

doi: 10.7690/bgzd.2022.09.019

射流源破甲稳定性研究

冯可华, 杨莹, 陈勇

(江苏永丰机械有限责任公司研发中心, 江苏 盱眙 211722)

摘要: 针对射流源设计和研制过程中借鉴精密破甲战斗部技术, 进行射流源结构设计与破甲稳定性分析、数值模拟等研究。设计和研制 $\phi 50$ mm、 $\phi 56$ mm、 $\phi 81$ mm、 $\phi 100$ mm 共 4 种装药口径的射流源, 采用精密装药工艺技术, 利用垂直静破甲试验考核穿深及跳动量。试验结果表明, 该研究可以满足射流源产品高稳定性的射流能量和破甲性能的要求。

关键词: 射流源; 精密装药; 结构设计; 破甲稳定性

中图分类号: TJ510.2 **文献标志码:** A

Study on Penetrating Stability of Shaped Charge Jet

Feng Kehua, Yang Ying, Chen Yong

(Research and Development Center, Jiangsu Yongfeng Machinery Co., Ltd., Xuyi 211722, China)

Abstract: Based on the technology of precision penetrating warhead, the structural design, penetrating stability analysis and numerical simulation of shaped charge jet were studied. The shaped charge jet with 4 kinds of charge calibers of $\phi 50$ mm, $\phi 56$ mm, $\phi 81$ mm and $\phi 100$ mm is designed and developed, and the precision charge technology is adopted. Vertical static penetration test was used to check the penetration depth and jump. The test results show that the study can meet the requirements of high stability of jet energy and penetration performance of shaped charge jet products.

Keywords: shaped charge jet; precision charge; structural design; penetrating stability

0 引言

射流源主要应用于不敏感弹药评估、装甲材料和装甲钢板等研究领域, 利用射流源的破甲性能对其进行测试及验收。目前, 国内主要集中在射流特征值 v^2d (射流速度的平方和射流直径的乘积) 和炸药射流感度的研究^[1-2]。从工程研制和满足用户最终使用需求的角度, 射流源的核心要求是破甲稳定性。射流源采用聚能装药结构设计, 在多年研制过程中借鉴、探索利用精密破甲战斗部技术, 较好地实现了这一要求。胡焕性^[3]从装药不对称因素及药型罩材料性质方面, 对射流特性和破甲效能的影响进行了研究。曹兵等^[4]分析了造成破甲弹穿深跳动量大的主要因素, 提出了减小穿深跳动量的工艺措施。孙建等^[5]进行了高威力精密破甲战斗部技术研究, 指出精密破甲战斗部的关键技术包括高威力炸药及其精密装药、精密药型罩、精密装配技术。尹刚^[6]主要从药型罩、成型装药及战斗部设计等方面入手, 开展了精密破甲战斗部实践研究。程明强^[7]研究了小口径破甲战斗部破甲稳定性的工艺控制方法。马建^[8]以某型号单兵破甲弹为基础, 从药型罩锥角、装药同轴度、起爆方式等方面对射流成型及其稳定

性的影响进行了理论分析。

笔者进行射流源结构设计与破甲稳定性分析、数值模拟等研究, 设计和研制了 $\phi 50$ mm、 $\phi 56$ mm、 $\phi 81$ mm、 $\phi 100$ mm 共 4 种装药口径的射流源。试验结果表明, 可以满足射流源产品高稳定性的射流能量和破甲性能的要求。

1 射流源结构设计与破甲稳定性分析

1.1 射流源结构设计

在分析国内现有射流源炸药选用、药型罩及装药结构的基础上, 借鉴类似破甲战斗部装药结构, 重点考虑破甲稳定性设计和使用要求, 确定射流源采用圆柱形、不带隔板的聚能装药结构设计。如图 1 所示, 射流源由药型罩、炸药柱、传爆药柱和定位套等组成, 用 8 号军用工程电雷管起爆。

