DOI: 10.11883/bzycj-2016-0293
文章编号: 1001-1455(2018)03-0632-07

聚奥-9C 装药的传爆管殉爆*

袁俊明[1],李 硕[1],刘玉存[1],唐 鑫[1],于雁武[1],闫利伟[2]
(1.中北大学环境与安全工程学院,山西 太原 030051;
2.辽宁北方华丰特种化工有限公司,辽宁 抚顺 113003)

摘要: 为了研究冲击波作用下引信传爆装置的响应规律,进行了以主发炸药为 RDX-8701、被发装置为聚奥-9C(JO-9C) 装药的传爆管(含导爆药柱)的殉爆实验。通过观测残留传爆药、壳体和见证块变形,判断传爆管的爆炸程度,分析了殉爆过程中 JO-9C 爆轰波的成长历程及传播规律。采用 AUTODYN 软件建立了殉爆实验有限元模型,计算模型中主要考虑了主发炸药产生的爆炸冲击波对传爆管的冲击响应。基于流固耦合方法,通过调整距离模拟计算得到了传爆管的临界殉爆距离和殉爆安全距离。结果表明,传爆管上端的侧角受到爆炸冲击后产生的爆轰波沿斜下方传播,使传爆药柱完全爆轰,并引起导爆药柱发生殉爆;数值模拟结果显示,JO-9C 装药的传爆管临界殉爆距离为 5.7 mm,殉爆安全距离为 8.8 mm。

关键词: 聚奥-9C 装药;传爆管;殉爆;点火增长模型
中图分类号: O381 **国标学科代码**: 1303510 **文献标志码**: A

炸药是一种含能物质,在受到足够强的外界刺激(如力、热、光、电等)作用时会发生爆炸,并可能造成临近炸药的殉爆。由于殉爆的存在,弹药在储存和运输时必须考虑各个弹药以及弹药库之间的距离,否则一旦单个弹药系统意外引爆,就会引起其他弹药以及弹药库发生爆炸,造成无法挽回的后果。殉爆现象使弹药的储存、运输及使用变得更加困难和复杂,所以深入了解弹药系统间发生殉爆的机理、避免弹药发生意外殉爆以及减轻由于殉爆而发生的危害具有十分重要的意义。

由于炸药本身已具备较高的机械感度和冲击波感度,在外界刺激作用下极易发生爆炸或爆轰,所以对殉爆的研究工作主要集中在炸药性质上,并对炸药的殉爆机理进行了较完整、充分的描述。Lu 等[1]对裸装 PBXN-109 炸药的殉爆实验进行了数值模拟,并给出了 PBXN-109 炸药的冲击波感度曲线。Fisher 等[2]则对壳装 PBXN-109 炸药的殉爆实验进行了数值模拟,分析了包装容器中弹药间的冲击波与泡沫隔离层材料对炸药殉爆的影响。Mostafa 等[3]开发了一种轻型硬质聚氨酯泡沫塑料并进行测试,对裸装炸药殉爆时爆轰波的成长情况进行了研究。周保顺等[4]对冲击波作用下炸药的殉爆过程进行了数值模拟。陈朗等[5]计算了不同距离下裸装固黑铝(GHL)炸药的临界殉爆距离。除了对裸装炸药和较近殉爆距离下壳装炸药的殉爆实验进行计算研究,姜颖资等[6]应用 Lee-Tarver 点火增长模型对 3 种不同运动速度的两种主发炸药 TNT 和 PBX9404 作用下带壳炸药的临界殉爆距离进行数值模拟研究。王晨等[7]进行了壳装固黑铝(GHL)炸药的殉爆实验,并建立有限元模型进行模拟计算。随着现代固体推进剂能量的提高和火炸药技术的融合,含有炸药颗粒的高能固体推进剂极易导致殉爆的发生。路胜卓等[8]采用实验和数值模拟对比相结合的分析方法,研究了某高能固体推进剂的殉爆过程,揭示了壳装高能固体推进剂的殉爆特性。

