

ICS 点击此处添加 ICS 号

CCS 点击此处添加 CCS 号

# T/CAQI

## 中国质量检验协会团体标准

T/CAQI XXXX—XXXX

### 氢能储运泄漏监测、预警及安全防护技术要求

Technical requirements for leakage monitoring, early warning and safety protection  
of hydrogen energy storage and transportation

（征求意见稿）

（本草案完成时间：）

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

XXXX – XX – XX 发布

XXXX – XX – XX 实施

中国质量检验协会 发布

目 次

前言 ..... II

1 范围 ..... 1

2 规范性引用文件 ..... 1

3 术语和定义 ..... 1

4 氢气气体检测报警仪 ..... 2

5 氢气泄漏监测技术 ..... 5

6 氢气泄漏预警技术 ..... 7

7 储运设备安全防护技术要求 ..... 8

8 作业人员安全要求 ..... 12

9 应急管理要求 ..... 13

## 前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由××××提出。

本文件由中国质量检验协会归口。

本文件起草单位：

本文件主要起草人：

# 氢能储运泄漏监测、预警及安全防护技术要求

## 1 范围

本文件规定了氢气气体检测报警仪与液氢检测仪的分类、功能、技术要求和试验方法，氢气泄漏的监测技术和预警技术，储运设备（包括气瓶、移动式压力容器、固定式压力容器、管道及附件）的安全防护(监测)技术要求，及作业人员安全要求。

本文件适用于氢能储运泄漏预警和安全防护管理。

本文件仅限于气氢、液氢储运装备泄漏监测、预警以及安全防护技术要求。

## 2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 150.1 压力容器 第1部分：通用要求  
GB/T 2423（所有部分） 环境试验  
GB/T 3836.1 爆炸性环境 第1部分：设备 通用要求  
GB/T 3836.15 爆炸性环境 第15部分：电气装置的设计、选型和安装  
GB/T 4208 外壳防护等级（IP代码）  
GB 7258 机动车运行安全技术条件  
GB 12358 作业场所环境气体检测报警仪 通用技术要求  
GB/T 17626（所有部分） 电磁兼容 试验和测量技术  
GB 20300 道路运输爆炸品和剧毒化学品车辆安全技术条件  
GB 50177 氢气站设计规范  
GB/T 50493 石油化工可燃气体和有毒气体检测报警设计标准  
TSG R0005 移动式压力容器安全技术监察规程

## 3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1

**氢气** hydrogen

分子式为 $H_2$ 的物质。

### 3.2

**液氢** liquid hydrogen

由氢气经过降温而得到的液体，是一种无色、无味的高能低温液体燃料。

### 3.3

**有机液储氢技术** liquid Organic Hydrogen Carriers Technology (LOHC)

以某些烯烃、炔烃或芳香烃等含有不饱和碳键的液态有机物作为储氢载体，通过发生一对一可逆反应实现氢储存和释放的技术。

### 3.4

**氢能储运** hydrogen energy storage and transportation

将氢气或液氢通过储存设备（如气瓶、移动式或固定式压力容器）和运输设备（如管道、罐车、集装箱）进行储存和/或输送的活动。

注：本文件中不包含氢浆相关内容。

### 3.5

**泄漏预警** leak warning

通过监测手段发现氢气泄漏迹象，在可能造成危险前发出报警信号，以便及时采取控制和应急措施的系统或过程。

### 3.6

#### 氢气气体检测报警仪 hydrogen gas detection alarm

一种能够检测空气中氢气浓度，并在达到或超过预设报警设定值时发出声光报警信号的仪器或系统。

### 3.7

#### 爆炸下限 (LEL) lower explosive limit

可燃气体（如氢气）在空气中遇火源能够发生爆炸的最低体积百分比浓度。在本文件中，常以该浓度百分比的百分比（%LEL）表示。氢气在空气中的爆炸下限约为4%（体积分数）。

