

DOI: 10.11883/bzycj-2018-0312

# 瓦斯/空气预混气体爆燃流场测试系统多参数耦合同步控制实验方法\*

胡 洋<sup>1</sup>, 尹尚先<sup>1</sup>, Bjørn J. ARNTZEN<sup>2</sup>, 朱建芳<sup>1</sup>, 李雪冰<sup>1</sup>, Ragnhild Dybdal OIE<sup>2</sup>, 秦汉圣<sup>1</sup>

(1. 华北科技学院安全工程学院, 北京 101601;

2. 卑尔根大学, 卑尔根 5020, 挪威)

**摘要:** 为了更精确地获得爆炸激波管内瓦斯/空气预混气体爆燃过程中, 激波形成过程、压力和火焰传播速度以及火焰与惰性阻燃剂相互作用的流场演化图像。通过分析激波管测试系统中多个目标的时间响应特征及控制方式, 利用超高速相机、光电倍增管、时间延时器、固态继电器、电荷放大器和数据采集系统等设备, 设计实验方案, 分别对激波管中瓦斯/空气预混气体爆燃高压点火系统的响应时间和惰性介质阻燃剂喷射系统的响应时间进行测试。实验结果表明电火花点火的响应时间为微秒量级, 而阻燃剂喷射系统的响应时间为毫秒量级, 以响应时间为依据, 通过设置精确的延迟时间实现多目标同步控制, 为完成激波管内瓦斯/空气预混气体爆燃过程的微观流场显示奠定基础。

**关键词:** 瓦斯爆燃; 激波管; 时间特征; 多目标同步控制; 高速摄影

中图分类号: O384 国标学科代码: 13035 文献标志码: A

煤矿井下瓦斯/空气预混气体爆燃给安全生产带来了极大的灾害<sup>[1-2]</sup>, 同时该类问题也一直是力学学科和安全学科所研究的经典问题和前沿问题。近年来, 学者们对其研究方法可分为数值模拟<sup>[3-4]</sup>和激波管实验<sup>[5-8]</sup>两类。目前虽然数值模拟已经可以揭示火焰传播过程中的流动现象, 有助于理解层流火焰向湍流火焰转变、燃烧不稳定性和火焰形态变化等<sup>[9-10]</sup>, 但是其计算结果却可能因为受到算法及网格的影响而产生偏差, 因此激波管实验仍然是该类问题不可替代的研究方法。目前激波管实验已经由现代的超高速纹影和瞬态光谱测试系统取代了传统的压力火焰速度传感器测试系统, 可以得到预混气体爆燃过程中激波的演化过程及火焰的微观结构<sup>[11-12]</sup>。但在激波管配合超高速纹影和瞬态光谱系统进行微观流场测试时却涉及到多个目标的时间尺度控制问题, 如电火花点火响应时间、激波阵面到达观察窗时间、火焰阵面到达观察窗时间、控制惰性阻燃剂喷射系统的响应时间、瞬态光谱 ICCD 相机电子快门响应时间和超高速相机 CCD 电子快门响应时间等。上述目标的时间特征分别从秒到纳秒量级, 为得到清楚的流场微观结构和光谱图像, 需协调多个目标的时间, 完成同步控制。本文通过实验研究确定激波管测试系统中不同目标的时间特征, 设置合理的延时时间, 为完成系统中预混气体爆燃过程激波演化及火焰微观结构测试奠定基础。

