

炸药在密闭空间中爆炸准静压的计算方法

李鸿宾, 金朋刚, 严家佳, 王建灵

(西安近代化学研究所, 陕西 西安, 710065)

摘要: 基于目前准静压计算公式的局限性, 提出了一个通用计算公式, 并提供了未知参数的确定方法。通过该方法在一个容积为 500L 的密闭爆炸罐中, 用 PCB 压电式压力传感器测试了 35g、80g 和 100g TNT 样品的准静压, 并拟合了 TNT 样品的准静压计算公式。利用该公式计算了 55g 和 90g TNT 的准静压, 并与试验值进行对比, 两者符合较好, 说明提出的参数拟合方法是可行的。

关键词: 爆炸力学; TNT; 准静压; 后燃烧; 温压炸药

中图分类号: TQ560.1 文献标识码: A

Calculation Method of Quasi-static Pressure of Blast Waves in Confined Chamber

LI Hong-bin, JIN Peng-gang, YAN Jia-jia, WANG Jian-ling

(Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an, 710065)

Abstract: Based on the limitation of quasi-static pressure calculation formulas at present, a formula in common use was proposed, and a determination method of unknown parameters was provided. Through the proposed method, the quasi-static pressures of 35g, 80g and 100g TNT sample were tested in a 500L confined chamber, by piezoelectricity pressure sensor, which was made by PCB corporation, then the quasi-static pressure calculation formula of TNT was fitted. Using the formula, the quasi-static pressures of 55g TNT and 90g TNT were calculated and compared to the test value. Two results agreed well, it indicated the determination method of unknown parameters in this paper is proper.

Key words: Explosion mechanics; TNT; Quasi-static pressure; Afterburning; Thermo-baric explosive

炸药在密闭空间中爆炸能够形成冲击波超压和准静压两种类型的超压, 前者幅值大、持续时间短, 后者幅值小、持续时间长, 它们具有截然不同的毁伤效应^[1-2]。出于相反的目的, 炸药配方研究人员和密闭结构设计人员都关注准静压的测试和预估工作^[3-4]。

通常军用炸药都是负氧平衡的, 在含氧的环境中, 其爆炸过程分为爆轰、无氧燃烧和后燃烧3个阶段^[5-6], 由于准静压持续时间一般超过200ms, 因此3个阶段释能都直接影响准静压, 这就大大增大了测试和预估工作的难度。

本文通过分析现有准静压计算公式的局限性, 提出了包含综合影响因子 k 的计算式, 并提供了未知参数拟合方法, 通过试验研究, 得到了TNT样品的准静压计算公式。

1 实验

1.1 试样及仪器

试样: 8号瞬发电雷管。压装TNT, 西安近代化学研究所, 密度 1.58g/cm^3 。

仪器：PCB 113B34型壁面压电式压力传感器，2支，PCB公司，量程0~6.8MPa；VXI数据采集器，成都南汇科技有限公司，频率为1M/s；工业硅油1盒。最大实验药量200gTNT当量密闭爆炸罐。

1.2 实验布局

实验是在一个最大实验药量200gTNT当量的密闭爆炸罐整中进行的，爆炸罐整体为回旋体结构，容积500L，试样利用雷管线自由悬挂，药柱中心距离传感器（热电偶）450mm，距离底部平台170mm，实验布局见图1。装药结构见图2。

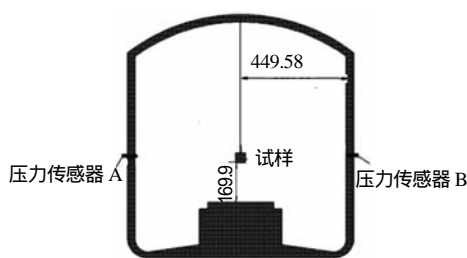


图1 试验布局
Fig.1 Test layout

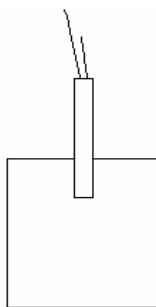


图2 装药结构
Fig.2 Charging structure

2 结果与讨论

2.1 准静压的形成过程分析

图3为100gTNT在图1所示密闭爆炸罐中爆炸的超压—时间曲线。由图3可见首先到达的是初始冲击波部分，这部分压力峰值最高，持续时间很短，大约0.2ms之后，压力大约衰减至最低值（没有回零），这种状态持续大约0.4ms之后，压力开始缓慢上升达到峰值压力的1/20。由于空间壁面对冲击波的反射作用，随后的压力曲线表现出较大幅度的振荡特性，大约2.5ms之后，这种现象趋于缓和，人们通常把此后十几到几十毫秒之后的平均超压作为“准静态压力”