### 3.8

#### 报警设定值 alarm setting value

氢气气体检测报警仪发出报警信号时所对应的预设氢气浓度阈值。

### 3.9

#### 一级报警 first level alarm

当检测到的氢气浓度达到或超过较低的报警设定值时触发的报警。

### 3.10

#### 二级报警 second level alarm

当检测到的氢气浓度达到或超过较高的报警设定值时触发的报警，通常表示危险程度更高。

### 3.11

#### 响应时间 response time

从氢气接触检测器达到报警设定浓度起，到预警系统发出报警信号（包括声、光或联动信号）止的总时间。

### 3.12

#### 校准 calibration

使用已知浓度的标准气体对气体检测仪器的示值进行调整，使其输出指示与标准气体浓度值相符的过程。

### 3.13

#### 撞击测试 bump test

使用已知浓度的目标气体（通常为报警浓度附近）冲击气体检测仪器，以快速验证其是否响应并触发报警，但不涉及调整仪器的示值准确性。

### 3.14

#### 氢脆 hydrogen embrittlement

金属材料在含氢环境中吸收氢，导致其塑性、韧性和断裂强度下降的现象。

### 3.15

#### 紧急切断阀 emergency shut-off valve (ESV)

一种用于在紧急情况下快速、可靠地切断氢气流动的阀门。

### 3.16

#### 危险区域 hazardous area

由于存在爆炸性环境，需要采取特殊措施进行电气设备的设计、安装和使用的区域。

### 3.17

#### 防护等级 IP code

通过特定的字母和数字组合，表示电气设备外壳对固体异物（包括灰尘）和水的防护程度的等级划分。

## 4 氢气气体检测报警仪

### 4.1 分类

#### 4.1.1 按安装使用方式，报警仪包括：

- a) 固定式氢气气体检测报警仪；

- b) 便携式氢气气体检测报警仪。
- 4.1.2 按使用场所环境要求,报警仪包括:
  - a) 通用型氢气气体检测报警仪;
  - b) 防爆型氢气气体检测报警仪。
- 4.1.3 按检测原理,报警仪包括但不限于:
  - a) 催化燃烧式;
  - b) 电化学式;
  - c) 热导式;
  - d) 半导体式;
  - e) 光学式。

## 4.2 功能

### 4.2.1 基本功能

- 4.2.1.1 报警仪应能检测空气中氢气的体积浓度或爆炸下限百分比浓度(%LEL)。
- 4.2.1.2 报警仪(适用时)应具备浓度显示功能,能直观显示当前测量的氢气浓度值。
- 4.2.1.3 报警仪应具备报警功能。当检测到的氢气浓度达到或超过预设的报警设定值时,应能发出清晰可辨的声、光报警信号。
- 4.2.1.4 报警仪应具备故障指示功能,当传感器失效、线路故障或其他内部故障发生时,应能发出与气体报警信号有明显区别的故障指示信号(如声、光或状态指示)。

### 4.2.2 扩展功能(适用时)

- 4.2.2.1 固定式报警仪宜具备报警信号输出功能,如提供开关量(继电器触点)信号,用于联动控制通风、切断阀门等安全设备。
- 4.2.2.2 报警仪可具备模拟量(如4mA~20mA)或数字量(如RS485/Modbus)信号输出功能,用于数据远传至监控系统。
- 4.2.2.3 报警仪可具备报警设定值调整功能。
- 4.2.2.4 报警仪可具备自检和校准提示功能。
- 4.2.2.5 报警仪可具备数据记录和存储功能。
- 4.2.2.6 便携式报警仪宜具备电池欠压指示功能。

## 4.3 技术要求

### 4.3.1 一般要求

- 4.3.1.1 报警仪的设计、制造应符合相关安全标准要求。用于爆炸危险环境的报警仪,其防爆性能应符合GB 3836(所有部分)的要求,并取得相应的防爆合格证。
- 4.3.1.2 报警仪的外壳防护等级应不低于IP54,特殊环境使用的报警仪应满足相应防护等级要求。
- 4.3.1.3 报警仪应有清晰、牢固的产品铭牌,标明产品名称、型号规格、制造厂商、制造日期、主要技术参数(如检测范围、防爆标志、防护等级等)、执行标准号等信息。
- 4.3.1.4 报警仪应能在规定的环境条件(温度、湿度、大气压力)下稳定工作。工作温度范围应至少覆盖0℃~40℃,湿度范围应至少覆盖10%RH~95%RH(无凝露)。设备应明确其工作温度的上限值,该上限值应根据具体应用场景的最高预期环境温度确定,并留有适当的安全裕度。特殊应用场景应满足更宽的环境适应性要求。

### 4.3.2 性能要求

- 4.3.2.1 检测范围:应覆盖预期的氢气泄漏浓度范围。常用检测范围为0%LEL~100%LEL(对应0%vol~4%vol H<sub>2</sub>)或更宽范围(如0%vol~100%vol H<sub>2</sub>)。应在铭牌或说明书中明确标注。
- 4.3.2.2 示值误差:在校准点及量程范围内其他测试点,报警仪显示的浓度值与标准气体浓度值之间的误差应符合以下规定:
  - a) 对于测量范围为0%LEL~100%LEL的报警仪,示值误差应不大于±5%LEL。

