DOI: 10.11858/gywlxb.20261068

碳化硅/钛合金穿插式 TPMS 结构的抗侵彻性能数值模拟研究

周浩天[1], 李依男[1], 覃 彬[2], 孟钰权[1], 宋卫东[1]

(1. 北京理工大学机电学院, 北京 100081;
2. 中国兵器工业第二〇八研究所, 北京 102202)

摘要: 陶瓷/金属复合材料作为一种具有轻量化、高比强度、高吸能效率特性的抗冲击结构, 被广泛应用于军事及航空航天领域。随着 3D 打印技术的发展, 制造三周期极小曲面 (triply periodic minimal surface, TPMS) 的复杂点阵结构成为可能。设计了一种碳化硅 (SiC) 陶瓷与钛合金 (TC4) 复合的穿插式 TPMS 防弹结构, 针对单弹侵彻与双弹侵彻工况, 利用 ABAQUS 开展了数值模拟研究, 对比了该结构与纯 SiC 的损伤破坏模式、侵彻深度和弹道极限速度。数值模拟结果表明: 不同穿插式 TPMS 结构呈现出不同的损伤破坏模式, 三维拓扑结构限制了裂纹在陶瓷内部的扩散, 使靶板整体损伤弱于纯 SiC 靶; 第 2 发弹丸侵彻造成的损伤沿首发弹丸侵彻区域继续发展, 侵彻深度增加; 相较于纯 SiC 靶板, 3 种穿插式 TPMS 靶板的侵彻深度更浅, 弹道极限速度更高; 当来袭子弹能够击穿靶板时, P 型结构对低速弹的抗弹性能更优, D 型结构对高速弹的抗弹性能更优。研究结果表明, 等面密度下穿插式 TPMS 靶板相较于纯 SiC 具有更优的抗弹性能。研究结果可为新型轻质陶瓷装甲设计提供技术支撑和理论依据。

关键词: TPMS 结构; 碳化硅陶瓷; 陶瓷复合材料; 抗侵彻性能; 弹道极限速度

中图分类号: O385; O521.9 **文献标志码:** A

随着现代军事武器毁伤效能的不断提高, 各国军队对防护装甲的性能提出了更高的要求。传统的防护装甲以金属材料为主, 通过堆叠的方式增强其防护性能, 但这种方式造成装甲质量增加, 大大降低了车辆与人员的机动性, 已不再满足现代战争需要[1], 而结合金属与陶瓷的复合装甲可以很好地改善这一问题[2−4]。

陶瓷作为一种兼具高硬度、低密度特征的材料, 在装甲防护领域具有广泛的应用[5−7]。如今常用的装甲陶瓷有氧化铝(Al_2O_3)、碳化硅(SiC)、碳化硼(B_4C)等[8], 其中 SiC 陶瓷因力学性能优异且价格适中被广泛应用于复合装甲[9]。然而, 由于其具有脆性, 以纯陶瓷构建的装甲防护性能并不理想, 因此, 将陶瓷板与其他金属或高分子材料等具有高韧性的背板组合而成的层状复合装甲材料被大量研究, 并获得了广泛的应用[10]。在复合板中, 将陶瓷作为一个整体放入时, 在高速冲击作用下, 陶瓷块裂纹的大面积扩展会导致大面积的失效, 进而导致该类型防护板在面对多发子弹侵彻时的防护性能大幅下降[11]; 但当增加黏性层比例以抑制这种失效时, 又会导致复合装甲抗单弹侵彻能力减弱[12]。

针对这种局限性, 众多学者开始探究其他组合方式的陶瓷装甲, 以最大程度地发挥陶瓷的抗弹能力。Stanislawek 等[13] 提出了一种金字塔陶瓷装甲, 研究发现其可通过偏转弹道来削弱来袭子弹的威

* **收稿日期:** 2026-03-30; **修回日期:** 2026-06-01
基金项目: 国家自然科学基金(12572429, 12172056, 12372349)
第一作者: 周浩天(2004—), 男, 本科, 主要从事冲击动力学研究. E-mail: 17602437047@163.com
通信作者: 宋卫东(1975—), 男, 博士, 教授, 主要从事材料与结构的冲击动力学研究. E-mail: swdgh@bit.edu.cn

胁，且该结构的陶瓷层并不会发生大面积破坏，表明新型结构对于抗多发弹体来袭的能力有所提升。Liu 等[14] 设计了一种外层为 SiC 陶瓷、内层与底层均为 6061 铝的仿生复合鳞片材料，为轻量化、柔性化的防护系统设计提供了方向。Guo 等[15] 设计了一种蜂窝状陶瓷基复合材料结构，研究了不同填充物的抗侵彻性能。Gao 等[16] 利用 SiC 与自适应、慢聚合（adaptive and slow-polymerizing, ASP）聚脲设计了一种具有珍珠层结构（nacre-like structure, NLS）的新型复合板，发现其可改变靶板中的应力波传播，降低侵彻效果，为先进陶瓷防弹材料提供了创新思路。Tian 等[17] 则构建了一种 TC4 框架与 SiC 棱柱的混合结构，发现由于 TC4 框架对 SiC 的约束作用，使该结构的抗侵彻能力高于同面密度的 TC4 材料。可见，约束对于提高陶瓷的抗侵彻能力具有很大的帮助[18]。Zhang 等[19] 在前者的基础上将 SiC 棱柱偏转一定角度，设计了一种波纹状 TC4 框架与 SiC 棱柱的混合结构，研究发现，提高陶瓷的支撑强度和约束强度可提高陶瓷的碎裂程度，并进一步提高弹丸的内能转化率。陈铭等[20] 研究了一种陶瓷球结构，他们将球形陶瓷作为增强颗粒埋入金属铝中构成复合靶板，通过数值模拟发现该结构对弹着点具有敏感性，并可将破坏限制在局部，表明其具备抗多弹侵彻的潜力。

近年来，3D 打印技术的发展让高精度地制造复杂点阵结构成为可能[21]，优异的力学特性使其在装甲防护领域具有巨大的应用潜力。其中，三周期极小曲面（triply periodic minimal surface, TPMS）结构由于具有多孔、表面连续[22] 以及能够将损伤限制在侵彻区域内[23] 的特性吸引了众多学者，并对其开展了吸能、强度等方面的研究。Ejeh[24] 采用 316L 不锈钢构建不同构型的 TPMS 材料，研究了其在低速冲击下的响应，发现由于其在冲击载荷下具有高剪切强度的优势，周期性的 P 型（primitive）TPMS 具有优异的抗侵彻性能。Qiu 等[21] 通过对比 8 种构型的 TPMS 的应力-应变曲线，发现相对密度在 30% 附近时，F-RD 型（F-rhombic dodecahedra）和 D 型（diamond）TPMS 拥有最优的吸能能力。Yassine 等[25] 通过落锤试验机对 7 种构型的 TPMS 结构进行了局部侵彻实验，发现 D 型和 G 型（gyroid）TPMS 表现出最优的抗侵彻性能，且 TPMS 的工艺参数和成型质量对点阵结构的抗侵彻性能具有很大影响。谢钟洋等[23] 以 SiC 为基体构建了 D 型和 G 型 TPMS 结构，通过弹丸侵彻实验并结合数值模拟，发现 D 型 TPMS 的能量吸收效果显著，而 G 型 TPMS 凭借自身的曲面结构可显著改变弹丸的侵彻角度。该研究为点阵结构在新型轻质装甲设计中的应用提供了参考。对于 TPMS 的制备工艺，Qin 等[26] 采用激光选区熔化（select laser melting, SLM）工艺制备了 TPMS，通过显微计算机断层扫描技术发现制造的 TPMS 中存在大量的结构缺陷，可显著影响 TPMS 结构的力学性能。

为了使 TPMS 结构的性能得到进一步提升，学者们开始将互穿相复合材料（interpenetrating phase composite, IPC）与 TPMS 相结合。IPC 是由 2 种或 2 种以上的相组成的复合材料，每个相在拓扑上都是连续的，各相之间通过微观结构进行连接[27]。该种材料结构可集中 2 种或 2 种以上材料的优势，从而提升材料整体的性能。Novak 等[28] 研究了 TPMS 金属与聚合物构成的 IPC 在不同冲击速度下的力学性能，发现填充了环氧树脂的 IPC 相较未填充样品的比能量吸收（specific energy absorption, SEA）提升了 38%。Singh 等[29] 研究了 TPMS 陶瓷与金属构成的 IPC 的制造工艺和力学性能，发现其比能量吸收是单相陶瓷超材料的 400 倍以上。Santos 等[30] 研究了 TPMS 氧化铝与铝构成的 IPC 的制造及力学性能，发现铝的加入显著改变了样品的抗压行为和能量吸收行为，其中 D 型和 G 型结构具有更好的力学性能。

