

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2013.05.012

# 不同约束条件下 ANPyO 炸药快烤试验研究\*

程波<sup>①</sup> 李文彬<sup>①</sup> 郑宇<sup>①</sup> 黄寅生<sup>②</sup> 陈伟<sup>①</sup> 刘华宁<sup>①</sup>

①南京理工大学机械工程学院(江苏南京,210094)

②南京理工大学化工学院(江苏南京,210094)

[摘要] 为研究约束条件对单质钝感炸药 ANPyO(2,6-二氨基-3,5-二硝基吡啶-1-氧化物)烤燃弹快烤响应的影响,对5种不同约束强度下的 ANPyO 烤燃弹进行了外部火烧试验研究,并对烤燃弹反应过程中的温度进行了数据采集。结果表明,在外部火烧条件下,ANPyO 烤燃弹药柱中心的温度远低于炸药点火温度;烤燃弹的约束强度必须大于特定条件才能使 ANPyO 点火,且其点火延滞时间与其约束强度成负相关,而最终响应的剧烈程度与约束强度成正相关,但约束强度对点火温度影响很小。

[关键词] ANPyO 炸药 快速烤燃 约束强度 响应 点火

[分类号] TJ510.3 TD235.2+1

## 引言

现代战争对弹药的热安全性要求极高,弹药一旦遇到意外热刺激,就有可能发生点火乃至爆炸等严重事故<sup>[1]</sup>。对弹药进行烤燃试验研究,对提高弹药系统的安全性和环境适应性有重要的意义。

法国的 Kent 等<sup>[2]</sup>于1982年用电热丝对装在钢管中的炸药进行了烤燃试验;国内自90年代开始这方面的研究,如1999年陈启珍等<sup>[3]</sup>对常用炸药进行了烤燃试验研究。近年来,烤燃方面的研究不断深入,从一维到多维<sup>[4]</sup>,从单一升温速率到不同升温速率<sup>[5]</sup>,从不考虑相变到考虑相变<sup>[6]</sup>。纵观国内的研究进展,大多数研究都是针对慢烤进行的,其特征是炸药中心温度高于炸药其它区域和外界的温度,热量从炸药中心向装药的其它区域传递<sup>[7]</sup>;而对于快烤,其特征是在炸药点火之前,外界温度大于炸药内任何一点,热量总是由外界向炸药内部传递<sup>[7]</sup>。实际上在动态平衡过程中,热量也会通过壳体散失到环境中,这方面的研究较少。对于不同约束条件下的快烤研究则更是鲜见,其原因在于快烤过程传热不稳定、传热机制复杂,涉及热传导、对流传热、辐射传热等。智小琦等<sup>[8]</sup>对不同密封条件下钝化 RDX 快速烤燃响应特性进行了试验研究,主要分析了端盖开孔面积对烤燃弹响应的影响,得到了同等密封条件下,当壳体密封条件良好时,快速烤燃中传爆药响应的剧烈程度相应地增强。

2,6-二氨基-3,5-二硝基吡啶-1-氧化物(ANPyO)是一种性能优良的耐热单质炸药,其结构与TATB相似。何志伟等<sup>[9-10]</sup>对ANPyO为基的混合药进行了耐热性能测试,结果表明:以ANPyO为基的炸药有良好的耐热性能,可以在200~250℃条件下使用;此外,还采用重结晶法精制了ANPyO,结果表明其撞击感度和摩擦感度分别为20%和18%。由此可见,ANPyO具有良好的热安定性和机械感度。然而ANPyO在快烤作用下的响应特性仍是未知的。为此,笔者对ANPyO烤燃弹进行了外部火烧试验。主要研究了烤燃弹壳体的约束强度对弹的响应特性的影响,以及此过程中温度的变化规律。