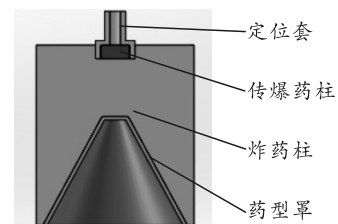


图 1 射流源结构

收稿日期: 2022-05-27; 修回日期: 2022-06-23

作者简介: 冯可华(1971—), 男, 江苏人, 高级工程师, 从事弹药工程、战斗部毁伤技术研究。E-mail: 1449348440@qq.com。

1.2 破甲稳定性影响因素分析与设计

影响射流源破甲稳定性的因素较多，主要有药型罩及炸药装药的材料选用、结构设计、工艺控制、炸高设置等，其中药型罩锥角和装药高度对破甲威力影响较大^[7-9]。

1.2.1 药型罩

药型罩是射流源的关键零部件，其材料、结构及加工精度，尤其是晶粒度、壁厚差对破甲性能影响较大。

药型罩材料要求密度大、塑性好，在形成射流过程中不易汽化。紫铜相对于铸铁钢、铝等材料而言，具有密度高、塑性好、破甲性能优等特点^[10]；因此，选用紫铜材料。

药型罩形状主要有单锥、双锥、半球、弧锥、喇叭等。实际使用中发现，喇叭形罩稳定性和工艺性都较差，目前常用的是锥形罩^[11]。经借鉴类似产品并分析认为，单锥药型罩相比双锥药型罩，加工工艺更加成熟、可靠，射流头部速度和射流能量更加稳定；因此，采用单锥形状。

药型罩形状确定后，锥角是决定射流头部速度和破甲深度的主要参数。射流头部速度随着药型罩锥角减小而增加，药型罩锥角 2α (双边) 一般取 $35^\circ \sim 65^\circ$ ^[12]。试验中发现，药型罩锥角较小时，金属射流细而长，稳定性较差。经借鉴类似产品并分析认为，药型罩锥角可适当取大些；因此，锥角 2α 选取 $50^\circ \sim 60^\circ$ 。

1.2.2 炸药柱

炸药装药是形成爆轰和金属射流的能源。聚黑-2 炸药威力大、性能稳定、成本低且装药工艺成熟，广泛应用于常规弹药战斗部；因此，炸药柱采用聚黑-2 炸药。

炸药柱一般采用圆柱形装药结构、圆柱结合截锥的收敛装药结构。收敛装药结构有利于提高装药利用率，圆柱形装药结构对实现稳定的爆轰更有利；因此，炸药柱采用圆柱形结构设计。

采用隔板的炸药装药结构，其威力可提高 $15\% \sim 20\%$ 。但是，带有隔板装药的破甲稳定性 (尤其是动破甲的稳定性) 比不带隔板的要差一些；因此，采用不带隔板的单一主药柱装药 (炸药柱) 结构设计。对无隔板的装药结构，罩顶药层厚度 h 应明显大于有隔板的装药结构， h 取不小于 0.5 倍装药口径。经借鉴类似产品并计算，在药型罩锥角 2α (双

边) $50^\circ \sim 60^\circ$ 的情况下，炸药装药总高度 (药型罩高度 + 罩顶药层厚度) 及其与装药口径的比值即炸药柱长径比^[13]，选取 $1.3 \sim 1.4$ 。

1.2.3 传爆序列

传爆序列主要涉及传爆药柱，起爆能量不足是引起破甲不稳定的原因之一，起爆能量主要与传爆药柱结构、药量，传爆药柱安装方式等有关^[14]。传爆药柱沉入炸药柱中，起爆面积大，有利于发挥起爆能量，保证起爆可靠性和稳定性；因此，传爆药柱采用圆柱形结构设计，装入定位套相应内孔，且沉入炸药柱顶端专用内腔中，通过定位套保证传爆药柱与炸药柱同轴，有利于实现爆轰对中性 and 射流准直性。传爆药柱由聚黑-14 炸药压制而成，借鉴同类产品传爆药量初步取不小于 $0.3\% \sim 0.5\%$ 炸药柱装药量，可保证聚黑-2 炸药装药爆炸完全且爆轰稳定。