目前，对于具有 TPMS 结构的 IPC 材料的抗侵彻性能研究相对较少，而此前针对穿插式陶瓷装甲的研究已证明，穿插结构可有效提升陶瓷装甲的抗侵彻能力，且 TPMS 结构在装甲防护领域具有巨大的应用潜力。本研究将借助具有 TPMS 结构的 IPC 的制造方法，基于 3 种 TPMS 构型，建立 3 种金属-陶瓷穿插式 TPMS 结构，分析其面对单弹侵彻/双弹侵彻工况时的抗弹能力，并与同等面密度下的纯 SiC 进行对比[11]，旨在探究装甲陶瓷的抗弹性能，提升其抗多发子弹打击能力，为层状复合装甲中陶瓷层的替代升级以及构造新型轻质陶瓷装甲提出新的设计思路。

1　数值模拟

1.1　几何模型

TPMS 是基于空间曲面发展而来的一种在空间中具有周期性排列特性的光滑曲面[31]。其空间几何形状可以通过数学隐函数的形式表达[32]，这也使得 TPMS 结构较其他传统点阵结构具有更强的可设计性。隐函数法采用一个三变量隐式方程$\phi(x,y,z)$来描述曲面在 x、y、z 方向上的变化，本研究构建的 D 型、P 型和 N 型 TPMS 结构的隐式方程如下。

对于 D 型 TPMS[31]

$$\cos X\cos Y\cos Z-\sin X\sin Y\sin Z=C \tag{1}$$

对于 P 型 TPMS[33]

$$\cos X+\cos Y+\cos Z=C \tag{2}$$

对于 N 型 TPMS[34]

$$\cos X+\cos Y+\cos Z+3\cos X\cos Y\cos Z=C \tag{3}$$

式中：$X=2\alpha\pi x$，$Y=2\beta\pi y$，$Z=2\gamma\pi z$，x、y、z表示空间坐标，参数α、β、γ控制单胞沿x、y、z轴的尺寸；C为 TPMS 表面的偏移量，用以控制 TPMS 结构的相对密度。根据方程的定义，TPMS 曲面将空间划分为内部域和外部域。通常采用 2 种方法获得 TPMS 结构：(1) 通过表面增厚以生成片状结构（sheet-type）；(2) 通过将内部域或外部域实体化以生成实体结构（solid-type）[35]。对于方法 1，隐函数$\phi(x,y,z)$应满足$-C\leqslant\phi(x,y,z)\leqslant C$；而对于方法 2，$\phi(x,y,z)$应满足$\phi(x,y,z)<C$或$\phi(x,y,z)>C$。本研究的 TPMS 结构均通过方法 2 生成。

3 种 TPMS 穿插靶板的构建方式相似，以 D 型 TPMS 为例，穿插靶板尺寸为 40 mm×40 mm×10 mm，采用 8×8×2 胞元阵列。为提高计算效率，穿插靶采用 1/4 模型进行仿真。将 1/4 模型分为 TC4 部分和 SiC 部分，并分别构建。其中 TC4 部分为 TPMS 结构，采用开源的数学软件 MSLattice 生成[36]，该软件利用 Matlab 的符号数学工具箱，针对不同 TPMS 拓扑构型实现水平集方程的求解，支持高效的 TPMS 拓扑结构生成和建模。在 MSLattice 中设置其相对密度为 20%，单胞尺寸为 5 mm。该软件会生成一个具有网格结构的 STL 文件，但由于其网格质量较差，且 STL 文件不具有实体网格单元，不能直接用于有限元分析，因此，还需借助 Hypermesh 对网格质量进一步处理。最后，将得到的 1/4 靶板导入 ABAQUS，根据定义的集将 SiC 和 TC4 的材料属性分别赋予相应的结构，完成穿插式 TPMS 板有限元模型构建，如图 1 所示。在弹体侵彻过程中，靶体结构主要承受来袭弹丸的冲击挤压作用而产生损伤失效。陶瓷

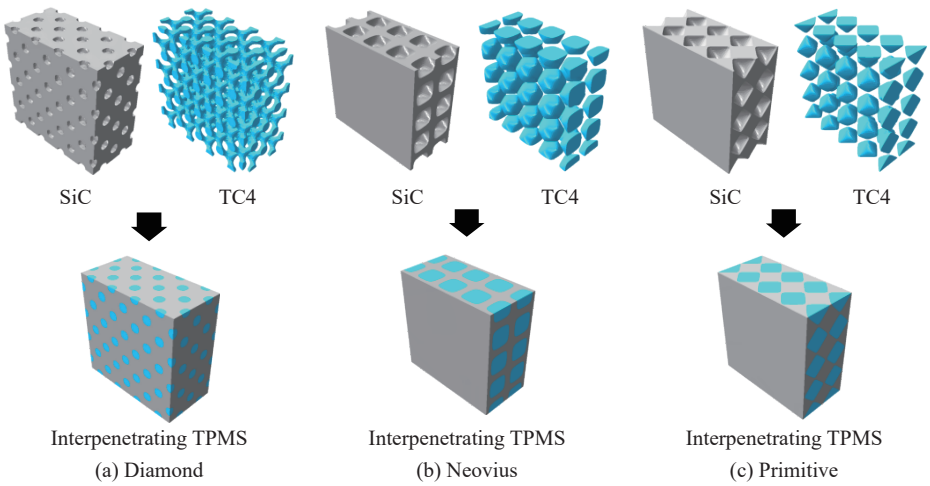


图 1　3 种穿插式 TPMS 结构的 1/4 模型构建示意图

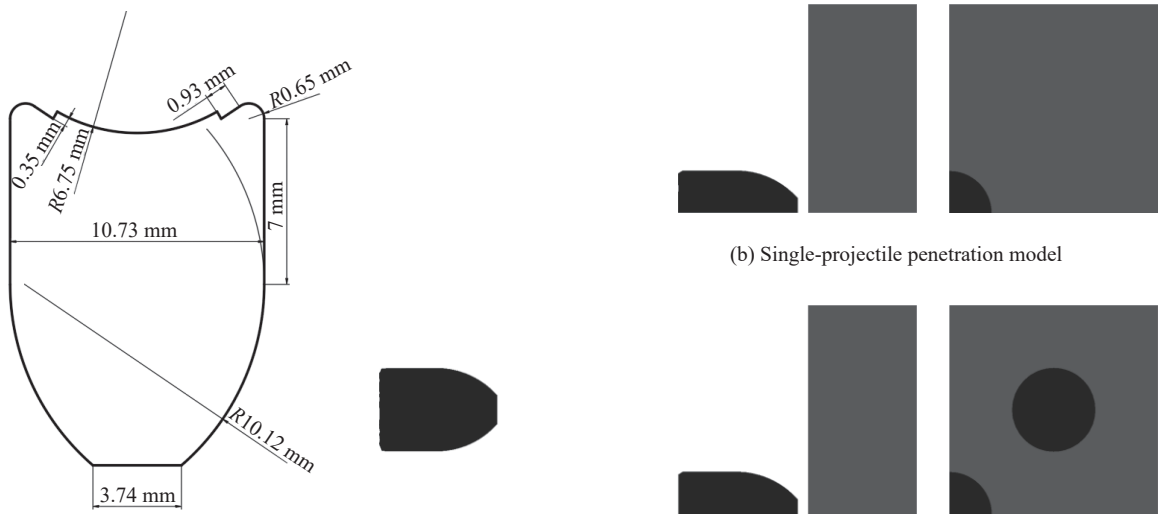
Fig. 1　Schematic diagram of 1/4 model construction for three interpenetrating TPMS structures

材料依靠自身碎裂实现弹体动能的耗散，而陶瓷与钛合金交界面处的滑移形变及界面开裂行为对整体能量吸收贡献极小。此外，由于本数值模型内陶瓷与钛合金的接触界面面积较大、拓扑关系复杂，为兼顾仿真精度与运算效率，本次分析忽略陶瓷-金属界面效应，界面间不会发生滑移开裂，当界面单元失效时，该约束同步失效。基于上述假设，复合靶内陶瓷与金属的相邻网格单元采用共节点方式处理[20]。

