

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.137



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



# 长持时爆炸冲击波产生方法

师燕超<sup>1a,1b</sup>, 杨森<sup>1b</sup>, 崔健<sup>1a,1b</sup>, 闫攀运<sup>2</sup>

(1. 天津大学 a. 滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室; b. 建筑工程学院, 天津 300350;  
2. 北京航天发射技术研究所, 北京 100076)

**摘要:**不同持时的爆炸冲击波对建筑结构及防护工程的作用显著不同,在试验或数值模拟中常需要得到长持时爆炸冲击波,延长爆炸冲击波正压作用时间是研究长持时爆炸荷载下结构响应的难点。在 AUTODYN 中建立长筒爆室小当量炸药多点延时起爆模型,分析爆炸冲击波在长筒爆室中的传播规律,研究管道长度、延时起爆时差、起爆顺序对冲击波波形的影响。结果表明:距离增加,超压峰值减小、正压持续时间增加;根据炸药量和爆室长度合理地选择起爆时差可以获得波形丰满且连续衰减的超压时程曲线;爆室底部起爆、合理控制延时间隔,可以形成类似于大当量远距离爆炸下产生的连续衰减的长持时冲击波。分别给出 100、200 ms 爆炸持时起爆方案,为长持时爆炸模拟装置的设计提供技术支持。

**关键词:**爆炸;冲击波;长持时;模拟装置

中图分类号:O384

文献标志码:A

文章编号:2096-6717(2023)01-0035-09

## Method for production of long duration blast wave

SHI Yanchao<sup>1a,1b</sup>, YANG Sen<sup>1b</sup>, CUI Jian<sup>1a,1b</sup>, YAN Panyun<sup>2</sup>

(1a. Key Laboratory of Coast Civil Structure Safety of China Ministry of Education; 1b. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, P. R. China; 2. Beijing Institute of Space Launch Technology, Beijing 100076, P. R. China)

**Abstract:** The effect of blast wave with different duration on building structure and protection engineering are obviously different, long duration blast wave is generally essential in experimental studies and numerical simulations. However, it is difficult to prolong the duration of the positive pressure in the practice experiment of studying the structural responses under long duration blast load. A multi-point delayed detonation model with multiple small charge TNT explosives in a long tube explosion chamber is established by computational fluid dynamics software AUTODYN. The propagation law of blast wave in the long tube is analyzed. On this basis, the influences of length of explosion chamber, the delay detonation time and the initiation sequence on the blast

收稿日期:2021-03-16

基金项目:国家自然科学基金(51878445、51908405)

作者简介:师燕超(1982-),男,博士,教授,主要从事建筑结构抗爆分析与设计研究,E-mail:yanchaoshi@tju.edu.cn。

崔健(通信作者),男,博士,副教授,E-mail:jian.cui@tju.edu.cn。

Received:2021-03-16

Foundation items:National Natural Science Foundation of China (No. 51878445, 51908405)

Author brief:SHI Yanchao (1982-), PhD, professor, main research interest: blast analysis and design of building structures, E-mail: yanchaoshi@tju.edu.cn.

CUI Jian (corresponding author), PhD, associate professor, E-mail: jian.cui@tju.edu.cn.

wave form are further investigated. The results show that, as the distance increases, the peak value of overpressure decreases and the duration of positive pressure increases. The overpressure time-history curve with full and continuous attenuation of the wave form can be obtained by selecting the delay detonation time rationally according to the amount of explosive and the length of the explosion chamber. Detonating from the bottom of the explosion chamber and controlling the delay detonation time interval reasonably can form a long-duration blast wave which is equivalent with the continuous attenuation produced by a large equivalent charge long distance explosion. The parameters such as the length of explosion chamber, amount of explosive and delay detonation time are adjusted repeatedly, and the detonation schemes of 100 ms explosion duration and 200 ms explosion duration are provided, providing technical support for design of long duration explosion simulation device.

**Keywords:** explosion; blast wave; long duration; simulation device

不同持时的爆炸冲击波对建筑结构及防护工程的作用显著不同,大当量 TNT 爆炸、大吨位危险化学品爆炸、燃油气爆炸、核爆炸等冲击波持时较长,可达到 100 ms 以上,甚至几百毫秒。野外爆炸试验常用的几公斤或几十公斤常规炸药产生的爆炸超压持时通常为几毫秒,很难达到 30 ms 以上。如果想要通过一次爆炸获得较长持时的冲击波,则需大大增加炸药量,但大当量 TNT 爆炸对场地要求极高、安全问题突出。因此,利用较少的炸药获得持续时间较长且波形连续丰满的冲击波对于结构抗爆性能试验研究有着重要意义。

