

doi: 10.7690/bgzd.2020.05.019

某双模战斗部成型装药船尾结构优化设计

汪 洋¹, 韩银泉¹, 刘应成²

(1. 中国兵器装备集团自动化研究所智能制造事业部, 四川 绵阳 621000;

2. 重庆嘉陵特种装备有限公司工艺技术部, 重庆 404100)

摘要:以 $\Phi 100\text{mm}$ 口径成型装药为基础,分析成型装药船尾结构对爆炸成型弹丸(EFP)与聚能杆式侵彻体(JPC)两模毁伤元匹配的影响关系,实现对该双模战斗部成型装药船尾结构的优化设计。根据双模战斗部成型装药研究基础,在确定5个基本结构参数的基础上,对船尾结构变化及其毁伤元成形规律进行研究。运用AUTODYN软件对不同船尾结构成型装药仿真分析,获得2种毁伤元的成形参数与形态,对比分析结果得到船尾结构对双模毁伤元的影响规律和船尾结构优化值,为双模战斗部大锥角成型装药的船尾结构设计提供参考。

关键词:成型装药;船尾结构;双模毁伤元;数值仿真

中图分类号:TJ410.3 **文献标志码:**A

Optimal Design of Stern Structure of a Dual-mold Warhead-molding Charge

Wang Yang¹, Han Yinquan¹, Liu Yingcheng²

(1. Department of Intelligent Manufacture, Automation Research Institute Co., Ltd. of China South Industries Group Corporation, Mianyang 621000, China;

2. Department of Process Technology, Chongqing Jialing Special Equipment Co., Ltd., Chongqing 404100, China)

Abstract: Based on the $\Phi 100\text{mm}$ caliber molding charge, analyzed the influence of the stern structure of the molding charge on the matching by the two-molded damage elements of the explosive forming projectile (EFP) and the jetting penetrator charge (JPC), and realized the optimal design of the molding charge stern structure of the two-molded combat unit. According to the research foundation of the two-mode combat-molding charge, based on the determination of five basic structural parameters, studied the change of stern structure and its damage forming rule. By using AUTODYN software to simulate the molding charge of different stern structures, the molding parameters and morphology of the two types of damage elements are obtained. The influence law of stern structure on two-mode damage elements and the optimization value of stern structure were obtained by comparison and analysis, which provided reference for the design of stern structure of large cone-angle shaped charge in two-mode warhead.

Keywords: molding charge; stern structure; double mode damage element; numerical simulation

0 引言

双模战斗部可根据战场信息选择不同作用模式,是在现代成型装药破甲弹的基础上逐步发展起来的一种新型穿破甲战斗部,核心技术是多模毁伤元的形成和转换。笔者研究的成型装药双模战斗部,在同一成型装药的基础上,通过运用不同的起爆方式让战斗部以最佳模式起爆,以形成2种不同的毁伤元,从而有效毁伤目标。当装药底部中心单点起爆时形成爆炸成型弹丸(explosive forming projectile, EFP),当端面环向多点起爆时形成用于近距离打击重型装甲的聚能杆式侵彻体(jetting penetrator charge, JPC)。

美国 David 提出设计大锥角药型罩的船尾成型装药结构,装药直径与药型罩直径相等;对于常

规的成型装药结构,通常认为其结构端面边缘的部分装药对于毁伤元的形成无作用,可将其去除,形成船尾结构。这种成型装药结构对整个弹丸来说不仅可以提高积极质量,而且对多模战斗部来说还可以形成具有稳定飞行性能的 EFP 和高速的 JPC^[1-2]。船尾成型装药结构的变化,对形成的双模毁伤元形态和成形参数将产生怎样的影响及规律,是成型装药结构设计时格外重视的问题。笔者对最优船尾结构参数进行研究,为 $\Phi 100\text{mm}$ 口径双模大锥角成型装药的船尾结构设计提供参考。

1 船尾结构方案确定

根据前期对成型装药的研究与相关资料参考,确定以 $\Phi 100\text{mm}$ 口径成型装药结构为基础,在已经确定药型罩壁厚 T 、锥角 2θ 、弧度半径 R 、壳体

