

侵彻自锐非连续穿甲弹芯性能的数值模拟分析

闫帅宇, 张会锁*, 李昌怡

(中北大学 机电工程学院, 山西 太原 030051)

摘要: 针对高速弹靶作用下硬质金属脆断及弹塑性材料泰勒杆效应导致穿甲弹侵彻性能下降的问题, 采用一维应力波反射与透射理论, 设计了一种将连续弹芯转变为非连续弹芯的多界面穿甲弹芯结构(弹芯头部由钨锥和铝锥交替组成)。首先, 通过理论计算证明经钨-铝-钨界面后弹靶碰撞产生的界面应力波强度降至初始值的51.3%; 然后, 运用Lsdyna软件开展有限元仿真, 对比研究了非连续穿甲弹芯与连续穿甲弹芯在侵彻陶瓷钢复合装甲过程中的应力波传播、动能及速度变化; 最后, 利用正交分析法研究了非连续穿甲弹芯头部锥角、头部锥厚度及各锥间厚度比例对穿靶残余动能的影响。研究表明, 非连续穿甲弹芯在侵彻时应力集中于头部钨锥, 其他部位应力强度很低, 弹芯头部在弹靶过程中能保持尖锐, 侵彻性能显著提升。其动能和速度全程高于连续穿甲弹芯, 侵彻后残余动能和残余速度分别高出48.2%和11.9%; 非连续穿甲弹芯各结构参数对穿靶残余动能的影响程度排序为头部锥角>头部锥厚度>各锥间厚度比例。本文研究结果可为提高穿甲弹芯侵彻性能的工程设计提供理论参考依据。

关键词: 非连续穿甲弹芯; 结构自锐; 金属脆断; 应力波

中图分类号: TJ413.2

文献标识码: A

doi: 10.62756/jnuc.issn.1673-3193.2025.04.0020

引用格式: 闫帅宇, 张会锁, 李昌怡. 侵彻自锐非连续穿甲弹芯性能的数值模拟分析[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2026, 47(1): 8-17.

YAN Shuaiyu, ZHANG Huisuo, LI Changyi. Numerical simulation analysis on performance of discontinuous armor-piercing projectile core with self-sharpening penetration[J]. Journal of North University of China(Natural Science Edition), 2026, 47(1): 8-17.

Numerical Simulation Analysis on Performance of Discontinuous Armor-Piercing Projectile Core with Self-Sharpening Penetration

YAN Shuaiyu, ZHANG Huisuo*, LI Changyi

(School of Mechanical and Electrical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Aiming at the problems of brittle fracture of hard metals under the action of high-speed projectiles and the decline in the penetration performance of armor-piercing projectiles caused by the Taylor rod effect of elastoplastic materials, a multi-interface armor-piercing projectile core structure that transformed continuous cores into discontinuous cores was designed based on the one-dimensional stress wave reflection and transmission theory (the core head is alternately composed of tungsten cones and aluminum cones). Firstly, it was verified through theoretical calculation that the stress intensity after passing through the tungsten-aluminum and aluminum-tungsten interfaces of the stress wave decreased to 51.3%

收稿日期: 2025-04-27

作者简介: 闫帅宇(2002-), 男, 硕士生, 主要从事弹药工程方面的研究。

* 通信作者: 张会锁(1976-), 男, 副教授, 博士, 主要从事弹药工程与爆炸技术方面的研究。E-mail: 20060117@nuc.edu.cn。

of the initial value. Secondly, the finite element simulation was carried out using Lsdyna software to comparatively study the stress propagation, kinetic energy and velocity changes of discontinuous armor-piercing cores and continuous armor-piercing cores during the penetration of ceramic-steel composite armor. Finally, the orthogonal analysis method was utilized to study the influence of the cone Angle at the head of the discontinuous armor-piercing core, the thickness of the cone at the head, and the thickness ratio between each cone on the residual kinetic energy of target penetration. The research results show that the stress of the discontinuous armor-piercing core is concentrated in the tungsten cone at the head during penetration, while the stress intensity in other parts is relatively low. The head of the core can remain sharp during the target firing process, and the penetration performance is significantly improved. Its kinetic energy and velocity are higher than those of the continuous armor-piercing core throughout the process. After penetration, the residual kinetic energy and residual velocity are 48.2% and 11.9% higher, respectively. The order of the influence degree of each structural parameter of the discontinuous armor-piercing core on the residual kinetic energy of penetrating the target is the cone angle of the head > the thickness of the cone of the head > the thickness ratio between each cone. The results can provide theoretical reference for engineering design of improving penetration performance of armor-piercing projectile core.

Key words: discontinuous armor-piercing projectile core; structural self-sharpening; metal brittle fracture property; stress wave

0 引言

穿甲弹作为现代反装甲武器的核心弹药,主要依靠动能实现对装甲目标的侵彻,穿深是衡量其侵彻性能的关键指标。根据德马尔公式(见式(1))^[1]可知,在既定速度下,弹体质量与穿深呈正相关关系,而弹体直径与穿深呈负相关关系。这意味着要获取大穿深,需增大穿甲弹的质量,减小直径,由此导致穿甲弹芯具有大长径比与高密度的特点。然而,过大的长径比会削弱弹芯的抗弯刚度,在侵彻过程中容易引发弯曲或失稳。钨的密度较大,但脆性也很高,在高速碰撞中容易发生脆断(如图 1 所示),降低了弹芯质量,从而影响了穿甲效果。