对战斗部主装药如裸装和壳装炸药等殉爆研究工作已取得了较多成果,但对含炸药的复杂结构如弹药引爆系统的传爆序列殉爆研究工作尚未见详细报道。如果传爆序列安全性不能保证,就会引发弹药安全系统失效,甚至导致爆炸事故发生。基于榴弹引信结构,本文中主要针对传爆序列的传爆管进行殉爆实验,并考虑了导爆药柱的作用。殉爆实验中的主发炸药为 RDX-8701、被发装置为 JO-9C 装药的

* **收稿日期**: 2016-09-23; **修回日期**: 2016-11-08
基金项目: 中物院安全弹药研发中心开放基金项目(RMC2014B03)
第一作者: 袁俊明(1979—),男,博士,副教授,junmyuan@163.com。

传爆管，通过实验分析导爆药柱及传爆管的殉爆规律，建立全尺寸 JO-9C 装药的传爆管殉爆实验有限元模型，利用 AUTODYN 软件进行模拟计算，基于实验与计算结果对比分析，获得引信传爆管的殉爆距离及安全距离。

1　实　验

殉爆实验装置如图 1 所示。此实验装置由主发炸药、JO-9C 装药的传爆管、钢套筒、雷管以及见证块等部分组成，d_1、d_2 是实验殉爆距离。主发炸药为 RDX-8701、被发装置为 JO-9C 装药的传爆管，在不同距离下对 JO-9C 装药的传爆管进行殉爆实验。实验中，由雷管起爆主发炸药，主发炸药爆炸产生的冲击波经空气传播后作用于整个传爆管，通过观察钢壳体碎裂、壳体内侧炸药残留情况，并测量出见证块的凹坑深度，从而判断传爆管中药柱的爆炸情况，得到临界殉爆距离和殉爆安全距离。图 2 是殉爆实验现场照片。钢套筒材料为 45 钢，密度 7.842 g/cm^3，导爆药柱钢套的外径 17 mm、内径 5 mm、高 7 mm，传爆药柱钢套的外径 17 mm、内径 15 mm、高 13 mm，殉爆实验的实验距离分别为 5、6、8 和 10 mm。

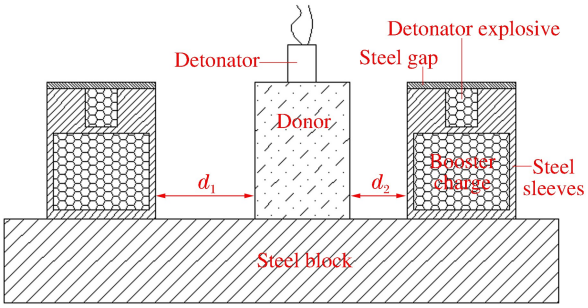


图 1　殉爆实验示意图

Fig. 1　Sketch of sympathetic detonation experiment

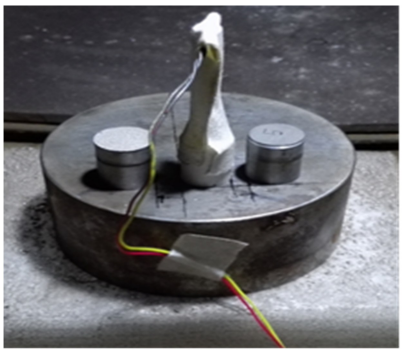


图 2　殉爆实验装置

Fig. 2　Sympathetic detonation experimental apparatus

2　数值计算

2.1　物理模型及算法

采用非线性有限元软件 AUTODYN 对 JO-9C 传爆药的传爆管殉爆实验进行数值模拟，并根据实验装置建立相应的二维模型。模型不考虑雷管，将主发炸药最上端的中心点设置为起爆点，即图 3 中的红色点。殉爆实验有限元模型如图 3 所示。

