



TPMS 结构抗侵彻性能数值研究

谢钟洋,杨春浩*,马吴宁

(南京理工大学 机械工程学院,江苏 南京 210094)

摘要:作为一种具有出色力学性能和多功能特性的结构,点阵结构有高强度、高能量吸收等特点,为了研究三周期小曲面(TPMS)结构的抗侵彻性能,基于该结构的可设计性,建立 Diamond 型和 Gyroid 型的点阵结构模型,选择碳化硅陶瓷作为 TPMS 结构基体材料,利用 ABAQUS 有限元软件研究其抗侵彻性能。研究表明:在低速侵彻下,Diamond 结构吸收能量的效果显著,而 Gyroid 结构在撞击中产生的非对称力及弹头的磨蚀能有效改变侵彻角度。针对 Gyroid 结构,分别对不同弹着点、不同入射角度,以及提升靶板厚度等不同的工况进行了有限元仿真,通过仿真结果分析了入射角度变化对 Gyroid 结构抗侵彻性能的影响,发现其射出角度的偏转程度随着入射角度的增大,呈现先减小后增大的趋势。另外,当弹丸冲击 Gyroid 结构凹陷的螺旋曲面时,会明显改变弹丸的射出角度。将 Gyroid 结构的厚度提升 50%后,发现弹丸的射出角度变化提升 176.92%,靶板吸收的能量提升 78.26%。Gyroid 结构通过自身独特的曲面结构能够有效改变弹丸的运动姿态,研究结果对轻量化装甲设计有一定的参考意义。

关键词:三周期小曲面结构;陶瓷;抗侵彻性能;有限元模拟

中图分类号:TJ03 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-499X(2025)01-0104-09

Numerical Study on Anti-penetration Performance of TPMS Structure

XIE Zhongyang, YANG Chunhao*, MA Wuning

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

Abstract: As a structure with excellent mechanical properties and multifunctional characteristics, the lattice structure has the characteristics of high strength, high energy absorption, and the like. In order to study the anti-penetration performance of the triply periodic minimal surface (TPMS) structure, we established lattice structure models of the Diamond and Gyroid types based on this structure. Silicon carbide ceramics were selected as the matrix material of TPMS structure, and its anti-penetration performance was studied by the ABAQUS finite element software. The research results show that under low-speed penetration, the Diamond structure significantly improves energy absorption, while the asymmetrical forces generated during impact and the erosion of the projectile in the Gyroid structure can effectively change the penetration angle. Aiming at Gyroid structure, finite element simulation was carried out under different working conditions, such as different impact points, different incident angles and increasing target thickness, and the influence of the change of incident angle on the anti-penetration performance of the Gyroid structure was analyzed. The result shows that the deflection degree of the ejection angle decreases first and then increases with the increase of the incident angle. In addition, when the projectile impacts the spiral surface of the concave Gyroid structure, the ejection angle of the projectile can be obviously changed. After increasing the thickness of the Gyroid structure by 50%, the change of bullet ejection-angle increases by 176.92%, and the absorbed energy increases by 78.26%. The Gyroid

structure can effectively change the motion attitude of the projectile through its unique curved-surface structure. The research results provide certain reference significance for lightweight armor design.

Key words: TPMS structure; ceramic; anti-penetration performance; finite element simulation

兼具防护性能和轻量化设计的复合装甲是近几年防护装甲的研究热点,因为它提供了抗侵彻防护性能,同时又增强了坦克、飞机、军舰和其他军事武器的机动性,是最重要的军事研究问题之一^[1]。陶瓷材料由于其高刚度和高硬度特性在抗冲击方面起着重要作用^[2],现有的复合防护装甲大多由高硬质陶瓷面板和高韧性复合材料背衬组成,陶瓷面板有助于钝化弹丸,减少弹丸侵蚀的后续动能,同时背板支撑前板,吸收陶瓷碎片和弹丸的剩余动能^[3-4]。

目前,轻质多孔的结构多用于吸能、减震、滤波、隔热等领域,弹道侵彻防护领域的相关研究较少。点阵结构作为一种特殊的多孔构型,能够有效提高防弹材料的吸能效果,并降低结构整体面密度,有望提高防护装甲的防弹能力^[5-6]。三周期极小曲面(triply periodic minimal surface, TPMS)结构作为一种新兴的轻质多孔结构,在三维空间中呈现重复的表面结构,每个局部点的平均曲率为 0^[7],孔隙率可调,具有良好的制造特性。TPMS 结构表面处处光滑,且内部完全不存在相交区域,能够有效避免传统点阵结构中常见的应力集中现象^[8-9]。这种力学超性能构型可实现超轻、吸能、提高载荷的传递能力、降低交接处应力集中,已逐渐应用到轻质多孔结构的设计当中^[10]。TPMS 结构凭借其可设计性及优良的动静态力学性能,在防护结构设计领域得到了越来越多的关注^[11-12]。

文献[13]评估了 TPMS 结构夹层板的变形行为和能量吸收能力,并与基于支柱的蜂窝结构进行了比较,发现在相对密度相同的情况下,填充 TPMS 的夹层板比填充支柱芯的夹层板的比能量吸收率高 25% 以上。PENG 等^[14]清楚展示了功能梯度 Gyroid 结构独特的动态破碎响应、冲击能量缓解和耗散机制,具有功能梯度 Gyroid 的夹层复合板有望应用于抗爆炸载荷。

然而,目前关于 TPMS 结构抗侵彻性能的研究尚不充足,本文利用有限元分析软件模拟弹丸侵彻该结构的过程,分析该结构对弹体的偏航、阻滞和拦截效果以及能量吸收能力,为进一步分析 TPMS 结构的抗侵彻机理打下基础。

1 研究问题描述

常见的 TPMS 结构有 4 种 Diamond、Gyroid、I-WP、Primitive,如图 1 所示。TPMS 结构可以使用水平集近似方程来表示,水平集公式由三角函数组成,这些三角函数表示在等值处获得的等值曲面,TPMS 表面将空间分成两个区域,并且可以通过改变常数 c 调整两个域的体积分数^[15-16]。