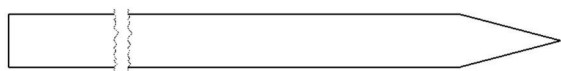


图 1 钨穿甲弹芯脆断

Fig. 1 Brittle fracture of tungsten armor-piercing projectile core

钨合金添加镍、铁、钴等金属后其韧性可以显著,可以避免弹体断裂,进而保持侵彻时弹体的完整性。但是,钨合金的塑性增加导致弹芯在侵彻过程中出现墩粗现象(如图 2 所示),弹芯直径增大,降低了其侵彻性能。

$$v_H = K \frac{d^{0.75} t^{0.75}}{m^{0.5} \cos \beta}, \quad (1)$$

式中: v_H 为极限穿透速度; d 为弹丸直径; K 为穿

甲复合系数; t 为装甲厚度; m 为弹丸质量; β 为弹丸速度方向与靶板法向的夹角。

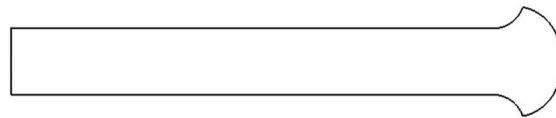


图 2 钨合金弹芯墩粗

Fig. 2 Upsetting of tungsten alloy core

为了提高侵彻性能,研究人员对非连续穿甲弹芯做了很多研究工作。针对硬质金属出现的脆断现象,王明扬等^[2]提出一种两级弹芯结构,通过有限元仿真证明两级弹芯结构更不易破碎,侵彻性能更好。范光磊^[3]设计了一种嵌套式连接的分段弹芯,并通过实验和数值模拟证明了其侵彻优势。但是,上述研究都未解决侵彻过程中的墩粗问题,侵彻性能还有待进一步提高。

针对钨合金弹芯在弹靶作用过程中的墩粗现象,国内外学者开展了许多研究。陈建良等^[4]结合穿甲实验开展了针对钨纤维增强金属玻璃复合材料分段弹体侵彻性能的研究,但是该复合材料分段弹体在侵彻过程中的自锐效果不好,弹体结构容易发生分散,进而导致弹体侵彻性能明显降低。Upadhyaya^[5]、王猛^[6]、罗荣梅^[7]、曲禹同^[8]、田开文等^[9]的研究主要探讨了通过热加工或晶粒细化等手段降低钨合金的临界绝热剪切应变率,从而改善钨合金的材料性能,使其在穿甲过程中能够发生绝热剪切现象,产生自锐效应,进而提

高其侵彻能力。然而,改善材料性能的方法通常伴随着较高的成本。Ekbom^[10]、Nechitailo^[11]、Ballew^[12]等提出了将不同材料进行组合制成杆式穿甲弹的弹体,在侵彻过程中充分发挥各材料的特性,从而提升穿甲弹整体侵彻能力的概念。吴群彪等^[13]对由钨合金和碳化钨构成的组合杆式穿甲弹结构进行了侵彻半无限钢靶的仿真分析,研究结果表明,尽管该结构在侵彻过程中能够出现结构自锐现象,但其自锐效果却相对有限。

董永香等^[14]利用霍普金森杆研究了三明治结构中的应力波传播,并进行了数值模拟与实验的对比。见雷雷^[15]应用一维应力波透射与反射理论对不同结构弹体头部表面处的应力波传入装药内的应力波强度进行了计算,证明合理的复合结构可以有效减弱应力波的强度。

本文针对高速弹靶作用时硬质金属出现的脆断现象和弹塑性材料出现的墩粗现象,利用一维应力波反射与透射理论,设计了一种多界面非连续穿甲弹芯结构,使其在侵彻过程中的应力集中在头部,头部锥不断脱落,使弹头保持尖锐形状,大大减弱向弹尾部传播的应力波强度,从而不易发生脆断。然后,利用Lsdyna开展有限元仿真,与连续穿甲弹芯侵彻陶瓷复合装甲的过程进行对比,分析了二者在侵彻过程中弹体内的应力波传播、动能和速度的变化趋势,证明非连续穿甲弹芯结构具有更好的侵彻性能。最后对非连续穿甲弹芯的弹头部锥角、头部锥厚度、各锥间厚度比例进行正交分析,并对它们的影响程度进行排序,从而为非连续穿甲弹芯的设计提供参考。

1 设计理论

1.1 穿甲弹芯墩粗和脆断机理

钨合金弹芯高速撞击靶板时,首先在撞击界面产生巨大压力,引发弹性压缩波向弹体内部传播。随着弹性波持续传递能量,撞击端应力迅速累积,当超过材料的动态屈服强度时,该区域进入塑性状态并形成初始塑性区^[16]。此后,随着侵彻的不断进行,塑性变形区向弹体内部扩展。在此过程中,弹芯经历轴向压缩和径向膨胀的墩粗变形,最终形成典型的蘑菇头形貌。

钨弹芯出现脆断现象是由于钨是脆性材料,脆性材料通常抗压不抗拉,抗拉强度极限低于抗压强度极限,在压缩状态下不会破坏,而在拉伸

状态下则会被破坏,压缩应力波在介质中传播至自由表面时,会反射回拉伸波,且反射的拉伸波与尚未反射的压缩波叠加,在自由表面附近形成净拉伸应力^[17]。当净拉伸应力超过材料抗拉强度极限时,材料内将形成裂纹,严重时会造成脆断。

钨合金弹芯出现墩粗和钨弹芯出现脆断都是由应力波传递导致的,若能将应力集中在弹芯头部很小的范围内,减弱向弹尾传播的应力波强度,则可以大大减弱墩粗和脆断现象。

1.2 一维应力波反射与透射理论

应力波在传播的过程中会受到界面的影响,由一维应力波反射与透射理论可知,应力波由波阻抗大的材料进入波阻抗小的材料,应力波强度就会减弱,钨合金自身波阻抗较大,如果在钨合金后面加一些波阻抗小的材料,则可以起到减弱应力波强度的作用。同一材料中应力波不断衰减,界面对应力波强度的影响与材料波阻抗有关,在撞击瞬间,弹头产生极大的压缩应力,越往后应力强度越低,为了减小压缩应力对弹体结构的破坏,不同材料弹芯设计为前面薄后面厚。基于此原理设计的非连续穿甲弹芯如图3所示。由于从波阻抗小的材料进入波阻抗大的材料时,应力波强度会增强,本文利用一维应力波反射与透射理论计算了应力波经过一次钨-铝界面和一次铝-钨界面时的应力波强度。

