

# 车用高压储氢气瓶组合阀 TPRD 氢循环试验技术研究

赵保頔<sup>1,2</sup>

(1 中国特种设备检测研究院 北京 100029; 2 国家市场监督管理总局重点实验室(氢能储运装备安全) 北京 100029)

**摘要:** 热动作压力泄放装置 (TPRD) 是车用高压储氢气瓶组合阀上的核心部件之一, 主要用于火灾工况气瓶安全泄放, 对保障氢能汽车安全使用具有重要意义。TPRD 在使用过程中会长期承受高压氢疲劳载荷, 为评价 TPRD 部件的高压临氢疲劳寿命, 国内外不同标准均提出了以氢气为试验介质的压力循环试验要求, 本文分析了国内外标准中关于 TPRD 部件循环试验方法和关键参数的要求, 开发了可满足标准要求的试验技术, 并对符合试验场地条件的技术路线进行了测试验证, 结果符合标准要求。

**关键词:** 组合阀; 氢气; 压力循环; 试验技术

## 0 引言

氢能是 21 世纪最重要的二次能源之一, 发展氢能经济对于降低碳排放、减少温室效应具有重要意义。近年来, 随着以氢气为动力的燃料电池汽车的快速发展, 安全、高效的储氢用氢已经成为评价氢能汽车本质安全的核心要素<sup>[1]</sup>。在汽车燃料电池供氢系统中, 组合阀是连接氢燃料电池动力系统和储氢系统的关键纽带, 热动作泄放装置 (TPRD) 一般与其他控制部件一起被集成在组合阀上, 并且直接安装在储氢系统的高压气瓶上<sup>[2]</sup>。

TPRD 是组合阀上一种感温动作的安全附件, 如图 1 所示。TPRD 一般与气瓶内高压氢气直接连通, 在正常使用过程中处于未激活状态, 起密封作用, 当遇到火灾等高温工况会自动动作, 失去密封作用引导瓶内高压氢气安全泄放, 有效地降低火灾事故中气瓶爆炸的风险, 对保障氢能汽车安全使用具有重要作用。TPRD 在正常使用工况下, 会承受瓶内高压氢气压力变化造成的疲劳载荷, 因此国内外标准均要求通过氢气压力循环试验方法测试组合阀 TPRD 在临氢工况下的疲劳性能及高压密封性能。本文简要比较了不同标准中组合阀 TPRD 氢气压力循环试验要求, 通过分析标准中关键技术参数, 形成符合标准要求的氢气压力循环试验技术路线, 并根据试验场地条件进行了测试验证, 为开发车载储氢系统临氢部件的氢气压力循环测试提供技术支撑。

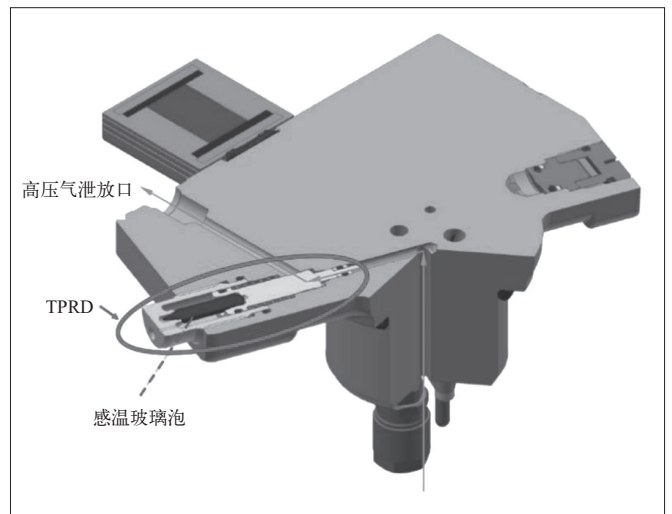


图 1 组合阀上的 TPRD

## 1 标准规定的 TPRD 氢循环试验方法

国内外不同标准规定的试验方法及参数见表 1。

从表 1 可以看到, 各标准规定的试验方法均要求 TPRD 在恒定温度下, 进行以高压氢气为介质的气体压力循环试验, 即通过氢气压力周期性连续变化形成疲劳循环载荷, 来测试 TPRD 抗疲劳性能。

试验要求以气态氢气为介质, 由于标准规定试验循环次数都在 1 万次以上, 整个试验过程氢气需求量较大, 考虑到试验的连续性和效率, 可以选择合适的高压氢气存储装备作为氢气气源。

