

doi: 10.7690/bgzdh.2018.05.016

聚能战斗部在防空反导中的毁伤效能研究

王 庆^{1,2}, 赵捍东¹, 赵鹏铎², 邵先锋¹, 张晓东¹

(1. 中北大学机电工程学院, 太原 030051; 2. 海军研究院, 北京 100161)

摘要: 为研究聚能战斗部在防空反导中的毁伤效能, 介绍等效靶板论证与装药结构设计, 给出数值计算方案, 并通过 AUTODYN 软件对 3 种典型聚能侵彻体以不同角度侵彻等效运动靶板进行数值模拟。结果表明: 聚能侵彻体和等效靶板的相对运动影响毁伤效能, 存在开坑体积逆向叠加效应, 同时聚能射流较易受等效靶板扰动, 杆式射流毁伤效果更优, 爆炸成型弹丸开口直径更大但穿深不足。

关键词: 聚能战斗部; 巡航导弹; 运动靶板; 毁伤效能; 数值模拟

中图分类号: TJ410.1 **文献标志码:** A

Study on Damage Effectiveness of Shaped Warhead in Air Defense and Anti-missile

Wang Qing^{1,2}, Zhao Handong¹, Zhao Pengduo², Shao Xianfeng¹, Zhang Xiaodong¹

(1. College of Mechatronic Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. Naval Academy, Beijing 100161, China)

Abstract: In order to study the damage effectiveness of the shaped warhead in air defense and anti-missile, the equivalent target was demonstrated and the charge structure design was introduced, numerical calculation schemes were given, and 3 kinds of typical penetration bodies penetrated equivalent moving target plate at different angles by AUTODYN software for numerical simulation. The results show that the relative motion of the penetration bodies and the equivalent target plate affects the damage efficiency, and there is a reverse stacking effect of the open pit volume. At the same time, the jet is more easily perturbed by the equivalent target plate, and the damage performance by the JPC is better, the EFP opening diameter is bigger but lack of penetration depth.

Keywords: shaped warhead; cruise missile; moving target; damage effectiveness; numerical simulation

0 引言

现代战争中, 巡航导弹以其强大的综合突防能力成为打击舰船及其他军事目标的重要武器。对抗以巡航导弹为主的空袭武器主要有高炮、火箭弹以及上述武器之间相互结合协同作用的武器系统^[1]。

聚能装药战斗部爆炸形成的聚能侵彻体具有能量密度高、穿透能力强的特点, 因而聚能装药在对抗巡航导弹中可以发挥重要作用^[2]。

由于不同聚能装药产生的侵彻体特点不同, 另外相比于国内外对于聚能装药进行实验时, 都采取固定静爆^[3-4]的方式, 无法精确评估聚能侵彻体对于高速移动目标的毁伤效应。实弹试验费用高昂, 仿真分析可以为聚能战斗部毁伤飞行中的巡航导弹为等效靶板的过程提供参考, 为将来防空反导聚能装药战斗部的设计提供一些依据。

1 等效靶板论证与装药结构设计

1.1 等效靶板的确定

巡航导弹飞行弹道丰富多样, 主要包括发射

段、巡航段、搜索段和自导命中段。在不同弹道上现役巡航导弹速度从 0.6~2.5 Ma 不等。因此拟定文中仿真目标靶板速度梯度分别为 400、600 和 800 m/s, 基本涵盖了巡航导弹不同弹道的速度。

对于防空反导武器系统而言, 直接攻击来袭武器的关键部位效果最好, 例如使无人机或攻击性武器导航系统失效, 或者直接使巡航导弹战斗部在命中之前殉爆。

根据强度等效理论对不同材料的厚度进行等效, 等效靶 h_0 的厚度可由目标靶的材料强度极限(抗拉强度)与等效靶的材料强度极限获得, 公式为:

$$h_0 = h_1 \frac{\sigma_{b1}}{\sigma_{b0}} \quad (1)$$

式中: h_1 为原部件的平均厚度; σ_{b1} 为原部件材料的强度极限; σ_{b0} 为等效靶的强度极限。

以 BGM-109 战斧巡航导弹为例, 战斗部舱段主要由蒙皮、隔框和容器组成, 材料为 2219-T6 铝合金和 2219-T61 铝合金^[5]。经等效战斗部舱段可视 40 mm 的 LY12 硬铝^[6], 其强度极限约为 475

