

超高速撞击下瓦楞型 Whipple 防护结构 参数优化*

郭家傲¹, 杨秋足^{1*}, 刘小川², 尹云飞¹, 李志强^{1,3,4,5}

(1. 太原理工大学航空航天学院, 山西 太原 030024;

2. 中国飞机强度研究所, 陕西 西安 710065;

3. 太原理工大学材料强度与结构冲击山西省重点实验室, 山西 太原 030024;

4. 太原理工大学山西省力学基础学科研究中心, 山西 太原 030024;

5. 太原理工大学国家力学实验教学示范中心, 山西 太原 030024)

摘要: 瓦楞型 Whipple 防护结构的几何构型是影响其防护性能的重要因素, 为优化瓦楞型 Whipple 防护结构在超高速撞击下的防护性能, 提出了一种结合有限元-光滑粒子流体动力学 (FEM-SPH) 耦合算法与正交试验设计的综合优化方法。通过构建可靠的数值仿真模型, 引入 Z 轴动量密度作为防护性能评价指标, 系统研究瓦楞厚度、跨度与角度 3 个因素对防护效果的影响。正交试验结果表明, 各因素影响程度依次为厚度>角度>跨度。进一步开展了双因素加密实验, 并建立了二次多项式模型, 获取了最优的几何参数组合, 其防护性能较平板提升了 33.72%。研究证实, 优化后的瓦楞构型 Whipple 防护结构能够有效促进弹丸破碎与碎片云扩散, 实现动量三维重分布, 从而显著提升结构防护性能, 为航天器防护设计提供理论依据与参数优化路径。

关键词: Whipple 防护; 超高速碰撞; FEM-SPH 耦合算法; 正交试验

中图分类号: o347;V423.4

文献标识码: A

随着人类航天活动的持续开展, 低地球轨道 (Low Earth Orbit, LEO) 上的人造卫星正在急剧增加^[1], LEO 空间碎片数量也随之增多, 空间碎片与微流星体对在轨航天器的撞击威胁日益严峻, 已成为航天工程领域关注的焦点。由于撞击速度极高, 毫米级碎片亦携带巨大动能, 因而航天器的防护设计至关重要。

目前, 应对空间碎片的技术路径主要分为主动清理 (如绳网^[2-4]、空间飞矛捕获^[5]和激光推移离轨^[6]) 与被动防护两类。考虑到空间碎片数量庞大、清理成本高昂, 对在轨航天器而言, 发展高效可靠的被动防护系统仍是不可或缺的关键环节。Fred Whipple 在 1947 年提出了分层防护概念^[7]。经典的 Whipple 防护罩由前缓冲屏与后舱壁构成, 其间预留一定间距。其防护核心在于前板使撞击体破碎、熔融或汽化, 形成一团低速膨胀的碎片云, 使撞击能量在抵达后板前得以显著衰减和分散, 从而保护后方主体结构。为不断提升 Whipple 防护结构及其改进形式的效能, 学术界长期致力于从结构与材料应用两方面进行优化, 例如增加内部子层以多次破碎碎片云^[8-13]、选用新型高性能防护材料^[11, 14-21]以及调整缓冲屏与舱壁的间距^[10, 11, 14]等。

已有大量研究致力于提升 Whipple 防护结构的性能。Rakib 等人^[22]系统梳理了航天器和空间站免受微流星体及轨道碎片超高速撞击的防护系统的类型与结构, 讨论了评估防护性能所需的实验测试

*收稿日期: 2025-12-09; 修回日期: 2026-01-30

基金项目: 国家自然科学基金 (1227021021); 山西省自然科学基金 (202203021212292)

作者简介: 郭家傲 (2002—), 女, 硕士研究生, 主要从事冲击动力学研究. E-mail: jiaaoguo2023@163.com

通讯作者: 杨秋足 (1991—), 男, 博士, 讲师, 主要从事计算力学与冲击动力学研究. E-mail: yangqz@tyut.edu.cn

和数值模拟；Wen等人^[23]则聚焦于Whipple防护结构及其改进构型用于防御空间碎片超高速撞击的研究进展，讨论了Whipple结构在超高速撞击下的多阶段响应机理；Ren等人^[24]在研究中重点介绍了三种基本防护结构，研究发现多层缓冲防护结构（Multi-bumper shield）和填充式Whipple防护结构（Stuffed Whipple shield）的防护性能优于传统Whipple防护结构，尤其在面对厘米级空间碎片超高速撞击时表现出更高的防护效能。这些研究充分表明，通过材料与结构创新以提升能量耗散效率是防护设计的关键路径。然而，现有研究多集中于材料改进或多层复合设计，对缓冲板本身几何构型的创新探索仍相对有限。Maclay等人^[25]提出的肋条型缓冲屏通过在平板表面构造离散凸起肋条，形成多点冲击以增强冲击波叠加效应。Silnikov等人^[26]研究的针状结构则通过密集排列的针体与弹体发生多次离散碰撞，实现能量的三维空间分散。但是肋条形、针状结构在超高速撞击下易因应力集中而发生早期失效，且结构完整性较差。而Asim Onder^[27]提出的波纹板构型采用连续曲面设计，通过调控应力波传播路径影响碎片云演化，具备良好的结构连续性，但其曲面构型对碎片云的空间分布调控能力有限，未能充分利用三维几何的动量再分布潜能。

瓦楞构型对超高速撞击过程中碎片云演化与能量吸收的调控机制十分复杂，对数值模拟方法的精确性与适应性提出了极高要求。在超高速碰撞领域，常用的方法有纯拉格朗日有限元法（Finite Element Method, FEM）、纯欧拉法与纯光滑粒子流体动力学法（Smooth Particle Hydrodynamics, SPH）。其中，有限元方法在处理结构响应和弹性变形时效率极高，但在模拟碎片云形成这类极大变形问题时，网格会发生严重畸变；光滑粒子流体动力学法作为一种无网格方法，天然适用于模拟材料破碎、飞散等过程，但仍存在物理边界施加困难以及物质边界不明确等问题，导致不能直接获得碎片云中的碎片；欧拉法则在界面追踪上存在困难，固定的网格无法自然地描述运动的、不断演化的材料边界。单一的数值方法难以精准复现超高速碰撞的全过程。目前，拉格朗日有限元法-光滑粒子流体动力学法（Finite Element Method-Smooth Particle Hydrodynamics, FEM-SPH）自适应耦合算法的优势在于其结合了有限元法（FEM）在计算效率和小变形区域精度上的优势，与光滑粒子流体动力学法（SPH）在模拟材料大变形、断裂和碎片化问题上的能力，被广泛应用于弹体侵彻、爆炸与冲击、流固耦合及航空航天领域的空间碎片防护等强动力学问题中。Dou^[28]采用FEM-SPH自适应耦合算法系统地模拟了钨重合金（WHA）碎片穿透99.5%氧化铝（AD995）装甲的一系列实验。Yang等人^[29]采用平滑粒子流体力学耦合有限元（SPH-FEM）方法研究水波诱导结构的动力特性。赵微等人^[30]采用FEM-SPH自适应耦合方法，对水滴超高速撞击Whipple防护结构的毁伤特性进行了数值模拟与实验验证，获得了穿孔经验公式及临界穿透速度。杨玉好等人^[31]基于FEM-SPH自适应耦合算法，对动能块超高速碰撞多层防护结构的毁伤特性进行了数值模拟，揭示了穿孔直径随动能块质量与速度的幂函数增长规律及碎片云速度的线性变化关系。He等人^[32]利用FEM-SPH自适应方法研究了超高速冲击下的碎片云分布特征，结合动量空间分析建立了用于定义危险碎片等级的定量阈值参数。

在此基础上，本文提出一种具有连续周期性瓦楞构型的新型缓冲板设计作为Whipple防护结构的前置缓冲板。该设计旨在结合离散结构的多点冲击优势与连续结构的完整性优势。其核心机理在于利用瓦楞特有的几何轮廓引导和分散撞击能量。这不仅促使弹体发生更充分的破碎，还能更有效地将碎片云的轴向（Z向）动量转化为径向分量，从而实现动量的三维空间重分布，显著降低对方舱壁的局部冲击威胁。瓦楞的几何构型与其防护性能密切关联，因此，对其进行参数化设计与优化是提升防护效能的必经之路。

