

文章编号: 1001-4888(2024)03-0315-08

# 隔离墙作用下欠膨胀射流 氢气点火爆炸的实验研究\*

马梦飞<sup>1,2</sup>, 王昌建<sup>1,3</sup>, 赵卫平<sup>1,2</sup>, 孙林<sup>3</sup>, 张爱凤<sup>1,2</sup>

(1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽合肥 230009;

2. 安徽国际氢能安全联合研究中心, 安徽合肥 230009; 3. 安全关键工业测控教育部工程研究中心, 安徽合肥 230009)

**摘要:** 为了降低欠膨胀射流氢气点火爆炸的危险性, 通过改变隔离墙与喷嘴间距离、隔离墙长度, 开展欠膨胀射流氢气点火爆炸时火焰行为和超压变化规律的实验研究。采用高速相机拍摄火焰形态, 采用压力传感器测量超压。结果表明: 在点火爆炸初期, 火焰前锋在点火位置以扇形向外扩散; 随后受射流影响, 逐渐演变成三角形; 火焰前锋到达墙面后逐渐熄灭; 形成的射流火焰沿墙体向上、下 2 个方向铺展且速度基本一致; 墙体长度为 70cm 时即可有效防止火焰向墙后蔓延; 爆炸受隔离墙和地面影响, 超压出现 3 个峰值; 随着隔离墙与喷嘴间距离的增加, 第一超压峰值在一定范围内波动, 第二超压峰值逐渐减小; 随着墙体长度的增加, 最大超压呈现先增大后减小的趋势。

**关键词:** 氢气爆炸; 隔离墙; 火焰前锋; 超压

**中图分类号:** O383

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.7520/1001-4888-23-097

## 0 引言

近年来, 随着化石能源日益减少以及环境污染问题, 许多国家和地区, 开始注重清洁能源的发展。由于氢能是一种来源丰富、应用广泛的二次能源, 被誉为 21 世纪最具发展潜力的清洁能源之一<sup>[1]</sup>。与其他能源相比, 氢具有可再生、零排放的特点, 能量密度约为汽油、柴油的 3 倍。加氢站是氢能汽车运行不可或缺的基础设施, 由于氢气点火能量低(仅为 0.017mJ<sup>[2]</sup>)且燃烧极限宽(4%~75%)<sup>[3]</sup>, 一旦泄漏, 可能会导致灾难性的爆炸事故。为了降低射流氢气爆炸的危害, 不少学者<sup>[4-15]</sup>对射流氢气爆炸特性及其抑制措施做了相关研究。

为了研究射流氢气爆炸时的火焰和超压特征, KOBAYASHI 等<sup>[4-5]</sup>测量了供给压力为 90MPa 的氢气泄漏时的浓度、温度变化, 还发展了爆炸后火焰长度、超压与流量的关系模型。TAKENO 等<sup>[6]</sup>研发了一种测量瞬态氢气浓度的装置, 该装置提高了测量的准确性; 他们还探究了多种因素对爆炸超压的影响, 发现爆炸超压不仅取决于氢和空气混合物的浓度、体积, 还取决于点火前的湍流特性。TANAKA 等<sup>[7]</sup>通过实验发现加氢站受限空间内氢气浓度为 30% 时爆炸最强烈, 但是加氢机一旦发生氢气泄漏, 在很短的时间内(小于 1 分钟)氢气浓度可以降到低于 15%, 所以爆炸超压很小, 相对更安全。

为了降低氢气爆炸的危害, 多数学者采用隔离墙抑爆控火。SCHEFER 等<sup>[8-9]</sup>研究了单墙和多墙结构对瞬态射流氢气爆炸的影响, 发现隔离墙对火焰的阻挡效果好, 火焰无法绕到墙后。相对于其他墙

\* 收稿日期: 2023-05-15; 修回日期: 2023-07-04

基金项目: 国家重点研发计划项目(项目号: 2021YFB4001004); 安徽省重点研发计划项目(项目号: 202104b11020019)

