

武器装备

贫铀合金球对 Q235 钢靶侵彻性能研究

王存洪, 郑文凯, 吴翰林, 曹玉武, 孙兴昀*

(西安近代化学研究所, 西安 710065)

摘要: **目的** 研究贫铀合金球对 Q235 钢靶的侵彻行为, 为贫铀合金材料侵彻行为的深入研究以及在战斗部中广泛应用提供支撑。**方法** 采用 Johnson-Cook 强度模型和失效模型建立贫铀合金球撞击 Q235 钢靶的模型, 利用 Abaqus/explicit 模块模拟研究贫铀合金球初速与尺寸对剩余速度、扩孔面积、侵彻深度的影响, 并对结果进行分析。**结果** 通过试验与模拟得到了贫铀合金球的穿靶极限速度, 两者结果基本吻合, 验证了模型参数的准确性。相同尺寸下, 贫铀合金球的剩余速度随初速的增大呈线性增大趋势, 穿靶后速度衰减率为 14.6%~33.2%。初速为 900~1 300 m/s、直径为 5~9 mm 时, 扩孔面积比为 1.08~1.286。贫铀合金球的侵彻深度 (H) 随直径 (d) 和初速 (v) 的增大逐渐增大, 三者的关系为 $H = -10.27 + 1.36d + 0.01v$ 。**结论** 贫铀合金球初速和尺寸是影响侵彻深度的关键因素, 但对扩孔直径没有显著影响。

关键词: 贫铀合金; Q235 钢靶; 初速; 剩余速度; 扩孔面积; 侵彻深度

中图分类号: O347

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2023)11-0001-07

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2023.11.001

Penetration Performance of Depleted Uranium Alloy Ball on Q235 Steel Target

WANG Cun-hong, ZHENG Wen-kai, WU Han-lin, CAO Yu-wu, SUN Xing-yun

(Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065, China)

ABSTRACT: The work aims to study the penetration behavior of depleted uranium alloy balls on Q235 steel targets, to provide support for further study of the penetration behavior of depleted uranium alloy material and its wide application in warhead. An impact model of depleted uranium alloy balls on Q235 steel target was established with a Johnson-Cook strength model and a failure model. The effect of initial velocity and size of depleted uranium alloy balls on residual velocity, ream area and penetration depth was simulated with an Abaqus/explicit module, and the results were analyzed. The ultimate penetration velocity of depleted uranium alloy balls was obtained by experiment and simulation, and the results were basically consistent, which verified the accuracy of the model parameters. It was found that the residual velocity of depleted uranium alloys ball with the same size increased linearly with the increase of initial velocity, and the velocity attenuation rate after penetration was 14.6%~33.2%. When the initial velocity was 900 m/s ~1 300 m/s and the diameter was 5 mm ~9 mm, the reamer area ratio was 1.08~1.286. Penetration depth of depleted uranium alloy balls increased with diameter and velocity gradually, the relationship between penetration depth (H), diameter (d) and initial velocity (v) was $H = -10.27 + 1.36d + 0.01v$. The initial velocity and size of the alloy

收稿日期: 2023-05-25; 修订日期: 2023-08-14

Received: 2023-05-25; Revised: 2023-08-14

基金项目: 国家安全重大基础研究 (14021005020302)

Fund: Major Basic Research Projects on National Security (14021005020302)

引文格式: 王存洪, 郑文凯, 吴翰林, 等. 贫铀合金球对 Q235 钢靶侵彻性能研究[J]. 装备环境工程, 2023, 20(11): 1-7.

WANG Cun-hong, ZHENG Wen-kai, WU Han-lin, et al. Penetration Performance of Depleted Uranium Alloy Ball on Q235 Steel Target[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(11): 1-7.

*通信作者 (Corresponding author)

ball are the key factors affecting the penetration depth, but have no significant effect on the reaming diameter.

KEY WORDS: depleted uranium alloy; Q235 steel target; initial velocity; residual velocity; reaming area; penetration depth

随着现代科学技术的不断发展和进步,武器装备的毁伤性能与防护性能得到了明显提高,常规材料的密度和强度已经无法实现有效地防护和毁伤作用。贫铀(Depleted Uranium, DU)合金材料因具有高密度、高强度、高硬度以及侵彻过程中的自锐性等优异性能,在贫铀弹、穿甲弹、聚能战斗部等^[1-3]武器装备中有着广泛的应用前景。相关研究发现,由贫铀合金制备的武器装备的毁伤威力明显优于常规武器^[4-5]。但是由于贫铀具有放射性且藏储性能较差影响,目前只有美国等少数国家在研究使用^[5]。

