

环形扰动爆轰实验装置及方法研究

高玉坤¹, 赵焕娟¹, 张英华¹, 刘婧¹, 杨轶芙¹

(1.北京科技大学土木与资源工程学院, 北京 100083)

摘要: 含能材料的高热值伴随着易燃易爆的特性, 在管道中传播时管道的形状及几何尺寸会影响爆轰的传播。本研究搭建了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、烟膜得到爆轰波速度、三波点轨迹、胞格结构等, 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, 更好地体现边界层效应和曲率管壁对爆轰波传播的影响, 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, 完善科研仪器案例成果数据库。

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: O38; V231 **文献标识码:**

Study on the experimental device and method of annular perturbation detonation

GAO Yukun¹, ZHAO Huanjuan¹, ZHANG Yinghua¹, LIU Jing¹, YANG Yifu¹

(1.School of Civil and Resource, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: High calorific value of energetic materials comes with their flammable and explosive nature. When propagating through pipelines, the shape and geometric dimensions of the pipeline can affect the propagation of detonations. In this study, 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 pressure sensors and smoke films. The effect of annular disturbance on detonation wave propagation was studied to better reflect the influence of boundary layer effect and curvature tube wall on detonation wave propagation. This study 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, and improving the database of scientific instrument case results.

Keywords: detonation experiment; annular perturbation; cellular structure; triple point trajectory

1 前言

科学发展和科技创新离不开科研仪器的支撑。和国外发达国家比较，我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。我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，比如发动机工业^[2-4]和太阳能电池^[5]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^[6-7]。因此，学者们对含能材料的爆轰特性进行了研究，测量其爆轰传播过程中的速度波动^[8]，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之一^[9]，胞格尺寸是描述爆轰传播的重要参数^[10]。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^[11]，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^[10,12-13]。

边界条件是爆轰传播的重要影响因素^[14]，在以往实验研究中发现，使用粗糙壁^[15]、吸声壁^[16]、多孔壁^[17]和多孔材料^[18-19]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^[20-22]，近年来在诸如石油化工^[23]、电力^[24]、航天推进^[25]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。

本研究搭建了环形扰动爆轰实验装置，在光滑圆管末段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，完善科研仪器案例成果数据库。

2 气相爆轰实验技术

2.1 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五大部分组成。

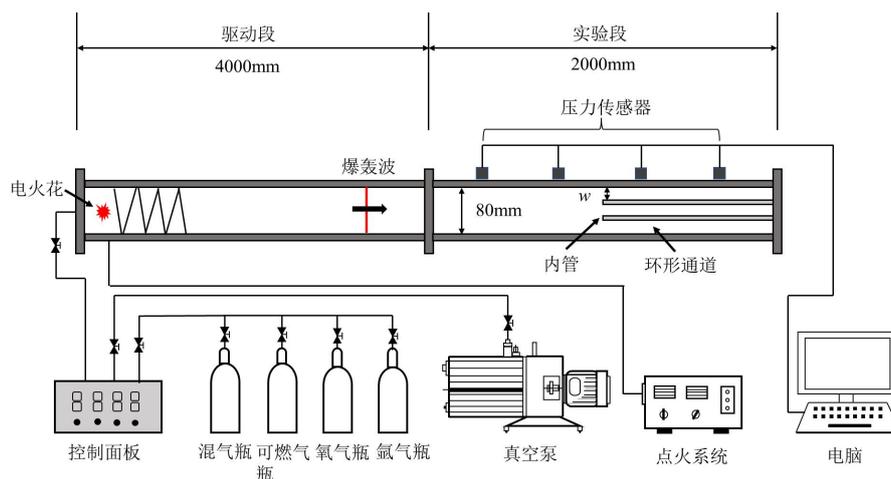


图1 环形扰动爆轰实验平台

2.2 管道系统

环形扰动爆轰实验装置的管道系统为内径 80 mm、总长 4000 mm 的高强度不锈钢光滑圆管。管道共有四节，每节长 1000 mm、厚度 5mm，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 2000mm。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。此外，实验段分为实验段前段和后段。在实验段后段中分别插入三种内径 $d=20\text{mm}$ 、 40mm 、 60mm 的扰动管构成三种尺寸的环形管道，扰动管长度均为 1000mm，厚度均为 5mm，所以得到宽度 $w=25\text{mm}$ 、 15mm 、 5mm 的环形通道。扰动管实物图如图 2 所示。

