

文章编号: 1001-1455(2001)03-0205-05

# 炸药柱限定性热爆炸实验研究

高大元, 韦力元, 彭 强, 李建军

(中物院化工材料研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 在 Frank-kamenetskii 热平衡方程基础上建立了二个  $\phi 12.7\text{mm} \times 25.4\text{mm}$  炸药柱的限定性热爆炸实验装置、实验条件和实验方法, 用于测定限定性热爆炸临界温度、反应延滞期, 评价限定性热爆炸实验的反应水平。对于 PBX-1 炸药, 限定性热爆炸的临界温度为  $189.5^\circ\text{C}$ , 而  $\Phi 30\text{mm} \times 30\text{mm}$  的炸药柱非限定热爆炸的临界温度为  $197.5^\circ\text{C}$ , 表明在限定性体系中, 由于炸药柱限定在金属铝的反应器里, 热分解产物不易逸出, 热量不易向环境传递, 比非限定性体系易达到热爆炸临界条件, 使热爆炸临界温度降低。此外, 在相同环境温度下, PBX-6 炸药柱的热爆炸延滞期比 PBX-1 炸药柱短, 表明 PBX-6 炸药柱的热感度高, 安全性低。

关键词: 炸药柱; 热爆炸; 临界温度; 延滞期

\* 中图分类号: TQ560.72 文献标识码: A

## 1 引言

热爆炸理论自诞生以来, 经过国内外许多研究者的共同努力, 取得了很大发展。然而, 热爆炸实验总是落后于它的理论研究。这主要是由于热爆炸实验场地要求高, 实验装置难于加工, 实验过程中控温和测温的准确性受到许多因素的影响, 并有一定危险性。但是, 为了确定某些武器的性能指标, 加工具有特殊几何形状的高能炸药, 分析发生自行爆炸事故的原因是否属于热爆炸, 以及为了确定在加工、运输、使用和贮存时的安全条件, 需要进行热爆炸实验研究。

美国用 Henkin 试验, ODTX 试验, Cook-off 试验等方法来综合评价炸药部件和大尺寸药柱的热感度<sup>[1~3]</sup>。80 年代以来, 我们在热爆炸实验方面作了大量工作, 在 Henkin 试验基础上建立了小药量炸药 5s 爆发点和 1ks 热爆炸临界温度测定试验, 在 Frank-kamenetskii 热平衡方程基础上建立了炸药柱非限定性和限定性热爆炸试验, 用于评价炸药的热感度和安全性<sup>[4~7]</sup>。

## 2 限定性热爆炸实验

炸药处在密闭条件下的反应过程与开放系统下的过程存在一些差别。为了有效地比较各种炸药在非限定性和限定性条件下的热爆炸特性, 各国热爆炸研究者都着手建立炸药在限定性条件下的热爆炸实验。80 年代初美国文献报导了限定性条件下测定炸药发生热爆炸反应延滞时间的方法, 称为一维热爆炸延滞期试验 (One Dimensional Time-to-Explosion Test), 简称 ODTX 试验。它是美国用于评价炸药部件安全性的标准方法之一。90 年代初, 我们首先在国内建立了炸药柱限定性热爆炸实验。炸药柱样品的装配见图 1, 采用二个  $\phi 12.7\text{mm} \times 25.4\text{mm}$  药柱, 装入薄壁的铝管中后, 两端加上带密封垫圈绝缘的塞子, 并用螺盖拧紧。

炸药样品的密度要求为理论密度的 95% 以上, 为了方便加工, 用二个小药柱叠接起来。如果能加工成一个完整的规定尺寸的药柱, 则是最理想的, 这将克服每个小药柱之间因接触不好而造成的热传递不均匀现象。

\* 收稿日期: 2000-07-21; 修回日期: 2001-02-08  
基金项目: “九五”国防科技预研项目  
作者简介: 高大元 (1962—), 男, 在读博士, 副研究员。