试验温度和循环试验压力范围也是试验的关键, 温度范围要求一般是  $-40 \sim 85^{\circ}\text{C}$ , 试验压力要求一般循环压力下限恒定, 循环压力上限则根据不同的

表1 TPRD 氢气压力循环试验方法

试验要素	GB/T 35544-2017	ECE R134	ANSI HPRD-2021	GB/T 42536-2023
样品数量 / 个	5	5	5	5
循环总次数	11000	11000	15000	15000
试验压力 $p$	2MPa ~ 1.5 $p$	2MPa ~ 1.5 $p$	2MPa ~ 1.5 $p$	2MPa ~ 1.5 $p$
试验温度	55℃、85℃	55℃、85℃	57℃、85℃	-40 ~ 85℃
循环阶段和循环方式	分3个阶段： (1) 85℃ 2MPa ~ 1.5 $p$ ，循环5次； (2) 85℃ 2MPa ~ 1.25 $p$ ，循环1495次； (3) 55℃ 2MPa ~ 1.25 $p$ ，循环9500次，循环频次不高于10次/min	分3个阶段： (1) 85℃ 2MPa ~ 1.5 $p$ ，循环5次； (2) 85℃ 2MPa ~ 1.25 $p$ ，循环1495次； (3) 55℃ 2MPa ~ 1.25 $p$ ，循环9500次，循环频次不高于10次/min	分3个阶段： (1) 85℃ 2MPa ~ 1.5 $p$ ，循环10次； (2) 85℃ 2MPa ~ 1.25 $p$ ，循环2240次； (3) 55℃ 2MPa ~ 1.25 $p$ ，循环12750次，循环频次不高于10次/min	分4个阶段： (1) 85℃，2MPa ~ 1.5 $p$ ，循环10次； (2) 85℃，2MPa ~ 1.25 $p$ ，循环2240次； (3) 20℃，2MPa ~ 1.25 $p$ ，循环10000次； (4) -40℃ 2MPa ~ 1.25 $p$ ，循环2750次，循环频次不高于10次/min

注： $p$ 为阀的公称工作压力。

温度条件，以阀的公称工作压力为基数，最高可达到1.5倍公称工作压力。

## 2 氢气压力循环试验技术开发

### 2.1 氢气压力循环试验技术方案总体设计

根据不同的现场条件，设计满足标准试验要求的氢气压力循环试验技术方案，如图2、图3所示。

### 2.2 氢气压力循环试验技术关键点

#### 2.2.1 高压氢气气源

气源条件是决定试验技术路线的关键因素。为满足标准试验要求，必须有能够持久供应的高压氢气气源，如氢气长管拖车或移动式氢气瓶组，可以提

供15 ~ 25MPa的高压氢气，高压氢气需要进行二次增压达到试验压力，适用于技术方案1；也可以用大容量的高压储氢压力容器做气源，通过外置增压系统可直接达到试验所需压力，适用于技术方案2，但是应为高压储氢压力容器准备专用场地。

#### 2.2.2 恒定的试验温度

按照标准要求，被测样品应处于恒定温度的环境中，一般是将被测样品放在能进行恒温控制的环境仓中试验，通过控制系统设定和调节环境仓的温度实现恒定温度的环境。试验时可以将环境仓内充满氮气作为保护气，有效降低氢气泄漏带来的火灾风险。