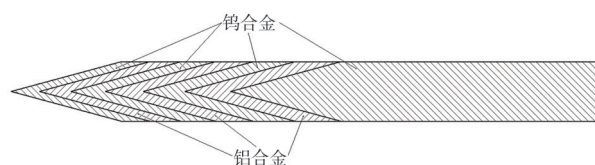


图3 非连续穿甲弹芯结构

Fig. 3 Structure of discontinuous armor-piercing projectile core

当波传播到两种介质的边界时,将发生反射和透射。设弹性波从一种介质(有关量都用下标A表示)传播到另一种波阻抗不同的介质(有关量都用下标B表示),传播方向垂直于界面。当入射波弹性扰动 σ_1 到达界面时。不论对第一种介质,还是对第二种介质,都会引起扰动,即分别向两种介质中传播反射扰动 σ_R 和透射扰动 σ_T 。只要这两种介质在界面处始终保持接触(既能承压又能承拉而不分离),则根据连续条件和牛顿第三定律,即界面两侧经反射-透射后的质点速度应相等,应力应相等,有^[15,18]

$$\sigma_1 + \sigma_R = \sigma_T. \quad (2)$$

再根据物质点运动的连续性条件,有

$$v_1 + v_R = v_T. \quad (3)$$

分别用下标 I, T 和 R 表示入射波、透射波和反射波。

$$v = \frac{\sigma}{\sqrt{E\rho}} = \frac{c}{E} \sigma = \frac{\sigma}{\rho c}, \quad (4)$$

式中: ρ 为材料密度; E 为材料弹性模量。

根据物质点速度与应力水平的关系式(4), 对于入射波、反射波和透射波分别有

$$v_I = \frac{\sigma_I}{\rho_A c_A}, \quad (5)$$

$$v_R = -\frac{\sigma_R}{\rho_A c_A}, \quad (6)$$

$$v_T = \frac{\sigma_T}{\rho_B c_B}. \quad (7)$$

联立式(2), 式(3), 式(5)~式(7) 容易得到透射波及反射波的应力幅值分别为

$$\sigma_R = F\sigma_I, \quad (8)$$

$$v_R = -Fv_I, \quad (9)$$

$$\sigma_T = T\sigma_I, \quad (10)$$

$$v_T = nTv_I, \quad (11)$$

其中,

$$n = \frac{\rho_A c_A}{\rho_B c_B}, \quad (12)$$

$$F = \frac{1-n}{1+n}, \quad (13)$$

$$T = \frac{2}{1+n}, \quad (14)$$

式中: n 为两种介质的波阻抗比值; F 和 T 分别为反射系数和透射系数, 它们完全由两种材料的波阻抗比值 n 所确定。显然有

$$1+F=T. \quad (15)$$

注意到, T 总为正值, 所以透射波和入射波总是同号。 F 的正负取决于两种介质波阻抗的相对大小, 本文分两种情况来讨论。

1) 如果 $n < 1$, 即 $\rho_A c_A < \rho_B c_B$, 则 $F > 0$, $T > 1$, 反射的应力扰动和入射的应力扰动同号(反射加载), 而透射扰动从应力幅值上来说强于入射扰动。这就是应力波由所谓的“软”材料传入“硬”材料时的情况。

2) 如果 $n > 1$, 即 $\rho_A c_A > \rho_B c_B$, 则 $F < 0$, $T < 1$, 反射的应力扰动和入射的应力扰动异号(反射卸载), 而透射扰动从应力幅值上来说弱于入射扰动。这就是应力波由所谓的“硬”材料传入“软”材料时的情况。

本文所用材料的波阻抗计算相关参数如表 1

所示, 将钨锥-铝锥-钨锥结构简化为多层板结构(如图 4 所示), 应用一维应力波透射与反射理论对多层板结构内的应力波传播进行分析。

表 1 钨合金和铝合金波阻抗相关参数

Tab. 1 Parameters related to wave impedance of tungsten alloy and aluminum alloy

材料	$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	E/GPa
钨合金	18.5	343
铝合金	2.78	72.4

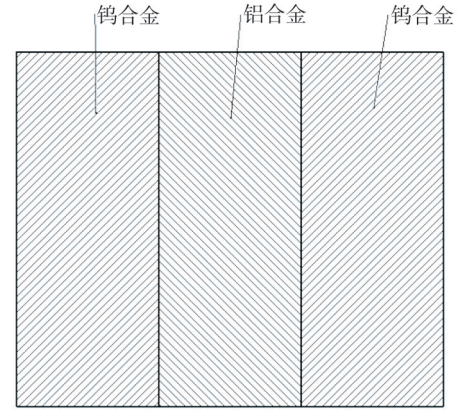


图 4 非连续穿甲弹芯头部一维界面简化图

Fig. 4 A simplified one-dimensional interface diagram of the head of a discontinuous armor-piercing projectile core

经过第一个界面时, 有

$$n_1 = \frac{\rho_W c_W}{\rho_L c_L} = 5.615, \quad (16)$$

$$\sigma_{T1} = T_1 \sigma_I = \frac{2}{1+n_1} \sigma_I = 0.302 \sigma_I, \quad (17)$$

$$\sigma_{R1} = F_1 \sigma_I = \frac{1-n_1}{1+n_1} \sigma_I = -0.698 \sigma_I. \quad (18)$$

经过第二个界面时, 有

$$n_2 = \frac{\rho_L c_L}{\rho_W c_W} = 0.178, \quad (19)$$

$$\sigma_{T2} = T_2 \sigma_{T1} = \frac{2}{1+n_2} \sigma_{T1} = 0.513 \sigma_I, \quad (20)$$

$$\sigma_{R2} = F_2 \sigma_{T1} = \frac{1-n_2}{1+n_2} \sigma_{T1} = 0.211 \sigma_I, \quad (21)$$

式中: 经过第一个界面的相关参数下标为 1; 经过第二个界面的相关参数下标为 2; 铝合金材料参数下标为 L ; 钨合金材料参数下标为 W ; 正负号代表应力波的相位关系。