通信作者: 王昌建(1975-), 男, 博士, 教授, 博士生导师。主要研究领域: 氢能安全与高效利用。Email: chjwang@hfut.edu.cn

型,三墙结构的墙后超压最小。HOUF 等<sup>[10]</sup>对隔离墙抑爆行为进行了建模并结合实验数据验证了模型的准确性,发现降低三墙结构之间的夹角导致墙前超压增大;点火延迟时间 1s 内,三墙结构超压会迅速上升,然后超压接近恒定值;在 25s 时,各种结构隔离墙中火焰辐射都达到最大,三墙结构前后热辐射相差 130 倍。TCHOUVELEV 等<sup>[11]</sup>利用 CFD 模拟了小尺寸隔离墙对供给压力为 70MPa 的氢气泄漏的影响,结果发现,氢气撞墙后会形成一个滞留区,此处压力远大于环境压力,氢气浓度高;隔离墙可有效降低壁后氢气浓度,但氢气只需 0.2s 就可蔓延到墙后。GROETHE 等<sup>[12]</sup>利用 4m 高、10m 宽的隔离墙来阻隔 5.26m<sup>3</sup>的氢气爆炸,实验发现墙后超压和比冲(超压脉冲随时间的积分)显著降低,且将现有隔离墙高度提高至少 2 倍才能有效降低爆炸超压。YU 等<sup>[13]</sup>利用 SCHEFER 等<sup>[14]</sup>提出的虚喷嘴理论以及简化的真实气体状态方程,模拟了氢气供给压力为 90MPa 时射流氢气撞击隔离墙的行为,并研究了火焰长度、火焰偏转角与隔离墙间不同高度差的关系,结果发现火焰长度随高度差的增加而减小,偏转角随高度差的增加而增大。WILLOUGHBY 等<sup>[15]</sup>比较了 90°和 60°倾角的隔离墙对射流氢气爆炸超压和热辐射的影响,他们发现,对于不同倾角的隔离墙,地面上压力传感器检测的数值无明显变化,但倾角为 90°时墙后热辐射更低,防火性能更加优越。

综上所述,目前大部分研究只集中在隔离墙对瞬态射流氢气爆炸的影响方面,而且研究的内容只局限于墙体的结构和倾斜角度,对隔离墙与喷口间距离以及隔离墙长度没有涉及,此外,前人<sup>[8-15]</sup>很少涉及爆炸超压机理的研究,故本文开展射流氢气爆炸与隔离墙作用的实验,分析研究爆炸超压诱导机理,并探讨隔离墙与喷口间距离以及隔离墙长度对火焰行为和爆炸超压的影响机制。

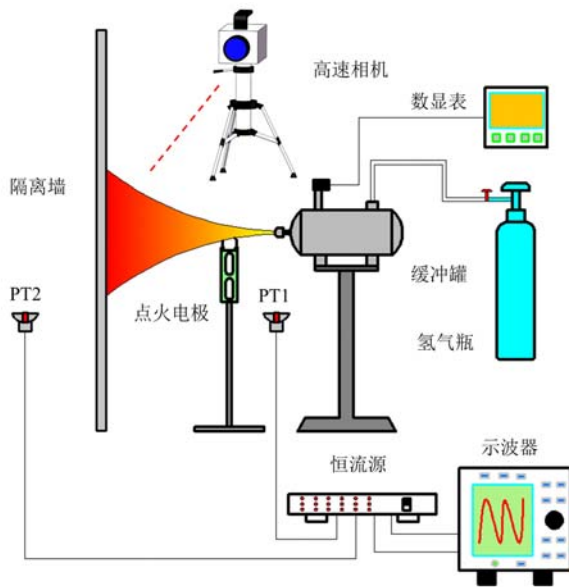


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 The layout of the experimental apparatus

水平线上,距离地面 17cm,与喷嘴间的高度差为 43cm;其中第一个压力传感器(PT1)感应面中心位于喷嘴正下方,第二个压力传感器(PT2)位于墙后,2 个压力传感器中心的水平距离为 1m<sup>[8-9,16]</sup>。实验中为了避免火焰热效应对超压的影响,在感应面涂上一层薄薄的硅油。压力传感器探测到的超压信号由恒流源转换为电信号存储于示波器。采用高速相机拍摄火焰演变图像,拍摄频率为 2000fps,高速相机、示波器和信号触发器由 TTL 信号同时触发。方形隔离墙材质为硅酸钙,边长为 1.2m,射流中心与墙中心对齐。隔离墙与喷嘴间距离对爆炸影响详见表 1,本文在相同工况下进行了 3 组实验以保证实验的重复性。此外,本文还探究了在隔离墙与喷嘴间距离  $L_1=50\text{cm}$  时墙体长度对爆炸的影响,具体参数列于表 2 中。