国内外研究人员在DU合金方面开展了大量的研究工作。早期主要是由国外研究者对贫铀合金的层裂问题、冲击压缩下材料力学性能及其本构参数^[6-7]进行了研究,随后开展了外载荷作用下贫铀合金材料的塑性变形、绝热剪切带的形成和发展,以及热处理对其性能的影响研究^[8-9]。如Batra等^[10]研究了贫铀冲击载荷作用下绝热剪切带的形成和发展。Eckelmeyer等^[11]研究了热处理对铀钛合金性能的影响,发现铀合金的形成过程以及溶液中合金元素的固溶体增强效应,可以使合金的强度比其他非铀合金高2倍。近年来,王铁福等^[12]研究了贫铀合金中的碳含量对射流质量及侵彻性能的影响。宋顺成等^[13]基于SPH方法对贫铀合金射弹的成形过程进行了数值仿真,给出了贫铀合金的Johnson-Cook(J-C)材料模型。何立峰等^[14]对铀钛合金在室温下的压缩力学行为进行了研究,通过试验数据拟合修正了J-C模型。石杰等^[15]通过霍普金森杆试验研究了不同温度人工时效的铀铌合金在冲击载荷作用下的绝热剪切带成形机理。郭亚昆等^[16]研究了U-5.7Nb合金动载下绝热剪切带的形成及其演化机制。朱福林等^[17]通过数值模拟研究了DU合金破片形状和长径比对冲击起爆B炸药的影响,发现相同质量条件下,长径比越小的破片冲击带壳B炸药的阈值速度越小,同质量破片在撞击面积相同时,方形面破片更容易起爆带壳B炸药。吴凡达等^[18]人通过数值模拟研究了不同形状DU合金破片侵彻性能,得到棱角着靶姿态立方体的侵彻性能最好。另外,龚柏林等^[19]开展了贫铀合金药型罩的聚能弹破甲后效试验研究。Xu等^[20]运用数值方法研究了贫铀聚能装药药型罩的性能,通过调整不同的参数,优化了聚能装药贫铀药型罩的性能,并通过相关实验进行了验证。

综上所述,研究人员对贫铀合金材料的力学性能、绝热剪切行为、侵彻性能以及贫铀合金破片对炸药的冲击起爆特性进行了大量研究,得到了丰富的研究成果,但是针对研究者重点关注的贫铀合金破片对靶标的扩孔性能以及侵彻深度的研究工作报道较少。

为此,本文采用J-C强度模型和累积失效模型建立了贫铀合金球撞击Q235钢靶的模型,基于Abaqus/explicit模块研究了贫铀合金球对Q235钢靶的侵彻行为,开展了合金球尺寸和初速对剩余速度、扩孔面积和侵彻深度的影响研究,本研究将对贫铀合金材料在武器装备中的应用提供帮助。

1 数值模型

1.1 模型建立

选用Abaqus/explicit模块建立贫铀合金球侵彻靶板的数值模型,研究贫铀合金球侵彻Q235钢靶板的侵彻行为。计算模型中,选用不同尺寸贫铀合金球侵彻Q235钢靶,球形直径分别取5、6、7、8、9 mm。靶板尺寸为60 mm×60 mm×6 mm和60 mm×60 mm×20 mm,前者用来研究贫铀合金球撞击Q235钢靶时的极限穿靶速度以及扩孔面积,后者用来研究贫铀合金球的侵彻深度。在建模过程中,合金球垂直撞击靶板中心,两者之间采用中性轴算法,接触类型为Contact Inclusions, ALL EXTERIOR,如图1a所示。为了提高计算精度和运算时间,对距靶板中心直径15 mm面域内进行网格加密处理,密度是外围网格的5倍,如图1b所示。其中,靶板采用六面体单元划分网格,靶板中心网格的尺寸为0.2 mm,外围网格的尺寸为1 mm,靶板网格总数为119 844个。另外,贫铀合金球采用六面体为主的单元划分网格,网格的尺寸为0.2 mm,网格总数为42 018个。

1.2 模型参数

贫铀合金球在撞击靶板过程中会产生大变形现象,Johnson-Cook模型因能够准确描述大变形和高应变率而被广泛应用于弹靶撞击模拟分析中。本研究采用Johnson-Cook强度模型和累积失效模型^[21-22],计算公式如(1)所示。

$$\sigma = (1-D) \left(A + B \varepsilon^n \right) \left(1 + C \ln \dot{\varepsilon}^* \right) \left(1 - T^{*m} \right) \quad (1)$$

式中: A 、 B 、 C 、 n 、 m 为材料常数; ε 为有效塑性应变; $\dot{\varepsilon}^* = \dot{\varepsilon} / \dot{\varepsilon}_0$ 为无量纲应变率($\dot{\varepsilon}_0 = 1 s^{-1}$ 为参考应变率); $T^* = (T - T_r) / (T_f - T_m)$ 为相似温度,其中 T_m 和 T_r 分别为材料的融化温度和室温; D 为材料损伤因子, $D = \sum \Delta \varepsilon / \varepsilon_f$,取值范围为0~1。当 $D=0$ 时,材料无损伤;当 $D=1$ 时,材料完全损伤。

