文章编号:1000-5773(2008)04-0445-04

药型罩初始孔隙度对聚能射流行为的影响*

李如江[1,2],沈兆武[2],王凤英[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 230026)

摘要:多孔材料药型罩由于其可压缩性,在压垮之前受炸药爆炸冲击压缩作用而使温度升高,为延迟射流的断裂时间提供了可能,估算了多孔材料药型罩压垮之前的冲击温升,并结合脉冲 X 光摄影研究了孔隙度对射流行为的影响。测试结果表明,在一定的孔隙度范围内,射流的韧性随着孔隙度的增加而提高,射流直径随孔隙度的增加而变细。

关键词:爆炸力学;孔隙;聚能射流;粉末药型罩;X 光测试
中图分类号:O385 **文献标识码**:A

1 引 言

聚能效应能够显著提高能量密度,且随着距起爆点距离的增加,能量衰减速度变慢,可以较好地传递爆炸能量,因而在军民两用方面得到了广泛的应用[1]。军事上,随着新材料、新概念、新结构装甲的不断涌现,其防护能力显著提高,为传统的反装甲武器提出了极大的挑战,如何提高破甲武器的侵彻能力,是近年来国内外众多学者的研究重点。在民用上,聚能效应广泛用于石油开采。为应付复杂的井下环境,提高采油率,使用了各种新技术如小药量深穿透技术等,因此提高侵彻深度也是石油射孔行业研究者追求的目标。

当装药结构一定时,要提高穿深必须从两方面着手:一是寻找高爆轰能量的炸药,如新近出现的 CL-20、TNAZ 等,可提高射流速度和射流质量[2];另一方面就是寻找新型的药型罩材料。铜由于具有高塑性,高温下不气化等优点,一直作为传统的药型罩材料,穿深已经达到极限,要想提高侵彻深度,就必须寻找高性能的材料。新技术和新型粉末冶金和各种烧结技术的结合,为合金与传统材料之间的竞争提供了技术基础[3]。在此背景下,粉末材料制造及其力学性能逐渐成为近年来研究的热点。

研究表明,在引爆聚能装药前加热药型罩至一定温度可以提高射流的断裂时间[4]。多孔材料药型罩由于可压缩性,在压垮阶段受冲击压缩作用而使温度升高,为延迟射流的断裂时间、提高射流的韧性提供了可能,本研究估算了多孔材料药型罩在炸药爆炸后冲击产生的温升,并结合脉冲 X 光摄影技术研究了孔隙度对射流行为的影响。

2 多孔材料药型罩压垮之前冲击温升估算

2.1 多孔材料冲击温升估算

多孔材料对冲击波的响应非常复杂,由于微孔洞的崩塌,对其中气体的绝热压缩,使材料温度急剧的升高,造成冲击波能量耗散。Herrman 在基于 Mie-Grüneisen 方程基础上,假定冲击波前沿过后孔隙完全闭合,利用质量、动量和能量守恒三大方程给出了实体和多孔材料的 p-V 关系(见图 1)

$$p_{\mathrm{HS}}=\frac{\rho_0 c^2 \eta}{(1-s\eta)^2} \tag{1}$$

* **收稿日期**:2007-11-25;**修回日期**:2008-03-12
作者简介:李如江(1978—),男,博士研究生,主要从事现代爆炸技术研究. E-mail:liru7841@mail.ustc.edu.cn

$$p_{\mathrm{H}}=\frac{\rho_0 c^2\eta}{(1-s\eta)^2}\left\{\frac{2-\gamma_0\eta}{2-\gamma_0[\alpha(1-\alpha)^{-1}+\eta]}\right\} \tag{2}$$

$$\eta=1-\frac{V}{V_0},\quad \alpha=1-\frac{V_0}{V_{00}} \tag{3}$$

式中:α 为材料孔隙度,V_{00} 为多孔材料初始体积,V_0 为实体材料的初始体积,η 代表相对压缩性,c、s 为冲击速度 U 和质点速度 u_{p} 之间的经验系数

$$U=c+su_{\mathrm{p}} \tag{4}$$

炸药爆炸后对多孔材料冲击温度计算,从热力学关系可得到

$$\mathrm{d}E+p\mathrm{d}V=C_V\mathrm{d}T+C_VT\gamma\mathrm{d}V/V \tag{5}$$

由 Hugoniot 关系可得

$$\mathrm{d}E_{\mathrm{H}}+p_{\mathrm{H}}\mathrm{d}V=[p_{\mathrm{H}}+(V_{00}-V)\mathrm{d}p_{\mathrm{H}}/\mathrm{d}V]\mathrm{d}V/2 \tag{6}$$

由上面两式并结合经验关系 $\rho\gamma=\rho_0\gamma_0$ 积分可得

$$T_3=\exp\left[\left(\frac{\gamma_0}{V_0}\right)(V_0-V)\right]\cdot\left\{\frac{1}{2C_V}\int_{V_0}^{V}\left[p_{\mathrm{H}}+(V_{00}-V)\frac{\mathrm{d}p_{\mathrm{H}}}{\mathrm{d}V}\right]\exp\left[\left(\frac{\gamma_0}{V_0}\right)(V-V_0)\right]\mathrm{d}V+T_0\right\} \tag{7}$$

