



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2405473

引用格式:高玉坤,包颖昕,卢宇轩,等.环形扰动爆轰实验装置及方法[J].科学技术与工程,2025,25(20):8364-8370.

Gao Yukun, Bao Yingxin, Lu Yuxuan, et al. Experimental device and method of annular perturbation detonation[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(20): 8364-8370.

力学

环形扰动爆轰实验装置及方法

高玉坤¹, 包颖昕¹, 卢宇轩¹, 刘婧², 杨轶芙¹, 赵焕娟^{1*}

(1. 北京科技大学资源与安全工程学院, 北京 100083; 2. 北京理工大学宇航学院, 北京 100081)

摘要 由于含能材料的高热值及其伴随着易燃易爆的特性,在管道中传播时会影响管道的形状及几何尺寸,导致爆轰的传播受到影响。为了深入探究环形扰动对爆轰波传播的影响,精确、清晰观察环形管道中爆轰波的传播动力学过程,更好地体现边界层效应和曲率管壁对爆轰波传播的影响。搭建环形扰动爆轰实验装置,在光滑圆管末端加入不同直径尺寸的扰动管实现环形扰动,利用压力传感器、烟膜组成的数据采集系统得到爆轰波速度、三波点轨迹、胞格结构等数据。成功搭建了环形扰动爆轰实验系统,并且获得了较为理想的传播数据,数据具有显著的规律性和高度的可靠性。经过验证,所搭建的爆轰实验装置具有良好的数据采集能力,所获得的数据证实了装置具备科学性与有效性。所搭建的实验系统有助于为事故防控提供理论支持,使科研仪器充分发挥支撑科技创新、社会发展的作用。

关键词 爆轰实验; 环形扰动; 胞格结构; 三波点轨迹

中图分类号 O381 X932; 文献标志码 A

Experimental Device and Method of Annular Perturbation Detonation

GAO Yu-kun¹, BAO Ying-xin¹, LU Yu-xuan¹, LIU Jing², YANG Yi-fu¹, ZHAO Huan-juan^{1*}

(1. School of Resources and Safety Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2. School of Aerospace Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

[Abstract] Due to the high calorific value of energetic materials combined with their flammable and explosive nature. The propagation in the tube will affect the shape and geometric dimensions of the tube, resulting in the propagation of detonations is affected. In order to deeply investigate the influence of annular perturbation on the propagation of detonation waves, accurately and clearly observe the propagation dynamics of the detonation wave in annular tube, and better reflect the influence of boundary layer effect and curvature tube wall on detonation waves. An annular disturbance detonation experimental device was built up. Annular disturbance was realized by adding disturbance tubes with different diameters to the end of the smooth circular tube. The detonation wave velocity, triple-point trajectory, and cell structure were observed by using a data acquisition system composed of pressure sensors and smoke films. The experimental system of annular disturbance detonation was constructed successfully. It was able to obtain the ideal propagation data with remarkable regularity and high reliability. After verification, the detonation experimental device built has excellent data acquisition capabilities, and the obtained data confirms that the device is scientific and effective. The experimental system built contributes to providing theoretical support for accident prevention and control, allowing scientific instruments to play a more significant role in supporting technological innovation and societal development.

[Keywords] detonation experiment; annular perturbation; cellular structure; triple point trajectory

科学发展和科技创新离不开科研仪器的支撑。与发达国家相比,中国科研仪器的利用率还有很大差距,共享水平仍有待提高,对外服务率和跨区域共享水平更是有待提升。中国科研仪器充分发挥支撑科技创新、社会发展的作用还没有实现^[1]。

含能材料由于其热值高被广泛应用于工业生产,如发动机工业^[2-4]、太阳能电池^[5]、火炸药^[6]等。但是含能材料作为易燃易爆物,具有爆炸性和爆燃性,在追求高能化的过程中,会部分牺牲掉热安全性,也存在巨大的安全隐患^[7-8]。因此,学者们对含

收稿日期: 2024-07-21; 修订日期: 2025-04-15

基金项目: 化学品安全全国重点实验室开放课题项目(SKLCS-2024023)

