

双箭头负泊松比结构抗侵彻性能*

刘洋佐,马大为,任杰,仲健林,赵昌方
(南京理工大学机械工程学院,江苏南京 210094)

摘要:采用数值模拟方法研究了双箭头负泊松比多胞结构抗子弹侵彻性能,对比分析了顶边撞击、铰点撞击、侧边撞击三种弹靶作用条件下子弹的侵彻行为与双箭头负泊松比结构的破坏形式。研究表明:当子弹以较高速度撞击双箭头负泊松比结构时,该结构的负泊松比效应不显著;顶边撞击与铰点撞击时,子弹直接贯穿结构,胞元破坏较小,此时双箭头负泊松比多胞结构抗侵彻性能较差;侧边撞击时,子弹未贯穿多胞结构,胞元破坏较大,双箭头负泊松比结构依靠其双三角结构使子弹发生偏转,显著增大了其侵彻阻力。分析了顶边撞击时子弹的入射角度变化对于双箭头负泊松比结构抗侵彻性能的影响,发现存在30°入射角和60°入射角。当子弹处于这两种入射角附近时,双箭头负泊松比多胞结构具有一定的抗侵彻能力。

关键词:多胞材料;负泊松比;结构响应;局部侵彻

中图分类号: O342;TB383;TJ03 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2023)02-197-11

Ballistic performance of double-arrow negative Poisson's ratio structure

LIU Yangzuo, MA Dawei, REN Jie, ZHONG Jianlin, ZHAO Changfang

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: The penetration performance of the double-arrow negative Poisson's ratio multicellular structure against bullet penetration was studied by numerical simulation method. The penetration behaviors of bullets and the damage forms of the double-arrow negative Poisson's ratio structure under the three bullet target conditions of top-edge impact, hinge-point impact and side-impact were compared and analyzed. The results show that the negative Poisson's ratio effect of the double-arrow negative Poisson's ratio structure is not significant when the bullet impacts the structure at a high velocity. The bullet directly penetrates the structure at topside impact and hinge point impact, the damage of the cell element is small and the anti-intrusion performance of the double-arrow negative Poisson's ratio multi-cell structure is poor at this time. The bullet does not penetrate the multi-cell structure at side impact, and the damage of the cell element is large; the double-arrow negative Poisson's ratio structure relies on its double-Poisson's ratio structure to deflect the bullet at side impact. The double-arrow negative Poisson's ratio structure relies on its double triangular structure to deflect and roll the bullet during side impact, which significantly increases its penetration resistance. The effect of the change in the angle of incidence of the bullet during topside impact on the intrusion resistance of the double-arrow negative Poisson's ratio structure was analyzed. It is found that there is a 30° angle of incidence and a 60° angle of incidence. The double-arrow negative Poisson's ratio multi-cell structure has some resistance to penetration when the bullet is near these two incidence angles.

Keywords: cellular materials; negative Poisson's ratio; structural response; local penetration

军用大型特种车辆除面对来袭弹药爆炸产生的冲击波与破片威胁外,也不能忽略敌方枪械射击造成的损伤。负泊松比(negative Poisson's ratio, NPR)超材料在受到轴向拉伸(或压缩)时,其垂直方向有膨胀(或收缩)的力学特性^[1]。近年来 NPR 多胞材料因其出色的力学性能、良好的吸能特性与轻质化特性,在冲击防护领域具有重要应用价值^[2-3], NPR 多胞材料结构在军用大型

特种车辆的使用对于提高车辆抗毁伤能力方面有着积极作用。因此研究 NPR 多胞结构在中口径子弹侵彻作用下的整体结构响应与局部撞击响应,对于充分认识 NPR 多胞结构的抗侵彻机理具有重要意义。

杨德庆等^[4]研究了星形 NPR 超材料防护结构的抗爆抗冲击性能,对于高速或超高速弹体侵彻问题,单纯依靠结构性的被动防御无法应对;

* 收稿日期:2021-05-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(12002169);江苏省博士后基金资助项目(2020Z226);江苏省研究生科研与实践创新计划资助项目(SJCX20_0106)

作者简介:刘洋佐(1995—),男,青海西宁人,博士研究生,E-mail:1327649083@qq.com;
任杰(通信作者),男,江苏常州人,副教授,博士,硕士生导师,E-mail:renjie@njust.edu.cn

NPR 效应蜂窝夹芯防护结构相较常规防护结构具有良好的水下抗爆性能。Qi 等^[5]对三种不同胞元的蜂窝夹芯板结构在钝头弹冲击下的动力学响应进行了研究。内凹六边形胞元与矩形、正六边形胞元相比,因其结构具有 NPR 效应,其夹心结构具备最高的冲击阻力。Jin 等^[6]研究了爆炸冲击下具有功能梯度的 NPR 蜂窝芯层的结构响应,并与未分级的蜂窝芯层和规则排列的蜂窝芯层进行了对比,结果显示,分级蜂窝芯层及交叉排列蜂窝芯层能够显著提高夹芯层结构的抗爆性能。马芳武等^[7]分析了冲击倾角与冲击速度对内凹三角形 NPR 多胞结构面内冲击的变形模态和动力响应的影响,结果指出内凹三角形 NPR 多胞结构具备一个最佳冲击倾角,使得抵抗变形的形式主要以结构胞壁的压缩与弯曲为主,平台应力值与吸能值得到了较大的提升,进一步发挥了多胞结构的抗承载能力。沈振峰等^[8]提出了一种新型 NPR 内凹环形蜂窝结构模型。研究了面内冲击载荷作用下胞元微结构对该内凹环形蜂窝材料的变形行为、动态冲击应力和能量吸收特性的影响。发现与传统内凹六边形蜂窝不同,在相同冲击速度下,内凹环形蜂窝的最大峰值应力降低显著,并且具备良好的冲击载荷一致性。并基于一维冲击波理论,推导了内凹环形蜂窝材料的动态平台应力经验公式。

纵观已有文献,对 NPR 多胞结构的研究多集中于通过刚性平板对结构进行撞击的方式施加冲击载荷,以此得到结构的面内冲击动力学性能,利用子弹撞击 NPR 多胞结构施加冲击载荷的研究较少。现有的相关研究中往往不考虑子弹的变形,且子弹的特征尺寸大于胞元特征尺寸,子弹撞击速度多集中在中低速范围($v < 500\text{ m/s}$),而研究 NPR 多胞结构在子弹高速冲击下的结构响应并不多见。

综上所述,本文在子弹特征尺寸与胞元特征尺寸同量级时,考虑子弹侵彻过程中的弹体变形因素,对子弹高速侵彻双箭头 NPR 结构过程进行研究,探讨双箭头 NPR 结构的抗子弹侵彻性能。

1 数值模拟

1.1 子弹与双箭头 NPR 结构

双箭头 NPR 结构是一种典型的内凹结构,它们是由薄肋和连接铰链组成的桁架结构构成^[1]。本文研究的双箭头 NPR 结构是由多个单胞结构叠加组成,单胞结构尺寸^[9]如图 1 所示。参数如下:短胞壁高度 $h = 4\text{ mm}$;长胞壁长度 $a = 4\text{ mm}$,胞壁厚度 $b = 1.5\text{ mm}$,胞元宽度 $c = 34\text{ mm}$,胞元高度 $H = 20\text{ mm}$,相对密度 $\Delta\rho = 0.162$ 。子弹头部

形状为截卵形,弹丸长度 $L = 26.8\text{ mm}$,直径 $d = 7.62\text{ mm}$,截顶直径 $d_0 = 1\text{ mm}$ 。