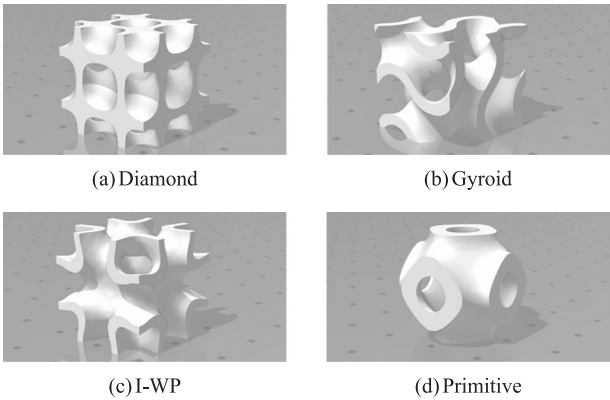


图 1 4 种典型的 TPMS 结构

Fig. 1 Four typical TPMS structures

对于 Diamond 结构,曲面方程为

$$\cos X \cos Y \cos Z - \sin X \sin Y \sin Z = c$$

对于 Gyroid 结构,曲面方程为

$$\sin X \cos Y + \sin X \cos Z + \sin Z \cos X = c$$

对于 I-WP 结构,曲面方程为

$$2(\cos X \cos Y + \cos Y \cos Z + \cos Z \cos X) - (\cos 2X + \cos 2Y \cos 2Z) = c$$

对于 Primitive 结构,曲面方程为

$$\cos X + \cos Y + \cos Z = c$$

式中: $X = 2\pi x/L$, $Y = 2\pi y/L$, $Z = 2\pi z/L$, xyz 为笛卡尔坐标系。通过改变 L 控制点阵单元尺寸,通过改变常数 c 控制点阵结构的相对密度。

根据 TPMS 点阵轻质多孔的结构以及可设计性强的特点,设计不同类型及相对密度的点阵结构,选取碳化硅陶瓷作为 TPMS 结构的材料。通过有限元软件模拟弹丸侵彻 TPMS 结构的过程中弹丸的速度变化,并统计点阵结构在侵彻过程中的损伤以及能量吸收情况,分析 TPMS 结构的抗弹道侵彻能力。

2 数值模拟研究

2.1 几何模型

TPMS 结构的原始表面形状可以通过 MSLattice^[17]和 nTopology^[18]软件生成,该类软件允许生成不同晶胞尺寸和相对密度的 TPMS 结构。本文主要对 Diamond 和 Gyroid 两种结构的抗侵彻能力进行研究,设计的 TPMS 结构靶板的整体尺寸为 50 mm×50 mm×20 mm,相对密度为 50%,点阵单元的尺寸为 20 mm,如图 2 所示。为了简化计算量,弹丸头部形状简化为尖卵形,弹丸的整体尺寸为 $\Phi 7.62$ mm×30 mm,如图 3 所示。

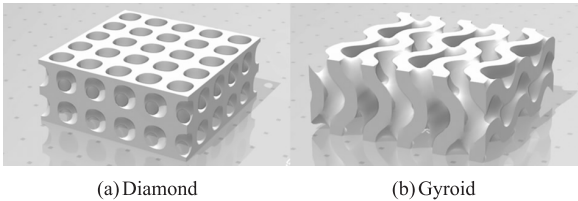


图 2 靶板模型
Fig. 2 Target plate model

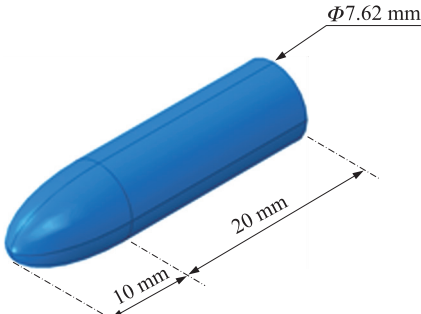


图 3 弹丸模型
Fig. 3 Bullet model

2.2 材料模型

弹丸的材料为均质钢材,模型采用 Johnson-Cook 本构模型,J-C 模型能够适应金属大变形,被广泛使用在弹道侵彻和冲击的模拟中。弹丸钢芯的材料参数如表 1 所示。表中, ρ 为密度, E 为弹性模量, γ 为泊松比, A 为屈服应力参数, B 为应变硬化系数, C 为应变率敏感系数, n 为应变硬化指数, m 为温度软化指数, D_1 、 D_2 、 D_3 、 D_4 、 D_5 为 J-C 模型中的失效模型参数, $\dot{\epsilon}_0$ 为参考应变率。

表 1 弹丸的 J-C 模型参数^[19]

Table 1 J-C model parameters of the bullet						
$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	E/GPa	γ	A/GPa	B/GPa	n	C
7.86	202	0.276	1.9	1.1	0.3	0.005
m	$\dot{\epsilon}_0$	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5
1.0	0.001	-0.07	0.5	1.5	-	-

TPMS 结构的材料为碳化硅陶瓷,对于陶瓷这类脆性材料,材料模型采用 Johnson-Holmquist II 本构模型。碳化硅的材料参数如表 2 所示。表中, ρ 为密度, G 为剪切模量, A' 为完整强度系数, B' 为断裂强度系数, C' 为应变速率系数, M 为断裂强度指数, N 为完整强度指数, T 为拉伸强度; E_H 为 Hugoniot 弹性极限, p_{HEL} 为 HEL 下的压力, D_1 、 D_2 为损伤常数, K_1 为材料的体积模量, K_2 、 K_3 为压力系数。

表 2 碳化硅的 JH-2 模型参数^[20-21]

Table 2 JH-2 model parameters of silicon carbide							
$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	E/GPa	A'	B'	C'	M	N	T/GPa
3.163	183	0.96	0.35	0	1.0	0.65	0.37
E_H/GPa	$p_{\text{HEL}}/\text{GPa}$	D_1'	D_2'	K_1/GPa	K_2/GPa	K_3/GPa	-
14.6	5.9	0.48	0.48	204.8	361	0	-

