

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2019.02.007

空心钨球侵彻性能的研究*

杨 帅^{①②} 赵太勇^{①②} 陈智刚^{①②} 李小军^③ 李 伟^③ 兰宇鹏^④ 史俊青^④

①中北大学机电工程学院(山西太原,030051)

②中北大学地下目标毁伤技术国防重点学科实验室(山西太原,030051)

③军事科学院防化研究院(北京,102200)

④山东特种工业集团有限公司(山东淄博,255200)

[摘要] 利用LS-DYNA软件对现有93W球型破片侵彻装甲钢试验结果进行符合计算,对93W合金材料参数进行标定,基于上述数值模拟与试验结果的一致性,进一步研究了93W空心钨球对装甲钢的毁伤效能。研究发现:空心钨球的弹道极限随靶板厚度的增加而增加,且弹道极限随空心钨球孔径直径的增加呈近似指数型增加,对靶板的开孔直径也逐渐增加;动能一定的条件下,空心钨球余速、剩余动能随孔径半径的增加呈现先增加后减小的趋势。结果表明:合理选择孔径直径的空心钨球,可实现余速与开孔兼顾的威力要求。

[关键词] 空心钨球;冲击;侵彻;弹道极限;余速;剩余动能

[分类号] TJ410

Study on Penetration Performance of Hollow Tungsten Balls

YANG Shuai^{①②}, ZHAO Taiyong^{①②}, CHEN Zhigang^{①②}, LI Xiaojun^③, LI Wei^③, LAN Yupeng^④, SHI Junqing^④

① College of Mechanical and Electrical Engineering, North University of China (Shanxi Taiyuan, 030051)

② National Defense Key Discipline Laboratory of Underground Target Damage Technology, North University of China (Shanxi Taiyuan, 030051)

③ Institute of Chemical Defense, Academy of Military Sciences (Beijing, 102200)

④ Shandong Special Industrial Group Co., Ltd. (Shandong Zibo, 255200)

[ABSTRACT] The LS-DYNA software was used to calculate the test results of the existing 93W spherical fragment into the armored steel, and the material parameters of the 93W alloy were calibrated. Based on the above research results, the 93W hollow tungsten ball was damaged by the armor steel. It is found that the ballistic limit of the hollow tungsten sphere increases with the increase of the thickness of the target plate, and the ballistic limit increases exponentially with the increasing diameter of the tungsten ball cavity, and the diameter of the opening of the target plate also increases gradually. With certain kinetic energy, the residual speed and residual kinetic energy of the tungsten ball increase first with the increase of the radius of the cavity, and then gradually decrease. The results show that the reasonable selection of the tungsten spheres with the diameter of the cavity can achieve the power requirements of both the storage speed and the opening.

[KEYWORDS] hollow tungsten ball; impact; penetration; ballistic limit; residual speed; residual kinetic energy

引言

装填式预制破片的出现极大地提高了武器战斗部的毁伤能力,钨球因其材料密度大、强度高、球形阻力系数小等优点而备受关注。其中,钨球作为典型的预制破片具有高比动能、高毁伤效能等优点,

已经应用于多种预制破片弹。钨球对装甲钢板的极限贯穿速度及侵彻机理是弹药设计者关心的问题,也是弹药科研工作者重点研究的课题之一。数十年间,学者们对球形破片高速冲击靶板进行了大量的研究和积累。其中,裴思行等^[1]通过试验研究,得出了钨球对多层间隔靶的侵彻机理,并建立了相应的理论计算公式;贾光辉等^[2]对钨球贯穿装甲钢板

