 弹丸高能量冲击作用下陶瓷开坑,形成裂纹,随后裂 纹迅速扩散至整个陶瓷片材,陶瓷的破损机制主要为 开裂破损和粉碎破损。另一方面,弹丸前端部分在高 硬度和高压缩强度的陶瓷磨蚀作用下,碎裂成细小、 坚硬的碎片,后端部分也因高应力而发生挤压变形, 速度和动能均大幅度降低(图 9),弹丸的破损机制 主要为挤压变形和碎裂。此外,着弹鳞片上的应力波 传递到与其相邻的鳞片上,着弹区域的鳞片开始整体 向后位移,使得在鳞片间传递应力耗散能量的同时增 加了鳞片对弹丸的作用时间,进一步损耗了弹丸的能 量。由此可见,在此阶段陶瓷的破碎和鳞片间应力的 传递是弹丸冲击能量损耗的主要原因。

2)弹丸贯穿陶瓷后与陶瓷碎片共同作用于 PE 背板,部分陶瓷碎裂后仍继续损耗弹丸。在这个阶段, PE 背板的损伤形成主要包含 2 个方面。一方面,当 弹丸贯穿陶瓷后, PE 背板在弹丸和陶瓷碎片的冲击 作用下形成应力波,其中的部分应力波沿着面内纤维 传递,面内方向的应力使得部分纤维应变超过断裂伸 长,从而出现拉伸断裂。另一部分沿法线方向逐层传 递,在界面处产生反射,并形成拉伸应力波,界面处 的反射应力波大于界面断裂容限的部位出现分层。另 一方面, PE 背板表层的部分纤维层在弹丸和陶瓷碎 片的切削作用下发生接触区局部的切削断裂,同时 发生拉伸变形,呈现出整体凹陷形状,纤维层之间 拉伸变形的程度不同,出现纤维层间分层失效,进 而导致陶瓷与 PE 背板之间出现脱黏,因此在此阶段 PE 背板的损坏机制主要包含纤维层的断裂、纤维层 的分层和 PE 背板的整体凹陷变形。能量损耗形式主要包含 2 个方面:当弹丸贯穿陶瓷后,陶瓷在其自身碎裂形成的碎片和外层材料的约束下,对弹丸后半部分继续磨损消耗,此过程与阶段 1 中陶瓷与弹丸相互作用的形式类似,主要为较大块的陶瓷破损成更小的碎片,以此对弹丸能量进行损耗;此阶段的应力传递扩散区域和应力峰值相较于阶段 1 (图 10)更大,着弹区产生的位移更多,这也导致弹丸损耗作用时间延长,损耗的能量也更多。由此可见,破碎陶瓷对弹丸的磨削,PE 背板对弹丸的牵制损耗,以及鳞片间传递的能量损耗是这个阶段弹丸能量损耗的主要因素。

3)弹丸摆脱了陶瓷的磨损, 在仅受 PE 背板的牵 制下, 其残余能量耗尽, 并停止侵彻。在此阶段, PE 背板与弹丸之间的相互作用效果及损伤形式与阶段 2 类似, 能量耗散形式主要包含 2 个方面: 通过 PE 背 板中的纤维层断裂、分层和整体凹陷变形来对弹丸的 残余能量进行损耗; 弹击鳞片向后位移不断增加(图 10), 延长了弹丸在 PE 背板中的驻留时间, 进一步增 加了残余能量的损耗。PE 背板对弹丸的牵制损耗及 鳞片间的能量耗散, 使得弹丸的残余能量耗尽, 并停 留在 PE 背板中, 最终失去侵彻能力。

综上所述,在弹丸侵彻柔性结构过程中,鳞片的 破损机制主要为陶瓷的破碎,陶瓷与 PE 背板脱黏, PE 背板纤维层断裂和分层,以及 PE 背板凹陷变形; 弹丸的破碎机制主要为挤压变形和碎裂。弹丸的冲击 动能主要通过陶瓷破损、PE 背板断裂/分层/变形、鳞 片间能量传递等方式来进行耗散。柔性结构表现出优 异的极限抗单发弹性能和抗多发弹性能,柔性结构 通过侵彻过程中产生的局部位移来增加对弹丸的作 用时间,进一步增大弹丸能量耗散,同时在鳞片间 传递能量进行耗散,减少单次弹击对着弹鳞片造成 的损伤,进而提高柔性结构的极限抗单发弹性能; 鳞片可限制单次弹击的损伤范围,使柔性结构受到 单次弹击后不会产生大面积损伤扩散,以此来提高 柔性结构的抗多发弹性能。

4 结语

通过对鳞片式拼接柔性防护结构进行防 95 式 5.8 mm 钢芯弹弹道测试和有限元仿真,分析了侵彻 过程中鳞片及弹丸的损伤机制和能量损耗形式,得出 以下结论。

1)提出了一种由六边形陶瓷和圆形 PE 背板复 合而成的鳞片,并拼接成柔性防护结构,弹道测试与 仿真分析结果吻合良好,均表明该结构能够有效防御 95式 5.8 mm 钢芯弹。

2)鳞片的损伤机制主要为陶瓷的破碎,陶瓷与 PE 背板脱黏, PE 背板纤维层断裂和分层,以及 PE 背板凹陷变形。弹丸的破碎机制主要为挤压变形和 碎裂。

3)在弹丸侵彻柔性结构过程中,弹丸的冲击动 能主要通过陶瓷破损、PE 背板断裂/分层/变形、鳞片 间能量传递等方式来进行耗散。

4)通过增加侵彻过程中的能量损耗来提高柔性 结构的极限抗单发弹性能,通过鳞片限制单次射击产 生的损伤范围,以提高柔性结构的抗多发弹性能。

参考文献:

