

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2021.02.024

受限空间内瓦斯爆炸障碍物附近流场 结构演化实验研究*

刘梦杰¹, 徐景德¹, 张延炜¹, 秦汉圣¹, 杨满江², 李伟光²

(1. 华北科技学院, 廊坊 065201; 2. 中国舰船研究设计中心, 武汉 430064)

摘要: 为研究受限空间内瓦斯爆炸障碍物附近流场结构演化,通过实验室中尺度激波管道设置压力和火焰传感器以及激光纹影系统,在玻璃视窗处设置阻塞率为21.56%的障碍物,改变障碍物数量,对比不同工况下火焰传播、压力变化、激波运动、流场变化,分析障碍物对受限空间内瓦斯爆炸流场演化影响。实验研究发现:障碍物对于瓦斯爆炸激励效应不可忽视,加入单一障碍物使最大爆炸超压增加32.3%;最大火焰传播速度增加115.4%。在障碍物数量一定时,障碍物对瓦斯爆炸激励效应与障碍物数量呈正相关关系。同时发现障碍物对瓦斯爆炸激励效应主要表现在障碍物周围区内。激励效应主要机理是障碍物存在增加了障碍物附近湍流强度,使得火焰拉伸形变,增大了火焰锋面面积,加速了化学反应进行。

关键词: 激励效应; 瓦斯爆炸; 障碍物; 纹影

中图分类号: TD712.7

文献标识码: A

文章编号: 1001-487X(2021)02-0160-07

Experimental Study on Evolution of Flow Field Near Gas Explosion Barriers in Confined Space

LIU Meng-jie¹, XU Jing-de¹, ZHANG Yan-wei¹, QIN Han-sheng¹, YANG Man-jiang², LI Wei-guang²

(1. North China Institute of Science and Technology, Langfang 065201, China;

2. China Ship Development and Design Center, Wuhan 430064, China)

Abstract: Pressure and flame sensors and laser schlieren system were installed in a mesoscale shock tube to study the flow field evolution near the gas explosion barriers within a confined space. Those Barriers with a blocking rate of 21.56% were set at the glass window. By changing the number of barriers, the flame propagation, pressure change, shock wave movement and flow field change under different working conditions were compared to analyze the influence of barriers on the evolution of gas explosion flow field in confined space. The experimental results show that the excitation effect of barriers on gas explosion cannot be ignored. The maximum explosion overpressure increases by 32.3% and the maximum flame propagation speed increased by 115.4% when a single obstacle is added. In addition, the excitation effect of barriers on gas explosion is positively correlated with the number of barriers and mainly in the area around the barriers. The main mechanism of the excitation effect is that the presence of barriers increases the turbulence intensity near them, which induces the flame tensile deformation, increases the flame front area, and accelerates the chemical reaction.

Key words: excitation effect; gas explosion; barrier; striation technique

收稿日期: 2021-02-27

作者简介: 刘梦杰(1996-), 男, 汉族, 硕士研究生, 主要从事瓦斯爆炸研究, (E-mail) lmj114133@gmail.com。

通讯作者: 徐景德(1965-), 男, 汉族, 博士、教授, 主要从事矿井瓦斯灾害防治、安全生产监管与应急救援, (E-mail) xujd1430@126.com。

基金项目: 国家自然科学基金(51874134, 51374108); “十三五”国家重点研发计划(2016YFC0801502); 华北科技学院中央高校基本科研业务费项目(3142018017)

甲烷作为自然界一种常见的烷类气体, 在日常生活和工业中都有广泛应用。同时甲烷也是矿井瓦斯主要成分, 瓦斯爆炸事故的元凶。煤矿井下设备复杂, 巷道内不可避免存在矿车、液压支架、风机等障碍物。障碍物存在使得其附近流场演化更加复

杂,对瓦斯爆炸形成激励效应,增大了事故破坏性。因此,研究受限空间内瓦斯爆炸障碍物附近流场结构演化,对剖析障碍物对瓦斯爆炸激励效应机制有着十分重要的意义,对于降低事故破坏性和事故调查具有指导性意义。

