

DOI: 10.11883/bzycj-2022-0174

# 破膜压力对氢-空气预混气体燃爆特性的影响\*

杜赛枫<sup>1</sup>, 张 凯<sup>1</sup>, 陈 昊<sup>1</sup>, 郭 进<sup>1</sup>, 段在鹏<sup>2</sup>

(1. 福州大学环境与安全工程学院, 福建 福州 350116;

2. 福州大学经济与管理学院, 福建 福州 350116)

**摘要:** 利用自主设计的 5.00 m 长矩形管道, 对氢气体积分数为 30% 的氢气-空气预混气体进行了不同破膜压力 ( $p_v$ ) 下的系列燃爆实验, 重点研究了  $p_v$  对管道内外火焰传播行为及爆炸超压的影响。实验结果表明: 管道内的火焰传播行为受  $p_v$  影响显著。在靠近泄爆口的压力传感器所监测的压力-时间曲线上, 可以观察到 3 个压力峰值 ( $p_b$ 、 $p_{out}$ 、 $p_{ext}$ ), 分别对应于铝膜破裂、燃烧混合物泄放以及外部爆炸, 大多数情况下,  $p_b$  为最大压力峰值。管道内部最大超压随着  $p_v$  升高而增大, 但最大内部超压出现的位置受  $p_v$  的影响。管道外部火焰传播行为与  $p_v$  有关, 但不同  $p_v$  下外部火焰的最大长度无明显差异。最大外部超压与  $p_v$  之间呈现非单调变化规律。

**关键词:** 氢气; 破膜压力; 火焰传播; 爆炸超压; 外部爆炸

中图分类号: O382.1

国标学科代码: 1303520

文献标志码: A

## Effects of vent burst pressure on explosion characteristics of premixed hydrogen-air gases

DU Saifeng<sup>1</sup>, ZHANG Kai<sup>1</sup>, CHEN Hao<sup>1</sup>, GUO Jin<sup>1</sup>, DUAN Zaipeng<sup>2</sup>

(1. College of Environment and Safety Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350116, Fujian, China;

2. School of Economics and Management, Fuzhou University, Fuzhou 350116, Fujian, China)

**Abstract:** By using a self-designed 5.00-m-long duct with a cross-section of 0.30 m × 0.30 m, a series of experiments were performed on premixed hydrogen-air gases in which volume fraction of hydrogen was 30%. And the effects of vent burst pressure ( $p_v$ ) on the flame propagation and pressure-time histories in the duct were experimentally investigated. The explosion flames were recorded by a high-speed camera at a frequency of 2.5 kHz. Five piezoelectric pressure transducers were employed to record the internal and external overpressure. The duct had been evacuated using a vacuum pump before the experiment, and the premixed hydrogen-air gases with volume fraction of 30% was prepared according to Dalton's law of partial pressure. The variation of the vent burst pressure was achieved by changing the thickness of the aluminum foil which was used as vent cover. The results show that the first three stages of the flame structure in the duct are hemispherical, finger-shaped and tulip flame, respectively.  $p_v$  has a significant effect on the structure of tulip flame and its subsequent development. Three pressure peaks ( $p_b$ ,  $p_{out}$ ,  $p_{ext}$ ) can be distinguished from the pressure-time histories monitored by the pressure transducer near the vent, corresponding to three different generation mechanisms: burst of the aluminum film, venting of burned mixtures, and the external explosion, respectively. The three pressure peaks increase with an increase in  $p_v$ .  $p_b$  is the dominant pressure peak in most cases. The maximum internal overpressure increases as  $p_v$  increases, and the position where the maximum internal overpressure was measured depended on  $p_v$ . The maximum internal overpressure was obtained at the center of the duct (PT2) when  $p_v \leq 42$  kPa, but near the open end of the duct (PT3) if  $p_v > 42$  kPa. When the flame reached the vent, it ejected from the

\* 收稿日期: 2022-04-24; 修回日期: 2022-10-11

基金项目: 国家社会科学基金(17CGL049)

第一作者: 杜赛枫(1997—), 男, 硕士研究生, 1095290649@qq.com

通信作者: 段在鹏(1985—), 男, 博士, 副教授, duanzaipeng@163.com

vent and then ignited the external combustible cloud. Therefore, the external explosion is triggered.  $p_v$  significantly affects the flame evolution outside the duct, but there is no significant difference in the maximum length of the external flame at various  $p_v$ . A non-monotonic trend between the maximum external overpressure and  $p_v$  was observed.

**Keywords:** hydrogen; vent burst pressure; flame propagation; explosion overpressure; external explosion

近年来, 氢气作为工业生产活动中的重要原料和燃料而备受关注, 并且已进入快速发展期。氢气具有可燃范围广、点火能量低和燃烧速率快等特点<sup>[1-2]</sup>, 在生产、处理、运输、储存和使用过程中容易造成火灾或爆炸事故, 存在严重的爆炸安全问题, 一旦发生爆炸事故, 往往会造成严重的人员伤亡和财产损失<sup>[3-4]</sup>。泄爆是用来减轻意外爆炸中设备和人员伤害的经济有效的方法, 它可以通过预设的薄弱环节, 快速释放爆炸产生的超压, 从而最大限度地降低可燃气体的意外爆炸危害<sup>[5-6]</sup>。泄爆的关键是通过设置恰当的泄爆参数来实现快速有效地降压, 并避免泄爆导致的二次灾害。

破膜压力是影响可燃气体泄爆特性的重要参数之一。Chow 等<sup>[7]</sup>比较了在 1.4 和 11.8 kPa 两种破膜压力下甲烷爆炸的压力-时间曲线, 实验结果表明, 两者的主要区别在于第一个压力峰值的大小, 而随后两者的压力-时间曲线几乎一致。Kasmani 等<sup>[8]</sup>在 0.2 m<sup>3</sup> 的圆柱形容器中使用 4% 的丙烷和 9.5% 的甲烷/空气混合物进行了中心点火和尾端点火泄爆实验, 发现最大超压并不总是随着破膜压力的升高而增大。Bao 等<sup>[9]</sup>在 12 m<sup>3</sup> 的燃烧室中进行了甲烷-空气预混气体泄爆实验, 发现内部的压力-时间历程始终以泄爆膜破裂产生或以声波与火焰耦合作用下产生为主, 且前者随破膜压力的升高而升高, 而后者则先升高后降低。文虎等<sup>[10]</sup>基于 FLACS 数值模拟软件研究了泄爆口强度对管道内天然气爆炸流场的影响, 发现泄爆口强度显著影响管道内爆炸超压和火焰传播速度, 但管内温度几乎与泄爆口强度无关。Dou 等<sup>[11]</sup>在水平放置的 1 m 管道中进行了沼气泄爆实验, 重点研究了破膜压力对内部超压的影响, 发现在超压曲线中存在 3 个可能的压力峰值( $p_b$ 、 $p_{mfa}$ 、 $p_{ext}$ ), 分别对应于泄爆膜破裂、最大火焰面积和外部爆炸压力,  $p_{ext}$  总是最小且与破膜压力无关。Rui 等<sup>[12]</sup>通过 FLACS 数值模拟软件与实验相结合的方法研究了低破膜压力条件对甲烷-空气预混气体爆燃的影响, 结果表明, 数值模拟结果与实验结果较吻合。

