

doi: 10.7690/bgzd.2018.12.021

装药长径比对 JPC 成型影响数值分析

崔魁文, 高敏, 米双山

(军械工程学院导弹工程系, 石家庄 050003)

摘要: 针对装药长径比对聚能杆式侵彻体的影响, 对 JPC 成型影响进行数值分析。基于一种球锥形药型罩, 运用 AUTODYN 软件建立聚能装药模型, 对聚能杆式侵彻体成型过程进行数值模拟, 分析装药长径比对 JPC 头部速度、动能以及炸药利用率的影响规律。分析结果表明: 当装药长径比大于 1.4 以后, 再增加装药长径比对有效装药量增加的并不多, 对 JPC 头部速度和动能影响大幅降低, 可为聚能杆式侵彻体战斗部的设计及应用提供参考。

关键词: 聚能杆式侵彻体; 药型罩; 长径比; 数值模拟

中图分类号: TJ410 **文献标志码:** A

Numerical Analysis of Fitness Ratio Influence on Jetting Projectile Charge

Cui Kuiwen, Gao Min, Mi Shuangshan

(Department of Missile Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: In order to study the influence of different fitness ratio of charge on jetting projectile charge, carry out numerical simulation of JPC charge influence. Use simulation software of AUTODYN to establish shaped charge model, carry out numerical simulation of JPC charge process, and analyze the influence principle of fitness ratio on JPC head speed, kinetic energy and explosion utilization ratio. The analysis results show that when the fineness ratio is larger than 1.4, the increase of charge-diameter ratio is little, the JPC head speed and kinetic energy significantly reduced. The results provide the reference for JPC warhead design and application.

Keywords: jetting projectile charge; liner; fitness ratio; numerical simulation

0 引言

聚能杆式侵彻体(jetting projectile charge, JPC)性能介于聚能射流(shaped charge, JET)和爆炸成型弹丸(explosively formed projectile, EFP)之间, 在大炸高条件下连续性好、稳定性高, 具有较强的侵彻能力, 在反装甲战斗部领域具有广阔的应用前景^[1-2]。新型爆炸反应装甲和主动防御装甲的出现, 要求聚能射流在大炸高条件下具有良好的连续性和抗干扰性; 因此, 为了满足现代战场的需求, 有效打击新型装甲以及工事等作战目标, 聚能杆式侵彻体成为国内外研究的热点。

影响 JPC 成型的关键因素有起爆方式、药型罩材料、炸药性能和装药长径比等。目前, 国内对 JPC 的成型有了初步的研究: 杨亚东等研究了起爆方式对 JPC 成型的影响^[3]; 吴晗玲、陈威、付恒以及焦志刚等研究了药型罩对 JPC 性能的影响^[4-7]; 朱亮等研究了炸药材料性能对 JPC 成型的影响^[8]等; 刘夯、龙源等研究了装药长径比对 EFP 成型的影响规律^[9-10]。目前, 有关装药长径比对 JPC 成型影响的研究比较少。

基于此, 笔者运用 AUTODYN 软件建立聚能装药模型, 对 JPC 成型过程进行数值模拟, 得到不同装药长径比下 JPC 成型的各项参数, 得出装药长径比对 JPC 成型的影响规律, 解决了 JPC 应用过程中装药长径比的选取问题, 为下一步聚能杆式侵彻体战斗部设计及应用提供了依据。

1 数值仿真

1.1 理论分析

聚能装药起爆后, 生成爆轰波压垮药型罩向轴中线汇聚形成射流。炸药是聚能装药形成射流的能源。理论分析和实验结果表明: 为了增大 JPC 的侵彻和穿孔能力, 应尽可能提高爆轰波压力, 要求选取具有高密度和高爆速性能的炸药, 同时增大炸药装填量。由此可以得出, 装药长径比直接影响到 JPC 的侵彻威力。