国内外学者对于障碍物对气体爆炸特性影响也展开了大量相关研究:张增亮通过实验研究发现不同孔型板状障碍物对甲烷空气预混气爆炸存在不同影响^[1],其中三角形影响最大。景国勋通过实验研究置障条件下不同分岔角度管道中瓦斯爆炸压力变化规律发现^[2],不同形状障碍物对不同角度分叉管影响不同。李国庆通过改变障碍物形状和可燃气体浓度研究发现^[3],障碍物形状对气体爆炸影响小于气体浓度对爆炸影响。徐景德通过实验、数值模拟及理论研究对障碍物激励效应进行了理论总结^[4-6]。于高明通过研究障碍物放置方式^[7],发现交错放置比平行放置影响更大。王磊利用数值模拟手段^[8],研究了球形和方形两种形状障碍物对瓦斯爆炸影响,发现障碍物诱导作用大于反射波压力作用,加速了火焰锋面传播能力。Qin Yi 通过数值模拟研究发现^[9],障碍物对瓦斯爆炸具有激励效应,激励效应随着障碍物数量增加而增强。Damir 通过理论分析和数值模拟研究发现圆柱形障碍物对于火焰加速最为明显^[10],且火焰加速存在上限。Vadim 通过数值模拟研究发现障碍物间距和数量对预混气爆炸激励效应有明显的影响^[11]。

目前关于障碍物对瓦斯爆炸影响研究主要集中在障碍物对湍流的影响;以及障碍物类型、间距、数量和摆放方式对瓦斯爆炸激励效应影响,对于障碍物激励效应的机制和障碍物对波系演化影响研究较少。且实验探究大部分采用传感器作为测试手段,对障碍物附近可视化流场研究较少,使用激光纹影手段可以较为直观的观察爆炸流场变化。所以,采用激光纹影研究受限空间内瓦斯爆炸障碍物附近流场结构演化,通过流场演化分析瓦斯爆炸激励效应机理十分有必要。

1 障碍物对瓦斯爆炸激励效应机理分析

密闭管道内瓦斯爆炸由于尾端对激波反射作用,使得激波在管道内周期性震荡,流场变化复杂。障碍物加入,障碍物附近流场产生明显变化,管道内流场变化更加复杂。基于瓦斯爆燃的两波三区理论、激波运动理论、湍流火焰模型就障碍物对瓦斯爆炸激励效应进行机理分析。障碍物对瓦斯爆炸火焰传播激励效应主要基于三个方面:(1)障碍物的存

在阻碍气流和激波传播,激波抵达障碍物时一部分阵面发生反射沿原先相反方向传播、一部分阵面继续沿原先方向传播。激波运动过程中造成湍流度上升,化学反应速率加快,火焰加速。(2)障碍物存在使得管道变为一个变径管,气流通过障碍物段时产生涡旋,使得障碍物附近流场湍流度上升且火焰经过此段时会产生射流效果使得火焰加速。瓦斯爆炸过程中甲烷并未完全参与化学反应,瓦斯爆炸过后存在剩余瓦斯和结焦。障碍物存在使得化学反应加速,更多甲烷气体参与反应,反应更加完全,反应产生更多能量。(3)障碍物反射激波阵面抵达火焰峰面处,与火焰锋面发生相互作用,造成 RM(Richtmyer-Meshkov)不稳定^[12];由于流场密度不均,使得 RT(Rayleigh-Taylor)不稳定产生,加剧火焰失稳造成火焰加速^[13,14]。

2 实验装置与方法

2.1 实验装置

本实验采用中尺度爆炸管路(图 1),由聚对苯二甲酰对苯二胺材质圆管点火端(长 750 mm、内径 150 mm)和方形可拆卸管道(内截面为 200 mm × 200 mm)组成。总长 17.05 m,沿管道于上壁面和侧壁面设置压力火焰传感器,管路 9.05m 处设有直径为 250 mm 的 K9 玻璃观察窗。爆炸超压测试选用美国 PCB 公司 ICP 压电传感器(型号为 M113A24)进行压力测量,最大量程 6.9 MPa,线性满足 $\leq 1\%$ FS,谐振频率 ≥ 500 KHz,上升时间 $\leq 1 \mu\text{s}$ 。采集频率和量程均满足瓦斯爆炸测量需求。火焰测量系统为自行研制,由光电信号转换器(光电二极管,型号为 GT-101,中电集团重庆第 44 研究所)将火焰的光信号转换为电信号,然后再导通包含分压电阻的电路,利用 AD 卡记录电阻的分压信号。通过火焰产生亮度记录火焰出现及强度。数采系统使用东华公司 DH8302 用于进行压力、火焰信号采集分析。点火系统采用自制脉冲式点火器实现高压放电产生火花,通过同步装置输入 TTL 电平触发,引燃激波管内的预混气。纹影系统采用 Z 字型光路,纹影仪为两个凹球反射镜(直径 260 mm、 $f=2.6$ m),脉冲激光光源采用红宝石激光器(波长 694.3 nm,激光强度 5 W),相机使用加拿大 mega speed 公司相机(型号 ms70k),每秒钟可采集 5000 张图像满足纹影捕获激波、火焰要求。整个系统由同步系统串联为一个整体,通过同步系统输出 TTL 电平触发电火装置和数据采集装置。



