

M855A1 步枪弹侵彻钢靶板数值仿真

王积锐^{1,2}, 刘聪和², 樊俊铃³, 焦婷³, 巩建坡⁴, 韩啸¹

(1. 大连理工大学 工程力学系, 辽宁 大连 116024; 2. 大连理工大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116024;
3. 中国飞机强度研究所, 陕西 西安 710065; 4. 潍柴巴拉德氢能科技有限公司, 山东 潍坊 261000)

摘要: M855A1 是一种采用新型穿甲弹结构的小口径步枪弹, 较 M855 步枪弹主要优化了硬目标穿甲与软目标杀伤性能。为研究其穿甲性能, 采用有限元软件 ANSYS/LS-DYNA 对不同射程下 M855A1 步枪弹侵彻结构钢靶板、装甲钢靶板的过程进行数值仿真, 分析穿甲过程中弹头与钢靶板的变形和损伤演化, 并对射程与极限穿透厚度的关系进行函数拟合, 拟合精度高于 99%。结果表明, M855A1 步枪弹能基本满足现代小口径步枪弹对穿甲性能的需求, 其结构在低速、薄靶条件下对弹体动能、质量的利用效率较高。

关键词: 高速侵彻; M855A1 步枪弹; 弹道极限; 穿透仿真; 钢靶板

中图分类号: TJ301 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1093(2022)09-2339-11

DOI: 10.12382/bgxb.2022.0448

Numerical Simulation of the Penetration of M855A1 EPR into Steel Targets

WANG Jirui^{1,2}, LIU Conghe², FAN Junling³, JIAO Ting³, GONG Jianpo⁴, HAN Xiao¹

(1. Department of Engineering Mechanics, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China;
2. School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China;
3. Aircraft Strength Research Institute, Xi'an 710065, Shaanxi, China;
4. Weichai Ballard Hy - Energy Technologies Co., Ltd., Weifang 261000, Shandong, China)

Abstract: M855A1 is a small-calibre high-velocity rifle bullet with the structure of the new type of small- and medium-calibre armour-piercing projectile. Compare to its predecessor, M855/SS109, M855A1 has enhanced penetration performance against hard targets and lethality against soft targets. To study the penetration performance of the new 5.56 mm M855A1, numerical simulations of the process of M855A1 penetrating structural steel target and armoured steel target at different ranges were carried out using the finite element software ANSYS/LS-DYNA. The deformation and damage evolution of the round and steel target during penetration were analysed, and the relationship between range and maximum penetration thickness was fitted as a function, with a fitting accuracy higher than 99%. The results showed that the M855A1 round can meet the demand for penetration performance against hard targets of modern high velocity small-calibre rifle bullets, and its structure is more efficient in utilising the kinetic energy of the round under low-velocity and thin-target conditions.

Keywords: high-velocity penetration; M855A1 EPR; ballistic limit; penetration simulation; steel target

收稿日期: 2022-05-27

基金项目: 国家大学生创新创业训练计划项目(202111014140910); 中央高校基本科研业务费项目(DUT21YG109); 航空科学基金项目(20200009023004)

作者简介: 王积锐(2001—), 男, 本科生。E-mail: 1614700499@qq.com

通信作者: 韩啸(1987—), 男, 副教授, 硕士生导师。E-mail: hanxiao@dlut.edu.cn

0 引言

步枪弹是现代战争中运用最广、消耗最多的一种弹药,主要用以杀伤中近距离有生目标,也可用于破坏轻型车辆、低空飞行器等轻型装甲目标。尽管导弹、火炮等重型武器系统已在战争中占据主导地位,但轻武器仍难以被完全替代,因此枪弹的作用不容忽视。要有效杀伤敌有生目标,枪弹必须能击穿防弹衣、掩体、车辆等防护设备^[1]。

通常情况下,具有穿甲作用的步枪弹由硬质弹芯和软质衬套组成。当侵彻硬目标时,护套变形、破碎,并被阻挡于靶板外侧;弹芯在穿甲过程中起主要作用,在低速下可能无明显损伤,而高速下则可能发生变形和破碎^[2]。目前对步枪穿甲弹的研究多采用实验和有限元分析结合的方法。Senthil 等^[3]通过有限元仿真研究了 7.62 mm 穿甲弹对垂直和倾斜铝合金、结构钢和装甲钢的侵彻过程,发现淬硬钢芯在侵彻过程中几乎不发生破坏,仅略微墩粗和弯曲。Børvik 等^[4]通过高速摄影系统研究 7.62 mm 穿甲弹对垂直高强度钢靶的侵彻过程,发现钢芯中后部分发生脆性断裂。Holmquist 等^[5]通仿真与实验结合的方法研究了 14.5 mm 硬质合金弹芯穿甲弹对高强度钢、装甲钢和碳化硅陶瓷的垂直侵彻过程,发现了与淬硬钢芯相似的碎裂现象,其主要成因是内部应力波反射导致的拉伸失效。Haight 等^[6]通实验研究了两种 5.56 mm 步枪弹对垂直结构钢靶的极限穿透速度,发现钢-铅组合弹芯的 SS109 半穿甲弹的穿甲性能较单一铅芯的 M193 普通弹更不稳定。王永亮^[7]通过仿真研究了 12.7 mm 机枪穿甲弹对垂直 45 号钢靶板的侵彻过程,发现若在仿真中不对弹头施加自旋角速度则会导致仿真结果显著偏差。受限于枪械的射击精度和实验平台的搭建难度,目前对枪弹穿甲的研究多局限于高速、近程条件,仅关注枪弹的穿甲原理而缺少对实际作战能力的评估。现代反恐战争中步兵交火半数以上发生于 300 m 以外^[8],远射程下枪弹的速度已大幅降低,终点弹道过程也随之改变,因此枪弹的低速性能同样需要重视。

M855A1/SS109A1 是一种新型小口径步枪弹,首次公布于 2010 年 6 月,较其前型 M855/SS109 主要增加了钢侵彻体的长度和硬度,小幅提升枪口初速并略微优化气动性能,有效增强了中远射程穿甲及杀伤能力^[9-10]。M855A1 与 7.62 mm AP10、XM1158 等新一代中口径穿甲弹具有相似的结构,

除口径增加带来的尺寸差异外,主要区别在于侵彻体材料为淬硬钢而非穿甲弹的硬质合金。目前公开的国外文献侧重于介绍在实际战场中的应用,在具体性能方面仅讨论了少量基于实验的参数^[9-11]。国内由于缺乏实验材料,研究局限于仿真领域。景形等^[12-13]通过有限元仿真研究了 M855A1 对明胶、松木、结构钢的侵彻效能,但初始速度均设定为接近枪口速的高速,未考虑速度在射程上的衰减,且忽略了弹头的旋转运动,不能准确地反映其实际穿甲效能。

本文利用 ANSYS/LS-DYNA 软件对 M855A1 侵彻硬目标过程进行有限元仿真,研究其对结构钢和装甲钢的极限穿透厚度,直观显示了穿甲过程中弹头变形、破坏的行为,并拟合速度-抗弹系数关系,以期为新型步枪穿甲弹及单兵防护装备设计提供借鉴参考。