第一个钨合金中的应力强度为 σ_I , 经过一个界面后铝合金中的应力强度为 $0.302 \sigma_I$, 经过第二个界面后第二个钨合金内的应力强度为 $0.513 \sigma_I$ 。因此, 经过一次钨-铝界面和一次铝-钨界面后应力强度由初始应力强度 σ_I 变为了 $0.513 \sigma_I$, 证明通过一次钨-铝界面和一次铝-钨后应力波强度减弱了。

2 仿真分析

2.1 有限元模型构建及材料参数

非连续穿甲弹芯的头部由两种不同材料交替组成,具体结构如图5所示。弹芯的主体材料选用钨合金,弹芯头部则采用钨锥和铝锥交替排列的方式。连续穿甲弹芯选用钨合金。非连续穿甲弹芯和连续穿甲弹芯的直径均为20 mm,为保证两种弹芯具有相同的初始动能,就要使二者在初速相同的情况下质量相同,由于铝合金的密度低,故非连续穿甲弹芯较长一些。复合靶板上部为陶瓷靶板,厚度为10 mm,下部为钢靶,厚度为90 mm。

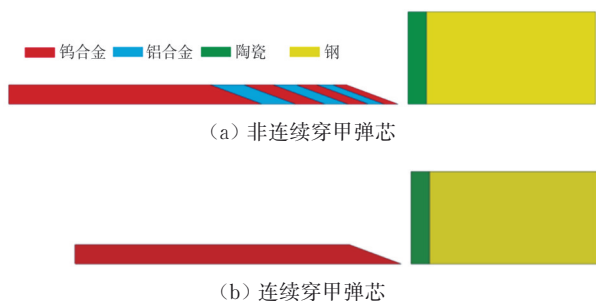


图5 弹靶作用1/4模型

Fig. 5 1/4 model of projectile-target interaction

在建模过程中,使用TrueGrid软件进行网格划分,所有网格均为六面体单元^[19]。弹靶作用过程采用Lagrange算法进行计算。考虑到模型的轴对称特性,为了提高计算效率,建立了1/4模型,同时为了确保计算结果的准确性,靶板中心区域的网格进行了加密处理,弹靶作用有限元模型如图6所示。

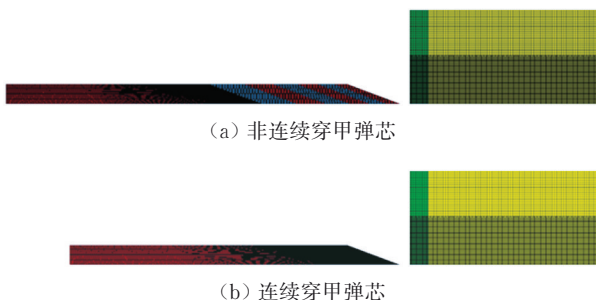


图6 弹靶作用1/4有限元模型

Fig. 6 1/4 finite element model of the projectile-target interaction

通过关键字CONSTRAINED_GLOBAL设置对称约束,通过CONTACT_ERODING_SURFACE_TO_SURFACE设置弹靶之间的侵蚀接触,通过CONTACT_TIED_NODES_TO_SURFACE设置陶瓷靶和钢靶之间的粘结接触。

在高速侵彻的过程中,弹体与靶板之间的接触区会受到高温、高压以及高应变率等因素的力学作用,使材料处于一个塑性大变形和断裂的状态。为了准确地描述这一复杂的物理现象,学者们采用经典的JOHNSON-COOK本构模型来分析材料的力学性能变化。同时,结合累积损伤失效模型来评估高速侵彻过程中材料可能发生的损伤和失效。本文利用GRUNEISEN状态方程对弹体侵彻过程中的压力变化进行了详细的描述。其中,JOHNSON-COOK模型本构关系为

$$\sigma = \left[A + B \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right)^n \right] \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right], \quad (22)$$

式中: σ 为材料的流动应力; A 为材料在参考应变率下的屈服强度; B 和 n 为应变硬化系数; ϵ 为材料应变; ϵ_0 为参考应变; C 为应变率敏感系数; m 为热软化指数; $\dot{\epsilon}$ 为材料的应变率; $\dot{\epsilon}_0$ 为参考应变率; T 为瞬时温度; T_r 为参考温度; T_m 为材料的熔点。仿真中钨合金材料选用JOHNSON-COOK材料模型和GRUNEISEN状态方程。

在LS-DYNA中,MAT_PLASTIC_KINEMATIC是模拟金属靶板(如钢、铝)常用的材料模型,其能够高效合理地描述金属材料在动态载荷(如冲击、弹体侵彻)下的关键力学行为。本文仿真中的铝合金材料和钢靶选用PLASTIC_KINEMATIC材料模型。

利用有限元仿真软件进行数值模拟仿真时,陶瓷面板材料本构模型一般选择JOHNSON-HOLMQUIST_CERAMIC模型,本文仿真中陶瓷也选用该材料模型。

文献[20]介绍了有限元分析常用的材料本构模型、状态方程、材料动态力学参数的标定方法,给出了上千种常用材料的数值计算材料模型参数,数据来源可靠。本文中使用的材料参数均取自文献[20],具体见表2~表6。

表2 钨合金的Johnson-Cook材料模型

Tab. 2 The Johnson-Cook material model of tungsten alloy

$\rho / (g \cdot cm^{-3})$	G / GPa	E / GPa	γ	A / GPa
18.5	134	343	0.22	1.9
B / GPa	n	C	m	D_1
0.177	0.12	0.016	1	0.705
D_2	D_3	D_4		
0.732	-0.54	-0.015		

表 3 钨合金的 Gruneisen 状态方程

Tab. 3 The Gruneisen state equation of tungsten alloy

$C/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	S_1	GAMAO	A
4 040	1.23	1.67	0.46

表 4 铝合金的 PLASTIC_KINEMATIC 材料模型

Tab. 4 The PLASTIC_KINEMATIC material model of aluminum alloy

$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	E/GPa	γ	SIGY/GPa	ETAN/GPa	BETA
2.78	72.4	0.33	0.345	0.777	0.5

