

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2013.02.011

# 热电偶法测量硅系延期药燃烧温度的研究<sup>\*</sup>

宋薇娜

新疆雪峰科技(集团)股份有限公司(新疆乌鲁木齐,830002)

[摘 要] 采用 R 型铂铑合金热电偶的方法测量硅系延期药的燃烧温度,模拟单芯延期体的燃烧状况,将延期药以 2.40 g/cm<sup>3</sup> 的压药密度,分次均匀压入厚壁钢管中。在热量积累最多的区域内,实验测得硅系延期药的最高燃烧温度为 1583℃。燃烧热有很大部分传递给外壳等物质而散失掉,35ms 后测出的温度较低。

[关键词] 热电偶 硅系延期药 燃烧温度 燃烧状态

[分类号] TJ45<sup>+</sup>5 TH811

## 引言

延期药是指以氧化剂和还原剂为基药,添加有少量燃速调整剂及其它添加物的、具有稳定燃速的火工药剂<sup>[1]</sup>。其中,硅系延期药由于燃烧速度快、作用稳定、价格低廉而广泛应用于毫秒延期雷管中<sup>[2]</sup>。关于延期药燃烧温度的测定,有直接接触测温法,如文献[3-4]中使用热电偶方法;有间接测量法,如文献[5]中使用红外测温仪测量延期药燃烧温度;文献[6]中使用改进型钠谱翻转法和原子发射光谱双谱线法。

本研究采用自制贵金属热电偶,模拟单芯延期体的作用形式,研究测量硅系延期药燃烧温度的方法。研究结果为测量延期药剂燃烧性能提供一种新的参考,有助于完善硅系延期药的燃烧理论,提高延期雷管的精度。

### 1 实验系统

本实验系统由两大部分组成。实验样品:用于模拟单芯延期体的钢管、硅系延期药;测温系统:贵金属热电偶、电荷放大器、起爆器及用于固定实验系统的实验平台。

#### 1.1 测温系统

##### 1.1.1 热电偶及选型依据

热电偶是指以热电效应理论为基础的测量温度的传感器,其测试原理如图 1。将两种不同金属导体的两端焊接在一起,与电荷放大器组成一个完整的闭合回路,当两焊接点温度与室温产生温差时,在两种导体组成的热电偶回路中就会产生电动势和热电流;两个接点,一个作为工作端或称为热端( $T_1$ ),另一个作为自由端或称为冷端( $T_0$ )。回路中产生

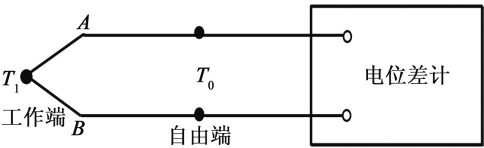


图 1 热电偶测试原理图

Fig. 1 Principle chart for the measurement of the thermocouple

的电动势称为热电势,由接触电势和温差电势组成,主要以接触电势为主。使用测量仪表配合热电偶,测出其回路中的热电动势,即可得到被测对象的温度。

实验中选取高响应频率、高温适用型贵金属热电偶,如铂铑合金型。根据偶丝成分及适用范围分为 3 种类型,如表 1 所示。

表 1 高温适用型贵金属热电偶

Tab. 1 Precious metal thermocouple used in high-temperature situation

性质	S 型热电偶	R 型热电偶	B 型热电偶
正极	铂铑合金 ( 铑 10% )	铂铑合金 ( 铑 13% )	铂铑合金 ( 铑 30% )
负极	纯铂	纯铂	铂铑合金 ( 铑 6% )
长期最高使用温度/℃	1300	1300	1600
短期最高使用温度/℃	1600	1600	1800

R 型热电偶电动势较大,抗氧化性能更好,较 S 型使用温度高,使用寿命更长,较 B 型热电偶灵敏

<sup>\*</sup> 收稿日期:2012-11-28  
作者简介:宋薇娜(1978.7~),女,硕士,工程师,主要从事民爆器材产品的研发和检测工作。E-mail:SWN246@163.com

度高。因此综合考虑,本次实验选取 R 型热电偶。采用氩弧焊将正负极偶丝一端焊在一起,应尽量使正负极偶丝接触良好,以降低测量误差。

### 1.1.2 电荷放大器

实验选取 YE5853A 型多通道电荷放大器,电荷灵敏度为  $0.01 \sim 1000 \text{ mV/pC}$ , 频率范围为  $1 \text{ Hz} \sim 200 \text{ kHz}$ , 输入最大电荷量  $\pm 105 \text{ pC}$ , 输出  $\pm 10 \text{ V}$ 、 $5 \text{ mA}$ , 精度误差  $\pm 1.5\%$ , 噪声  $\leq 5 \mu\text{V}$ 。