除上述破膜压力对碳氢燃料的泄爆特性研究外, 学者们还对反应性更强的氢气-空气混合物进行了大量的实验研究。Cao 等<sup>[13]</sup>利用一个圆柱形容器研究了点火位置和破膜压力对外部爆炸的影响, 实验结果表明, 外部超压与破膜压力和点火位置有关。尾端点火时的外部超压受破膜压力影响较小, 但在中心点火和前点火时, 外部超压随破膜压力的升高而升高。Rui 等<sup>[14]</sup>采用一个 1 m<sup>3</sup> 的爆炸舱来研究体积分数为 30% 的氢气爆炸的泄爆特性, 结果表明, 亥姆霍兹震荡的幅度随破膜压力的升高而增大, 而亥姆霍兹震荡的持续时间随破膜压力的升高而缩短。Zhang 等<sup>[15]</sup>在水平放置的 3 m 阻塞管道中进行了氢气泄爆实验, 管道阻塞率为 46.2%, 实验观察到最大内外超压随破膜压力的升高而非单调增大。

文献综述表明, 以往的研究大多集中于甲烷、丙烷等燃烧速率较低的碳氢化合物泄爆实验, 而由于受到设备、安全和成本等因素的影响, 有限的氢气-空气泄爆实验通常是在小长径比管道或球形容器中进行, 这可能与真实的氢气泄漏燃爆事故在尺度上存在差异, 例如氢气管道运输燃爆事故。小长径比容器研究结论不能直接运用于开发大长径比的容器爆炸防护措施。例如, 在长径比小的泄爆容器中, 各处的爆炸压力基本一致; 而本文中采用的大长径比管道中, 爆炸压力随位置发生变化。国际上广泛使用的 EN 14994<sup>[16]</sup> 和 NFPA 68<sup>[17]</sup> 标准都涉及到大长径比装置的泄爆问题, 且给出了爆炸压力的计算方法, 然而其适用的条件是可燃物的燃烧速度小于 0.46 m/s。此外, 在先前的研究中主要针对的是破膜压力对管道内外超压的影响, 而针对不同破膜压力下大长径比管道内外火焰行为差异的研究却很少涉及。因此, 了解破膜压力对大长径比容器中氢气的燃爆特性的影响, 对该类设备或结构以及泄爆口设计尤为重要。由于接近化学计量比的氢气-空气混合物反应性更强, 火焰传播速度更快, 爆炸压力上升速率更高, 因此本文中利用自主设计的长径比为 16.7 的矩形管道, 对氢气体积分数为 30% 的氢气-空气预混气体进行不同破膜压力下的燃爆实验, 以期阐明不同破膜压力下管道内外氢气-空气预混气体火焰传播行为的差异, 以及破膜压力对管道内外爆炸超压的影响。

## 1 实 验

氢气-空气预混气体燃爆实验在长 5.00 m、横截面尺寸为 0.30 m × 0.30 m 的矩形管道中进行, 管道装置如图 1 所示。管道由 5 个长 1.00 m 的短管拼接而成, 为了观察管道中的火焰发展过程, 在每个短管道的中心设置一个尺寸为 0.50 m × 0.15 m 的窗口, 并使用高速相机来记录火焰图像, 高速相机的拍摄频率为 2.5 kHz。管道一端采用盲板密封作为封闭端; 另一端作为泄爆口, 使用铝膜密封并用法兰螺栓固定。3 个压电压力传感器 PT1~PT3 分别安装在泄爆口上游 4.25、2.25 和 0.25 m 处, 以测量管道内的压力, 另外 2 个压电压力传感器 PT4 和 PT5 分别安装在泄爆口下游 1.25 和 2.50 m 处, 以测量管道外部压力。压力传感器采用 PCB-102B16 型压电式压力传感器, 测试量程为 0~689.4 kPa, 响应频率大于等于 500 kHz。数据采集仪型号为 MR8847A, 采样频率为 10 kHz。为避免热效应对压力测量产生影响, 每个压力传感器都涂有一层薄薄的硅脂。通过安装在泄爆口上游 4.75 m 处的点火电极点燃氢气-空气预混气体, 点火能量约为 500 mJ。

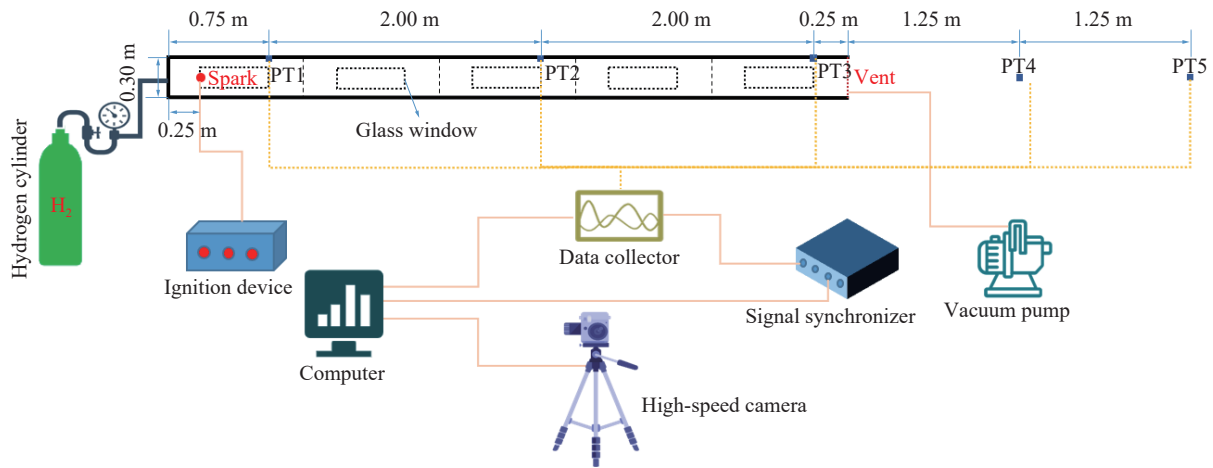


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

实验前对不同厚度铝膜的静态破膜压力进行测量。根据 NFPA68<sup>[17]</sup> 推荐的方法, 具体步骤如下: 首先, 将一定厚度的铝膜密封在泄爆口处, 使管道内部形成一个密闭空间; 随后, 将压缩空气缓慢注入管道, 内部压力会逐渐上升, 直到靠近泄爆口处的压力传感器 PT3 记录到的压力突然降低, 表明铝膜破裂, PT3 压力传感器所记录到的最大压力即为该厚度下铝膜的静态破膜压力。每次实验重复 2 次, 实验重复性良好。实验结果保留为整数, 不同厚度铝膜静态破膜压力汇总如表 1 所示。