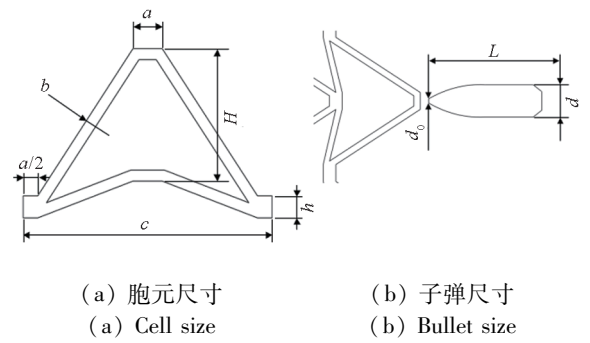
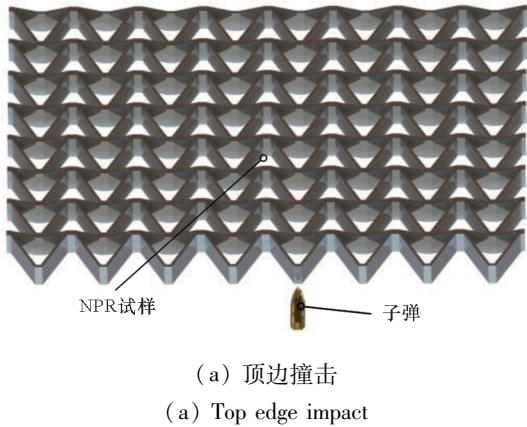


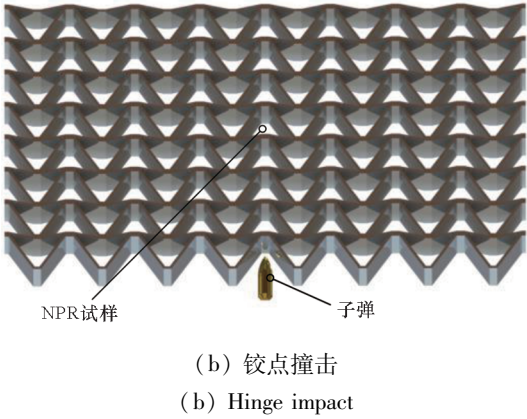
图 1 双箭头 NPR 结构与子弹尺寸
Fig. 1 Double arrow NPR structure and bullet size

双箭头 NPR 多胞结构试样由 8×8 形式的单胞结构组成。试样高度为 163 mm ,试样宽度为 272 mm ,试样面外厚度为 34 mm 。

本研究中子弹以 700 m/s 的初速度正向撞击双箭头 NPR 结构。为分析该结构在不同位置、不同角度受子弹撞击时的抗侵彻能力,使用同一种 NPR 多胞结构试样构建了三种工况下的模型,即子弹垂直撞击胞元顶角水平壁时的“顶边撞击”模型、撞击相邻胞元之间连接铰处的“铰点撞击”模型、撞击外侧斜边中点时的“侧边撞击”模型,分别对应图 2(a)、图 2(b)与图 2(c)中的几何模型。



(a) 顶边撞击
(a) Top edge impact



(b) 铰点撞击
(b) Hinge impact

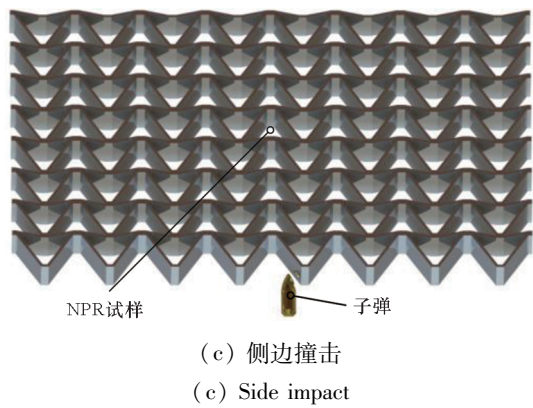


图2 子弹与 NPR 试样几何模型

Fig. 2 Bullet and NPR specimen geometry model

同时为探究双箭头 NPR 结构在受子弹撞击时是否能体现负泊松比效应。如图 3 所示,沿与子弹初速同向的 Z 轴方向,在 NPR 结构边沿处依次选取 8 个测试点,并通过测量节点位移分析结构的负泊松比效应。若多数测试点沿 X 轴正向位移较大,可认为该结构发生了明显的负泊松比效应。

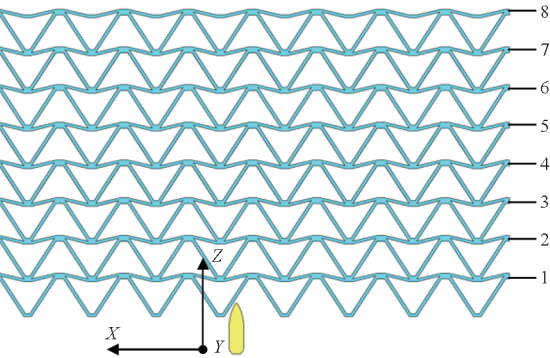


图3 结构测试点
Fig. 3 Structural test points

1.2 材料属性与状态方程

子弹由 45 钢制成,NPR 胞元材料为 2024 铝合金。二者均采用 Johnson-Cook 本构模型用以模拟子弹撞击过程中金属材料的动态力学行为。Johnson-Cook 模型常用于大应变、高应变率与材料热软化效应的问题中,能够较为理想地描述金属的力学行为,其流动应力^[4]描述为:

$$\sigma_y = (A_1 + B_1 \bar{\epsilon}_p^n) (1 + C \ln \dot{\epsilon}^*) (1 - T^*) \quad (1)$$

式中: A_1 、 B_1 、 C 和 n 都是材料输入常数; $\bar{\epsilon}_p$ 为等效塑性应变; $\dot{\epsilon}^*$ 为无量纲化的等效塑性应变速率; T^* 为无量纲温度, $T^* = (T - T_0)/(T_m - T_0)$, T_m 为材料融化温度, T_0 为室温。

子弹与 NPR 结构均采用 Gruneisen 状态方程,方程是由 S_1 、 S_2 与 S_3 三个参数拟合的三次多

项式。此状态方程定义材料的压力^[10-12]为:

$$p = \frac{\rho_0 C^2 \mu \left[1 + \left(1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu - \frac{a}{2} \mu^2 \right]}{\left[1 - (S_1 - 1) \mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2} \right]} + (\gamma_0 + \alpha \mu) E \quad (2)$$

式中: E 为初始内能, C 是 $v_s - v_p$ 曲线的截距, S_1 、 S_2 与 S_3 是 $v_s - v_p$ 曲线斜率的系数, γ_0 是 Gruneisen 系数, a 是 γ_0 的一阶体积修正。

破坏应变定义为^[4]:

$$\epsilon_f = [D_1 + D_2 \exp(D_3 \sigma^*)] (1 + D_4 \ln \dot{\epsilon}^*) (1 + D_5 T^*) \quad (3)$$

式中: σ^* 为压力与有效压力之比, $\sigma^* = p/\sigma_{\text{eff}}$; $D_1 \sim D_5$ 为断裂常量,当破坏参数 D 达到 1 时即认为产生断裂。

$$D = \sum (\Delta \bar{\epsilon}_p / \epsilon_f) \quad (4)$$

45 钢、2024 铝的具体材料参数如表 1、表 2、表 3,表中参数源自文献[4,13]。

表 1 45 钢、2024 铝 Johnson-Cook 本构参数					
Tab. 1 Johnson-Cook constitutive parameters of 45 steel and 2024 aluminum					
材料	$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	G/Mbar	A/Mbar	B/Mbar	n
45 钢	7.83	0.76	0.005 07	0.003 21	0.28
2024 铝	2.78	0.47	0.003 69	0.006 84	0.34