1 仿真方法

1.1 M855A1 步枪弹主要参数

1.1.1 弹靶有限元模型

M855A1 步枪弹弹头由钢芯、铜芯、被甲三部分组成,总质量 4.0 g^[9-10],最大直径 5.7 mm,其中钢芯最大直径 4.4 mm。仿真时模型作如下简化:1) 不考虑弹头章动引起的着角和攻角误差;2) 忽略膛线压痕、辊沟、圆角等尺寸微小的结构,在建模时略微改变各部件外形并保持主要几何参数和质量不变;3) 弹头与靶板材质连续且均匀,不存在各向异性、初始应力及加工缺陷;4) 忽略空气阻力和重力影响;5) 忽略靶板的整体运动^[14]。参考实物、几何模型与有限元网格模型如图 1 所示。

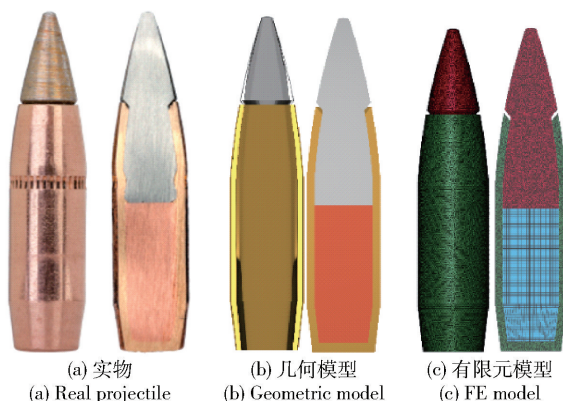


图 1 M855A1 步枪弹

Fig. 1 M855A1 Enhanced Performance Round

靶板总直径 60 mm,发生大变形和破坏的核心

区直径 20 mm。弹头及靶板核心区网格最大边长 0.15 mm,靶板外周区网格由内向外逐渐稀疏,最大边长 0.8 mm。钢芯及被甲几何外形较为复杂,采用四节点四面体单元(ELFORM 10)以准确描述;靶板及铜芯几何外形较为规则,采用八节点六面体单元(ELFORM 1)以提高计算精度。当靶板厚度为 9.525 mm 时,全模型共划分 1 877 334 个网格单元。弹、靶有限元网格模型如图 2 所示。弹头各部件间采用侵蚀单面接触(*CONTACT_ERODING_SINGLE_SURFACE);靶板核心区与弹头采用侵蚀面—面接触(*CONTACT_ERODING_SURFACE_TO_SURFACE),其中弹头为主面,靶板为从面;靶板核心区与外周区采用固连接触(*CONTACT_TIED_SURFACE_TO_SURFACE),其中核心区为主面,外周区为从面。靶板外周设固定约束。

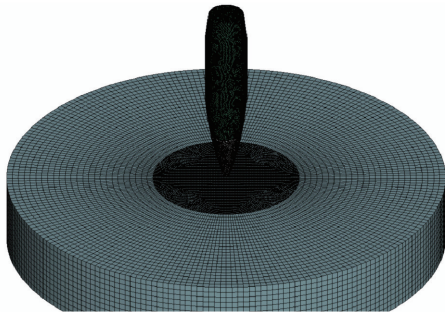


图2 M855A1 侵彻 1006 结构钢靶有限元模型

Fig.2 Finite element model of M855A1 penetrating 1006 steel target

1.1.2 外弹道参数

M855A1 为典型的尖头船尾弹,外形近似于 G7 标准弹形,弹道系数为 0.152,从 M4 卡宾枪发射时初速 905 m/s^[9],有效射程 500 m^[15]。设大气压 101.3 kPa、气温 15 ℃、相对湿度 50%,由 JBM 计算器^[16]计算得 0~600 m 内速度及动能,结果如图 3 所示。M4 卡宾枪缠距 178 mm^[17],弹头初自旋角速度 31 945 rad/s。弹头表面最大切向速度约 91 m/s,在飞行过程中仅受轻微极阻尼力矩影响,其衰减率远小于速度^[18];且相较于弹道标准弹,小口径枪弹的膛线刻痕更浅,表面更光滑,因此黏性阻力更小,不能直接采用经验模型计算。在实际应用中,枪管长度亦可能更长或短,而缠距保持不变,初自旋角速度也随之增减。因此,速度与角速度不存在准确的函数关系;即使针对某型步/机枪-弹系统建立弹道模型,其结论也无法定量推广至其他工况。为简化计算与建模流程,同时保证所得结论的泛用性,假设飞行过程中自旋角速度恒为 30 000 rad/s 不变。

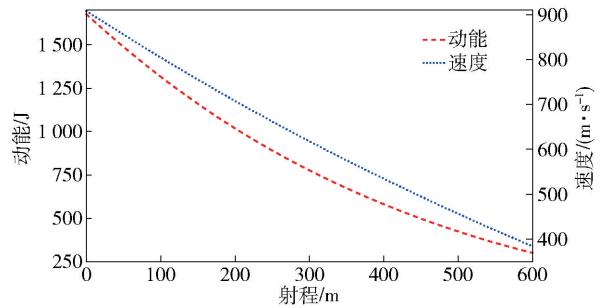


图3 M855A1 动能、速度与射程的关系

Fig.3 Relationship between kinetic energy, velocity and range of of M855A1

1.2 材料模型与仿真参数

钢芯材料为 T12A 工具钢,铜芯及被甲材料为 H70 黄铜。为分析 M855A1 对不同类型目标的穿甲效能,靶板分别选用 AISI 1006 结构钢模拟建筑结构及常规车辆、616 装甲钢(22SiMn2TiB)模拟单兵防护设备。仿真中金属材料均采用 Johnson-Cook 材料模型和 Gruneisen 状态方程。Johnson-Cook 模型能够较为准确地描述金属应变率强化效应和温度软化效应,适用于求解大变形、高应变条件下材料的应力—应变关系^[19]。各材料主要参数见表 1。Gruneisen 状态方程适用于描述金属材料在高温、高压、高应变率条件下表现出来的材料动态行为。

表1 Johnson-Cook 材料模型主要参数

Table 1 Main parameters of Johnson-Cook model

材料	A/MPa	B/MPa	n	C	m
T12A 工具钢 ^[20]	1 200	50 000	1	0	1
H70 黄铜 ^[21]	111.7	504.7	0.42	0.009	1.68
1006 结构钢 ^[22]	350	275	0.36	0.022	1
616 装甲钢 ^[23]	1 470	511	0.26	0.014	1.03

