

金属封装陶瓷复合结构抗射流性能仿真

王晓东¹, 徐永杰^{1,2*}

(1. 中北大学 机电工程学院, 山西 太原 030051;
2. 重庆红宇精密工业集团有限公司, 重庆 402760)

摘 要: 为提升轻质装甲对聚能射流的防护性能, 针对金属封装陶瓷结构的抗射流防护性能开展研究。以金属封装陶瓷结构为平台设计 5 种复合结构, 通过 LS-DYNA 软件开展数值模拟, 研究在不同倾角下各结构金属框架损伤程度、陶瓷夹芯的损伤范围及射流动能损失量。结果表明: 与常规钢制装甲相比, 金属封装陶瓷结构具有更好的抗射流侵彻性能, 可降低结构的变形程度, 将局部载荷分散至结构面内, 降低陶瓷损伤范围, 提升结构的防护性能; 金属封装陶瓷结构可在面密度降低的同时造成比金属夹芯更高的射流动能损失量, 并且在多种倾角情况下均表现出良好的防护性能。

关键词: 复合装甲; 陶瓷材料; 聚能射流; 抗侵彻性能; 数值模拟

中图分类号: TJ410.3

文献标志码: A

文章编号: 2097-2741(2024)02-017-008

Simulation Research on Jet Penetration Resistance of Metal-Packaged Ceramic Structures

WANG Xiaodong¹, XU Yongjie^{1,2*}

(1. School of Mechatronic Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, Shanxi;
2. Chongqing Hongyu Precision Industrial Co., Ltd., Chongqing 402760)

ABSTRACT: In order to enhance the protective performance of light armor against shaped-charge jet, the anti-jet penetration performance of metal-packaged ceramic structures was studied. First, three composite structures were designed based on metal-packaged ceramic structures. Then, numerical simulations were carried out using LS-DYNA to investigate the extent of metal frame damage, the shattered range of ceramic cores, and the kinetic energy loss of the jet at different incidence angles. Results indicated that the proposed metal-packaged ceramic structures have better antijet penetration performance than steel armor. It can reduce the degree of structural deformation and disperse local loads to the structural surface, which reduces the damage range of ceramics and improves the protective performance of the structure. Moreover, it can reduce the surface density, while leading to higher kinetic energy loss compared to metal. The proposed structures exhibit good protective performance at many angles.

KEYWORDS: composite armor; ceramic material; shaped-charge jet; anti-penetration performance; numerical simulation

收稿日期: 2023-04-06

基金项目: 山西省基础研究计划 (2021690); 山西省高等学校科技创新项目 (2020299)

第一作者: 王晓东 (1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事兵器科学与技术研究。E-mail: wangxiaodongedu@foxmail.com

***通信作者:** 徐永杰 (1987—), 男, 副教授, 博士, 主要从事兵器科学与技术研究。E-mail: yongqiang515@nuc.edu.cn

引用格式: 王晓东, 徐永杰. 金属封装陶瓷复合结构抗射流性能仿真[J]. 火箭军工程大学学报, 2024, 38 (2): 17-24.

陶瓷材料具有硬度高、密度低的特性,使其成为理想的抗侵彻冲击材料,可用于制作陶瓷复合装甲。但其抗拉强度低、塑性与韧性很差,在一定程度上限制了其功能的发挥。因此,克服当前陶瓷复合装甲材料的结构缺陷、缓解材料的动态损伤、提升材料抗侵彻效能,是陶瓷复合装甲的发展趋势之一^[1]。

Woodward等^[2]经大量试验发现对于外加约束条件的陶瓷靶板,相较于非约束条件下,破碎陶瓷的飞散程度减弱且破碎陶瓷对侵彻弹体的磨蚀增强,可提高陶瓷装甲的防护性能。于少娟等^[3]对聚能射流侵彻约束与非约束陶瓷靶开展试验,研究发现约束陶瓷可提高其抗射流侵彻能力。苟瑞君等^[4]设计陶瓷/泡沫铝/铝合金复合结构,并通过数值模拟分析优化其抗射流性能。Jiusti等^[5]通过在陶瓷间填充环氧树脂和石英材料以改变阻抗,使其可在抵抗侵彻的同时保护相邻陶瓷单元。Rahbek等^[6]研究了复合材料覆盖层对陶瓷损伤的影响,结果表明有覆盖层的陶瓷损伤更为严重。Seifert等^[7]研究了弹丸侵彻位置对粘接陶瓷金属结构防护性能的影响,结果表明间隙的增加及粘接强度的降低将使防护性能下降。Liu等^[8]通过试验和数值模拟研究了氧化铝陶瓷柱层与TC₄和超高分子量聚乙烯复合背板防护性能和破坏机理。Tepeduzu等^[9]对6种织物复合材料增强陶瓷抗弹过程开展数值模拟,结果显示芳纶与环氧复合材料对增强陶瓷的抗弹能力有较好效果。Luo等^[10]通过数值模拟研究了不同阻抗材料封装陶瓷对复合结构防护性能的影响,结果表明封装结构可延长驻留时间,增加对侵彻体的损伤,提升了结构的防护性能。An等^[11]对钨合金长杆弹侵彻不同金属与正交排列矩形氧化锆陶瓷复合结构开展试验,结果表明背板及限制陶瓷是其抗侵彻的关键因素。叶腾钊等^[12]研究了添加TiB₂对石墨烯改性B₄C陶瓷基复合材料抗弹性能的影响,结果显示可使其维氏硬度、弯曲强度和断裂韧性得到提高,抗弹性能提升。Chen等^[13]对陶瓷纤维复合装甲的陶瓷结构进行改进,采用六棱柱球冠陶瓷作为装甲陶瓷层,该结构可将正侵彻转为斜侵彻,提高装甲的防护效能。Jiang等^[14]对异形陶瓷/金属复合装甲的抗侵彻性能开展研究,结果表明随弹丸速度的增加,复合装甲的防护效果逐渐减弱。Chen等^[15]通过数值模拟对射流侵彻陶瓷复合装甲的过程开展研究。