模型中的计算区域主要包括主发炸药、导爆药柱、传爆药柱、钢壳体、见证块以及周围一定范围的空气介质。采用单点多物质流固耦合算法，即主发炸药和空气域选用 Euler 网格，导、传爆药柱、钢壳体、见证块为 Lagrange 网格，Lagrange 网格置入 Euler 网格中。

为简化模型并与实验相对应，模型中仅建立一个主发炸药，由 JO-9C 传爆药构成的传爆管分别设立在主发炸药的左右两侧。模型中的主发炸药和钢见证块采用与空气域相同的 0.5 mm网格，药柱及药柱外侧钢壳体网格为 0.25 mm。

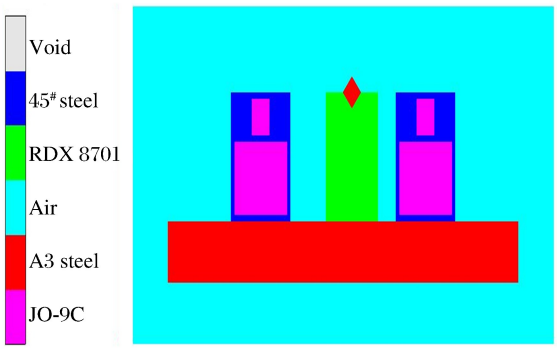


图 3　殉爆实验有限元模型

Fig. 3　Finite element model of sympathetic detonation experiment

2.2 材料参数及状态方程

殉爆实验的模拟计算中，主发炸药为 RDX 炸药，采用爆轰产物的 JWL 状态方程：

$$p=A(1-\omega/(R_1V))\,\mathrm{e}^{-R_1V}+B(1-\omega/(R_2V))\,\mathrm{e}^{-R_2V}+\omega E/V \tag{1}$$

式中：A、B、R_1、R_2、ω 为待拟合参数；E 为初始比内能；p 为爆轰产物的压力。

对于传爆药 JO-9C，采用流体弹塑性材料模型和点火及增长状态方程描述，未反应炸药采用 JWL 状态方程，爆轰产物的反应速率采用三项式点火增长模型的反应速率方程：

$$\mathrm{d}\lambda/\mathrm{d}t=I(1-\lambda)^b(\rho/\rho_0-1-a)^x+G_1(1-\lambda)^c\lambda^d p^y+G_2(1-\lambda)^e\lambda^d p^z \tag{2}$$

式中：I、G_1、G_2、a、b、x、c、d、y、e、g 和 z 为 12 个可调的拟合系数；a 为临界压缩度；λ 为炸药反应度；b、c 表示内向的球形颗粒燃烧；G_1、d 控制点火后热点早期的反应增长；G_2、e、g、z 决定高压下的反应速率；I、x 控制点火热点的数量；ρ 为密度；y 为压力指数；p 为反应压力。

主发炸药 RDX-8701 的 JWL 方程相关参数来自文献[9]。JO-9C 的三项式点火增长模型参数是以 LX-10 炸药（$\rho=1.862$ g/cm^3，95HMX/5 氟橡胶）和 PBX-9501 炸药（$\rho=1.832$ g/cm^3，95HMX/2.5Estane/2.5NP）的参数[10]为基础以及 JO-9C 传爆药的小隔板实验结果进行微调得到，所确定的 JO-9C 参数分别为：

未反应时，$A=952.2$ TPa，$B=-5.944$ GPa，$R_1=14.1$，$R_2=1.41$，$\omega=0.886\ 7$，$G=5$ GPa，$Y=0.2$ GPa，$\rho=1.70$g/cm^3；

产物，$A=614$ GPa，$B=10.89$ GPa，$R_1=4.416\ 04$，$R_2=1.19$，$\omega=0.33$，$E_0=9.08$ GPa，$D=8.212\ 5$ km/s，$p=30.4$ GPa；

