文章编号：1001-1455(2011)04-0397-05

侧向稀疏波对非均质凝聚炸药冲击波起爆过程的影响*

陶为俊[1]，浣 石[1]，黄风雷[2]，蒋国平[1]

（1.广州大学工程抗震研究中心，广东 广州 510405；
2.北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室，北京 100081）

摘要：以压装 TNT 为例，开展二维拉氏实验，利用二维锰铜-康铜组合拉氏量计测量了轴对称位置和径向位置的压力时程曲线和径向位移曲线。同时利用二维拉格朗日分析计算程序 RFLA 对压装 TNT 的冲击波起爆过程进行了计算，分别得到了在 2 个不同径向位置上各个 Lagrange 位置上的质点速度、相对比容、比内能等时程曲线。研究结果展现了侧向稀疏波对非均质炸药冲击起爆过程中各个流场物理量的影响。

关键词：爆炸力学；冲击起爆；拉格朗日分析；炸药

中图分类号：O381 **国标学科代码**：130・3510 **文献标志码**：A

近几十年来，非均质凝聚炸药冲击起爆过程的动力学研究，一直是爆轰领域中的一个重要研究方向，其重要性涉及到炸药的安全性和可靠性问题。随着各种爆炸系列的设计日益精密化，需要了解能量的传输规律和输出极限，更需要控制各种压强波形，这进一步促进了该项研究的发展。

影响非均质凝聚炸药冲击起爆过程的因素很多，例如直径效应、颗粒度、装药密度、约束条件、起爆压力等。很多学者对各种因素已进行了深入的研究，如何远航等[1]对凝聚炸药直径效应和熄爆直径进行了理论研究，得到了直径效应和熄爆直径的理论计算方法；赵继波等[2]对带壳钝感炸药非理想爆轰进行了实验研究，认为波阻抗越大的约束能更有效地减小侧向稀疏的影响；王作山等[3]对约束条件对传爆药输出压力的影响进行了研究，认为约束条件在装药直径为 1.5 mm 时影响最大。C. M. Tarver 等[4-5]、P. A. Urtiew 等[6-8]和 K. Bahl 等[9]对 LX-04、LX-17 药柱在没约束和弱约束下的冲击感度进行了研究，认为弱约束下的冲击感度较没约束时有所增加，并作出了相应的解释。

本文中根据小隔板实验和拉格朗日分析方法，以压装 TNT 为例分析侧向稀疏波对非均质凝聚炸药冲击起爆的影响。拉格朗日分析方法[10-12]基于拉氏量计的测量结果，对一维不定常流体动力学方程组进行数值计算。浣石提出了二维拉格朗日分析方法[13]，设计了二维拉格朗日传感器[14-15]，将一维分析流场扩展到二维，可为研究侧向稀疏波对炸药冲击起爆过程的影响提供理论和实验条件。

1 实 验

为研究侧向稀疏波对非均质凝聚炸药冲击波起爆过程的影响，采用二维小隔板实验，实验系统见图 1，包括加载装置、待测样品、锰铜-康铜二维组合拉氏量计、触发探针、恒流源以及信号传输和记录系统。

对于传统的一维拉格朗日实验，需要利用平面波发生器产生平面波，并将拉氏量计放置在轴对称位置，以减小侧向稀疏波对其产生的影响。在隔板实验中，采用二维锰铜康铜组合拉氏量计[14-15]。二维锰铜康铜组合拉氏量计能够同时测量压力与拉伸，这为研究侧向稀疏波对炸药起爆过程的影响提供了实验条件。实验中传感器的布置如图 2 所示，采用圆柱形装药，在同一个拉格朗日位置上放置 2 个传感器，一个放置在轴对称位置（$r_0=0$），另一个放置在径向位置（$r_0=11.25$ mm）。

* **收稿日期**：2010-04-13；**修回日期**：2010-07-12
基金项目：国家自然科学基金项目(10972060)
作者简介：陶为俊(1981—)，男，博士研究生。

