DOI: 10.11883/bzycj-2017-0056 文章编号: 1001-1455(2018)05-1045-06

球形爆炸容器内炸药爆炸形成的准静态气体压力*

刘文祥[1,2],张德志[2],钟方平[2],程 帅[2],张庆明[1]
(1.北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室,北京 100081;
2.西北核技术研究所强动载与效应重点实验室,陕西 西安 710024)

摘要: 准静态压力是爆炸容器设计的重要参考数据。在球形爆炸容器内开展了爆炸加载实验,压力传感器采用齐平和导孔两种安装方式,均获得了准静态压力数据,且两组数据一致。理论推导了准静态压力的表达式,并通过拟合实测数据得到经验公式。研究结果表明:(1)爆炸冲击波在容器内部往返 3 次后,容器内气体压力进入准静态;(2)准静态压力与当量容积比近似呈正比例关系,比例系数为1.10 MPa·m^3/kg TNT。

关键词: 准静态压力;球形爆炸容器;当量容积比;压力传感器
中图分类号: O381 **国标学科代码**: 13035 **文献标志码**: A

炸药在密闭空间内爆炸,冲击波在空间内往返运动,并在该过程中逐渐减弱并消失,之后空间内的压力分布较均匀,随时间变化缓慢,这种压力状态被称为准静态压力状态。准静态气压状态下空间内的压力因气体与外界热交换而缓慢变化,而一般受关注的是最初的准静态压力值或者准静态压力峰值,下文将准静态压力峰值简称为准静态压力。

准静态压力受到的关注远不及爆炸冲击波形成的脉冲压力,但其仍是非常重要的力学参数,比如:准静态压力是爆炸容器安全设计的重要参考数据[1-2];另外,对于地下核爆炸,爆室内的准静态压力是核爆炸形成的剧毒物质在岩土孔隙和裂缝中扩散的动力[3]。国外实验研究工作较丰富[4-8],Anderson 等[7]基于文献中的实验数据,利用相似理论拟合得到容器内爆炸准静态气压无量纲峰值的经验公式,Anthony 等[8]通过实验得到了炸药 LX-13 在容器内爆炸形成的准静态压力经验公式,Bultman[1]在容器设计时也引用了基于实验数据的经验公式,但这些经验公式差异较大。国内的研究工作不多,特别是实验工作比较缺乏。王等旺等[9]、林俊德[10]开展了柱形容器内准静态压力的实验研究,钟方平[11]通过数值计算研究了柱形容器内的准静态压力,钟巍等[12]研究了考虑化学反应动力学影响的约束爆炸准静态压力的计算方法。

本文中,在球形爆炸容器内开展了 4 种不同当量的爆炸加载实验,实验中压力传感器采用了 2 种安装方式,均获得了理想数据;还理论推导了准静态压力的表达式,并通过拟合实测数据得到具体的经验公式。

1 实 验

实验在内径 523 mm 的球形爆炸容器内进行,容器如图 1 所示。炸药采用球形装药,装药包括主装药和起爆微型药球两部分,如图 2 所示。主装药由 2 个半球组成,为 60%RDX 和 40%TNT 浇铸而成。起爆药球的当量为 1 g TNT,直径为 10 mm,由微米级的 PETN 粉压制而成。起爆药球连接一根柔爆索,其中心为柔爆索的一端。柔爆索直径为 1 mm,线装药密度为 0.5 g RDX/m,为铅皮柔爆索。

实验时采用细绳吊挂装药,装药置于容器中心。容器内除了炸药、导爆索和细绳,再无其他物体,这样的做法可以尽量减少容器内除炸药以外的多余物体。雷管处于雷管罩内,与容器内部体积隔开。由雷管

* 收稿日期: 2017-02-22; 修回日期: 2017-06-30
基金项目: 国家自然科学基金项目(11172245)
第一作者: 刘文祥(1982—),男,博士,副研究员,wxliu@ustc.edu。