注:A 为初始屈服强度,B 为应变强化系数, n 为应变强化指数, C 为应变率强化系数, m 为温度软化系数。

1.3 仿真可信性验证

为验证仿真结果可靠性,首先对 M855A1 侵彻结构钢靶过程进行数值仿真。实验结果表明,M855A1 对 9.525 mm 结构钢板的极限穿透射程为 350 m^[9]。由仿真结果可见,M855A1 的钢芯击穿靶板,铜芯和被甲停止于穿入侧,且出现了回弹现象。图 4 显示了弹头各部件及靶板在侵彻时的变形、破碎过程。由图 4 可见:整个侵彻过程中,由于被甲、铜芯、靶板强度远低于钢芯,最高应力始终位于钢芯表面,并且远高于其余部分的应力;钢芯在整个侵彻

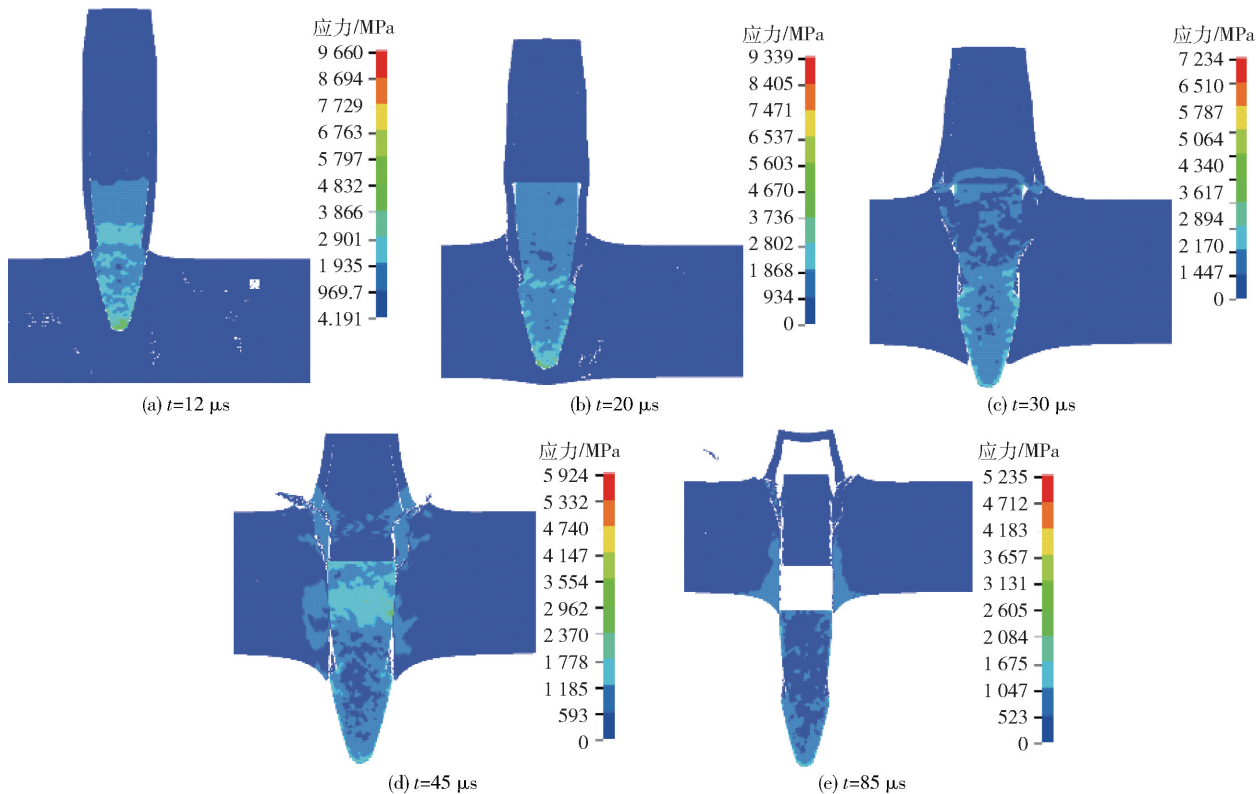


图 4 侵彻过程等效应力云图

Fig. 4 Equivalent stress cloud picture of penetration process

过程中均无明显变形,应力集中的锥形部尖端发生少量失效,其余与靶板接触的表面仅有个别单元失效;铜芯接触靶板前先墩粗,被甲随之扩张,接触靶板后两者迅速破碎,随后与钢芯分离。图 5 为终了时刻正面损伤仿真与实验结果对比。由图 5 可见,靶板的破坏形式为延性穿孔,穿出孔径约等于钢芯最大直径;穿入侧受被甲和铜芯侵蚀,孔径有明显扩大,孔边界发生韧性翻唇。仿真与实验靶板损伤情况基本吻合,但受限于侵蚀接触算法需删除失效单元以保证计算稳定性,未能模拟被甲及铜芯碎片贴附于靶板表面的情况。

因铜芯及被甲在侵彻过程中发生较大变形及损伤,各单元、节点速度存在明显差异,整体速度不具有实际意义,故仅统计动能的过程。基于图 4、图 6 综合分析弹体各部件在侵彻过程中的变形、破坏行为与速度、动能变化过程, M855A1 侵彻结构钢板的过程大致分为 5 个阶段: 1) 0 ~ 12 μs : 钢芯锥形部逐渐侵入靶板,弹头有效截面积增大,弹体所受阻力也随之增大,弹体各部件动能变化规律大致相同; 2) 12 ~ 20 μs : 钢芯锥形部完全侵入靶板,被甲与靶板开始发生接触,所受阻力瞬间增大,但对钢芯及铜芯影响很小,弹头有效截面积几乎不变,钢芯速度及

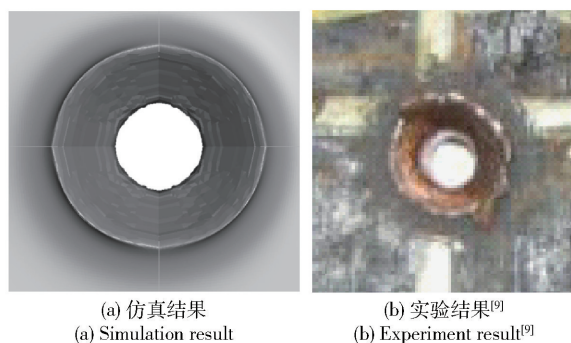


图 5 终时刻靶板正面损伤仿真与实验结果对比
Fig. 5 Comparison between simulation and experiment results of final frontal damage of target

弹体各部分动能的变化均近似线性; 3) 20 ~ 30 μs : 钢芯锥形部逐渐穿出靶板,所受阻力逐渐减小,被甲和铜芯动能变化规律不变; 4) 30 ~ 45 μs : 铜芯所受阻力明显增大,此阶段铜芯阻力主要包括两个分力: 铜芯对被甲侵入靶板部分的挤压与摩擦,此分力随铜芯-被甲-靶板接触面积的增大而提高;对钢芯的支持作用力随钢芯头部阻力的减小以及铜芯与钢芯的分离而逐渐降低至无,钢芯所受合阻力因支持力减小而逐渐增大; 5) 45 ~ 85 μs : 钢芯锥形部完全穿出靶板,仅柱形尾部受少量摩擦力,被甲与铜芯分