- b) 对于测量范围超出 100%LEL 的报警仪, 具体要求应在产品标准或技术协议中规定, 一般全量程 (FS) 误差宜不大于  $\pm 3\%FS$  或  $\pm 5\%FS$ 。
- 4.3.2.3 响应时间 (T90): 将报警仪置于试验气体中, 指示值达到标准气体浓度真值的 90%所需的时间 (T90) 应不大于 5 秒。
- 4.3.2.4 重复性: 在相同条件下, 连续多次测量同一浓度标准气体, 示值输出的最大差值应不大于 3%LEL 或全量程的 2%。
- 4.3.2.5 零点漂移: 在洁净空气中连续运行 24 h, 零点示值的变化量应不大于  $\pm 2\%LEL$ 。
- 4.3.2.6 量程漂移: 在规定浓度的标准气体中连续运行 24h, 示值的变化量应不大于  $\pm 5\%LEL$  或  $\pm 5\%$  示值。
- 4.3.2.7 报警设定值:
- a) 应至少设有一级报警, 推荐设置低、高两级报警;
  - b) 低报警设定值 (一级报警, AL) 宜设置在 10%LEL~25%LEL 范围内;
  - c) 高报警设定值 (二级报警, AH) 宜设置在 25%LEL~50%LEL 范围内;
  - d) 报警设定值应不超过 100%LEL。
- 4.3.2.8 报警误差: 报警仪实际发出报警信号时的浓度值与设定的报警浓度值之间的误差应不大于  $\pm 2\%LEL$  或  $\pm 10\%$  报警设定值 (取较大者)。
- 4.3.2.9 声报警信号: 在距离报警仪声源设备 1 米处测量, 声压级应不小于 75 dB (A)。报警声信号应清晰、易于辨识, 并与故障声信号有明显区别。
- 4.3.2.10 光报警信号: 报警光信号应采用高亮度、易于观察的指示灯 (通常为红色), 在正常环境光线下, 距离 3 米处应清晰可见。应与电源指示、故障指示灯有明显区别。
- 4.3.2.11 输出信号 (适用时):
- a) 开关量输出: 触点容量应满足联动设备的要求, 动作应准确可靠;
  - b) 模拟量输出: 信号应与浓度值线性对应, 误差应不大于  $\pm 5\%FS$ ;
  - c) 数字量输出: 通信协议应符合相关标准或约定, 数据传输应准确可靠。
- 4.3.2.12 抗干扰性: 报警仪应具备一定的抗电磁干扰能力, 符合 GB/T 17626.2 要求。
- 4.3.2.13 电源适应性:
- a) 交流供电: 应能在额定电压的 85%~110%范围内正常工作;
  - b) 直流供电/电池供电: 应能在规定的电压范围内正常工作, 便携式报警仪应有欠压告警功能。

## 4.4 试验方法

### 4.4.1 一般规定

- 4.4.1.1 试验的标准大气条件为: 温度 15℃~35℃, 相对湿度 45%RH~75%RH, 大气压力 86 kPa~106 kPa。特殊要求的试验应在规定的环境条件下进行。
- 4.4.1.2 试验用标准气体的不确定度应不大于 2%, 并可溯源至国家基准。
- 4.4.1.3 试验仪器设备的精度应满足测量要求。

### 4.4.2 外观与结构检查

目视检查报警仪的铭牌、标志、外观结构、防护等级标识、防爆标志 (若有) 等是否符合 4.3.1 的要求。

### 4.4.3 基本功能试验

接通电源, 观察报警仪启动、自检、显示、状态指示等功能是否正常, 是否符合 4.2.1 的要求。

### 4.4.4 防爆性能试验

按 GB 3836 (所有部分) 规定的方法进行试验, 检查是否符合 4.3.1.1 的防爆要求。

### 4.4.5 外壳防护等级试验

按 GB/T 4208 规定的方法进行试验, 检查是否符合 4.3.1.2 的防护等级要求。

### 4.4.6 示值误差试验

使用已知浓度的氢气标准气体（至少包括零点、低报警点附近、高报警点附近、满量程的80%左右等点），通入报警仪，待示值稳定后读取读数，计算示值误差，检查是否符合4.3.2.2的要求。

#### 4.4.7 响应时间（T90）试验

将报警仪置于洁净空气中稳定后，迅速通入规定浓度的标准气体（通常为50%LEL或60%FS），记录示值达到该标准气体浓度真值的90%所需时间，检查是否符合4.3.2.3的要求。

#### 4.4.8 重复性试验

在相同条件下，使用同一浓度的标准气体，重复进行6次测量，记录每次稳定后的示值，计算最大差值，检查是否符合4.3.2.4的要求。

#### 4.4.9 漂移试验（零点和量程）

按产品说明书或GB 12358规定的方法进行零点漂移和量程漂移试验，检查是否符合4.3.2.5和4.3.2.6的要求。

#### 4.4.10 报警功能试验

4.4.10.1 报警设定值检查：通过仪器接口或菜单查看并确认报警设定值是否在4.3.2.7规定的范围内。

4.4.10.2 报警误差试验：缓慢通入浓度逐渐增加的标准气体，或使用多组接近报警设定值的标准气体，精确记录报警仪发出声、光报警信号时的实际浓度值，计算报警误差，检查是否符合4.3.2.8的要求。重复进行低、高两级报警试验。

