文章编号：1000-5773(2013)04-0556-05

粉末药型罩的材料密度对聚能射流性能的影响*

高永宏[1,2]，顾晓辉[1]，王凤英[2]

(1. 南京理工大学机械工程学院，江苏南京 210094；
2. 中北大学化工与环境学院，山西太原 030051)

摘要：为研究粉末药型罩的材料密度对其所形成的聚能射流的影响，借助 Birkhoff 定常模型和 Gurney 压垮速度理论，计算了相同装药条件下药型罩密度与其所形成的聚能射流速度、射流微粒动量与动能的关系曲线。在相同装药结构下，对 W、Cu 质量配比分别为 0.5∶0.5 和 0.4∶0.6 的两种 W-Cu 粉末药型罩，进行了射流速度测定和破甲威力实验研究。计算结果与实验结果吻合较好，表明借助 Birkhoff 定常模型和 Gurney 压垮速度理论所计算的射流密度、射流微粒动量及动能与药型罩密度的关系曲线具有一定的参考价值，增大粉末药型罩密度可有效提高聚能射流的破甲威力。

关键词：粉末药型罩；聚能射流；破甲威力；密度
中图分类号：O358；TJ410.333 **文献标识码**：A

1 引 言

随着聚能装药的广泛应用，针对其具体应用特性的研究一直在持续进行[1-7]。最常用的研究方法是，通过改变描述聚能装药的某些参数来优化生成射流的特性，以适应相应的应用，例如：改变外壳和药型罩的厚度、使用不同的炸药或变换炸药的起爆方式以改变波阵面的几何形状等。当然，在任何优化研究中，射流特性是其应用研究的关键。本研究以优化粉末药型罩聚能射流特性为目的，探讨相同材料在不同配比下的密度变化对射流特性的影响。

影响聚能射流的因素很多，包括装药结构、装药特性、药型罩材料及其相关参数等。要研究其中某一参数对聚能射流性能的影响，需要限定其它相关参数，因此本工作在保证装药结构、壳体材料等完全一致的条件下，研究粉末药型罩的密度对其生成聚能射流特性的影响。

2 聚能射流的形成机理

2.1 Birkhoff 定常模型[8]

Birkhoff 定常模型假定爆轰波在压垮药型罩的过程中产生相当大的压力，以至于材料的强度可以忽略不计[4]，在爆轰波扫过后，药型罩微元瞬间被加速到最终压合速度。药型罩的压垮过程见图 1。

用 Birkhoff 定常理想不可压缩流体力学模型解释射流形成过程最为简明，首先假设：(1) 在爆炸高压下药型罩金属为理想(无粘性)不可压缩流体；(2) 药型罩各处的压跨速度 v_0 相同，且在压跨过程中 v_0 保持不变；(3) 在药型罩变形过程中，药型罩母线长度保持不变。

* **收稿日期**：2012-03-14；**修回日期**：2012-06-06
基金项目：国家自然科学基金(11072222)
作者简介：高永宏(1978—)，女，博士，讲师，主要从事聚能装药的聚能效应及其应用研究. E-mail：gyh54gyh@163.com

药型罩母线上任一小段所对应的环(简称罩微元)在闭合时的情况如图 1 所示。根据前面的假设,在爆轰波传到 A 处时,A 点(环)以 $\boldsymbol{v}_0$ 的速度开始闭合。当其运动到药型罩轴线上 C 处时,发生互相碰撞,此时爆轰波沿母线已传到了 B 处。由假设(3)可知:$|AB|=|BC|$。$\boldsymbol{v}_0$ 与 $\overrightarrow{AC}$ 方向一致。δ 为 $\boldsymbol{v}_0$ 偏离 A 点法线的飞散角,也称抛射角。可以把闭合点(C 点)处的 $\boldsymbol{v}_0$ 分解到 $\overrightarrow{BC}$ 和 $\overrightarrow{OC}$ 两个方向上,即