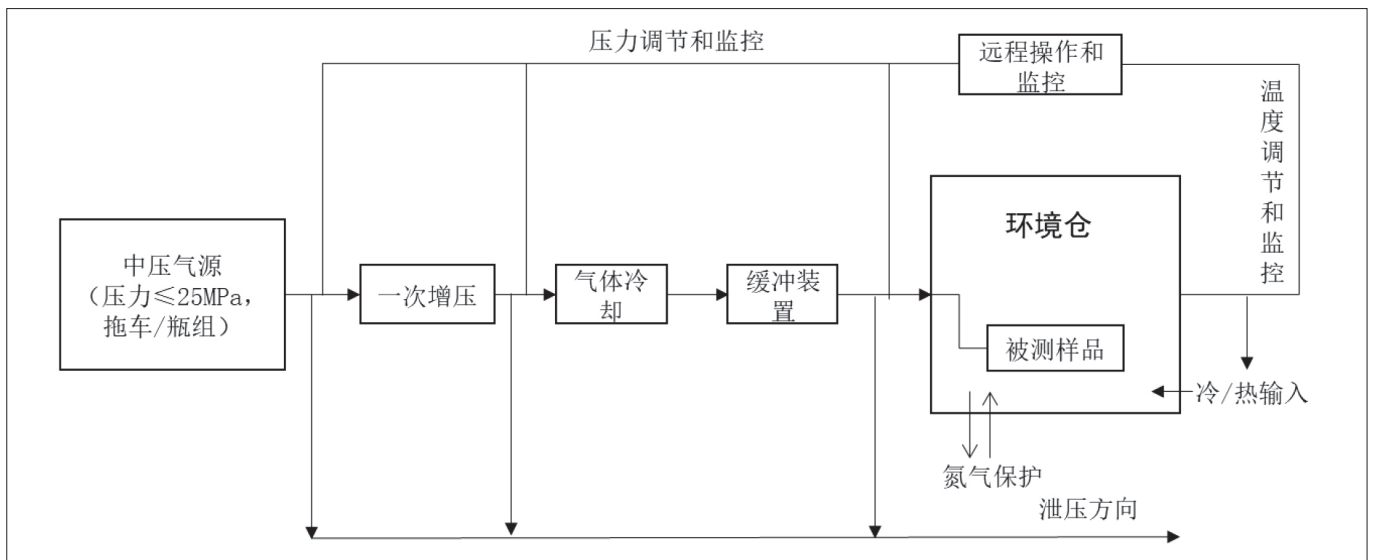


图2 方案1氢循环试验技术原理示意图

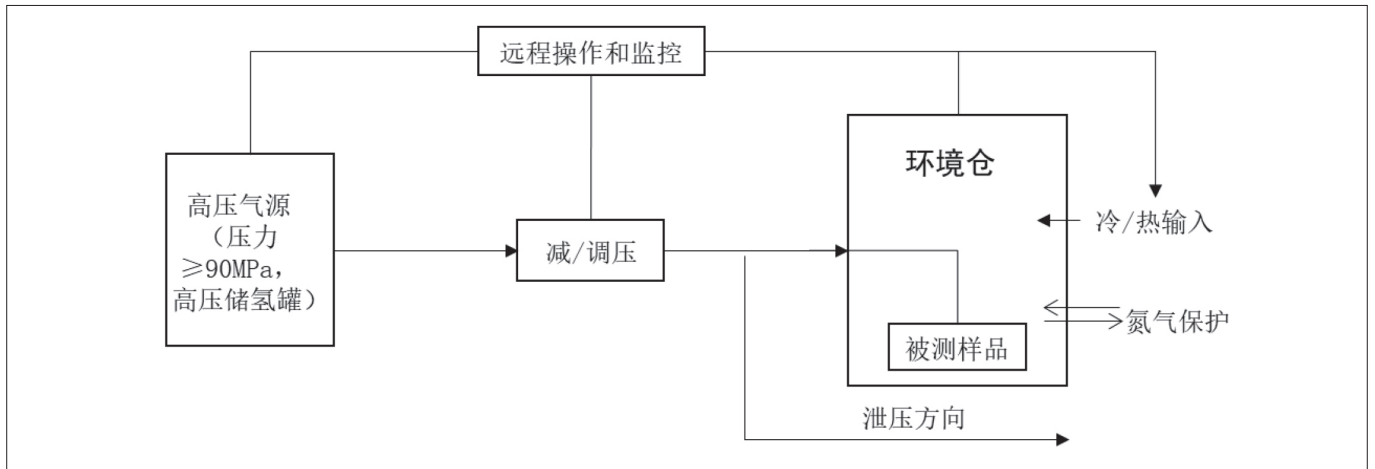


图3 方案2氢循环试验技术原理示意图

### 2.2.3 连续周期性循环压力及控制

按照标准要求，应对被测样品施加连续的循环压力，高压氢气通过增压或调压控制系统连通被测样品，为被测样品提供连续循环的氢气压力载荷。

### 2.2.4 多个被测样品同时进行试验

为降低能耗提高效率，可将5个样品并联连接到同一个进气口，以实现同时对5个样品进行试验，如图4所示。

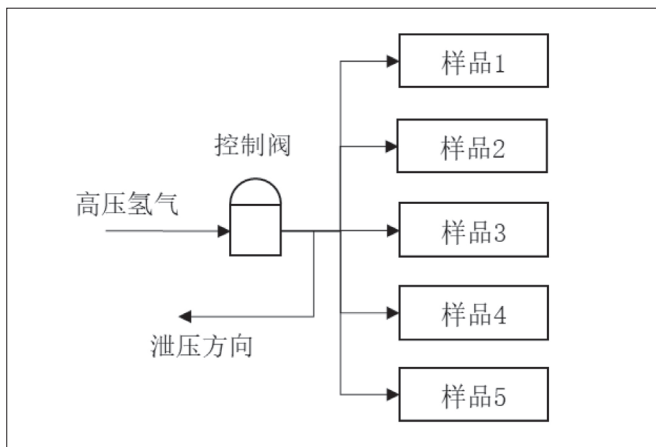


图4 5个TPRD并联试验示意图

### 2.2.5 远程操作监控技术

该试验涉及高压氢气输送，考虑到压力高、周期长及氢气泄漏等因素，试验过程的压力控制建议选择远程操作模式，同时对压力、温度、氢气浓度等关键参数信号进行实时监控，并结合摄像头监控，对异常情况能够及时处理。

### 2.3 试验技术方案可行性分析

方案1采用的是氢气长管拖车或瓶组为气源，由于气源压力低于试验压力，须配备增压控制系统，

实现稳定输出循环氢气压力，试验温控方案可以考虑集成加热和制冷一体式的高低温箱，也可以考虑“独立绝热腔体+外置供热/制冷”的温控模式。

方案2采用的是高压储氢容器为气源，由于容器属于固定式压力容器，需要建立专用场地，并且应符合相关标准的要求，前期投入较大。气源提供的压力高于试验压力，可以直接用于试验，不需要增压。试验温度控制方案与方案1一致。

