doi:10.3969/j.issn.1001-4837.2026.03.005

设计计算

Ⅲ型车载高压储氢瓶火灾环境爆破试验关键参数研究

李广印[1],韩　冰[2,3],宋　辰[4],刘贵龙[5],李　贝[5]

(1.甘肃省特种设备检验检测研究院,兰州 730050;2.大连锅炉压力容器检验检测研究院有限公司,辽宁大连 116012;
3.国家市场监督管理总局重点实验室(气瓶安全技术),辽宁大连 116012;4.大连度达理工安全系统有限公司,
辽宁大连 116620;5.大连理工大学 化工学院,辽宁大连 116024)

摘　要:针对火灾极端工况下储氢瓶风险突出的问题,本文采用火灾事故分析与火烧试验数据相结合的方法,对储氢瓶爆破压力等关键参数开展了系统评估。结果表明:火灾环境下储氢瓶承压强度显著下降,35 MPa公称工作压力(*NWP*)气瓶的爆炸压力从常温下的122.7~126.0 MPa降低至41.1~53.5 MPa;而*NWP*为70 MPa气瓶则由常温下的209.8~226.8 MPa降至98.9~112.3 MPa;气瓶从受火至爆炸的时间集中在9~22 min。若气瓶泄放压力与爆炸压力接近,损伤容限低,火灾下爆炸风险高;火灾后经冷却处理的气瓶仍具有较高残余强度,约为2.09~3.37*NWP*。建议在"泄放先行"的目标下,进一步完善火灾工况下的气瓶爆破强度安全阈值,并规范火灾后气瓶残余强度测试方法。研究可为火灾场景储氢瓶的全过程安全评估提供技术依据。

关键词:燃料电池车;复合材料储氢气瓶;氢能安全;失效分析;火灾

中图分类号:TH49;TK91;TB332　　**文献标志码:**A

Study of key parameters of burst testing for type Ⅲ on-board high-pressure hydrogen storage cylinders

LI Guangyin[1],HAN Bing[2,3],SONG Chen[4],LIU Guilong[5],LI Bei[5]

(1.Gansu Province Special Equipment Inspection and Testing Institute,Lanzhou 730050,China;
2.Dalian Boiler and Pressure Vessel Inspection & Testing Institute Co.,Ltd.,Dalian 116012,China;
3.Key Laboratory of Gas Cylinders Safety Technology,State Administration for Market Regulation,Dalian 116012,China;
4.Dalian Duta Technology Safety System Co.,Ltd.,Dalian 116620,China;
5.School of Chemical Engineering,Dalian University of Technology,Dalian 116024,China)

Abstract: In response to the significant risks associated with hydrogen storage cylinders under extreme fire conditions,this study adopts a method combining fire accident analysis with fire test data to systematically evaluate key parameters such as the burst pressure of hydrogen storage tanks. The results show that the pressure-bearing capacity of hydrogen storage tanks decreases significantly under fire exposure:For a tank with a nominal working pressure(*NWP*) of 35 MPa,the burst pressure drops from 122.7~126.0 MPa at room temperature to 41.1~53.5 MPa;For a 70 MPa *NWP* tank,it drops from 209.8~226.8 MPa at room temperature to 98.9~112.3 MPa.The time from fire exposure to tank explosion ranges from 9 to 22 min.When the pressure relief setting of the tank is close to its burst pressure,the damage tolerance is low,resulting in a high risk of explosion under fire conditions. After fire exposure and subsequent cooling,the tanks still exhibit relatively high residual strength,approximately 2.09~3.37 times the *NWP*.It is recommended that,with the objective of "pressure release first",the safety threshold for tank burst strength under fire conditions be further refined,and that standardized testing methods for post-fire residual strength be established. This study provides a technical basis for the comprehensive safety assessment of hydrogen storage tanks in fire scenarios.

Key words:fuel cell vehicle;composite hydrogen storage tanks;hydrogen energy safety;failure analysis;fire

收稿日期:2025-12-16　**修回日期:**2026-02-02

基金项目:国家市场监督管理总局科技计划项目(2024MK131);辽宁省博士科研启动基金计划项目(2025-BS-0020);中国博士后科学基金面上资助项目(2024M760310)

0 引言

氢燃料电池汽车(hydrogen fuel cell vehicle, HFCV)是未来汽车产业的重要发展方向之一[1-3]。以美国雪佛兰Equinox的运营、日本丰田Mirai上市和德国宝马BMW iX5 Hydrogen车型的推出为标志,发达国家在氢燃料电池技术领域持续取得进展。根据《氢能汽车蓝皮书:中国车用氢能产业发展报告(2024)》,2024年底,我国已累计推广HFCV约2.8万辆。国家《氢能产业发展中长期规划(2021-2035年)》进一步提出,预计到2035年,HFCV保有量将达到130万辆。目前,我国车载高压储氢气瓶绝大多数采用碳纤维和环氧树脂作为增强材料的Ⅲ型储氢气瓶[4-6],公称工作压力(nominal working pressure, NWP)为35 MPa或70 MPa,容积28~320 L,在役的复合材料高压储氢气瓶已超过2.5万只,如东风柳汽乘龙H5氢能重卡搭载了4个320 L气瓶,35 MPa压力下单次注满氢气可实现满载状态下400 km的续航里程。