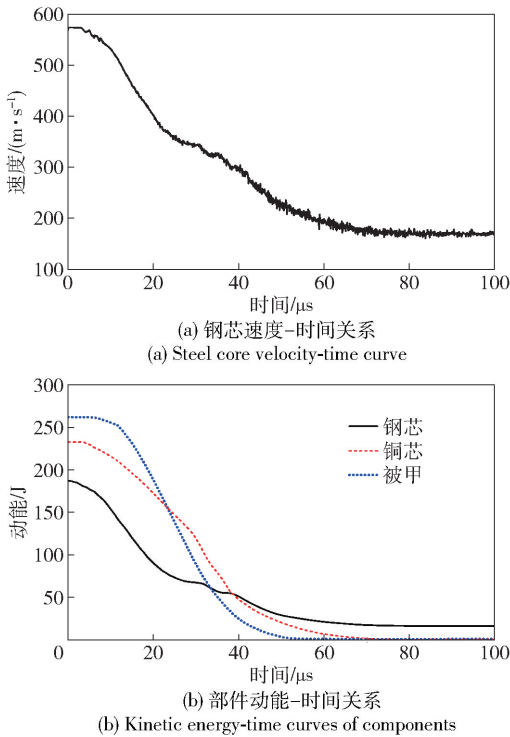


图6 M855A1以573.9 m/s着速侵彻
9.525 mm 1006 钢靶过程

Fig.6 Penetration process of M855A1 penetrating
9.525 mm 1006 steel target at the impact
velocity of 573.9 m/s

离,先后停止于射入侧,穿出的钢芯最终剩余动能16.2 J,已低于最小杀伤动能^[24],可认为9.525 mm是M855A1在350 m处对1006钢的极限穿透厚度。实验与仿真结果相符,说明有限元模型及速度-射程关系准确且可靠。

2 侵彻结构钢靶仿真

2.1 极限穿透厚度理论计算

对于装甲厚度大于弹径的情况,在侵彻开始阶段,靶板的破坏形式以挤压为主。德马尔公式基于能量守恒原理和相似理论,是计算装甲靶板临界穿透速度的主要公式,适用于靶板厚度大于弹体直径的情况,广泛应用于枪炮弹丸设计与靶场实验。其基本假设条件为:弹体在冲击和侵彻过程中无变形;弹体无旋转运动;弹体的动能全部用于侵彻靶板;靶板材质均匀,固定结实可靠。以M855A1为代表的现代步枪弹中仅以钢、硬质合金等高硬度材料制成的穿甲体在侵彻过程中可近似视为刚体(以下称主要结构),而衬套、铜芯、被甲等以铜、铅制成的低强度部分(以下称次要结构)会发生较大变形和破坏;弹体需自旋以保证飞行稳定;弹体内部变

形、摩擦等过程会消耗少量动能,因此均不完全满足以上假设。理论计算结果无法精确反映其实际穿甲能力,仅可用于粗略估算,需结合具体情况作进一步修正。

德马尔公式的一般形式为

$$v = K \frac{D^{0.75}}{m_p^{0.5}} T^{0.7} \quad (1)$$

式中: v 为弹体穿透指定厚度靶板所需最小着速,或称弹道极限速度(m/s); K 为抗弹系数,由实验得出; D 为弹体直径(dm); m_p 为弹体质量(kg); T 为装甲厚度(dm)。(1)式中的钢板力学性能、弹体结构以及其他因素的影响,一般通过调节 K 加以修正,对于含有次要结构的枪弹也可以通过 m 修正^[1]。实际外弹道过程中仅 v 发生变化,因此两种修正方法在计算结果上是完全等同的。由于本文研究对象为两种靶钢,为能直观比较其抗弹能力,以下选择 K 修正。

将(1)式转换为由着速求解最大击穿厚度的形式:

$$T = \frac{m_p^{0.715} v^{1.43}}{K^{1.43} D^{1.07}} \quad (2)$$

M855A1在350 m处 $v = 573.9$ m/s、 $T = 0.09525$ dm、 $m = 0.004$ kg、 $D = 0.044$ dm,以上参数代入(2)式计算得 $K = 1945.3$ 。由射程-速度曲线计算得极限穿透厚度与射程的关系如图7所示,部分射程理论着速与极限穿透厚度如表2所示。

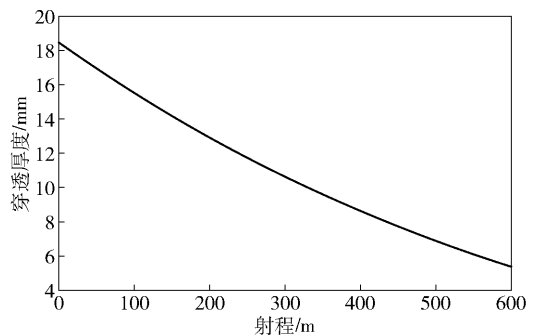


图7 M855A1侵彻1006钢靶理论极限穿透厚度曲线

Fig.7 Relationship between maximum penetration
thickness into 1006 steel target and
range of M855A1

2.2 极限穿透厚度仿真校正

基于以上参数建立弹-靶有限元模型。除射程100 m外,其余各组的钢芯均能击穿靶板,理论计算结果与仿真结果相符。从图8中速度和动能的变化过程来看,铜芯和被甲对钢芯的支持作用对

表 2 部分射程理论着速与极限穿透厚度

Table 2 Theoretical velocity and maximum penetration thickness at partial range

射程/m	着速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	穿透厚度/mm
100	802.0	15.371
200	705.5	12.796
300	616.1	10.542
400	533.1	8.572
500	455.4	6.843

表 3 射程 100 ~ 500 m 侵彻后钢芯剩余速度、动能

Table 3 Residual velocity and kinetic energy of steel core after penetration at 100 - 500 m

射程/m	速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	动能/J
100	0	0
200	161.3	15.7
300	109.2	6.0
400	142.8	11.7
500	182.4	18.3

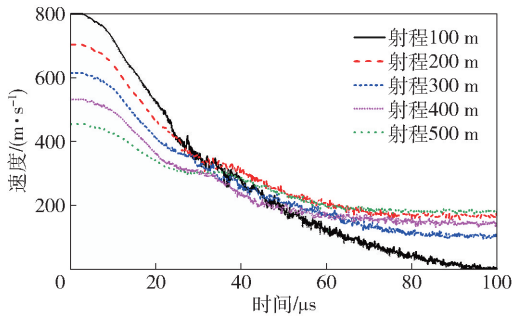
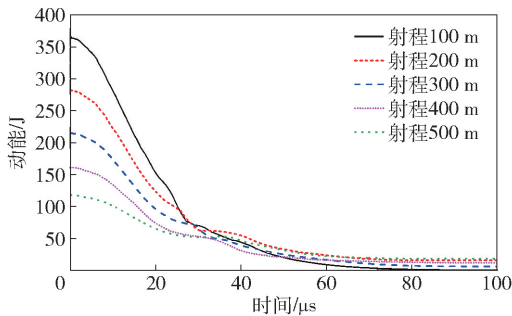
(a) 侵彻过程中钢芯速度变化
(a) Change of steel core velocity during penetration(b) 侵彻过程中钢芯动能变化
(b) The change of steel core kinetic energy during penetration