考虑到方案2需要超高压力的储氢容器，场地设备投入较大，建设周期长，而方案1气源获取相对容易，对场地需求条件相对较低，本文选择方案1的技术路线进行测试验证。

## 3 氢循环试验技术方案测试验证

根据现场条件，按方案1技术路线搭建了相应的试验系统，如图5所示。以某公司开发的70MPa瓶口组合阀（型号：CQZF-70-12-1）为测试单元开展试验，如图6所示，并对技术路线进行测试验证。

试验参考了《车用压缩氢气铝内胆碳纤维全缠绕

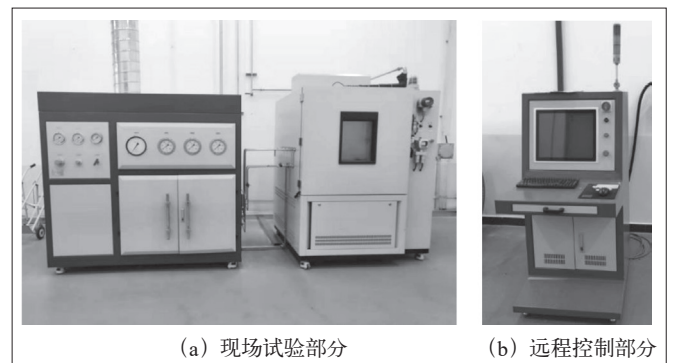


图5 TPRD氢循环试验系统



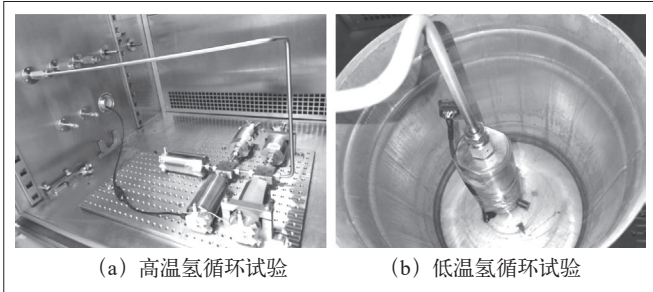


图6 TPRD 氢循环试验

气瓶》(GB/T 35544-2017) 附录 B 中 TPRD 氢循环试验和温度循环试验低温氢气压力循环试验的要求, 主要验证了试验系统在不同温度和压力下的试验能力。主要试验参数见表 2。

试验过程中充分验证了远程操作和监控、氢气增

表 2 氢循环过程主要试验参数

试验顺序	试验温度 / $^{\circ}\text{C}$	试验压力 /MPa	循环次数	样品数量 / 个
1	85	2 ~ 105	5	5
2	85	2 ~ 87.5	1495	5
3	55	2 ~ 87.5	9500	5
4	-40	2 ~ 56	100	1

压和调节、恒温控制等关键技术, 能够自动控制试验压力随时间的变化而变化, 并形成实时压力曲线, 如图 7、图 8 所示。结果表明由该试验技术方案形成氢气压力循环试验过程符合标准要求, 方案可行性得到验证。

