DOI: 10.11883/bzycj-2017-0170
文章编号: 1001-1455(2018)06-1429-06

TNT 内爆炸准静态压力特性*

张玉磊,苏健军,李芝绒,蒋海燕,仲 凯,王胜强
(西安近代化学研究所,陕西 西安 710065)

摘要: 为研究密闭空间内 TNT 爆炸准静态压力特性,通过理论分析得到了准静态压力计算模型,以爆炸罐和爆炸舱室为典型密闭空间环境开展了系列 TNT 内爆炸实验。结果表明,准静态压力的上升伴随着内爆炸冲击波的多次反射,反射结束后准静态压力到达峰值,药量-容积比是准静态压力的主要影响因素,准静态压力峰值及上升速率随着药量-容积比的增加而增加;基于实验数据拟合得到了 TNT 内爆炸准静态压力峰值经验公式,可用于准静态压力峰值预估及内爆炸威力评估。

关键词: TNT;内爆炸;准静态压力;药量-容积比
中图分类号: O381 **国标学科代码**: 13035 **文献标志码**: A

对于舰船、建筑等具有腔室结构的目标毁伤,内爆炸是最常见的毁伤手段,此类工况下的压力效应分为冲击波压力和准静态压力[1]。准静态压力是由于爆炸产生的高温高压气体产物向外扩张膨胀受到密闭空间约束形成的,上升相对缓慢并稳定到某一较低压力,峰值远小于冲击波超压峰值[2]。弹药爆炸后,密闭空间结构首先受到高频冲击波的作用,产生裂缝、抛掷、撕裂等预毁伤,紧接着低频的准静态压力继续作用于目标,造成结构解体、飞散等更严重的毁伤,目标的最终毁伤效果与准静态压力的作用强度密切相关,准确得到密闭空间内爆炸准静态压力非常重要。

A. L. Kuhl 等[3-4]开展了约束爆炸产物与空气发生化学反应的动力学研究,认为约束爆炸产生的气体产物中富含 C、CO 等易燃物,将会与空气混合并与 O 发生化学反应,导致约束系统内压力明显上升。K. B. Lee 等[5]通过实验得到了准静态压力和总燃烧热之间的关系。T. P. E. David[6]和 R. J. Lee[7]等建立了基于准静态压力的炸药内爆炸效应评估方法。金朋刚等[8]、姬建荣等[9]利用密封罐开展了密闭条件 TNT 基炸药的爆炸特性研究,研究了准静态压力和二次化学反应的关系。钟巍等[10]开展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研究,得到理论计算公式,并开展了少量实验校核。李鸿宾等[11]、王等旺等[12]利用爆炸容器开展了内爆炸实验,得到基于爆炸能量的准静态压力计算方法。

虽然内爆炸准静态压力实验研究已经开展并得到了一些计算公式,但是这些实验的药量最大约 100 g 量级、实验容器容积不足 1 m^3,计算公式适用范围较小,对于大药量和大容积工况条件下的内爆炸准静态压力特性研究有待开展。本文中以 TNT 内爆炸准静态压力为研究对象,在前人研究的基础上给出准静态压力计算理论模型,开展大型密闭空间内爆炸系列实验,基于实验结果和有关文献记载的实验数据,拟合得到精度较高的准静态峰值压力计算经验公式。

1 理论模型

内爆炸释能大致可分为连续的两个阶段——无氧爆轰和有氧燃烧。在无氧爆轰阶段,能量释放时间为 μs 量级,产生大量的高温气体产物,形成初始冲击波;在有氧燃烧阶段,高温爆轰产物扩散,不同组分产物之间、产物与空气中的氧气相互反应,放热升温导致密闭空间压力继续上升,两阶段释能最终形成密闭空间内的高温高压环境。为简化计算,将准静态压力 p_{qs} 的形成看做独立的两部分[12],即爆轰产生的气体扩散至密闭空间造成的压力上升 p_1 和爆炸释能引起密闭空间内温度上升导致的压力上升 p_2。

* **收稿日期**: 2017-05-15; **修回日期**: 2017-07-21
第一作者: 张玉磊(1987—),男,硕士,副研究员; **通信作者**: 苏健军,sjj3582@sina.com。

