

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2014.02.003

# TNT 密闭环境中能量释放特性研究<sup>\*</sup>

金朋刚 郭 炜 任松涛 王建灵 高 赞 李鸿宾

西安近代化学研究所(陕西西安,710065)

[摘 要] 为了研究 TNT 在密闭空间中的能量释放特性,依据量热法原理测量了 TNT 炸药在不同环境中(真空、0.1 MPa 空气、0.1 MPa 氧气)的爆热;同时在自行设计的密闭爆炸仓内,采用 PCB 压力传感器和 K 型热电偶分别测量了 TNT 炸药在不同气氛(空气、氮气、纯氧气)中爆炸后的准静态压力和爆炸场温度。爆热测试试验结果表明,当环境中氧含量增加时,爆热也随之增加;密闭空间中爆炸参数测量结果表明,随着密闭环境中氧含量的增加,准静态压力和爆炸场温度均有所增加。这说明实际应用中 TNT 爆炸反应完全性较低,有大量能量未释放,密闭条件可以提高 TNT 爆炸能量释放率。

[关键词] 爆炸力学;密闭条件;爆炸场温度;准静态压力

[分类号] TQ564.3; O383

## 引言

随着温压炸药技术的发展,炸药及弹药系统研究的重点已经转变为科学设计并高效利用炸药的能量<sup>[1-3]</sup>。Arnold<sup>[4]</sup>提出了一个爆轰和燃烧的计算模型,认为温压炸药的能量释放有 3 个过程:炸药爆轰、无氧反应和有氧反应。国外关于密闭空间中炸药爆炸后燃烧的研究有大量报道,一致认为后燃烧阶段提供的能量是温压炸药在密闭空间中产生强持续冲击效应的动力源,在温压炸药研究初期,就已经将准静态压力作为衡量温压炸药能量特性的主要参数。美国“战斧”导弹装药更换时,将准静态压力作为衡量炸药威力的唯一标准<sup>[5]</sup>。韩国 Lee 等<sup>[6]</sup>通过试验研究了温压炸药总燃烧热和炸药密闭空间中准静态压力的关系。美国 Ames 等<sup>[7]</sup>测量了多种温压炸药密闭空间中的准静态压力—时间曲线,并量化了密闭空间中温压炸药爆轰和后燃烧两个过程中的能量,试验中得到了温压炸药密闭空间中的典型压力—时间曲线。加拿大张帆等<sup>[8]</sup>通过量热试验证明,TNT 在外界条件合适时能够实现后燃烧过程,释放的能量是其在真空条件下的 3.75 倍,约 17138 J/g。国内在温压炸药爆炸能量释放的研究还处于初期阶段,对温压炸药密闭空间中能量释放过程的认识还不清晰,因此,关于温压炸药密闭空间中准静态压力的研究较少,主要通过爆炸场温度等

常规参数衡量温压炸药的爆炸特性,如李媛媛等<sup>[9]</sup>研究了不同铝粉含量炸药内爆的温度场特性;辛春亮等<sup>[10]</sup>采用水中爆炸的方法研究了含铝炸药的能量输出在冲击波能和气泡能方面的区别。

关于富燃料炸药在密闭空间中的能量释放特性参数(准静态压力)测量及不同形式能量释放的系统研究还未见报道。本文通过量热的方法测量 TNT 炸药在不同环境中的爆炸能量,同时在不同环境的密闭环境中测量了 TNT 的准静态压力和温度输出特性,系统地分析了 TNT 密闭空间中能量释放特性。

## 1 试验部分

### 1.1 试验装置

#### 1.1.1 密闭空间中准静态压力测量装置及测点布置

试验用密闭装置的尺寸为  $\phi 900$  mm,高 700 mm,容积为 500 L。两个测量窗口位于距离圆柱形罐体顶端 350 mm 的高度处,如图 1 所示。压力传感器采用 PCB 压电式不锈钢传感器,其量程为 0 ~ 0.345 MPa,温度传感器采用 K 型热电偶,密闭装置中有两个测点,每个测点处均安装了压力和温度传感器。数据采集用南汇科技 VXI 瞬态数据采集器,采用频率为  $1 \times 10^6$  次/秒。

