

文章编号: 1006-9941(2008)04-0424-04

多孔药型罩聚能射流低炸高大穿深机理研究

李如江^{1,2}, 沈兆武², 刘天生¹

(1. 中北大学安全工程系, 山西 太原 030051;

2. 中国科技大学近代力学系, 安徽 合肥 230027)

摘要:理论上分析了初始冲击温升对高速段射流的动态屈服强度的影响,并对孔隙度为11.4%铜粉末药型罩与紫铜药型罩进行了侵彻对比试验。试验结果表明,在1.3~3倍的装药口径范围内,铜粉末射流的性能要优于紫铜射流,最大穿深为紫铜射流的1.12倍。铜粉末药型罩比紫铜药型罩具有更高的冲击温升,使高速段的射流的粘性和动态屈服强度降低,提高了射流的延伸能力。

关键词:爆炸力学;聚能射流;孔隙度;多孔药型罩;低炸高

中图分类号: TJ55; O385

文献标识码: A

1 引言

聚能效应由于能够显著提高能量密度,且随着距起爆点距离的增加,能量衰减速度慢,可较好地传递爆炸能量,而在军民两用方面得到了广泛应用^[1,2]。

粉末及其冶金药型罩可以按照实际使用要求添加硬质和高密度金属,与传统的密实铜罩聚能装药相比具有低炸高、无杵堵等特点而广泛用于石油射孔行业。Jamet^[3]研究了钨铜药型罩烧结工艺对射流性能的影响,Jackowski^[4]研究了多孔铜药型罩再压对射流断裂时间的影响,Seong^[5]研究了锻压钨铜药型罩聚能射流的侵彻性能,王凤英^[6]、王铁福^[7]等试验研究了钨铜射流的侵彻性能。这些研究主要侧重于对多孔材料药型罩工艺研究,人们对其侵彻机理特别是低炸高条件下的侵彻机理还没有充分的认识,仍然按照原有的理论来设计射孔弹^[8]就有可能达不到既定的设计目标,因而有必要对多孔药型罩聚能射流的一些机理进行研究,从而可以更好地指导实践。

粉末材料本质上属于多孔材料,由于其可压缩性,具有传统密实材料所不具有的力学性能。本文对粉末材料的冲击压缩特性进行理论分析,并结合试验,研究了多孔药型罩聚能射流低炸高大穿深机理。

2 理论分析

2.1 聚能射流的粘性和动态屈服强度

研究表明^[9],从碰撞区域流出的射流不是一条流

线,当来流经过压跨区域折转时,要经受内剪力作用,造成射流的外层速度要远大于其内层速度,因此射流在延伸过程中由于流层速度差的存在而经受了较大的剪切变形,直至被材料的变形所吸收。

聚能射流形成过程中,药型罩材料在非常短的时间内经受了极其强烈的变形,其应变达1000%,应变率达 $10^4 \sim 10^7 \text{ s}^{-1}$ 。在射流的运动状态下,金属的动力粘度为 $10^3 \sim 10^4 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{[10]}$ 。一般来讲,粘度与温度呈指数形式变化,随着温度的升高,粘度按指数降低^[11]。

由于聚能射流的高速运动经受了高应变率下的塑性变形,材料的屈服应力具有较强的应变硬化、应变率强化(粘性效应)以及热软化效应。其本构可用热粘塑性本构关系来描述^[12]:

$$\tau = f(\gamma, \dot{\gamma}, T) \quad (1)$$

式中, $\tau, \gamma, \dot{\gamma}, T$ 分别表示剪应力,应变、应变率和温度。他们之间的关系可以用下式来表示:

$$\tau = \tau_0 \gamma^n \left(\frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_0} \right)^m \exp\left(\frac{W}{T} \right) \quad (2)$$

式中, $\tau_0, \gamma_0, \dot{\gamma}_0$ 分别为材料的初始屈服应力、应变和应变率, n, m, W 为试验常数, T 为温度。

