

doi: 10.7690/bgzd.2018.05.011

2 维轴对称爆炸驱动增速理论计算模型的研究

余 曜, 钱建平, 纪杨子懿

(南京理工大学机械工程学院, 南京 210094)

摘要: 为达到在末段弹道提高弹丸速度的目的, 提出一种在侵彻目标的终点周期内适时引爆后体炸药装药单元, 驱动前体战斗部单元, 以提高弹丸侵彻速度的爆炸驱动装置。采用理论分析的方法建立爆炸驱动增速的理论计算模型, 并进行数值仿真比较。结果表明: 理论计算与数值仿真结果具有较好的一致性, 可为工程设计提供一定参考。

关键词: 爆炸驱动; 理论计算; 数值仿真

中图分类号: TJ765.4 **文献标志码:** A

Research on 2D-Axisymmetric Explosively Driven Velocity Improving Theoretical Calculation Model

Yu Yao, Qian Jianping, Ji Yangziyi

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: In order to improve the velocity of projectile at the end of ballistic, an explosively driven unit is presented. Theory analysis method is used to establish a calculation model for this unit, numerical simulation is used to compare with the result of theory model. The result shows that theoretical calculation and numerical simulation are consistent, it will provide reference for engineering design.

Keywords: explosively driven; theoretical calculation; numerical simulation

0 引言

提高弹丸的侵彻能力一直是弹药领域研究的重要方向之一。在弹道末段增速的方法目前一般采用火箭助推或者利用聚能装药在弹道末段起爆形成爆炸成型弹丸高速侵彻目标。随着科技以及社会的发展, 许多关键地区将越来越多地实现城市化, 城市战可能成为未来战争的主要组成部分^[1]。一批新技术如无人机、无人作战平台将越来越多地应用到局部战场, 甚至一些非国家力量也能拥有重型武器以及智能设备, 使得小规模地面部队在城市当中会遭遇敌方较强火力据点、无人作战平台和轻型装甲载具等多种多样的目标。这就需要为小规模地面部队配备具有攻坚杀爆能力且能大量携行的弹药以提供较为持续的火力。

一些弹药受到使用环境和武器系统的限制, 弹丸的初速较低, 针对这一问题, 笔者提出一种在侵彻目标的终点周期内适时引爆后体炸药装药单元, 驱动前体战斗部单元, 以提高弹丸侵彻速度的爆炸驱动装置。尤其是对于要求结构简单、方便大量携行的单兵弹药来说, 该爆炸驱动增速装置更为经济。

1 爆炸驱动技术的研究现状

炸药爆炸的反应速度非常快、功率高、做功能力强。工程技术人员利用炸药的特性, 将其应用在各个领域如武器弹药领域研究, 如破片、射流的形成机理、爆炸反应装甲, 工程爆破领域、高速空间碰撞实验等^[2-3]。随着航空航天技术的发展以及对超高速撞击问题的研究, 人们一直在探索着超高速加速器及加速方法的研究。在常规武器研究方面, 爆炸驱动理论多用于研究破片、射流的形成机理和驱动金属平板等领域^[4]。

文献[5-6]系统研究了单层、双层平行以及双层楔形爆炸反应装甲各金属靶板的运动规律, 建立了爆炸反应装甲作用场理论模型; 文献[7]提出了一种可用于坦克装甲车辆主动防御的利用飞盘拦截穿甲弹的对抗方式, 建立了高压驱动飞盘的内弹道数理模型并进行了缩比实验, 实验验证了该技术可将 2.4 kg 的飞盘驱动加速到 444 m/s; 文献[8]从爆轰驱动装置的原理入手, 建立了驱动装置的 1 维简化理论模型。

目前爆炸驱动技术多用于大药量在较密闭空间内爆炸驱动小质量的物体以获得超高速, 并且在

收稿日期: 2018-02-27; 修回日期: 2018-04-04

作者简介: 余 曜(1992—), 男, 湖北人, 硕士, 从事战斗部设计研究。

理论计算上多采用爆轰的 1 维假设，在侵彻目标时利用爆炸驱动技术提高弹药的速度这一方面，目前还没有见到公开发表相关的研究。

2 理论计算模型的建立与计算分析

2.1 理论计算模型的建立

将弹药简化为前体战斗部单元与后体爆炸驱动单元，为了方便建模研究，将前体战斗部单元等效为同等质量的质量块，后体爆炸驱动单元简化为壳体与炸药，由于弹丸为轴对称结构，只画出简化模型的 1/2 结构，带有爆炸驱动装置的单兵弹药的简化计算模型如图 1 所示。作出如下假设：

- 1) 炸药瞬时爆轰，爆轰产物的轴向与径向速度分量服从线性分布；
- 2) 忽略波的传播效应以及材料的变形能。

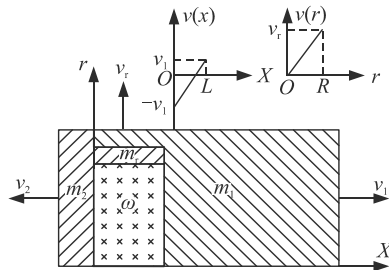


图 1 带有爆炸驱动装置的弹药简化模型

弹药前体部分质量为 m_1 ，后壳体底部质量为 m_2 ，后壳体与弹药前体连接处的轴向壳体质量为 m_r ，装药质量为 ω ，装药长度为 L ，装药半径为 R ，弹药的外径为 R_0 。