收稿日期:2019-12-28;修回日期:2020-02-25

作者简介:汪 洋(1994—),男,四川人,硕士,从事弹药智能装配装备研究。E-mail: 1411684110@qq.com。

厚度 δ 和装药高度 H 等 5 个基本结构参数的基础上, 再进行船尾结构参数的优化设计探究^[3], 这 5 个因素为不变的结构参数, 而笔者只关注船尾结构的变化及其毁伤元成形规律, 以此为某 $\Phi 100$ mm 口径双模战斗部成型装药的船尾结构设计提供参考。

$\Phi 100$ mm 口径船尾形结构成型装药战斗部结构如图 1 所示。

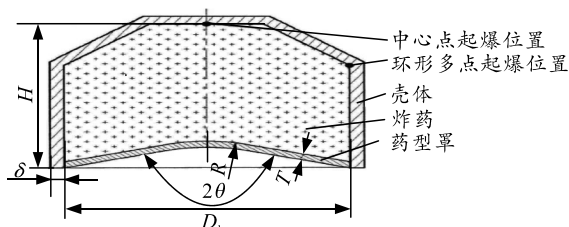


图 1 成型装药结构

该成型装药为船尾形结构, 药型罩为弧锥结合形。图中, 成型装药口径为 D_k , 装药高度为 H , 壳体厚度为 δ , 药型罩弧度半径为 R , 锥角为 2θ , 罩厚为 T 。笔者根据资料参考得到成型装药基本结构参数分别为: $R=0.50D_k$, $2\theta=142^\circ$, $T=0.034D_k$, $H=1.2$, $\delta=0.07D_k$ ^[3-4]。

为探究船尾装药与常规装药形成的毁伤元形态、参数不同, 先对 2 种结构装药进行仿真分析; 船尾结构参数包括船尾半径 R_k 和倾角 α , 结构方案设计将针对这 2 个参数的变化而确定。常规装药结构如图 2 所示。

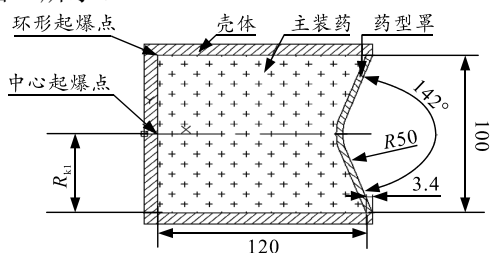


图 2 成型装药结构

船尾形装药将常规装药后端变为船尾形, 中心起爆点不变, 环形起爆点设置在船尾前端面, 船尾形装药结构如图 3 所示。

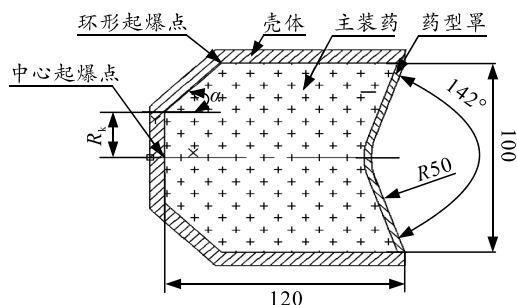


图 3 船尾成型装药结构

文中数值仿真通过 AUTODYN 显示有限元分析程序软件来实现, AUTODYN 是解决固体、液体、气体和高度非线性动力学问题(如高速碰撞、侵彻及爆炸等)的软件, 主要功能包括: 计算结构动力学有限元功能、多物理现象耦合下多求解器功能等; AUTODYN 软件具有丰富材料模型, 包括本构模型和热力学状态方程, 可提供金属、水泥、岩土、炸药、空气及其他固、液、气体的材料模型和数据^[5]。笔者研究的成型装药双模战斗部毁伤元成形数值仿真是 2 维非线性结构的爆炸和金属成形的冲击载荷非线性问题, 选用欧拉计算方法。仿真分析过程中, 划分的欧拉网格不变形、不移动, 网格也不会相交; 所定义的物质材料通过网格边界流进流出, 该流动变形不影响时间步长计算^[6]。

