

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2023.01.006

# 密闭爆发器结构对点火器输出压力测试结果的影响<sup>\*</sup>

王秋宇<sup>①</sup> 刘 丹<sup>②</sup> 唐 琴<sup>①</sup> 窦天全<sup>①</sup>  
①四川蓝狮科技有限公司(四川绵阳,621007)  
②雅化集团绵阳实业有限公司(四川绵阳,621007)

[摘 要] 为研究密闭爆发器对点火器输出峰值压力和达到峰值压力时间的影响,针对特定点火器,设计了 4 种长径比、2 种测点的密闭爆发器,在相同激励条件和测试条件下开展相关研究。结果表明:密闭爆发器长径比和测点的位置对结果具有一定影响。在工程应用上优先推荐长径比 1.0 : 1.0、测点位置在长度方向中点处的密闭爆发器。  
[关键词] 密闭爆发器;点火器;输出压力  
[分类号] TU746.5

## Influence of Closed Bomb Structure on Test Results of Igniter Output Pressure

WANG Qiuyu<sup>①</sup>, LIU Dan<sup>②</sup>, TANG qin<sup>①</sup>, DOU Tianquan<sup>①</sup>  
① Sichuan Lanshi Technology Co., Ltd. (Sichuan Mianyang, 621007)  
② Mianyang Industrial Co., Ltd., Yahua Group (Sichuan Mianyang, 621007)

[ABSTRACT] In order to study the influence of closed bomb on the output peak pressure and the time to reach the peak pressure of the igniter, for a specific igniter, a closed bomb with four length-diameter ratios and two measuring points was designed, and relevant research was carried out under the same excitation conditions and test conditions. The results show that the length-diameter ratio of the closed bomb and the measuring points have certain influence on the results. In engineering application, the closed bomb with the length-diameter ratio of 1.0 : 1.0 and the measuring point in the middle of the length direction is preferred.  
[KEYWORDS] closed bomb; igniter; out put pressure

### 引言

点火器是用于完成预定功能的一次性使用的元器件或装置,是应用数量和种类较多的火工品。在接收发火指令后,以较小能量激发点火器内装敏感药剂,产生燃烧或爆炸,以燃烧火焰、爆炸冲击波、高压燃气等输出方式实现点火、起爆、做功。而该类火工品的性能考核是测试在一定密闭容腔内特定时间段内不同测点的输出压力。

点火器作为点火或做功用火工品,输出峰值压力和达到峰值压力的时间是其重要指标之一。密闭爆发器是常用测试工装。作为输出压力-时间曲线测试中的重要环节,密闭爆发器的容腔形状、密封性等成为测试结果是否准确的关键。在火工品行业,

现无相关标准或规范对该工装结构设计进行规定。

本文中,研究常规点火器发火后在不同结构的密闭爆发器和不同测试点处的压力-时间曲线,获取压力测试工装对压力-时间曲线的影响规律,为压力测试工装的结构尺寸设计提供参考<sup>[1-3]</sup>。

### 1 理论输出压力

对于已知装药量和装药密度的做功元件,可根据诺贝尔-阿贝尔方程推导出在特定密闭爆发器燃烧室总体积下的输出压力<sup>[3]</sup>:

$$\frac{p_m}{\Delta} = f + \alpha p_m; \tag{1}$$

$$p_m = \frac{mf}{V_0 - m\alpha}。 \tag{2}$$

<sup>\*</sup> 收稿日期:2021-06-24  
第一作者:王秋宇(1988 - ),男,工程师,主要从事火工品设计研究。E-mail: 443815517@qq.com  
通信作者:窦天全(1985 - ),男,高工,主要从事火工品设计研究。E-mail: dtqcool@163.com

式中: $p_m$  为输出峰值压力,MPa; $\Delta$  为装填密度,g/cm<sup>3</sup>;  $f$  为火药力,kJ/g; $\alpha$  为余容; $m$  为药量,g; $V_0$  为密闭容积,cm<sup>3</sup>。