材料	C	m	T_m/K	T_r/K	$C_p/(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$
45 钢	0.064	1.06	1 795	300	469
2024 铝	0.008	1.00	775	300	875

表 2 45 钢、2024 铝 Gruneisen 参数			
Tab. 2 Gruneisen parameters of 45 steel and 2024 aluminum			
材料	$C/(\text{cm} \cdot \mu\text{s}^{-1})$	S_1	γ_0
45 钢	0.456 9	1.490	2.17
2024 铝	0.532 8	1.338	2.00

表 3 45 钢、2024 铝 Johnson-Cook 失效参数					
Tab. 3 Parameters of Johnson-Cook failure model for 45 steel and 2024 aluminum					
材料	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5
45 钢	0.10	0.76	1.57	0.005	-0.84
2024 铝	0.13	0.13	-1.50	0.011	0.00

弹体和 NPR 结构之间的接触设置为面 - 面

侵彻,以模拟胞元贯穿失效,当胞元的塑性应变达到失效值时,相应单元被删除,从而形象地模拟 NPR 结构的断裂以及子弹与结构之间的相互挤压变形。

1.3 有限元模型

子弹撞击双箭头 NPR 多胞结构试样的数值模拟采用 ANSYS/LS-DYNA 软件进行分析。考虑模型的形状、载荷具有对称性,在垂直于 Y 轴方向上建立三维模型的 $1/2$ 模型以减小计算规模与时间,建模采用单位为 $g, cm, \mu s$ 。

对三种模型均施加两边约束,约束位置如图 4 所示。对两边约束限制 5 个自由度,仅保留沿 X 轴方向的平动,不影响约束端测点的位移。

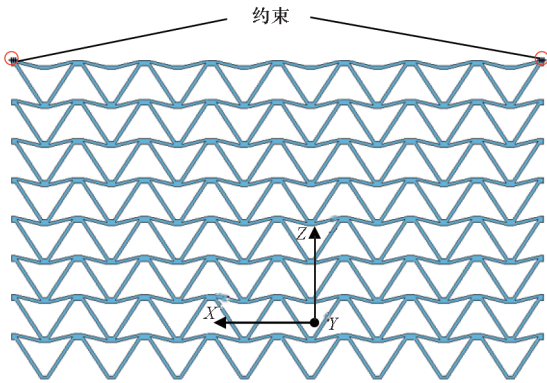


图 4 胞元约束位置
Fig. 4 Constraint position of the cell element

在进行数值分析时,对多胞结构对称面定义对称边界条件,弹体和 NPR 结构选用实体单元网格。在 Hypermesh 软件中对各模型采用映射网格划分。顶边撞击与铰点撞击时,弹丸理论上不发生偏转,贯穿仅发生在与弹丸初速度方向一致的区域,因此对这一列胞元采用较密的网格划分,较密网格尺寸为 0.5 mm ;在距接触位置较远处,则采用相对稀疏的网格划分,稀疏网格尺寸为 $1 \sim 2\text{ mm}$,如图 5(a)与图 5(b)所示。侧边撞击时弹丸运动轨迹将会偏转,故对整个 NPR 结构采用均一化网格划分,网格尺寸为 1 mm ,如图 5(c)所示。

三个模型中的子弹模型网格尺寸保持不变,均为 1 mm 。顶边撞击模型共计 448 404 个网格单元,93% 的网格雅可比质量大于 0.7;铰点撞击模型共计 588 088 个网格单元,94% 的网格雅可比质量大于 0.7;侧边撞击模型共计 196 624 个网格单元,92% 的网格雅可比质量大于 0.7。通常网格雅可比质量大于 0.7 时可认为有限元模型的网格质量较为优良,由网格产生的误差对数值计

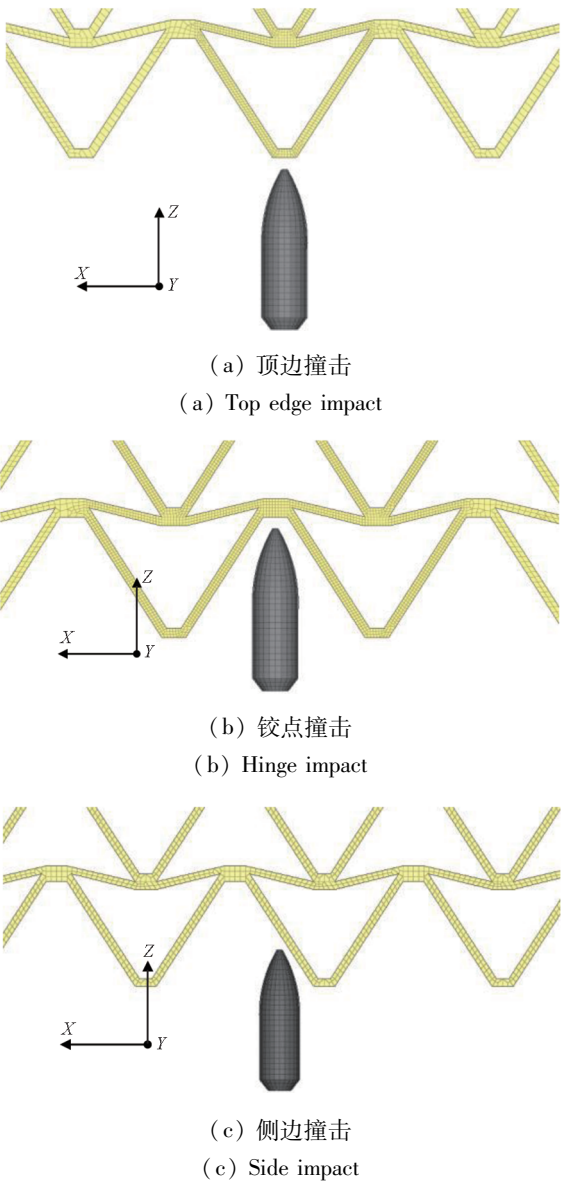


图 5 子弹与 NPR 结构网格分布
Fig. 5 Bullets and NPR structure grid distribution

算的准确性影响可以忽略。

由于双箭头 NPR 多胞结构实际加工难度较大,为证明本数值模拟模型的有效性,建立了与文献[4]单层钢板防护结构相同的数值模型进行验证,弹体冲击过程模拟如图 6 所示。单层正方形钢板厚度为 50 mm ,边长为 8 000 mm ,四周采用固定约束。射弹为截锥形,弹体直径为 200 mm ,截顶直径为 50 mm ,长度为 800 mm ,半锥角 20° ,垂直于钢板表面入射。钢板材料为 45 钢,采用 Johnson-Cook 本构模型,参数见表 1。计算中弹体材料取为刚体,密度取为 7 830 kg/m^3 ,计算结果如图 7 所示。

由图 7 可知,入射初速度为 200 m/s 和 340 m/s 的弹体穿透单层钢板后的剩余速度为 131 m/s 和 305 m/s 。此数值结果与图 8 中展示

