

文章编号: 1006-9941(2016)03-0231-07

## 温压炸药爆炸冲击波在爆炸堡内的传播规律

赵新颖<sup>1,2</sup>, 王伯良<sup>1</sup>, 李 席<sup>1</sup>, 韩 早<sup>1</sup>, 邓金榜<sup>1</sup>

(1. 南京理工大学化工学院, 江苏 南京 210094; 2. 沈阳理工大学装备工程学院, 辽宁 沈阳 110159)

**摘要:** 为研究温压炸药爆炸冲击波在有限空间的传播特征, 在爆炸堡中进行 400 g RDX/Al/AP(高氯酸铵)/HTPB(端羟基聚丁二烯)温压炸药的爆炸实验, 通过压力测试系统得到冲击波在地面和空中的超压时程曲线, 以 JWL-Miller 方程作为爆炸产物状态方程, 采用 AUTODYN 软件对爆炸过程进行了数值模拟, 并用数值模拟结果研究冲击波在爆炸堡内发生正反射和斜反射。结果表明, 数值模拟得到的冲击波形态、峰值及作用时间与实验测试结果吻合较好, Miller 余项能够较为合理地描述含铝温压炸药的后燃特征。正反射发生在装药的地面投影点, 反射波峰值达到入射波峰值的 3.3 倍; 斜反射包括规则反射和马赫反射, 冲击波入射角小于 40° 时, 在地面形成规则反射, 反射波峰值约为入射波峰值的 2.5 倍; 冲击波入射角大于 40° 时形成马赫反射, 马赫波峰值约为入射波峰值的 1.2~1.6 倍; 在侧壁及穹顶发生规则反射。在几何对称轴上发生聚焦现象, 聚焦点冲击波超压高于 2200 kPa, 达到该点入射冲击波超压的 4.3 倍, 增强了爆炸堡内冲击波, 提高了温压炸药的毁伤能力。

**关键词:** 温压炸药; 有限空间; 数值模拟; 冲击波

**中图分类号:** TJ55

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.11943/j.issn.1006-9941.2016.03.004

### 1 引言

温压炸药是一种富燃料炸药, 通常由高能炸药、金属或非金属超细燃料粉、活性剂、粘结剂按一定比例混合制成<sup>[1]</sup>。它利用空气中的氧气作氧化剂, 单位质量装药可释放的能量得以大大提高, 使其成为应对密闭或半密闭空间目标的常用装药, 因此研究温压炸药在有限空间中的爆炸作用具有重要意义。

实验和数值模拟是研究温压炸药在有限空间爆炸特性的两个基本方法。学者们在不同体积量级的容器内对含铝炸药进行了爆炸实验和数值模拟研究。姬建荣等<sup>[2]</sup>在小型爆炸容器中对 TNT 基含铝温压炸药进行爆炸实验, 研究铝粉含量与后燃现象的关系。李芝绒等<sup>[1]</sup>在内径 2.6 m 的中型密闭容器中研究空气和氮气环境下温压炸药爆炸输出的不同。李席等<sup>[3]</sup>在内径 3 m 高 4 m 的大型爆炸容器中进行 RDX 基温压炸药爆炸实验, 研究温压炸药组成对冲击波参数的影响。李世民等<sup>[4]</sup>对温压炸药在长直坑道内爆炸冲击波的传播进行了数值模拟研究。苟兵旺等<sup>[5]</sup>在有拐

角的复杂坑道研究温压炸药爆炸冲击波的传播规律。陈昊等<sup>[6]</sup>在两个相互连接的密闭和半密闭房间测试温压炸药爆炸冲击波的强度, 并与数值模拟结果进行对比研究。Zhang Fan 等<sup>[7]</sup>在 26 m<sup>3</sup> 的爆炸罐中对 TNT 基含铝温压炸药进行爆炸实验, 研究两种装药方式对准静压等参数的影响。Puggirello K P 等<sup>[8]</sup>采用美国桑迪亚国家实验室的爆炸装置进行 RDX 基含铝炸药的爆炸实验, 并引入改进的两相流模型和铝粉反应度模型进行数值模拟, 确定铝粉初始直径和当量比对模型的影响。A. L. Kuhl 等<sup>[9-11]</sup>采用两相燃烧模型对含铝温压炸药在爆炸室和管道中的爆炸及后燃效应进行模拟研究。本课题组曾将温压炸药置于小型容器中进行水下爆炸试验, 通过分析冲击波能和气泡能来研究组分和气氛对温压炸药爆炸能量输出的影响<sup>[12]</sup>。

从上述文献可见现有的温压炸药内爆实验研究侧重于炸药内在组成和气氛对爆炸参数的影响, 而数值模拟研究侧重于验证各种模型的有效性和狭长坑道中冲击波的传播规律, 未见实验与数值模拟相结合研究爆炸室内温压炸药冲击波传播特征的工作, 基于此, 本研究开展温压炸药内爆冲击波传播规律研究。温压炸药的典型特点是有大量含能组分在 C-J 面后与由湍流卷入的氧气进行反应释能, 即具有后燃效应。湍流越剧烈越有利于含能组分与氧气的混合反应, 这就需要有限空间中有足够的氧气且能容纳爆炸形成的湍流火球;