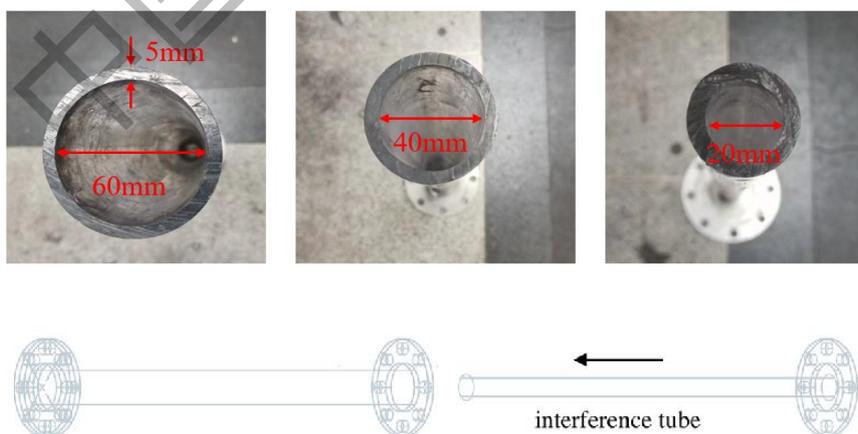


图2 扰动管实物图及安装示意图

2.3 数据采集系统

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。本文采用厚度为 1 mm，长度 1000mm 的 PVC 薄膜作为烟迹载体^[26]，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，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^[27]，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。

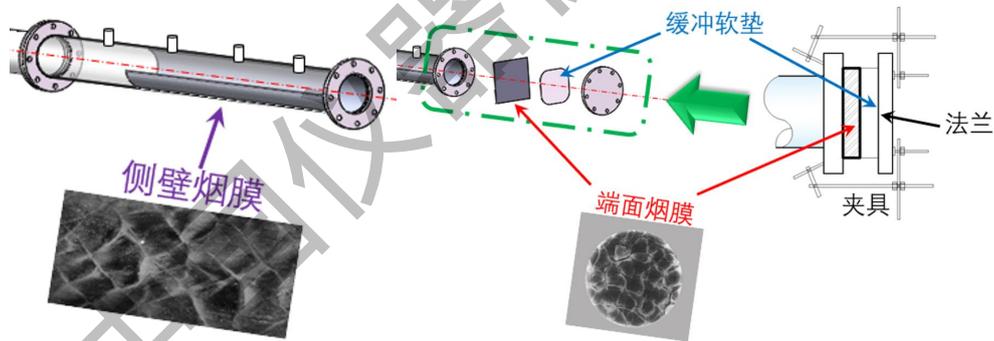


图 3 压力传感器系统

2) 压力传感器系统

爆轰波传播过程是瞬时行为，传播速度接近 2000m/s，所以捕捉爆轰波的瞬时压力对于传感器的采样频率有较高要求。因此，本文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

传感器型号	PCB113B27
测量范围	689.4kPa
灵敏度	7.25mV/kPa
分辨率	0.007kPa
共振频率	≥500kHz
响应时间	≤1.0μ sec



(a) PCB113B27 压力传感器



(b) 482C 信号调节器



(c) DS1104 示波器

图 4 压力传感器系统

2.4 充配气系统

图 5 为本文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 24h 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 分钟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。

