

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2015.01.005

# 全密闭空间内温压炸药的冲击波参数试验研究\*

韩 早 王伯良 李 席

南京理工大学化工学院(江苏南京,210094)

[摘 要] 为研究温压炸药在全密闭空间内冲击波特征,在双层密闭的爆炸容器中测定了等质量与等体积条件下,不同含铝量的温压炸药的超压及冲量,并采用 AUTODYN 软件对容器中的冲击波传播进行了模拟分析。等质量与等体积两种装药方式下的研究结果均表明,数值模拟能很好地对试验数据进行拟合,在密闭空间内温压炸药铝粉质量分数为 30% 时,冲击波的超压与冲量最大。

[关键词] 温压炸药;冲击波参数;全密闭空间;数值模拟

[分类号] TQ560

## 引言

温压炸药是利用热效应和压力效应对目标造成毁伤的<sup>[1]</sup>。当温压炸药爆炸波在约束空间内传播时,冲击波遇到约束面产生反射汇聚作用,能够导致燃料空气混合物局部反应更加强烈,可大大提高其综合毁伤效应<sup>[2]</sup>,特别适合针对藏在密闭或半密闭空间的恐怖分子,因此逐渐成为国内外学者研究的热点<sup>[3-5]</sup>。但由于试验条件的限制,温压炸药试验研究主要还基于空中爆炸与半密闭空间内。李芝绒等<sup>[6]</sup>通过试验获取了空气和氮气环境中温压炸药和 TNT 的冲击波超压峰值、罐体内准静态压力和热电偶响应温度峰值,研究了不同气体环境中温压炸药爆炸效应参数的特性。金朋刚等<sup>[7]</sup>采用热通量传感器研究了自由场和半密闭两种条件下的 TNT、852 及 G-1 温压炸药爆炸过程中的热通量时间历程,认为试验环境对温压炸药反应历程影响较大,半密闭条件有利于提高温压炸药的热量输出。但是,已有的研究较少涉及到全密闭条件下爆炸能量输出特征研究。

本文采用密闭双层爆炸碉堡内进行的温压炸药静爆试验,并结合相关研究手段<sup>[8-11]</sup>,测试并研究了等质量与等体积情况下不同铝粉含量的温压炸药的冲击波参数。同时,对容器中的冲击波传播进行了数值模拟分析。

## 1 试验部分

### 1.1 试验装置

爆炸试验在密闭的双层锰钢爆炸容器中进行。

该容器由上下球冠和中间圆柱形壳体无缝焊接而成,容器内径为 3 m,容积约为 25 m<sup>3</sup>。爆炸容器南北两侧各开有一个直径为 300 mm 的盲板,如图 1 所示。

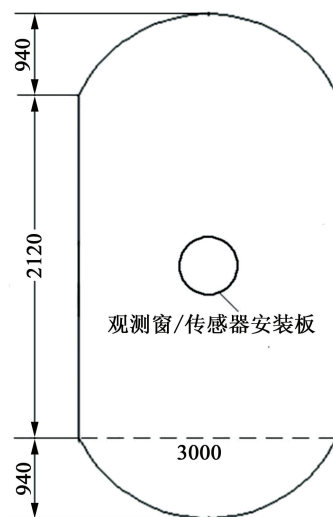


图 1 爆炸容器示意图

Fig. 1 Sketch of the explosion vessel

### 1.2 测试系统

在两侧盲版上分别安装 2 个 ICP 自由场压力传感器与 2 个壁面压力传感器,如图 2 所示。其中壁面传感器距离爆心为 1.5 m,自由场传感器距离爆心为 1.0 m 和 1.2 m。爆炸冲击波压力信号由 Tra-NET 型多通道数据采集仪进行采集与记录。

\* 收稿日期:2014-03-14

作者简介:韩早(1983~),男,博士,主要从事爆炸理论及其应用研究。E-mail:41199@qq.com

通信作者:王伯良(1964~),男,硕士,教授,主要从事爆炸理论及其应用研究。E-mail:boliangwang@163.com

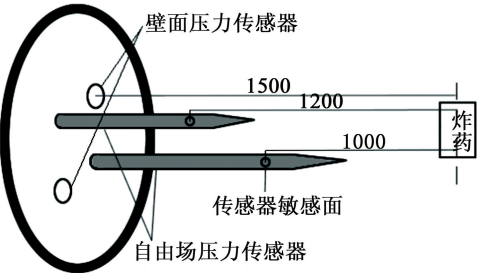


图2 盲板测点布置图

Fig.2 Layout of measuring points on blind

1.3 试验药品

试验采用等体积与等质量两类各4种含铝质量分数为20%、30%、40%、50%的RDX基温压炸药,并与TNT作比较,配方如表1所示。其中,Z-20、Z-30、Z-40、Z-50(等质量)配方炸药的装药量均为340g,T-20、T-30、T-40、T-50(等体积)配方炸药的药柱体积约为161 cm<sup>3</sup>。

