

# TNT 内爆准静态压力实验和数值模拟研究

张明明,张连生,王鑫

(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:**通过自主设计的密闭爆炸容器,开展了 TNT 内爆实验,用指数衰减模型对压力载荷进行分析,并与数值模拟结果进行对比;结果表明:质量/空间体积  $m/V$  是决定准静态压力的主要因素,针对不同的  $m/V$  范围,准静态压力变化规律呈现差异性;基于实验数据,得到了爆炸准静态压力的经验计算公式,可为爆炸准静态压力预估和炸药威力评价提供参考。

**关键词:**TNT;准静态压力;指数衰减模型;数值模拟;质量/空间体积

**本文引用格式:**张明明,张连生,王鑫. TNT 内爆准静态压力实验和数值模拟研究[J]. 兵器装备工程学报,2019,40(5):195-199.

**Citation format:**ZHANG Mingming, ZHANG Liansheng, WANG Xin. Quasi-Static Pressure Experiment and Numerical Simulation of TNT Internal Explosion[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering,2019,40(5):195-199.

中图分类号:TJ55;O38

文献标识码:A

文章编号:2096-2304(2019)05-0195-05

## Quasi-Static Pressure Experiment and Numerical Simulation of TNT Internal Explosion

ZHANG Mingming, ZHANG Liansheng, WANG Xin

(State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Squasi-static pressure in explosion containment vessel, experiments were carried out through a self-designed explosion containment vessel. The exponential decay model was used to analyze the pressure load, and the results were compared with those of numerical simulation. The results shows that quasi-static pressures obtained by exponential decay model agree well with numerical simulation results. The ratio of charge mass and volume ( $m/V$ ) is the main factor determining quasi-static pressure, and the variation of quasi-static pressure varies according to different  $m/V$  ranges. Based on the experimental date, the empirical formula of the quasi-static pressure was fitted, which can provide reference for the prediction of quasi-static pressure and the evaluation of explosives power.

**Key words:** TNT; quasi-static pressure; exponential decay model; numerical simulation; charge mass/space volume

炸药在密闭空间内爆炸后,由于爆炸产物气体在密闭空间内均匀分布,在密闭空间内部会产生持续时间较长的准静态压力。因为密闭空间对炸药爆炸过程的强约束性,准静态压力表征了炸药总能量的集聚,因此密闭空间爆炸准静态压力是评价炸药威力的一个重要参量,开展炸药在密闭容器中

爆炸准静态压力的研究对于炸药威力评价和结构防护都有重要的意义<sup>[1]</sup>。

针对密闭空间内爆炸准静态压力的研究,国内外的学者做了大量的工作。Baker等<sup>[2]</sup>利用大量实验数据对带泄压口的密闭空间准静态压力载荷规律进行了研究。Marchand

收稿日期:2019-02-03;修回日期:2019-03-10

作者简介:张明明(1993—),男,硕士研究生,主要从事爆炸毁伤技术研究,E-mail:bitzhangmm@163.com。

通讯作者:张连生(1963—),男,副研究员,主要从事爆炸毁伤技术研究,E-mail:zzzllsss@bit.edu.cn。

等<sup>[3]</sup>研究了四种炸药爆炸准静态压力与质量/空间体积之间的关系。Anderson 等<sup>[4]</sup>基于文献中的实验数据,利用相似理论拟合得到了容器内爆炸准静态压力无量纲峰值的经验公式。王等旺等<sup>[5]</sup>对爆炸容器内准静态压力进行了实验研究,根据实验数据得到了经验计算公式。钟巍等<sup>[6]</sup>对考虑化学反应的密闭容器爆炸准静态压力提出了计算方法。

目前,关于准静态压力的研究主要集中在实验研究方面,不同文献得到的经验计算公式差异较大,而且计算公式的适用范围较小。本文以 TNT 炸药为研究对象,开展炸药在密闭容器内爆实验,结合数值模拟结果对 TNT 炸药在密闭容器的爆炸准静态压力规律进行了分析研究。