$\Delta \varepsilon$ 为一个时间步的塑性应变增量, ε_f 为当前时间步的破坏应变,如式(2)所示。

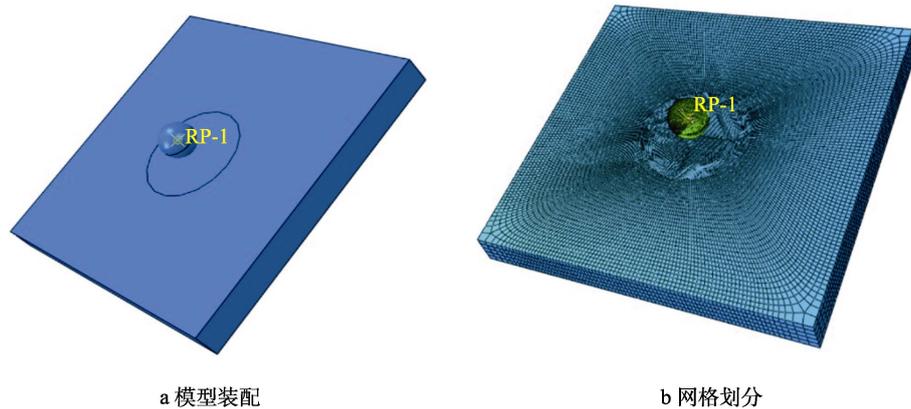


图 1 贫铀合金球撞击靶板模型

Fig.1 Impact model of depleted uranium alloy balls on target plates: a) model assembly; b) meshing

$$\varepsilon_f = (D_1 + D_2 \exp D_3 \sigma^*) (1 + D_4 \ln \varepsilon^*) (1 + D_5 T^*) \quad (2)$$

式中: σ^* 为静水压力与等效应力之比; $D_1 \sim D_5$ 为材料失效参数。

贫铀合金球和 Q235 钢靶的相关物理性能参数参考文献[17-18], 材料基本参数见表 1, 状态方程参数见表 2。

表 1 贫铀合金球材料基本模型参数
Tab.1 Basic model parameters of depleted uranium alloy ball materials

参数项	贫铀合金球	Q235
$\rho_0 / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	18.6	7.8
E / GPa	182.8	200
ν	0.22	0.33
T_r / K	293	293
T_m / K	1 473	1 795
$\varepsilon_0 / \text{s}^{-1}$	1	2.1×10^{-3}
A / GPa	1 022	293.8
B / GPa	1 120	230.2
n	0.25	0.578
C	0.007	0.065 2
m_1	—	1.762
m_2	—	1.278
m	1	0.706
D_1	0.18	0.472
D_2	3.3	-6.8
D_3	-1.5	-7.805
D_4	0.021	-0.019 3
D_5	0	3.811

表 2 状态方程参数
Tab.2 Parameters of equation of state

材料	E / GPa	Gruneisen parameters	$C_1 / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	S_1	a
贫铀合金球	182.8	2.32	2 590	1.56	0
Q235	200	1.93	4 070	1.49	0.46

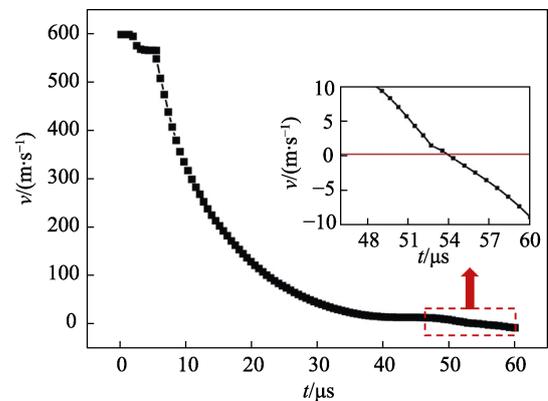


图 2 贫铀合金球以 600 m/s 撞击靶板的速度衰减
Fig.2 Velocity attenuation diagram of 600 m/s depleted uranium alloy ball impacting the target plate

1.3 模型验证

为验证建立模型及其参数的准确性和有效性, 进行了贫铀合金球撞击 Q235 钢靶的弹道极限速度试验。试验选用 12.7 mm 弹道枪来驱动贫铀合金球高速运动, 合金球直径小于弹道枪的口径。为了保证合金球在弹道枪内平稳运动和膛内火药气体的密闭性, 采用闭气环固定破片方法。合金球初速是通过调整药筒装药量来控制, 速度大小是通过激光测速仪进行测量, 并且采用高速相机对合金球穿靶过程进行记录。其中, 高速相机曝光时间为 1~3 μs , 帧率为 15 000~30 000 fps, 贫铀合金球直径 (d) 分别为 6、7、8 mm。在建模分析中, 规定以撞击靶板的方向为速度的正方向。