加载药柱采用 TNT,装药密度为 1.60 g/cm³。被发炸药为压装 TNT,装药密度为 1.58 g/cm³。药柱直径约为 20.0 mm,由长 2.0～4.0 mm 不等的小药柱组成,二维拉氏量计放置在小药柱之间。4 个拉格朗日位置分别为 0.00、3.01、5.14、8.11 mm。

实验中由示波器记录电压变化过程,示波器测量出由于二维锰铜-康铜组合量计电阻的变化而引起的电压的变化。将电压转变为压力和径向位移,其参数可以通过动态标定实验[13]进行标定,具体方程如下

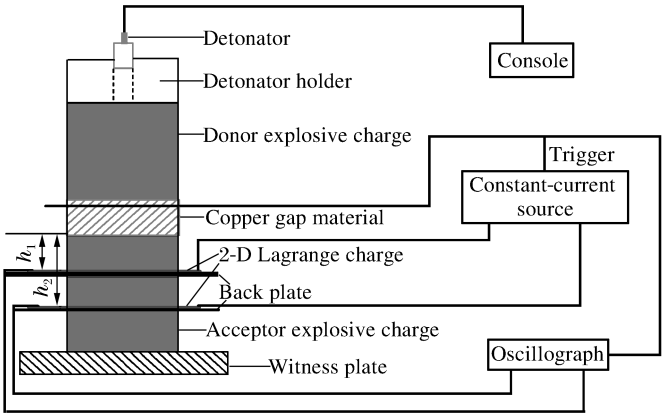

图 1 小隔板实验装置图

Fig. 1 Experimental setup for small scale gap test

$$p=\alpha\left[\left(\frac{\Delta R}{R_0}\right)_{\mathrm{m}}-\frac{K_{\mathrm{m}}}{K_{\mathrm{c}}}\left(\frac{\Delta R}{R_0}\right)_{\mathrm{c}}\right],\quad l=l_0\left[1+\frac{1}{K_{\mathrm{c}}}\left(\frac{\Delta R}{R_0}\right)_{\mathrm{c}}\right] \tag{1}$$

式中:p 是压力,α 是锰铜压阻系数,ΔR 是电阻的变化,R_0 是初始电阻,$(\Delta R/R_0)_{\mathrm{m}}$ 和 $(\Delta R/R_0)_{\mathrm{c}}$ 分别表示锰铜和康铜的相对电阻变化。K_{m} 和 K_{c} 分别表示锰铜和康铜的拉伸系数,l 是径向位移,l_0 是敏感部分的初始长度。锰铜量计的压阻系数 α 由动态实验标定,其标定结果如下

$$p=0.27+34.40\frac{\Delta R}{R_0}+1.07\left(\frac{\Delta R}{R_0}\right)^2 \tag{2}$$

式中:$\dfrac{\Delta R}{R_0}=\left(\dfrac{\Delta R}{R_0}\right)_{\mathrm{m}}-\dfrac{K_{\mathrm{m}}}{K_{\mathrm{c}}}\left(\dfrac{\Delta R}{R_0}\right)_{\mathrm{c}}$。