2.3 有限元模型

本文中弹丸侵彻 TPMS 结构靶板的数值模拟采用 ABAQUS/Explicit 软件进行分析。弹丸位于靶板上方 5 mm 的位置,分别以 808 m/s、700 m/s、560 m/s 的初速度垂直射入。

文献[22]指出侵彻仿真中弹体的剩余速度与实验值的偏差随着网格密度的增大而减小,当网格尺寸为 0.5 mm 时,数值仿真与实验拟合曲线的平均相对误差最小。考虑到弹丸侵彻过程中可能会偏离运动轨迹,故对整个结构采用均一化网格划分,弹丸与 TPMS 结构靶板的网格尺寸均为 0.5 mm,弹丸的网格数量为 13 968;Diamond 结构靶板的网格数量为 884 806;Gyroid 结构靶板的网格数量为 740 797。弹丸与陶瓷之间创建一个内部的侵蚀接触方式,陶瓷靶板四周施加固定约束,所建立的有限元模型如图 4 所示。

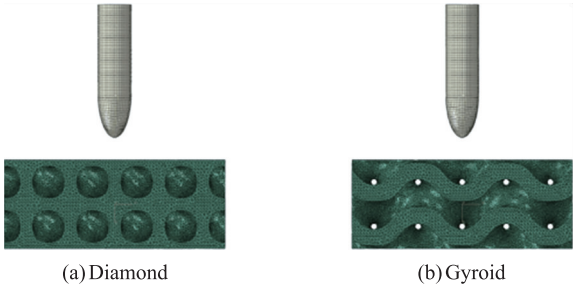


图 4 有限元模型
Fig. 4 Finite element models

由于 TPMS 结构的实际加工难度较大,为验证本文数值模拟的有效性,建立与文献[23~24]三

治复合防护结构相同的数值模型并进行验证,该复合防护结构中的陶瓷为碳化硅陶瓷,采用 JH-2 本构模型,参数见表 2,计算结果如图 5~图 7 所示。

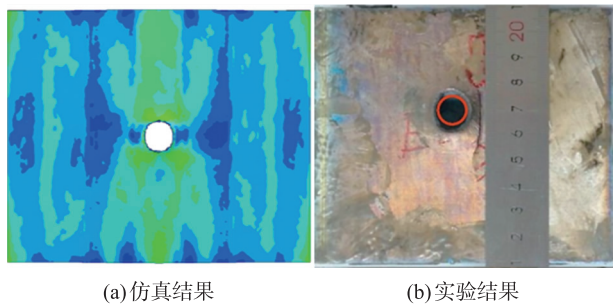


图 5 面板的破坏形式
Fig. 5 Panel failure modes

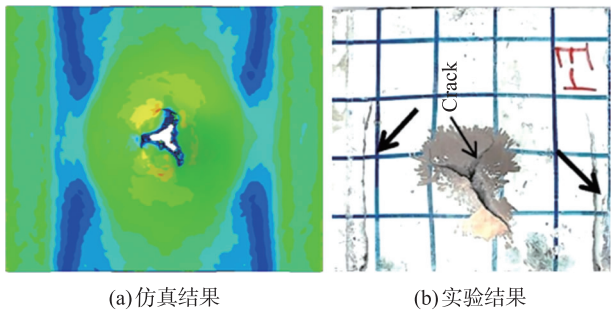


图 6 背板的破坏形式
Fig. 6 Backplate failure modes

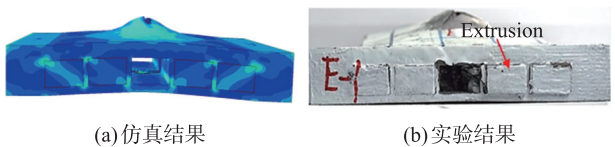


图 7 结构的破坏形式
Fig. 7 Structural failure modes

仿真结果中面板、背板的变形和结构破坏与试验结果的吻合度很高。对比仿真和试验结果中背凸高度和弹丸剩余长度的数据,如表 3 所示。数值模拟结果与实验数据基本吻合,误差在容许范围内。因此,本文的数值方法能够较好模拟靶板在弹丸垂直侵彻下的结构响应和破坏模式。

表 3 仿真结果与试验结果数据对比
Table 3 Comparison between experimental results and numerical simulation results

背凸高度/mm		背凸高度相对误差/%	弹丸剩余长度/mm		弹丸剩余长度相对误差/%
试验 ^[23]	仿真		试验 ^[23]	仿真	
14	12.73	9.1	25	27.46	9.8

3 结果分析与讨论

3.1 抗侵彻与吸能效率分析

弹丸以 808 m/s 的初速度侵彻 TPMS 结构的应力云图,如图 8 和图 9 所示。从仿真结果来看,弹丸均击穿两种结构,由于陶瓷材料具有极高的硬度和抗压强度,在侵彻过程中弹头也出现变形。侵彻 Diamond 结构时,尖卵形头部逐渐被销蚀、墩粗;侵彻 Gyroid 结构时,弹丸与结构内部的磨蚀大部分发生在弹头的一侧,弹丸的头部被磨蚀成斜平面。

两种 TPMS 结构的入射速度和剩余速度如图 10 所示。可以看出,弹丸的剩余速度随着侵彻速度的增加而增加,并且可以推断出在同等侵彻速度的条件下,两种结构的抗侵彻能力区别不大,而在低速侵彻下,Diamond 结构的抗侵彻能力要比 Gyroid 结构强。

