

TNT 后燃反应的水下爆炸 实验研究与数值模拟^{*}

曹 威, 何中其, 陈网桦

(南京理工大学化工学院, 江苏南京 210094)

摘要: 为了研究 TNT 炸药的后燃反应, 采用水下爆炸实验方法和一种增强炸药后燃反应的实验装置, 对 TNT 炸药的能量输出结构进行了研究, 计算得到了不同气体氛围下的后燃反应能量。采用 Miller 能量释放模型, 对后燃反应实验结果进行了数值模拟。结果表明: 在实验装置中充入空气或氧气, 可明显增强 TNT 炸药的后燃反应能量输出, 实测的后燃反应能量随着氧含量的增加而增大, 在实验研究范围内后燃反应能量的最大值达到 4.90 kJ/g, 但并没有达到后燃反应能量的理论最大值; 冲击波压力时程曲线的数值模拟结果与实验结果基本一致, 证明了 Miller 能量释放模型的可行性。

关键词: 后燃反应; TNT 炸药; 水下爆炸; 数值模拟; 实验装置

中图分类号: O383; O389

文献标志码: A

doi: 10.11858/gywlxb.2014.04.009

1 引 言

TNT 炸药是应用最为广泛的常规炸药之一, 氧平衡为 -0.74 。TNT 炸药在完成爆轰反应后, 会生成大量的富含燃料的组分(包括 C、CO 等); 这些组分在燃烧完全(即后燃)的情况下可产生 10.4 kJ/g 的热量, 明显高于 TNT 炸药的爆热(4.5 kJ/g)^[1-2]。为使 TNT 爆轰产物中的燃料组分发生后燃烧反应, 增强炸药的能量输出, 必须提供足够的氧化性气体^[3]。Wolański 等人^[4]对 TNT 炸药在充有空气以及 50% 氧气-50% 氮气(体积分数)的密闭钢管中的冲击波压力时程曲线进行了测量, 采用纹影法和高速摄影法对 TNT 炸药爆轰产物的混合和后燃过程进行了拍摄, 并对后燃反应释放的能量进行了估计, 结果表明, 在 50% 氧气-50% 氮气中 TNT 炸药释放了更多的能量。Kuhl 等人^[5-6]也对 TNT 等炸药在密闭容器中的后燃效应进行了研究, 测得了压力时程曲线, 得到了充空气容器中的超压比充氮气容器中的超压大的结论; 他们还采用自适应网格技术, 对后燃过程进行了数值模拟。以上研究主要集中于后燃反应在密闭空间内的能量输出, 并没有对后燃反应的对外做功情况进行分析。

本研究采用水下爆炸实验方法, 通过设计一种增强炸药后燃反应的实验装置, 研究 TNT 炸药在不同气体氛围下的后燃反应对水下爆炸能量输出的影响, 并使用 ANSYS AUTODYN 软件对后燃反应进行数值模拟。

^{*} 收稿日期: 2012-08-20; 修回日期: 2012-10-15

基金项目: 国防科技工业基础产品创新计划火炸药科研专项

作者简介: 曹 威(1988—), 男, 博士研究生, 主要从事爆炸与安全防护研究. E-mail: weicao668@qq.com

通讯作者: 何中其(1978—), 男, 讲师, 主要从事爆炸与安全防护研究. E-mail: hzq555@163.com

2 实验

2.1 主装药与起爆系统

采用 TNT 圆柱形压装药作为主装药,每发质量为 200 g,直径为 40 mm,密度约为 1.58 g/cm^3 。选用 8 号电雷管进行起爆,为了使主装药爆轰完全,每发 TNT 装药均使用一发直径为 15 mm、密度约为 1.72 g/cm^3 、质量为 5 g 的 JH-14 传爆药柱^[7]。

2.2 实验装置

为了增强炸药的后燃反应,设计了如图 1 所示的增强炸药后燃反应的实验装置。该装置为双层圆筒结构,在内、外层容器间的封闭空腔内充填一定压力的气体;进行水下爆炸测试时,将被测炸药试样装填于内层圆柱容器中,完成防水处理后,将实验装置放入水下。起爆后,壳体破裂,炸药能量向外输出。装置由 20 钢焊接而成,为保证周向能量均匀输出,环形部分均采用无缝钢管。经计算,空腔内充装气体的体积为 6024 cm^3 。实验时,容器空腔内分别充空气(绝对压力为 0.1、0.6 和 4.6 MPa)、氧气(绝对压力为 0.6 和 4.6 MPa)和氮气(绝对压力为 0.6 和 4.6 MPa)。每种实验条件下均进行两发平行实验。