* 收稿日期:2018-10-04

第一作者:杨帅(1994 -),男,硕士研究生,主要研究方向为战斗部结构优化与高效毁伤。E-mail: 1043414401@qq.com

时的能耗问题进行了研究, 得出了钨球在侵彻靶板时, 破坏形式主要为开坑和冲塞, 且开坑能耗大于冲塞能耗; 张国伟等^[3]对钨球在侵彻过程中的变形进行研究, 得出了在侵彻过程中, 随着钨球变形加剧, 其能量消耗也随之增加; 赵晓旭等^[4]建立了钨球高速侵彻低碳钢板成坑直径的计算模型; 康爱花等^[5]对球形破片侵彻高强度装甲钢进行了弹道极限速度的计算, 从理论方面解释了钨球在侵彻过程中的能量损失情况, 并得到了极限穿透速度的计算公式; 李明星等^[6]对不同形状轴向预制破片的飞散特性进行了研究, 得到了球形预制破片的飞散角最大; 张宝铨等^[7]建立了钨合金动态拉伸行为的本构关系, 提出了钨合金受动载发生塑性失稳, 以致发生拉断的判据; 文献[8-10]对球形破片撞击金属靶板进行了相关研究, 得到了撞击过程中球形破片的响应参数; 王维占等^[11]建立了战斗部装药能量对破片动能转化率的计算模型, 并经过优化, 得到破片获得最大动能的充分条件。而国外对钨球破片的研究也非常广泛, Yadav 等^[12]提出了等效塑性应变达到一定值时, 会出现单元失效消溶的情况; Czarniecki 等^[13-15]以弹道极限表征动能侵彻体对靶体的侵彻能力或靶体的防护能力, 通过试验研究、理论分析或数值仿真获得侵彻体对靶体的弹道极限速度; Lawrence 等^[16]从最大化整体破片动能和动量的角度获取了不考虑长径比影响的最优解; Schoof 等^[17-18]研究了材料动态球腔扩张, 并提出了一种能预测弹丸穿透的数值方法。

目前的研究, 大都是针对于实心钨球而言, 而对空心钨球的研究比较少见。基于前人的研究成果, 利用 LS-DYNA 软件获取了可靠的 93W 合金与装甲钢材料参数, 对空心钨球侵彻靶板进行数值模拟, 并通过应力波理论解释了空心钨球的变形规律, 较好地分析了空心钨球对装甲钢的毁伤效能。

1 应力波在钨球中的传播规律

钨球在着靶过程中, 在接触面会受到应力波的作用, 应力波会以球形波的形式, 向钨球内部进行传播, 并会在空腔以及自由表面处进行反射, 下面对钨球内部应力波的传播特性进行分析。

1.1 实心钨球受力分析

结合试验现象, 对钨球内部应力波传播特性进行分析。高速冲击下, 忽略材料内部横波的传播, 将弹性波和塑性波等效为冲击波。当发生冲击碰撞时, t_1 时刻钨球产生背向冲击面的冲击波 B_1 , 钨球被压缩。由靶板在冲击面处反射回来的拉伸波 R_3 和由钨球内部压缩波 B_1 在两侧自由面反射回来的拉伸波 B_2 一起向钨球内部传播, 由于 B_2 为非刚性壁垂直反射, 故应力波 B_2 强度远远小于 B_1 。 t_2 时刻, 由于 B_2 未能在初始传入钨球的冲击波 B_1 到达自由面前将其完全卸载, 初始传入钨球的压缩波 B_1 在自由面反射为拉伸波 R_1 , 在该拉伸波与冲击波 B_1 的作用下, 钨球顶部自由面产生轴向拉伸塑性应变。在 t_3 时刻, 由于 B_1 在两侧自由面反射形成的拉伸波 B_2 沿径向向中心轴线汇聚, 汇聚后的拉伸波在轴线处相互作用, 形成反向拉伸波 R_2 , 以近似径向球面波的形式扩散传播, 使钨球发生径向塑性拉伸变形, 钨球径向膨胀增大。具体过程如图 1 所示。实心钨球形变对比如图 2 所示。

1.2 空心钨球受力分析

针对空心钨球而言, 在冲击碰撞的初始时刻, 首先出现背向冲击面的压缩波 A_1 , 在冲击面与两侧自由面上, 产生反射波 B_1 、 B_2 。当 A_1 传播到空腔表面处时, 在向前传播的同时, 也会出现空腔反射现象, 形成反射波 B_3 , 之后, A_1 穿过空腔, 继续传播, 发生顶部反射, 形成反向的拉伸波 B_4 , 与此同时, B_2 也会