引爆较细的柔爆索，柔爆索在中心起爆微型药球，微型药球再起爆球形主装药，该起爆方式能保证形成较理想的球面冲击波。采用 27、60、185、370 g TNT 4 种当量，对应的比距离范围为0.36～0.87 m/kg$^{1/3}$。

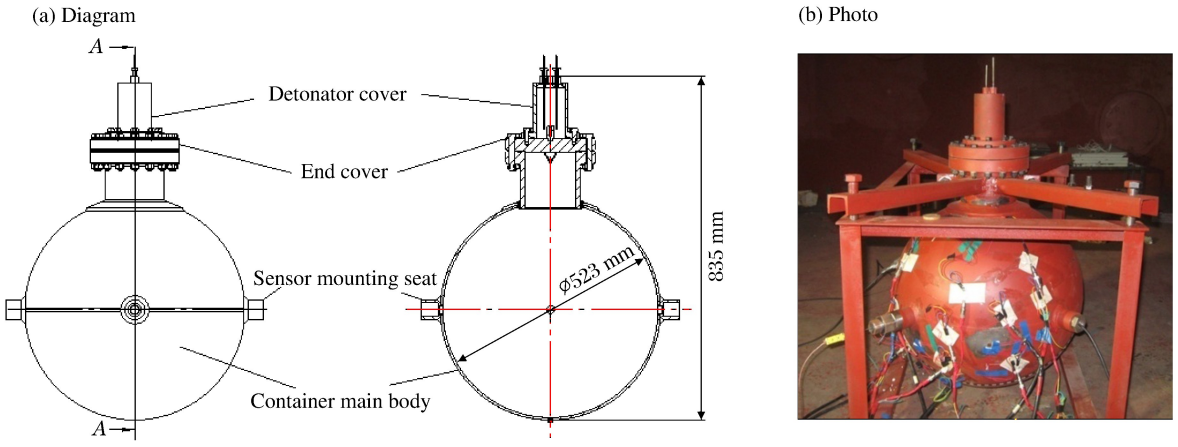


图 1 实验用球形爆炸容器

Fig. 1 The spherical explosion containment vessel used in experiment

容器赤道面上均布 4 个用于传感器安装的接口。压力传感器安装包括齐平安装和导孔安装 2 种方式，如图 3 所示。齐平安装方式中传感器敏感面与容器内壁齐平；导孔安装方式设计了一个空腔，传感器敏感面处于空腔内，该空腔通过 6 个直径1 mm的导孔连接容器。导孔安装方式可以避免传感器遭受强冲击波或高速破片的破坏，但也导致整个测试的频响降低[13]，因此该方式仅适合准静态压力这种变化较缓慢的参数测试。

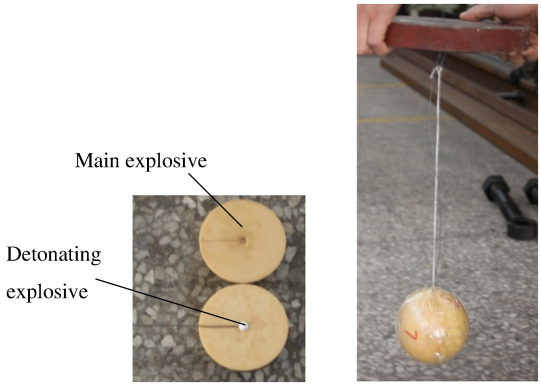


图 2 实验装药

Fig. 2 Explosive installation

实验中采用了某型压电式压力传感器和某型压阻式压力传感器，参数见表 1。由于实验中压阻式传感器在采用齐平安装方式下容易损坏或实测信号质量不高，最终压阻式传感器采用导孔安装方式，压电式传感器采用齐平安装方式。2 种压力测量系统通过同步机实现时间同步。