为系统揭示瓦楞构型几何参数（如瓦楞厚度、跨度与角度）对防护性能的影响，本文将FEM-SPH自适应耦合数值仿真与正交试验设计相结合的研究方法，并引入Z轴动量密度（ ρ_{pz} ）作为量化评估防护性能的新指标，以此构建从几何设计到性能优化的完整研究框架。旨在建立几何参数与防护性能之间的量化关系，优化出最佳构型参数组合，为航天器防护结构的创新设计提供理论依据和新思路。

1 瓦楞型 Whipple 结构超高速撞击数值仿真

1.1 材料模型

为精准模拟超高速撞击下瓦楞结构的碎片云演化及能量吸收过程，本研究运用FEM-SPH耦合算法。该算法结合了有限元法（FEM）在结构弹性变形计算中的高效性和光滑粒子流体动力学（SPH）在大变形和材料破碎问题中的优势，适用于高速冲击等强非线性问题。耦合机制通过单元失效转换实现：当有限元单元等效塑性应变超过临界阈值（ $\varepsilon = 0.15$ ）时，自动将其转换为SPH粒子，从而有效避免网格畸变问题，保证计算稳定性。

材料本构模型采用Johnson-Cook强度模型与Grüneisen状态方程联合描述。Johnson-Cook模型用于描述材料的应变率强化效应及热软化行为，其表达式为^[33]：

$$Y = (A + B\varepsilon_p^n)(1 + C \ln \dot{\varepsilon}^*)(1 - T^{*m}) \quad (1)$$

式中： A 为静态屈服极限； B 为应变硬化模量； n 为应变硬化指数； C 为应变速率系数； m 为温度软化系数； ε_p 为有效塑性应变； $\dot{\varepsilon}^*$ 为无量纲的有效塑性应变速率（ $\dot{\varepsilon}^* = \dot{\varepsilon}/\varepsilon_0$ ）； ε_0 为参考应变速率。同源温度 T^* 由公式(2)给出：

$$T^* = \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \quad (2)$$

式中： T_r 为室温； T_m 为熔融温度。Grüneisen 状态方程则能够精准描述高压状态下的体积响应，其方程形式为：

$$P - P_H = \rho\gamma(E - E_H) \quad (3)$$

式中： P_H 为沿固体Hugoniot曲线的压力； P 为受压缩固体材料所受压力； E_H 为沿固体Hugoniot曲线的内能； E 为受压缩固体材料的内能； ρ 为材料密度； γ 为Grüneisen系数。

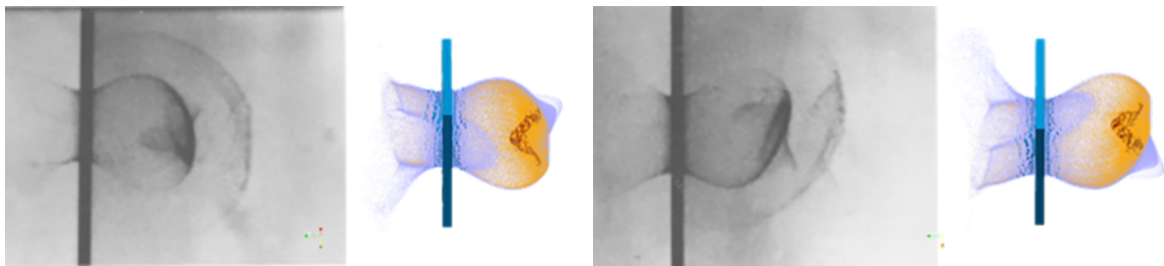
材料动态失效行为采用Johnson-Cook损伤准则与最大拉应力失效准则共同表述。Johnson-Cook失效模型基于累积损伤理论构建，其失效应变表达式为：

$$\varepsilon^f = \max(D_1 + D_2 e^{D_3 \sigma^*}) (1 + D_4 \ln \dot{\varepsilon}^*) (1 + D_5 T^*) \quad (4)$$

式中， D_1 至 D_5 均为材料常数； σ^* 为应力三轴度。当材料的等效塑性应变达到失效应变时，材料即发生失效。最大拉应力失效准则主要用于描述材料在拉伸状态下的断裂行为，一旦材料中的最大拉应力超出其抗拉强度，材料便发生断裂。这两种失效准则结合，能够全面描述材料在超高速撞击过程中的剪切失效与拉伸断裂等情形。

1.2 仿真模型

为验证建立的FEM-SPH耦合数值模型的可信性，本研究设计基准工况，开展超高速撞击对比实验。该实验参照Pickutowski的经典超高速撞击地面试验方案^[34]构建。实验具体参数如下：弹丸为直径与高度均为7.72 mm的2024-T4铝合金圆柱体，密度为2.79 g·cm⁻³，以6.39 km/s的速度以攻角24.3° 撞击厚度2.03 mm的6061-T6铝合金靶板（屈服强度为276 MPa）。在数值模拟中，弹靶系统采用六面体结构化网格进行离散，全局单元尺寸设置为0.1 mm，共生成约2.4×10⁶个单元。



(a)侧视图

(b)俯视图

图1 实验图像（左）的碎片云结构与FEM-SPH自适应耦合方法（右）的比较

Fig.1 A comparison of the debris cloud structure of the experimental image (left) with the FEM-SPH adaptive coupling method (right)

图1中左侧显示了实验结果^[34]，右侧展示了自适应方法的计算结果。选取6.5us时刻进行对比，在仿真结果中，红色部分表示撞击后未失效的弹丸材料，蓝色部分表示靶板材料。SPH粒子代表了已删除的失效单元，即黄色粒子对应弹丸材料，紫色粒子对应靶板材料。可以清晰地观察到前锥、内锥和外气泡三个主要结构，碎片云的前锥和内锥构成了其主体结构。

FEM-SPH自适应方法可以直观地获取碎片的形态和位置信息，在实验结果中，颜色深、粒子密度高的位置与自适应方法中代表碎片的单元位置相吻合。在撞击过程中，采用FEM-SPH自适应耦合算法获得的碎片云前锥头部轴向速度为5.77 km/s，与实验值（5.60 km/s）吻合良好，相对误差仅为3.04%。基于上述碎片云结构和碎片云头部速度的比较，FEM-SPH自适应方法能够复现超高速偏航撞击的工况，证实了该数值方法在此类复杂冲击问题中的可信性。

1.3 瓦楞型 Whipple 结构构型设计

受瓦楞纸板吸能机理的启发，本研究设计了一种新型瓦楞型Whipple防护结构（几何模型见图2）。为系统研究几何构型对能量耗散特性的影响，定义了三个关键参数：瓦楞厚度 H 、瓦楞跨度 λ 和瓦楞角度 θ 。以厚度2.1 mm的平板Whipple结构作为对照组，在保持等效面积密度的前提下（单位面积质量一致），通过图2(b)的方式对构型进行变化，形成如图所示瓦楞板，以此达到等效面密度的目的。对瓦楞构型进行参数化设计与优化，消除质量差异对防护性能评价的干扰。

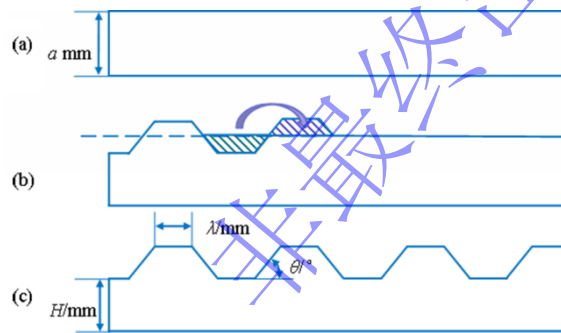


图2 瓦楞构型结构的几何形状以及几何参数

Fig.2 Geometric shape and geometrical parameters of corrugated structures

超高速撞击数值模型如图3所示。弹丸为直径5.0 mm的2017-T4铝合金球体，其规格符合NASA空间碎片防护设计标准^[35]，可准确表征典型毫米级轨道碎片的动力学特性。弹丸网格分辨率设置为0.1 mm^[36]。防护结构采用Al 6061-T6材料，依据几何参数（ H 、 λ 、 θ ）进行参数化建模，使用六面体单元进行离散，单元尺寸为0.1 mm^[36]。全局单元尺寸设置为0.1mm（对比单元尺寸0.3mm、0.2mm、0.1mm模拟结果，网格收敛性得到验证）。根据研究计划撞击速度取值4.6 km/s，进行正撞击。前期研究表明，正撞击瓦楞凹坑区域时结构的防护性能低于撞击瓦楞凸起区域，为确保评估的保守性，所有撞击试验均针对瓦楞板凹坑区域开展。