1.2.4 炸高

聚能装药在最有利炸高的条件下，可达到最大穿深。在保证射流正常形成且头部射流呈连续状态时，有利于实现破甲性能稳定^[15]。随着炸高的增加，头部射流出现颈缩现象直至断裂，破甲能力将显著下降。有利炸高与炸药性能、药型罩材料、锥角等有很大关系，一般情况下聚能装药有利炸高为 $1.5 \sim 3$ 倍装药口径。经分析，破甲试验时初步取 $1.5 \sim 2.5$ 倍装药口径。

2 数值模拟研究

2.1 建立模型

采用 AUTODYN2D 仿真射流源垂直侵彻钢板情况。由于装药结构对称，建模时取 1/2 模型。侵彻仿真模型如图 2 所示。



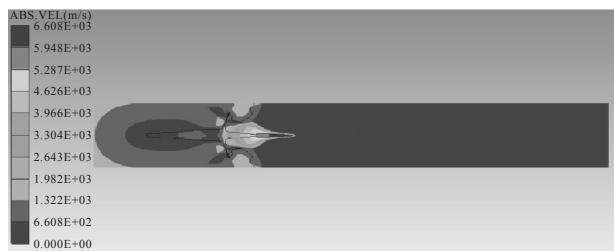
图 2 侵彻仿真模型

射流源破甲性能及其稳定性主要影响因素是药型罩锥角和装药高度。仿真时，装药口径 81 mm ，药型罩锥角 2α 分别为 35° 、 45° 、 60° 进行对比，装药高度均取药型罩高度加 41 mm (即 0.5 倍装药口径)，分别为 159 、 131 、 106 mm 。装药在长度与宽

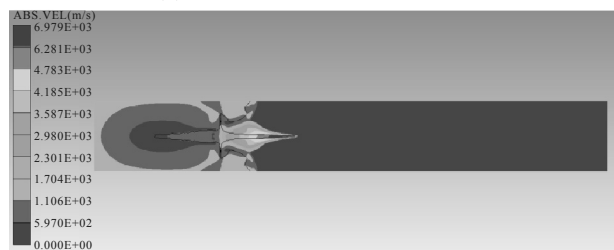
度方向上网格均取 1 mm，45#钢靶板长度与宽度网格尺寸取 0.5 mm；空气域长为 650 mm，宽为 50 mm，网格尺寸取 1 mm，本次仿真网格共计 95 802 个。为更好地模拟炸药在空气中爆炸，本次模拟采用流固耦合 (arbitrary lagrange-euler, ALE) 的算法，空气域、炸药采用欧拉网格，其余采用拉格朗日网格，在空气域的上边界和侧边界施加流出边界，在靶板的上边界施加 x 方向速度为 0 的约束。

2.2 射流形态对比分析

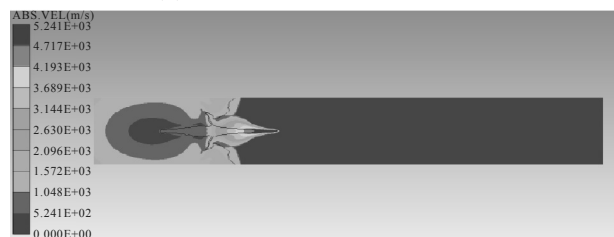
头部射流呈连续状态，射流断裂迟，有利于实现破甲性能稳定。为研究不同锥角药型罩射流形态，选取 40、44、50、56 (接触靶板)、66、80、96、180、224 μs (侵彻结束) 9 个阶段进行对比分析，其中 40、50、56 μs 情况如图 3—6 所示 (各图中依次为锥角 35°、45°、60° 药型罩射流形态)。