图1 实验装置

Fig. 1 Experimental apparatus

2.2 工况设置

障碍物采用实心长方体钢块(长115 mm、宽115 mm、高75 mm)阻塞率为21.56%。本实验采用3种工况。

工况1 全管道充入9.5%浓度甲烷-空气预混气(当量比=1)点火能量255mJ,模拟井下长直巷内瓦斯爆炸。沿管道在2 m、4.5 m、7.3 m、8.75 m、9.35 m、10.8 m、13.3 m、15.8 m处分别设置压力、火焰传感器。纹影拍摄位置为观察窗处(距点火端9.05 m)。

工况2和工况3分别在工况1的基础之上在观察窗处(9.05 m)设置一个的障碍物和两个障碍物,模拟井下矿车存在时瓦斯爆炸。见图2。

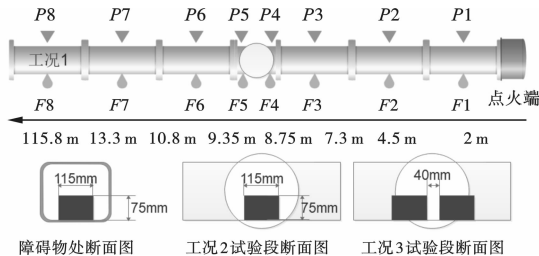


图2 工况示意图

Fig. 2 Schematic diagram of working conditions

2.3 实验方法

(1) 配制预混气:根据 Dalton 分压定律将甲烷

和空气分别充入预混气罐,配制完成之后罐内预混8~12 h,保证预混充分。

(2) 障碍物设置:将实验段管道拆开,放入障碍物后封闭管道检测气密性。

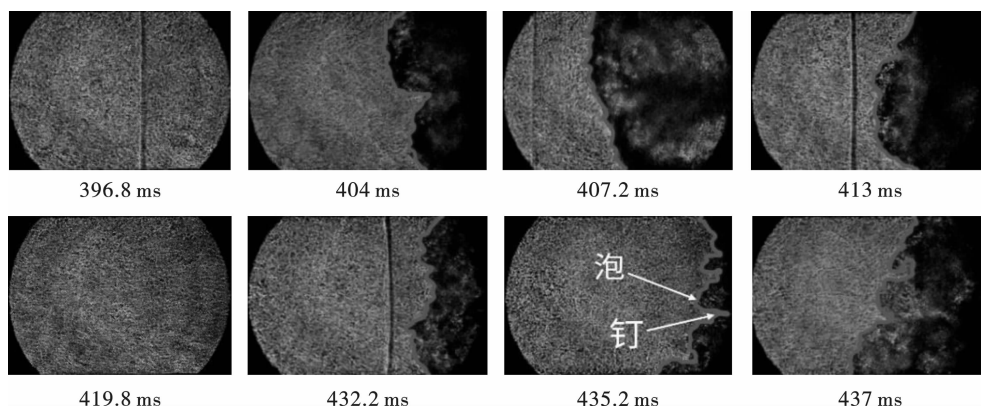
(3) 进气:对全管道进行抽真空操作后充入1 atm 预混气体。

(4) 点火:将点火器电压调整至15 kV,通过同步系统控制同时触发电火系统、压力采集系统、火焰信号采集系统和高速相机。实现点火及数据采集。

3 实验结果分析

3.1 激光纹影图像分析

图3为工况1 激波火焰纹影图像。由图3可见396.8 ms 由尾端反射的一道激波经过观察窗。404 ms 火焰首次到达观察窗,火焰明显呈现变形 Tulip 形态。形成此形态火焰主要是由于火焰和激波相互作用、DL(Darrieus-Landau)不稳定性和 Taylor 不稳定、已燃气体的涡旋运动等相互作用导致。因为流场中存在多道激波,在多道激波作用下,火焰形态不断变化。运动激波后气体存在伴随运动,随着多道激波经过观察窗,观察窗处流场流动方向由向尾端流动转为向点火端流动。随着流场向点火端处流动速度增加,火焰也呈现由减速逐渐转向回流的情况。由图3也可明显观察到407.2 ms 时火焰前锋到达观察窗中部,随着流场流动速度大于火焰传播速度,于419.8 ms 火焰完全退至观察窗之前。432.2 ms 火焰重新传播至观察窗,此时一道激波运行至火焰前锋之前,435.2 ms 火焰与激波相遇后出现回流。由于火焰锋面前后气体密度存在差异,激波与火焰相遇后发生 RM(Richtmyer-Meshkov)不稳定。在435.2 ms 图像中明显观察到由于界面扰动产生的“钉”、“泡”结构。在此基础上火焰进一步失稳发生 KH(Kelvin-Helmholtz)不稳定,火焰对未燃气体进行卷吸,使得火焰加速。