<sup>\*</sup> 收稿日期:2013-05-12

基金项目:国防重大基础研究专项项目

作者简介:金朋刚(1978~),男,硕士,助理研究员,主要从事炸药性能评价与预估研究。E-mail:jinpenggang204@126.com

通信作者:郭炜(1968~),男,高级工程师,主要从事火炸药性能评估研究。E-mail:gw200222@sina.com

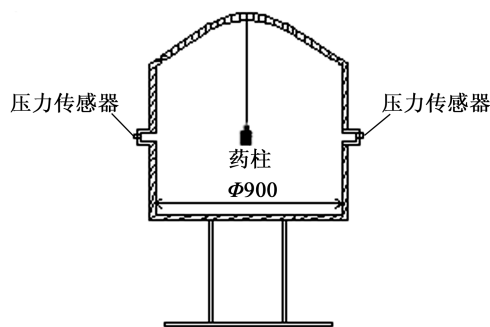


图1 密闭爆炸装置结构示意图(单位:mm)

Fig. 1 Schematic diagram of enclosed condition (unit: mm)

### 1.1.2 爆炸能量测量装置

试验参照国军标 GJB772A—97 中方法 701.1 爆热恒温法和绝热法,本文中采用绝热量热法测量试样的爆热。除了采用标准的真空条件下外,还进行了 0.1 MPa 压力下空气和氧气环境条件下的爆热测量。

## 1.2 试验样品及安装方式

### 1.2.1 准静态压力测量中试验样品及安装方式

将试样压成直径 40 mm、质量为 100 g 的药柱,悬挂于容器的中心位置(图 1),试样为压装 TNT 炸药,密度为  $1.58 \text{ g/cm}^3$ ,采用 8 号铜壳雷管引爆。为了比较 TNT 炸药爆炸后对环境中氧气的利用情况,分别在设计的密闭装置中充入质量分数为 99% 的氮气和氧气,使容器内的初始气体压力保持为一个大气压力,与空气气氛试验时的初始压力保持一致。3 种不同气氛中各进行 2 次平行试验。

### 1.2.2 爆炸能量测量中试验样品及安装方式

试样为压装 25 g TNT,密度为  $1.58 \text{ g/cm}^3$ 。安装在壳体厚度为 0.5 mm 的陶瓷壳体中,吊装在爆热弹体中心部位,采用 8 号铜壳雷管引爆。爆热弹体内腔为 5.8 L。

## 2 结果与讨论

### 2.1 密闭空间 TNT 爆炸准静态压力

在密闭空间中,对于炸药的爆炸威力评估,从美国在“战斧”换装时只采用准静态压力作为炸药威力评价的唯一指标可以看出<sup>[5]</sup>,准静态压力已经成为评价炸药密闭空间中爆炸威力的重要指标。图 2 是 100 g TNT 炸药的爆炸压力—时间曲线(图中的曲线为传感器输出电压与时间的曲线,传感器的输出电压与冲击波压力之间是线性关系,因此,电压—时间关系与冲击波压力—时间关系是一致的,同时为了保证数据的真实性未做转换),图中平滑的红色部分为准静态压力,黑色为多次反射的冲击波压力。图 3 是美国 Ames 等<sup>[7]</sup>测量得到的密闭空间中的典型压力波形图。