第一作者: 高玉坤(1983—),男,汉族,山东胶州人,博士,高级工程师。研究方向:实验室安全与管理。E-mail: gaoyukunustb@126.com。

*通信作者: 赵焕娟(1985—),女,汉族,山东日照人,博士,教授。研究方向:爆轰机理、冲击动力学。E-mail: ziai.1985@163.com。

投稿网址: www.stae.com.cn

能材料的爆轰特性进行研究,测量其爆轰传播过程中的速度波动^[9],并用烟膜技术捕捉测量了爆轰波的胞格结构。胞格结构是实验结果分析的重要参数^[10],胞格尺寸是描述爆轰传播的重要参数^[11]。在爆轰波传播过程中,横波、马赫杆和前导激波的交点轨迹构成了鱼鳞形的胞格结构^[12],胞格尺寸的大小与爆轰化学反应强弱程度有关,胞格的分布规律一定程度上也可以反映出可燃气体的性质^[11,13-14]。

边界条件是爆轰传播的重要影响因素^[15],在以往实验研究中发现,使用粗糙壁^[16]、吸声壁^[17]、多孔壁^[18]和多孔材料^[19-20]等会导致爆轰波传播出现较大的速度损失,甚至爆轰失效的情况。管道的形状及几何尺寸也会对爆轰有影响,相较于方形管道,圆形管道截面积大于方形,可以输送更多的流体且受力更加均匀。在普通圆形管道中加入扰动管形成环形管道,具有结构紧凑、传热面积大、流动性好、传热系数高等显著优点,可以更好地体现边界层效应和曲率管壁对爆轰波传播的影响^[21-23],近年来在诸如石油化工^[24]、电力^[25]、航天推进^[26]等技术行业已受到关注,如旋转爆轰发动机环形构造的燃烧室等。

在环形扰动爆轰研究方面,贺顺江等^[27]研究了不同含量氩气稀释过的乙炔-氧气爆轰波经直管道沿切向进入环形通道中的传播过程和模式,发现环形通道的宽度会使高浓度或低浓度气体爆轰波的临界管径趋近于经典衍射问题中不稳定爆轰波的临界管径。孟豪龙等^[28]使用 OpenFOAM 软件对环形燃烧室中凹腔对旋转爆轰流畅的影响进行研究,发现相较于同轴圆环形旋转爆轰燃烧室,凹腔基环

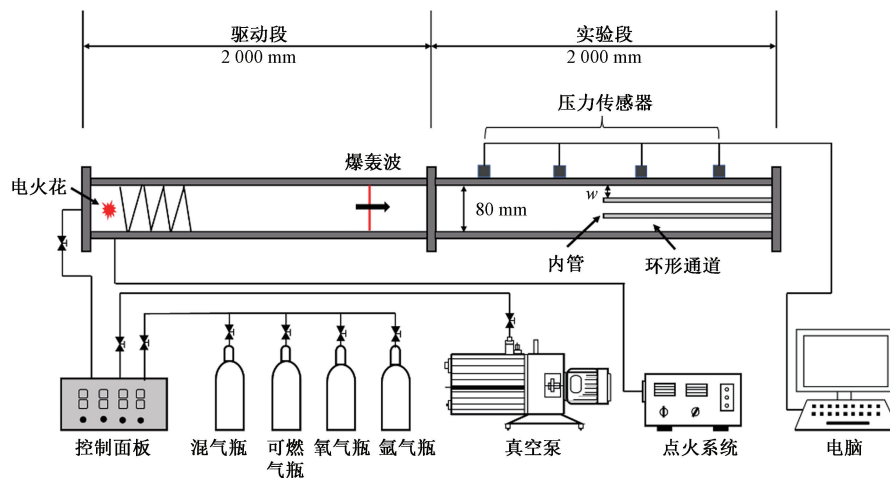
形旋转爆轰燃烧室具有更大的速度亏损。褚驰等^[29]采用 OpenFOAM 软件对爆轰波进入发动机环形燃烧室传播过程进行数值模拟研究,发现爆轰波在进入环形燃烧室后衰减为燃烧波,并存在“初始爆轰波解耦-爆燃转爆轰-触发旋转爆轰波”的过程。杨怀远等^[30]对火焰在环形通道内的形态演变过程进行实验研究,发现环形通道几何效应对火焰传播影响并产生一系列火模式,其舌形火焰在爆轰起爆过程中发挥了重要作用。Yao 等^[31]对环形通道中爆轰波传播的胞格结构特征进行研究,发现环形通道对胞格结构的影响取决于内半径和通道宽度。由此可见,环形扰动对爆轰波及火焰传播、爆轰波胞格结构都产生了巨大的影响。因此,展开环形扰动对爆轰波传播动力学影响的研究具有极大的重要性。