车辆在运输、行驶和停放过程中均存在火灾风险。SURYAWANSHI等[7]指出,全球每年约发生(17~22)万起车辆火灾事故,原因包括碰撞、发动机故障、电气短路等,造成的损失接近20亿美元。如2022年"Felicity Ace"号货轮火灾,导致其输运的近4 000辆新车全部烧毁[8]。美国国家公路交通安全管理局(NHTSA)、交通部(DOT)发布的联邦机动车安全标准FMVSS No. 307 *Fuel system integrity of hydrogen vehicles*(《氢燃料汽车的燃料系统完整性》)明确提出了车载高压储氢系统可能遭受的车辆火灾、长期停放静态高压、加氢过充等6种外力因素事故场景。当前,高压储氢气瓶的安全技术和检测检验已在ISO,SAE,JIS等国际及区域标准体系中建立起较为完善的框架,对材料相容性、密封性能、低温循环、疲劳耐久及火烧试验等方面提出了明确要求,相关测试内容涵盖了温度变化与反复充装下的安全性能评估,并确保在火灾等极端条件下氢气能安全泄放、泄压装置正常动作[9-13]。但由于HFCV全球运营规模有限,可供分析的失效与事故案例数据不足,部分标准条款缺乏充分的试验研究与安全技术支撑,在科学性和完整性上仍有待完善。此外,现有针对车载储氢气瓶的火灾安全性能的研究与检测评价规则,尚未系统涵盖车辆火灾应急处置等典型应用场景,缺乏针对火灾环境车载储氢装置材料、部件和系统的适用性服役安全约定。

鉴于此,本文结合车辆火灾事故场景与现有气瓶火烧试验数据,系统性整合分析了气瓶的爆炸压力与爆炸时间等火灾特征参数,并结合数据和全过程安全理念对现行标准提出了针对性建议。研究结果可为车载高压储氢系统的安全设计、标准制定及消防救援人员进行事故后的安全处置与风险研判提供技术参考。

1 火灾极端条件车载储氢气瓶服役安全理论

1.1 失效后果和模式

图1示出燃料电池车辆火灾诱发高压储氢气瓶失效的3类潜在后果和模式。

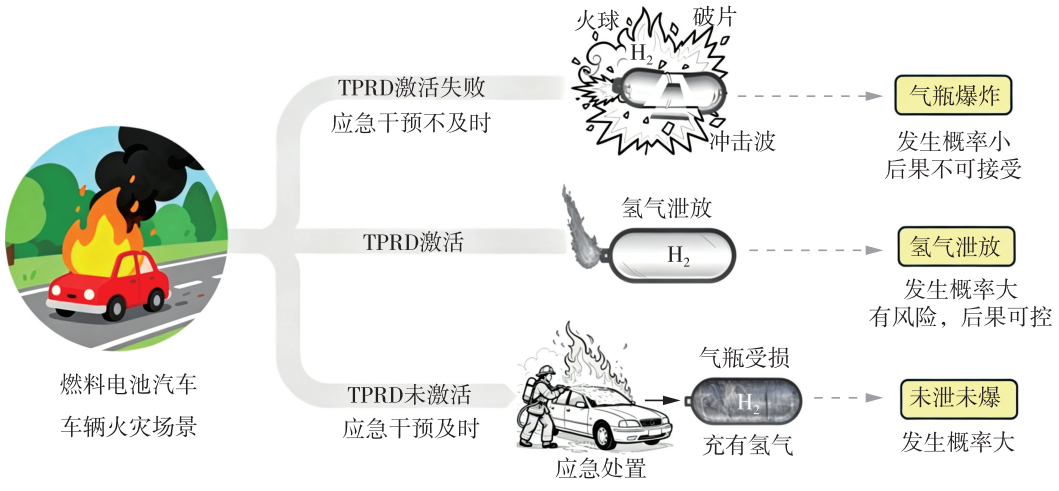


图1 燃料电池车辆火灾诱发高压储氢气瓶失效的潜在后果和模式

Fig.1 Potential consequences and patterns of high-pressure hydrogen storage cylinder failure induced by fuel cell vehicle fires

（1）第一类为火灾过程中气瓶爆炸。若火灾中气瓶温度驱动安全泄压装置（temperature activeated pressure relief device，TPRD）激活不及时或激活失败，在应急干预不及时的条件下可能发展为气瓶爆炸，造成人员伤亡。例如，2003年，德国萨尔布吕肯一辆搭载10个Ⅲ型瓶（172 L-20 MPa）的CNG大巴起火，15 min后发生爆炸，事故造成2辆大巴损毁[14]；2023年，韩国土木工程和建筑技术研究所（KICT）开展的HFCV整车火烧爆炸试验发现[15]，搭载70 MPa满载氢气的Ⅳ型瓶在油池点火后11 min 12 s发生爆炸，冲击波在3 m处达到最大，为173 kPa，远超人员致死阈值，车辆和气瓶残骸最远抛掷半径达74 m，致使灾害范围显著扩大。

（2）第二类为火灾过程中气瓶可控泄放。火灾触发TPRD及时启动，高压氢气经泄放形成高速射流火。邹林志等[16]在研究48 L-70 MPa储氢气瓶紧急泄放射流火辐射风险时指出，试验气瓶泄放瞬间火焰的辐射通量在1.5 m处可达13 kW/m^2，在距离射流火焰2~3 m处停留4~6 s可能造成一级烧伤，建议安全距离应保持10 m以上。虽然高压氢气泄放仍伴随射流火及其辐射风险，但该方式可有效避免爆炸事故，显著控制灾害后果，属于风险相对可控的失效模式。

（3）第三类为受火气瓶经应急介入后未泄放、未爆炸。在此情况下，明火被扑灭后气瓶保持结构完整。然而，在热/冷交替冲击后，车载高压储氢气瓶能否维持安全的承压极限与结构稳定性，是评价后续应急处置过程气瓶服役安全性的关键，也直接关系到现场处置人员的安全。

1.2 损伤容限合格指标规定

根据中国民用航空局发布的CCAR-25-R4《运输类飞机适航标准》第25.571条结构损伤容限和疲劳评定要求，损伤后的结构必须能够承受飞行中可合理预期出现的静载荷（视为极限载荷），且无需考虑这些静载荷的动态效应。损伤容限理念引申至燃料电池车载高压储氢气瓶，即允许储氢装置在火烧、冲击、热疲劳等极端或长期载荷下存在一定缺陷，仍能保持结构完整与功能正常，从而提升系统安全裕度，降低失效风险。当前在车载高压储氢气瓶领域，现行GB/T 35544—2025《车用压缩氢气铝内胆碳纤维全缠绕气瓶》和GB/T 42612—2023《车用压缩氢气塑料内胆碳纤维全缠绕气瓶》对极限温度压力循环试验、加速应力破裂试验、性能耐久性试验和期望道路使用性能试验等气瓶损伤容限的合格指标均做出了明确规定，即通过规定顺序试验收，气瓶寿命终止爆破压力应≥1.8*NWP*或≥0.8P_{b0}。然而，针对火灾场景下气瓶安全性试验检验项目，目前仅对火烧试验提出了定性合格标准：从点火到TPRD打开的时间应≥10 min，TPRD泄放过程应连续，且气瓶不应爆破。对火灾场景下气瓶的最低爆破强度和火灾暴露后气瓶损伤容限等均无相关安全指标和约定。