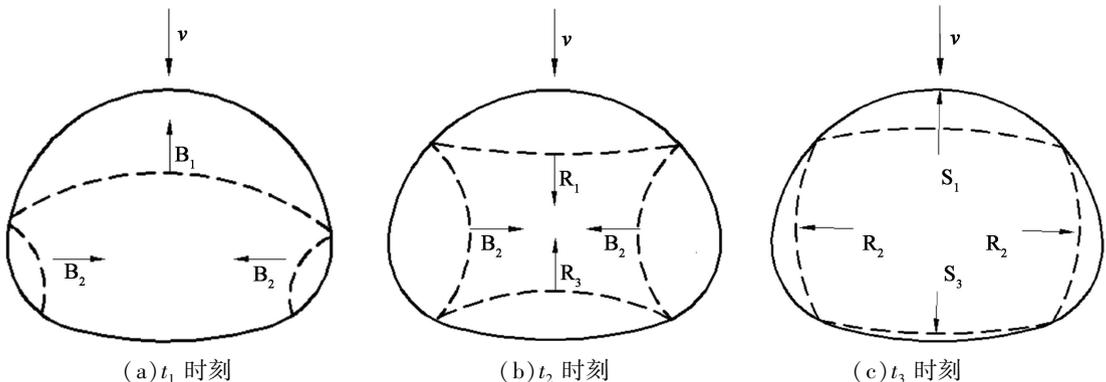


图 1 实心钨球内应力波的传播

Fig. 1 Propagation of stress waves in a solid tungsten ball



(a) 初始形态 (b) 变形形态

图2 实心钨球形变对比

Fig. 2 Spherical variation contrasts of solid tungsten ball

在空腔处发生反射,形成反射波 B_5 。最终,在轴向上发生塑性应变,在径向上出现膨胀增大。波的传播过程如图3所示。



(a) 初始碰撞 (b) 底部反射 (c) 空腔反射 (d) 顶部反射

图3 空心钨球内应力波的传播

Fig. 3 Propagation of stress waves in hollow tungsten spheres

对比空心钨球与实心钨球的传播方式可知,实心钨球在中心附近应力波叠加效果明显,而空心钨球因存在空腔,导致中心附近应力波叠加效果减弱,故实心钨球较空心钨球更易碎;但空心钨球受到中心空腔处的径向反射波作用,使其更易发生径向膨胀变形,故空心钨球在侵彻时会展现出一定的开孔优势。

基于以上理论可知,实心钨球在侵彻过程中变形较小,其与靶板的接触面积也较小;而空心钨球受力时,因中心空腔原因,而出现较大的变形,在侵彻过程中,接触面积有所增加,故其开孔能力也较强。同时,在外径一定的前提下,空心钨球的质量较轻,故在初始能量一定时,空心钨球会有较高的初速,在侵彻后,也会存在较高的余速和剩余动能,可以进一步提高对目标的杀伤能力。

2 仿真材料参数验证

2.1 试验方法

采用12.7 mm口径滑膛弹道枪发射93 W钨球破片垂直侵彻6 mm厚装甲钢。试验场地及装置布置如图4所示。

在理论研究的基础上进行试验,此次试验目的:测试直径为5.5 mm的实心钨球对6 mm装甲钢的极限穿透速度,并得到该工况下,靶板的穿孔情



(a) 12.7 mm 弹道枪 (b) JMC-K500 激光测速靶



(c) 靶架 (d) 测时仪

图4 试验布置

Fig. 4 Test arrangement

况,将仿真结果与之对比,进行仿真材料参数验证。

2.2 试验结果

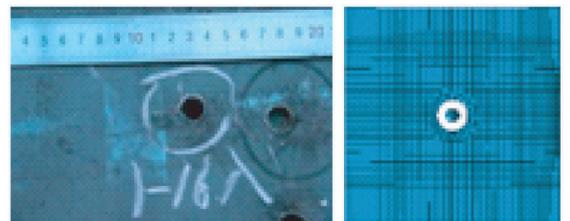
进行了1#、2#两组验证试验,并与仿真结果进行对比,见表1。极限穿透速度及靶板穿孔情况如图5和图6。