## 1 实验装置

图 1 给出了实验装置布置图。图中氢气缓冲罐的体积和耐压极限分别是 5L 和 1.2MPa。实验中,缓冲罐内供给压力为 0.5MPa,泄漏口径为 4mm,流量为 4.69g/s。高压氢气瓶内氢气经减压阀送至缓冲罐,氢气经泄漏口释放并点火爆炸,需要说明的是:实验中采用控制减压阀来恒定缓冲罐内氢气的压力。点火电极中心与喷嘴中心对齐,距离为 20cm,为了确保每组实验的成功点火,在实验前进行了 5 组预实验,以确定合适的点火距离。点火电极的点火能量和频率分别为 440mJ 和 50Hz。2 个压力传感器(PCB 102B16)感应面位于同一水

表1 隔离墙与喷嘴间距离对超压的影响

Tab.1 The effect of the distance between barrier wall and nozzle on overpressure

实验序号 No.	喷嘴直径 $d/\text{mm}$	供给压力 $p_0/\text{MPa}$	墙与喷嘴间距离 $L_1/\text{cm}$	第一个超压峰 值/mbar	第二个超压峰 值/mbar
1	4	0.5	45	18.5	20.0
2	4	0.5	50	15.8	15.8
3	4	0.5	55	14.3	15.0
4	4	0.5	60	14.0	10.0
5	4	0.5	65	18.5	9.0
6	4	0.5	70	17.0	7.0
7	4	0.5	75	16.0	7.5
8	4	0.5	80	13.8	8.0
9	4	0.5	85	17.0	6.0
10	4	0.5	90	16.0	7.0

表2 隔离墙长度对超压的影响

Tab.2 The effect of the length of barrier wall on overpressure

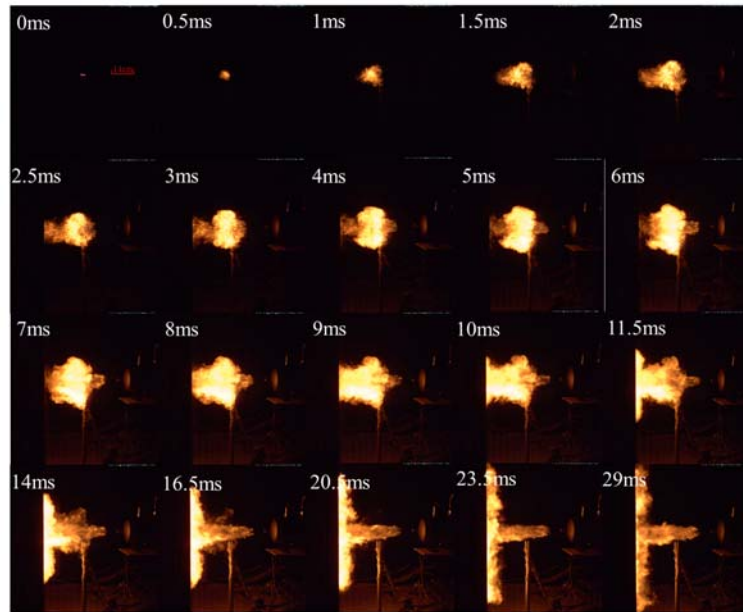
实验序号 No.	喷嘴直径 $d/\text{mm}$	供给压力 $p_0/\text{MPa}$	墙的长度 $L_2/\text{cm}$	PT1 处最大 超压/mbar	PT2 处最大 超压/mbar
1	4	0.5	60	15.8	5.2
2	4	0.5	70	17.0	8.0
3	4	0.5	80	22.0	8.0
4	4	0.5	90	20.0	7.5
5	4	0.5	100	17.0	5.6
6	4	0.5	110	15.8	5.0
7	4	0.5	120	15.8	3.5

