doi:10.3969/j.issn.1001-4837.2025.11.003

试验研究

氢燃料电池公交车车载氢系统火烧试验研究

向冬梅[1,2],毛占鑫[1,2],付　娜[1,2],易守春[1,2],张　勋[1,2],李伊惠[1,2]
（1.中国汽车工程研究院股份有限公司,重庆 401120;2.中汽院新能源科技有限公司,重庆 401120）

摘　要:为了探究氢燃料电池公交车在火灾中的安全性,通过搭建车载氢系统火烧试验平台,开展140 L-35 MPa Ⅲ型储氢瓶4瓶组火烧试验研究。车载氢系统设有2个管径为10 mm的紧急泄放口,每个储氢瓶瓶口阀单独设置1个TPRD,重点分析车载氢系统在火灾环境下的热响应规律与泄放规律。试验结果表明:火烧过程中火焰融合至车载氢系统的中部位置,导致中间位置的2个气瓶较早泄放,未被火焰完全包裹的气瓶存在不泄放的可能;高压气体泄放过程中,管路受到气体冲击,泄放管路发生2次变形;4瓶组共享泄放管道时的排放速率并不一致,储氢瓶TPRD内易熔合金存在未完全熔化的可能。未来应重点关注高压储氢瓶TPRD及其泄放管路的协同安全设计,提升极端工况下高压储氢瓶的使用安全性能。

关键词:车载氢系统;火烧试验;燃料电池公交车;氢安全
中图分类号:TH49;TK912;TM911.42　　**文献标志码:**A

Fire test research on on-board hydrogen system of hydrogen fuel cell buses

XIANG Dongmei[1,2],MAO Zhanxin[1,2],FU Na[1,2],YI Shouchun[1,2],ZHANG Xun[1,2],LI Yihui[1,2]
（1.China Automotive Engineering Research Institute Co.,Ltd.,Chongqing 401120,China;
2.China Automobile Academy New Energy Technology Co.,Ltd.,Chongqing 401120,China）

Abstract: To explore the safety of hydrogen fuel cell buses in case of fire,a fire test platform for the on-board hydrogen system was established,and a fire test study on a four-bottle group of 140 L-35 MPa type Ⅲ hydrogen storage cylinders was carried out. The on-board hydrogen system was equipped with two emergency vent with a pipe diameter of 10 mm,and a separate TPRD was set at the bottle mouth valve of each hydrogen storage cylinder.The thermal response law and release law of the on-board hydrogen system in a fire environment were analyzed emphatically.The test results show that during the burning process,the flame fuses to the middle position of the on-board hydrogen system,causing the two gas cylinders at the middle position to release prematurely. There is a possibility that the gas cylinders not completely wrapped by the flame will not release.During the high pressure gas release process,the pipeline is subjected to gas impact,and the release pipeline undergoes two deformations.When the four-bottle group shares the venting pipeline,the venting rate is not consistent.There is a possibility that the fusible alloy in the TPRD of the hydrogen storage cylinder has not been completely melted.In the future,particular attention should be paid to the coordinated safety design of TPRD for high pressure hydrogen storage vessels and their venting pipelines to enhance the safety performance of high pressure hydrogen storage vessels under extreme working conditions.

Key words:on-board hydrogen system;fire test;fuel cell buses;hydrogen safety

0　引言

氢能凭借其来源丰富、零碳排放、应用场景广泛等优势,正加速崛起成为全球能源革新的核心驱动力[1]。氢燃料电池汽车具有零碳排放、长续航、加注快等特点,是氢能应用的重要领域。北京

收稿日期:2025-05-09　**修回日期:**2025-10-16
基金项目:国家重点研发计划项目（2022YFB2502404）

冬奥会期间，累计投入超1 000辆氢燃料电池汽车参与示范运营，涵盖客车、轿车、特种车辆等多种车型[2]，为氢能的示范应用提供了世界级舞台。车载氢系统是氢燃料电池汽车的重要组成部分，包含氢气的加注、储存、输送、供给和控制，由于其储存的高压氢气具有分子小、易燃易爆等属性，其在火灾等事故中的安全性能，将直接影响氢燃料电池汽车的社会认可度与商业化进程，使车载氢系统的安全性备受关注。而现有措施防范重大潜在风险的能力不足，导致涉氢安全事故屡有发生，因此，整车氢安全性能评估是燃料电池汽车示范运营成效的关键。