Andersen 等<sup>[1]</sup>提出了一种利用高压气体作为驱动源产生长持时冲击波的模拟方法。Campbell 等<sup>[2]</sup>采用分段驱动气体填充技术,在一定程度上实现了长持时恒压冲击波的模拟。Ismail 等<sup>[3]</sup>利用 ANSYS Fluent 分析了激波管设计参数对冲击波特性的影响,并对锥形激波管系统的尺寸进行了优化。杨科之等<sup>[4]</sup>研究了装药在坑道内部爆炸时产生的空气冲击波传播规律,发现相比于无限空间中的爆炸,坑道中的爆炸冲击波经过多次反射和叠加作用之后具有更高的峰值和更长的持续时间。李秀地等<sup>[5]</sup>指出,在类似坑道的空间中爆炸,超压峰值会随着坑道长度的增加而降低,但超压持时会增加,故类似坑道受限爆炸条件下的爆炸波模拟装置可以产生较长的持续时间。王朝成等<sup>[6]</sup>提出了一种一端开口的圆筒形爆室线状装药爆炸冲击波简化计算模型,并利用计算模型对爆室内线状装药爆炸压力进行了分析计算,计算结果与实测数据吻合较好。穆朝民等<sup>[7]</sup>研究了爆室内中心装药爆炸后爆炸冲击波的产生、传播和壳体的动力响应全过程。姚哲芳等<sup>[8]</sup>给出了厚壁圆筒爆室内爆炸流场的压力云图、筒壁受到的爆炸压力峰值及冲量的分布规律、

筒体的等效应力云图以及等效应力的分布规律等。辛凯等<sup>[9]</sup>提出了利用多点装药延时起爆及爆室冲压技术延长爆炸冲击波持续时间的方法。同时文献[10]也指出,为了在管道中得到较理想的空气冲击波波形,必须合理考虑起爆药量、起爆次数、多次起爆时间间隔、管道长度等因素。

综上,目前研究主要集中在爆室冲击波传播规律和延长正压持时的定性分析,尚没有通过小当量炸药获取预期长持时冲击波的详细试验和定量研究。笔者利用 AUTODYN 软件对圆筒形爆室 TNT 爆炸进行了数值模拟,并与相应的试验数据进行了对比,验证了数值模拟的可行性。在此基础上,进一步探究管道长度、起爆时间间隔和起爆顺序等因素对冲击波波形的影响。最后,经过多次反复对爆室长度、炸药量、延时间隔等参数的调整,给出了实现正压持续时间为 100、200 ms,入射超压峰值约 0.2 MPa(对应反射超压峰值约 1 MPa)的冲击波波形丰满且连续衰减的试验方案。

## 1 数值模型的建立

### 1.1 模型建立方法

采用 AUTODYN 建立数值模型,因为模型尺寸较大,若使用三维实体单元建模,计算效率极低。考虑到圆筒爆室轴心球型装药为轴对称模型,对称轴为圆筒轴心线,故建立二维轴对称模型进行计算。

爆炸初始阶段压力极高,模拟结果受网格尺寸影响非常明显,为提高计算精度,首先采用一维楔形单元模拟初期爆炸,如图 1 所示。再利用 AUTODYN 的重映射技术,将一维计算结果映射到二维模型中继续计算,如图 2 所示。文献[11]指出,在炸药体积膨胀到 10 倍之后,爆轰产物可等效视为空气,因此,炸药和空气可以考虑为同一种材

料(空气),采用理想气体的状态方程描述,在一维条件下计算到大约 0.05 ms 时停止,然后再将单元状态参数映射到二维轴对称模型中,此时冲击波还未到达管道壁面,可视为球面波。

由于结构的微小变形对空气冲击波影响较小,因此将爆室侧壁和底面设置为刚性反射面,爆室出口设为自由流出边界。



图 1 一维模型

Fig. 1 One-dimensional model



图 2 映射后的二维模型

Fig. 2 Mapped two-dimensional model

### 1.2 模型材料参数

模型材料包括空气和炸药。空气采用软件材料库中的 AIR 模型,状态方程为理想气体状态方程,可用式(1)描述。

$$p = (\gamma - 1)\rho e \quad (1)$$

式中: $\gamma$ 为空气绝热常数,取值为 1.4; $\rho$ 为空气密度,取值为 1.225 kg/m<sup>3</sup>;e 为比内能,取值为 2.068 × 10<sup>5</sup> kJ/m<sup>3</sup>[11]。

TNT 炸药采用 JWL 状态方程描述,其具体形式为

$$p = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 v}\right) \exp(-R_1 v) + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 v}\right) \exp(-R_2 v) + \frac{\omega e_0}{v} \quad (2)$$

式中: $v$ 为相对体积; $e_0$ 为初始比内能; $A$ 、 $B$ 、 $R_1$ 、 $R_2$ 、 $\omega$ 为材料常数;此外,TNT 材料还需要输入 C-J 压力  $P_{CJ}$  和爆轰速度  $V_{CJ}$ ,TNT 材料各参数取值[12]如表 1 所示。