研究表明: 随着长径比的增大, 射流的侵彻效能随之提高, 当长径比大到一定程度后, 增大长径比对射流侵彻性能产生的影响将会降低。但在实际应用中, 装药结构往往受到反坦克导弹弹体限制, 装药长径比要限制在一定范围内; 因此, 对装

收稿日期: 2018-10-12; 修回日期: 2018-11-01

作者简介: 崔魁文(1992—), 男, 河北人, 硕士, 从事弹箭发射理论与技术研究。

药结构长径比进行优化选择具有重要意义。

1.2 仿真模型

笔者在装药结构形状和药型罩确定的前提下，研究装药长径比 ($K = L / D$) 对 JPC 成型的影响。其中聚能装药结构为柱形装药，装药直径 $D = 6 \text{ cm}$ ，药型罩采用弧锥结合结构，药型罩壁厚 $d = 0.35 \text{ cm}$ ，成型装药结构图 (1/2 剖面图) 如图 1 所示。

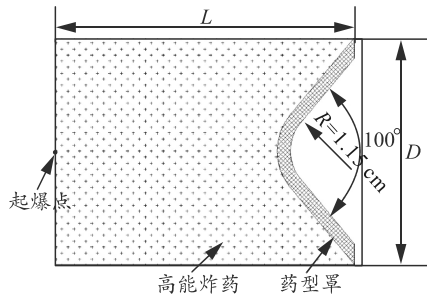


图 1 聚能装药结构

炸药爆炸和药型罩压垮属于大变形问题。在聚能杆式射流形成的过程中，炸药材料和药型罩材料会发生愈来愈剧烈的变形。Euler 算法由于不涉及网格变形，特别适合模拟爆炸等大变形的问题，故主装药、药型罩和空气场均采用 Euler 单元建立，并在观测的区域对模型进行细化处理；Lagrange 算法能够很好模拟固体材料的小、中度网格变形，且与其他算法相比，其计算速度较快、精度较高，因此靶板采用 Lagrange 算法，在靠近轴线区域进行细化处理，求解采用 Lagrange/Euler 自动耦合算法，求解时间 $300 \mu\text{s}$ ^[11]。其中对网格细化处理能够使得射流形成区域网格大小合理，既保证了仿真的准确性，又合理减少了仿真运行时间。

边界条件选择 Flow-Out，表示边界无反射，防止爆轰波的反射对射流形成造成影响，同时对靶板进行速度约束，防止其在仿真过程中发生位置偏移。因为聚能装药结构为轴对称结构，所以采用 1/4 结构建模仿真^[12]，对真实性无影响，同时运算量的减少也缩短了仿真时间，减少了仿真运算中误差的积累，提高了仿真的可靠性和稳定性。起爆方式为中

表 2 炸药材料主要参数

材料	$\rho/(\text{g}/\text{cm}^3)$	$D/(\text{m}/\text{s})$	A_1/GPa	B_1/GPa	R_1	R_2	ω	E/GPa	p/GPa
PBX9501	1.840	8 800	852.4	18.02	4.55	1.3	0.38	10.2	37

1.3.3 药型罩参数

药型罩材料为紫铜，采用 Shock 状态方程，一般形式如下：

$$p = p_H + \Gamma \rho (e - e_H); \quad (3)$$

心起爆，炸高为 3 倍装药口径，单位制为 $\text{cm-g-}\mu\text{s}$ 。有限元网格模型如图 2 所示。

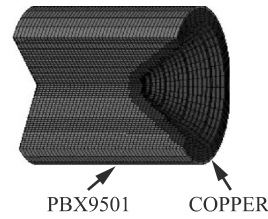


图 2 装药结构有限元模型

1.3 材料模型

在文中的数值模拟中，涉及到空气、炸药、药型罩以及靶板 4 种材料模型，所用材料对应软件库中的材料选择如表 1 所示。

表 1 装药材料模型

部件	材料名称	状态方程	强度模型	失效模型
空气	AIR	Ideal Gas	None	None
主装药	PBX9501	JWL	None	None
药型罩	COPPER	Shock	Johnson Cook	None
靶板	RHA	Shock	von Mises	None

