

DOI: 10.11883/bzycj-2018-0394

高压氢气泄漏自燃形成喷射火的实验研究*

闫伟阳¹, 潘旭海^{1,2}, 汪志雷¹, 华 敏^{1,2}, 蒋益明¹, 王清源¹, 蒋军成^{1,2}

(1. 南京工业大学安全科学与工程学院, 江苏 南京 210009;

2. 南京工业大学江苏省危险化学品本质安全与控制技术重点实验室, 江苏 南京 210009)

摘要: 为了探究高压氢气泄漏发生自燃时所需的临界初始释放压力随管道长度的变化规律, 了解管内自燃火焰向管外喷射火焰转变的发展过程, 本文利用压力、光电以及高速摄像等测试系统展开实验研究。实验结果表明: 当管道长度相同, 初始释放压力较低时, 氢气泄漏不容易发生自燃; 随着管道长度的增加, 氢气发生自燃时的临界初始释放压力先缓慢减小后迅速增大; 当管道长度一定时, 初始释放压力越大, 激波传播速度越快, 氢气管内自燃的位置距离爆破片越近; 气流通过激波马赫盘后, 火焰燃烧加剧; 随着时间的增加, 火焰长度呈现先增大后逐渐减小的变化趋势, 喷射火焰尖端的平均传播速度逐渐减小; 火焰宽度呈现先增大后迅速减小至稳定值的变化规律。

关键词: 氢气; 自燃; 管道; 激波; 喷射火焰

中图分类号: O389

国标学科代码: 13035

文献标志码: A

氢能作为一种清洁能源, 具有广泛的应用前景和市场潜力。1980 年联合国召开的“联合国新能源和可再生能源会议”提出应该大力发展氢能等新能源, 希望通过逐步减少化石燃料的使用来降低大气的环境污染和减少温室气体的排放。氢能是一种具有极高地位的战略能源。目前, 很多发达国家正在大力发展氢气能源和氢燃料电池^[1]。但是, 氢气的一系列不安全特性, 如极低的点火能(仅为 0.017 mJ^[2]), 较宽的燃烧范围(体积比 4%~75%), 以及较强的泄漏特性等导致氢气极易发生火灾和爆炸事故。氢气的这些危险性制约着氢气的广泛使用和发展, 氢气的安全问题是氢能推广和使用过程中面临的重大挑战。

高压储氢是目前氢气储存的最佳方式, 然而高压储氢一旦泄漏释放, 很容易引发火灾爆炸事故。Xu 等^[3]通过统计 676 起高压氢气泄漏的灾害事故, 发现高达 61.98% 的事故中无明显的点火源, 该类事故通常被认为是氢气泄漏后发生了自燃。1973 年, Wolinski 等^[4]在激波管的实验中发现周围环境温度低于氢气自燃温度的条件下, 氢气仍然可以发生自燃。Dryer 等^[5]在氢气泄放实验中未使用下游管道, 发现氢气自燃很难发生, 他们认为采用下游泄放管道是氢气自燃的必要条件, 因为泄放管道为高压氢气发生膨胀和激波加热混合气体提供了空间。Mogi^[6]先采用长度为 3 mm 的管道进行实验, 发现即使释放压力达到 20 MPa 时, 氢气仍很难发生自燃。随后, Mogi 等^[7]在实验中采用不同长度的管道进行氢气的泄放实验, 结果发现随着管道长度增加氢气自燃的初始释放压力逐渐减小。Lee 等^[8]与 Mogi 等^[7]在不同的实验研究中得出了相同的结论, 即在一定管道长度范围内, 随着泄放管道长度的增加氢气自燃发生的可能性会增大, 同时氢气自燃所需要的最小释放压力也会降低, 他们认为泄放管道长度的增加可以为氢气和空气的混合提供充足的时间从而促进其发生自燃。Kitabayashi 等^[9]研究了较长管道下氢气自燃的初始释放压力与管道长度的关系, 实验发现当管道长度超过 1 200 mm 以后, 高压氢气发生自燃的初始释放压力反而会升高。

图 1 所示为高压氢气泄漏自燃的扩散点火理论示意图。高压氢气从管道中突然释放至常压空气,

* 收稿日期: 2018-10-16; 修回日期: 2019-02-12

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0804700, 2016YFC0800100)

第一作者: 闫伟阳(1992—), 男, 硕士研究生, 455314754@qq.com;

通信作者: 潘旭海(1977—), 男, 博士, 教授, xuhaipan@njtech.edu.cn。

会在氢气射流前端形成前导激波^[10-14]。前导激波、激波与激波之间的相互作用、以及高速气流与管壁之间和高速气流之间的高速摩擦会加热前导激波后方的氢-空气混合区域。当氢-空气混合区域温度达到氢气自燃温度且氢气浓度处于点火范围,经过一段时间的点火延迟后,氢气自燃现象便会发生。段强领等^[10]根据扩散点火理论,结合激波管流动理论解释了氢气自燃现象,他们认为激波、激波反射和激波聚焦等多维激波结构可以加热气体使得氢气发生自燃,而不同的管道长度、直径和形状则会影响多维激波结构的生成从而改变氢气自燃的临界条件。Golub 等^[11-12]利用实验和数值模拟相结合的方法研究高压氢气泄漏自燃现象,结果发现氢气-空气混合气体泄漏后温度的升高是导致氢气自燃的关键因素,只有混合气体达到高于氢气自燃点的高温后才可以诱发着火。为直接观察激波在管道内传播的过程, Kim 等^[13]采用透明的矩形泄放管道,实验结果表明,氢气自燃发生在混合区前沿的边界层,且火焰沿边界层向混合区前沿和混合区尾部传播,并且观察到最初点火位置始终在混合区边界层的混合点处。Grune 等^[14]利用纹影技术研究透明圆形管道中高压氢气的泄放过程,实验发现前导激波和氢气-空气接触面之间形成了多维的反射激波。Kaneko 等^[15]在实验中观察到了管道中的激波和自燃诱导产生的环形火焰,并且发现隔膜破裂过程是影响氢气自燃的重要因素之一。Kaneko 等^[16]采用透明管道(管道材质为有机玻璃)进行高压氢气泄放实验,发现高压氢气穿过隔膜与靠近管壁的热空气混合,随后混合气体发生自燃,且实验结果表明氢气发生自燃严重依赖于隔膜破裂时产生冲击波的强度。