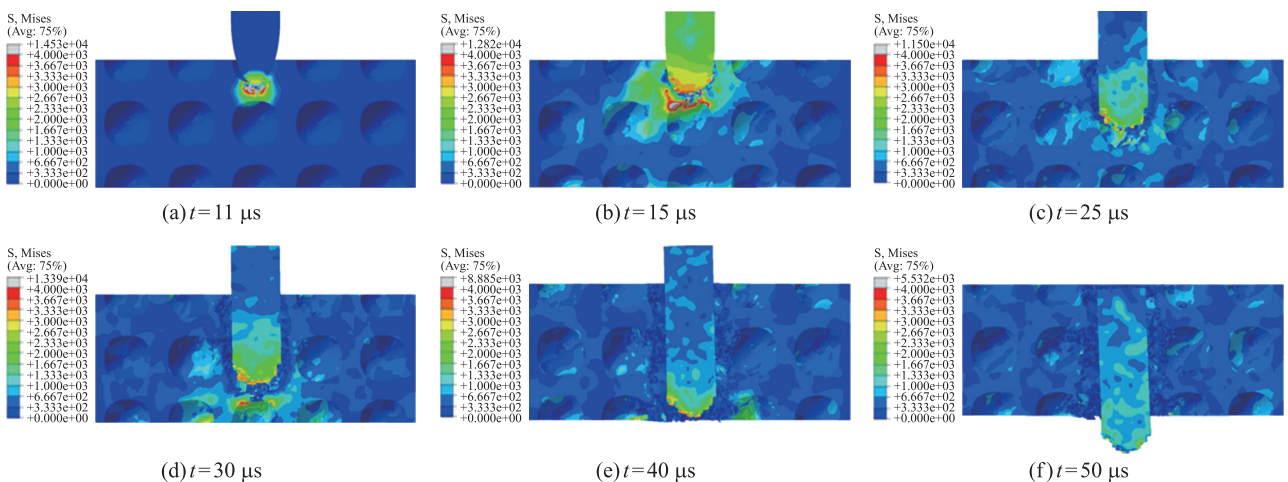


图 8 弹丸以 808 m/s 初速度侵彻 Diamond 结构的仿真应力云图
Fig. 8 Stress contours of diamond structure impacted by projectile at initial velocity of 808 m/s

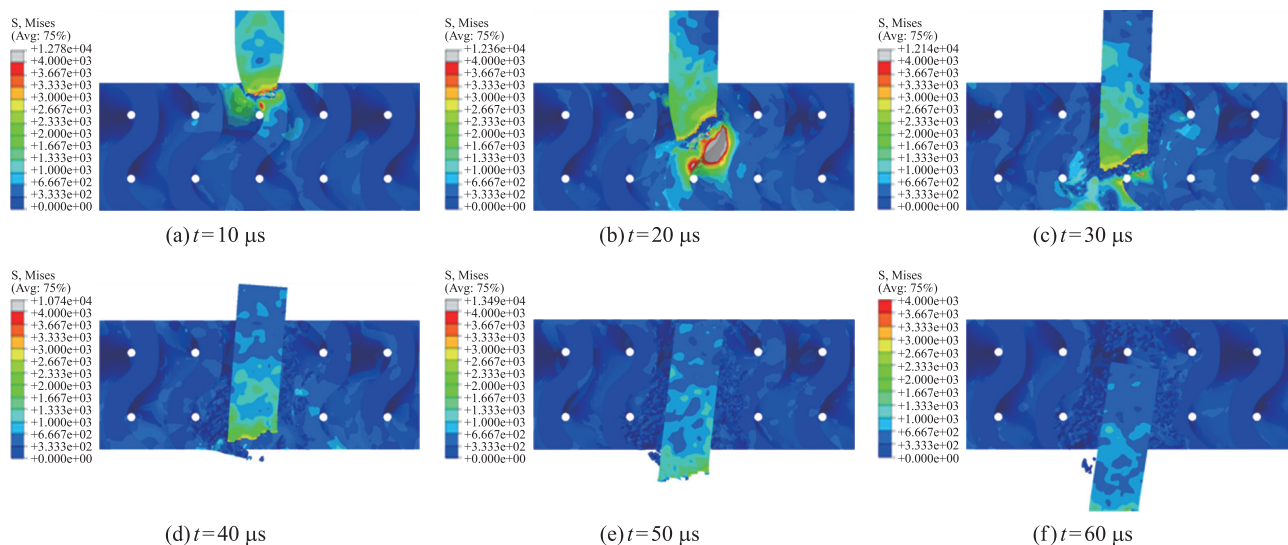


图 9 弹丸以 808 m/s 初速度侵彻 Gyroid 结构侵彻仿真应力云图

Fig. 9 Stress contours of Gyroid structure impacted by the projectile at an initial velocity of 808 m/s

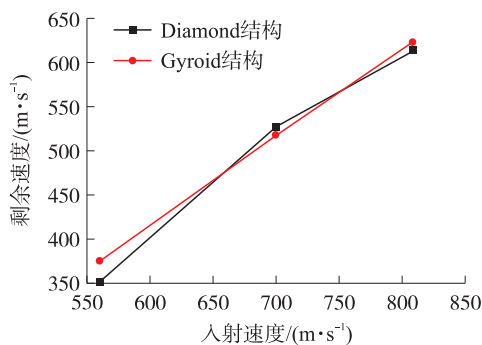


图 10 不同入射速度下剩余速度比较图

Fig. 10 Comparison of residual velocities at different impact velocities

在不考虑弹丸变形的情况下,弹丸动能的损失 ΔE_k 可以看作靶板的能量吸收。

$$\Delta E_k = \frac{1}{2} m (v_0^2 - v_f^2)$$

式中: v_0 、 v_f 为弹丸的初速度和末速度, m 为弹丸的质量。吸能效率主要指靶板在不同入射速度下吸收弹丸动能的情况。

经过计算,两种 TPMS 结构不同入射速度下吸收的能量如图 11 所示。可以看出,这两种结构的吸能效率随着入射速度的增加而增加。另外,在低速侵彻下, Diamond 结构吸收能量的效果显著,而 Gyroid 结构吸收的能量与侵彻速度呈线性关系。在入射速度为 808 m/s 时,两种结构吸收的能量分别可达到 1 318.65 J 和 1 259.47 J。

为了验证 Gyroid 结构改变弹丸射出角度的能

力,对相同质量下的均质靶板进行正侵彻仿真,均质靶板的整体尺寸为 50 mm×50 mm×10 mm,仿真结果对比如图 12 所示。可以看出,弹丸在垂直射入相同质量的两种靶板时, Gyroid 结构靶板能够明显改变弹丸的射出角度。