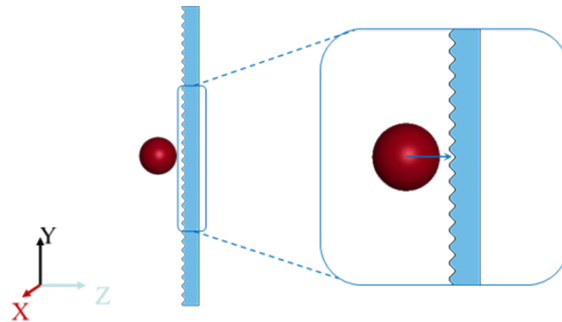


图3 弹丸撞击瓦楞构型防护结构的模型

Fig.3 Model of projectile impact on corrugated protective structure

图4显示了弹丸撞击 $H = 1.9\text{ mm}$ 、 $\lambda = 0.2\text{ mm}$ 、 $\theta = 55^\circ$ (瓦楞板1), $H = 1.4\text{ mm}$ 、 $\lambda = 1\text{ mm}$ 、 $\theta = 75^\circ$ (瓦楞板2)的构型瓦楞板与平板三者碎片云形貌。碎片云形态的对比分析表明, 平板结构产生的碎片云呈辐射状对称分布, 弹丸碎片(红色)高度集中于撞击中心, 沿径向呈分散状。弹丸撞击平板形成的靶板碎片(蓝色)则规则分布于外围, 形成单一集中点与清晰边界, 整体呈现出以弹丸碎片为核心、缓冲屏碎片为包裹层的明显分层结构。相比较, 瓦楞板结构的碎片云分布则更为复杂, 碎片云被瓦楞结构“引导”, 形态更偏向沿瓦楞方向的“定向膨胀”, 不再是对称球形。弹丸撞击瓦楞板1形成的碎片云正视图观察其前端呈现不规则凹陷, 且未呈现辐射状分布; 弹丸碎片以团簇的形式集中于正前方, 而缓冲屏碎片则沿瓦楞方向在X轴两侧形成两个对称的集中点, 导致两者碎片相互混杂、边界模糊, 并出现分散的小热点区域。板1形成的碎片云俯视图观察碎片云前端受瓦楞齿形影响, 形貌边缘呈现不规则凹陷, 碎片的分布更加紧凑。正视图观察弹丸撞击瓦楞板2形成的碎片云沿瓦楞的大角度定向膨胀, 膨胀范围大于瓦楞板1, 整体呈“蝶翼形发散”, 沿瓦楞倾斜方向展开; 边缘模糊且“舒展”, 径向膨胀较大; 弹丸残余碎片破碎不够彻底, 仍有大碎片分布, 靶板碎片集中于中轴线位置。俯视图观察弹丸撞击瓦楞板2形成的碎片云, 云团形态更狭长, 碎片云径向膨胀范围显著缩小, 大碎片聚集度更高, 几乎没有大范围的弥散小碎片。直接体现了瓦楞几何对撞击载荷与碎片运动的定向引导与调控作用, 导致了更为复杂的能量耗散与动量重分布过程。

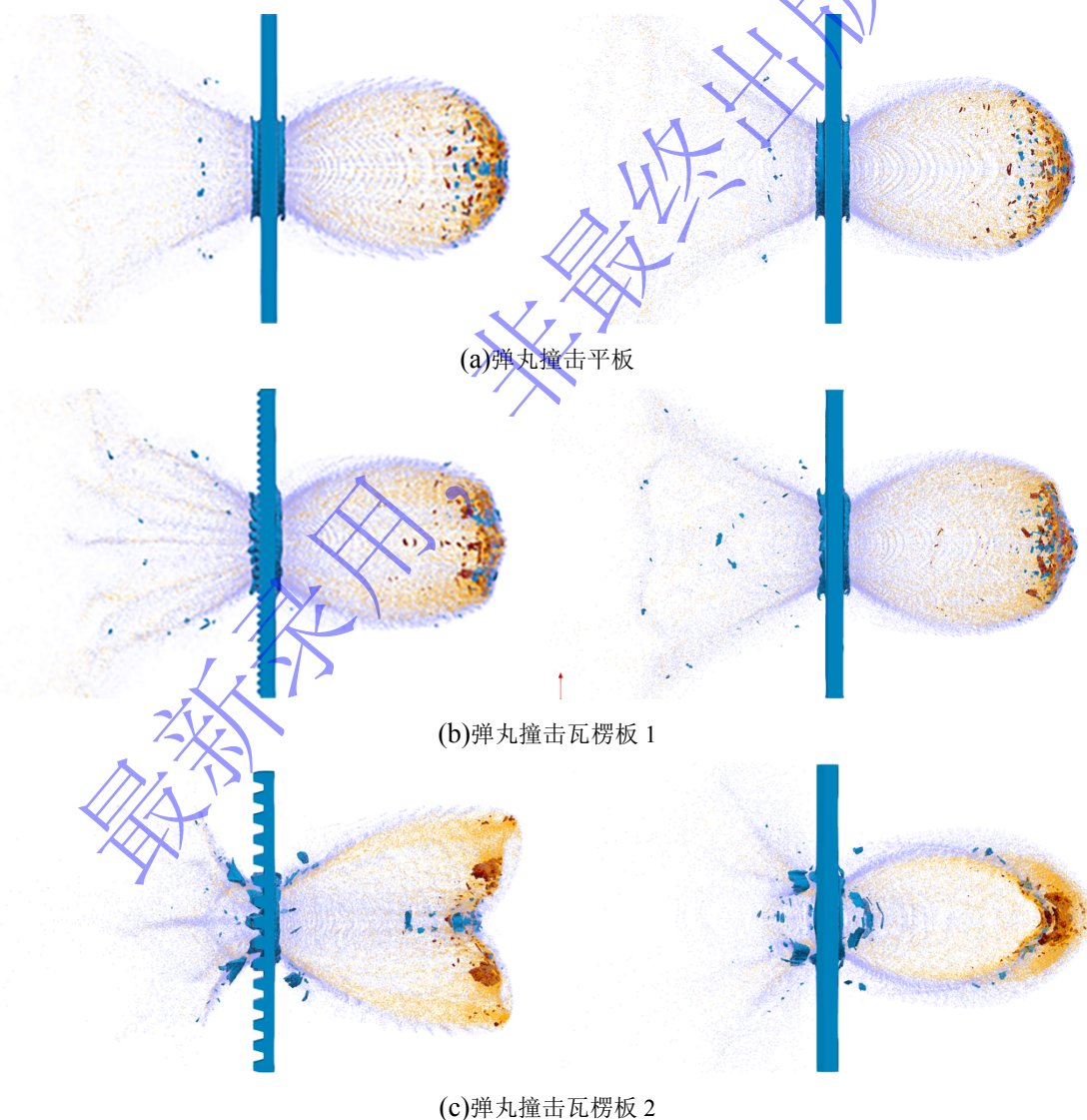


图4 $10\ \mu\text{s}$ 时弹丸撞击平板与瓦楞型防护结构形成的碎片云形貌 (左: 正视图; 右: 俯视图)

Fig.4 The morphologies of the debris cloud following the projectile impacting the flat plate and the corrugated protective structure at $10\ \mu\text{s}$ (Left: Front view; Right: Top view)