鉴于此,搭建环形扰动爆轰实验装置,在光滑圆管末端加入不同直径尺寸的扰动管实现环形扰动,利用压力传感器记录爆轰波到达时间并通过距离时间计算爆轰传播速度,分析速度波动。同时,使用烟膜记录爆轰过程在环形管壁面、扰动管内外壁面、管道端面留下的三波点轨迹,观察环管中爆轰波的传播动力学过程,研究环形扰动对爆轰波传播的作用,有助于为事故防控提供理论支持。

1 气相爆轰实验技术

1.1 实验装置系统

基于真实输运管道特征自主搭建了环形扰动爆轰实验装置,如图 1 所示。整个环形管道实验系统是由管道系统、数据采集系统、充配气系统、点火系统和气体监测系统组成。



w 为环形管道宽度

图 1 环形扰动爆轰实验平台

Fig. 1 Ring disturbance detonation experiment platform

1.2 管道系统

为充分研究和分析爆轰波传播过程中的特性,管道管径需胞格尺寸大小,爆轰传播机理可以量化为 $\frac{d}{\lambda} = 1$,其中, λ 为一个胞格尺寸的大小, d 为爆轰管道管径大小。管径应大于一个爆轰波胞格尺寸,才能够使爆轰波正常、稳定传播。因此,设计环形扰动爆轰实验装置的管道系统为内径 80 mm。管道长度由过驱和稳定传播长度的总长度决定,包含驱动段和实验段,因此设计两段管道长度均为 2 m,使数据采集系统能够完整记录爆轰波的起爆及传播过程。

管道共有 4 节,每节长 1 000 mm、厚度 5 mm,各节管道首尾端部为开槽的法兰,相邻法兰之间使用螺丝进行连接,并加入橡胶垫片以保证实验的密闭性,每次实验前必须对爆轰管道进行气密性检查。

管道系统由驱动段和实验段组成,分别为 2 000 mm。驱动段内部设有直径为 80 mm 的铜制 Shchelkin 螺旋线来促进稳定爆轰的形成。实验段分为实验段前段和后段。在实验段后段中分别插入 3 种内径 $d = 20, 40, 60$ mm 的扰动管构成 3 种尺寸的环形管道,扰动管长度均为 1 000 mm,厚度均为 5 mm,得到宽度 $w = 25, 15, 5$ mm 的环形通道。扰动管实物图如图 2 所示。

1.3 数据采集系统

1.3.1 烟膜系统

爆轰波实际上是三维结构,横波、马赫杆和前导激波碰撞形成三波点并在该点局部区域产生高温高压区,从而在烟熏薄膜上擦除烟尘留下三波点轨迹,左旋和右旋三波点轨迹交叉构成了菱形的胞格结构。采用厚度为 1 mm,长度 1 000 mm 的 PVC 薄膜作为烟迹载体^[32],具体宽度根据实验管道内壁周长进行剪裁。在对薄膜烟熏之前需先使用酒精湿

巾擦拭,去除薄膜表面残留的灰尘等颗粒杂物,有利于后续烟尘颗粒的吸附。本实验烟膜使用煤油燃料进行熏制,熏制过程中在煤油灯罩出烟口处放置铁丝网片,可以吸附过滤煤油燃烧过程中较大的烟尘颗粒,保证烟熏膜上烟尘的均匀性。此外在熏制过程中应时刻注意调整 PVC 薄膜和火焰之间的距离,确保烟尘颗粒分布均匀,颗粒堆积厚度一致。

如图 3 所示,烟膜制作完成后将其放置于合适方式记录管道中不同位置的横波结构与纵波结构^[33],如在内部管内壁和外壁、外管内壁、端面处放置烟膜,直观显示管道中距管道中心线不同极径处的横波与纵波结构。烟膜背面需与管道内壁面紧贴无缝隙,需在两端贴置双面胶,同时烟膜在管道内应留出一定空隙确保不会遮挡压力传感器探头。为防止人为操作等原因带来的偶然性实验结果,通常在实验中对每组条件进行三次实验。通过记录不同极径处螺旋爆轰横波结构,并与对应的纵向波结构对比分析,有助于几何体现爆轰波在不同截面处的三维结构,对于爆轰结构研究与探索具有重要的意义。