根据理想气体状态方程有：

$$p_1 = p_0 V_0 (m/V) \tag{1}$$

式中：V_0 为 TNT 爆容，m 为 TNT 药量，V 为密闭空间容积，p_0 为初始压力。

假定爆炸反应释放的能量全部用来加热气体，那么气体的温升为：

$$\Delta T = (mQ_V)/(m_g c_V) \tag{2}$$

式中：ΔT 为密闭空间内气体温升，Q_V 为 TNT 定容爆热，m_g 为密闭空间内气体质量，c_V 为密闭空间内气体定容比热。

由理想气体状态方程，可得：

$$p_2 = ((nRQ_V)/(m_g c_V))(m/V) \tag{3}$$

故理想状态下准静态压力峰值 $p_{qs,max}$ 的计算公式为：

$$p_{qs,max} = \left(p_0 V_0 + \frac{nRQ_V}{m_g c_V}\right)\frac{m}{V} \tag{4}$$

具有代表性的是 R. W. Carlson[13] 和 D. C. Moira[14] 提出的计算公式：

$$p_{qs,max} = 1.30 m/V \tag{5}$$

$$p_{qs,max} = (1.34 \pm 0.193) m/V \tag{6}$$

上述推导基于理想状态，且密闭条件下爆轰反应产物与空气、产物之间的后燃反应过程非常复杂，目前仍没有较好的模型，计算结果与实验结果势必有差异。在美军设计手册 TM5-1300[15] 中，基于大量毁伤效应实验数据分析后给出了 $m/V<1$ kg/m^3 条件下的经验公式：

$$p_{qs,max} = 2.26 (m/V)^{0.72} \tag{7}$$

可见，实际工况下准静态压力峰值 $p_{qs,max}$ 与药量-容积比 m/V 并未呈线性关系，但可以确定的是 $p_{qs,max}$ 与 m/V 密切相关，即 $p_{qs,max} = f(m/V)$。

2 实 验

实验分为爆炸罐实验和爆炸舱室实验。爆炸罐为胶囊形，直径 2.6 m，圆柱部分长 3.2 m，容积 26 m^3，如图 1 所示；舱室模型共 3 种尺寸，均为方盒形结构，如图 2 所示，容积分别为 0.612、1.046、2.013 m^3。爆炸罐实验用药为 TNT 球形装药，质量为 0.5、1.0、2.0 和 4.0 kg 等 4 种规格，舱室模型实验用药为长径比约为 1 的 TNT 柱形装药，质量为 30 g，密度均为 1.58 g/cm^3。实验时，将药柱悬挂于实验装置中心位置，测量爆炸装置内准静态压力及爆炸罐壁面冲击波反射压力，取 3 次实验平均值。

冲击波压力测试选用 PCB 公司的 ICP 型 113B 系列通用高频压力传感器，谐振频率大于 500 kHz，上升时间小于 1 μs。准静态压力测试采用西安近代化学研究所自制的准静态压力测试组件，主要包括进气孔、管体、螺旋杆、铜垫片、传感器安装座、压力传感器，如图 3 所示，其中压力传感器选用昆山双桥传感器测控公司的 CYG400 型压阻式压力传感器，测量精度 0.5 级。测试组件通过螺旋杆上的传压管道结构传递被测压力，可滤掉冲击波高频分量，实现低频准静态压力的直接测量[2]。经激波管校准，测试组件压力上升时间为 0.24 ms。