若已知火药力、余容、密闭容积及装药量,则可根据式(2)求得理论输出峰值压力。

试验用点火器装药为 B/KNO<sub>3</sub>。采用两级装药:第一级为管壳内压装,药量(150.0±0.5)mg;第二级为∅8 mm×4 mm 药柱,药量(350.0±0.5)mg。总药量为(500.0±1.0)mg。

根据火药力和余容计算公式可以求得  $f$  和  $\alpha$ <sup>[4]</sup>。在密闭容积 5 cm<sup>3</sup> 条件下,代入式(2),得到 0.5 g 装药量下理论输出峰值压力为 20.33 MPa。

## 2 试验及结果分析

工程上,点火器产品在特定密闭爆发器中的输出峰值压力和时间区间作为验收指标。对于某些特定要求的产品,区间往往较窄(数 MPa 以内)。而特定的点火器的输出峰值压力、时间及分散性等参数会因测试所用的密闭爆发器(材料、燃烧腔室体积、长径比、测点位置等)、传感器(分辨率、灵敏度、量程等)及测试系统的不同而有所差异。不合适的密闭爆发器、传感器会对产品的验收造成较大困扰<sup>[2]</sup>。

使用 Kistler™ 6215 型传感器及配套电荷放大器,分辨力、灵敏度等参数满足要求,量程选择 100 MPa。图 1 为使用的密闭爆发器示意图。 $\Phi$  为燃烧腔室直径; $L_1$  为燃烧腔室长度; $L_2$  为测点距离。在给定燃烧腔室体积为 5 cm<sup>3</sup> 前提下,设置 2.0 : 1.0、1.5 : 1.0、1.0 : 1.0 及 0.5 : 1.0 共 4 种长径比,对应组别 I、II、III、IV;设置 2 个位置的测点,1/2 处 A 点和 2/3 处 B 点。每个测点位置对称安装 2 台传感器以消除传感器本身对测试结果的影响。如图 2 所示。

测试系统主要由恒流电源、示波器(2 台)、电荷放大器(4 台)、传感器(4 台)等组成,见图 3。1<sup>#</sup>示波器和 2<sup>#</sup>示波器的 a 通道分别接收样品的电阻、电压信号,b 通道和 c 通道分别接收不同测点的压力信号。

将获得的原始数据通过专业软件进行数据处理,可以获得点火延迟时间 $t_1$ (通电至压力起跳点时间)、达到峰值压力时间 $t_2$ (通电至达到压力峰值时间)、各传感器的峰值压力(测点 A 处的峰值压力  $p_{A1}$  和  $p_{A2}$ 、测点 B 处的峰值压力  $p_{B1}$  和  $p_{B2}$ ) 等结果,

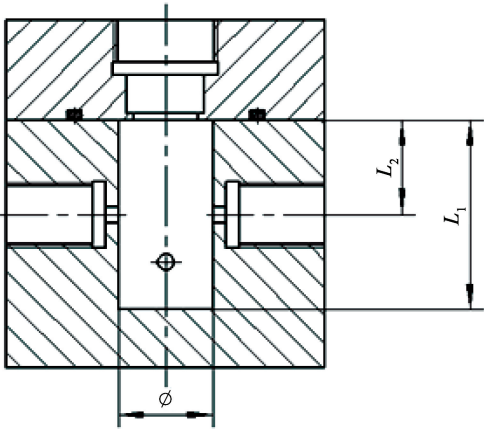
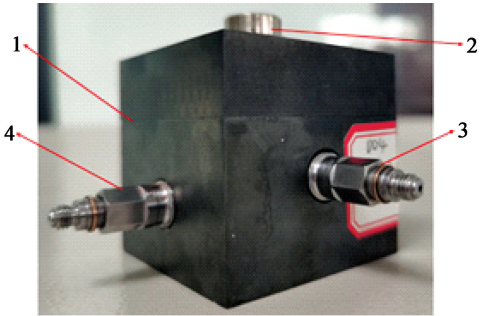