1.3 基线初始强度爆破压力规定

表1列出车载储氢气瓶寿命终止爆破压力现行规定。基线初始爆破压力测试用于验证气瓶的初始爆破压力是否达到最低规定值，且与制造商声明的爆破压力P_{b0}（气瓶爆破压力期望值或实际爆破压力）偏差不超过±10%。UN GTR No. 13 *Global Technical Regulation concerning the hydrogen and fuel cell vehicles*（《氢及燃料电池电动汽车全球技术法规》）第一阶段规定，碳纤维复合材料气瓶的最小爆破压力$P_{b,min}$不应低于其公称工作压力（*NWP*）的225%。该数值参考了压缩天然气车辆的应用经验，作为安全设计的保守起点。在GB/T 35544—2025和GB/T 42612—2023中，针对车载储氢气瓶的初始爆破压力进行了进一步分类规定，其中，载客车辆最小设计爆破压力不低于2.3*NWP*，如表2所示。本研究在评估高压储氢气瓶的承压安全性时，仍采用225%*NWP*作为其承压安全的最低阈值判断指标，暂不考虑气瓶在服役过程中因压力循环充放导致的疲劳寿命衰减，重点聚焦于火灾暴露下的气瓶承压能力评价。

1.4 残余强度爆破压力规定

与GTR No.13规定一致，残余强度爆破测试涉及对寿命结束的气瓶进行与基线初始爆破压力测试相同的爆破测试。耐久性测试结束时的爆破压力要求至少达到容器标签上指定P_{b0}的80%。这有效地控制了在整个极端使用寿命期间的爆破压力降解率。控制降解率很重要，例如，一个初始P_{b0}非常高的容器，比如400%*NWP*，但随后下降到180%*NWP*，表明降解率很高。如果这样的容器在其预期使用寿命后继续使用，高降解率可能会持续，导致高爆破风险。因此，残余爆破强度必须至少达到80%P_{b0}。此概念类似于FMVSS No.209 *Seat belt assemblies*（《座椅安全带装置》）对安全带的要求，其中不仅控制了磨损后的最小断裂强度（S4.2d），还控制了暴露于光线和微生物后的最大降解率（S4.2e和S4.2f）。

表1 车载储氢气瓶寿命终止爆破压力规定

Tab.1 Regulations on end-of-life burst pressure for vehicle-mounted hydrogen storage cylinders

序号	试验类型	说明	爆破压力合格指标	适用类型
1	水压爆破试验	基线爆破压力测试。	$0.9P_{b0}$~$1.1P_{b0}$，且≥$P_{b,min}$	A类和B类
2	极限温度压力循环试验	模拟加氢和放氢过程极端温度条件。	≥1.8*NWP*	A类
3	加速应力破裂试验	模拟气瓶长期高压服役状态，瓶体破裂失效发生危险的情况。	≥1.8*NWP*	
4	耐久性试验	按规定依次开展水压试验、跌落试验、表面损伤试验、环境试验、加速应力破裂试验、极限温度压力循环试验和常温静压试验过程中，气瓶不应泄漏或破裂。	≥$0.8P_{b0}$	B类
5	使用性能试验	按规定依次开展水压试验、常温和极限温度压力循环试验、极限温度氢气泄漏试验和常温静压试验过程中，气瓶不应泄漏或破裂。	≥$0.8P_{b0}$	
6	火烧试验	从点火到TPRD打开的时间应≥10 min。TPRD泄放过程应连续，且气瓶不应爆破。	—	A类和B类

注：A类气瓶的*NWP*=35 MPa；B类气瓶的*NWP*=70 MPa。

表2 车载储氢气瓶基线初始爆破规定

Tab.2 Initial burst specifications for baseline vehicle hydrogen storage cylinders

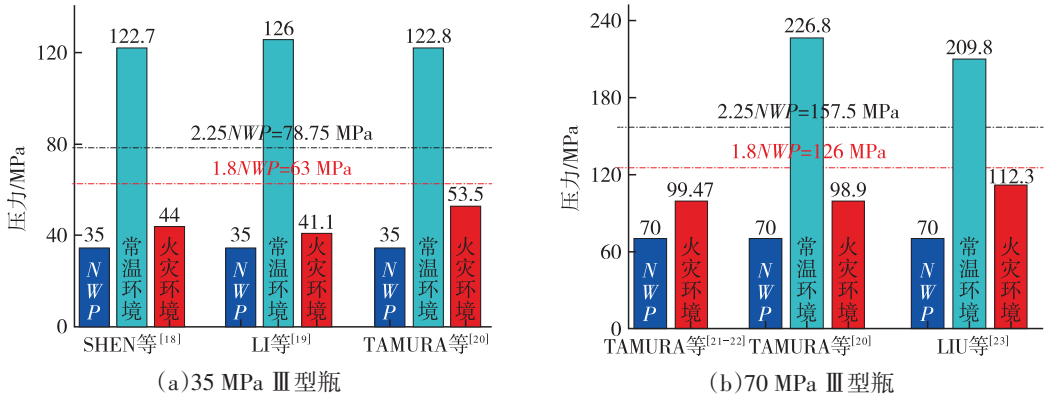
标准/分类	最小设计爆破压力$P_{b,min}$			
	A1类	A2类	B1类	B2类
GB/T 35544—2025	≥2.3*NWP*	≥2.25*NWP*	≥2.3*NWP*	≥2.25*NWP*
GB/T 42612—2023	≥2.3*NWP*	≥2.25*NWP*	≥2.3*NWP*	≥2.00*NWP*