收稿日期: 2018-01-02; 修回日期: 2018-01-22

基金项目: 国家自然科学基金(11302259)

作者简介: 王 庆(1991—), 男, 山东人, 硕士, 从事舰船毁伤与防护技术研究。

MPa。笔者拟用 4340 钢作为目标靶板，AUTODYN 软件材料库中对应材料为 STEEL 4340，其强度极限约为 982 MPa。由式(1)计算得等效后靶板的厚度为 19.3 mm。考虑误差及毁伤效能，此处等效目标靶板设置为 20 mm。

1.2 聚能装药结构

笔者设计了 3 种战斗部药型罩锥角，根据聚能效应^[7]，这 3 种药型罩将分别形成 JET(聚能射流)、JPC(杆式射流)和 EFP(爆炸成型弹丸)。结构如图 1 所示。装药结构为 1/2 模型。

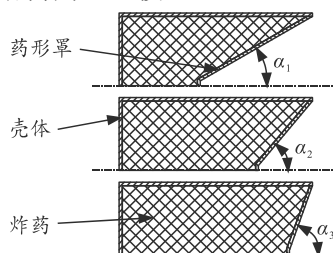


图 1 装药结构

模型中装药直径 $D=83$ mm，壳体厚度 $h=2$ mm，装药长度 $L=110$ mm，药型罩厚度 $\delta=1.5$ mm，锥角分别是 $\alpha_1=30^\circ$ ， $\alpha_2=50^\circ$ ， $\alpha_3=70^\circ$ 。

2 数值计算方案

AUTODYN 非线性动力学仿真软件提供了多种材料模型和状态方程，是一个包含前处理、后处理及求解程序分析引擎的完全集成化的软件包，适用于爆炸、冲击和侵彻等问题的数值模拟计算。

2.1 材料模型及参数选择

聚能装药战斗部的材料模型及参数如表 1。

表 1 材料参数

名称	材料	状态方程	强度模型	密度 $\rho/(g/cm^3)$
空气	AIR	Ideal Gas	None	0.001 225
炸药	COMPB	JWL	None	1.717
壳体	STEEL 4340	Linear	Johnson Cook	7.83
药型罩	CU-OFHC	Linear	Johnson Cook	8.96

文中数值模拟采用了软件自带的映射(Remap)技术，首先运用 AUTODYN-2D 对聚能装药侵彻体的形成过程进行数值仿真，获得侵彻靶板时刻的侵彻体形态，在此基础上将侵彻体重映到 AUTODYN-3D 中，并加入 3 维靶板模型。

2.2 2 维计算模型的建立

在 AUTODYN-2D 中建立聚能装药 1/2 模型，在 Euler 空气域边界上添加“FLOW-OUT”边界条件来消除边界效应。为提高计算精度同时节省计算

时间，在聚能侵彻体形成通道上进行网格加密处理；计算模型单位制为 mm-mg-ms。如图 2 所示。

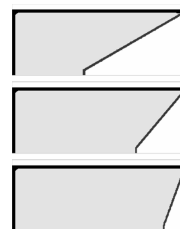


图 2 计算模型

聚能侵彻体形成过程中，侵彻体运动到一定时间后会产生拉断、颈缩等现象。药型罩锥角越小，拉断、颈缩现象越严重，影响毁伤效能。因此要选取成形形态良好，速度足够高，侵彻毁伤能力相对较强的聚能侵彻体映射(Remap)到 AUTODYN-3D 中。最终侵彻体形态(1/2 模型)如图 3 所示，JET 头部速度为 5 135.1 m/s，JPC 头部速度为 4 066.2 m/s，EFP 头部速度为 3 419.7 m/s。

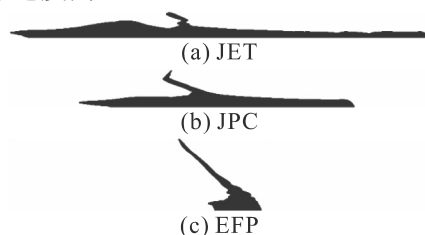


图 3 3 种侵彻体形态

对照文献[8]中锥角函数的射流和杆体速度对应图，3 种侵彻体头部速度均符合 Held 的预测值，侵彻体形态和文献[9-10]中 X 射线照片中的形态规律性一致，因此仿真结果具有可信性。