收稿日期: 2014-12-08; 修回日期: 2015-07-09

作者简介: 赵新颖(1978-), 女, 博士研究生, 主要从事炸药爆炸输出特性研究。e-mail: xinyingz@126.com

通信联系人: 王伯良(1964-), 男, 教授, 主要从事爆炸理论及其应用研究。e-mail: boliangwang@163.com

此外,温压药柱应具有较大药量,药量过小时无法在一定范围建立高温高压环境,不利于后燃反应发生。因此通常大药量温压炸药在与之匹配的较大有限空间中爆炸才更能体现温压炸药的特点。为此,本研究在体积更接近军事工事的爆炸堡中进行爆炸实验,实验药量达400 g,通过在地面和空中的超压测试点获取的超压时程曲线,研究不同位置超压的变化规律。为了克服实验的局限性,全面描述爆炸堡中冲击波传播规律,同时采用AUTODYN软件对该实验进行数值模拟。

## 2 实验条件

### 2.1 实验场地与样品

实验爆炸堡的直径为6 m,顶高为5 m,内部尺寸如图1所示;实验所用温压炸药药柱主要组分为RDX/Al/AP(高氯酸铵)/HTPB(端羟基聚丁二烯),药量为400 g;传爆药为8701,40 g,由8号电雷管从药柱下端起爆,炸高为60 cm。

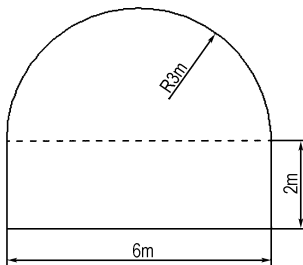


图1 爆炸堡内部尺寸图

Fig.1 Inner Size of explosion chamber

### 2.2 冲击波参数测试系统

实验用冲击波参数测试系统是由压力传感器、信号调理仪、VXI总线型数据采集系统及计算机控制处理系统组成;其中压力传感器选用6个壁面压力传感器和4个自由场传感器,在爆炸堡内的布置如图2所示。6个壁面压力传感器固定在地面,分别在距离爆心投影1.25,2 m及2.75 m的两条测试线上,两条测试线夹角45°。4个自由场传感器安置在距爆心投

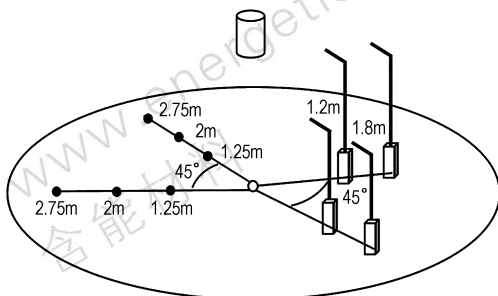


图2 冲击波参数测试压力传感器布置示意图

Fig.2 Arrangement of free field pressure sensors and wall pressure sensors in explosion chamber

影1.2 m和1.8 m的两条测试线上,安装高度为60 cm,两条测试线间夹角也为45°。

## 3 数值模拟方法

### 3.1 计算模型与边界条件

AUTODYN是有限元分析程序,可用来解决固体、流体、气体及其相互作用的高度非线性动力学问题,具有欧拉(Euler)、拉格朗日(Lagrange)、任意拉格朗日欧拉(ALE)、薄壳(Shell)、光滑流体动力(SPH)、梁(Beam)处理方法及混合处理方法,可以对各类冲击响应、高速/超高速碰撞、爆炸及其作用等问题进行模拟分析<sup>[13]</sup>,在军工行业得到广泛应用,因此选择用该软件进行数值模拟。

用AUTODYN软件对温压炸药在爆炸堡中的爆炸过程进行模拟,采用轴对称模型按实际试验建立计算模型如图3。空气域网格尺寸为30 mm,炸药网格尺寸为5 mm。测点1、2、3对应壁面传感器,测点4、5对应自由场传感器。地面、侧壁面和顶部弧形反射壁面设为绝热刚性壁面。

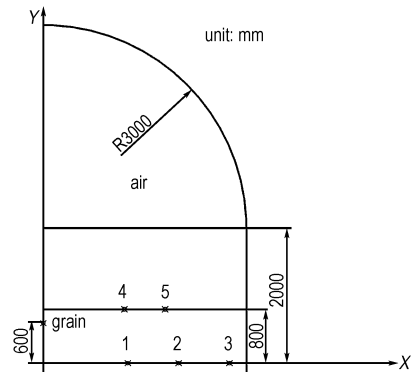


图3 AUTODYN计算模型

Fig.3 AUTODYN computation model

### 3.2 炸药爆轰产物状态方程的参数选取

温压炸药是后燃效应显著的非理想炸药,在AUTODYN软件的材料库中,Al/AP HE是适用于含铝非理想炸药的材料模型,采用JWL方程的修正式JWL-Miller方程<sup>[14]</sup>作为爆轰产物状态方程,如式(1)所示。

$$p = A \left( 1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left( 1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega(E + \lambda Q)}{V} \quad (1)$$