表 1 TNT 材料参数

Table 1 Material parameters of TNT

$\rho/(kg \cdot m^{-3})$	$A/GPa$	$B/GPa$	$R_1$	$R_2$	$\omega$	$V_{CJ}/(m \cdot s^{-1})$	$e_0/(GJ \cdot m^{-3})$	$P_{CJ}/GPa$
1 600	540	9.37	4.5	1.1	0.25	7 000	8	25.5

### 1.3 模型验证

在数值模型中,材料模型的网格尺寸直接影响计算的效率和精度,合理选择网格尺寸至关重要。经过网格敏感性分析,一维模型网格尺寸取 1 mm,二维模型网格尺寸取 30 mm。其中,一维模型网格尺寸取 1 mm 已经可以获得较高精度[13]。同时,文献[13-14]指出,压力的网格敏感性高于冲量,本文研究区域的比例距离大于 5.89 m/kg<sup>1/3</sup>,故以该比例距离下二维模型的压力为指标进行网格敏感性分析,如图 3 所示。根据结果可知,二维模型网格尺寸取 30 mm 已经足够。

文献[12]进行了野外圆形坑道爆炸试验,对坑道内的爆炸冲击波压力进行了测定,得到了不同测

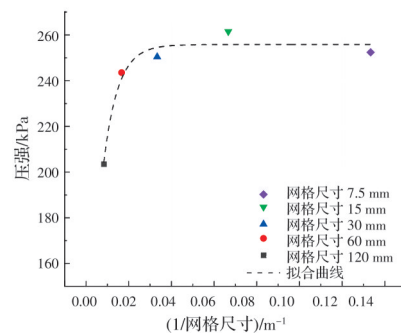


图 3 网格敏感性分析

Fig. 3 Mesh sensitivity analysis

点的爆炸冲击波压力时程曲线,坑道截面与爆炸测点布置如图 4 所示。

基于上述方法建立了该试验的数值模型,TNT

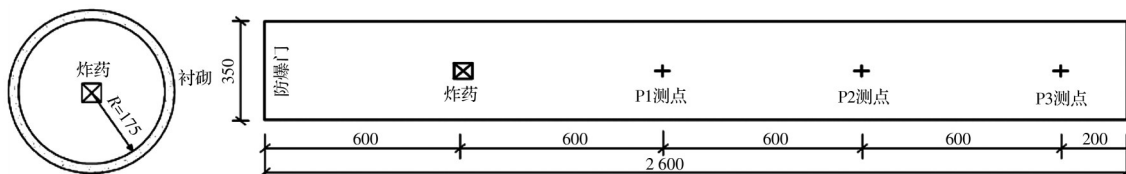


图 4 试验坑道截面及测点示意图(单位:cm)

Fig. 4 Schematic diagram of testing tunnel section and measuring point (Unit: cm)

药量为 36 kg,各测点的试验与模拟压力时程曲线对比如图 5~图 7 所示。

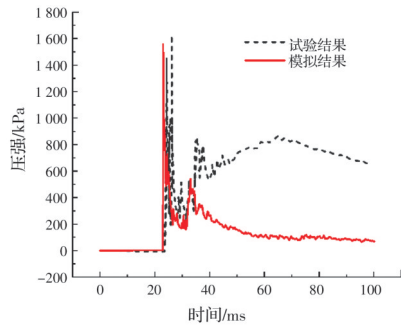


图 5 测点 P1 的压力时程曲线

Fig. 5 Pressure time-history curve of the measuring point P1

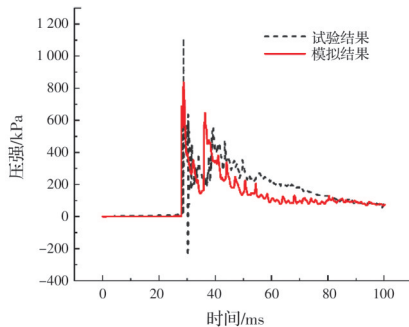


图 6 测点 P2 的压力时程曲线

Fig. 6 Pressure time-history curve of the measuring point P2

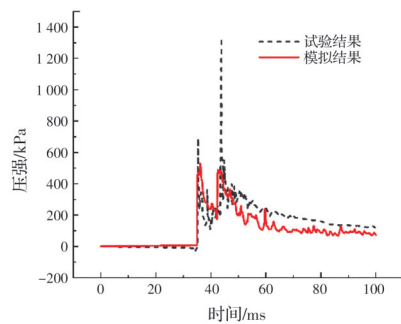


图 7 测点 P3 的压力时程曲线

Fig. 7 Pressure time-history curve of the measuring point P3

试验原文献指出<sup>[12]</sup>,3个测点的测试信号均受到了一定程度的干扰,其中,由于受到较大干扰,测点 P1 在测试信号后期压力没有归零,而是出现了漂移;测点 P2 第 1 个峰值过后由于干扰出现的一个负峰值没有参考意义;测点 P3 测试信号同样受到干扰,压力曲线在 0.045 s 左右出现一个较大峰值,该峰值同样没有参考价值。从以上试验对比结果可