所有的网格单元均采用 C3D10M 网格单元。与线性四面体单元（C3D4）相比，C3D10M 单元可以提供更好的收敛性、更高的数值精度和更稳定的应力-应变输出[37−39]。C3D10M 是一种二阶修正单元类型，由 10 个节点（4 个角节点和 6 个中边节点）组成。这种设计使其能够克服与完全集成的元件相关的潜在剪切锁定问题，同时对不可压缩材料中的体积锁定保持相对敏感。考虑到网格的尺寸效应，为兼顾计算精度与效率，同时保证不同结构之间的可比性，统一采用 0.30 mm 的网格。

1/4 TPMS 穿插靶板尺寸为 20 mm×20 mm×10 mm，面密度为 34.52 kg/m^2，所有穿插靶板的尺寸相同、面密度相同。同时，本研究还采用了纯碳化硅陶瓷靶板作为参考，其面密度与 TPMS 穿插靶板同为 34.52 kg/m^2，据此设定其尺寸为 20 mm×20 mm×10.74 mm。

采用仿 8 mm 柯尔特制式子弹，弹速为 350 m/s，子弹钢芯尺寸如图 2(a) 所示。为研究所构建的穿插式 TPMS 靶板的抗弹性能，构建了 2 种侵彻模型，分别为单弹侵彻和双弹侵彻。其中单弹侵彻模型中的弹体与靶体均采用 1/4 模型，双弹侵彻模型则是在单弹侵彻模型的基础上，于 1/4 靶板中心加入一发全弹侵彻，弹速同为 350 m/s。为保证第 2 发子弹侵彻发生在第 1 发子弹侵彻基本完成之后，将第 2 发子弹与靶板的初始距离设为 30 mm。2 种侵彻模型分别如图 2(b) 和图 2(c) 所示。



(a) Projectile model　　(b) Single-projectile penetration model　　(c) Double-projectile penetration model

图 2　2 种侵彻模型

Fig. 2　Two types of penetration models

1.2　材料模型及参数

在数值模拟中，采用 JH-2 模型[40] 描述 SiC 陶瓷的材料属性，标准等效应力σ^*的表达式为

$$\sigma^* = \sigma_{\mathrm{i}}^* - D(\sigma_{\mathrm{i}}^* - \sigma_{\mathrm{f}}^*) \tag{4}$$

式中：σ_{i}^*为完整材料的无量纲等效应力；σ_{f}^*为损伤材料的无量纲等效应力；D为损伤，在 0～1 之间变化。3 个无量纲等效应力的表达式如下

$$\sigma^* = \sigma/\sigma_{\mathrm{HEL}} \tag{5}$$

$$\sigma_{\mathrm{i}}^* = A(p^* + T_{\max}^*)^N(1 + C\ln\dot{\varepsilon}^*) \tag{6}$$

$$\sigma_{\mathrm{f}}^* = Bp^{*M}(1 + C\ln\dot{\varepsilon}^*) \tag{7}$$

式中：σ为实际等效应力；σ_{HEL}为 Hugoniot 弹性极限应力；p^*为无量纲压力，由$p^*=p/p_{\mathrm{HEL}}$给出，其中p为实际压力，p_{HEL}为在 Hugoniot 弹性极限处的压力；$T^*_{\max}$为无量纲最大拉伸静水压，由$T^*_{\max}=T_{\max}/T_{\mathrm{HEL}}$给出，其中$T_{\max}$为材料能承受的最大拉伸静水压力，$T_{\mathrm{HEL}}$为材料在 Hugoniot 弹性极限处的拉伸静水压力；$\dot{\varepsilon}^*=\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0$为无量纲应变率，其中$\dot{\varepsilon}$为实际应变率，$\dot{\varepsilon}_0$为参考应变率；$A$、$B$、$C$、$M$和$N$为材料常数。

材料的损伤D定义为塑性应变与损伤应变之比，表达式为

$$D=\sum\frac{\Delta\varepsilon^{\mathrm{p}}}{\varepsilon_{\mathrm{f}}^{\mathrm{p}}}=\sum\frac{\Delta\varepsilon^{\mathrm{p}}}{d_1\left(p^*+T^*_{\max}\right)^{d_2}} \tag{8}$$

式中：$\Delta\varepsilon^{\mathrm{p}}$为一个增量步中塑性应变的变化量，$\varepsilon_{\mathrm{f}}^{\mathrm{p}}$为恒定压力下的断裂应变，$d_1$、$d_2$为材料常数。

断裂开始前（$D=0$时）的静水压力为

$$p=K_1\mu+K_2\mu^2+K_3\mu^3 \tag{9}$$

式中：K_1、K_2、K_3均为参数，K_1为体积模量；$\mu=\rho/\rho_0-1$，ρ为当前材料密度，ρ_0为初始材料密度。当$\mu<0$及应力为拉伸应力时，式 (9) 由$p=K_1\mu$代替。本研究的数值模拟中采用的 SiC 陶瓷材料参数如表 1[41]所示，其中，G为剪切模量。

表 1　SiC 陶瓷的 JH-2 模型参数[41]

Table 1　JH-2 model parameters for silicon carbide ceramics[41]

ρ/(kg·m^{-3})	G/GPa	A	B	C	M	N	σ_{HEL}/GPa	d_1	d_2	K_1/GPa	K_2/GPa	K_3/GPa
3 215	193	0.96	0.35	0.009	1	0.65	11.7	0.48	0.48	220	361	0

在模拟中子弹选用的材料为 T12A 钢，其与 TC4 合金均采用包含动态损伤的 Johnson-Cook（J-C）本构模型[42−43]描述。在该模型中，等效的应力-应变关系为

$$\sigma_{\mathrm{s}}=\left(A_0+B_0\varepsilon^{N_0}\right)\left(1+C_0\ln\frac{\dot{\varepsilon}^{\mathrm{p}}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)\left(1-T^{*M_0}\right) \tag{10}$$

式中：A_0、B_0、C_0、M_0、N_0均为材料常数，A_0为屈服强度，B_0为硬化参数，C_0为应变率敏感系数；ε^{p}为塑性应变，$\dot{\varepsilon}^{\mathrm{p}}$为塑性应变率，参考应变率$\dot{\varepsilon}_0$通常取为 1.0 s^{-1}；$T^*=(T-T_{\mathrm{r}})/(T_{\mathrm{m}}-T_{\mathrm{r}})$为无量纲温度，其中$T$为当前温度，$T_{\mathrm{r}}$为室温，$T_{\mathrm{m}}$为材料熔点。单元损伤定义为

$$\omega=\sum\frac{\Delta\varepsilon^{\mathrm{p}}}{\varepsilon_{\mathrm{f}}^{\mathrm{p}}} \tag{11}$$

式中：ω为材料的损伤系数，其值在 0～1 之间变化，当$\omega=1$时材料失效。

当前状态下的失效应变$\varepsilon_{\mathrm{f}}^{\mathrm{p}}$表示为

$$\varepsilon_{\mathrm{f}}^{\mathrm{p}}=\left(D_1+D_2\mathrm{e}^{D_3\lambda}\right)\left(1+D_4\ln\frac{\dot{\varepsilon}^{\mathrm{p}}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)\left(1+D_5T^*\right) \tag{12}$$

式中：λ为静水压力与等效应力之比，D_1、D_2、D_3、D_4、D_5为材料参数。T12A 钢与 TC4 的材料参数见表 2，其中，E为杨氏模量。

表 2　T12A 钢与 TC4 合金的 Johnson-Cook 模型参数

Table 2　Johnson-Cook model parameters for T12A steel and TC4 alloy

Material	ρ/(kg·m^{-3})	E/GPa	A_0/MPa	B_0/MPa	N_0	M_0
T12A	7 850	210	1 540	477	0.16	1.0
TC4	4400	110	1 030	952	0.40	0.8
Material	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	$\dot{\varepsilon}_0$/s^{-1}
T12A	1.4	0	0	0	0	1.0
TC4	−0.2	0.25	0.2	0.014	3.87	1.0

本研究采用商用有限元程序 ABAQUS/Explicit 进行数值模拟。根据之前的研究[24]，弹丸与靶板之间采用通用接触，接触界面处的摩擦系数设置为 0.4。

1.3　数值模拟可靠性验证

利用文献 [16] 中的 12.7 mm 穿甲燃烧弹侵彻 SiC 陶瓷/6082 铝合金后效应靶实验，验证仿真模型的可靠性，侵彻模型如图 3(a) 所示。SiC 陶瓷靶尺寸为 150 mm×150 mm×5 mm，后效应铝靶尺寸为 ⌀240 mm×250 mm。为加快计算速度，采用 1/4 模型。子弹的初速度为 859.56 m/s，陶瓷与铝靶之间采用 Tie 接触固定。