1.3.2 压力传感器系统

爆轰波传播过程是瞬时行为,传播速度约为 2 000 m/s,因此捕捉爆轰波的瞬时压力对于传感器

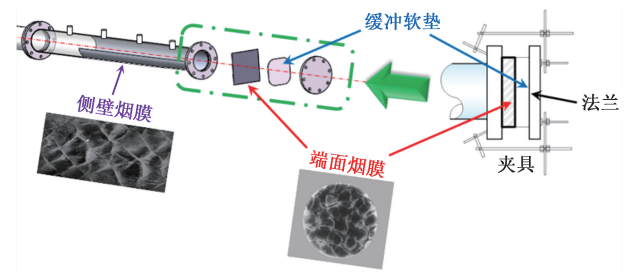


图 3 压力传感器系统
Fig. 3 Pressure sensor system

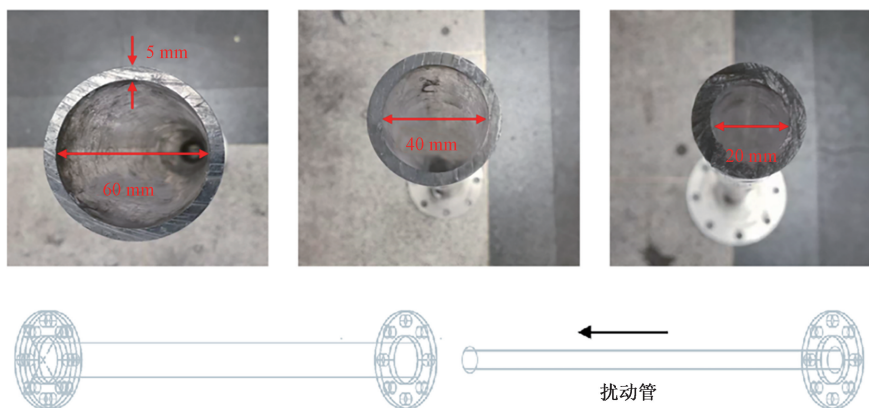


图 2 扰动管实物图及安装示意图

Fig. 2 Disturbance tube physical drawing and installation diagram

的采样频率有较高要求。本实验装置系统中采用压电式压力传感器,型号为 PCB113B27。表 1 为 PCB113B27 压力传感器的参数。压力传感器系统主要由压力传感器、482C 信号调节器和 DS1104 示波器组成。图 4 为 PCB113B27 压力传感器、482C 信号调节器和 DS1104 示波器的实物图。压力传感器将采集到的压力信号转变为电信号,经过调节器输入至示波器从而将电信号转变为可视化的波形图像,爆轰波抵达压力传感器处时传感器电信号发生突跃,在示波器上显示为出现电压波峰,之后可以将波形图保存在电脑。

表 1 PCB113B27 压力传感器参数

Table 1 PCB113B27 pressure sensor parameters

传感器型号	PCB113B27
测量范围/kPa	689.4
灵敏度/(mV·kPa ⁻¹)	7.25
分辨率/kPa	0.007
共振频率/kHz	≥500
响应时间/μs	≤1.0

1.4 充配气系统

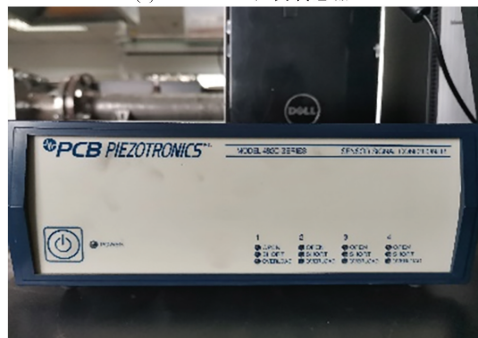
图 5 为本实验装置系统中的充配气系统示意图,主要包括控制面板、真空泵、压力表、混气瓶、燃料气瓶、氧气瓶、氩气瓶、爆轰管道。配气流程为首先通过塑胶软管连接各控制面板、气瓶和真空泵,检查整个气体通路的气密性。气密性满足要求后打开真空泵和混气瓶之间的阀门,将混气瓶抽至真空后关闭真空泵和阀门。之后采用道尔顿分压法依次将燃料气、氩气、氧气充入混气瓶中,每次充入新的气体之前需先将塑胶软管中的残留气体排出,抽至真空状态。混合后的气体需在混气瓶中静置 24 h 确保预混气体的均匀性。充气流程为每组实验之前,通过控制面板将真空泵和爆轰管道连通,使用真空泵将管道内部抽为真空,之后关闭阀门,通过压力表监测管道内压力变化,若管道内压力可维持稳定数值 5 min 即可视为爆轰管道气密性合格。再次使用真空泵对管道抽真空,之后通过控制面板关闭真空泵阀门,打开混气瓶管道阀门和混气瓶阀门将预混气缓慢充入爆轰管道,当爆轰管道内压力达到实验压力时关闭所有阀门,利用真空泵将塑胶管道中的残留预混气抽出排至室外。