式中, $p$ 为爆轰产物压力,GPa; $V$ 为爆轰产物的相对比容; $A, B$ 和 $C$ 为材料参数,GPa; $R_1, R_2$ 和 $\omega$ 为常数; $E$ 为C-J面前释放的比内能, $J \cdot m^{-3}$ ;  $Q$ 为C-J面后额外释放的比内能, $J \cdot m^{-3}$ ;  $\lambda$ 为非理想组分的燃

烧分数。

该方程引入了 Miller 能量释放模型<sup>[14]</sup>,如式(2)所示,考虑了由反应率  $\lambda$  和压力  $p$  控制的燃烧。

$$\frac{d\lambda}{dt} = a(1-\lambda)^m p^n \quad (2)$$

式中,  $a$  为能量释放常数;  $m$  为能量释放指数;  $n$  为压力指数。这些参数与铝粉粒度、比表面积有关,可通过铝粉燃烧模型<sup>[15]</sup>确定的  $\lambda-t$  关系来确定  $a$ 、 $m$ 、 $n$  的值。

由于温压炸药与含铝非理想炸药释能特征有所不同,需针对温压炸药进行方程参数标定。标定实验在野外开阔平坦的硬质土壤场地进行。采用与爆炸堡内实验相同配方的温压炸药裸药柱,药量为 800 g,以 100 g 的 8701 作为传爆药,试验药柱置于距地面 1 m 的支架上,由 8 号电雷管下端起爆。以药柱在地面上的垂直投影点为圆心,测点分布在半径为 1, 2, 3 m 和 5 m 的相互垂直的两条射线上,如图 4 所示。实验采用压电式压力传感器获取冲击波参数,传感器用加固装置安装在地面,敏感面与地面平齐。通过获取的冲击波时程曲线可提取到各测点的超压峰值、正压作用时间和冲量。需注意的是实验直接获取的是地面反射波超压曲线,要换算为入射波超压曲线再进行分析。对野外标定实验进行 AUTODYN 数值模拟,采用文献[16]的方法,通过保持计算结果与实验数据之间的一致性确定 JWL-Miller 方程的参数,获得的参数见表 1。

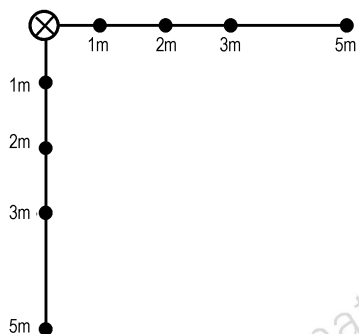


图 4 标定实验超压测点布置示意图

Fig. 4 Arrangement of pressure sensors in calibration experiment

表 1 所得温压炸药 JWL-Miller 状态方程参数

Table 1 Parameters of JWL-Miller state equation for thermo-baric explosive

$A$ /GPa	$B$ /GPa	$R_1$	$R_2$	$\omega$	$\rho$ /g · cm <sup>-3</sup>	$V_{CJ}$ /m · s <sup>-1</sup>
695.1	3.13	5.4	3.4	0.4	1.88	6900
$E_{CJ}$ /kJ · m <sup>-3</sup>	$p_1$ /GPa	$Q$ /J · m <sup>-3</sup>	$a$	$m$	$n$	
$7 \times 10^6$	55	$1.1 \times 10^7$	0.01	0.5	0.367	

## 4 结果分析与讨论

### 4.1 数值模拟与实验结果对比

实验中两发测试药柱在 1.25, 2, 2.75, 1.2 m 及 1.8 m 处各有两个测点,即对该配方温压炸药在每个测试距离均有四条压力测试曲线,去除测试值不合理及噪音过大的曲线,采用重复度较好的测试曲线与模拟曲线进行对比,结果如图 5 所示。

内爆中冲击波形态与野外爆炸有很大不同,冲击波呈现震荡波形,在图 5 中可清晰地看到各测点的冲击波主峰和若干反射峰。总体看,在各个典型测点上,无论是地面近场(图 5a)、中场(图 5b)、远场(图 5c),还是空中近场(图 5d)、中场(图 5e),测试曲线与模拟曲线形态特征一致,尤其是主峰和前几个能够起到杀伤作用的反射峰一致度较好。模拟曲线上冲击波主峰峰值略低于测试曲线,相差在 7% 以内,这是由于计算模型中处理强间断采用了人工粘性,使计算值略偏低。模拟曲线中靠后的反射波峰值和冲量与测试值略有差别,这是由 Miller 计算过程中的累积误差造成,由于靠后的反射波峰值与冲量都不大,几乎不能产生杀伤作用,因此可忽略该差异。由上述对比可见数值模拟与实验测试结果吻合较好,可以采用数值模拟结果研究温压炸药在爆炸堡内爆炸时冲击波的强度与时空分布。