，简称“准静压”，用 P_{qs} 表示。

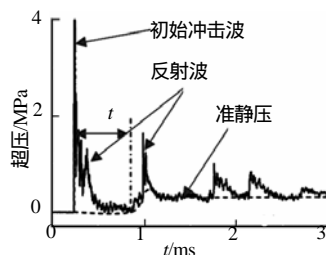


图3 传感器 A 所测典型的超压—时间曲线
Fig.3 Typical overpressure curve tested by sensor A

由于准静压持续时间较长（通常超过200ms），炸药种类、药量、起爆方式、起爆位置、有限空间的结构特性和空间内的氧化剂含量都能够影响准静压值。准静压又被描述为“紧随初始冲击波之后的后续压力波”^[7]，它是由于冲击波之后的压力“堆积”而形成的，其上升速率能够反映后续压力的“堆积”速率，对于确定的炸药装药、确定的空间结构，准静压的大小决定于炸药的爆炸能量和空间结构的热散失之差。

2.2 准静压的计算方法

王等旺^[4]和Ki-Bong Lee^[7]都各自提出了准静压的计算公式。

$$P_{qs} = 1.34m/V \quad (1)$$

式(1)中： P_{qs} 为准静压，MPa； m 为炸药的TNT当量，kg； V 为密闭空间的体积， m^3 。

可见公式(1)没有体现出密闭空间的结构特性、密闭空间中氧化剂含量和炸药的氧平衡能对准静压的影响。

$$\text{Ki-Bong Lee: } P_{qs} = 0.146 + 0.193\Delta H_c \quad (2)$$

式(2)中： H_c 为炸药的总燃烧热，kJ。式(2)认为准静压是炸药总燃烧热的单值函数，这也是考虑不够全面的，限制了它的使用范围。

密闭空间中，炸药爆炸和后燃烧释能是导致准静压增大的因素，而对于确定的装药，密闭空间的容积增大准静压减小，反之准静压增大。所以准静压的计算公式可以做如下描述：

$$\Delta P_{qs} = k \frac{\Delta H}{V} \quad (3)$$

式(3)中： P_{qs} 为准静压，Pa； H 为炸药爆炸能量，包括爆炸能和后燃烧能，可以通过文献[6]所述试验方法测量得到，J； V 为密闭空间容积， m^3 ；

k 为无量纲的综合影响因子。

只要确定 V 、 H 和 k 的值就能够用公式(3)预估准静压。 V 的值通常是给定的或者可以通过测量得到；

H 代表炸药的爆炸能量，其大小和系统氧平衡OB ($\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$) 密切相关，可以通过试验测量和理论计算两种方法得到； k 综合反映了密闭空间的结构特性、炸药种类、起爆方式、起爆位置等因素对准静压的影响规律，其具体数值需要通过试验确定。

“系统氧平衡”指的是将密闭空间中的气体和炸药看成一个整体来计算氧平衡。根据密闭爆炸罐中是否含有氧化剂和系统氧平衡大小可以将 H 的计算分为如下3种情况：

(a) 无额外氧化剂

$$H = W \times H_D \quad (4)$$

式(4)中： W 为炸药质量， g ； H_D 为炸药的爆热， $\text{J} \cdot \text{g}^{-1}$ 。此时 k 需要通过试验拟合得到。

(b) 有额外氧化剂，但是不能将炸药完全氧化（即系统氧平衡小于零）

这种情况最为复杂，需要对炸药的后燃烧机理做详细研究，得到炸药爆炸能量和系统中的氧化剂含量的关系，此时 k 一般不能看作为一个常数。

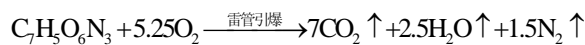
(c) 有额外氧化剂，且能够将炸药完全氧化（系统氧平衡大于等于零）

$$H = W \times H_C \quad (5)$$

式(5)中： H_C 为炸药在富氧条件下的爆炸能量，可以通过文献[6]所述方法测量得到， $\text{J} \cdot \text{g}^{-1}$ 。此时 k 可以通过试验拟合得到。

2.3 TNT 样品准静压计算参数拟合

试验中样品质量分别取为35g、80g和100g TNT 样品，测量它们在1atm大气压空气条件下的准静压，每次试验重复3次，每次的结果取2个传感器所测结果的算术平均值。根据理论计算，爆炸罐中的空气最多能够将185.4g TNT 样品完全氧化。化学反应方程式为：



从安全角度考虑，通常在该爆炸罐进行试验的药品都小于150g，故实际使用中有额外氧化剂的情况最为常见。本文也只对该情况下的 k 值进行拟合。

测试得到的准静压曲线见图4，参考文献[6]的试验数据，将TNT在富氧条件下的爆炸能量取为168 $68.0\text{J} \cdot \text{g}^{-1}$ ，按照公式(5)计算爆炸能量，数据处理结果见表1。

