

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2015.02.003

空气中 PETN 爆炸产物初始参数的计算研究*

李洪伟 颜事龙 郭子如 杜明燃 何志伟

安徽理工大学化学工程学院(安徽淮南, 232001)

[摘 要] 为了研究 PETN 爆炸产物的初始参数,以爆炸理论为依据,利用计算机数值模拟 PETN 装药密度与爆速的关系。采用软件编程的方法实现其爆炸产物初始参数的计算,并拟合得出爆炸产物初始参数与 PETN 装药密度的关系曲线和方程。用密度分别为 1.56、1.65、1.69、1.74 g/cm³ 的 PETN 爆炸产物初始参数验证拟合方程的准确度。结果表明拟合方程具有较好的准确度。

[关键词] 爆炸力学;PETN 数值模拟;电测法;参数

[分类号] TD235.1+1

引言

爆炸冲击波相关参数的计算一直以来都是一个复杂而繁琐的问题,怎样利用爆炸理论结合计算机编程对相关爆轰参数进行模拟仿真计算一直都是爆炸领域研究的热点^[1]。通过对炸药在空气中爆炸现象的了解和研究,爆轰波在介质分界面上初始参数由爆轰波参数和空气的机械性质确定。研究和模拟爆炸产物初始参数必须对炸药的爆轰波参数和空气介质的相关性质有深入的了解^[2]。炸药的爆轰参数与炸药的物理和化学性质密切相关^[3],现阶段有大量文献对炸药的爆轰参数做过深入的实验和理论研究^[4],但针对空气中爆炸冲击波在介质分界面上初始参数的研究却鲜有报道。本文利用计算机模拟编程,对 PETN 介质分界面上的初始参数进行模拟计算。

1 介质分界面上初始参数的理论基础

利用爆轰产物在空气界面处的质点速度计算公式,结合爆轰产物的膨胀规律、爆轰波的 Hugoniot 方程以及动量守恒定律和质量守恒定律,介质分界面上初始参数满足以下公式^[5]:

$$u_x = \frac{D}{\gamma + 1} \left\{ 1 + \frac{2\gamma}{\gamma - 1} \left[1 - \left(\frac{p_K}{p_2} \right)^{\frac{\gamma-1}{2\gamma}} \right] \right\} + \frac{2C_K}{k-1} \left[1 - \left(\frac{p_x}{p_K} \right)^{\frac{k-1}{2k}} \right]; \quad (1)$$

$$p_x = \frac{2\rho_a D_x^2}{k+1} = \frac{k+1}{2} \rho_a u_x^2. \quad (2)$$

式中: u_x 为爆轰产物在空气界面处的质点速度; D 为爆速; γ 为常数,取 1.3; p_K 为中间状态的压力,可

由爆轰波的 Hugoniot 方程计算; C_K 为 p_K 对应波速; k 为常数,一般取 1.3; ρ_a 为未扰动空气的密度。

根据式(1)、式(2),先假设一个计算 u_x 值记为 u_{x1} ,利用式(2)计算出一个 p_x 值记为 p_{x1} ,把 p_{x1} 代入式(1)求得 u_x 值记为 u_{x2} ,比较 u_{x1} 和 u_{x2} 值,如果两者差值在设定误差范围内,所设定 u_x 即 u_{x1} 为要求的 u_x 值。如果两者差值不在设定误差范围内,取两者平均值 $u_{x3} = (u_{x1} + u_{x2})/2$ 为假定值,再次求得下一个循环的 p_x 和 u_x 值,依次反复计算。直到所求的 u_x 值满足要求。最终求得 p_x 、 u_x 值。

上述计算 p_x 、 u_x 过程和前文相关参数计算过程需要反复迭代数次,计算过程繁琐,运用计算机编程计算能减少计算量、提高计算效率,并且保证计算的准确度。求得 p_x 和 u_x 后也可计算出 D_x 。

2 计算机拟合计算结果分析

2.1 PETN 装药密度与爆速值的数值拟合

设计拟合计算方案要求装药密度和实测爆速具有定量关系。通常装药密度和爆速的关系采用一次线性拟合,但为了减小计算值误差,通过计算机拟合采用二次多项式拟合,计算可得一次线性拟合和二次多项式拟合的爆速值与实验爆速值和装药密度的相关系数均接近 1,且二次多项式拟合爆速值与实验爆速值的平均方差小于一次线性拟合爆速值与实验爆速值的平均方差,因此采用二次多项式拟合关系优于一次线性拟合关系。