(a) 锥角 35° 药型罩射流形态

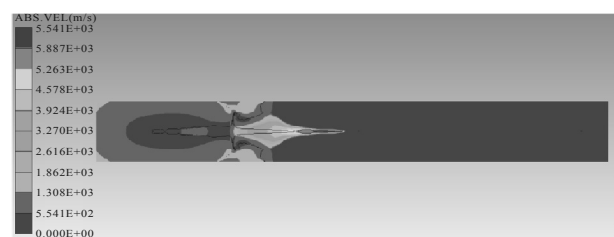


(b) 锥角 45° 药型罩射流形态

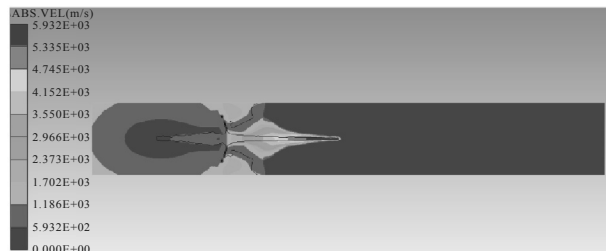


(c) 锥角 60° 药型罩射流形态

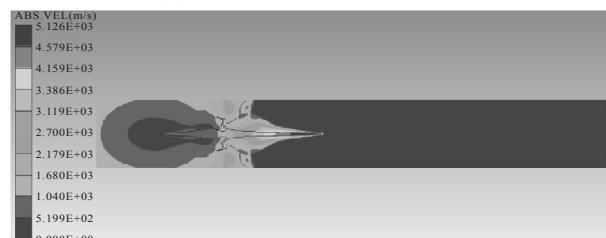
图 3 40 μs 不同锥角药型罩射流形态对比云图



(a) 锥角 35° 药型罩射流形态

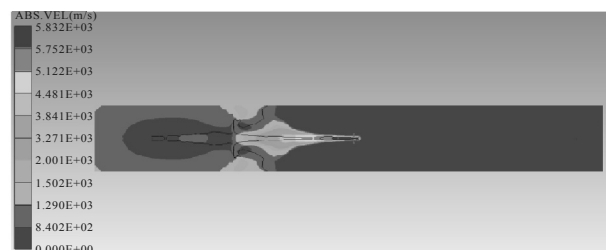


(b) 锥角 45° 药型罩射流形态

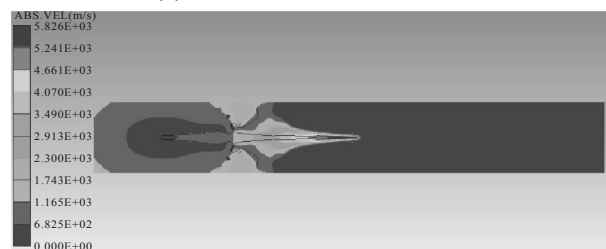


(c) 锥角 60° 药型罩射流形态

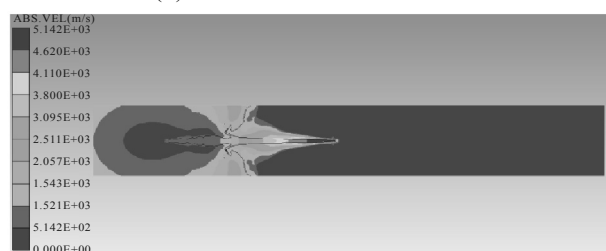
图 4 50 μs 不同锥角药型罩射流形态对比云图



(a) 锥角 35° 药型罩射流形态

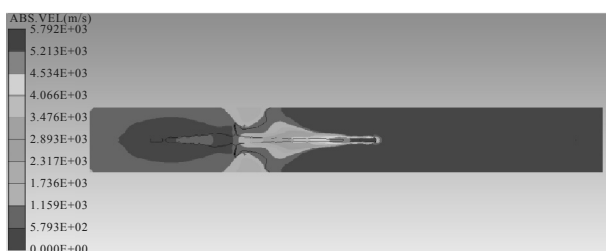


(b) 锥角 45° 药型罩射流形态



(c) 锥角 60° 药型罩射流形态

图 5 56 μs 不同锥角药型罩射流形态对比云图



(a) 锥角 35° 药型罩射流形态

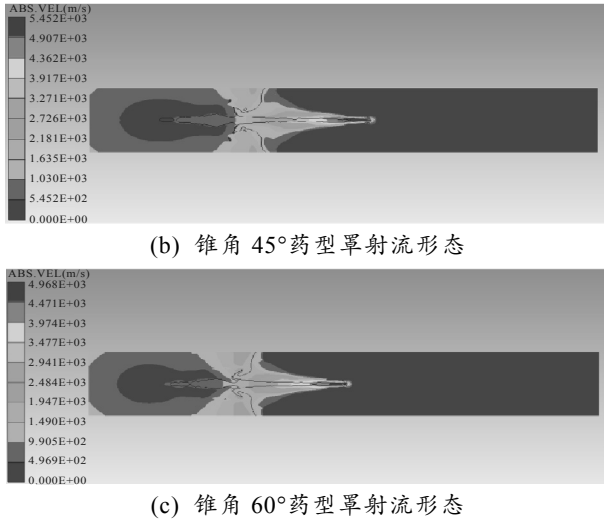


图 6 66 μs 不同锥角药型罩射流形态对比云图