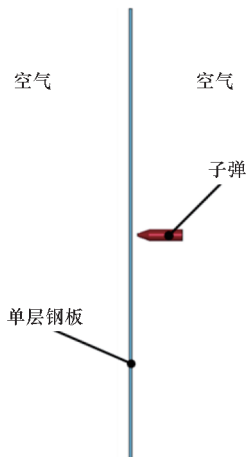


图6 单层防护结构验证模型

Fig.6 Single-layer protection structure verification model

的文献[14]的试验结果基本一致,证明了本文数值方法的有效性。

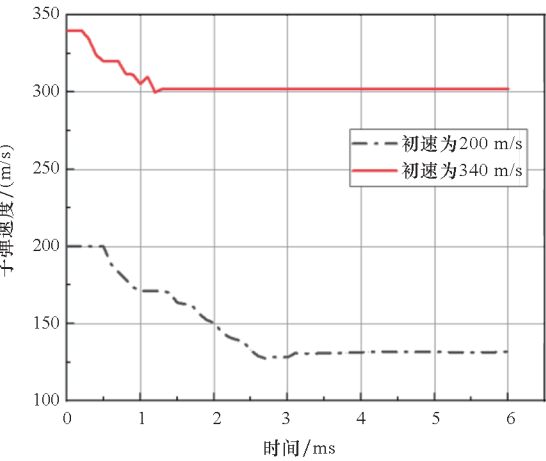


图7 单层防护结构弹体冲击结果

Fig.7 Impact result of single-layer protective structure projectile

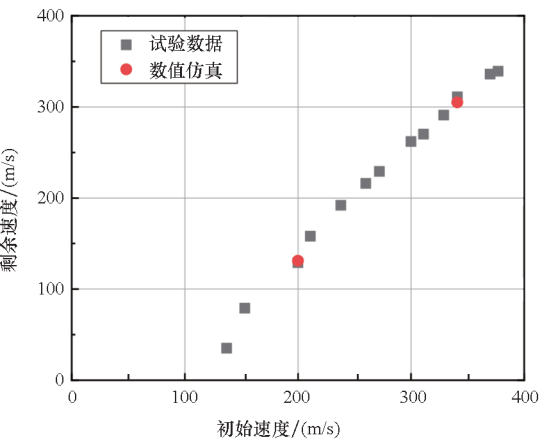


图8 锥形弹体初始速度与剩余速度关联曲线^[14]

Fig.8 Correlation curve between initial velocity and residual velocity of cone-shaped projectile^[14]

2 结果对比与讨论

2.1 子弹弹道特性

图9给出0~400 μs时子弹顶边撞击双箭头NPR结构时的运动轨迹,弹体贯穿该结构。可见,NPR结构的塑性变形和破坏仅局限在弹丸路径范围内的胞元顶角与底边处。

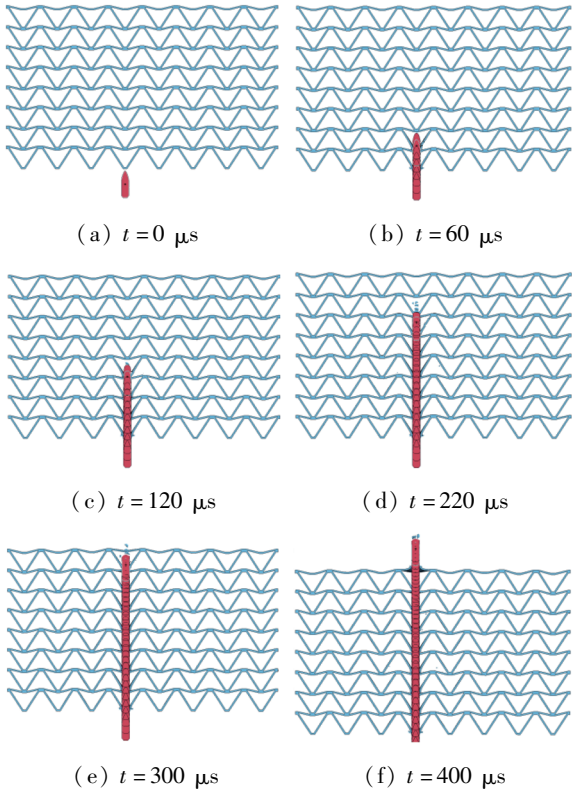
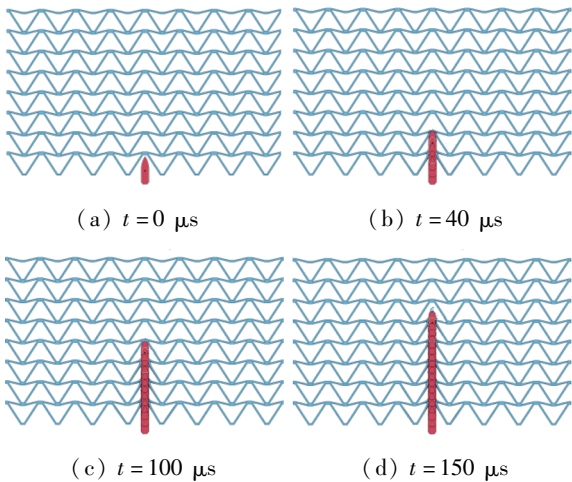


图9 顶边撞击时子弹侵彻过程截面示意

Fig.9 Cross-sectional schematic diagram of the penetration process of the bullet during the top side impact

图10给出0~300 μs时子弹铰点撞击双箭头NPR结构时的运动轨迹,弹体贯穿该结构。可见,NPR结构的塑性变形和破坏仅局限在弹丸路径范围内的胞元连接处。



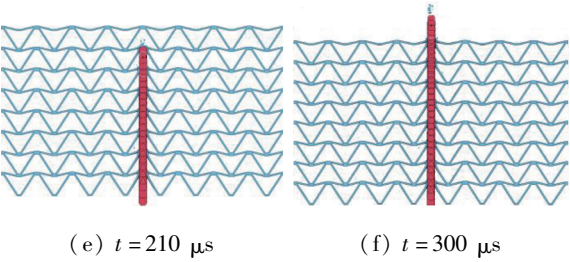


图 10 铰点撞击时子弹侵彻过程截面示意
Fig.10 Cross-sectional schematic diagram of the penetration process of the bullet during the hinge impact

在顶边撞击与铰点撞击时,子弹破坏 8 个胞元,穿透 8 层。在侵彻过程中,子弹攻角几乎不发生改变,可认为其贯穿通道为一圆柱。双箭头 NPR 结构在贯穿通道上的一列胞元顶边与底边全部被破坏,贯穿通道为一圆柱体。

图 11 展示 0 ~ 500 μs 时子弹侧边撞击双箭头 NPR 结构的运动状态,子弹共计破坏 10 个胞元,穿透 7 层。在侧边撞击过程中,子弹攻角增加明显,其运动轨迹发生明显偏转。

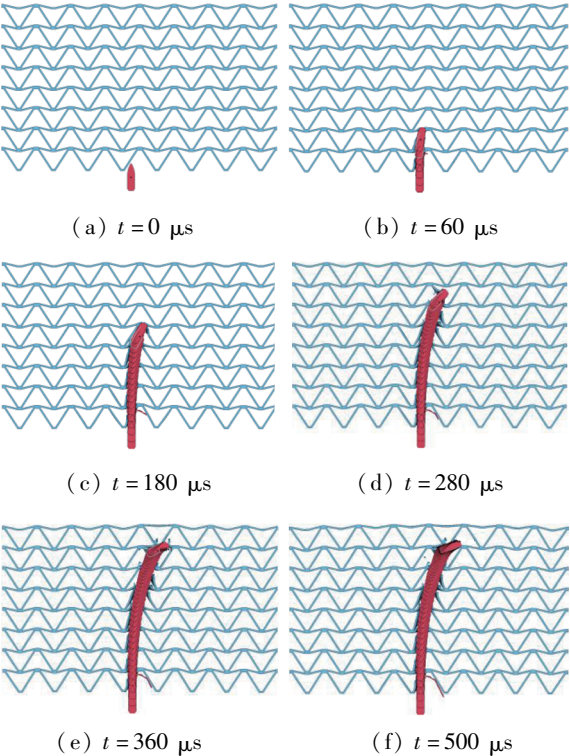


图 11 侧边撞击时子弹侵彻过程截面示意
Fig.11 Cross-sectional schematic diagram of the penetration process of the bullet during side impact