反应速率方程中，$a=0.022$，$b=0.667$，$c=0.667$，$d=0.267$，$e=0.333$，$g=1.0$，$I=4\times10^6\ \mu\mathrm{s}^{-1}$，$x=4$，$y=2$，$z=3$，$F_{\mathrm{ig,max}}=0.022$，$F_{G_1,\mathrm{max}}=0.5$，$F_{G_2,\mathrm{min}}=0.5$，$G_1=28$ TPa/μs，$G_2=25$ TPa/μs。

殉爆实验有限元模型中，药柱钢壳体选择 45 钢，鉴定块为 A3 钢。两种材料均采用 Johnson-Cook 强度模型，状态方程为 Grüneisen 状态方程，强度理论为 von Mises 准则[11]。

空气对应的材料模型采用线性多项式方程和理想气体的状态方程，密度取标准状态下 $\rho=1.225$ kg/m^3。

3 分析及讨论

3.1 实验结果

根据 GJB 2178.1A-2005《传爆药安全性试验方法》，取在主发炸药和被发炸药中间无隔板，即零间隙所对应钢凹值的 50%为判据，钢凹深不小于此值判为爆，小于此值判为不爆。根据 JO-9C 装药的传爆管零间隙冲击起爆实验结果可知，传爆管完全爆轰时见证块钢凹值为 2.4 mm。图 4～7 分别是 5 和 10 mm、6 和 8 mm 两组工况的殉爆实验结果。



图 4 距离 5 和 10 mm 时见证块凹坑

Fig. 4 Deformation of steel witness plate at 5 and 10 mm



图 5 距离 10 mm 时传爆管殉爆效果

Fig. 5 Blasting effect of booster pipe at 10 mm



图 6 实验距离 6 和 8 mm 见证块凹坑

Fig. 6 Deformation of steel witness plate at 6 and 8 mm



图 7 距离 8 mm 时传爆管殉爆效果

Fig. 7 Blasting effect of booster pipe at 8 mm

主发炸药爆炸后产生的凹坑深度为 2.2 mm，距离主发炸药 5 mm 处传爆管爆炸后的凹坑深度为 1.2 mm，凹坑端面口径约为 18.32 mm，与传爆管的外径基本一致，药柱完全爆炸。通过测量传爆管处的凹坑，发现距主发炸药稍远一端的凹坑深度为 0.2 mm，当主发炸药发生爆炸后，产生的冲击波经过空气传播作用于传爆管侧面的管壳，并经约束管壳衰减后的冲击波冲击引爆传爆药柱。实验后未收集到钢壳碎片，也未在约束套筒外壁发现残留炸药，结合见证块凹坑深度可确定距离 5 mm 时，传爆管发生了稳定爆轰。

从图 5 可知，实验距离 10 mm 时传爆管壳体向内凹陷并发生变形，隔板微微上翘但形状基本保持完好，管壁上存有大量残留炸药，表明管内只有少量 JO-9C 炸药发生反应。从图 6 可知，实验距离 6 和 8 mm 时传爆管爆炸后的见证块仅有凹陷痕迹，未出现明显凹坑，无法测出准确的凹坑值。图 7 是距离 8 mm 时钢约束壳体的变形照片，传爆药柱钢壳体发生严重的塑性变形并向内凹陷，导爆药柱钢壳体发生轻微变形并有残留炸药，与距离 10 mm 的实验现象相似，表明冲击波对药柱两侧有不同的冲击作用，主发炸药爆炸对传爆管的作用主要集中在中下部。

3.2　数值模拟结果

在 $t=0$ 时刻以点起爆方式引爆 RDX-8701 主发炸药，主发炸药在药柱顶端发生非理想爆轰，爆炸后产生的冲击波经过空气以及钢壳体衰减后作用于传爆管，根据冲击波在传爆管药柱中的传播方向，选取不同位置单元点观察冲击波在传爆药柱及导爆药柱内的成长状况。

从图 8 可以看出，在距离为 5 mm 的殉爆实验中，主发炸药产生的爆炸冲击波作用于传爆管的上端侧面一角，先引爆传爆药柱，后爆轰波沿传爆药柱的斜角方向继续往下传播。当爆轰波经过导爆药柱壳体下方时，经壳体衰减后冲击波使导爆药柱殉爆，而传爆药柱的爆轰波持续沿斜角向下方传播，进而起爆整个传爆管，整个殉爆作用过程约 5.47 μs。