4.4.10.3 声、光报警试验：在报警状态下，使用声级计测量声报警信号强度，目测光报警信号的可见性，检查是否符合4.3.2.9和4.3.2.10的要求。

#### 4.4.11 输出信号试验

在不同浓度条件下（包括报警状态），测量报警仪的开关量输出、模拟量输出或数字量输出信号，检查其准确性、可靠性是否符合4.3.2.11的要求。

#### 4.4.12 环境适应性试验

按GB/T 2423（所有部分）规定的方法，进行高低温、湿热等环境试验，检查报警仪在规定环境条件下的工作性能是否符合4.3.1.4的要求。

#### 4.4.13 电磁兼容性（EMC）试验

按GB/T 17626（所有部分）规定的方法进行试验，检查是否符合4.3.2.12的要求。

#### 4.4.14 电源适应性试验

将供电电源电压在规定范围内调整，检查报警仪是否能正常工作，并验证便携式报警仪的欠压告警功能，检查是否符合4.3.2.13的要求。

#### 4.4.15 故障指示功能试验

模拟传感器失效、线路故障等情况，检查报警仪是否能发出与气体报警信号有明显区别的故障指示信号，是否符合4.2.1.4的要求。

### 5 氢气泄漏监测技术

#### 5.1 主要技术指标

5.1.1 检测对象与原理：应选用对氢气有良好选择性、稳定性和可靠性的检测原理的探测器，根据现场环境条件（温度、湿度、可能存在的干扰气体等）和检测需求选择合适的检测原理。

5.1.2 量程范围：检测器的量程范围应覆盖氢气的爆炸下限（LEL，约为空气中体积浓度的4%）。通常选用0%LEL~100%LEL的量程，或根据风险评估和应用场景确定更宽量程。

5.1.3 报警设定值：



- a) 应设置至少两级报警；
  - b) 一级报警（低报）设定值不应高于 25%LEL。建议值可设为 10%LEL 或 20%LEL；
  - c) 二级报警（高报）设定值不应高于 50%LEL。建议值可设为 25%LEL 或 40%LEL；
  - d) 具体的报警设定值应结合场所风险评估结果、工艺操作条件和相关规范要求综合确定。
- 5.1.4 精度与重复性：检测报警仪的示值误差、重复性等计量性能应符合 GB 12358 的要求。
- 5.1.5 防爆要求：安装在爆炸危险区域的氢气探测器及相关电气部件，应选用符合 GB 3836（所有部分）要求的防爆类型和等级，并取得国家认可的防爆合格证。防爆等级和温度组别应不低于现场环境的要求。
- 5.1.6 防护等级（IP 等级）：根据安装环境（室内、室外、粉尘、潮湿等），探测器外壳的防护等级应满足 GB/T 4208，以保证其正常运行和使用寿命。
- 5.1.7 环境适应性：检测报警仪应能在预期的环境温度、湿度、压力等条件下稳定工作，并应明确规定其最高和最低工作温度限值。
- 5.1.8 信号输出与联动：检测报警仪应具备标准的信号输出，能够接入报警控制器或 DCS/PLC 系统，并根据安全设计要求，实现声光报警、启动通风设备、切断氢气流、触发紧急停车系统（ESD）等联动功能。
- 5.1.9 认证与检定：选用的氢气检测报警仪产品应具有国家指定机构颁发的型式批准证书（CPA）、消防产品认证（CCCF）和防爆合格证。安装前及使用期间，应按国家计量检定规程进行定期检定或校准。

## 5.2 风险分析

在设计和配置氢气泄漏监测系统前，必须进行充分的风险分析，识别氢气泄漏的主要风险点和潜在后果。

- a) 氢气特性风险：
  - 1) 极宽可燃极限：氢气在空气中的可燃极限极宽，约为 4.0%~75.6%；
  - 2) 最小点燃能低：氢气的最小点燃能极低，对静电火花、机械撞击火花或热表面等引燃源高度敏感；
  - 3) 感官难察觉：氢气是一种无色、无味的气体，发生泄漏时，无法通过人员的视觉或嗅觉等感官及时发现；
  - 4) 易扩散并积聚：氢气密度极小，泄漏后会迅速向上扩散。在室内、受限空间或通风不良的区域，易在空间上部积聚并形成爆炸性气体环境；
  - 5) 存在氢脆风险：氢气可导致特定金属材料发生氢脆现象，导致材料韧性降低、脆性增加，进而提升承压设备及管道发生脆性断裂或泄漏的风险。
- b) 潜在泄漏源识别：应系统性排查工艺设备和管线中可能发生泄漏的位置，包括但不限于：
  - 1) 法兰、阀门、焊缝、密封点；
  - 2) 压缩机、泵的轴封；
  - 3) 仪表接口、取样口；
  - 4) 储罐、压力容器本体及附件；
  - 5) 加氢机、充装口；
  - 6) 安全阀、爆破片等泄放装置出口附近；
  - 7) 经常操作或维护的部位。
- c) 泄漏后果评估：分析泄漏可能导致的火灾、爆炸事故范围和严重程度，对人员、设备、环境可能造成的危害，以及对生产运行的影响。
- d) 风险分析应用：风险分析的结果是确定检测报警仪类型、数量、布局、报警设定值和联动逻辑的重要依据。