直径 5 mm 的贫铀合金球以 600 m/s 的速度撞击靶板的速度衰减过程如图 2 所示, 发现破片在 50 μs 时速度衰减至 0, 之后速度小于 0。图 2 中插图以速度曲线局部放大, 发现贫铀合金球的速度出现了微弱的反弹现象, 说明合金球达到了极限穿靶速度, 但未完全贯穿靶板。由此可知, 5 mm 贫铀合金球撞击 6 mm Q235 钢靶的极限速度为 600 m/s。5 mm 贫铀合金球以 600 m/s 的速度刚好穿透 6mm Q235 靶板的数

值模拟与实物如图3所示。对比发现,两者穿孔边缘隆起、形状相似,均为冲塞式穿孔模式。不同尺寸贫铀合金球撞击靶板极限速度的试验结果与模拟结果如图4所示,试验得到了3种不同合金球尺寸撞击靶板的极限速度,数值模拟给出了5种不同尺寸合金球撞击靶板的极限速度,其中误差棒取值为±20 m/s。通过图3发现,模拟结果与试验结果基本吻合,吻合度高达98.6%。由此证明了建模方法和相关参数的准确性,为下一步扩孔面积及侵彻深度研究奠定基础。

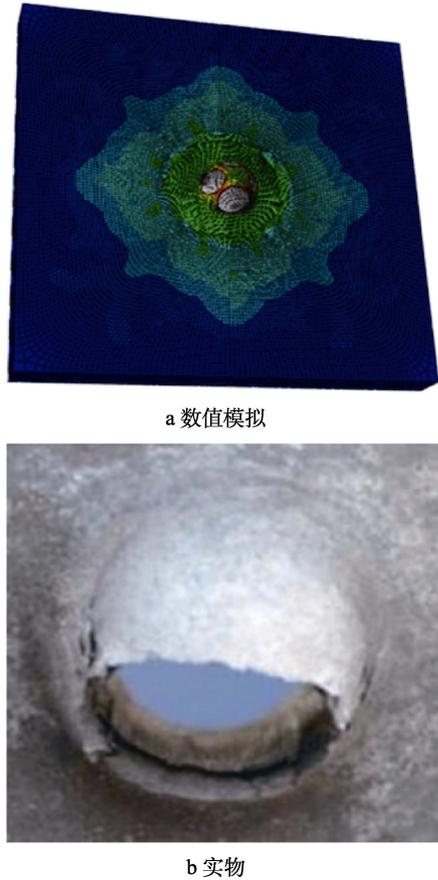


图3 极限穿靶数值模拟及实物
Fig.3 (a) Numerical simulation diagram and (b) object picture of ultimate penetration velocity

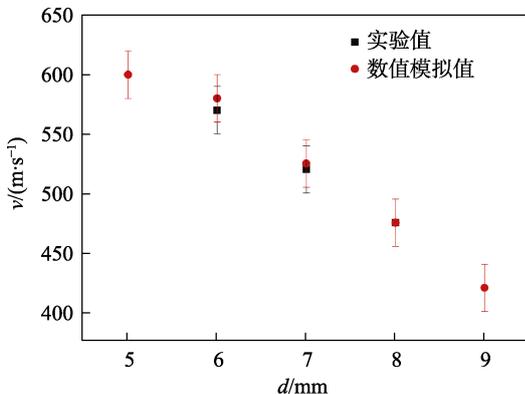


图4 贫铀合金球直径与极限穿靶速度
Fig.4 Diameter and ultimate penetration velocity of depleted uranium alloy balls

2 结果分析与讨论

2.1 剩余速度

在上述模型的基础上,首先开展了贫铀合金尺寸和初速对剩余速度的影响研究。在综合考虑破片初速和飞行中的速度衰减及装甲目标的防护等特性, d 分别取 5、6、7、8、9 mm, 初速分别为 900、1 000、1 100、1 200、1 300 m/s。通过数值模拟,得到了着靶初速与剩余速度的关系,如图5所示。可以发现,相同尺寸下,贫铀合金球的剩余速度随着靶速度的增大而增大;同一速度下,贫铀合金球的剩余速度随着直径的增大而增大,基本呈现线性变化,这与徐豫新等^[23]在高速钨合金破片对中厚钢靶的穿甲效应研究中给出的结论基本保持一致。随后,对合金球穿靶速度衰减值与衰减率进行了计算,发现穿靶速度衰减值在 170~337 m/s, 衰减率在 14.6%~33.2%。其中,直径为 5 mm、速度为 900 m/s 的贫铀合金球的衰减率最大,达到了 33.2%;直径为 9 mm、速度为 1 300 m/s 的贫铀合金球衰减率最小,为 14.6%。另外,通过 Recht 公式^[24]对破片不同着靶速度对剩余速度的影响进行了进一步分析。Recht 公式为 $v_1 = \lambda(v_0^k - v_{50}^k)^{1/k}$, 其中, $\lambda = m/(m + m_p)$; m 为破片质量; m_p 为塞块质量; v_1 为剩余速度; v_0 为着速; v_{50} 为弹道极限速度; k 为常数。对于相同靶板和贫铀合金球, λ 、 v_{50} 等参数是确定的。因此,通过 Recht 公式可以得到,相同尺寸贫铀合金球撞击靶板,破片剩余速度随破片初速的增大而逐渐增大。