研究选用Z轴方向碎片投影的动量密度 (ρ_{pz}) 作为评价防护性能的关键指标, 如图 5, 其物理意义为单位面积上碎片云在法向 (Z轴) 的动量积聚量, 该指标直接反映了碎片云对后方舱壁的穿透威胁。其核心依据在于超高速撞击理论, ρ_{pz} 与防护效能存在显著的负相关关系。 ρ_{pz} 值越小, 表明碎片云对后方结构的局部冲击威胁越低, 防护性能越好。因此, 本次实验通过比较 ρ_{pz} 来量化瓦楞型 Whipple 防护结构的性能, 该值越低, 代表防护性能越优。 ρ_{pz} 通过以下方法获取: 在瓦楞型防护结构后方 100 mm 处设置虚拟背板^[37], 并将其离散为网格; 将数值模拟中处于稳定运动状态的碎片粒子按速度方向投影至背板, 按式(5)计算各网格单元的Z轴方向动量密度, 最终取全区最大值作为该工况的响应值。

$$I = \frac{\sum mv_z}{\Delta S} \quad (5)$$

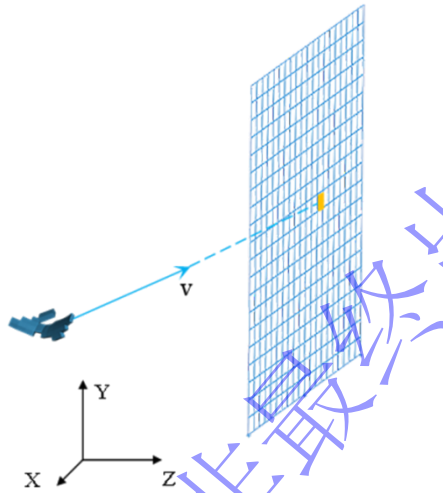
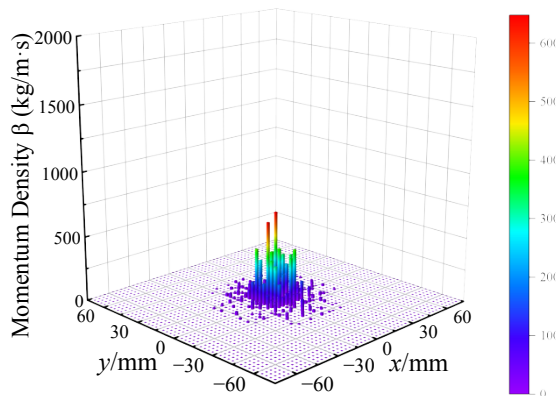


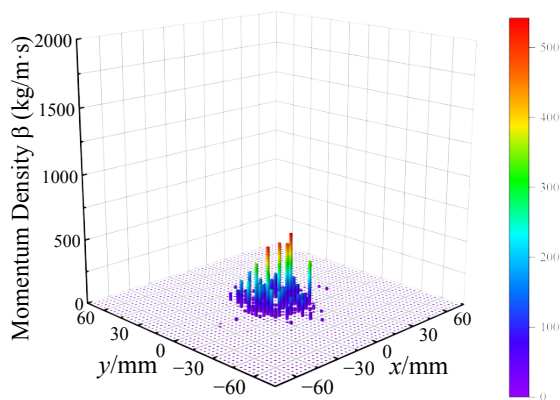
图 5 沿速度矢量投射到虚拟背面的危险碎片草图

Fig.5 Sketch drawing for hazardous debris projected onto the virtual backside along the velocity vector

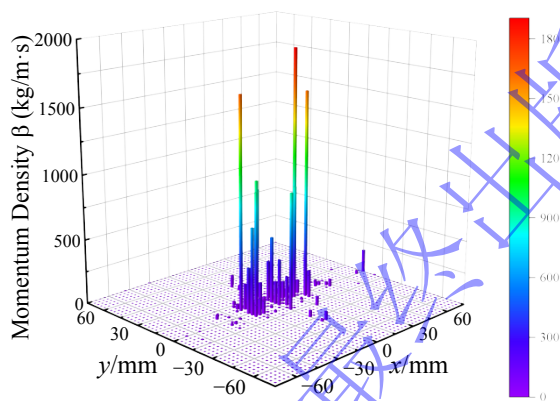
图 6 显示了三者前向碎片云沿Z轴的动量密度分布。平板防护结构形成碎片云的Z轴动量密度最大值为 $640.07 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$, 而撞击瓦楞板 1 形成碎片云的Z 轴动量密度最大值为 $542.27 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$, 撞击瓦楞板 2 形成碎片云的Z 轴动量密度最大值为 $1904.57 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ 。同时在分布上, 平板形成的碎片云Z轴动量密度的“峰值簇”集中在撞击中心附近, 峰值簇的空间分布较分散, 无明显定向性。撞击瓦楞板 1 形成的碎片云峰值簇的范围比平板靶更集中, 且数值较低, 峰值的“高度”更平缓, 无突出的高值点。撞击瓦楞板 2 形成的碎片云出现大量高动量密度的峰值, 且峰值最大值显著高于前两者, 空间分布沿X轴方向延伸。



(a) 弹丸撞击平板结果



(b) 弹丸撞击瓦楞板 1 结果



(c) 弹丸撞击瓦楞板 2 结果

图 6 10 μs 时平板与瓦楞板防护结构下碎片云 Z 轴动量分布对比

Fig.6 A comparison of the Z-axis momentum distribution of the debris cloud for the flat plate and corrugated plate protection structures at 10 μs

上述对比分析表明，与传统的平板Whipple防护结构相比，瓦楞板作为一种非平面防护结构，其防护性能与结构参数之间存在显著的辩证关系。研究表明，瓦楞板的几何参数并非单向地提升或削弱防护效能，而是重塑了撞击后碎片云的动量分布特征。这种防护性能分化的原因在于，瓦楞几何通过影响应力波的传播路径、诱导特定的结构变形，影响了能量在空间中的分配方式。

鉴于此，瓦楞构型的几何参数（如角度、厚度与跨度）是决定其防护效能的关键。不同的参数组合通过影响弹丸的破碎程度与碎片云的扩散特性，直接决定了最终的防护性能。本研究拟通过数值模拟与理论分析相结合的方法，构建构型参数与防护性能间的量化关系，以期确定瓦楞型Whipple防护结构的最优参数配置。

2 正交试验与瓦楞型 Whipple 防护结构参数优化方法

2.1 正交试验

2.1.1 正交试验设计

正交试验设计是一种基于正交表的高效多因素试验方法，能以较少的试验次数系统分析各因素对响应的影响。本研究采用正交试验法，以探究板厚 (H)、楞型跨度 (λ) 和楞型角度 (θ) 三个关键几何参数对瓦楞型 Whipple 防护结构防护性能的作用机制，从而优化结构构型，提升抗撞击性能。

表 1 正交试验方案

Table 1 Orthogonal test program

	$H(\text{mm})$	$\lambda(\text{mm})$	$\theta(^{\circ})$
1	0.9	0.2	60
2	0.9	0.6	45
3	0.9	1	30
4	1.4	0.2	30
5	1.4	0.6	60
6	1.4	1	45
7	1.9	0.2	45
8	1.9	0.6	30
9	1.9	1	60

注：表中所有瓦楞结构参数均满足“单位面积质量与平板一致”的约束（具体设计见 1.3 节）。

各因素水平设置如下：板厚 H 为 0.9 mm、1.4 mm、1.9 mm；楞型跨度 λ 为 0.2 mm、0.6 mm、1.0 mm；楞型角度 θ 为 30°、45°、60°。数据处理过程采用统计分析方法，以验证 ρ_{pz} 与防护性能之间的关系，并通过正交试验设计，查明各几何参数对 ρ_{pz} 的影响程度。具体正交实验方案如表 1 所示

2.1.2 极差分析结果

正交试验是研究多因素多水平的有效方法，依据瓦楞型Whipple防护结构构型的因素水平表设置，得到表 2 的试验结果。在表 2 中，输出结果是衡量防护性能的Z轴动量密度 ρ_{pz} 数据。同时采用极差分析法量化各几何参数对防护性能的影响程度，明确主次顺序并识别较优参数组合。