综上,国内外开展了大量关于陶瓷复合装甲的研究,但关于陶瓷复合结构对聚能装药战斗部防护性能的研究却不多见。因此,为提升轻质复合装甲的防护性能,本文基于约束陶瓷增强抗侵彻性能的原理,利用LS-DYNA软件对聚能射流侵彻金属封装陶瓷结构的过程开展数值模拟,通过分析金属框架破坏形式、陶瓷损伤程度及射流动能的损失量,以研究金属封装陶瓷结构对聚能射流的防护性能,可为今后轻质复合装甲的设计和工程应用提供参考。

1 模型建立

1.1 物理模型

基准破甲弹的结构如图1所示。其中: D 表示装药直径,为56 mm; H 表示装药高度,为73.3 mm; 2α 表示药型罩的锥角,为 60° ; δ 表示药型罩壁的厚度,为1 mm。起爆方式为装药底部中心点起爆,炸高80 mm。

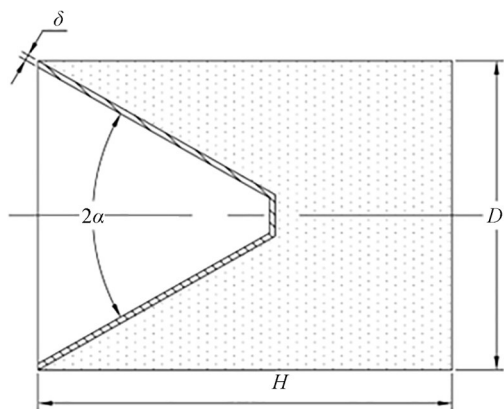


图 1 56 mm 基准弹结构

Fig. 1 Structure of 56 mm standard shaped charge

根据文献[16]设计金属封装陶瓷复合结构,如图2所示。复合结构长度 L_1 为150 mm,厚度 D_1 为25 mm。金属框架的材料为45钢, A_1 、 A_2 、 A_3 结构的非金属材料为Al₂O₃。除陶瓷结构外的炸高参数、材料参数等均保持相同。

1.2 有限元模型

有限元计算模型如图3所示。

通过Truegrid软件,以六面体单元绘制网格,建立有限元模型,网格大小为1 mm×1 mm×1 mm。利用LS-DYNA软件进行数值模拟。因聚能射流侵彻金属封装陶瓷结构的模型具有对称性,所以,为提高计算效率,仅建立1/2有限元模型。

聚能射流与金属封装陶瓷结构间采用 CON-
STRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID 关键字以
实现流固耦合, 金属封装陶瓷结构间采用 CON-
TACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFA-
CE 关键字以实现各部分的相互接触作用。

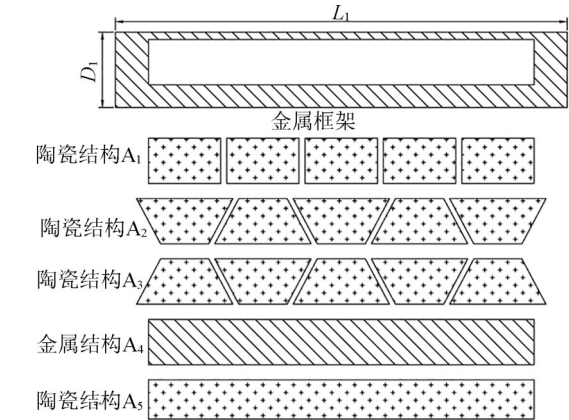


图 2 金属封装陶瓷复合材料的结构设计
Fig. 2 Structural design of metal-packaged ceramic
composite materials