由图 3 可知，在 40 μs 时，无射流断裂情况，3 个锥角下射流形成情况均稳定，35°、45°和 60°锥角药型罩的头部射流速度依次降低。图 4 在 50 μs 时，35°锥角药型罩射流出现断裂情况，其余 2 个比较稳定。图 5 中 56 μs 时，3 种药型罩产生的射流均接触靶板，35°药型罩射流继续发生 2 次断裂，45°锥角药型罩产生的射流有第 1 次断裂的趋势，60°锥角药型罩产生的射流稳定，无断裂趋势。图 6 中 66 μs 时，35°药型罩射流出现第 3 次断裂，45°锥角药型罩射流产生第 1 次断裂，60°锥角药型罩头部射流变得细长，出现第 1 次断裂的趋势；随着时间的增加，直至侵彻结束阶段，35°、45°和 60°锥角药型罩射流发生断裂的次数分别为 8 次、5 次和 3 次。由上述数据及仿真结果可知，当药型罩锥角为 60°，炸高取 180 mm，装药高度为 106 mm，壁厚 1.4 mm 时射流产生断流(断裂射流)的次数最少，即射流源最稳定。

将上述断流所占百分比情况，绘制出曲线如图 7 所示。

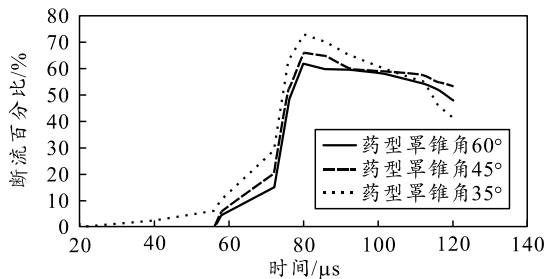


图 7 断流占比曲线

2.3 穿深仿真结果

经过测量仿真结果，得到最大穿深为 310 mm，仿真结果如图 8 所示。

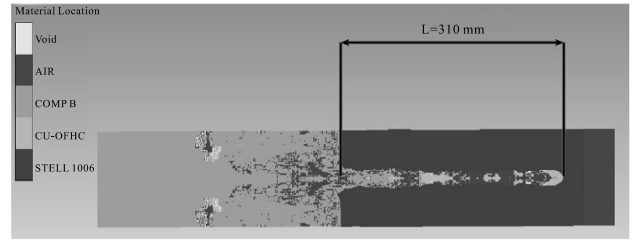


图 8 穿深仿真结果

3 试制和试验验证

3.1 试制加工和精密工艺控制

采用药型罩精密成型工艺、炸药柱精密压制工艺，保证药型罩材料晶粒度、尺寸、形位公差和贴模性，炸药柱尺寸、形位公差、密度及其均匀性等符合设计要求，完成了射流源的试制加工。

3.1.1 药型罩精密成型

通过采用精密成型工艺，保证药型罩晶粒细化和均匀化，以及较高的壁厚差和同轴度精度。经检测，药型罩晶粒平均直径细化至 0.010~0.015 mm(如图 9 所示)，壁厚差控制不大于 0.02 mm。