数值模拟得到的侵彻过程如图 3(b) 所示。初始阶段，子弹撞击陶瓷靶后迅速形成陶瓷锥，紧接着陶瓷失效破碎，弹头随侵彻深入发生钝化，进入铝靶后形成明显的空化现象。侵彻完毕后，子弹在靶中的侵深为 90 mm，实验中靶板的侵彻深度为 85 mm[16]，两者偏差在 6% 以内，可以认为本研究的数值模拟可靠。产生偏差的原因可能是未考虑陶瓷靶与后效应靶间的黏结剂、忽略了子弹的包覆层和铅层等。

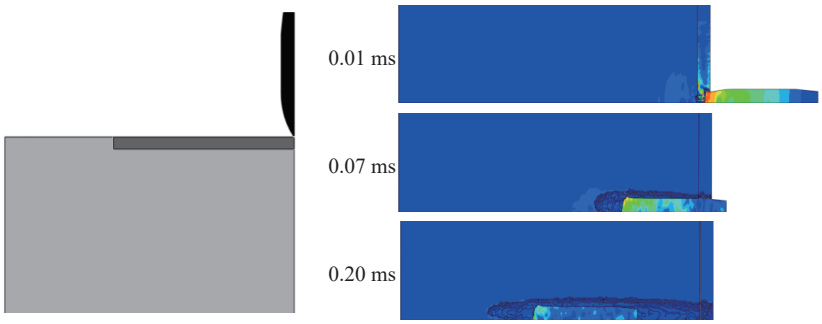


图 3　侵彻模型和侵彻过程

Fig. 3　Penetration model and penetration process

考虑到网格尺寸效应，对纯 SiC 靶板进行了网格收敛性分析。计算了 0.35、0.30、0.25、0.20 mm 4 种网格尺寸下子弹的侵彻深度。结果表明，随着网格的加密，侵彻深度趋于常值。0.35 与 0.30 mm 网格尺寸下侵彻深度的相对误差为 2.5%，考虑到网格加密导致计算时长大幅度增加，可认为 0.30 mm 网格已足够收敛[20]。为保证不同结构之间具有可比性，不同结构均采用 0.30 mm 的网格尺寸。

2　结果与讨论

基于构建的数值模型，开展了在单弹侵彻/双弹侵彻工况下纯 SiC 和 3 种穿插式 TPMS 结构损伤破坏效应的数值模拟，对比分析了靶板的损伤破坏模式、侵彻深度和极限穿透速度。

2.1　损伤破坏模式

在冲击载荷下，穿插式 TPMS 结构的动态力学性能受到多种因素的影响，这些因素主要源自不同 TPMS 的拓扑结构和不同的侵彻工况。图 4 展示了正视、俯视、仰视 3 个视角下，t=4.8 μs 时纯 SiC 的应力分布情况。

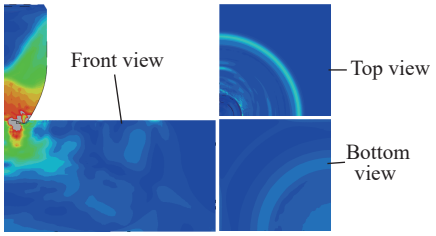


图 4　应力云图视角示意图

Fig. 4　Schematic diagram of the stress contour plot

图 5 展示了纯 SiC 在单弹侵彻/双弹侵彻 2 种工况下不同时刻的应力分布和损伤破坏模式。可以看出：t=4.8 μs 时，弹头与靶板接触点出现显著的应力集中，应力波由着弹点向四周呈均匀环形扩散；t=60.0 μs 时侵彻结束，可观察到陶瓷锥的形成，同时弹头因冲击应力产生凹陷。第 2 发弹丸的侵彻在第 1 发弹孔处诱发更大面积的破坏，显著扩展和加深已形成的陶瓷锥，同时在靶板边界形成更多裂纹，这种损伤模式与宗香华等[44] 研究的混凝土受多发弹丸打击的损伤演化现象类似。

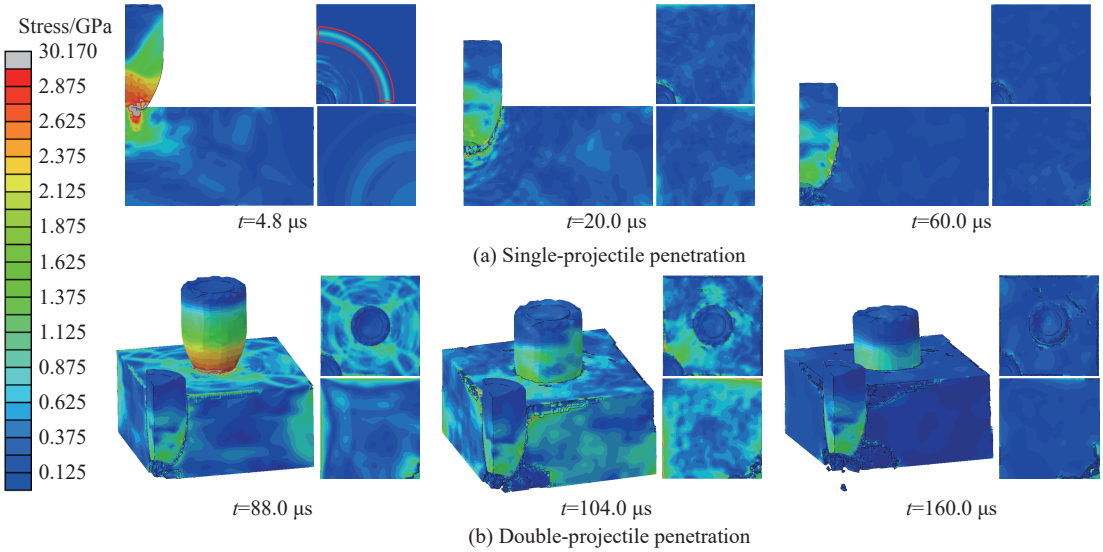


图 5　纯 SiC 在单弹侵彻/双弹侵彻工况下的应力云图

Fig. 5　Stress contours of the pure SiC under single-projectile and double-projectile penetration conditions

相比均质 SiC, 穿插式 TPMS 复杂的拓扑结构使其在子弹侵彻下的应力分布和损伤破坏更加复杂。图 6、图 7、图 8 分别展示了 D 型、N 型和 P 型穿插式 TPMS 靶在单弹侵彻/双弹侵彻下不同时刻的应力云图和损伤破坏模式。可以看出, t=4.8 μs 时应力波仍大致以环形扩散, 但相比于均质 SiC 中完整、规律的应力波, 3 种穿插 TPMS 结构在传播路径上出现明显的低应力区。在 SiC 与 TC4 的交界面处采用共节点处理能够保证应力波可跨界面传播, 因此, 这种低应力区的形成可用应力波理论解释。(1) 由于 2 种材料的波阻抗不同, 当加载压缩波由高阻抗的 SiC 向低阻抗的 TC4 中传播时将发生透射与反射。透射进入 TC4 的压缩波幅值将大幅衰减, 导致 TC4 部分低应力区产生; 反射产生的卸载拉伸波与加载压缩波叠加会使 SiC 中的应力下降, 在 SiC 中形成低应力区。(2) TC4 中的应力波波速小于 SiC, 使得 SiC 中应力波超前于 TC4, 导致 TC4 中的应力低于周围的 SiC, 形成观察到的低应力区。