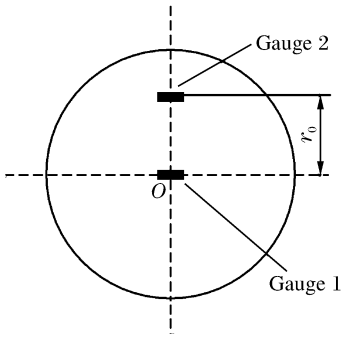

图 2 同一个拉氏位置上的 2 个二维拉氏量计

Fig. 2 Two 2-D CMC Lagrange gauges at the same Lagrangian position

2 实验结果与分析

根据实验测出的电压信号,通过式(1)～(2)可以将各个拉氏位置处的电压信号转化为压力和径向位移曲线。从图 3 可以看出,在相同的径向 r_0 时,压力曲线的变化关系满足李群相似解。比较对称轴位置($r_0=0$)与径向 $r_0=11.25$ mm 可以得出,对于相同的拉氏位置,前导冲击波先到达对称轴位置,然后才到达 $r_0=11.25$ mm 处,而且随着反应的进行,两者的时间差越来越大;说明由于侧向稀疏波的作用,在 $r_0=11.25$ mm 处的前导冲击波上升速度减慢了。对于前导冲击波的压力,由于侧向稀疏波的作用,对称轴处的压力也高于 $r_0=11.25$ mm 的压力,并且对称轴附近的压力上升的速度也明显高于 $r_0=11.25$ mm 处的压力。从图 4 可以看出,径向位移在对称轴附近小于 $r_0=11.25$ mm 处的径向位移,且在 $r_0=11.25$ mm 处的径向位移较明显,说明径向位移在拉氏分析中不可忽视。

将上述的压力和径向位移通过拉氏分析计算程序,得到了反应产物流场中的质速史、比容史、比内能史等,结果如图 5～7 所示。

图 5 为质点的速度迹线族,从图中可以看出,在对称轴区域($r_0=0$),前导冲击波阵面上质点的速度随着冲击波压力的增强而迅速增大;而对于对称轴区域的每条迹线来说,由于前导冲击波作用,质点速度首先表现为一个脉冲,然后随着化学反应的进行,质点速度继续增加,最后,随着该处流场反应的进行,质点速度迅速减小。而在 $r_0=11.25$ mm 处,前导冲击波阵面上质点的速度变化很小(基本没变化),说明侧向稀疏波对该区域的影响很大。比较两者发现,在 $r_0=11.25$ mm 处的质点速度比轴对称附近的质点速度大,这主要是由于侧向稀疏波的作用造成的。由于侧向稀疏波的影响,反应区膨胀,质点速度增加。这样在反应未完成前就可能达到超声速,因此,反应终点不一定是声速点。

图 6 为相对比容迹线族,在对称轴区域,前导冲击波压缩炸药使相对比容减小,越往后,前导冲击波

压力越大，压缩越大，相对比容越小。随着反应的进行，反应区膨胀，相对比容增大。$r_0=11.25$ mm 处，由于侧向稀疏波的影响，前导冲击波压力增长缓慢，相对比容变化很小；随着反应的进行，相对比容增加速度缓慢，之后一段时间相对比容又迅速增大。