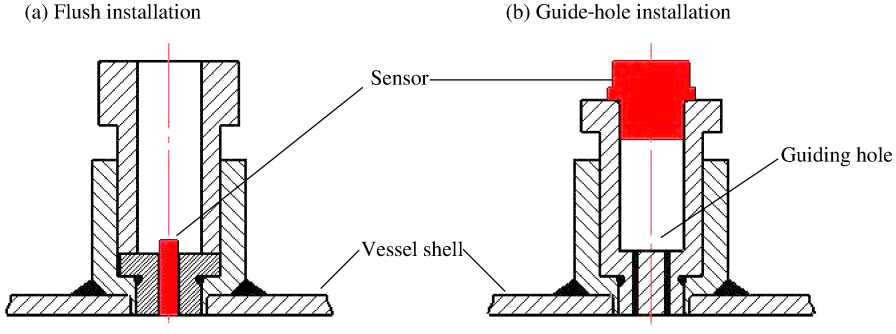


图 3 压力传感器安装结构示意图

Fig. 3 Diagrams of pressure sensor installations

表 1 压力传感器参数

Table 1 Performance parameters of pressure sensors

类型	量程/MPa	频响/kHz	上升时间/μs	非线性度	精度
压电式传感器	34.48，68.95	500	≤1.0	≤1.0%Fs	0.14，0.28 kPa
压阻式传感器	15，40	600	≤0.3	≤1.0%Fs	0.5%Fs

2　实验结果及分析

2.1　实验结果

图 4 为齐平安装压力传感器测得的典型波形。可见压力波形的前期(爆炸后 1 ms 之前)存在 3 次较明显的脉冲，表明炸药在容器中心爆炸后，形成的冲击波在容器壁和容器中心之间往返运动，在容器壁上反射了 3 次；在 3 个脉冲之后，压力波形变化较缓，表明容器内的压力趋于平静，进入准静态压力状态。当然，在比距离比本文的更小的工况下，也可能出现冲击波往返次数多于 3 次，容器内压力进入准静态状态的现象。准静态压力的取值是对压力波形的准静态压力部分进行平均处理，图 4 中冲击波反射压力达到约 16 MPa，准静态压力仅为 1.5 MPa。

图 5 为导孔安装压力传感器获得的典型压力波形。可见波形早期有一个压力最大值(约 3.5 MPa)，之后压力缓慢变化，且压力在初期时间内(爆炸后 0.2 s 之前)近似地随时间线性下降。

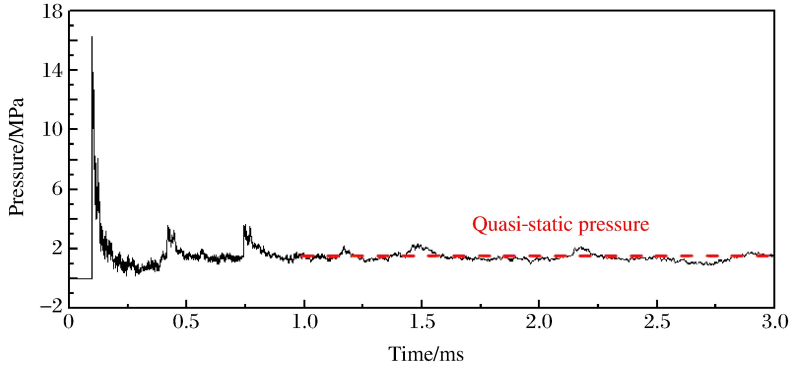


图 4 齐平安装传感器获得典型压力波形(当量 60 gTNT)

Fig. 4 Pressure-time curve obtained by the pressure sensor of flush installation (when explosion equivalent is 60 gTNT)

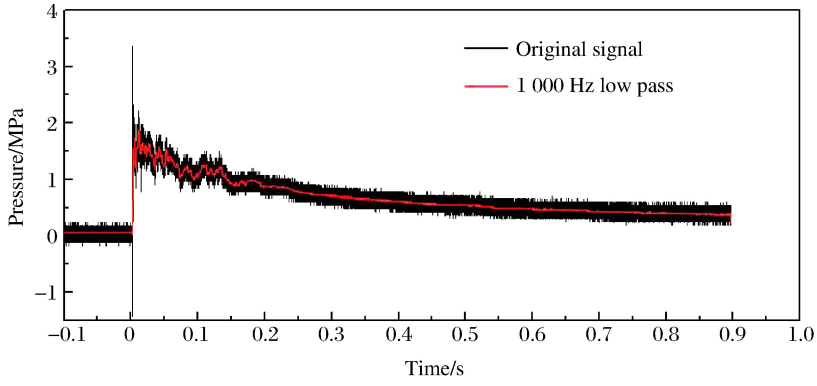


图 5 导孔安装传感器获得的典型波形(当量 60 gTNT)