### 4.2 Miller 余项对数值模拟结果的影响

Miller 余项是在冲击波阵面后加入补充能量,唯象地描述含铝温压炸药后燃作用对冲击波能量的补充,由数值模拟结果和实验结果对比可见,带有 Miller 余项的模拟结果与实验结果符合度较好。为说明 Miller 余项对计算结果的影响,将上述模型采用不带 Miller 余项的 JWL 方程计算, JWL 方程参数不变。在冲击波主峰与反射峰都较清晰的 2 m 测点处进行对比,其超压-时间曲线结果如图 6 所示;对超压曲线进行积分,得到冲量-时间曲线如图 7 所示。

由图 6 可以看到,采用带有 Miller 余项的状态方程进行计算时,超压衰减相对缓慢,较靠后的反射波的衰减也明显缓慢,体现了后燃作用对冲击波的能量补充。对压力时程曲线积分得到冲量时程曲线,如图 7 所示。由图 7 可看到,有 Miller 余项时计算的冲量比无 Miller 余项时大 10%,且如图 5 所示,有 Miller 余项的压力时程曲线计算结果与实验结果吻合较好,因此有 Miller 余项时的冲量计算值也与实验结果相吻合。上述结论在其它测点也具有相似的规律,说明 JWL-Miller 方程能够较为合理地描述含铝温压炸药的后燃特性。

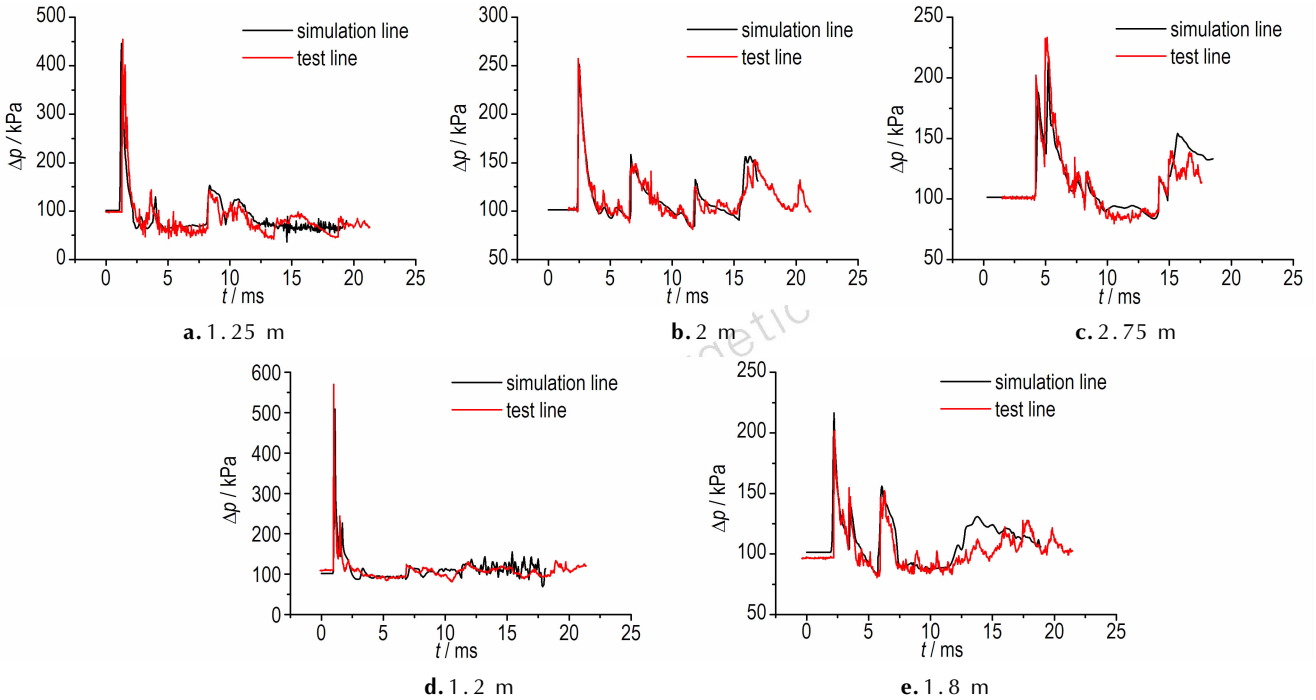


图5 不同测点处模拟超压时程曲线与测试超压时程曲线的对比

Fig.5 Comparison of pressure history between simulation and experiment at different test point