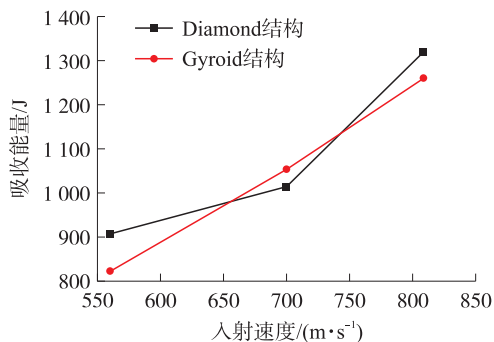


图 11 不同入射速度下吸收能量图

Fig. 11 Energy absorption at different impact velocities

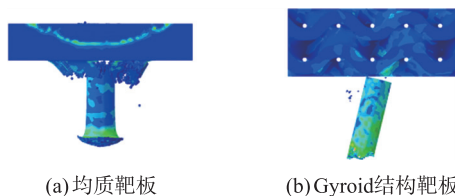


图 12 均质靶板和 Gyroid 结构靶板的仿真结果

Fig. 12 Simulation results of homogeneous target plate and Gyroid structure target plate

3.2 破坏形式与抗侵彻机理分析

两种结构的损伤轮廓如图 13 所示,不同于整块陶瓷板的侵彻破坏形式, TPMS 结构的破坏主要集

中在侵彻的区域。因为该结构具有多孔结构的特点,结构的壁厚较薄,弹丸冲击带来的载荷在该结构上来不及横向传播,弹丸就已经穿透到下一层的结构中,冲击产生的裂纹较短且不明显。另外,弹丸在侵彻过程中的动能损耗主要由于多层结构陶瓷的破碎,破坏的陶瓷与弹丸相互磨蚀,进一步消耗弹丸的动能。

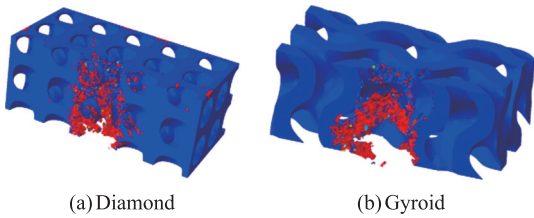


图 13 两种结构的损伤轮廓

Fig. 13 Damage contour of two structures

侵彻过程中的应力云图如图 14 所示, Diamond 结构在侵彻过程中应力主要集中在中心区域;而 Gyroid 结构在侵彻中的应力集中在螺旋曲面上,弹丸与靶板的接触主要集中在弹头的一侧。弹丸撞击在曲面位置上受到的非对称力以及弹头的磨蚀使弹丸偏离入射轨迹。

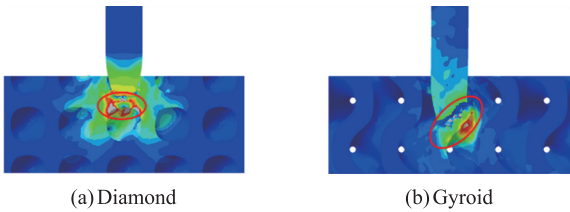


图 14 侵彻过程中的应力云图

Fig. 14 Stress contours during the penetration process

3.3 弹丸入射角度对侵彻效果的影响

由前文的仿真结果可知, Gyroid 结构能明显偏转弹丸侵彻过程中的轨迹,弹丸入射角度 α 的不同也会对侵彻结果造成不同的影响。在前文弹丸垂直侵彻 Gyroid 结构靶板的基础上,以 10° 为增量,将入射角由 10° 增大到 50° ,建立 5 个不同角度的有限元模型,如图 15 所示。

不同角度入射的仿真结果如图 16 所示。入射角度与射出角度的相对值如表 4 所示。可以看出,随着入射角度的增加,弹丸角度的偏转先减小后增大。以 20° 和 30° 的入射角度侵彻靶板,弹丸射出的角度并没有发生明显变化,而以 40° 和 50° 的角度进行侵彻,弹丸射出的角度相对于入射角度发生了明显偏转。

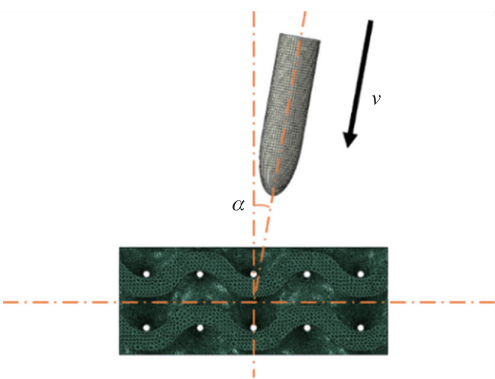


图 15 入射角示意图

Fig. 15 Schematic diagram of bullet incidence angle

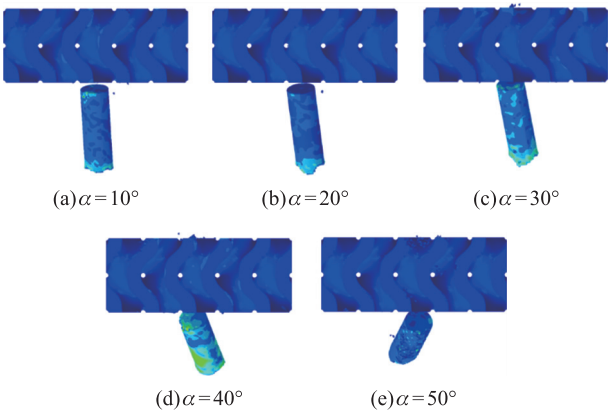


图 16 xz 平面内不同角度侵彻的仿真结果

Fig. 16 Simulation results of penetration at different angles in the xz plane

表 4 入射角度与射出角度的差值

Table 4 Difference between incident angle and ejection angle

模型编号	入射角度/($^\circ$)	射出角度/($^\circ$)	差值/($^\circ$)
1	10	20	10
2	20	23	3
3	30	30	0
4	40	55	15
5	50	68	18