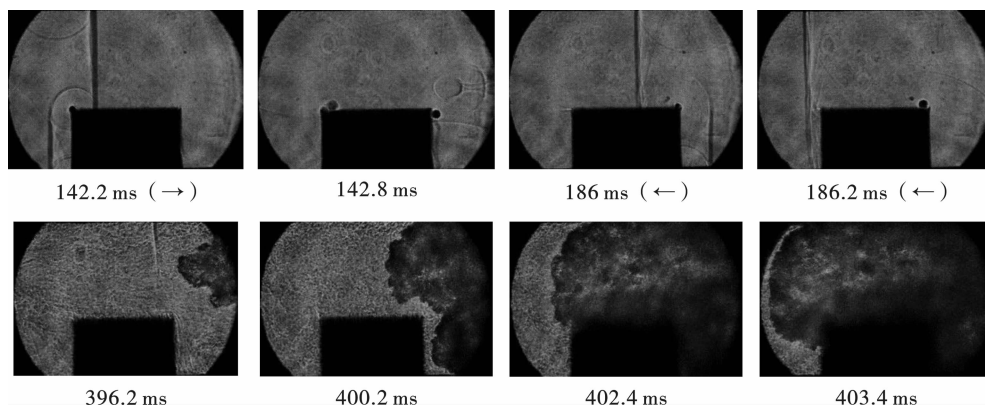
注:图中激波均为向右移动。点火端位于右侧。图中红色为火焰前锋边界

图3 激光纹影图像(工况1)

Fig. 3 Laser schlieren image(condition 1)

由图4可见激波通过障碍物区域时,激波的绕射和反射。由186.2 ms图像可见激波阵面已近发生畸变,但此阵面在传播过程中由于壁面约束作用,会逐渐恢复为平面激波。经过障碍物反射后激波阵面向相反方向传播,障碍物反射激波在传播过程中不断对气流扰动。由于反射激波阵面位于界面下方,使管内气流上部和下部流速和压力出现不平衡。使得障碍物周围流场内湍流速度急剧上升。点火端反射激波经过障碍物反射后会向火焰锋面方向传播,最终与火焰锋面相遇,对火焰锋面造成扰动。同时波后气流在经过障碍物时产生涡团,使得障碍物附近湍流速度上升。由图4可以观察到396.2 ms在火

焰未到达障碍物时,火焰就发生了锐角化形变,火焰上偏移。观察400.2 ms图像,面向障碍物的火焰下端出现向内凹陷,火焰褶皱数量明显增加。402.4~403.4 ms火焰前锋经过障碍物,观察图像发现过障碍物后火焰出现向下内卷,火焰失稳造成湍流加剧使得火焰前锋阵面褶皱增大。同时此段可以视作一个突扩管结构,形成射流。使得火焰进一步加速。对比工况1和工况2激光纹影图像发现,障碍物加入使得激波在障碍物处发生反射和绕射,使瓦斯爆炸流场紊乱产生多道激波阵面和横波。火焰抵达障碍物处发生拉伸和形变火焰褶皱增多,增大火焰锋面面积,使得火焰失稳加速。



注:箭头方向为激波运动方向

图4 激光纹影图像(工况2)

Fig. 4 Laser schlieren image(condition 2)

由图5工况3激波火焰相互作用图可见激波阵面经过第一个障碍物后,已经不是一个完整阵面。激波在第一个障碍物尾端产生马赫反射生成弧形冲击波,经过第二个障碍物时继续在边角位置发生马赫反射使得流场内波系进一步紊乱,障碍物间冲击波阵面发生交叉,产生多道错乱波系。波后气流流经障碍物时在障碍物周围明显可以观察到涡团产生。由图5可见,工况3经过第一个障碍物时火焰形变与工况2类似,在火焰未到达障碍物时,火焰就发生了锐角化形变,火焰向上偏移,面向障碍物的火焰下端出现向内凹陷。387.6~388.4 ms火焰前锋经过第一个障碍物,在第一障碍物后火焰发生向下内卷,火焰充入两障碍物间隙。火焰锋面在389.2 ms抵达第二个障碍物,携带着火焰内卷趋势加速通过第二个障碍物。第二个障碍物的存在增大了此处激励效应,使得火焰加速喷射出障碍物区域。对比工况2和工况3激光纹影图像,相较于单一障碍物,两个障碍物存在使得流场更加紊乱。随着障碍物数量增加,火焰褶皱面积增大,化学反应加速,