(1) 极差分析法通过计算各因素在不同水平下试验指标平均值的极差 R 进行评价， R 值越大表明该因素对结果影响越显著。对因素 i 计算其在水平 j 下的试验结果总和 K_{ij} ，再求取该水平下的平均值 $k_{ij}=K_{ij}/n_j$ ，其中 n_j 为该水平出现的次数（通常等于重复试验次数）。

随后，计算因素 i 的极差 R_i ： $R_i = \max(k_{i1}, k_{i2}, k_{i3}) - \min(k_{i1}, k_{i2}, k_{i3})$ 。极差值越大，表明该因素对试验结果的影响越显著。依据各因素的极差大小，可排序确定因素的主次顺序：极差大的因素为主要因素，极差小的因素为次要因素。同时，通过对比各因素不同水平下的平均值，可确定其最优水平。最优组合则是由所有因素的最优水平组合而成，使试验指标达到最佳状态。

(2) 在本研究中，极差分析结果如表 2 所示。分析可知：厚度（ H ）对Z轴动量密度（ ρ_{pz} ）的影响最为显著（ $R_A = 2344.52$ ），是调控防护性能的核心参数。当厚度从 0.9 mm增至 1.9 mm时， ρ_{pz} 大幅下降 65.5%。这表明较厚的防护板可通过塑性变形吸收更多动能，从而有效抑制碎片云的形成。楞型角度（ θ ）的影响次之（ $R_C = 980.01$ ），在 30°时 ρ_{pz} 达到最低值，相比 60°降低了 30.5%。这说明楞型角度对防护性能有显著影响，适当的角度可以优化防护结构的能量吸收和碎片分散效果。楞型跨度（ λ ）的影响最弱（ $R_B = 706.95$ ），在本研究范围内，其对防护性能的影响相对较小，可以认为在当前试验条件下楞型跨度不是主要影响因素。

极差分析法基于因素间无交互作用的假设，而实际工程中参数间可能存在耦合效应。因此，极差分析所得较优组合（ $H_3\lambda_1\theta_3$ ，即 $H = 1.9 \text{ mm}$ ， $\lambda = 0.6 \text{ mm}$ ， $\theta = 30^{\circ}$ ）还需要结合实际试验验证和进一步的综合分析。

表2：正交试验结果

Table 2 Orthogonal test results

	$H(\text{mm})$	$\lambda(\text{mm})$	$\theta(^{\circ})$	$\rho_{pz}(\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1})$
1	0.9	0.2	60	5719.63
2	0.9	0.6	45	2780.70
3	0.9	1	30	2244.38
4	1.4	0.2	30	1672.53

5	1.4	0.6	60	2091.21
6	1.4	1	45	5931.89
7	1.9	0.2	45	394.47
8	1.9	0.6	30	2250.10
9	1.9	1	60	1066.58
K1	10744.71	7786.63	8877.42	
K2	9695.63	7122.00	9107.05	
K3	3711.15	9242.85	6167.01	
k1	3581.57	2595.54	2959.14	
k2	3231.88	2374.00	3035.68	
k3	1237.05	3080.95	2055.67	
R	2344.52	706.95	980.01	

在已开展的试验中，第7组试验（厚度 1.9 mm、跨度 0.2 mm、角度 45°）测得的Z轴动量密度为 394.47 kg·m⁻¹·s⁻¹，显著低于其他试验组，这一结果为后续的优化工作提供了关键参考。因此，在后续的研究中，可着重分析厚度（ H ）和楞型角度（ θ ）这两个显著因素，并在楞型跨度（ λ ）固定为 0.2 mm的条件下，开展 H - θ 双因素加密实验，以精准识别最优参数配置，进一步提升防护结构的优化设计。

2.2 关键几何参数加密优化与二次响应面模型

2.2.1 双因素三水平加密实验

为进一步探究各几何参数的耦合影响并精准捕捉最优解，本研究在正交试验基础上开展双因素三水平加密实验。根据 2.1 节极差分析结果，楞型跨度（ λ ）对防护性能影响较小，故在本阶段将其固定为 0.2 mm。选取板厚（ H ）为 1.8 mm、1.9 mm 和 2.0 mm，楞型角度（ θ ）为 35°、45°和 55°，构建三水平全因子实验设计，旨在系统分析 H 与 θ 的交互作用对Z轴动量密度（ ρ_{pz} ）的影响，精确识别最优参数组合。

具体实验方案如下表 3 所示：

表3：双因素三水平加密实验方案及结果

Table 3 Experimental program and results for double-factor, three-level encryption

	$H(\text{mm})$	$\theta(^{\circ})$	$\rho_{pz}(\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1})$
D1	1.8	35	2340.74
D2	1.8	45	1566.87
D3	1.8	55	1195.35
D4	1.9	35	1461.78
D5	1.9	45	394.47
D6	1.9	55	542.27
D7	2.0	35	1113.50
D8	2.0	45	673.06
D9	2.0	55	1347.03

注：表中所有瓦楞结构参数均满足“单位面积质量与平板一致”的约束（具体设计见 1.3 节）。

全局最优解出现在D5组($H = 1.9 \text{ mm}$, $\theta = 45^{\circ}$)，其 ρ_{pz} 值为394.47 kg·m⁻¹·s⁻¹。远低于其他组合，表明此参数配置能最有效地分散碎片云动量，防护性能最佳。 ρ_{pz} 对厚度的变化极为敏感，但并非单调相关，存在明确的“最优厚度窗口”。当 $\theta = 45^{\circ}$ 时， H 从1.8 mm增至1.9 mm， ρ_{pz} 从1566.87 kg·m⁻¹·s⁻¹降至394.47 kg·m⁻¹·s⁻¹（降幅达74.8%），优化效果极其显著；而 H 从1.9 mm增至2.0 mm， ρ_{pz} 从394.47 kg·m⁻¹·s⁻¹回升至673.06 kg·m⁻¹·s⁻¹（增幅70.7%），性能反而下降。因此，考虑厚度存在一个极值点

(约1.9 mm)，过薄或过厚都会导致性能衰退。角度的最优值强烈依赖于厚度的匹配。

在最优厚度 $H = 1.9 \text{ mm}$ 时，最佳角度为 45° ($\rho_{pz} = 394.47 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)。当角度偏离至 35° 或 55° ， ρ_{pz} 分别上升至 $1461.78 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $542.27 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ，性能显著下降；因此，虽然 45° 是当前实验范围内的全局优势角度，但其卓越性能高度依赖于 1.9 mm 的厚度。厚度与角度之间存在强烈的交互作用，这构成了参数优化的核心。D5(1.9, 45°)的卓越性能在参数轻微变动时迅速消失。例如，厚度不变，角度变为 55° (D6)，性能下降；角度不变，厚度变为 2.0 mm (D8)，性能也显著下降。在 $H = 1.9 \text{ mm}$ ， $\theta = 55^\circ$ (D6， $\rho_{pz} = 542.27 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)和 $H = 2.0 \text{ mm}$ ， $\theta = 45^\circ$ (D8， $\rho_{pz} = 673.06 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)均表现出较好的次优性能。

综合以上结果，可划定优化参数窗口为： $H = 1.90 \pm 0.05 \text{ mm}$ ， $\theta = 45^\circ \pm 5^\circ$ ，此时 ρ_{pz} 稳定于 $400 \sim 700 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ 范围内。 $\lambda = 0.2 \text{ mm}$ 被验证为可行固定值。该结果为第2.2.2节响应面优化提供了可靠的初始参数区间。

2.2.2 二次响应曲面模型

基于2.2.1节中 λ 固定为 0.2 mm 条件下的双因素三水平加密实验数据，采用最小二乘法对Z轴动量密度 (ρ_{pz}) 与板厚 (H)、楞型角度 (θ) 的定量关系进行回归分析，建立二次响应曲面模型。模型形式如下：

$$\rho_{pz} = \beta_0 + \beta_1 H + \beta_2 \theta + \beta_3 H\theta + \beta_4 H^2 + \beta_5 \theta^2 + \varepsilon \quad (6)$$

其中， $\beta_0 \sim \beta_5$ 为回归系数， ε 为随机误差项。通过MATLAB最小二乘拟合求得系数向量，最终回归方程为：

$$\rho_{pz} = 2502.71 - 3638.92H - 3121.16\theta + 1378.91H\theta + 2293.01H^2 + 1821.25\theta^2 \quad (7)$$