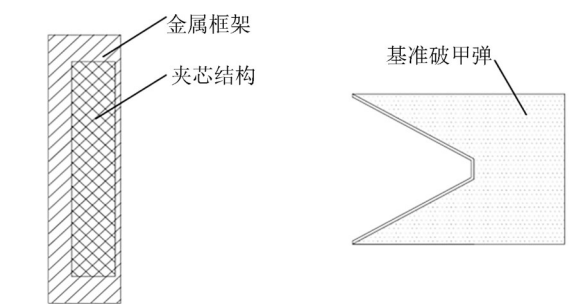


图 3 有限元计算模型
Fig. 3 FEM calculation model

1.3 材料参数

金属封装陶瓷结构中的金属框架材料为 45 钢^[17], 采用 Johnson-Cook 本构方程和 Gruneisen 状态方程描述, 材料参数如表 1 所示。封装陶瓷材料为 Al₂O₃ 陶瓷^[18], 采用 Johnson-Holmquist 本构方程描述, 材料参数如表 2 所示。药型罩材料为高导无氧铜^[19], 采用 Steinberg 本构方程和 Gruneisen 状态方程描述, 材料参数如表 3 所示。56 mm 基准弹内装药为 8701 炸药^[20], 采用 JWL (Johnson-Wollman-Liu) 状态方程描述, 材料参数如表 4 所示。

1.4 模型有效性验证

根据文献[21]中的试验建立数值计算模型, 即采用基准破甲弹侵彻倾角为 69° 的陶瓷复合装甲, 面板、陶瓷、背板的厚度分别为 4 mm、10 mm 和 10 mm, 数值模拟与试验射流剩余速度的结果如表 5 所示。

表 1 45 钢材料参数

Tab. 1 Parameters of 45 [#] steel			
参数	取值	参数	取值
密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	7.8	软化指数 m	1.06
弹性模量 E/GPa	200	材料损伤参数 D_1	0.1
屈服强度 A/MPa	506	材料损伤参数 D_2	0.76
硬化参数 B/MPa	320	材料损伤参数 D_3	1.57
硬化指数 n	0.28	材料损伤参数 D_4	0.005
硬化系数 C	0.064	材料损伤参数 D_5	-0.84

表 2 Al₂O₃ 陶瓷材料参数

Tab. 2 Parameters of Al ₂ O ₃ ceramic			
参数	取值	参数	取值
密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	3.7	Hugoniot 弹性极限 HEL/GPa	2.79
剪切模量 G/GPa	90.16	HEL 压力 $P_{\text{HEL}}/\text{GPa}$	1.46
屈服强度 A	0.93	压力常数 K_1/GPa	130.95
硬化参数 B	0.31	压力常数 K_2/GPa	0
硬化系数 C	0.0	压力常数 K_3/GPa	0
材料参数 M	0.6	材料损伤参数 D_1	0.005
材料参数 N	0.6	材料损伤参数 D_2	1.0
抗拉强度 T/GPa	0.2		

表 3 高导无氧铜材料参数

Tab. 3 Parameters of oxygen free high conductivity copper (OFHC)			
参数	取值	参数	取值
密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	8.96	硬化系数 β	36
剪切模量 G_0/GPa	47.7	偏导数 G'_p	1.35
屈服应力 Y_0/GPa	0.12	偏导数 G'_t	-17.98
最大屈服应力 Y_m/GPa	0.64	偏导数 Y'_p	0.003 396
硬化指数 n	0.45	熔化温度 T_{melt}/K	1 790

表 4 8701 炸药材料参数

Tab. 4 Parameters of 8701 [#] explosive			
参数	取值	参数	取值
密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	1.717	材料参数 B/GPa	7.678
爆压 p_{Cl}/GPa	29.5	材料参数 R_1	4.2
爆速 $V_D/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	7 980	材料参数 R_2	1.1
材料参数 A/GPa	524.23	材料参数 ω	0.34

表 5 试验结果与数值模拟结果

Tab. 5 Experimental and numerical simulation results			
试验 编号	文献[21]剩余 速度/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	计算的剩余 速度/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	误差/%
1	3 010	3 214	6.8
2	3 000	3 214	7.1
3	3 020	3 214	6.4

陶瓷在抵抗射流侵彻过程中, 由于陶瓷屈服强度高, 因而导致射流侵彻通道窄, 以致后续射流将与通道相互作用。且陶瓷抗拉强度较低, 在应力卸载时, 通道周围的陶瓷破碎, 进而破碎的陶瓷垮塌至射流通道的, 导致后续射流受到干扰, 变成间断、振荡型射流降低了其侵彻能力。而数值模拟难以描述破碎陶瓷对射流的影响过程, 因而造成数值模拟与实验存在一定误差。