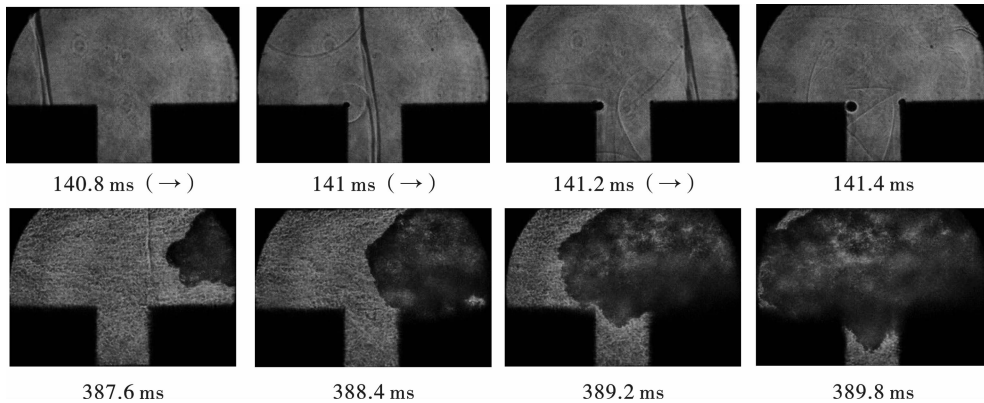
火焰加速传播。

3.2 压力、火焰传感器信号分析

由图6可见,工况1未加入障碍物的空载管道P4点压力图像。管道内瓦斯爆炸,由于管道封闭,冲击波在管道内不断反射,使得管道内压力不断震荡。瓦斯爆炸首先产生一道前驱冲击波a,后续由于火焰热辐射形成的一道压缩波b。经过尾端盲板反射后前驱冲击波c和压缩波d由尾端继续向点火端传播。这两道反射波性质上都属于压缩波,无论从哪个方向经过该点都会使得压力上升。反射波经过前端点火端反射和火焰作用后波形更加复杂紊乱,使得管道内压力震荡更加剧烈。主要是因为:(1)点火端直径与管道不同,经过点火端反射后首先出现一个类环形激波,后续反射一个圆面激波。类环形激波发生激波聚焦,重新发展为一个平面。圆面激波因为管壁约束作用,随着向前传播也会重新发展为一个平面,这就由一道激波阵面衍生出两道激波阵面。(2)激波与火焰阵面相互作用,激波由已燃气体穿过火焰峰面进入未燃气体时,由于已

燃气体密度低未燃气体密度高。激波发生一个透射和一个反射,这两道波均为激波。这就产生多道激

波使得波系进一步紊乱。进而解释了压力图像由“突跃-缓降”转变为“起伏不定”的原因。



注:箭头方向为激波运动方向

图 5 激光纹影图像(工况 3)

Fig. 5 Laser schlieren image(condition 3)

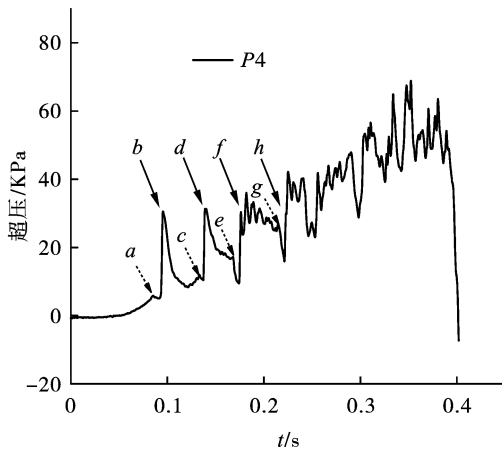


图 6 P4 传感器压力信号(工况 1)

Fig. 6 Pressure signal of P4 sensor(condition 1)

图 7 为各测点最大超压图,由图像可见,障碍物之前三个工况最大超压基本一致,障碍物之后不同工况超压情况出现明显差异。未加障碍物管道最大超压一直呈现上升趋势;加入障碍物后最大超压在 P7 传感器处达到最大值,在尾端呈现下降趋势。