采用决定系数 (R^2) 和均方根误差 (RMSE) 评价模型拟合优度。计算得 $R^2 = 0.9526$ ，表明该模型可解释95.26%的响应变异性； $\text{RMSE} = 123.41 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ，相对于 ρ_{pz} 均值 ($1185.80 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$) 的相对误差为10.4%，模型精度较高。

图 7 展示了 ρ_{pz} 随 H 与 θ 变化的三维响应曲面，呈典型“马鞍形”分布，可以清晰地反映出两参数对 ρ_{pz} 的复合影响。曲面存在明显谷值区域，对应最优参数区间为 $H \in [1.85, 1.95] \text{ mm}$ ， $\theta \in [40^\circ, 50^\circ]$ 。在 $H = 1.92 \text{ mm}$ 、 $\theta = 47^\circ$ 处取得全局最小预测值 $\rho_{pz} = 424.21 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ，与实验最低值 ($394.47 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$) 的相对误差为7.6%，进一步验证了模型的可靠性与工程适用性。该结果为瓦楞型 Whipple防护结构的参数优化提供了明确的理论依据与设计方向。

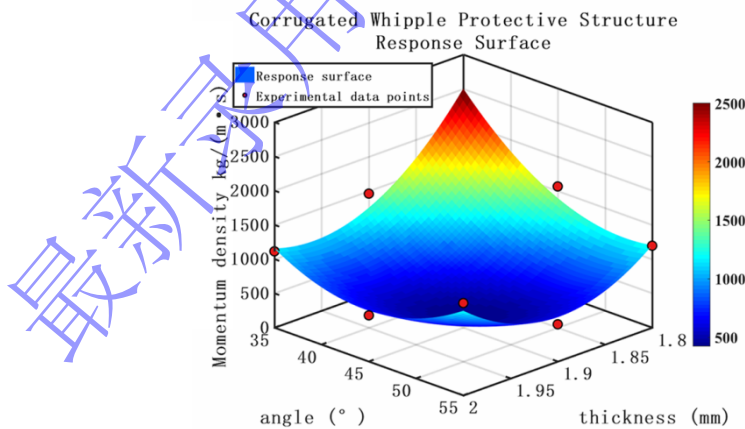


图 7. 瓦楞型 Whipple 防护结构 Z 轴动量密度响应面

Fig.7 The Z-axis momentum density response surface of the corrugated Whipple protective structure

3 最优结构超高速碰撞特性分析

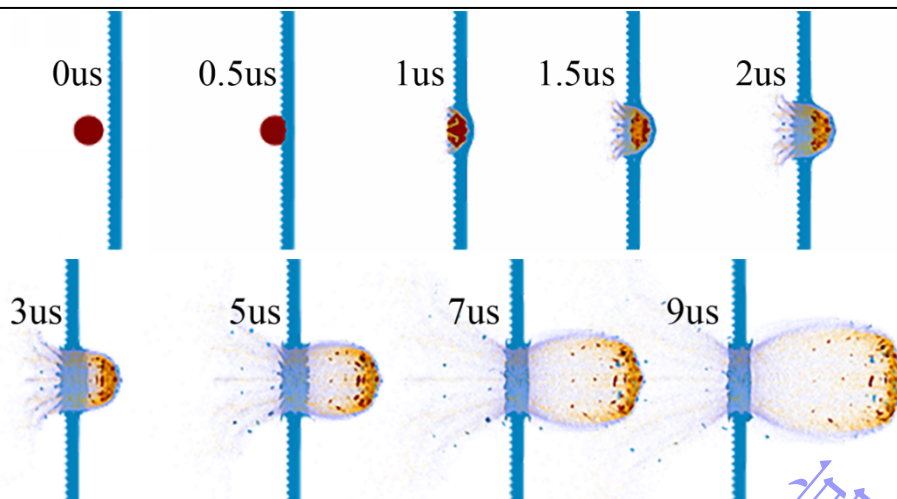
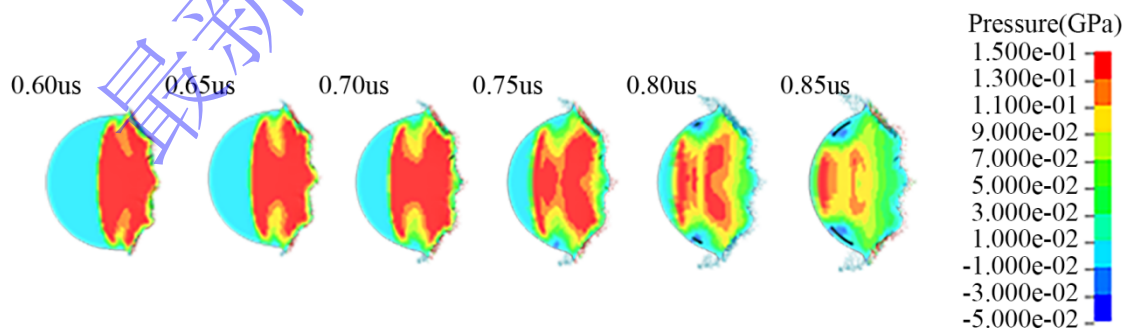


图 8. 超高速碰撞最优构型瓦楞型 Whipple 防护结构过程

Fig.8 Process of the optimal configuration of the corrugated Whipple protection structure for hypervelocity collision

为深入探究第2.2节所得理论最优构型 ($H = 1.92 \text{ mm}$, $\theta = 47^\circ$, $\lambda = 0.2 \text{ mm}$) 在超高速撞击下的防护机理, 本节基于FEM-SPH耦合模型, 对5 mm弹丸以4.6 km/s速度撞击该结构的动态响应及碎片云演化过程进行特征分析, 如图8所示。初始阶段, 弹丸以有限元单元形式向防护结构超高速撞击。到0.5 μs , 弹丸与防护结构碰撞, 但此刻尚未达到失效阈值。1 μs 时, 撞击界面处的应力集中达到材料失效强度, 防护结构与弹丸接触区域开始破碎、飞溅。由于瓦楞构型的非对称接触, 弹丸在撞击初始阶段即发生非均匀应力加载, 弹丸部分材料转化为SPH粒子, 缓冲屏出现塑性鼓包, 形成碎片云雏形, 这为后续的充分破碎奠定了基础。

在1.5 μs 时, 碎片云扩张, 瓦楞的周期性几何特征有效引导了应力波的传播路径与相互作用, 弹丸前端单元大量转化为SPH粒子, 形成了不规则前端轮廓, 缓冲屏凸起部位同样发生材料破碎, 碎片云在撞击面附近聚集, 并沿轴向与径向发散。2 μs 时, 碎片云进入快速膨胀阶段。弹丸与防护结构的残余单元持续破碎, SPH粒子的数量显著增加。碎片云的形态从初始的聚集状态转变为开阔分布, 这反映出撞击能量得到了有效分散。3 μs 时, 碎片云空间分布进一步扩展, 弹丸主体完全破碎, 缓冲屏出现完整穿孔, 弹丸主体基本完成向SPH粒子的转化。5 μs 时, 碎片云在防护结构的背面形成典型的碎片云结构, 弹丸产生的较大尺寸碎片并未完全破碎, 动能较高, 缓冲屏的残余单元与SPH粒子形成混合介质。碎片云内部由于速度不同, 开始出现空间分化, 逐渐呈现出更复杂的形态。7 μs 时, 碎片云达到准稳定状态, SPH粒子转化基本完成, 空间分布范围持续扩大, 主要碰撞及二次破碎过程基本完成, 系统进入自由扩散阶段。9 μs 时, 碎片云呈现充分发展的扩散形态, 粒子分布范围进一步扩大, 反映出超高速撞击下能量的传递与材料的破碎、飞溅过程。