图 8 射程 100 ~ 500 m M855A1 侵彻理论极限击穿厚度 1006 钢靶过程曲线

Fig. 8 Process of M855A1 penetratign 1006 steel target with theoretical maximum penetration thickness at 100 - 500 m

M855A1 的穿甲效能有明显影响。尽管弹体着速、靶板厚度不同,铜芯对钢芯的支持作用均在接触靶板后逐渐减小。此阶段开始时刻与钢芯锥形部完全穿出靶板时刻相差越多,铜芯及被甲参与钢芯侵彻的时段占比越少,弹体质量、动能的利用效率越低,理论计算与仿真结果的偏差也就越大。

为确定 M855A1 在射程 50 ~ 200 m 对 1006 钢的侵彻效能,在此范围内每间隔 25 m 取一测试点,通过仿真得到其极限穿透厚度。与射程 100 ~ 500 m 结果类似,整体上,抗弹系数与靶板厚度和着速负相关,但变化范围较其数值而言很小,在粗略计

算时仍可近似视为常数。

2.3 经验函数拟合

除本文主要研究的 M4 卡宾枪以外,其他 5.56 mm 口径步/机枪枪管长度多在 228 mm (如 G36C 短步枪) 至 521 mm (如 M249 轻机枪) 之间,枪弹初速随之减少或增加。为提高本文结论的普适性,基于 2.2 节结果,应用 2 阶多项式拟合抗弹系数 K 与着速间的关系,得到 (3) 式。拟合与仿真结果最大误差为 0.66%,结合德马尔公式和速度曲线可快速且准确地估算不同射程下 M855A1 对结构钢的穿甲效能。根据拟合结果,M855A1 在射程 450 ~ 850 m/s 速度范围内对 1006 结构钢的最大、最小抗弹系数分别为 1 993.4、1 945.6,偏差 2.4%,在粗略计算时可近似视作常数。

$$T = 2\,113 - 0.628v + 5.72 \times 10^{-4}v^2 \quad (3)$$

3 侵彻装甲钢靶仿真

3.1 抗弹系数确定

实验结果表明,M855A1 能击穿 6.35 mm 符合 MIL-DTL-12560 标准的均质轧制装甲钢 (RHA)^[9,25]。不同文献所给出的 RHA 力学参数有较大差别^[26-28],且 RHA 的力学性能与厚度显著相关^[27],无法用统一的数学模型模拟;此外,由于美国

表 4 射程 50 ~ 175 m 仿真结果

Table 4 Simulation results at 50 - 175 m

射程/ m	着速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	厚度/ mm	剩余速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	剩余 动能/J	抗弹 系数
50	852.7	16.35	196.9	22.97	1 980.9
75	827.1	15.5	175.0	16.92	1 994.5
100	802	14.95	105.7	5.93	1 983.4
125	777.2	14.3	121.8	7.92	1 982.8
150	752.9	13.75	215.3	25.94	1 974.2
175	729	13.4	165.3	16.04	1 946.3

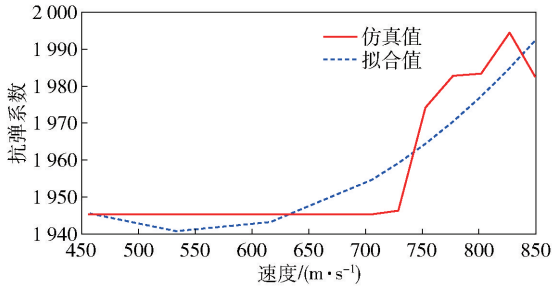
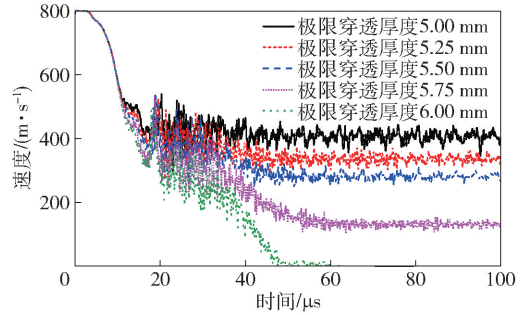


图9 仿真与多项式拟合抗弹系数比较(1006 钢)

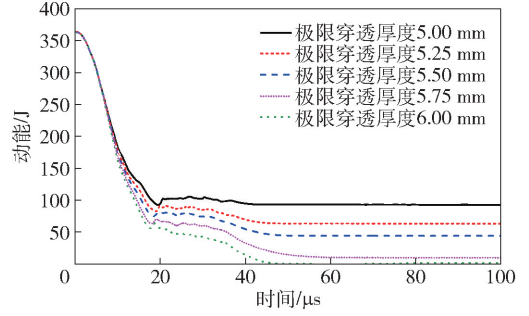
Fig.9 Comparison of simulation result and polynomial fitting result of K (1006 steel)

标准的 RHA 靶板在国内难以获取, 不利于后续实验验证和比较, 因此本文选用功能、性能近似且研究较为成熟的国产 616 装甲钢作为仿真和理论计算靶。

目前销售于美国民用市场的符合 NIJ 0101.06 III 级标准的钢制防弹插板多采用 Armox 500 高硬度装甲钢为基体, 厚约 6.35 mm^[29-31]。考虑到 M855A1 的穿甲能力优于 NIJ 0101.06 III 级测试所用的 M80 步枪弹^[9,29], 而 616 钢强度高于 Armox 500, 且防弹插板存在涂层、纹理等与抗弹无关的结构, 实际有效厚度略低于测量值, 预估 M855A1 在 100 m 处对 616 装甲钢的极限穿透厚度在 5~6 mm 范围内。基于 1.1.2 节运动参数建立弹-靶有限元



(a) 钢芯速度变化过程
(a) Change of steel core velocity



(b) 钢芯动能变化过程
(b) Change of steel core kinetic energy

图 10 M855A1 以 802 m/s 着速侵彻不同厚度靶板过程曲线

Fig. 10 The penetration process of 802 m/s M855A1 to 616 steel with different thickness