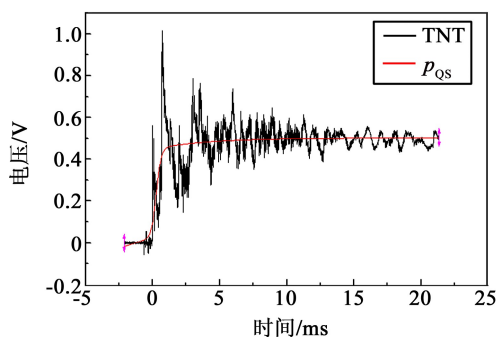


图2 TNT 密闭空间爆炸压力—时间曲线

Fig. 2 Curves of pressure changing with time for TNT in enclosed condition

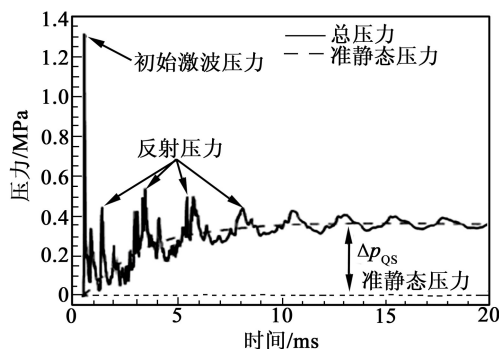


图3 典型压力—时间曲线

Fig. 3 Typical curves of pressure changing with time

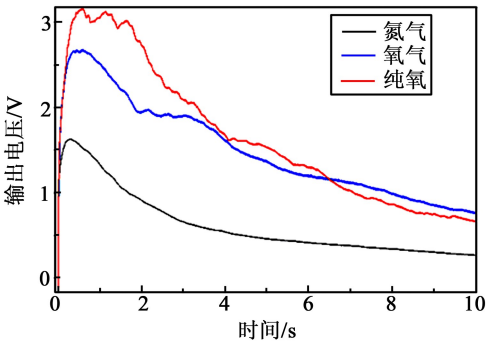
Lee 等<sup>[11]</sup>在进行数据处理时采用多义线拟合的方法取得 10 ~ 20 ms 时间内的平均值作为准静态压力结果;Ames 等<sup>[7]</sup>取一定时间段内冲击波压力平均值作为准静态压力结果;本文中准静态压力的试验结果是冲击波压力—时间曲线中 10 ~ 20 ms 时间内的压力平均值,试验得到的 0.1 MPa 压力的空气、氮气和氧气条件下结果分别是 239.7、200.9 和 289.3 kPa。这与文献[12]中的结果十分吻合,最大相对标准偏差为 3.40%,最小为 2.30%。表 1 是美国面武器中心在“战斧”导弹更换装药时测量得到的多种炸药的准静态压力结果,其最大相对偏差为 5.71%,最小为 2.42%,这说明本文中准静态压力结果的可靠性较高。

### 2.2 爆炸场温度

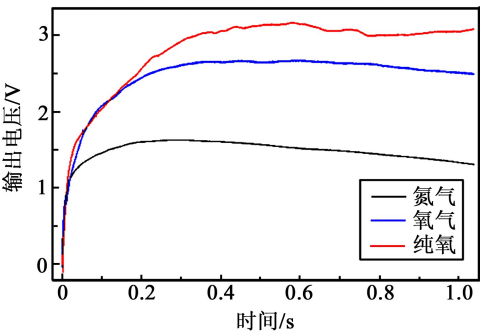
爆炸场温度测量采用自制的 K 型热电偶,热电偶测得的曲线如图 4 所示(热电偶的电压与温度之间存在线性关系,为了保证数据的真实性未做转换)。测得的数据如表 2 所示。表 2 中的数据是温度场在 1 s 内的平均值。从图 4 中可以看出 TNT 在纯氧的密闭空间中产生的热效应持续时间最长,空气中次之,氮气中最短。这说明在有氧气存在的情况下,TNT 爆轰产物与环境中的氧气发生了放热反应,导致环境温度升高。

表 1 美国海军面武器中心准静态压力测量  
Tab. 1 Quasi-static pressure tested by NSWC

炸药名称	组分	质量分数/%	准静态压力/kPa	标准偏差/kPa	相对标准偏差/%
AFX-645	TNT	32.0	231	9.23	3.99
	NT0	48.0			
	Al	12.0			
	WAX	8.0			
Tritonal	TNT	80.0	277	9.78	3.53
	Al	20.0			
PBXN-109	RDX	64.0	295	16.84	5.71
	Al	20.0			
	HTPB 黏结剂	16.0			
PBXC-131	HMX	81.0	248	6.01	2.42
	Al	10.0			
	LMA 黏结剂	9.0			
PBXW-114	HMX	78.0	240	9.58	3.99
	Al	10.0			
	HTPB 黏结剂	12.0			