3.4 弹着点位置对侵彻效果的影响

Gyroid 结构是横向波纹状曲面和竖向波纹状曲面联合组成的螺旋曲面,表面不平整。考虑到 Gyroid 结构靶板与弹丸接触的位置对弹丸的抗侵彻性能有着一定的影响,在前文模型的基础上使弹丸以 808 m/s 的初速度垂直侵彻如图 17 所示的 A、B 和 C 不同位置,即弹丸分别侵彻靶板的中心点(凸起曲面部分)、凸起曲面与凹陷曲面的交界部分、凹陷螺旋曲面部分,分析弹丸的不同冲击点对 Gyroid

结构靶板抗侵彻性能的影响。

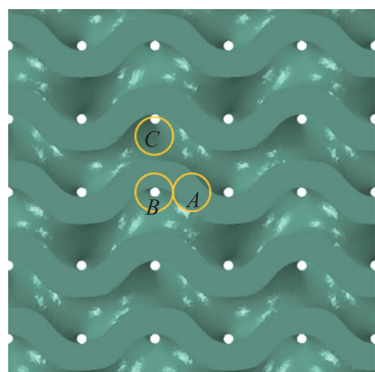


图 17 弹丸侵彻 Gyroid 结构的 3 个不同弹着点

Fig. 17 Three impact points of projectile penetrating Gyroid structure

弹丸射出时的仿真结果如图 18 所示,弹丸侵彻 Gyroid 结构靶板时,不同弹着点的射出角度与偏转方向也不同,冲击点为 A 和 B 时,弹丸射出的角度偏转程度大致相同,而弹丸的偏转方向相反,当冲击点为 C 时,弹丸射出的角度偏转程度最大。

当弹丸冲击 Gyroid 结构凹陷的螺旋曲面时,因为该位置上凹陷的螺旋曲面与弹丸一侧相接触,给

弹丸一个初始偏转力矩,导致弹丸的射出角度偏转最大,可以最大程度上发挥出 Gyroid 结构偏转弹丸的作用。

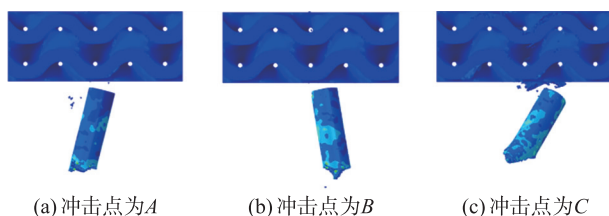


图 18 弹丸冲击不同位置时击穿靶板后的仿真结果

Fig. 18 Simulation results after the projectile penetrating the target plate while impacting different positions

3.5 靶板厚度对侵彻效果的影响

根据前文的研究,Gyroid 结构有一定抵御弹丸侵彻的能力,并且能够改变弹丸的弹道轨迹。但靶板厚度相比于弹丸的长度较小,弹丸偏转的效果不明显,故将靶板的厚度提升 50%,进一步研究该结构对弹丸的偏转效果,整体结构尺寸为 50 mm×50 mm×30 mm,弹丸以 808 m/s 的初速度侵彻 30 mm 厚度 Gyroid 结构靶板的数值仿真应力云图,如图 19 所示。

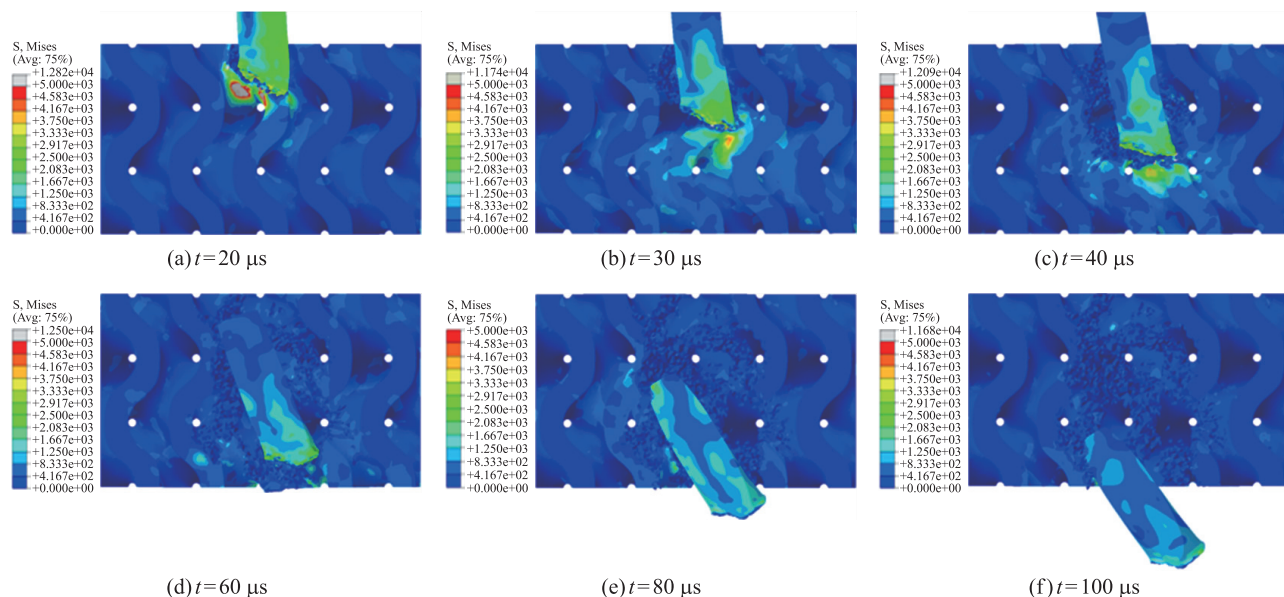


图 19 30 mm 厚度的 Gyroid 结构侵彻仿真应力云图

Fig. 19 Stress contours of 30 mm thick gyroid structure impacted by projectile

从仿真结果来看,30 mm 的 Gyroid 结构靶板内部的螺旋曲面改变弹丸的入射轨迹更加明显,延长了弹丸的侵彻距离,一定程度上提高了靶板的抗侵彻性能。如图 20 所示,仿真过程中弹丸发生了明显偏转,靶板的厚度提升 50%,弹丸偏转的程度提升