## 1 试验

### 1.1 试验设计与样品参数

试验设计参照北约不敏感弹药试验标准,其主要要求有:火焰持续时间应该是所有爆炸物反应所需时间的1.5倍;战斗部应被包围在火焰的外焰中。

试验用的样品为22.9g ANPyO,按药柱成型工艺制成直径为(30.0±0.1)mm、高为(20.0±0.1)mm、密度为(1.62±0.02)g/cm<sup>3</sup>的药柱。药柱间密度级差≤0.04g/cm<sup>3</sup>。外部火烧试验场景见图1。

### 1.2 壳体约束条件

壳体由两部分组成:圆柱部和端盖。圆柱部长120mm,内孔直径30mm,厚3mm。端盖上开有热电偶插孔,两者采用了两种联接,一为非螺纹联接;一

\* 收稿日期:2013-05-31

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51278250)

作者简介:程波(1986~),男,硕士,主要从事冲击动力学研究。E-mail:chengbo267@gmail.com

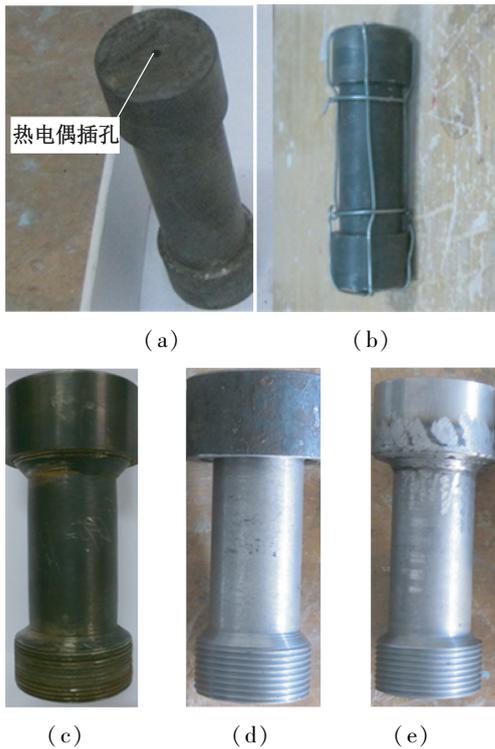
通信作者:李文彬(1965~),男,教授,主要从事爆炸力学的研究。E-mail:lwb2000cn@mail.njust.edu.cn



图 1 试验场景

Fig. 1 View of experiment

端用过盈配合,一端用过渡配合;另一种为螺纹联接,而螺纹联接又分为细螺纹联接和粗螺纹联接,其中细螺纹的螺距为 1.75mm,粗螺纹为 2.50mm。在两种联接之外,为了得到更多的约束强度等级,又对烤燃弹采取了轴向钢丝加强和焊接加强。共得到 5 种约束方案,见图 2:弹 1 为一端过盈配合,一端过渡配合;弹 2 为弹 1 的基础上加轴向钢丝约束;弹 3 为两端细螺纹联接;弹 4 为两端粗螺纹联接;弹 5 为一端粗螺纹联接,一端焊接。



(a) 弹 1; (b) 弹 2; (c) 弹 3; (d) 弹 4; (e) 弹 5

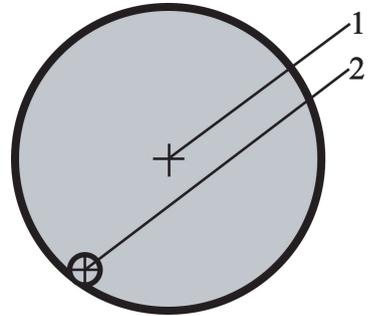
图 2 各弹的约束条件

Fig. 2 Constraint conditions of warheads

### 1.3 温度数据采集

在试验过程中,用热电偶对烤燃弹内部的温度数据进行采集,以视频中整个液面燃烧时刻为时间起点。壳体的圆柱部分厚为 3mm,药柱与壳体间的

间隙约为 0.5mm,故忽略药柱与壳体之间的接触热阻,近似认为药柱外圆的温度等于壳体温度。热电偶的布置如图 3 所示,为了在药柱外圆处放置热电偶,需将炸药挖掉一小部分,图中黑圈所示。