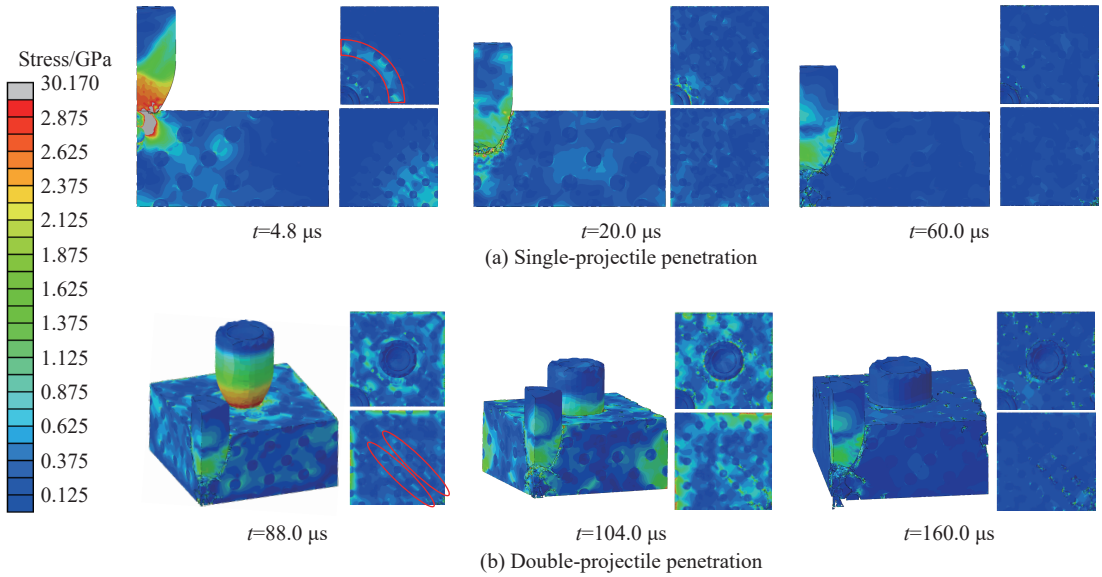


图 6　D 型 TPMS 穿插靶在单弹侵彻/双弹侵彻工况下的应力云图

Fig. 6　Stress contours of D-shaped TPMS interpenetrating target under single-projectile and double-projectile penetration conditions

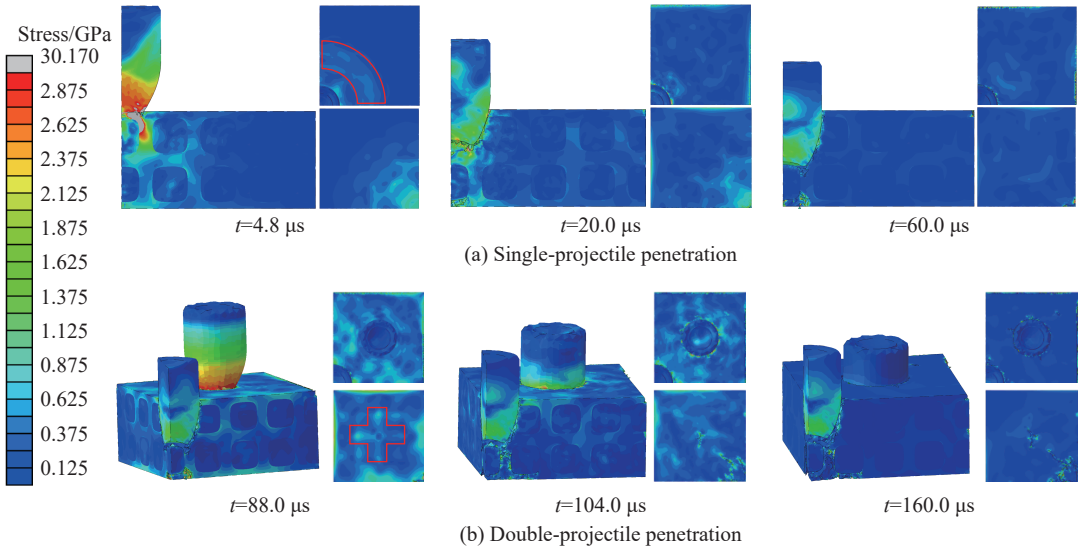


图 7　N 型 TPMS 穿插靶在单弹侵彻/双弹侵彻工况下的应力云图

Fig. 7　Stress contours of N-shaped TPMS interpenetrating target under single-projectile and two-projectile penetration conditions

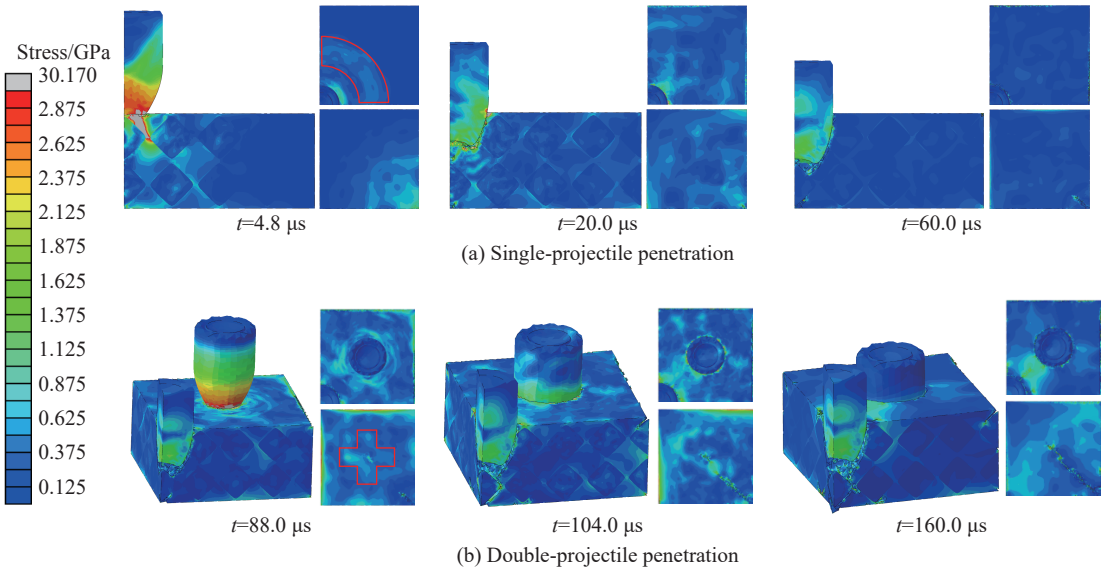


图 8　P 型 TPMS 穿插靶在单弹侵彻/双弹侵彻工况下的应力云图

Fig. 8　Stress contours of P-shaped TPMS interpenetrating target under single-projectile and double-projectile penetration conditions

观察 t=4.8 μs 时纯 SiC 的云图可以看出，一圈应力远高于周围的前沿压缩波，这是由于初始冲击时冲击速度最高、接触压强峰值最大。对比此时纯 SiC 与 3 种穿插式结构的应力波发现，相较于纯 SiC 中波面窄、应力高、边缘锐利的前沿压缩波，穿插式结构的前沿压缩波的波面更宽、应力更低、边缘更模糊，且传播距离更短。这是由于穿插式结构中 TC4 相的三维复杂拓扑结构产生反射波叠加，使得应力波不断被切割、弥散，拓宽波面，模糊边缘，且 N 型与 P 型结构的 TC4 部分反射面积更大，导致波面扩展更加明显；当应力波经过界面时均会产生透射与反射，进入 TC4 中的应力波会产生塑性耗能，无法再维持像纯 SiC 一样极高的环形应力，进一步削弱了前沿压缩波的能量；应力波传播速度减慢则是由于穿插式结构中波速低的 TC4 使得靶板整体等效波速降低。穿插结构对应力波的弥散、削弱作用阻止了高应力的传播，使后续损伤演化模式与均质陶瓷形成差异。

t=60.0 μs 时，3 种结构均形成了类似陶瓷锥的结构，靶板的破碎更细碎均匀，损伤更加集中于侵彻区域[23]，未产生明显的横向裂纹。这得益于穿插结构中 TC4 相的存在，其与 SiC 的界面使裂纹偏转、分

支，阻碍了裂纹的生长；且相较于纯 SiC 仅依靠脆性机制吸能，穿插结构中的 TC4 提供了额外的塑性吸能机制，使得承受冲击后的结构更加完整，这在第 2 发子弹侵彻完成后更加明显。不同拓扑结构的 TPMS 穿插板呈现出各异的破碎模式：D 型穿插 TPMS 的陶瓷破碎更为细碎和集中，仰视图中未见侵彻区外裂纹；N 型穿插 TPMS 的应力集中和类陶瓷锥结构更为显著，且在两侧约束边界均产生微裂纹；P 型穿插 TPMS 的俯视图中可见一条明显的主裂纹。

第 2 发弹丸侵彻进一步加剧了结构损伤，并显著放大了不同穿插式 TPMS 结构在应力分布与损伤模式上的差异。t=88.0 μs 时，3 种结构的背板呈现不同的应力分布：D 型穿插 TPMS 结构呈现出沿对角线对称的双直线形应力集中，N 型和 P 型穿插 TPMS 则呈现十字形应力集中。这与它们的拓扑结构息息相关，N 型与 P 型相似的拓扑结构导致了其面对侵彻时应力分布的相似性。随着侵彻过程的发展，t=160.0 μs 时，不同结构的损伤模式呈现显著差异：D 型穿插 TPMS 形成双直线形裂纹，N 型和 P 型穿插 TPMS 形成沿 2 发弹着点连线的单条裂纹。观察此时首发弹孔的损伤发现，相比于均质 SiC 靶，3 种穿插 TPMS 靶的裂纹扩展和损伤加剧更不明显，表明在穿插靶中第 2 发弹丸对侵彻区域外的影响更小，进一步验证了 TPMS 结构限制侵彻损伤范围的能力。