## 1.2 实验样品

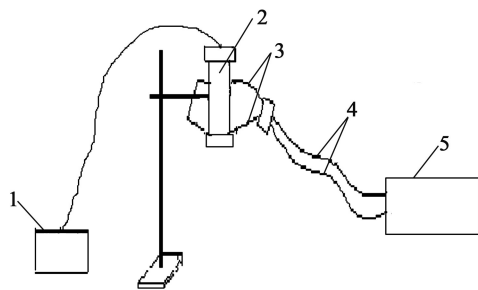
本实验选取硅系延期药为实验药剂,用厚壁钢管模拟单芯延期体,钢管的尺寸为:外径  $\varnothing 13 \text{ mm}$ , 内径  $\varnothing 3 \text{ mm}$ , 长  $40 \text{ mm}$ , 侧面中间位置有一对  $\varnothing 1 \text{ mm}$  的通路,用于置入热电偶丝。

采用分段压制法装药<sup>[7]</sup>,分 4 次压入药剂,控制每次压药密度均为  $2.40 \text{ g/cm}^3$ 。压制完成后总药高  $36 \text{ mm}$ , 总装药量  $610 \text{ mg}$ 。

## 2 实验步骤

1) 用专用钢针将压制好的实验样品在侧面通孔处穿透,将热电偶埋入延期样品,并保证热电偶两极焊接处位于延期药柱的中央位置;

2) 设置存储记录仪的参数,接入补偿导线,将实验样品固定在实验平台上,此时系统示意图如图 2;



1 - 发爆器; 2 - 样品; 3 - 热电偶;  
4 - 补偿导线; 5 - 存储设备

图 2 延期药燃烧温度测试系统

Fig. 2 Temperature test system of delay composition

3) 用电容式充电发爆器接点火铜丝,以脉冲电火花的能量形式从一端引燃延期药;

4) 存储数据,进行数据分析;

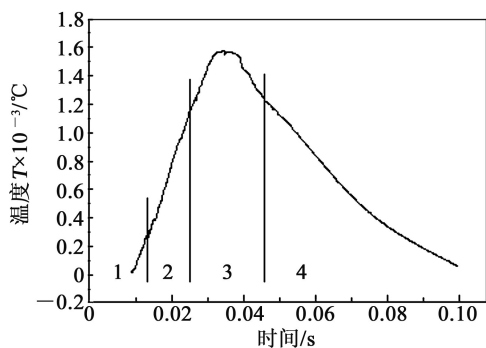
5) 对相同的实验样品进行二次测量。

## 3 实验结果及分析

### 3.1 实验结果

将数据用软件处理后,得出延期药燃烧温度随时间的变化曲线,如图 3。对相同延期药做 2 次实验,得出温度—时间曲线大致相似。

对存储仪记录的数据图形进行放大,数据显示:



1 - 预热区; 2 - 凝固相分解反应区;

3 - 气相燃烧反应区; 4 - 燃烧产物区

图 3 延期药燃烧温度—时间曲线及状态区域划分

Fig. 3 Temperature-time curve and its division

according to the combustion of the delay composition

延期药燃烧温度上升阶段为  $9 \sim 35 \text{ ms}$ , 测出的最高温度为  $1583^\circ\text{C}$ , 从  $35 \text{ ms}$  开始测得的温度持续下降, 至  $100 \text{ ms}$  左右, 温度降至  $50^\circ\text{C}$ 。图中可以明显看出, 延期药燃烧过程升温速率大于降温速率, 这是延期药燃烧过程中, 热量积累与传递的必然结果。

### 3.2 结果分析

延期药的反应属于固相反应<sup>[8]</sup>, 随着时间的变化, 延期药柱中同一点的状态发生变化, 依次可以归入预热区(图 3 中 1 部分)、凝固相分解反应区(图 3 中 2 部分)、气相燃烧反应区(图 3 中 3 部分)和燃烧产物区<sup>[9]</sup>(图 3 中 4 部分)。当延期药柱一端接受外来给予的能量时, 表层一部分的延期药温度逐渐升高至分解温度, 此时也有部分低熔点组分发生气化现象, 延期药开始分解、气化, 生成氧化剂成分, 并在气相状态下与还原剂在燃烧表面的周围一定范围内, 发生剧烈的化学反应, 同时一部分热量向未燃烧的区域传递, 层层推进延期药燃烧的进程, 一部分热量随燃烧产物向已燃烧的区域扩散, 在热量积累最多的区域, 达到最高的燃烧温度。

将延期药燃烧升温过程的曲线进行拟合得到图 4。可以看出在温度—时间曲线上  $15 \text{ ms}$  处有较小波峰出现, 说明在该时刻发生了较强的放热反应, 此时对应温度为  $381^\circ\text{C}$ , 而氧化剂  $\text{Pb}_3\text{O}_4$  的分解温度约在  $550^\circ\text{C}$ , 因此, 可以用预点火反应机理解释这一现象。

