

文章编号: 1003-1480 ( 2006 ) 03-0039-03

# 高速摄影法研究铅芯延期体的燃烧特性

马志钢<sup>1</sup>, 王瑾<sup>1</sup>, 葛雷<sup>2</sup>, 吴伟<sup>1</sup>

( 1. 安徽理工大学化工系, 安徽 淮南, 232001; 2. 中国兵器工业第 213 研究所, 陕西 西安, 710061 )

**摘 要:** 用高速摄影仪对卡在透明塑料管中的铅芯延期体从点火到喷火的过程进行了拍摄。图像显示, 在铅芯延期体点火端有一段延期药与点火药头一起在很短的时间内完成燃烧过程; 在铅芯延期体喷火端有一段延期药被喷出, 铅芯延期体未起延期作用。将燃烧后的铅芯延期体沿药芯切开, 显微镜下观察残渣, 发现有的残渣呈层状龟裂。根据结果, 对这些影响铅芯延期精度的因素进行了分析。

**关键词:** 铅芯延期体; 延期精度; 燃烧特性; 层状龟裂

中图分类号: TJ453

文献标识码: A

## Study on the Burning Characteristic of Delay Element with Lead Tube by High Speed Photography

MA Zhi-gang<sup>1</sup>, WANG Jin<sup>1</sup>, GE Lei<sup>2</sup>, WU Wei<sup>1</sup>

( 1. Chemical Engineering Department, Anhui University of Science and Technology, Huainan, 232001; 2. The 213th Research Institute of China Ordnance Industry, Xi'an, 710061 )

**Abstract :** The process from being ignited to spurting flames out of a lead delay element mounted in the transparent plastic tube was photographed by high speed video camera. The image showed that the delay composition at ignition end was instantaneously burned together with the match head. A length of delay composition at terminal end was erupted and had no delay function. The lead delay element after deflagration was split with a knife, and observed by a microscope, the residue in layer form was found somewhere in the longitudinal direction. Based on the result, this paper analyzes the factors affecting the accuracy of delay time for lead delay element.

**Key words :** Lead tube delay element; Delay accuracy; Burning characteristic; Layer chap

目前有关雷管延期精度影响因素的研究工作已取得了不少成果, 在一定程度上提高了雷管的延期精度, 但未见有关铅芯延期体燃烧方面的研究报道。本文采用高速摄影仪对卡在透明塑料管中的铅芯延期体从点火到喷火的状况进行了拍摄。将燃烧后的铅芯延期体沿药芯切开, 显微镜下观察残渣、点火端和喷火端, 发现一些可能影响铅芯延期体延期精度的因素。

## 1 实验

把切长 10mm 3 段 ( 名义延期时间 (  $50 \pm 12.5$  ) ms ) 毫秒铅芯延期体 ( 3 芯 ) 和点火药头装入内径略小于铅芯延期体外径的透明塑料管内 ( 气室长度 7mm ), 用铁丝拧紧固定。在电起爆器点燃药头的同时用 FASTCAM-SUPER 10KC 型高速摄影机 ( 1 000

收稿日期: 2005-12-14

作者简介: 马志钢 ( 1961- ), 男, 副教授, 从事爆破器材专业教学与研究工作。

帧/s)拍摄从药头点火到铅芯延期体喷火的整个过程。将铅芯延期体沿药芯切开,显微镜下观察残渣、点火端和喷火端状况。共实验3发,实验装置见图1。

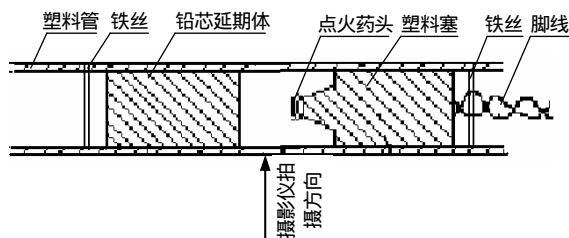


图1 实验装置示意图

Fig.1 Sketch of experimental instrument

## 2 分析

### 2.1 喷火端状况

从点火药头点火到铅芯延期体喷火结束历时40~47ms。第1发点火后31ms的图像见图2。

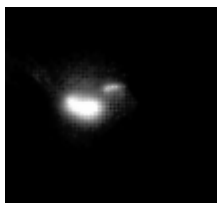


图2 燃烧的药芯被喷出延期体(第31ms)