爆速测试方法采用电测法^[6-7],分别对装药密度为 1.54、1.57、1.63、1.67、1.71、1.77 g/cm³ 的

* 收稿日期:2014-05-29

作者简介:李洪伟(1979~),男,副教授,主要从事含能材料性能研究。E-mail: lihw@aust.edu.cn

PETN 进行测试,所得爆速与 PETN 装药密度拟合曲线如图 1 所示。

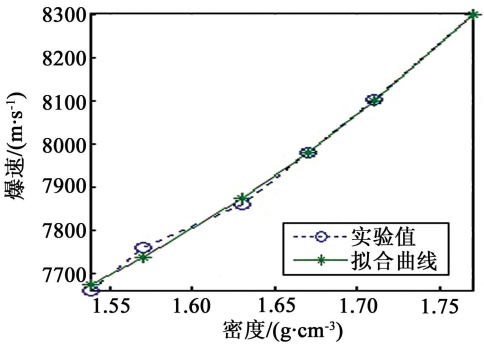


图 1 PETN 装药密度与爆速关系

Fig.1 Relationship between charge density and detonation velocity of PETN

图 1 中拟合曲线的对应方程为:

$$D = 3\,747.828\rho^2 - 9\,700.399\rho + 13\,727.288. \quad (3)$$

式中: D 为爆速, m/s ; ρ 为装药密度, g/cm^3 。

2.2 计算结果及拟合分析^[8]

根据式(1)、式(2)以及文献[5]中关于以上两式的推导过程自编计算程序,计算可得 p_x 、 u_x , 根据文献[5]由 u_x 得到 D_x , 参数值见表 1。表 1 中其他参数为中间过程参数, 详见文献[5]。

根据表 1 数据, 可以拟合得到装药密度和爆炸产物初始参数的关系, 如图 2 ~ 图 3 所示曲线。同样根据表 1 可以得到装药密度和爆炸冲击波初始速度的关系, 如图 4 所示。

图 2 拟合曲线的对应方程为:

$$u_x = 1\,862.103\rho^2 - 4\,469.520\rho + 9\,813.520. \quad (4)$$

式中: u_x 为爆炸产物初始速度, m/s ; ρ 为 PETN 装药密度, g/cm^3 。

图 3 拟合曲线的对应方程为:

$$p_x = -60.522\rho^3 + 344.583\rho^2 - 606.255\rho + 414.243. \quad (5)$$

式中: p_x 为爆炸产物初始压力, MPa ; ρ 为 PETN 装药密度, g/cm^3 。

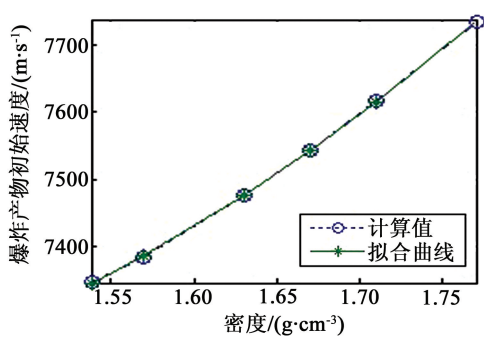


图 2 PETN 装药密度与爆炸产物初始速度关系

Fig.2 Relationship between charge density and initial velocity of explosion product of PETN

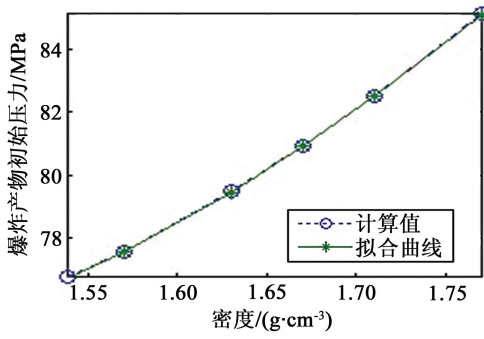


图 3 PETN 装药密度与爆炸产物初始压力关系

Fig.3 Relationship between charge density and initial pressure of explosion product of PETN

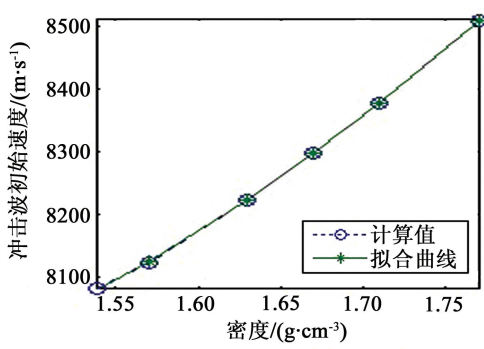


图 4 PETN 装药密度与冲击波初始速度关系

Fig.4 Relationship between charge density of PETN and initial velocity shock wave

