

基于 PER 理论的聚能装药射流理论计算方法^{*}

孙传杰, 卢永刚, 李会敏

(中国工程物理研究院总体工程研究所, 四川绵阳 621900)

摘 要:以 Behrmann 和 J. Carleone 改进的 PER 理论为基础,通过 P. J. Chou 方法建立综合考虑药型罩、炸药、壳体等因素的压垮速度计算方法,对药型罩微元的压垮过程、射流头部参数(质量和速度)等进行修正,在此基础上建立 Lagrangian 坐标系下的射流空间运动方程,编制了相应的计算程序。与数值模拟结果的对比表明,所建立的射流理论分析方法能有效计算射流参数,可为聚能装药结构设计提供参考。

关键词:爆炸力学;PER 理论;聚能装药;射流

中图分类号:O38 文献标志码:A

Model of Theoretical Calculation of Shaped Charge with Modified P-E-R Theory

SUN Chuanjie, LU Yonggang, LI Huimin

(Institute of Systems Engineering, CAEP, Sichuan Mianyang 621900, China)

Abstract: Based on modified P-E-R theory founded by Behrmann and J. Carleone, collapse process of liner element and calculation of jet tip parameters including mass and velocity were illustrated. The modified P-E-R theory got collapse velocity of liner elements with simple model provided by P. J. Chou who takes influence of liner, charge, case into account when calculating liner-collapsed velocity. The equations of modified P-E-R theory of shaped charge can be solved with liner-collapsed velocity. Jet motion equations were founded with Lagrangian coordinate.

Keywords: mechanics of explosion; PER theory; shaped charge; jet

0 引言

目前关于聚能装药射流计算的理论主要有 Birkhoff 定常理论、PER 非定常理论以及 PER 相关修正理论等。这些射流分析理论中独立的方程数均少于未知变量数,计算方程组是不封闭的,尚需通过其它途径(实验、数值模拟或理论分析等)获得压垮速度或变形角,才能完整求解其余的变量。在压垮速度理论分析方面,许多学者开展了较深入的研究,提出了各种压垮速度计算方法^[1-2]。但这些计算方法均未综合反映药型罩、炸药、壳体等因素对压垮速度的影响。

文中以文献[3]为基础建立了综合考虑药型罩、炸药、壳体等影响因素的药型罩压垮速度计算公式,并采用线性加速模型描述药型罩压垮过程。在此基础上结合 PER 理论构建了 Lagrangian

坐标系下的射流空间运动方程,编制了相应的射流分析程序。

1 理论模型

1.1 基本假设

- 1) 聚能装药结构为轴对称结构;
- 2) 药型罩微元的压垮速度仅与其对应的轴向装药质量和径向装药质量相关;
- 3) 射流微元在爆轰波作用下向对称轴线汇聚,忽略射流微元间的相互作用,且射流微元汇聚后仅沿轴向平动。

1.2 理论模型

图 1 为药型罩压垮过程示意图,由图可见压垮过程涉及的主要参数包括变形角 δ 、压垮角 β 和压垮速度 V_c 等,下面将分别给出相应的计算方法。

* 收稿日期:2008-09-08

作者简介:孙传杰(1976-),男,四川新都人,工程师,硕士,研究方向:战斗部终点效应。

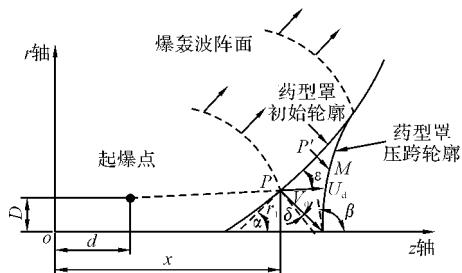


图 1 药型罩压垮过程

1.2.1 变形角 δ

药型罩微元变形角 δ 由 Taylor 公式获得:

$$\sin \delta = \frac{V_o \cos \epsilon}{2U_d} \quad (1)$$

1.2.2 压垮角 β

压垮角 β 为药型罩压垮轮廓在对称轴线处的切线与对称轴线的夹角。设药型罩上微元 P 点的横坐标为 z , 纵坐标为 r , 则其表达式如下。

$$z = x + V_o(t - T) \sin(\alpha + \delta) \quad (2)$$

$$r = r_1(x) - V_o(t - T) \cos(\alpha + \delta) \quad (3)$$

在 $r = 0$ 处 r 对 z 求导即求得压垮角 β :

$$\left. \frac{\partial r}{\partial z} \right|_{r=0} = \tan \beta =$$

$$\frac{\tan \alpha + r_1 \cdot [(\alpha' + \delta')] \cdot \tan(\alpha + \delta) - \frac{V_o'}{V_o} + V_o \cdot T' \cdot \cos(\alpha + \delta)}{1 + r_1 \cdot [(\alpha' + \delta') + (\frac{V_o'}{V_o}) \cdot \tan(\alpha + \delta)] - V_o \cdot T' \cdot \sin(\alpha + \delta)} \quad (4)$$