2.3 测试装置

采用 PCB 138M124 电气石水下传感器、PCB 482A16 型信号调理仪、国产纵横公司 JV5200 数据采集仪和 Jovian 软件,测量并记录水下固定位置处的压力时程曲线。

2.4 实验布局

实验在 $\varnothing 8 \text{ m} \times 8 \text{ m}$ 的刚性水池中进行,水池池壁和池底材质均为钢板。实验装置和传感器布放在水下 4.25 m 处,水平间距 2.5 m,距池壁的水平距离均为 3 m。实验布局如图 2 所示。

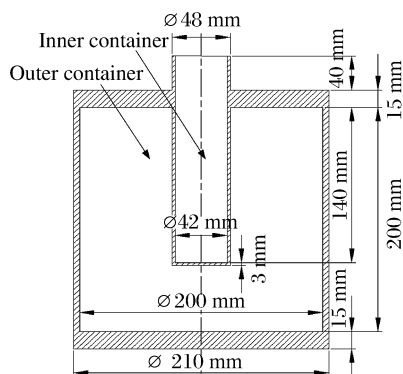


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Sketch of the experimental device

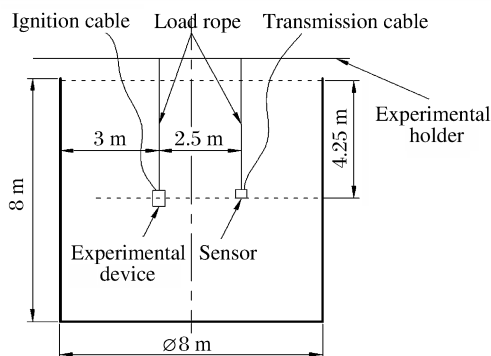


图 2 实验布置

Fig. 2 Experimental layout

3 实验结果与分析

3.1 实验平行性

在每种实验条件下均进行两发平行实验。表 1 列出了在充有 4.6 MPa 空气的实验装置中装药水下爆炸平行实验结果,其中: p_m 为冲击波超压峰值; θ 为衰减时间常数(冲击波压力从 p_m 衰减至 p_m/e 时所需的时间); $M = \int_0^{51.7\theta} p^2(t) dt$, 为冲击波压力的平方对时间的积分; t_b 为第一气泡脉动周期。从表 1 中的实验数据可以看出,实验的平行性较好,就各水下爆炸参数而言,两发平行实验的相对误差小于 5%,说明实验装置对实验结果的平行性没有影响,即在相同气体环境下实验装置的变形和破坏所消耗的能量相等。

表 1 水下爆炸平行实验结果

Table 1 Parallel experiment results of the underwater explosion

Experimental No.	$p_m / (\text{MPa})$	$\theta / (\mu\text{s})$	$M / (\text{kPa}^2 \cdot \text{s})$	$t_b / (\text{ms})$
1	4.65	26.92	804	146.78
2	4.72	26.98	823	147.65

3.2 压力时程曲线

图 3 给出了不同气体环境下 TNT 炸药的冲击波压力时程曲线。由于气体压力和氧气浓度不同,实验装置中的氧气含量存在差异。从图 3 中可以看出,冲击波波头过后,同压力气体下氧气中的冲击波压力最大,空气次之,氮气最小,考虑到氮气不参与炸药的后燃反应^[8],因此 TNT 炸药的爆轰产物在氧气和空气中发生了后燃反应,使冲击波压力升高,且后燃反应的强度随氧气含量的增加而增大。值得注意的是,在 4.6 MPa 的氮气环境下冲击波压力曲线高于 0.1 MPa 空气下的压力曲线,而 0.6 MPa 氮气下的冲击波压力曲线则基本与 0.1 MPa 空气下的压力曲线重合,说明实验装置内的气体压力对冲击波压力曲线亦有影响,并且冲击波压力随着气体压力的增加而增大。