$$\boldsymbol{v}_0 = \boldsymbol{v}_1 + \boldsymbol{v}_2 \tag{1}$$

如果在具有 $\boldsymbol{v}_1$ 速度的动坐标系上看药型罩的压跨过程,只能看到罩材料是以 $\boldsymbol{v}_2$ 的速度沿母线向轴线流来,类似于一股定常流体冲击刚性壁面[9-10]的情况,在碰撞点分为方向相反的两股流。由于定常不可压缩流体满足伯努利方程[11-12],即流体各处满足

$$p + \frac{1}{2}\rho v^2 = c \tag{2}$$

式中:p、ρ、v 分别为流体的压强、密度和速度,c 为常数。

在距碰撞点较远的各点处(图 1 中 O、B、H 点等),其压强可认为近似相同,ρ 也相同,由(2)式可得,v_O、v_B、v_H 与 $|\boldsymbol{v}_2|$ 相等。于是,在静坐标系中,射流速度为

$$v_j = |\boldsymbol{v}_1| + |\boldsymbol{v}_2| \tag{3}$$

杵体速度为

$$v_s = |\boldsymbol{v}_1| - |\boldsymbol{v}_2| \tag{4}$$

参见图 1,有

$$\beta = \alpha + 2\delta \tag{5}$$

$$v_j = \frac{|\boldsymbol{v}_0|}{\sin(\beta/2)}\cos\left(\frac{\beta}{2} - \alpha - \delta\right) \tag{6}$$

$$v_s = \frac{|\boldsymbol{v}_0|}{\cos(\beta/2)}\sin\left(\alpha + \delta - \frac{\beta}{2}\right) \tag{7}$$

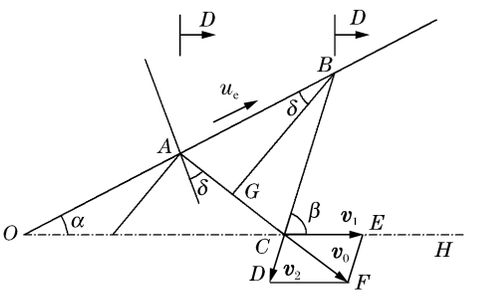


图 1　药型罩压垮过程示意图

Fig. 1　The schematic of liner's crushed process

式中:β 为压跨角,α 为药型罩锥角的 1/2。δ 可按如下方法考虑:设 u_e 为爆轰波沿罩面扫过的速度,t_{AC} 为 A 点闭合运动到 C 点所用的时间,则有 $u_e t_{AC}=|AB|$,$|\boldsymbol{v}_0|t_{AC}=|AC|$,由图 1 可得

$$\delta = \arcsin\frac{|\boldsymbol{v}_0|}{2u_e} \tag{8}$$

如果爆轰波按平面波的形式以爆速 D 沿轴向传播,则有

$$u_e = D/\cos\alpha \tag{9}$$

至此,在(5)式、(6)式、(8)式和(9)式 4 个方程中有 5 个未知量:v_j、$|\boldsymbol{v}_0|$、β、δ、u_e。只要确定其中一个,就可以求出其它几个。

2.2　Gurney 压垮速度公式

爆轰波扫过药型罩时,入射角在一定范围内变化,药型罩的压垮过程是一个不定常问题,但对药型罩的每一个微元来说,若将其视为板厚为 d、装药厚度为 E 的无限大平板,则压垮过程可视为定常问题[13-14],故可由 Gurney 公式计算药型罩的压垮速度 v_H。

Gurney 能量守恒模型的计算公式如下

$$v_H = \sqrt{2E}\left[\mu + \frac{(1+2\mu)^3+1}{6(1+\mu)}\right]^{-1/2} \tag{10}$$

对于带壳体的聚能装药结构,考虑到罩微元对应的壳体质量 m_s,药型罩微元压垮速度的计算公式为[21]

$$v_H = \sqrt{2E}\left[\frac{1+A^3}{3(1+A)} + A^2\frac{m_s}{m_e} + \mu\right]^{-1/2} \tag{11}$$