Fig.2 Burning Drug being spurted out of the delay element

图2显示长度约为药芯直径3~4倍的燃烧的延期药柱从铅芯延期体喷火端喷出(喷出的药柱直径与药芯直径相仿,在空中飞行过程中形状稳定,故认为是药柱),这段延期药的部分燃烧过程在延期体外进行,图3为铅芯延期体喷火端的图像。

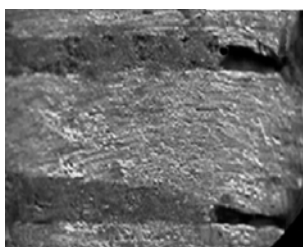


图3 铅芯喷火端(右端)

Fig.3 Spurting end of lead element(right end)

图3中铅芯右端空腔即药柱喷出后留下的,由此可见延期药未能起到延期作用。另外,有的铅芯延期体只喷出火焰没有喷出药柱。铅芯在第40ms时第2

次喷火,喷火持续时间为7ms。在第1次喷火后几毫秒内,起爆药应已被引爆,第2次喷火直接面对雷管外围环境,这也许是毫秒雷管引燃瓦斯的一个原因。

### 2.2 残渣状况

用刀将燃烧后的铅芯延期体沿药芯切开,用显微镜观察燃烧后铅芯,发现残渣有时呈层状龟裂,见图4,是典型的脉动燃烧,龟裂厚度与龟裂宽度有时不均匀。有些铅芯延期体和一些铅芯的部分长度不存在龟裂。另外还发现,有的地方残渣较为致密,有的则较为疏松,这表明延期体内燃烧状况不稳定。另外发现有些药芯呈Si-Pb<sub>3</sub>O<sub>4</sub>延期药颜色(红色),这表明有些药芯未被点燃或燃烧中断。

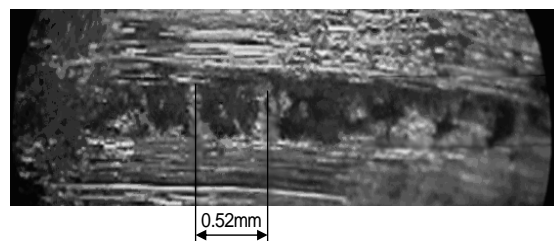
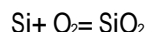
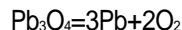


图4 残渣龟裂痕迹(放大38倍)

Fig.4 Image of layer crazing residue(×38)

当Si-Pb<sub>3</sub>O<sub>4</sub>延期药受到高温热源的加热时,温度急剧上升。铅丹分解及铅丹与硅燃烧反应可表示如下<sup>[1]</sup>:



有资料表明,在DTA实验中, Si在空气中加热时, 700℃以下无反应; Pb<sub>3</sub>O<sub>4</sub>加热到570℃时开始分解; Si和Pb<sub>3</sub>O<sub>4</sub>混合物分别在300℃, 520℃, 625℃有3个放热峰,第1个峰值出现在300℃,此温度低于Pb<sub>3</sub>O<sub>4</sub>的分解温度和Si的发火点。由于DTA反应是在N<sub>2</sub>中进行的,无氧气参与作用,故这种反应属固相反应。520℃是该延期药的发火点,625℃才是主反应阶段。这时氧化剂分解,分解出来的氧包围了可燃剂,反应按气-固相进行,反应速度比固-固相快得多<sup>[2]</sup>。

对延期体喷出的以及附在铅芯内壁上的残渣进行微观观察,发现许多大小不一的亮白色圆金属颗粒(0.1~0.5mm)。把这些颗粒放在玻璃上用螺丝刀用力按之不变形,表明硬度很高,应该是硅颗粒。这是由未燃烧完全的硅颗粒在燃烧或残渣喷出过程中相互聚集而成。