Fig. 5 Pressure-time curve obtained by the pressure sensor of guide-hole installation (when explosion equivalent is 60 gTNT)

虽然导孔安装传感器未与容器内部空间直接接触，而是通过 6 个直径 1 mm 的小孔连接，但爆炸冲击波通过小孔仍会对传感器加载一个较弱的冲击载荷。因此，简单地读取图 5 中压力波形的最大值作为准静态压力值是不合适的，该峰值应该是冲击波压力在低频测试系统中的表现。准静态气压是由冲击波压力连续变化而来的，如何确定准静态气压值显得比较困难，这可能也是不同文献中实测准静态气压差别较大的原因之一。本文的取值方法如图 6 所示，按照线性下降斜率进行反向回推，与波形上升沿交于一个点，该点的压力值即为准静态气压。这种取值方法也是 Anderson 等[7]推荐的方法。

表 2 为两种安装方式的传感器测量到的准静态压力值，可见两种测量方式得到的准静态压力值相近。

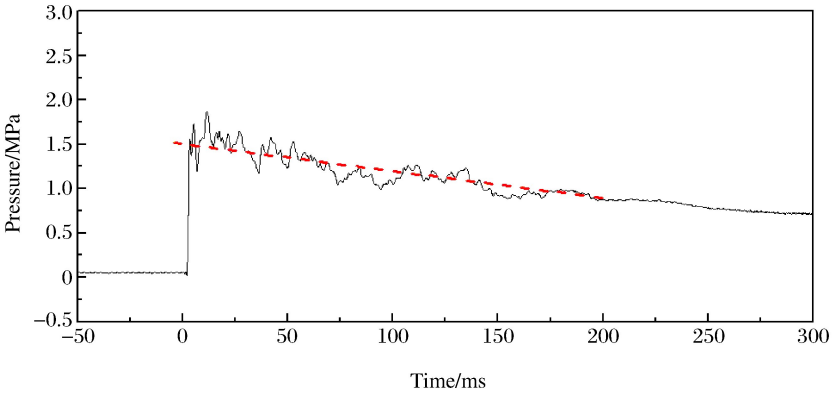


图 6 准静态压力值的选取方法

Fig. 1 The method for determining quasi-static pressure

表 2 压力传感器参数

Table 2 Quasi-static pressures obtained by pressure sensors

当量/(gTNT)	准静态压力/MPa	
	压电式传感器	压阻式传感器
27	0.7,0.7,0.6	
60	1.4,1.5	1.5,1.2
185	2.4	3.7
370	5.5,4.9,5.3	5.4

值得注意的是，由于冲击波的作用，压力波形的早期存在一个远高于准静态压力值的压力峰，如图 4～5 所示。传感器的量程必须根据该压力峰值来进行选取，但传感器量程过高必然导致准静态压力值的测量精度下降。

2.2 数据分析

密闭空间内的准静态气压主要是爆炸气体产物在爆炸释放热量的作用下温度升高而引起的气体热运动压力。影响准静态气压的主要因素包括两部分：一是由爆炸形成的大量气体产物使得密闭空间内气体量增大；二是爆炸释放的热量使气体的温度升高。下面基于理想气体的假设，简单地推导密闭空间内准静态压力的表达式。