式中:m_e 为罩微元对应的炸药质量;m_s 为罩微元对应的壳体质量;$\mu=m/m_e$,其中 m 为罩微元质量;$A=(1+2\mu)/(1+m_s/m_e)$;$\sqrt{2E}$ 为 Gurney 常数,取值 3 220。

3 计算分析

在装药结构、药型罩形状等相关参数不变的条件下，借助聚能射流的形成机理与 Gurney 压垮速度公式，对聚能射流的头部速度随药型罩密度的变化进行计算分析。聚能装药的相关参数见表 1，其中 d_m 为药型罩厚度，ρ_c、d_c 分别为聚能装药的密度和平均高度。由表 1 的相关参数，可以计算聚能射流速度 v_j、单位体积粒子流的动量 p_p 及动能 $E_{k,p}$ 随药型罩密度变化的曲线，如图 2 所示。

表 1 聚能装药参数

Table 1 Parameters of the shaped charge

d_m/(mm)	α/(°)	ρ_c/(g/cm^3)	d_c/(mm)	D/(km/s)
1.5	30	1.73	15	8.6

由图 2 可以看出：随着药型罩密度的增加，聚能射流的速度逐渐下降，且下降速度逐渐平缓；而单位粒子流所携带的动量和动能则逐渐增加，且增加速度亦逐渐平缓。由此可以认为：在材料特性相对稳定、装药结构和药型罩几何尺寸不变的条件下，尽管提高药型罩密度降低了聚能射流的速度，但粒子流所携带的能量增加了，因此，药型罩密度的增加有助于提高聚能装药的破甲威力。

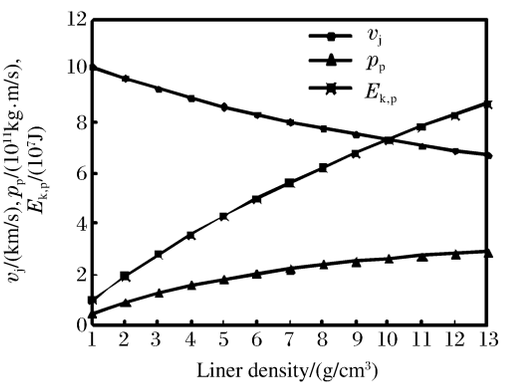


图 2 射流速度 v_j、单位体积粒子流的动量 p_p 和动能 $E_{k,p}$ 与药型罩密度的关系曲线

Fig. 2 Variations of jet velocity (v_j), particle momentum (p_p) and kinetic energy ($E_{k,p}$) per unit volume with liner density

4 实验研究

对装药结构相同、药型罩粉末配比不同的两种聚能装药进行对比实验，以验证计算结果的准确性。两种 W-Cu 粉末药型罩的 W 和 Cu 的质量配比（w_W ∶ w_{Cu}）分别为 0.4 ∶ 0.6 和 0.5 ∶ 0.5。炸药采用 8701 炸药，密度为 1.73 g/cm^3。采用 X 光高速摄影技术测量速度变化，采用静破甲实验研究破甲效应。

4.1 速度对比实验

聚能射流的速度测试采用 SCANDIFLASH450 脉冲 X 光测试装置，充电电压为 420 kV，实验布局和实验结果如图 3、图 4 和图 5 所示。由图 4、图 5 可以看出，当 W 粉的质量分数 w_W 增加时，粉末药型罩密度相应地增加，所形成射流的速度有所下降，与理论计算结果吻合。