1 - 中心测温点; 2 - 外圆测温点

图 3 测温点示意图

Fig. 3 Sketch map of temperature measuring points

## 2 试验结果与讨论

由热电偶测得火焰的温度在 850℃ 左右波动。如图 1 所示,战斗部完全包含在液体火焰的外焰中,所以试验有效。

### 2.1 温度结果

热电偶测得药柱中心和药柱外圆的温度数据分别见图 4 和图 5。

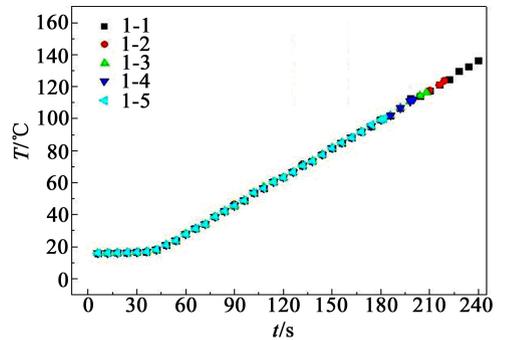


图 4 1 号测温点温度—时间曲线

Fig. 4 Relation of temperature and time for temperature measuring point 1

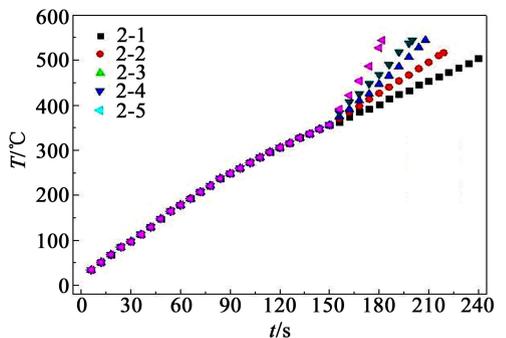


图 5 2 号测温点温度—时间曲线

Fig. 5 Relation of temperature and time for temperature measuring point 2

如图4所示,各弹的药柱中心在约40s时温度开始明显上升,并且都成直线趋势,各个弹的升温路径基本吻合。根据炸药热爆炸理论,药柱的热反应及热传导遵循 Frank-Kaminetskii 方程<sup>[11]</sup>:

$$c_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \nabla^2 T + Q \frac{\partial \Lambda}{\partial t} \quad (1)$$

式中: $c_p$ 为炸药的定压比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ;  $\rho$ 为炸药的密度, $\text{g}/\text{cm}^3$ ;  $T$ 为炸药的瞬时温度, $\text{K}$ ;  $\lambda$ 为炸药的热传导系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ;  $Q$ 为炸药化学反应释放热量, $\text{J}$ ;  $\nabla^2$ 为拉普拉多算子; $\Lambda$ 为已反应炸药的百分比; $t$ 为时间, $\text{s}$ 。上式的物理含义为:左边是单位体积炸药在单位时间内升高温度所要求的热量,右边第一项为由热传流入或流出的热量,第二项为单位体积内、单位时间内炸药热分解释放的能量。由于直至发生反应,药柱中心的温度都没有达到 ANPyO 的快速热分解点(由图5知约为 $350^\circ\text{C}$ ),所以式(1)中,右边第二项贡献很小,药柱中心升温的热量基本上都是来自于热传导项。

如图5所示,药柱外圆在快速热分解点之前,升温趋势也近似成直线,但其升温速率比中心点要大很多,均在约150s时就达到快速热分解点。约束较强的3、4、5号弹分别在约210s、200s、180s时达到 ANPyO 的点火温度(从图5知约为 $550^\circ\text{C}$ ),且三者的点火温度只有 $10^\circ\text{C}$ 的波动;而约束较弱的1、2号弹分别在240s和220s冲开端盖,且都未达到点火温度,这是因为当其热分解产生的压力达到某一特定值时,就能够推动端盖移动从而泄压,使反应中止。由于各弹的约束强度不同,相应的延滞时间也各不相同,表现为与约束强度成负相关。