2 数值模拟

基于上述聚能装药及金属封装陶瓷结构的参数, 对射流侵彻金属封装陶瓷结构的过程进行数值模拟, 分析侵彻过程中金属封装陶瓷结构的损伤情况及射流的能量变化。

2.1 框架损伤

倾角为 0° 时, 不同结构金属框架损伤的仿真结果如图 4 所示。

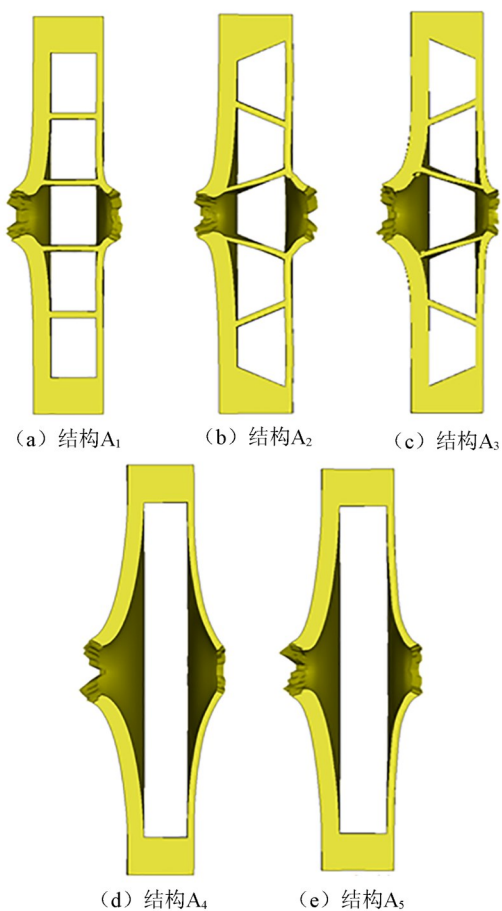


图 4 倾角为 0° 时不同结构金属框架的损伤

Fig. 4 Damage to metal frames of different structures at 0° dip

可以看出, 射流侵彻金属封装陶瓷结构的过程中, 金属框架的损伤形式大致相同, 但损伤范围存在差别。射流侵彻 A_1 、 A_2 、 A_3 结构时, 由于内部框架限制了面板及背板的形变, 有助于降低射流对框架的破坏程度; 射流侵彻 A_4 、 A_5 结构时, 由于内部不存在框架, 使得面板及背板产生大范围形变, 但夹芯为陶瓷的 A_5 结构在一定程度上降低了面板及背板的形变程度。

金属封装陶瓷结构的倾角增加至 30° 时, 不同结构金属框架损伤的数值仿真结果如图 5 所示。

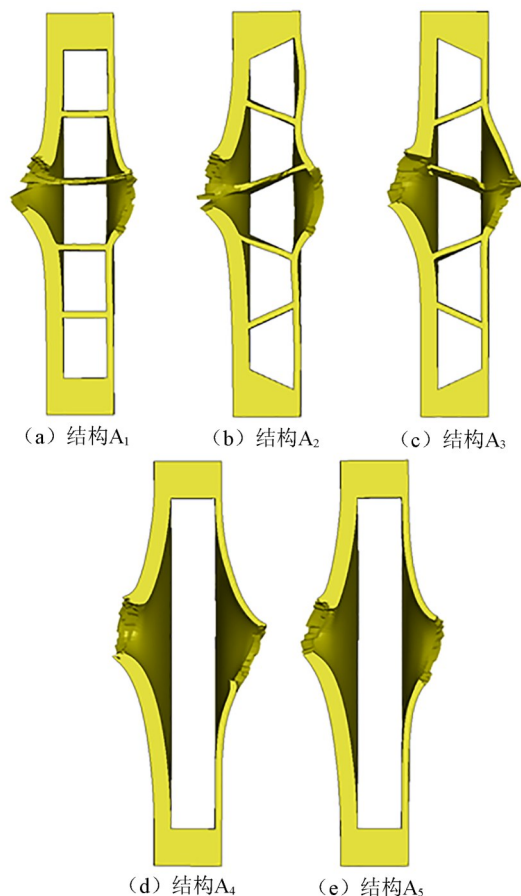


图 5 倾角为 30° 时不同结构金属框架的损伤

Fig. 5 Damage to metal frames of different structures at 30° dip

可以看出, 此时金属框架的损伤形式与 0° 倾角时并无较大区别。结构 A_2 在侵彻过程中, 不仅在射流通处发生形变, 而且在冲击载荷的作用下, 相邻结构单元面板发生塑性变形; 采用正梯形的结构 A_3 在面板侧出现较大范围形变, 导致约束陶瓷的能力下降。

射流穿靶后的速度也可表征不同结构框架的防护效果。由仿真结果可得: 结构 A_1 工况时射流穿靶后速度约为 $4\,690\text{ m/s}$; 结构 A_2 工况时约为

4 580 m/s; 结构 A₃ 工况约为 4 670 m/s; 结构 A₄ 工况约为 4 660 m/s; 结构 A₅ 工况约为 4 610 m/s。

2.2 陶瓷损伤

对陶瓷的损伤程度由 0 至 1 表征, 当损伤程度为 0 时表示陶瓷完好; 当损伤程度为 1 时表示陶瓷完全损坏。射流侵彻金属封装陶瓷结构的陶瓷损伤如图 6 所示。