## 1 实验系统介绍

图 1 为获取瓦斯/空气预混气体爆燃过程中激波形成过程和火焰微观结构流场显示的实验系统图。

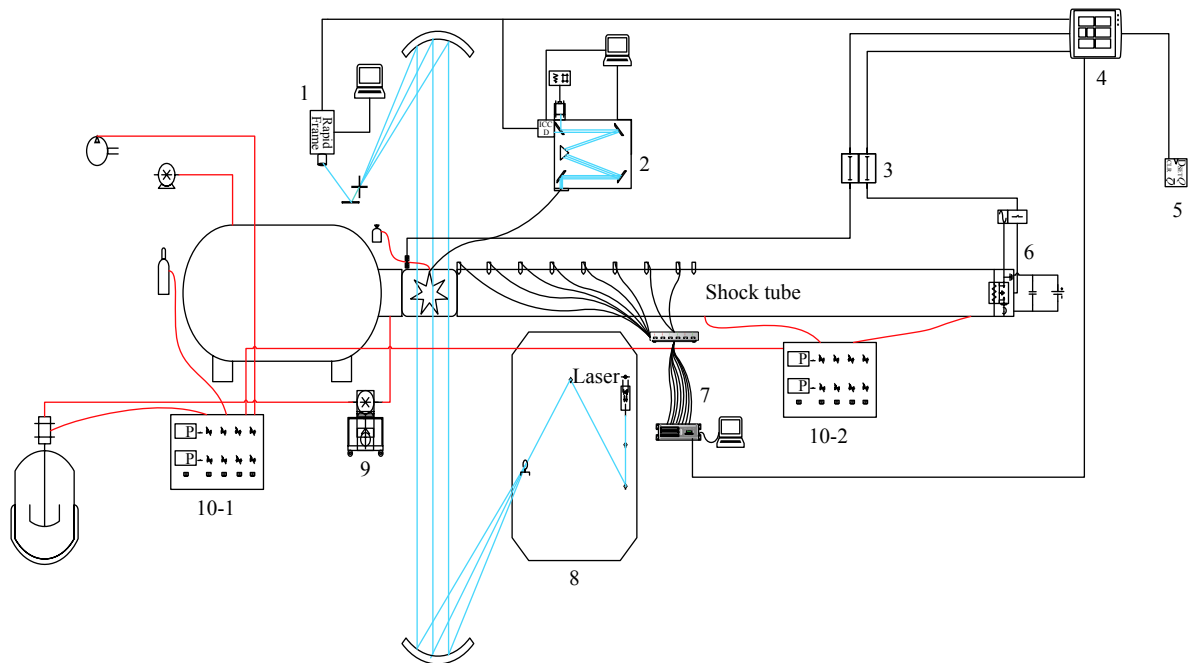
\* 收稿日期: 2018-08-22; 修回日期: 2018-12-03

**基金项目:** 国家自然科学基金(51774136, 51874134); “十三五”国家重点研发计划(2017YFC0804108, 2016YFC0801502); 中央高校建设世界一流大学(学科)和特色发展引导专项国际合作项目(0108023303); 河北省自然科学基金(E2018508089); 爆炸科学与技术国家重点实验室开放基金(KFJJ15-15M); 华北科技学院中央高校基本科研业务费项目(3142018017, 3142016018, 3142017093)

**第一作者:** 胡 洋(1979—), 男, 博士, 副教授, 28770007@qq.com;

**通信作者:** 尹尚先(1964—), 男, 博士, 教授, yinshx03@qq.com。

实验系统包括激波管、高压点火系统、真空系统、预混系统、压力信号采集系统、火焰信号采集系统、阻燃剂喷射系统和高速摄影系统组成。激波管是截面形状为 200 mm×200 mm 的正方形，管道共 11 段，总长为 27.5 m，观察窗口设置在末段管道，采用两块直径为 200 mm 的石英玻璃；高压点火系统由低压正极和地线产生放电，击穿高压正极和地线间的介质，完成点火；真空系统由旋片泵和罗茨泵组成，其中旋片泵抽速为 90 m<sup>3</sup>/h，极限真空度 0.7 Pa、罗茨泵抽气速度为 500 m<sup>3</sup>/h，极限真空度 0.4 Pa；预混系统采用激波管外预混的思想，将甲烷和空气分别按照预定的体积百分数充入密闭罐中，待静止数小时后充入激波管内作为实验气体备用；压力信号采集系统包括压电压力传感器和数据采集卡，其中传感器的采样频率为 500 kHz，最大量程为 6.9 MPa、数据采集卡的最高采样频率为 20 MHz；火焰信号采集系统包括光电二极管和数据采集卡，其中光电二极管可将火焰产生的光信号通过光纤导入并转化为电信号。



1. Ultra high speed acquisition; 2. Transient spectrum; 3. Solid state relay; 4. DG64; 5. Signal generator; 6. Igniter; 7. Digital acquisition; 8. Pulse laser; 9. Roots pump; 10. Control cabinet