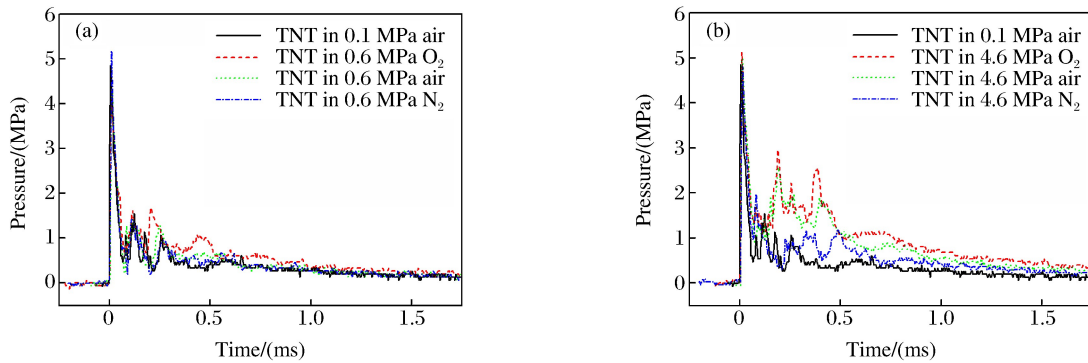


图 3 冲击波压力时程曲线

Fig. 3 Shock wave pressure histories

3.3 后燃反应能量

Bjarnholt^[9]基于 Cole^[10]的水下爆炸理论,提出了有限水域水下爆炸能量的计算公式

$$e_s = K_e \frac{4\pi R^2}{\rho_w c_w w} \int_0^\tau p^2(t) dt \quad (1)$$

$$e_b = \frac{1}{8C^3 K_1^3 w} \left\{ \left[1 + 4Ct_b \left(\frac{p_h}{p_{hn}} \right)^{5/6} \right]^{1/2} - 1 \right\}^3 \quad (2)$$

$$e_t = K_f (\mu e_s + e_b) \quad (3)$$

式中: e_s 为比冲击波能(J/kg); K_e 为比冲击波能的修正系数; R 为爆心至测点的距离(m); w 为装药质量(kg); ρ_w 为水的密度(kg/m^3),本研究取 $1000 \text{ kg}/\text{m}^3$; c_w 为水中声速(m/s),取 1500 m/s ; $p(t)$ 为测点处 t 时刻的冲击波压力(Pa); τ 为积分上限(s),由于冲击波压力时程曲线衰减较慢,因此本研究中 τ 取 51.7θ ,此时冲击波压力降至峰值压力的 5% 以下; e_b 为比气泡能(J/kg); C 、 K_1 是与水池和装药位置有关的常数, $K_1 = 1.135 \rho_w^{1/2} / p_{hn}^{5/6}$,在本实验条件下,根据实验测量结果,结合最小二乘法^[11]计算得到 $C = 0.4147 \text{ s}^{-1}$; p_h 为实验时大气压与装药处静水压之和(Pa); p_{hn} 为标准大气压(101325 Pa)与装药处静水压之和(Pa); e_t 为水下爆炸的总比能量(J/kg); K_f 为装药形状系数; μ 为冲击波能损失系数。

根据实验结果,由(1)式~(3)式计算得到水下爆炸能量,如表 2 所示。可见,氧气和空气中的冲击波能和气泡能均大于同压力下氮气中的冲击波能和气泡能,说明存在后燃反应。同时注意到,将 TNT 炸药置于充有常压(0.1 MPa)空气的实验装置时,比冲击波能 e_s 和比气泡能 e_b 相比 TNT 裸药的比冲

击波能(约 1 kJ/g)和比气泡能(约 2 kJ/g)^[12]均有所降低,其主要原因在于 TNT 炸药对实验装置的破坏消耗了其能量。对于氮气而言,虽然它不参与炸药的后燃反应,但是由于气体压力的升高(从 0.6 MPa 升高到 4.6 MPa),比冲击波能 e_s 和比气泡能 e_b 均有所提高,并且比气泡能 e_b 的提高更为明显。