表 1 不同厚度铝膜的静态破膜压力

Table 1 Static vent burst pressure for various thicknesses of aluminum film

铝膜厚度/mm	静态破膜压力1/kPa	静态破膜压力2/kPa	平均值/kPa
0.025	13	14	14
0.050	27	27	27
0.075	41	43	42
0.125	68	73	71
0.175	97	102	100
0.225	128	134	131
0.325	182	190	186

利用真空泵对管道进行抽真空处理,并根据道尔顿分压定律制备氢气体积分数为 30% 的氢气-空气预混气体。泄爆口采用厚 0.025~0.325 mm 的铝膜密封,所有实验均在环境压力和初始温度为 280 K 的条件下进行,每次实验至少重复 2 次,实验重复性良好。

## 2 结果与讨论

### 2.1 破膜压力对管道内火焰传播特性的影响

图 2 给出了破膜压力  $p_v=186$  kPa 时高速相机记录的管道内的典型火焰图像,图 3 为点火后火焰前沿位置以及火焰的传播速度与时间的关系,火焰速度由相邻 2 张火焰图像之间的距离和二者之间的时间差(0.4 ms)计算得到。点火初期,火焰从点火位置以半球状向四周传播,此时火焰向泄爆口的传播速度为 15~20 m/s,而 Dahoe<sup>[18]</sup> 在先前类似的实验环境条件下测得体积分数为 30% 的氢气的层流燃烧速度为 2.25 m/s。通过对比可知,此时火焰速度远高于该实验条件下氢气的层流燃烧速度。根据 Ferrara 等<sup>[19]</sup>、李艳超等<sup>[20]</sup> 的研究,这是由于层流传播的火焰会受到流体力学和热扩散不稳定性的影响,从而促进管道内氢气的燃烧和能量的释放,最终导致火焰的自加速行为。在管道壁的约束下,火焰沿管道轴向的传播速度远高于沿管道径向的传播速度,火焰被横向拉长且火焰结构由半球形转变为指形。由于氢气燃烧释放的热量以及产生的压力波不断作用于前方未燃气体,大大提高了管道内氢气的反应速率,火焰传播速度迅速提升,在 20.0 ms 时火焰速度已高达 175 m/s。点火后约 26.0 ms,在氢气-空气预混气体燃烧产生的超压作用下,覆盖在泄爆口的铝膜破裂,泄爆口被打开,然而此时管道内的火焰没有观察到明显的加速现象;相反,火焰经历一个减速阶段。值得注意的是,铝膜破裂时火焰仍离泄爆口较远,因此部分未燃烧的氢气-空气预混气体被排出管道,并在管道外形成可燃云<sup>[21-22]</sup>。随着火焰在管道中继续传播,在

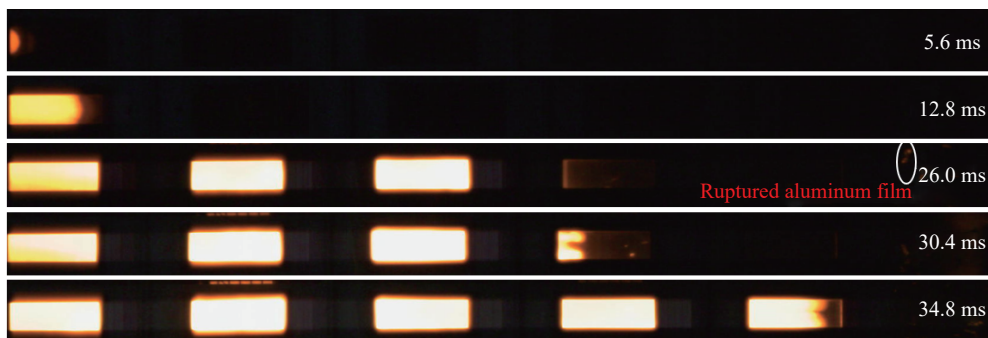


图 2 破膜压力 186 kPa 时管道内的典型火焰图像

Fig. 2 Typical flame images inside the duct at the vent burst pressure of 186 kPa

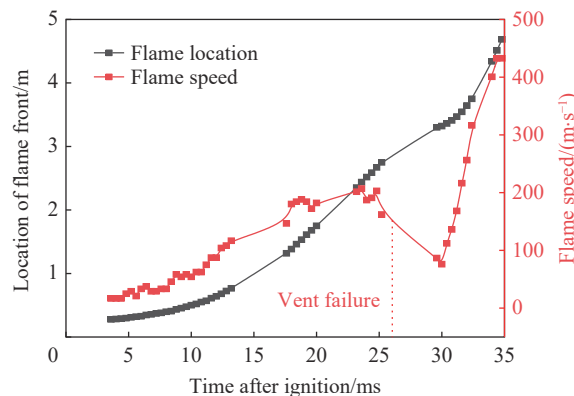


图 3 破膜压力 186 kPa 时火焰前沿位置和火焰传播速度

Fig. 3 Location of flame front and flame speed at the vent burst pressure of 186 kPa



30.4 ms 时, 可以观察到火焰前沿的显著变形, 高速相机记录到一个典型的郁金香形火焰。因此, 可以确定之前的火焰减速与火焰结构从指形到郁金香形转变有关<sup>[23]</sup>。随后, 由于火焰的泰勒不稳定性 and 郁金香形火焰的生成, 火焰表面积大幅增加, 从而导致了火焰的二次加速行为。在后期阶段, 火焰形状保持郁金香形并向泄爆口传播直至冲出管道, 火焰在管道内的最大传播速度在管道出口处达到约 432 m/s。

不同破膜压力下管道内的火焰传播图像如图 4 所示。管道内火焰结构的前 3 个阶段均为半球形、指形和郁金香形火焰。点火初期, 火焰在一个完全封闭的管道内传播, 管道内火焰行为在不同破膜压力下无明显差异, 火焰都经过了从半球形到指形的转变。但泄爆口打开后, 管道内郁金香形火焰结构及其之后的发展在不同破膜压力下存在显著差异。当  $p_v < 71$  kPa 时, 在管道末端, 郁金香形火焰下侧火焰锋面消退, 火焰受到浮力影响紧贴上壁面沿着泄爆口方向传播, 如图 4(a)~(b) 所示。此外, 在部分实验中, 可以观察到管道内出现的郁金香形火焰结构并不沿着管道轴线上、下对称, 郁金香形火焰的下方火舌比