将试验结果与仿真结果相比较,并调整仿真材料模型参数,使得仿真结果与试验结论有较好的一致性,最后,将调整好的模型参数进行标定,在此基础上,对空心钨球侵彻钢靶进行后续的研究。

表1 试验与仿真结果对比

Tab. 1 Comparison of test results and simulation results

序号	$v_{50}/(m \cdot s^{-1})$		入孔直径/cm		出孔直径/cm	
	试验	仿真	试验	仿真	试验	仿真
1#	765	758	0.623	0.618	0.630	0.631
2#	763	755	0.601	0.596	0.622	0.619



(a) 1# 试验

(b) 1# 仿真



(c) 2# 试验

(d) 2# 仿真

图5 入孔图片

Fig. 5 Initial holes

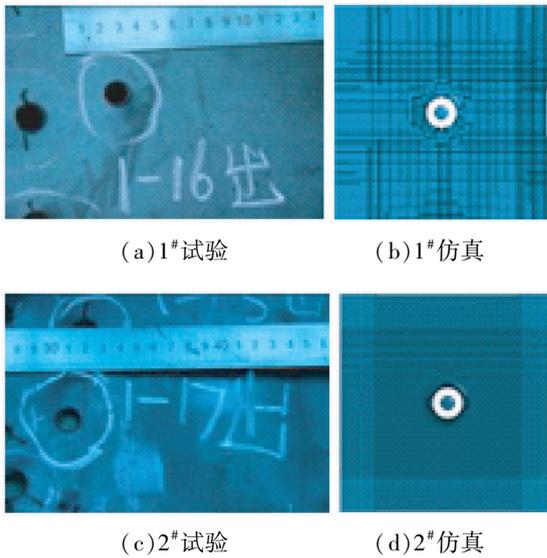


图 6 出孔图片

Fig. 6 Penetrating holes

3 数值模拟与分析

3.1 建模与仿真

3.1.1 计算模型及设计方案

采用 ANSYS/LS-DYNA 有限元动力学软件对钨球高速侵彻钢靶进行数值模拟。根据破片垂直侵彻环境,采用 TRUEGRID 软件建立有限元模型,为节约计算时间,建立 1/4 轴对称 3D 侵彻模型,并设置对称约束条件于 1/4 模型的对称面上。计算网格均采用 Solid164 八节点六面体单元,钨球破片网格尺寸为 0.015 mm × 0.015 mm,靶板网格尺寸为 0.025 mm × 0.025 mm,整个模型共有 845 672 个单元。钨球、靶板采用 Lagrange 算法,它们之间的采用面-面接触算法。并在模型的边界节点上施加压力流出边界条件,避免压力在边界上的反射。

本文算例中,钨球直径为 5.5 mm,空心钨球的中心孔径分别为 0(实心)、0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0、3.5 mm 和 4.0 mm,靶板厚度分别为 3、4、5、6、7、8 mm,靶板材料为钢,具体参数见表 2。

3.1.2 侵彻过程的仿真

图 7 为仿真试验的有限元模型,为了节约计算

时间,靶板网格采用中间密、四周逐渐变疏的划分方式。

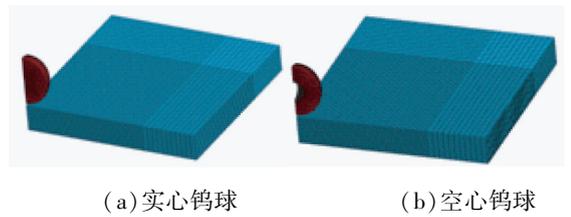


图 7 钨球侵彻钢靶模型

Fig. 7 Tungsten ball penetration model

在此模型基础之上,分别赋予钨球一定的初始速度,从极限穿透速度(v_{50})入手,开始将空心钨球与实心钨球做对比,得到钨球在侵彻靶板过程中的各类参数。

3.2 数值模拟结果

3.2.1 空心钨球中心孔径与极限穿透速度(v_{50})的关系

在该模型的基础上,通过仿真计算,得到了不同工况下的极限穿透速度,结果如图 8 所示。

由图 8 可知,当空心钨球中心孔径较小时(空腔直径占比在 30% 以内),其极限穿透速度与实心钨球的有所降低,且空腔直径占比为 10% 时,最大降幅约为 6.68%;但随着空心钨球中心孔径的逐渐增加,极限穿透速度也随之增大。

