

文章编号:1000-8055(2020)01-0001-08

doi:10.13224/j.cnki.jasp.2020.01.001

弹头形态对点阵金属陶瓷夹层结构 侵彻效能的影响

张俊¹, 贾广臣¹, 徐国军¹, 刘荣忠², 郭锐²
(1. 上海海洋大学 工程学院, 上海 201306;
2. 南京理工大学 机械工程学院, 南京 210094)

摘 要:提出了一种由金字塔型点阵金属骨架、陶瓷棒、环氧树脂胶结剂、金属面板及背板所组成的复合材料结构模型。基于有限元法,在实验验证数值方法有效性的基础上,模拟研究了该型复合结构对三类钢制弹丸(平头、球头和锥头)的抗侵彻机制。对比分析了弹靶模型各子结构的失效模式、吸能效率、弹丸的塑性变形、弹道特性、速度及加速度等变化规律。结果表明:弹头形态对复合靶板的破坏形态和吸能特性有较大影响,平头弹丸和球头弹丸对靶板主要产生冲塞破坏,达到峰值加速度的时间较短;而锥头弹丸主要表现为刺穿扩孔型破坏,达到峰值加速度的时间较长,侵彻效能最高。在弹体高速侵彻靶板的过程中,由于金属骨架的剪切扩孔和塑性变形、陶瓷棒的断裂破坏以及金属面板与背板的塑性变形,使得该型防护结构的抗侵彻能力得到了显著提高。

关 键 词:冲击动力学仿真; 金属陶瓷复合材料; 抗侵彻机理; 金属骨架; 点阵夹层结构

中图分类号: V215; TB330 **文献标志码:** A

Effect of warhead shape on penetration into metal-ceramic lattice sandwich structure

ZHANG Jun¹, JIA Guangchen¹, XU Guojun¹,
LIU Rongzhong², GUO Rui²
(1. College of Engineering Science and Technology,
Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;
2. School of Mechanical Engineering,
Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: A structural model of composite materials composed of the metal skeleton, ceramic rods, epoxy, front and back metal plates was proposed. Based on the finite element method, the validity of numerical method was proved by the available experiments. Then, anti-penetration mechanisms of the composite structures were simulated in the process of penetration with three types of steel projectiles (flat-warhead, hemispherical-warhead and conical-warhead). The sub-structures failure modes, energy absorption efficiency, plastic deformation, ballistic performances, velocities and accelerations of the projectiles target plate were analyzed. The results showed that the warhead shape had a great effect on the damage

收稿日期:2019-08-07
基金项目:国家自然科学基金(51775329); 上海市科委创新行动计划(17050502000);
上海市临港管委会产学研合作项目(2017-056)
作者简介:张俊(1983—),男,讲师,博士,主要从事金属陶瓷复合材料力学研究。

引用格式:张俊,贾广臣,徐国军,等. 弹头形态对点阵金属陶瓷夹层结构侵彻效能的影响[J]. 航空动力学报,2020,35(1):1-8.
ZHANG Jun, JIA Guangchen, XU Guojun, et al. Effect of warhead shape on penetration into metal-ceramic lattice sandwich structure[J]. Journal of Aerospace Power, 2020, 35(1): 1-8.

mechanisms and energy absorption characteristics. The flat-warhead and hemispherical-warhead projectiles mainly resulted in crushing damage to the target plate, and the peak acceleration time was shorter. However, the conical-warhead projectile penetration into the target plate mainly resulted in piercing and reaming. The peak acceleration time was greater and the penetration efficiency was the highest. During the projectile penetration, the shear hole and plastic deformation of the metal skeleton, the fracture of the ceramic rod and the plastic deformation of the metal front plate and the metal back plate significantly improved the anti-penetration ability of the structure.

Key words: impact dynamics simulation; metal-ceramic composites; anti-penetration mechanism; metal skeleton; lattice sandwich structure

陶瓷具有强度高、密度低、抗压硬度高和耐磨性好等特点,被广泛应用于装甲防护等领域^[1-2]。Sternberg^[3]发现陶瓷断裂韧性的提高能够增强陶瓷材料的抗侵彻性能。Asadi等^[4-5]指出含SiC的纳米陶瓷其断裂方式为穿晶断裂,而这种断裂方式能够显著提高陶瓷的强度和硬度,并指出当纳米陶瓷面板含有SiC-MgO微粒时,其抗压强度提高了60%,硬度提高了35%。