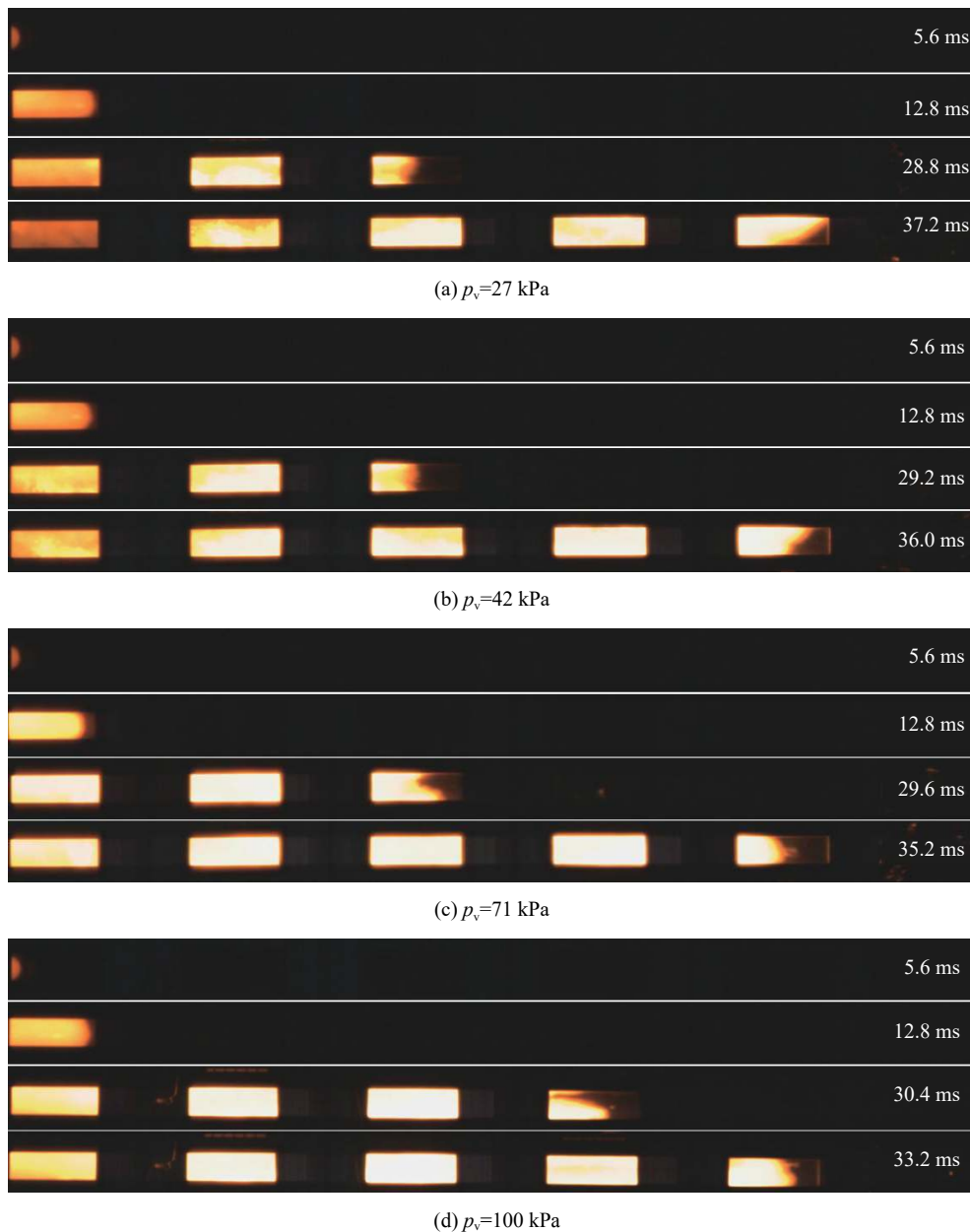


图 4 不同破膜压力下管道内的典型火焰传播图像

Fig. 4 Typical flame propagation images inside the duct under different vent burst pressures

上方火舌传播速度较快, 如图 4(c)~(d) 所示。这种上下火舌速度的差异, 是由火焰不稳定性与重力的相互作用导致的<sup>[24]</sup>。随着管道内火焰的继续传播, 郁金香形火焰结构的上下两个火舌逐渐靠近, 在管道出口处郁金香形火焰结构消失, 当  $p_v=71$  kPa 时甚至可以观察到火焰在管口处形成了新的指形火焰结构。

## 2.2 破膜压力对管道内压力特性的影响

爆炸超压是易燃气体安全防护领域最重要的参数之一, 图 5 为不同破膜压力下的内部压力-时间变化曲线。实验结果表明, 管道封闭端压力传感器 PT1 和中心处压力传感器 PT2 测得的爆炸超压具有相似的变化规律。在低破膜压力下, PT1 和 PT2 单调增加至峰值后下降至负压峰; 而当  $p_v \geq 71$  kPa 时, PT1 和 PT2 在达到最大压力峰值之前都经历了下降阶段, 这可能是由于泄爆口打开时间较晚, 火焰温度过高, 在管道封闭端和中心处管道壁面存在热传导现象, 造成了部分能量损失。相较于 PT1 和 PT2, 开口端压力传感器 PT3 测得的压力-时间变化曲线存在较大差异。