## 2 火焰的传播

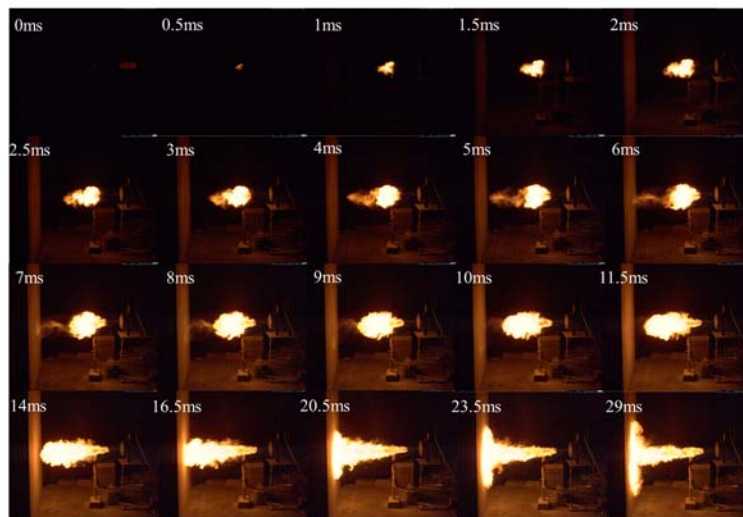
图2给出了隔离墙与喷嘴间不同距离对火焰传播过程的影响。当隔离墙与喷嘴间距离  $L_1=50\text{cm}$  时(图2(a)), 点燃射流氢气之后, 在爆炸初期即  $0.5\text{ms}$  时火焰以扇形发展。受射流的影响, 在  $1\text{ms}$  时火焰逐渐发展成三角形。爆炸初期扇形火焰中心在射流的作用下偏离了电极的中心, 后期的三角形火焰中心类似。  $1.5\text{ms}$  时, 火焰变得更亮, 且通过时间间隔内火焰前锋位移差计算发现火焰以超过  $100\text{m/s}$  的速度向下游传播。同时, 火焰也会向上游传播, 直到火焰到达喷嘴附近, 但并不与喷嘴接触, 这主要是由于喷嘴处射流中心流速大于火焰传播速度及该处氢气浓度高于燃烧上限所致。  $3\text{ms}$  时, 爆燃火焰前锋虽已到达隔离墙, 但由于氢气浓度低, 火焰前锋的颜色变暗; 然后火焰前锋逐渐熄灭, 射流火焰形成并在隔离墙上开始铺展。由于射流膨胀作用, 火焰前端变宽, 与空气的接触面积变大, 因此可以卷吸更多空气, 火焰更加明亮。隔离墙上的火焰同时朝上、下2个方向铺展而且速度几乎一致, 但火焰并没有绕过隔离墙向墙后扩展或者扩展至地面, 这表明隔离墙的尺寸足够阻挡火焰。当  $L_1=80\text{cm}$  时(图2(b)), 火焰的传播过程有所不同, 由于隔离墙与喷嘴间的距离较远,  $6\text{ms}$  时火焰前锋才到达墙体;  $9\text{ms}$  时火焰前锋完全熄灭;  $29\text{ms}$  时射流火焰在与墙面接触以后, 沿墙面向上、下铺展的距离较小。由此可见, 随着距离的增大, 火焰前锋与喷射火到达隔离墙的时间增大, 喷射火在隔离墙面的铺展面积减小。

图3给出了隔离墙与喷嘴间距离  $L_1=50\text{cm}$  时隔离墙的不同长度对火焰的影响。墙体长度  $L_2=60\text{cm}$  时, 火焰从隔离墙中心向四周铺展, 少部分火焰越过隔离墙向墙后蔓延;  $L_2=70\text{cm}$  时, 火焰也仅刚