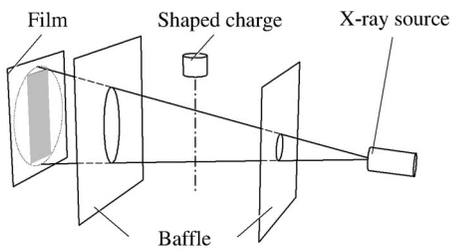


图 3 聚能射流 X 光测试布局

Fig. 3 The schematic of shaped charge jet's X-ray test device

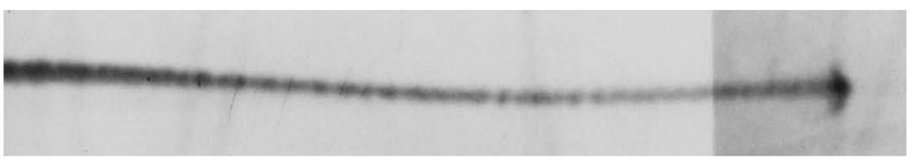


图 4 w_W ∶ w_{Cu} = 0.4 ∶ 0.6 时 W-Cu 粉末药型罩起爆 50 μs 所形成的射流的 X 光照片（v_j = 7.56 km/s）

Fig. 4 X-ray graph of the jet formed by W-Cu powder liner with w_W ∶ w_{Cu} = 0.4 ∶ 0.6 after 50 μs (v_j = 7.56 km/s)

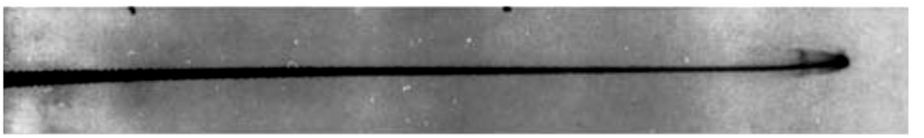


图 5　w_W ∶ w_{Cu} = 0.5 ∶ 0.5 时 W-Cu 粉末药型罩起爆 50 μs 所形成的射流的 X 光照片(v_j = 7.25 km/s)

Fig. 5　X-ray graph of the jet formed by W-Cu powder liner with w_W ∶ w_{Cu} = 0.5 ∶ 0.5 after 50 μs (v_j = 7.25 km/s)

4.2　破甲效应研究

对所研制的粉末药型罩进行静破甲实验,炸高为 36 mm,靶板为 603 均质装甲钢,采用 8# 电雷管中心起爆,实验装置见图 6。两种药型罩各做 5 发实验,实验结果如图 7 和表 2 所示。从表 2 可以看出,随着粉末药型罩密度的增加,垂直穿深随之增加,破甲威力增强,与计算结果一致。



图 6　实验装置

Fig. 6　Experimental setup



图 7　实验结果

Fig. 7　Experimental results

表 2　实验结果

Table 2　The experimental results

w_W ∶ w_{Cu}	Vertical penetration depth/(mm)					Average penetration depth/(mm)
	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	
0.4 ∶ 0.6	116	123	120	118	115	118.4
0.5 ∶ 0.5	128	140	136	132	130	133.2

5　结　论

依据计算得到的同一装药结构的药型罩密度与聚能射流速度、射流微粒动量和动能的关系,针对两种配比的 W-Cu 粉末药型罩,进行了聚能射流速度测定及其相应破甲威力的实验研究,得出如下结论:(1) 随着 W-Cu 粉末药型罩中 W 含量的增加,药型罩的密度增大,所形成的射流速度减小,与计算结果一致;(2) 随着 W-Cu 粉末药型罩中 W 含量的增加,药型罩的密度增大,破甲威力增加,与计算结果一致;(3) 依据 Birkhoff 定常模型和 Gurney 压垮速度理论计算得到的相同装药条件下药型罩密度与所形成的聚能射流速度、射流微粒动量及动能的关系曲线,具有一定的实际参考价值。由于影响聚能射流特性的因素很多,其它因素的影响有待进一步研究。

References:

[1] Azharonok V V, Krat'ko L E, Goncharik S V, et al. Character of the fast jet efflux upon detonation of shaped charges [J]. J Eng Phys Thermophys, 2008, 81(3): 494-498.

[2] Lei F B, Cao D L. Numerical simulation of the shaped charge jet from tungsten-copper powder liner [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2010, 33(6): 73-75. (in Chinese)
雷锋斌,曹端林. 钨铜粉末药型罩形成聚能射流的数值模拟 [J]. 火炸药学报, 2010, 33(6): 73-75.