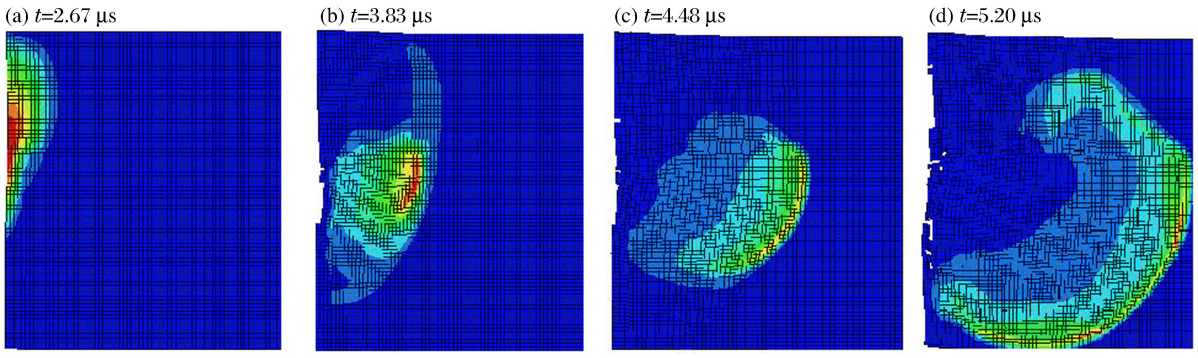


图 8 距离 5 mm 时传爆管殉爆压力云图

Fig. 8 Pressure contours of sympathetic detonation for booster pipe at 5 mm

3.2.1 不同距离的殉爆实验

分别对实验距离为 5、6、8 和 10 mm 的殉爆实验进行数值模拟计算，其中图 9～10 为距离 5 mm 时传爆药柱和导爆药柱的压力曲线。由图 9 可见，在 $t=2.25$ μs 时冲击波进入传爆药柱，引起爆炸反应，起爆点 1 的初始峰值压力约为 6.4 GPa，随着冲击波的传播，波阵面的压力值越来越高，从 $t=4.66$ μs 开始，观测点压力值达到 28 GPa，逐渐发展成稳定的爆轰波，直到在传爆药柱反应后期达到并稳定维持在 JO-9C 的爆压值 30 GPa 左右，炸药发生稳定爆轰。由图 10 可见，导爆药柱的临界入射压非常小，仅有 1.7 GPa，不足以使导爆药柱发生起爆，随着冲击波继续传播，在 $t=4.68$ μs 时整个导爆药柱内部压力上升，由于导爆药尺寸较小，发生反应时间短，导致爆轰成长不完全。导爆药柱内部各个观测点的峰值压力维持在 15 GPa 左右，远远小于爆轰波在传爆药柱内部后期的稳定爆压值，由此表明爆轰波在向上传播的过程中受到导爆管底部钢约束套筒的衰减作用，更加验证了殉爆实验中，爆轰波在传爆装置中的传播方向是自下向上。