图 1 爆炸罐

Fig. 1 Explosion vessel



图 2 爆炸舱室

Fig. 2 Explosion chamber

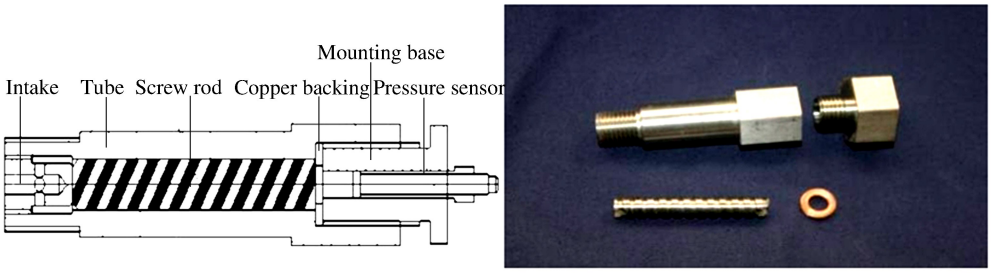


图 3　准静态压力测试组件

Fig. 3　Testing device of quasi-static pressure

3　结果与分析

不同药量-容积比 m/V 条件下的准静态压力峰值 $p_{qs,max}$ 和冲击波超压峰值 Δp 测试结果列于表 1，其中 1 kg TNT 内爆典型准静态压力和冲击波超压时程曲线如图 4 所示，爆炸罐内的 1 kg TNT 和 2 kg TNT药柱爆炸准静态压力实测曲线如图 5 所示。

表 1　实验结果

Table 1　Experimental data

实验装置	V/m^3	m/kg	$(m \cdot V^{-1})/(kg \cdot m^{-3})$	$p_{qs,max}/MPa$	$\Delta p/MPa$
爆炸罐	26	0.5	0.019 23	0.089	1.95
爆炸罐	26	1.0	0.038 46	0.150	3.64
爆炸罐	26	2.0	0.076 92	0.237	10.08
爆炸罐	26	4.0	0.153 85	0.360	23.13
爆炸舱室 1	0.612	0.03	0.049 02	0.180	—
爆炸舱室 2	1.046	0.03	0.028 68	0.120	—
爆炸舱室 3	2.013	0.03	0.014 90	0.073	—

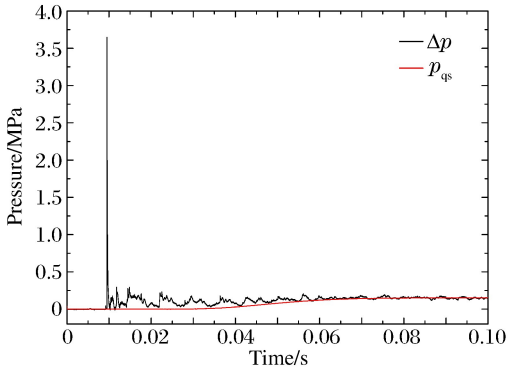


图 4　内爆超压及准静态时程曲线

Fig. 4　Histories of internal overpressure and quasi-static pressure

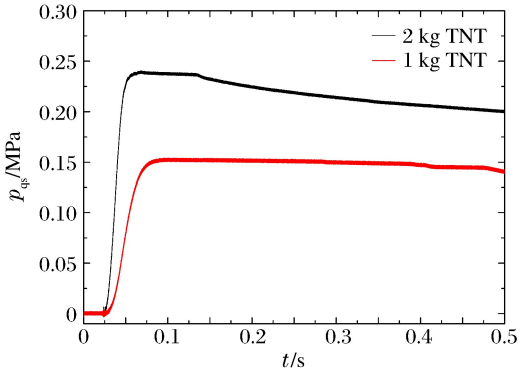


图 5　内爆炸典型准静态压力曲线

Fig. 5　Tipcal quasi-static pressure curves of internal explosion

从图 4 可以看出，在冲击波与内壁面的多次反射过程中准静态压力逐渐上升，冲击波反射结束后，密闭空间内气体均匀分布，准静态压力到达峰值并维持较长压力平台。冲击波压力峰值高、反射次数多、衰减迅速，准静态压力峰值低、持续作用时间长，准静态压力随着装药量-容积比 m/V 的增加而增加。本实验条件下，准静态压力峰值大小为冲击波超压峰值 Δp 的二十分之一甚至更低。

准静态压力曲线的上升前沿不如冲击波曲线那般陡峭，冲击波曲线上升时间为微秒级，而准静态压力上升时间为数十毫秒。TNT 在密闭空间内爆炸后，爆轰产物气体在密闭空间内均匀分布需经历一定时间，准静态压力上升到稳定状态的过程相对缓慢。准静态压力达到峰值后，由于空间密闭，压力曲线