2.3 3 维计算模型的建立及方案设计

在 AUTODYN-3D 中，靶板设定了 3 组运动速度^[11]，分别为 400、600 和 800 m/s。在 Initial Condition 中将材料 STEEL 4340 赋予 Y 轴正方向的速度。采用 Lagrange 算法，靶板的材料模型及参数如表 2 所示。以 400 m/s 为例，靶板模型如图 4 所示，箭头方向为运动方向。

表 2 靶板参数

材料	状态方程	强度模型	失效模型	侵蚀模型
STEEL 4340	Linear	Johnson Cook	Plastic Strain	Geometric Strain

在对靶板的侵彻过程中，设定了 3 种侵彻角度，以顺时针方向为正，与目标靶面法向夹角分别为 30° 、 0° 和 -30° 。结合侵彻体和目标靶板相互运动关系，该设计更能模拟真实毁伤情况。由于篇幅所限，仅以 JPC 侵彻靶板为例，三角度侵彻情况如图 5 所示，从上至下夹角分别为 30° 、 0° 和 -30° 。

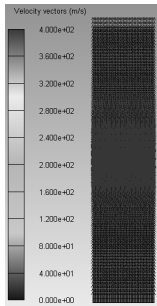


图 4 靶板模型

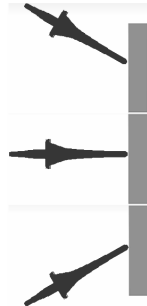


图 5 三角度侵彻

侵彻体。

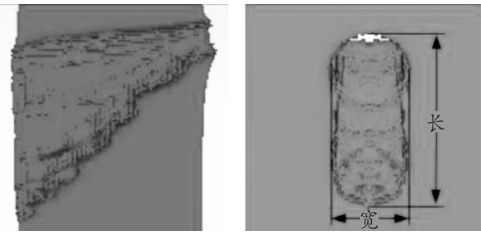


图 8 开口形状

3 数值模拟结果与分析

笔者对 3 种聚能装药结构、3 种等效靶板运动速度，分别以 3 种侵彻角度进行了数值模拟，共得到 27 组数值模拟结果。JPC 以 30° 夹角侵彻 800 m/s 靶板过程如图 6 所示。

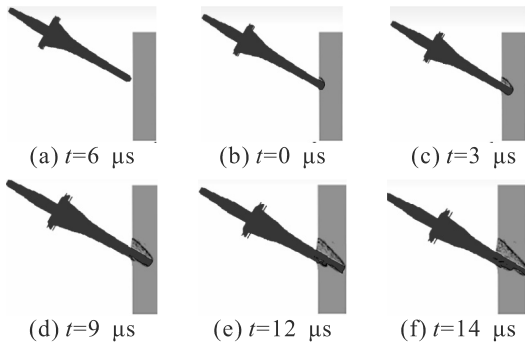


图 6 JPC 侵彻靶板

由上图可知：在侵彻体毁伤靶板过程中，存在运动靶板对侵彻体横向扰动的问题，与文献[12]中的不同转速金属射流因旋转而飞散扰动相同。若侵彻体出现扰动，金属流侵彻体会出现飞散、颈缩现象^[7]，不利于对靶板的毁伤，靶板运动速度越大，横向扰动越明显。以 JET 在 12 μs 击穿 800 m/s 运动靶板的时刻为例，横向振动如图 7 所示。在对靶板运动引起的横向扰动现象上，JET 最敏感，JPC 次之，EFP 最不敏感。

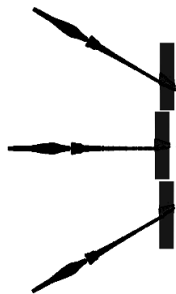


图 7 JET 横向扰动

JET 和 JPC 在靶板上前开口形状近似为矩形，后开口形状近似为圆形，开口截面和正面形状如图 8 所示，为了更清晰地观察开口情况，图中隐去了

JET 和 JPC 对运动靶板的毁伤效能如表 3 和表 4 所示。毁伤效能由通孔体积、开口面积和剩余速度来表征，通孔体积越大，开口面积越大，剩余速度越高，则毁伤效能就越高。通孔近似为一个棱台，棱台体积公式为：