氢燃料电池汽车在火灾环境下，由于受到高温火焰的冲击，储氢瓶瓶体缠绕的碳纤维树脂复合材料的力学性能将会快速退化、承压能力骤降，从而引发瓶体破裂，泄漏出来的氢气被点燃后可能进一步触发可燃气云爆炸[3]。为了预防事故发生，高压储氢瓶瓶口阀或瓶尾阀设有温度驱动安全泄压装置（temperature activated pressure release device，TPRD）[4]，TPRD一般采用玻璃泡形式或易熔合金形式，当温度达到110±5 ℃后，TPRD被激活，使得瓶内的氢气释放出来[5]。如果周边有火源，只出现氢气燃烧而避免发生爆炸。火烧试验作为评估高压储氢瓶火灾环境风险特征的关键研究方法，能准确复现汽车起火后气瓶实际经历的火烧情况[6-7]。

目前，国内外研究人员主要集中在对单个储氢瓶进行火烧试验与仿真模拟研究。为了保证氢燃料电池汽车的安全可靠，国内外标准均将火烧试验纳入气瓶型式试验项目，确保TPRD在极端工况下能正常响应，但这些标准在试验形式、试验步骤、合格指标等方面存在较大差异[8]。吕洪等[4]为了评价高压储氢瓶在火灾中的安全性，对70 MPa的Ⅳ型瓶进行耐火性能的数值仿真，结果表明，在油池火灾中，气瓶中间高度靠上方、头尾两端的圆肩部位最有可能先发生失效。吕弘鹏[7]试验研究了火烧条件下，35 MPa和70 MPa储氢瓶外壁面温度和瓶内压力响应特性，并开展35 MPa压力下53，140，210 L三种容积气瓶的火烧对比试验，研究高压储氢瓶不同容积下的爆炸危险性。ZHENG等[9]建立三维计算流体力学模型，研究不同燃料及流量对瓶内氢气温度的影响，结果表明，燃料类型对内部气体升温速率影响显著，燃料流量增大时，温升速率随之增加，但流量超过一定值后，温升速率变化趋于平缓。KASHKAROV等[10]通过数值模拟，研究了储氢瓶充装压力对气瓶失效形式的影响，结果表明，初始压力是气瓶最终发生破裂或泄漏的主要决定因素。ZHENG等[11-12]揭示了充装介质、充装压力及火灾情形对TPRD动作时间的影响，结果表明，充装介质对内部气体温升速率和TPRD动作时间影响很小，TPRD动作时间受压力的影响较小，TPRD的激活由储氢瓶外部火焰传递的热量主导。VALENCIA等[13]研究了100 L-Ⅳ型瓶在不同压力下的火烧性能和爆炸模式，结果表明，在相同的火灾条件下，容器的失效模式由初始压力决定。RUBAN等[14]开展了36 L-70 MPa Ⅳ型瓶火烧试验，研究了不同火烧阶段和不同压力对其爆破延迟的影响，提出带有一个小孔的安全释放装置即可避免爆炸事故发生。HALM等[15]通过开展高压储氢瓶防火试验，发现其失效模式取决于储氢瓶内压临界值，同时通过建立有限元模型，实现预测高压储氢瓶在火灾中的破裂或泄漏时间。

综上所述，高压储氢瓶火烧试验已较为成熟，但是针对氢燃料电池汽车实际搭载的多瓶组车载氢系统的火烧试验研究尚处空白。而氢燃料电池公交车大多搭载由4个、6个或8个高压储氢瓶组组成的车载氢系统，其车载氢系统的火烧试验更能反映氢燃料电池汽车起火后真实泄放情况。因此，本文通过开展真实工况下的车载氢系统火烧试验，以期为车载氢系统的安全设计提供科学指导。