对(2)式求导,代入(7)式,通过数值解此方程可得到 Hugoniot 曲线上任一点的温度,由于模型假定很弱的冲击波就可以把多孔材料压缩至实体体积 V_0,因而计算温度时积分下限取为 V_0。当压力卸载至零时,可通过等熵卸载方程求得残余温度,即

$$T_4=T_3\exp\left[\left(\frac{\gamma_0}{V_0}\right)(V_4-V_3)\right] \tag{8}$$

2.2 冲击波作用下罩壁中波的关系

文献[5]中给出了药型罩压垮之前,即罩微元在轴线上碰撞之前,罩壁中冲击波的波系图,如图 2 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,故炸药与罩作用处的反射波和透射波都为冲击波。根据斜击波的关系,可以计算来流的偏折角。

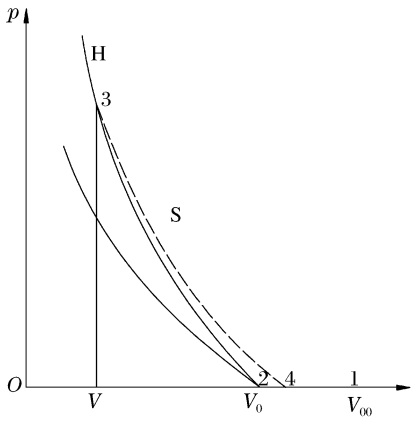


图 1 粉末和实体材料的冲击绝热线

Fig. 1 Solid and porous Hugoniot curve

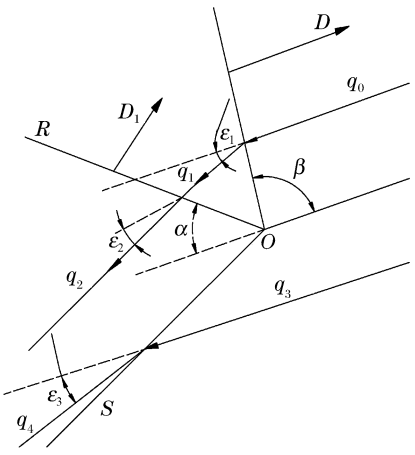


图 2 冲击波与药型罩作用的波系图

Fig. 2 Wave interaction during the linear compression of shaped charge

折射角 ε_1 仅取决于爆轰波与药型罩壁的夹角 β,有

$$\varepsilon_1=\beta-\arctan[k\tan\beta/(k+1)] \tag{9}$$

对于折射角 ε_2,有

$$\varepsilon_2=\varphi-\arctan\left[\frac{(k+1)^2p_{\mathrm{D}}\sin^2\alpha-k[p(V)-p_{\mathrm{D}}]\sin^2\beta}{(k+1)^2p_{\mathrm{D}}\sin^2\alpha}\tan\varphi\right] \tag{10}$$

$$\alpha=\arctan\frac{k\sin\varepsilon_1\cdot\sin\beta}{\sin(\beta-\varepsilon_1)-k\cos\beta\cdot\sin\varepsilon_1} \tag{11}$$

$$\varphi=\alpha+\varepsilon_1,\quad p_D=\rho_e D^2/(k+1) \tag{12}$$

式中:ρ_e 为装药密度,p_D 为爆压,k 为多方指数,对于工程计算,一般可取 $k=3$。对于折射角 ε_3 有

$$\varepsilon_3=\arctan\left[\frac{\sin\beta}{\rho_{00}D^2-p(V)\sin^2\beta}\sqrt{p(V)[\rho_{00}D^2(1-\rho_{00}V)-p(V)\sin^2\beta]}\right] \tag{13}$$

(10)式、(11)式和(13)式中 $p(V)$由(2)式决定。

在 O 点利用罩和爆轰产物的滑移接触边界条件可得以上各个折射角的关系

$$\varepsilon_3=\varepsilon_1+\varepsilon_2 \tag{14}$$

这样,由(9)式、(11)式、(13)式和(14)式就可以求得罩中的压力,进而由(8)式可以求得冲击波作用后药型罩的残余温度,由 $\Delta T=T_2-T_0$,可以求得温升。在求压力时一般有 3 个值,最低值对于本研究所求解的 $p(V)$线没有物理意义,最大值相应于强支冲击波,不稳定,总会衰减为弱冲击波,故仅取中间值。

3　多孔铜药型罩聚能射流的 X 光测试

为了验证初始孔隙度对射流行为的影响,保证药型罩外形参数和质量不变,分别对铜粉末药型罩的初始孔隙度 α 分别为 9.3%和 11.4%时的聚能射流进行了 X 光测试。炸药采用 8701,装药密度 $\rho_e=1.685\ \mathrm{g/cm^3}$,聚能装药口径为 35 mm,罩壁厚为 1.3 mm,延迟时间为 30 μs。多孔铜药型罩材料的计算参数为[6]:$c=3.94\ \mathrm{km/s}$,$s=1.49$,$D=8120\ \mathrm{m/s}$,$\beta=80°$,$T_0=293\ \mathrm{K}$,$\rho_0=8.93\ \mathrm{g/cm^3}$,$\gamma_0=2.0$,$c_V=0.376\ \mathrm{J/(g\cdot K)}$。则根据上面所述方法编程,可以计算出初始孔隙度为 9.3%和 11.4%的药型罩冲击波过后的温升分别为 290 ℃和 380 ℃。测试结果如图 3 和图 4 所示。