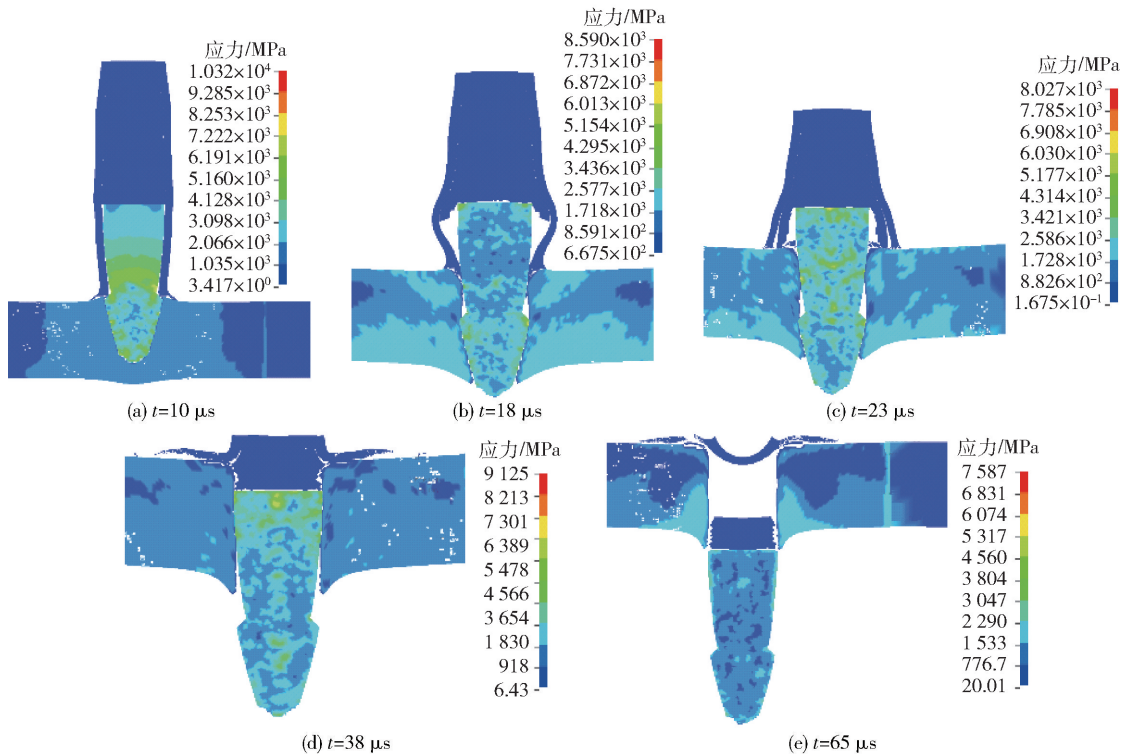


图 11 M855A1 以 802 m/s 着速侵彻 5.75 mm 616 钢靶过程等效应力云图

Fig. 11 Equivalent stress cloud picture of M855A1 penetrating 5.75 mm 616 steel target at the impact velocity of 802 m/s

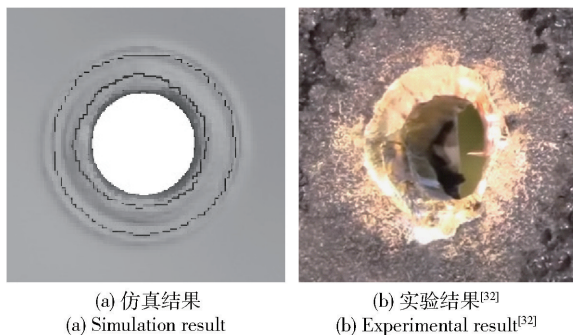


图 12 616 钢靶板正面损伤仿真与实验结果比较
Fig. 12 Comparison between simulation and experiment results of final frontal damage of 616 steel target

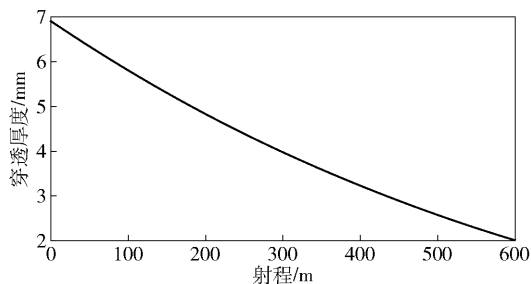


图 13 基于射程 100 m 仿真结果计算的射程-理论极限穿透厚度关系

Fig. 13 Relationship between theoretical maximum penetration thickness of 616 steel target and range of M855A1 based on 100 m simulation result

表 5 射程 100 ~ 500 m 理论着速与基于射程 100 m 仿真结果计算的极限穿透厚度

Table 5 Theroretica limpact velocity and maximum penetration thickness at 100 - 500 m based on 100 m simulation result

射程/m	着速/(m·s ⁻¹)	穿透厚度/mm
100	802.0	5.750
200	705.5	4.787
300	616.1	3.944
400	533.1	3.207
500	455.4	2.560

模型,接触参数、网格划分方法和除靶板厚度以外的几何参数同 1.3.1 节。由图 10 可见,M855A1 在 100 m 处对 616 钢的极限穿透厚度约为 5.75 mm,不同厚度靶板侵彻过程中速度与动能的变化规律基本相同。代入 $v = 802 \text{ m/s}$ 、 $T = 0.0575 \text{ dm}$ 、 $m = 0.004 \text{ kg}$ 、 $D = 0.044 \text{ dm}$,得 $K = 3869.1$ 。

与图 12 着速 902.8 m/s、靶板为符合 NIJ 0101.06 III 级标准的 Armox 500 钢板的实验结果相

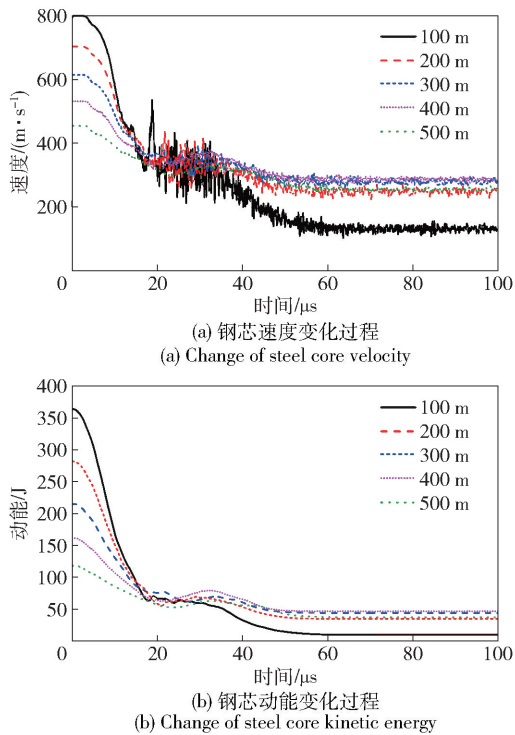


图 14 M855A1 在射程 100 ~ 500 m 侵彻理论极限击穿厚度 616 钢靶过程

Fig. 14 Process of M855A1 penetrating 616 steel target with theoretical maximum penetration thickness at 100 - 500 m

比,仿真所得的靶板正面破坏形貌基本符合实际情况,可认为 616 钢可有效模拟钢制防弹插板的破坏过程及抗弹原理。与侵彻结构钢过程相比,由于装甲钢强度高而塑性低,其表面受铜芯和被甲侵蚀形成的凹坑较浅且不存在明显翻唇,对钢芯头部的磨损破坏更强。铜芯在侵彻过程中应力更高,除径向扩张现象更明显以外,其与钢芯的接触面上也发生压缩失效,扩张部分发生剪切—压缩破坏,残余部分直径小于孔径,随钢芯一同穿出。与侵彻结构钢相似,过程中最大应力位于钢芯表面,远高于弹靶其余部分应力。