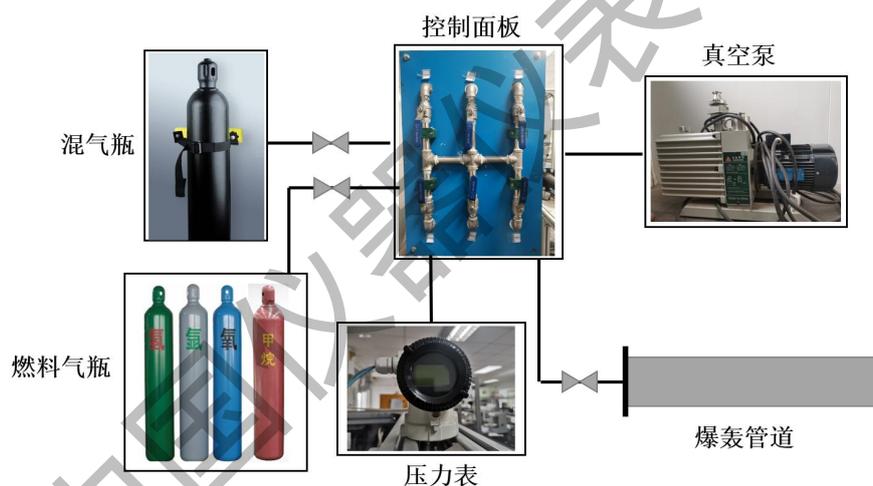


图 5 充配气系统

2.5 点火系统

本文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, 如图 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 15kV 时关闭高压电源, 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。

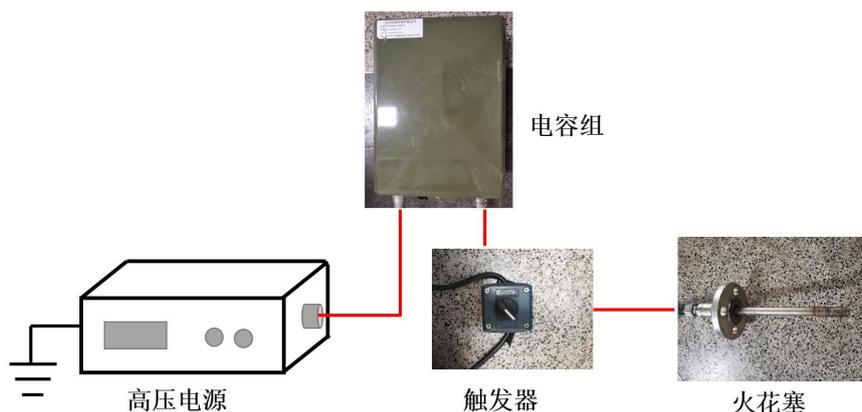


图 6 点火系统

2.6 气体监测系统

本文实验涉及到的危险因素较多,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 7 气体检测装置

3 爆轰传播特性研究结果

3.1 爆轰波速度

从图 8 中可以看出爆轰波在不同尺寸环形通道 ($w = 5\text{mm}, 15\text{mm}, 25\text{mm}$) 和光滑圆管内的速度变化。在实验段圆形管道的爆轰波速度伴随着一些波动保持在 $0.9V_{CJ} - 1V_{CJ}$ 范围内,表明在此阶段内爆轰波可以自持传播。边界条件下爆轰波在实验段前段的速度非常接近。

爆轰波传播至 3000mm 处进入环形管道后,爆轰波速度发生了不同的变化。对于 80mm 圆形管道,爆轰波速度稍有减小,这是由于边界层效应造成了能量损失,但整体依旧以 $0.9V_{CJ}$ 左右的速度继续传播,直至管道末尾。对于 15mm 环形管道,爆轰波进入后也发生了速度衰减,而且随着传播距离增大,速度也在缓慢衰减,后半段速度整体处于 $0.8V_{CJ} - 0.9V_{CJ}$ 区

间内，所以 13kPa 时爆轰波在 15mm 环形管道内可以传播。爆轰波进入 25mm 环形管道后，速度发生了一定突越，上升至 $1.1V_{CJ}$ 左右，但是很快又衰减至 $0.9V_{CJ}$ ，并随着继续向前传播而不断缓慢衰减至 $0.8V_{CJ}$ 。爆轰波进入 5mm 环形管道后无法维持，迅速失效，爆轰波速度随着传播距离增长逐渐衰减。