1 试验对象

某氢燃料电池公交车上搭载有4个140 L-35 MPa Ⅲ型高压储氢瓶，理论储氢量13.456 kg，每个高压储氢瓶设有2个泄压装置，瓶口阀设置1个TPRD，瓶尾阀设置1个安全泄压装置（pressure relief device，PRD）。气瓶垂直于轴线放置于车顶，系统设有2个管径为10 mm的紧急泄放口，紧急泄放口位于车辆左右两侧，朝向为斜向上，可在车辆遇紧急事故时，氢气通过紧急泄放口对空排放，避免积聚在不易扩散的部位，降低安全隐患。按照摆放顺序，对4个高压储氢瓶进行编号，靠近泄放口的气瓶为1#，如图1所示，主要技术参数如表1所示。

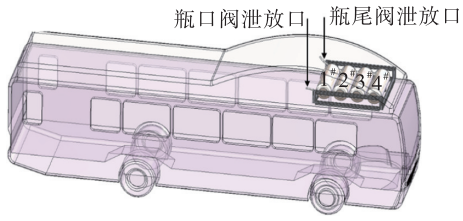


图1 氢燃料电池公交车车载氢系统示意

Fig.1 Schematic diagram of the on-board hydrogen system of hydrogen fuel cell bus

表1 车载氢系统主要技术参数

Tab.1 Main technical parameters of the on-board hydrogen systems

项目	参数
储氢瓶型号	CHG3-370-140-35B
瓶阀型号	TV-240-350
瓶组尺寸/mm	1 958×1 948×445
TPRD激活温度/℃	110±5
PRD激活压力/MPa	43.75
管路材料	316L不锈钢
各阀件情况	配置限流阀、减压阀、安全阀、泄放阀、单向阀等

2 试验设计

2.1 试验平台

车载氢系统火烧试验平台具备多角度记录、采集试验过程的功能,如图2所示。

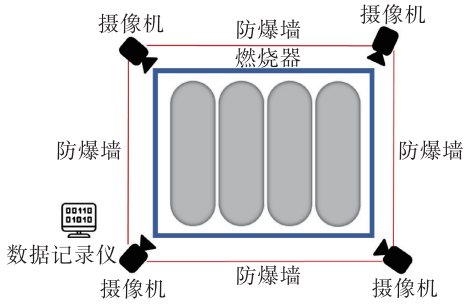


图2 车载氢系统火烧试验平台示意

Fig.2 Schematic diagram of the on-board hydrogen system fire test platform

平台由车载氢系统、热响应参数采集系统、图像采集系统和火灾环境模拟系统组成,主要通过获取储氢瓶外壁面温度和瓶内压力参数,来评估车载氢系统在火烧过程中的安全性能。其中,热响应参数采集系统主要包括温度传感器、压力传感器、数据记录仪等,用于实时监测瓶壁的温度变化及瓶内的压力变化。图像采集系统主要包括摄像机、监控主机和显示屏,实时记录试验全过程中的火焰形态。火灾环境模拟系统的核心是燃烧器,提供试验所需的燃料及火源。车载氢系统放置于防爆墙中,防止试验过程中爆炸、飞溅物对人员造成损伤。

2.2 火源

试验使用液化石油气(LPG)作为燃料,燃烧器尺寸为2 250 mm×2 000 mm,燃料通过管路输入,由燃烧管上的燃料孔喷出,点燃后形成火源。试验开始前,将车载氢系统水平放置于燃烧器上,其下表面距火源约100 mm,火源宽度大于瓶组直径,火源长度大于气瓶总长,使火焰由下部和两侧将气瓶环绕。如图3所示,局部火烧位置为气瓶中间位置,火源长度为250 mm,整体火烧时火源长度吞没整个车载氢系统。