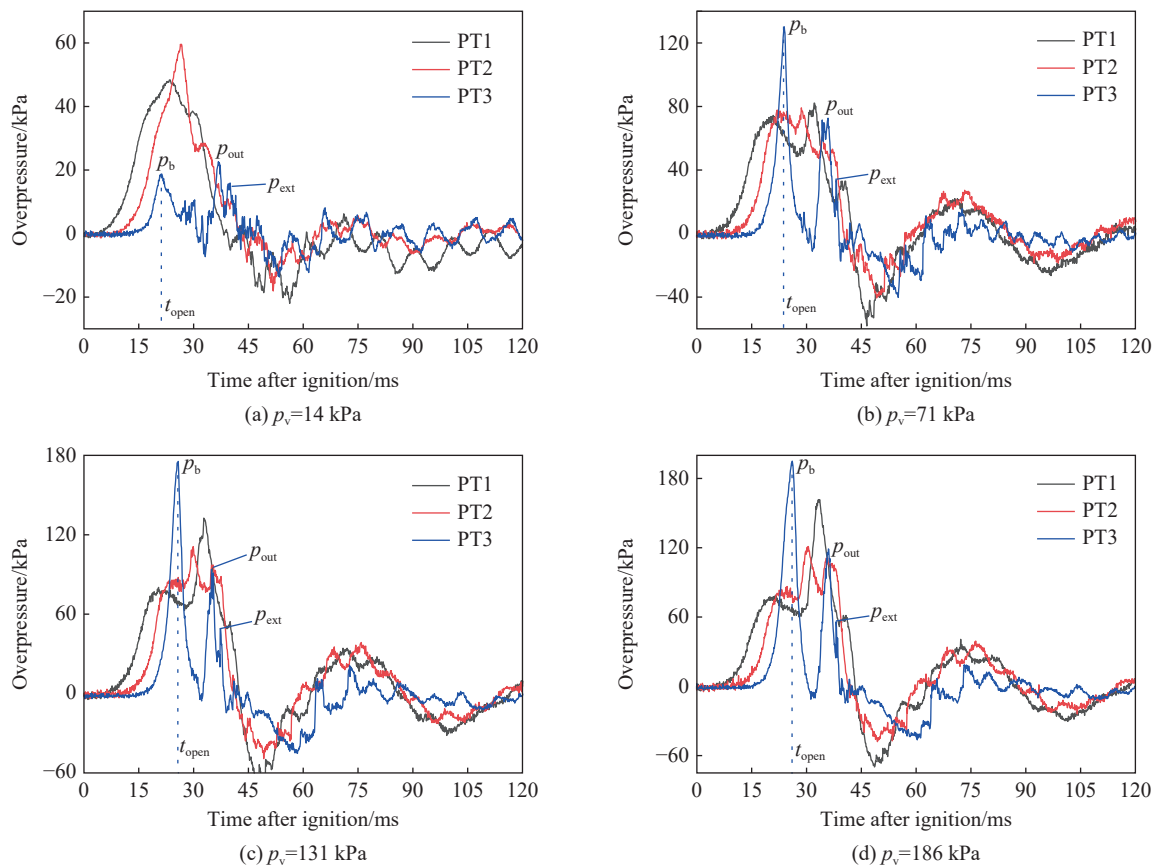


图 5 不同破膜压力下内部压力-时间曲线

Fig. 5 Internal pressure-time histories under different vent burst pressures

从图 5 可以看出, 在开口端压力传感器 PT3 测得的压力-时间曲线中可以观察到多峰现象, 特定的超压峰值与特定的产生机制有关。第 1 个压力峰值  $p_b$  是由覆盖在泄爆口的铝膜破裂所致<sup>[25-26]</sup>, 也被称为动态破膜压力, 因此该超压峰值对应时刻可近似看作泄爆口开启时间  $t_{open}$ 。当火焰到达泄爆口时, 可以观察到第 2 个超压峰值  $p_{out}$ , 它是由燃烧混合物的泄放引起的<sup>[27]</sup>, 燃烧混合物的泄放会导致管道内的体积流出率急剧增加, 这也可由对应时刻的火焰图像加以佐证。当先前从管道排出的未燃烧氢气-空气预混气体被火焰点燃时, 发生外部爆炸, 外部爆炸会使管道外部压力上升, 从而降低了泄爆口的内外压力梯度<sup>[28-29]</sup>, 进而阻碍了管道内部压力释放, 最终增大内部超压并产生了第 3 个压力峰值  $p_{ext}$ 。

随着  $p_v$  的升高, 铝膜破裂所需能量增加, 泄爆口开启时间延长。在  $p_v=14$  kPa 时, 泄爆口最早开启时

间  $t_{\text{open}}$  为 21.2 ms, 最晚开启时间  $t_{\text{open}}$  在  $p_v=186$  kPa 时取得, 约为 26.0 ms, 后者较前者延长了 22.6%。当  $p_v=14$  kPa 时, 在  $p_b$  和  $p_{\text{out}}$  之间可以观察到 PT3 传感器记录到的压力出现振荡现象, 如图 5(a) 所示。这可以归因于管道内燃烧产物的生成率与未燃烧混合物的体积流出率之间的竞争, 当前者大于后者时, 压力上升, 反之压力下降。此外, 当管道内部压力逐渐下降到环境压力时, 气体在惯性作用下继续向管道外部泄放, 导致管道内产生负压。因本文中管道长径比较大(16.7), 管道内的负压也不同; 离泄爆口越远, 负压也越大。Rui 等<sup>[14]</sup> 利用高度为 1.8 m 的容器开展泄爆实验时发现了类似的现象。若可燃气体的层流燃烧速度慢或者泄爆容器的长径比小, 则该现象不明显<sup>[9, 30]</sup>。

图 6 显示了各超压峰值与  $p_v$  之间的函数关系。 $p_b$  随  $p_v$  的升高而单调升高, 在  $p_v \geq 42$  kPa 时,  $p_b$  为最大压力峰值。 $p_b$  始终高于  $p_v$ , 这种差异是由于材料在动态瞬时压力脉冲负荷下比在缓慢的静态压力负荷下更坚固<sup>[31]</sup>。超压峰值  $p_{\text{out}}$  随  $p_v$  的升高而逐渐升高, 这是由于随着  $p_v$  的升高, 泄爆口打开时间越晚, 管道内消耗的氢气-空气混合气体越多, 反应越剧烈, 火焰泄放前管道内燃烧产物的生成率与未燃烧混合物的体积流出率之间的差值越大,  $p_{\text{out}}$  越高。值得注意的是, 当  $p_v \leq 27$  kPa 时,  $p_{\text{out}}$  略高于  $p_b$ ; 当  $p_v$  升高到 42 kPa,  $p_b$  开始超过  $p_{\text{out}}$ , 且两者之间差异随着  $p_v$  的继续升高而显著升高。此外, 超压峰值  $p_{\text{ext}}$  随  $p_v$  的升高而升高, 是所有实验中最低的峰值。

图 7 为不同破膜压力下管道内 3 个压力传感器测得的最大超压。当  $p_v$  由 14 kPa 升高到 186 kPa 时, 管道内的最大超压从 54.9 kPa 升高到 195.0 kPa, 增幅为 255.2%, 管道内部最大超压随  $p_v$  的升高而升高。分析认为: 随着  $p_v$  的升高, 管道内参与反应的氢气增加, 且氢气燃烧产生的能量无法及时得到释放, 从而导致超压升高。此外, 管道内最大超压的位置, 即由 PT1、PT2 或 PT3 测得的最大超压, 取决于  $p_v$ 。实验结果表明: 当  $p_v \leq 42$  kPa 时, 管道内部最大超压始终在管道中心处(PT2)测得; 而随着  $p_v$  继续升高, 管道内部最大超压在泄爆口附近处(PT3)取得, 这是因为本文中采用的泄爆管道长径比较大, 内部压力随距泄爆口距离变化而变化。当破膜压力较低时, 泄爆封口较早破裂, 离泄爆口近的位置, 泄放效果明显, 最大压力也低; 而在管道的点火端, 因燃烧产物向壁面传热导致压力降低。随着破膜压力升高, 泄压时间推迟; 泄爆封口破裂前, 由于管道内的氢气点燃后产生了亚声速传播的压缩波以及之后的燃烧波, 此时管道内部的未燃烧氢气会受到压力波冲击影响向前推动, 可燃气体被压缩至管道末端且湍流度升高, 因此管道末端的爆炸压力也就升高。李静野等<sup>[32]</sup> 和 Zhou 等<sup>[33]</sup> 分别在 3.5 和 7.2 m 的密闭管道进行爆炸实验时也发现了管道内不同位置最大压力不一致的现象。