1.5 点火系统

本实验装置中的点火系统所采用的点火方式为高压电火花点火,图 6 为电火花点火系统示意图。高压点火系统主要由高压电源、电容组、触发器和火花塞组成。在点火之前,首先连接电容组和高压电源,对电容组进行充电,当达到 15 kV 时关闭高压



(a) PCB113B27 压力传感器



(b) 482C 信号调节器



(c) DS1104 示波器



(d) 数据采集系统

图 4 压力传感器系统

Fig. 4 Pressure sensor system

电源,然后按下触发器,电容组可以对火花塞放电从而引爆管道内的可燃预混气体。

1.6 气体监测系统

本实验涉及的危险因素较多,可燃预混气一旦在实验过程中发生泄漏遇到电火花或其他火源非常容易引发火灾爆炸事故。因此需要设置气体监测装置对整个实验环境进行监测,针对实验气体选用了气体检测器,如图 7 所示。

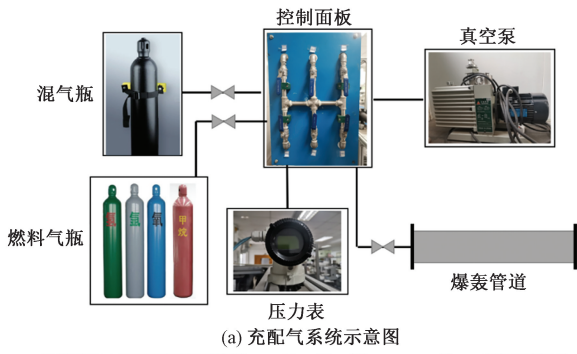


图5 充配气系统

Fig. 5 Charging and distributing system

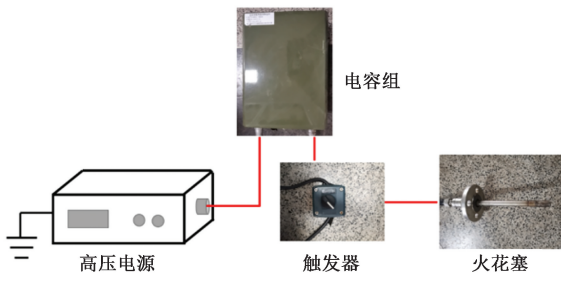


Fig. 6 Ignition system



图7 气体检测装置

Fig. 7 Gas detection device

2 爆轰实验系统数据获取与分析

爆轰实验数据通过数据采集系统收集。而后,经由专业的数据处理方法,能够从中提取出具有重

要研究价值的爆轰波特性数据,涵盖爆轰波传播速度、胞格尺寸以及结构等关键参数。

爆轰波速度可通过压力传感器系统获得。根据数据采集系统中将电信号转变成的可视化波形图像,爆轰波抵达压力传感器处时传感器信号发生突跃,在示波器上显示为出现电压波峰,如图8所示。通过电压波峰判断每个探针监测数据的时间,可以用来预估推进剂点火起爆的时间。通过管道两个相邻电探针之间的距离除以波峰出现的时间差,可以得到爆轰波的传播速度。