胞元损伤孔径关系如图 12 所示,由图可知:顶边撞击时,损伤孔径略大于弹丸直径,除开始子弹处于高速侵彻扩孔阶段造成的孔径波动外,随着弹丸头部逐渐钝化逐渐稳定至 9.6 mm。铰点撞击时,孔径变化规律与顶边撞击类似,均呈现先

小幅波动后稳定的趋势,但与之不同的是损伤孔径较顶边撞击较小,为 8.3 mm。侧边撞击时,子弹弹道穿过的双箭头 NPR 结构胞元整体破坏严重,穿孔孔径大于弹丸直径,胞元壁产生撕裂破坏现象。弹丸对双箭头 NPR 结构的攻角越大,结构通孔的横截面积也越大,由于子弹自身的偏转导致损伤孔径呈周期性变化,最大孔径为 20.7 mm。侧边撞击时的胞元损伤孔径是顶边撞击时的 2.16 倍,是铰点撞击时的 2.49 倍。

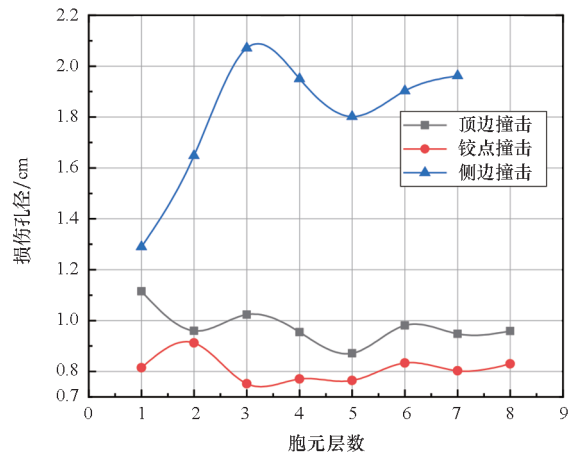


图 12 胞元损伤孔径关系
Fig.12 Cell damage aperture relationship

2.2 结构负泊松比效应体现

子弹顶边撞击时,双箭头 NPR 结构的测试点位移-时间关系如图 13 所示。1 ~ 5 号测试点沿 X 轴正方向存在最大约 0.02 mm 的微小位移,说明此时结构有微弱的负泊松比效应体现。而 6 ~ 8 号测试点沿 X 轴负方向存在微小位移,该负方向位移是由结构受到子弹冲击时作用在内部的扰动波所致。由于整体结构沿 X 轴正方向的位移很小,此时可认为整个结构未发生负泊松比效应。

子弹铰点撞击时,双箭头 NPR 结构的测试点位移-时间关系如图 14 所示。1 ~ 7 号测试点沿 X 轴正方向存在最大约 0.17 mm 的微小位移,是顶边撞击时测试点位移的 8 倍,说明此时结构整体有微弱的负泊松比效应体现。

子弹侧边撞击时,双箭头 NPR 结构的测试点位移-时间关系如图 15 所示。1 ~ 8 号测试点在 0 ~ 400 μs 时沿 X 轴正方向存在最大约 0.5 mm 的位移,此时结构出现了负泊松比效应。在 400 μs 时刻之后到子弹运动停止之前,8 个测点又沿 X 轴负方向发生位移。表明这种负泊松比效应随着时间的推移逐渐消失,这是由于结构整体变形还未到达材料的塑性变形阶段,材料自身发生弹性形变恢复,但由于该负泊松比效应产生

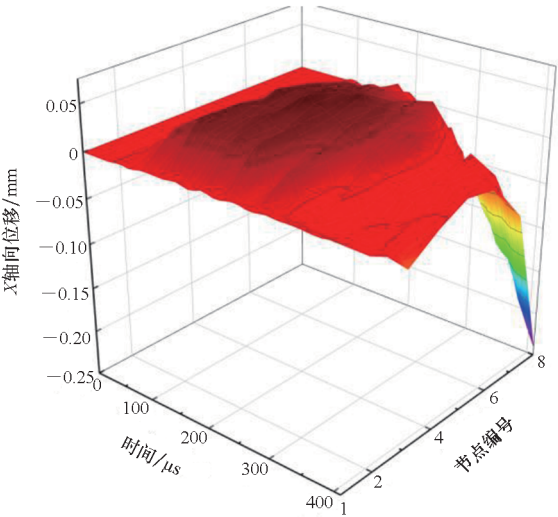


图 13 顶边撞击节点位移-时间图

Fig. 13 Displacement-time diagram of the top edge impact node

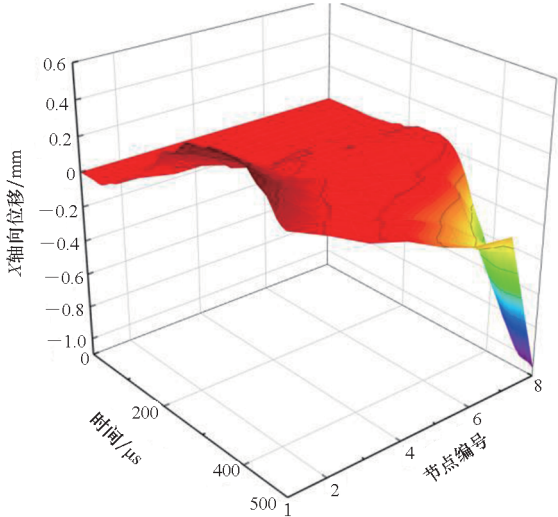


图 15 侧边撞击节点位移-时间图

Fig. 15 Displacement-time diagram of the side impact node

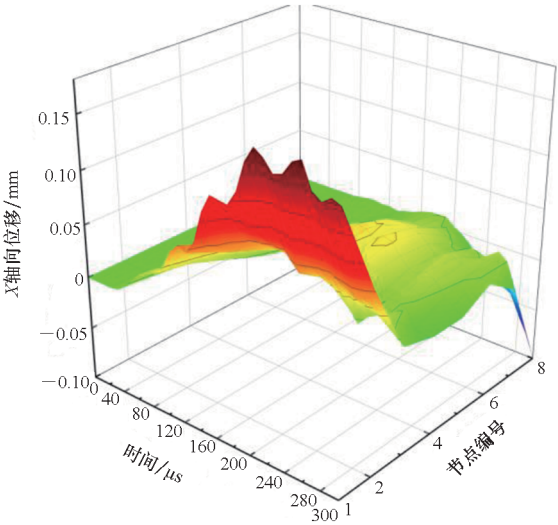


图 14 铰点撞击节点位移-时间图

Fig. 14 Displacement-time diagram of the hinge impact node

的位移(毫米量级)与胞元自身尺寸(厘米量级)相比过小,可认为此时整个结构未发生明显的负泊松比效应。

综上可以得出,双箭头 NPR 结构无论受到子弹何种形式的高速撞击,其负泊松比效应并不显著。

2.3 胞元结构破坏形式

图 16 与图 17 分别显示了在 4 个典型时刻,子弹及胞元结构失效状态的 Mises 应力云图。其中子弹在侵彻过程中头部发生变形,从 $t = 100 \mu\text{s}$ 时刻开始,尖卵形头部逐渐呈现为蘑菇头形状,且子弹头部被镦粗。随着子弹头部由尖卵形转变为