## 5.3 氢气气体检测报警仪布局

氢气气体检测报警仪的布局应遵循 GB 50177、GB 50493 的规定，并结合风险分析结果，遵循以下原则：

- a) 靠近泄漏源原则：应在识别出的潜在氢气泄漏源附近设置探测器。
- b) 考虑气体特性原则：

- 1) 鉴于氢气密度远小于空气，探测器应优先布置在潜在泄漏点上方的空气易于积聚处，如建筑物最高点、屋顶下方、设备顶部、管道廊道上方等；
- 2) 对于室内或封闭/半封闭空间，应在其顶部或空气流通不畅、易于积聚氢气的位置设置探测器。
- c) 结合通风状况原则：
  - 1) 应考虑场所的自然通风和机械通风状况，将探测器设置在泄漏气流可能经过的路径上；
  - 2) 对于强制通风场所，可在排风口附近设置探测器，监测排风中的氢气浓度；
  - 3) 避免将探测器设置在通风口或气流过强处，以免泄漏气体被迅速稀释而无法及时检出。
- d) 覆盖范围原则：
  - 1) 点型可燃气体探测器的保护半径应参考 GB 50493 等标准，通常室内保护半径约为 5 m，室外约为 10 m，但需根据空间结构、释放源特性和标准更新进行调整。
  - 2) 对于大范围或开放空间，可考虑使用开放光路式（线型）探测器。
- e) 重点区域设置：在氢气压缩机房、储氢容器区、加氢机区域、氢气瓶组间、氢气分析小屋、氢气管道集中的廊道等高风险区域，应根据规范要求和风险评估加密设置探测器。
- f) 可操作性与维护性：探测器的安装位置应便于日常检查、维护、标定和更换。
- g) 避免干扰：探测器的安装位置应避开高温、高湿、振动、强电磁干扰以及可能影响其正常工作的物理或化学因素。
- h) 报警器设置：声光报警器应设置在现场工作人员易于看到和听到的地方，控制室应有集中的报警显示和记录。

## 6 氢气泄漏预警技术

### 6.1 快速判定技术

#### 6.1.1 氢泄漏判据

##### 6.1.1.1 核心判定参数：

- a) 氢气浓度梯度变化率 $\geq 1\%LEL/s$ 时应触发预警；
- b) 应结合 CFD 扩散模型进行泄漏源定位；
- c) 报警阈值设置应符合一级报警 $\leq 25\%LEL$ ，二级报警 $\leq 50\%LEL$ 的要求。

##### 6.1.1.2 数据分析方法：

- a) 应采用多传感器数据融合技术消除环境干扰；
- b) 宜采用机器学习算法降低误报率。

#### 6.1.2 报警逻辑与联动控制

##### 6.1.2.1 应建立分级响应机制：

- a) 一级报警应启动声光报警及排风系统；
- b) 二级报警应联动紧急切断阀（响应时间 $\leq 500\text{ ms}$ ）并上报监控中心。

##### 6.1.2.2 高风险区应配置双传感器交叉校验机制。

### 6.2 防护技术

6.2.1 防爆要求：安装在爆炸危险区域的氢气检测器及相关电气部件，其防爆等级和温度组别应不低于所在区域的防爆要求。应取得国家认可的防爆认证。

6.2.2 环境防护：检测器及其外壳应具备适应现场环境条件的防护能力，包括：

- a) 防护等级（IP 等级）应满足防尘、防水的要求；
- b) 材料应能抵抗现场可能存在的腐蚀性介质影响，特别是对于可能接触氢气的部件，应考虑氢脆风险；
- c) 应能在规定的环境温度、湿度范围内稳定工作，并明确其最高环境工作温度上限。

##### 6.2.3 系统可靠性：

- a) 宜采用冗余设计，在关键位置设置多个检测器或采用不同原理的检测器组合；

- b) 预警系统应具备自诊断功能，能够检测传感器失效、线路故障、通讯中断等异常状态，并发出故障报警；
  - c) 关键系统的电源应配备备用电源，确保在主电源中断时仍能正常工作一段时间。
- 6.2.4 联动控制：
- a) 行动报警（二级报警）信号应能联动触发声光报警装置，清晰指示报警位置和级别；
  - b) 根据安全设计要求，行动报警信号应能自动或手动联动启动强制通风系统、紧急切断阀（ESD）、喷淋系统或其他安全保护措施。联动逻辑应经过严格的安全评估和测试。

## 6.3 技术优化

- 6.3.1 性能提升：鼓励研发和采用新型传感材料与技术，提高检测器的灵敏度、选择性、稳定性和环境适应性，降低交叉干扰和漂移。
- 6.3.2 智能化与集成：鼓励应用物联网（IoT）、大数据、人工智能（AI）等技术：
- a) 实现远程监控、数据分析、趋势预测和智能诊断；
  - b) 结合泄漏扩散模型，优化检测器布局和报警策略；
  - c) 开发早期微小泄漏的识别算法，提高预警能力。
- 6.3.3 降低误报率：应持续优化算法和系统配置，结合多传感器信息融合、环境参数补偿等方法，有效识别干扰源，降低误报警发生概率。
- 6.3.4 成本效益：在满足安全要求的前提下，宜考虑系统的全生命周期成本，包括购置、安装、运行、维护和校准成本，选择性价比高的技术方案。