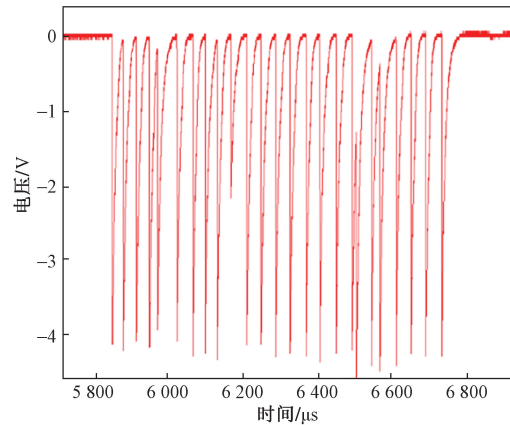


图8 电信号波形图

Fig. 8 Electrical data

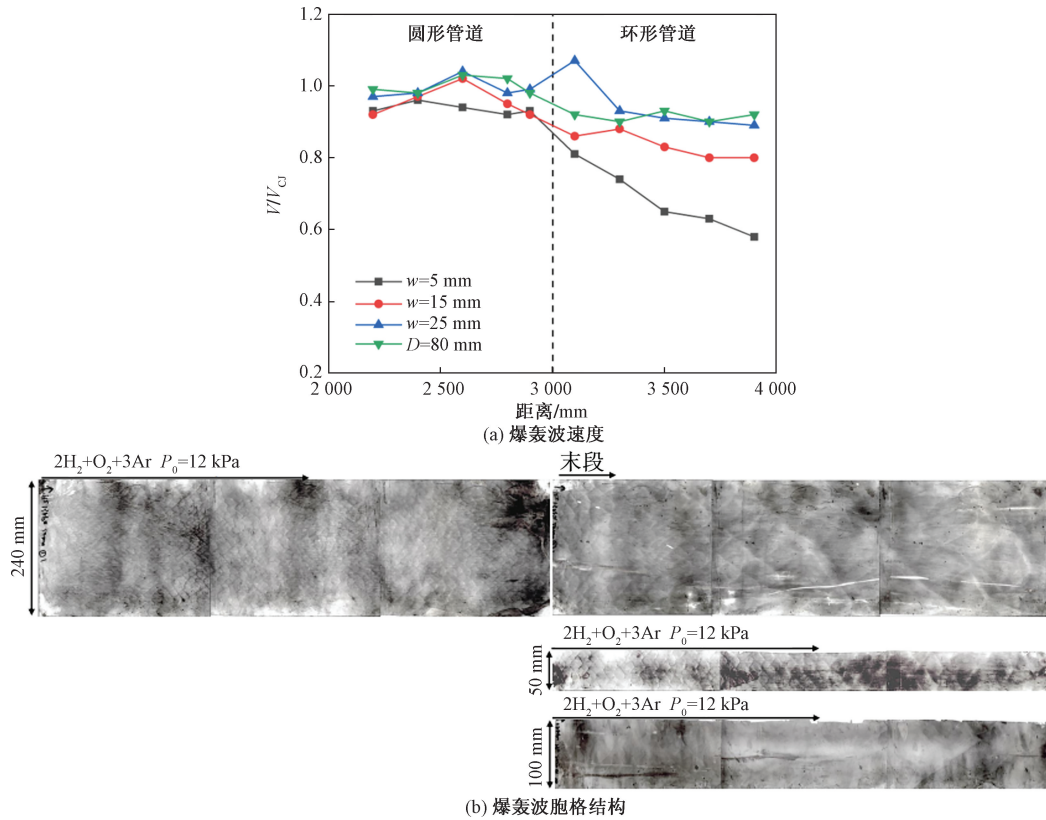
胞格尺寸及其结构能够借助烟膜系统予以获取。为了更为清晰地描绘甲烷-氧预混气的爆轰波传播结构,可对烟膜进行扫描操作,并运用PS处理技术剔除烟膜的背景层,采用50%灰度的图层作为背景,进而获取仅包含三波点轨迹线的图片。

所设计的实验装置已进行多组实验,得到的实验数据结果近似。通过本装备可以得到爆轰波速度和胞格结构数据如图9所示。实验装置得到的结果较为理想,能够明确看出,爆轰波速度的衰减,胞格结构清晰可见,满足装置设计要求。

结果(图9)显示,本装置所得数据具有明显的规律性,并且能够在不同的初始条件下进行实验,具有实验可靠性。这充分证明了本实验装置的科学性,能为研究提供更可靠的数据支持。

3 结论

(1)搭建环形扰动爆轰实验平台,实物为管径80 mm,长度为4 000 mm的高强度不锈钢光滑圆管。爆轰实验装置系统由管道系统、数据采集系统、充配气系统、点火系统及气体检测系统组成。通过在圆管中设置不同的环形管道($w = 25、15、5$ mm),并利用压力传感器、烟膜构成的数据采集系统获得爆轰波速度、三波点轨迹、胞格结构等,观察



V 为实验中测得爆轰波传播速度; V_{CJ} 为理论 CJ 速度; D 为圆形管道直径; P_0 为管道内初始压力

图 9 爆轰装置实验结果

Fig. 9 Experimental results of detonation device

环管中爆轰波的传播动力学过程, 研究环形扰动对爆轰波传播的作用。

(2) 本实验装置能够完整记录爆轰波的传播过程, 并可以清晰地观察和记录胞格结构、爆轰波速度等数据, 数据较为理想。由此可见, 环形扰动爆轰实验平台拓宽了传统实验管道的初始条件, 提出了横波及纵波结构的测试方法, 有助于几何体现爆轰波在不同截面处的三维结构。

参 考 文 献

[1] 李健. 国家重大科研设施与仪器开放共享机制研究[D]. 北京: 中央民族大学, 2017.
Li Jian. Research on open sharing mechanism of national major scientific research facilities and instruments[D]. Beijing: Minzu University of China, 2017.