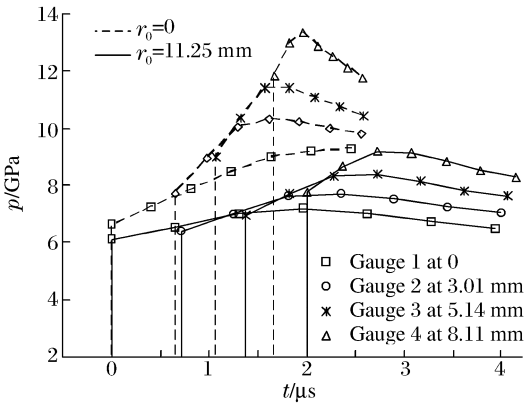

图 3　压力时程曲线

Fig. 3　Pressure histories

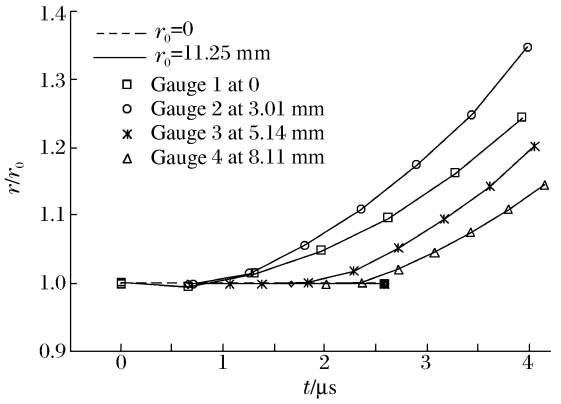

图 4　径向位移时程曲线

Fig. 4　Relative radial displacement histories

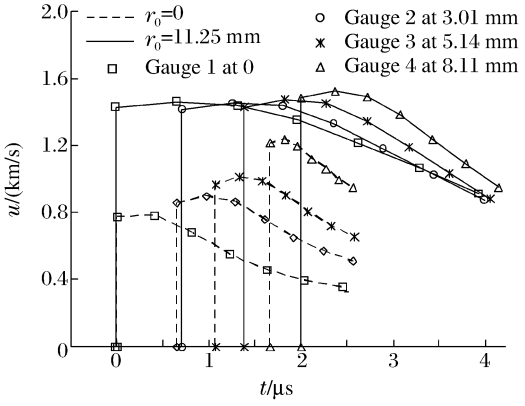

图 5　质点速度时程曲线

Fig. 5　Particle velocity histories

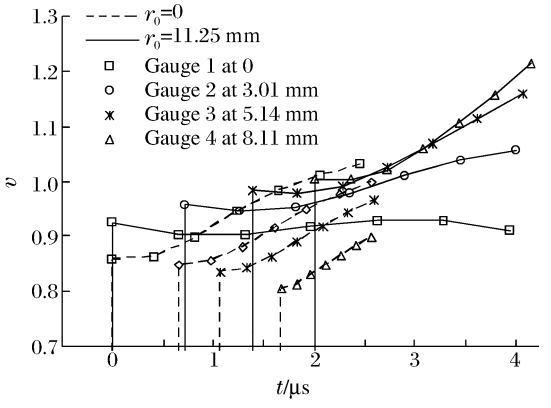

图 6　相对比容时程曲线

Fig. 6　Relative specific volume histories

从图 7 中比内能迹线族可以看出对称轴附近由于前导冲击波的压缩作用，炸药的比内能增加，随着反应进行，比内能迅速减小。且随着反应的加快，比内能减小的速度也不断加快。$r_0=11.25$ mm 处比内能的减小比对称轴附近缓慢，对拉氏位置 $h_1=0$ 处的时程曲线，比内能下降很少，可能是由于侧向稀疏波导致此处的炸药只有少量参与反应，因此冲击起爆过程中药柱边界附近的炸药可能没有完全反应。而且各个拉氏位置处的比内能基本一致，说明在侧向边界区域，爆轰波传播与化学反应的能量释放速度与侧向稀疏波引起的能量耗散速度基本相当。冲击波的作用很大一部分被侧向稀疏波吞噬。

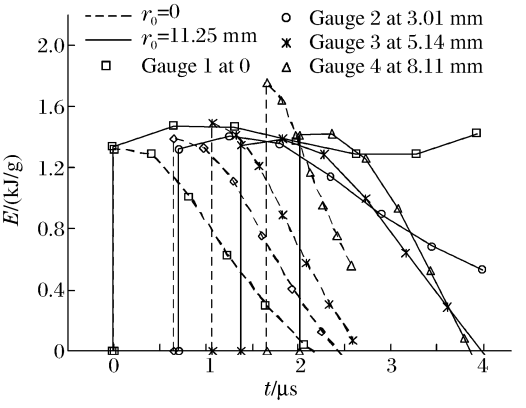

图 7　比内能时程曲线

Fig. 7　Specific internal energy histories

图 8 为反应度迹线族，通过对比对称轴附近和径向 $r_0=11.25$ mm 处的结果，不难发现，在对称轴位置处化学反应速度明显高于径向 $r_0=11.25$ mm 处的化学反应速度。说明侧向稀疏波降低了炸药的化学反应度。

图 9 为冻结声速迹线族,对比径向不同的 2 个位置可以发现,轴对称位置处的声速高于径向 $r_0=11.25$ mm 处的声速,而且轴对称位置处声速下降的速度也较快,说明在中心轴对称位置处,由于压力、化学反应速度都比外侧的大,介质的状态改变也较大,因此,中心轴对称位置处冻结声速的变化也很大。