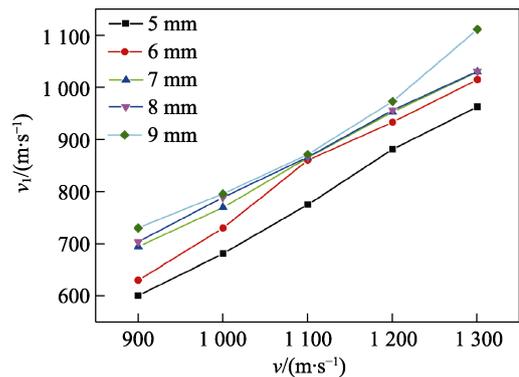


图5 不同直径贫铀合金球的初速与剩余速度
Fig.5 Initial velocity and residual velocity of depleted uranium alloy balls with different diameters

2.2 扩孔面积比

破片穿靶后对材料造成的扩孔面积一直是影响破片毁伤效果的关键指标,因此基于上述研究进一步开展了贫铀合金球穿靶后的扩孔情况。模拟分析中,首先对穿靶后的扩孔直径(d)进行了测量,并计算了对应扩孔面积(S),其次将扩孔面积与真实破片横截

面积 (S_1) 的比值定义为扩孔面积比 n ($n=S/S_1$)。不同尺寸贫铀合金球的初速与扩孔直径关系如图 6 所示。可以发现, 相同尺寸下, 合金球扩孔直径随初速增大未发生显著变化, 基本在一个固定数值上下波动。随后, 经数据处理得到了不同条件下贫铀合金球撞击靶板时的扩孔面积比值 n , 见表 3。通过表 3 可以发现, 破片速度在 900~1 300 m/s、直径在 5~9 mm 时, 其 n 值不呈现相关变化规律, 基本在 1.08~1.286。李鑫等^[25]、彭军等^[26]对活性破片撞击钢靶/铝靶进行了试验研究, 得到穿孔直径是破片直径的 1.04~1.62 倍, 发现穿孔直径与破片初速和靶板厚度无关。此外, 余庆波等^[27]在金属基活性破片侵彻铝靶试验研究中得到, 破片初速在 742~1 024 m/s 时, 穿孔面积是破片横截面积的 1.09~1.28 倍。可以发现, 本文数值模拟所得到的结论与上述研究结论基本一致, 而存在差异的主要原因是所选择的破片尺寸以及靶板材质不

同引起的。由此可得, 破片尺寸以及靶板材质将会对 n 值产生一定影响。

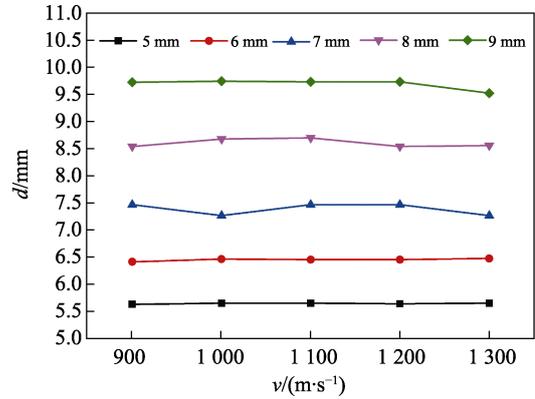


图 6 不同直径贫铀合金球的初速与扩孔直径
Fig.6 Initial velocity and remaining diameters of depleted uranium alloy balls with different diameters

表 3 不同直径合金球在不同初速撞击靶板时的扩孔面积比值

Tab.3 Reaming area ratio of alloy balls with different diameters impacting the target plate at different initial velocities

$v/(m \cdot s^{-1})$	$d=5$ mm	$d=6$ mm	$d=7$ mm	$d=8$ mm	$d=9$ mm
900	1.277	1.164	1.14	1.142	1.169
1000	1.286	1.165	1.080	1.180	1.174
1100	1.286	1.164	1.142	1.185	1.171
1200	1.281	1.164	1.142	1.142	1.171
1300	1.286	1.170	1.082	1.148	1.121