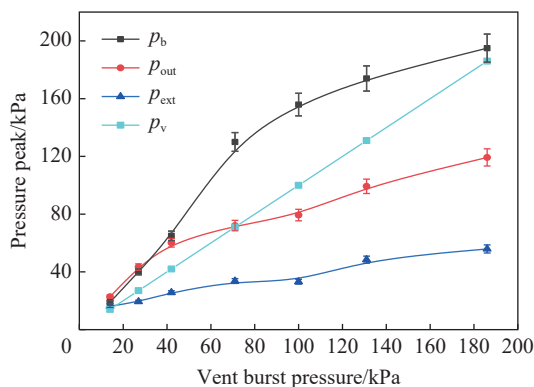


图 6 压力峰值与破膜压力之间的关系

Fig. 6 Relationships between the pressure peaks and the vent burst pressure

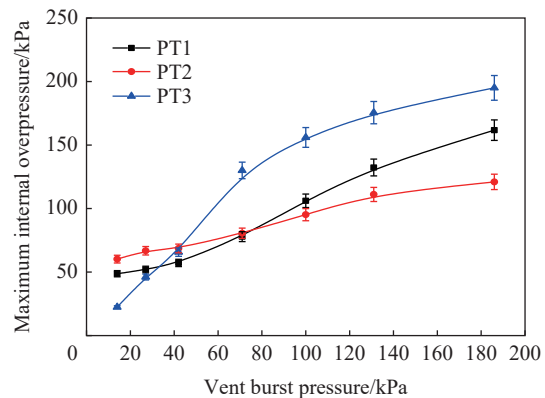


图 7 最大内部超压与破膜压力之间的关系

Fig. 7 Relationships between the maximum internal overpressures and the vent burst pressure

### 2.3 破膜压力对管道外火焰传播特性及压力的影响

图 8 给出了不同破膜压力下典型的外部火焰图像。当火焰到达泄爆口时, 火焰从泄爆口喷出, 并点燃外部可燃气体云触发外部爆炸。当  $p_v=14$  kPa 时, 观察到外部火焰始终保持射流结构, 在几毫秒内迅速

蔓延到最大火焰长度, 如图 8(a) 所示。但随着  $p_v$  的升高, 外部火焰结构发生显著变化。以  $p_v=71$  kPa 为例, 外部爆炸发生时, 火焰在泄爆口附近形成一个明亮的蘑菇状火球。随后, 外部火焰迅速发展, 达到最大长度, 如图 8(b) 所示。这种外部火焰不同的传播行为可以归因于外部可燃云结构。在低  $p_v$  时, 铝膜过早破裂, 泄爆口开启时间较早, 管道内的未燃气云会更早地泄放至管道外并向外喷射到离泄爆口较远的范围, 在管道外部形成一个细长的可燃气体区<sup>[34]</sup>, 而不是近乎球形的可燃云。此外, 通过对比图 8 可知, 尽管二者外部火焰传播行为存在差异, 但管道外部最大火焰长度几乎相同,  $p_v$  对管道外部最大火焰长度无明显影响。

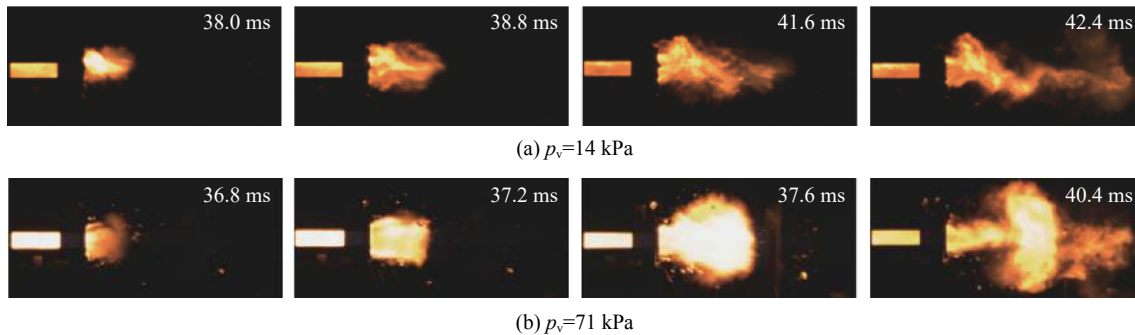


图 8 破膜压力为 14 和 71 kPa 时管道外部的火焰传播图像

Fig. 8 Flame propagation images outside the duct at the vent burst pressures of 14 and 71 kPa

图 9 为  $p_v=14$  kPa 和  $p_v=71$  kPa 时由压力传感器 PT4 和 PT5 监测到的外部超压-时间曲线。当  $p_v=71$  kPa 时, 在泄爆口打开后约 3.5 ms, PT4 处可以观察到一个微弱的压力峰值  $p_1$ , 它是由铝膜破裂后产生的弱冲击波所致<sup>[35]</sup>, 与  $p_v$  的大小有关; 当  $p_v=14$  kPa 时, 由于  $p_v$  太小而无法监测到该压力峰值。通过计算该破膜激波从泄爆口以超声速方式传播到 PT4, 平均速度约为 357 m/s。随后在 PT4 处可以观察到压力开始由环境压力下降至负压, 这是由未燃气体的膨胀引起的<sup>[36]</sup>。泄爆口打开后, 由于管道内外存在压差, 未燃气体经泄爆口排出后继续向外膨胀, 并在管道外部产生膨胀波, 气体经过膨胀波后, 其压力下降并产生负压。由于外部爆炸的发生, 在 PT4 的负压基础上叠加一个较强的压力脉冲, 并产生第 2 个压力峰值  $p_2$ ,  $p_2$  在外部压力-时间曲线中为最高压力。值得注意的是, 在泄爆口较远的 PT5 处并没有记录到压力下降至负压的现象, 虽然由破膜激波产生的  $p_1$  以及外部爆炸产生的  $p_2$  在 PT5 中同样被记录到, 但在 PT4 记录到的  $p_2$  低于 PT5。分析认为, 这并不是因为外部爆炸发生在距 PT5 较远的地方, 而是由于之前产生的负压降低了其压力峰值。

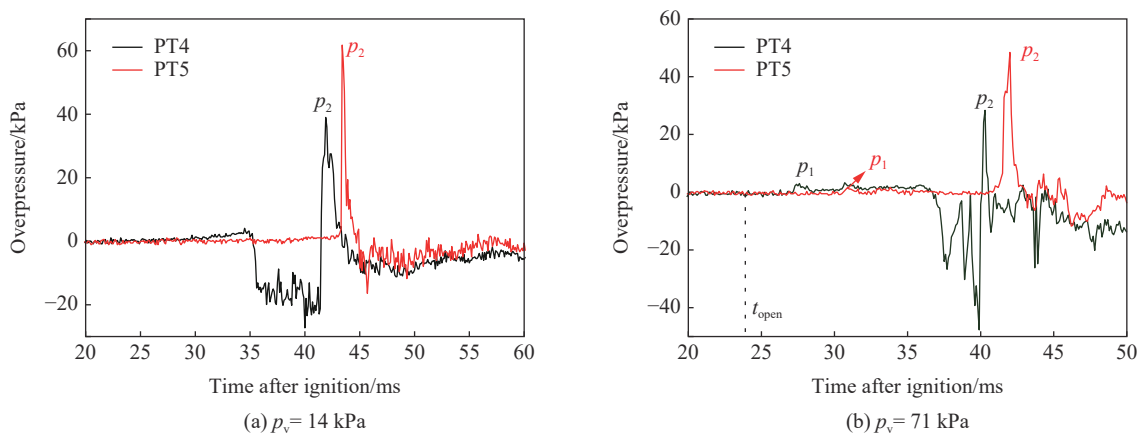


图 9 破膜压力为 14 和 71 kPa 时外部压力-时间曲线

Fig. 9 External pressure-time histories at the vent burst pressures of 14 and 71 kPa