从公式(2)可以看出其它参数不变时,增加温度可以使材料的动态屈服强度 τ 降低,从而可以增加射流的延伸能力。

2.2 多孔材料药型罩压垮之前温升估算

文献^[13]给出了冲击波与药型罩作用的波系图,但在计算温度时误用了状态方程。如图1所示, O 点为炸药和药型罩的滑移爆轰接触点, OD 为爆轰波阵面, OR 为反射波阵面, OS 为透射波阵面。由于多孔材料的冲击阻抗一般大于爆轰产物的冲击阻抗,故炸药与

收稿日期: 2007-12-18; 修回日期: 2008-04-21

作者简介: 李如江(1978-),男,在读博士生,从事爆炸技术研究。

e-mail: liru7841@mail.ustc.edu.cn

罩作用处的反射波和透射波都为冲击波。在 O 点利用罩和爆轰产物的滑移接触边界条件可以求得罩壁中的压力 p 和材料受冲击后体积 V 的关系。

材料 p - V 关系如图 2 所示。假定冲击波过后多孔材料被完全压实,则密实材料和多孔材料的关系 p - V 为:

$$p(V)_s = \frac{\rho_0 c^2 \eta}{(1 - s\eta)^2} \quad (3)$$

$$p(V)_p = \frac{\rho_0 c^2 \eta}{(1 - s\eta)^2} \left[\frac{2 - \gamma_0 \eta}{2 - \Gamma_0 [\alpha(1 - \alpha)^{-1} + \eta]} \right] \quad (4)$$

$$\eta = 1 - \frac{V}{V_0}, \quad \alpha = 1 - \frac{V_0}{V_{00}} \quad (5)$$

式中,下标 S, p 表示为密实和多孔材料, α 为材料孔隙度, V_{00} 为多孔材料初始体积, V_0 密实材料的初始体积, η 代表相对压缩性, Γ_0 为常态 Grüneisen 系数, c, s 为冲击速度 U 和质点速度 u_p 之间的经验系数。

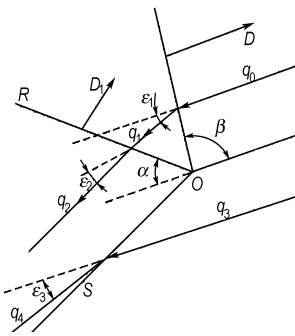


图 1 冲击波与药型罩作用的波系图

Fig. 1 Shock wave scheme during the liner compressed

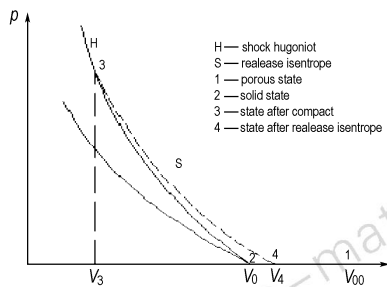


图 2 粉末和实体材料的 p - V 图

Fig. 2 p - V diagrams of solid and porous materials

$$U = c + s u_p \quad (6)$$

炸药爆炸后对多孔材料冲击温度计算公式为:

$$T_3 = \exp \left[\left(\frac{\Gamma_0}{V_0} \right) (V_0 - V) \right] \times \left(\frac{1}{2C_V} \int_{V_0}^V [p(V) + (V_{00} - V) \frac{dp(V)}{dV}] \times \exp \left[\left(\frac{\Gamma_0}{V_0} \right) (V - V_0) \right] dV + T_0 \right) \quad (7)$$

式中, C_V 为定容比热, T_0 为室温。

当压力卸载至零时,可通过等熵卸载方程求得残

余温度,即

$$T_4 = T_3 \exp \left[\left(\frac{\Gamma_0}{V_0} \right) (V_4 - V_3) \right] \quad (8)$$

通过数值解此方程可得到 p - V 曲线上任一点的温度。进而由 $\Delta T = T_4 - T_0$, 可以求得药型罩在压垮之前的冲击温升。

3 试验结果与讨论

3.1 试验装置和方案

为了验证初始孔隙度对聚能射流侵彻性能的影响和便于计算,保证药型罩质量和外形以及壁厚变化率不变,分别对初始孔隙度 α 为 11.4% 铜粉末药型罩和紫铜药型罩进行侵彻对比试验,紫铜药型罩聚能装药采用中北大学研制的 100 mm 标准弹。靶板由两块 100 mm 厚 603 装甲钢叠合而成。实验装置和实物如图 3 和图 4 所示。