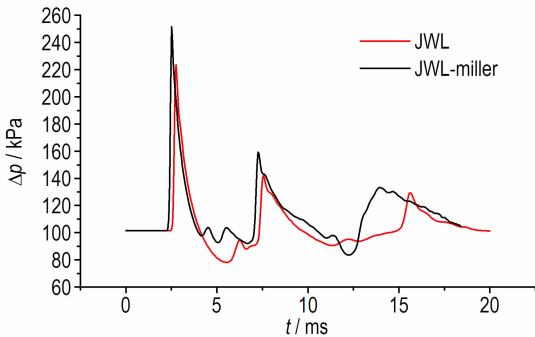


图6 JWL方程与JWL-Miller方程计算超压对比

Fig.6 Pressure history calculated by AUTODYN based on JWL and JWL-Miller

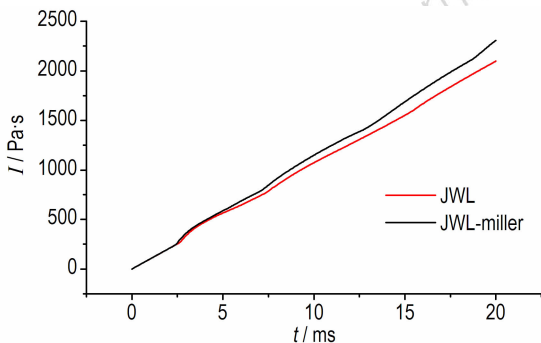


图7 JWL方程与JWL-Miller方程计算冲量对比

Fig.7 Impulse history calculated by AUTODYN based on JWL and JWL-Miller

### 4.3 爆炸堡内冲击波的反射与聚焦

冲击波在有限空间遇到固壁会形成反射,在特定位置会出现聚焦现象,使冲击波峰值与冲量增加,大幅提高毁伤能力,但目前还无法采用实验来测试研究爆炸堡中冲击波聚焦现象。在4.1节中数值模拟结果与实验结果的对比分析说明采用JWL-Miller方程的数值模拟方法对温压炸药冲击波压力的计算结果是可靠的,因此本研究采用该数值模拟方法研究冲击波在爆炸堡中的传播演变。

#### 4.3.1 爆炸堡中冲击波的正反射

当入射冲击波阵面与刚壁表面成角为 $\varphi_0 = 0^\circ$ 时,冲击波将发生正反射。设 $p_0$ 为未经扰动介质的压强(kPa), $p_1$ 为入射冲击波阵面压强(kPa), $p_2$ 为反射冲击波阵面压强(kPa); $\Delta p_1 = p_1 - p_0$ , $\Delta p_2 = p_2 - p_0$ ;  $\gamma$ 为绝热指数,对空气常取 $\gamma = 1.4$ 。根据冲击波传播理论<sup>[17]</sup>,反射冲击波的峰值超压为:

$$\Delta p_2 = 2\Delta p_1 + \frac{(\gamma + 1)\Delta p_1^2}{(\gamma - 1)\Delta p_1 + 2\gamma p_0} \quad (3)$$

对爆炸堡内的试验药量来说,冲击波强度在4 MPa以下,由式(3)可见,反射波强度是入射波强度的3~4倍。受爆炸堡结构所限,只在爆心的地面投影点上发生正反射,如图8所示。从图8可以看到,冲击波入射压力约为949.1 kPa,反射压力达3.161 MPa,是

入射压力的 3.3 倍,与理论分析相符。

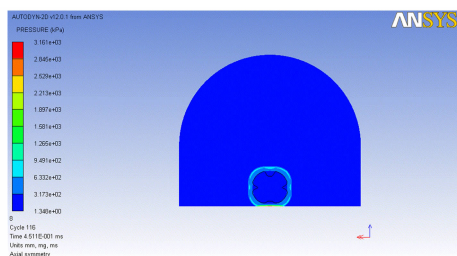


图 8 冲击波的正反射

Fig.8 Positive reflection of shockwave in explosion chamber

### 4.3.2 爆炸堡中冲击波的斜反射

当入射冲击波阵面与刚壁表面成角  $\varphi_0 > 0^\circ$  时,其反射为斜反射,在爆炸堡中斜反射现象更为常见。在一定入射波强度下,存在临界角  $\varphi_{cr}$ ,当入射角小于临界角时,发生规则反射,大于临界角时则发生马赫反射。临界角  $\varphi_{cr}$  的近似计算式如(4)所示,反射波超压见式(5)。

$$\varphi_{cr} = \arccos\left(\sqrt{\frac{\gamma+1}{4}} \sqrt{1 - \exp\left(-2.3 \frac{\Delta p_1}{p_0}\right)}\right) \quad (4)$$

$$\Delta p_2 = \Delta p_1 \left(1 + \frac{\cos\varphi_0}{B} + \frac{(\gamma+1)\Delta p_1}{(\gamma-1)\Delta p_1 + 2\gamma p_0} \cos^2\varphi_0\right)$$

$$\text{其中 } B = \begin{cases} \cos\varphi_0, & \varphi_0 \leq \varphi_{cr} \quad \text{规则反射} \\ \cos\varphi_{cr}, & \varphi_0 > \varphi_{cr} \quad \text{马赫反射} \end{cases} \quad (5)$$

由式(5)可见,规则反射时反射波压力略低于正反射压力,但仍为入射波压力的 2 倍以上,而马赫反射时反射波压力比规则反射压力更低些。

爆炸堡中的冲击波首先在地面发生斜反射,其传播过程如图 9 所示。根据式(4),考虑爆炸药量,在爆炸堡内发生马赫反射的临界角应趋于  $40^\circ$ 。由图 9a 可以看到在 0.504 ms 时入射波阵面与地面夹角较小,没有达到临界角,反射为规则反射,其中入射波峰值约为 829.8 kPa,反射波峰值约为 2073 kPa,反射波峰值约为入射波峰值的 2.5 倍,符合规则反射的规律。冲击波继续传播,逐渐在地面上形成马赫反射,如图 9b 和 9c 两个典型云图所示,实验中地面传感器测到的是马赫波。将图 9b、图 9c 中的马赫波峰值与入射波峰值比较可见,马赫波峰值约为入射波峰值的 1.6 倍。