注：A1和B1类气瓶仅适用于至少有四个车轮、车长不超过8 m且座位数不超过19座的载客车辆。

2 典型火灾场景下车载高压储氢气瓶安全性特征

2.1 爆炸压力

承压性能是评估气瓶在火灾等极端条件下安全服役能力的重要指标。图2示出*NWP*为35 MPa和70 MPa的Ⅲ型瓶在火烧试验过程中的爆炸压力分布。结果显示，对于*NWP*为35 MPa的气瓶，常温下水压爆破压力范围为122.7~126 MPa，约为其*NWP*的351%~360%，显著高于225%*NWP*的最低承压阈值。然而，在火灾条件下，其爆炸压力下降至41.1~53.5 MPa，约为*NWP*的117%~153%，相比常温工况分别降低了64%，67%和56%；对于*NWP*为70 MPa的气瓶，常温下水压爆破压力范围为209.8~226.8 MPa，火灾中爆炸压力为98.9~112.3 MPa，约为*NWP*的141%~160%，降低幅度在46%~56%之间。



(a)35 MPa Ⅲ型瓶 (b)70 MPa Ⅲ型瓶

图2 典型Ⅲ型瓶火烧试验爆炸压力

Fig.2 Critical explosion pressure for type Ⅲ vessel fire test

表3列出典型Ⅲ型高压储氢气瓶技术参数及试验条件。总体来看，初始充装状态下，气瓶常温中爆破压力与*NWP*的比值（P_{b0}/NWP）为3.0~3.6，而在火灾中该比值（P_{f0}/NWP）降至1.17~1.60。*NWP*为35 MPa气瓶的承压强度在火灾中降低约69.3~84.9 MPa；而*NWP*为70 MPa气瓶的下降幅度略高，为97.5~127.9 MPa。根据气瓶承压强度衰减率（$P_{b0}-P_{f0}$）/P_{b0}的分析显示，7号气瓶的衰减率最低，仅为0.46，显著低于1~6号气瓶，表明其在火灾环境中具有更好的安全性能。

表3 典型Ⅲ型瓶火烧试验爆炸特征参数

Tab.3 Explosion characteristic parameters of typical type Ⅲ vessel fire test

序号	1	2	3	4	5	6	7
国家	美国	中国	中国	日本	日本	日本	中国
时间	2006年	2018年	2021年	2019年	2006年	2019年	2025年
NWP/MPa	35	35	35	35	70	70	70
V/L	88	165	210	—	36	—	48
P_{b0}/MPa	—	122.7	126	122.8	—	226.8	209.8
充装介质	H_2	H_2	H_2	He	—	He	H_2
P_{ini}/MPa	31.8	35	32.2	35	70	70	68.6
火烧方式	整体	局部+整体	局部+整体	整体	—	整体	局部+整体
后果	爆炸	爆炸	爆炸	爆炸	爆炸	爆炸	爆炸
P_{f0}/MPa	—	44	41.1	53.5	99.47	98.9	112.3
爆炸时间/s	738	576	784	1 006	660	929	1 322
P_{b0}/NWP	—	3.51	3.60	3.51	—	3.24	3.00
P_{f0}/NWP	—	1.26	1.17	1.53	1.42	1.41	1.60
P_{f0}/P_{b0}	—	0.36	0.33	0.44	—	0.44	0.54
（$P_{b0}-P_{f0}$）/P_{b0}	—	0.64	0.67	0.56	—	0.56	0.46
文献	ZALOSH[17]	SHEN等[18]	LI等[19]–HST1	TAMURA等[20]–test9	TAMURA等[21-22]	TAMURA等[20]–test17	LIU等[23]

注：P_{ini}为初始充装压力，MPa；$P_{b0}-P_{f0}$为火灾中气瓶强度降低值，MPa；（$P_{b0}-P_{f0}$）/P_{b0}为强度衰减率。

2.2 爆炸时间

高压储氢气瓶的爆炸时间是衡量其安全性能的重要指标，直接反映了气瓶在火灾中的耐受能力及其潜在风险水平。本研究将气瓶从开始受火至发生爆炸的持续时间定义为爆炸时间。图3示出*NWP*为35 MPa和70 MPa下典型Ⅲ型高压储氢气瓶满载充氢状态下的爆炸时间。对于*NWP*为35 MPa的气瓶，爆炸时间范围为576~1 006 s；对于*NWP*为70 MPa的气瓶，爆炸时间范围为660~1 322 s。在满载充氢条件下，*NWP*为70 MPa气瓶的爆炸时间高于35 MPa气瓶，这主要源于前者缠绕层设计壁厚更大，从而延缓了火烧下的失效时间。需要指出的是，爆炸时间受多种因素影响，包括火源参数（如火烧方式、强度及燃料类型）、气瓶设计参数（如缠绕层厚度、环氧树脂热稳定性），以及初始压力和充氢状态等[24-25]。综上可以看出，满载条件下Ⅲ型车载高压储氢气瓶在受火后至发生爆炸的耐火时间一般不超过25 min。此外，若以*NWP*为35 MPa的Ⅲ型气瓶的最低耐火时间576 s（9 min 36 s）为例，考虑实际应急响应流程，若在从车辆火灾蔓延至储氢气瓶开始的9 min内及时采取灭火或降温措施，则有可能防止气瓶爆炸，从而避免因气瓶燃爆引发的二次灾害和损失扩大。