1.3.1 空气参数

空气采用理想气体模型，Ideal Gas 状态方程。该状态方程主要用来描述理想气体的状态，表现形式为

$$P = (\gamma - 1)\rho e + P_{\text{shift}}. \quad (1)$$

式中：密度 $\rho = 1.225 \text{ e}^{-3} \text{ g}/\text{cm}^3$ ；理想气体常数 $\gamma = 1.4$ ；初始化内能 $e = 2.066 \text{ 4 J}$ ；初始压力 $P_{\text{shift}} = 0$ 。

1.3.2 炸药参数

炸药材料为以奥克托今为主体的 10#-159 装药，采用 JWL 状态方程描述。炸药及爆轰产物可以用来计算由化学能转化成的压力，其压力和能量的关系式^[13]为

$$p = A_1 \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B_1 \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V}. \quad (2)$$

式中：参数 A_1 、 B_1 、 R_1 、 R_2 和 ω 为材料常数； p 为爆轰压力； V 为相对体积； E 为初始内能密度。10#-159 装药相关参数如表 2 所示。

$$p_H = \rho_0 c_0^2 \mu (1 + \mu) [1 - (s - 1)\mu]^2; \quad (4)$$

$$e_H = \frac{p_H}{2\rho_0} \left(\frac{\mu}{1 + \mu} \right); \quad (5)$$

$$\mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1. \quad (6)$$

式中： Γ 为系数； p 为压力； ρ_0 为初始密度； c_0 和 s 为常数。

使用 Johnson-Cook 动态屈服模型描述药型罩的力学行为。该模型是描述材料在大变形、高应变率 and 高温条件下的本构模型，适用于高速碰撞或爆炸引起的材料变形，表达式^[14]为：

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n)(1 + c \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\varepsilon_0})[1 - (T^*)^m]; \quad (7)$$

$$T^* = \frac{T - T_r}{T_m - T_r}. \quad (8)$$

式中： ε 为有效塑性应变； T^* 为相似温度； T_r 为参考温度； T_m 材料的熔点； A 为材料屈服强度； B 为硬化常数； c 为应变率常数； n 为硬化指数； m 为热软化指数； A 、 B 、 C 、 n 、 m 均由实验获得。紫铜材料模型参数如表 3^[15]所示。

表 3 Johnson-Cook 材料模型参数

A	B	C	n	m	T_r / K	T_m / K
0.000 9	0.002 92	0.31	0.025	1.09	1 356	293

1.3.4 靶板参数

靶板材料为装甲钢，采用 Shock 状态方程和 von Mises 强度模型。该强度模型用于描述金属材料的塑性行为，应变增量可写成下面的形式：

$$d\varepsilon = d\varepsilon^e + d\varepsilon^p. \quad (9)$$

式中： $d\varepsilon^e$ 为弹性形变增量； $d\varepsilon^p$ 为塑性应变增量。

Erosion 模型设置为“Geometric strain”，同时由经验将“erosion strain”参数修改为 2。

2 数值仿真结果及分析

2.1 JPC 成型情况分析

JPC 成型过程十分复杂，其影响因素很多，其中装药长径比是一个比较重要的因素。为研究装药长径比对 JPC 成型参数的影响规律并为今后的研究提供参考，取装药长径比 K 为 0.6~1.6，间隔为 0.1，对不同方案进行数值模拟计算。

JPC 成型过程如图 3 所示，炸药起爆后，球锥形药型罩在爆轰波作用下被压垮，向轴中线汇聚，形成 JPC。JPC 存在一定的速度梯度，但远小于聚能射流中存在的速度梯度。最终在 70 μ s 时，JPC 经过拉伸延长，头部速度基本保持不变，形成较稳定形态的 JPC。