以看出,采用的数值模拟方法可以很好地对冲击波在爆室内的传播反射进行预测,同时,上述试验对比过程中的 TNT 当量为 36 kg,后续模拟中 TNT 当量均不超过 3 kg,小当量 TNT 爆炸超压峰值较低,对网格的敏感性也相对减弱,故采用上述数值模拟方法可以获取更准确的超压时程曲线。

## 2 爆室内爆炸冲击波传播规律研究

### 2.1 爆室尺寸及炸药布置

爆室的尺寸大小影响着冲击波的传播反射特性,文献[9]利用 AUTODYN 研究了爆室尺寸对超压持时的影响。爆室较小,可以获得更大的超压峰值,但会造成爆室侧壁所受爆炸超压过大,进而造成侧壁变形;爆室过大,建造成本和难度变高,且会导致冲击波峰值过小。不同尺寸的爆室使爆炸的能量传递给空气冲击波和爆室结构变形所占的比例不同,合理的爆室结构下空气冲击波吸收的能量所占比例较大,即能量的利用率有所提高。文献[15]对比了不同截面形状坑道中冲击波的传播规律,其中,圆形坑道内坑道壁所受超压峰值最小,是直墙圆拱形坑道内的 60% 左右;正方形坑道内坑道壁所受超压峰值最大,大约是直墙圆拱形坑道内的 300%。故试验采用圆柱形爆室,以使侧壁承受超压尽量减小且爆炸压力沿截面分布更加均匀。表 2 列出了半径分别为 0.75、1.5、3.0 m 的圆柱形爆室中 3 kg TNT 爆炸时侧壁的超压峰值。综合考虑,采用半径 1.5 m 的圆柱形爆室,炸药安放在爆室纵向轴线上。

表 2 不同尺寸爆室侧壁所受超压

Table 2 Overpressure on the side walls of detonation chambers with different sizes

半径/m	超压峰值/MPa
0.75	9.24
1.5	2.23
3.0	0.36

文献[16]系统研究了包括 TNT 炸药在内的各类炸药安全殉爆距离,其中,3 kg TNT 炸药相隔 0.65 m 以上时可以避免殉爆发生。虽然本文条件为管道受限爆炸,但管道半径较大,为 1.5 m,当反射波经筒壁反射并再次传播到邻近炸药处时,入射波早已经过该处,在殉爆时间内叠加增大效应不明显。同时,在长持时装置中,炸药不会裸露安装,有一定外

壳涂装,考虑到管道内受限爆炸的强化作用和炸药安装的可操作性,所有炸药间隔距离均取为 1 m,第一个炸药距离桶底 1.5 m。建立的数值模型示意图如图 8 所示。

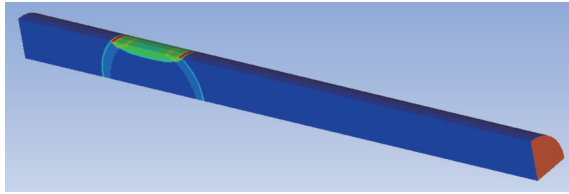


图 8 数值模型示意图

Fig. 8 Schematic diagram of numerical model

### 2.2 单个炸药冲击波传播规律

以单个 3 kg 炸药距离桶底 1.5 m 起爆为例,研究单个炸药冲击波在爆室内的传播规律,图 9 为不同时刻爆室内冲击波压力云图。图 9(a)表明,冲击波首先呈球面向四周传播;随着冲击波的继续传播,如图 9(b)所示,当球面冲击波抵达桶壁时,在爆室侧壁和桶底发生反射,稀疏波区变宽,冲击波阵面后方压力逐渐降低;随着时间的推进,波头不断沿着爆室前移,入射冲击波后方的稀疏波区与反射冲击波相互作用(图 9(c));随着入射角的不断增大,桶壁反射波与球面波的波头相互作用,产生了复杂的马赫反射(图 9(d));随后,如图 9(e)所示,侧壁反射的冲击波在爆室轴心相遇,经过反射后再次向侧壁运动,同时,侧壁的反射波在桶底再次发生反射,各种反射波与入射波相互作用,形成爆室内复杂的冲击波系;随着时间的推移,混乱的流场逐渐成为较为稳定的平面冲击波,向爆室出口传播(图 9(f))。