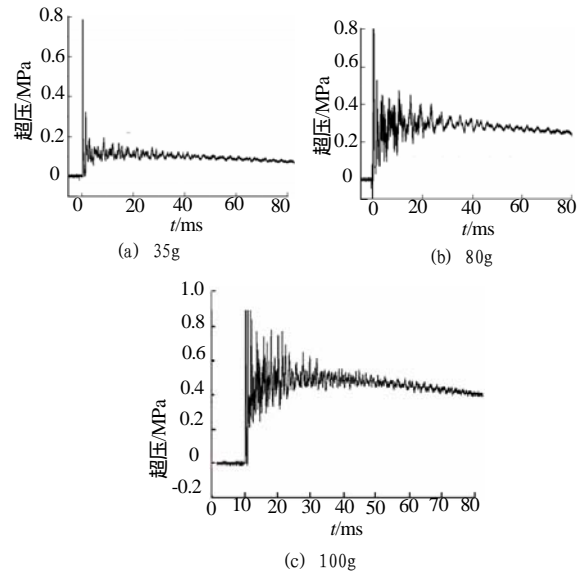


图 4 TNT 准静压测试曲线

Fig.4 Tested quasi-static pressure curves of TNT

表 1 1atm 空气条件下不同质量 TNT 的准静压

Tab.1 Quasi-static pressure of various mass of TNT at 1atm condition

质量 /g	系统氧平衡 /($\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)	炸药爆炸能量 ^[6] /MJ	ΔP_{qs} /MPa			$\overline{\Delta P_{qs}}$ /MPa	相对误差 /%
			1	2	3		
35	3.20	0.590 4	0.115	0.120	0.113	0.116	3.4
80	0.98	1.349 4	0.312	0.305	0.308	0.308	1.3
100	0.63	1.686 8	0.414	0.410	0.403	0.409	1.5

考虑到炸药质量为零的情况下，准静压为零，以炸药释能为横坐标、准静压为纵坐标，对表2中的数据做截距为零的线性拟合，结果见图5，计算得到参数 k 的值为0.117。

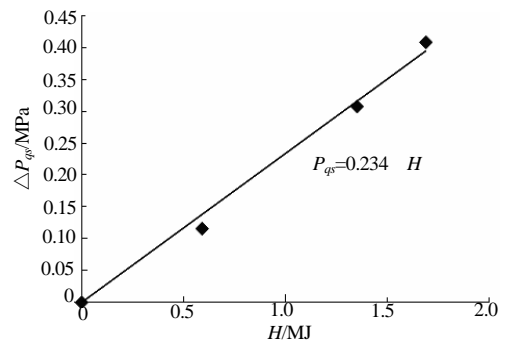


图 5 H —— P_{qs} 线性拟合关系

Fig.5 Linear fitting relationship of H and P_{qs}

即有：

$$\Delta P_{qs,TNT} = 0.117 \frac{\Delta H}{V} = 3.947 \times W \quad (6)$$

$W \leq 0.185\text{kg}$

式(6)中： W 为TNT的质量，kg。

准静压的计算值和试验值对比见表2。

表2的数据可见，计算值和实测值相对误差小于4%，说明本文所述准静压计算方法是可行的。

表2 准静压计算值和试验值对比

Tab.2 Comparison of test and calculation values of quasi-static pressure

质量/g	计算值/MPa	试验值/MPa	相对误差/%
55	0.217	0.225	2.3
90	0.355	0.343	3.5

3 结论

(1) 分析认为，目前文献中出现的准静压计算公式大多没有全面体现准静压的影响因素，通过引入综合影响因子 k ，得到了 $\Delta P_{qs} = k \frac{\Delta H}{V}$ 形式的计算公式，并提供了未知参数拟合方法。

(2) 测量了不同质量TNT样品的准静压，拟合得到了本实验条件下TNT炸药的准静压计算公式为：

$$\Delta P_{qs,TNT} = 0.117 \frac{\Delta H}{V} = 3.947 \times W$$

$$W \leq 0.185\text{kg}$$

计算值和试验值比对结果符合较好，说明本文提供的参数拟合方法是可行的。

参考文献：

- [1] 金朋刚,郭炜,王建灵,等.密闭条件下 TNT 的爆炸压力特性[J].火炸药学报,2013,36(3):39-41.
- [2] FISCHER S T, KESSLER A. Characterization of explosives with enhanced blast output in detonation chamber and free field experiments[C]//35th International ICT-Conference. Karlsruhe, Germany:ICT,2008.
- [3] David tassia, P.E. Internal blast test to support the tomahawk and APET programs [C]// Insensitive Munitions Technology Symposium.Munich, Germany,1996.
- [4] 王等旺,张德志,李焰.爆炸容器内准静态气压实验研究[J].兵工学报,2012,33(12):1 493-1 499.
- [5] W. A Tracinski, J.Paszula. Visualization turbulent combustion of TNT detonation products in a steel vessel[C]//38th International Annual Conference of ICT. Karlsruhe:ICT, 2007.
- [6] 王晓峰,冯晓军,肖奇.温压炸药爆炸能量的测量方法[J].火炸药学报,2013,36(2):9-12.
- [7] Ki-Bong Lee, Keun-Deuk Lee, Jeong-Kook Kim,et al. Relationship between combustion heat and blast performance of aluminized explosives[C]//36th International Annual Conference of ICT & 32nd International Pyrotechnics Seminar. Karlsruhe:ICT,2005.