## 6.4 验证与维护

- 6.4.1 系统安装完成后，应进行全面的检查和调试，包括：
- a) 检测器安装位置、接线、密封性检查；
  - b) 系统供电、通讯、报警功能测试；
  - c) 初始校准（标定）。
- 6.4.2 定期校准：
- a) 应按照制造商推荐或相关规程要求，使用有效期内、浓度准确的标准气体对氢气检测器进行定期校准。校准周期通常为3个月~6个月，或根据设备性能和使用环境确定，但不应长于1年；
  - b) 校准工作应由经过培训的合格人员进行，并做好详细记录。
- 6.4.3 定期功能测试（撞击测试/Bump Test）：
- a) 在两次校准之间，应定期进行功能测试，用已知浓度的氢气（通常为报警浓度的某个比例）冲击检测器，确认其能正常响应并触发报警。功能测试频率应高于校准频率，具体由风险评估和维护策略决定；
  - b) 功能测试结果应记录存档。
- 6.4.4 日常巡检与维护：
- a) 应建立日常巡检制度，检查检测器外观、指示状态、有无堵塞或污染等；
  - b) 定期清洁检测器探头外部，确保气体通路畅通；
  - c) 检查系统线路、连接件的完好性；
  - d) 按照传感器寿命预期，及时更换。
- 6.4.5 记录与文档：应建立完整的氢气泄漏预警系统技术档案，包含设计文件、设备清单、防爆证书、安装调试记录、校准记录、功能测试记录、维护记录、故障处理记录等，并妥善保管。

## 7 储运设备安全防护技术要求

### 7.1 气瓶

- 7.1.1 行驶中气瓶应妥善固定，防止滚动、撞击。瓶阀应处于关闭状态，必要时佩戴瓶帽或保护罩。
- 7.1.2 使用前应检查气瓶外观、压力，连接管路应可靠，确保无泄漏。
- 7.1.3 应使用专用的减压阀调节压力，严禁直接使用瓶阀控制流量。

- 7.1.4 气瓶内气体不得用尽，应按规定留有余压。
- 7.1.5 在气瓶储存和运输过程中，应采取措施进行氢气泄漏检测和监测，尤其是在可能发生泄漏的关键部位。
- 7.1.6 对于集束气瓶或放置在相对密闭区域内的气瓶，应在集束框架内部、围护结构内或储存场所的关键位置安装氢气传感器。
- 7.1.7 液氢瓶由于可能存在蒸发产生的氢气，在储存或运输中应确保良好的通风，并在可能积聚氢气的区域安装氢气传感器。
- 7.1.8 当监测到氢气浓度达到报警设定值时，应立即发出声光报警信号，并采取相应的安全措施，如增强通风、切断气源（如果可能）、启动应急预案等。
- 7.1.9 监测系统应具备数据记录功能，方便追溯和分析。监测数据可集成到储运过程的整体安全监控系统中。
- 7.1.10 液氢瓶的压力是评估其安全状态（特别是热漏和蒸发速率）的关键参数，应安装压力表进行监测，对于重要的液氢储运过程，宜进行连续压力监测。
- 7.1.11 液氢瓶应监测内胆真空度及夹层压力，防止真空失效导致的绝热性能下降；温度传感器需覆盖瓶体关键区域，监测液氢蒸发速率异常。
- 7.1.12 对于高压气氢瓶，压力监测是基本要求，应确保压力不超过设计压力。

## 7.2 移动式压力容器

- 7.2.1 移动式压力容器除应符合 TSG R0005、GB 7258、GB 20300 等相关法规和标准的要求。
- 7.2.2 压力监测：应设置清晰、准确、抗振的压力表或压力传感器，用于监测容器或集管内的压力。压力表量程应为工作压力的 1.5 倍至 3 倍。
- 7.2.3 温度监测：宜设置温度监测点，尤其是在充装/卸载口附近或可能影响安全泄放装置性能的位置。
- 7.2.4 对于液氢罐车/罐箱，应设置真空夹套真空度监测装置，宜具备现场显示和数据远传功能。
- 7.2.5 对于液氢罐车/罐箱，真空夹套的真空度低于设计要求或设定阈值时，应能发出声光报警信号，并宜将报警信号传输至监控中心或驾驶室。
- 7.2.6 定期和操作性泄漏检查：车辆/装置在每次充装后、运输前以及定期维护后，应对所有阀门、法兰、接头等潜在泄漏点进行泄漏检测，确保无泄漏。
- 7.2.7 对于液氢罐车/罐箱，应在易发生泄漏的部位安装固定式氢气泄漏探测器。探测器的选型和布置应能有效监测氢气泄漏。
- 7.2.8 对于长管拖车/管束式集装箱，鼓励在阀门密集区、主要连接点等潜在泄漏风险较高的位置，预留安装便携式或固定式氢气泄漏探测器的接口或空间，或在运行管理中规定使用便携式探测器进行定期检查。
- 7.2.9 当氢气浓度达到预设报警值时，应能触发高分贝声光报警器，报警信号应清晰可辨。
- 7.2.10 对于配备固定式探测器的车辆（如液氢罐车、长管拖车等），报警信号应同时传输至驾驶室，提醒驾驶员。
- 7.2.11 宜具备将报警信号远传至远程监控平台的功能。
- 7.2.12 对于液氢罐车/罐箱，真空夹套外壳应采取防护措施，防止因低温或外力撞击导致损坏。