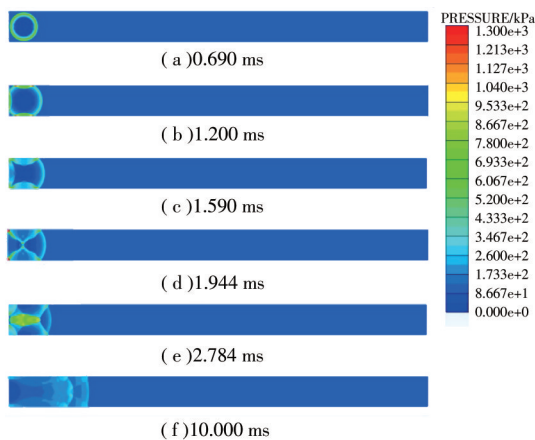


图 9 不同时刻冲击波压力等值线图

Fig. 9 Isogram of shock wave pressure at different moments

图 10 为距桶底 20 m 截面上 3 个不同径向距离处的压力时程曲线。可以看出,3 条时程曲线形态大致相同,但不同径向距离处的压力时程略有不同,轴心线上压力峰值略高于爆室边缘位置。其中,半径 0 mm 处(即轴线上)压力震荡较为明显,这是由于从侧壁反射回来的冲击波在轴心处相遇,并多次发生反射和相互作用所致,在径向 750 mm 处,测点的压力时程曲线已较为平滑。

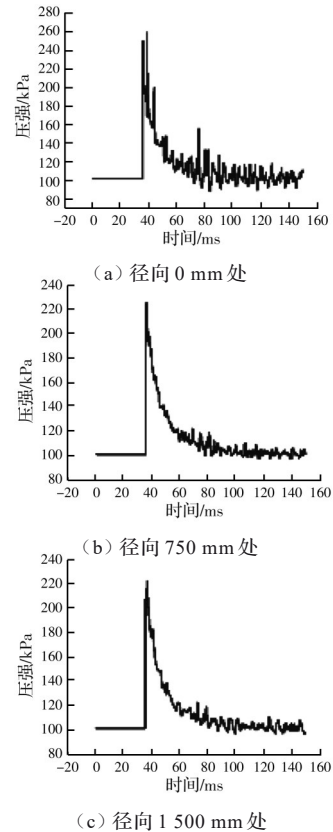


图 10 同一截面上不同径向距离的 3 个测点

Fig. 10 Three measuring points with different radial distances on the same section

### 2.3 管道长度的影响

管道的长短影响着超压峰值和持时,图 11 为单个 3 kg 炸药距离桶底 1.5 m 起爆时,距离桶底 10~35 m 截面处的压力时程曲线。可以发现,随着距离的增加,超压峰值不断减小,同时,由于距离增加,各种复杂的反射波经过多次反射叠加逐渐平稳,使得叠加引起的多峰值效果减弱,冲击波时程曲线变得平滑。因此,增加爆室长度可以使产生的冲击波更接近于单炸药大当量远距离爆炸。

### 2.4 延时起爆时差的影响

单纯增加炸药量可以增大爆炸冲击波正压峰值,在一定程度上延长冲击波作用时间,但爆筒侧

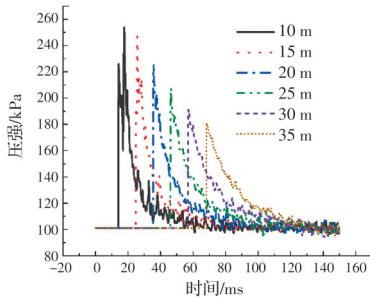


图 11 不同长度处压力时程曲线

Fig. 11 Pressure time-history curves at different length

壁压力增加明显会显著增加爆炸模拟装置的制造成本和难度。而多点小药量炸药延时起爆则可以克服这一困难,通过精确至毫秒起爆控制,使得多个炸药的冲击波在管中形成连续且衰减的波形,正压持时增加效果明显。

图 12 给出了 3 kg TNT 沿爆室纵向中轴线布置,起爆时差分别为 5、10、20 ms,爆室长度 20 m 处的压力时程曲线。从图 12 中可以看出,当起爆间隔时间较大,为 20 ms 时,后起爆炸药产生的爆炸冲击波未与先起爆炸药产生的爆炸冲击波有效融合,导致波形出现多峰值、连续非衰减的形态。当间隔时间缩短至 10 ms 后,各峰值的间距缩小,但仍旧存在多峰值现象。另一方面可以发现,第 2 个波的峰值略高于第 1 个波,这是因为第 1 次爆炸后爆室压力升高,爆炸产生的气体使空气密度有所增加,且第 2 次爆炸产生的冲击波与第 1 次爆炸产生的冲击波相互作用。若进一步将起爆时间间隔缩短至 5 ms,多峰值可以在 20 m 的距离内有效融合形成连续波形。起爆间隔时间越小,超压峰值越高,冲击波到达时间越早。