可以看出: 金属封装陶瓷结构内部陶瓷夹芯的损伤主要集中在射流通道附近, 并向横向、纵向分别延伸; 结构 A₁ 与结构 A₂ 的陶瓷损伤较为严重, 对射流施加到结构的冲击载荷可以进行比较有效的分散; 结构 A₃ 则主要将载荷分散到纵向; 结构 A₅ 由于采用整块陶瓷夹芯, 使得其在侵彻过

程中产生了大范围损伤。

射流侵彻时, 金属封装陶瓷结构的应力云图如图 7 所示。

由图 7 可知: 结构 A₁ 增加了载荷的分布范围, 应力较为均匀地作用于背板与相邻的陶瓷中, 将载荷分散至结构面内; 结构 A₂ 可将载荷有效传递到相邻区域, 增大金属封装陶瓷结构的受载范围, 由此增加对射流能量的吸收, 同时使应力在多种介质中传递, 陶瓷损伤较为均匀; 结构 A₃ 将载荷较为集中地作用于背板, 由此射流侵彻造成陶瓷的损伤程度低于其他 2 种结构; 结构 A₄ 的载荷主要集中于射流侵彻区域, 相较于其他 3 种结构, 载荷分布最为集中; 结构 A₅ 的载荷在单块陶瓷中传