## 7.3 固定式压力容器

- 7.3.1 固定式储氢压力容器本体、连接管道、阀门、法兰、接口、安全附件等易发生泄漏的部位，应设置氢气泄漏检测装置。检测点位布置应基于对潜在泄漏源和氢气扩散特性的分析，覆盖氢气易积聚区域（气态氢应考虑低洼和封闭区域，液态氢泄漏气化后向上扩散区域），且检测探头的数量、类型和灵敏度应满足相关标准要求。
- 7.3.2 氢气泄漏检测系统应具备实时监测、数据显示、声光报警、故障指示等功能。报警值应设置多级阈值，报警信号应清晰、及时、可靠，并能上传至监控中心。报警阈值设定应符合 GB/T 50493 和风险评估结果的要求。
- 7.3.3 当氢气泄漏检测装置发出报警信号时，应能自动或手动联动相应的安全防护措施。低限报警时宜启动局部或全面通风；高限报警时应能自动或手动切断氢气源、隔离相关区域、启动事故通风、发出紧急疏散指令等。具体的联动逻辑应根据风险评估结果确定。

- 7.3.4 固定式储氢压力容器应配备可靠的压力和温度监测装置，对容器内部介质的压力和温度进行实时连续监测。对于低温液态储氢容器，还应监测夹层真空度或绝热层温度、蒸发气排放流量等关键参数。
- 7.3.5 压力、温度及其它关键参数监测系统应具备超限报警和安全联锁功能。当监测参数超过预设的安全限值时，应立即发出报警信号，并能自动联动相应的安全保护装置。
- 7.3.6 固定式储氢压力容器应按 GB/T 150.1 设置可靠的压力释放装置，其选型、定压、排量应满足超压泄放要求。压力释放装置的泄放口应安全排放，宜高于周围建构筑物顶，并远离火源、人员活动区域、空气取入口和临近设备，必要时应设置导向管或汇集总管并进行安全处理。
- 7.3.7 设置在室内、半封闭空间或可能形成氢气积聚的场所的固定式储氢压力容器区域，应设置有效的自然通风或机械通风系统。通风系统的设计能力应满足正常运行期间的通风换气要求以及事故状态下的紧急通风要求，并宜与氢气泄漏检测系统联动，在检测到泄漏时自动提高通风能力。
- 7.3.8 液态储氢压力容器（低温绝热容器）的真空保持和绝热性能至关重要，应加强对容器夹层真空度或绝热层温度的监测，防止因绝热失效导致氢气蒸发率异常升高。蒸发气排放系统应采取防堵塞措施，并确保排放安全。
- 7.3.9 有机液态储氢容器（LOHC）系统除关注氢气泄漏外，还应考虑有机液载体的泄漏风险。在加卸氢接口、催化反应器、泵、阀门等部位应强化氢气和有机液载体的泄漏检测。有机液载体泄漏检测系统应能联动围堵、收集或火灾扑灭等防护措施。
- 7.3.10 固态储氢容器应重点监测吸放氢过程中的温度变化，防止出现超温或热失控。应根据材料和工艺特性，设定明确的温度上限报警值和安全联锁值。温度监测点应具有代表性，监测系统应能联动冷却系统、紧急卸压或停止操作等安全措施。对于存在粉尘风险的固态储氢材料，应采取措施防止粉尘泄漏和积聚引发爆炸。
- 7.3.11 固定式储氢压力容器及其所有与氢气接触的金属部件、连接管道、阀门、支架等应可靠接地和等电位连接，防止静电积聚引发火花。
- 7.3.12 固定式储氢容器区域应根据 GB/T 3836.15 的要求对潜在的氢气泄漏和扩散范围进行危险区域划分，并按照 GB/T 3836.1 选用适用于相应危险区域的电气设备和防爆型泄漏检测装置。
- 7.3.13 固定式储氢容器区域应设置氢气火焰的火灾检测装置。当发生火灾时，应能联动声光报警，并采取隔离气源、启动喷淋降温（对容器本体及临近设备）等应急措施。
- 7.3.14 所有用于安全监测、报警、联锁及紧急切断等关键安全功能的仪表和控制系统，应具备足够的可靠性，宜采用安全仪表系统（SIS）实现，并满足相应的功能安全等级要求。
- 7.3.15 关键安全监控和联动系统的供电应采用可靠的电源，宜具备不间断电源（UPS）或备用电源，确保在主电源中断时仍能正常工作。
- 7.3.16 固定式储氢容器及其安全附件、监测设备、阀门、管道等应采用与氢气兼容的材料，防止氢脆、腐蚀等导致设备失效和泄漏。
- 7.3.17 固定式储氢容器区域应设置必要的物理防护措施，如围栏、门禁，限制非授权人员进入，并设置醒目的安全警示标识和紧急联系方式。
- 7.3.18 应建立并严格执行固定式储氢压力容器及相关安全防护系统的运行、维护、检查和紧急预案程序，并定期进行演练。所有监测、报警和联锁系统应定期进行功能测试和校准，确保其可靠有效。