由图 8 可见,在爆炸初期,压力曲线基本一致。随着火焰传播至障碍物附近位置,加入障碍物的压力曲线起伏波动更加剧烈,随着障碍物增加波动程度增大;超压上升明显增大。结合火焰图像分析,火焰经过障碍物后失稳,前锋阵面面积增大,化学反应加快产生更多能量使得障碍物后超压上升,随着障碍物数量增加,湍流度上升,火焰进一步失稳加速,使得化学反应加快产生更多能量导致压力进一步上升。随着火焰传播,障碍物对瓦斯爆炸的激励效应逐渐减弱。火焰速度降低,化学反应减弱,产生超压降低,逐渐趋近未加障碍物条件。

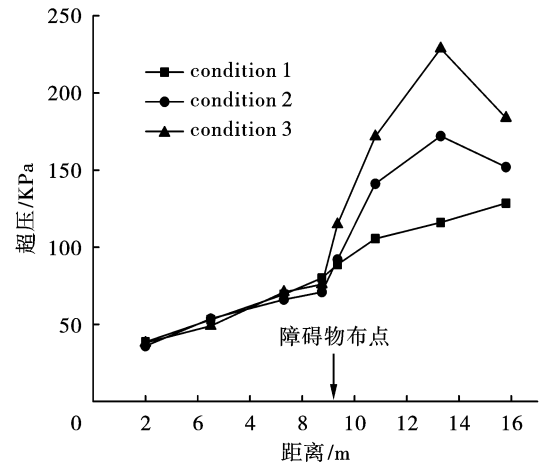


图 7 测点最大超压

Fig. 7 Maximum overpressure at measuring

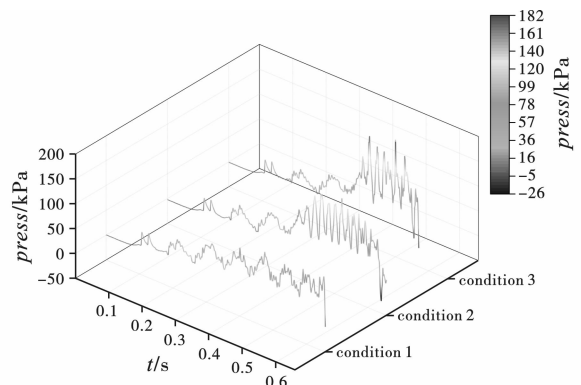


图 8 不同工况尾端压力曲线

Fig. 8 Tail pressure curves under different working conditions

图 9 为工况 1、2 火焰速度图,V1 为 F1 - F2 之间平均速度、V2 为 F2 - F3 间平均速度以此类推,可见加入障碍物后火焰传播速度出现明显变化。在障

碍物附近火焰传播速度明显上升,在传感器 $F3 - F6$ 传感器间出现明显加速,对比工况 1 和工况 2,工况 2 的 $F3 - F4$ 间平均速度为 46.819 m/s,相对工况 1 增长 155.1%。 $F4 - F5$ 传感器间平均速度为 56.926 m/s,增长 483.7%, $F5 - F6$ 平均速度 30.571 m/s,增加 67.5%。障碍物对于火焰传播激励效应主要作用于障碍物前后区间。且经过障碍物后速度逐渐恢复为未加障碍物水平。