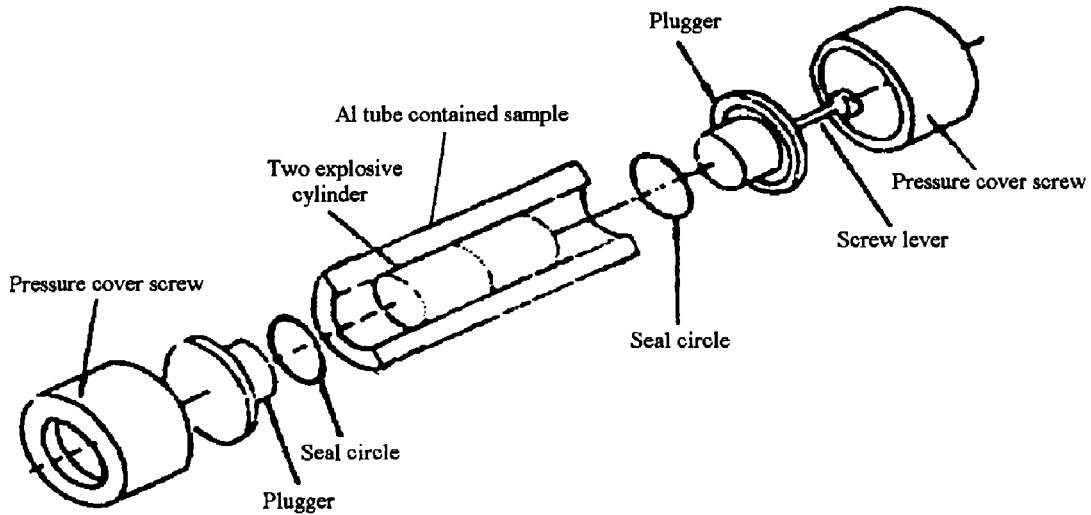


图 1 炸药柱样品的装配

Fig. 1 Assemble sketch of explosive cylinder sample

试验时先将空气浴加热炉恒定在设定的环境温度,然后将装有样品的试样管放入加热炉中,由记录仪记录从样品放入到发生热爆炸反应过程的温度随时间变化情况。根据试样管的损坏程度来判断试验的反应水平,并分为四种类型。

(1) 没有反应:试样管的压盖螺母能无损卸下,没有压力积累。

(2) 中等压力释放:反应缓慢,产生的压力仅仅引起试样管的一端或二端的压盖螺母炸出,试样管没有裂开。

(3) 低级反应:试样管的管壳至少裂开;一端或二端的压盖螺母被炸出,其它金属部件可能成碎片。

(4) 高级爆轰:试样管的金属部件被炸为碎片,没有炸药残留物,加热部件可能被损坏。

### 3 理论分析和实验研究

#### 3.1 理论分析

热爆炸理论研究表明<sup>[8]</sup>,圆柱形药柱的临界点火参数是药柱长径比  $H/r$  的函数,当有限长圆柱的长度半径比大于 7 时,临界点火参数与无限长圆柱的临界点火参数的误差小于 2%。本实验在建立限定性热爆炸实验方法的试样壳装配设计中,  $H/r = 8$ ,而且在药柱两端加上了绝热密封垫圈,使得有限长圆柱两端热绝缘,在理论上可等效于无限长圆柱的热爆炸问题,因此,建立的限定性热爆炸实验也可称为“一维热爆炸延滞期实验”。

炸药柱限定性条件下的点火状态,是一个热平衡态,在两种不同介质的边界上热流相等,边界处温度连续,限定性试样管中沿径向方向温度分布见图 2。热平衡方程的边界条件为 Thomas 边界条件,即从炸药柱中心传递到炸药柱表面的热量等于从炸药柱表面传递到金属壳内壁的热量,以及从金属壳中传递到金属壳外壁的热量等于从金属壳外壁传递到环境中去的热量,因此,壳体的热流平衡方程为

$$k_1 \left( \frac{\partial T}{\partial r} \right)_1 = k_2 \left( \frac{\partial T}{\partial r} \right)_2 = \alpha (T_2 - T_0) \quad (1)$$