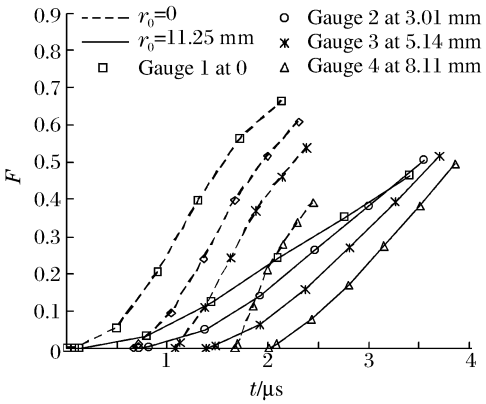

图 8 反应度时程曲线

Fig. 8 Reaction rate histories

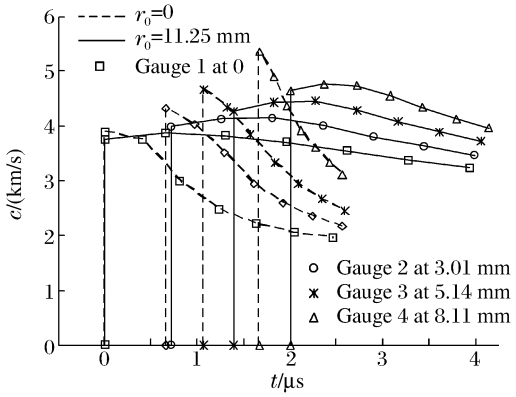

图 9 冻结声速时程曲线

Fig. 9 Frozen sound histories

3 结 论

(1)通过二维拉氏实验和二维锰铜-康铜组合量计,测量了轴对称位置($r_0=0$)和径向位置($r_0=11.25$ mm)的压力时程曲线和径向位移曲线。

(2)压力时程曲线满足李群相似解。前导冲击波阵面上质点的速度随着冲击波压力的增强而增大,随着流场反应的进行,质点速度迅速减小。由于前导冲击波冲击压缩炸药,相对比容在初始时刻附近稍有减小,然后越来越大,而比内能则开始有稍微的增加;随着反应的加快进行,化学释能速度迅速增加,比内能迅速减小。

(3)侧向稀疏波的影响致使边界位置处的压力低于中心位置处的压力,上升速度缓慢,相对比容增大,质点速度也明显变大,相对比内能减小缓慢。

(4)由于存在侧向膨胀,致使反应区的能量密度减小,波阵面的强度降低,所激发的化学反应速度降低,进而导致爆轰波传播速度下降。同时,使反应区展宽,这又反过来使得爆轰的强度弱化。

参考文献:

[1] 何远航,黄风雷,浣石.凝聚炸药直径效应和熄爆直径的理论研究[J].兵工学报,1997,18(1):38-41.
HE Yuan-hang, HUANG Feng-lei, HUAN Shi. Theoretical studies on the diameter effect and the failure diameter of condensed explosives[J]. Acta Armamentarii, 1997,18(1):38-41.

[2] 赵继波,谭多望,赵锋,等.带壳钝感炸药非理想爆轰实验研究[J].含能材料,2005,13(4):217-221.
ZHAO Ji-bo, TAN Duo-wang, ZHAO Feng, et al. Experimental study on the non-ideal detonation of IHE with confinements[J]. Energetic Materials, 2005,13(4):217-221.

[3] 王作山,刘玉存,张景林,等.约束条件对传爆药输出压力的影响[J].火炸药学报,2003,26(2):10-12.
WANG Zuo-shan, LIU Yu-cun, ZHANG Jing-lin, et al. Effect of restraint conditions on shock pressure of booster [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2003,26(2):10-12.