好蔓延到隔离墙边缘。之后随着隔离墙长度继续增加,火焰被完全阻挡,所以增加隔离墙的长度可以有效地阻挡射流火焰。



(a)  $L_1=50$  cm



(b)  $L_1=80$  cm

图 2 初始阶段火焰的演变过程

Fig. 2 Evolutions of the flame at the initial stage

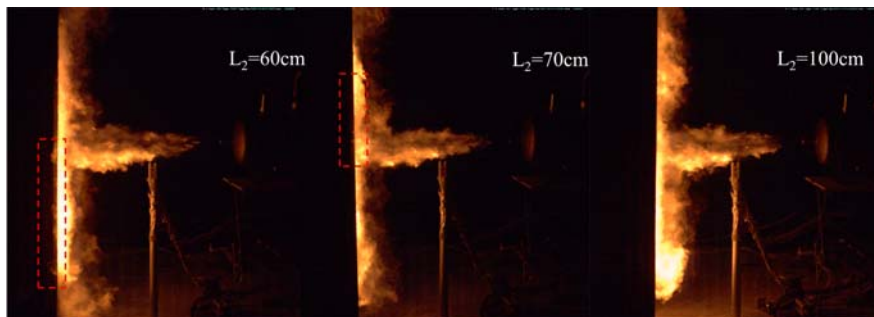


图 3 不同墙体长度对火焰传播的影响

Fig. 3 Effects of different wall lengths on flame propagation

### 3 超压

#### 3.1 隔离墙与喷嘴间距离对超压的影响

图 4 给出了压力传感器记录到的超压。由图可见，超压存在一定波动，这是氢气湍流射流造成的。图 4(a)给出了自由射流氢气的超压变化，其中 PT1 和 PT2 均有一个超压峰值。氢气被点燃后，火焰迅速向外膨胀并产生正压，然后，由于火焰过度膨胀，超压缓慢下降，可能诱导负压。图 4(b)~(d)给出了隔离墙作用下的射流氢气爆炸超压曲线，PT1 处产生了 3 个超压峰值，其中，第一个峰值是由爆炸产生的；第二个峰值是入射波经隔离墙反射形成的；由于压力传感器与地面间距离仅有 17cm，点火电极离地面也较近，因此地面会反射爆炸波导致第三个超压峰值出现。