表 5 45 号钢的 PLASTIC_KINEMATIC 材料模型

Tab. 5 The PLASTIC_KINEMATIC material model of No. 45 steel

$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	E/GPa	γ	SIGY/GPa	ETAN/GPa
7.877	207	0.33	1.03	6.9

表 6 陶瓷的 JOHNSON_HOLMQUIST_CERAMICS 材料模型

Tab. 6 JOHNSON_HOLMQUIST_CERAMICS material model of ceramics

$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	G/GPa	A/GPa	B/GPa	C
3.163	183.8	0.96	0.35	0
M	N	T/GPa	HEL/GPa	P_{HEL}/GPa
1	0.65	0.37	14.567	5.9
D_1	D_2	K_1	K_2	K_3
0.48	0.48	2.05	0	0

2.2 网格无关性验证

为了提升仿真的可信度与准确性,验证网格无关性,建立连续穿甲弹芯侵彻靶板不同网格尺寸

的模型,通过对比侵彻残余动能来看网格尺寸带来的影响。不同网格尺寸下的靶后残余动能如图 7 和表 7 所示。综合考量计算结果与时长,采用 $0.5\text{ mm}\times 0.5\text{ mm}\times 0.5\text{ mm}$ 的六面体网格。

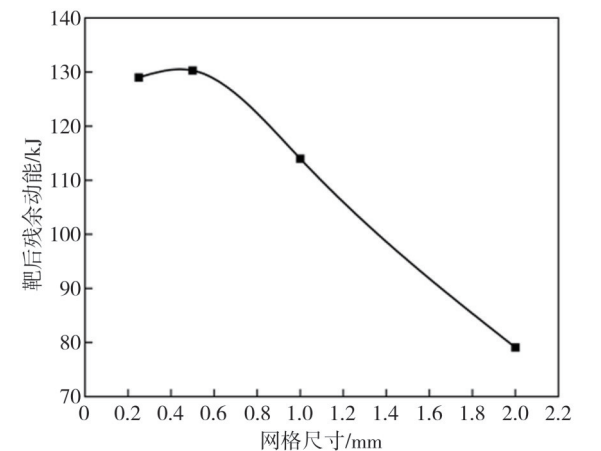


图 7 网格尺寸与靶后残余动能的关系

Fig. 7 The relationship between grid size and residual kinetic energy behind the target

表 7 不同网格尺寸下的靶后残余动能

Tab. 7 Residual kinetic energy behind the target under different grid sizes

网格尺寸/mm	靶后残余动能/kJ
2	79.1
1	114.0
0.5	130.3
0.25	129.0

2.3 侵彻速度对侵彻效果的影响

表 8 展示了不同侵彻速度下连续穿甲弹芯和非连续穿甲弹芯的侵彻残余动能,可以看出,在 $600\sim 1\,500\text{ m/s}$ 侵彻速度下非连续穿甲弹芯的穿靶残余动能相较于连续穿甲弹芯均有较大提升,侵彻速度为 $1\,500\text{ m/s}$ 时的侵彻残余动能提升最大,后文仿真使用的侵彻速度均为 $1\,500\text{ m/s}$ 。

表 8 不同侵彻速度下残余动能的提升率

Tab. 8 The increase rate of residual kinetic energy under different penetration speeds

侵彻速度/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	靶后残余动能/kJ		
	连续穿甲弹芯	非连续穿甲弹芯	增量
600	15.8	27.6	11.8
900	23.6	64.6	41.0
1 200	86.1	123.3	37.2
1 500	130.3	193.1	62.8

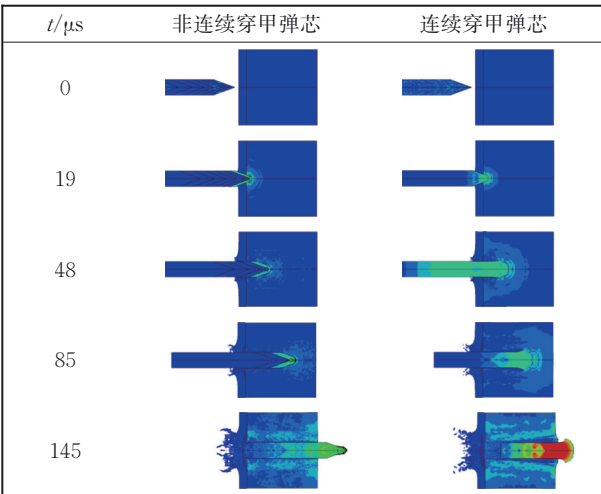
2.4 仿真结果及分析

2.4.1 弹靶作用过程应力分析

表 9 展示了非连续穿甲弹芯和连续穿甲弹芯在弹靶作用过程中的 Von Mises 应力云图。

表 9 两种弹芯对弹靶作用过程的 Von Mises stress 云图

Tab. 9 Von Mises stress nephogram of the interaction between two types of projectile core and target



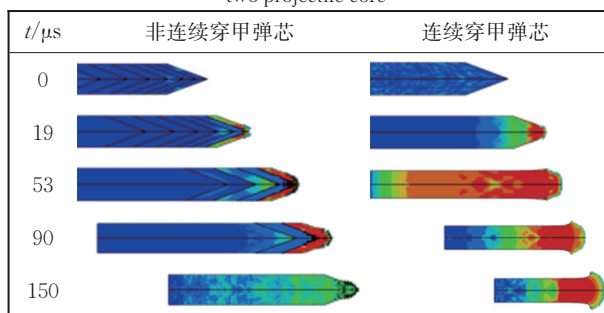
分析结果表明:两种弹芯的应力分布特征存在显著差异;非连续穿甲弹芯的应力主要集中在头部区域,这种应力分布特征导致其头部锥体在侵彻过