图 1 多目标同步同步控制系统实验原理图

Fig. 1 Multi-objective synchronous control system

## 2 实验系统变量时间特征分析及同步控制方案

为了通过超高速纹影系统获得更好的火焰与阻燃剂相互作用的流场图像，需要对实验系统中各个变量的时间特征加以分析，目的是使火焰到达观察窗时，阻燃剂刚好喷射与火焰作用并且同时打开 CCD 和 ICCD 电子快门，获得爆炸流场微观信息。在整套实验系统中需要同步控制的时间变量如表 1 所示，分析可知实现同步控制的时间关系式为：

$$t_1 + t_2 + t_3 = t_4 + t_5 + t_d = t_6 = t_7 \quad (1)$$

此处仍有必要对式 (1) 加以分析，定义  $T_1 = t_1 + t_2 + t_3$ 、 $T_2 = t_4 + t_5 + t_d$ ：(1) 若  $T_1 > T_2$ ，说明通道设置的延时时间  $t_d$  过小，则在火焰未达到观察窗前，阻燃剂喷射系统已经开始工作，惰性介质就会干扰观察窗附近预混气体的组分，改变爆炸流场的微观信息；(2) 若  $T_1 < T_2$ ，说明通道设置的延时时间  $t_d$  过大，则在火焰到达观察窗后，阻燃剂喷射系统仍未工作，影响惰性介质的阻燃效果。

因此多目标耦合的时间同步控制是本套实验的核心技术，即要求  $T_1 = T_2$ 。实现  $T_1 = T_2$  的同步控制方案如图 2 所示。

表 1 同步控制实验系统中的变量

Table 1 Variables in synchronous control experiment system

变量	含义	备注
$t_0$	信号发生器产生电平TTL <sub>0</sub> 的时刻	定义该时刻为系统的“0”时刻
$t_1$	高压点火装置放电响应时间	本文需实验测得响应时间尺度
$t_2$	预混气体点火延时时间	认为相同物质相同压力下该时间一致 <sup>[13]</sup>
$t_3$	火焰运动到观察窗时间	需要通过多组实验得到较好的重复性 <sup>[14]</sup>
$t_4$	阻燃剂喷射系统响应时间	本文需实验测得响应时间尺度
$t_5$	阻燃剂运动到观察窗时间	认为相同压力等长管路下该时间一致
$t_6$	触发瞬态光谱ICCD快门时刻	电子快门响应时间为ns级可忽略
$t_7$	触发超高速相机CCD快门时刻	电子快门响应时间为ns级可忽略
$t_d$	通道设置延时时间	由上述各个变量确定

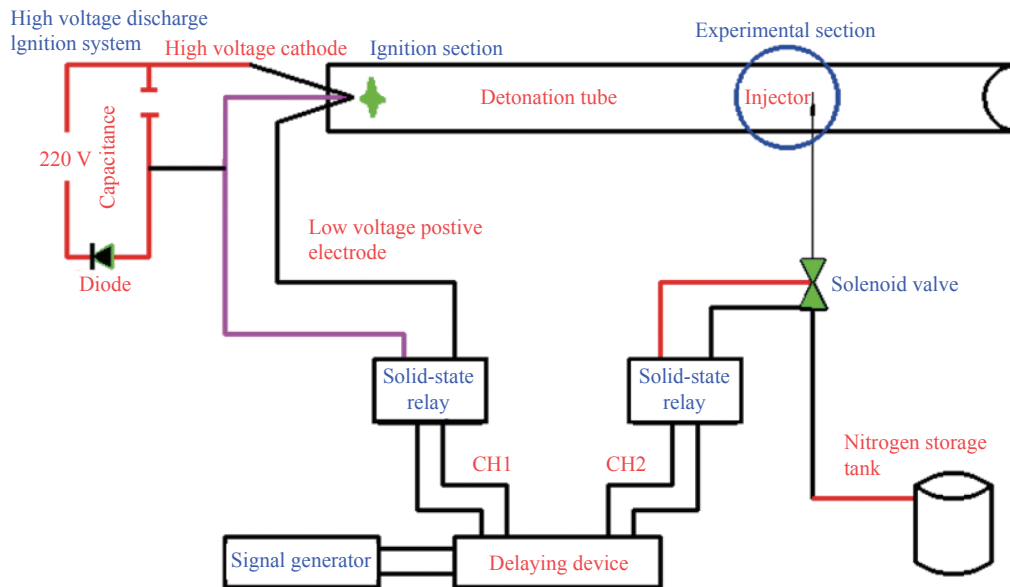


图 2 高压点火装置与阻燃剂喷射装置同步控制实验方案示意图

Fig. 2 Schematic diagram of synchronous control experiment scheme for the high pressure ignition device and the flame retardant injection device