近年来,国内外学者针对点阵金属陶瓷复合材料在承受大变形、高过载条件下的动力学特性进行了大量研究^[6-9]。文献[10-11]研究了金字塔型金属骨架陶瓷复合材料的抗弹性能,并分析了靶板的尺寸效应对复合装甲抗侵彻性能的影响。文献[12-14]对球头弹丸高速侵彻金属骨架陶瓷复合材料的动力学特性进行了数值模拟,并分析了不同侵彻速度和侵彻角度的影响。研究发现:弹丸的头部形状对于靶板破坏模式的影响非常大,平头体主要产生挤压剪切和冲塞破坏,而锥形体主要产生穿刺破坏。Borvik等^[15]研究了直径为20 mm的平头、球头和锥头弹丸侵彻厚度为12 mm钢制靶板的力学特性,研究发现:弹头形状显著影响靶板的破坏模式和能量吸收特性;靶板在圆头和锥头弹丸撞击时的弹道极限明显高于平头弹丸。Gupta等^[16]通过靶板撞击实验发现,球头弹丸的弹道极限最高,卵头弹丸贯穿厚度为0.5~1.5 mm靶板的效率较高,而平头弹丸贯穿厚度为2.0~3.0 mm靶板的效率较高。孙炜海等^[17]通过实验研究了90°锥头弹丸穿透不同厚度薄钢板的力学特性,分析了靶板的花瓣型和冲塞型破坏机理。文献[18-19]通过弹道冲击实验研究了陶瓷棒填充点阵金属夹层结构的抗侵彻能力,并结合失效模式和吸能效率分析了靶板的抗弹性能。研究表明:在球形钢制弹丸侵彻靶板的过程中,由

于点阵结构的塑性大变形和剪切扩孔、陶瓷棒和环氧树脂的断裂破坏以及面板的宏观弯曲变形,使得该型防护结构的抗侵彻能力得到了大幅度提高。

综上,国内外针对不同弹头形态的高速动能体侵彻靶板的力学效应进行了大量研究,但对靶板为点阵金属陶瓷复合结构的研究较少。本文以一种金字塔型点阵金属陶瓷复合材料为研究对象,基于有限元法,在实验验证数值方法有效性的基础上,模拟研究了平头、球头及锥头弹丸侵彻金字塔型点阵金属陶瓷复合靶板的动力学特性,对比分析了复合弹靶模型各子结构的吸能效率、破坏形态、弹丸的塑性变形、弹道性能、速度、加速度等变化规律。

1 算例验证

1.1 弹靶结构模型

为了验证数值方法的有效性,以一种空心金字塔型三明治板为研究对象^[9],模拟研究靶板受高速球体侵彻过程中的力学响应,并与文献[10]的实验结果对比分析。图1为弹靶结构模型。

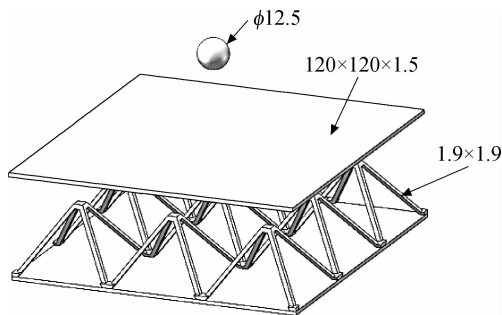


图1 弹靶结构模型(单位:mm)

Fig. 1 Structural model of projectiles-target plate
(unit:mm)

金字塔型金属骨架和弹丸材料均为 Q460 钢,均采用随动硬化材料模型(plastic kinematic)进行描述,弹丸直径为 12.5 mm,金属骨架的截面尺寸为 1.9 mm×1.9 mm;面板和背板的材料均为 50CrMnSi 装甲钢,边长为 120 mm,厚度为 1.5 mm,采用 Johnson_Cook 材料模型进行描述。弹靶模型的各子结构均采用六面体结构化网格划分方法,接触方式均采用侵蚀面对面接触算法。

1.2 仿真与实验结果的对比分析

图 2 为球形弹丸以初始速度 814 m/s 贯穿靶板的 Mises 应力云图,峰值应力为 1.501 GPa。图 3 为弹丸初始速度与剩余速度的仿真和实验结果,图 4 为靶板破坏形态的仿真和实验结果。结果表明:弹丸剩余速度的仿真与实验结果一致性较好,误差在 0.4%~10%之间。由图 4 可以看出,靶板产生塑性变形、剪切扩孔、冲塞、断裂等破坏形态的数值模拟与实验结果^[11]相近,验证了数值计算方法的可靠性。

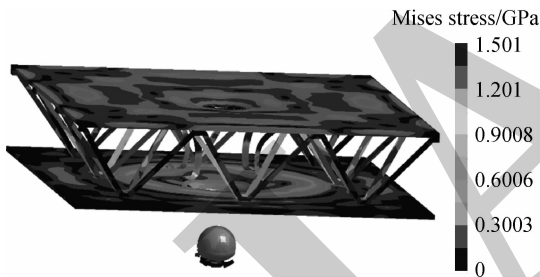


图 2 弹丸穿透靶板的 Mises 应力云图
Fig.2 Mises stress nephogram after penetrating the target plate

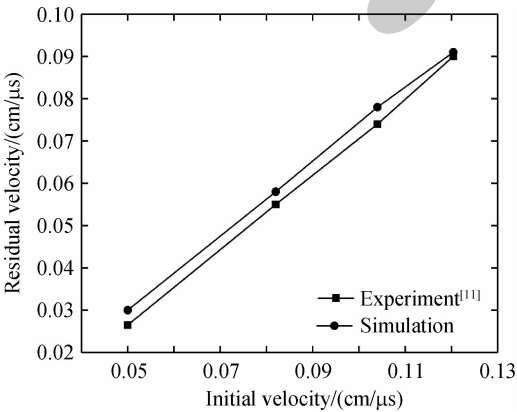


图 3 弹丸速度的仿真和实验结果
Fig.3 Simulation and experiment of projectile velocities

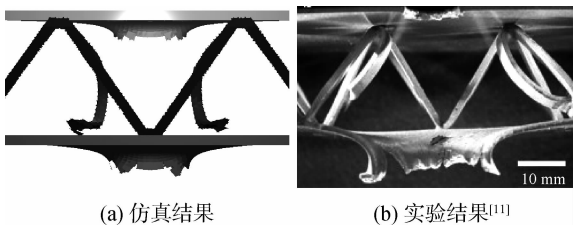


图 4 靶板破坏形态的仿真与实验结果
Fig.4 Structure failure modes of target plate of simulation and experiment