图 1 密闭爆发器示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the closed bomb



1 - 密闭爆发器;2 - 点火器;3 - 1/2 处(A 点)测点传感器;  
4 - 2/3 处(B 点)测点传感器。

图 2 传感器安装示意图

Fig. 2 Installation diagram of the sensor

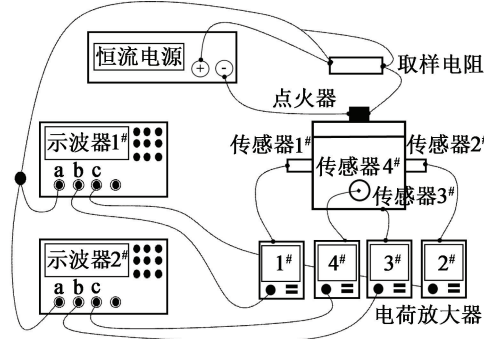


图 3 试验线路示意图

Fig. 3 Schematic diagram of test circuit

如图 4 所示。

峰值压力和达到峰值压力的时间以同一测点两台传感器测试结果的平均值计,每种长径比下分别测试 20 发。峰值压力的测试结果见图 5;达到峰值压力时间的测试结果见图 6。可以看出,长径比由大到小时,A 点测得的平均峰值压力分别为 19.83、19.74、19.63 MPa 和 18.86 MPa;B 点测得的平均峰值压力分别为 18.78、18.62、18.29 MPa 和 17.88

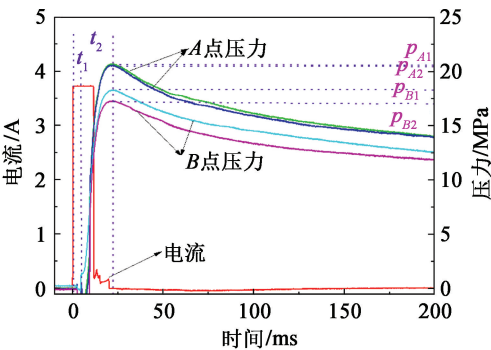


图 4 典型试验结果  
Fig. 4 Typical test results

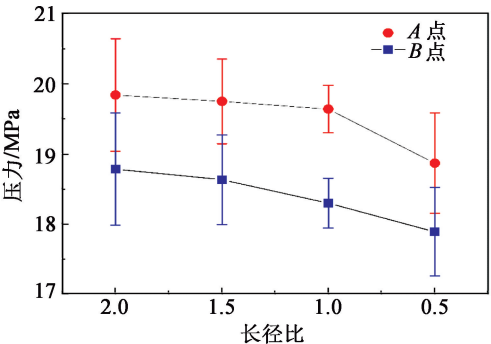


图 5 峰值压力测试结果

Fig. 5 Test results of peak pressure

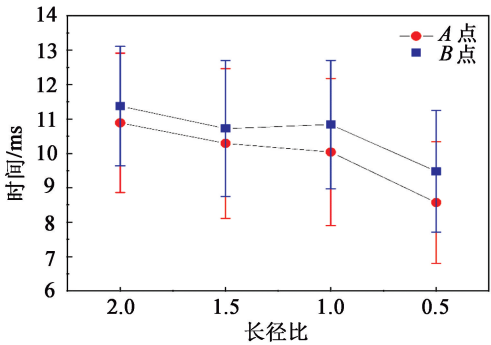


图 6 达到峰值压力时间测试的结果

Fig. 6 Test Results of time to reach peak pressure

MPa;均小于理论值(20.33 MPa),且测点 A 处测得结果更接近理论值。平均峰值压力和达到峰值压力的平均时间均随长径比变小而降低。

根据显著性检验<sup>[5]</sup>,对峰值压力和达到峰值压力时间成组数据平均值进行比较:。

$$t = \frac{\overline{X_1} - \overline{X_2}}{\sqrt{\frac{S_1^2 + S_2^2}{2}}} \sqrt{n_1} \quad (3)$$