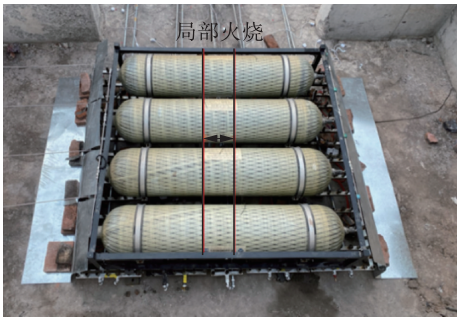


图3 试验现场布置及局部火烧位置

Fig.3 The layout of the test site and the location of local fires

2.3 数据采集

分别使用热电偶与压力传感器采集储氢瓶数据,其详细参数如表2所示。在每个储氢瓶的瓶口阀、瓶体顶部、瓶体中部和尾阀处各处布置1个热电偶,瓶体底部等间距布置3个热电偶。每个气瓶在瓶口阀处引出压力管线,并在压力管线上安装1只压力传感器,如图4所示。

表2 传感器参数

Tab.2 Sensor parameters

传感器参数	热电偶	压力传感器
型号	WRNK-131	CYYZ18-X-24-A1-14-B-G-B
工作温度范围	0~1 300 ℃	-40~85 ℃
测量范围	0~1 300 ℃	0~70 MPa
精度	1%FS	0.1%FS

2.4 试验方法

试验前将车载氢系统加压至公称工作压力35 MPa。局部火烧阶段:点火后1 min内,至少1只热电偶显示火焰温度达到300 ℃;3 min内至少1只热电偶显示火焰温度达到600 ℃;在之后的7 min内不得低于600 ℃,但不得高于900 ℃。点

火后10 min进入整体火烧阶段，火焰应迅速布满整个车载氢系统，热电偶指示温度达到800 ℃，但不得高于1 100 ℃，火烧试验过程中的温度要求如表3所示。

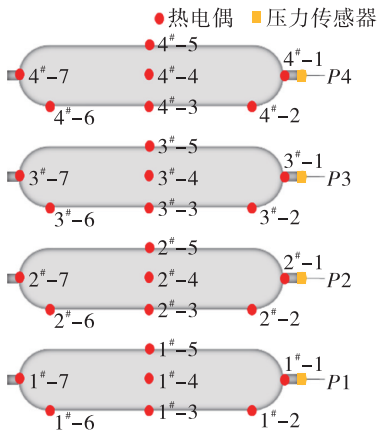


图4 温度和压力测量位置示意

Fig.4 Schematic diagram of temperature and pressure measurement positions

3 试验结果及分析

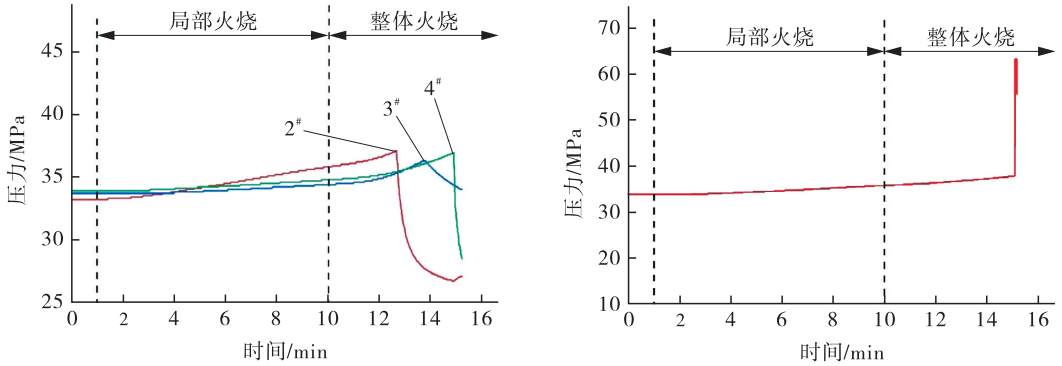
3.1 内部压力变化

在外部火源的冲击下，热量通过热对流、热传导和热辐射的形式，不断传递给瓶内的氢气，使其温度不断升高，分子运动越来越剧烈，瓶内压力也随之升高，如图5所示。局部火烧初期火源较小，同时受气瓶碳纤维树脂复合材料层导热系数低的影响，热量短时间内难以通过瓶壁传入瓶内高压氢气。因此，4个气瓶内的压力变化较小。随着火烧时间的增加，气瓶内的压力开始逐渐升高。进入整体火烧阶段后，瓶壁热通量增大，4个气瓶内部压力较局部火烧阶段均明显加速上升。由图5(a)可以看出，2#，3#，4#气瓶分别在试验进行到758，826，891 s时，TPRD达到启动温度，易熔合金熔化形成泄放通道，气瓶开始泄压。