2 点阵金属陶瓷复合材料模型

2.1 复合靶板有限元模型

图 5 为金属陶瓷复合靶板的结构组成^[20]。

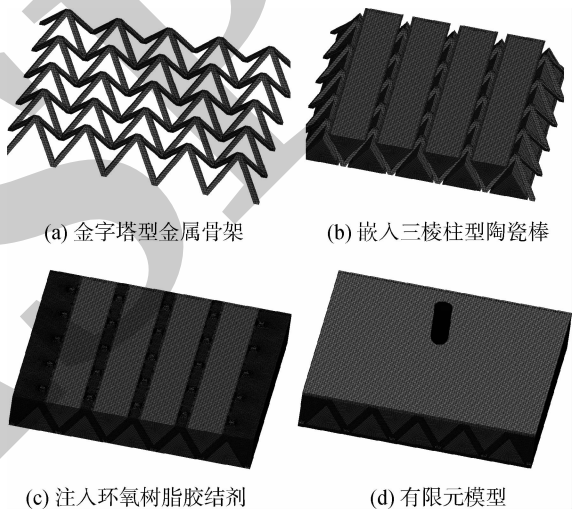


图 5 复合靶板的结构模型
Fig.5 Structural model of composite target plate

金属骨架是一种由四棱锥胞元扩展而成的点阵结构,如图 5(a)所示。在金属骨架中嵌入三棱柱型陶瓷棒,如图 5(b)所示。在空隙中注入环氧树脂胶结剂,并在上下表面黏结面板与背板,构成了该型金属陶瓷复合结构,如图 5(c)、图 5(d)所示。构成金属骨架的单根钢梁结构尺寸为 2 mm×2 mm×20 mm,相邻两根钢梁间的夹角为 60°。三棱柱型陶瓷棒的底面边长为 17 mm,高 102 mm。面板和背板均为 50CrMnSi 装甲钢材料,厚度均为 1.5 mm,靶板的总厚度为 17.14 mm。为分析不同弹头形态对靶板的破坏效应,对比研究了平头圆柱弹丸、球头圆柱弹丸和锥头圆柱弹丸(分别简称平头弹丸、球头弹丸和锥头弹丸)。三种弹丸的直径均为 7.62 mm,圆柱段的高度均为 15 mm,锥头弹丸的锥角为 45°。

2.2 陶瓷材料模型

陶瓷采用 Johnson _ Holmquist _ Ceramics (JH-2)材料模型进行描述,该模型特别适合描述脆性材料的破坏形式和损伤程度。复合靶板其余子结构的材料模型、参数、状态方程、接触算法等均与空心金字塔型三明治板的实验验证模型一致。表 1 为陶瓷材料参数。

表 1 陶瓷材料参数

Table 1 Material parameters of ceramic

参数	数值
密度 $\rho/(\text{g}/\text{cm}^3)$	3.7
切变模量 G/GPa	90.16
无损标准强度参数 a/GPa	0.88
断裂标准强度参数 b/GPa	0.28
应变率相关系数 c	0.003
断裂强度指数 m	0.6
无损强度指数 n	0.64
应变率 $\dot{\epsilon}^*$	10^{-6}
最大拉伸强度 T/GPa	0.262
Hugoniot 弹性极限 $l_{\text{htl}}/\text{GPa}$	6.7
HEL 处压力分量 $p_{\text{htl}}/\text{GPa}$	3.63
第一断裂参数 D_1	0.005
第二断裂参数 D_2	0.7
状态方程参数 k_1/GPa	130.9
断裂准则 F_s	1.6

陶瓷材料的等效应力定义为

$$\sigma^* = \sigma_t^* - D(\sigma_t^* - \sigma_i^*) \tag{1}$$

式中 σ^* 为材料的等效应力; D 为损伤因子; σ_t^* 为陶瓷材料的初始强度; σ_i^* 为陶瓷材料破碎时的强度。

$$\sigma_t^* = a(F^* + p_t^*)^n(1 + c \ln \dot{\epsilon}^*) \tag{2}$$

$$\sigma_i^* = b(F^*)^m(1 + c \ln \dot{\epsilon}^*) \tag{3}$$

式中 p_t^* 为静水压力; $\dot{\epsilon}^*$ 为材料的应变率,可通过材料的断裂和应变率之间的关系进行求解; F^* 为材料受到的压力。

陶瓷材料的状态方程为

$$P = k_1\left(\frac{\rho}{\rho_0} - 1\right) + k_2\left(\frac{\rho}{\rho_0} - 1\right)^2 + k_3\left(\frac{\rho}{\rho_0} - 1\right)^3 \tag{4}$$