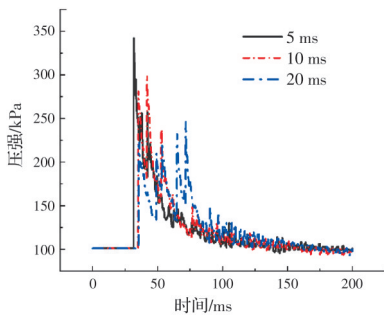


图 12 20 m 处不同起爆时差的压力时程曲线

Fig. 12 Pressure time-history curves of different detonation time difference at 20 m

图 13 给出了其余布置方案相同,仅爆室长度改变为 40 m 后的压力时程曲线。可以看出,长度增加以后,10 ms 的起爆间隔时间下多峰值现象已有效

减弱,波阵面到达测点的时差更加明显,冲击波峰值降低。若进一步将起爆时间间隔缩短至 5 ms,则波形基本不变,过短的起爆时间也不利于延时起爆的控制。由以上分析可知,根据炸药量和爆室长度合理地选择起爆时差可以获得波形丰满且连续衰减的超压时程曲线。

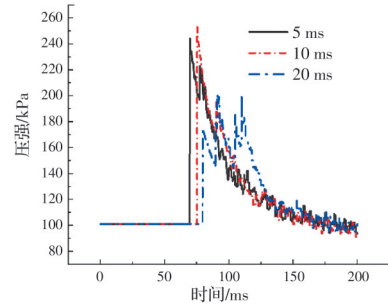
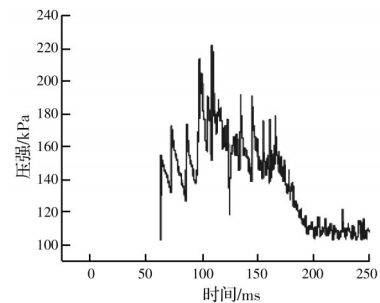


图 13 40 m 处不同起爆时差的压力时程曲线

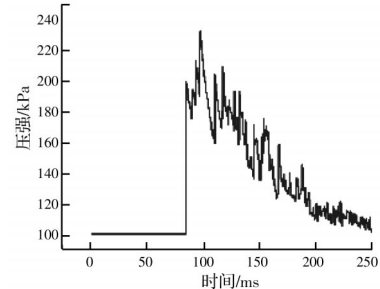
Fig. 13 Pressure time-history curves of different detonation time difference at 40 m

### 2.5 起爆顺序的影响

炸药起爆有从爆室口部向底部以及从底部向口部两种常规起爆顺序,对相同装药量、不同起爆顺序的两种起爆场景进行了模拟,不同的起爆顺序会得到不同的冲击波时程曲线,图 14 给出了从爆室底部起爆和从爆室口部起爆两种起爆方式下的压力时程曲线。



(a) 口部起爆



(b) 底部起爆

图 14 不同起爆顺序的压力时程曲线

Fig. 14 Pressure time-history curves of different detonation sequence

从图 14 中可以看出,从口部起爆时,后起爆炸药的冲击波起始位置“落后”于先起爆炸药 1 m 的距离;从底部起爆时,后起爆炸药的冲击波起始位置“领先”于先起爆炸药 1 m 的距离。故从口部起爆时,后续冲击波波头始终“落后”于先起爆产生的冲击波,导致出现多峰值间断的波形且超压时程曲线尾端不连续衰减。从爆室底部起爆时,虽然后起爆产生的冲击波起始位置“领先”于后先起爆产生的冲击波,但合理的延时间隔使后起爆产生的冲击波与先起爆产生的冲击波有效融合,形成类似于大量远距离爆炸下产生的连续衰减的长持时冲击波。

### 3 长持时爆炸冲击波产生方案

#### 3.1 方案确定方法

确定特定超压和持时的冲击波产生方案,首先需考虑经济因素和实际操作的可行性来确定爆室长度,所有炸药均在 0.5~5 kg 范围内进行选择,从爆室底部起间隔 1 m 布置。根据所需超压水平选取起始炸药量,当单个小当量炸药无法产生所需超压时,考虑采用多个小当量炸药同时起爆。接着在初始炸药后添加延时炸药,通过不断调整延时炸药的量和起爆时差,获取特定的长持时方案,具体流程如图 15 所示。