2.3 侵彻深度

在贫铀合金球侵彻深度研究过程中, 模型中选择的靶板厚度为 20 mm, 规定最大穿靶深度为侵彻深度。直径为 5 mm、初速为 900 m/s 的贫铀合金球穿靶深度随时间的变化曲线如图 7 所示, 插图为合金球侵彻深度数值模拟。通过曲线发现, 合金球穿靶深度先增大后趋于平稳, 在 13.6 μ s 时达到了最大穿靶深度 6.35 mm, 即为直径为 5 mm、初速为 900 m/s 的合金球侵彻 20 mm 靶板的侵彻深度。随后, 开展了不同尺寸贫铀合金球在不同初速下的侵彻深度研究, 得到了不同直径贫铀合金球的初速与侵彻深度的关系, 如图 8 所示。通过图 8 发现, 在相同速度下, 合金球直径越大, 侵彻深度越大, 相同直径合金球的侵彻深度随着初速的增加逐渐增大。此结论与马玉媛^[28]在预制破片的速度和侵彻深度研究一文中给出的相关结论一致。根据马玉媛^[28]在文中给出的球形破片侵彻木板的关系式 $H=-74.95+11.72d+0.148v$ (H 为侵彻深度, d 为破片直径, v 为初速), 对本文数据进行线性回归分析, 得到贫铀合金球侵彻钢板的侵彻深度与合金球直径和初速的关系为 $H=-10.27+1.36d+0.01v$ 。通过关系式发现, 合金球直径与初速越大, 侵彻深度越大, 侵彻深度分别与直径和初速呈线性关系。由此得到, 直径与初速是影响侵彻深度的关键因素。同时, 根据

文献[29]可知, 由牛顿第二定律以及初始条件可得, 弹丸侵彻金属靶的最大深度为 $H=A \ln(Bv_0^2+1)$, 其中, $A=m/2\pi a^2 \rho N_d$, $B=\rho N_d/\sigma_s$ (m 为弹丸质量; a 为弹丸半径; ρ 为密度; N_d 为流动阻力项系数, 与弹头形状和靶板半径有关; σ_s 为准静态径向应力)。可以看出, 对于相同材料, 影响侵彻深度的因素是破片半径 a 和初速 v_0 。因此, 对于相同尺寸贫铀合金球和靶板, 材料性能及其尺寸等参数不变, A 和 B 为常数, 得到贫铀合金破片侵彻深度随初速度的增大而增大。

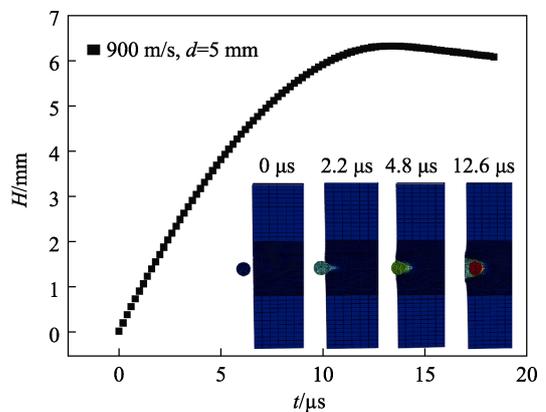


图 7 贫铀合金球侵彻深度随时间变化曲线
Fig.7 Curve of penetration depth of depleted uranium alloy balls with time

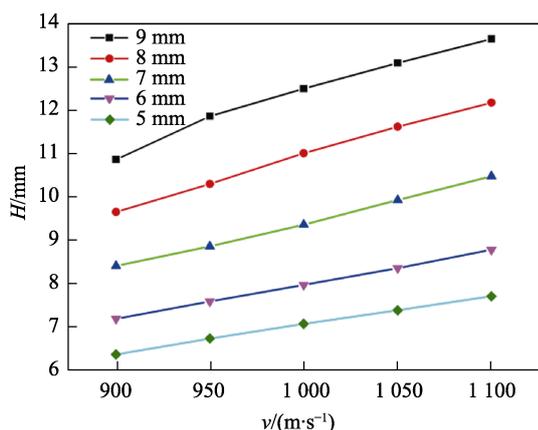


图8 不同直径贫铀合金球初速与侵彻深度的关系

Fig.8 Relationship between initial velocity and penetration depth of depleted uranium alloy balls with different diameters, v is the initial velocity, H is the penetration depth

3 结论

贫铀合金材料因其优异的力学性能,在武器装备中具有广泛的应用前景。本文利用 Abaqus/explicit 模块研究了贫铀合金球对 Q235 钢靶的侵彻行为,在试验验证模型参数可靠性的基础上,开展了合金球初速和尺寸对撞击靶板的剩余速度、扩孔面积比以及侵彻深度的影响。得到如下主要结论。

1) 相同尺寸下贫铀合金球的剩余速度随着靶初速的增大而增大,基本呈现线性变化,穿靶速度衰减率在 170~337 m/s, 衰减率为 14.6%~33.2%。

2) 贫铀合金球初速为 900~1 300 m/s、直径为 5~9 mm 时, n 值范围在 1.08~1.286, 初速和直径对 n 值没有显著影响。

3) 贫铀合金球直径和初速越大,侵彻深度越大,侵彻深度与直径和初速关系为 $H=10.27+1.36d+0.01v$ 。由此说明,贫铀合金球初速和直径是影响穿靶和侵彻深度的关键因素。

上述结论为贫铀合金球穿靶扩孔性能以及侵彻行为研究奠定基础,同时为战斗部中的进一步应用提供支撑。

参考文献:

- [1] 岳明凯, 曲家惠. 穿甲弹弹芯材料的发展趋势研究[J]. 飞航导弹, 2010(12): 67-70.
YUE Ming-kai, QU Jia-hui. Research on the Development Trend of Piercing Projectile Core Material[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2010(12): 67-70.
- [2] 白新德, 姜作中, 林伟, 等. 贫铀武器的发展现状及其前景[J]. 稀有金属材料与工程, 2003, 32(6): 412-416.
BAI Xin-de, JIANG Zuo-zhong, LIN Wei, et al. Review on the Development and Prospect of DU Munitions[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2003, 32(6):

412-416.