龟裂的产生与铅丹热分解有关。铅丹分解时放出大量的氧气形成高压气体(量级10MPa)和压力波。延期药燃烧时的气体压力波透过药层,先行于燃烧波,其速度是燃烧传播速度的10倍以上<sup>[1]</sup>。当紧靠燃烧波的这一层延期药温度升到520℃时,铅丹分解,放出大量氧气,产生高压,将这一薄层的延期药向后(与燃烧传播方向相反)推动。随之达到温度为625℃的主反应阶段。使“其整体移动”,产生“层状龟裂”,见图5。因为燃烧波前的温度梯度很大,所以此时只有这一薄层的延期药龟裂。在燃烧波阵面燃烧速度、燃烧压力、化学反应速度都是脉动的,称之为“脉动燃烧”。从整个铅芯延期体来看,如果龟裂厚度和龟裂宽度均匀,燃烧就是稳定的。

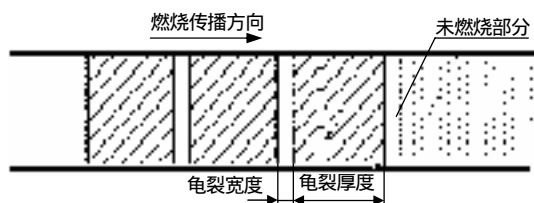


图 5 延期药层状龟裂示意图

Fig.5 Sketch of layer crazing of delay composition

### 2.3 点火端状况

若龟裂层的厚度和间距愈大,即振幅愈大,燃烧和燃烧波的传播就愈不容易稳定,延时精度就愈差。图6为铅芯点火端的图像。

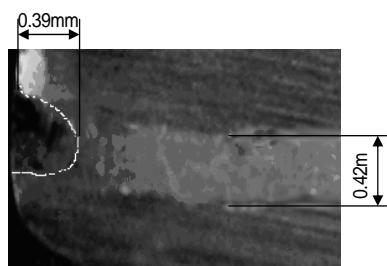


图 6 铅芯点火端(左端)

Fig.6 Igniting end of lead element (left end)

由图6可见,在铅芯延期体点火端有一空穴。这部分延期药在点火药头燃烧所产生的高温高压气体和冲击波的作用下,与点火药头同时燃烧,在一定程度上没有起到延期作用。在实验中有两次点火药头处塑料管被炸破,爆炸声也很大,可见点火药头燃烧时气体压力有时很大。因为延期药燃烧速度受压力影响较大,因此如

果这个压力因点火药头个体差异而相差较大,雷管延期药精度就会受影响。所以在保证药头对铅芯延期药点火可靠性的基础上,适当减小点火药头燃烧压力<sup>[3]</sup>,如采用点火药来点燃延期药<sup>[4]</sup>,将有助于提高延期药的燃烧稳定性,提高延期精度。

## 3 结论

(1) 延期药残渣呈层状龟裂表明,铅芯延期体中延期药的燃烧传播过程有时呈层状。延期药残渣呈层状龟裂和连续致密状两种状况表明,铅芯延期体内延期药的燃烧状况不稳定。

在铅芯延期体点火端有一小段延期药几乎随着药头同时点燃。在铅芯延期体喷火端有一段延期药被喷出铅芯延期体,相当一部分燃烧过程是在铅芯延期体外进行的。这种情况在不同的铅芯延期体中表现程度不一。当药芯长度较短时(一般毫秒延期雷管的延期药芯长度都短于10mm),这种情况对秒量精度会有一定的影响。

减小点火药头和延期药气体发生量,有利于减小气体压力对燃烧稳定性的影响。

铅芯喷火时间有时长达7ms,有时还会有第2次喷火,这也许是铅芯延期雷管引燃沼气的的一个原因。

如能测试延期药在燃烧过程中的压力和温度变化情况,对沼气的引燃情况进行实验,将有助于进一步揭示铅芯延期体燃烧机理,更多地了解影响铅芯延期雷管沼气安全性的因素。

### 参考文献:

- [1] 《煤矿火工技术丛书》编写组. 矿用起爆器材[M], 1978.
- [2] 蔡瑞娇. 火工品设计原理[M]. 北京理工大学出版社, 1999.
- [3] 杨祖一. 毫秒延期雷管(三)[J]. 爆破器材, 2000, 29(1): 21~26.
- [4] 陈继业. 引信延期雷管分析[J]. 火工品, 1996, (3):36~39.