系统工作过程如下: 函数信号发生器产生电平 TTL<sub>0</sub> 送入时间延时器的输入端, 在输出端的两个通道 CH1 和 CH2 分别产生电瓶 TTL<sub>1</sub> 和 TTL<sub>2</sub>; 电平 TTL<sub>1</sub> 经过固态继电器控制高压放电点火系统中的低压正极和地线产生放电, 其能量可击穿系统中高压正极和地线间的介质, 实现高压放电; 电平 TTL<sub>2</sub> 经过固态继电器启动阻燃剂喷射系统, 喷射 CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O 等。

上述过程的关键为控制电平 TTL<sub>1</sub> 与电平 TTL<sub>0</sub> 的延时时间  $\Delta T_1$  和电平 TTL<sub>2</sub> 与电平 TTL<sub>0</sub> 的延时时间  $\Delta T_2$ , 结合表 1 和图 2 分析可知  $\Delta T_1 + t_1 + t_2 + t_3 = t_4 = t_5 + \Delta T_2$ , 通常在实验中使用的延时器延时精度不大于 2  $\mu$ s, 可近似认为  $\Delta T_1 = 0$ , 因此  $\Delta T_2 = t_d = (t_1 + t_2 + t_3) - (t_4 + t_5)$ , 其中  $t_2$ 、 $t_3$ 、 $t_5$  需要多次重复实验确定, 不是本文所研究的重点内容, 而  $t_1$ 、 $t_4$  的时间响应需要本文实验测得。

### 3 实验原理及测试方案

#### 3.1 高压点火装置响应时间测试

由上述分析可知, 为了实现实验系统中多目标的同步控制, 本小节通过实验确定高压点火系统中,

低压正极与地线产生放电到击穿高压正极与地线间介质的响应时间。图 3 给出了高压点火系统的测试方案。

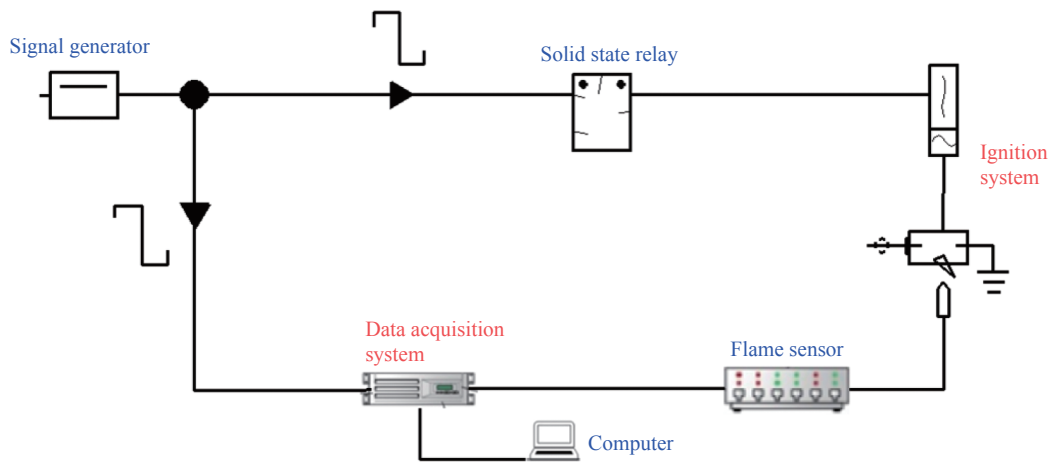


图 3 高压点火系统放电响应时间  $t_1$  测量方案示意图

Fig. 3 Schematic diagram of  $t_1$  measurement scheme for discharge response time of high voltage ignition system