表3 火烧试验过程温度要求

Tab.3 Temperature requirements during the fire test process

时间/min	操作	局部火烧区域		整体火烧区域(除局部火烧区域)	
		最低温度/℃	最高温度/℃	最低温度/℃	最高温度/℃
0~1	点燃燃烧器	—	900	—	—
1~3	稳定局部火源	300	900	—	—
3~10	稳定局部火源	600	900	—	—
10~11	在第10 min点燃主燃烧器	600	1 100	—	1 100
11~12	稳定整体火源	600	1 100	300	1 100
12~试验结束	稳定整体火源	800	1 100	800	1 100



(a)2#，3#，4#瓶火烧过程中的压力变化

(b)1#瓶火烧过程中的压力变化

图5 车载氢系统压力随时间的变化情况

Fig.5 The variation of the pressure of the on-board hydrogen system over time

文献[4]和文献[7]的试验结果与本试验TPRD开启时间吻合，均在约13 min开启，排除此次试验结果的偶然性与随机性。TPRD开启后，压力从最高值开始快速降低，2#，3#，4#气瓶泄压时的压力分别为37.1，36.3，36.9 MPa，较初始压力分别增加3.9，2.6，3.0 MPa。对比3个气瓶的泄放速率：2#，3#，4#气瓶在泄放21 s后，瓶内压力分别为30.6，35.5，28.5 MPa，泄放速率分别为0.309 5，0.038 1，0.400 0 MPa/s。因此，4#气瓶的泄放速率最快，2#气瓶次之，3#气瓶的泄放速率最慢。

由图5(b)可知,试验过程中1#气瓶压力未下降,TPRD未开启。当试验进行到902 s时,传感器指示压力在1 s内从37.6 MPa急升至62.9 MPa。此现象是由于压力传感器工作温度范围为-40~85 ℃,尽管在试验前对压力管线进行高温防护,仍导致其在高温火烧过程中失效,无法准确显示气瓶内部压力,出现压力急剧上升的假象。

现场监控画面如图6所示,火焰主要融合至车载氢系统中部,1#气瓶位于边缘位置,由于空气流动影响,火焰未完全包裹1#气瓶和瓶阀,导致其受热不均,TPRD未开启。火焰由下部及两侧将中间位置的2#,3#气瓶环绕,因此2#,3#号气瓶较早紧急泄放。由于4#气瓶处于边缘最内侧位置,受外界气流扰动较小,其TPRD也顺利开启,但没有2#,3#气瓶火焰包裹的程度大,因此4#气瓶泄放滞后。