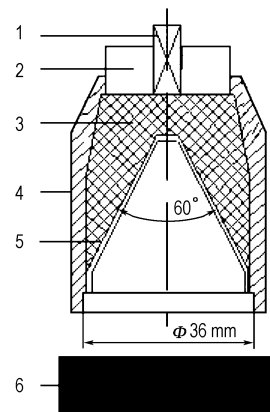


图 3 试验装置示意图

1—雷管, 2—定位塞, 3—药柱, 4—外壳, 5—药型罩, 6—靶板

Fig. 3 Experimental set-up

1—detonator, 2—plug, 3—charge, 4—steel case, 5—liner, 6—target



图 4 聚能装药现场实验

Fig. 4 Field test of the shaped charge

3.2 实验参数及结果

聚能装药口径 (Charge Diameter, CD) 为 36 mm, 药型罩外锥角为 60° , 质量为 16 g, 药柱所用炸药为 8701, 质量为 40 g, $\rho_e = 1.685 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, $D = 8120 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 用 8[#] 雷管起爆。药型罩的材料参数为^[12]: $\rho_0 = 8.93 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, $s = 1.49$, $c = 3.94 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, $T_0 = 293 \text{ K}$, $C_V = 0.376 \text{ J} \cdot (\text{g} \cdot \text{k})^{-1}$, $\Gamma_0 = 2.0$ 。侵彻后的靶板效果如图 5 和图 6, 试验顺序为从右至左。

表 1 试验参数及结果

Table 1 Experimental parameters and test results

No.	liner materials	standoff /mm	penetration /mm	cratering /mm × mm
1	copper	9	60	14 × 16
	powder	9	48	15 × 15
2	copper	48	102	19 × 19
	powder	48	103	17 × 19
3	copper	78	107	21 × 21
	powder	78	120	12 × 12
4	copper	108	121	17 × 20
	powder	108	128	11 × 12

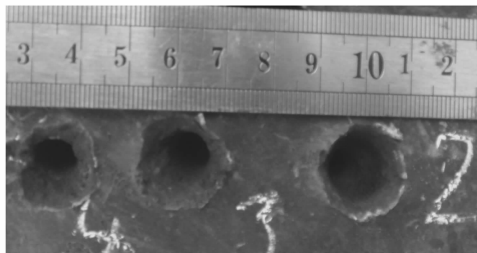


图 5 紫铜射流侵彻后的靶板

Fig. 5 Target penetrated by the copper jets

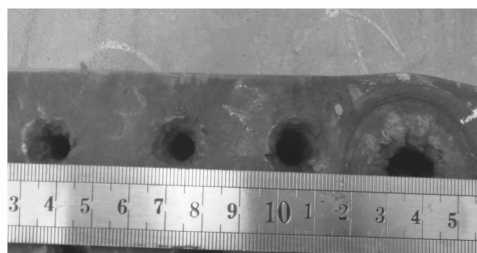


图 6 铜粉末射流侵彻后的靶板

Fig. 6 Target penetrated by the powder copper jet

3.3 结果分析和讨论

(1) 假定中心点起爆聚能装药, 对于此装药结构, 爆轰波与药型罩壁的夹角从罩顶到口部的变化范围为 $70^\circ \sim 90^\circ$, 采用公式 (3)、(4)、(7) 和 (8) 可以计算出冲击温升沿药型罩母线从顶端至口部的温度分布, 如图 7 所示, 从图 7 上可以看出温度从顶端到口部逐渐降低, 铜粉末罩温升要比紫铜罩高得多。

较高的温升使射流的粘性和动态屈服降低。由公式 (2) 以及 $\alpha-T-\tau$ 之间的关系, 可得到 $\alpha-\tau$ 曲线, 如图 8 所示, 可以看出射流的动态屈服强度随孔隙度的增加而呈指数降低。