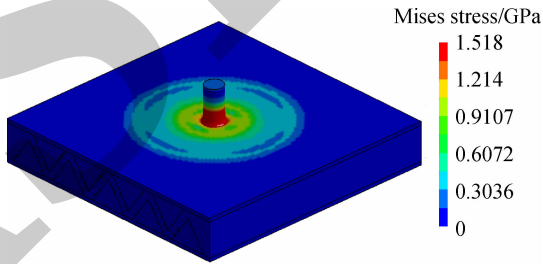
式中 k_1 、 k_2 和 k_3 为常数; ρ_0 为材料的初始密度; ρ

为材料的当前密度。

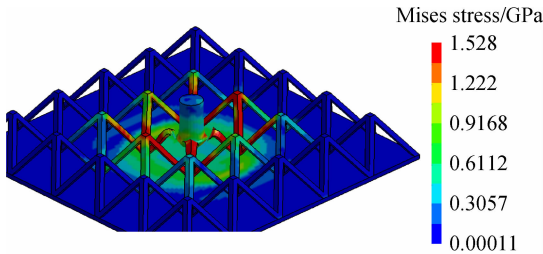
3 数值模拟与结果分析

3.1 侵彻过程分析

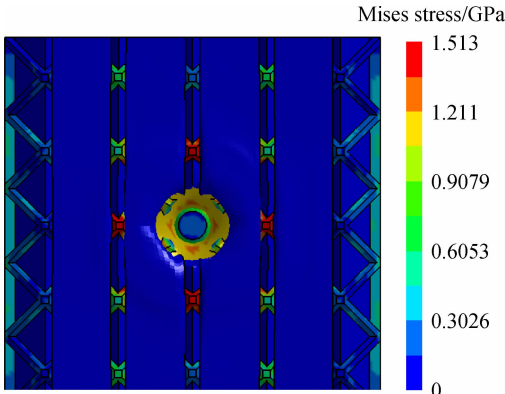
图 6 为球头弹丸以 800 m/s 的初始速度侵彻点阵金属陶瓷复合靶板过程中的 Mises 应力云图。计算结果表明:在弹丸侵彻靶板的过程中,弹丸上的应力波沿弹丸头部向弹丸尾部传递,靶板上的应力波从撞击点沿着靶板以圆环状向四周扩散;弹丸穿透面板后,应力波由金属骨架传递到金属背板;在弹丸与陶瓷棒的相互作用过程中,随着陶瓷材料表面的裂纹不断扩展和汇聚,逐渐引起陶瓷产生挤压破碎,但是,由于金字塔型金属骨架的约束作用,使得破碎的陶瓷仍具有吸收动能的作用;侵彻时间(t)在 18~60 μs 之间时,夹芯层的破孔逐渐增大,随着弹丸与背板接触,陶瓷的破孔形态将不继续扩展;随着弹丸速度迅速降低,且其



(a) $t=10\ \mu\text{s}$



(b) $t=20\ \mu\text{s}$



(c) $t=70\ \mu\text{s}$

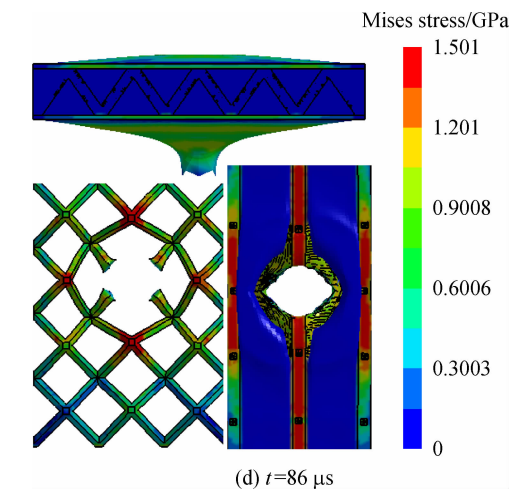


图 6 弹丸侵彻靶板过程中的 Mises 应力云图
Fig. 6 Mises stress nephograms of projectile penetration

形态出现了墩粗现象,弹丸与背板的作用时间较长,背板产生塑性大变形后逐渐发生断裂,侵彻时间达到 $86\ \mu\text{s}$ 时靶板被穿透。

图 7 为三种弹丸贯穿靶板后的弹丸变形、陶瓷棒及金属骨架破孔的对比图。结果表明:平头弹丸和球头弹丸对靶板主要产生挤压冲塞破坏,平头弹丸贯穿靶板后,陶瓷和金属骨架的破孔最

大;锥头弹丸对靶板主要表现为刺穿扩孔破坏,陶瓷及金属骨架所形成的破孔最小,等效力最高,所消耗的弹丸动能最少;锥头弹丸的变形最大,球头弹丸的变形最小,而平头弹丸出现了明显的挤压卷边现象;在靶板的结构设计中,可采取表面强化措施,使侵入的弹丸受挫、墩粗,有利于形成较大的陶瓷锥,以提高复合材料的抗侵彻能力。