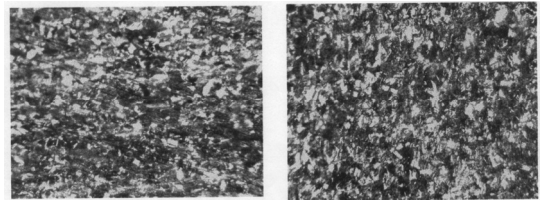


图 9 药型罩口部和顶部金相组织(×200)

3.1.2 炸药柱精密压制

常用的炸药柱成型方法有注装、压装、螺旋装药等。由于压装法药型罩与炸药柱同轴度匹配最佳，因此选用压装法。压制药柱过程中，压力过大或过小，都可能使成型药柱的内部结构发生变化，产生药柱密度不均匀等问题。合适的保压时间是提高成型药柱质量的关键^[16]。通过采用双向压药并经适当保压，改善了炸药颗粒的流动及蠕变性能，得到了均匀而致密的炸药柱。炸药柱密度差由一般 ±0.02 g/cm³ 控制至 ±0.005 g/cm³，高低差(端面马蹄形)则不大于 0.08 mm。

3.2 81 mm 口径试验验证和考核

试验时，射流源垂直放置在 45#钢柱上，采用 8 号军用工程电雷管起爆，通过炸高筒调节至设定炸高。

国外对射流源性能以特征值 v^2d (射流速度的平方和射流直径的乘积)进行表征。国内对射流源考核，一般采用特征值 v^2d 和(或)穿深相对标准偏差

指标, 相对标准偏差要求为不大于 3%^[1-2]。在破甲弹或破甲战斗部中一般以极差、穿深跳动量/平均穿深×100%(相对极差)或将相对极差分解为正向相对极差和负向相对极差^[4]来统计穿深跳动量和衡量破甲稳定性, 射流源可借鉴采用。

企业在研制过程中, 考虑指标直观性及数据采集便利, 通常采用正向相对极差和负向相对极差指标, 能够进一步明确单发最大值和最小值的偏离情况。正向相对极差和负向相对极差的计算为:

$$\delta\left(\frac{D_{\max}-\bar{D}}{\bar{D}}\right)\times 100\%; \quad (1)$$

$$\delta-\left(\frac{D_{\min}-\bar{D}}{\bar{D}}\right)\times 100\%。 \quad (2)$$

式中: D_{\max} 为该组试验中单发最大穿深; D_{\min} 为该组试验中单发最小穿深; \bar{D} 为该组试验平均穿深。

经多轮优化后主要设计参数: 药型罩质量为 100 g, 装药高度(炸药柱高度)为 106 mm, 传爆药柱药量为 2.4 g。试验时, 炸高取 180 mm。验证结果表明, 射流形成及其侵入入口、孔型和深度一致性较好。具体数据如表 1 所示。

表 1 81 mm 装药口径射流源试验数据

组别	序号	穿深/mm	平均穿深/mm	正负向相对极差/%	相对标准偏差/%
第 1 组	1-1	301	304	+1.3-0.99	1.0
	1-2	305			
	1-3	304			
	1-4	308			
	1-5	301			
第 2 组	2-1	300	305	+1.3/-1.6	1.1
	2-2	305			
	2-3	306			
	2-4	304			
	2-5	309			

3.3 其他口径射流源设计和验证考核

采用相似性原则设计 50、56、100 mm 装药口径射流源, 进行垂直静破甲试验考核, 炸高分别取 120、130 和 250 mm。试验具体数据如表 2 所示。

表 2 50、56、100 mm 装药口径射流源试验数据

装药口径高度/mm	穿深/mm	平均穿深/mm	正负向相对极差/%	相对标准偏差/%
50/65	180、183、184、183、185	183.0	+1.1/-1.6	1.0
	181、183、184、187、188	184.6	+1.8/-2.0	1.6
56/73	200、204、207、210、210	206.2	+1.8/-3.0	2.1
	201、204、207、205、208	205.0	+1.5/-2.0	1.3
100/130	485、490、495、493、495	491.6	+0.7/-1.3	0.9
	487、499、495、494、500	495.0	+1.0/-1.6	1.0