理想气体的状态方程为：

$$p=\rho RT \tag{1}$$

式中：ρ 为气体密度；R 为理想气体参数，为普适气体参数 R_0 除以气体摩尔质量 M，即 $R=R_0/M$；T 为绝对温度。

忽略气体与外界热交换带来的能量损失，且忽略空间内介质气体的质量(因为其质量远小于炸药的质量)，同时假设爆炸释放的能量全部用来加热球形容器内的气体物质(因为大部分爆炸能量转换为了气体内能)，则气体的温升为：

$$\Delta T=\frac{E}{Q c_V} \tag{2}$$

式中：E 为爆炸释放的总能量，Q 为爆炸当量，c_V 为容器内气体的平均定容比热。

实验初始状态为常温、常压，因此爆炸后密闭空间内的准静态压力为：

$$p_q=\rho RT=\frac{Q}{V}\frac{R_0}{M}(T_0+\Delta T)=\frac{Q}{V}\frac{R_0}{M}\left(T_0+\frac{E}{Q\,c_V}\right)=\frac{Q}{V}\left(\frac{R_0\,T_0}{M}+\frac{eR_0}{M\,c_V}\right) \tag{3}$$

式中：T_0 为初始温度，V 为容器体积，e 为炸药释放的质量能量，即比内能。对于特定的炸药来说，气体摩尔质量 M、定容比热 c_V、比内能 e 皆为常数，从式(3)可以看出，空间内准静态压力与当量容积比 Q/V 呈正比例关系。该关系式与 Pastrnak 等[5]采用的表达式形式相同。

根据表 2 中数据，绘制准静态压力与当量容积比 Q/V 的变化关系，如图 7 所示。可见，2 种安装方式传感器获得的数据变化规律一致。另外，也可以看出，球形爆炸容器内准静态压力与当量容积比Q/V 呈近似的线性关系。

基于式(3)和表 2 中的实测数据，可以拟合得出准静态压力经验公式：

$$p_q=1.10Q/V \qquad 0.36\ \text{kg TNT/m}^3\leqslant Q/V\leqslant 4.94\ \text{kg TNT/m}^3 \tag{4}$$

式中 p_q 单位为 MPa，当量单位为 kg TNT，容器体积单位为 m^3。

在理论推导准静态压力表达式—式(3)的过程中，忽略了容器内介质气体的质量，因为大部分情况下介质气体的质量远小于炸药质量，但当炸药质量较小，与容器内介质气体质量相当时，这种处理方式是不合适的，此时经验公式(4)不再适用。另外，文献[10]表明，容器内的氧气环境对准静态压力有影响，在爆炸后的高温环境中，爆轰产物与氧气化合燃烧，增大容器内气压，如果爆炸当量比本文实验的爆炸当量更大，可能导致氧气相对不足，爆轰产物与氧气的化合燃烧不充分，此时经验公式(4)也不再适用。因此，基于现有的实验结果，当量容积比范围 0.36～4.94 kg TNT/m^3 是式(4)成立的重要前提条件，如果当量容积比不在该范围，式(4)可能不再适用。

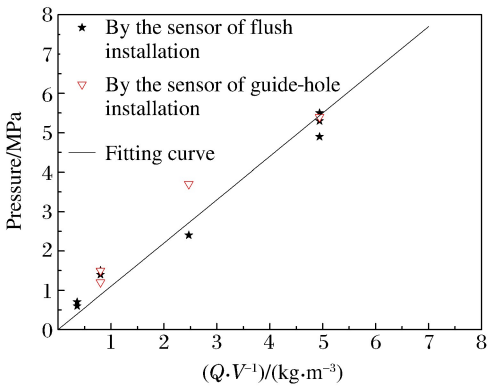


图 7 球形容器内准静态压力与当量容积比的关系

Fig. 7 Relation between quasi-static pressure and explosion equivalent-to-vessel volume ratio in spherical vessel

再者，式(3)显示，炸药种类不变的情况下准静态压力和当量容积比之间关系的线性系数才是一个常数。因此，式(4)可能不适用于性质与本文实验所用炸药相差较大的炸药。

3　结束语

在球形容器内开展了 4 种当量的爆炸加载实验，实验中压力传感器采用了齐平和导孔两种安装方式，均获得了准静态压力数据，且两组数据一致。研究结果表明：

(1)在比距离 0.36～0.87 m/$kg^{1/3}$、当量容积比 0.36～4.94 kg TNT/m^3 范围内，爆炸冲击波在球形容器内往返 3 次后，容器内气体进入准静态压力状态。

(2)球形容器内准静态压力与当量容积比呈正比例关系，系数为 1.10 MPa·m^3/ kg TNT。

参考文献：

[1] BULTMAN D H. Static-stress analysis of dual-axis confinement vessel: LA-12434-MS[R]. 1992:93.