[3] Yu R, Li F J, Xue X Y, et al. Study on the influence of rate of liner thickness change on the penetration [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2010, 30(1): 134-136. (in Chinese)
郁 锐, 李福金, 薛鑫莹, 等. 药型罩壁厚变化率对破甲威力影响的研究 [J]. 弹箭与制导学报, 2010, 30(1): 134-136.

[4] Wang C, Fu X L, Ning J G. Numerical simulation of shaped charge jet formation under different ways of initiation [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2006, 26(5): 401-404. (in Chinese)
王 成, 付晓磊, 宁建国. 起爆方式对聚能射流性能影响的数值分析 [J]. 北京理工大学学报, 2006, 26(5): 401-404.

[5] Jing Q B, Jing Z Y, Shi J. The influence of metal particles arrangement of powder shaped charge liner and its thermal treatment on performance of jet [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2008, 31(1): 42-44. (in Chinese)
景青波, 景振禹, 石 健. 粉末药型罩金属粒度级配及热处理对聚能射流性能的影响 [J]. 火炸药学报, 2008, 31(1): 42-44.

[6] Zhang X R, Wu C, Huang F L. Penetration of shaped charge jets with tungsten-copper and copper liners at the same explosive-to-liner mass ratio into water [J]. Shock Waves, 2010, 20(3): 263-267.

[7] Zygmunt B, Wilk Z. Formation of jets by shaped charges with metal powder liners [J]. Propell Explos Pyrot, 2008, 33(6): 482-487.

[8] Proskuryakov E V, Sorokin M V, Fomin V M. Rebounding of a shaped-charge jet [J]. J Appl Mech Tech Phys, 2007, 48(5): 633-635.

[9] Chen W G, Zhang Y. Influence of liner with different material model on simulation results [J]. Science Technology and Engineering, 2010, 10(13): 3227-3229. (in Chinese)
陈文刚, 张 越. 不同材料模型的药型罩对仿真结果的影响 [J]. 科学技术与工程, 2010, 10(13): 3227-3229.

[10] Hirsch E. Scaling of the shaped charge jet break-up time [J]. Propell Explos Pyrot, 2006, 31(3): 230-233.

[11] Jackowski A, Włodarczyk E. The influence of repressing liners made from sintered copper on jet formation [J]. J Mater Process Technol, 2006, 171(1): 21-26.

[12] Chen X L, Hang Y H, Fan Z B, et al. A coupling computation method for penetration of shaped charge jet [J]. Explosion and Shock Waves, 1998, 18(4): 317-322. (in Chinese)
陈贤林, 杭义洪, 范中波, 等. 聚能射流侵彻的一种耦合算法 [J]. 爆炸与冲击, 1998, 18(4): 317-322.

[13] Nagao Y, Kibe S, Shimizu T, et al. Improvement of conical shaped charge system and comparison of the test result between CSC and gas gun [J]. Acta Astronaut, 2007, 60(8/9): 763-769.

[14] Held M. Predominance of shaped charge diameter to performance quality against special targets [J]. Propell Explos Pyrot, 2005, 30(6): 435-437.

Powder Liner Density Effect on the Performance of Shaped Charge Jet

GAO Yong-Hong[1,2], GU Xiao-Hui[1], WANG Feng-Ying[2]

(1. *School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing* 210094, *China*;
2. *Department of Chemical Engineering and Environment, North University of China, Taiyuan* 030051, *China*)

Abstract: In order to study the relation of powder liner material density and performance of the shaped charge jet, the curves of shaped jet velocity, jet particle momentum and jet particle kinetic energy with respect to the liner density were calculated under the same charge conditions, according to the Birkhoff's steady theory and Gurney's formula of crushed speed. In the same charge structure, the jet velocity and penetration power of two kinds of powder liner were tested, whose mass ratios of W to Cu were 0.5 ∶ 0.5 and 0.4 ∶ 0.6 respectively. It is found that the experimental results are well in agreement with the calculation results. Therefore, it is considered that the calculated curves have certain reference values, and the penetration power can be increased effectively by improving the density of powder liner.

Key words: powder liner; shaped charge jet; penetration power; density