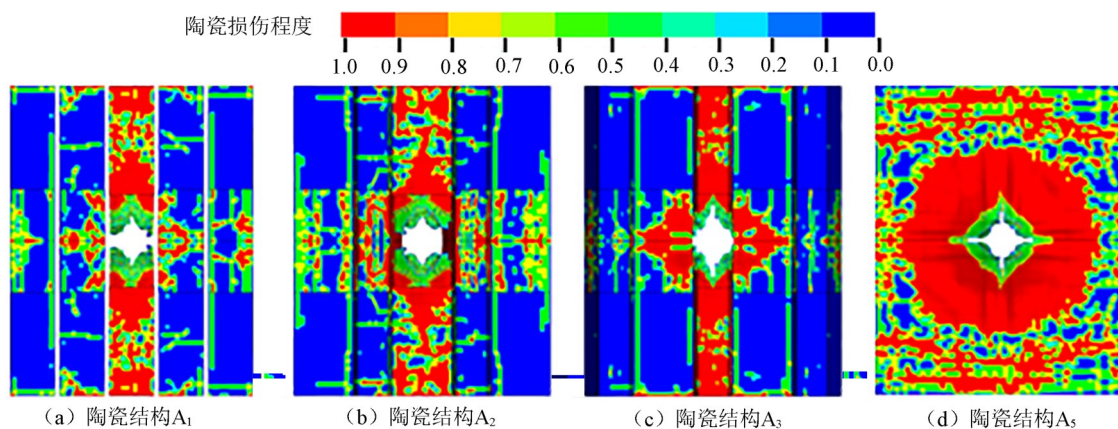


图 6 陶瓷损伤云图

Fig. 6 Nephogram of ceramic damage

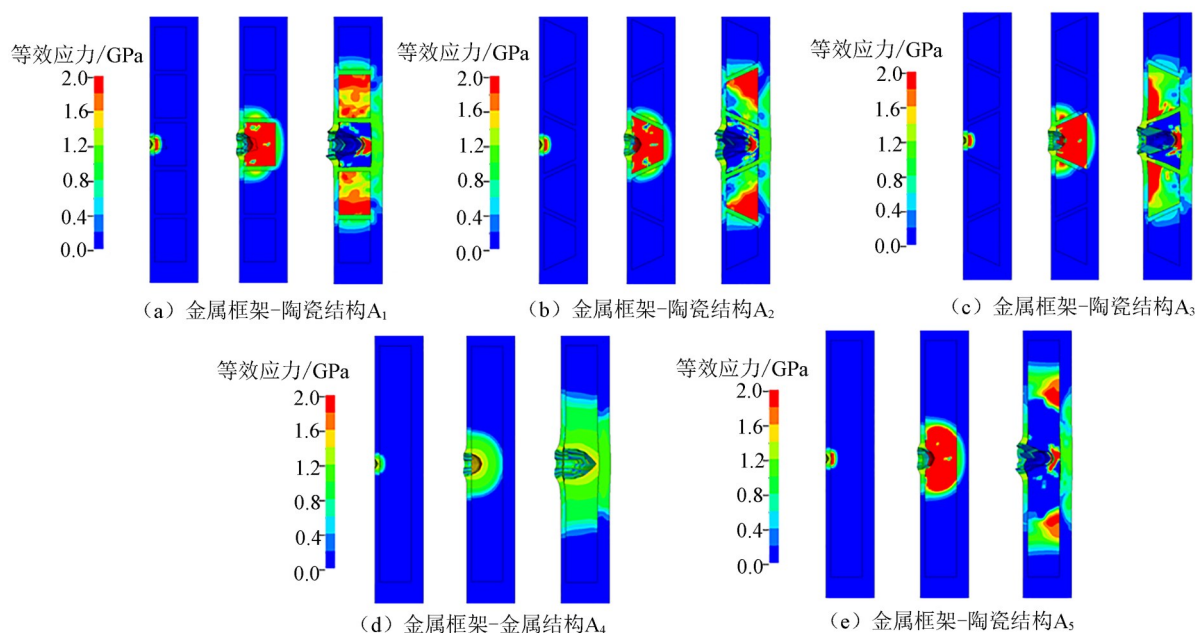


图 7 金属封装陶瓷结构应力云图

Fig. 7 Stress nephogram of metal-packaged ceramic structures

递,造成大范围的陶瓷被破坏。这些表明,金属封装陶瓷结构可在约束陶瓷、提升抗射流侵彻性能的同时,改变了载荷在面内的传播与分布。

2.3 射流动能损失

通过仿真可得,在射流侵彻金属封装陶瓷结构的过程中,射流能量在 $18\ \mu\text{s}$ 左右达到最高值 ($80.8\ \text{kJ}$),此时头部速度为 $5\ 800\ \text{m/s}$ 。在侵彻目标过程中,射流能量被大幅消耗,直至穿透金属封装陶瓷结构后,能量变化趋于平稳。射流穿透靶板后,不同倾角金属封装陶瓷结构造成的动能损失量的仿真结果如图 8 所示。

由图 8 可以看出,侵彻不同倾角金属封装陶瓷结构的过程中动能损失量的变化趋势基本相同,都随着结构倾角的增大而增大。在 60° 倾角时,各结构造成的射流动能损失量均达到最大,其中: A_1 结构造成射流动能损失量达 $38.4\ \text{kJ}$,占总动能的 47.5% ; A_2 结构造成射流动能损失量达 $39.4\ \text{kJ}$,占总动能的 48.8% ; A_3 结构造成射流动能损失量达 $40.2\ \text{kJ}$,占总动能的 49.8% ; A_4 结构造成射流动能损失量达 $34.4\ \text{kJ}$,占总动能的 42.6% ; A_5 结构造成射流动能损失量达 $36.4\ \text{kJ}$,占总动能的 45.0% 。

另外,射流动能的损失量也受到结构的影响。金属夹芯结构 A_4 造成的损失量最低,其次为单块陶瓷夹芯的结构 A_5 ,封装结构 A_1 、 A_2 、 A_3 造成的

损失量最高。

防护模块的质量也是评价其防护能力的重要指标,因此,以射流动能损失量与结构面密度之比来量化各结构的防护性能,比值越大越好。金属框架-金属结构 A_4 (面密度为 $182.5\ \text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$) 与 4 种金属框架-陶瓷结构 (面密度为 $145.8\ \text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$) 的防护性能仿真结果如表 6 所示。

表 6 射流动能损失量与结构面密度的比值

Tab. 6 Lost kinetic energy of jet and structural surface density

倾角/ ($^\circ$)	动能损失与面密度之比/($\text{J}\cdot\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$)				
	金属框架- 金属结构 A_4	金属框架-陶瓷结构			
		A_1	A_2	A_3	A_5
0	111.78	148.15	144.03	145.40	146.78
10	117.26	150.89	146.78	145.40	155.01
20	121.64	155.01	153.64	153.64	160.49
30	128.22	163.24	178.33	159.12	170.10
40	144.66	182.44	200.27	183.81	182.44
50	157.81	219.48	235.94	219.48	219.48
60	188.49	263.37	270.23	275.72	249.66

由表 6 可以看出,金属封装陶瓷结构 A_1 、 A_2 和 A_3 对射流的防护性能优于金属夹芯结构 A_4 及单块陶瓷夹芯结构 A_5 ,在多倾角下均能保持较好的抗射流侵彻能力,其在减轻质量的同时造成了更高动能损失量。