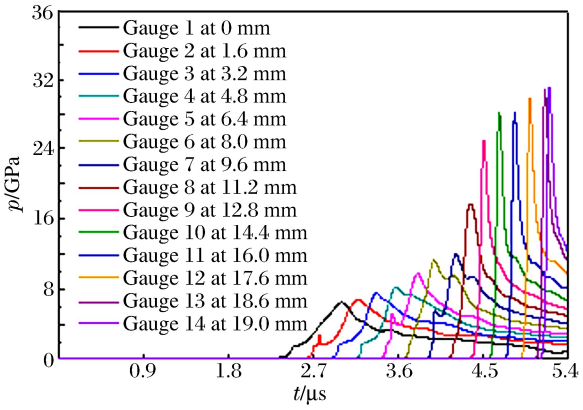


图 9 距离 5 mm 时传爆药柱的压力

Fig. 9 Pressures of booster charge at 5 mm

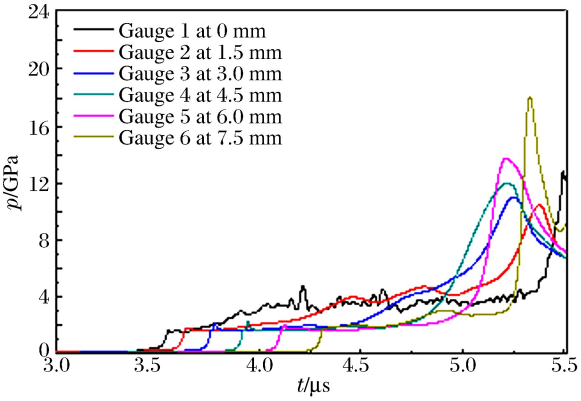


图 10 距离 5 mm 时导爆药柱的压力

Fig. 10 Pressures of detonating explosive at 5 mm

3.2.2 临界殉爆距离

图 11～12 为距离 5.7 mm 时传爆药柱和导爆药柱的压力曲线。由图 11 可见，传爆药柱反应后期 JO-9C 的最大压力为 29.8 GPa 左右，炸药发生稳定爆轰。由图 12 可见，导爆药柱的临界入射压仅有 1.67 GPa，不足以使导爆药柱发生起爆，随着冲击波继续传播，在 $t=4.68$ μs 时整个导爆药柱内部压力上升，由于导爆药的尺寸较小，发生反应时间短，导爆药柱内部各个观测点的峰值压力稳定维持在 10 GPa左右。

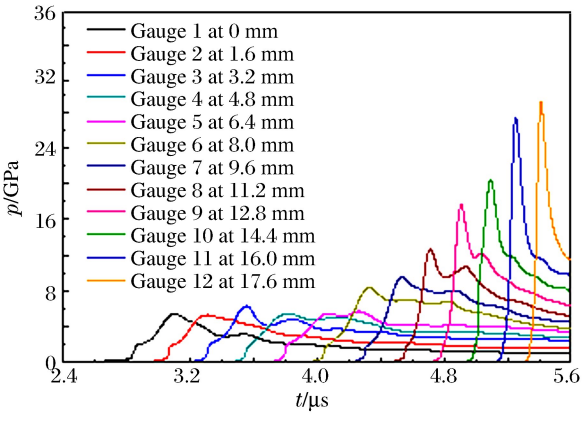


图 11 距离 5.7 mm 时传爆药柱的压力

Fig. 11 Pressures of booster charge at 5.7 mm

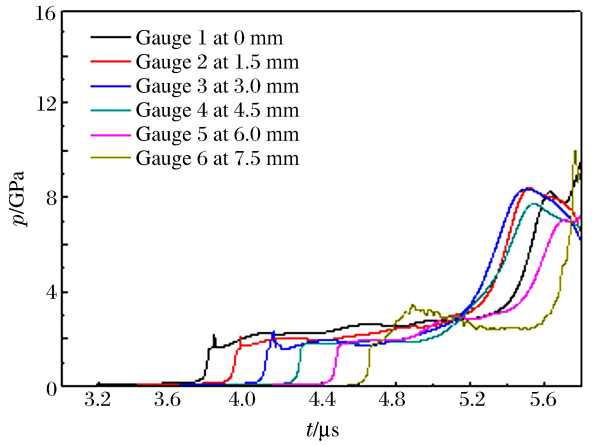


图 12 距离 5.7 mm 时导爆药柱的压力

Fig. 12 Pressures of detonating explosive at 5.7 mm

3.2.3　殉爆安全距离

图 13～14 为距离 8.8 mm 时传爆药柱和导爆药柱的压力曲线。由图 13 可见，在 $t=2.38$ μs 时冲击波进入传爆药柱，传爆药柱发生反应，爆轰波由下向上持续传播，但是压力较低，起爆点 1 的压力值仅为 0.17 GPa。爆轰波继续向上传播，但炸药内部的压力值并无上升，反而呈现衰减的趋势，反应没有成长为爆轰。由图 14 可见，导爆药柱内部峰值压力整体低于 0.11 GPa，低于传爆药柱的内部压力。