3.2 理论计算与仿真校正

由德马尔公式计算得射程-极限穿透厚度曲线,依此建立有限元模型。网格划分方法、接触参数和边界条件同 1.3.1 节。由仿真结果可见,在射程 200 ~ 500 m,M855A1 的极限穿透厚度均较预测情况显著偏高,这是 M855A1 结构的特殊性所致。在低速、薄靶的条件下,铜芯及被甲参与侵彻过程的时段占比更高,M855A1 对铜芯和被甲部分的利用率更高,极限穿透厚度更大。

参考 1006 钢仿真与拟合结果,由于次要结构动能利用率的提高,抗弹系数 K 在随射程增加而减小,超过某一临界值之后则保持稳定。为确定临界射程,分别对射程 200 m、300 m、400 m、500 m 的侵彻过程进行仿真。

表 6 射程 200 ~ 500 m 各点仿真结果

Table 6 Simulation result at 200 - 500 m

射程/ m	着速/ ($m \cdot s^{-1}$)	厚度/ mm	剩余速度/ ($m \cdot s^{-1}$)	剩余 动能/J	抗弹 系数
200	705.5	5.100	141.6	11.09	3 752.99
300	616.1	4.300	92.04	4.63	3 641.97
400	533.1	3.496	172.35	16.04	3 641.97
500	455.4	2.791	179.58	18.16	3 641.97

由表 6 可见,616 钢对 M855A1 的抗弹系数在射程 100 ~ 300 m 内与射程负相关,在 300 m 外基本稳定。为确定 50 ~ 300 m 范围的极限穿透厚度,每间隔 25 m 取一测试点进行仿真。与 1006 钢整体结果和 616 钢 100 ~ 500 m 结果相似,抗弹系数与靶板厚度和着速负相关。值得注意的是,当射程超过 300 m、着速低于 616 m/s 时,靶板厚度已小于钢芯最大直径,不满足德马尔公式的中厚靶假设,但由于钢芯头部较为尖锐,挤压破坏仍占主导地位,德马尔公式仍然具有良好的精度。应用 2 阶多项式拟合 50 ~ 500 m 射程内着速与抗弹系数的关系,得到 (4) 式。拟合结果如图 15 所示,与仿真结果最大误差 0.97%,可快速且准确地估计 M855A1 对 616 钢的穿甲效能。根据拟合结果,M855A1 在 450 ~ 850 m/s 速度范围内对 616 装甲钢的最大、最小抗弹系数分别为 3 900.7、3 629.7,变化幅度 6.9%。

表 7 射程 50 ~ 275 m 各点仿真结果

Table 7 Simulation results at 50 - 275 m

射程/ m	着速/ ($m \cdot s^{-1}$)	厚度/ mm	剩余速度/ ($m \cdot s^{-1}$)	剩余 动能/J	抗弹 系数
50	852.7	6.25	167.7	14.82	3 880.67
75	827.1	6.00	151.6	10.38	3 873.17
125	777.2	5.55	178.2	17.21	3 843.43
150	752.9	5.40	141.8	10.50	3 795.28
175	729.0	5.20	89.0	5.71	3 773.08
225	682.5	4.80	179.3	17.33	3 734.13
250	659.9	4.60	95.4	5.70	3 721.19
275	637.8	4.45	92.2	4.64	3 680.92

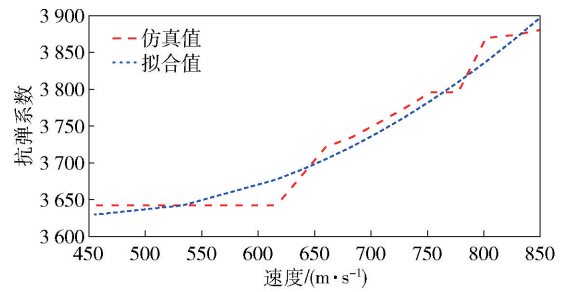


图 15 仿真与多项式拟合抗弹系数比较(616 钢)

Fig. 15 Comparison of simulation and polynomial fitting result of K (616 steel)

$$T = 3\,952 - 1.45v + 1.63 \times 10^{-3}v^2 \quad (4)$$

4 结论

本文以 ANSYS Workbench 和 LS-DYNA 软件为平台对 M855A1 在不同射程侵彻结构钢和装甲钢的过程进行了有限元仿真,得到其射程与极限穿透厚度的关系。得出主要结论如下:

1) 尽管侵彻过程中弹体中被甲和铜芯部分存在较大的变形和破坏,且低速条件下靶板厚度不满足中厚靶假设,但在有效射程内仍可由采用近似刚体假设的德马尔公式计算极限穿甲厚度,其中与弹体结构和材料力学性能有关的抗弹系数 K 在粗略计算时可近似视为恒值,即塑性的次要结构可等效为较小质量、近似刚体的主要结构。

2) 在低速、薄靶条件下对动能、质量的利用效率更高。当靶体强度较低时铜芯及被甲变形、破坏较小,被阻挡于射入侧,仅钢芯穿出;强度较高时铜芯及被甲变形和破碎较剧烈,铜芯碎片随钢芯一同穿出。从穿甲的角度看,相较于低强度(如结构钢和铝合金)厚靶,M855A1 能更高效地杀伤高强度(如装甲钢和钛合金)薄靶后的目标。

3) 靶板的强度和厚度与其针对 M855A1 的抗弹系数正相关。当靶板强度增加时,铜芯破坏的形式由仅靶板-被甲变为靶板-被甲、钢芯联合破坏,破坏的增多导致对装甲钢的穿甲效能劣化,此现象在高速下尤为明显;当靶板厚度增加时,次要结构提供的支持相对减少,导致对厚结构钢的穿甲效能劣化,此现象在高速相对明显。

本文仅对 M855A1 侵彻两种典型金属靶板的过程进行了仿真,结论也适用于结构类似的新型中口径穿甲弹。未来还需完善对更多其他类型目标——

如混凝土、高强度纤维、陶瓷、明胶、骨骼等侵彻过程的研究,以明确 M855A1 及类似结构穿甲弹的实际作战性能,并依此进行针对性防护设计。

参考文献 (References)