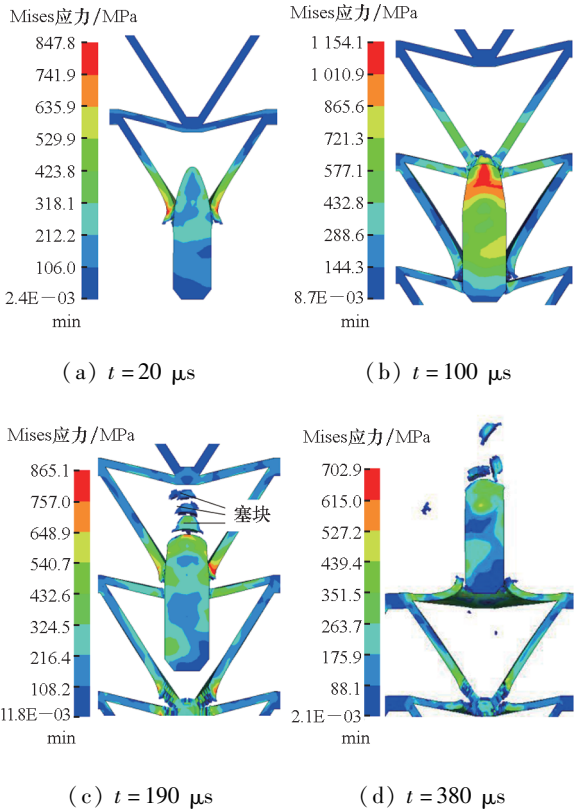


图 16 顶边撞击时胞元失效形式

Fig. 16 Cells and cell failure forms of the top edge impact 钝头形,胞元壁的破坏形式从花瓣型破坏转变为冲塞破坏。

在花瓣型的失效模式中,胞元在弹头的冲击下发生了凸起和盘形凹陷的塑性变形,此时弹丸头部已经开始发生变形。凸起顶点处的拉伸应力超过胞元材料的拉伸强度,该部位就出现了向四周扩展的星形裂纹,子弹继续向前运动,裂纹迅速向四周扩展变大构成了花瓣的雏形。弹体挤压周

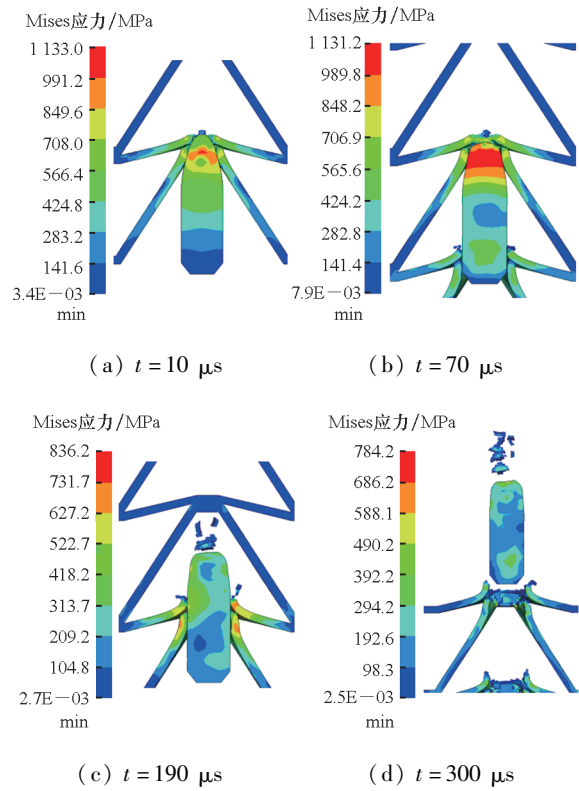


图 17 铰点撞击时胞元失效形式

Fig. 17 Cells and cell failure forms of the hinge impact

围胞元材料,胞元壁裂缝向花瓣的根部扩展,最终产生花瓣型失效。

顶边撞击时,侵彻过程中子弹头部逐渐变钝,当头部挤压胞元壁时,它和胞元壁接触的环形截面上产生很大的剪切应力。在撞击区造成了胞元材料的剪切形变,形成绝热剪切带,以致使被撞击的胞元发生剪切失效,胞元冲塞失效产生,如图 16 所示。塞块的大小随着子弹速度的降低和其头部钝度的增加而增大,当子弹速度进入一个较低水平时(小于 400 m/s),在子弹撞击胞元的部位,胞壁发生了明显的结构响应,如 $t = 380\ \mu\text{s}$ 时刻。观察到在撞击区的周边胞壁材料中存在较大的拉伸变形,直至使胞壁产生撕裂失效。其失效面的切向与子弹轴线约为 45° 角。顶边撞击时子弹最终以 365.1 m/s 的速度从双箭头 NPR 结构中穿出。

铰点撞击时,子弹头部变形规律、胞元破坏形式与顶边撞击时相似,在此不再赘述。但由于子弹撞击位置处于相邻胞元间连接铰处,此时结构无法将冲击力直接传递到下一层胞元。导致铰点撞击时子弹所受侵彻阻力小于顶边撞击时的侵彻阻力,子弹最终以 487.3 m/s 的速度从双箭头 NPR 结构中穿出,子弹末速度大小是顶边撞击时的 1.33 倍。

图 18 显示了在 4 个典型时刻子弹自身偏转及胞元结构失效的状态,其中子弹在侵彻过程中头部发生变形。不同于顶边撞击,从 $t = 40\ \mu\text{s}$ 时刻开始,进行侧边撞击的尖卵形头部逐渐近似为半球形状。随着子弹头部由尖卵形变为半球形,胞元壁的破坏形式从非对称花瓣型破坏转变为以拉伸撕裂失效为主, $t = 140\ \mu\text{s}$ 时刻,子弹偏转角度大于胞元角 θ ,NPR 结构局部开始出现撕裂现象的破坏。同时伴随结构整体的拉伸薄膜变形,胞元壁上开始出现一个两边平行且细长的撕裂带并外翻形成塑性铰^[15]。

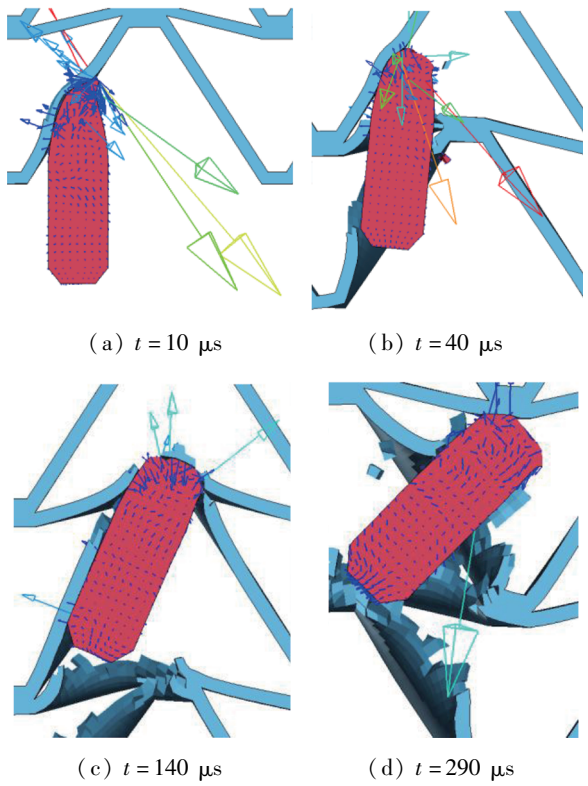


图 18 侧边撞击时子弹受力与变形

Fig. 18 Force and deformation diagram of bullet

2.4 子弹速度衰减规律

由图 19 子弹速度曲线变化规律可以得出:子弹偏转角度小于胞元角之前,顶边撞击与侧边撞击时子弹受到的侵彻阻力大小差距不明显,吸能差距较小;子弹偏转角度大于胞元角后,双箭头 NPR 结构整体抗侵彻能力随着子弹翻滚角度的增加而逐渐变大。 $t = 290\ \mu\text{s}$ 时刻子弹与胞元顶边完全接触碰撞,此时子弹受到的侵彻阻力最大,使其速度短时间内下降,最终导致子弹无法贯穿 NPR 多胞结构。