出现该现象的原因是,在钨球外径一定的前提

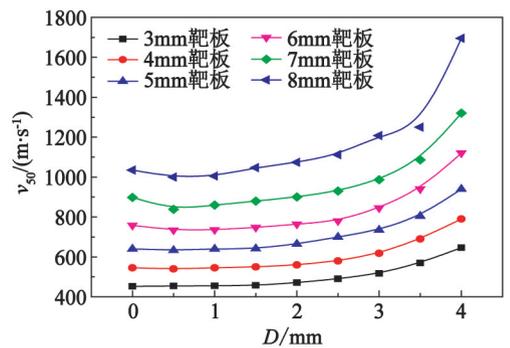


图 8 极限穿透速度(v_{50})

随空心钨球中心孔径的变化关系

Fig. 8 Relationship between ultimate penetration velocity (v_{50}) and diameter of the central hole of the hollow tungsten ball

表 2 材料性能具体参数

Tab. 2 Specific parameters of material performance

材料	密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	弹性模量/ ($N \cdot m^{-2}$)	泊松比	屈服极限	切线系数	硬化系数	应变率系数	失效应变
钨	17.82	3.070	0.32	0.01	0.052	1.2	3.2	0.7
钢	7.83	2.069	0.30	0.01	0.002	1.0	0	0.8

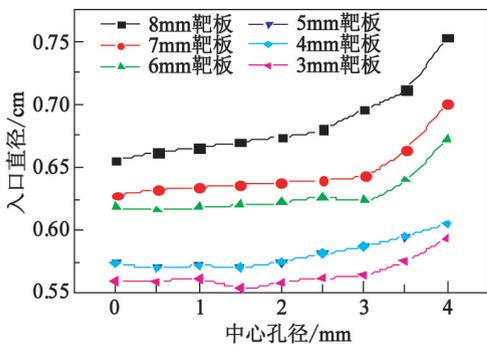
下,空腔直径 D 越大,钨球质量 m 越小,且 m 与 D 成立方关系;当 D 较小时,空心钨球变形较小,与实心钨球差别不大,故极限穿透速度接近。但随着中心孔径的增加,空心钨球在侵彻过程中的变形明显增大,导致着靶面积增加,侵彻时受到的阻力增加,使得极限穿透速度也随之增加。

3.2.2 空心钨球侵彻靶板过程中的参数分析

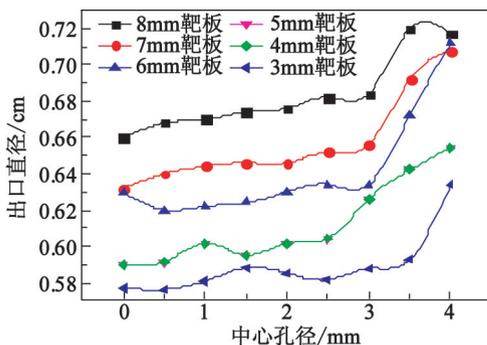
在初始条件一定的前提下,弹丸爆炸产生的能量是固定的,即爆炸会赋予破片一定的初始能量,而空心钨球的质量比实心钨球低,依据动能定理,空心钨球会体现出较高的初速;在侵彻过程之中,空心钨球易变形而径向膨胀,使得其在穿靶后,会形成较大的穿孔,同时,空心钨球在靶后余速及剩余动能等方面,也会体现出一定的优势,下面就侵彻过程中的几个参数,结合仿真结果,进行具体的分析。

1) 空心钨球中心孔径与靶板穿孔直径的关系。

空心钨球外围直径一定时,空腔越大,质量越小。由图9可知,随着空心钨球中心孔径的增大,在侵彻不同厚度的靶板时,在靶板上留下的穿孔直径呈增大趋势。当空腔直径占比在55%以内时,出、入孔直径均有所提示;且当空腔直径占比在55%左右时,出、入孔直径达到最大增幅,约为13%。这是



