

文章编号: 1001-1455(2005)04-0378-04

一种基于能量法则的爆炸成形弹丸速度的工程计算方法^{*}

周翔^{1,2}, 龙源^{1,2}, 岳小兵^{1,2}, 唐献述^{1,2}

(1. 解放军理工大学工程兵工程学院, 江苏 南京 210007;

2. 北京理工大学爆炸灾害预防、控制国家重点实验室, 北京 100081)

摘要: 为了准确预报爆炸成形弹丸的速度, 提出了以药型罩中所有内部微元都变处于流动状态的时刻作为爆炸成形弹丸成形结束的标志, 并因此得出药型罩自身变形时所消耗的变形能应与使整个药型罩都处于流动状态的熔化能相等。在此基础上利用能量守恒原理, 建立了爆炸成形弹丸速度的计算公式, 并通过试验和数值模拟验证。实验和计算结果表明, 本文中所建立的爆炸成形弹丸速度的计算公式具有较好的工程实用价值。

关键词: 爆炸力学; 弹丸速度公式; 能量守恒法则; 爆炸成型弹丸

中图分类号: O381

国标学科代码: 130·3599

文献标志码: A

1 引言

爆炸成形弹丸 (explosively-formed projectile, EFP) 是一种对装甲钢具有大炸高、强侵彻能力的新型装药结构。对爆炸成形弹丸设计的研究是国内外兵器弹药和工程弹药研究中的热点问题。大量实验表明, EFP 对装甲的侵彻能力很大程度上取决于 EFP 速度的大小, 但由于 EFP 的成形过程属于爆炸高压加载范畴, 药型罩和炸药作用机理复杂、影响因素多, 目前对 EFP 成形的计算分析一般采用准定常理想不可压缩流体模型或者数值模拟软件。虽然这两种方法在分析 EFP 成形过程方面效果较好, 但计算量大、耗时多, 因此本文中在能量守恒定律的基础上提出了一个计算 EFP 弹丸速度的简便方法。

2 理论分析

EFP 成形过程一般可近似分解成两个阶段: 第一阶段为高能炸药驱动加载阶段, 由高能炸药起爆产生的冲击波对药型罩进行瞬时冲击, 药型罩自身变形可忽略; 第二个阶段为药型罩自身变形阶段, 产生的主要原因为爆炸冲击波冲击药型罩各微元的持续时间和角度不同使微元间存在速度梯度。

2.1 第一阶段能量守恒法则的应用

假设 EFP 装药的爆轰为瞬时爆震, 爆炸产物在完全膨胀时对质量为 M 的药型罩同时做抛射, 这时爆炸产物单向的一维飞散的能量守恒方程可以写成

$$E_1 + E_2 = E_0 \quad (1)$$

式中: E_0 为炸药一维爆轰所产生的有效能量, E_1 为药型罩具有的初始动能, E_2 为炸药一维爆轰所产生的爆炸产物的剩余能量。

假设炸药一维爆轰产生的爆炸产物的剩余能量

$$E_2 = \frac{1}{2} \int_0^{u_{\max}} u^2 dm \quad (2)$$

* 收稿日期: 2004-09-14; 修回日期: 2004-11-30

基金项目: 爆炸灾害预防、控制国家重点实验室开放基金项目(KFJJ03-5)

作者简介: 周翔(1979—), 男, 博士研究生。

式中: $dm = A\rho dx$, m 为爆炸产物的质量, ρ 为爆炸产物的密度, x 为爆炸产物的位移, A 为药型罩横截面面积; u_{\max} 为药型罩的初始速度。