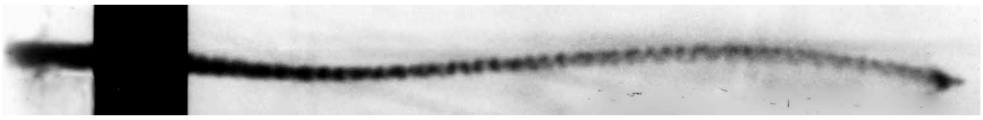


图 3　$\alpha=9.3\%$时射流 X 光摄影图

Fig. 3　X-ray photograph of the shaped charge jet when $\alpha=9.3\%$

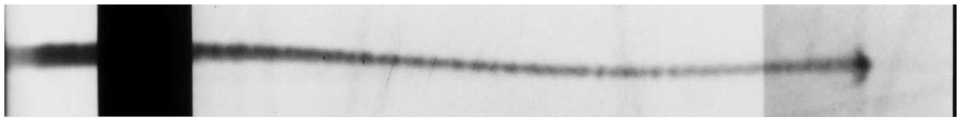


图 4　$\alpha=11.4\%$时射流 X 光摄影图

Fig. 4　X-ray photograph of the shaped charge jet when $\alpha=11.4\%$

比较上面两幅图可以看出,在 $t=30$ μs 时,初始孔隙度为 $\alpha=9.3\%$的药型罩形成的射流已出现明显断裂,而从孔隙度 $\alpha=11.4\%$的药型罩中形成的射流仅出现局部颈缩,说明药型罩初始孔隙度较大的射流断裂要迟,形成的金属射流较细;射流速度较低,由于在压垮过程中能量耗散在温度的升高上[7]。因此在研究多孔材料药型罩聚能射流时,孔隙度是一个比较重要的影响因素。

4　结　论

孔隙度是影响射流动态行为的一个比较重要的因素,合适的孔隙度可以明显增加射流的韧性和延长射流的断裂时间。对某种特定的材料,孔隙度多大时比较合适,依然是一个值得研究的问题,孔隙度太大,反而会降低射流的韧性和凝聚性。一般来讲,要把孔隙度控制在合适的范围以内。对于本研究的铜粉末药型罩,通过对两种不同的孔隙度计算和试验研究可以得出以下结论:

(1) 理论计算表明,使用多孔材料药型罩可以提高射流温度。

(2) X 光摄像表明,随着孔隙度的增加,射流的韧性增加、直径变细。

References:

[1] Yun S R, Zhao H Y. Explosion Mechanics [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2005: 171-211. (in Chinese)
恽寿榕, 赵衡阳. 爆炸力学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2005: 171-211.

[2] Baker E L, Daniels A, Fuchs B. Improved Performance of Shaped Charge Warheads Using More Powerful Explosive Formulations [A]//17th International Symposium on Ballistics [C]. Midrand, South Africa, 1998: 347-355.

[3] Chaint D. Future P/M Materials for Kinetic Energy Penetrators and Shaped Charge [J]. Powder Metallurgy in Defence Technology, 1981, 7: 185-195.

[4] Babkin A V, et al. Limits of Increasing the Penetration of Shaped Charge Jets by Pulsed Thermal Action on the Shaped Charge Liners [J]. Combustion, Explosion and Shock Waves, 2001, 37(6): 727-733.

[5] Trebinski R, Jackaski A. Influence of Shock Wave Heating during Porous Liners Lauching on the Behavior of Jets [A]//17th International Symposium on Ballistics [C]. Midrand, South Africa, 1998: 235-242.

[6] Meyers M A. Dynamic Behaviour of Materials [M]. New York: John Wiley&Sons, 1994: 133-149.

[7] Li R J, Shen Z W. Porosity Effect on the Shaped Charge Jet Speed from Powder Metallurgical Liner [A]//Huang P, Wang Y J, Li S C. 2007-IASPEP [C]. Beijing: Science Press, 2007: 765-769.

Initial Porosity Effect on the Jet Behavior of Shaped Charge

LI Ru-Jiang[1,2], SHEN Zhao-Wu[2], WANG Feng-Ying[1]

(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: Shock heating can cause temperature rise prior to the porous liner collapse process because of its porous nature, which is possible to increase the jet temperature and enhance the jet ductility. The temperature rise calculation method was presented, and the porous effect on the jet behavior was studied with the pulse X-ray photograph. It was shown that the jet ductility increased with the initial porosity within some value, and the jet diameter became smaller with increasing initial porosity.

Key words: explosion mechanics; porosity; shaped charge jet; powder liner; X-ray photograph