上述公式中撇号为变量对 x 的导数。

1.2.3 射流质量和速度

根据质量守恒和动量守恒可获得射流质量 m_j 和射流速度 V_j 。

$$\frac{dm_j}{dm} = \sin^2 \frac{\beta}{2} \quad (5)$$

$$V_j = V_o \cdot \csc \frac{\beta}{2} \cdot \cos(\alpha + \delta - \frac{\beta}{2}) \quad (6)$$

1.2.4 压垮速度计算

改进的 PER 理论中未知变量的数量超过了独立方程式的数量, 需通过其它方法预先确定一个参量值, 才能使其方程组封闭。

下面通过文献[3]提供的一种简单有效的计算方法获得压垮速度, 该方法考虑了药型罩、壳体、装药等因素对压垮速度的影响。

压垮速度计算模型如图 2 所示。首先将药型罩划分成若干微元, 并假设微元的压垮速度受其对应的轴向和径向两方面炸药的作用。

压垮速度 V_o 的表达式为:

$$V_o = f(\phi) \cdot V_p + g(\phi) \cdot V_c \quad (7)$$

$$f(\phi) = 1 - \sin \phi$$

$$g(\phi) = \cos \phi$$

其中: ϕ 为药型罩在微元处切线的法线与对称轴线的夹角; V_p 为微元对于轴向炸药产生的压垮速度分量; V_c 为微元对

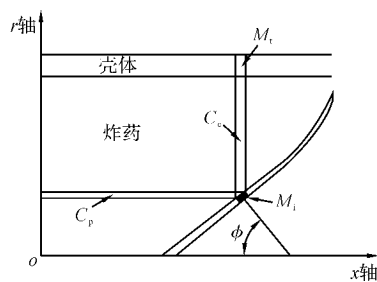


图 2 压垮速度计算模型

于径向炸药产生的压垮速度分量。

由 Gurney 平板压垮公式和 Chanteret 管柱压垮公式分别获得 V_p 和 V_c 。

$$V_p = \sqrt{2E} \cdot \left[\frac{(1 + 2 \cdot \frac{M_i}{C_p})^3 + 1}{6 \cdot (1 + \frac{M_i}{C_p})} + \frac{M_i}{C_p} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (8)$$

$$V_c = \sqrt{2E} \cdot \left[\left(\frac{R_e^2 - R_i^2}{R_x^2 - R_i^2} \right) \cdot \frac{M_i}{C_c} + \frac{1}{6} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (9)$$

其中: R_e 为药型罩微元对应炸药的外半径; R_i 为药型罩微元对应炸药的刚性面半径; R_x 为药型罩微元对应炸药的刚性面半径。

另外, 微元对应炸药的刚性面半径 R_x 通过求解下式获得:

$$R_x^3 + 3 \cdot R_x \cdot$$

$$\left[(R_e + R_i) \cdot \frac{\rho_o}{\rho_{ej}} \cdot \left(\frac{M_i}{C_c} R_e + \frac{M_i}{C_c} R_i \right) + R_i R_e \right] - 3 \cdot (R_i + R_e) \cdot R_i \cdot R_e \cdot \left[\frac{2}{3} + \frac{\rho_o}{\rho_{ej}} \left(\frac{M_i}{C_c} + \frac{M_i}{C_c} \right) \right] = 0$$

1.2.5 压垮加速度计算

改进的 PER 理论假定药型罩微元速度是瞬时从零到达压垮速度的, 未反映药型罩微元压垮加速过程, 下面采用 Carlenoe 提出的线性加速模型对其进行修正。药型罩微元线性加速度模型如图 3 所示。

药型罩微元线性加速度 a 的表达式为:

$$a = c \cdot \frac{P_{ej}}{\rho_{Liner} \cdot TH_{Liner}} \quad (10)$$

其中: c 为经验常数; ρ_{Liner} 为药型罩密度; TH_{Liner} 为药型罩微元厚度。

1.2.6 射流微元坐标和半径

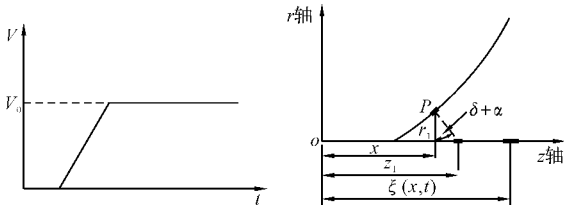


图 3 药型罩微元线性加速度模型 图 4 射流微元运动示意图

下面采用 Lagrangian 坐标建立射流微元坐标、半径随时间和微元对应的初始药型罩位置的变化关系。

1) 射流微元坐标

药型罩微元汇聚于对称轴线后,形成射流和杵体,并沿轴向运动,由于存在速度差,射流长度不断变化。射流的运动坐标 $\xi(x, t)$ 的表达式为:

$$\xi(x, t) = z_1 + (t - t_c) \cdot V_j, t \geq t_c \quad (11)$$

$$z_1 = x + r_1 \cdot \tan(\alpha + \delta) \quad (12)$$

其中: t_c 为药型罩微元到达轴线的时刻; z_1 为药型罩微元到达轴线的横坐标。

2) 射流微元半径

假设射流为不可压缩流体、射流微元为圆柱形,根据质量守恒可获得射流微元半径 r_j 的表达式为:

$$r_j = \sqrt{\frac{dm_j}{\pi \cdot \rho_{Liner} \cdot d\xi}} \quad (13)$$

其中: $d\xi$ 为射流微元长度; dm_j 为射流微元质量; ρ_{Liner} 为药型罩密度; r_j 为射流半径。

1.2.7 射流头部处理

改进的 PER 理论认为射流速度从头部到尾部是单调减小的,而试验表明由于药型罩顶部附近微元加速不充分,其压垮速度可能小于相邻微元的压垮速度,从而出现“反向射流”现象,导致射流质量的“聚积”。根据质量守恒和动量守恒重新获得射流头部微元的质量 m_{tip} 和速度 $\bar{V}_j(x_{tip})$:

$$m_{tip} = \int_0^{x_{tip}} \frac{dm_j}{dx} dx \quad (14)$$

$$\bar{V}_j(x_{tip}) = \frac{\int_0^{x_{tip}} V_j(x) \cdot \frac{dm_j}{dx} dx}{\int_0^{x_{tip}} \frac{dm_j}{dx} dx}, \quad V_j(x_{tip}) \geq \bar{V}_j(x_{tip}) \quad (15)$$

至此,通过对改进的 PER 理论的补充和修正,即可进行聚能装药射流参数计算。

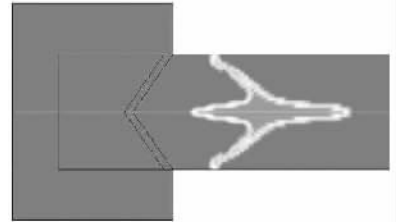
2 算例验证

下面分别以大锥角罩和小锥角罩为例进行计算验证。

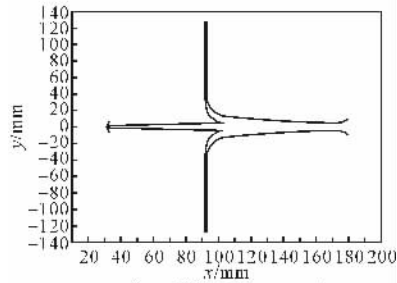
文献 [4]

的药型罩结构为 110° 的大锥角药型罩,罩材为纯铝,壳体为钢,装药为 Octol70/30。

下面分别采用 LS-Dyna 和文中方法进行射流成形计算。图 5 为起爆后 $45\mu s$ 时数值模拟和理论分析的射流形状对比图,图 6 为该



(a) 数值模拟 ($45\mu s$)



(b) 理论分析 ($45\mu s$)

图 5 数值模拟和理论分析的射流形状对比图

时刻射流速度随射流坐标变化的对比图。

由图 5 可见,数值模拟和理论分析获得的射流头部半径分别约为 5.9mm 和 4.3mm,两者相差 1.6mm,偏差约为 37.2%。数值模拟和理论分析获得的射流尾部半径分别约为 11.8mm 和 14mm,两者相差 2.2mm,偏差约为 18.6%。

由图 6 可见,在起爆 $45\mu s$ 时数值模拟和理论分析获得的射流头部速度分别约为 5150m/s 和 5100m/s,两者相差 50m/s,偏差约为 1.0%。数值模拟和理论分析获得的射流尾部速度分别约为 2820m/s 和 3030m/s,两者相差 210m/s,偏差约为 7.4%。数值模拟和理论分析获得的射流长度分别约为 93mm 和 74mm,两者相差 19mm,偏差约为 20.4%。

由以上对比可见,理论分析与数值模拟的射流速度吻合较好,而射流长度和半径分别具有一定偏差,但仍具有较强的可比性,可满足初步工程设计要求。此外在其它时刻的对比也可得到类似结论。