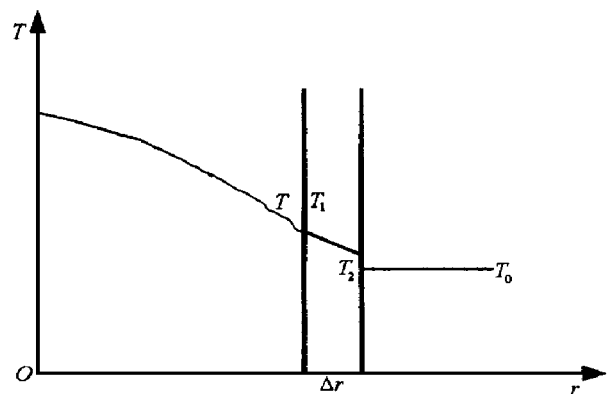


图 2 试样管中温度分布

Fig. 2 Temperature distribution in tube contained sample

式中:  $T$  为试样管体系中的温度;  $T_1$  为金属壳内壁的温度;  $T_2$  为金属壳外壁的温度;  $T_0$  为加热体系的环境温度;  $r$  为试样管体系中的径向坐标;  $k_1$  为炸药的导热系数;  $k_2$  为金属壳的导热系数;  $\alpha$  为金属壳外壁与环境间热量对流的换热系数。

由于试样管的壳体很薄,  $\Delta r$  很小, 且壳体用传热性能好的铝制成, 因此壳体内壁温度  $T_1$  近似等于炸药柱表面温度  $T$ , 做近似:

$$(\partial T / \partial r)_2 \approx (T_1 - T_2) / \Delta r \approx (T - T_2) / \Delta r \quad (2)$$

联立解方程(1)和(2)得

$$T_2 = (k_2 T / \Delta r + \alpha T_0) / (\alpha + k_2 / \Delta r) \quad (3)$$

将式(3)代入方程(1)可得

$$(\partial T / \partial r)_1 = \alpha (T_2 - T_0) / k_1 = \alpha k_2 (T - T_0) / [k_1 \Delta r (\alpha + k_2 / \Delta r)] \quad (4)$$

$$\text{令 } \beta = \alpha / k_1; \beta_{\text{eff}} = \beta (1 + \beta k_1 \Delta r / k_2)^{-1}$$

$$\text{则 } (\partial T / \partial r)_1 = \beta_{\text{eff}} (T - T_0) \quad (5)$$

当金属壳体无限薄时,  $\Delta r \rightarrow 0$ ,  $\beta_{\text{eff}} \rightarrow \beta$ , 为非限定性情况;  $\Delta r \neq 0$  时,  $\beta k_1 \Delta r / k_2 > 0$ 。

$$\text{故 } \beta_{\text{eff}} < \beta \quad (6)$$

理论研究表明,  $\beta$  值较小, 系统的 Frank-kamenetskii 点火临界环境温度较低<sup>[9~10]</sup>。因此, 对于相同的炸药柱样品, 限定性系统点火临界温度较相应的非限定性系统点火临界温度低。

### 3.2 实验研究

限定性热爆炸临界温度  $T_m$  用发生热爆炸的最低环境温度与没有发生热爆炸的最高环境温度的平均值来表示。各种炸药限定性热爆炸实验结果见表1。热爆炸后试样管的损坏程度见图3。PBX-1炸药的5<sup>#</sup>和6<sup>#</sup>样品在设定的环境温度下未发生热爆炸, 试样管的压盖螺母能无损卸下, 没有压力积累。其它样品在设定的环境温度下均发生了热爆炸, 试样管的金属部件被炸为碎片, 没有炸药残留物, 反应水平为高级爆轰。

表1 炸药柱限定性热爆炸实验结果

Table 1 Limited thermal explosion experiment results of explosive cylinder

样品编号	环境温度/°C	时间/s	现象	反应水平	临界温度/°C
PBX-1-1 <sup>#</sup>	214	5340	热爆炸	高级爆轰	
PBX-1-2 <sup>#</sup>	209	4860	热爆炸	高级爆轰	
PBX-1-3 <sup>#</sup>	194	14940	热爆炸	高级爆轰	
PBX-1-4 <sup>#</sup>	192	15420	热爆炸	高级爆轰	189.5
PBX-1-5 <sup>#</sup>	187	36000	不爆	没有反应	
PBX-1-6 <sup>#</sup>	179	36000	不爆	没有反应	
PBX-6-1 <sup>#</sup>	192	8280	热爆炸	高级爆轰	
PBX-6-2 <sup>#</sup>	187	12060	热爆炸	高级爆轰	
PBX-6-3 <sup>#</sup>	184	14400	热爆炸	高级爆轰	