表1 温压炸药配方

Tab.1 Compositions of the thermobaric explosive

编号	装药密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	装药量/ g	质量分数/%		
			RDX	AP	Al
T-20	1.79	288.5	50	24	20
Z-20		340.0			
T-30	1.85	298.0	43	21	30
Z-30		340.0			
T-40	1.91	308.1	36	18	40
Z-40		340.0			
T-50	1.98	318.8	30	14	50
Z-50		340.0			

1.4 试验结果

试验时将炸药药柱安置于双层爆炸容器的几何中心,并使用8#雷管进行引爆。试验共分10组配方,温压炸药与TNT的平均冲击波超压峰值与冲量值列于表2中。

2 结果分析

2.1 有限空间内冲击波传播分析

采用AUTODYN程序对有限空间内冲击波波形进行分析<sup>[12]</sup>。根据爆炸容器实际尺寸设定。计算采用2D四分之一对称模型,如图3所示。

设定容器壁面边界条件为绝热刚性壁面,空气选用理想气体状态方程,炸药状态方程采用JWL。以等质量配方TNT炸药为例进行密闭空间数值模拟,试验与模拟结果列于表3中。表3中可以看出,模拟结果比较切合实际,超压与冲量误差均不超过5%。

有限空间内的壁面传感器与自由场传感器的

表2 温压炸药密闭空间试验的冲击波参数

Tab.2 Shockwave parameters of thermobaric explosive in the fully enclosed space experiment

配方	自由场超压 (入射)/kPa		壁面超压 (反射)/kPa	冲量/ (Pa·s)
	1.0 m	1.2 m	1.5 m	1.5 m
Z-20	650.5	400.3	790.3	238.6
Z-30	857.0	462.7	865.9	252.1
Z-40	637.9	396.8	787.8	227.3
Z-50	555.1	373.5	754.2	219.8
TNT	543.1	373.0	717.2	212.0
T-20	592.4	341.7	653.4	217.1
T-30	664.2	414.9	712.7	227.1
T-40	599.9	343.8	674.7	217.6
T-50	573.1	336.7	645.7	209.5
TNT	383.0	259.5	483.3	163.9

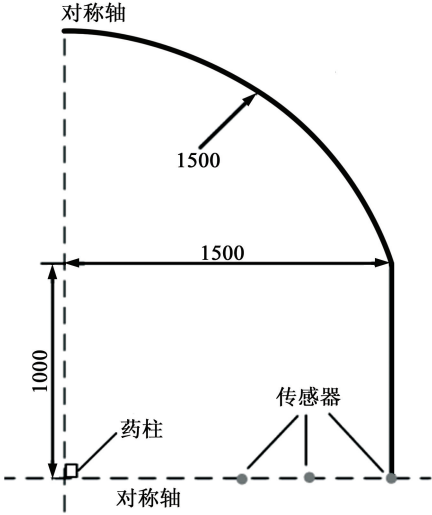


图3 计算模型

Fig.3 Computational model

表3 TNT密闭空间爆炸的冲击波参数

Tab.3 Shockwave parameters of TNT blasted in the fully enclosed space

	自由场超压/ kPa		壁面超压/ kPa	冲量/ (Pa·s)
	1.0 m	1.2 m	1.5 m	
试验	543.1	373.0	717.2	212.0
模拟	563.5	359.4	690.1	222.1

超压时程曲线具有明显的多峰结构,以Z-30为例,结果如图4、图5所示。根据模拟的结果对波形进行分析可知,图4中的第二个超压峰为由异侧壁面形成的反射冲击波;而图5中的第二个超压峰为同侧壁面反射产生。