176.92%。20 mm 和 30 mm 的 Gyroid 结构靶板在弹丸 808 m/s 初速度的冲击下,弹丸的速度变化如图 21 所示。可以明显看出 30 mm Gyroid 结构的抗侵彻能力明显提升,弹丸的剩余速度为 428 m/s,吸收的能量为 2 245.07 J。

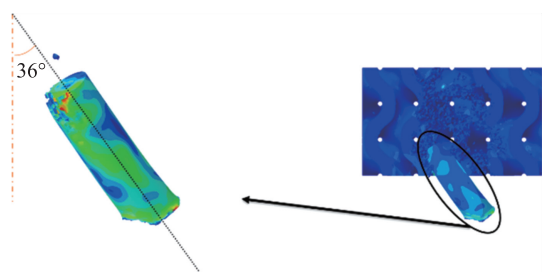


图 20 30 mm 靶板仿真中弹丸出现的偏转

Fig. 20 Deflection of the projectile in simulation of 30 mm target plate

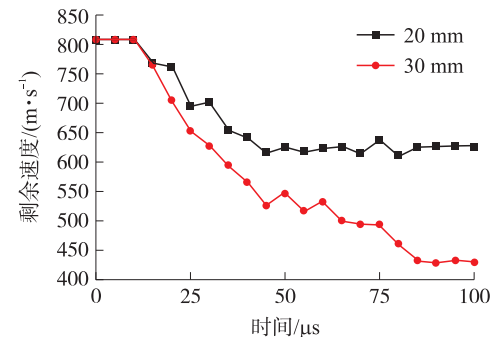


图 21 不同厚度靶板的剩余速度比较图

Fig. 21 Comparison of residual velocities for different thicknesses of target plates

4 结束语

本文基于碳化硅陶瓷的 TPMS 点阵结构,利用有限元软件进行数值模拟,分析了弹丸侵彻过程中速度变化、靶后速度、靶板吸收能量情况,并针对 Gyroid 结构进一步研究,通过改变弹丸的入射角度、弹着点以及靶板的厚度,分析该结构抗侵彻性能,主要结论如下:

①在低速侵彻下,Diamond 结构吸收能量的效果相比 Gyroid 结构显著提升,高速侵彻下二者的抗侵彻性能区别不大。而弹丸在侵彻 Gyroid 结构的过程中,弹丸的射出角度发生了明显变化,主要是因为弹丸撞击在 Gyroid 结构的曲面位置上,撞击过程中产生的非对称力及单侧弹头的磨蚀,使得弹丸偏离入射轨迹。

②随着入射角度的增加,弹丸射出角度相对入射角度的偏转呈现先减小后增大的趋势。

③弹丸的弹着点对 Gyroid 结构靶板的抗侵彻性能有一定的影响,当弹丸冲击 Gyroid 结构凹陷的螺旋曲面时,能够有效偏转弹丸的射出角度。

④将 Gyroid 结构的厚度提升 50%后,弹丸的射

出角度变化提升 176.92%,弹丸吸收的能量提升 78.26%。表明 Gyroid 结构内部的螺旋弧面可使弹丸偏转方向,延长侵彻距离,有利于提高靶板的抗侵彻性能。

⑤通过选择高强度陶瓷、树脂和纤维材料,并且合理优化结构布局及 TPMS 点阵结构的内部组成参数,可以进一步提升该结构复合材料的抗侵彻性能,从而为轻量化防护装甲的设计提供参考。

参考文献

[1] NAIK N K, KUMAR S, RATNAVEER D, et al. An energy-based model for ballistic impact analysis of ceramic-composite armors[J]. International Journal of Damage Mechanics, 2013, 22(2): 145-187.

[2] 侯海量, 朱锡, 李伟. 轻型陶瓷/金属复合装甲抗弹机理研究[J]. 兵工学报, 2013, 34(1): 105-114.

HOU Hailiang, ZHU Xi, LI Wei. Investigation on bullet proof mechanism of light ceramic/steel composite armor [J]. Acta Armamentarii, 2013, 34(1): 105-114. (in Chinese)

[3] SHEN Zhiwei, HU Dean, YANG Gang, et al. Ballistic reliability study on SiC/UHMWPE composite armor against armor-piercing bullet[J]. Composite Structures, 2019, 213: 209-219.

[4] 江洁, 董侠, 陈美玉, 等. 现代防弹材料[J]. 材料导报, 2013, 27(11): 70-76.

JIANG Jie, DONG Xia, CHEN Meiyu, et al. A review of modern bulletproof materials[J]. Materials Reports, 2013, 27(11): 70-76. (in Chinese)

[5] 苏罗川, 宜晨虹, 刘文杰, 等. 轻质抗侵彻材料及结构研究现状[J]. 兵器装备工程学报, 2018, 39(1): 157-167.

SU Luochuan, YI Chenhong, LIU Wenjie, et al. Development of lightweight ballistic armor materials and structures[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2018, 39(1): 157-167. (in Chinese)

[6] 崔天宁, 秦庆华. 轻质多孔夹芯结构的弹道侵彻行为研究进展[J]. 力学进展, 2023, 53(2): 395-432.

CUI Tianning, QIN Qinghua. Ballistic performance of lightweight cellular sandwich structures: A review [J]. Advances in Mechanics, 2023, 53(2): 395-432. (in Chinese)

[7] HAN Lu, CHE Shunai. An overview of materials with triply periodic minimal surfaces and related geometry: From biological structures to self-assembled systems [J]. Advanced Materials, 2018, 30(17): 1705708.

[8] ZHOU Hailun, ZHAO Miao, MA Zhibo, et al. Sheet and network based functionally graded lattice structures manufactured by selective laser melting: Design, mechanical properties, and simulation [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2020, 175: 105480.