- [3] 贾梦晔, 高永宏, 周鹏飞, 等. 药型罩材料与结构的研究进展[J]. 兵器装备工程学报, 2022, 43(1): 10-18.
JIA Meng-ye, GAO Yong-hong, ZHOU Peng-fei, et al. Research Progress on Material and Structure of Drug Cover[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2022, 43(1): 10-18.
- [4] 李含健, 朱鹤, 张强, 等. 2020 年国外精确制导武器战斗部和引信技术发展分析[J]. 飞航导弹, 2021(2): 14-18.
LI Han-jian, ZHU He, ZHANG Qiang, et al. Analysis on the Development of Precision-Guided Weapon Warhead and Fuze Technology Abroad in 2020[J]. Aerospace Technology, 2021(2): 14-18.
- [5] 马心璐, 王茜, 韩锋. 基于专利地图的贫铀技术国际研究态势分析[J]. 飞航导弹, 2018(2): 57-61.
MA Xin-lu, WANG Qian, HAN Feng. Analysis of International Research Situation of Depleted Uranium Technology Based on the Patent Map[J]. Aerospace Technology, 2018(2): 57-61.
- [6] DANDEKAR D P, MARTIN A G, KELLEY J V. Deformation of Depleted Uranium - 0.78 Ti under Shock Compression to 11.0 GPa at Room Temperature[J]. Journal of Applied Physics, 1980, 51(9): 4784-4789.
- [7] ADDESSIO F L, ZUO Q H, MASON T A, et al. Model for High-Strain-Rate Deformation of Uranium-Niobium Alloys[J]. Journal of Applied Physics, 2003, 93(12): 9644-9654.
- [8] 黄广炎, 冯顺山, 李顺平, 等. 贫铀合金在冲击条件下的燃烧效应研究[C]// 第 10 届全国冲击动力学学术会议论文摘要集. 太原: 北京理工大学, 2011.
HUANG Guang-yan, FENG Shun-shan, LI Shun-ping, et al. Research on Burning Effect of Depleted Uranium Alloys under Impact Condition[C]// The 10th National Conference on Impact Dynamics. Taiyuan: Beijing Institute of Technology, 2011.
- [9] 王小英, 郎定木, 任大鹏, 等. 高应变率下铀铌合金的断裂组织特征[J]. 稀有金属材料与工程, 2005, 34(10): 1546-1549.
WANG Xiao-ying, LANG Ding-mu, REN Da-peng, et al. The Fracture Morphology and Microstructure of U-Nb Alloy at High Strain Rate[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2005, 34(10): 1546-1549.
- [10] BATRA R C, STEVENS J B. Adiabatic Shear Bands in Axisymmetric Impact and Penetration Problems[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1998, 151(3/4): 325-342.
- [11] ECKELMEYER K H. Diffusional Transformations, Strengthening Mechanisms, and Mechanical Properties of Uranium Alloys[R]. Albuquerque: Sandia National Laboratories, 1982.
- [12] 王铁福, 阮文俊. 贫铀中的碳含量对其聚能射流性能的影响[J]. 科学通报, 1997, 42(7): 764-766.
WANG Tie-fu, RUAN Wen-jun. The Effects of Carbon Content of Depleted Uranium on the Performance of