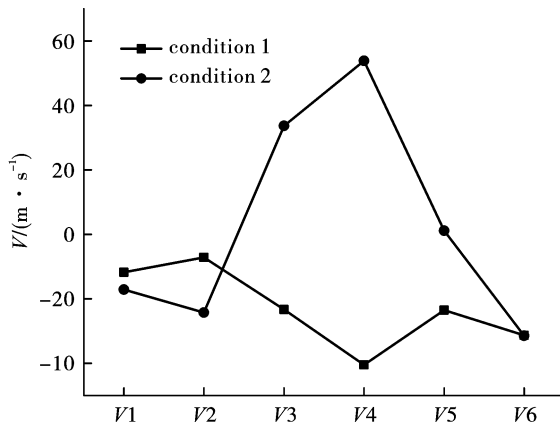


图9 工况 1、2 火焰速度图

Fig. 9 Flame velocity diagram in conditions 1 and 2

表 1 为不同障碍物条件下压力火焰特征,由表 1 可见随着障碍物数量增加最大压力呈上升趋势。未加障碍物管道内瓦斯爆炸最大超压为 128.503 kPa。加入一个障碍物后最大超压达到 172.071 kPa,相比工况 1 增长 32.3%。加入两个障碍物时最大超压达到 228.808 kPa 相对工况 2 超压增长 33.0%;相对工况 1 增长 78.1%。工况 1 最大火焰传播速度为 26.425 m/s,加入一个障碍物的工况 2 火焰传播速度为 56.926 m/s,相对工况 1 最大火焰传播速度增加 115.4%。加入两个障碍物的工况 3 最大火焰传播速度为 69.505 m/s,相对工况 1 最大火焰传播速度增长 163.0%,相对工况 2 最大火焰传播速度增长 16.0%。可见,加入障碍物后瓦斯爆炸最大超压和最大火焰传播速度都有了显著提升,且随着障碍物数量增加最大超压和最大火焰传播速度也持续增加。障碍物加入使得瓦斯爆炸更具破坏性,随着障碍物数量增加瓦斯爆炸破坏性上升。

表 1 压力火焰特征

Table 1 Characteristics of pressure flame

工况	最大超压/kPa	最大火焰速度/($m \cdot s^{-1}$)
1	128.503	26.425
2	172.071	56.926
3	228.808	69.505

4 结论

(1) 激波在障碍物处发生反射和绕射,使瓦斯爆炸流场紊乱产生多道激波阵面和横波。火焰抵达障碍物处发生拉伸和形变火焰褶皱增多,增大火焰锋面面积,使得火焰失稳加速。增加障碍物数量导致波系进一步紊乱,火焰形变加剧。

(2) 障碍物存在使瓦斯爆炸最大超压和最大火焰传播速度上升。随着障碍物增加,激励效应增强。障碍物对瓦斯爆炸激励效应主要作用于障碍物周围区间,随着障碍物数量增加,激励效应影响区间增大。

(3) 在实际生产过程中,应减少避免巷道中障碍物尤其是多个障碍物队列式分布存在,以降低事故危险程度。在事故调查之中可以通过瓦斯爆炸对巷道毁伤判断障碍物参与情况及火源位置。

参考文献 (References)

- [1] 张增亮,王 昕,王昊平. 带孔障碍物对管道中可燃气体爆炸特性的影响[J]. 化工学报,2019,70(11):4497-4503.
- [1] ZHANG Zeng-liang, WANG Xin, WANG Hao-ping. Influence of installation of perforated obstacles in pipelines on explosive characteristics of combustible gases[J]. CIESC Journal, 2019, 70(11): 4497-4503. (in Chinese)
- [2] 景国勋,贺 祥,班 涛,等. 障碍物在分岔附近对瓦斯爆炸压力影响的实验研究[J]. 中国安全生产科学技术,2020,16(11):128-133.
- [2] JING Guo-xun, HE Xiang, BAN Tao, et al. Experimental study on influence of obstacles near bifurcation on gas explosion pressure[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2020, 16(11): 128-133. (in Chinese)
- [3] 李国庆,杜 扬,白 洁,等. 平板障碍物通道形状对油气爆炸传播特性影响[J]. 化工学报,2020,71(4):1912-1921.
- [3] LI Guo-qing, DU Yang, BAI Jie, et al. Effects of flat obstacle channel shapes on characteristics of gasoline-air explosion[J]. CIESC Journal, 2020, 71(4): 1912-1921. (in Chinese)
- [4] 徐景德,张延炜,胡 洋,等. 管道内金属网对瓦斯爆炸冲击波抑制作用的实验研究[J]. 煤矿安全,2021,52(1):20-24.
- [4] XU Jing-de, ZHANG Yan-wei, HU Yang, et al. Experimental study on suppression effect of metal mesh in pipeline on gas explosion shock wave[J]. Safety in Coal Mines, 2021, 52(1): 20-24. (in Chinese)
- [5] 徐景德,冯若尘,田思雨,等. 100%置障与浓度梯度耦合作用甲烷爆炸激励效应实验研究[J]. 爆破,2020,