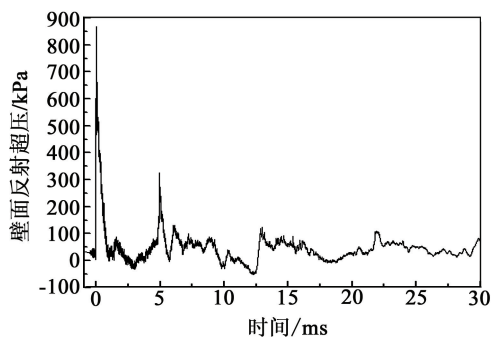


图 4 Z-30 配方壁面超压时程曲线

Fig. 4 Pressure-time profile of reflected blast wave for Z-30

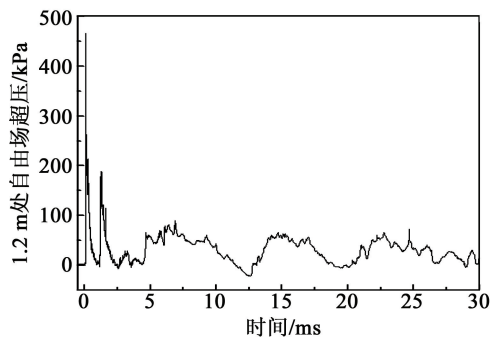


图 5 Z-30 配方自由场超压时程曲线

Fig. 5 Pressure-time history of incident blast wave for Z-30

## 2.2 含铝量对冲击波参数的影响

Wightman 等<sup>[13]</sup>认为,有限空间内的复合冲击波可分为 A 和 B 两个时段,如图 6 所示。其中,A 时段为压力从跃升至峰值后再下降至大气压水平所经历的时长,B 时段为压力脉冲波稳定在 10% 超压峰值以上所经历的时长。温压炸药的作用方式与普通炸药有很大的区别,单纯的针对 A 时段进行冲击波参数分析,并不能体现在有限空间内的温压燃料混合物与冲击波的耦合作用,因此,笔者认为通过 B 时段来分析更为合理。

根据等质量配方反射传感器数据,通过计算将 A、B 时段的持续时间  $t_A$ 、 $t_B$  与正冲量  $i_{A+}$ 、 $i_{B+}$  分别列于表 4 中。

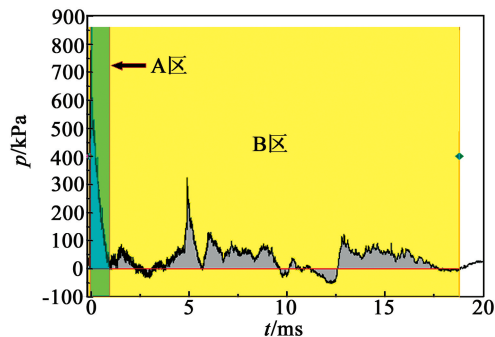


图 6 Z-30 炸药配方的冲击波 A、B 时段

Fig. 6 A and B periods of shock wave for Z-30

表 4 等质量配方的 A、B 时段参数

Tab. 4 Parameters of A and B periods for thermobaric explosives with equal mass

配方	作用时间/ms		冲量/(Pa·s)	
	$t_{A+}$	$t_{B+}$	$i_{A+}$	$i_{B+}$
Z-20	0.890	17.96	238.6	983.18
Z-30	0.965	18.90	252.1	1 002.20
Z-40	0.914	17.07	227.3	893.02
Z-50	0.893	16.07	219.8	651.15
TNT	0.864	13.74	212.0	606.54

从表 4 中可以看出,随着配方含铝量的提高,A、B 时段的冲击波冲量与作用时间均先增大后减小。其中,等质量配方 Z-30 配方在 A、B 时段上的正压作用时间与冲量均为最高,相比于 TNT 在 A 时段上冲量提高了 12.5%,而在 B 时段上提高了 65.0%,这说明了冲击波当遇到约束面形成的复合冲击波能与爆炸形成的燃料空气混合物之间互相作用,由于壁面的约束作用,冲击波在地面、侧面和顶面等区域发生了反射、聚焦作用,使得反射冲击波更强,当遇到爆炸火球时的后燃反应也更为猛烈。因此提高了炸药整体的威力,从而提高了炸药整体的温压效应。

此外,等质量的 Z-40、Z-50 配方在 A 时段上冲量相差并不大,但在 B 时段,Z-40 配方的冲量要高出后者 37.1%。这表明含铝质量分数超过 40% 后,温压炸药的后燃效果会明显降低,这是由于炸药配方中的高能炸药 RDX 组分的减少,因此形成反射冲击波强度减弱,造成后燃效果偏弱。

## 2.3 等体积与等质量装药方式的影响

在等质量试验中,各测点的入射超压峰值均随着配方含铝质量分数的升高先增加后降低。表 2 中的试验结果表明,Z-30 与 T-30 配方分别在等质量与等体积的测试中的冲击波冲量与超压峰值最高。其中,在等质量测试中,Z-20 配方超压峰值与冲量略高于 Z-40 配方,而在等体积测试中,T-40 配方的冲击波参数要优于 T-20 配方。这是由于 T-40 配方的密度要高于 T-20 配方,在等体积装药时,装药要多约 19.6 g。

## 3 结论

本文利用双层密闭爆炸容器,对等质量与等体积装药条件下温压炸药进行冲击波超压及冲量测试,并进行了数值模拟分析。得到以下结论:

1) 在密闭空间内的冲击波具有很强的反射与聚焦作用,能有效地提高温压炸药的作用时间与冲

量等。

2) 炸药中铝粉质量分数对爆轰参数的影响较大,结果表明铝粉质量分数为 30% 时配方超压与冲量最大。

3) 等体积与等质量两种装药方式下的测试结果表明,在固定战斗部装药体积的情况下,需考虑炸药的装药密度对冲击波参数的影响,温压炸药含铝质量分数略大于 30% 较为适合。

### 参 考 文 献

- [1] Wildegger-Gaissmaier A E. Aspects of thermobaric weaponry[J]. ADF Health, 2003, 4(1):3-6.
- [2] 裴明敬, 胡华权, 张景森, 等. 含铝温压炸药及其爆炸效能研究[J]. 中国工程科学, 2008, 11(4):67-75.  
Pei Mingjing, Hu Huaquan, Zhang Jingsen, et al. Study on efficiency of aluminized thermobaric explosive[J]. Engineering Sciences, 2008, 11(4):67-75.
- [3] 李秀丽. 基于燃烧和爆炸效应的温压药剂相关技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2008.  
Li Xiuli. Study on correlative techniques of thermobaric explosive based on combustion[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2008.
- [4] 阚金玲. 温压炸药的爆炸特性研究[C]//第八届全国爆炸力学学术会议论文集, 2007:47-54.
- [5] 裴明敬, 毛根旺, 张颖, 等. 温压炸药爆炸火球和冲击波传播过程的高速摄影测量[C]//第四届全国爆炸力学实验技术学术会议, 2006:264-272.
- [6] 李芝绒, 王胜强, 殷俊兰. 不同气体环境中温压炸药爆炸特性的试验研究[J]. 火炸药学报, 2013, 36(3):59-61.  
Li Zhirong, Wang Shengqiang, Yin Junlan. Experiment study of blast performance of thermobaric explosive under different gas environment[J]. Chinese Journal of Explosive & Propellants, 2013, 36(3):59-61.
- [7] 金朋刚, 王晓峰, 郭炜, 等. 温压炸药爆炸释热特性研究[J]. 爆破器材, 2014, 43(3):1-4.  
Jin Penggang, Wang Xiaofeng, Guo Wei, et al. Research on the heat release characters of TBX explosion[J]. Explosive Materials. 2014, 43(3):1-4.
- [8] Astbury N F, West H W H, Hodgkinson H R, et al. Gas explosions in load-bearing brick structures [M]. The British Ceramic Research Association, 1970.
- [9] Kingery C N, Schumacher R N, Ewing W O. Internal pressures from explosions in suppressive structures: BRL interim Memorandum Report, NO. 403 [R]. Maryland: Aberdeen Proving Ground, 1975.
- [10] 段卓平, 恽寿榕. 密闭爆炸容器实验研究及数值模拟[J]. 中国安全科学学报, 1994, 4(3):1-7.  
Duan Zhuoping, Yun Shourong. The experimental study and numerical simulating of explosion containment chamber[J]. China Safety Science Journal, 1994, 4(3):1-7.
- [11] 钟方平, 陈春毅, 林俊德, 等. 双层圆柱形爆炸容器弹塑性结构响应的实验研究[J]. 兵工学报, 2000, 21(3):268-271.  
Zhong Fangping, Chen Chunyi, Lin Junde, et al. An experimental study on the elasto-plastic response of double-walled cylindrical explosion containment vessels [J]. Acta Armamentarii, 2000, 21(3):268-271.
- [12] 许铤. 温压装药在有限空间的爆炸特性研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2008.  
Xu Ting. Study of the explosive characteristics of thermobaric charges in a confined space [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2008.
- [13] Wightman J M, Gladish S L. Explosions and blast injuries[J]. Annals of Emergency Medicine, 2001, 37(6):664-678.

## Experimental Study on Shock Wave Parameters of Thermobaric Explosive in Fully Enclosed Space

HAN Zao, WANG Boliang, LI Xi

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

[ABSTRACT] In order to research the shockwave parameters of thermobaric explosive in fully enclosed space, the over-pressure and impulse of thermobaric explosives with different Al content were measured under the same charge volume and charge mass respectively in a double-layer enclosedblast chamber. Furthermore, the numerical simulation of shock wave propagation has been carried out by using the AUTODYN software. Results show that propagation process of shock wave by numerical simulation agreed well with experiments, and the charge with 30% aluminum content (mass fraction) achieves the best performance under both equal volume and equal mass.

[KEY WORDS] thermobaric explosive; shockwave parameters; fully enclosed space; numerical simulation