[4] Tarver C M, Kury J W, Breithaupt R D. Detonation waves in triaminotrinitrobenzene[J]. Journal of Applied Physics, 1997,82(8):3771-3782.

[5] Tarver C M, Hallquist J O, Erickson L M. Modeling short pulse duration shock initiation of solid explosives[C]// Proceedings of the 8th International Symposium on Detonation. Albuquerque, NM: Naval Surface Weapons Center NSWC 86-194, 1985:951-960.

[6] Urtiew P A, Erickson L M, Aldis D F, et al. Shock initiation of LX-17 as a function of its initial temperature[C]

// Proceedings of the 9th International Symposium on Detonation. Portland, OR: Office of the Chief of Naval Research OCNR 113291-7, 1989:112.

[7] Urtiew P A, Tarver C M, Maienschein J L, et al. Effect of confinement and thermal cycling on the shock initiation of LX-17[J]. Combustion and Flame, 1996,105(1/2):43-53.

[8] Urtiew P A, Tarver C M, Forbes J W, et al. Shock sensitivity of LX-04 at elevated temperatures[C]// Schmidt S C, Dandekar D P, Forbes J W. Proceedings of the 10th American Physical Society Topical Conference on Shock Compression of Condensed Matter. Woodbury, NY, 1998,429:727-730.

[9] Bahl K, Bloom G, Erickson L, et al. Initiation studies on LX-17 explosive[C]// Proceedings of the 8th International Symposium on Detonation. Albuquerque, NM: Naval Surface Weapons Center NSWC MP 86-194, 1985:1045.

[10] Fowles R, Williams R F. Plane stress wave propagation in solids[J]. Journal of Applied Physics, 1970,41(1):360-363.

[11] Grady D E. Experimental analysis of spherical wave propagation[J]. Journal of Geophysical Research, 1973,78(8):1299-1307.

[12] Seaman L. Lagrangian analysis for multiple stress or velocity gages in attenuation waves[J]. Journal of Applied Physics, 1974,45(10):4303-4314.

[13] 浣石.非均质炸药冲击波起爆和二维稳态爆轰的研究[D].北京:北京理工大学,1988:32.

[14] HUAN Shi, DING Jing. A two-dimensional Lagrangian technique for shock initiation diagnosis[C]// Proceedings of the 9th International Symposium on Detonation. Portland, Oregon: Office of the Chief of Naval Research, OCNR 113291-7, 1989:77-82.

[15] HUAN Shi, DING Jing. A two-dimensional Lagrangian technique for flow field measurement under high dynamic pressure[J]. Acta Mechanica Sinica, 1990,6(2):188-192.

Lateral rarefaction wave effects on shock initiation of heterogeneous condensed explosives*

TAO Wei-jun[1], HUAN Shi[1], HUANG Feng-lei[2], JIANG Guo-ping[1]

(1. *Earthquake Engineering Research Test Center, Guangzhou University, Guangzhou* 510405, *Guangdong, China*;
2. *State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing* 100081, *China*)

Abstract: Pressed TNT explosive was chosen to carry out 2-D Lagrangian experiments. There lied two 2-D composite manganin-constantan (CMC) Lagrangian gauges at the same Lagrangian position. And the two gauges were placed on and off the axis, respectively. The pressure and radial displacement were measured by the CMC Lagrangian gauges embedded between individual discs of explosives. And the shock initiation process of the pressed TNT was analyzed by using the 2-D reactive flow Lagrangian analysis. At the different Lagrangian positions, some variables were gained, such as particle velocity, relative specific volume, specific internal energy, reaction rate and frozen sound speed. Results reveal the effects of lateral rarefaction waves on explosive variables during shock initiation.

Key words: mechanics of explosion; shock initiation; Lagrangian analysis; explosives

---

* Received 13 April 2010; Revised 12 July 2010
Supported by the National Natural Science Foundation of China (10972060)
Corresponding author: TAO Wei-jun, 44913301@qq.com

(责任编辑　张凌云)