3.4 试验数据统计

50、56、81、100 mm 共 4 种装药口径射流源,

8 组静破甲穿深数据统计结果为:

1) 相对极差范围为 2.0%~4.8%, 8 组平均为 3.1%, 单组最大不超过 5%。正向相对极差极限为 +1.8%, 负向相对极差极限为 -3.0%, 均不超出 ±3.0%。

2) 相对标准偏差范围为 0.9%~2.1%, 8 组平均为 1.3%, 单组最大不超过 3%。

4 结论

1) 射流源采用单锥药型罩和圆柱形装药结构设计, 经优化结构参数和合理选用精密工艺技术, 取得了共 4 种装药口径、8 组试验穿深跳动量相对极差不大于 5%、正向和负向极限不超过 ±3.0%、相对标准偏差不大于 3%的良好效果。

相对极差和相对标准偏差反映单发最大值和最小值的偏离情况直观性不足。正向相对极差和负向相对极差在体现一组数据分布和离散程度的前提下, 可以弥补其不足, 对射流源穿深的考核采用此指标, 可确定为 ±3.0% 控制范围。

2) 精密破甲战斗部技术是提高破甲威力和改善破甲稳定性的重要技术途径, 在射流源研制过程中充分借鉴和有机融合了精密破甲战斗部技术。

仿真分析与试验结果基本吻合, 说明射流源结构设计合理、精密工艺控制有效, 达到了国外精密破甲战斗部破甲稳定性同等控制水平, 穿深跳动量控制较为先进, 满足了破甲稳定性设计和使用要求。

参考文献:

- [1] 赵玉清, 靳朝阳, 李建强, 等. 弹药低易损试验研究及射流源设计[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(9): 25-30.
- [2] 王建灵, 俞统昌, 郭炜. 一种射流源和炸药射流感度的研究[J]. 爆炸与冲击, 2007, 27(4): 370-374.
- [3] 胡焕性. 不对称因素及药型罩材料性质对射流特性和破甲效能影响[C]. 破甲文集《中国兵工学会弹药学会》, 1984(4): 84.
- [4] 曹兵, 陈惠武, 高森烈. 减小破甲弹穿深跳动量的工艺研究[J]. 南京理工大学学报, 1997, 21(6): 489-492.
- [5] 孙建, 胡焕性. 高威力精密破甲战斗部技术研究[J]. 火炸药学报, 2004, 27(1): 23-25.
- [6] 尹刚. 精密破甲战斗部实践研究[J]. 装备制造技术, 2018, 12(5): 62-64.
- [7] 程明强. 小口径破甲战斗部破甲稳定性的工艺研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2008.
- [8] 马建. 某单兵制导破甲战斗部威力性能研究[D]. 太原: 中北大学, 2013.
- [9] 李松楠, 张国伟, 崔晓杰, 等. 小口径多功能弹破甲威

力影响因素[J]. 兵工自动化, 2019, 38(4): 75-78.

[10] 闫超, 黄正祥, 祖旭东, 等. 细晶铜材料力学性能及药型罩领域应用研究[J]. 弹道学报, 2017, 29(1): 85-92.

[11] 周长省, 鞠玉涛, 陈雄, 等. 火箭弹设计理论[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2014: 129-130.

[12] 张会锁, 赵捍东, 王芳, 等. 药型罩锥角对聚能射流影响的数值模拟[J]. 弹箭与制导学报, 2005, 25(1): 351-358.

(上接第 64 页)

3 结论

针对联合作战条件下, 面对海量、异构、复杂多变的战场态势数据, 研究基于大数据分析技术的战场态势分析和预测, 对辅助指挥员实时、高效、科学地进行决策具有重要意义。笔者构建分布式大数据分析建模系统框架, 提出一种采用 Hadoop 分布式数据处理平台对海量战场态势要素进行并行处理的可行方案, 其次用 PSO-ELM 算法进行战场态势预测。仿真结果表明: PSO-ELM 算法相比于传统的 BP 神经网络和 ELM 方法, 战场态势预测效率和精度有较大提升, 对于未来高度动态变化的战场环境, 实现智能化的战场态势认知, 具有一定应用价值。

参考文献:

[1] 孙儒凌. 战场态势的描述[J]. 军事系统工程, 1998(1): 226-230.