在 4.85 ms 后地面马赫反射波首先到达侧壁,形成反射,继而炸药的初始冲击波到达侧壁及穹顶(8.953 ms),由于入射波与侧壁和穹顶夹角较小,且此时入射波强度一般低于 300 kPa,因此在侧壁和穹顶只发生规则反射,如图 10 所示。

由此可见,冲击波在爆炸堡内的斜反射以规则反射为主,只有在地面发生马赫反射,由于规则反射的反射波比马赫波更强,所以发生大范围的规则反射时毁伤能力更强。

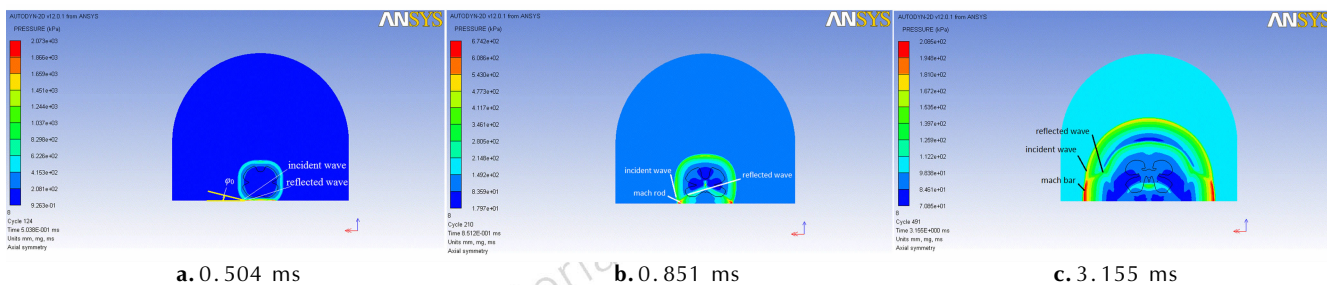


图 9 冲击波在地面的反射

Fig.9 Reflection of shockwave on the ground at different time

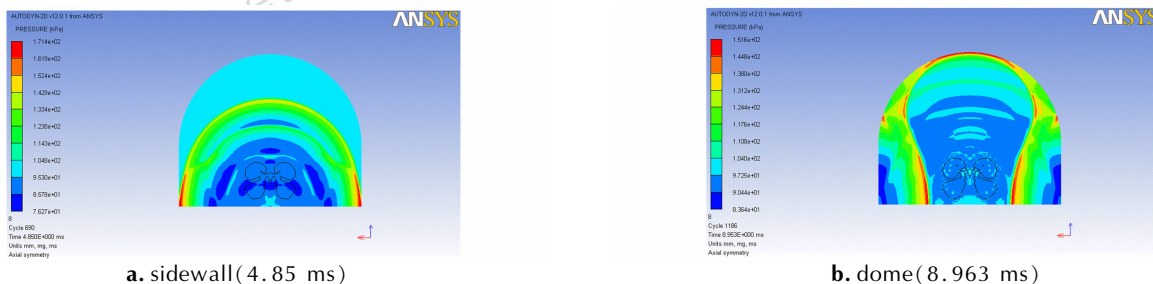


图 10 冲击波在侧壁与穹顶的反射

Fig.10 Reflection of shockwave at sidewall and dome in explosion chamber

### 4.3.3 爆炸堡中冲击波的聚焦

激波传播区域逐渐缩小使得能量最终会聚于一个很小的区域,在聚焦点产生高温高压,形成激波聚焦现象。对平面激波运动来讲,当激波向对称面运动时其强度是有限的,只有环形激波向对称轴绕射时才有可能形成较强的激波聚焦。环形激波绕射产生了准柱形激波,并最终聚焦于对称轴上的某一点,从最初的绕射激波迎面碰撞点开始,绕射激波相对于对称轴的入射角度越来越大,最终发生了从规则反射向马赫反射的转变。对称轴上的最高压力点出现在绕射激波迎面碰撞点和规则反射消失点(或马赫反射的出现点)之间,

此最高压力点被认为是准柱形激波的有效聚焦点。在几何轴对称的爆炸堡中,会在中轴线出现冲击波聚焦现象,图 11 展示了冲击波聚焦形成的过程,从侧壁和穹顶反射回来的冲击波逐渐向中轴线聚焦(见图 11a、图 11b),于 13.75 ms 形成聚焦点(图 11c),聚焦后达到 2291 kPa,是聚焦前的冲击波阵面压力(523.1 kPa)的 4.3 倍。