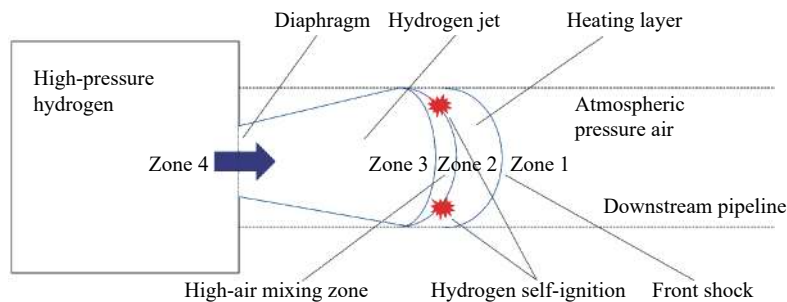


图 1 高压氢气泄漏自燃的扩散点火理论

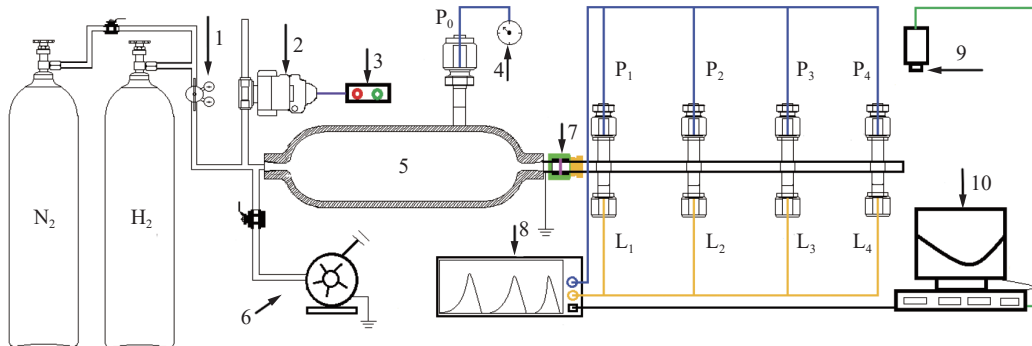
Fig. 1 Diffusion ignition theory of high-pressure hydrogen self-ignition

综述国内外文献研究发现,绝大多数学者的实验以及模拟的管道长度集中于 1 000 mm 以下的短管道,且他们发现随着管道长度的增加初始释放压力会降低。仅 Kitabayashi 等^[9]发现当管道长度大于 1 200 mm 时,随着管道长度的增加导致氢气自燃的初始释放压力会增加,但他们并没有研究高压氢气释放后的在管道内部不同位置的的压力变化和氢气管内自燃情况以及喷射火焰形态的演变过程。本实验采用压力传感器记录管道内的压力变化,通过光电传感器监测高压氢气在管道内的自燃情况及确定氢气自燃可能发生的起始区域,高速摄像记录管内自燃火焰向管外火焰发展的演变过程。论文通过对 300 mm 到 3 000 mm 的管道长度下的泄放实验研究,旨在探究高压氢气泄漏自燃时的临界初始释放压力随管道长度的变化规律、管内激波的传播特性以及高压氢气泄漏自燃形成喷射火焰的形态变化过程。

1 实验设置

高压氢气泄漏模拟实验装置示意图如图 2 所示。实验装置由气瓶组、高压氢气储罐、含爆破片的夹持器、高压泄放管道、真空泵、高速摄像机、示波器、压力和光电测量系统等组成。氢气(纯度 99.99%)为实验气体;氮气(纯度 99.99%)主要用于前期测量系统的测试、实验前的气密性检查以及尾气吹扫。整套装置设计最高承压 30 MPa。实验采用的泄放管道材质为 316 L 不锈钢,高压泄放管道是由三段等长度管道通过真空连接径向密封方式连接而成,爆破片到管道喷口之间的距离即为泄放管道长度,泄放管道长度为 300、700、1 200、1 700、2 200 和 3 000 mm,管道直径为 10 mm; $P_1 \sim P_4$ 为压力传感器, $L_1 \sim L_4$ 为光电传感器,压力传感器与光电传感器对称分布。绿色部分与黄色部分为爆破片夹持器,

紫红色部分为爆破片, 传感器 P_1 距离爆破片 65 mm, 传感器 P_4 距离尾喷口 55 mm。管壁的压力传感器为压电式压力传感器; 管壁光电传感器。控制氢气释放的装置是带有“十”字减弱槽的平板带槽型样式爆破片, 如图 3(b) 所示。管道部件的连接方式如图 3(a) 所示。



1. Pressure reducing valve; 2. High-pressure pneumatic valve; 3. Controller; 4. Pressure gauge; 5. Tanks; 6. Vacuum pump; 7. Rupture disc; 8. Data processor; 9. High-speed camera; 10. Computer