(a)



(b)

(a) 10 s; (b) 1 s

图 4 温度—时间曲线图

Fig. 4 Temperature-time curves

从表 2 中可以看出,爆炸场温度测量相对标准偏差较大,最大为 7.0%,最小为 5.4%。造成偏差较大的原因主要有两个:一是爆炸场温度分布不均匀,二是爆炸场温度梯度大造成温度测量准确度低。虽然表中结果的标准偏差较大,但总体趋势是一致的,能够反应出不同气氛条件下爆炸场温度的变化

表 2 爆炸场温度测量结果

Tab. 2 Test results of explosion temperature

试验 气氛	温度/℃					相对标准 偏差 /%	
	第一发试验	第二发试验		平均值	标准 偏差		
氮气	380	430	420	400	408	22	5.4
空气	570	640	620	550	595	42	7.0
氧气	790	720	680	710	725	46	6.4

趋势。

2.3 不同环境下 TNT 的爆热

常规的爆热测量时的密闭环境中的气氛条件是真空状态,本文中进行了 0.1 MPa 下空气气氛和 0.1 MPa 下氧气气氛时爆热测量,试验结果如表 3 所示。

表 3 不同试验条件下 TNT 的爆热值

Tab. 3 Detonation heat of TNT in different  
experiment conditions

环境条件	爆热值/(J · g <sup>-1</sup> )
真空	4 229
0.1 MPa 空气	5 012
0.1 MPa 氧气	8 432

从表 3 的数据可以看出,环境气氛的变化会影响 TNT 炸药的能量输出,当环境中的氧含量增加时,TNT 在密闭空间中爆炸的能量(爆热)也随之增加,这说明 TNT 炸药的爆炸化学反应除了爆轰阶段外,还存在其他释放能量的反应阶段。

2.4 TNT 密闭空间中能量释放特性的分析

密闭空间中不同气氛下的爆炸试验结果表明,当氧气浓度增加时,TNT 爆炸场温度及准静态压力也随之增加,如图 5 所示:氧气质量分数从 0→20%→100% 的增加过程中,TNT 在密闭空间中的准静态压力分别增加了 19.5% 和 44.0%,爆热分别增加了 18.6% 和 99.4%,温度增加了 46% 和 77%。这说明,在有氧的密闭空间中爆炸时,TNT 的能量释放过程不仅限于爆轰过程,还存在另外的释能反应过程。

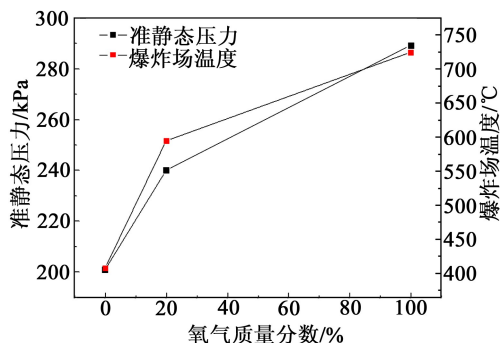
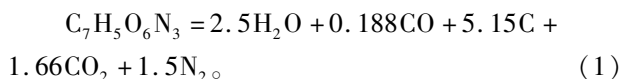


图 5 压力及爆炸场温度—氧气质量分数曲线

Fig. 5 Curves of pressure and explosion temperature changing with the oxygen content

TNT 是一种负氧平衡的炸药,按照贝克尔-季斯捷柯夫斯基-威尔逊(BKW)方程计算结果<sup>[13]</sup>,可以写出 TNT 在无限空中爆炸反应的方程式如式(1)所示:



从式(1)可以看出,TNT 发生爆轰反应后能够产生大量的燃料(例如碳和一氧化碳),如果试验环境条件适当,TNT 在密闭空间中应当也可以发生碳及一氧化碳的燃烧而继续释放能量,这是本文中 TNT 在有氧气氛中测量爆热时会出现上升的主要原因。加拿大张帆用同样的方法证明,极度富氧条件下 TNT 爆炸过程释放的能量为 17138 J/g 也说明了这一点<sup>[8]</sup>。