文中成型装药由炸药、药型罩、壳体组成, 仿真模型除了这 3 种材料外, 还需要将空气作为爆轰介质。这些材料均采用欧拉(Euler)算法。引入材料状态方程和本构关系后, 模型控制方程才能求解; 模型装药选用 B 炸药, 材料模型为高能炸药爆轰模型, 状态方程为 JWL 状态方程^[4,7]:

$$p(E, \bar{V}) = A \left(1 - \frac{w}{R_1 \bar{V}} \right) e^{-R_1 \bar{V}} + B \left(1 - \frac{w}{R_2 \bar{V}} \right) e^{-R_2 \bar{V}} + \frac{wE}{\bar{V}}$$

式中: e 为比内能; E 为炸药初始内能; \bar{V} 为比体积; A 、 B 、 w 、 R_1 和 R_2 为炸药常数。

药型罩材料为紫铜, 材料模型为 JC (Johnson-Cook)。该模型是适用于金属在高应变率和高温度条件下的本构模型; 状态方程为 Gruneisen 方程^[3]:

在压缩状态下, 有

$$p = \frac{\rho_0 C^2 \mu \left[1 + \left(1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu - \frac{a}{2} \mu^2 \right]}{\left[1 - (S_1 - 1) \mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2} \right]^2} + (\gamma_0 + a \mu) E$$

当材料发生膨胀时, 有

$$P = \rho_0 C^2 \mu + (\gamma_0 + a \mu) E$$

式中: $\mu = \rho_0 / \rho - 1$; ρ 为材料变形后密度; S_1 、 S_2 和 S_3 为材料冲击绝热线(Hugoniot 线)有关参数; γ_0 为 Gruneisen 系数; a 为对 γ_0 一阶体积修正量; C 为材料静态体声速; ρ_0 为材料初始密度。

笔者根据常规成型装药和船尾成型装药 2 种装药结构, 建立相应的模型进行仿真计算, 对比 2 种装药结构所形成的双模毁伤元^[8]。两结构成型装药 200 μ s 仿真计算结果如表 1 所示。

表 1 2 种成型装药毁伤元参数、形态对比

方案	头部速度/(m/s)	长径比 L/d	毁伤元形态
EFP	常规成型装药	2 676	2.15
	船尾成型装药	2 756	2.70
JPC	常规成型装药	3 145	5.40
	船尾成型装药	3 351	10.86

由表中可以看出：船尾形结构装药形成的 EFP 和 JPC 的头部速度都比常规装药形成的 2 种毁伤元头部速度高，同时前者毁伤元成形形态也更好，特别是对比采用环形起爆形成毁伤元的 2 种结构的成型装药可知，船尾形结构成型装药形成的 JPC 长径比大，更细长，其形态与对特定目标的攻击性能也更优于常规成型装药。

2 船尾结构方案设计及仿真计算分析

根据前期研究，已知当大锥角弧锥结合形药型罩成型装药为船尾形结构且装药直径大于药型罩直径的船尾成型装药时，具有使形成的侵彻体速度较高、形态性能较好的最佳船尾结构。其最佳值分别为：最佳船尾半径大约为 40%装药半径，最佳倾角约为 45° ^[9]。笔者参考该成型装药船尾结构数值，以研究所得的最佳船尾半径和船尾角度为基础，将这 2 个结构参数在一定范围内变动，探究船尾结构对双模战斗部形成的毁伤元的影响，得出更有利于形成最佳双模毁伤元的船尾结构参数，确定船尾半径结构方案如表 2 所示。

表 2 船尾半径结构方案

方案	1	2	3	4	5
船尾半径	$25\%R_{K1}$	$35\%R_{K1}$	$40\%R_{K1}$	$45\%R_{K1}$	$55\%R_{K1}$
R/mm	12.5	17.5	20	22.5	27.5

根据该仿真方案，参照模型与算法相关参数设置与求解过程进行数值仿真，计算结果如表 3 所示。

表 3 船尾半径结构仿真计算结果

半径方案	EFP		JPC	
	头部速度/(m/s)	长径比	头部速度/(m/s)	长径比
1	2 704	3.14	3 178	5.93
2	2 723	2.95	3 209	8.65
3	2 738	2.87	3 249	9.10
4	2 753	2.62	3 374	10.74
5	2 748	2.95	3 269	6.40