3.2 外壁面温度变化

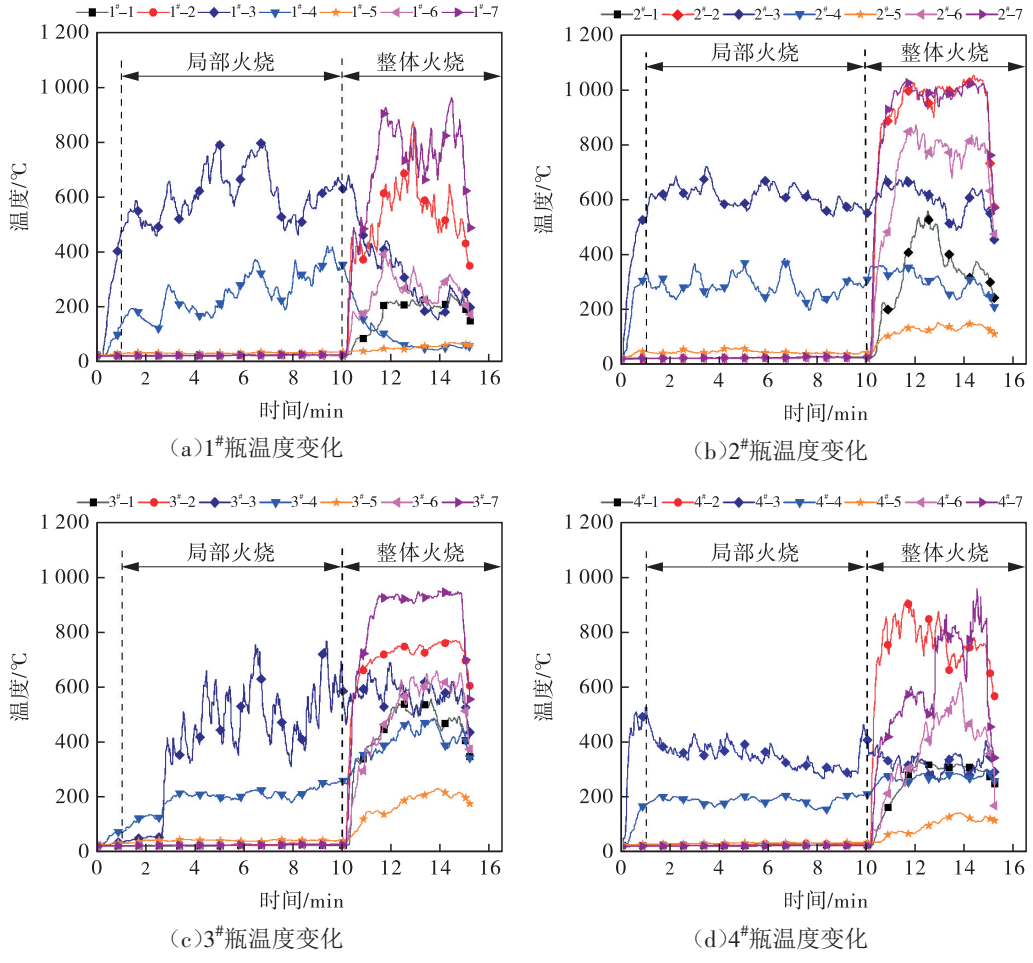
火烧条件下,气瓶外壁面温度不断升高,4个气瓶火烧过程中的温度变化如图7所示。



图6 火烧试验过程中的火焰状态

Fig.6 The state of the flame during the fire test process

试验开始后的1 min内为点火阶段,之后进入局部火烧阶段,气瓶上完全处于局部火烧区域的热电偶指示温度上升,处于火烧区域外的热电偶指示温度无明显变化,这表明局部火烧时,气瓶瓶壁沿其轴向传热缓慢。10 min后进入整体火烧阶段,气瓶上位于整体火烧的1,2,6,7号位置完全暴露于火焰中,温度急剧上升,同时瓶内气体温度迅速上升,最终导致TPRD开启。



(a)1#瓶温度变化 (b)2#瓶温度变化

(c)3#瓶温度变化 (d)4#瓶温度变化

图7 车载氢系统温度随时间的变化情况

Fig.7 The variation of the temperature of the on-board hydrogen system over time

此外，在局部火烧与整体火烧过程中，气瓶外壁面温度沿瓶体周向分布不均匀，温度差异较大。气瓶底部温度高于气瓶顶部与中部温度，主要由于气瓶底部较中部受火焰的直接冲击，热通量高，温升快；而气瓶顶部因瓶体自身的阻隔作用，火焰难以直接冲击该区域，温升缓慢。