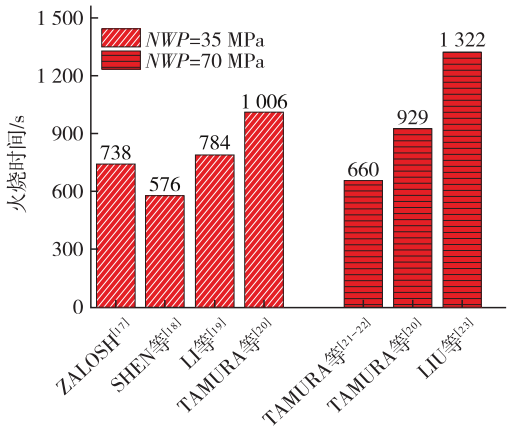
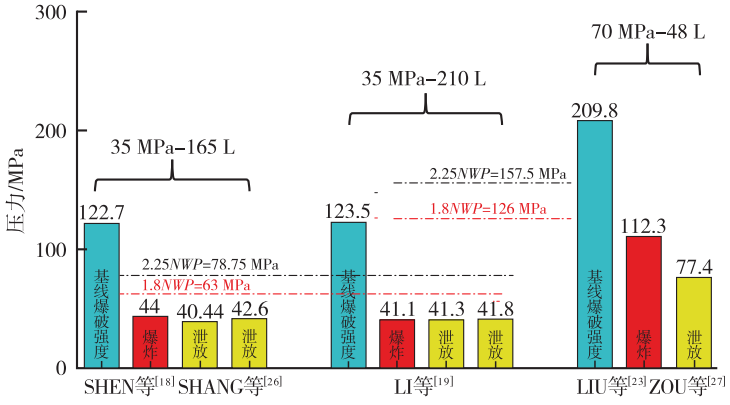


图3 典型Ⅲ型瓶满载充氢条件下爆炸时间

Fig.3 Fire resistance limits of typical type Ⅲ cylinders under full-load hydrogen filling conditions

2.3 爆炸与泄放压力比较

图4(a)对比了三款典型Ⅲ型高压储氢气瓶(35 MPa-165 L,35 MPa-210 L和70 MPa-48 L)爆炸和泄放压力,结果见表4。如LI等[19]采用的35 MPa-210 L气瓶所示,常温下其平均水压爆破压力为123.5 MPa,约为353%*NWP*,远高于GB/T 35544—2025规定的225%*NWP*合格要求。然而,在3次火烧试验中,该气瓶有1次发生爆炸,未通过火烧试验,爆炸时压力为41.1 MPa(约117%*NWP*),相比常温爆破强度下降约66.7%;另外2次则发生泄放,其泄放压力分别为41.3,41.8 MPa,进一步佐证了火烧试验在气瓶安全审查中的必要性,该试验能够有效规避初始强度达标但在火灾中性能较差的气瓶投入使用。对于70 MPa-48 L的Ⅲ型气瓶,其在常温下平均水压爆破压力为209.8 MPa(300%*NWP*);而在火烧试验条件下的爆破压力为112.3 MPa,强度下降约41.7%;其在火烧试验条件下泄放压力为77.4 MPa。



(a)火烧试验爆炸/泄放临界压力对比



(b)火烧试验意外爆炸事故现场[18]

图4 典型Ⅲ型瓶火烧试验爆炸与泄放对比

Fig.4 Comparison of explosion/vent critical pressure in typical type Ⅲ cylinder fire tests

表4 典型Ⅲ型瓶火烧试验泄放/爆炸特征参数对比

Tab.4 Comparison of vent/explosion characteristic parameters in typical type Ⅲ cylinder fire burst tests

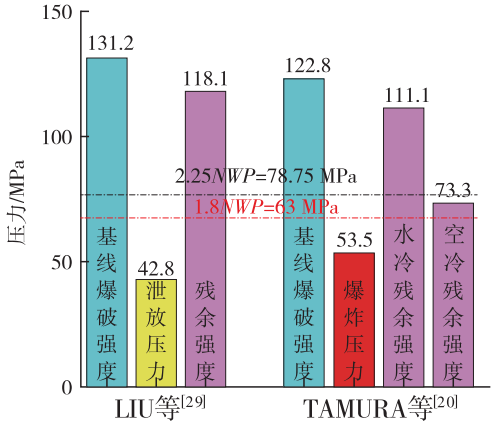
序号	1	2	3	4	5	6	7	8
国家	中国	中国	中国	中国	中国	中国	中国	中国
时间	2018年	2025年	2025年	2021年	2021年	2021年	2025年	2024年
NWP/MPa	35	35	35	35	35	35	70	70
V/L	165	165	165	210	210	210	48	48
P_{b0}/MPa	122.7	122.7	122.7	123.5	123.5	123.5	209.8	209.8
充装介质	H_2	H_2	H_2	H_2	H_2	H_2	H_2	H_2
P_{ini}/MPa	34.3	35.11	34.1	32.2	33.8	33.9	68.6	66.1
火烧方式	局部+整体	局部+整体	局部+整体	局部+整体	局部+整体	局部+整体	局部+整体	局部+整体
P_{f0}/MPa	44	—	—	41.1	—	—	112.3	—
P_{fv}/MPa	—	40.44	42.6	—	41.3	41.8	—	77.4
后果	爆炸	泄放	泄放	爆炸	泄放	泄放	爆炸	泄放
耐火时间/s	576	769	610	784	666	596	1 322	610
P_{b0}/NWP	3.51	3.51	3.51	3.53	3.53	3.53	3.00	3.00
P_{f0}/NWP	1.26	1.16	1.22	1.17	1.18	1.19	1.60	1.11
P_{f0}/P_{b0}	0.36	0.33	0.35	0.33	0.33	0.34	0.54	0.37
P_{f0}/P_{fv}		1.06			0.99		1.45	
$(P_{b0}-P_{f0})/P_{b0}$	0.64	0.67	0.65	0.67	0.67	0.66	0.46	0.63
文献	SHEN等[18]	SHANG等[26]-tank D	SHANG等[26]-tank E	LI等[19]-HST1	LI等[19]-HST2	LI等[19]-HST3	LIU等[23]	ZOU等[27]