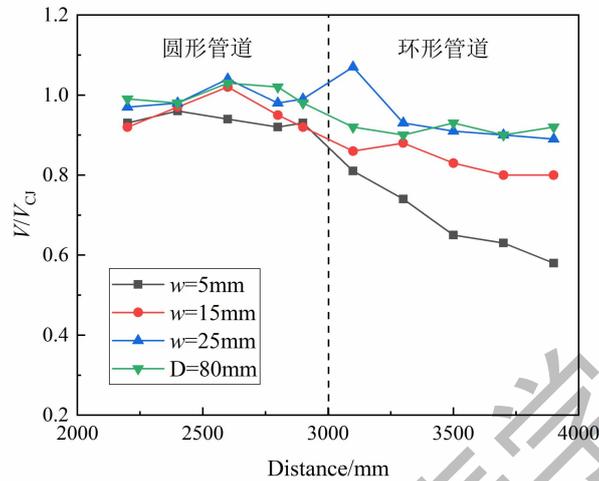


图 8 爆轰波速度

从图 9 中可以观察到，爆轰波速度依旧是随着初始压力的增大而增大。在 80mm 圆管和 25mm、15mm 环形管实验段内爆轰波的传播速度也均处于 $0.9V_{CJ} - 1V_{CJ}$ 范围内，但是 15mm 环形管道内的速度偏小，位于 $0.9V_{CJ}$ 附近。25mm 环形管道内的爆轰波速度比 80mm 圆管中的速度稍大，可以推测爆轰波在 25mm 环形管内可能发生了过驱。5mm 环形管道内的爆轰波速度在 $0.8V_{CJ}$ 以下，这是由于爆轰波在该管道内的能量损失较高，而且在实验段后段爆轰波失效，所以导致实验段整体平均速度较低。

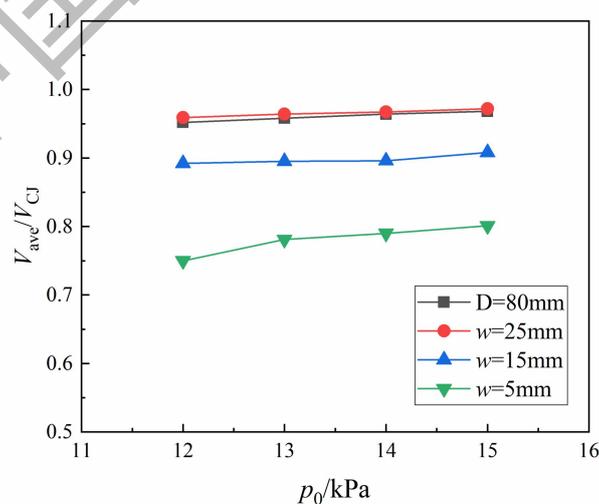


图 9 不同压力下圆管和环形管道内的爆轰平均速度

3.2 爆轰波胞格结构

图 10 为圆管不稳定气体的烟膜结果，可以发现在实验段起始区域中的爆轰波三波点轨迹是比较混乱的，也出现了很多三波点轨迹的交叉、分叉，在主胞格结构里形成了次生胞格。爆轰波传播至前段中后部，三波点轨迹趋于清晰，胞格结构规则度有所提高。同时，胞格尺寸也在逐渐增大。但是爆轰波进入实验段后段后，三波点轨迹大量减少，胞格结构骤然衰减为双头结构，而且轨迹在后段波动剧烈，以较为混乱复杂的双头结构向前传播。对于爆轰波在传播过程中出现结构衰变现象，原因应为爆轰波传播过程中管道边界和气体不稳定性共同作用，导致胞格结构在环形管道某处出现显著衰减。