爆轰产物内的速度分布规律为线性分布^[9]，按图 1 的坐标轴将爆轰产物的速度分解为轴向 x 方向 $v(x)$ 以及径向 r 方向 $v(r)$ 2 个方向，设弹药前体获得的速度为 v_1 ，后体底部获得的速度为 v_2 ，前后体连接处的壳体获得的径向速度分量为 v_r 。轴向和径向的速度分布函数图像如图 1 所示。显然有：

$$v(x) = \frac{v_1 + v_2}{L}x - v_2; \quad (1)$$

$$v(r) = \frac{v_r}{R}r. \quad (2)$$

在轴向上，根据动量平衡有

$$m_1v_1 - m_2v_2 + \int_0^L \rho_1 \pi R^2 v(x) dx = 0. \quad (3)$$

根据式(3)可得：

$$v_2 = 1 + \frac{2m_1}{\omega} / 1 + \frac{2m_2}{\omega} v_1. \quad (4)$$

令 $k = 1 + \frac{2m_1}{\omega} / 1 + \frac{2m_2}{\omega}$ 。

则有

$$v_2 = kv_1. \quad (5)$$

根据能量守恒定律，炸药爆炸产生的能量 ωE (E 为单位质量炸药的能量) 转换为爆轰产物中剩余的动能 E_1 和内能 E_2 ，弹药前体、后体底部以及前后体连接处壳体的动能分别记为 E_3 、 E_4 、 E_5 ，对于壳体径向膨胀的变形能，文献[9]指出其只占爆炸产生能量的 1% 左右，可以忽略不计，所以有

$$\omega E = E_1 + E_2 + E_3 + E_4 + E_5. \quad (6)$$

E_1 可由 $v(x)$ 和 $v(r)$ 表示出来：

$$E_1 = \frac{1}{2} \left(\int_0^L \rho_1 \pi R^2 v^2(x) dx + \int_0^R 2\pi L r \rho_1 v^2(r) dr \right) = \frac{\omega}{2} \left(\frac{k^2 - k + 1}{3} v_1^2 + \frac{v_r^2}{2} \right). \quad (7)$$

E_2 与径向壳体膨胀的极限半径相关：

$$E_2 = \omega E \left(\frac{R}{R_m} \right)^{2\gamma-2}. \quad (8)$$

式中： γ 为多方指数； R_m 为壳体径向膨胀的极限半径，与壳体的材料有关，文献[10]指出，对于常规的弹药，一般可取 $1.6R$ 。

易得：

$$E_3 = \frac{1}{2} m_1 v_1^2; \quad (9)$$

$$E_4 = \frac{1}{2} m_2 v_2^2 = \frac{1}{2} m_2 k^2 v_1^2. \quad (10)$$

E_5 由轴向速度产生的动能与径向速度产生的动能构成：

$$E_5 = \frac{1}{2} \int_0^L \frac{m_r}{L} v^2(x) dx + \frac{1}{2} m_r v_r^2 = \frac{m_r}{6} \left(\frac{k^2 - k + 1}{3} v_1^2 + \frac{1}{2} m_r v_r^2 \right). \quad (11)$$

将式(7)–(11)代入式(6)整理可得

$$v_1 = \sqrt{\frac{2E - \left(\frac{1}{2} + \frac{m_r}{\omega} \right) v_r^2 - 2E \left(\frac{R}{R_m} \right)^{2\gamma-2}}{\frac{m_1}{\omega} + \frac{m_2}{\omega} k^2 + \frac{k^2 - k + 1}{3} + \frac{m_r}{\omega} \times \frac{k^2 - k + 1}{3}}}. \quad (12)$$

如果知道径向的初始速度 v_r 代入式(12)即可求得爆炸驱动装置对弹药前体的增速 v_1 。文献[9]指出：考虑到战斗部的端部效应，壳体径向速度可用下式修正的格尼公式计算。

$$v_r = \frac{\sqrt{2E}}{\sqrt{\left(1 + \frac{R}{L} \right) \left(\frac{m_r}{m} + \frac{1}{2} \right)}}. \quad (13)$$

式中 $\sqrt{2E}$ 为格尼速度，与装药特性有关。结合已知条件联立式(12)、(13)即可得到爆炸驱动装置对弹药前体战斗部单元的增速 v_1 。

2.2 数值仿真与理论计算的比较

利用 AUTODYN-2D 轴对称程序对上述问题进行仿真，炸药与金属壳体均从 AUTODYN 材料库中选择，炸药选用 PETN1.77，装药密度 1.77 g/cm^3 ，爆速 $8\ 300 \text{ m/s}$ ，格尼速度 $\sqrt{2E} \approx 2\ 800 \text{ m/s}$ ，采用 JWL 状态方程，前后体以及前后连接处的壳体材料选用 Steel4340，采用 Johnson-Cook 模型，炸药采用 Euler 求解器，其他部分采用 Lagrange 求解器，网格大小为 $0.5 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$ ，取 $R=30 \text{ mm}$ ， $R_0=40 \text{ mm}$ 。仿真模型的材料种类与几何参数如表 1 所示。