## 2.2 烤燃弹响应结果

各弹的反应状态见表1。从表1可见,当采用非螺纹联接时,反应的等级为快速热分解;而采用螺纹联接时,反应就升级到燃烧或爆燃,而且在同等联接水平内,随着其它约束的加强,如加钢丝、焊接等,响应的剧烈程度增加。由此可见,当装药结构不变,圆柱部壳体厚度相同时,随着战斗部壳体约束强度的增加,ANPyO 炸药的快速烤燃响应从热分解升级为燃烧或爆燃。图6为不同约束强度时烤燃弹的响应状态图。

在外部火烧的作用下,烤燃弹壳体将热量通过热传导的方式传递给药柱外圆,外圆迅速升温。在热作用下,炸药反应速率服从阿累尼乌斯定律,相应的炸药内部温度将呈指数上升,同时部分炸药热分解产生的热量将通过壳体散失到环境中,因此热流失是一个线性过程,其服从牛顿冷却定律。在此期

表1 不同约束条件下烤燃试验  
Tab. 1 Fast Cook-off results for different constraint conditions

弹号	延滞时间 /s	反应状态	试验结果
1	240	快速热分解	端盖冲开,残留大块,壳体无变形
2	220	快速热分解	钢丝拉断,冲开端盖,残留小药块,壳体无变形
3	210	燃烧	螺纹剪切失效,残留药粉,有燃烧痕迹
4	200	爆燃	壳体炸开,无破片
5	180	爆燃	壳体炸开,无破片



(a)弹1;(b)弹2;(c)弹3及其喷出药粉;  
(d)弹4;(e)弹5

图6 各弹的快速烤燃响应状态

Fig. 6 Response state of warheads in fast Cook-off test

间,壳体内积聚了大量的气体产物,形成了高压区,则烤燃弹必然以破坏的形式达到新的平衡。当反应速度较慢时,压力值逐渐增长到约束强度,则烤燃弹以热分解、燃烧或爆燃等反应形式冲破约束,迅速泄压,使反应中止。当反应速度很快时,迅速建立的高压远远超过整个弹体的极限强度,爆炸或爆轰就成了烤燃弹的响应形式。

综上所述,烤燃弹壳体的约束条件,包括联接强度和壳体强度是影响 ANPyO 快速烤燃条件下响应特性的重要因素。在同等条件下,壳体的约束条件直接影响 ANPyO 快烤响应的剧烈程度。从反应结果来看,ANPyO 在壳体内 $400 \sim 550^\circ\text{C}$ 温度下反应速

率不高,可以说是较钝感的。

### 3 结论

1) 在外部火烧试验中,ANPyO 烤燃弹的药柱中心近似成直线升温规律,药柱外圆在快速热分解前也近似直线升温。药柱中心的温度远低于炸药点火温度,引发其温升的热量大部分来自热传导。

2) 烤燃弹的约束强度必须大于某一阈值才能使装药点火,其点火延滞时间与其约束强度成负相关,而最终响应的剧烈程度与约束强度成正相关,但约束强度对装药点火温度影响很小。