### 4 结语

本文通过分析国内外标准中关于 TPRD 部件循环试验方法和关键参数的要求, 提出了满足标准要求的试验技术方案, 并进行了可行性分析, 根据现场试验条件选择合适的技术方案进行测试验证, 结果符合标准要求。本文提及的技术方案也可用于其他高压氢装备零部件相同试验工况的氢压力循环试验, 为开发储氢系统临氢部件的氢气压力循环测试提供技术支撑。

基金项目: 中国特种设备检测研究院青年基金项目“车载储氢气瓶组合阀极限温度压力循环试验方法研究”(项目号: 2021 青年 18)。

### 参考文献:

[1] 刘艳秋, 张志芸, 张晓瑞, 等. 氢燃料电池汽车氢系统安全防控分析 [J]. 客车技术与研究, 2017, 39(06): 13-16.  
 [2] 古纯霖, 赵保颀, 张波, 等. 我国车载高压储氢气瓶阀门发展现状 [J]. 中国特种设备安全, 2019(12): 5-8.

作者简介: 赵保颀 (1988.08-), 男, 汉族, 河南郑州人, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 气瓶阀门试验。

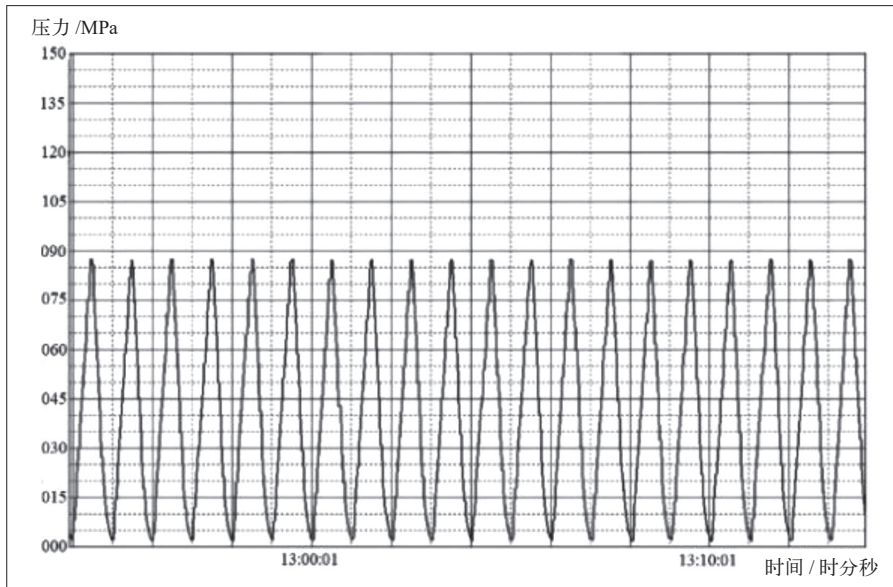


图7 TPRD 氢循环压力曲线 (顺序 2)

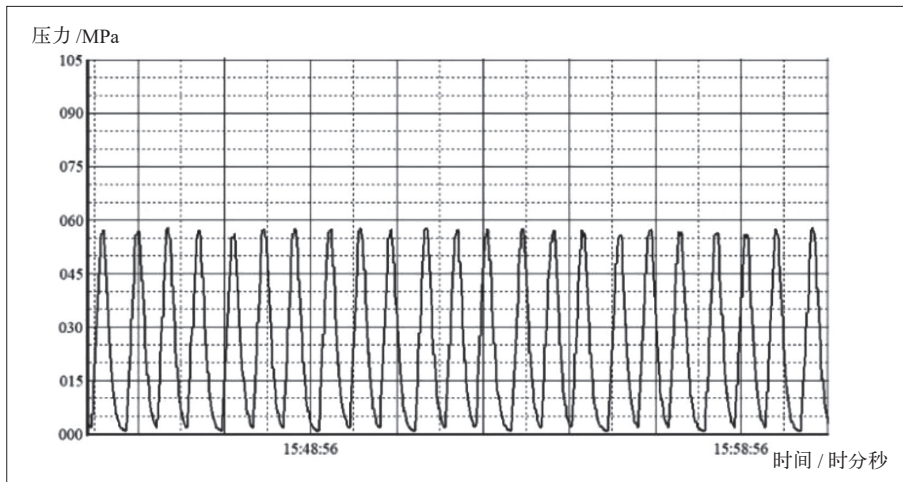


图8 TPRD 氢循环压力曲线 (顺序 4)