测试方案如下: (1) 将中尺度激波管道点火端的尼龙法兰安置在实验台上; (2) 将火焰测速光纤利用支架固定在高压点火电极附近; (3) 示波器分别记录函数信号发生器产生的 TTL 信号启动固态继电器的时刻  $t_{11}$  和测速光纤连接的光电管 PD 或光电倍增管 PMT 输出信号时刻  $t_{12}$ , 则  $t_1 = t_{12} - t_{11}$ ; (4) 重复上述测试过程, 求得  $N$  次实验的平均值。

### 3.2 阻燃剂喷射系统响应时间测试

同样图 4 给出了阻燃剂喷射系统工作响应时间的测试原理图。测试方案如下: (1) 将一张打印纸覆盖在激波管实验段内惰性介质喷射孔上, 通过有机玻璃观察窗可拍摄打印机运动轨迹; (2) 利用函数信号发生器产生标准 TTL 电平, 经过时间延时器后分出两路信号, 同时作用于固态继电器和 CCD 相机的外触发端口; (3) 数据采集系统和示波器分别记录 CCD 相机外触发时刻  $t_{21}$  和打印纸运动时刻  $t_{22}$ , 则  $t_2 = t_{22} - t_{21}$ , 打印纸运动时刻可以根据阻燃剂喷射后高速摄影的图像帧数以及每帧的间隔时间确定; (4) 重复上述测试过程, 求得  $N$  次实验的平均值。

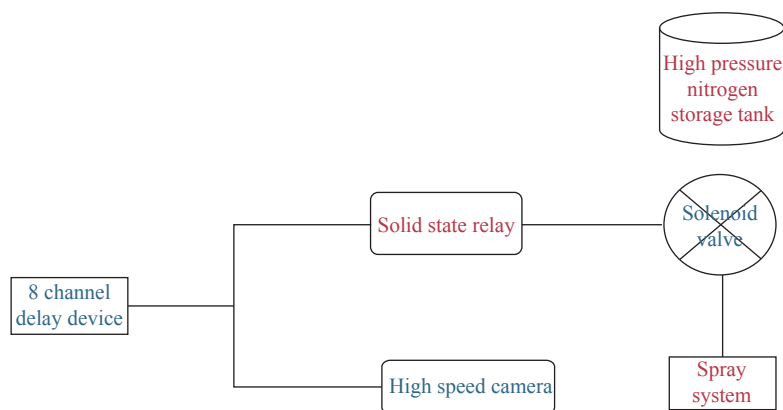


图 4 阻燃剂喷射系统响应时间  $t_2$  测量方案示意图

Fig. 4 Schematic diagram of response time  $t_2$  measurement scheme for flame retardant injection system

## 4 实验结果与分析

图 5 为高压点火系统响应时间实测信号, 其中点火电压为 5 000 V, 数据采集卡采样频率为 1 MHz,

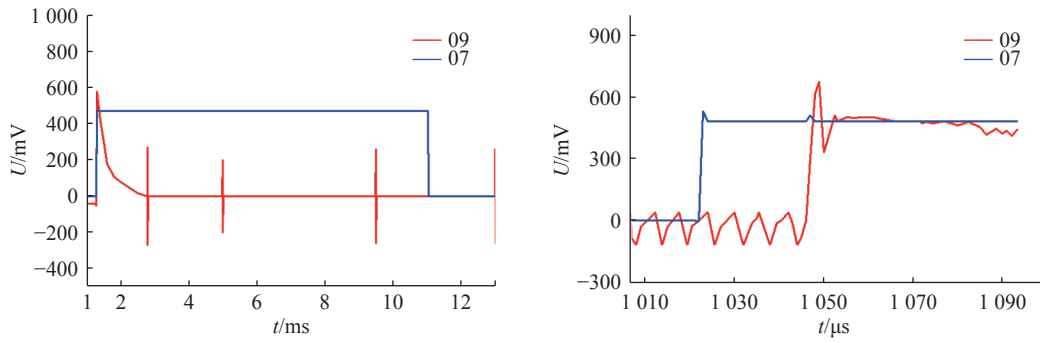


图 5 高压点火系统放电响应时间  $t_1$  实测数据

Fig. 5 Experimental data of discharge response time of high voltage ignition system  $t_1$