呈现准平台效应，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，准静态压力曲线缓慢衰减，持续时间为秒级。长持续时间的准静态压力的毁伤作用不可忽略，特别是在冲击波作用后目标的易损性能显著降低，后续的准静态压力甚至可能是目标毁伤效果的决定因素。因此，合理适配冲击波和准静态压力的协同作用是提高内爆毁伤效果的重要途径。

从图 5 可以看出，当密闭空间容积一定时，准静态压力上升速率随着装药的增加而增加。TNT 爆炸反应时间与准静态压力上升时间相比可以忽略，装药质量越大，爆炸瞬时释放的能量和气体量以及爆炸结束后密闭空间内压力和温度也越大，因此准静态压力上升速率就越大。根据理论模型可以推断，当药量一定时，准静态压力上升速率随着密闭空间容积的减小而增大。

准静态压力是内爆炸威力的重要表征参量，对评估炸药内爆炸性能具有重要意义，通过实验得到准确的准静态压力峰值经验公式很有必要。为验证参考文献经验公式的正确性，将文献[10-12]中的实验数据和本文实验数据进行了梳理，列于表 2，其中本实验、文献[10,12]的实验值均为直接测量值，文献[11]的实验值是对高频冲击波超压曲线平缓段取均值得到的间接测量值。实验结果与经验公式值对比如图 6 所示。

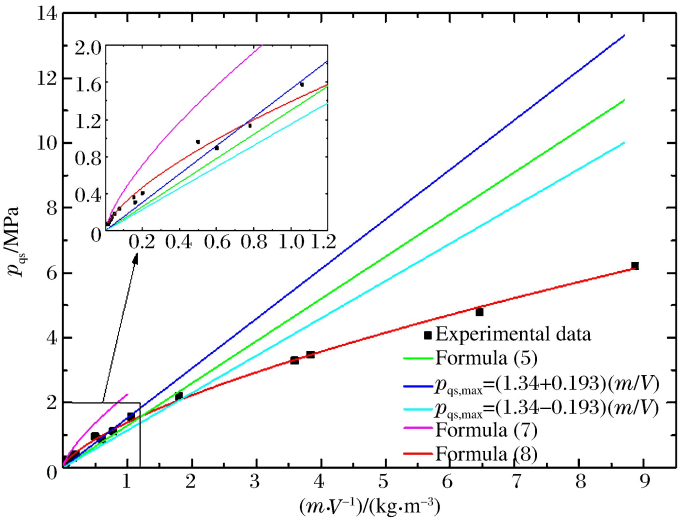


图 6 实验值及经验公式值对比

Fig. 6 Comparison of experimental data with calculated data

从图 6 可以看出，TNT 内爆准静态压力峰值并未随着 m/V 的增加而线性增加。当 $m/V<1$ kg/m^3 时，式(5)～(6)计算值均偏小，式(7)计算值偏大；当 $m/V>1$ kg/m^3 时，式(7)不再适用，式(5)～(6)计算值随着 m/V 的增加而大于实验值，且偏差随 m/V 的增加而增大。究其原因，可能是上述经验公式所用准静态压力峰值数据并非直接测量，而是对一定时间内的高频冲击波压力取平均值得到的，但准静态压力的形成是密闭空间内压力逐渐匀化的过程，用这种方法得到的准静态压力峰值结果的准确性值得商榷。参考式(7)，基于表 2 数据拟合得到 TNT 内爆炸准静态压力峰值计算经验公式：

$$p_{qs,max}=1.394(m/V)^{0.679} \qquad 0.019\leqslant m/V\leqslant 8.87 \tag{8}$$