不同破膜压力下管道外部最大超压如图 10 所示。最大外部超压并不随着  $p_v$  的升高而呈现单调变化规律。最大外部超压最小值在  $p_v=42$  kPa 时取得, 为 41.1 kPa; 当  $p_v=131$  kPa 时, 取得最大外部超压最大值 72.2 kPa。Guo 等<sup>[2]</sup>的研究表明, 外部爆炸的强度与可燃云的结构、体积、体积分数、湍流水平以及火焰出口速度等一系列错综复杂的因素有关。一方面,  $p_v$  的升高会导致外部可燃云体积减小, 这会造成外部爆炸强度的削弱; 另一方面,  $p_v$  的升高会提升外部的湍流水平以及火焰出口速度, 进而提高外部爆炸强度。当前者占主导地位时, 外部爆炸强度被减弱; 相反, 当后者占主导地位时, 外部爆炸强度被提高。

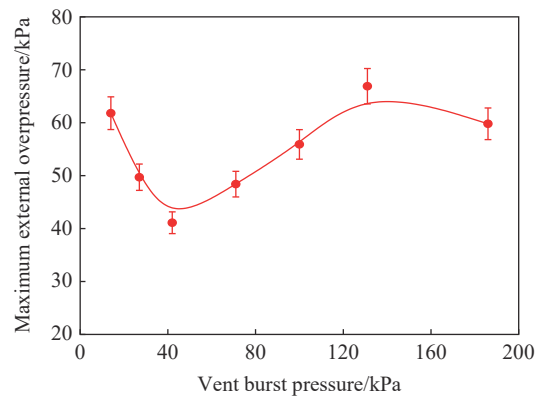


图 10 最大外部超压与破膜压力之间的关系

Fig. 10 Relationship between the maximum external overpressure and the vent burst pressure

### 3 结 论

利用自主设计的 5.00 m 长管道, 研究了破膜压力对管道中氢气体积分数为 30% 的氢气-空气预混气体火焰行为和压力特性的影响, 得出以下主要结论。

(1) 在所有实验中, 管道内火焰结构的前 3 个阶段分别为半球形、指形和郁金香形火焰, 但郁金香形火焰结构与其后的发展在不同破膜压力下存在显著差异。郁金香形火焰结构的形成过程伴随着火焰减速。实验结果可为大长径比管道内预混火焰传播模型的开发和验证提供参考。

(2) 对于靠近泄爆口的压力传感器, 在其所记录的压力-时间曲线上可以观察到 3 个压力峰。第 1 个压力峰值  $p_b$  是由覆盖在泄爆口上的铝膜破裂引起的, 第 2 个压力峰值  $p_{out}$  是由火焰到达泄爆口时燃烧混合物的泄放产生的, 第 3 个压力峰值  $p_{ext}$  是由外部爆炸引起的。在大多数实验中,  $p_b$  为最大压力峰值。最大内部超压随破膜压力  $p_v$  的升高而升高。当  $p_v \leq 42$  kPa 时, 管道内部最大超压在中心处取得; 然而, 随着  $p_v$  继续升高, 在管道开口端测得管道内部最大超压。

(3)  $p_v$  对管道外部火焰传播行为具有显著影响, 当  $p_v < 71$  kPa 时, 管道外部火焰保持射流状传播; 当  $p_v \geq 71$  kPa 时, 管道外部火焰可以观察到明亮的蘑菇状火球。破膜压力对外部火焰最大长度的影响可以忽略不计。最大外部超压与  $p_v$  之间呈现非单调变化规律。

### 参考文献:

- [1] 曹勇, 郭进, 胡坤伦, 等. 点火位置对氢气-空气预混气体泄爆过程的影响 [J]. *爆炸与冲击*, 2016, 36(6): 847–852. DOI: 10.11883/1001-1455(2016)06-0847-06.  
CAO Y, GUO J, HU K L, et al. Effect of ignition locations on vented explosion of premixed hydrogen-air mixtures [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2016, 36(6): 847–852. DOI: 10.11883/1001-1455(2016)06-0847-06.
- [2] XIAO H H, WANG Q S, HE X C, et al. Experimental study on the behaviors and shape changes of premixed hydrogen-air flames propagation in horizontal duct [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2011, 36(10): 6325–6336. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2011.02.049.
- [3] 程关兵, 王国大, 黄燕晓. 氢气爆燃转爆轰特性试验研究 [J]. *中国安全科学学报*, 2016, 26(12): 64–68. DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2016.12.012.  
CHENG G B, WANG G D, HUANG Y X. Experimental study on characteristics of hydrogen deflagration to detonation transition [J]. *China Safety Science Journal*, 2016, 26(12): 64–68. DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2016.12.012.
- [4] 郝腾腾, 王昌建, 颜王吉, 等. 氢气泄爆作用下结构动力响应特性研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2020, 40(6): 065401. DOI: 10.11883/bzycj-2019-0412.