聚焦后的反射波会继续向四周传播,随着时间进一步发展,聚焦反射激波将会在室内壁面再次发生反射,所形成的反射波也将会再次向轴心处传播并形成聚焦点。

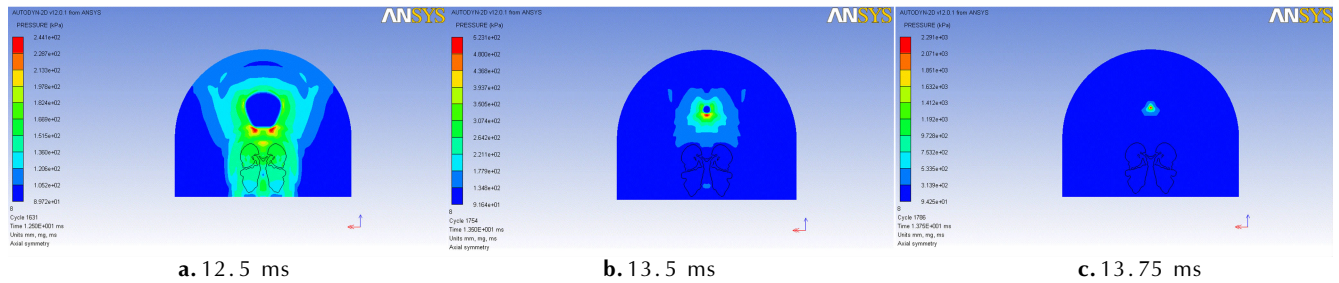


图 11 冲击波的聚焦过程

Fig.11 Focus process of shockwave in explosion chamber

## 5 结论

对 400 g 的温压炸药在爆炸堡内进行爆炸实验,测试冲击波参数,并进行数值模拟,将冲击波的测量结果与数值模拟结果对比分析,得到以下结论:

(1) 温压炸药在爆炸堡内爆炸时冲击波呈震荡波形,采用 AUTODYN 进行数值模拟,得到的冲击波形态、峰值及作用时间与测试结果吻合较好,可以采用数值模拟结果研究温压炸药在爆炸堡内爆炸时冲击波的强度与时空分布。

(2) 对比采用 JWJ-Miller 方程和 JWJ 方程的计算结果,带 Miller 余项时超压衰减较慢,在后续反射波中更为明显,相应的有 Miller 余项时计算的冲量比无 Miller 余项时大 10%,说明 JWJ-Miller 方程能够较为合理地描述含铝温压炸药的后燃特性。

(3) 通过 Autodyn 数值模拟结果可以看到,在爆炸堡中冲击波在地面发生正反射和斜反射,正反射发生在装药的地面投影点,反射波峰值达到入射波峰值的 3.3 倍;冲击波入射角小于  $40^\circ$  时,在地面形成规则反射,反射波峰值约为入射波峰值的 2.5 倍;冲击波入射角大于  $40^\circ$  时形成马赫反射,马赫波峰值约为入射波峰值的 1.2~1.6 倍;冲击波在侧壁及穹顶发

生规则反射。

(4) 在爆炸堡的几何对称轴上有激波的聚焦现象,聚焦点冲击波超压高于 2200 kPa,可达此处入射冲击波超压的 4.3 倍以上。冲击波在爆炸堡内聚焦-发散-反射-再聚焦的过程使冲击波形成震荡波形。

冲击波的反射和聚焦现象都将使堡内冲击波得到增强,从而提高温压炸药的毁伤能力。

### 参考文献:

- [1] 李芝绒,王胜强,殷俊兰. 不同气体环境中温压炸药爆炸特性的试验研究[J]. 火炸药学报, 2013,36(3):59-61.  
LI Zhi-rong, WANG Sheng-qiang, YIN Jun-lan. Experiment study of blast performance of thermobaric-explosive under different gas environment [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2013,36(3):59-61.
- [2] 姬建荣,苏建军,王胜强. 小型爆炸容器中 TNT/Al 炸药的后燃烧性能[J]. 火炸药学报, 2013, 36(3): 46-49.  
JI Jian-rong, SU Jian-jun, WANG Sheng-qiang. After-burning performance of TNT/Al explosive in small explosion vessel [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2013, 36(3): 46-49.
- [3] 李席,王伯良,韩早,等. 温压炸药密闭空间能量输出特性研究[C]//第十六届中国科协年会-含能材料及绿色民爆产业发展论坛,昆明,2014.  
LI Xi, WANG Bo-liang, HAN Zao, et al. Energy output characteristics of thermobaric explosives in a confined space [C]// Session nine, The 16th annual meeting of China association for sci-