图 2 高压氢气泄漏模拟实验装置示意图

Fig. 2 Illustration of the experimental platform

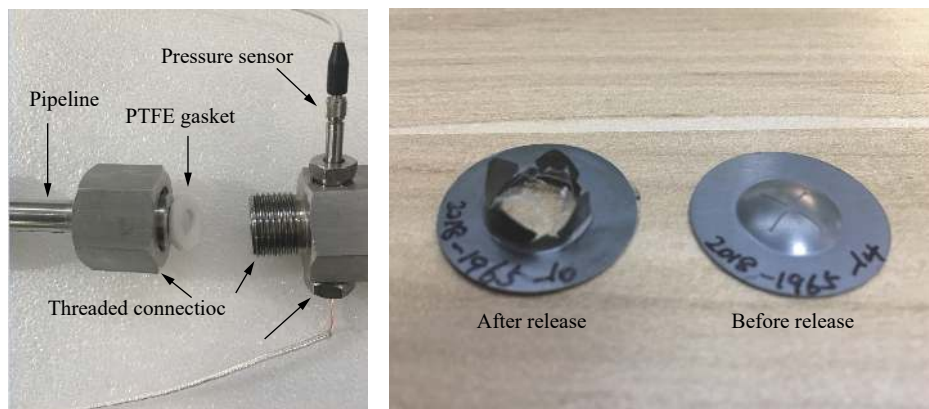


图 3 部分零件实物图

Fig. 3 Some actual of parts

实验时首先关闭 2 号阀门并安装爆破片, 然后用真空泵将爆破片上游的储罐和管道抽成真空, 之后启动数据测量仪器, 然后开启氢气气瓶阀门, 之后打开阀门 1 注入氢气直至爆破片破裂后, 立即关闭阀门 1 和氢气气瓶阀门, 然后开启阀门 1, 打开氮气气瓶阀门吹扫, 最后吹扫完毕, 关闭氮气阀门, 关闭阀门 1, 保存数据, 准备下一组实验。实验过程中抽真空结束后, 向主体容器的进气流量约为 $0.6 \text{ m}^3/\text{min}$ 。

2 结果与讨论

2.1 管道长度与氢气泄漏自燃时临界初始释放压力的关系

图 4 是氢气自燃时管道长度与初始释放压力的关系图。从图中可以发现, 同一管道长度下, 初始释放压力较低时, 氢气泄漏不会发生自燃现象, 只有当初始释放压力超过某一临界值后, 氢气泄漏后才会发生自燃。氢气射流的膨胀冷却作用会导致氢-空气混合区域(即图 1 的 2 区)温度低于其自燃温度, 这是导致初始释放压力较低时氢气泄漏后不易发生自燃的主要原因^[10]。随着初始释放压力的增加, 氢-空气混合区(即图 1 的 2 区)和射流区(即图 1 的 3 区)的流动加强, 在接触面的氢和空气混合加剧, 进而导致混合气体受到的激波压缩、激波干扰升温作用以及高速气流与管壁之间、高速气流之间摩擦生热作用

增强,进而促进氢气发生自燃。从图4中高压氢气泄漏自燃的变化曲线还可以发现,在管道直径(即,10 mm)不变的条件下,存在一个管道长度(即,1 700 mm)的拐点。当管道长度从300 mm增加至1 700 mm时,临界初始释放压力随长度的增加而缓慢减小;管道长度大于1 700 mm时,临界初始释放压力随长度的增加而陡增;而管道长度达3 000 mm时,初始释放压力即使高至12.15 MPa,都未发生自燃的现象。

2.2 高压氢气释放后在泄放管道内的传播过程

图5是压力传感器 P_1 在前3 000 μs 内监测到的压力变化过程,释放条件为管长700 mm、释放压力3.04 MPa。传感器 P_1 的设计安装位置距离爆破片为65 mm,将传感器 P_1 探测到压力瞬间上升的时刻定为 t_0 。从图中发现首次压力急剧上升时间为15 μs ,这表明前导激波开始形成。整个压力变化过程可分为3个阶段,即图中所示的 $t_0 \sim t_1$ 、 $t_1 \sim t_2$ 和 $t_2 \sim t_3$ 。

在 t_0 到 t_1 阶段,管内压力呈现3次突升的变化过程,这与爆破片的多步破裂行为有关。爆破片的多步破裂行为会导致压力传感器监测到的压力在波动中迅速上升^[10]。在 t_1 时,管内上升压力达到最高值,爆破片完全破裂,这时所需要的时间约为125 μs 。

在 t_1 到 t_2 阶段,管内压力是一个先短暂下降后波动上升的过程。氢气经爆破片突然释放后会剧烈膨胀,其形成的膨胀波会导致压力发生急剧下降。之后,随着氢气射流的到来会导致传感器监测到管内压力上升。之后,压力出现波动,推测主要是管道内由激波、反射激波以及激波相互作用等形成的多维激波结构造成的^[17-18]。再然后,压力出现突升,推测主要是氢气射流内产生了稀疏波,稀疏波随射流向下游传播并作用于压力传感器所致。在 t_2 到 t_3 阶段,由于储罐内压力的逐步下降和氢气射流的不断膨胀,管内压力出现逐步下降。

图6和图7分别是管长1 700 mm下初始释放压力为3.70 MPa和5.79 MPa时的压力图和光电图。从图6中可以发现,高压氢气突然释放后,传感器 P_1 、 P_2 和 P_3 监测到的前导激波强度变化较小;当前导激波传播至管道末端时,传感器 P_4 监测到的前导激波强度出现明显下降。激波在管道内的传播过程中,激波反射和激波相互作用等形成的多维激波结构会使前导激波强度增强^[9],而流体粘性的影响、前导激波与管壁之间的摩擦以及湍流边界层产生的激波能量耗散作用则会导致前导激波强度降低^[19]。通过传感器 P_1 、 P_2 和 P_3 监测到的压力变化可以发现,当前导激波在管道前段部分传播时,前导激波强度由于受到增强效应(多维激波结构等)和减弱效应(能量耗散作用等)的共同作用,进而导致前导激波的强度保持在恒定值附近上下波动;当前导激波传播至管道末端时,减弱效应在前导激波的传播过程中占据了主导地位,所以前导激波的强度发生了明显降低。激波平均传播速度是根据两个相邻的压力传感器的距离以及前导激波到达时间之差的比计算得来的。通过计算,当与爆破片距离的区间为65 mm到592 mm、592 mm到1 118 mm、1 118 mm到1 645 mm时,在初始释放压力为3.70 MPa下,分别所对应的激波平均传播速度分别为1 106 m/s、1 003 m/s、975 m/s;在初始释放压力为5.79 MPa下,分别所对应的