火焰信号灵敏度 1 mV/mV, TTL 信号 10 mV/mV, 触发方式为信号触发, 07 通道信号为 TTL 电平信号, 09 通道为电火花信号。

重复上述实验, 数据如表 2 所示。

8 组实验所测得的高压点火系统放电响应时间平均值为 22.75  $\mu\text{s}$ , 放电产生的电火花光照强度介于 500~900 mV 之间, 本实验的火焰测试系统存在干扰信号, 波形特殊, 幅值在 275 mV 左右。

表 2 高压点火系统放电响应时间  $t_1$  实验数据

Table 2 Experimental data on discharge response time of high voltage ignition system  $t_1$

实验序号	$t_1/\mu\text{s}$	实验序号	$t_1/\mu\text{s}$
1	26	N <sub>5</sub>	23
2	24	N <sub>6</sub>	24
3	22	N <sub>7</sub>	20
4	21	N <sub>8</sub>	22

图 6 为惰性介质阻燃剂喷射系统响应时间测试的高速摄影图, 共进行了 6 次实验, 选用 3 种拍摄速度。图 6 中的 (a)~(f) 为每一次实验高速摄影照片中所能找到的第一张打印纸运动照片, 图中的白色矩形物为运动的打印纸, 白色圆点为惰性阻燃剂喷射孔, 6 组实验得到的惰性阻燃剂喷射系统响应时间平均值为 4.492 ms, 表 3 给出每组实验数据。

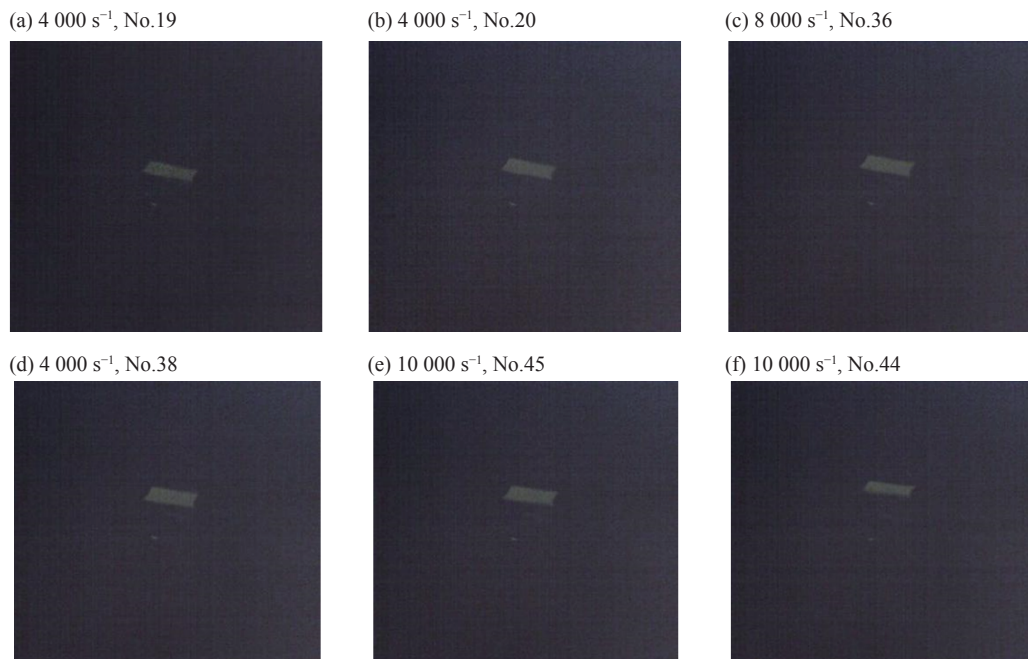


图 6 惰性介质阻燃剂喷射系统响应时间测试高速摄影图

Fig. 6 Response time test of injection system for inert medium flame retardants



表3 惰性介质阻燃剂喷射系统响应时间  $t_2$  实验数据Table 3 Inert medium flame retardant injection system response time  $t_2$  experimental data