固体相在燃烧反应之前存在一个固体组分间的扩散过程, 固体组分经加热后温度升高, 导致组分中的氧化剂发生晶格“松弛”<sup>[10]</sup>, 一部分氧化剂分解放出氧气, 同时一部分还原剂扩散至氧化剂的晶格内反应放出热量。这对应着图 3 中 1 部分与 2 部分的临界状态。在  $22 \text{ ms}$  处温度出现另一个较小波峰,

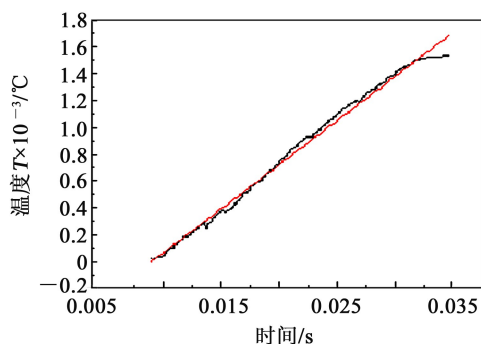


图 4 延期药燃烧过程中温度上升阶段

Fig. 4 The combustion temperature's ascent portion of delay composition

对应温度为 923℃, 可以断定此时该区域的延期药正处于分解反应与气相燃烧的临界状态。

#### 4 结论

1) 选取适当的热电偶, 可以用于直接测量延期药类火工品的燃烧温度, 测出的硅系延期药燃烧的最高温度为 1583℃。

2) 由于延期药燃烧产生的热量只有一小部分用于加热燃烧产物, 直观表现为测得的燃烧温度。燃烧热有很大部分传递给与之接触的外壳等物质而散失掉, 所以测试出的温度较低。

#### 参 考 文 献

- [1] 刘自镗, 蒋荣光. 工业火工品[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2003: 199-200.  
Liu Zitang, Jiang Rongguang. Industrial pyrotechnics [M]. Beijing: Ordnance Industry Press, 2003: 199-200.
- [2] 吴幼成, 宋敬楠. 延期药技术综述[J]. 爆破器材, 2000, 29(2): 23-27, 39.  
Wu Youcheng, Song Jingpu. Technology of delay compositions review[J]. Explosive Materials, 2000, 29(2): 23-27, 39.
- [3] 孙玉玲. 延期药燃烧特性的表征方法的研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2007.  
Sun Yuling. Study of combustion characteristics method of the delay composition[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2007.

- [4] 姬建荣, 苏健军, 李芝绒, 等. WRe 5/26 热电偶对爆炸产物的热响应分析[J]. 火炸药学报, 2008, 31(1): 26-29.  
Ji Jianrong, Su Jianjun, Li Zhirong, et al. Analysis of hot response of WRe 5/26 thermocouple to explosive products [J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants, 2008, 31(1): 26-29.
- [5] 刘晓文. 延期药燃烧性能及表征方法的研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2011.  
Liu Xiaowen. Research on combustion performance and characterization method of delay composition[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2011.
- [6] 刘大斌. 塑料导爆管的起爆、传爆及输出性能的研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2002.  
Liu Dabin. Study of the initiation, explosion transferring and output character of Nonel tube[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2002.
- [7] 龚锦梅, 刘建斌, 成一, 等. 研究延期药燃烧过程及规律的分段压制测试法[J]. 爆破器材, 2003, 32(4): 17-20.  
Gong Jinmei, Liu Jianbin, Cheng Yi, et al. Subsection-pressing charge-measure method to research combustion process of delay compositions[J]. Explosive Materials, 2003, 32(4): 17-20.
- [8] 劳允亮, 盛涤伦. 火工药剂学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2011: 260-284.  
Lao Yunlinag, Sheng Dilun. The science of initiating explosives and relative composition[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2011: 260-284.
- [9] 蔡瑞娇. 火工品设计原理[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1999: 279-299.  
Cai Ruijiao. Design principle of initiators & pyrotechnics [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1999: 279-299.
- [10] 俞金良, 郝建春. 硼铅丹延期药预点火反应机理研究[J]. 含能材料, 2004, 12(3): 21-23.  
Yu Jinliang, Hao Jianchun. Pre-ignition reaction mechanism of B/Pb<sub>3</sub>O<sub>4</sub> delay composition [J]. Energetic Materials, 2004, 12(3): 21-23.

### Measuring the Burning Temperature of Silicon Delay Composition with Thermocouple

SONG Weina

Xinjiang Xuefeng Science and Technology (group) CO., Ltd (Xinjiang Urumchi, 830002)

[ABSTRACT] Pt-Rh thermocouple is used to measure combustion temperature of silicon delay-composition. The combustion state of single delay composition is simulated, and the delay composition is loaded in a steel thick tube by several times with the density is 2.40g/cm<sup>3</sup>. The highest measured temperature is 1583℃ at the mainly heat-accumulation area. Most of the combustion heat loses in the transmission to the shells and so on, and the much lower temperature is measured after 35ms.

[KEY WORDS] thermocouple, silicon delay composition, combustion temperature, combustion state