3) ANPyO 在快烤试验中表现较钝感。

### 参 考 文 献

- [1] 张蕊,冯长根,陈朗. 弹药的热烤(cook-off)实验[J]. 火工品,2002(4):37-39.  
Zhang Rui, Feng Changgen, Chen Lang. Cook-off test of ammunition[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2002(4):37-39.
- [2] Kent R, Rat M. Explosion thermique (cook off) des propergols solides[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 1982,7(5):129-135.
- [3] 陈启珍,王培. JOB-9003 炸药烤燃试验性能研究[D]. 绵阳:中国工程物理研究院化工材料研究所,1999.
- [4] 冯长根,张蕊,陈朗. RDX 炸药热烤(Cook-off)实验及数值模拟[J]. 含能材料,2004,12(4):193-198.  
Feng Changgen, Zhang rui, Chen Lang. The Cook-off test and its numerical simulation of RDX[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2004, 12(4):193-198.
- [5] 代晓淦,黄毅民,吕子剑,等. 不同升温速率热作用下 PBX-2 炸药的响应规律[J]. 含能材料,2010,18(3):282-285.  
Dai Xiaogan, Huang Yimin, Lü Zijian, et al. Reaction behavior for PBX-2 explosive at different heating rate[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2010, 18(3):282-285.
- [6] 陈朗,王沛,冯长根. 考虑相变的炸药烤燃数值模拟计算[J]. 含能材料,2009,17(5):568-573.  
Chen Lang, Wang Pei, Feng Changgen. Numerical simulation of Cook-off about phase transition of explosive[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2009, 17(5):568-573.
- [7] 陈朗,马欣,黄毅民,等. 炸药多点测温烤燃实验和数值模拟[J]. 兵工学报,2011,32(10):1230-1236.  
Chen Lang, Ma Xin, Huang Yimin, et al. Multi-point temperature measuring Cook-off test and numerical simulation of explosive [J]. Acta Armamentarii, 2011, 32(10):1230-1236.
- [8] 智小琦,胡双启,肖志华,等. 密封条件对钝化 RDX 快速烤燃响应特性的影响[J]. 火炸药学报,2010,33(1):31-33,37.  
Zhi Xiaochi, Hu Shuangqi, Xiao Zhihua, et al. Effect of sealing conditions on fast Cook-off response properties of passive RDX[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2010, 33(1):31-33,37.
- [9] 何志伟,刘祖亮. 2,6-二氨基-3,5-二硝基吡啶-1-氧化物为基的耐热混合炸药性能[J]. 含能材料,2010,18(1):97-101.  
He Zhiwei, Liu Zuliang. Performance of 2,6-diamino-3,5-dinitropyridine-1-oxide-based heat-resistance composite explosives [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2010, 18(1):97-101.
- [10] 何志伟,成健,刘祖亮. 2,6-二氨基-3,5-二硝基吡啶-1-氧化物的精制及其性能研究[J]. 含能材料,2009,17(4):392-395.  
He Zhiwei, Cheng Jian, Liu Zuliang. Refining and properties of 2,6-diamino-3,5-dinitropyridine-1-oxide[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2009, 17(4):392-395.
- [11] 章冠人,陈大年. 凝聚炸药起爆动力学[M]. 北京:国防工业出版社,1991:64-69.

## Study on ANPyO Explosive in Fast Cook-off Test under Different Constraint Conditions

CHENG Bo<sup>①</sup>, LI Wenbin<sup>①</sup>, ZHENG Yu<sup>①</sup>, HUANG Yinsheng<sup>②</sup>, CHEN Wei<sup>①</sup>, LIU Hua'ning<sup>①</sup>

<sup>①</sup>School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology (Jiangsu Nanjing ,210094)

<sup>②</sup>School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology (Jiangsu Nanjing ,210094)

[ABSTRACT] In order to investigate the fast Cook-off response of an elementary insensitive explosive ANPyO (2,6-diamino-3,5-dinitropyridine-1-oxide) warhead under constraint conditions, external burning experiments were performed on five warheads with different constraint conditions, with the varied temperature data in the warhead collected. The results show that under external burning condition the temperature of explosive close to cylinder center of ANPyO warhead is far below the ignition temperature. The charge can not be ignited unless the constraint conditions exceed specified qualification. The constraint conditions have positive and a negative correlation to the delay time and response level, respectively. The constraint intensity, however, exerts little influence on the ignition temperature.

[KEY WORDS] ANPyO explosive, fast cook-off, constraint conditions, response, ignition