凝聚相炸药爆轰具有自持性<sup>[14-17]</sup>,当起爆条件和药量固定后,爆轰形成的冲击波参数就基本是定值,不会受到外界环境的影响。从大量的报道可以看出,后燃烧释放的能量无法用以维持冲击波的传播,因为这二者不在一个时间尺度上。从图 2 和图 3 的密闭空间中的压力曲线也可以看出这一点,冲击波已经在密闭空间中发生了多次反射后才测量到准静态压力波。因此,可以认为,TNT 在不同气氛中反应时,爆轰过程释放的能量不会受到外界条件的影响。

Arnord 等<sup>[18]</sup>从理论上已经证明温压炸药在密

闭空间中爆炸时,机械做功和热是其能量释放的两种主要形式。Ames 等<sup>[7]</sup>通过试验证明,密闭空间中的后燃烧过程中存在显著的准静态压力,这种压力主要来源于温压炸药密闭空间中的后燃烧过程。从本文试验结果可以看出,TNT 炸药在有氧密闭空间中爆炸后爆热增加的同时,密闭空间准静态压力增加了、温度升高了。

从以上分析可以看出,TNT 在有氧的密闭环境中爆炸时,能量释放的 3 种主要形式是冲击波压力、准静态压力和热。爆轰过程中主要以冲击波的形式释放能量,同时伴随短暂(为微秒级)的高温过程。后燃烧过程主要以准静态压力和热的形式释放能量。由于后燃烧过程持续时间为几十毫秒级,此时的高温产物与密闭空间中的氧气在冲击波的作用下发生了强烈的湍流混合,高温产物与环境中的氧充分接触;密闭空间内高温产物与环境中的氧的混合物在毫秒级时间内与周围环境无法发生有效的热交换。因此,高温产物与氧的混合物能够维持较高的温度,以上两个因素为高温产物与环境中的氧的化学反应提供了条件,从而使未完全反应的高温产物与环境中的氧发生了氧化还原反应,释放出了比开阔空间更大的能量,因此,文中测量的爆热、准静态压力和爆炸场温度均有明显的增加。

### 3 结论

TNT 在有氧密闭环境中能够释放出更多的能量,主要原因是在密闭空间中发生了除爆轰外的另一种释放能量的反应——爆轰产物与环境中的氧气的燃烧释热反应;但这一反应与冲击波不在同一时间尺度上,因此,其产生的能量无法维持冲击波的传播,即不会影响炸药的冲击波输出;这部分能量主要提高了 TNT 在密闭空间中准静态压力和爆炸场温度。最后,建议将准静态压力作为密闭空间中炸药性能评价的指标之一。

### 参考文献

- [1] Davison N, Lewer N. Bradford non-lethal weapons research project[R]. Bradford: University of Bradford, 2006.
- [2] Smith K T. Pressable thermobaric explosives; aluminum containing compositions based on HMX and RDX [C]// 36th International Annual Conference of ICT. Karlsruhe: ICT, 2005.
- [3] Schaefer R A, Nicolich S M. Development and evaluation of new high blast explosives [C]// 36th International Annual Conference of ICT. Karlsruhe: ICT, 2005.
- [4] Arnold W, Rottenkolber E. Thermobaric charges; modelling and testing [C]// 38th International Annual Conference of ICT. Karlsruhe: ICT, 2007.