表 2 不同条件下的实验结果

Table 2 Experimental data under different conditions

来源	V/m^3	m/kg	$(m\cdot V^{-1})$ /(kg·m^{-3})	$p_{qs,max}$ /MPa	来源	V/m^3	m/kg	$(m\cdot V^{-1})$ /(kg·m^{-3})	$p_{qs,max}$ /MPa
本文	26	0.5	0.019	0.089	文献[10]	0.016 0	0.008	0.50	0.96
本文	26	1.0	0.038	0.150	文献[12]	0.013 3	0.008	0.60	0.89
本文	26	2.0	0.077	0.237	文献[10]	0.034 6	0.027	0.78	1.13
本文	26	4.0	0.154	0.360	文献[10]	0.005 7	0.008	1.06	1.58
本文	0.612	0.03	0.049	0.180	文献[12]	0.015 0	0.027	1.80	2.19
本文	1.046	0.03	0.029	0.120	文献[12]	0.007 5	0.027	3.59	3.30
本文	2.013	0.03	0.015	0.073	文献[10]	0.034 6	0.133	3.84	3.48
文献[11]	0.5	0.08	0.160	0.308	文献[10]	0.020 6	0.133	6.46	4.80
文献[11]	0.5	0.10	0.200	0.409	文献[10]	0.015 0	0.133	8.87	6.22

该经验公式如图 6 所示，拟合优度 $R^2=0.998$，式(7)～(8)计算值与实验值对比结果如表 3 所示。从表 3 可以看出，在式(7)适用范围内，其计算值与实验值相差在 40%以上，平均偏差达到了 58.29%。式(8)计算值与实验值的平均偏差为 6.76%，其中，与本实验、文献[10]和文献[12]的直接测量值偏差在 11%以内，平均偏差为 4.81%，与文献[11]的间接测量值偏差较大，最大达到了 30.4%。相较于式(7)～(8)计算得到的准静态压力峰值更接近实验值，特别是更接近直接测量的准静态压力峰值。

由于准静态压力的低频、长持续时间的特性，建议采用频率下限低、放电常数大的压力传感器和具有冲击波高频滤波功能的安装结构直接测量准静态压力。对其他内爆炸药的准静态压力峰值，也可通过对开展系列实验并按此方式拟合数据得到适用的经验公式，为内爆型弹药威力评估提供支撑。

表 3 公式(7)与公式(8)计算结果对比

Table 3 Comparison of calculation results between formula (7) and (8)

$(m\cdot V^{-1})$ /(kg·m^{-3})	$p_{qs,max}$ /MPa	式(7) 计算值 /MPa	式(7) 偏差 /%	式(8) 计算值 /MPa	式(8) 偏差 /%	$(m\cdot V^{-1})$ /(kg·m^{-3})	$p_{qs,max}$ /MPa	式(7) 计算值 /MPa	式(7) 偏差 /%	式(8) 计算值 /MPa	式(8) 偏差 /%
0.019	0.089	0.130	46.360	0.095	6.205	0.50	0.96	1.372	42.921	0.871	−9.303
0.038	0.150	0.215	43.041	0.151	0.889	0.60	0.89	1.565	75.787	0.985	10.723
0.077	0.237	0.357	50.534	0.244	3.143	0.78	1.13	1.890	67.239	1.178	4.212
0.154	0.360	0.588	63.238	0.391	8.714	1.06	1.58			1.450	−8.211
0.049	0.180	0.258	43.145	0.180	−0.084	1.80	2.19			2.078	−5.126
0.029	0.120	0.177	47.182	0.126	4.966	3.59	3.30			3.320	0.614
0.015	0.073	0.110	50.512	0.081	10.282	3.84	3.48			3.476	−0.128
0.160	0.308	0.604	96.121	0.402	30.410	6.46	4.80			4.948	3.079
0.200	0.409	0.709	73.431	0.467	14.272	8.87	6.22			6.136	−1.346

4　结　论

(1)内爆准静态压力的上升伴随着冲击波的多次反射，反射结束后准静态压力上升到峰值并维持较长时间，药量-容积比 m/V 是准静态压力大小的主要影响因素，准静态压力峰值及上升速率均随着 m/V 的增加而增加。(2)基于实验数据，拟合得到了适用范围为 $0.019\text{kg/m}^3\leqslant m/V\leqslant 8.87\text{kg/m}^3$ 的 TNT 内爆准静态压力峰值计算经验公式 $p_{qs,max}=1.394(m/V)^{0.679}$，与实验结果平均偏差为 6.76%，可用于 TNT 内爆炸准静态压力峰值的预测。(3)准静态压力是内爆炸威力的重要表征参量，合理适配弹药冲击波和准静态压力的协同作用是提高内爆威力的重要途径之一。

参考文献：

[1] 胡宏伟，肖川，李丽，等. 有限空间炸药装药内爆炸威力的评估方法综述[J]. 火炸药学报，2013，36(4)：1-6.
HU Hongwei，XIAO Chuan，LI Li，et al. Review on evaluation methods of blast power in confined space[J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants，2013，36(4)：1-6.