程中不断脱落,从而产生了自锐效应;连续穿甲弹芯的整体应力强度普遍较高,这种应力分布特点使得弹芯头部在侵彻过程中持续变粗,进而增大了弹芯侵彻的阻力,同时导致侵彻孔径扩大和更严重的侵蚀现象。对比分析显示,在弹靶作用过程中,连续穿甲弹芯的应力强度高于非连续穿甲弹芯。

2.4.2 弹芯侵彻过程应力分析

非连续穿甲弹芯和连续穿甲弹芯侵彻过程的 Von Mises stress 云图如表 10 所示。

表 10 两种弹芯侵彻过程的 Von Mises stress 云图
Tab. 10 Von Mises stress nephogram of penetration processes by two projectile core



对于非连续穿甲弹芯,在 0~19 μs 期间,弹靶开始作用,在接触界面产生极大的冲击压力,分别向弹、靶扩散,非连续穿甲弹芯头部的应力集中在第一个钨锥上,这是由于钨-铝界面的存在使向铝锥中传播的应力波强度大大减弱。非连续穿甲弹芯的应力波传播到第二个钨锥上,且第一个钨锥和第二个钨锥上的应力大于第一个铝锥上的应力,由一维应力波反射与透射理论可知,应力波从波阻抗大的材料传入波阻抗小的材料时,透射扰动从应力幅值上来说弱于入射扰动,应力波从波阻抗小的材料传入波阻抗大的材料时,透射扰动从应力幅值上来说强于入射扰动。在 19~53 μs 期间,表面材料在剧烈的摩擦下不断脱落,第一个钨锥和第一个铝锥已经全部侵蚀,应力集中在第二个钨锥上,且应力波传播到第三个钨锥上,同样地,第二个钨锥和第三个钨锥上的应力大于第二个铝锥上的应力。在 53~90 μs 期间,第二个钨锥和第二个铝锥已经全部侵蚀,应力集中在第三个钨锥上,且应力波传播到钨芯主体部分,同样地,第三个钨锥和钨芯主体上的应力大于第三个铝锥上的应力。在 90~150 μs 期间,第三个钨锥和第三个铝锥已经全部侵蚀,钨芯主体应力波向弹尾部传播。连续穿甲弹芯在接触到靶板时,弹头部应力急剧上升且向弹尾部传播,弹芯的整体应力强度都比较高,表面材料在剧烈的

摩擦下不断脱落,弹体不断发生侵蚀,弹头部变粗。由表 10 可以看出,非连续弹芯的头部更为尖锐,更有利于侵彻。

图 8 是前 20 μs 距弹尖水平距离 2.06 cm 处单元的有效应力(前 20 μs 非连续穿甲弹芯第一个钨锥正在侵彻靶板,距弹尖 2.06 cm 处的单元是非连续穿甲弹芯的第二个钨锥中心单元)。

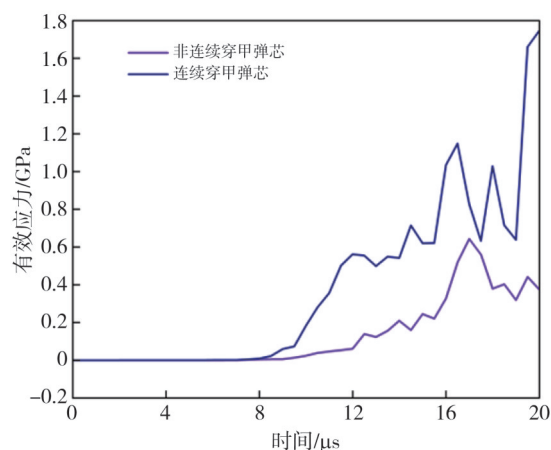


图 8 前 20 μs 距弹尖水平距离 2.06 cm 处单元的有效应力
Fig. 8 The effective stress of the element at a horizontal distance of 2.06 cm from the tip of the bullet in the first 20 μs

由图 8 可以看出,连续弹芯该处单元的有效应力从 7 μs 时开始增大,而非连续穿甲弹芯该处单元的有效应力从 9 μs 时开始增大,非连续穿甲弹芯该处单元的有效应力一直小于连续穿甲弹芯该处单元的有效应力。以上结果证明经过一次钨-铝界面和一次铝-钨界面后,应力波得到了有减弱。

2.4.3 弹芯侵彻过程动能和速度分析

由图 9 和表 11 可知,在两种弹芯接触到靶板时,二者的动能都开始下降。

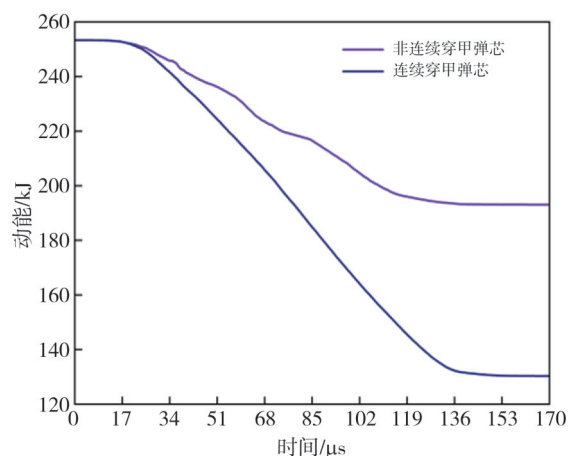


图 9 连续穿甲弹芯和非连续穿甲弹芯动能对比图
Fig. 9 Kinetic energy comparison chart between continuous armor-piercing core and discontinuous armor-piercing core

表 11 靶后残余动能和残余速度对比

Tab. 11 Comparison of residual kinetic energy and residual velocity behind the target

靶后残余动能/kJ		
连续穿甲弹芯	非连续穿甲弹芯	增量
130.3	193.1	62.8(48.2%)
靶后残余速度/(m·s ⁻¹)		
连续穿甲弹芯	非连续穿甲弹芯	增量
1 325.35	1 483.48	158.13(11.9%)