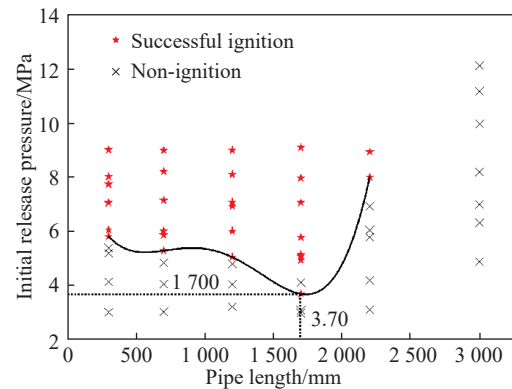


图4 氢气自燃时管道长度与初始释放压力的关系

Fig. 4 Pipe lengths vs. initial release pressure of hydrogen self-ignition

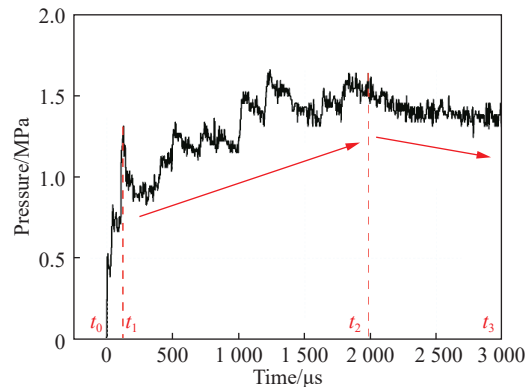


图5 压力传感器 P_1 监测到的压力波形变化

Fig. 5 Pressure waveform variation monitored by pressure sensor P_1

激波平均传播速度为 1 281 m/s、1 205 m/s、1 106 m/s。通过光电图可以发现, 初始释放压力为 3.70 MPa 时, 光电传感器 L_3 首先接收到光电信号, 说明氢气泄漏自燃的位置在传感器 L_2 与传感器 L_3 之间; 初始释放压力为 5.79 MPa 时, 光电传感器 L_1 首先接收到短暂光电信号, 说明氢气泄漏自燃的位置在传感器 L_1 附近。因此, 与释放压力 3.70 MPa 时相比较, 释放压力 5.79 MPa 时的氢气管内泄漏自燃位置距离爆破片更近。