3.2 弹丸的速度与加速度分析

图 8 为三类弹丸分别以初始速度为 $800\ \text{m/s}$ 侵彻靶板过程中的速度变化规律。图 9 为弹丸初始速度与穿透靶板后的速度衰减量之间的关系。结果表明:锥头弹丸侵彻靶板后的剩余速度最大,穿透靶板所需时间最短;平头弹丸侵彻靶板后的剩余速度最小,穿透靶板所需时间最长;球头弹丸穿透复合靶板后的剩余速度介于两者之间。说明该类金属陶瓷复合材料对锥头弹丸的抗侵彻效果最差,对平头弹丸的抗侵彻效果最好。

为了分析弹丸初始速度的影响,对三类弹丸分别设置初始速度为 600 、 800 、 1000 、 1200 、 1400 、 $1600\ \text{m/s}$ 侵彻靶板。计算结果表明:当弹丸初始速度为 $600\ \text{m/s}$ 时,平头弹丸不能穿透靶板,而球

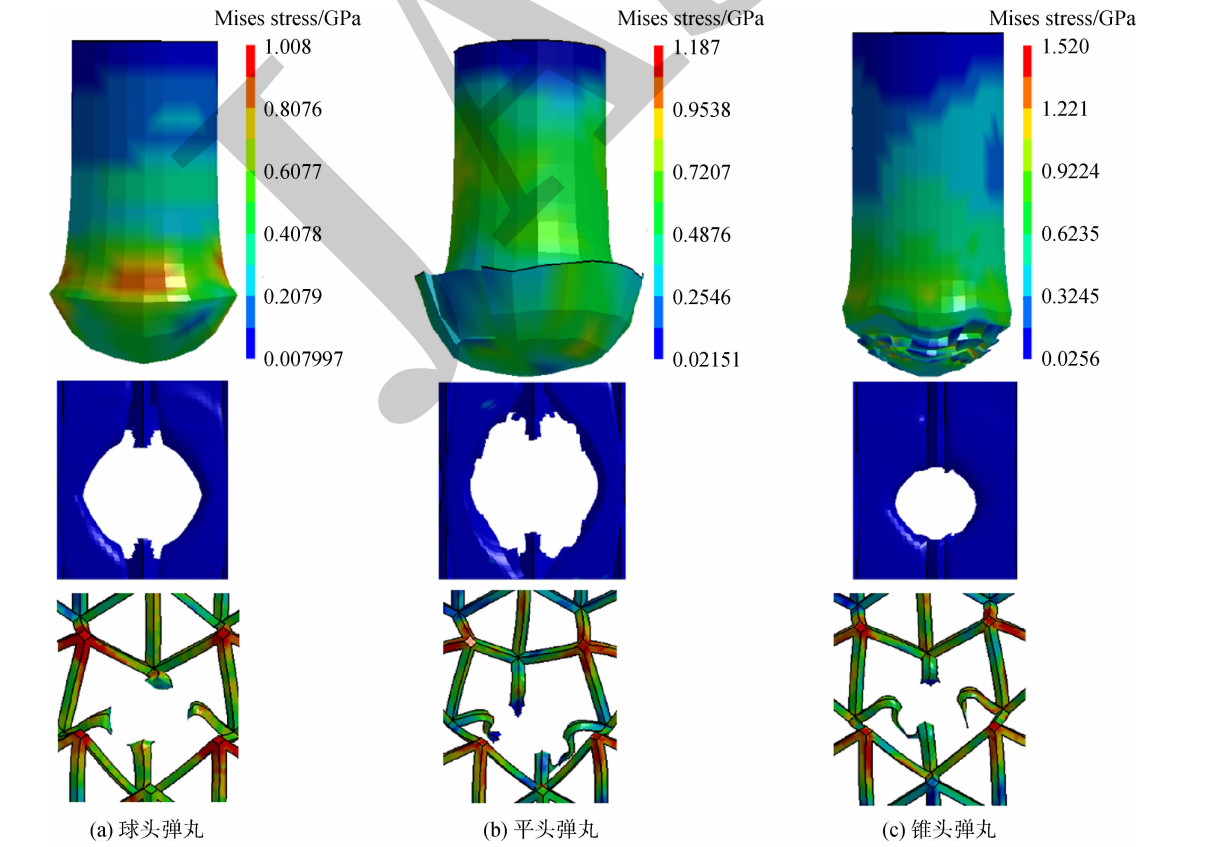


图 7 弹丸、陶瓷及金属骨架的破坏形态
Fig. 7 Failure modes of projectiles, ceramics and metal skeletons

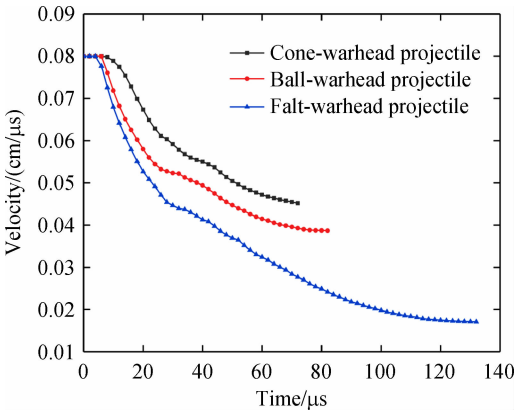


图 8 弹丸侵彻靶板过程中的速度变化规律
Fig. 8 Projectile velocities in penetrating the target plate