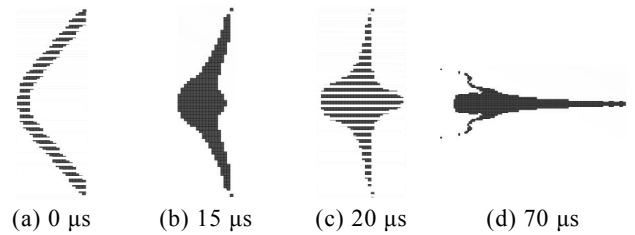


图 3 JPC 成型过程

增大聚能装药结构长径比会增加装药结构的装药量，起爆后生成爆轰波也会相应提高。根据能量守恒定律，药型罩质量不变的条件下，JPC 速度会增大。仿真得到不同装药长径比生成 JPC 在 70 μ s 时的头部速度，如图 4 所示。

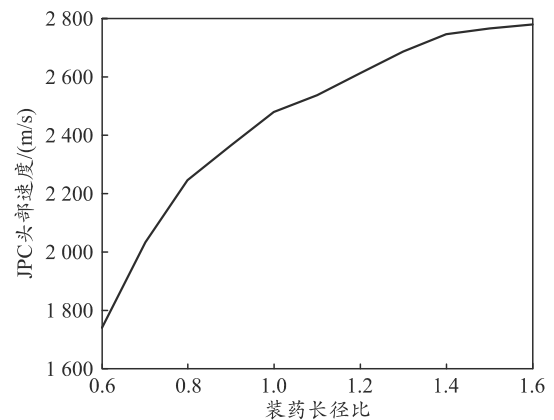


图 4 不同装药长径比生成 JPC 在 70 μ s 时头部速度

由图可以看出：随着装药长径比的增加，JPC 的头部速度也在增加，但增加趋势不断变缓，尤其是在长径比 1.4 以后，曲线变平缓，JPC 头部速度增量减小比较明显。由此可知：长径比在 1.4 以上时，增大长径比虽然仍可以提高射流速度，但 JPC 提高的效率越来越低，装药长径比对 JPC 头部速度的影响因子不断降低。

JPC 的动能最直接反应其侵彻性能，通过仿真可以得出 70 μ s 时，不同装药长径比生成的 JPC 的动能，其动能随长径比变化规律如图 5 所示。

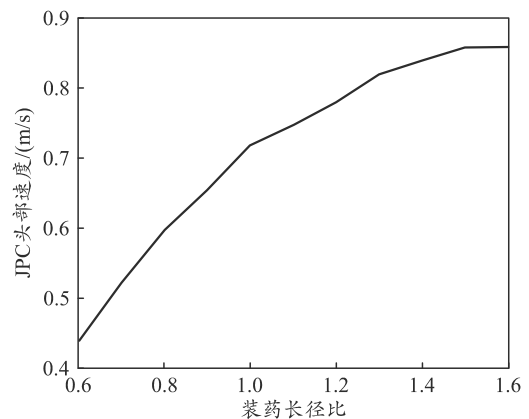


图 5 不同装药长径比 JPC 的动能

由图 5 可知：随着装药长径比的增加，JPC 动能也不断增大，并且，当长径比大于 1.4 时，曲线斜率出现较大程度的降低，即长径比大于 1.4 时，再增加装药长度，JPC 成型后动能增加并不多，对动能提升效果不明显。

结合图 4 和图 5 可知：当装药长径比大于 1.4 以后，继续增加装药高度，装药质量增大，但有效装药量增加并不明显。JPC 战斗部装药往往受到弹体空间限制，其直径、高度以及质量都不能过大；因此，在进行装药长径比设计时，在满足作战要求的条件下，尽可能将装药长径比定在 1.4 以下进行优化研究。

2.2 能量利用率

炸药利用率指 JPC 成型时动能与炸药初始内能的比值。装药长径比增大，JPC 动能增大，装药自身内能也随着装药量的增加而增大。为了研究装药利用率，对仿真参数进行分析，得到不同装药长径比的炸药能量利用率曲线如图 6 所示。