[2] 赵宗贵, 李君灵, 王珂. 战场态势估计概念、结构与效能[J]. 中国电子科学研究院学报, 2010, 5(3): 226-230.

[3] 王劲松, 李宗有, 隋雷. 基于灰色神经网络的战场态势分析及预测[J]. 电光与控制, 2015, 22(12): 15-19.

(上接第 86 页)

参考文献:

[1] 朱轶龙, 孙浩, 白蕾, 等. 火箭橇试验地面点火控制系统[J]. 兵工自动化, 2020, 39(9): 25-30.

[2] 郭进勇, 张群兴, 李全俊, 等. 固体火箭发动机喷管组件过盈装配强度分析[J]. 兵工自动化, 2021, 40(2): 93-96.

[3] 王凯民, 张学舜. 火工品工程设计与试验[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010: 16.

[13] 韩继龙, 敬怡东, 杜忠华, 等. 新型复合药型罩结构参数对射流侵彻的影响[J]. 弹道学报, 2020, 32(3): 32-57.

[14] 崔银峰, 周伟江, 康乐. 引信传爆序列能量匹配性设计与试验[J]. 水下无人系统学报, 2020, 28(3): 337-344.

[15] 高飞, 王雨时, 闻泉, 等. 聚能装药破甲深度炸高不敏感度研究[J]. 弹箭与制导学报, 2020, 40(1): 7-14.

[16] 岳晓媛, 张会锁, 黄鸿鑫, 等. 压药工艺参数对成型药柱质量的影响研究[J]. 兵工自动化, 2021, 40(1): 84-87.

[4] 郭圣明, 贺筱媛, 吴琳, 等. 基于强制稀疏子编码神经网络的作战态势评估方法研究[J]. 系统仿真学报, 2018(3): 772-800.

[5] 方冰, 张翠侠. 基于时空维度分析的战场态势预测方法[J]. 指挥信息系统与技术, 2017(8): 59-63.

[6] 廖馨, 孙峥皓. 智能化对抗战场态势展示系统的设计与实现[C]//第二届中国系统仿真技术及其应用学术年会论文集. 合肥: 中国自动化学会系统仿真专业委员会, 2017.

[7] 庄玉册, 黎蔚. 基于 PSO 优化极限学习机神经网络的空气质量预报[J]. 沈阳工业大学学报, 2020, 42(2): 213-217.

[8] 何卫华, 王宏. 基于大数据分析技术的光纤通信系统安全态势预测[J]. 现代电子技术, 2020, 43(7): 6-9.

[9] IM U, BIANCONI R, SOLAZZO E, et al. Evaluation of operational on-line-coupled regional air quality models over Europe and North America in the context of AQMEII phase 2[J]. Atmospheric Environment, 2015, 115(2): 404-420.

[10] IOSIFIDIS A, TEFAS A, PITAS I. Graph embedded extreme learning machine[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2016, 46(1): 311-314.

[11] YANNIS MARINAKIS. A Hybrid Multi-Swarm Particle Swarm Optimization algorithm for the Probabilistic Traveling Salesman Problem[J]. Computers and Operations Research, 2010, 37(3): 432-442.

[4] 马宏宣. 国外抗静电抗射频电火工品[J]. 火工品, 1981(3): 21.

[5] 唐顺厚, 江兆平, 傅忠实. 一种用于固体火箭发动机的瞬发/延期电点火器[J]. 航空兵器, 2000(6): 9-11.

[6] 周育才. 高温环境适应性设计初探[J]. 航空兵器, 2003(2): 12-15.

[7] GJB450-2004 装备可靠性工作通用要求[S]. 北京: 总装备部军标发行部, 2004: 12.

[8] 黄正祥, 肖强强, 贾鑫, 等. 弹药设计概论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2015: 322-327.