$$V_T = \frac{1}{3}h(S_1 + S_2 + \sqrt{S_1S_2}) \quad (2)$$

式中： h 为靶板厚度，此处为 20 mm； S_1 为进口面积，以矩形面积公式做近似计算； S_2 为出口面积，以圆形面积公式做近似计算。

表 3 JET 毁伤效能

靶板速度 $v/(m/s)$	侵彻角度 $\theta/(^\circ)$	通孔体积 V/mm^3	剩余速度 $v/(m/s)$
400	30	1 234.3	4 670.1
	0	1 218.0	4 727.6
	-30	1 071.1	4 702.3
600	30	1 355.3	4 663.8
	0	1 114.1	4 732.2
	-30	910.1	4 566.4
800	30	1 239.9	4 657.3
	0	1 151.0	4 765.8
	-30	1 038.0	4 796.4

表 4 JPC 毁伤效能

靶板速度 $v/(m/s)$	侵彻角度 $\theta/(^\circ)$	通孔体积 V/mm^3	剩余速度 $v/(m/s)$
400	30	1 393.2	3 482.3
	0	1 268.8	3 521.3
	-30	1 287.8	3 468.4
600	30	1 455.8	3 476.5
	0	1 202.3	3 575.4
	-30	1 179.1	3 624.5
800	30	1 458.0	3 459.0
	0	1 122.2	3 601.2
	-30	1 132.5	3 791.7

由表 3、4 可知：当靶板速度一定时，侵彻体 30° 夹角侵彻时通孔体积最大，0° 夹角时次之，30° 夹角时最小。侵彻体分速度方向和运动靶板方向相反时毁伤效果更好，存在开坑体积逆向叠加效应。

分析表 3、4 剩余速度，如图 9 所示。靶板速度变化时，JET 剩余速度变化未呈现单调性，JET 较易发生横向扰动，另外准流体金属在侵彻作用下速度受靶板的运动影响，存在速度叠加效应。侵彻 3 种运动靶板时，JET 速度损失为 8.5%、9.4% 和 7.7%，JPC 速度损失为 14.2%、12.5% 和 11.0%。

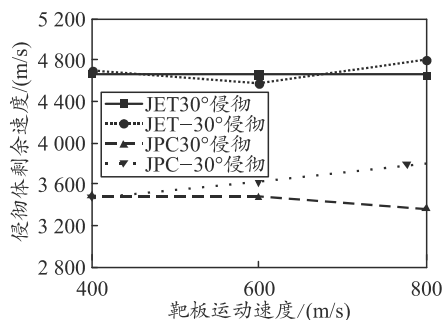


图 9 剩余速度变化曲线

JET 极易拉断、飞散，而 JPC 基本保持侵彻体外形，且同等装药结构下（仅锥角不同）JPC 开坑体积大于 JET 开坑体积。因为 JPC 本身头部直径大于 JET 头部直径，侵彻体头部动能比 JET 大很多，因此 JPC 毁伤效果优于 JET。

EFP 速度较低，弹丸尾裙过大，未能穿透靶板。EFP 侵彻运动靶板，开口形状近似为圆形，记录其进口直径和侵彻深度如表 5 所示。

表 5 EFP 毁伤效能

靶板速度 $v/(m/s)$	侵彻角度 $\theta/(^\circ)$	进口直径 D/mm	侵彻深度 H/mm
400	30	53.3	12.7
	0	51.7	13.9
	-30	45.4	13.7
600	30	54.7	12.3
	0	51.2	13.6
	-30	46.2	13.2
800	30	55.4	12.1
	0	50.3	14.0
	-30	46.1	13.4

针对 EFP 的毁伤效能，参照文献[4, 13]提供的工程经验公式，EFP 斜侵彻静止靶板的侵彻深度表达式为：

$$P = \frac{v_0 - \Delta}{-\frac{\rho_t v_0}{\eta \rho_p} + \Delta} (l_0 - 0.5d)(\cos \theta)^{1.5}; \quad (3)$$

$$\Delta = \sqrt{\frac{\rho_t}{\eta \rho_p} v_0^2 + \left(1 - \frac{\rho_t}{\eta \rho_p}\right) \frac{2R}{\eta \rho_p}}. \quad (4)$$