爆轰产物与周围气体的混合反应需要一定的时间,从图 3 中可以看出,后燃反应发生在起爆后约 0.13 ms(即空气和氧气条件下的压力时程曲线开始高于氮气条件下的压力时程曲线的时间),而根据实验结果计算得到的实验装置的变形和破坏发生在起爆后 0.05 ms,即后燃反应(与气体种类有关)对实验装置的变形和破坏没有影响。结合 3.1 节的实验平行性结论,可以认为:在相同气体压力条件下,实验装置的变形和破坏所消耗的能量相等。由于氮气不参与炸药的后燃反应,故用某压力下空气和氧气中计算得到的能量值减去同压力下氮气中的能量值,即可得到此压力下后燃反应能量的实测值($e_{a,exp}$)。根据不同气体环境下氧气的含量,按照最大放热原则(H_2O-CO_2 型,即首先将 H 氧化成 H_2O ,再将 C 氧化为 CO_2)写出的化学反应方程式,可计算出后燃反应能量的理论最大值($e_{a,theor}$)^[2],如表 3 所示。

表 2 水下爆炸能量
Table 2 Underwater explosion energy

Filling gas	Pressure/(MPa)	e_s /(kJ/g)	e_b /(kJ/g)	e_t /(kJ/g)
Air	0.1	0.19	1.54	1.86
Air	0.6	0.22	2.24	2.66
Air	4.6	0.56	5.09	6.30
N ₂	0.6	0.21	1.81	2.17
N ₂	4.6	0.28	3.32	3.87
O ₂	0.6	0.30	3.27	3.89
O ₂	4.6	0.68	7.23	8.77

由表 3 中的数据可得到与 3.2 节相同的结论:后燃反应能量的实测值随着氧气含量的增加而增大,最大值为 4.6 MPa 氧气环境下的 4.90 kJ/g。但是,后燃反应能量的实测值并没有达到理论最大值,即使在氧气过量(4.6 MPa 氧气环境,此时氧气含量为 358 g,而 200 g 的 TNT 炸药完全燃烧需要 148 g 氧气)的情况下,后燃反应能量也没有达到理论最大值 10.4 kJ/g(1 g TNT 炸药完全燃烧产生的热量与爆热之差)。分析认为,这是由于炸药起爆后对实验装置进行破坏而消耗了一部分能量,此外爆轰产物向外膨胀做功形成开放空间,导致爆轰产物的温度和压力迅速下降,从而使后燃反应中途终止,没有反应完全。

表 3 后燃反应能量
Table 3 Afterburning reaction energy

Filling gas	Pressure/(MPa)	$e_{a,exp}$ /(kJ/g)	$e_{a,theor}$ /(kJ/g)	Filling gas	Pressure/(MPa)	$e_{a,exp}$ /(kJ/g)	$e_{a,theor}$ /(kJ/g)
Air	0.6	0.49	1.49	O ₂	0.6	1.72	3.78
Air	4.6	2.43	5.54	O ₂	4.6	4.90	10.40

4 理论模型与计算方法

炸药的爆轰与后燃反应是流体力学与化学反应动力学相互耦合的复杂过程,除了要考虑数值计算方法外,还要考虑化学反应率问题。

4.1 基本方程

不考虑各种耗散因素和外力做功情况,二维非定常可压缩化学反应流体力学的控制方程组为^[13]

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0 \\ \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2 + p)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u v)}{\partial y} = 0 \\ \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u v)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2 + p)}{\partial y} = 0 \\ \frac{\partial(\rho e)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho e u + p u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho e v + p v)}{\partial y} = 0 \\ \frac{\partial(\rho \lambda)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \lambda u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \lambda v)}{\partial y} = \rho r \end{cases} \quad (4)$$

式中: ρ 、 u 、 v 、 e 、 p 分别为密度、 x 方向的速度分量、 y 方向的速度分量、单位质量的总能量和压力, λ 为化学反应进程变量, r 为化学反应速率。

4.2 JWL-Miller 状态方程

JWL 状态方程^[14]没有考虑炸药的后燃反应, 而后燃反应过程却十分复杂, 为了模拟 TNT 炸药在后燃反应中的能量释放, 选用 Miller 能量释放模型^[15-16], 此时炸药的材料模型采用 JWL-Miller 状态方程

$$p = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega(E + \lambda Q)}{V} \quad (5)$$