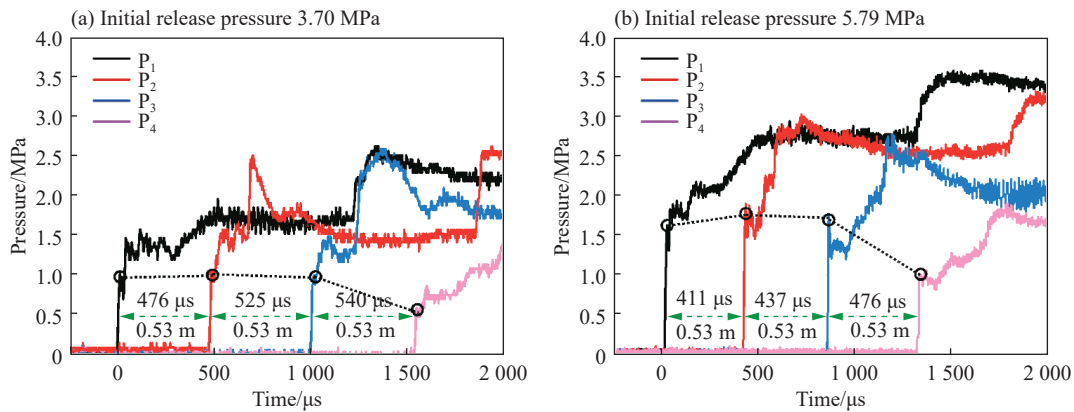


图 6 管道长度 1 700 mm 下的 2 组实验压力图

Fig. 6 Pressure of pipe length 1 700 mm

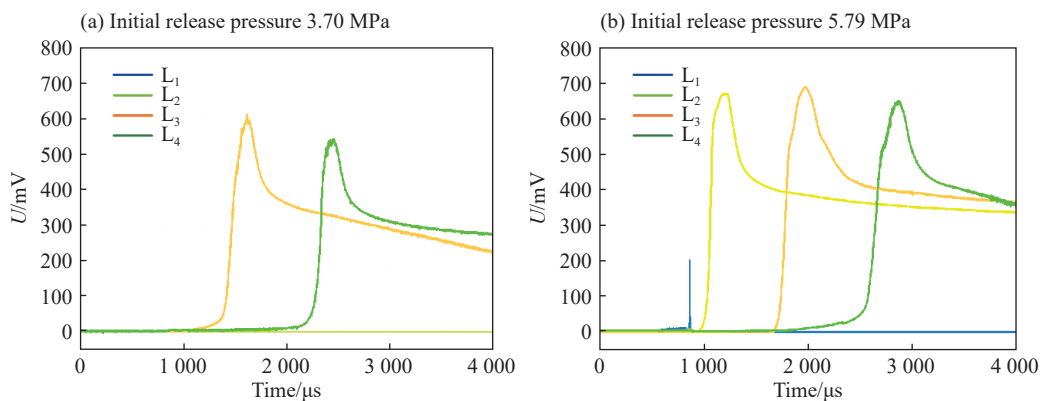


图 7 管道长度 1 700 mm 下的 2 组实验光电图

Fig. 7 Photo-electricity of pipe length 1 700 mm

图 8 是管长 700 mm 下不同初始释放压力时激波平均传播速度的变化图, 激波平均传播速度是根据两个相邻的压力传感器的距离以及前导激波到达时间之差的比计算得来的。从图中可以发现, 初始释放压力越大, 激波平均传播速度越快。根据激波管流动理论, 初始释放压力越大, 高压氢气突然释放后形成的前导激波强度越大, 激波平均传播速度越快。高压氢气初始释放阶段, 由于爆破片的多步破裂行为会不断产生新的压缩波, 所以激波平均传播速度会先有一个短暂的增大过程^[10]。当爆破片完全破裂后, 将不会再产生新的压缩波, 而没有新的压缩波产生则意味着激波强度已到达峰值。激波在传播过程中

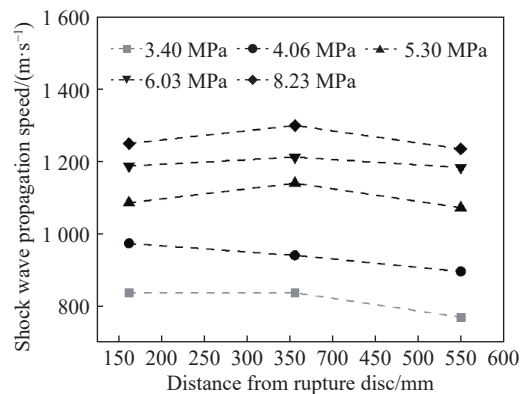


图 8 管长 700 mm 不同初始释放压力下的激波传播速度图

Fig. 8 Shock wave propagation speed of pipe length 700 mm under different initial release pressures

由于流体粘性、管壁摩擦等能量耗散作用会降低激波的传播速度。从图 8 中还可以看出,在管长 700 mm 下,初始释放压力较大时,激波平均传播速度会出现先增大后减小的过程;初始释放压力较低时,激波平均传播速度呈缓慢减小的传播过程。

2.3 氢气管内自燃形成管外喷射火焰的演变过程

图 9 是管内火焰向管外柱状火焰转变的过程发展图,实验初始条件是管长 700 mm 初始释放压力 7.08 MPa。实验高速摄像机帧速为 $50\,000\text{ s}^{-1}$,将管口处观察到火焰亮点时的时间定义为 $t=0\ \mu\text{s}$ 。

当 $t=0\ \mu\text{s}$ 时,在管口处观察到微小的火焰单元。经过较短的时间,管内自燃火焰从泄放管道喷射至空气中,并继续向下游传播,可以发现火焰前锋呈现出平面的形状。当 $t=20\ \mu\text{s}$ 时,发现距离管口约 40 mm 处存在激波马赫盘。激波马赫盘的出现是因为膨胀不足的氢气射流中会产生许多膨胀波,膨胀波向射流外部传播,当它们遇到射流边界层时,会以压缩波的形式被反射,形成桶状激波、马赫盘以及反射激波等典型波系^[10,20-21]。