- [1] 范浩霖. 5.8 毫米穿甲弹工程研制 [D]. 南京: 南京理工大学, 2016.
- FAN H L. 5.8 mm armor-piercing projectile development [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2016. (in Chinese)
- [2] BENEDETTO G D, MATTEIS P, SCAVINO G. Impact behavior and ballistic efficiency of armor-piercing projectiles with tool steel cores [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2018, 115: 10–18.
- [3] SENTHIL K, IQBAL M A. Prediction of superior target layer configuration of armour steel, mild steel and aluminium 7075-T651 alloy against 7.62 AP projectile [J]. *Structures*, 2021, 29: 2106–2119.
- [4] BØRVIK T, DEY S, CLAUSEN A H. Perforation resistance of five different high-strength steel plates subjected to small-arms projectiles [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2009, 36(7): 948–964.
- [5] HOLMQUIST T J, JOHNSON G R, GOOCH W A. Modeling the 14.5 mm BS41 projectile for ballistic impact computations [J]. *Projectile Impact: Modelling Techniques and Target Performance Assessment*, 2014: 73–87.
- [6] HAIGHT C, MCNAMARA K, COURTNEY M. Does v_{50} depend on armor mass? [R]. Colorado, US: Air Force Academy Colorado Springs, 2012.
- [7] 王永亮. 枪弹和破片对引信的打击及相关不敏感技术研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2019.
- WANG Y L. Research on the impact of bullets and fragments on fuze and related insensitive technology [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)
- [8] EHRHART M T P. Increasing small arms lethality in Afghanistan: Taking back the infantry half-kilometer [M]. Royal Oak, Auckland, New Zealand; Pickle Partners Publishing, 2015.
- [9] WOODS J K. M855A1 enhanced performance round (EPR) media day [R]. Morris, NJ, US: Office of the Program Manager Maneuver Ammunition Systems Picatinny Arsenal, 2011.
- [10] WOODS J K. Small caliber ammunition enhancing capabilities [C] // Proceedings of 2010 NDIA Joint Armaments Conference. Dallas, TX, US: NDIA, 2010, 20.
- [11] WOODS J K. Evolution of the M855A1 enhanced performance round [J]. *Infantry*, 2010, 99(4): 22.
- [12] 景彤, 郭子云, 雷文星, 等. 步枪弹 M855 与 M855A1 的侵彻效能对比仿真 [J]. *弹箭与制导学报*, 2018, 38(4): 45–48, 54.
- JING T, GUO Z Y, LEI W X, et al. Simulation comparison of penetration efficiency of rifle projectile M855 and M855A1 [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2018, 38(4): 45–48, 54. (in Chinese)
- [13] 景彤, 陈智刚, 兰宇鹏, 等. 步枪弹 M855A1 的侵彻效能仿真 [C] // OSEC 首届兵器工程大会论文集. 北京: 中国兵工学会, 重庆市科学技术协会, 兵器装备工程学报编辑部, 2017.
- JING T, CHEN Z G, LAN Y P. Simulation of penetration efficiency of rifle projectile M855A1 [C] // Proceedings of OSEC first Weapon Engineering Conference. Beijing: China Ordnance Society, Chongqing: Chongqing Science and Technology Association meeting, editorial department of the Chinese Journal of Weapons and Equipment Engineering, 2017. (in Chinese)
- [14] 陈勇军. 小口径穿甲爆破炮弹侵彻目标数值模拟研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2013.
- CHEN Y J. Numerical research on small calibre armour-piercing high-explosive projectile penetrating targets [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2013. (in Chinese)
- [15] BATEMAN M J K, U. S. Air Force. Maximizing engagement area lethality [J]. *Military Review*, 2022: 21–30.
- [16] JBM ballistics [EB/OL]. (2010-05-31) [2022-06-20]. <https://www.jbmballistics.com/cgi-bin/jbmtraj-5.1.cgi>.
- [17] ARVIDSSON P G. Is there a problem with the lethality of the 5.56 NATO caliber? [C] // Proceedings of NDIA Joint Armaments Conference. Dallas, TX, US: NDIA, 2010: 17–20.
- [18] 项帆. 引信弹道炸外弹道力学环境研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2021.
- XIANG F. Research on the fuze trajectory burst and external ballistic mechanics environment [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2021. (in Chinese)
- [19] MEYER H W, KLEPONIS D S. An analysis of parameters for the Johnson-Cook strength model for 2-in-thick rolled homogeneous armor: ADA392414 [R]. Aberdeen, Harford County, MD, US: Army Research Lab Aberdeen Proving Ground, 2001.
- [20] TRIA D E, TREBIŃSKI R. On the influence of fracture criterion on perforation of high-strength steel plates subjected to armour piercing projectile [J]. *Archive of Mechanical Engineering*, 2015, 62(2): 157–159.
- [21] MANES A, BRESCIANI L M, GIGLIO M. Ballistic performance of multi-layered fabric composite plates impacted by different 7.62 mm calibre projectiles [J]. *Procedia Engineering*, 2014, 88: 208–215.
- [22] KARIM M R, FATT M S. Impact of the boeing 767 aircraft into the world trade center [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2005, 131(10): 1066–1072.
- [23] 侯二永. 陶瓷间隙靶抗 12.7 mm 穿甲燃烧弹机理及性能研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2008.
- HOU E Y. Investigation of mechanism and performance of spaced

- ceramic target under impact of 12.7 mm armor piercing projectile [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008. (in Chinese)
- [24] 翟杰. 非致命武器打击能量可控技术研究[D]. 南京:南京理工大学,2013.
- ZHAI J. Non-lethal weapon killing energy controllable technology research [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2013. (in Chinese)
- [25] Armor plate, steel, wrought, homogeneous (for use in combat-vehicles and for ammunition testing);MIL-DTL-12560[S/OL]. (2019-07-19) [2022-09-07]. <https://standards.globalspec.com/std/13399455/mil-dtl-12560>.
- [26] JOO J H, LEE C H, CHOI J H. A numerical research on the penetration into a semi-infinite rolled homogeneous armor by a medium-caliber kinetic energy projectile[J]. Materials Science Forum, 2011, 673: 197 – 202.
- [27] MEYER H W, KLEPONIS D S. An analysis of parameters for the Johnson-Cook strength model for 2-in-thick rolled homogeneous armor[R]. Aberdeen, Harford County, MD,US:Army Research Lab Aberdeen Proving Ground,2001.
- [28] JAMIL W N M, ARIPIN M A, SAJURI Z, et al. Mechanical properties and microstructures of steel panels for laminated composites in armoured vehicles [J]. International Journal of Automotive & Mechanical Engineering, 2016, 13(3): 3741 – 3753.
- [29] Spartan Armor Systems. Spartan omega AR500 body armor single plate[EB/OL]. (2020-08-05) [2022-09-07]. <https://www.spartanarmorsystems.com/spartan-omega-ar500-body-armor-single-plate/>.
- [30] Ballistic steel AR 500 tile NIJ III 1/4" thick size 16" x 16" color black matte [EB/OL]. (2021-05-05) [2022-09-07]. <https://www.armorco.com/online-store/Ballistic-Steel-AR-500-Tile-NIJ-III-1-4-thick-size-16-x-16-Color-Black-Matte-18-Tiles-p108015347>.
- [31] BAO tactical AR500 steel plate, Level III standalone, 10x12, single curve. [EB/OL]. (2021-09-20) [2022-09-07]. <https://www.bodyarmoroutlet.com/products/bao-tactical-steel-plate>.
- [32] The Machine Gun Channel. M855A1 vs Level III AR500 Armor [Z/OL]. (2015-09-15) [2022-09-07]. <https://www.youtube.com/watch?v=e0gxeSpjdSk>.