#### 3.2 长持时方案实例

经过反复调整,同时考虑到经济因素和实际操作的可行性,爆室采用长 40 m、半径 1.5 m 的圆筒

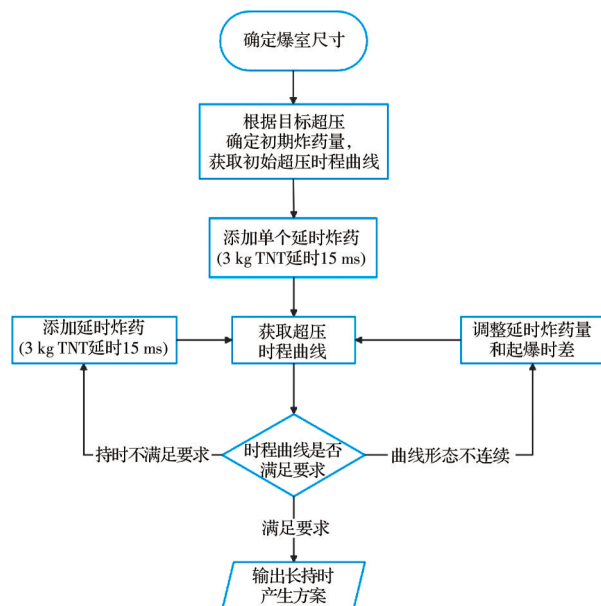


图 15 长持时冲击波产生流程图

Fig. 15 Flow chart of long holding time shock wave generation

形爆室,炸药均布在爆炸纵向轴线上,均从爆室底部起爆,持时 100、200 ms 的具体试验方案如表 3、表 4 所示。

1)持时 100 ms 炸药布置方案。共使用 3 颗球形炸药,单个炸药质量均为 3 kg。

表 3 100 ms 持时炸药布置方案

Table 3 Explosive arrangement scheme of 100 ms duration

距底部的距离/m	起爆时刻/ms	TNT 质量/kg
1.5	0	3
2.5	10	3
3.5	20	3

2)持时 200 ms 炸药布置方案。共使用 12 颗小质量球形炸药,单个炸药质量最小 0.5 kg,最大 3 kg。

表 4 200 ms 持时炸药布置方案

Table 4 Explosive arrangement scheme of 200 ms duration

距底部的距离/m	起爆时刻/ms	TNT 质量/kg
1.5	0	3
2.5	15	3
3.5	30	3
4.5	40	2
5.5	50	2
6.5	60	2
7.5	70	1
8.5	80	1
9.5	90	1
10.5	95	0.5
11.5	100	0.5
12.5	105	0.5

图 16、图 17 为数值模拟得到的压力时程曲线。从图 16 中可以看出,爆炸压力时程曲线正压持续时间约 100 ms,基本无升压时间且连续衰减。从图 17 中可以看出,冲击波正压作用时间可达 200 ms 以

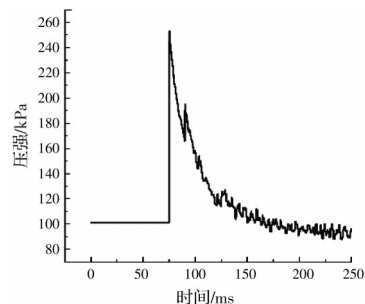


图 16 持时 100 ms 压力时程曲线

Fig. 16 Pressure time-history curves of 100 ms duration

上,超压随时间连续衰减。

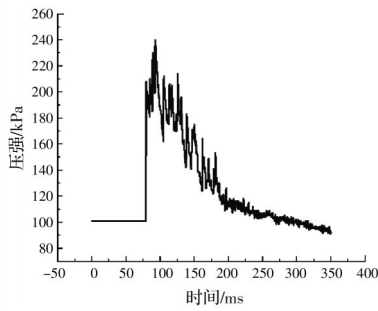


图17 持时200 ms压力时程曲线

Fig. 17 Pressure time-history curves of 200 ms duration

## 4 结论

基于AUTODYN软件,建立了爆室内TNT爆炸的数值模型。将模拟结果与已有的试验结果进行对比,验证了所建模型的可靠性。在此基础上,研究爆炸冲击波在圆筒形爆室内的传播规律,分析管道长度、延时间隔、起爆顺序等参数对超压时程曲线的影响,并提出两种持时的具体长持时爆炸冲击波产生方案。主要结论如下:

1)冲击波与爆室侧壁发生多次反射,并与入射冲击波相互作用,产生复杂的叠加波,随着传播距离的增加,逐渐形成较为稳定的平面冲击波,增加爆室长度可以有效延长爆炸冲击波的持续时间。

2)根据炸药量合理地选择起爆时差可以获得波形丰满且连续衰减的超压时程曲线,例如,对于3 kg TNT来说,10 ms的起爆时差比较合适。

3)从爆室口部起爆得到的超压时程曲线会出现多峰值现象,相比而言,从底部起爆是一种更好的选择。

4)提出使用多个小质量球形炸药多点延时起爆产生100、200 ms长持时冲击波的方案,为长持时爆炸模拟装置的设计提供理论基础和实践方案。

### 参考文献

[1] ANDERSEN W H, LOUIE N A. Shock tube for simulating nuclear blast durations [J]. *The Review of Scientific Instruments*, 1978, 49(12): 1729.

[2] CAMPBELL M F, PARISE T, TULGESTKE A M, et al. Strategies for obtaining long constant-pressure test times in shock tubes [J]. *Shock Waves*, 2015, 25(6): 651-665.