- HAO T T, WANG C J, YAN W J, et al. Structural dynamical characteristics induced by vented hydrogen explosion [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2020, 40(6): 065401. DOI: 10.11883/bzyej-2019-0412.
- [5] 张庆武, 蒋军成, 喻源, 等. 泄爆导管对球形容器内气体爆炸泄放过程影响的试验 [J]. *安全与环境学报*, 2015, 15(2): 51–54. DOI: 10.13637/j.issn.1009-6094.2015.02.011.
- ZHANG Q W, JIANG J C, YU Y, et al. Experimental study over the effect of the relief duct on the venting of gas explosion in a spherical vessel [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2015, 15(2): 51–54. DOI: 10.13637/j.issn.1009-6094.2015.02.011.
- [6] GUO J, SUN X X, RUI S C, et al. Effect of ignition position on vented hydrogen-air explosions [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2015, 40(45): 15780–15788. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2015.09.038.
- [7] CHOW S K, CLEAVER R P, FAIRWEATHER M, et al. An experimental study of vented explosions in a 3 : 1 aspect ratio cylindrical vessel [J]. *Process Safety Environmental Protection*, 2000, 78(6): 425–433. DOI: 10.1205/095758200530970.
- [8] KASMANI R M, ANDREWS G E, PHYLAKTU H N, et al. Influence of static burst pressure and ignition position on duct-vented gas explosions [C] // Proceedings of the 5th International Seminar on Fire and Explosion Hazards. Edinburgh, England: 2007: 254–264.
- [9] BAO Q, FANG Q, ZHANG Y D, et al. Effects of gas concentration and venting pressure on overpressure transients during vented explosion of methane-air mixtures [J]. *Fuel*, 2016, 175: 40–48. DOI: 10.1016/j.fuel.2016.01.084.
- [10] 文虎, 高慧慧, 王秋红, 等. 泄爆口强度对管内天然气爆炸流场的影响仿真 [J]. *天然气工业*, 2019, 39(8): 126–136. DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2019.08.016.
- WEN H, GAO H H, WANG Q H, et al. A simulation study on the influence of vent port strength on the natural gas explosion flow field in line pipes [J]. *Natural Gas Industry*, 2019, 39(8): 126–136. DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2019.08.016.
- [11] DOU Z G, ZHENG L G, ZHENG K, et al. Effect of film thickness and methane fraction on explosion characteristics of biogas/air mixture in a duct [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2020, 139: 26–35. DOI: 10.1016/j.psep.2020.04.006.
- [12] RUI S C, LI Q, GUO J, et al. Experimental and numerical study on the effect of low vent burst pressure on vented methane-air deflagrations [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2021, 146: 35–42. DOI: 10.1016/j.psep.2020.08.028.
- [13] CAO Y, GUO J, HU K L, et al. Effect of ignition location on external explosion in hydrogen-air explosion venting [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, 42(15): 10547–10554. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2017.01.09.
- [14] RUI S C, GUO J, LI G, et al. The effect of vent burst pressure on a vented hydrogen-air deflagration in a 1 m<sup>3</sup> vessel [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018, 43(45): 21169–21176. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.09.124.
- [15] ZHANG S, TANG Z S, LI J L, et al. Effects of equivalence ratio, thickness of rupture membrane and vent area on vented hydrogen-air deflagrations in an end-vented duct with an obstacle [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44(47): 26100–26108. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.08.057.
- [16] Spanish Institute of Standardization. Gas explosion venting protective systems: UNE-EN 14994-2007 [S]. Brussels, Belgium: European Committee for Standardization, 2007.
- [17] Institute National Fire Protection Association. Standard on explosion protection by deflagration venting: NFPA 68 ERTA 1-2017 [S]. USA: American National Standards, 2017.
- [18] DAHOE A E. Laminar burning velocities of hydrogen-air mixtures from closed vessel gas explosions [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2005, 18(3): 152–166. DOI: 10.1016/j.jlp.2005.03.007.
- [19] FERRARA G, WILLACY S K, PHYLAKTU H N, et al. Venting of gas explosion through relief ducts: interaction between internal and external explosions [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 155(1): 358–368. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2007.11.077.
- [20] 李艳超, 毕明树, 高伟. 耦合火焰自加速传播的氢气云爆炸超压预测 [J]. *爆炸与冲击*, 2021, 41(7): 072101. DOI: 10.11883/bzyej-2019-0004.
- LI Y C, BI M S, GAO W. Theoretical prediction of hydrogen cloud explosion overpressure considering self-accelerating flame propagation [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2021, 41(7): 072101. DOI: 10.11883/bzyej-2019-0004.
- [21] JIANG X, FAN B, YE J, et al. Experimental investigations on the external pressure during venting [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2005, 18(1): 21–26. DOI: 10.1016/j.jlp.2004.09.002.
- [22] GUO J, WANG C J, LIU X Y. Experimental study on duct-vented explosion of hydrogen-air mixtures in a wide range of

- equivalence ratio [J]. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 2016, 55(35): 9518–9523. DOI: 10.1021/acs.iecr.6b02029.
- [23] SUN X X, LU S X. On the mechanisms of flame propagation in methane-air mixtures with concentration gradient [J]. *Energy*, 2020, 202: 117782. DOI: 10.1016/j.energy.2020.117782.
- [24] 肖华华. 管道中氢-空气预混火焰传播动力学实验与数值模拟研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2013.  
XIAO H H. Experimental and numerical study of dynamics of premixed hydrogen-air flame propagating in ducts [D] Hefei, Anhui, China: University of Science and Technology of China, 2013.
- [25] COOPER M G, FAIRWEATHER M, TITE J P. On the mechanisms of pressure generation in vented explosions [J]. *Combustion and Flame*, 1986, 65(1): 1–14. DOI: 10.1016/0010-2180(86)90067-2.
- [26] 王亚磊, 郑立刚, 于水军, 等. 约束端面对管内甲烷爆炸特性的影响 [J]. *爆炸与冲击*, 2019, 39(9): 139–148. DOI: 10.11883/bzycj-2018-0249.  
WANG Y L, ZHENG L G, YU S J, et al. Effect of vented end faces on characteristics of methane explosion in duct [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2019, 39(9): 139–148. DOI: 10.11883/bzycj-2018-0249.
- [27] GUO J, LI Q, CHEN D D, et al. Effect of burst pressure on vented hydrogen-air explosion in a cylindrical vessel [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2015, 40(19): 6478–6486. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2015.03.059.
- [28] TOMLIN G, JOHNSON D M, CRONIN P, et al. The effect of vent size and congestion in large-scale vented natural gas [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2015, 35: 169–181. DOI: 10.1016/j.jlp.2015.04.014.
- [29] KUZNETSOV M, FRIEDRICH A, STERN G, et al. Medium-scale experiments on vented hydrogen deflagration [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2015, 36: 416–428. DOI: 10.1016/j.jlp.2015.04.013.
- [30] RUI S C, WANG C J, LUO X J, et al. Experimental study on the effects of ignition location and vent burst pressure on vented hydrogen-air deflagrations in a cubic vessel [J]. *Fuel*, 2020, 278(15): 118342. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.118342.
- [31] FAKANDU B M, ANDREWS G E, PHYLAKTOU H N. Vent burst pressure effects on vented gas explosion reduced pressure [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2015, 36: 429–438. DOI: 10.1016/j.jlp.2015.02.005.
- [32] 李静野, 蒋新生, 李进, 等. 长径比对管道油气爆炸特性与火焰传播规律影响研究 [J]. *中国安全生产科学技术*, 2020, 16(8): 88–94. DOI: 10.11731/jissn.1673-193x.2020.08.014.  
LI J Y, JIANG X S, LI J, et al. Study on influence of length-diameter ratio on explosion characteristics and flame propagation laws of gasoline-air mixture in pipeline [J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2020, 16(8): 88–94. DOI: 10.11731/jissn.1673-193x.2020.08.014.
- [33] ZHOU N, NI P F, LI X, et al. Experimental study and numerical simulation of the influence of vent conditions on hydrogen explosion characteristics [J]. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, 2021(11): 1–16. DOI: 10.1080/15567036.2021.1898494.
- [34] ZHENG L G, DOU Z G, DU D P, et al. Study on explosion characteristics of premixed hydrogen/biogas/air mixture in a duct [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44(49): 27159–27173. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.08.156.
- [35] 杜扬, 王世茂, 袁广强, 等. 含弱约束端面短管道油气爆炸特性实验研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2018, 38(2): 465–472. DOI: 10.11883/bzycj-2015-0242.  
DU Y, WANG S M, YUAN G Q, et al. Experimental study of fuel-air mixture explosion characteristics in the short pipe containing weakly confined face at the end [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2018, 38(2): 465–472. DOI: 10.11883/bzycj-2015-0242.
- [36] 罗鑫蛟. 管道内贫氢泄爆超压特性及外部爆炸机理研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2021.  
LUO X J. Study on overpressure characteristics and external explosion mechanism of vented lean hydrogen explosion in pipeline [D]. Hefei, Anhui, China: Hefei University of Technology, 2021.

(责任编辑 蔡国艳)