## 1 准静态压力理论计算模型

准静态压力的形成可以认为包括两部分<sup>[7]</sup>:一部分是爆炸产物气体在密闭容器内膨胀形成的压力  $p_1$ ,另一部分是炸药爆炸释放能量而使爆炸产物气体升温而形成的压力  $p_2$ 。同时假设爆炸产物气体是理想气体,且密闭容器绝热,不计密闭容器与外界热交换带来的能量损失。炸药在密闭容器内膨胀,由理想气体状态方程:

$$mp_0V_0 = p_1V \quad (1)$$

式(1)中: $m$ 为装药质量, $P_0$ 为大气压, $V_0$ 为炸药的爆容, $V$ 为爆炸容器体积。爆炸反应释放的能量全部用来加热爆轰气体,密闭容器内的温度升高。

$$\Delta T = mQ/m_g c_v \quad (2)$$

式(2)中: $Q$ 为炸药的爆热, $m_g$ 为密闭容器内气体质量, $c_v$ 为密闭容器内气体定容比热。因为温升而形成的压力

$$p_2 = (nRQ/m_g c_v) \cdot m/V \quad (3)$$

式(3)中: $n$ 为爆炸气体产物物质的量, $R$ 为理想气体常数。爆炸准静态压力:

$$p_{qs} = p_1 + p_2 = (p_0V_0 + RQ/Mc_v) \cdot m/V \quad (4)$$

对于确定的炸药类型, $V_0$ 、 $R$ 、 $Q$ 、 $M$ 、 $c_v$ 都是常数,从式(4)可以看出,准静态压力与质量空间体积比  $m/V$  呈线性关系。

### 1.1 实验

1) 实验介绍。本文设计的密闭爆炸容器结构示意图如图 1,主体尺寸为  $\phi 30 \text{ cm} \times 18 \text{ cm}$ ,空腔尺寸为  $\phi 6 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ ,空腔体积为  $282.7 \text{ cm}^3$ ,爆炸容器由上端盖、下端盖、爆炸腔体和传感器安装组件四个部分构成。传感器选择壁面压电压力传感器。为了保证结构的强度和装置的重复使用,主体材料选用高强度不锈钢。

为了防止爆炸冲击波压力对传感器的破坏,设计如图 2 所示的传感器安装组件,组件采用了导孔设计,导孔的存在可以让传感器免受强冲击波的破坏。虽然这种结构会降低整个测试系统的频率响应,但是因为我们所要测试的爆炸准静态压力属于低频变化参量,这种设计能够满足测试要求。实验采用 3 组 TNT 药量,分别为:5 g、10 g 和 15 g,每组药量进行 3 发实验,8 号电雷管一端起爆 TNT 装药。

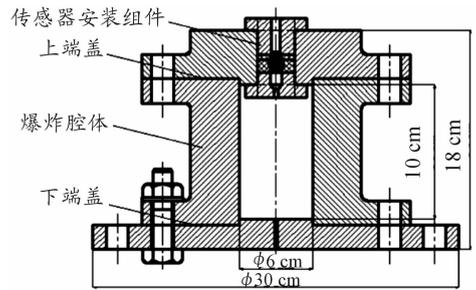


图 1 密闭爆炸容器结构示意图

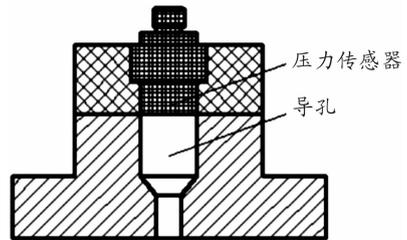


图 2 传感器安装组件示意图

2) 结果与分析。图 3 所示是 5 g TNT 内爆实验所测得压力波形。从波形图中可以看出,压力波形的变化可以分为两个阶段:第一阶段是高频的爆炸冲击波载荷阶段,因为传感器采用的是导孔安装结构,冲击波在导孔中会出现波的反射和叠加;爆炸冲击波载荷过后就是准静态压力载荷阶段,准静态压力持续时间达到数十到数百毫秒,相比于爆炸冲击波载荷,持续时间明显更长。