(a) 入口直径



(b) 出口直径

图9 穿孔直径与空心钨球中心孔径的关系

Fig. 9 Relationship between perforation diameter and central aperture of the hollow tungsten ball

由于空心钨球在受力时,容易出现较大的变形,且中心孔径越大,呈现出的变形就越严重,故在侵彻过程中会有较大的穿孔;而实心钨球变形较小,故其穿孔也较小。

2) 空心钨球中心孔径与靶后余速以及剩余动能的关系。

如图10、图11所示,在初始能量一定的前提下,空腔直径占比在45%以内时,靶后余速及剩余动能较实心钨球均有较大幅度的提升;且当空腔直径占比在30%左右时,达到最大增幅,约为83%;但随着空心钨球中心孔径的增加,其靶后余速也在逐渐减小,直到中心孔径增加到一定范围时,会出现穿不透的现象(余速为0);同时,钨球在侵彻靶板过程中,其质量也在消逝,但总体来说,空心钨球的剩余动能较实心钨球而言,仍然呈现出先增加,而后逐渐减小的趋势。

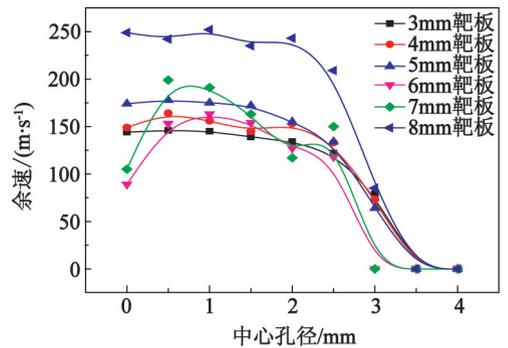


图10 靶后余速与中心孔径的关系

Fig. 10 Relationship between residual speed after target and diameter of center hole

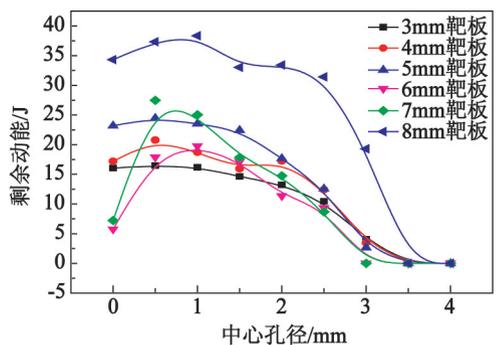


图11 剩余动能与中心孔径的关系

Fig. 11 Relationship between residual kinetic energy and diameter of center hole

4 结论

通过理论分析、试验标定、以及数值模拟仿真3种方式,来研究空心钨球在侵彻过程中的参数性能,

得到了如下结论:

1) 当空腔直径占比在 30% 以内时, 极限穿透速度有所下降。当空腔直径占比在 10% 左右时, 达到最大降幅, 约为 6.68%。

2) 当空腔直径占比在 55% 以内时, 出、入孔直径均有所提升。当空腔直径占比在 55% 左右时, 达到最大增幅, 约为 13%。

3) 当空腔直径占比在 45% 以内时, 靶后余速及剩余动能均有较大提升。当空腔直径占比在 30% 左右时, 达到最大增幅, 约为 83%。

参 考 文 献

- [1] 裴思行, 午新民, 孙韬, 等. 钨球对多层间隔靶的侵彻研究[J]. 弹箭与制导学报, 1993(2): 23-30.
- [2] 贾光辉, 张国伟, 裴思行. 钨球对装甲钢板极限贯穿时能耗研究[J]. 弹箭与制导学报, 1997(4): 49-53.
- [3] 张国伟, 贾光辉, 李庆. 钨球在侵彻装甲钢板中的变形分析[J]. 华北工学院学报, 1997, 18(1): 71-74.
ZHANG G W, JIA G H, LI Q. The analysis of deformation of tungsten spheres in the impact test on armor plates [J]. Journal of North China Institute of Technology, 1997, 18(1): 71-74.
- [4] 赵晓旭, 王树山, 徐豫新, 等. 钨球高速侵彻低碳钢板成坑直径的计算模型[J]. 北京理工大学学报, 2015, 35(12): 1217-1221.
ZHAO X X, WANG S S, XU Y X, et al. Crater diameter calculation model of tungsten sphere impacting low carbon steel plate at high velocity[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2015, 35(12): 1217-1221.
- [5] 康爱花, 陈智刚, 付建平. 球形破片侵彻高强度装甲钢的弹道极限速度计算[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2015, 36(6): 647-651.
KANG A H, CHEN Z G, FU J P. Calculation of ballistic limiting velocities of spherical fragment to high hardness armor steel [J]. Journal of North University of China (Natural Science Edition), 2015, 36(6): 647-651.
- [6] 李明星, 王志军, 黄阳洋, 等. 不同形状轴向预制破片的飞散特性研究[J]. 兵器装备工程学报, 2017, 38(12): 65-69.
LI M X, WANG Z J, HUANG Y Y, et al. Study on the scattering characteristics of different shape axial prefabricated fragment [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2017, 38(12): 65-69.
- [7] 张宝铨, 丁淳彤, 刘宝华, 等. 钨合金的冲击拉伸行为及其本构和断裂判据的表述[J]. 中国工程科学, 2003, 5(3): 44-50, 74.
ZHANG B P, DING C T, LIU B H, et al. Shock tensile behavior of tungsten alloy and presentations to its constitutive models and fracture criterion [J]. Engineering Science, 2003, 5(3): 44-50, 74.
- [8] 陈志斌, 刘志刚. 球形弹垂直碰撞金属靶板的实验研究[J]. 弹道学报, 1991(1): 66-70.
CHEN Z B, LIU Z G. Experimental investigation on the metal target by normal impact of spherical shell [J]. Journal of Ballistics, 1991(1): 66-70.
- [9] 沈志刚, 于骐. 球形破片碰撞金属靶板的试验研究[J]. 兵工学报弹箭分册, 1988(1): 62-70.
- [10] 午新民. 钨合金球体对有限厚靶板侵彻的理论及试验研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 1999.
WU X M. The theoretical and experimental research on tungsten alloy sphere penetrating limited thickness plate [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 1999.
- [11] 王维占, 印立魁, 赵大勇, 等. 杀爆战斗部装药能量对破片动能的转化率[J]. 爆破器材, 2017, 46(2): 26-30.
WANG W Z, YIN L K, ZHAO T Y, et al. Conversion rate of charge energy to kinetic energy of fragments of blast-fragmentation warhead [J]. Explosive Materials, 2017, 46(2): 26-30.
- [12] YADAV S, REPETTO E A, RAVICHANDRAN G, et al. A computational study of the influence of thermal softening on ballistic penetration in metals [J]. International Journal of Impact Engineering, 2001, 25(8): 787-803.
- [13] CZARNECKI G J. Estimation of the V_{50} using semi-empirical (1-point) procedures [J]. Composites Part B: Engineering, 1998, 29(3): 321-329.
- [14] ZUKAS J A. High velocity impact dynamics [M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1990.
- [15] ANDERSON C E, Jr, HOHLER V, WALKER J D, et al. Time-resolved penetration of long rods into steel targets [J]. International Journal of Impact Engineering, 1995, 16(1): 1-18.
- [16] LAWRENCE D, JOHN C, ANDREW B. Optimization of fragmentation warheads [C]// 24th International Symposium on Ballistics. Lancaster: DEStech Publications Inc., 2008: 1035-1041.
- [17] SCHOOF L A, MAESTAS F A, YOUNG C W. Numerical method to predict projectile penetration [C]// 4th Annual Symposium on Interaction of Non-nuclear Munitions with Structures. Panama City, US, 1989.
- [18] LUK V K, FORRESTAL M J, AMOS D E. Dynamic spherical cavity expansion of strain-hardening materials [J]. Journal of Applied Mechanics, 1991, 58(1): 1-6.