[3] ISMAIL A, EZZELDIN M, EL-DAKHAKHNI W, et al. Blast load simulation using conical shock tube

systems [J]. *International Journal of Protective Structures*, 2020, 11(2): 135-158.

- [4] 杨科之, 杨秀敏. 坑道内化爆冲击波的传播规律[J]. *爆炸与冲击*, 2003, 23(1): 37-40.  
YANG K Z, YANG X M. Shock waves propagation inside tunnels [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2003, 23(1): 37-40. (in Chinese)
- [5] 李秀地, 郑颖人, 李列胜, 等. 长坑道中化爆冲击波压力传播规律的数值模拟[J]. *爆破器材*, 2005, 34(5): 5-8.  
LI X D, ZHENG Y R, LI L S, et al. Simulation of the pressure attenuation of chemical shock wave in long tunnels [J]. *Explosive Materials*, 2005, 34(5): 5-8. (in Chinese)
- [6] 王朝成, 任辉启, 穆朝民, 等. 一端开口圆筒形爆室线状装药爆炸冲击波峰值压力计算分析[J]. *振动与冲击*, 2014, 33(9): 122-125.  
WANG C C, REN H Q, MU C M, et al. Analysis and calculation for peak pressure of shock wave of linear charge explosive in a cylinder blasting chamber [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2014, 33(9): 122-125. (in Chinese)
- [7] 穆朝民, 任辉启, 李永池, 等. 爆室内爆炸流场演化与壳体动力响应的数值模拟[J]. *弹箭与制导学报*, 2010, 30(2): 82-86.  
MU C M, REN H Q, LI Y C, et al. Numerical simulation on blast flow field evolution and dynamic response of blast chamber [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2010, 30(2): 82-86. (in Chinese)
- [8] 姚哲芳, 任辉启, 沈兆武. 柱状装药爆炸条件下厚壁圆筒爆室内流场及结构动力响应分析[J]. *爆炸与冲击*, 2012, 32(5): 449-456.  
YAO Z F, REN H Q, SHEN Z W. Internal blast flow field and dynamic responses of thick-walled cylinder subjected to cylindrical charge explosion [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2012, 32(5): 449-456. (in Chinese)
- [9] 辛凯, 梁仕发, 宋红民, 等. 爆炸波模拟装置延长冲击波正压作用时间的关键技术[J]. *防护工程*, 2013(5): 9-13.  
XIN K, LIANG S F, SONG H M, et al. The key technology for increasing positive duration in a blast wave simulator [J]. *Protective Engineering*, 2013(5): 9-13. (in Chinese)
- [10] 刘平, 王予民, 刘瑞朝. 空气与土中爆炸波模拟装置的数值分析[J]. *焦作工学院学报(自然科学版)*, 2002, 21(4): 305-307.  
LIU P, WANG Y M, LIU R C. Numerical analysis for simulation equipment of blasting wave in air and soil [J]. *Journal of Jiaozuo Institute of Technology*, 2002, 21(4):



- 305-307. (in Chinese)
- [11] CHAPMAN T C, ROSE T A, SMITH P D. Blast wave simulation using AUTODYN2D: A parametric study [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1995, 16(5/6): 777-787.
- [12] 闫秋实. 典型地铁结构内爆炸流场分布及动力反应研究[D]. 北京: 清华大学, 2011: 39-43.  
YAN Q S. Flow field distribution and dynamic response analysis of typical subway structure subjected to internal explosion [D]. Beijing: Tsinghua University, 2011: 39-43. (in Chinese)
- [13] SHI Y C, LI Z X, HAO H. Mesh size effect in numerical simulation of blast wave propagation and interaction with structures [J]. *Transactions of Tianjin University*, 2008, 14(6): 396-402.
- [14] LUCCIONI B, AMBROSINI D, DANESI R. Blast load assessment using hydrocodes [J]. *Engineering Structures*, 2006, 28(12): 1736-1744.
- [15] 卢红琴, 刘伟庆. 坑道截面形状对化爆冲击波传播规律的影响程度分析[J]. *南京工业大学学报(自然科学版)*, 2009, 31(6): 41-44.  
LU H Q, LIU W Q. Influence of cross-section shape of tunnel on in-tunnel air blast wave propagation [J]. *Journal of Nanjing University of Technology (Natural Science Edition)*, 2009, 31(6): 41-44. (in Chinese)
- [16] 李铮, 项续章, 郭梓熙. 各种炸药的殉爆安全距离[J]. *爆炸与冲击*, 1994, 14(3): 231-241  
LI Z, XIANG X Z, GUO Z X. Various explosives of safety distance of unsympathetic detonation [J]. *Explosion and Shock Waves*, 1994, 14(3): 231-241. (in Chinese)

(编辑 黄廷)