- 37(1):134-140.
- [5] XU Jing-de, FENG Ruo-chen, TIAN Si-yu, et al. Excitation effect of methane explosion propagation under condition of coupling of 100% blocking probability and concentration gradient[J]. *Blasting*, 2020, 37(1):134-140. (in Chinese)
- [6] 徐景德, 田思雨, 刘振乾, 等. 甲烷爆炸传播过程膜状障碍物的激励效应研究[J]. *中国安全生产科学技术*, 2019, 15(7):69-74.
- [6] XU Jing-de, TIAN Si-yu, LIU Zheng-qian, et al. Research on excitation effect of membrane obstacle in propagation process of methane explosion[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2019, 15(7):69-74. (in Chinese)
- [7] 余明高, 纪文涛, 温小萍, 等. 交错障碍物对瓦斯爆炸影响的实验研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2013, 42(3):349-354.
- [7] YU Ming-gao, JI Wen-tao, WEN Xiao-ping, et al. Experimental study of the influence of staggered obstacles on gas explosion[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2013, 42(3):349-354. (in Chinese)
- [8] 王磊, 司荣军, 苗磊, 等. 障碍物压力反射特性对瓦斯爆炸传播影响的数值模拟研究[J]. *中国安全生产科学技术*, 2020, 16(8):106-112.
- [8] WANG Lei, SI Rong-jun, MIAO Lei, et al. Numerical simulation research on influence of obstacle pressure reflection characteristics on gas explosion propagation[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2020, 16(8):106-112. (in Chinese)
- [9] QIN Yi, CHEN Xiao-wei. Flame propagation of premixed hydrogen-air explosion in a closed duct with obstacles[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46(2):2684-2701.
- [10] DAMIR Valiev, VITALY Bychkov, V'YACHESLAV Akkerman, et al. Flame acceleration in channels with obstacles in the deflagration-to-detonation transition[J]. *Combustion and Flame*, 2009, 157(5):1012-1021.
- [11] VADIM N Gamezo, TAKANOBU Ogawa, ELAINE S O-ran. Flame acceleration and DDT in channels with obstacles: Effect of obstacle spacing[J]. *Combustion and Flame*, 2008, 155(1):302-315.
- [12] 丛洲洋, 郭旭, 司廷. 反射激波诱导界面不稳定性研究进展[J]. *中国科学:物理学 力学 天文学*, 2020, 50(10):18-39.
- [12] CONG Z Y, GUO X, SI T. Advances in interfacial instability induced by reshock(in Chinese)[J]. *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2020, 50(10):18-39. (in Chinese)
- [13] 姜宗林. 气体爆轰物理及其统一框架理论[M]. 北京:科学技术出版社, 2020:62-78.
- [14] ZHU Y F, WANG D M, SHAO Z L, et al. Investigation on the overpressure of methane-air mixture gas explosions in straight large-scale tunnels[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2020, 135(C):101-112.

英文编辑:袁必和

(上接第36页)

- [6] 张小军. 台阶爆破振动高程效应理论及应用[D]. 北京:北京科技大学, 2021.
- [6] ZHANG X J. Theoretical study and application of height effect of step blasting vibration[D]. Beijing:University of Science and Technology Beijing, 2021. (in Chinese)
- [7] 张耿城, 郭连军, 贾建军, 等. 某露天铁矿爆破振动对边坡的动态响应特征研究[J]. *中国矿业*, 2020, 29(12):165-169.
- [7] ZHANG G C, GUO L J, JIA J J, et al. Study on dynamic response characteristics of blasting vibration of an open-pit iron mine to slope[J]. *China Mining Industry*, 2020, 29(12):165-169. (in Chinese)
- [8] 董英健, 于妍宁, 郭连军, 等. 高寒地区矿山爆破振动对边坡的响应特征分析[J]. *中国矿业*, 2020, 29(11):131-135.
- [8] DONG Y J, YU Y N, GUO L J, et al. Response characteristics of mine blasting vibration to slope in alpine region[J]. *China Mining Industry*, 2020, 29(11):131-135. (in Chinese)
- [9] 汪禹, 仪海豹, 杨海涛, 等. 某露天矿爆破振动的传播规律及其对周边设施的影响[J]. *现代矿业*, 2020, 36(7):47-51.
- [9] WANG Y, YI H B, YANG H T, et al. Propagation law of blasting vibration in an open pit mine and its influence on surrounding facilities[J]. *Modern Mining*, 2020, 36(7):47-51. (in Chinese)
- [10] 陈能革, 刘文胜, 郎永忠. 某露天铁矿爆破振动规律研究[J]. *现代矿业*, 2019, 35(10):88-91.
- [10] CHEN N G, LIU W S, LANG Y Z. Study on blasting vibration law of an open-pit iron mine[J]. *Modern Mining*, 2019, 35(10):88-91. (in Chinese)
- [11] 袁玉宝, 雷振, 高正华, 等. 台阶爆破下振速传播规律公式的应用和对比[J]. *煤矿爆破*, 2019, 37(5):8-12.
- [11] YUAN Y B, LEI Z, GAO Z H, et al. Application and comparison of vibration velocity propagation law formula under bench blasting[J]. *Coal Mine Blasting*, 2019, 37(5):8-12. (in Chinese)

英文编辑:陈东方