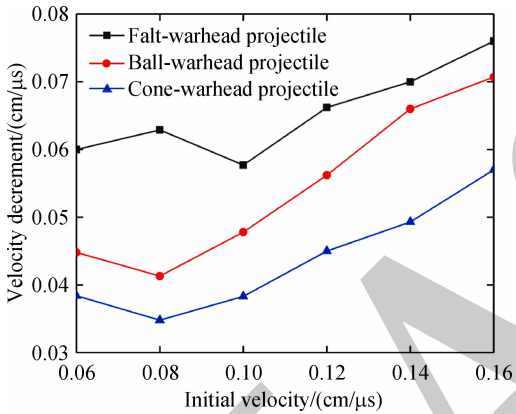


图 9 弹丸初始速度与速度衰减量的关系
Fig. 9 Relationship between initial velocities and decrements

头弹丸和锥头弹丸穿透靶板后的速度降依次减少;随着弹丸初始速度增加,平头弹丸的速度衰减量呈先增加后减少再增加趋势,当弹丸初始速度为 1000 m/s 时,其速度衰减量最小;对于球头弹丸和锥头弹丸,其速度衰减量则为先减少后增加趋势,弹丸初始速度为 800 m/s 时的速度衰减量达到最小值,这是由于不同弹丸速度将导致靶板破孔的大小不同,也是影响金属陶瓷复合靶板抗侵彻性能的关键因素^[21]。

图 10 为三类弹丸分别以初始速度 800 m/s 侵彻靶板过程中的加速度变化规律。结果表明:三类弹丸的加速度均呈先急速增加,达到最大值后急剧减少的变化趋势。这是由于靶板的屈服极限较高,且陶瓷具有较高的强度和硬度,所以弹丸与靶板作用初期的作用力大,随着金属骨架的塑性变形和陶瓷发生挤压破碎,其作用力迅速降低。另外,由于弹丸在侵彻过程中将不断受挫墩粗,因

此,其作用力呈现小幅度波动趋势。在弹道末段,弹丸的加速度逐渐降低,但平头弹丸的受力最大。从不同弹丸达到峰值加速度的时间来分析,平头弹丸和球头弹丸在侵彻时间约为 10 μs 时达到最大值,而对于锥头弹丸,其加速度在侵彻时间为 18 μs 时达到最大值,这是导致不同弹头形态对靶板破坏形态不一致的主要原因。

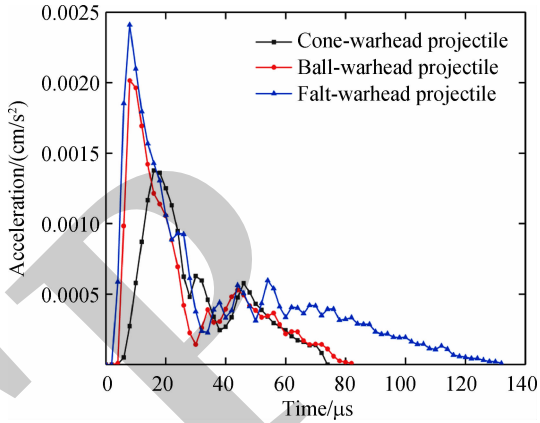


图 10 弹丸侵彻靶板过程中的速度变化规律
Fig. 10 Projectile accelerations in penetrating the target plate

3.3 靶板子结构的吸能效率

图 11 为锥头弹丸侵彻靶板过程中的各子结构吸能效率。图 12 为球头弹丸侵彻靶板过程中的各子结构吸能效率。图 13 为平头弹丸侵彻靶板过程中的各子结构吸能效率。

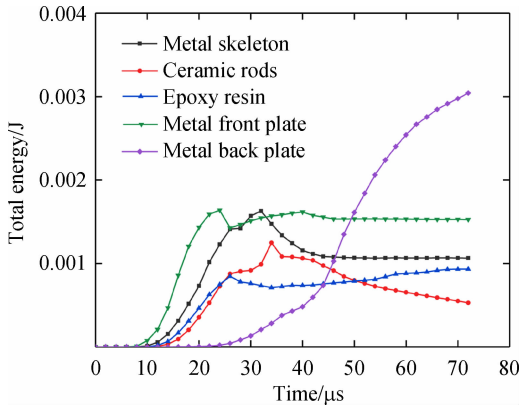


图 11 锥头弹丸侵彻靶板过程中各子结构的吸能效率
Fig. 11 Energy absorption efficiency of conical-warhead projectile penetrating into the target plate

对比分析可知:在弹丸侵彻靶板的过程中,金属背板所吸收的动能最多,这是由于弹丸与靶板的面板作用时,其形态完整,侵彻速度高,作用时间短,而随着弹丸在侵彻过程中不断产生变形与