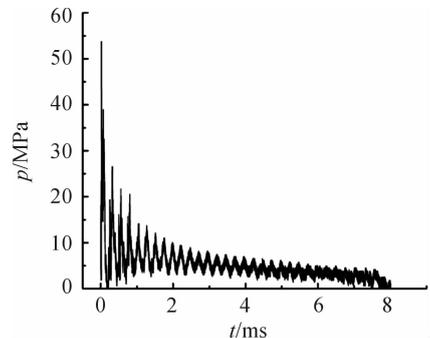


图 3 压力波形

在准静态压力载荷阶段,随着内部气体温度的均匀化和非绝对密封导致的压力外泄,准静态压力波形呈现缓慢衰减的趋势。如何从所测得的压力波形中得到一个合适的值来作为准静态压力值成为了分析的难点。国内外很多研究者认为取压力曲线在一定时间内的平均值作为准静态压力值,这种方法在选取时间范围上有很强的人为性,而且针对不同的实验装置,得到的准静态压力值也会有所差异,这也可能是导致不同文献中所测得的准静态压力值出现较大差异的原因之一。

### 1.2 指数衰减模型

为了对小型密闭容器内准静态压力进行定量描述,本文

应用指数衰减模型对实验所测压力进行分析,指数衰减模型表达式为<sup>[8]</sup>

$$p(t) = p_m \exp(-ct) \quad (5)$$

式(5)中: $p(t)$ 为密闭容器内压力随时间的变化关系, $p_m$ 为压力峰值, $c$ 为指数衰减系数。根据指数衰减模型的表达式,采用指数拟合的方式确定模型中的参数 $p_m$ 和 $c$ ,如图4所示。为了确定合适的准静态压力数值,取理想状况下的压力峰值 $p_m$ 作为准静态压力值 $p_{qs}$ 。

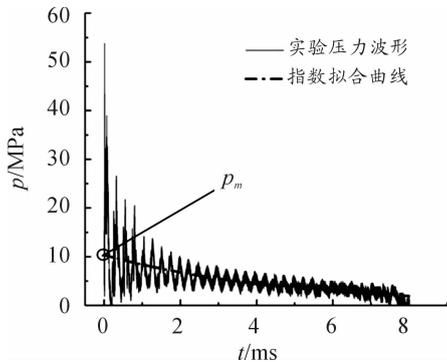


图4 指数衰减模型

### 1.3 不同 $m/V$ 条件下的准静态压力

由爆炸准静态压力理论计算模型可以看出,对于确定的炸药种类,密闭空间内准静态压力是由炸药质量和密闭空间体积之比  $m/V$  决定的。目前的研究主要是通过实验数据得到一定范围内的经验计算公式。对每组药量进行了3次实验,每次实验的实验波形按照指数衰减模型处理得到的准静态压力值如表1所示。

表1 爆炸准静态压力实验值

$m/g$	$V/cm^3$	$m/V/(kg \cdot m^{-3})$	$p_{qs}/MPa$	$\bar{p}_{qs}/MPa$	$(p_{qs} - \bar{p}_{qs})/\bar{p}_{qs}/\%$
			13.20		-4.9
5	282.7	17.69	12.54	12.58	0.4
			12.00		4.6
			20.94		2.6
10	282.7	35.37	22.16	21.5	-3.0
			21.40		0.4
			29.44		-3.1
15	282.7	53.06	28.42	28.55	0.4
			27.75		2.8

从表1的数据可以得到,以相同药量3次实验的平均值为标准,每次实验的相对偏差都在5%以内,说明实验的重复性良好。为了得到TNT爆炸准静态压力在不同质量空间体积比情况下的变化规律,将本文实验值与主要文献的实验值