根据表 3 计算结果可得：随着船尾半径从 $25\%R_{K1} \sim 55\%R_{K1}$ 增加，毁伤元头部速度先逐渐增加后减小，且方案 4 时形成的毁伤元头部速度达最

大；EFP 长径比先逐渐减小后增大，JPC 长径比先逐渐增大后减小；相对于毁伤元长径比的变化，船尾结构半径的改变对毁伤元头部速度的影响比较小。综合毁伤元头部速度、长径比与仿真计算时的成型形态，成型装药最优船尾结构为方案 4，即船尾半径为 $R_K=45\%R_{K1}=22.5 \text{ mm}$ 。

笔者在成型装药船尾半径确定为 22.5 mm 基础上，探究船尾倾角对双模毁伤元的影响规律，并得到最优船尾倾角值。船尾倾角结构方案确定如表 4 所示。

表 4 船尾倾角结构方案

方案	1	2	3	4	5
船尾倾角 $\alpha/(\circ)$	30	40	45	50	60

根据船尾倾角角度方案的确定，仿真计算得到各结构方案所形成毁伤元的参数结果如表 5 所示。



表 5 船尾倾角结构仿真计算结果

倾角方案	EFP		JPC	
	头部速度/(m/s)	长径比	头部速度/(m/s)	长径比
1	2 669	3.07	2 994	8.31
2	2 709	2.68	3 183	11.50
3	2 773	2.95	3 390	13.20
4	2 770	2.86	3 286	8.66
5	2 765	3.24	3 270	6.20

根据表中参数可知：当船尾倾角从 $25^\circ \sim 65^\circ$ 增大时，毁伤元头部速度先增大后减小，船尾倾角结构采用方案 3 即倾角为 45° 时，毁伤元头部速度达到最大；同时毁伤元 JPC 的长径比也是先增大后减小，方案 3 时达到最大；毁伤元 EFP 的长径比不断波动，就整体来看先减小后增大。依据上述分析且综合毁伤元成形参数与形态，确定最佳船尾倾角为 45° ，此时毁伤元头部速度较大，JPC 细长有利于对目标的侵彻，EFP 长径比也较为合理，有利于长距离稳定飞行。

根据对 $\Phi 100 \text{ mm}$ 口径船尾成型装药结构的设计与仿真计算，由所形成的毁伤元参数对比分析可得，优化后的船尾结构参数为：船尾半径 $R_K=45\%$ ， $R_{K1}=22.5 \text{ mm}$ ，船尾倾角 $\alpha=45^\circ$ ，该船尾结构参数下，成型装药通过不同起爆点形成的双模毁伤元的毁伤效果较为理想。根据该结构优化参数建立仿真模型进行计算，仿真计算参数结果如表 6 所示。

表 6 船尾优化结构成型装药仿真结果

毁伤元及形态参数	头部速度/(m/s)	长径比	毁伤元长度/mm	毁伤元成形图
EFP	2 773	2.95	38	
JPC	3 390	13.20	181	

由表可知: 所形成的毁伤元头部速度较高, 同时 EFP 长径比在不产生头尾速度差的情况下达到最大值, 有利于 EFP 实现远距离飞行, 在大炸高的情况下仍然具有较好的毁伤性能, 而 JPC 的长径比较大, 能够保证其在一定距离内稳定飞行, 具有较大的后效杀伤效果。

3 结论

笔者仿真分析了船尾结构对成型装药形成毁伤元的影响, 得出结论:

1) 船尾成型装药形成的毁伤元头部速度随着船尾半径的增加而有所增大, 在成型装药结构设计中宜采用在合理范围内船尾半径较大的结构; 而毁伤元头部速度随着船尾倾角的增大先快速增大然后缓慢递减。

2) 船尾半径和船尾倾角对于毁伤元头部长径比的影响较毁伤元头部速度的影响大, 当船尾半径和船尾倾角角度改变时, 毁伤元的长径比变化较大, 且成形形态差别也较大, 而毁伤元的头部速度在较小范围内变化。