式中: p 为爆轰产物的压力; V 为爆轰产物的相对比容; A 、 B 、 R_1 、 R_2 、 ω 为常数, 可通过标准圆筒试验进行标定; E 为爆轰产物的比内能; Q 为冲击波阵面后额外释放的比内能; λ 为爆轰产物的燃烧反应分数。 λ 用 Miller 能量释放模型表示

$$d\lambda/dt = a(1 - \lambda)^m p^n \quad (6)$$

式中: a 为能量释放常数, m 为能量释放指数, n 为压力指数。 a 、 m 和 n 与爆轰产物、气体氛围有关, 可通过对实验数据和数值计算结果进行对比迭代进而反推确定。

4.3 计算方法

用 ANSYS AUTODYN 软件进行数值模拟, 采用二维多物质 Euler 算法进行建模, 材料参数均取自 AUTODYN 自带材料库。为提高计算精度和速度, 先在小范围内采用小网格进行计算, 然后将计算结果映射到实验范围内(大网格)进行计算。

5 计算结果分析

以 TNT 炸药在氧气(压力为 0.6 和 4.6 MPa)中的后燃反应为例进行分析, 图 4 给出了压力和冲量

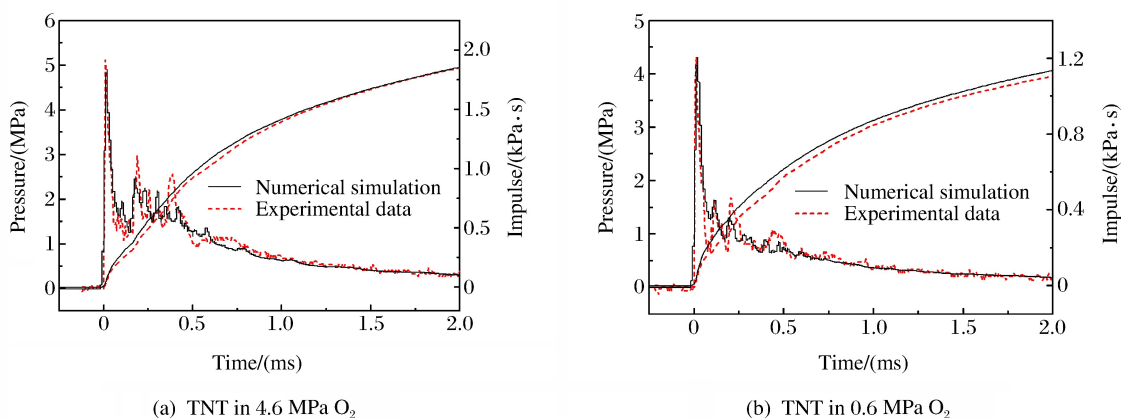


图 4 压力和冲量时程曲线的数值模拟结果与实验结果的对比

Fig. 4 Comparison of pressure and impulse histories from numerical simulation with experimental data

时程曲线的数值模拟结果与实验结果的对比。从冲击波峰值压力、冲击波波形和冲量值来看,模拟曲线与实验曲线的吻合度较好,证明了 Miller 能量释放模型在模拟后燃反应方面的可行性。通过对实验和数值模拟结果的分析可知,冲击波指数衰减后的振荡现象主要是由于实验装置的存在以及后燃反应速率随时间的变化所致。

6 结 论

通过水下爆炸实验,研究了 TNT 炸药后燃反应的能量输出,采用 Miller 能量释放模型,计算了炸药后燃反应的水下冲击波压力时程曲线,所得如下结论:

(1) 设计的实验装置可以明显地增强炸药后燃反应,提出的炸药后燃反应能量测试方法可为炸药的配方设计提供一定的参考;

(2) 后燃反应增强了炸药的能量输出,后燃反应能量实测值随着氧含量的增加而增大,在实验研究范围内实测的后燃反应能量最大值为 4.90 kJ/g,没有达到后燃反应能量的理论最大值;

(3) 数值模拟结果与实验波形基本吻合,说明选用的 Miller 能量释放模型在模拟炸药后燃反应方面是可行的。

References:

- [1] Ornellas D L. Calorimetric determinations of the heat and products of detonation for explosives; October 1961 to April 1982, UCRL-52821 [R]. Livermore, USA; Lawrence Livermore National Laboratory, 1982.
- [2] Cooper P W. Explosives Engineering [M]. New York, USA; Wiley-VCH, 1996; 132-133.
- [3] Needham C E. Blast Waves [M]. Heidelberg, Germany; Springer-Verlag, 2010; 303-312.
- [4] Wolański P, Gut Z, Trzciński W A, et al. Visualization of turbulent combustion of TNT detonation products in a steel vessel [J]. Shock Waves, 2000, 10(2): 127-136.
- [5] Kuhl A L, Reichenbach H. Combustion effects in confined explosions [J]. Proc Combust Inst, 2009, 32(2): 2291-2298.
- [6] Kuhl A L, Bell J B, Beckner V E, et al. Gasdynamic model of turbulent combustion in TNT explosions [J]. Proc Combust Inst, 2011, 33(2): 2177-2185.
- [7] Sun H, Guo Z J. Study on the application of high energy hexogen booster in undersea weapons [J]. Journal of the Academy of Equipment Command and Technology, 2010, 21(3): 111-113. (in Chinese)
孙 华, 郭志军. 高能聚黑类传爆药在水中兵器中应用研究 [J]. 装备指挥技术学院学报, 2010, 21(3): 111-113.
- [8] Kiciński W, Trzciński W A. Calorimetry studies of explosion heat of non-ideal explosives [J]. J Therm Anal Calorimetry, 2009, 96(2): 623-630.
- [9] Bjarnholt G, Holmberg R. Explosive expansion waves in underwater detonation [C]//Proceedings of the Sixth International Symposium on Detonation. San Diego, USA, 1976; 540-550.
- [10] Cole R H. Underwater Explosions [M]. Princeton, USA; Princeton University Press, 1948.
- [11] Ding C X, Cui Y J. Determination of intrinsic constants of bubble energy with least square method; Accurate calculations of explosive energy measured underwater [J]. Explosive Materials, 1994(3): 1-7. (in Chinese)
丁长兴, 崔应娟. 用最小二乘法求气泡能的固有常数——兼议水下测试炸药能的精确计算 [J]. 爆破器材, 1994(3): 1-7.
- [12] Shi R, Xu G G, Liu D R, et al. Underwater test and analysis for explosion energy of explosives [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2008, 31(4): 1-5. (in Chinese)
史 锐, 徐更光, 刘德润, 等. 炸药爆炸能量的水中测试与分析 [J]. 火炸药学报, 2008, 31(4): 1-5.
- [13] Sun J S, Zhu J S. Theory of Detonation Physics [M]. Beijing; National Defense Industry Press, 1995; 360-368. (in Chinese)
孙锦山, 朱建士. 理论爆轰物理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1995; 360-368.

- [14] Lee E L, Horning H C, Kury J W. Adiabatic expansion of high explosive detonation products, UCRL-50422 [R]. California, USA: University of California, 1968.
- [15] Miller P J. A reactive flow model with coupled reaction kinetics for detonation and combustion in non-ideal explosives [J]. MRS Proc, 1996, 418: 413-420.
- [16] Xin C L, Xu G G, Liu K Z, et al. Application of Miller energy release model for aluminized explosive [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2008, 16(4): 436-440. (in Chinese)
辛春亮, 徐更光, 刘科种, 等. 含铝炸药 Miller 能量释放模型的应用 [J]. 含能材料, 2008, 16(4): 436-440.

Experimental Research and Numerical Simulation of Afterburning Reaction of TNT Explosive by Underwater Explosion

CAO Wei, HE Zhong-Qi, CHEN Wang-Hua

(School of Chemical Engineering, Nanjing University of
Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: To explore the afterburning reaction of TNT explosive, the underwater explosion method and an experimental device designed to enhance the afterburning reaction of explosives were used to investigate the energy output structure, and the afterburning reaction energy in different ambient atmosphere was calculated. The experimental data of afterburning reaction was simulated by using Miller energy release model. The results show that the experimental device filled with oxygen or air can increase the afterburning reaction energy output of TNT explosive significantly. The measured afterburning reaction energy increases with the increase of the content of oxygen, and in the studied range, the afterburning reaction energy reaches the maximum value of 4.90 kJ/g, but does not reach the theoretically maximum value. The computed shock wave pressure histories agree with the measured ones well, which indicates that the Miller energy release model is practicable.

Key words: afterburning reaction; TNT explosive; underwater explosion; numerical simulation; experimental device