式中: $t$  为统计量; $\overline{X_1}$ 、 $\overline{X_2}$  分别为第 1 组和第 2 组参数的算术平均值; $S_1$ 、 $S_2$  分别为第 1 组和第 2 组的标准差; $n_1$  为第 1 组样本量。计算结果见表 1。

假设两组之间无显著性差异的否定域为 $|t| > t_\alpha$ 。根据式(3)分别求出每组两两之间的 $t$ ,然后根

表 1 显著性检验结果

Tab. 1 Significance test results

参数	组别	$t$	$t_\alpha$	检验结果
峰值 压力	I、II	0.401 2	2.021	无显著性变化
	I、III	1.028 9		无显著性变化
	I、IV	4.035 2		显著性变化
	II、III	0.711 3		无显著性变化
	II、IV	4.199 3		显著性变化
	III、IV	4.345 6		显著性变化
达到 峰值 压力 时间	I、II	0.902 8	2.021	无显著性变化
	I、III	1.290 5		无显著性变化
	I、IV	3.857 6		显著性变化
	II、III	0.366 4		无显著性变化
	II、IV	2.742 6		显著性变化
	III、IV	2.367 9		显著性变化

据 $f=2(n_1-1)$ 、 $\alpha=0.05$ ,查表得到 $t_\alpha$ <sup>[6]</sup>。当 $|t| > t_\alpha$ 时,说明两组样本敏感参量发生了显著性变化;反之,则无显著性变化。

从表 1 可以看出,峰值压力和达到峰值压力时间两两显著性检验,仅第 IV 组与其他 3 组有显著性差异,其他 3 组两两检验无显著性差异。

密闭爆发器并不是完全绝热,根据热传导理论,散热面积越大,燃气热量损失越严重,达到的峰值压力越小。长径比越小,燃烧腔室直径越大,散热面积越大,获得的结果就越小。设置的 2.0 : 1.0、1.5 : 1.0 和 1.0 : 1.0 长径比下测得的峰值压力和达到压力峰值时间无显著性变化,即上述 3 种长径比对规定点火器的压力峰值和达到压力峰值时间无显著性影响。长径比 1.0 : 1.0 测得的数据的标准差最小,即数据一致性最好。

考虑到实测数据与理论计算值之间的差异、各长径比测得数据的显著性检验结果和数据的离散性,推荐工程应用中选用 1.0 : 1.0 长径比的密闭爆发器,以保证产品质量一致性检验的稳定可靠。

1/2 处测点获得的结果比 2/3 处测点获得的结果更靠近理论计算值,且数据离散性小;因此,推荐测点位置设在密闭爆发器长度方向的中点。

3 结论

为研究密闭爆发器长径比和测点位置对输出峰值压力和达到峰值压力时间的影响,设置了 4 种长径比、2 种测点的密闭爆发器,针对给定点火器开展相关研究,获得结论如下:

(下转第 43 页)

tiation of insensitive explosives by flyer plate impact [TATB]: SAND-75-0461 [R]. Albuquerque, NM, US: Sandia Labs., 1975.

[14] 夏良洪, 谭柳, 徐森, 等. 粒径对硝酸铵爆炸特性的影响[J]. 爆破器材, 2015, 44(2): 32-35.  
XIA H L, TAN L, XU S, et al. Effects of particle size on the explosibility of ammonium nitrate [J]. Explosive Materials, 2015, 44(2): 32-35.

[15] 黄云川. 乳化炸药爆轰感度性能影响因素研究[J]. 中国新技术新产品, 2021(17): 146-148.

[16] 黄文尧, 颜事龙. 炸药化学与制造[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2009: 120-157.  
HUANG W Y, YAN S L. Explosives chemistry and production [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2009: 120-157.