[2] 李芝绒，翟红波，闫潇敏，等. 一种温压内爆炸准静态压力测量方法研究[J]. 传感器技术学报，2016，29(2)：208-212.
LI Zhirong，ZHAI Hongbo，YAN Xiaomin，et al. Test method research for the quans-static pressure on inside-explosive[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators，2016，29(2)：208-212.

[3] Kuhl A L，Ferguson R E，Oppenheim A K. Combustion of TNT products in a confined explosion：UCRL-JC-134681[R]. 1999.

[4] Kuhl A L，Bell J B，Beckner V E，et al. Gas-dynamic model of turbulent combustion in TNT explosion[J]. Proceedings of the Combustion Institute，2011，33(2)：2177-2185.

[5] Lee K B，Lee K D，Kim J K. Relationship between combustion heat and blast performance of aluminized explosives [C]// Proceedings of the 36th International Annual Conference of ICT and 32nd International Pyrotechnics Seminar. Karlsruhe：ICT，2005.

[6] David T P E. Internal blast test to support the tomahawk and APET programs[C]// Insensitive Munitions & Energetic Materials Technology Symposium. San Diego: NDIA, 1996.

[7] Lee R J, Newman K E, Chemoff D G, et al. Combined initial air blast and quasi-static overpressure assessment for pressed aluminized explosives[C]// Proceedings 14th International Detonation Symposium. Idaho: Office of Naval Research, 2010.

[8] 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.
JIN Penggang, GUO Wei, WANG Jianling, et al. Explosion pressure characteristics of TNT under closed condition [J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants, 2013,36(3):39-41.

[9] 姬建荣,苏健军,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 Jianrong, SU Jianjun, WANG Shengqiang. After-burning performance of TNT/Al explosive in small explosion vessel[J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants, 2013,36(3):46-49.

[10] 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 pressure for confined explosions considering chemical reactions under isobaric assumption[J]. Explosion and Shock Waves, 2013,33(4):375-380.

[11] 李鸿宾,金朋刚,严家佳,等.炸药在密闭空间中爆炸准静态压力的计算方法[J].火工品,2014(1):45-48.
LI Hongbin, JIN Penggang, YAN Jiajia, et al. Calculation method of quasi-static pressure of blast Waves in confined chamber[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2014(1):45-48.

[12] 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.

[13] Carlson R W. Confinement of an explosion by a steel vessel[R]. Los Alamos: LANL, 1945.

[14] Moir D C. Safety analysis of the M-2 comfinement systems[R]. Los Alamos: LANL, 1979.

[15] Departments of the army, the navy and the airforce. Structures to resist the effects of accidental explosions: TM5-1300[S]. 1990.

Quasi-static pressure characteristic of TNT's internal explosion

ZHANG Yulei, SU Jianjun, LI Zhirong, JIANG Haiyan,
ZHONG Kai, WANG Shengqiang

(*Xi'an Modern Chemistry Research Institute*, *Xi'an* 710065, *Shaanxi*, *China*)

Abstract: In order to estimate the quasi-static pressure of TNT when it explodes in closed space, the calculation model of the quasi-static pressure is derived basing on the theoretical analysis. Moreover, a series of TNT's internal explosion tests are performed, these tests take the explosion vessel and explosion chamber as the closed container. The results show that the quasi-static pressure increases accompanied by multiple reflections of shockwave and the pressure reaches to the maximum when the reflection is over. The ratio of charge quality and volume is the main factor influenting quasi-static pressure. The peak and increasing rate of quasi-static pressure will increase with the growth of the ratio of charge quality and volume. According to the experimental data of TNT's internal explosion, the empirical formula of the peak for the quasi-static pressure is fitted, The formula can be used to calculate of quasi-static pressure's peak value and assess the lethality of internal explosion.

Keywords: TNT; internal explosion; quasi-static pressure; the ratio of charge quality and volume

(责任编辑 曾月蓉)