3.3 泄放分析

文中所用氢燃料电池公交车储氢瓶组紧急泄放口，分别位于瓶组两侧斜向上，如图8所示。试验中，2#，3#，4#气瓶位于左侧瓶口阀处的TPRD启动，PRD未达到触发条件。因此，气瓶内氢气均从左侧瓶口阀连接的泄放管路处泄放。2#气瓶TPRD最先启动，启动3 s后，由于泄压时气流强大的冲击力直接作用于泄放管路折弯处，导致左侧泄放管路发生第一次变形，同时泄放出来的氢气产生射流火焰，氢射流火焰未按照既定的方向喷射。4#气瓶TPRD启动时，左侧泄放管路发生第二次变形，其前后变化如图9所示。右侧管路因无气体泄放，未发生变形。泄放管路发生变形是多因素耦合的结果，TPRD启动瞬间，气瓶内的高压气体急速泄放到常压环境中，高速气流具有巨大的动量。当气流直接冲击管路折弯处时，流动方向发生改变，从而对弯头产生持续的冲击力，导致管路无法承受而发生变形，这是其发生变形的直接原因。同时，由于焦耳–汤姆逊效应，高压氢气在泄放过程中会发生绝热膨胀，气体温度快速下降，管路在低温下的韧性会大幅下降，抗冲击和变形的能力严重不足，容易发生变形。



图8 车载氢系统紧急泄放口

Fig.8 Emergency vent of the on-board hydrogen system

由前文可知，4#和2#气瓶泄放速率分别约为3#气瓶的10.5倍和8.1倍。造成此现象的原因主要是试验气瓶TPRD内置易熔合金，当易熔合金达到激发温度时，其结构与受热均匀度相关，会进行缓慢且不同程度的熔化，泄压通道缓慢扩大，熔化的金属可能再次凝结堵塞泄放通道。因此，3#气瓶瓶阀内的易熔合金，可能因受热不均出现未完全熔化或熔化的金属凝结堵塞泄放口，使其协防速率远低于其他两个气瓶。由图5(a)可知，2#气瓶最早泄放，泄放初期速率较快，但其还未泄放完成时，3#气瓶就开始泄放，且所有气瓶共用一根泄放管路，同时泄放管道直径较小，导致2#气瓶泄放速率变缓，排气效率降低。



(a)泄放前管路



(b)泄放后第一次变形



(c)泄放后第二次变形

图9 泄放管路泄放前后变化

Fig.9 Changes in the venting pipeline before and after venting

4 结论

(1)火烧环境下，火焰融合至车载氢系统中部，导致中间位置的气瓶较早紧急泄放，气瓶组内未被火焰完全包裹的气瓶有不泄放的可能。

(2)高压氢气泄放过程中，管路受到气体冲击，导致泄放管路发生两次变形，设计时应进行应力核算，防止高压氢气泄放过程中损坏管道。

(3)4瓶组共享泄放管路时，泄放速率不一致，TPRD内置易熔合金存在未完全熔化的可能。

(4)在气瓶使用安全和运行维护方面,建议重点关注高压气瓶TPRD及其泄放管路的协同安全设计,重点攻克泄放管路结构强度、多瓶协同泄放的匹配性,以及TPRD触发可靠性等问题,提升高压气瓶的使用安全性能。

参考文献:

[1] 李逸凡,李奇楠,杨苗苗,等.氢燃料电池汽车全球技术法规第二阶段火烧试验方法研究[J].太阳能学报,2022,43(6):277-285.
LI Y F,LI Q N,YANG M M,et al.Research on fire test method of UN GTR 13 phase 2[J].Acta Energiae Solaris Sinica,2022,43(6):277-285.

[2] 赵子垚.北京冬奥会,氢能交通成亮点[J].汽车纵横,2022(3):13-15.
ZHAO Z Y.Beijing winter olympics,hydrogen traffic bright spot[J].Auto Review,2022(3):13-15.

[3] ZALOSH R,WEYANDT N.Hydrogen fuel tank fire exposure burst test[C]//SAE Technical Paper Series,2005,114:2338-2343.

[4] 吕洪,黄港淇,沈亚皓,等.燃料电池汽车车载高压Ⅳ型储氢瓶耐火烧性能仿真[J].中南大学学报(自然科学版),2022,53(12):4637-4647.
LÜ H,HUANG G Q,SHEN Y H,et al.Numerical simulation of fire resistance performance of high-pressure type Ⅳ hydrogen storage tank for fuel cell vehicle [J].Journal of Central South University (Science and Technology),2022,53(12):4637-4647.