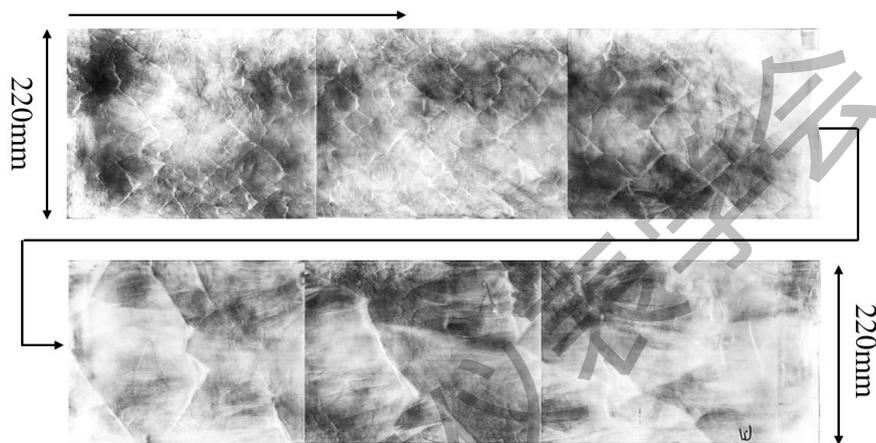
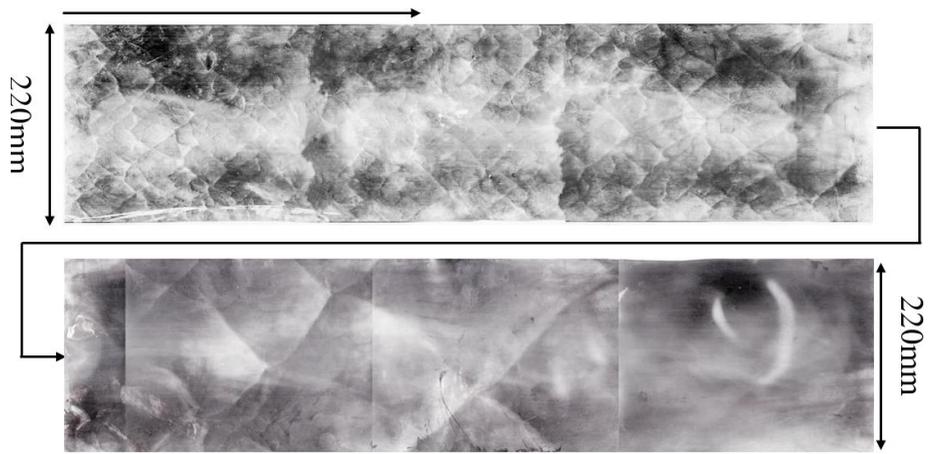
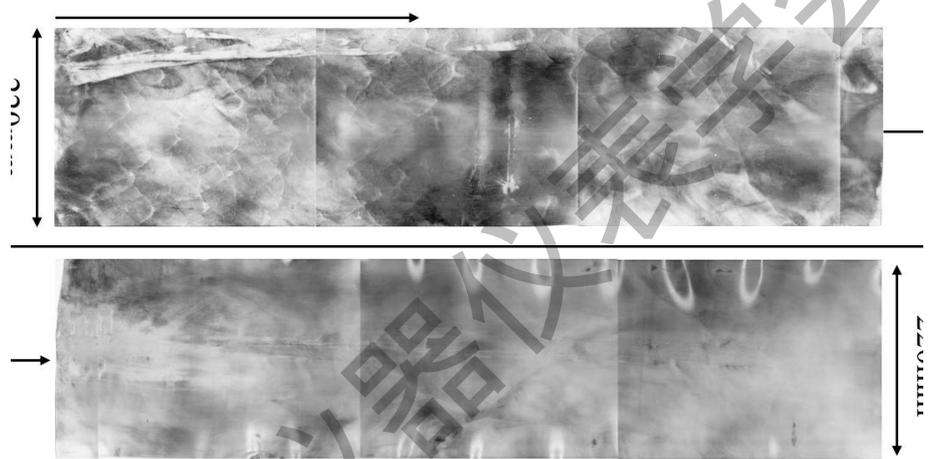