- [5] David T P E. Internal blast test to support the tomahawk and APET programs " Munitions Survivability in Unified Operations" [ C ]//Insensitive Munitions & Energetic Materials Technology Symposium, San Diego, NDIA, 1996.
- [6] Lee K B, Lee K D, Kim J K. Relationship between combustion heat and blast performance of aluminized explosives[ C ]//36th International Annual Conference of ICT & 32nd International Pyrotechnics Seminar. Karlsruhe, Germany, 2005.
- [7] Ames R G, Drotar J T, Silber J, et al. Quantitative distinction between detonation and afterburn energy deposition using pressure-time histories in enclosed explosions [ C ] // Proceedings of the 13th International Detonation Symposium. Norfolk, VA: office of Naval Research, 2006:253-262.
- [8] Zhang Fan, Anderson J, Yoshinaka A, et al. Post-detonation energy release from TNT-aluminum explosive [ C ]//AIP Conference Proceedings, 2007, 955: 885-888.
- [9] 李媛媛, 南海. 半密闭条件下爆炸场的温度与压力测量[ J ]. 火炸药学报, 2008, 31(1): 48-52.  
Li Yuanyuan, Nan Hai. Detonation field temperature and pressure test under semi-enclosed conditions[ J ]. Chinese Journal of Explosives & ropellants, 2008, 31(1): 48-52.
- [10] 辛春亮, 徐更光, 刘科种, 等. 含铝炸药与理想炸药能量输出结构的数值模拟[ J ], 火炸药学报, 2007, 30(4): 6-8.  
Xin Chunliang, Xu Gengguang, Liu Kezhong, et al. Numerical simulation of energy output structure for aluminized explosive and idealized explosive in underwater explosion [ J ]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2007, 30(4): 6-8.
- [11] Lee R J, Newman K E, Bohl D G, et al. Combined initial air blast and quasi-static overpressure assessment for pressed aluminized explosives[ C ] // Proceedings of the 13th International Detonation Symposium. Norfolk, VA: Office of Naval Research, 2006:245-252.
- [12] 金朋刚, 郭伟, 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 & Propellants, 2013, 36(3): 39-41.
- [13] 周霖. 爆炸化学基础[ M ]. 北京: 北京理工大学出版社, 2005: 40.
- [14] 惠君明, 陈天云. 炸药爆炸理论[ M ]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1995: 66.
- [15] Gel'fand B E, Gogulya M F, Medvedev S P, et al. Diagnostics of the afterburning of the detonation products of condensed explosives[ J ]. Doklady Physical Chemistry, 2001, 379(1-3): 186-190.
- [16] 李静, 王伯良, 赵新颖, 等. 含铝炸药爆炸过程中的能量分析[ J ]. 爆破器材, 2013, 42(2): 10-13.  
Li Jing, Wang Boliang, Zhao Xinying, et al. Energy analysis in the explosion process of high aluminized explosive[ J ]. Explosive Materials, 2013, 42(2): 10-13.
- [17] 连赞猛, 方道红, 顾晓辉, 等. 典型密闭装置内爆炸尺寸效应研究[ J ]. 爆破器材, 2012, 41(5): 1-4.  
Lian Yunmeng, Fang Daohong, Gu Xiaohui, et al. Effect of scales on typical closed structure due to internal explosion[ J ]. Explosive Materials, 2012, 41(5): 1-4.
- [18] Arnord W, Rottenkolber E. The performance of insensitive blast enhanced explosives: US, 5467714[ P ]. 1995-11-21.

## Research on TNT Energy Release Characteristics in Enclosed Condition

JIN Penggang, GUO Wei, REN Songtao, WANG Jianling, GAO Zan, LI Hongbin

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

[ABSTRACT] In order to study the energy release characteristics of TNT in enclosed condition, the detonation heat of TNT in different environments (vacuum, 0.1MPa air or 0.1MPa oxygen) was tested by the calorimetric method. And the quasi-static pressure and explosion temperature of TNT in different air condition (air,  $N_2$  and  $O_2$ ) were measured respectively using PCB company piezoelectric pressure sensors and thermocouple of type K. The detonation heat test results show that when the oxygen content of gas condition increases, the detonation heat of TNT also increases. The quasi-static pressure and explosion temperature tests also show that the same results. All of these indicate that in the practical application the completion of the TNT explosive reaction is much low, where there is a lot of energy is unable to be released, but the enclosed condition can improve the ratio of TNT energy released in explosion.

[KEY WORDS] explosion mechanics; enclosed condition; explosion temperature; quasi-static pressure