[9] YANG Lei, YAN Chunze, HAN Changjun, et al. Mechanical response of a triply periodic minimal surface cellular structures

- manufactured by selective laser melting[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2018, 148: 149–157.
- [10] 张璇, 李晓雁. 微纳米点阵力学超材料的设计和性能[J]. 力学与实践, 2021, 43(1): 164–168.
ZHANG Xuan, LI Xiaoyan. Design and mechanical property of micro-/nano-scale architected metamaterials[J]. Mechanics in Engineering, 2021, 43(1): 164–168. (in Chinese)
- [11] AL-KETAN O, LEE D W. Mechanical properties of additively-manufactured sheet-based gyroidal stochastic cellular materials[J]. Additive Manufacturing, 2021, 48: 102418.
- [12] ALMAHRI S, SANTIAGO R, LEE D W, et al. Evaluation of the dynamic response of triply periodic minimal surfaces subjected to high strain-rate compression[J]. Additive Manufacturing, 2021, 46: 102220.
- [13] NOVAK N, BOROVINSEK M, AL-KETAN O, et al. Impact and blast resistance of uniform and graded sandwich panels with TPMS cellular structures[J]. Composite Structures, 2022, 300: 116174.
- [14] PENG Chenxi, TRAN P. Bioinspired functionally graded gyroid sandwich panel subjected to impulsive loadings[J]. Composites Part B, 2020, 188: 107773.
- [15] 吴桐, 王清辉, 徐志佳. 三周期极小曲面多孔材料渗透率尺度特性研究[J]. 系统仿真学报, 2022, 34(5): 1015–1024.
WU Tong, WANG Qinghui, XU Zhijia. Study on the scale characteristics of permeability of TPMS porous materials[J]. Journal of System Simulation, 2022, 34(5): 1015–1024. (in Chinese)
- [16] LU Jiaxiong, DONG Peng, ZHAO Yongtao, et al. 3D printing of TPMS structural ZnO ceramics with good mechanical properties[J]. Ceramics International, 2021, 47(9): 12897–12905.
- [17] ORAIB A. MSLattice: A free software for generating uniform and graded lattices based on triply periodic minimal surfaces[J]. Material Design & Processing Communications, 2020, 3(6): e205.
- [18] NICKELS L. Software toolkits for architected materials, lightweighting, and more[J]. Metal Powder Report, 2020, 75(4): 203–206.
- [19] AN Rui, WANG Yangwei, FU Qiang, et al. Study on parameter acquisition and optimization methods of JH-2 constitutive model for ceramic[J]. International Journal of Impact Engineering, 2023, 172: 104424.
- [20] JOHNSON G R, HOLMQUIST T J. Response of boron carbide subjected to large strains, high strain rates, and high pressures[J]. Journal of Applied Physics, 1999, 85(12): 8060–8073.
- [21] HOLMQUIST T J, JOHNSON G R. Response of silicon carbide to high velocity impact[J]. Journal of Applied Physics, 2002, 91(9): 5858–5866.
- [22] 祝奔霆, 吴国民. 侵入数值仿真中网格密度对单元失效应变影响分析[J]. 中国舰船研究, 2023, 18(1): 199–204.
ZHU Benting, WU Guomin. Analysis on influence of grid density on element failure strain in penetration numerical simulation[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2023, 18(1): 199–204. (in Chinese)
- [23] TIAN Chao, SUN Qitian, AN Xuanyi, et al. Influences of ceramic constraint on protection performances of ceramic-metal hybrid structures under impact loads[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2019, 159: 81–90.
- [24] 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, 2018, 211: 264–272.

(上接第 59 页)

- [8] 石章松, 刘忠. 单站纯方位目标跟踪系统可观测性分析[J]. 火力与指挥控制, 2007(2): 26–29, 33.
SHI Zhangsong, LIU Zhong. The analysis of the observability on the single platform bearings-only target tracking system[J]. Fire Control & Command Control, 2007(2): 26–29, 33. (in Chinese)
- [9] 冯道旺, 李宗华, 周一宇, 等. 一种单站无源定位方法及其可观测性分析[J]. 国防科技大学学报, 2004(1): 68–71.
FENG Daowang, LI Zonghua, ZHOU Yiyu, et al. A new single observer passive location and tracking technology and its observability analysis[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2004(1): 68–71. (in Chinese)
- [10] 许志刚. 纯方位三维运动目标跟踪的不可观测性问题[J]. 弹道学报, 2007, 19(2): 33–36.
XU Zhigang. Unobservability for three-dimensional tracking based on bearings-only measurements[J]. Journal of Ballistics, 2007, 19(2): 33–36. (in Chinese)
- [11] NARDONE S C, AIDALA V J. Observability criteria for bearings-only target motion analysis[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1981, 17(2): 162–166.
- [12] HAMMEL S E, AIDALA V J. Observability requirements for three-dimensional tracking via angle measurements[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1985, 21(2): 200–207.
- [13] 夏佩伦. 一般仅方位目标跟踪系统可观测的必要条件[J]. 电光与控制, 2011, 18(6): 1–4.
XIA Peilun. Necessary observable conditions for general bearings-only target tracking systems[J]. Electronics Optics & Control, 2011, 18(6): 1–4. (in Chinese)
- [14] WELCH G, BISHOP G. An Introduction to the Kalman filter[M]. Chapel Hill, NC, USA: University of North Carolina at Chapel Hill, 1995.
- [15] FAN Y, QIAO S, WANG G. A modified adaptive Kalman filtering method for maneuvering target tracking of unmanned surface vehicles[J]. Ocean Engineering, 2022, 266: 112890.
- [16] LI Q, SUN F. Adaptive cubature particle filter algorithm[C]//2013 IEEE international conference on mechatronics and automation (ICMA). New York: IEEE, 2013: 1356–1360.
- [17] FANG J, YANG S. Study on innovation adaptive EKF for in-flight alignment of airborne POS[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2011, 60(4): 1378–1388.