图 10 圆管内的爆轰波胞格结构

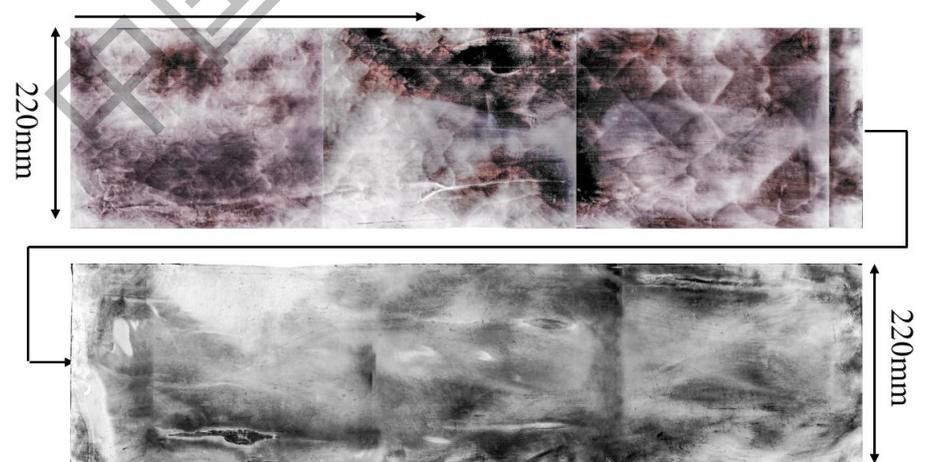
图 11 为爆轰波分别在 $w = 25 \text{ mm}$, 15 mm , 5 mm 环形管道内的烟膜结果。爆轰波从 80 mm 圆管进入 25 mm 的环形管道时，爆轰波保持多头结构。然而，多头结构在管内传播一段距离后衰减为双头结构，然后继续以双头结构传播至管道末端。当环形通道减小至 15 mm 时，从图 11 (b) 中可看出爆轰在实验段前段以多头结构传播，进入环形通道后立即衰减为二头螺旋结构，仅能在烟膜上观察到模糊的轨迹线。从图 11 (c) 中可以发现，爆轰波在前半段烟膜中为多头结构，在后半段中并未留下三波点轨迹，因此爆轰波在 5 mm 环形通道内不能传播。



(a) $w = 25\text{mm}$



(b) $w = 15\text{mm}$



(c) $w = 5\text{mm}$

图 11 环形管道壁面的爆轰波胞格结构

爆轰波在光滑管中稳定传播。当它传播到环形管时，传播方式开始改变。胞格尺寸增加，并产生一些二级细胞结构。爆轰波在 $w = 15\text{mm}$ 环形管道末端为二头螺旋结构。如图 12 所示，扰动管外壁和内壁对爆轰波产生不同的影响。内壁为凹壁，可以汇聚爆轰波的反射和衍射，从而增强爆轰波。外壁为凸壁，对爆轰波的反射和衍射有发散效应，会在一定程度上加速爆轰波的失效。外壁横波的轨道角沿爆轰传播减小，说明传播速度减小，与内壁相反。爆轰波在环形管中螺旋前进，内外壁交替汇聚和分散。根据动力学分析，爆轰波在环形管中的变速运动会产生时空畸变，表现为曲率。内壁的直径越小，就会产生更大的曲率，爆轰前部的倾角也会增加，从而产生更多的二级细胞结构。内壁上的爆轰波的胞格尺寸小于外壁上的细胞尺寸。爆轰波对应在环形管道端面出现两条轨迹线。其中一个横波顺时针旋转（A2-B1），另一个横波逆时针旋转（A1-B2）。在扰动管端面出现四条轨迹线。