式(3)、(4)中： P 为侵彻深度，mm； v_0 为侵彻靶板时的初速度，此处为 3 419.7 m/s； ρ_t 为靶板密度； ρ_p 为 EFP 材料密度； η 为 EFP 密实度，此处为 0.85； R 为 EFP 和靶板强度之差，此处为 700 MPa； l_0 为 EFP 初始长度，此处为 0.028 7 m； d 为 EFP 密实直径，此处为 0.019 8 m； θ 为 EFP 着靶夹角，此处为 30°。

带入数值计算得本文 EFP 斜侵彻静止 4340 靶板的侵彻深度为 14.5 mm。所得结果和表 6 中的侵彻深度对比，数值接近，因此仿真具有一定可信性。但同时公式计算解总体大于仿真解，说明靶板的运动减弱了侵彻体的开坑毁伤效能。

由于仿真所得 EFP 尾裙直径较大，没有出现运动方向开坑体积逆向叠加的效果，进口直径的变化趋势符合逆向叠加效应。

由表 5 可知：EFP 对靶板运动不敏感，侵彻深度变化范围不大，如图 10 所示。单个 EFP 对靶板侵彻深度有限，鉴于较大的进口直径，实际设计战斗部时，可以考虑综合效应 EFP 或串联 EFP^[14-15]。

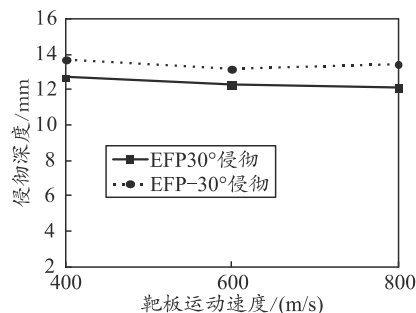


图 10 EFP 侵彻深度变化曲线

4 结论

聚能装药战斗部对巡航导弹为等效靶板的毁伤优势明显：

1) 聚能侵彻体在毁伤巡航导弹即高速运动靶板时存在开坑体积逆向叠加效应；

2) 聚能射流 JET 在穿透 20 mm 运动靶板过程中速度损失较少，但是横向扰动现象严重；杆式射流 JPC 有着较稳定的侵彻效能，设计防空反导战斗部时可优先考虑；

3) 爆炸成型弹丸 EFP 可以侵彻出较大开口半径，适合应用于综合效应 EFP 或与其他杀伤战斗部配合使用。

文中基于数值仿真和经验公式得出了符合工程意义的规律性结论，后续仍需要实地试验等方法继续研究。

参考文献：

- [1] 王金云, 王孟军. 国外舰载防空反导火控系统发展现状[J]. 火力与指挥控制, 2013, 38(12): 6-8.
- [2] 耿万钧, 孙兴昀, 曹玉武, 等. 防空反导打击爆战斗部技术研究综述[J]. 飞航导弹, 2016, 1(3): 84-87.
- [3] 柯文, 陈化良, 张之, 等. 聚能射流作用下模拟装甲舱室内冲击波试验研究[J]. 兵工学报, 2017, 38(2): 407-411.
- [4] 刘飞. 爆炸成型弹丸(EFP)研制及其工程破坏效应研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2006: 125-127.
- [5] 张萍. 战斧导弹大扫描[J]. 飞航导弹, 2005, 1(11): 1-7.
- [6] 王涛, 唐宴虎. 脱壳穿甲弹对巡航导弹的毁伤模型及仿真[J]. 火力与指挥控制, 2010, 35(10): 110-112.

Problems[J]. Journal of the Acm, 1976, 23(3): 555-565.

[2] BOZER Y A, WANG C T. A graph-pair representation and MIP-model-based heuristic for the unequal-area facility layout problem[J]. European Journal of Operational Research, 2010, 218(2): 382-391.

[3] SADAN K K, ABDULLAN K. A new relaxed flexible bay structure representation and particle swarm optimization for the unequal area facility layout problem[J]. Engineering Optimization, 2011, 43(12): 1263-1287.

[4] ULUTAS B H, SADAN K K. An artificial immune system based algorithm to solve unequal area facility layout problem[J]. Expert Systems with Applications An International Journal, 2012, 39(5): 5384-5395.

[5] 高贵兵. 混流制造系统生产物流关键问题优化研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.