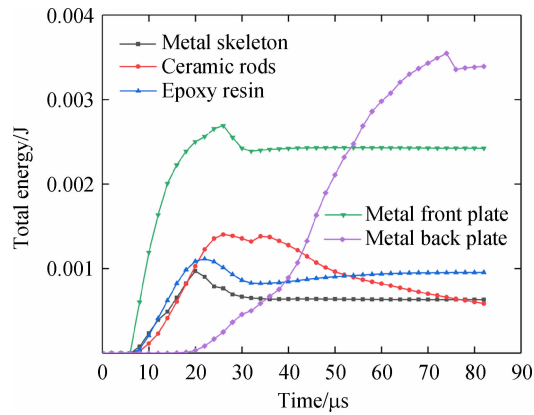


图 12 球头弹丸侵彻靶板过程中各子结构的吸能效率
Fig. 12 Energy absorption efficiency of hemispherical-warhead projectile penetrating into the target plate

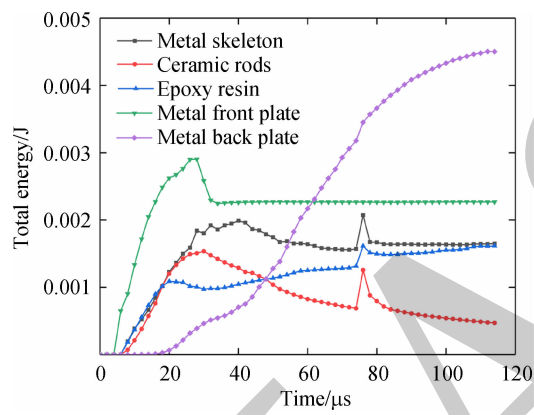


图 13 平头弹丸侵彻靶板过程中各子结构的吸能效率
Fig. 13 Energy absorption efficiency of flat-warhead projectile penetrating into the target plate

墩粗,且随着侵彻速度的不断降低,与背板的作用时间最长,使得金属背板出现了大鼓包,塑性变形大;在球头弹丸侵彻过程中,陶瓷吸收的弹丸动能高于金属骨架,且靶板面板吸能的弹丸动能相对较高;结合靶板的破坏形态可以看出,金属骨架产生了较大的塑性变形与剪切扩孔,而陶瓷棒则出现了较大的破孔,这是由于陶瓷的失效形式主要是断裂而非塑性变形。对比分析可知,平头弹丸侵彻过程中,靶板各子结构吸收的总能量最高,而锥头弹丸侵彻靶板时的子结构吸收总能量最低。金属骨架对陶瓷具有一定结构限制和边界约束作用,在弹丸侵彻过程中,能够作用起到衰减冲击应力波和防止陶瓷崩落等作用,能够显著增强金属陶瓷复合材料的抗侵彻性能。

4 结 论

1) 弹丸侵彻金属陶瓷复合靶板的过程中,应

力波从撞击点以圆环状向四周扩散。弹丸穿透面板后,应力波由金属骨架传递到金属背板。在弹丸与陶瓷棒的作用过程中,随着陶瓷材料表面的裂纹不断扩展和汇聚,引起陶瓷发生挤压破碎,但由于金字塔型点阵金属骨架的边界约束作用,使得破碎的陶瓷仍具有吸收动能的作用,起到了衰减应力波和防止陶瓷崩落的作用。

2) 平头弹丸和球头弹丸对靶板主要产生挤压破坏,达到峰值加速度的用时较短。平头弹丸贯穿靶板所形成的破孔最大,其弹道末段的加速度最大,靶板的各子结构吸收的总能最高。锥头弹丸对复合靶板的破坏主要表现为刺穿扩孔破坏,贯穿靶板所形成的破孔最小,弹丸的变形最大,侵彻效能最高,达到峰值加速度的用时最长,靶板各子结构吸收的总能最低。

3) 随着弹丸在侵彻过程中不断变形与墩粗,并且侵彻速度不断降低,弹丸与背板的作用时间最长,背板产生塑性大变形后断裂,所吸收的弹丸动能最多。球头弹丸侵彻靶板的过程中,陶瓷材料吸收的弹丸动能高于点阵金属骨架,且面板吸能的弹丸动能相对较高。综合分析得出:由于点阵金属骨架的剪切扩孔和塑性变形、陶瓷棒的挤压破坏以及金属面板与背板的塑性大变形,使得该型金属陶瓷复合材料的抗侵彻能力得到了大幅度提高。

参考文献:

[1] 石多奇,沙景恬,程震,等. SiC/SiC mini 复合材料拉伸性能分散性的数值仿真方法[J]. 航空动力学报, 2019, 34(5): 971-979.
SHI Duoqi, SHA Jingtian, CHENG Zhen, et al. Numerical simulation method of the variability in tensile properties of SiC/SiC minicomposites[J]. Journal of Aerospace Power, 2019, 34(5): 971-979. (in Chinese)
[2] 方光武,宋迎东,高希光. 层合陶瓷基复合材料多尺度应力-应变计算模型[J]. 航空动力学报, 2017, 32(6): 1375-1380.
FANG Guangwu, SONG Yingdong, GAO Xiguang. Multi-scale stress-strain calculation model of laminated ceramic matrix composites[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(6): 1375-1380. (in Chinese)
[3] STERNBERG J. Material properties determining the resistance of ceramics to high velocity penetration[J]. Journal of Applied Physics, 1989, 65(9): 3417-3424.
[4] ASADI A, VANINI S A S, FARROKHI A. Optimization of mechanical properties of Al₂O₃-SiC nanocomposite body [J]. Journal of Materials Design and Applications, 2011, 225(4): 266-276.