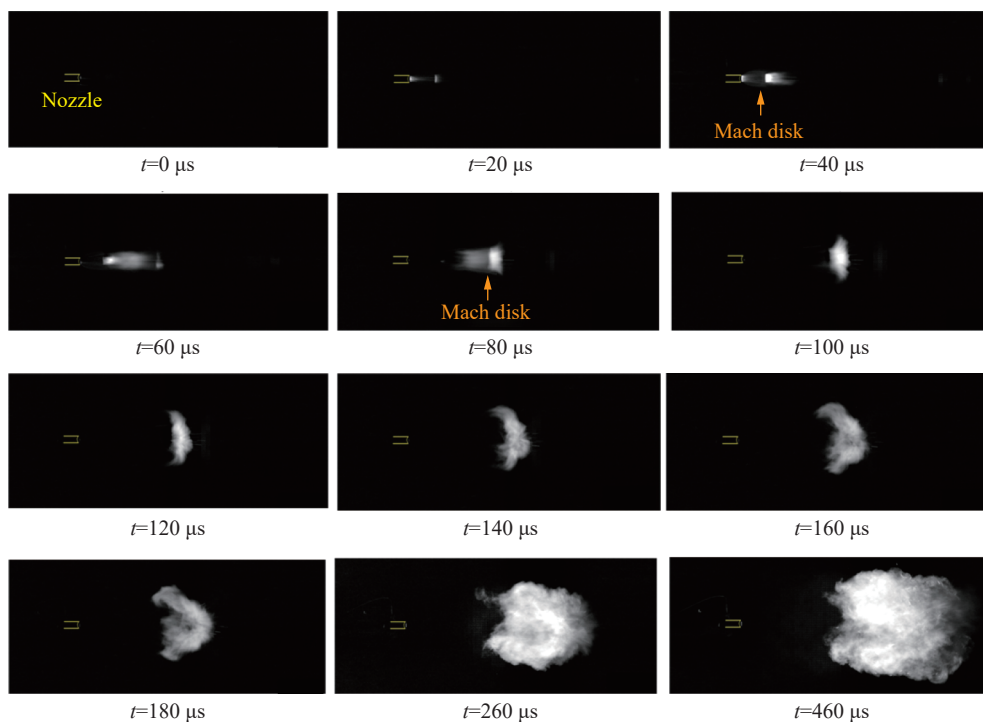


图 9 管内火焰向管外喷射火焰转变的过程图

Fig. 9 Transition of flame inside pipe to the jet flame outside pipe

在 $t=0\ \mu\text{s}$ 到 $t=40\ \mu\text{s}$ 之间,随着时间的推移,管口处明亮区域逐渐稳定。当 $t=40\ \mu\text{s}$ 时,可以发现激波马赫盘后部产生的明亮扁平火焰。当 $t=60\ \mu\text{s}$ 时,管口处明亮区域消失,由于膨胀不足的氢气射流继续发展,在火焰前锋发现第二个激波马赫盘。在 $t=40\ \mu\text{s}$ 和 $t=80\ \mu\text{s}$ 时,观察到当气流通过激波马赫盘后的束状区域会更明亮,这说明激波马赫盘会使管外燃烧加剧。从 $t=100\ \mu\text{s}$ 到 $t=160\ \mu\text{s}$ 之间,可以发现明亮的束状区域逐渐发展成弓形火焰。弓形火焰的出现主要是因为许多可燃性混合气体在束状区域形成并被点燃,从而导致形成强烈燃烧的火焰。从 $t=160\ \mu\text{s}$ 到 $t=460\ \mu\text{s}$ 之间,随着氢气射流的发展,管口氢气射流前端经膨胀发散后会与空气形成可燃混合物,弓形火焰会继续引燃火焰后方的可燃混合物,最后形成柱状火焰。

图 10 是管长 700 mm 初始释放压力 7.08 MPa 时的管外火焰发展图。管外火焰发展图是数码相机每隔 10 ms 采集一次火焰图像数据所得,将管口出现柱状火焰的时间设为 $t=0\ \text{ms}$ 。从图中可以发现,随着时间的增加,火焰长度呈现先增大后逐渐减小的变化趋势;火焰宽度呈现先增大后迅速减小至稳定值的

变化规律, 因为球形火焰仅存在于火焰发展的前段时间(即, $t=480$ ms 之前)。火焰形成初期, 管内火焰传播至管口时, 会在管口处形成柱状火焰。之后, 火焰迅速发展, 随着高压氢气的不断注入会形成明亮的燃烧区, 燃烧区由于膨胀发散作用逐渐发展成球形火焰, 并不断的向下游移动。高压氢气喷射火焰的形成初期由于初始释放压力比较大, 喷射火焰整体上是动量控制的水平射流火焰^[10, 22]。随着罐内压力不断降低, 射流减弱, 球形火焰不断远离喷口, 并与射流区的连接逐渐弱化。然后, 球形火焰逐渐减弱, 残余火焰会向下游继续运动一段距离后完全消失。随着火焰的进一步发展, 可以发现火焰前端略有上升。这是因为随着储罐上游高压氢气进气阀门的关闭, 罐内气体压力持续降低, 喷射火焰由动量控制逐渐转变为动量-浮力混合控制。最后, 随着储罐及管内气体逐渐消耗殆尽, 喷射火焰将会逐渐熄灭。

图 11 和图 12 所示为不同管道长度下、不同初始释放压力的火焰发展图和火焰尖端平均速度变化图(图例中, LF 是火焰长度, WF 是火焰宽度, 后面两个数字分别表示管道长度和初始释放压力)。通过对比两组火焰发展图可以发现, 在火焰发展阶段, 火焰长度和宽度上升所需要的时间相差不大; 之后, 在火焰长度和宽度下降阶段, 图 12 中比图 11 中的下降所需要的时间要短。这是因为图 11 中的实验采用手动控制关闭阀门 1(见图 1 所示), 图 12 中的实验采用自动控制关闭阀门 1, 自动控制阀门比手动控制阀门的反应时间要短。综述图 11 和图 12 发现, 阀门控制方式、管道长度以及初始释放压力对于火焰最长长度和最宽宽度的影响不大, 火焰最长长度可达 4.29 m, 火焰最宽宽度可达 1.83 m。

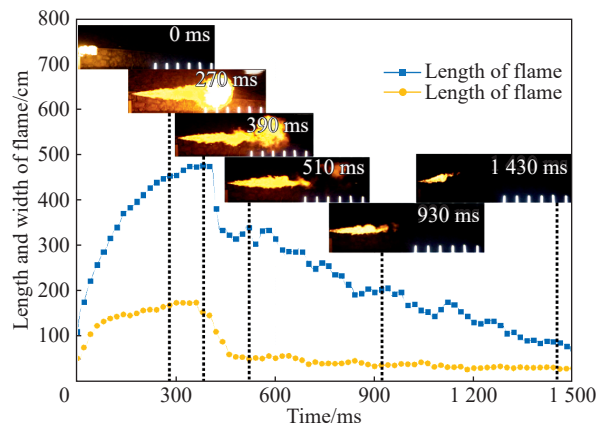


图 10 管长 700 mm 初始释放压力 7.08 MPa 下管外火焰的发展图

Fig. 10 Flame development process of pipe length 700 mm and initial release pressure 7.08 MPa

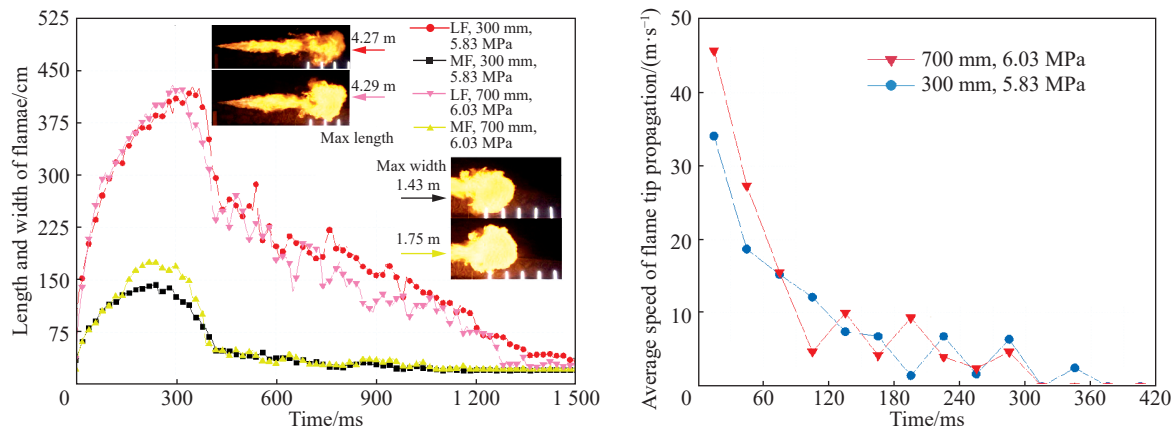


图 11 管长 300 mm 和 700 mm 初始释放压力相近的管外火焰形态变化

Fig. 11 Flame development process with similar initial release pressure of 300 mm and 700 mm