从图 20 结构吸能曲线可知:顶边撞击时双箭头 NPR 结构最终吸能量 13 700 N·cm,铰点撞击时该结构最终吸能量 11 600 N·cm,侧边撞击时

该结构最终吸能量 21 500 N·cm。侧边撞击时双箭头 NPR 多胞结构较顶边撞击时多吸收 56.9% 的能量,与铰点撞击时相比多吸收 85.3% 的能量。

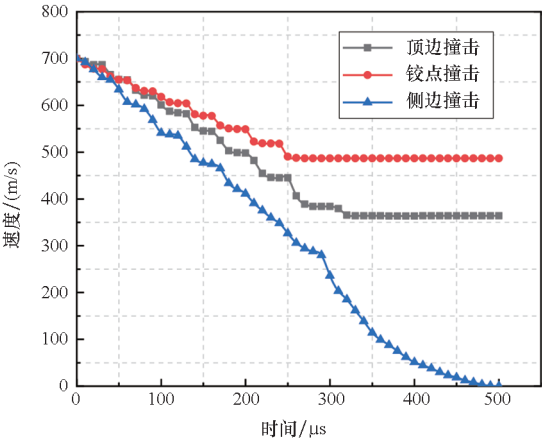


图 19 不同工况子弹的速度 - 时间曲线
Fig. 19 Velocity-time curves of bullets under different working conditions

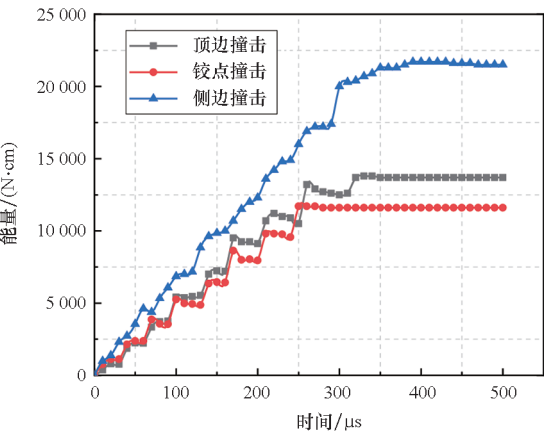


图 20 不同工况 NPR 结构吸能曲线
Fig. 20 NPR structure energy absorption curve under different working conditions

2.5 子弹入射角度对侵彻效果的影响

将子弹与胞元特征尺寸对比可知,NPR 胞元壁厚远小于子弹($b/d\ll 1$),单胞长度略小于子弹长度($H/L\approx 1$)。且 NPR 结构和子弹材料均为金属,所以可将子弹撞击双箭头 NPR 结构的物理过程看作子弹侵彻金属薄板问题。子弹对双箭头 NPR 结构的贯穿通常受到胞元的局部效应和胞元结构响应影响^[16-17],此外,子弹入射角度 φ 的不同也会对撞击效果造成影响。

在顶边撞击模型的基础上,以 10° 为增量,将入射角 φ 从 10° 增大到 80° ,如图 21 及表 4 所示,建立 8 个不同入射角度的子弹撞击双箭头 NPR 结构模型。

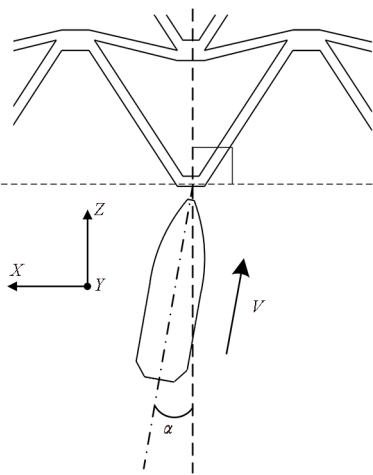
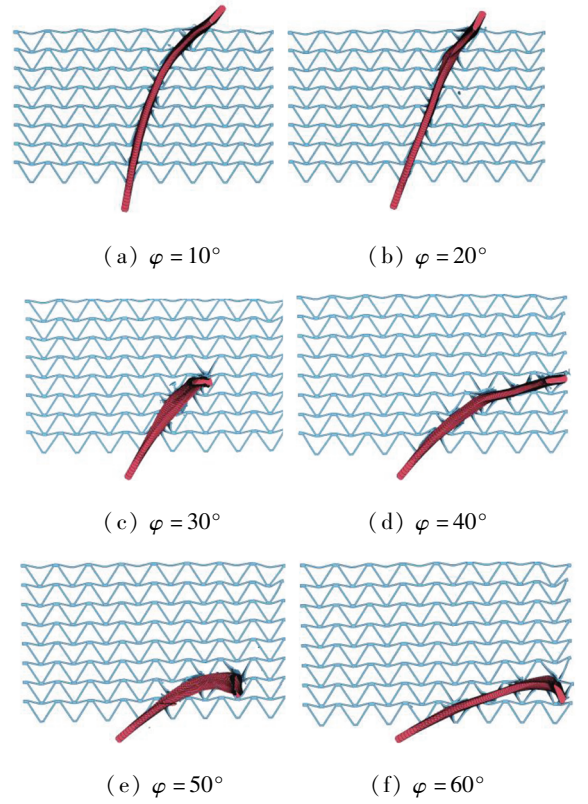


图 21 子弹入射角示意
Fig. 21 Schematic diagram of bullet incidence angle

表 4 模型入射角参数								
Tab. 4 Incident angle parameters of model								
模型编号	1	2	3	4	5	6	7	8
入射角度/($^\circ$)	10	20	30	40	50	60	70	80

最终 8 个模型顶边撞击时子弹以不同角度撞击双箭头 NPR 结构的运动轨迹如图 22 所示。

由图 22 的子弹运动轨迹可以得出:在顶边撞击时,对于不同入射角 φ ,子弹有着不一样的侵彻路径,且子弹无一例外都发生了不同程度的偏转。通过对比子弹贯穿路径发现,随着入射角增大,



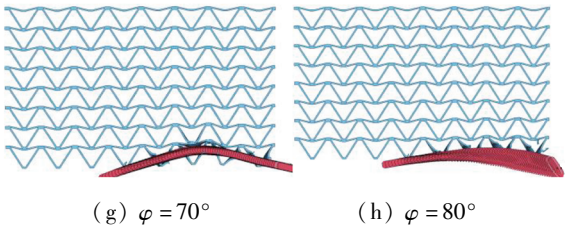


图 22 不同入射角时的子弹运动轨迹

Fig. 22 Bullet trajectory at different incident angles

子弹轨迹偏移程度出现先增大后减小的趋势。对于该双箭头 NPR 多胞结构,在 $\varphi = 60^\circ$ 时该入射角可以使子弹运动轨迹偏移最大至 90° 。

不同入射角时子弹的速度 - 时间曲线如图 23 所示。从曲线中可以得出:顶边撞击时,子弹速度衰减趋势的变化和入射角的改变之间并不是简单的线性关系。对于该双箭头 NPR 多胞结构,在 $\varphi = 30^\circ$ 时该入射角可以使子弹速度衰减最为剧烈。