- [5] ASADI A, VANINI A S, JABBARI A. Investigation on the impact behavior of Al_2O_3 -SiC-MgO nanoceramic/metal laminated composite[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2011, 25(9): 2179-2184.
- [6] 薛建刚, 高希光, 方光武, 等. 针刺陶瓷基复合材料损伤本构模型及构件应力分析[J]. *航空动力学报*, 2016, 31(10): 2370-2375.
- XUE Jiangang, GAO Xiguang, FANG Guangwu, et al. A damage constitutive model for needled CMCs composites and stress analysis of components[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2016, 31(10): 2370-2375. (in Chinese)
- [7] LU T J, VALDEVIT L, EVANS A G. Active cooling by metallic sandwich structures with periodic cores[J]. *Progress in Materials Science*, 2005, 50(7): 789-815.
- [8] LU T J, ZHANG Q C, JIN F. Recent progress in the development of lightweight porous materials and structures[J]. *Materials China*, 2012, 31(1): 13-35.
- [9] 倪长也, 金峰, 卢天健, 等. 3种点阵金属三明治板的抗侵略性能模拟分析[J]. *力学学报*, 2010, 42(6): 1125-1137.
- NI Changye, JIN Feng, LU Tianjian, et al. Penetration and perforation performance of three pyramidal lattice-cored sandwich plates: numerical simulations[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2010, 42(6): 1125-1137. (in Chinese)
- [10] CHRISTIAN J Y, DARREN D R, MARK A, et al. Experiment assessment of the ballistic response of composite pyramidal lattice truss structures[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2008, 39(3): 556-569.
- [11] CHRISTIAN K, DUAN E C, MICHAEL W, et al. Influence of material properties on the ballistic performance of ceramics for personal body armour[J]. *Shock and Vibration*, 2003, 10(1): 51-58.
- [12] ZHU F, ZHAO L, LU G, et al. A numerical simulation of the blast impact of square metallic sandwich panels[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2009, 36(5): 687-699.
- [13] NI C Y, LI Y C, XIN F X, et al. Ballistic resistance of hybrid-cored sandwich plates: Numerical and experimental assessment[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2013, 46(1): 69-79.
- [14] BEN D G, DUBINSKY A, ELPERIN T. Optimization of two-component composite armor against ballistic impact[J]. *Composite Structures*, 2005, 69(1): 89-94.
- [15] BORVIK T, LANGSETH M, HOPPERSTAD O S, et al. Perforation of 12 mm thick steel plates by 20 mm diameter projectiles with flat, hemispherical and conical noses; Part I experimental study[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2002, 27(1): 19-35.
- [16] GUPTA N K, IQBAL M A, SEKHON G S. Effect of projectile nose shape, impact velocity and target thickness on deformation behavior of aluminum plates[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2007, 44(10): 3411-3439.
- [17] 孙炜海, 鞠桂玲, 陈德民, 等. 锥头弹丸穿透薄钢板的实验研究[J]. *高压物理学报*, 2012, 26(1): 69-75.
- SUN Weihai, JU Guiling, CHEN Demin, et al. An experimental study of thin steel plates perforated by conical-nosed projectiles[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2012, 26(1): 69-75. (in Chinese)
- [18] 郭锐, 周昊, 刘荣忠, 等. 陶瓷棒填充点阵金属夹层结构的制备及抗侵略实验[J]. *复合材料学报*, 2016, 33(4): 921-928.
- GUO Rui, ZHOU Hao, LIU Rongzhong, et al. Preparation and anti-penetration experiment of metal lattice truss cored sandwich structures filled with ceramic rods[J]. *Acta Materialiae Compositae Sinica*, 2016, 33(4): 921-928. (in Chinese)
- [19] 郭锐, 南博华, 周昊, 等. 点阵金属夹层结构抗侵略实验研究[J]. *振动与冲击*, 2016, 33(4): 921-928.
- GUO Rui, NAN Bohua, ZHOU Hao, et al. Experiment assessment of the ballistic response of a hybrid-cored sandwich structure[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2016, 33(4): 921-928. (in Chinese)
- [20] 张俊, 郭锐, 刘荣忠, 等. 金属桁架增强陶瓷复合装甲抗弹性能研究[J]. *南京理工大学学报*, 2012, 36(5): 773-778.
- ZHANG Jun, GUO Rui, LIU Rongzhong, et al. Antibullet property of metal truss structures enhanced ceramic composite armor[J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology*, 2012, 36(5): 773-778. (in Chinese)
- [21] 徐国军, 张俊, 郑兴伟, 等. 金属蜂窝增强陶瓷复合装甲抗侵略性能研究[J]. *弹箭与制导学报*, 2019, 39(2): 92-96.
- XU Guojun, ZHANG Jun, ZHENG Xingwei, et al. Anti-penetration property of the metal honeycomb enhanced ceramic composite armor[J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2019, 39(2): 92-96. (in Chinese)

(编辑: 叶青、陈越)