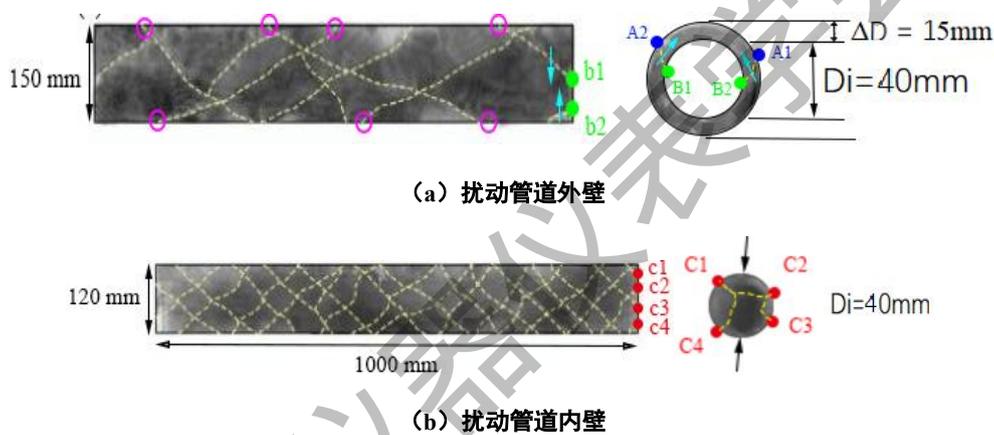


图 12 扰动管道的爆轰波胞格结构

4 结论

本研究搭建了环形扰动爆轰实验平台，在 80mm 圆管和不同的环形管道（ $w = 25\text{mm}$ ， 15mm ， 5mm ）中，利用压力传感器、烟膜获得爆轰波速度、三波点轨迹、胞格结构等，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，得出主要结论如下。

（1）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。

（2）爆轰波在 80mm 圆管和 25mm、15mm 环形管道内可以自持传播，并可观察到胞格结构。但是，在 5mm 的环形管道内传播失败且无胞格结构记录。

（3）在扰动管的内外壁中观察到不同的横波模式记录，结合管道端面的烟膜记录，内壁上的爆轰波的细胞尺寸小于外壁上的细胞尺寸，发现内壁为凹壁会增强爆轰波，外壁为凸壁会加速爆轰波的失效。

(4) 爆轰波在环形管中由于倾角的减少和更频繁的碰撞,会产生时空畸变,表现为曲率。内壁的直径越小,就会产生更大的曲率,爆轰前部的倾角也会增加,从而产生更多的二级细胞结构。

5 成果产出

本研究团队长期致力于火灾爆炸领域研究,在国家“十三五”重点专项、国家自然科学基金等科研项目的支持下,研发了环形扰动爆轰实验装置。该实验装置由管道系统、数据采集系统、充配气系统、点火系统和气体监测系统五大部分组成,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。经多年研究改进,该系统运行性能正常,技术先进,数据可靠,具有完全自主知识产权。

基于该实验装置,共获得授权国家发明专利 9 项,实用新型专利 2 项;发表实验教学及科研论文 17 篇,其中 SCIEI 期刊论文 15 篇。同时,积极探索将科研成果转化为优质实验教学资源的模式,开发基于爆轰实验装置的可燃气体爆轰实验教学内容,丰富本科实验教学内容,提高实验教学质量,该成果获第六届全国高等学校教师自制实验教学仪器设备创新大赛二等奖。

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.
- [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]. 哈尔滨工业大学, 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(06): 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.
- [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.
- [6] 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]. 中国矿业大学, 2019.
- [7] 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.
- [8] Zhang B, Wang C, Shen X B, et al. Velocity fluctuation analysis near detonation propagation

- limits for stoichiometric methane-hydrogen-oxygen mixture[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, 41(39): 17750-17759.
- [9] 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(04): 421-435.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 赵焕娟, J.H.S.Lee, 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(02): 201-207.
- [15] Zhang B. The influence of wall roughness on detonation limits in hydrogen-oxygen mixture[J]. *Combustion and Flame*, 2016, 169: 333-339.
- [16] 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.
- [17] Wang L Q, Ma H H, Shen Z W, et al. Detonation characteristics of stoichiometric H₂-O₂ diluted with Ar/N₂ in smooth and porous tubes[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2018, 91: 345-353.
- [18] 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.
- [19] 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(02): 968-976.
- [20] Zhang B, Pang L, Gao Y. Detonation limits in binary fuel blends of methane/hydrogen

- mixtures[J]. Fuel, 2016, 168: 27-33.
- [21] 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.
- [22] Zhao H J, Liu K Q, Lin M, et al. Propagation characteristics of unstable detonation waves in a round tube with annular perturbation. Int J Hydrogen Energy, 2023, 48(24); 9127-9138.
- [23] 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(04): 1-15.
- [24] 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).
- [25] Sun Bing, Zhang M, Zhang M, et al. Coupled numerical analysis of variable cross-section cooling channels in LOX/Methane rocket engines[J]. Heat Transfer Research, 2020, 51(13): 1181-1196.
- [26] 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.
- [27] 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.