火焰尖端平均速度值是根据每隔 30 ms 的火焰长度之差与时间间隔之比得到的平均值。从火焰尖端平均速度变化图中可以发现, 火焰尖端平均速度随着时间的增加逐渐减小。其中, 前 105 ms 内火焰尖端平均速度的下降速率较大; 之后, 火焰尖端平均速度在波动中发生缓慢下降。高压氢气喷射火焰形成初期, 由于初始释放压力较大, 所以喷射火焰尖端的初始传播速度也比较大。从图中可以发现, 在前 30 ms 内, 火焰尖端平均传播速度在 35 m/s 到 50 m/s 之间。之后, 随着管外火焰的发展, 由于空气阻力的作用, 火焰尖端速度逐渐减小至 0 m/s。

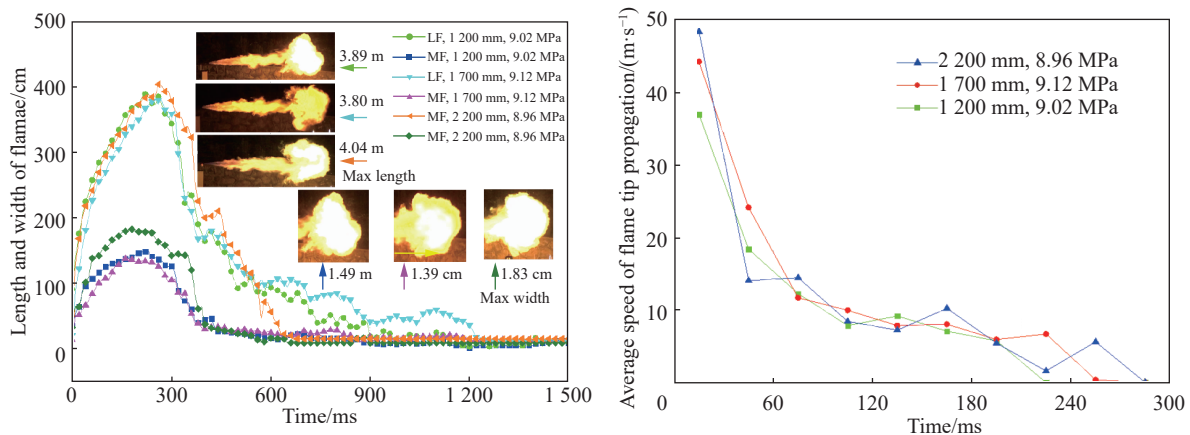


图 12 管长 1 200、1 700 和 2 200 mm 初始释放压力相近的管外火焰形态变化

Fig. 12 Flame development process with similar initial release pressure of 1 200, 1 700 and 2 200 mm

3 结 论

本文通过高压氢气泄漏实验平台,研究了高压氢气在不同长度管道下释放发生自燃的临界初始释放压力的变化规律、管内激波传播特性以及管内火焰向管外火焰的形态演变过程,同时测量了喷射火焰的形态参数。得出的主要结论如下:

(1)同一管道长度下,当初始释放压力较大时,氢气更容易发生管内自燃;随着管道长度的增加,导致氢气自燃的临界最小初始释放压力呈现先缓慢减小后突然增大的变化规律;管长 1 700 mm,发生氢气自燃的最小初始释放压力是 3.70 MPa。

(2)高压氢气通过爆破片释放至管道中,管内压力并不会呈现直线上升,而是一个波动上升的过程。这与爆破片的多步破裂行为,以及管内激波的相互作用有关。实验发现,同一管道长度下,初始释放压力越大,管内自燃发生的位置距离爆破片越近,且激波传播速度也越大。

(3)通过高速摄像图像发现,管口处的激波马赫盘会加剧管外火焰的燃烧。高压氢气从管内自燃发展到管外火焰后,首先会形成柱状火焰进而演变为球形火焰,最后发展为稳定的喷射火焰。当储罐容量一定时,随着时间的增加,火焰长度表现为先增大后缓慢减小,火焰宽度表现为先增大后迅速减小至稳定恒定值,火焰尖端传播速度逐渐减小。

(4)综述实验可知,在直径 10 mm 的管道中初始释放压力在 3.70 MPa 到 9.12 MPa 时氢气射流火焰长度范围在 3.50 m 到 4.50 m 之间,喷射火焰宽度范围在 1.30 m 到 2.00 m 之间,前 30 ms 的喷射火焰尖端平均速度在 30 m/s 到 50 m/s 之间。

参考文献:

- [1] NICOLETTI G, ARCURI N, NICOLETTI G, et al. A technical and environmental comparison between hydrogen and some fossil fuels [J]. *Energy Conversion and Management*, 2015, 89(89): 205–213.
- [2] ONO R, ODA T. Spark ignition of hydrogen-air mixture [C] // 2008: 012003. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/142/1/012003>.
- [3] XU B P, WEN J X, DEMBELE S, et al. The effect of pressure boundary rupture rate on spontaneous ignition of pressurized hydrogen release [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2009, 22(3): 279–287. DOI: 10.1016/j.jlp.2008.07.007.
- [4] WOLINSKI M, WOJANSKI P. Investigation into the mechanism of the diffusion ignition of a combustible gas flowing into an oxidizing atmosphere [C] // *Proceedings of the 14th symposium on combustion*, 1973: 1217–1223.