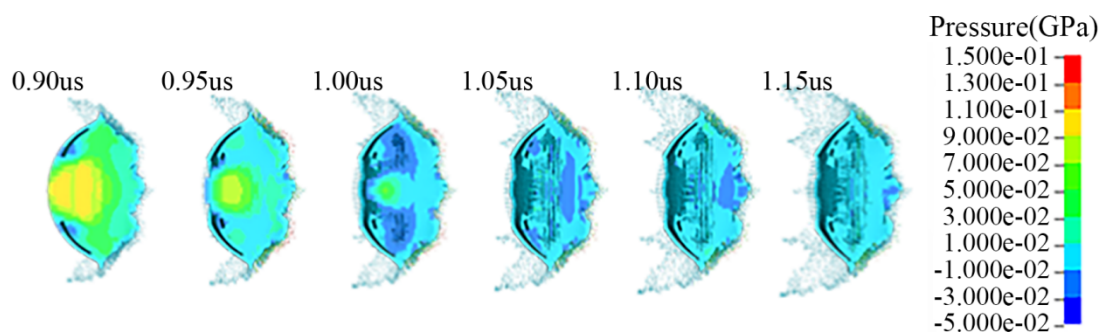


图9. 超高速碰撞最优构型瓦楞型 Whipple 防护结构弹丸内部的应力云图演变过程

Fig.9 Evolution maps of the stress inside the projectile of a corrugated Whipple protection structure with optimal configuration for hypervelocity collision

图9展示了速度为4.6 km/s工况下弹丸内部层裂的演化过程。弹丸与防护结构发生初始撞击，由于接触界面的压缩和侵蚀，弹丸头部的单元在破碎过程中从前端向弹丸内部逐渐脱落，瓦楞结构的几何特征使弹丸前端呈现多点撞击态势，形成轮廓不规则、凹凸变化明显的前沿。在0.60 μs时刻，弹丸与防护结构接触区域出现显著应力集中，云图中表现为红色高应力区，反映出撞击动能迅速转化为应力能，形成初始压缩应力波并向弹丸内部传播。

随着时间推进至0.65 – 0.85 μs，压缩波在弹丸内部传播并逐渐扩散，应力分布范围扩大，云图颜色由红向黄、绿过渡，显示应力影响区域不断扩展。在此阶段，应力波传播路径上出现明显的波阵面结构，符合一维应力波在固体介质中的传播特性。值得注意的是，在0.80 μs时刻，弹丸中后部区域开始出现层裂迹象，初始裂纹沿弹丸后表面向后端扩展，这与压缩波在弹丸自由表面反射形成拉伸波，并在材料强度薄弱区域引发断裂的机制一致。至0.90 μs，应力云图显示高应力区域持续减小，颜色以黄、绿为主，表明应力能逐步释放与衰减。在0.95 μs时刻，弹丸最后端发生破裂，层裂区域自后表面附近逐渐向弹丸中心扩展，形成典型的层裂破坏模式。这一过程与Johnson-Cook失效模型中考虑的应力波反射导致材料层裂行为一致。在0.95 – 1.15 μs阶段，弹丸内部应力分布更趋均匀，整体应力水平持续下降，云图颜色逐渐过渡至蓝系，表明撞击能量在材料中不断耗散，弹丸力学响应由初始的强烈冲击状态逐渐趋于动态平衡。至1.15 μs时刻，弹丸内部形成完整的层裂结构，该层裂过程揭示了弹丸在瓦楞结构冲击下的一种重要内部损伤模式，这种从内部开始的破碎，与撞击表面的粉碎相结合，共同导致了弹丸的更充分解体，从而形成粒度更小、分布更均匀的碎片云。

第3节的碰撞特性分析表明，优化后的瓦楞构型通过其独特的几何轮廓，在撞击初始诱导弹丸非对称破碎，并在过程中引导应力波多次反射叠加，从而有效促进碎片云扩散，将集中的轴向动能转化为横向分量，最终实现动量的再分布，显著降低对后方舱壁的冲击威胁。

4 结 论

本研究在设定的典型撞击条件（弹丸直径5.0 mm、速度4.6 km/s、正撞击）下提出了超高速碰撞仿真与正交试验融合设计的Whipple防护结构防护性能优化方法，实现了Whipple防护结构几何参数优化设计。归纳以下几点：

1) 正交试验极差分析表明，瓦楞构型的三个几何参数对防护性能的影响主次顺序为：厚度（RA = 2344.52）>角度（RC = 980.01）>跨度（RB = 706.95），厚度为核心调控参数，后续优化需优先聚焦。

2) 参数优化研究显示，厚度与角度之间存在强耦合效应。当厚度为1.9 mm、角度为45°、跨度为0.2 mm 时，获得最优防护性能，Z轴动量密度最低值为394.47 kg·m⁻¹·s⁻¹。

3) 基于加密实验数据建立了二次响应曲面模型具有较高预测精度（R² = 0.9526），确定全局最优参数组合为厚度1.92 mm、角度47°、跨度0.2 mm，对应Z轴动量密度预测值为424.21 kg·m⁻¹·s⁻¹，该预测值与实验最优值394.47 kg·m⁻¹·s⁻¹ 较为接近，相对误差为7.6%，验证了优化结果的可靠性。

4) 数值模拟结果表明,优化后的瓦楞构型能有效促进弹丸破碎和碎片云扩散,通过独特的几何轮廓将集中的轴向动能转化为横向分量,实现动量的三维空间重分布,最终防护性能较平板提升33.72%,显著降低对后方舱壁的冲击威胁。

参考文献

- [1] 吴树范, 王伟, 温济帆, 等. 低轨互联网星座发展研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2024, 50(1): 1-11.
WU S F, WANG W, WEN J F, et al. Development research of LEO internet constellations[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2024, 50(1): 1-11(in Chinese).
- [2] 郭甲, 庞兆君, 岳帅, 等. 空间绳系组合体的继电型控制离轨策略[J]. 航空学报, 2021, 42(12): 287-298.
GUO J, PANG Z J, YUE S, et al. Relay control deorbit strategy for space tethered combination[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(12): 287-298 (in Chinese).
- [3] 李梦生, 岳帅, 杜忠华, 等. 空间长方形绳网展开动力学及多参数特性分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2024, 50(3): 994-1004.
LI M S, YUE S, DU Z H, et al. Deployment dynamics and multi-parameter characteristic analysis of space rectangular rope net[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2024, 50(3): 994-1004 (in Chinese).
- [4] 陈鹏旭, 吴晨晨, 倪智宇. 空间飞网系统动力学建模与仿真[J]. 北京航空航天大学学报, 2024, 50(9): 2951-2962.
CHEN P X, WU C C, NI Z Y. Dynamics modeling and simulation of space flying net system[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2024, 50(9): 2951-2962 (in Chinese).
- [5] ZHAO W, PANG Z, ZHAO Z, et al. A simulation and an experimental study of space harpoon low-velocity impact, anchored debris[J]. Materials, 2022, 15(14): 5041.
- [6] 张品亮, 龚自正, 杨武霖, 等. 激光移除空间碎片过程的三维仿真与建模[J]. 宇航学报, 2017, 38(3): 323-330.
ZHANG P L, GONG Z Z, YANG W L, et al. Three-dimensional simulation and modeling of space debris removal by laser[J]. Journal of Astronautics, 2017, 38(3): 323-330 (in Chinese).
- [7] WHIPPLE F L. Meteorites and space travel[J]. ASTRONOMICAL JOURNAL, 1947, 52(5): 131.
- [8] COUR-PALAIS B G, CREWS J L. A multi-shock concept for spacecraft shielding[J]. International Journal of Impact Engineering, 1990, 10(1-4): 135-146.
- [9] NAM Y W, SATHISH KUMAR S K, ANKEM V A, et al. Multi-functional aramid/epoxy composite for stealth space hypervelocity impact shielding system[J]. Composite Structures, 2018, 193(0): 113-120.
- [10] CHRISTIANSEN E L, CREWS J L, WILLIAMSEN J E, et al. Enhanced meteoroid and orbital debris shielding[J]. International Journal of Impact Engineering, 1995, 17(1-3): 217-228.
- [11] KE F W, HUANG J, WEN X Z, et al. Test study on the performance of shielding configuration with stuffed layer under hypervelocity impact[J]. Acta Astronautica, 2016, 127(0): 553-560.
- [12] CHRISTIANSEN E L, KERR J H. Mesh double-bumper shield: A low-weight alternative for spacecraft meteoroid and orbital debris protection[J]. International Journal of Impact Engineering, 1993, 14(1-4): 169-180.
- [13] 管公顺, 陈礼文, 王少恒, 等. 不锈钢网/铝板多冲击防护屏高速撞击防护性能实验研究[J]. 高压物理学报, 2012, 26(2): 127-134.
GUAN G S, CHEN L W, WANG S H, et al. Experimental Investigation on Resist Capability of Stainless Steel Mesh/Al Multi-Shock Shield by High-Velocity Impact[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2012, 26(2): 127-134 (in Chinese).
- [14] SATHISH KUMAR S K, KIM Y, CHA J, et al. Hybrid interspaced and free-boundary aramid fabric back bumper for hypervelocity impact shielding system[J]. International Journal of Impact Engineering, 2023, 171(Suppl C): 104377.