- Shaped Charge Jets[J]. Chinese Science Bulletin, 1997, 42(7): 764-766.
- [13] 宋顺成, 高平, 才鸿年. 贫铀合金材料自锻弹丸的数值模拟[J]. 应用数学和力学, 2003, 24(9): 951-955.
SONG Shun-cheng, GAO Ping, CAI Hong-nian. Numerical Simulation for Formed Projectile of Depleted Uranium Alloy[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2003, 24(9): 951-955.
- [14] 何立峰, 肖大武, 巫祥超, 等. U-Ti 合金变形及失效机理的 SHPB 研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2013, 42(7): 1382-1386.
HE Li-feng, XIAO Da-wu, WU Xiang-chao, et al. Deformation and Failure Mechanism of U-Ti Alloy by SHPB[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2013, 42(7): 1382-1386.
- [15] 石洁, 王小英, 赵雅文, 等. 热处理对铀铌合金变形局域化的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2014, 43(11): 2836-2840.
SHI Jie, WANG Xiao-ying, ZHAO Ya-wen, et al. Effects of Heat Treatment on Microstructure and Dynamic Shear Localization of U-Nb Alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2014, 43(11): 2836-2840.
- [16] 郭亚昆, 帅茂兵, 邹东利, 等. U-5.7Nb 合金动载下绝热剪切带的形成及其演化机制[J]. 稀有金属材料与工程, 2018, 47(5): 1459-1465.
GUO Ya-kun, SHUAI Mao-bing, ZOU Dong-li, et al. Formation and Evolution Mechanism of Adiabatic Shear Bands in U-5.7Nb Alloy Subjected to Dynamic Loading[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2018, 47(5): 1459-1465.
- [17] 朱福林, 陈阳, 崔卫超, 等. DU 合金破片冲击起爆 B 炸药研究[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(3): 69-72.
ZHU Fu-lin, CHEN Yang, CUI Wei-chao, et al. Study on Impact Initiation of Comp. B by DU Alloy Fragment[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2019, 40(3): 69-72.
- [18] 吴凡达, 赵捍东. 钨、铀合金破片侵彻性能对比数值研究[J]. 测试技术学报, 2019, 33(3): 209-215.
WU Fan-da, ZHAO Han-dong. Study on the Penetration Performance of Tungsten Alloy and Uranium Alloy Fragments[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2019, 33(3): 209-215.
- [19] 龚柏林, 李明, 初哲, 等. 贫铀合金药型罩聚能破甲性能实验研究[J]. 高压物理学报, 2018, 32(3): 83-88.
GONG Bai-lin, LI Ming, CHU Zhe, et al. Penetration Performance of Depleted Uranium Alloys Liner[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2018, 32(3): 83-88.
- [20] XU Rong-zheng, CHEN Li, ZHANG Jin-hua, et al. Penetration of an Optimal Depleted Uranium Liner of a Shaped Charge: A Numerical Simulation Method[J]. International Journal of Protective Structures, 2021, 12(3): 396-413.
- [21] JOHNSON G R, COOK W. A Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strains, High Strain Rates and High Temperatures[C]// 7th International Symposium on Ballistics. Netherlands: [s. n.], 2018.
- [22] 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.
- [23] 徐豫新, 王树山, 翟喆, 等. 高速钨合金破片对中厚钢靶的穿甲效应研究[J]. 兵工学报, 2009, 30(S2): 259-262.
XU Yu-xin, WANG Shu-shan, ZHAI Zhe, et al. Research on Armour-Piercing Effect of High Velocity Tungsten Alloy Fragment Against Medium-Thick Steel Target[J]. Acta Armamentarii, 2009, 30(S2): 259-262.
- [24] RECHT R F, IPSON T W. Ballistic Perforation Dynamics[J]. Journal of Applied Mechanics, 1963, 30(3): 384-390.
- [25] 李鑫, 王伟力, 梁争峰, 等. 复合结构活性破片对双层靶标毁伤效应[J]. 兵工学报, 2021, 42(4): 764-772.
LI Xin, WANG Wei-li, LIANG Zheng-feng, et al. Damage Effect of Composite Structural Reactive Fragments on Double-Layer Targets[J]. Acta Armamentarii, 2021, 42(4): 764-772.
- [26] 彭军, 李彪彪, 袁宝慧, 等. 钢包覆式活性破片侵彻双层铝靶的行为特性研究[J]. 火炸药学报, 2020, 43(1): 90-95.
PENG Jun, LI Biao-biao, YUAN Bao-hui, et al. Research on Behavior of Steel-Coated Reactive Materials Fragment on Penetrating Double-Layer Aluminum Plates[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2020, 43(1): 90-95.
- [27] 周晟, 张甲浩, 余庆波. 金属基活性破片侵彻间隔铝靶作用行为[J]. 兵工学报, 2023, 44(8): 2263-2272.
ZHOU Sheng, ZHANG Jia-hao, YU Qing-bo. Behaviors of Metal-Based Reactive Fragments Penetrating Spaced Aluminum Targets[J]. Acta Armamentarii, 2023, 44(8): 2263-2272.
- [28] 马玉媛. 小型预制破片的速度衰减和侵彻深度的研究[J]. 兵工学报, 1981, 2(1): 52-58.
MA Yu-yuan. A Study on the Velocity Dampings and Penetrating Depth of Small Preformed Fragments[J]. Acta Armamentarii, 1981, 2(1): 52-58.
- [29] 王娟, 赵均海, 张建华, 等. 刚性弹侵彻有限直径金属厚靶的机理与模型研究[J]. 工程力学, 2021, 38(7): 239-247.
WANG Juan, ZHAO Jun-hai, ZHANG Jian-hua, et al. Research on Mechanism and Model of Penetration into Metallic Thick Target Finite in Radial Extent by Rigid Projectile[J]. Engineering Mechanics, 2021, 38(7): 239-247.

责任编辑: 刘世忠