- ence and technology, Kunming, 2014.
- [4] 李世民, 李晓军, 李洪鑫. 温压炸药坑道内爆炸冲击波的数值模拟研究[J]. 应用力学学报, 2012, 29(5): 595-600.  
LI Shi-min, LI Xiao-jun, LI Hong-xin. Numerical simulation study of airblast of thermobaric explosive explosion in tunnel[J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2012, 29(5): 595-600.
- [5] 苟兵旺, 李芝绒, 闫潇敏, 等. 复杂坑道内温压炸药冲击波效应试验研究[J]. 火工品, 2014, 2: 41-45.  
GOU Bing-wang, LI Zhi-rong, YAN Xiao-min, et al. Experimental study on shock wave effects of thermobaric explosive in complex tunnel[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2014, 2: 41-45.
- [6] 陈昊, 陶钢, 蒲元. 温压药在有限空间内爆炸冲击波的实验研究及数值模拟[J]. 火炸药学报, 2009, 32(5): 41-45.  
CHEN Hao, TAO Gang, PU Yuan. Experiment study and numerical simulation of shock wave generated by thermobaric column exploding in limited space[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2009, 32(5): 41-45.
- [7] Zhang F, Anderson J, Yoshinake A. Post-detonation energy release form TNT-aluminum explosives[J]. *Shock Compression of Condensed Matter*, 2007, 955(1): 885-888.
- [8] Ruggirello K P, Desjardin P E, Baer M R. A reaction progress variable modeling approach for non-ideal multiphase explosives [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2012, 42: 128-151.
- [9] Kuhl A L, Bell J B, Beckner V E, et al. Simulation of aluminum combustion and PETN afterburning in a confined explosion[C]// 21<sup>th</sup> Int. Colloquium on Dynamics of Explosions and Reactive Systems. Poitiers France; Lawrence Livermore National Laboratory, 2007: 1-4.
- [10] Kuhl A L, Bell J B, Beckner V. E, et al. Numerical simulations of thermobaric explosions[C]// 38<sup>th</sup> Int. Annual Conf of ICT, Pfinztal Germany; Lawrence Livermore National Laboratory, 2007.
- [11] Bell J B, Kuhl A L, Beckner V E. Simulation of enhanced-explosive devices in chambers and tunnels[C]// HPCMP Users Group conference. Pittsburgh PA: IEEE, 2007: 139-143.
- [12] 卢勇, 王伯良, 何中其, 等. 温压炸药爆炸能量输出的实验研究[J]. 含能材料, 2014, 22(5): 684-687  
LU Yong, WANG Bo-liang, HE Zhong-qi, et al. Experimental research on energy output of thermobaric explosive[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2014, 22(5): 684-687
- [13] 许铤. 温压装药在有限空间的爆炸特性研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2008.
- [14] Miller P J. A reactive flow model with coupled reaction kinetics for detonation and combustion of non-ideal explosives [C]// Proceedings of the Symposium on Decomposition, Combustion, and Detonation Chemistry of Energetic Materials. Boston, Massachusetts, 1995: 413-420.
- [15] Carlo Badiola, Robert J. Gill, Edward L, et al. Combustion characteristics of micron-sized aluminum particles in oxygenated environments [J]. *Combustion and Flame*, 2011, 158: 2064-2070.
- [16] 黄菊, 王伯良, 仲倩, 等. 温压炸药能量输出结构的初步研究[J]. 爆炸与冲击, 2012, 32(2): 164-168.  
HUANG Ju, WANG Bo-liang, ZHONG Qian, et al. A preliminary investigation on energy output structure of a thermobaric explosive[J]. *Explosive and Shock Waves*, 2012, 32(2): 164-168.
- [17] (俄)Л. И. 奥尔连科. 爆炸物理学[M]. 孙承伟, 译. 北京: 科学出版社, 2011: 364-368.

## Shockwave Propagation Characteristics of Thermobaric Explosive in an Explosion Chamber

ZHAO Xin-ying<sup>1,2</sup>, WANG Bo-liang<sup>1</sup>, LI Xi<sup>1</sup>, HAN Zao<sup>1</sup>, DENG Jin-bang<sup>1</sup>

(1. School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. School of Equipment Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China)

**Abstract:** In order to investigate the propagation characteristics of shock wave generated by thermobaric explosive, series experiments with thermobaric explosive of RDX/Al/AP/HTPB and the column mass of 400 g were carried out in an explosion chamber. Pressure histories were obtained by piezoelectric measurement system for the measurement points on the ground and in the air. The explosion process was simulated with AUTODYN software using JWL-Miller equation for detonation products. The parameters of JWL-Miller EOS were calibrated by experimental data. Results show that the error of peak pressure and action time between experiment and simulation are too small to be neglected. The Miller remainder can describe the after-burning features of thermobaric explosive reasonably. The simulated pressure distributions show that both normal reflection and oblique reflection occurred in the explosion chamber. Regular reflection and Mach reflection are two forms of oblique reflection. Normal reflection occurs at the ground projective point of the explosive charge. The peak pressure of reflected wave is 3.3 times higher than that of incident wave. Regular reflection occurs at where the incident angle is less than 40°, and the peak of reflected wave is about 2.5 times higher than that of incident wave. Mach reflection occurred at where the incident angle is more than 40°, and the peak of Mach wave is about 1.2-1.6 times higher than that of incident wave. There are regular reflections at side wall and dome. There is focus phenomenon at geometric symmetry axis. The peak overpressure of shock wave on the focus point is above 2200 kPa, and more than 4.3 times higher than that of incident wave. Reflection and focus of shock wave strengthen the overpressure in chamber.

**Key words:** thermobaric explosive; confined space; numerical simulation; shock wave

**CLC number:** TJ55

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/j.issn.1006-9941.2016.03.004