[2] 韦健飞. 气氧/甲烷火箭燃烧室火焰发展规律及其对热环境的影响[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
Wei Jianfei. Combustion chamber flame development and its influence on thermal environment of gas-oxygen/methane rocket [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.

[3] 张小平, 严伟. 蓝箭航天液氧甲烷发动机研制进展[J]. 上海航天, 2019, 36(6): 83-87.
Zhang Xiaoping, Yan Wei. Development progress of liquid oxygen methane engine for Lanjian Aerospace[J]. Shanghai Aerospace, 2019, 36(6): 83-87.

[4] 杨青格, 郝京辉, 林倩, 等. 俄罗斯爆轰发动机发展现状研究[J]. 国际太空, 2021(11): 48-51.
Yang Qingge, Hao Jinghui, Lin Qian, et al. Research on the development status of Russian detonation engine[J]. International Space Science, 2021(11): 48-51.

[5] 刘彦铄, 王新赫, 张军社, 等. 太阳能甲烷重整反应器研究进展[J]. 化工进展, 2019, 38(12): 5339-5350.
Liu Yanshuo, Wang Xinhe, Zhang Junshe, et al. Research progress of solar energy methane reforming reactor[J]. Chemical Industry Progress, 2019, 38(12): 5339-5350.

[6] 武宗凯, 栗磊, 张福勇, 等. CL-20/HMX 共晶含能材料研究进展[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(35): 14882-14891.
Wu Zhongkai, Li Lei, Zhang Fuyong, et al. Research Progress of CL-20/HMX cocrystal energetic materials[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(35): 14882-14891.

[7] 刘浩雄. 江源煤矿采空区煤自燃气体特征及其对瓦斯爆炸影响研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
Liu Haoxiong. Study on characteristics of coal spontaneous combustion gas and its influence on gas explosion in goaf of Jiangyuan coal mine[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.

[8] 胡江慧. 矿井瓦斯爆炸特性研究的综述及展望[J]. 西部皮革, 2019, 41(14): 33.
Hu Jianghui. Review and prospect of research on mine gas explosion characteristics[J]. Western Leather, 2019, 41(14): 33.

[9] Zhang B, Wang C, Shen X B, et al. Velocity fluctuation analysis near detonation propagation limits for stoichiometric methane-hydro-