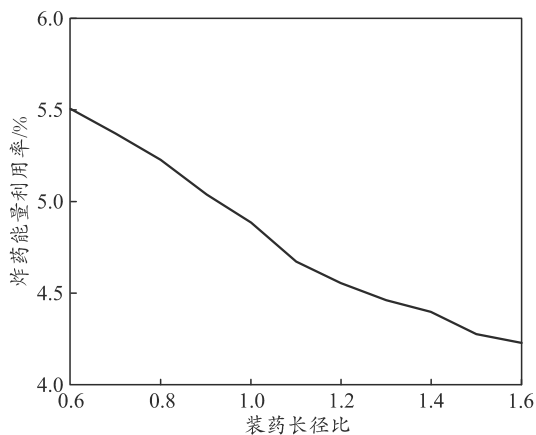


图 6 不同装药长径比对的炸药能量利用率

由图可知：随着装药长径比的增加，炸药本身初始内能增量大于 JPC 动能的增幅，炸药利用率不断降低。

3 结束语

笔者运用 AUTODYN 软件，对 JPC 成型过程进行了数值模拟，研究分析了聚能装药长径比对 JPC 成型性能的影响规律，得到了以下结论：

1) 随着聚装药长径比的增大，JPC 成型后的头部速度和动能均增大，但增长率逐渐减低，当长径比大于 1.4 时，提高长径比后，有效装药增加并不多，JPC 头部速度和动能提高的效率明显减低。

2) 炸药长径比增大，炸药能量利用率不断降低。

参考文献：

- [1] 尹建平, 王志军. 弹药学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2014: 132-139.
- [2] DANIELS A S, BAKER E L, VUONG T H, et al. Selectable Initiation Shaped Charges[C]. the 20th International Symposium on Ballistics. Florida: NDIA, 2002: 23-27.
- [3] 杨亚东, 陈智刚. 起爆方式对杆式射流形成影响的数值模拟研究[J]. 火箭与制导学报, 2008, 28(5): 89-91, 98.
- [4] 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.
- [5] 陈威, 李吉峰, 朱磊. 药型罩锥角对有利炸高影响的数值分析[J]. 火箭与制导学报, 2010, 31(6): 98-99, 107.
- [6] 付恒, 陈智刚. 等壁厚球缺形装药结构优化设计[J]. 爆破器材, 2016(5): 17-22.
- [7] 焦志刚, 杜宇, 寇东伟. 双模聚能战斗部成型装药的结构优化[J]. 计算机仿真, 2017, 34(2): 1-4.
- [8] 朱亮, 李慧子, 王晓鸣, 等. 炸药材料性能参数对 JPC 成型的影响[J]. 四川兵工学报, 2011, 32(3): 13-16.
- [9] 刘奔, 谷宏强, 石全, 等. 装药长径比对 EFP 成型作用效果影响分析[J]. 军械工程学院院报, 2013, 25(4): 24-27.
- [10] 龙源, 周翔, 马海洋, 等. 装药长径比对 EFP 动能影响的数值模拟研究[J]. 火箭与制导学报, 2003(S2): 134-136.
- [11] 门建兵, 蒋建伟, 王树有. 爆炸冲击数值模拟技术基础[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2015: 115-122.
- [12] 崔军, 徐峰, 李向荣. 聚能射流对靶板侵彻的数值仿真[J]. 兵工自动化, 2010, 29(1): 24-26.
- [13] 黄正祥. 聚能装药理论与实践[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2014: 379-380.
- [14] 宋梅利, 李伟兵, 王晓鸣, 等. 药型罩材料影响 EFP 成型的数值计算研究[J]. 火工品, 2009, 31(4): 16-19.
- [15] 李阳, 张国伟, 马建, 等. 药型罩锥角对某单兵制导破甲战斗部威力的影响研究[J]. 机电技术, 2013, 37(6): 72-73, 81.