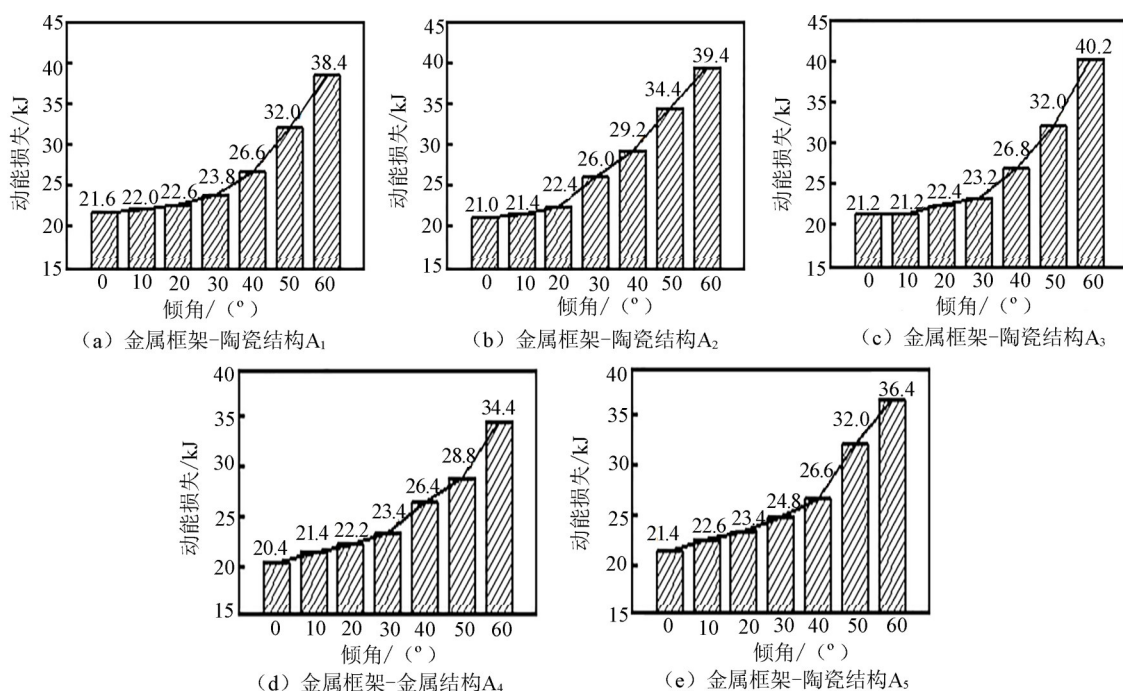


图 8 不同倾角时各结构造成的射流动能损失量

Fig. 8 kinetic energy loss of jet during penetration

3 结论

为提升轻质复合装甲的防护能力,通过数值模拟方法,开展了轻量化金属封装陶瓷结构抗射流侵彻性能研究。结果表明:金属封装陶瓷结构可降低结构在侵彻过程中的形变程度,将载荷分散至结构面内,降低内部陶瓷材料的损伤范围,增大射流在侵彻过程中的能量损失。该研究可为轻质复合装甲的研发设计工程应用提供参考。

参考文献:

- [1] 李维锴,韩保红,赵忠民. 装甲防护陶瓷材料的研究进展[J]. 特种铸造及有色合金, 2018, 38(3): 259-262.
LI W K, HAN B H, ZHAO Z M. Research progress in ceramics armor materials[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2018, 38(3): 259-262.
- [2] WOODWARD R L, GOOCH W A, O'DONNELL R G, et al. A study of fragmentation in the ballistic impact of ceramics[J]. International Journal of Impact Engineering, 1994, 15(5): 605-618.
- [3] 于少娟,李永池,张先锋,等. 约束陶瓷靶抗射流侵彻实验研究[J]. 中国科学技术大学学报, 2008, 38(11): 1299-1303.
YU S J, LI Y C, ZHANG X F, et al. An experimental study on antipenetration process of confined AD95 ceramic targets to shaped charge jets[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2008, 38(11): 1299-1303.
- [4] 苟瑞君,孙丹,张博. 陶瓷/泡沫铝/铝合金复合装甲抗射流侵彻性能[J]. 含能材料, 2017, 25(6): 451-458.
GOU R J, SUN D, ZHANG B. Antijet penetration performances of the ceramic/aluminum foam/aluminum alloy composite armor[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2017, 25(6): 451-458.
- [5] JIUSTI J, KAMMER E H, NECKEL L, et al. Ballistic performance of Al_2O_3 mosaic armors with gap-filling materials[J]. Ceramics International, 2017, 43(2): 2697-2704.
- [6] RAHBK D B, SIMONS J W, JOHNSEN B B, et al. Effect of composite covering on ballistic fracture damage development in ceramic plates[J]. International Journal of Impact Engineering, 2017, 99: 58-68.
- [7] SEIFERT W, STRASSBURGER E, DOLAK M, et al. Experimental study on the dependency of the ballistic performance of tiled ceramic/metal targets on inter tile gap width and projectile impact position[J]. International Journal of Impact Engineering, 2018, 122: 50-59.
- [8] LIU W L, CHEN Z Z, XU T, et al. Effect of Al alloy back panel on the dynamic penetration and damage characteristics of ceramic composite armors[J]. Materials Express, 2019, 9(7): 723-731.
- [9] TEPEDUZU B, KARAKUZU R. Ballistic performance of ceramic/composite structures[J]. Ceramics International, 2019, 45(2): 1651-1660.
- [10] LUO D J, WANG Y W, WANG F C, et al. The influence of metal cover plates on ballistic performance of silicon carbide subjected to large-scale tungsten projectile[J]. Materials & Design, 2020, 191: 108659.
- [11] AN X Y, TIAN C, SUN Q T, et al. Effects of material of metallic frame on the penetration resistances of ceramic-metal hybrid structures[J]. Defence Technology, 2020, 16(1): 77-87.
- [12] 叶腾钊,徐豫新,武岳,等. 添加 TiB_2 对石墨烯改性 B_4C 陶瓷基复合材料抗弹性能的影响[J]. 兵工学报, 2021, 42(7): 1471-1481.
YE T K, XU Y X, WU Y, et al. Effect of TiB_2 addition on ballistic properties of graphene modified B_4C ceramic matrix composites[J]. Acta Armamentarii, 2021, 42(7): 1471-1481.
- [13] CHEN J M, ZENG Y H, LIANG X P, et al. Lightweight design and experimental study of ceramic composite armor[J]. Processes, 2022, 10(6): 1056.
- [14] JIANG A B, LI Y Q, LI D, et al. Study on anti-penetration performance of semi-cylindrical ceramic composite armor against 12.7 mm API projectile[J]. Crystals, 2022, 12(10): 1343.
- [15] CHEN J Y, FENG D L, SUN Q Y, et al. Numerical modeling of shaped charge jet penetration into ceramic metal double-layered medium using smoothed particle hydrodynamics[J]. International Journal of Impact Engineering, 2023, 175: 104526.
- [16] 孙启添,田超,孙昕,等. 封装陶瓷形状对复合结构抗侵彻性能的影响[J]. 兵工学报, 2020, 41(S2): 83-88.
SUN Q T, TIAN C, SUN X, et al. Effect of the shape of ceramics on the anti-penetration performance of compound structure[J]. Acta Arma-