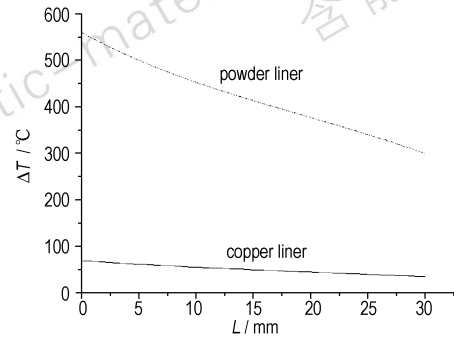


图 7 沿罩母线的温升

Fig. 7 Temperature rise along the liner

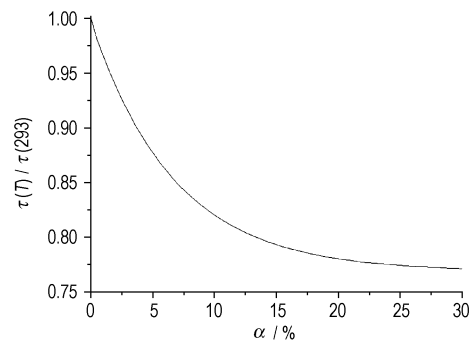


图 8 孔隙度与射流动态屈服强度

Fig. 8 Porosity and jet dynamic strength

当孔隙度为 30% 时, 通过计算还发现, 药型罩顶端的冲击温升使密度仅降低了 5.3%, 可见冲击温升对密度的影响比较小。但是冲击温升的增加会降低材料的声速, 对形成凝聚射流不利, 限于篇幅, 作者会在其它文章中讨论孔隙度对射流凝聚性的影响。

(2) 以炸高 (S) 为横轴, 穿深 (P) 为纵轴, 将表 1 的数据分别用装药口径的倍数来表示, 绘制成 $S-P$ 曲线如图 9 所示。从图 9 可以看出, 在 1.3CD 的炸高之内铜粉末罩聚能射流穿深小于紫铜射流; 1.3 ~ 3CD 炸高范围内铜粉末罩聚能射流的穿深要比紫铜射流具有明显优势, 在炸高为 2.1CD 时, 铜粉末射流的穿深是紫铜的 1.12 倍。另外, 从图 5 和图 6 侵彻靶板效果看, 当炸高为 9 mm 时, 入孔孔径大小几乎相同, 大于 48mm 后, 铜粉末射流的入孔尺寸比紫铜射流的入孔小。

(3) 当炸高小于 1.3CD 时, 可能由于射流还没有完全形成以及强度原因, 铜粉末罩聚能射流穿深小于紫铜射流; 当炸高为 1.3 ~ 3CD 时, 由于铜粉末罩初始冲击温升远远高于紫铜罩, 形成射流的粘性和动态屈服强度要

低于紫铜射流,这样就实现了射流在较低的炸高下可以边侵彻边延伸;而紫铜药型罩形成的射流由于温度低,在相同的速度梯度下,其延伸能力要比铜粉末罩聚能射流低,故穿深低于铜粉末射流。另外,通过比较两者的入孔孔径可以看出,铜粉末罩射流直径较细,从另一方面说明了铜粉末罩聚能射流良好的延伸性能。

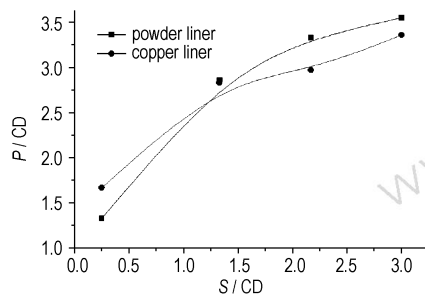


图9 炸高-穿深曲线

Fig.9 Standoff-penetration curves

4 结论

(1) 理论计算结果表明,从铜粉末药型罩形成射流的温度比紫铜的高,降低了高速段射流的粘性和动态屈服强度,使射流具有快速延伸的能力。

(2) 冲击温升从药型罩顶端至口部逐渐降低。

(3) 在 1.3 ~ 3.0CD 炸高范围内,从孔隙度为 11.4% 的铜粉末药型罩形成的聚能射流穿深要比紫铜药型罩形成的射流深,最大穿深是紫铜射流的 1.12 倍。