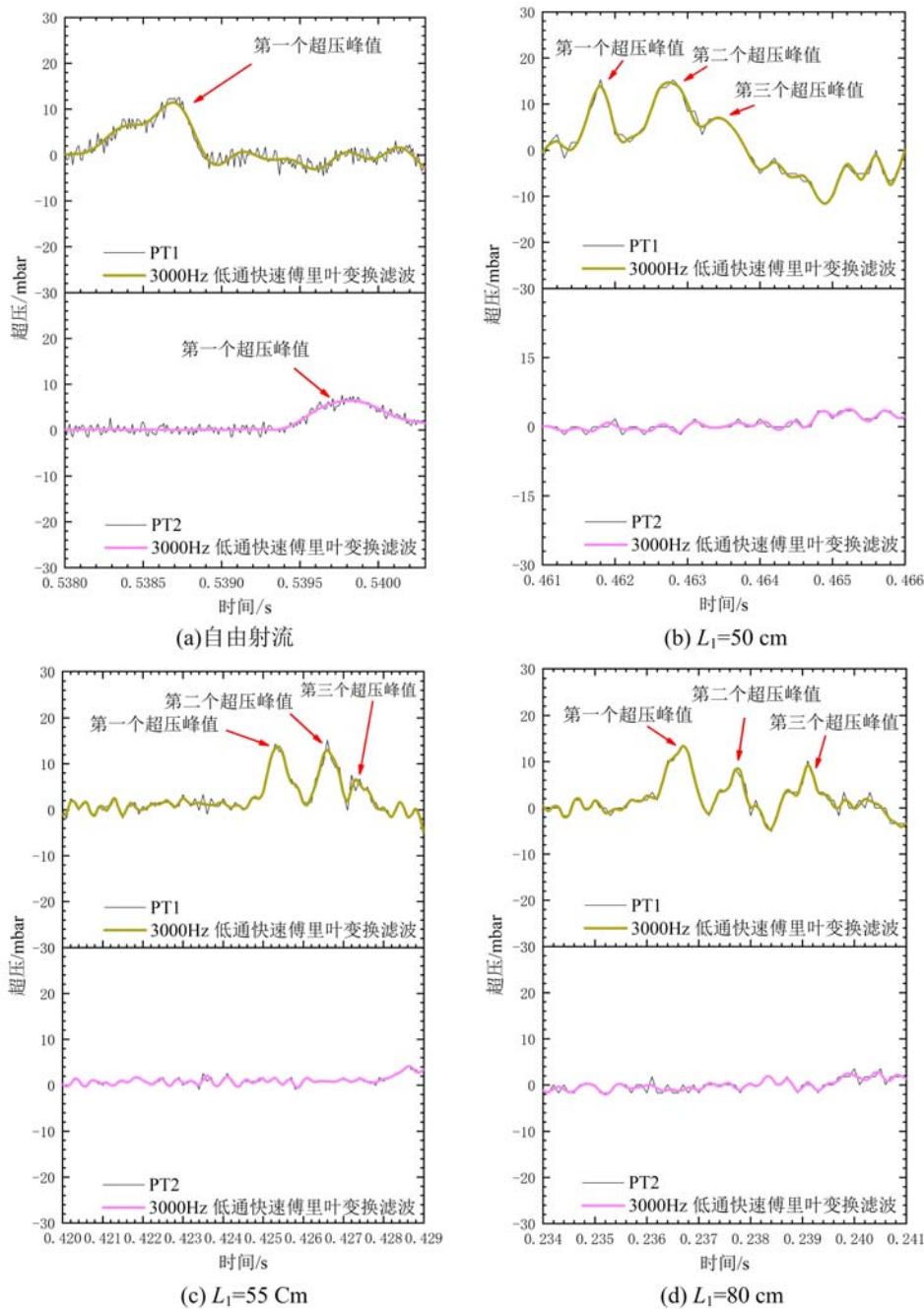


图 4 超压随时间的变化趋势

Fig. 4 Evolution of overpressure with time

由于第三个超压峰值的数值较小,所以本文仅研究第一个、第二个超压峰值的变化,如图5所示。由图可以发现,随着隔离墙与喷嘴间的距离增加,第一个超压峰值约为15mbar,且在一定范围内波动,总体变化不明显。第一个超压峰值略高于无隔离墙的状况,表明隔离墙对爆炸波的反射能诱导火焰加速,导致超压增大。第二个超压峰值呈衰减趋势,这是因为随着距离的增加,导致隔离墙的反射对爆燃火焰的加速逐渐减弱。

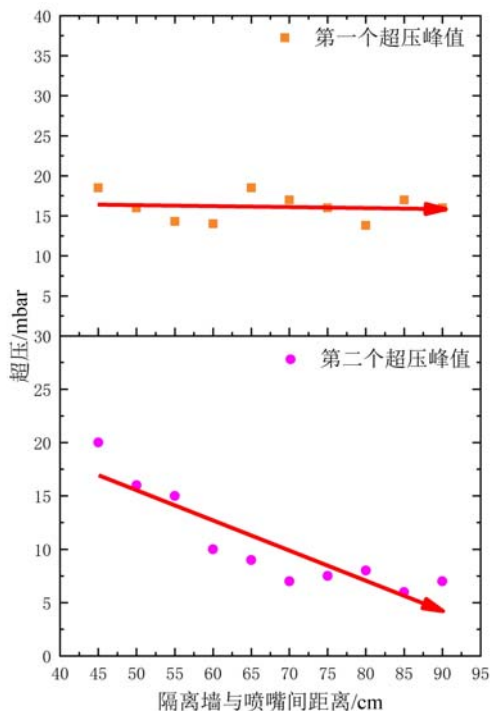


图5 PT1处超压峰值随墙体与喷嘴间距离的变化  
Fig. 5 Variation of overpressure at PT1 with distance between barrier wall and nozzle

### 3.2 隔离墙长度对超压的影响

图6给出了不同隔离墙长度下超压随时间的变化曲线。由图可以看出,即使改变隔离墙的长度,PT1处的前3个超压峰值依旧很明显,第一个超压峰值与第二个超压峰值基本相同。PT2处有一个较明显的超压峰值。在隔离墙的作用下,多超压峰值的出现是由于多激波及其与壁面的反射波或两两相互碰撞形成的反射波或马赫杆作用导致的。每个超压峰值形成的详细原因还需要通过大尺度的纹影或数值模拟做进一步的深入研究,将在后续实验中开展。

隔离墙长度不同,导致超压的大小也不同。本文将3个超压峰值中数值最大的称为最大超压,最大超压随墙体长度的变化呈现先增大后减小的趋势,如图7所示。当墙体较窄时,氢气会绕过隔离墙向墙后扩散,此时隔离墙前能诱导火焰加速的氢气区长度减小,爆炸波较弱,进而反射波也较弱,导致墙前的最大超压仅15.8 mbar,墙后的超压也仅5.2mbar。当墙体长度小于80cm时,随着长度的增加,能诱导火焰加