- FISCHER H. US Military Casualty Statistics: Operation New Dawn, Operation Iraqi Freedom, and Operation Enduring Freedom[R]. Congressional Research Service Reports, 2013: 1-13.
- [2] 赵旭东,高兴勇,刘国庆. 装甲防护材料抗侵彻性能 研究现状[J]. 包装工程, 2017, 38(11): 117-122.
 ZHAO Xu-dong, GAO Xing-yong, LIU Guo-qing. Situation of Research on Anti-Penetration Performance of Armor Protective Material[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(11): 117-122.
- [3] 李良春,张会旭,牛正一,等. 军用防弹防爆方舱主 要材料与结构[J]. 包装工程, 2017, 38(23): 37-40.
 LI Liang-chun, ZHANG Hui-xu, NIU Zheng-yi, et al. Main Materials and Structures of Military Explosion-Proof and Bullet-Proof Shelter[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(23): 37-40.
- [4] 曹凌宇, 罗兴柏, 刘国庆, 等. 军用装甲防护技术发展及应用[J]. 包装工程, 2018, 39(3): 223-228.
 CAO Ling-yu, LUO Xing-bai, LIU Guo-qing, et al. Development and Application of Military Armor Protection Technology[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(3): 223-228.
- [5] 黄海英,王克印,张璜炜,等. 单兵躯干防护装备的现状与展望[J]. 兵工自动化, 2016, 35(7): 16-18.
 HUANG Hai-ying, WANG Ke-yin, ZHANG Huang-wei, et al. Current Situation and Prospect of Individual Protective Equipment[J]. Ordnance Industry Automation, 2016, 35(7): 16-18.
- [6] 许冬梅, 刘元坤, 艾青松, 等. 防弹衣中防凹陷材料的应用研究[J]. 中国个体防护装备, 2015(5): 9-11.
 XU Dong-mei, LIU Yuan-kun, AI Qing-song, et al.
 Study on the Application of Anti-Trauma Material in Body Armor[J]. China Personal Protective Equipment, 2015(5): 9-11.
- [7] ISLAM M K, HAZELL P J, ESCOBEDO J P, et al. Biomimetic Armour Design Strategies for Additive Manufacturing: A Review[J]. Materials & Design, 2021,

205: 109730.

- [8] DURO-ROYO J, ZOLOTOVSKY K, MOGAS- SOLDEVILA L, et al. MetaMesh: A Hierarchical Computational Model for Design and Fabrication of Biomimetic Armored Surfaces[J]. Computer-Aided Design, 2015, 60: 14-27.
- [9] RAWAT P, ZHU De-ju, RAHMAN M Z, et al. Structural and Mechanical Properties of Fish Scales for the Bio-Inspired Design of Flexible Body Armors: A Review[J]. Acta Biomaterialia, 2021, 121: 41-67.
- [10] CONNORS M, YANG Ting, HOSNY A, et al. Bioinspired Design of Flexible Armor Based on Chiton Scales[J]. Nature Communications, 2019, 10: 5413.
- [11] MARTINI R, BARTHELAT F. Stretch-and-Release Fabrication, Testing and Optimization of a Flexible Ceramic Armor Inspired from Fish Scales[J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2016, 11(6): 066001.
- [12] 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: 119-120.
 LIU Peng. Multistage Structure, Mechanical Properties and Bionics of Scales[D]. Changsha: Hunan University, 2017: 119-120.
- [13] KIM Y, CHOI C, KUMAR S K S, et al. Behavior of Dragon Skin Flexible Metal Bumper under Hypervelocity Impact[J]. International Journal of Impact Engineering, 2019, 125: 13-26.
- [14] HE Jing-jie, YUAN Meng-qi, GONG Zheng, et al. Egg-Shell Structure Design for Stab Resistant Body

Armor[J]. Materials Today Communications, 2018, 16: 26-36.

- [15] 彭恋. 仿生柔性叠层结构防弹性能有限元模拟与试验 对比[D]. 长沙: 湖南大学, 2020: 46-47.
 PENG Lian. Finite Element Simulation and Experimental Comparison of Bulletproof Performance of Bionic Flexible Laminated Structure[D]. Changsha: Hunan University, 2020: 46-47.
- [16] 朱德举, 镇鑫楼. 仿鱼鳞片结构的防护装具抗穿甲燃烧弹性能[J]. 复合材料学报, 2022, 39(12): 5958-5965.
 ZHU De-ju, ZHEN Xin-lou. Anti-Armor-Piercing Incendiary Performance of Protective Equipment with Fish-Like Scale Structure[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(12): 5958-5965.
- [17] 程时雨,李忠盛,郭峰,等.碳化硼陶瓷插板抗多发 弹性能研究[J]. 兵器装备工程学报, 2022, 43(8): 146-151.
 CHENG Shi-yu, LI Zhong-sheng, GUO Feng, et al. Study on Multiple Elastic Resistance of Boron Carbide Ceramic Insert[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2022, 43(8): 146-151.
- [18] GJB 4300A—2012, 军用防弹衣安全技术性能要求[S].
 GJB 4300A-2012, Requirements of Safety Technical Performance for Military Body Armor[S].
- [19] GJB 4300A—2002, 军用防弹衣安全技术性能要求[S].
 GJB 4300A-2002, Requirements of Safety Technical Performance for Military Body Armor[S].

责任编辑: 彭颋