实验序号	拍摄速率/s <sup>-1</sup>	照片帧数	响应时间 $t_2/\mu\text{s}$
1	4 000	N <sub>19</sub>	4 500
2	4 000	N <sub>20</sub>	4 750
3	8 000	N <sub>36</sub>	4 375
4	8 000	N <sub>38</sub>	4 625
5	10 000	N <sub>45</sub>	4 400
6	10 000	N <sub>44</sub>	4 300

## 5 结 语

在爆炸激波管内瓦斯/空气预混气体爆燃过程测试系统中,多目标耦合时间同步控制是关键,通过设计实验方案,分别测试瓦斯/空气预混气体爆燃系统中高压点火系统和阻燃剂喷射系统的响应时间。多组实验结果表明,高压点火系统的平均响应时间为 22.75  $\mu\text{s}$ ,阻燃剂喷射系统的平均响应时间为 4.492 ms,实验数据为整个实验系统设置合理的延时时间,为获得瓦斯/空气预混气体爆燃流场更精确的微观信息奠定基础。

## 参考文献:

- [1] 劳动保护编辑部. 2017年重特重大事故回顾 [J]. *劳动保护*, 2018, 20(1): 16–18. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4335.2018.01.009. Labor protection editorial department. Review of serious and extraordinary accidents in 2017 [J]. *Labor Protection*, 2018, 20(1): 16–18. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4335.2018.01.009.
- [2] 李润之, 司荣军, 张延松, 等. 煤矿瓦斯爆炸特性及发展趋势 [J]. *煤炭技术*, 2010, 29(4): 4–6. LI Runzhi, SI Rongjun, ZHANG Yansong, et al. Characteristics and development trend of coal mine gas explosion [J]. *Coal Technology*, 2010, 29(4): 4–6.
- [3] 陈鹏, 李艳超, 黄福军, 等. 方孔障碍物对瓦斯火焰传播影响的实验与大涡模拟 [J]. *爆炸与冲击*, 2017, 37(1): 21–16. DOI: 10.11883/1001-1455(2017)01-0021-06. CHEN Peng, LI Yanchao, HUANG Fujun, et al. LES approach to premixed methane/air flame propagating in the closed duct with a square-hole obstacle [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2017, 37(1): 21–16. DOI: 10.11883/1001-1455(2017)01-0021-06.
- [4] 王公忠, 张建华, 李登科, 等. 障碍物对预混火焰特性影响的大涡数值模拟 [J]. *爆炸与冲击*, 2017, 37(1): 68–76. DOI: 10.11883/1001-1455(2017)01-0068-09. WANG Gongzhong, ZHANG Jianhua, LI Dengke, et al. Large eddy simulation of impacted obstacles' effects on premixed flame's characteristics [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2017, 37(1): 68–76. DOI: 10.11883/1001-1455(2017)01-0068-09.
- [5] 王高峰, 马承飏, 王宝源, 等. 激波诱导甲烷点火化学反应区的可视化实验研究 [J]. *科学通报*, 2008, 53(19): 2371–2378. DOI: 10.3321/j.issn:0023-074X.2008.19.016. WANG Gaofeng, MA Chengyu, WANG Baoyuan, et al. Visual experimental study on chemical reaction zone of shock-induced methane ignition [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53(19): 2371–2378. DOI: 10.3321/j.issn:0023-074X.2008.19.016.
- [6] 张尊华, 李敬瑞, 万琦, 等. 激波管的调试与甲烷着火延迟时间的测量 [J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2017, 45(7): 56–60. ZHANG Zunhua, LI Jingrui, WAN Qi, et al. Calibration of shock tube and determination of ignition delay time formethane for methane [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2017, 45(7): 56–60.
- [7] 王连聪, 罗海珠, 梁运涛, 等. 激波管中水对瓦斯爆炸反应动力学特性的影响 [J]. *煤炭学报*, 2014, 39(10): 2038–2042. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2013.1383. WANG Liancong, LUO Haizhu, LIANG Yuntao, et al. Effects of water on reaction kinetic for gas explosion in shock tube [J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(10): 2038–2042. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2013.1383.
- [8] 任少云. 密闭空间内天然气混合及爆炸传播规律研究 [J]. *中国安全生产科学技术*, 2016, 12(11): 130–135. DOI:

- 10.11731/j.issn.1673-193x.2016.11.022.
- REN Shaoyun. Study on mixing and explosion propagation laws of natural gas in confined space [J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2016, 12(11): 130–135. DOI: 10.11731/j.issn.1673-193x.2016.11.022.
- [9] CICCARELLIA G, DOROFEEV S. Flame acceleration and transition detonation in ducts [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2008, 34: 499–550. DOI: 10.1016/j.peccs.2007.11.002.
- [10] BYCHKOV V, VALIEV D, AKKERMAN V, et al. Gas compression moderates flame acceleration in deflagration-to-detonation transition [J]. *Combustion Science and Technology*, 2012, 184(7-8): 1066–1079. DOI: 10.1080/00102202.2012.663995.
- [11] 蒯伟, 回岩, 王成, 等. 瓦斯体积分数对火焰传播规律影响的实验研究 [J]. *北京理工大学学报*, 2015, 35(6): 552–555. DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645.2015.06.001.
- LIN Wei, HUI Yan, WANG Cheng, et al. Experimental study on the effect of gas volume fraction on the law of flame propagation [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2015, 35(6): 552–555. DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645.2015.06.001.
- [12] 陈东梁, 孙金华, 刘义, 等. 甲烷/空气预混气体火焰的传播特征 [J]. *爆炸与冲击*, 2008, 28(5): 385–390.
- CHEN Dongliang, SUN Jinhua, LIU Yi, et al. Propagation characteristics of premixed methane-air flames [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2008, 28(5): 385–390.
- [13] 廖钦, 徐胜利. 雾化激波管研制和煤油点火延时测量 [J]. *实验流体力学*, 2009, 23(3): 70–74. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9897.2009.03.015.
- LIAO Qin, XU Shengli. The ignition delay measurement of atomized kerosene air mixture in an aerosol shock tube [J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2009, 23(3): 70–74. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9897.2009.03.015.
- [14] 史晓亮, 徐景德, 徐胜利, 等. 中尺度管道内瓦斯爆炸压力火焰传播特性初步研究 [J]. *华北科技学院学报*, 2016, 13(4): 76–82. DOI: 10.3969/j.issn.1672-7169.2016.04.017.
- SHI Xiaoliang, XU Jingde, XU Shengli, et al. Preliminary study on pressure flame propagation characteristics of Gas explosion in mesoscale pipeline [J]. *Journal of North China Institute of Science and Technology*, 2016, 13(4): 76–82. DOI: 10.3969/j.issn.1672-7169.2016.04.017.

## Experimental study of multi-objective coupling synchronous control in gas/air premixed gas deflagration flow test system

HU Yang<sup>1</sup>, YIN Shangxian<sup>1</sup>, Bjørn J. ARNTZEN<sup>2</sup>, ZHU Jianfang<sup>1</sup>, LI Xuebing<sup>1</sup>,  
Ragnhild Dybdal OIE<sup>2</sup>, QIN Hansheng<sup>1</sup>

(1. *Collage of Safety Engineering, North China Institute of Science and Technology, Beijing 101601, China;*

2. *University of Bergen, Bergen 5020, Norway*)

**Abstract:** To obtain more accurate images of the shock wave formation process, pressure and flame propagation velocity, and flow field evolution of flame-inert flame retarding interaction during premixed gas/air deflagration in a blast shock tube, by analyzing the time response's characteristics and the control modes of multiple targets in the shock tube test system, we designed two experimental schemes using an ultrahigh speed camera, a photomultiplier tube, a time delayer, a solid state relay, a charge amplifier and a data acquisition system, and tested the response time of the high pressure ignition system and the inert medium flame retarding injection system. The results showed that the response time of the spark ignition is microsecond, and that of the flame retarding injection system is millisecond. Based on the response time, we realized the multi-objective synchronous control by setting a precise delay time, thus laying a foundation for the display of a micro-flow field of premixed gas/air deflagration in a shock tube.

**Keywords:** gas deflagration; shock tube; time characteristics; multi-objective synchronous control; high-speed photography

(责任编辑 王小飞)