[5] 李力军,王昕雨,唐小龙,等.燃料电池汽车氢系统泄放安全研究[J].压力容器,2024,41(7):1-5.
LI L J,WANG X Y,TANG X L,et al.Research on release safety of on-board hydrogen system in fuel cell vehicle [J].Pressure Vessels Technology,2024,41(7):1-5.

[6] 欧可升.碳纤维全缠绕复合材料高压储氢气瓶耐局部火烧性能研究[D].杭州:浙江大学,2014.
OU K S.Research on fully-wrapped carbon fiber reinforced composite high-pressure hydrogen storage cylinder subjected to localized fire [D].Hangzhou:Zhejiang University,2014.

[7] 吕弘鹏.火烧条件下碳纤维缠绕铝内胆车用高压储氢瓶危险性研究[D].大连:大连理工大学,2021.
LÜ H P.Study on the danger of high pressure hydrogen storage tank for vehicle with carbon fiber wound aluminum liner under fire condition [D].Dalian:Dalian University of Technology,2021.

[8] 李介普,古纯霖,赵保峭,等.车用复合材料储氢气瓶火烧试验方法标准对比研究[J].中国安全生产科学技术,2022,18(1):189-194.
LI J P,GU C L,ZHAO B D,et al.Comparative study on fire test methods standards of composite hydrogen storage cylinders for land vehicles[J].Journal of Safety Science and Technology,2022,18(1):189-194.

[9] ZHENG J Y,OU K S,BIE H Y,et al.Heat transfer analysis of high-pressure hydrogen storage tanks subjected to localized fire[J].Internatioanal Journal of Hydrogen Energy,2012,37(17):13125-13131.

[10] KASHKAROV S,MAKAROV D,MOLKOV V.Performance of hydrogen storage tanks of type Ⅳ in a fire:Effect of the state of charge[J].Hydrogen,2021,2(4):386-398.

[11] ZHENG J Y,BIE H Y,XU P,et al.Experimental and numerical studies on the bonfire test of high-pressure hydrogen storage vessels [J].International Journal of Hydrogen Energy,2010,35(15):8191-8198.

[12] ZHENG J Y,OU K S,HUA Z L,et al.Experimental and numerical investigation of localized fire test for high-pressure hydrogen storage tanks [J].International Journal of Hydrogen Energy,2013,38(25):10963-10970.

[13] VALENCIA L B,BLANC-VANNET P,DOMERGUE D,et al.Thermal history resulting in the failure of lightweight fully-wrapped composite pressure vessel for hydrogen in a fire experimental facility [J].Fire Technology,2016,52(2):421-442.

[14] RUBAN S,HEUDIER L,JAMOIS D,et al.Fire risk on high-pressure full composite cylinders for automotive applications [J].Internatioanal Journal of Hydrogen Energy,2012,37(22):17630-17638.

[15] HALM D,FOUILLEN F,LAINE E,et al.Composite pressure vessels for hydrogen storage in fire conditions:Fire tests and burst simulation [J].Internatioanal Journal of Hydrogen Energy,2017,42(31):20056-20070.

作者简介:向冬梅(1998),女,工程师,主要研究方向为氢能安全测评技术,通信地址:401120重庆市江北区郭家沱街道中国汽车工程研究院股份有限公司国家氢能动力质检中心,E-mail:xiangdongmei@caeri.com.cn

通信作者:毛占鑫(1991),男,高级工程师,主要研究方向为燃料电池及氢能安全测评技术,通信地址:401120重庆市江北区郭家沱街道中国汽车工程研究院股份有限公司国家氢能动力质检中心,E-mail:maozhanxin@caeri.com.cn。

本文引用格式:

向冬梅,毛占鑫,付娜,等.氢燃料电池公交车车载氢系统火烧试验研究[J].压力容器,2025,42(11):23-29.

XIANG Dongmei,MAO Zhanxin,FU Na,et al.Fire test research on on-board hydrogen system of hydrogen fuel cell buses[J].Pressure Vessel Technology,2025,42(11):23-29.