进行对比,有关数据如图5所示。

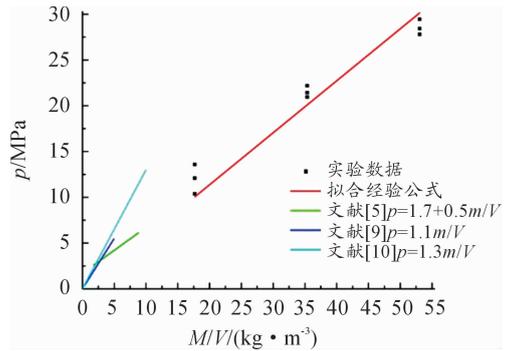


图5 本文实验值和有关文献的实验值

从图5中可以发现,目前从文献中得到TNT准静态压力经验公式适用范围较小,只能计算  $m/V$  在  $(0, 10 \text{ kg/m}^3)$  范围内的准静态压力。为了增大经验计算公式的运用范围,基于我们在密闭容器实验中得到的准静态压力数据,参照理论模型中的线性表达式形式,在  $17.69 < m/V < 53.06$  范围内,拟合得到如下计算公式:

$$p_{qs} = 0.568m/V \quad (6)$$

式(6)中: $m$ 为炸药的质量(kg), $V$ 为密闭空间的体积( $\text{m}^3$ ), $p_{qs}$ 为所求的准静态压力(MPa)。计算公式的拟合相关性  $R^2 = 0.996$ 。计算公式可为  $m/V$  在指定范围内的爆炸准静态压力提供预测,进而为炸药的威力评价提供参考。

可以发现,实验数据拟合得到的经验计算式(6)和文献经验公式的线性系数相比较小,原因分析是因为TNT属于负氧平衡炸药,其氧平衡系数达到-74%。当  $m/V$  较小时,密闭空间内有足够的氧与爆炸产物进行二次反应释放能量,此时准静态压力的形成除了爆炸反应释放的能量外,还包括二次反应所释放的能量。随着  $m/V$  不断增大,密闭空间内的氧不足以支持爆炸产物进行二次反应,密闭空间内总能量增大趋势变缓,导致爆炸准静态压力随着  $m/V$  的增大幅度变小,由此说明针对不同的  $m/V$  范围,TNT爆炸准静态压力变化呈现差异性。

## 2 数值模拟

### 2.1 模型建立

本文利用LS-DYNA非线性动力学软件对5g、10g和15g三组药量下TNT炸药在密闭容器内的爆炸过程进行数值模拟。对实验所用柱形爆炸容器主体部分等尺寸建模,简化传感器的导孔安装结构。模型中的空气和炸药采用欧拉网格,密闭容器采用拉格朗日网格,爆炸产物和密闭容器间采用流固耦合算法,边界选择非反射透射边界。为了减少计算时间,建立1/4网格模型,网格大小为1mm,数值模拟网格计算模型如图6所示。

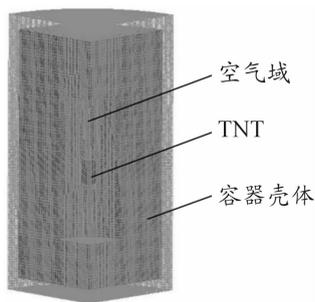


图6 数值模拟网格计算模型

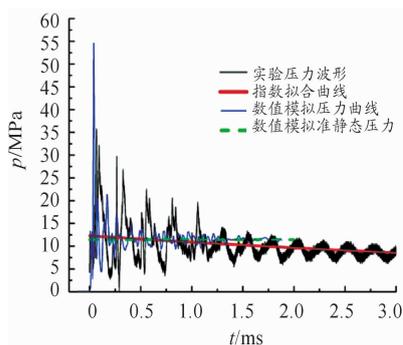
在计算模型中,用高能炸药燃烧模型和JWL状态方程来表征TNT炸药的材料模型,表达式为

$$P = A_1 \left(1 - \frac{w}{R_1 V}\right) e^{-R_1 V} + B_1 \left(1 - \frac{w}{R_2 V}\right) e^{-R_2 V} + \frac{wE}{V} \quad (7)$$

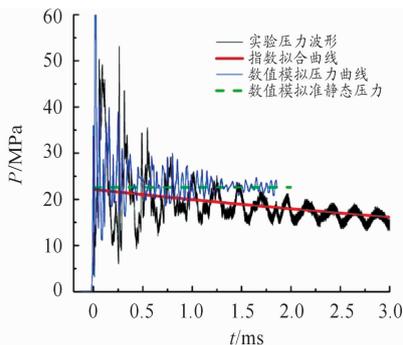
式(7)中: $P$ 为爆轰压力, $V$ 是相对体积, $E$ 是单位体积炸药的初始内能, $A_1$ 、 $B_1$ 、 $R_1$ 、 $R_2$ 、 $w$ 均为状态方程参数,JWL状态方程参数值如表2所示<sup>[11]</sup>。