表 1 不同装药密度 PETN 的爆炸相关参数

Tab.1 Explosion parameters of PETN with different charge densities

$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$D/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	p_K/MPa	$V_K/(\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1})$	$C_K/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$u_x/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	p_x/MPa	$D_x/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
1.54	7 660	363.22	0.001 80	1 027.79	7 345.6	76.743	8 080.1
1.57	7 760	354.19	0.001 79	1 017.02	7 384.1	77.550	8 122.5
1.63	7 857	329.73	0.001 80	990.95	7 475.5	79.482	8 223.0
1.67	7 980	308.85	0.001 82	969.92	7 543.2	80.930	8 297.6
1.71	8 100	284.52	0.001 85	945.64	7 616.4	82.507	8 378.0
1.77	8 300	242.16	0.001 92	902.27	7 735.7	85.111	8 509.2

图 4 拟合曲线的对应方程为:

$$D_x = 2\,042.738\rho^2 - 4\,898.086\rho + 10\,779.723.$$

(6)

式中: D_x 为冲击波初始速度, m/s ; ρ 为 PETN 装药密度, g/cm^3 。

由图 2 和式 (4) 可知, 爆炸产物初始速度与 PETN 装药密度近似服从式 (4) 的二次曲线方程; 由图 3 和式 (5) 可知, 爆炸产物初始压力与 PETN 装药密度近似服从式 (5) 的三次曲线方程; 由图 4 和式 (6) 可知, 冲击波初始速度与 PETN 装药密度近似服从式 (6) 的二次曲线方程。

以上相关关系目前未见文献报道。下文的拟合验证部分通过理论计算验证和实验验证两部分证明图 2 ~ 图 3 对应的关系式具有一定的准确度。

2.3 拟合计算公式的验证

用装药密度分别为 1.56、1.65、1.69、1.74 g/cm^3 的 PETN 验证拟合计算公式的可靠性, 表 2 给出了拟合方程计算结果与理论计算结果对比。由表 2 知 u_x 、 p_x 、 D_x 的相对误差均小于 0.1%, 证明拟合曲线方程式是可靠的, 能达到较准确的计算要求。

为了进一步验证由理论推导得到的拟合曲线计

算公式, 本文还对以上 4 种装药密度的 PETN 进行了爆压测试试验。测试药卷长 200 mm, 直径 38 mm, 炸药起爆方向与传感器在同一直线上, 药卷底端面垂直于地面, 距地面距离为 1.3 m。爆压测量系统包括: CY-YD-202 型自由场爆炸压力传感器; YE5853 型电荷放大器; 美国 Agilent 公司 54815A (S/N: US40500190) 型存储示波器; STYV-2 低噪音电缆。试验用 3 组平行试验测得距 PETN 爆心 0.4、1.0、1.5、2.0 m 处爆压, 取平均值, 测试结果如表 3 所示。

对于一般球形装药爆轰产物压力和炸药装药密度满足 $p_x = A\rho^3$, 且 ρ 与 r^{-3} (r 为球形装药直径) 成正比^[8], 即 p_x 与 r^{-9} 成正比, 考虑到本试验采用的柱形装药, 且本试验测得压力为药柱底端面垂直方向上的压力, 假设 p_x 与 r^β 成正比 (β 为考虑扩散的待定系数), 即 $p_x = Ar^\beta$ 。利用各个装药密度在对应测试位置的测试压力, 计算出 A 和 β , β 取平均值。计算得到 A 的平均值为 1.528, 4 种不同装药密度的 PETN 对应的 β 值见表 3, 进而计算出爆心距 0.1 m 处爆轰产物初始压力和拟合曲线计算压力 (表 3)。

表 3 显示拟合曲线计算公式计算爆炸产物初始

表 2 拟合曲线与理论计算结果对比

Tab. 2 Comparison of fitting curves and theoretical calculation results

方法	$\rho = 1.56\text{ g/cm}^3$			$\rho = 1.65\text{ g/cm}^3$			$\rho = 1.69\text{ g/cm}^3$			$\rho = 1.74\text{ g/cm}^3$		
	$u_x/$	$p_x/$	$D_x/$	$u_x/$	$p_x/$	$D_x/$	$u_x/$	$p_x/$	$D_x/$	$u_x/$	$p_x/$	$D_x/$
	($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	MPa	($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	MPa	($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	MPa	($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	MPa	($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
理论计算结果	7 370.0	77.256	8 107.0	7 508.7	80.190	8 259.5	7 579.2	81.702	8 337.0	7 674.6	83.773	8 442.0
拟合曲线计算结果	7 372.7	77.296	8 109.9	7 508.4	80.177	8 259.2	7 578.4	81.707	8 336.2	7 674.2	83.787	8 441.6
相对误差/%	0.04	0.05	0.04	0.00	0.02	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.02	0.00