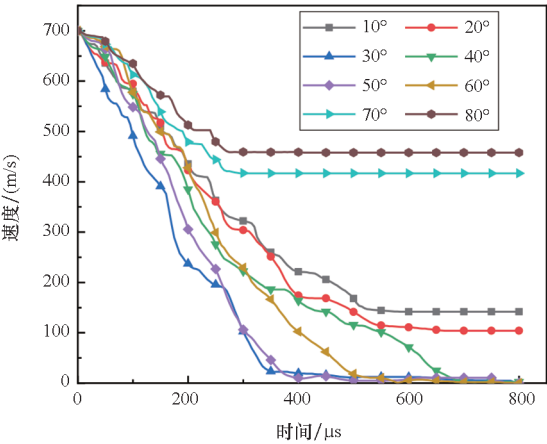


图 23 不同入射角时子弹的速度 - 时间曲线

Fig. 23 Velocity-time curve of bullets at different incident angles

3 结论

本文通过数值仿真方法研究了在子弹特征尺寸与胞元处于同一数量级时,子弹撞击 NPR 多胞结构位置的不同,双箭头 NPR 多胞结构抗子弹侵彻性能的影响,主要结论如下:

- 1) 面对子弹高速撞击时,双箭头 NPR 多胞结构的负泊松比效应不显著,这是因为子弹撞击结构时产生的应力波波速远大于子弹的侵彻速度,胞元结构尚未来得及变形而局部材料已经失效。虽然双箭头 NPR 多胞结构此时也会产生膜响应等结构响应,但其变形远不足以耗散子弹冲击带来的能量,其压阻效应无法体现。
- 2) 顶边撞击与铰点撞击时子弹直接贯穿结

构,胞元破坏较小,双箭头 NPR 多胞结构破坏形式从花瓣型破坏转变为冲塞破坏;侧边撞击时子弹未击穿多胞结构,胞元破坏较为严重,此时结构破坏形式从非对称花瓣型破坏转变为以拉伸撕裂失效为主,且结构胞元壁的损伤随着弹丸翻滚而增大。

3) 子弹侧边撞击双箭头 NPR 多胞结构时,胞元依靠其双三角形结构使弹丸受多次不对称力的作用,产生一个变化的翻转力矩。该力矩使子弹偏转翻滚,显著增大了侵彻过程中的阻力,与顶边撞击对比可多吸收 56.9% 的能量;与铰点撞击时相比多吸收 85.3% 的能量。

4) 顶边撞击时双箭头 NPR 多胞结构面对具有入射角度的子弹,依靠其双三角形结构可以使子弹运动轨迹发生偏转并使其速度衰减。此时存在两个特殊入射角度: $\varphi = 60^\circ$ 与 $\varphi = 30^\circ$,前者使子弹轨迹发生最大偏移,后者使子弹速度衰减最为剧烈。此时结构表现出一定的抗侵彻能力。

参考文献 (References)

[1] WEI Y L, YANG Q S, LIU X, et al. A novel 3D anti-tetrachiral structure with negative Poisson's ratio [J]. Smart Materials and Structures, 2020, 29(8): 085003.

[2] ZHAO C F, ZHOU Z T, LIU X X, et al. The in-plane stretching and compression mechanics of negative Poisson's ratio structures: concave hexagon, star shape, and their combination [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021, 859: 157840.

[3] 高松林. 星形负泊松比结构抗冲击性能研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2019.

GAO S L. Study on shock resistance of star negative Poisson ratio structure [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2019. (in Chinese)

[4] 杨德庆, 吴秉鸿, 张相闻. 星型负泊松比超材料防护结构抗爆抗冲击性能研究 [J]. 爆炸与冲击, 2019, 39(6): 124 - 135.

YANG D Q, WU B H, ZHANG X W. Anti-explosion and shock resistance performance of sandwich defensive structure with star-shaped auxetic material core [J]. Explosion and Shock Waves, 2019, 39(6): 124 - 135. (in Chinese)

[5] QI C, YANG S, WANG D, et al. Ballistic resistance of honeycomb sandwich panels under in-plane high-velocity impact [J]. The Scientific World Journal, 2013: 892781.

[6] JIN X C, WANG Z H, NING J G, et al. Dynamic response of sandwich structures with graded auxetic honeycomb cores under blast loading [J]. Composites Part B: Engineering, 2016, 106: 206 - 217.

[7] 马芳武, 梁鸿宇, 赵颖, 等. 倾斜荷载下内凹三角形负泊松比材料的面内冲击动力学性能 [J]. 振动与冲击, 2020, 39(4): 81 - 87.

MA F W, LIANG H Y, ZHAO Y, et al. In-plane dynamic crushing of concave triangles materials with negative Poisson's ratio under inclined load [J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(4): 81 - 87. (in Chinese)

[8] 沈振峰, 张新春, 白江畔, 等. 负泊松比内凹环形蜂窝结构的冲击响应特性研究 [J]. 振动与冲击, 2020, 39(18): 89–95, 117.
SHEN Z F, ZHANG X C, BAI J P, et al. Dynamic response characteristics of re-entrant circular honeycombs with negative Poisson's ratio [J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(18): 89–95, 117. (in Chinese)

[9] 马芳武, 梁鸿宇, 王强, 等. 双材料负泊松比结构的面内冲击动力学性能 [J]. 吉林大学学报(工学版), 2021, 51(1): 114–121.
MA F W, LIANG H Y, WANG Q, et al. In-plane dynamic crushing of dual-material structure with negative Poisson's ratio [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2021, 51(1): 114–121. (in Chinese)

[10] 蒋欣程. 双箭头蜂窝夹层式军车装甲的防弹分析与优化 [D]. 大连: 大连理工大学, 2016.
JIANG X C. Analysis and optimization of the ballistic resistance performance of the double arrowhead sandwich military vehicle armor [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016. (in Chinese)

[11] GOLDSMITH W, TAM E, TOMER D. Yawing impact on thin plates by blunt projectiles [J]. International Journal of Impact Engineering, 1995, 16(3): 479–498.

[12] MEYERS M A. Dynamic behavior of materials [M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1994.

[13] 辛春亮, 朱星宇, 薛再清. 有限元分析常用材料参数手册 [M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2022.
XIN C L, ZHU X Y, XUE Z Q. Handbook of common material parameters for finite element analysis [M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2022. (in Chinese)

[14] DURMUŞ A, GÜDEN M, GÜLÇİMEN B, et al. Experimental investigations on the ballistic impact performances of cold rolled sheet metals [J]. Materials & Design, 2011, 32(3): 1356–1366.

[15] 郭子涛, 郭钊, 张伟. 弹体斜撞击单层金属薄靶的数值仿真 [J]. 高压物理学报, 2018, 32(4): 116–126.
GUO Z T, GUO Z, ZHANG W. Numerical study of the oblique perforation of single thin metallic plates [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2018, 32(4): 116–126. (in Chinese)

[16] 陈小伟. 穿甲/侵彻力学的理论建模与分析: 上册 [M]. 北京: 科学出版社, 2019.
CHEN X W. Modelling on the perforation and penetration I [M]. Beijing: Science Press, 2019. (in Chinese)

[17] 黄岐, 周彤, 白洋, 等. 弹丸变攻角侵彻间隔靶弹道极限研究 [J]. 兵工学报, 2016, 37(增刊 2): 251–257.
HUANG Q, ZHOU T, BAI Y, et al. Ballistic performance of projectile penetrating large-spaced multi-layer plates at variable angle-of-attack [J]. Acta Armamentarii, 2016, 37(Suppl 2): 251–257. (in Chinese)