[2] 胡八一，刘大敏. 密封结构内炸药爆炸产生的准静态气体压力研究评述[J]. 爆轰波与冲击波，2001(1):11-16.

[3] 郝保田. 地下核爆炸及其应用[M]. 北京：国防工业出版社，2002:18-88.

[4] MARCHAND K A, COX P A, POLCYN M A. A design guide and specification for small explosive containment structures: SAND-94-2255[R]. 1994. DOI:10.2172/10120233.

[5] PASTRNAK J W, BAKER C F, SIMMONS L F. Measurements of a 1/4-scale model of a 60-kg explosives firing

chamber: UCRL-JC-117774[R]. 1995.
[6] CHANDLER J, FERGUSON R E, FORBES J, et al. Confined combustion of TNT explosion products in air: UCRL-JC-131748[R]. 1998.
[7] ANDERSON C E, BAKER W E, WAUTERS D K, et al. Quasi-static pressure, duration, and impulse for explosions (eg HE) in structures[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1983,25(6):455-464.
[8] ANTHONY J R, FOSTER P A. Explosive containment study: DE85011719[R]. 1985.
[9] 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.
WANG Dengwang, ZHANG Dezhi, LI Yan, et al. Experiment investigation on quasi-static pressure in explosion containment vessels[J]. Acta Armamentarii, 2012,33(12):1493-1497.
[10] 林俊德.封闭空间的化爆荷载与沙墙消波[J].解放军理工大学学报(自然科学版),2007,8(6):559-566.
LIN Junde. Chemical explosion loads in enclosed space and wave attenuation of sand wall[J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2007,8(6):559-566.
[11] 钟方平.柱形容器内部爆炸流场的数值模拟[J].计算物理,2000,17(6):695-701.
ZHONG Fangping. Numerical simulation of unsteady flow within cylindrical container[J]. Chinese Journal of Computational Physics, 2000,17(6):695-701.
[12] 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.
ZHONG Wei, TIAN Zhou. Calculation of quasi-static pressures for confined explosions considering chemical reactions under isobaric assumption[J]. Explosion and Shock Waves, 2013,33(4):375-380. DOI:10.11883/1001-1455(2013)04-0375-06.
[13] 邱嗣鑫.压力传感器引压系统对动态测试影响的讨论[J].工业仪表与自动化装置,1984(2):1-3.

Quasi-static gas pressure generated by explosive charge blasting in a spherical explosion containment vessel

LIU Wenxiang[1,2], ZHANG Dezhi[2], ZHONG Fangping[2],
CHENG Shuai[2], ZHANG Qingming[1]
(1. *State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing* 100081, *China*;
2. *Key Laboratory of Intense Dynamic Loading and Effect, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an* 710024, *Shaanxi, China*)

Abstract: Quasi-static pressure is important for the design of explosion containment vessels. Experiments of the spherical vessel under blast loading, in which the quasi-static pressure was measured by the pressure sensors of two different installations, i.e. flush installation and guide-hole installation, were carried out. The data obtained by the pressure sensors are consistent with each other. Based on the formula form derived theoretically, the empirical formula was obtained by fitting the data. The main results are as follows: (1) the pressure in the vessel goes into quasi-static state after the blast wave reflects back and forth three times in the vessel; (2) the quasi-static pressure in the spherical vessel is proportional to the explosion equivalent-to-vessel volume ratio, and the empirical coefficient is 1.10 MPa·m^3/kg TNT.

Keywords: quasi-static pressure; spherical explosion containment vessel; explosion equivalent-to-vessel volume ratio; pressure sensor

(责任编辑 张凌云)