- [5] FREDERICK L D, MARCOS C, ZHENWEI Z, et al. Spontaneous ignition of pressurized releases of hydrogen and natural gas into air [J]. *Combustion Science and Technology*, 2007, 179(4): 663–694.
- [6] MOGI T, WADA Y, OGATA Y, et al. Self-ignition and flame propagation of high-pressure hydrogen jet during sudden discharge from a pipe [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2009, 34(14): 5810–5816. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2009.04.079.
- [7] MOGI T, KIM D, SHIINA H, et al. Self-ignition and explosion during discharge of high-pressure hydrogen [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2008, 21(2): 199–204. DOI: 10.1016/j.jlp.2007.06.008.
- [8] LEE H J, KIM Y R, KIM S H, et al. Experimental investigation on the self-ignition of pressurized hydrogen released by the failure of a rupture disk through tubes [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2011, 33(2): 2351–2358. DOI: 10.1016/j.proci.2010.06.040.
- [9] KITABAYASHI N, WADA Y, MOGI T, et al. Experimental study on high pressure hydrogen jets coming out of tubes of 0.1–4.2 m in length [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2013, 38(19): 8100–8107. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2012.10.040.
- [10] 段强领. 高压氢气泄漏自燃机理及其火焰传播特性实验研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2016.
DUAN Qiangling. Experimental study of spontaneous ignition and subsequent flame propagation of high-pressure hydrogen release [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2016.
- [11] GOLUB V V, BAKLANOV D I, BAZHENOVA T V, et al. Shock-induced ignition of hydrogen gas during accidental or technical opening of high-pressure tanks [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2007, 20(4): 439–446.
- [12] GOLUB V V, BAKLANOV D I, GOLOVASTOV S V, et al. Mechanisms of high-pressure hydrogen gas self-ignition in tubes [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2008, 21(2): 185–198. DOI: 10.1016/j.jlp.2007.06.012.
- [13] KIM Y R, LEE H J, KIM S, et al. A flow visualization study on self-ignition of high pressure hydrogen gas released into a tube [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2013, 34(2): 2057–2064. DOI: 10.1016/j.proci.2012.07.020.
- [14] GRUNE J, SEMPET K, KUZNETSOV M, et al. Experimental investigation of flame and pressure dynamics after spontaneous ignition in tube geometry [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2014, 39(35): 20396–20403. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2014.05.046.
- [15] KANEKO W, SHII K. Effects of diaphragm rupturing conditions on self-ignition of high-pressure hydrogen [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, 41(25): 10969–10975. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2016.04.211.
- [16] KANEKO W, ISHII K. An experimental study on the mechanism of self-ignition of high-pressure hydrogen [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, 42(11): 7374–7379. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2016.06.046.
- [17] XU B P, WEN J X. Numerical study of spontaneous ignition in pressurized hydrogen release through a length of tube with local contraction [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012, 37(22): 17571–17579. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2012.04.150.
- [18] 陈强. 激波管流动理论和实验技术 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 1979.
CHEN Qiangling. Theory and experimental techniques of shock tube flows [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 1979.
- [19] SPENCE D A, WOODS B A. A review of theoretical treatments of shock-tube attenuation [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2006, 19(2): 161–174.
- [20] LEE B J, JEUNG I S. Numerical study of spontaneous ignition of pressurized hydrogen released by the failure of a rupture disk into a tube [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2009, 34(20): 8763–8769. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2009.08.034.
- [21] SHEN X, SUN J. Numerical simulation on the spontaneous ignition of leaking high pressure hydrogen from terminal unit [J]. *Physics Procedia*, 2012, 33(6): 1833–1841.
- [22] STUDER E, JAMOIS D, JALLAIS S, et al. Properties of large-scale methane/hydrogen jet fires [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2009, 34(23): 9611–9619. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2009.09.024.

Experimental investigation on spontaneous combustion of high-pressure hydrogen leakage to form jet fire

YAN Weiyang¹, PAN Xuhai^{1,2}, WANG Zhilei¹, HUA Min^{1,2}, JIANG Yiming¹,
WANG Qingyuan¹, JIANG Juncheng^{1,2}

(1. *College of Safety Science and Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 210009, Jiangsu, China;*
2. *Jiangsu Key Laboratory of Intrinsic Safety and Control of Hazardous Chemicals,*
Nanjing Tech University, Nanjing 210009, Jiangsu, China)

Abstract: In this paper, to investigate the variation of the critical initial release pressure with the pipeline length in high-pressure hydrogen leakage that leads to spontaneous combustion and the transition process from spontaneous combustion flame inside the tube to the jet flame outside the tube, we conducted experiments using a pressure gauge, a photoelectric and high-speed camera, etc. Our results showed that, at the same pipeline length and under a low initial release pressure, hydrogen is not apt to spontaneous combustion. The minimum initial release pressure of hydrogen spontaneous combustion decreases slowly and then increases rapidly with as the pipe length increases. At the same pipeline length, the greater the initial release pressure, the faster the shock wave propagation, and the closer the hydrogen self-ignition position inside the pipe to the rupture disc. It is found that the flame combustion is intensified after the airflow passed through the Mach disk. With the increase of time, the flame length increases first and then decreases gradually, the average propagation speed of the jet flame tip decreases gradually. The flame width increases first and then decreases rapidly to a stable value.

Keywords: hydrogen; spontaneous combustion; pipeline; shock wave; jet fire

(责任编辑 王易难)