表2 TNT的JWL状态方程参数值

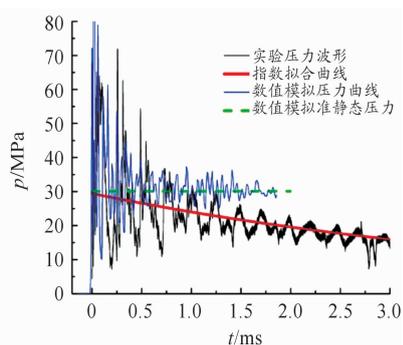
炸药	$A/\text{GPa}$	$B/\text{GPa}$	$R_1$	$R_2$	$w$
TNT	373.77	3.7471	4.15	0.9	0.35



(a) 5 g TNT



(b) 10 g TNT



(c) 15 g TNT

图7 数值模拟与实验结果

通过对比发现,数值模拟得到的准静态压力值和实验得到的准静态压力值吻合较好,具体的对比结果如表5所示,从表5中可以得到数值模拟结果和实验结果相对偏差在5%左右,说明运用指数衰减模型描述小型密闭容器爆炸准静态压力变化具有一定的合理性,也可数值模拟方法研究爆炸准静态压力问题提供参考。

表5 准静态压力实验和数值模拟结果

$m/V/$ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	实验 $p_{qs}/$ MPa	数值模拟 $p_{qs}/\text{MPa}$	相对偏 差/%
17.69	12.58	11.82	-6
35.37	21.5	22.61	5.1
53.06	28.55	30.09	5.3

用随动硬化材料模型来表征密闭容器壳体高强度不锈钢的材料模型,容器壳体的材料参数值如表3所示。

空气域用空物质材料模型和线性多项式状态方程描述,参数值如表4所示。

表3 容器壳体的材料参数值

壳体	密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	杨氏模量/ GPa	泊松 比	屈服应 力/MPa
钢	7.85	210	0.3	350

表4 空气的材料参数值

$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$C_0/\text{Pa}$	$C_1$	$C_2$	$C_3$
1.29	$-1.0 \times 10^5$	0	0	0
$C_4$	$C_5$	$C_6$	$E/(\text{J} \cdot \text{m}^{-3})$	$V_0$
0.4	0.4	0	$2.5 \times 10^5$	1.0

## 2.2 结果分析

图7是在不同药量条件下数值模拟压力变化和实验压力波形。在爆炸冲击波阶段,由于传感器的导孔安装方式,数值模拟压力曲线和实验压力波形差异较大。在准静态压力阶段,因为在数值模拟中密闭容器是理想密封且满足绝热条件,所以准静态压力值基本保持稳定不变。

## 3 结论

1) 运用指数衰减模型分析密闭容器内的爆炸准静态压力变化,实验准静态压力和数值模拟结果吻合较好,说明了指数衰减模型描述小型密闭容器爆炸准静态压力变化具有一定的合理性。

2) 质量/空间体积  $m/V$  是影响 TNT 准静态压力大小的主要因素,针对不同的  $m/V$  范围,准静态压力变化不同。

3) 基于实验数据,得到了  $m/V$  在  $(17.69, 53.06) \text{ kg/m}^3$  范围内的爆炸准静态压力  $p = 0.568m/V$ ,可用于 TNT 爆炸准静态压力值的预测。

## 参考文献:

- [1] RICHARD G A, JASON T D, JOSEPH S, et al. Quantitative distinction between detonation and after burn energy deposition using pressure-time histories in enclosed explosions [C]//13th International Detonation Symposium. Norfolk Virginia: Office of Naval Research, 2006.
- [2] BAKER W E, OLDHAM G A. Estimates of blowdown of quasi-static pressures in vented chambers [R]. San Antonio, TX: Southwest Research Institute, 1975.
- [3] MARCHAND K A, COX P A, POLCYN M A. A design guide and specification for small explosive containment structures [J]. Containment Systems, SAND94-2255 [R]. US: Amer Society of Civil Engineers, 1994: 324 - 331.
- [4] ANDERSON C E, BAKER W E, WAUTERS D K, et al. Quasi-static pressure, duration, and impulse for explosions in structures [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1983, 25(6): 455 - 456.
- [5] 王等旺, 张德志, 李焰, 等. 爆炸容器内准静态气压实验研究 [J]. 兵工学报, 2012, 33(12): 1493 - 1497.