注:P_{fv}为火灾中泄放压力,MPa。

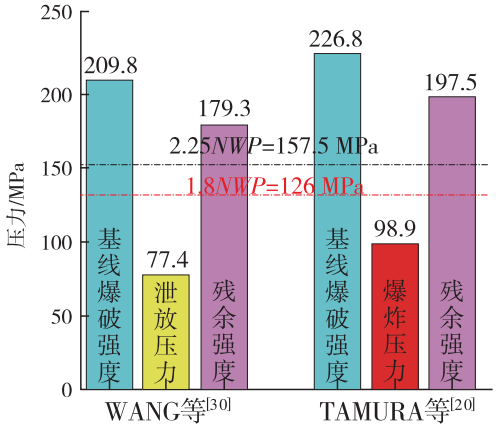
通常认为，若气瓶在火灾中仅发生泄放而未爆炸，则其残余强度应不低于泄放压力。从火烧数据来看，*NWP*为70 MPa的气瓶表现符合“常温水爆压力＞火灾中爆炸压力＞火灾中泄放压力”的趋势，说明该气瓶在火灾中泄放时仍具备较高的残余强度，安全性能较好。若在某些火灾条件下，气瓶承压强度劣化速率较快，可能在达到TPRD启动温度前就已破裂，因而仍存在爆炸风险。换言之，当火灾环境下气瓶损伤容限裕度较小时，无法确保其在彻底失效前及时启动泄压，导致其仍存在爆炸风险，这与车载储氢气瓶在火灾极端条件下安全服役的预期存在一定差距。该分析结果与实际案例相符，如图4(b)所示，SHEN等[18]报道了满载氢气的35 MPa-165 L气瓶在安装TPRD的条件下进行常规火烧试验时发生意外爆炸：气瓶主体向前飞出，撞击卡车后落在距爆源32.5 m处，卡车驾驶舱被击毁，撞击导致卡车前移0.5 m。该案例进一步表明，部分气瓶虽在常温下水压爆破试验中满足标准强度要求，但若在结构设计、制造工艺或TPRD匹配方面存在缺陷，导致气瓶的泄放压力与爆炸压力过于接近，火灾环境下将缺乏必要的安全裕度，气瓶本体在火灾下的临界失稳压力未形成有效安全梯度，在潜在火灾场景中可能出现爆炸与泄放并存的随机结果。

2.4 火灾暴露后残余强度

储氢气瓶缠绕层为复合材料制成，在遭受热损伤后其承压性能会显著下降。为确保事故后续处置的安全性，气瓶必须仍具备足够的残余强度。然而在多数实际火灾场景中，消防救援人员实施灭火后，往往难以准确判断事故现场气瓶的具体残余强度，这导致在后续处置阶段对气瓶是否仍存在爆炸风险的认识不足，增加了操作不确定性[28]。图5示出典型Ⅲ型高压储氢气瓶火灾暴露后的残余强度，详细数据见表5。以日本汽车技术研究所测试的*NWP*为35 MPa的2号气瓶为例，其水爆基线压力为122.8 MPa，在火灾中发生爆炸时的爆炸压力为53.5 MPa。对该型号气瓶进行的另外两组测试中，在达到爆炸压力前撤除火源，气瓶经水冷后的残余强度为111.1 MPa，而经空冷后残余强度仅为73.3 MPa。总体来看，火灾环境中气瓶的爆破强度处于最低水平，是车辆火灾全周期中最危险的阶段；而火灾暴露后对气瓶实施冷却处理，其残余强度均高于1.8倍*NWP*；其余测试气瓶火灾暴露后的残余爆破强度也均高于2.25倍*NWP*。



(a)35 MPa Ⅲ型瓶



(b)70 MPa Ⅲ型瓶

图5 典型Ⅲ型瓶火灾暴露后残余强度对比

Fig.5 Residual strength comparison of typical type Ⅲ cylinders after fire exposure

值得说明的是，对于空冷条件下的2号气瓶，其残余强度衰减率($1-P_{bf0}/P_{b0}$)为40%。若以2.25*NWP*为基准，考虑20%衰减率时，该气瓶满足≥1.8*NWP*的指标。可以看出，火灾暴露后经冷却的Ⅲ型气瓶残余强度明显高于火灾中发生泄放或爆炸时的压力。这可能是由于冷却过程中缠绕层的热应力与机械应力得以迅速释放，同时内部温度快速下降，导致已软化的环氧树脂重新固化。水冷方式因冷却速率更高，环氧树脂再固化过程更为迅速，因此，残余强度恢复效果更好。在储氢气瓶的型式试验中，不应仅依据固定数值(如1.8倍*NWP*)作为合格判据，而应结合气瓶的初始爆破强度进行综合评价，以避免在生产制造中为满足指标而过度提高设计强度，但实际承压强度衰减率过高所带来的潜在风险。

表5 典型Ⅲ型瓶火烧试验后残余强度

Tab.5 Residual strength of typical type Ⅲ cylinders after fire exposure test

序号	1	2	3	4	5	6	7
国家	中国	日本	日本	日本	中国	日本	日本
时间	2025年	2019年	2019年	2019年	2023年	2019年	2019年
NWP/MPa	35	35	35	35	70	70	70
2.25*NWP*/MPa	78.75	78.75	78.75	78.75	157.5	157.5	157.5
V/L	53	—	—	—	48	—	—
P_{b0}/MPa	131.2	122.8	122.8	122.8	209.8	226.8	226.8
充装介质	H_2	He	He	He	H_2	He	He
P_{ini}/MPa	—	35	—	—	66.1	—	—
火烧方式	局部+整体	整体	整体	整体	局部+整体	整体	整体
P_{f0}/MPa	42.8	53.5	—	—	77.4	98.9	—
测试描述	火烧直至泄放，自然冷却后，二次水爆	火烧直至爆炸	爆炸前撤掉火源，喷淋冷却后，二次水爆	爆炸前撤掉火源，自然冷却后，二次水爆	火烧直至泄放，自然冷却后，二次水爆	火烧直至爆炸	爆炸前撤掉火源，喷淋冷却后，二次水爆
耐火时间/s	320	1 006	—	—	618	929	—
P_{fb0}/MPa	118.1	—	111.1	73.3	179.3	—	197.5
P_{b0}/NWP	3.75	3.51	3.51	3.51	3.00	3.24	3.24
P_{f0}/NWP	—	1.53	—	—	1.11	1.41	—
P_{bf0}/NWP	3.37	—	3.17	2.09	2.56	—	2.82
P_{bf0}/P_{b0}	0.90	—	0.90	0.60	0.85	—	0.87
文献	LIU等[29]–HST5	TAMURA等[20]–test9	TAMURA等[20]–test10	TAMURA等[20]–test11	WANG等[30]–tank A	TAMURA等[20]–test17	TAMURA等[20]–test18