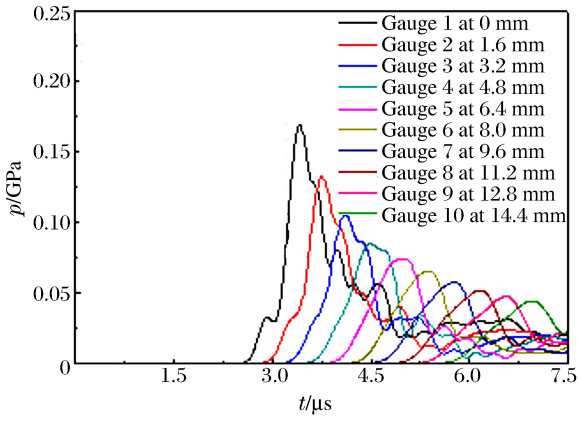


图 13　距离 8.8 mm 时传爆药柱的压力

Fig. 13　Pressures of booster charge at 8.8 mm

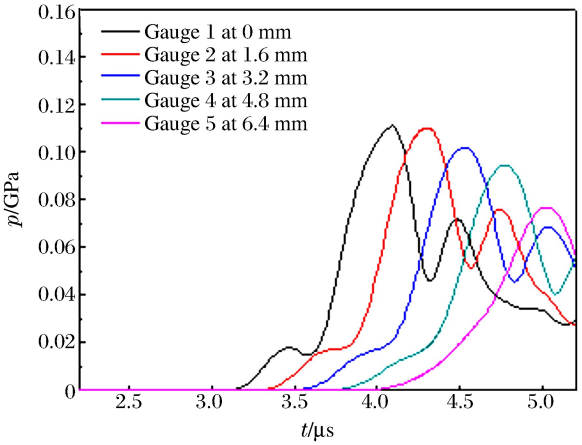


图 14　距离 8.8 mm 时导爆药柱的压力

Fig. 14　Pressures of detonating explosive at 8.8 mm

4　结　论

(1)以 JO-9C 装药的传爆管为被发装置、并考虑了含导爆药柱作用的殉爆实验过程中，冲击波先作用于传爆管上端侧角，后爆轰波沿其斜角方向继续往下传播，并使导爆药柱发生了爆炸。

(2)不同距离的殉爆实验与数值模拟结果基本一致，表明 JO-9C 装药的传爆管殉爆实验计算模型能够有效描述传爆管的殉爆实验情况。

(3)RDX-8701 为主发炸药、JO-9C 装药的传爆管殉爆实验的数值模拟计算，获得了该条件下引信传爆装置的临界殉爆距离为 5.7 mm、殉爆安全距离为 8.8 mm。

参考文献：

[1]　LU J P, LOCHERT I J, KENNEDY D L, et al. Simulation of sympathetic reaction tests for PBXN-109[C]// Proceedings of 13th International Symposium on Detonation. New York, USA, 2006:1338-1349.

[2]　FISHER S, BAKER E L, WELLS L, et al. XM982 excalibur sympathetic detonation modeling and experimentation[C]// Insensitive Munitions and Energetic Materials Technology Symposium. New York, USA, 2006:937-951.

[3]　MOSTAFA H E, MEKKY W F, El-DAKHAKHNI W W. Sympathetic detonation wave attenuation using polyurethane foam[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2013,26(8):04014046.

[4]　周保顺，王少龙，徐明利，等. 非均质炸药殉爆试验数值模拟[J]. 弹箭与制导学报，2009，29(5)：145-148.
ZHOU Baoshun, WANG Shaolong, XU Mingli, et al. Numerical simulation of sympathetic detonation of heterogeneous condensed explosives[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2009,29(5):145-148.