从实验结果可知, PBX-1炸药柱限定性热爆炸的临界温度为189.5°C, 而 $\phi 30\text{mm} \times 30\text{mm}$ 的炸药柱非限定热爆炸的临界温度为197.5°C<sup>[11]</sup>。在限定性体系中, 虽然炸药柱直径减少了17.3mm, 临界温度却降低了8°C, 这表明炸药柱限定在金属铝的试样管里, 热分解气体不易逸出, 热量向环境传递受阻, 这些都会加速炸药柱的热分解, 使限定性体系比非限定性体系易达到热爆炸临界条件。

PBX-1和PBX-6炸药柱限定性热爆炸实验结果表明, 在环境温度为192°C时, PBX-6炸药柱的热爆

炸延滞期为 8280s, 而 PBX-1 炸药柱的热爆炸延滞期为 15420s, PBX-6 炸药柱的热爆炸延滞期短。在环境温度为 187℃ 时, PBX-6 炸药柱的热爆炸延滞期为 12060s, 而 PBX-1 炸药柱经过 10h 仍未发生热爆炸现象。这表明在相同环境温度下, PBX-6 炸药柱的热感度高, 安全性低。

在限定性热爆炸实验中, 当环境温度高于临界温度时, 必然会发生热爆炸现象。延滞期  $t$  与环境温度  $T$  间的关系可用计算一维热爆炸延滞期的方法处理, 近似表示为

$$\ln t = D + C/T \quad (7)$$

式中:  $C$ 、 $D$  为与炸药热物理常数和动力学参数有关的待定系数。将表 1 实验结果代入方程 (7), 可得热爆炸延滞期方程。

对 PBX-1 炸药柱, 延滞期方程为

$$\ln t = -17.64 + 12694/T$$

相关系数  $R = 0.9697$

对 PBX-6 炸药柱, 延滞期方程为

$$\ln t = -22.87 + 14834/T$$

相关系数  $R = 0.9977$ 。

在限定性热爆炸试验中, 还规定了在试验条件下 4h 不发生热爆炸反应的最高温度称为“特征临界温度”, 它是预测装药过程和弹药贮存过程中危险条件最逼真的温度。表 2 列出了 PBX-1 和 PBX-6 炸药热爆炸试验的特征临界温度。