[17] 赵国玺. 表面活性剂物理化学[M]. 北京: 北京大学出版社, 1984.

[18] 刘哲峰, 李旭祥, 邹忠良. 硝酸铵的结块与防止[J]. 应用化工, 2006, 35(6): 464-466, 473.  
LIU Z F, LI X X, ZOU Z L. Agglomeration and anti-

agglomeration of ammonium nitrate[J]. Applied Chemical Industry, 2006, 35(6): 464-466, 473.

[19] 霍尚义. 硝酸镁对硝酸铵结块性的影响[J]. 甘肃师范大学学报(自然科学版), 1964 (2): 34-47.

[20] 宋元达, 汪旭光. 添加剂对粉状硝酸铵的抗结块性研究[J]. 有色金属, 1993, 45(2): 20-25.  
SONG Y D, WANG X G. Anticaking effect of additives on powdered ammonium nitrate [J]. Nonferrous Metals, 1993, 45(2): 20-25.

[21] 刘东胜. 相稳定硝酸铵相转变影响因素研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2008.

[22] 曾贵玉. 炸药微观结构对性能的影响研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2008.

[23] 蔡敏敏, 陈天云, 黄建祯, 等. 无机盐添加剂对硝酸铵晶变及结块性的影响[J]. 南京理工大学学报(自然科学版), 2000, 24(1): 76-79.  
CAI M M, CHEN T Y, HUANG J Z, et al. Effect of inorganic additives on AN polymorphism and caking[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2000, 24(1): 76-79.



(上接第 36 页)

1)长径比对输出峰值压力和达到峰值压力的时间有一定影响。具体表现为,随着长径比的减小,测得的平均峰值压力和达到峰值压力的平均时间均变小。

2)对于长径比 2.0 : 1.0、1.5 : 1.0 和 1.0 : 1.0 的密闭爆发器,测得的输出峰值压力和达到峰值压力时间无显著性变化。对于长径比 1.0 : 1.0 的密闭爆发器,测得的标准差最小,适合作为产品质量一致性检验用密闭爆发器的长径比。

3)推荐密闭爆发器的测点设置在长度方向的中点处。

参 考 文 献

[1] 夏建才. 火工品制造[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2009.

[2] 王凯民. 火工品工程[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014.

[3] 汪靖程, 李燕华, 温玉全, 等. 典型点火器不同装药量下输出冲击试验与分析[J]. 振动与冲击, 2020, 39(2): 16-21.  
WANG J C, LI Y H, WEN Y Q, et al. Test and analysis

of the output shock under different loading doses of a typical igniter [J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(2): 16-21.

[4] 梁晓爱, 聂建新, 王帅, 等. 密闭爆发器中 Al/KClO<sub>4</sub> 点火器的输出性能研究[J]. 兵工学报, 2017, 38(8): 1513-1519.  
LIANG X A, NIE J X, WANG S, et al. Research on output performance of Al/KClO<sub>4</sub> igniter in closed bomb [J]. Acta Armamentarii, 2017, 38(8): 1513-1519.

[5] 湛赞, 梁晓爱, 严楠, 等. B/KNO<sub>3</sub> 激光点火内弹道仿真研究[J]. 弹箭与制导学报, 2020, 40(1): 141-144, 149.  
ZHAN Z, LIANG X A, YAN N, et al. The interior ballistic simulation of B/KNO<sub>3</sub> by laser ignition[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2020, 40(1): 141-144, 149.

[6] 周奎军, 陈红俊, 叶淑琴, 等. 热通量测量在 B/KNO<sub>3</sub> 点火药装药结构设计中的应用[J]. 兵工学报, 2009, 30(8): 1030-1034.  
ZHOU K J, CHEN H J, YE S Q, et al. The application of thermal flux measurement to design of B/KNO<sub>3</sub> igniting charges [J]. Acta Armamentarii, 2009, 30(8): 1030-1034.