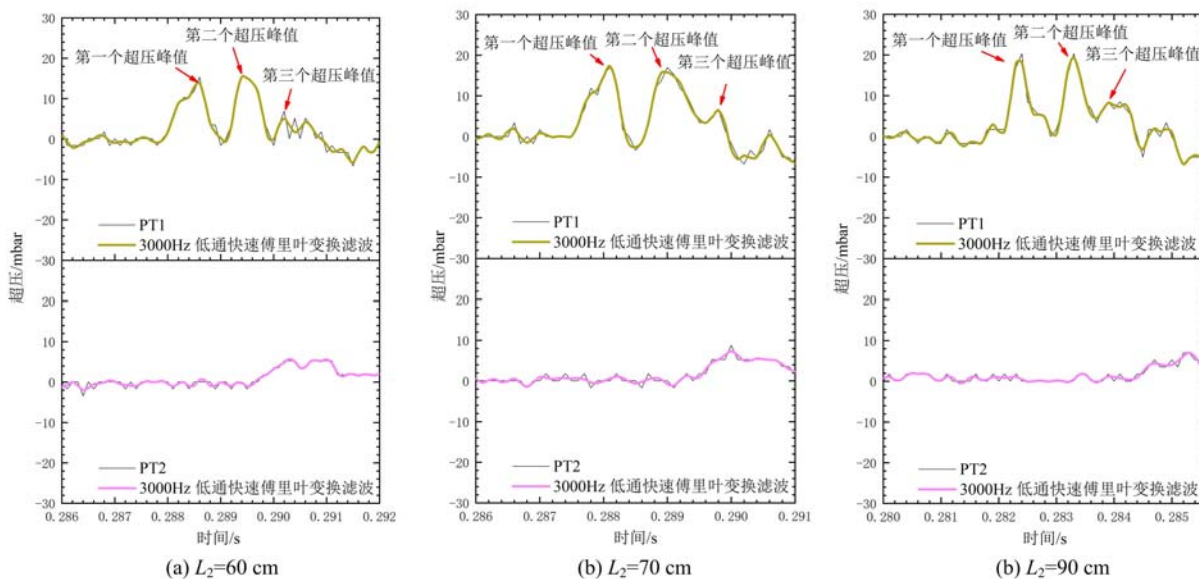


图6 不同隔离墙长度下超压随时间的变化趋势

Fig. 6 Variation of overpressure with time under different lengths of barrier wall

速的氢气区长度增大,因此最大超压增加。当墙体长度大于80cm时,随着墙体长度的增加,墙体完全

阻碍氢气绕过墙体进入墙后, 氢气由墙面向四周扩散, 导致能诱导火焰加速的氢气区长度减小, 即 PT1 处最大超压呈下降趋势。此外, 墙体后基本无爆炸波到达或很弱的爆炸波绕射墙体到达, 即 PT2 较低。

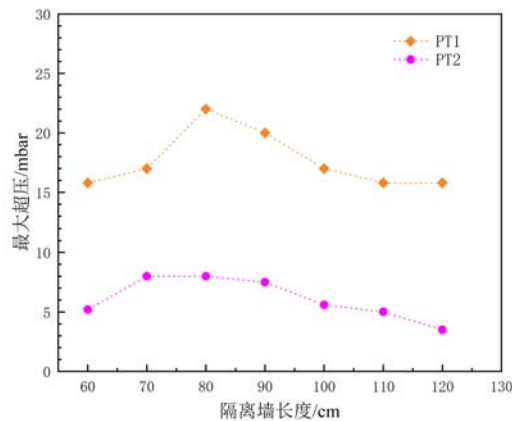


图7 最大超压随墙体长度的变化趋势

Fig. 7 Variation of maximum overpressure with length of barrier wall

## 4 结论

本文实验研究了稳态条件下隔离墙与喷嘴间距、隔离墙长度对欠膨胀射流氢气点火爆炸初期火焰形态和超压的影响。主要结论如下:

(1) 爆炸初始阶段火焰以扇形发展, 受射流影响演变为三角形。初始阶段火焰前锋以超过 100m/s 的速度向下游蔓延, 到达墙面后, 低氢气浓度导致火焰前锋发生熄灭, 之后射流火焰开始在墙体上铺展。当墙体长度为 70cm 时, 火焰可以被完全阻挡。

(2) 在隔离墙作用下, 超压出现了 3 个峰值, 分别由爆炸、入射波经隔离墙反射和地面反射产生。随着隔离墙与喷嘴间距离的增加, 第一个超压峰值在一定范围内波动, 略高于自由射流工况, 第二个超压峰值逐渐减小。