- [6] 钟巍, 田宙. 等压假设下考虑化学反应动力学影响的约束爆炸准静态压力的计算 [J]. 爆炸与冲击, 2013, 33(4): 375 - 380.
- [7] 张玉磊, 李芝绒, 李海燕等. 温压炸药内爆炸压力特性及威力试验研究 [J]. 兵工学报, 2018, 39(7): 1333 - 1338.
- [8] AMES R G, DROTAR J T, SILBER J. et al. Quantitative distinction between detonation and after burn energy deposition using pressure-time histories in enclosed explosions [C]//Proc of 39th Int Annu Conf of ICT. Karlsruhe: ICT, 2008.
- [9] 刘文祥, 张德志. 球型爆炸容器内炸药爆炸形成的准静态气体压力 [J]. 爆炸与冲击, 2018, 38(5): 1045 - 1050.
- [10] CARLSON R W. Confinement of an explosion by a steel vessel [R]. Los Alamos: LANL. 1945.
- [11] FELDGUN V R, KARINSKI Y S, EDRI I, et al. Prediction of the quasi-static pressure in confined and partially confined explosions and its application to blast response simulation of flexible structures [J]. Int J Impact, 2016, 90(15): 46 - 60.

(责任编辑 唐定国)

(上接第 159 页)

## 4 结论

设计了基于海豚额隆结构仿生学的水下电容式微加工超声传感器。基于仿生学知识,建立了简单的声阻抗匹配模型,利用 comsol multiphysics 4. 3b 软件进行有限元仿真分析,仿真结果证明与理论计算值基本相符,同时与超声直接由空气射入水中的情况进行比对,进一步证明了设计的正确性。基于以上研究可知,海豚额隆结构仿生学电容式超声传感器阻抗匹配性能良好,有效输出声压大,可应用于水下超声成像系统。

## 参考文献:

- [1] 郑舟. 电容式微加工超声传感器的有限元分析及其薄膜的形变研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
- [2] 王朝杰, 王红亮, 段培盛, 等. 电容式微机械超声传感器设计与仿真 [J]. 压电与声光, 2017, 39(2): 284 - 288.
- [3] HERZING D L. Clicks, whistles and pulses: Passive and active signal use in dolphin communication [J]. Acta Astronautica, 2014, 105(2): 534 - 537.

- [4] 张自宣. 鲸豚声呐声源的仿生结构模型设计及研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2016.
- [5] 宋忠长, 张宇, 魏翀, 等. 基于 CT 扫描的长江江豚声波束形成研究 [C]//中国声学学会水声学会 2015 年学术会议论文集. 中国声学学会水声学会: 中国声学学会, 2015.
- [6] 荆显英, 肖友芙, 景荣才. 白鲸豚 [Lipotes vexillifer] 额隆的声功能 [J]. 声学学报, 1982(1): 14 - 22.
- [7] 华明龙. 白鲸豚额隆声衰减和声速的测量 [J]. 兽类学报, 1987, 7(2): 85 - 91.
- [8] 伍于添. 医学超声设备应用设计及应用 [M]. 上海: 上海科学技术文献出版社, 2012.
- [9] 李凤岐. 海洋科学导论 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [10] 杜骋, 杨军. 聚苯乙烯泡沫 (EPS) 的特性及应用分析 [J]. 东南大学学报 (自然科学版), 2001(3): 138 - 142.
- [11] 王红亮. CMUT 及其阵列工作机理与应用基础研究 [D]. 天津: 天津大学, 2016.

(责任编辑 杨继森)