- mentarii, 2020, 41(S2): 83-88.
- [17] 陈刚, 陈小伟, 陈忠富, 等. A3 钢钝头弹撞击 45 钢板破坏模式的数值分析[J]. 爆炸与冲击, 2007, 27(5): 390-397.
- CHEN G, CHEN X W, CHEN Z F, et al. Simulations of A3 steel blunt projectiles impacting 45[#] steel plates[J]. Explosion and Shock Waves, 2007, 27(5): 390-397.
- [18] CRONIN D S, LBVIK, KAUFMANN C, et al. Implementation and validation of the Johnson-Holmquist ceramic material model in LS-DYNA[C/OL]// 4th European LS-DYNA Conference, 2003: 48-59. [2023-12-07]. <https://www.semanticscholar.org/paper/Implementation-and-Validation-of-the-Ceramic-Model-Cronin-Bui/185b0f0e3c4090132c6a1e427e3ec-26450faa82a>.
- [19] 冯江拓, 李芮宇, 周玲, 等. 药型罩材料本构模型对 EFP 数值模拟的影响[J]. 弹箭与制导学报, 2017, 37(4): 71-75.
- FENG J T, LI R Y, ZHOU L, et al. The influence of the constitutive model of shaped charge liner material on EFP numerical simulation[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2017, 37(4): 71-75.
- [20] 孔繁家, 周春桂, 王志军, 等. 罩顶材料对双锥药型罩成型及侵彻性能的影响[J]. 兵器材料科学与工程, 2021, 44(6): 30-35.
- KONG F J, ZHOU C G, WANG Z J, et al. Influence of top material on forming and penetration performance of double cone type charge[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2021, 44(6): 30-35.
- [21] 黄正祥, 宣世峰. 射流斜侵彻陶瓷复合装甲的数值模拟和实验研究[J]. 弹箭与制导学报, 2006, 26(4): 115-117.
- HUANG Z X, XUAN S F. A study on jet penetrated ceramic compound armor obliquely numerical simulation and experiment[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2006, 26(4): 115-117.

通信作者及其研究团队介绍

徐永杰, 男, 火炮、自动武器与弹药工程专业博士, 材料科学与工程学科博士后, 中北大学智能弹药高效毁伤技术科技创新团队教师, 副教授, 硕士研究生导师。主要从事复杂载荷材料响应行为、高强耦合服役多材料界面质量控制、毁防效应模拟试验等方面的教学与科研工作。近年来, 主持省部级基金 3 项, 参与重大专项 5 项。以第一或通信(研究生第一)作者发表学术论文 26 篇, 其中 SCI/EI 收录 10 篇。培养硕士研究生 10 人, 多名在读研究生成功入选“中组部专项联培计划”。

智能弹药高效毁伤技术科技创新团队依托兵器科学与技术学科, 团队具有成员 24 名, 其中教授 4 名、副教授 4 名、讲师(博士) 5 名、博硕士研究生 10 余名。创新团队以山西省兵器工程研究生教育创新中心和中国兵器工业集团有限公司弹药自动装药工艺中心为平台, 在理论与实践相结合的基础上, 形成了智能弹药技术、高效毁伤技术和弹箭飞行控制技术 3 个主要研究方向。近年来, 团队成员在 *Mechanika*、*Mathematical Problems in Engineering*、*Strength of Materials*、*Materials*、*E-Polymers*、*Thin-Walled Structures*、《兵工学报》《北京理工大学学报》《振动与冲击》《含能材料》《爆炸与冲击》等重要知名学术期刊发表学术论文 60 余篇; 团队承担国家自然科学基金等项目 50 余项, 获省部级科技进步二等奖 5 项, 获山西省学术技术带头人 3 名、山西省“三晋英才” 5 名、山西省“教学名师” 2 名。本团队 2018 年入选中北大学“科技创新团队”。