由爆炸产物一维飞散理论可知, 爆炸产物在完全膨胀的情况下, 即当 $p = p_a$ (p_a 为大气压) 时

$$u = \frac{x}{t}, \quad \rho = \frac{m_e}{Au_{\max}t} \quad (3)$$

式中: m_e 为装药有效部分质量。因此

$$E_2 = \frac{m_e u_{\max}^2}{6} \quad (4)$$

又因为 $E_1 = \frac{1}{2}Mu_{\max}^2$, 所以

$$E_2 = \frac{m_e}{3M}E_1 \quad (5)$$

根据式(1)、(5)可得

$$E_1 = E_0 \frac{3M}{3M + m_e} \quad (6)$$

设炸药一维爆轰所产生的有效能量

$$E_0 = m_e Q \quad (7)$$

式中: Q 为爆震波阵面上的能量密度。由式(6)、(7)可得

$$E_1 = \frac{3M}{3M + m_e} m_e Q \quad (8)$$

由文献[1]可知, 在药型罩顶端到装药底面中心的距离不小于装药直径; 圆柱形 EFP 装药的有效部分装药质量 m_e 和爆震波阵面上的能量密度 Q 分别为

$$m_e = \frac{\pi}{3}\rho_e r_0^3, \quad Q = \frac{D^2}{12}$$

式中: ρ_e 为装药有效密度, D 为炸药爆轰速度, r_0 为药型罩的半径。

2.2 第二阶段能量守恒法则的应用

由于药型罩的成形时间很短, 没有足够的时间使能量由热传递而损失, 因此药型罩整个变形过程可视为绝热过程。第二阶段能量守恒方程可以写成

$$E_1 = E_k + W \quad (9)$$

式中: E_k 为 EFP 最终成形时所具有的动能, W 为药型罩在变形过程中所消耗的变形能。

药型罩之所以会产生变形是因为药型罩内部微元之间不存在速度梯度, 因此可把药型罩内部微元之间不存在速度梯度的时刻作为第二阶段结束的标志。由于药型罩内部微元之间的拉力是由相互间的速度梯度产生的, 因此当罩内部微元之间不存在速度梯度时, 罩内部所有微元之间的拉力都应为 0。因为流体是不能承受拉力的^[2], 也就是说在药型罩内部所有微元都处于流动状态时, 罩内部所有微元之间的拉力都为 0, 所以可以以药型罩中所有内部微元都处于流动状态的时刻作为第二阶段结束的标志。根据上述分析, 在第二阶段消耗的变形能 W 应等于使整个药型罩熔化的熔化能。由式(8)、(9)可得

$$E_k = \frac{3M}{3M + m_e} m_e Q - H_m \quad (10)$$

式中: H_m 为整个药型罩熔化所需的能量, 包含了把某种材料从常温提高到熔化点并使材料全部熔化所需能量。

2.3 EFP 弹丸速度的修正

假设在 EFP 成形过程中, 药型罩的质量保持不变, 则由弹丸的动能定义可得 EFP 的速度

$$v = \sqrt{\frac{2E_k}{M}} \quad (11)$$

由于装药高度和外壳质量对 EFP 弹丸速度的大小影响较大^[3], 而上述分析计算中没有考虑装药高

度和外壳质量对 EFP 弹丸速度的影响;因此在参考文献[4]的基础上,根据多年的研究工作,分别引入装药高度修正因数 K_1 和外壳质量修正因数 K_2

$$K_1 = \left(\frac{h}{d}\right)^{0.25}, \quad K_2 = \left(\frac{\rho_c}{\rho_e}\right)^{0.1} \quad (12)$$

式中: d 为装药直径, h 为药型罩顶端到装药底面中心的距离, ρ_c 为外壳密度。故修正后 EFP 弹丸速度

$$v_p = K_1 K_2 v \quad (13)$$

3 算例

3.1 与以往实验结果的比较

为了检验上述计算方法的正确性,对文献[5]中的 EFP 装药结构的实验数据进行计算。该实验中装药结构基本参数为:药型罩材料为工业纯铁、质量为 151 g,纯铁的比熔化能^[6] ΔH_m 为 1 074.841 J/g;装药为 B 混合炸药,装药有效密度 ρ_e 为 1.717 g/cm³,爆速 D 为 7 980 m/s;壳体的材料为钢,密度 ρ_c 为 7.8 g/cm³,厚度为 3 mm;药型罩为曲率半径 R 为 60 mm 的等壁厚球缺罩,其壁厚和直径 d 分别为 3.78、76.2 mm;装药高度为 57.2 mm。试验所得装药结构最后形成 EFP 弹丸的速度为 1 890 m/s。利用本文中所建立的计算方法对该 EFP 结构所形成的弹丸速度进行计算,结果为: $m_e = 99.42$ g, $E_1 = 432.64$ kJ, $H_m = 162.3$ kJ, $E_k = 270.34$ kJ, $v = 1 892$ m/s, $K_1 = 0.85$, $K_2 = 1.16$, $v_p = 1 866$ m/s, $e =$

$$\left| \frac{v_p - v_{\text{实验}}}{v_{\text{实验}}} \times 100\% \right| = 1.3\%$$