- [15] BALUCH A H, PARK Y, KIM C G. Hypervelocity impact on carbon/epoxy composites in low Earth orbit environment[J]. *Composite Structures*, 2013, 96(0): 554-560.
- [16] GIANNAROS E, KOTZAKOLIOS A, KOSTOPOULOS V, et al. Hypervelocity impact response of CFRP laminates using smoothed particle hydrodynamics method: Implementation and validation(Article)[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2019, 123(0): 56-69.
- [17] ROGERS J A, MOTE A, MEAD P T, et al. Hypervelocity impact response of monolithic UHMWPE and HDPE plates[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2022, 161(Suppl C): 104081.
- [18] CHERNIAEV A. Modeling of hypervelocity impact on open cell foam core sandwich panels[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2021, 155(Suppl C): 103901.
- [19] PAI A, SHARMA A, EBY I M, et al. A numerical approach for response of whipple shields with coated and monolithic front bumper to hypervelocity impact by spherical projectiles[J]. *Acta Astronautica*, 2023, 202(0): 433-441.
- [20] 管公顺, 戴训洋, 张铎. 玄武岩纤维布/铝板组合防护结构的高速撞击防护性能[J]. *高压物理学报*, 2022, 36(1): 99-108.
GUAN G S, DAI X Y, ZHANG D. High Velocity Impact Shielding Performance of Basalt Fiber Cloth/Al-Plate Composite Shields[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2022, 36(1): 014102 (in Chinese).
- [21] 张宝玺, 哈跃, 邓云飞, 等. 超高速撞击 Kevlar 纤维布填充防护结构研究[J]. *高压物理学报*, 2013, 27(1): 105-112.
ZHANG B X, HA Y, DENG Y F, et al. Optimal Structural Design of Stuffed Shields with Kevlar Fiber Clothes against Hypervelocity Impact[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2013, 27(1): 105-112 (in Chinese).
- [22] RAKIB M A, SMITH S T, T. T. A review of shielding systems for protecting off-earth structures from micrometeoroid and orbital debris impact[J]. *Acta Astronautica*, 2024, 223(0): 404-425.
- [23] WEN K, CHEN X W, LU Y G. Research and development on hypervelocity impact protection using Whipple shield: An overview[J]. *Defence Technology*, 2021, 17(6): 1864-1886.
- [24] REN S Y, ZHANG P L, WU Q, et al. Review of bumper materials for spacecraft shield against orbital debris hypervelocity impact[J]. *Defence Technology*, 2025, 45: 137-177.
- [25] MACLAY T D, CULP R D, BAREISS L, et al. Topographically modified bumper concepts for spacecraft shielding[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1993, 14(1-4): 479-489.
- [26] SILNIKOV M, GUK I, MIKHAYLIN A, et al. Efficiency of needle structure at hypervelocity impact[J]. *Acta Astronautica*, 2018, 150(0): 73-80.
- [27] ÖNDER A. Projectile fragmentation and debris cloud formation behaviour of wavy plates in hypervelocity impact[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2024, 183(suppl-C): 104788.
- [28] DOU L L, HE L L, YIN Y H. Numerical Investigation on Protective Mechanism of Metal Cover Plate for Alumina Armor against Impact of Fragment by FE-Converting-SPH Method[J]. *Materials*, 2023, 16(9): 3405.
- [29] YANG Y L, LI J Z. SPH-FE-Based numerical simulation on dynamic characteristics of structure under water waves(Article)[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2020, 8(9): 630.
- [30] 赵微, 陈利, 张庆明, 等. 水滴超高速撞击 Whipple 防护结构的毁伤特性[J]. *高压物理学报*, 2022, 36(4): 79-90.
ZHAO W, CHEN L, ZHANG Q M, et al. Damage Characteristics of Whipple Protective Structure Impacted by Water Droplets at Hypervelocity[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2022, 36(4): 044103 (in Chinese).
- [31] 杨玉好, 郭香华, 张庆明. 动能块超高速碰撞多层防护结构的毁伤特性数值模拟[J]. *高压物理学报*, 2022, 36(4): 155-165.

- YANG Y H, GUO X H, ZHANG Q M. Numerical Simulation of Damage Characteristics of Multi-Layer Protective Structure under Hypervelocity Impact of Kinetic Energy Block[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2022, 36(4): 044204 (in Chinese).
- [32] HE Q G, CHEN J F, CHEN X W. Velocity-space analysis method for hazardous fragments in debris clouds[J]. International Journal of Impact Engineering, 2022, 161(Suppl C): 104087.
- [33] JOHNSON G. R. Fracture Characteristics of Three Metals Subjected to Various Strain Rates, Temperatures and Pressures[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1985, 21(1): 31-48.
- [34] PIEKUTOWSKI A J. Debris clouds generated by hypervelocity impact of cylindrical projectiles with thin aluminum plates[J]. International Journal of Impact Engineering, 1987, 5(1-4): 509-518.
- [35] PELTON J N. US Government and NASA Documents Related to Orbital Space Debris Mitigation[M], 2020.
- [36] HE Q G, CHEN X, CHEN J F. Finite element-smoothed particle hydrodynamics adaptive method in simulating debris cloud[J]. Acta Astronautica, 2020, 175(0): 99-117.
- [37] ARNOLD J, CHRISTIANSEN E L, DAVIS A, et al. Handbook for Designing MMOD Protection[M], 2009

Parameter Optimization of the Corrugated Whipple Protective Structure under Hypervelocity Impact

GUO Jiaao¹, YANG Qiuzu^{1*}, LIU Xiaochuan², YIN Yunfei¹, LI Zhiqiang^{1,3,4,5*}

(1. College of Aeronautics and Astronautics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China;

2. Aircraft Strength Research Institute of China, Xi'an 710065, Shaanxi, China;

3. Shanxi Provincial Key Laboratory of Material Strength & Structural Impact, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China;

4. Shanxi Basic Disciplines Research Center for Mechanics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China;

5. National Experimental Teaching Demonstration Center for Mechanics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China)

Abstract: The geometric configuration of the corrugated Whipple protective structure significantly influences their protective capability against hypervelocity impact. To optimize the performance of the corrugated Whipple protective structures under hypervelocity impact, an integrated optimization method combining the finite element method-smoothed particle hydrodynamics (FEM-SPH) coupled algorithm with orthogonal experimental design was proposed. A reliable numerical simulation model was constructed, and the Z-axis momentum density was introduced as an evaluation factor for protective performance. The three geometric parameters of the corrugation, namely thickness, span, and angle, were systematically investigated for their protective effects on the shielding. Orthogonal test results indicated that the order of influence of these factors, in descending order of magnitude, is thickness, angle, and span. Further double-factor refined experiments were conducted, and a quadratic polynomial model was developed to identify the optimal geometric parameters. The optimal configuration improved the protective performance by 33.72% compared to a flat plate. The study confirms that the optimized corrugated structure effectively promotes projectile fragmentation and debris cloud dispersion, facilitating three-dimensional redistribution of the momentum, thereby significantly enhancing protective performance of the shield. This research provides a theoretical basis and a parameter optimization pathway to the design of spacecraft protective structures.

Keywords: Whipple protective structure; hypervelocity impact; FEM-SPH coupling algorithm; orthogonal tests

最新录用，非最终出版稿