连续穿甲弹芯的动能是匀速下降的,非连续穿甲弹芯的动能由于铝锥的存在而经历了三个降速阶段,且每次降速的时间都会加长。非连续穿甲弹芯的动能始终大于连续穿甲弹芯的动能,侵彻复合靶板之后非连续穿甲弹芯的残余动能比连续穿甲弹芯的残余动能大 48.2%。

由图 10 和表 11 可知,在两种弹芯接触到靶板时,二者的速度都开始下降。连续穿甲弹芯的速度是匀速下降的,非连续穿甲弹芯的速度由于铝锥的存在而经历了三个加减速阶段,且每次加减速的时间段都会加长。非连续穿甲弹芯的速度始终大于连续穿甲弹芯,侵彻复合靶板之后非连续穿甲弹芯的残余速度比连续穿甲弹芯的残余速度大 11.9%。

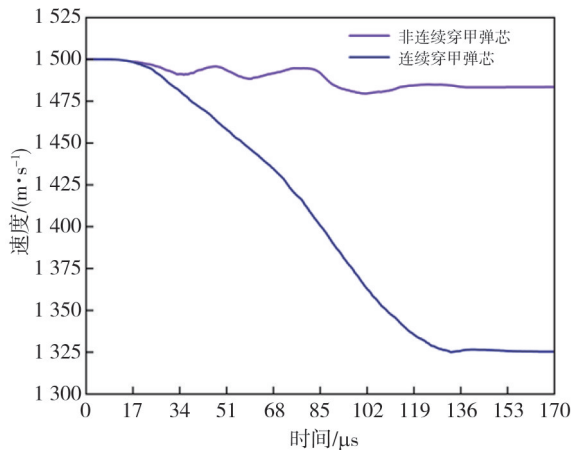


图 10 连续穿甲弹芯和非连续穿甲弹芯的速度对比

Fig. 10 Comparison of the velocity between continuous armor-piercing core and discontinuous armor-piercing core

2.4.4 非连续穿甲弹芯自锐机理

在侵彻过程中,钨合金弹芯头部在极高轴向压应力作用下发生剧烈塑性变形,形成“蘑菇头”状结构。这种变形导致边缘区域产生显著的环向拉应力和剪切应力,环向拉应力引发径向裂纹,而剪切应力则形成绝热剪切带。在应力三轴度影响下,弹芯中心区域表现为塑性流动,边缘区域则因拉应力作用发生脆性断裂。随着侵彻的持

续,边缘材料不断剥落,同时新的材料通过塑性流动补充到头部,形成动态平衡,使弹芯在保持“蘑菇头”形状的同时逐渐缩短。这一失效过程可通过 Johnson-Cook 模型的应力三轴度、应变率和温度耦合准则进行定量描述,当损伤累积达到临界值时即判定材料失效。

非连续穿甲弹芯在弹靶作用时,弹头部产生极大的压力,并向弹尾扩散,由于钨合金-铝合金界面的存在,使向后传播的应力波强度大大减弱,应力集中在弹头部锥,除头部锥以外,其他弹芯部位的应力强度很小,达不到材料屈服强度,故塑性变形区只存在于头部锥这一小部分区域上,其他部分不会产生塑性变形,仍保持尖锐形状,当头部锥完全侵蚀后,后部锥又补上,不断形成自锐效果。

3 正交实验设计与分析

为了节约时间成本,提高试验效率,本文利用正交试验的方法研究非连续穿甲弹各结构参数对靶后残余动能的影响,其中结构参数包括头部锥角、头部锥的厚度和各锥之间的比例^[21]。影响因素及各因素水平如表 12 所示。依照所选因素以及所选参数水平设计实验,结果如表 13 所示。

表 12 影响因素与水平

Tab. 12 Influencing factors and levels

影响因素	影响因素水平		
	-1	0	1
头部锥角 $T_1/(^\circ)$	30	40	50
头部锥厚度 T_2/mm	2.5	3.5	4.5
各锥角之间的厚度比例 T_3	1:1.1	1:1.2	1:1.3

表 13 仿真实验设计及结果

Tab. 13 Simulation experiment design and results

序号	影响因素			穿靶残余动能/kJ
	T_1	T_2	T_3	
1	-1	-1	-1	167.2
2	-1	0	0	173.6
3	-1	1	1	167.8
4	0	-1	0	152.2
5	0	0	1	160.8
6	0	1	-1	159.1
7	1	-1	1	140.5
8	1	0	-1	134.1
9	1	1	0	154.4

根据上述实验,通过正交分析可以得到各个影响因素不同水平下的影响情况如表 14 所示。

由表 12、表 13 和表 15 可以看出所有非连续

穿甲弹芯的残余动能均大于连续穿甲弹芯。由表 14 可以看出,头部锥角对侵彻效果的影响最大,各锥间厚度比例对侵彻效果的影响最小,影响程度的排序为头部锥角>头部锥厚度>各锥间厚度比例。在 $30^{\circ}\sim 50^{\circ}$ 的范围内,头部锥角越小侵彻效果越好;在 $2.5\sim 4.5\text{ mm}$ 的范围内,头部锥厚度越大侵彻效果越好;在 $1:1.1\sim 1:1.3$ 的范围内,锥间厚度比例 $1:1.2$ 的侵彻效果最好。

表 14 分析统计结果

Tab. 14 Analysis and the statistics results

因素水平	不同影响因素下的残余动能/kJ		
	T_1	T_2	T_3
-1	169.5	153.3	153.5
0	157.4	156.2	160.1
1	143.0	160.4	156.4
极差	26.5	7.1	6.6

表 15 连续穿甲弹芯仿真结果

Tab. 15 Simulation results of continuous armor-piercing projectile core

序号	锥角/ $^{\circ}$	穿靶残余动能/kJ
10	30	117.0
11	40	98.6
12	50	89.4

4 结 论

针对高速弹靶作用下硬质金属脆断及弹塑性材料泰勒杆效应导致穿甲弹侵彻性能下降的问题,设计了一种非连续多界面穿甲弹芯结构。通过理论计算和数值模拟得到以下结论:

1) 将钨锥-铝锥-钨锥简化为多层板结构,应用一维应力波反射与透射理论计算得出,经过一次钨-铝界面和一次铝-钨界面后应力强度减小为初始应力强度的 51.3% ,证明通过多界面减弱应力波强度的方法可行。

2) 非连续穿甲弹芯侵彻时,应力主要集中在最头部钨锥上,其他部位应力很小,弹头始终保持尖锐;连续穿甲弹芯整体应力强度都很高,弹头部出现墩粗。非连续穿甲弹芯在距弹尖 2.06 cm 处的有效应力始终低于连续穿甲弹芯,这说明钨-铝和铝-钨界面可以有效减弱应力波强度。

3) 在整个弹靶作用过程中,非连续穿甲弹芯的动能和速度始终大于连续穿甲弹芯,侵彻复合靶板之后非连续穿甲弹芯的残余动能比连续穿甲弹芯的残余动能大 48.2% ,残余速度大 11.9% 。

4) 利用 Lsdyna 软件对穿靶过程进行数值模拟,得到了头部锥角、头部锥的厚度和各锥之间

的比例三种因素在不同水平下的穿靶残余动能,运用极差分析的方法,统计出三种因素对穿靶残余动能影响的排序为头部锥角>头部锥厚度>各锥间厚度比例。

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors declare no relevant conflict of interests.

参考文献:

- [1] 魏惠之,朱鹤松,汪东晖,等. 弹丸设计理论[M]. 北京:国防工业出版社,1985.
- [2] 王明扬,郑宇轩,李天鹏,等. 分段弹芯对陶瓷/钢复合装甲的侵彻行为[J]. 兵工学报, 2023, 44(12): 3667-3675.
- [3] WANG Mingyang, ZHENG Yuxuan, LI Tianpeng, et al. Behavior of segmented projectile penetrating into ceramic/steel composite armor[J]. Acta Armamentarii, 2023, 44(12): 3667-3675. (in Chinese)
- [4] 范光磊. 分段穿甲弹结构设计及侵彻机理研究[D]. 南京:南京理工大学, 2023.
- [5] 陈建良,李继承. 钨纤维增强金属玻璃复合材料分段弹体侵彻性能研究[J]. 爆炸与冲击, 2020, 40(6): 54-65.
- [6] CHEN Jianliang, LI Jicheng. Ballistic behavior of tungsten fiber/metallic glass matrix composite segmented rods[J]. Explosion and Shock Waves, 2020, 40(6): 54-65. (in Chinese)
- [7] UPADHYAYA A. Processing strategy for consolidating tungsten heavy alloys for ordnance applications[J]. Materials Chemistry and Physics, 2001, 67(1/2/3): 101-110.
- [8] 王猛. 细晶钨合金穿甲弹芯侵彻机理分析及试验研究[D]. 南京:南京理工大学, 2013.
- [9] 罗荣梅. 细晶钨合金穿甲弹靶作用机理研究[D]. 南京:南京理工大学, 2017.
- [10] 曲禹同. 基于绝热剪切机制的细晶钨合金弹芯自锐行为研究[D]. 沈阳:沈阳理工大学, 2022.
- [11] 田开文,尚福军,祝理君. 具备绝热剪切敏感性的钨合金穿甲弹材料研究现状[J]. 兵器材料科学与工程, 2005, 28(4): 53-56.
- [12] TIAN Kaiwen, SHANG Fujun, ZHU Lijun. Research status of WHA with adiabatic shear susceptibility[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2005, 28(4): 53-56. (in Chinese)
- [13] EKBOM L. Armor-piercing projectile with spiculating core: US19900459489[P]. 1991-12-03.

- [11] NECHITAILO N V. Advanced high-speed ceramic projectiles against hard targets[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 45(1): 614-619.
- [12] BALLEW W D. Taylor impact test and penetration of reinforced concrete targets by cylindrical composite rods [D]. Blacksburg: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2004.
- [13] 吴群彪, 沈培辉, 刘荣忠. 组合杆式穿甲弹的侵彻能力仿真分析[J]. 系统仿真学报, 2013, 25(2): 367-370.
WU Qunbiao, SHEN Peihui, LIU Rongzhong. Simulation analysis on penetration ability of composite rod penetrator[J]. Journal of System Simulation, 2013, 25(2): 367-370. (in Chinese)
- [14] 董永香, 黄晨光, 段祝平. 多层介质对应力波传播特性影响分析[J]. 高压物理学报, 2005, 19(1): 59-65.
DONG Yongxiang, HUANG Chenguang, DUAN Zhuping. Analysis on the influence of multi-layered media on stress wave propagation[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2005, 19(1): 59-65. (in Chinese)
- [15] 见雷雷. 钨合金结构侵彻弹体应用分析研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
- [16] 徐恒威, 卢永刚, 李军润, 等. 考虑变形/侵蚀耦合的弹体横截面积理论模型[J]. 兵工学报, 2024, 45(S1): 97-104.
- XU Hengwei, LU Yonggang, LI Junrun, et al. A theoretical model for the cross-sectional area of a projectile considering deformation and erosion coupling [J]. Acta Armamentarii, 2024, 45(S1): 97-104. (in Chinese)
- [17] 张守中. 爆炸与冲击动力学[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1993.
- [18] 余同希, 邱信明. 冲击动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011.
- [19] 辛春亮, 薛再清, 涂建, 等. TrueGrid 和 LS-DYNA 动力学数值计算详解[M]. 北京: 机械工业出版社, 2019.
- [20] 辛春亮, 薛再清, 涂建, 等. 有限元分析常用材料参数手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2020.
- [21] 谢天奇, 张会锁, 陶洋, 等. 基于 EDEM 的炸药颗粒静电积累仿真研究[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2024, 45(6): 764-771.
XIE Tianqi, ZHANG Huisuo, TAO Yang, et al. Simulation of electrostatic accumulation of explosive particles based on EDEM[J]. Journal of North University of China(Natural Science Edition), 2024, 45(6): 764-771. (in Chinese)