表 1 仿真模型各部位材料与几何参数

部分	材料种类	密度 $\rho/(\text{g/cm}^3)$	长度 L/mm	内半径 R/mm	外半径 R_0/mm
前体	Steel4340	7.83	50	—	40
后体底部	Steel4340	7.83	10	—	40
前后连接处	Steel4340	7.83	10~20	30	40
炸药	PETN1.77	1.77	10~20	30	—

根据上述参数在 AUTODYN 中建立仿真模型，分别对装药量为 $50 \sim 100 \text{ g}$ ，每间隔 10 g 为 1 组的 6 种工况进行仿真。壳体膨胀至极限后，爆轰产物逸出后前体获得的最大速度 v ，不同时刻爆炸驱动的状态如图 2 所示。再将表 1 中的参数代入到理论模型中进行求解，得到如表 2 所示的计算结果。

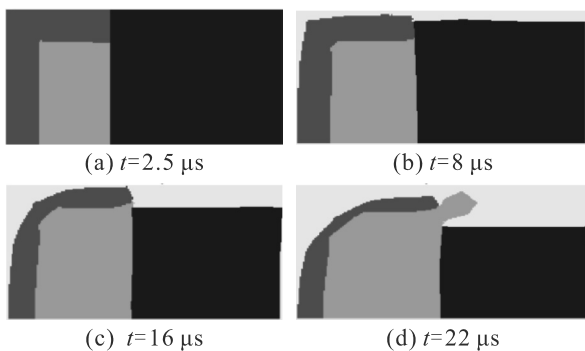


图 2 不同时刻爆炸驱动的状态

表 2 爆炸驱动增速的仿真与理论计算结果

炸药质量 ω/g	仿真结果 $v/(\text{m/s})$	理论计算 结果 $v_1/(\text{m/s})$	相对误差 $\frac{ v-v_1 }{v_1} \times 100\%$
50	129.2	138	6.40
60	139.5	146	4.40
70	148.9	153	2.70
80	156.4	159	1.60
90	162.2	164	1.10
100	167.4	168	0.36

将数值仿真结果与理论计算结果进行比较，如图 3 所示。

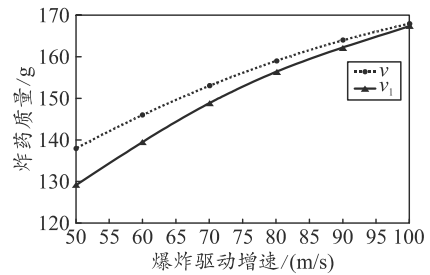


图 3 理论计算与仿真结果对比

结果表明：理论计算的结果与仿真结果相比，最大误差为 6.4%，最小误差为 0.36%，并且在一定的范围内随着装药量的增加，数值仿真结果与理论计算结果之间的误差呈减小的趋势，两者具有较好的一致性，可以为工程设计提供一定的参考。

3 结束语

利用能量守恒的方法推导出 2 维轴对称情况下爆炸驱动增速的理论计算模型，并与数值仿真进行了比较。结果表明：理论计算结果与数值模拟结果有较好的一致性，可以为今后的工程设计提供一定的参考。

提高弹药的侵彻能力一直是弹药领域研究的重要方向之一，笔者提出的爆炸驱动装置为这一方向的研究提供了一种思路，下一步将进行爆炸驱动特性规律的深入研究。

参考文献：

- [1] 李勇. 美军地面部队面临的新挑战[J]. 现代军事, 2016, 4(4): 92-97.
- [2] 沈兆武, 马宏昊, 李雪交, 等. 炸药能量的和平利用(I)[J]. 工程爆破, 2015, 21(6): 32-41.
- [3] 赵超. 高能钝感混合炸药的研究进展及发展趋势[J]. 兵工自动化, 2013, 32(1): 67-70.
- [4] 杨相礼, 何勇, 何源. 圆柱形预制破片爆炸驱动仿真研究[J]. 兵工自动化, 2016, 35(8): 9-12.
- [5] 朱传胜, 黄正祥, 刘荣忠, 等. Analytical Calculation Model for Mach Wave Parameters[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2014, 31(6): 688-692.
- [6] 姬龙. 反爆炸反应装甲理论与关键技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2013: 27-31
- [7] 付超. 旋飞毁伤盘形成机理及毁伤效能研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2012: 7-17
- [8] 伊文静. 弹丸爆炸驱动技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2009: 6-22.
- [9] 黄正祥, 祖旭东. 终点效应[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 98-105.
- [10] 安振涛, 王超, 甄建伟, 等. 常规弹药爆炸破片和冲击波作用规律理论研究[J]. 爆破, 2012, 29(1): 15-18.