3 基于火灾事故全流程的气瓶安全性能测试建议

（1）从现有案例数据来看，火灾环境中气瓶的爆破强度处于最低水平，是车辆火灾全周期中最危险的阶段。火灾环境中气瓶爆炸压力与泄放压力接近，表明其损伤容限裕度小，TPRD启动的“安全窗口”窄。建议通过规定爆炸压力与泄放压力的最小比值（P_{f0}/P_{fv}）（参照现行规范，经耐久性试验与使用性能试验后，气瓶爆破压力应≥$0.8P_{b0}$。据此初步类比，P_{fv}应≤$0.8P_{f0}$，即P_{f0}/P_{fv}≥1.25），并考虑设定其安全阈值，以此强化气瓶设计过程中对泄放先行阶段的优先考量。

（2）火灾暴露后气瓶未爆炸的状态，有一定的安全裕度，但需要进一步约定安全指标值。在现有火烧试验合格标准（TPRD正常启动、气瓶不爆破）的基础上，增加对“火灾扑灭后未泄放气瓶”残余强度的推荐性测试与量化要求。建议合格判据应关联气瓶的初始爆破强度（P_{b0}），采用相对值进行规定。例如，可规定火灾暴露并冷却后，气瓶的残余爆破压力（P_{bf0}）不得低于其初始爆破压力（P_{b0}）的某一特定百分比（如80%）。

4 结论

本研究聚焦于Ⅲ型车载高压储氢瓶在车辆火灾极端事故场景下的安全性能，通过综合车辆真实火灾场景与气瓶火烧试验数据，对比分析并量化评估了火灾极端热载荷对储氢瓶关键安全参数的影响规律，得出以下结论。

（1）常温条件下车载高压储氢瓶设计安全裕度充足，安全性高；火灾场景下储氢瓶承压强度会显著劣化，爆炸压力相较初始爆破压力大幅降低，其中，*NWP*为35 MPa的气瓶承压强度降幅为56%~67%，*NWP*为70 MPa的气瓶降幅为46%~56%。气瓶从

开始受火至发生爆炸的爆炸时间集中在9~22 min之间。从火灾发生到可能爆炸的应急响应时间非常有限，构成了车辆火灾中最具危险性的阶段。

（2）储氢瓶如35 MPa-165 L的爆炸压力为41.1 MPa，未通过火烧试验，且泄放压力分别为41.3，41.8 MPa，数值极其相近，表明其初始设计可能存在缺陷，损伤容限裕度小，TPRD启动的“安全窗口”窄。对于相同热损伤气瓶，火烧后采取水冷的残余强度为111.1 MPa，而空冷为73.3 MPa，经冷却后的气瓶残余爆破强度均高于1.8*NWP*；

（3）当前标准对火烧试验仅规定了TPRD启动的定性要求，缺乏对火灾中储氢瓶最低爆破强度、泄放与爆炸压力安全裕度，以及火灾扑灭后未爆气瓶残余强度的量化安全约定。建议在现有标准基础上，补充火灾中泄放压力与爆炸压力的最小安全比值，确保设计上留有明确的泄放先行空间，另外，增加对火灾暴露并冷却后气瓶残余强度的测试要求，从而为火灾后气瓶的安全处置提供明确依据。

参考文献：

[1] 郑津洋，马凯，叶盛，等.我国氢能高压储运设备发展现状及挑战[J].压力容器，2022，39(3)：1-8.
ZHENG J Y，MA K，YE S，et al.Development status and challenges of equipment for storage and transportation of high-pressure gaseous hydrogen in China[J].Pressure Vessel Technology，2022，39(3)：1-8.

[2] GUO X P，LI W J，REN D F，et al.Prospects for the development of hydrogen fuel cell vehicles in China[J].Renewable Energy，2025，240：122231.

[3] HUA Z L，GAO W，CHI S H，et al.Development status and challenges of high-pressure gaseous hydrogen storage vessels and cylinders in China[J].Renewable and Sustainable Energy Reviews，2025，214：115567.

[4] 郑津洋，胡军，韩武林，等.中国氢能承压设备风险分析和对策的几点思考[J].压力容器，2020，37(6)：39-47.
ZHENG J Y，HU J，HAN W L，et al.Risk analysis and some countermeasures of pressure equipment for hydrogen energy in China [J]. Pressure Vessel Technology，2020，37(6)：39-47.

[5] WANG X，FU J Q，LIU Z，et al.Review of researches on important components of hydrogen supply systems and rapid hydrogen refueling processes [J]. International Journal of Hydrogen Energy，2023，48(5)：1904-1929.

[6] 张杰，蒋文杰，杨锐，等.70 MPa碳纤维缠绕储氢气瓶结构设计与力学性能研究[J].压力容器，2023，40(3)：28-37.
ZHANG J，JIANG W J，YANG R，et al. Study on structural design and mechanical properties of 70 MPa carbon fiber wound hydrogen storage cylinder[J].Pressure Vessel Technology，2023，40(3)：28-37.

[7] SURYAWANSHI R，BHAGAT H，KARANDE A，et al. Mitigating risks in vehicle fires：An integrated approach for early detection and real-time alert system[C]//International Conference on Smart Systems：Innovations in Computing. Smart Innovation，Systems and Technologies. Singapore：Springer，2023：211-222.