3) 笔者研究的 $\Phi 100$ mm 口径成型装药双模战斗部的船尾结构确定为: 最佳船尾半径为 22.5 mm, 最佳船尾倾角为 45° 。该船尾结构所形成的毁伤元

(上接第 79 页)

经计算, 加入弹射线圈之前单级弹射线圈在仿真时间内的效率为 3.45%; 加入弹射线圈后的发射效率为 4.02%。

由此可以得出, 弹射线圈的加入可以使电枢发射过程的效率提高。

3 结论

通过仿真分析可知, 在电枢所受电磁力的方向在运动过程中发生了反向。在驱动线圈的电路参数和结构参数都相同的情况下: 随着电枢质量的增加, 电磁力反向时刻不断推迟, 电磁力峰值不断增加, 电枢运动速度峰值不断下降, 电枢最终运动位移不断减小, 使发射效率降低; 随着电枢速度的增加, 电磁力的反向时刻前移, 使得加速区域和电能利用率明显减小, 从而降低了系统的发射效率, 而且反向点前移的根本原因是电枢进入线圈的速度。在大质量电磁发射的研究中要考虑发射速度随着质量增加而减小的问题, 而且为了提高多级线圈发射器的发射效率, 应适当调整各级线圈的电路参数或结构

头部速度较大, 双模毁伤元的长径比都较为合理且成形形态最好。

参考文献:

- [1] 陈忠勇, 李文彬, 高旭东, 等. 药型罩结构参数对侵彻体成型的影响[J]. 四川兵工学报, 2011(2): 18-21.
- [2] 吴义锋, 王晓鸣, 李文彬, 等. 船尾装药结构对侵彻体性能影响的仿真研究[J]. 南京理工大学学报, 2009, 33(2): 231.
- [3] 陈奎. 双模毁伤元侵彻威力匹配研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2013.
- [4] 范晨阳. 弹丸侵彻混凝土 SPH 数值模拟[D]. 太原: 中北大学, 2011.
- [5] 石少卿, 汪敏, 孙波, 等. AUTODYN 工程动力分析及应用实例[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012: 38-40.
- [6] 汤建明. 基于 ANSYS\LS-DYNA 进行 EFP 成形及切割仿真研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2006.
- [7] 黄正祥. 聚能杆式侵彻体成型机理研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2003.
- [8] 郭萌萌, 廉鹏, 陈松, 等. 基于水力空化原理倒出装药的模拟与实验[J]. 兵工自动化, 2019, 38(8): 58-61.
- [9] 曹兵. EFP 成型机理与关键技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2001.

参数。电枢受力反向时刻随速度提高而提前的现象, 为多级线圈炮触发策略研究提供了基础。并且, 在大质量物体发射的方案设计中, 在被发射物体底部加设弹射线圈可提高发射效率。

参考文献:

- [1] FAIR H D. Guest Editorial 18th IEEE International EML Symposium[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2017, 45(7): 1064-1066.
- [2] 张红旭, 张军, 董健年, 等. 添加轭铁对磁阻型电磁发射的影响[J]. 兵器装备工程学报, 2018, 39(8): 44-47.
- [3] 李伟波, 曹延杰, 朱良明, 等. 电磁线圈弹射导弹技术研究[J]. 飞航导弹, 2012(11): 52-55.
- [4] 王钊, 曹延杰, 王旻, 等. 三级电磁线圈垂直发射器工作过程仿真[J]. 高压电器, 2014, 50(1): 14-19.
- [5] 李凤层, 雷彬, 李治源, 等. 单级感应线圈发射器参数分析与动态特性计算[J]. 兵器材料科学与工程, 2010, 33(4): 72-75.
- [6] 向红军. 电磁感应线圈炮原理与技术[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2015: 12-15.
- [7] 邹本贵, 孙学锋, 曹延杰, 等. 舰载导弹电磁线圈垂直发射方案设计[J]. 弹箭与制导学报, 2013, 33(5): 45-48.