表 3 拟合曲线计算与实验推测结果比较

Tab. 3 Comparison of fitting curves and the experimental speculation

$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	1.56	1.65	1.69	1.74
0.4m 处 p/MPa	7.512	7.890	7.621	7.582
1.0m 处 p/MPa	1.634	1.712	1.502	1.530
1.5m 处 p/MPa	0.774	0.740	0.752	0.763
2.0m 处 p/MPa	0.395	0.452	0.443	0.475
β	-1.738	-1.752	-1.741	-1.746
0.1m 处实验外推结果 p/MPa	83.584	86.322	84.163	85.138
0.1m 处拟合曲线 p/MPa	77.296	80.177	81.707	83.787
相对误差/%	8.14	7.66	3.01	1.61

压力和实验预测结果存在一定误差,最大误差为 8.14%,推导拟合曲线的相对误差 $\leq 10\%$ 均满足拟合曲线的要求。装药密度较小时,装药均匀性较差导致产生较大误差。产生误差的原因可能跟测试误差和爆轰产物扩散有关,表 3 显示装药密度大相对误差较小。

3 结论

在研究装药密度范围内,通过计算机编程实现 PETN 爆炸产物初始参数的计算,计算过程首先拟合出 PETN 密度和爆速的关系,再利用自编程序实现爆炸产物初始参数的计算,得出 PETN 装药密度和爆炸产物初始参数 u_x 、 p_x 、 D_x 的关系方程,关系方程如式(4)、式(5)和式(6)所示的多项式方程。表 2 显示理论计算结果与拟合曲线方程计算结果误差很小,表 3 结果证明拟合曲线方程与实验结果存在一定误差,最大误差为 8.14%。

参 考 文 献

- [1] 刘群,陈郎,伍俊英,等. PBX 炸药细观结构冲击点火的二维数值模拟[J]. 火炸药学报,2011,34(6):10-16.
Liu Qun, Chen Lang, Wu Junying, et al. Two-dimensional mesoscale simulation of shock ignition in PBX explosives[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2011, 34(6):10-16.
- [2] 李德华,程新路,杨向东,等. PETN、RDX 和 HMX 炸药爆轰参数的数值模拟[J]. 爆炸与冲击,2005, 25(4): 325-329.
Li Dehua, Cheng Xinlu, Yang Xiangdong, et al. Numerical simulation of detonation parameters for PETN, RDX and HMX explosives[J]. Explosion and Shock Waves, 2005, 25(4):325-329.

- [3] 王神送,张立,程宏兵. 装药密度对空气冲击波参数影响的实验研究[J]. 爆破器材,2010,39(1):4-7.
Wang Shensong, Zhang Li, Cheng Hongbing. Experimental study for effect of charge density on the air shock-wave parameters[J]. Explosive Materials, 2010, 39(1):4-7.
- [4] 冯晓军,王晓峰,徐洪涛,等. AP 对炸药空中爆炸参数的影响[J]. 火炸药学报,2010,33(2):40-44.
Feng Xiaojun, Wang Xiaofeng, Xu Hongtao, et al. Effect of AP on the air explosion parameters of explosive[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2010, 33(2):40-44.
- [5] 张俊秀,刘光烈. 爆炸及其应用技术[M]. 北京:兵器工业出版社,1998.
- [6] 张立. 爆破器材性能与爆炸效应测试[M]. 北京:中国科学技术出版社,2006.
- [7] 吴国群,黄文尧,王晓光,等. 二级煤矿许用乳化炸药爆轰参数的理论计算[J]. 安徽理工大学学报:自然科学版,2008,28(1):78-80.
Wu Guoqun, Huang Wenyao, Wang Xiaoguang, et al. Theoretical calculation of detonation parameters of emulsified explosive materials of class II use permissibility in coal mine[J]. Journal of Anhui University of Science and Technology:Natural Science, 2008, 28(1):78-80.
- [8] 唐敬友,岳朋涛,谷岩,等. 甲烷气体的冲击状态方程数值计算[J]. 空气动力学学报,2003,21(2):164-172.
Tang Jingyou, Yue Pengtao, Gu Yan, et al. One-dimensional numerical computation for equation of state of gaseous methane under shock compression[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2003, 21(2):164-172.

Calculation Research on the Initial Parameters of PETN Explosion Products in Air

LI Hongwei, YAN Shilong, GUO Ziru, DU Mingran, HE Zhiwei

School of Chemical Engineering, Anhui University of Science and Technology (Anhui Huainan, 232001)

[ABSTRACT] In order to research the initial parameters of PETN explosion products, computer numerical simulation was used to fit the relationship of PETN charge density and detonation velocity which based on explosion theory. Calculation of initial parameters of explosion product was realized by computer programming, and fit curves and equations of the correlation between initial parameters of explosion products and the density of PETN charge were also obtained. Initial parameters of explosion products, which were produced by PETN with the density of 1.56、1.65、1.69 g/cm³ and 1.74 g/cm³ separately, were used to verify the accuracy of fitting equation. The results show that the fitting relationship equation has a very high accuracy.

[KEY WORDS] mechanics of explosion; PETN; numerical simulation; electrical measurement method; parameter