[6] 朱大林, 詹腾, 张屹, 等. 元胞多目标粒子群优化算法

(上接第 63 页)

[7] 隋树元, 王树山. 终点效应学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000: 194-199.

[8] 安二峰. 新型战斗部聚能效应及相关问题研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2004: 4-5.

[9] 赵捍东, 陈国光, 董永香. 聚能装药射流的数值仿真研究[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2001, 22(3): 211-214.

[10] 吴晗玲, 段卓平, 汪永庆. 杆式射流形成的数值模拟研究[J]. 爆炸与冲击, 2006, 26(4): 328-332.

[11] 韩世峰. 破甲弹对运动体斜侵彻的仿真研究[D]. 太原:

(上接第 66 页)

3) 同一时刻下, 温度对药筒残余应力的影响很大, 尤其是对筒体;

4) 同一时刻下, 温度使药筒的抽壳力略微增大, 增大约 16%。

综上所述, 热冲击对铜质药筒有一定的影响。温度使得药筒筒体残余应力增大, 对药筒的重复使用有严重影响。该研究对焊接钢质药筒的研究有较为重要的指导意义。

参考文献:

[1] 王志军, 尹建平. 弹药学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2005: 201-237.

[2] ROBBINS F W, COLBURN J W, ZOLTANI C K. Combustible Cartridge Cases: Current Status and Future Prospects[M]. Combustible Cartridge Cases Current Status & Future Prospects, 1992.

[3] 何清. 焊接钢质药筒设计理论与研究[D]. 太原: 中北

与其应用[J]. 农业机械学报, 2013, 44(12): 280-287.

[7] 张屹, 卢超, 张虎, 方子帆. 基于差分元胞多目标遗传算法的车间布局优化[J]. 计算机集成制造系统, 2013, 19(4): 727-734.

[8] 李伯虎. 复杂产品制造信息化的重要技术——复杂产品集成制造系统[J]. 机械设计与制造工程, 2006(14): 20-24.

[9] 钱超, 陈维义, 谢芝亮, 等. 基于遗传算法的装备技术准备资源平衡[J]. 兵工自动化, 2017, 36(9): 81-85.

[10] LENO I J, SANKAR S S, PONNAMBALAM S G. An elitist strategy genetic algorithm using simulated annealing algorithm as local search for facility layout design[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 84(5): 787-799.

[11] 邹世伟. 车间柔性布局算法及三维仿真研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2007.

中北大学, 2015: 15-18.

[12] 卢芳云, 蒋邦海, 李翔宇, 等. 武器战斗部投射与毁伤[M].北京: 科学出版社, 2013: 176-177.

[13] 樊菲, 李伟兵, 王晓鸣, 等. 爆炸成型弹丸战斗部不同侵彻着角下的毁伤能力研究[J]. 高压物理学报, 2012, 26(2): 199-204.

[14] 杨绍卿. 灵巧弹药工程[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010: 295-298.

[15] 郭希维, 姚志敏, 赵昉. 对抗主动防护系统的 EFP 战斗部设计[J]. 兵工自动化, 2013, 32(8): 6-9.

大学, 2005.

[4] 田晓丽, 杨黎明, 何清, 等. 药筒有限元分析前处理软件系统研究与应用[J]. 应用基础与工程科学学报, 2009, 17(4): 636-642.

[5] 卫丰, 张光. 药筒发射应力和抽壳力的有限元分析[J]. 爆炸与冲击, 2001, 21(1): 72-75.

[6] 曹畅. 火炮膛内瞬态多相流场与药筒受力耦合作用研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2005.

[7] 何清, 田晓丽, 陈国光. 焊接药筒发射强度应力场分析[J]. 弹箭与制导学报, 2006, 26(1): 82-83.

[8] 金志明. 枪炮内弹道学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2004: 19-46.

[9] 郭振宇. 火炮药筒在发射状态下的工作过程及其基本参量[J]. 兵工学报, 1981, 2(3): 34-39.

[10] 顾克秋, 钱林方, 常秀英, 等. 大口径火炮焊接药筒射击变形机理的启发式反演[J]. 爆炸与冲击, 2004, 24(6): 553-557.

[11] 张文革, 李德信, 杨世强. 悬索桥桥梁检查车力学性能分析[J]. 机电工程, 2016, 33(10): 1169-1175.