3.2 与数值模拟结果的比较

为了与数值模拟结果进行比较,采用 LSDY-NA-3D 动力有限元软件对图 1 所示装药结构进行了计算。此 EFP 装药设计采用的是 56 mm 变壁厚药型罩,其材料为紫铜、质量为 74.86 g,紫铜的比熔化能^[6] ΔH_m 为 727.137 J/g;采用中心点起爆方式引爆 8701 压装炸药,装药有效密度 ρ_e 为 1.7 g/cm³,爆速 D 为 8 425 m/s;装药外壳为塑料,密度 ρ_c 为 0.1 g/cm³。数值模拟结果表明此装药结构最后形成 EFP 弹丸的速度为 1 452 m/s。利用本文中所建立的计算方法对该 EFP 结构所形成的弹丸速度进行计算,结果为: $m_e = 39.07$ g, $E_1 = 196.854$ kJ, $H_m = 54.43$ kJ, $E_k = 142.43$ kJ, $v = 1 950$ m/s, $K_1 =$

$$0.95, K_2 = 0.76, v_p = 1 408 \text{ m/s}, e = \left| \frac{v_p - v_{\text{模拟}}}{v_{\text{模拟}}} \times 100\% \right| = 3.1\%$$

从以上的计算和比较可知,本文中提出的计算方法可用于 EFP 弹丸速度的估算;估算结果与实际测试以及数值模拟结果很接近,误差小于 5%。

4 结论

(1)利用能量守恒定律,解决了 EFP 速度的工程计算问题。在用所建立的计算方法计算 EFP 速度中,工作量小、速度快,计算 EFP 速度只需几分钟。

(2)在所建立的 EFP 速度计算公式中,考虑了装药高度和外壳质量的影响,更接近实际,保证了求解精度。

(3)利用本文的 EFP 速度计算方法,对一些实际问题进行了计算,计算结果与试验和数值模拟的结果符合较好。

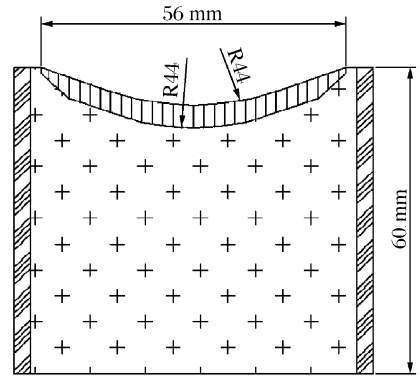


图 1 EFP 设计图

Fig. 1 Structure of EFP

参考文献:

- [1] 鲍姆. 爆炸物理学[M]. 众智, 译. 北京: 科学出版社, 1964: 461—492.
- [2] 费祥麟, 胡庆康, 景思睿. 高等流体力学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1989: 2.
- [3] Cullis I G. 材料性能的动态试验与模拟[J]. 周员升, 译. 弹箭技术, 1994, 2: 37—42.
- [4] Weimann K, Blache A, Cauret M, et al. Terminal ballistics of EFPs with high L/D-ratio[A]. 17th International Symposium of Ballistics[C]. Midrand, South Africa: International Ballistics Committee, 1998: 281—287.
- [5] Weimann K, Doeringsfeld K, Speck J, et al. 爆炸成形弹丸性能随壳体厚度变化的模拟、试验和分析[J]. 慈明森, 译. 弹箭技术, 1994, 2: 17—21.
- [6] Bourne B, Cowan K G, Curtis J P. Shaped charge warheads containing low melt energy metal liners[A]. 19th International Symposium of Ballistics[C]. Interlaken, Switzerland: International Ballistics Committee, 2001: 583—590.

**An engineering computing method
for the velocity of explosively-formed-projectile(EFP)
based on the law of energy conservation**

ZHOU Xiang^{1,2*}, LONG Yuan^{1,2}, YUE Xiao-bing^{1,2}, TANG Xian-shu^{1,2}

- (1. *Engineering Institute of Engineer Corps, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, Jiangsu, China;*
2. *State Key Laboratory of Prevention and Control of Explosion Disaster, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China*)

Abstract: In order to exactly predict the velocity of EFP, its formation process is divided into a loading phase by high explosives and a self-deforming phase. It is assumed that the process ends at the time when the whole liner has melted, and the deformation energy consumed by the liner is equal to its melting energy. Accordingly, a velocity formula of EFP is proposed based on the law of energy conservation. The results are in good agreement with those from an experiment and a numerical simulation, demonstrating the applicability of this formula in engineering computation.

Key words: mechanics of explosion; projectile velocity formula; law of conservation of energy; EFP

* Corresponding author: ZHOU Xiang

E-mail address: zhoxiangnj@soho.com

Telephone: 025-80821037