表 2 炸药柱的特征临界温度

Table 2 Characteristic critical temperature for explosive cylinder

炸 药	尺 寸/(mm×mm)	特征临界温度/℃
PBX-1	二个 Φ12.7×25.4	193.5
PBX-6	二个 Φ12.7×25.4	184.0

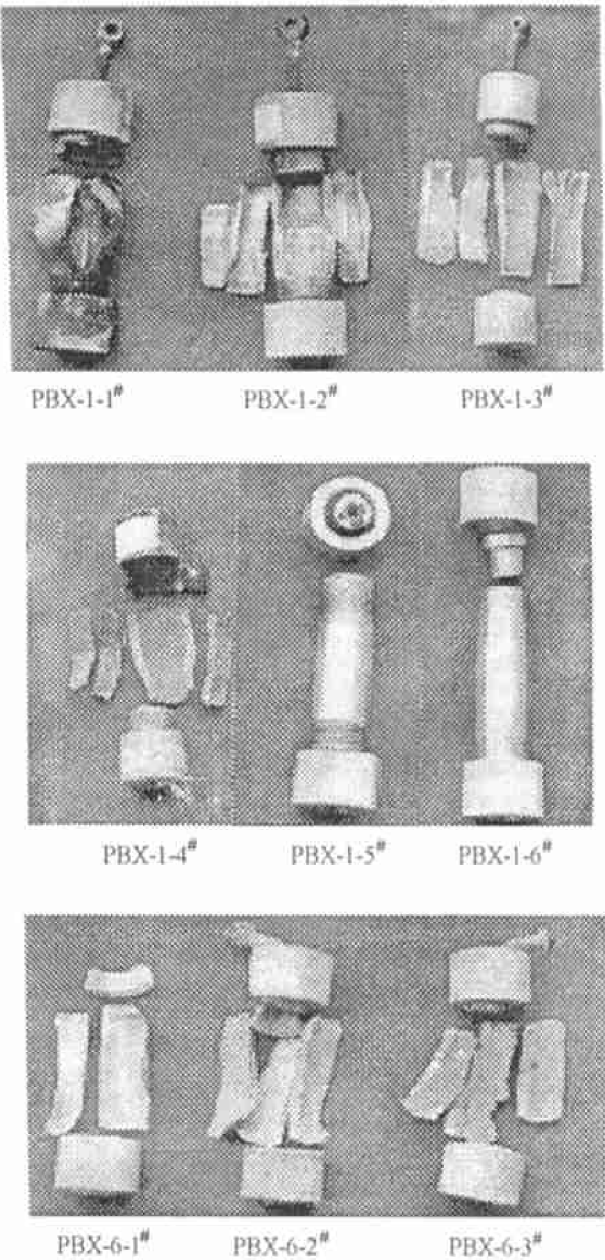


图 3 试样管损坏程度

Fig. 3 Deformation degree of tube contained sample

## 4 结 论

(1) 建立了炸药柱长径比为 8 的限定性热爆炸实验装置、实验条件和实验方法, 用于测定限定性热爆炸临界温度、反应延滞期, 评价限定性热爆炸实验的反应水平。

(2) PBX-1 炸药柱限定性热爆炸的临界温度为 189.5℃, 而  $\phi 30\text{mm} \times 30\text{mm}$  的炸药柱非限定热爆炸的临界温度为 197.5℃。表明在限定性体系中, 炸药柱限定在金属铝的反应器里, 比非限定性体系易达到热爆炸临界条件。

(3) 在相同环境温度下, PBX-6 炸药柱的限定性热爆炸延滞期比 PBX-1 炸药柱短, 表明 PBX-6 炸药柱的热感度高, 安全性低。

(4) PBX-1 和 PBX-6 炸药柱限定性热爆炸试验的特征临界温度分别为 193.5℃ 和 184.0℃。

## 参考文献:

- [1] ROGERS R N. Henkin-to-Explosion for TATB-Part I [R]. USA: MHSMP-77-18H, 1977.
- [2] SEHMITS G T. ODTX Test Program [R]. USA: MHSMP-80-40, 1980.
- [3] SEHMITS G T. Large Scale ODTX Standard Test [R]. USA: MHSMP-82-26, 1982.
- [4] 冯长根. 热爆炸理论 [M]. 北京: 科学出版社, 1988.
- [5] 冯长根. 热点火理论 [M]. 吉林: 科学技术出版社, 1991.
- [6] 楚士晋. 炸药热分析 [M]. 北京: 科学出版社, 1994.
- [7] GJB 772A-97, 热爆炸临界温度测定: 1000s 延滞期法[S].
- [8] 秦承森. 圆柱形药柱热爆炸临界参数的估算[J]. 含能材料, 1994, 2(4): 1—6.
- [9] 秦承森. 热爆炸临界状态的变分特性[J]. 爆炸与冲击, 1991, 11(3): 217—223.
- [10] 秦承森. 用变分法估算热爆炸临界状态参数[J]. 爆炸与冲击, 1992, 12(2): 106—114.
- [11] 高大元, 张孝仪, 韦力元, 等. 炸药柱非限定热爆炸实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2000, 20(3): 253—256.

## Study on Limited Thermal Explosion Experiment for Explosive Cylinder

GAO Da-yuan, WEI Li-yuan, PENG Qiang, LI Jian-jun

*(Institute of Chemical Materials, CAEP, Mianyang 621900, Sichuan, China)*

**Abstract:** We set up two limited thermal explosion test equipment, condition and method of explosive cylinder of  $\Phi 12.7\text{mm} \times 25.4\text{mm}$  on the base of the Frank-kamenetskii heat equilibration formula, to test the critical temperature and reaction delay time of limited thermal explosion, and evaluate its reaction level. For the PBX-1 explosive, its limited thermal-explosion critical temperature is  $189.5^\circ\text{C}$ , and its unlimited thermal-explosion critical temperature of  $\Phi 30\text{mm} \times 30\text{mm}$  explosive cylinder is  $197.5^\circ\text{C}$ . This is showed: in the limited system, the explosive cylinder's thermal decomposition product is not easy to come out and the heat is not easy to convey to environment because they are confined in the AL reactor. It is easier to reach the thermal explosion critical condition than the unlimited system, this decreases the thermal-explosion critical temperature. In addition, PBX-6 explosive cylinder's thermal-explosion delay time is short than the PBX-1 explosive cylinder at the same temperature environment. This is showed that PBX-6 explosive cylinder's heat sensitivity is high and hence its security is low.

**Key words:** explosive cylinder; thermal explosion; critical temperature; delay time