2.2　侵彻深度

图 9 给出了初速度为 350 m/s 的单弹侵彻工况下 4 种结构的侵彻深度。在单弹侵彻工况下，相比纯 SiC，3 种 TPMS 穿插板的侵深均有所降低，其中 P 型 TPMS 的侵深降低了 3.1 mm，N 型和 D 型分别降低 2.6 和 2.2 mm。该现象表明设计的穿插式 TPMS 结构相较纯陶瓷的抗弹性能有所提升，且 P 型穿插式 TPMS 结构对弹速为 350 m/s 的子弹表现出更好的抗弹性能。

图 10 给出了双弹侵彻工况下每发子弹的侵彻深度。可以看出，对于 3 种 TPMS 穿插结构，第 2 发子弹的侵深均高于第 1 发子弹。其中，相较于第 1 发子弹，P 型、N 型、D 型 TPMS 穿插板的侵深分别增加 28.2%、17.0% 和 14.0%。这表明：虽然 P 型 TPMS 结构在面对单弹侵彻时抗弹性能优异，但面对第 2 发来袭子弹时抗弹性能下降得最为明显；而 D 型 TPMS 结构在面对双弹侵彻时侵彻深度变化较小，抗弹性能更为稳定。

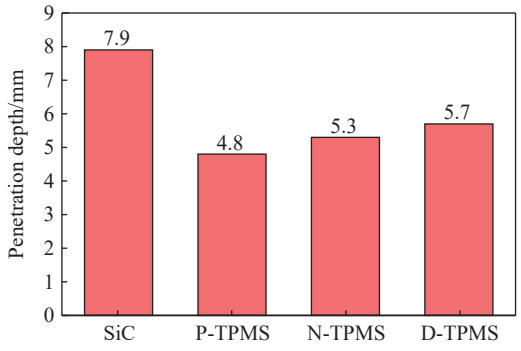


图 9　单弹以 350 m/s 速度侵彻不同结构的侵深对比

Fig. 9　Comparison of penetration depth for different structures under single projectile at 350 m/s

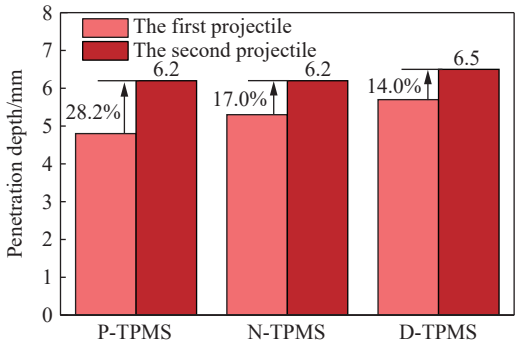


图 10　双弹以 350 m/s 速度侵彻不同结构的侵深对比

Fig. 10　Comparison of penetration depth for different structures under double projectiles at 350 m/s

2.3　弹道极限速度

弹道极限速度作为评估防弹材料性能的核心指标[45]，具有至关重要的物理意义。它指子弹穿透靶板的概率为 50% 时对应的最低冲击速度，其物理意义在于量化材料在动态载荷下的能量吸收阈值，在防弹衣、装甲车辆和航天器防护罩等领域有着广泛的应用。为得到穿插靶板的弹道极限速度，采用一系列不同初速度的子弹侵彻靶板，得到一组初速度-剩余速度数据，运用 Ipson 等[46] 提出的 R-I 公式进行拟合，得到弹道极限速度

$$v_{\mathrm{r}} = a\left(v_{\mathrm{i}}^{P} - v_{50}^{P}\right)^{\frac{1}{P}} \tag{13}$$

式中：v_r 为剩余速度，v_i 为来袭子弹的初速度，v_{50} 为弹道极限速度，a 和 P 均为待定的拟合参数。通过对 4 种结构的剩余速度进行拟合，得到各个靶板的弹道极限速度，如图 11 所示，3 种穿插式 TPMS 板的拟合参数如表 3 所示。

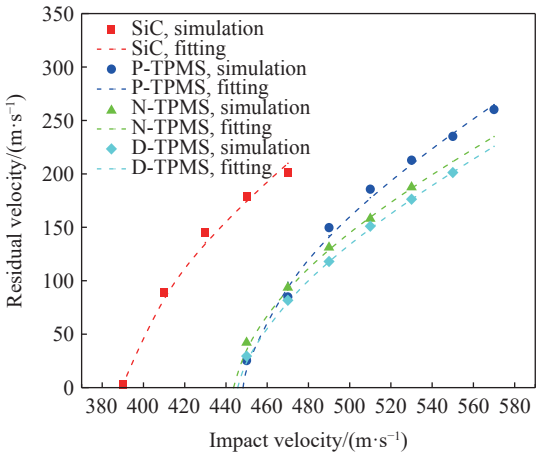


图 11　4 种靶板的弹道极限速度拟合曲线

Fig. 11　Fitting curves of the ballistic limit velocity for four target plates

由图 11 可知，3 种 TPMS 结构的弹道极限速度均高于纯 SiC 靶板，说明 SiC 中的 TC4 结构提升了装甲的抗弹效果。3 种 TPMS 靶板的弹道极限速度相近，差距不超过 1%。观察不同拓扑结构的穿插式 TPMS 靶对不同初速度来袭子弹的剩余速度发现：当初速度高于靶板的弹道极限速度但低于 452.8 m/s 时，P 型 TPMS 穿插靶的剩余速度最小；但随着入射速度的增加，P 型靶剩余速度的增加速率高于其他 2 个类型的靶板；当入射速度高于 462.2 m/s 时，P 型靶的剩余速度超过 N 型靶，成为剩余速度最高的穿插式 TPMS 靶，而入射速度高于 452.8 m/s 时，D 型靶成为剩余速度最低的穿插式 TPMS 靶。

通过上述结论和图 11 中的斜率可以看出：在超过弹道极限速度但弹速较低的情况下，P 型靶具有更好的抗弹性能；而面对高速来袭子弹时，P 型靶的剩余速度快速上升，抗弹性能快速下降，此时 D 型靶反而具有更好的抗弹性能。这是由于，D 型结构中的 TC4 部分呈网状分布，在 SiC 中形成了强力的侧向约束，使陶瓷破碎得更加均匀细碎；而 P 型结构面对高速侵彻时背部的 SiC 破碎，TC4 颗粒作为整体被推出 SiC，无法有效消耗子弹动能，导致剩余速度偏高。

表 3　3 种穿插式 TPMS 结构的拟合参数

Table 3　Fitting parameters of three interpenetrating TPMS structures

Target type	a	P	v_{50}/(m·s^{-1})
D	0.75	1.69	445.69
N	0.72	1.80	443.69
P	0.82	1.83	448.31

3　结论与展望

开展了 3 种不同拓扑结构的穿插式 TPMS 靶板在单弹/双弹侵彻工况下的数值模拟研究，通过与纯 SiC 板对比，探讨了损伤破坏模式、侵彻深度和弹道极限速度的差异，并采用应力波理论、裂纹演化理论，从机理的角度解释了现象的成因，得到以下主要结论。

(1) 面对侵彻时，穿插式 TPMS 靶板的应力分布不同于纯 SiC 靶板，结构中 TC4 对应力波的反射和透射将前沿压缩波切割、弥散，使靶板中的应力分布更加均匀，削弱了应力峰值，减少了应力集中。3 种 TPMS 结构间由于不同的拓扑结构产生不同的应力分布和损伤破坏模式。

(2) 相比于纯 SiC 靶板，3 种穿插式 TPMS 靶板面对 350 m/s 子弹侵彻时，陶瓷破碎得更加细碎，损伤区域更为集中，侵彻深度更浅，弹道极限速度更高，因此，3 种结构均具有更优的抗弹性能。

(3) 对于 350 m/s 子弹，第 2 发子弹的损伤演化沿第 1 发子弹侵彻后靶体损伤区域继续发展，加剧了 3 种结构损伤破坏模式的差异。N 型和 D 型靶板面对第 2 发弹丸侵彻时侵彻深度提升得并不明显，表明该结构具有抗多弹打击能力，其中 D 型结构抗多弹打击能力最优。