参考文献:

- [1] 恽寿容,赵衡阳. 爆炸力学[M]. 北京:国防工业出版社,2005:193-202.
- [2] YUN Shou-rong, ZHAO Heng-yang. Explosion Mechanics[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2005. (in Chinese): 171-211.
- [3] LI Wen-ho. Oil well perforator design using 2D eulerian code[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2002(27): 535-559.
- [4] Jamet F, Lichtenberger A. Investigation of the W-Cu liner material [C]//9th ISB, 1986: 2-233-2-236.
- [5] Jackowski A, Włodarczyk E. The influence of repressing liners made from sintered copper on jet formation[J]. *J Mater Pro Tech*, 2006(171): 21-26.
- [6] Lee S, Kim E P, Kim Y, et al. penetration performances of tungsten-copper shaped charge liner[C]//22th ISB, 2005: 437-443.
- [7] 王凤英,刘天生,苟瑞君,等. 钨铜镍合金药型罩的研究[J]. *兵工学报*, 2001, 22(1): 112-114.
- [8] WANG Feng-ying, LIU Tian-sheng, GOU Rur-jun, et al. A study on tungsten-copper-nickel alloy as shaped charge liner[J]. *ACTA Armentarii*, 2001, 22(1): 112.
- [9] 王铁福,朱鹤荣,周箭隆,等. Copper-tungsten shaped charge liners and their performance[J]. *弹道学报*, 1992(2): 78-82.
- [10] WANG Tie-fu, ZHU He-rong, ZHOU Jian-long, et al. Copper-tungsten shaped charge liners and their performance[J]. *Journal of Ballistics*, 1992(2): 78-82.
- [11] 史慧生. 小长径比石油射孔弹[J]. *爆破器材*, 1999, 28(1): 28-31.
- [12] SHI Hui-sheng. Oil perforating cartridge with small slenderness ratio [J]. *Explosive Materials*, 1999, 28(1): 28-31.
- [13] 陈军,罗建. 聚能装药射流如何形成空穴[J]. *弹箭技术*, 1995(4): 36-43.
- [14] CHEN Jun, LUO Jian. How the cavity formed of shaped charge jet? [J]. *Bullet and rocket technology*, 1995, 4: 36-43.
- [15] 秦承森,段庆生,韩冰,等. 聚能射流的断裂[J]. *爆炸与冲击*, 1997, 17(4): 318-325.
- [16] QIN Cheng-sen, DUAN Qing-sheng, HAN Bing, et al. Breakup time of the shaped charge jet[J]. *Explosion and Shockwave*, 1997, 17(4): 318-325.
- [17] 吴月华,杨杰编著. 材料的结构与性能[M]. 合肥:中国科技大学出版社,2001:104.
- [18] WU Yue-hua, YANG Jie. Material structure and property [M]. Hefei:USTC press, 2001: 104.
- [19] Meyer M A. Dynamic behavior of materials [M]. John Wiley and sons, inc. 1994: 327-331.
- [20] Trebinski R, Jackaski A. Influence of shock wave heating during porous liners launching on the behavior of jets[A]. 17th International symposium on ballistics, part 2, 1998: 235-242.

Deep Penetration Mechanism of Jet Produced by Shaped Charge with Porous Liner at Low Standoff Distance

LI Ru-jiang^{1,2}, SHEN Zhao-wu², LIU Tian-sheng¹

(1. Department of Safety Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China ;

2. Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: Compressibility of porous materials was considered, shock temperature rise effect on the dynamic strength of front jet was analyzed theoretically. Penetration test results show that the porous copper liner with 11.4% porosity has better penetration ability than the homogeneous one when the standoff distance is between 1.3 and 3 charge diameters (CD), and the maximum penetration of porous jet is 1.12 times than that of copper one. The temperature rise in the porous liner is much higher, which is helpful to decrease jet viscosity and dynamic strength and increase the stretching ability at low standoff distance.

Key words: explosion mechanics; shaped charge jet; porosity; porous liner; low standoff distance