[8] 戴晓莹.新能源汽车滚装船火灾防控技术研究[J].消防科学与技术，2025，44(11)：1704-1707.
DAI X Y. Research on fire prevention and control technologies for Ro-Ro new energy vehicle ships[J]. Fire Science and Technology，2025，44（11）：1704-1707.

[9] LI Y F，LI Q N，PENG W Z，et al. A comparative analysis of the regulations，codes and standards for on-board high-pressure hydrogen storage cylinders[J]. International Journal of Hydrogen Energy，2024，54：894-907.

[10] MAGLIANO A，CARRERA C P，PAPPALARDO C M，et al. A comprehensive literature review on hydrogen tanks：storage，safety，and structural integrity[J].Applied Sciences，2024，14(20)：9348.

[11] 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 D M，MAO Z X，FU N，et al.Fire test research on on-board hydrogen system of hydrogen fuel cell buses[J].Pressure Vessel Technology，2025，42(11)：23-29.

[12] 韩冰，戴行涛，刘岩，等.火烧环境无隔热气瓶超压工程预测模型构建[J].压力容器，2025，42(4)：41-47.
HAN B，DAI X T，LIU Y，et al. Construction of engineering prediction model on overpressure of uninsulated gas cylinder under fire environment[J]. Pressure Vessel Technology，2025，42(4)：41-47.

[13] 王云峰，王哲，徐双庆，等.高压Ⅳ型储氢气瓶充氢工艺分析[J].流体机械，2024，52(10)：24-32.
WANG Y F，WANG Z，XU S Q，et al. Numerical analysis of hydrogen charging process for the

high-pressure type IV hydrogen storage cylinder[J]. Fluid Machinery,2024,52(10):24-32.

[14] TSCHIRSCHWITZ R,KRENTEL D,KLUGE M,et al. Hazards from failure of CNG automotive cylinders in fire[J].Journal of Hazardous Materials,2019,367:1-7.

[15] PARK B, KIM Y K. Reenacting the hydrogen tank explosion of a fuel-cell electric vehicle: An experimental study [J]. International Journal of Hydrogen Energy,2023,48(89):34987-35003.

[16] 邹林志,李贝,韩冰,等.氢燃料电池车紧急泄放射流火辐射风险分析[J].清华大学学报(自然科学版),2025,65(11):2149-2156.
ZOU L Z, LI B, HAN B, et al. Risk prediction of thermal radiation from jet fire of onboard hydrogen storage tanks [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2025, 65 (11): 2149-2156.

[17] ZALOSH R. Blast waves and fireballs generated by hydrogen fuel tank rupture during fire exposure[C]// Proceedings of the 5th international seminar on fire and explosion hazards.UK:Edinburgh,2007:4.

[18] SHEN C C, MA L, HUANG G, et al. Consequence assessment of high-pressure hydrogen storage tank rupture during fire test[J].Journal of Loss Prevention in the Process Industries,2018,55:223-231.

[19] LI B, HAN B, LI Q, et al. Study on hazards from high-pressure on-board type Ⅲ hydrogen tank in fire scenario: Consequences and response behaviours[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47(4):2759-2770.

[20] TAMURA Y, YAMAZAKI K, MAEDA K, et al. The residual strength of automotive hydrogen cylinders after exposure to flames[J]. International Journal of Hydrogen Energy,2019,44(17):8759-8766.

[21] TAMURA Y, TAKAHASHI M, MAEDA Y, et al. Fire exposure burst test of 70MPa automobile high-pressure hydrogen cylinders [C]//. Society of Automotive Engineers of Japan Annual Autumn Congress.Japan,2006:7-10

[22] MOLKOV V V,CIRRONE D M C,SHENTSOV V V, et al. Dynamics of blast wave and fireball after hydrogen tank rupture in a fire in the open atmosphere [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(5):4644-4665.

[23] LIU G L, LI B, TAO S W, et al. Full-scale explosion experiment and overpressure prediction method for 70 MPa hydrogen fuel cell vehicle tank under standard fire test[J].International Journal of Hydrogen Energy, 2025,170:151194.

[24] 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.

[25] HUPP N,STAHL U,KUNZE K,et al.Influence of fire intensity,fire impingement area and internal pressure on the fire resistance of composite pressure vessels for the storage of hydrogen in automobile applications[J]. Fire Safety Journal,2019,104:1-7.

[26] SHANG Y Q, LI B, SUN D L, et al. Virtual sample generation-enhanced machine learning for predicting critical burst pressure of hydrogen storage tanks in fire scenarios [J]. International Journal of Hydrogen Energy,2025,132:239-252.

[27] ZOU L Z,LI B,HAN B,et al.Release of high-pressure hydrogen from type Ⅲ tank in a fire scenario: Analysis and prediction of jet flame length and thermal response characteristics[J].Fuel,2024,372: 132153.

[28] GEHANDLER J, LÖNNERMARK A. Uneven exposure of compressed natural gas (CNG) and hydrogen (H2) cylinders: Fire and extinguishment tests[J].Fire Safety Journal,2024,146:104170.

[29] LIU G L,LI B,HAN B,et al.A method for the residual strength tests of type Ⅲ composite on-board hydrogen storage tanks after fire exposure[J].Journal of Energy Storage,2026,141(Part A):119189.

[30] WANG X Y, LI B, JIN X, et al. Ultimate pressure-bearing capacity of type Ⅲ onboard high-pressure hydrogen storage tanks under typical accident scenarios [J]. Journal of Energy Storage, 2023,63:107135.

作者简介:李广印(1987),男,高级工程师,主要从事压力容器检测检验方面的研究,通信地址:730050甘肃省兰州市七里河区东坪街536号甘肃省特种设备检验检测研究院,E-mail:921049306@qq.com。

本文引用格式:
李广印,韩冰,宋辰,等.Ⅲ型车载高压储氢瓶火灾环境爆破试验关键参数研究[J].压力容器,2026,43(3):51-60.
LI Guangyin,HAN Bing,SONG Chen,et al.Study of key parameters of burst testing for type Ⅲ on-board high-pressure hydrogen storage cylinders [J].Pressure Vessel Technology,2026,43(3):51-60.