- gen-oxygen mixture[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2016, 41(39): 17750-17759.
- [10] 姜宗林, 滕宏辉. 气相规则胞格爆轰波起爆与传播统一框架的几个关键基础问题研究[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2012, 42(4): 421-435.
Jiang Zonglin, Teng Honghui. Research on several key basic issues of unified framework for gas phase regular cell detonation wave initiation and propagation[J]. Science in China: Physics, Mechanics and Astronomy, 2012, 42(4): 421-435.
- [11] Zhang B, Pang L, Shen X B, et al. Measurement and prediction of detonation cell size in binary fuel blends of methane/hydrogen mixtures[J]. Fuel, 2016, 172: 196-199.
- [12] Zhao H J, John H S L, Zhang Y H. Quantitative comparison of cellular patterns of stable and unstable mixtures [J]. Shock Waves, 2016, 26(5): 621-633.
- [13] 严屹然. 预混气爆轰极限与螺旋爆轰胞格结构表征研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2020.
Yan Yiran. Study on detonation limit of premixed gas and cell structure characterization of spiral detonation[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2020.
- [14] Peng W Y, Séan J C, Christopher L S, et al. Single-ended mid-infrared laser-absorption sensor for time-resolved measurements of water concentration and temperature within the annulus of a rotating detonation engine[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2018, 37(2): 1435-1443.
- [15] 赵焕娟, Lee J. H. S., 张英华, 等. 边界条件对甲烷预混气爆轰特性的影响[J]. 爆炸与冲击, 2017, 37(2): 201-207.
Zhao Huanjuan, Lee J. H. S., Zhang Yinghua, et al. Effect of boundary conditions on detonation characteristics of methane premixed gas[J]. Explosion and Shock, 2017, 37(2): 201-207.
- [16] Zhang B. The influence of wall roughness on detonation limits in hydrogen-oxygen mixture [J]. Combustion and Flame, 2016, 169: 333-339.
- [17] Bivol G Y, Golovastov S V, Golub V V. Attenuation and recovery of detonation wave after passing through acoustically absorbing section in hydrogen-air mixture at atmospheric pressure[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2016, 43: 311-314.
- [18] Wang L Q, Ma H H, Shen Z W, et al. Detonation characteristics of stoichiometric H_2-O_2 diluted with Ar/N_2 in smooth and porous tubes[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2018, 91: 345-353.
- [19] Zhang B, Liu H. The effects of large scale perturbation-generating obstacles on the propagation of detonation filled with methane-oxygen mixture[J]. Combustion and Flame, 2017, 182: 279-287.
- [20] 赵焕娟, 刘婧, 周冬雷, 等. 多孔材料对氢气爆轰的抑制作用[J]. 化工学报, 2023, 74(2): 968-976.
Zhao Huanjuan, Liu Jing, Zhou Donglei, et al. Inhibition of hydrogen detonation by porous materials [J]. Journal of Chemical Engineering, 2023, 74(2): 968-976.
- [21] Zhang B, Pang L, Gao Y. Detonation limits in binary fuel blends of methane/hydrogen mixtures[J]. Fuel, 2016, 168: 27-33.
- [22] Zhang B, Liu H, Wang C, et al. An experimental study on the detonability of gaseous hydrocarbon fuel-oxygen mixtures in narrow channels [J]. Aerospace Science and Technology, 2017, 69: 193-200.
- [23] Zhao H J, Liu K Q, Lin M, et al. Propagation characteristics of unstable detonation waves in a round tube with annular perturbation[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2023, 48(24): 9127-9138.
- [24] 王莹, 孔莲, 赵震, 等. 甲烷选择性氧化制甲醛/甲醇多相催化剂研究进展[J]. 工业催化, 2021, 29(4): 1-15.
Wang Ying, Kong Lian, Zhao Zhen, et al. Research progress of heterogeneous catalysts for selective oxidation of methane to formaldehyde/methanol[J]. Industrial Catalysis, 2021, 29(4): 1-15.
- [25] Liu J, Sun W, Gareth P H. The economic and environmental impact of power to hydrogen/power to methane facilities on hybrid power-natural gas energy systems[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(39): DOI: 10.1016/J. IJHYDENE. 2019. 11. 177.
- [26] Sun B, Zhang M. Coupled numerical analysis of variable cross-section cooling channels in LOX/methane rocket engines [J]. Heat Transfer Research, 2020, 51(13): 1181-1196.
- [27] 贺顺江, 任会兰, 李健. 环形通道内爆轰波的起爆机制[J]. 高压物理学报, 2023, 37(1): 161-170.
He Shunjiang, Ren Huilan, Li Jian. Initiation mechanism of detonation wave in an annular channel[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2023, 37(1): 161-170.
- [28] 孟豪龙, 翁春生, 武郁文, 等. 环形燃烧室中凹腔对 C_2H_4/Air 旋转爆轰流场影响的数值模拟[J]. 兵工学报, 2022, 43(5): 1063-1074.
Meng Haolong, Weng Chunsheng, Wu Yuwen, et al. Numerical simulation of cavity influence on C_2H_4/Air rotating detonation flow field in annular combustor [J]. Acta Armamentarii, 2022, 43(5): 1063-1074.
- [29] 褚驰, 翁春生, 武郁文, 等. 基于预爆轰点火方式的连续旋转爆轰发动机起爆过程分析[J]. 弹道学报, 2021, 33(1): 1-10.
Chu Chi, Weng Chunsheng, Wu Yuwen, et al. Analysis of initiation process of continuous rotating detonation engine based on pre-detonation ignition [J]. Journal of Ballistics, 2021, 33(1): 1-10.
- [30] 杨怀远, 张彭岗, 潘振华. 火焰在环形通道内形态演变的实验研究[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(15): 6291-6296.
Yang Huaiyuan, Zhang Penggang, Pan Zhenhua. Experimental investigation on flame behavior incurred channel[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(15): 6291-6296.
- [31] Yao K P, Yang P F, Wang C, et al. Characteristics of cellular structure of detonation waves propagating in annular channels[J]. Physics of Fluids, 2023, 35(10): 106104.
- [32] 赵焕娟, 张英华, 严屹然, 等. 一种记录爆轰内部结构的管道系统及其方法: CN105651810B[P]. 2018-09-14.
Zhao Huanjuan, Zhang Yinghua, Yan Yiran, et al. A pipeline system for recording the internal structure of detonation and its method; CN105651810B[P]. 2018-09-14.
- [33] 赵焕娟, 高玉坤, 严屹然, 等. 一种直观显示螺旋爆轰横波及纵波结构的爆轰管道组: CN108831275B[P]. 2020-07-31.
Zhao Huanjuan, Gao Yukun, Yan Yiran, et al. A Detonation pipeline group visually displaying the transverse and longitudinal wave structure of spiral detonation; CN108831275B[P]. 2020-07-31.