(4) 当子弹可击穿靶板时，面对低速侵彻，P 型结构的抗弹能力最优；面对高速侵彻，D 型结构的抗弹性能最优。

针对本研究提出的 3 种穿插式 TPMS 结构的制造工艺，依据不同拓扑结构和现有制造工艺提出了 2 种可行的制造方案，具体方法细节还需在将来的制备中进一步探索。

(1) D 型穿插式 TPMS 结构：首先，采用数字光处理 3D 打印技术制造结构中的 SiC 胚体[30]，经脱脂、高温烧结后得到 SiC 预制体；然后，将得到的 SiC 部分放入石墨模具中固定；接着，在真空或保护气氛下注入熔融态的 TC4；最后，保温静置得到穿插式 TPMS 结构。

(2) P/N 型穿插式 TPMS 结构：首先，浇注得到需要的 TC4 颗粒，用精密模具将其按构型规则排布；然后，将 SiC 粉体均匀填充入 TC4 颗粒间隙；接着，在真空或保护气氛下利用放电等离子烧结或热压烧结使陶瓷致密化；最后，经过冷却、打磨、抛光，获得穿插式 TPMS 结构。

本研究构建的 D 型结构属于陶瓷-金属构成的互穿相复合材料，其先制造陶瓷体再注入熔融金属的工艺为该种材料的常见制备步骤[47−48]，本研究的结构中，其难点主要在 SiC 胚体的质量缺陷控制和注入 TC4 后产生热应力的处理等；构建的 P/N 型结构工艺难点主要在于陶瓷粉体的填充间隙控制和高温烧结在陶瓷-金属界面产生的脆性界面反应层等。

参考文献：

[1] 黄雪刚, 赵忠民, 张龙, 等. TiC-TiB_2 细晶陶瓷装甲抗钨合金长杆动能弹侵彻试验 [J]. 特种铸造及有色合金, 2011, 31(10): 891–894.
HUANG X G, ZHAO Z M, ZHANG L, et al. Investigation of fine-grained TiC-TiB_2 ceramic armor for defeating long-rod kinetic-energy tungsten alloy penetrator [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2011, 31(10): 891–894.

[2] 龚宣丞. 陶瓷复合材料装甲抗侵彻性能研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2020: 1−4.
GONG X C. Research on the anti-penetration performance of ceramic composite armor [D]. Changsha: Hunan University, 2020: 1−4.

[3] 孙金贵, 厉承森, 李宗家, 等. 装甲用陶瓷及高性能纤维复合材料的应用与发展 [J]. 合成纤维, 2025, 54(9): 50–56, 91.
SUN J G, LI C S, LI Z J, et al. Application and development of ceramic and high performance fiber composites for armor [J]. Synthetic Fiber in China, 2025, 54(9): 50–56, 91.

[4] 戴俊宏, 李宗家, 李年华. 抗 87 式 5.8 mm 普通弹防弹插板的研究与制备 [J]. 合成纤维, 2024, 53(3): 20–25, 59.
DAI J H, LI Z J, LI N H. Research and preparation of bulletproof insert board with resistance to type 87 5.8 mm ordinary bullets [J]. Synthetic Fiber in China, 2024, 53(3): 20–25, 59.

[5] 邹有纯, 熊超, 殷军辉, 等. 陶瓷/钛合金复合装甲抗侵彻性能优化设计研究 [J]. 兵器装备工程学报, 2024, 45(10): 69–74.
ZOU Y C, XIONG C, YIN J H, et al. Study on optimal design of penetration resistance of ceramic/titanium alloy composite armor [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2024, 45(10): 69–74.

[6] 刘倩利. 装甲陶瓷的界面击溃效应物质点法分析 [D]. 西安: 西安理工大学, 2024: 1−4.
LIU Q L. Analysis of interfacial defeat effect of armor ceramics bymaterial point method [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2024: 1−4.

[7] 陈智勇, 徐颖强, 高飞, 等. 轻质陶瓷复合装甲研究进展 [J]. 中国陶瓷, 2025, 61(5): 1–10.
CHEN Z Y, XU Y Q, GAO F, et al. Research progress in lightweight ceramic composite armor [J]. China Ceramics, 2025, 61(5): 1–10.

[8] 杨佳蕊. 双连续 (SiC-Si_3N_4)/Al 梯度复合材料制备及性能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2025: 3−5.
YANG J R. Preparation and properties of co-continuous (SiC-Si_3N_4)/Al gradient composite materials [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2025: 3−5.

[9] TAN M T, ZHANG X F, XIONG W, et al. Influence of layered back plate on the ballistic performance of ceramic armor [J]. Composite Structures, 2023, 308: 116688.

[10] 陆文成, 武一丁, 余毅磊, 等. 不同厚度比的 SiC 陶瓷-纤维增强树脂基复合材料装甲的损伤失效及其抗弹性能 [J]. 复合材料学报, 2025, 42(2): 1125–1139.
LU W C, WU Y D, YU Y L, et al. Damage failure and ballistic performance of SiC ceramic-fiber reinforced resin-based composite armor with different thickness ratios [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2025, 42(2): 1125–1139.

[11] 代春泉, 矫维成, 金浩正, 等. 拼接式陶瓷复合装甲的研究现状及发展趋势 [J]. 复合材料学报, 2025, 43(4): 1927–1957.
DAI C Q, JIAO W C, JIN H Z, et al. Research status and development trends of modular ceramic composite armor [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2025, 43(4): 1927–1957.

[12] 尹飞, 纪伟, 王智慧. 陶瓷复合装甲的研究现状及发展 [J]. 兵器材料科学与工程, 2024, 47(1): 106–111.
YIN F, JI W, WANG Z H. Research status and development of ceramic composite armor [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2024, 47(1): 106–111.

[13] STANISLAWEK S, MORKA A, NIEZGODA T. Pyramidal ceramic armor ability to defeat projectile threat by changing its trajectory [J]. Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences, 2015, 63(4): 843–849.

[14] LIU P, ZHU D J, YAO Y M, et al. Numerical simulation of ballistic impact behavior of bio-inspired scale-like protection system [J]. Materials & Design, 2016, 99: 201–210.

[15] GUO Y L, WU Y, ZHANG G X, et al. Penetration resistance of honeycomb ceramic matrix composites with filler material [J]. Ceramics International, 2024, 50(21): 41590–41602.

[16] GAO Y X, WANG X, WANG Y T, et al. Penetration resistance of bioinspired nacre-like SiC ceramic/ASP polyurea structure under projectile impact loading: experiment and simulation [J]. Thin-Walled Structures, 2025, 208: 112812.

[17] TIAN C, AN X Y, SUN Q T, et al. Experimental and numerical analyses of the penetration resistance of ceramic-metal hybrid structures [J]. Composite Structures, 2019, 211: 264–272.

[18] 张茂哲, 王智慧, 纪伟, 等. 约束陶瓷复合装甲的研究进展 [J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2024, 29(4): 255–262.
ZHANG M Z, WANG Z H, JI W, et al. Research progress on confined ceramic composite armor [J]. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy, 2024, 29(4): 255–262.

[19] ZHANG L H, SUN X, ZHANG X Y, et al. Penetration resistance of corrugated hybrid structures with ceramic insertions against steel projectile impact [J]. Ceramics International, 2024, 50(11): 19148–19162.

[20] 陈铭, 张永亮, 郑航, 等. 陶瓷球金属复合结构的抗弹性能和梯度设计 [J]. 高压物理学报, 2021, 35(5): 054201.
CHEN M, ZHANG Y L, ZHENG H, et al. Ballistic performance analysis and gradient optimization design of ceramic ball and metal composite armor [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2021, 35(5): 054201.

[21] QIU N, WAN Y H, SHEN Y J, et al. Experimental and numerical studies on mechanical properties of TPMS structures [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2024, 261: 108657.

[22] 王广阳, 纪小刚, 牛国法, 等. 异构 TPMS 点阵结构的渐进变形和吸能特性 [J/OL]. 机械科学与技术 (2025-10-22) [2026-03-30]. https://link.cnki.net/doi/10.13433/j.cnki.1003-8728.20250101.
WANG G Y, JI X G, NIU G F, et al. Progressive deformation and energy absorption characteristics of a heterogeneous TPMS lattice structure [J/OL]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering (2025-10-22) [2026-03-30]. https://link.cnki.net/doi/10.13433/j.cnki.1003-8728.20250101.