[5]　陈朗，王晨，鲁建英，等. 炸药殉爆实验和数值模拟[J]. 北京理工大学学报，2009，29(6)：497-501.
CHEN Lang, WANG Chen, LU Jianying, et al. Experiment simulation of sympathetic detonation tests[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2009,29(6):497-501.

[6]　姜颖资，王伟力，黄雪峰，等. 带壳炸药在高速运动炸药作用下殉爆效应研究[J]. 工程爆破，2014，20(3)：1-4.
JIANG Yingzi, WANG Weili, HUANG Xuefeng, et al. Research on the sympathetic detonation effect of shelled explosive by high-speed movement explosive[J]. Engineering Blasting, 2014,20(3):1-4.

[7]　王晨，伍俊英，陈朗，等. 壳装炸药殉爆实验和数值模拟[J]. 爆炸与冲击，2010，30(2)：152-158.

WANG Chen, WU Junying, CHEN Lang, et al. Experiments and numerical simulations of sympathetic detonation of explosives in shell[J]. Explosion and Shock Waves, 2010,30(2):152-158.

[8] 路胜卓,罗卫华,陈卫东,等.壳装高能固体推进剂的殉爆实验与数值模拟[J].哈尔滨工程大学学报,2014,35(12):1507-1512.
LU Shengzhuo, LUO Weihua, CHEN Weidong, et al. Experiments and numerical simulations of sympathetic detonation of high-energy solid propellant in shell[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2014,35(12):1507-1512.

[9] 陶为俊,浣石.RDX-8701 炸药二维冲击起爆状态的研究[C]//第八届全国爆炸力学学术会议.江西吉安,2007:58-63.

[10] VANDERSALL K S, TARVER C M, GARCIA F, et al. On the low pressure shock initiation of octahydro-1, 3, 5, 7-tetranitro-1, 3, 5, 7-tetrazocine based plastic bonded explosives[J]. Journal of Applied Physics, 2010,107(9):094906.

[11] 李晓杰,姜力,赵铮,等.高速旋转弹头侵彻运动金属薄板的数值模拟[J].爆炸与冲击,2008,28(1):57-61.
LI Xiaojie, JIANG Li, ZHAO Zheng, et al. Numerical study on penetration of a high-speed-rotating bullet into the moving sheet-metal plate[J]. Explosion and Shock Waves, 2008,28(1):57-61.

Sympathetic detonation of booster pipe with JO-9C charge

YUAN Junming[1], LI Shuo[1], LIU Yucun[1], TANG Xin[1], YU Yanwu[1], YAN Liwei[2]

(1. *School of Environment and Safety Engineering, North University of China, Taiyuan* 030051, *Shanxi*, *China*;
2. *Liaoning North Huafeng Special Chemistry Cop., Fushun* 113003, *Liaoning*, *China*)

Abstract: In the present study we carried out sympathetic detonation experiments, using RDX-8701 as donor and booster pipe and using JO-9C charge as acceptor explosive, to study the response of the fuse explosion device under shock wave. By observing the remainder of the JO-9C explosive, the deformation of the witness and the steel shell, and judging the explosive reaction state, we analyzed the histories in the sympathetic detonation reaction of the acceptor, and established the calculation model of the sympathetic detonation using AUTODYN. The calculated results of the model included the effects of the shock waves produced by the donor that acted on the booster pipe. Based on the fluid-solid coupling method, we also obtained the critical and safety distance of the sympathetic detonation through numerical simulation by adjusting experimental distance. The results show that the detonation wave propagated down firstly along the slope direction of the booster charge, thereby leading to the detonation of the booster charge, and then detonated the detonator explosive. According to the numerical simulation results, the critical and the safety distances of the sympathetic detonation were 5.7 mm and 8.8 mm respectively.

Keywords: JO-9C charge; booster pipe; sympathetic detonation; ignition and growth model

(责任编辑 丁 峰)