(3) 随着隔离墙长度的增加, 最大超压呈现先增大后减小的趋势。在一定范围内墙体长度的增加, 会诱导火焰加速氢气区长度增大, 因此最大超压增加。

### 参考文献:

- [1] ALAZEMI J, ANDREWS J. Automotive hydrogen fuelling stations: an international review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 48:483-499.
- [2] 钱松. 加氢站风险分析[J]. *电气防爆*, 2021(5):5-8 (QIAN Song. Risk analysis of hydrogen refueling station [J]. *Electric Explosion Protection*, 2021(5):5-8 (in Chinese))
- [3] 吴越, 於星, 王伟, 等. 氮气射流抑制氢气喷射火的实验研究[J]. *实验力学*, 2023, 38(1):91-100 (WU Yue, YU Xing, WANG Wei, et al. Experimental study of the mitigation of nitrogen jets for hydrogen jet flames[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2023, 38(1):91-100 (in Chinese))
- [4] KOBAYASHI H, MUTO D, DAIMON Y, et al. Experimental study on cryo-compressed hydrogen ignition and flame[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45(7):5098-5109.
- [5] KOBAYASHI H, NARUO Y, MARU Y, et al. Experiment of cryo-compressed (90-MPa) hydrogen leakage diffusion[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018, 43(37):17928-17937.
- [6] TAKENO K, OKABAYASHI K, KOUCHI A, et al. Dispersion and explosion field tests for 40MPa pressurized hydrogen[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2007, 32(13):2144-2153.
- [7] TANAKA T, AZUMA T, EVANS J A, et al. Experimental study on hydrogen explosions in a full-scale hydrogen filling station model[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2007, 32(13):2162-2170.
- [8] SCHEFER R W, GROETHE M, HOUF W G, et al. Experimental evaluation of barrier walls for risk reduction of unintended hydrogen releases[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2009, 34(3):1590-1606.

- [9] SCHEFER R W, MERILO E G, GROETHE M, et al. Experimental investigation of hydrogen jet fire mitigation by barrier walls[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2011, 36(3):2530–2537.
- [10] HOUF W, SCHEFER R, EVANS G, et al. Evaluation of barrier walls for mitigation of unintended releases of hydrogen[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2010, 35(10):4758–4775.
- [11] TCHOUVELEV A V, ZHONG C, AGRANAT V M, et al. Effectiveness of small barriers as means to reduce clearance distances[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2007, 32:1409–1415.
- [12] GROETHE M, MERILO E, COLTON J, et al. Large-scale hydrogen deflagrations and detonations [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2007, 32(13):2125–2133.
- [13] YU X, YAN W, LIU Y, et al. The flame mitigation effect of vertical barrier wall in hydrogen refueling stations [J]. *Fuel*, 2022, 315:123265.
- [14] SCHEFER R W, HOUF W G, WILLIAMS T C, et al. Characterization of high-pressure, underexpanded hydrogen-jet flames[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2007, 32(12):2081–2093.
- [15] WILLOUGHBY D B, ROYLE M. The interaction of hydrogen jet releases with walls and barriers [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2011, 36(3):2455–2461.
- [16] GRUNE J, SEMPET K, KUZNETSOV M, et al. Experimental study of ignited unsteady hydrogen jets into air [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2011, 36(3):2497–2504.

## Experimental study on the effect of barrier wall on under expanded hydrogen jet ignition and explosion

MA Mengfei<sup>1,2</sup>, WANG Changjian<sup>1,3</sup>, ZHAO Weiping<sup>1,2</sup>, SUN Lin<sup>3</sup>, ZHANG Aifeng<sup>1,2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China;

2. Anhui International Joint Research Center on Hydrogen Safety, Hefei 230009, Anhui, China;

3. Engineering Research Center of Safety Critical Industrial Measurement and Control Technology, Ministry of Education, Hefei 230009, Anhui, China)

**Abstract:** For alleviating the hazards of underexpanded hydrogen jet ignition and explosion, the flame behaviors and overpressure evolutions were investigated experimentally by changing the distance between barrier wall and nozzle, as well as the length of barrier wall. The results show that at the initial stage of ignition and explosion, the flame front spreads outwards in a flabelliform shape at the ignition position. Affected by the jet, a triangular flame front is gradually evolved. The flame front is quenched when it reaches the wall. Finally, the jet flame gradually forms and spreads over the wall. The jet flame spreads upward and downward along the wall and those speeds are almost same. When the length of wall is 70cm, the flame can be effectively prevented from spreading behind the wall. The explosion is affected by the wall and the ground, resulting in three peaks of overpressure. As the distance between the wall and the nozzle increases, the first overpressure peak fluctuates within a certain range, while the second overpressure peak gradually decreases. As the length of wall increases, the maximum overpressure shows a tendency of first increasing and then decreasing.

**Keywords:** hydrogen explosion; barrier wall; flame front; overpressure