[23] 谢钟洋, 杨春浩, 马吴宁. TPMS 结构抗侵彻性能数值研究 [J]. 弹道学报, 2025, 37(1): 104–112.
XIE Z Y, YANG C H, MA W N. Numerical study on anti-penetration performance of TPMS structure [J]. Journal of Ballistics, 2025, 37(1): 104–112.

[24] EJEH C J, BARSOUM I, ABU AL-RUB R K. Impact behavior of periodic, stochastic, and anisotropic minimal surface-lattice sandwich structures [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2024, 276: 109359.

[25] YASSINE M, ALMASKARI F, ZAKI W. Low-speed impact penetration characterization of sheet-based triply periodic minimal surfaces [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2025, 303: 110561.

[26] QIN H J, HOU H, XU C Y, et al. Effects of manufacturing defects and microstructure on the tensile and low cycle fatigue behavior of selective laser melting IN718 TPMS structures [J]. Thin-Walled Structures, 2026, 222: 114528.

[27] 杜恒愷. 泡沫增强 TPMS 点阵结构力学与吸能性能研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2023: 2, 13−15.
DU H K. Study on mechanical properties and energy absorption properties of foam-reinforced TPMS lattice structure [D]. Chongqing: Chongqing University, 2023: 2, 13−15.

[28] NOVAK N, AL-KETAN O, MAUKO A, et al. Quasi-static and impact behaviour of polymer-metal interpenetrating phase TPMS composites [J]. Composite Structures, 2025, 366: 119225.

[29] SINGH A, AL-KETAN O, KARATHANASOPOULOS N. Hybrid manufacturing and mechanical properties of architected interpenetrating phase metal-ceramic and metal-metal composites [J]. Materials Science and Engineering: A, 2024, 897: 146322.

[30] SANTOS S, MATOS C, DUARTE I, et al. Effect of TPMS reinforcement on the mechanical properties of aluminium-alumina interpenetrating phase composites [J]. Progress in Additive Manufacturing, 2025, 10(2): 1187–1199.

[31] XIAO L J, LI Y N, ZHU Y L, et al. Tension-compression asymmetry in triply periodic minimal surface lattice structures [J]. Thin-Walled Structures, 2026, 220: 114351.

[32] MICHIELSEN K, KOLE J S. Photonic band gaps in materials with triply periodic surfaces and related tubular structures [J]. Physical Review B, 2003, 68(11): 115107.

[33] 李毅, 王晓强, 易文珏, 等. 不同体积分数 Primitive 点阵结构的 AlMgScZr 合金力热性能研究 [J]. 稀有金属材料与工程, 2026, 55(2): 406–418.
LI Y, WANG X Q, YI W J, et al. Mechanical and thermal properties of AlMgScZr alloy with primitive lattice structure of different volume fractions [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2026, 55(2): 406–418.

[34] 范小杰. 激光选区熔化钛合金梯度多孔仿生骨结构性能研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2021: 11−13.
FAN X J. Study on the properties of the Ti6Al4V graded-porous bionic structures fabricated by laser selective melting [D]. Chongqing: Chongqing University, 2021: 11−13.

[35] AL-KETAN O, ABU AL-RUB R K, ROWSHAN R. Mechanical properties of a new type of architected interpenetrating phase composite materials [J]. Advanced Materials Technologies, 2017, 2(2): 1600235.

[36] AL-KETAN O, ABU AL-RUB R K. MSLattice: a free software for generating uniform and graded lattices based on triply periodic minimal surfaces [J]. Material Design & Processing Communications, 2021, 3(6): e205.

[37] CHU Y Y, XU J Y, WANG X C, et al. Experimental and numerical study on ballistic performance of a sandwich composite plate with biomimetic tendon basalt filament bundles (SCP-BTBFB) [J]. Thin-Walled Structures, 2026, 218: 113960.

[38] FENG G Z, LI S, XIAO L J, et al. Mechanical properties and deformation behavior of functionally graded TPMS structures under static and dynamic loading [J]. International Journal of Impact Engineering, 2023, 176: 104554.

[39] XIAO L J, XU X, FENG G Z, et al. Compressive performance and energy absorption of additively manufactured metallic hybrid lattice structures [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2022, 219: 107093.

[40] JOHNSON G R, HOLMQUIST T J. An improved computational constitutive model for brittle materials [J]. AIP Conference Proceedings, 1994, 309(1): 981–984.

[41] CRONIN D S, BUI K, KAUFMANN C, et al. Implementation and validation of the Johnson-Holmquist ceramic material model in LS-DYNA [C]//Proceedings of the 4th European LS-DYNA Users Conference. Germany, 2003.

[42] JOHNSON G R, COOK W H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures [J]. Engineering Fracture Mechanics, 1985, 21(1): 31–48.

[43] 杨睿. TC4/Kevlar/TC4 夹层板抗高速破片侵彻性能研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2022: 24−26.
YANG R. Research on penetration resistance of TC4/Kevlar/TC4 sandwich panels under high-speed fragments [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2022: 24−26.

[44] 宗香华, 王银, 孔祥振, 等. 错位多次打击下 UHPC 靶体损伤破坏效应的数值模拟研究 [J]. 高压物理学报, 2024, 38(3): 034201.
ZONG X H, WANG Y, KONG X Z, et al. Numerical investigation on damage and failure of UHPC targets subjected to dislocation multi-attacks [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2024, 38(3): 034201.

[45] 刘铁磊, 徐豫新, 王晓锋, 等. 钨合金球形破片侵彻低碳钢的弹道极限速度计算模型 [J]. 兵工学报, 2022, 43(4): 768–779.
LIU T L, XU Y X, WANG X F, et al. Ballistic limit calculation model of tungsten alloy spherical fragments penetrating into low carbon steel plate [J]. Acta Armamentarii, 2022, 43(4): 768–779.

[46] IPSON T W, RECHT R F. Ballistic-penetration resistance and its measurement [J]. Experimental Mechanics, 1975, 15(7): 249–257.

[47] SHEN J C, PAN Y, ZUO J Y. Study on thermal fatigue damage mechanisms for high-speed train's wheel-mounted brake disc considering multiaxial stress state [J]. Engineering Failure Analysis, 2025, 174: 109525.

[48] JI Q L, LI Y B, YE P H, et al. The effect of the interface structure on the interfacial bonding strength of Ti/Al clad plates [J]. Progress in Natural Science: Materials International, 2025, 35(3): 568–577.

Numerical Simulation on Anti-Penetration Performance of SiC/Ti-Alloy Interpenetrating TPMS Structures

ZHOU Haotian[1], LI Yinan[1], QIN Bin[2], MENG Yuquan[1], SONG Weidong[1]

（1. *School of Mechatronics Engineering*, *Beijing Institute of Technology*, *Beijing* 100081, *China*;
2. *No.*208 *Research Institute of China Ordnance Industries*, *Beijing* 102202, *China*）

Abstract: Ceramic/metal composite materials were widely used in national defense, military industry, and aerospace fields as lightweight impact-resistant structures with high specific strength and high energy absorption efficiency. With the development of 3D printing technology, it has become possible to fabricate complex lattice structures based on triply periodic minimal surfaces (TPMS). In this paper, an interpenetrating TPMS ballistic composite structure composed of silicon carbide (SiC) ceramic and titanium alloy (TC4) is designed. A series of numerical simulations are carried out under single-projectile and double-projectile penetration conditions using ABAQUS software. The damage modes, penetration depth, and ballistic limit velocity of the proposed structure and pure SiC target plate are compared and analyzed. The simulation results show that different interpenetrating TPMS structures exhibit distinct damage and failure modes. The three-dimensional topological configuration restrains crack propagation inside the ceramic, resulting in slighter overall damage than the pure SiC target plate. The damage caused by the second projectile further propagates along the penetration region of the first projectile, and accompanied by an increase in penetration depth. Compared with the pure SiC target plate, the three interpenetrating TPMS targets present smaller penetration depth and higher ballistic limit velocity. When the projectile can perforate the target plate, the primitive (P-type) structure shows better ballistic performance against low-velocity projectiles, while the diamond (D-type) structure is superior against high-velocity projectiles. It is demonstrated that the interpenetrating TPMS targets possess better ballistic performance than pure SiC at the same area density. The technical support and theoretical basis can be provided for the design of novel lightweight ceramic armor in this study.

Keywords: triply periodic minimal surfaces structure; silicon carbide ceramic; ceramic matrix composite; anti-penetration performance; ballistic limit velocity