另外对小锥角罩也进行了计算验证,文献 [5] 中的模型为 80° 的小锥角铜药型罩,壳体为

铝,装药为 Octol 炸药。文献[5]采用圣地亚实验室开发的 SCAP 程序计算的 350 μ s 时的射流形状和文中模型计算的射流形状如图 7 所示,通过图像对比

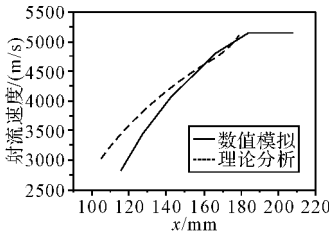


图 6 45 μ s 时射流速度随射流坐标的变化图

可知,两者计算获得的射流长度、射流直径等参数偏差很小。并且文献[5]根据 SCAP 程序设计的聚能装药结构通过试验进行了验证。

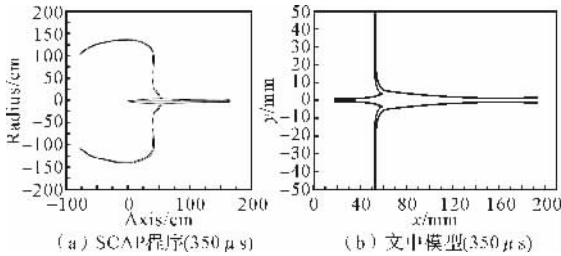


图 7 采用 SCAP 程序和文中模型计算获得的射流形状对比图

3 结束语

文中结合改进的 PER 射流理论建立了综合考虑炸药、壳体因素的药型罩压垮速度计算方法,修正了药型罩微元压跨过程、射流头部参数。通过与数值模拟的对比分析表明,文中所建立的

(上接第 98 页)

结果将偏高。而数值模拟考虑了爆轰产物泄出的影响等,所以结果比经验公式偏低。

4 结论

通过模拟计算及结果分析表明,中心起爆时获得的破片速度最大,杀伤效果更好,如果不存在工艺技术的话,应尽量选择中心起爆。在合理选择简化模型材料参数的情况下,数值仿真结果和经验公式计算结果具有较好的一致性,而且还会获得一些用试验的方法难以得到的数据结果,比如通过仿真可以得到壳体各点的应力应变值,给弹丸结构设计及优化提供了依据,让弹丸战斗部能够发挥更大的毁伤威力。

参考文献:

[1] 李向东,钱建平,曹兵,等. 弹药概论[M]. 北京:国

射流理论计算方法具有较好的工程计算精度,可为聚能装药结构设计提供参考。

参考文献:

[1] 谭多望,孙承纬. 大锥角聚能装药射流理论计算方法[J]. 高压物理学报, 2006,20(3):270-276.
 [2] 郑平泰,杨涛,秦子增. 聚能射流形成过程的理论建模与分析[J]. 国防科技大学学报, 2006,28(3):28-32.
 [3] Chou P C, Flis W J, Forsyth C M. A simplified model of jet formation in hemispherical shaped charges[C]//9th ISB, Shrivenham, 1986; 2-263-2-272.
 [4] Murpgy M J. Shaped charge penetration in concrete; A unified approach [R]. UCRL - 53393, 1983.
 [5] M Huertaa, M G Vigil. Design, analyses, and field test of a 0.7m conical shaped charge[J]. International Journal of Impact Engineering, 2006, 32(8): 1201-1213.
 [6] W P Walter, J A Zukas. Fundamentals of shaped charges[M]. New York Wiley Interscience, 1989.
 [7] Trebinski R. Some improvement into analytical models of shaped charge jet formation[C]// 19th ISB, Switzerland, 2001; 725-732.
 [8] Carlenoe J, Chou P C. A one-dimensional theory to predict the strain and radius of shaped charged jets [C]// 1th ISB, Orsndo 1974; 13-15.

防工业出版社, 2004.

[2] 孟会林,孙新利,王少龙. LS-DYNA 程序在战斗部仿真计算中的应用[J]. 上海航天, 2003, 20(2): 33-37.
 [3] 魏继锋,焦情介,吴成. 预制破片战斗部试验与数值模拟研究[J]. 弹箭与制导学报, 2004, 24(3): 39-41.
 [4] 李翔宇,卢芳云. 三种类型战斗部破片飞散的数值模拟[J]. 火炸药学报, 2007, 30(1): 44-48.
 [5] 杨云斌,屈明,钱立新. 破片战斗部威力仿真方法与仿真软件研究[J]. 计算机仿真, 2007, 24(10): 14-18.
 [6] 于川,李良忠,黄毅民. 含铝炸药爆轰产物 JWL 状态方程研究[J]. 爆炸与冲击, 1997, 19(3): 274-279.
 [7] 魏惠之,朱鹤松. 弹丸设计理论[M]. 北京:国防工业出版社, 2000.