## 7.4 管道

- 7.4.1 管道应设置氢气泄漏检测系统，实现对泄漏的早期预警。
- 7.4.2 泄漏检测系统应具备实时监测、数据传输、报警功能，并能与其他安全系统联动。
- 7.4.3 泄漏检测传感器的选型应考虑环境条件以及氢气的特性。
- 7.4.4 泄漏检测传感器应布置在易发生泄漏的部位，如法兰、阀门、接头、焊缝、穿越构筑物或密闭空间等区域。
- 7.4.5 泄漏检测传感器的布置密度应根据管道运行压力、环境风险、人口密度等因素进行风险评估后确定。
- 7.4.6 泄漏检测系统应设置多级报警阈值，并清晰指示报警区域。
- 7.4.7 报警信号应可靠传输至控制室或指定人员，并触发相应的应急响应程序。
- 7.4.8 对于穿越建筑物、隧道等密闭或半密闭空间的管道，应加强该区域的泄漏监测，并应采取强制通风等安全防护措施。

- 7.4.9 管道设计应采取措施防止氢脆引起的泄漏，材料选择应符合相关标准。
- 7.4.10 管道应设置紧急切断阀（ESD 阀），并与泄漏检测系统或其他安全监测系统联动，以便在发生严重泄漏时快速隔离事故段。
- 7.4.11 泄漏检测系统及紧急切断阀应定期进行检查、测试和维护，确保其功能可靠。
- 7.4.12 可采用声波检测、热成像、流量平衡监测、压力降监测等辅助手段进行管道泄漏监测。
- 7.4.13 纯氢管道的泄漏检测系统应具备较高的灵敏度，能快速响应微小泄漏。
- 7.4.14 在高压纯氢管道的关键部位，应优先选用响应速度快、准确性高的检测技术。
- 7.4.15 报警阈值设定应充分考虑纯氢的易燃易爆特性及快速扩散能力。
- 7.4.16 掺氢管道的泄漏检测系统应能准确检测出混合气体中的氢气成分。
- 7.4.17 报警阈值设定应基于混合气体的爆炸极限，并留有足够的安全裕度。
- 7.4.18 泄漏检测传感器的选型应考虑混合气体成分对传感器性能的影响。
- 7.4.19 液氢管道的泄漏检测应能够识别低温泄漏的特征，如结霜、结冰或冷蒸气云。
- 7.4.20 可采用红外热成像、低温传感器等适用于极低温环境的检测技术。
- 7.4.21 真空夹层液氢管道应监测夹层真空度，真空度的异常升高可作为内部泄漏的预警信号。
- 7.4.22 液氢泄漏后会迅速气化并大量膨胀，安全防护应考虑低温烧伤及快速形成大范围易燃区域的风险。
- 7.4.23 在可能积聚低温气体的低洼区域或密闭空间，应加强泄漏监测和通风措施。

## 7.5 附件

- 7.5.1 储运设备上的各类附件（包括但不限于用于泄漏检测、安全保护、工艺控制等的接口、传感器、阀门、仪表、接头、法兰等）应采用与氢气兼容的材料，确保在设计温度、压力和运行环境下不发生氢脆、腐蚀或性能劣化。
- 7.5.2 所有涉及氢气密封的附件连接应采用可靠的密封形式，并进行严格的泄漏测试，确保满足设计和规范要求的泄漏率。
- 7.5.3 安装在爆炸危险区域的附件应满足相应的防爆要求，其选型、安装和接线应符合 GB/T 3836.15 的规定。
- 7.5.4 附件的安装位置应便于日常检查、维护和校准，同时应采取措施防止非授权人员的误操作或破坏。
- 7.5.5 附件应具备足够的机械强度和耐候性，能够承受设备运行过程中的振动、规定的运行温度上限变化及外部环境影响。
- 7.5.6 附件应有清晰的标识，包括型号、规格、耐压等级、防爆等级等信息。
- 7.5.7 用于连接泄漏检测系统的采样口、传感器安装座、或探头本身应设置在氢气可能聚集的区域，如设备顶部、阀门下方、连接法兰处、通风不良区域等。
- 7.5.8 采样口或传感器安装座的设计应确保氢气易于进入，且不易被雨水、灰尘或其他杂物堵塞。对于有压系统，采样口设计应考虑压力和流速对检测结果的影响。
- 7.5.9 在需要进行在线或离线校准的泄漏检测附件上，应设置便捷的校准气体接口或通道。
- 7.5.10 用于泄漏检测的传感器或其他测量元件，其电气连接、信号传输应符合 GB/T 17626 要求，并具备抗电磁干扰能力。
- 7.5.11 泄漏检测附件应与设备的运行状态、压力、温度等参数关联，以便更准确地判断泄漏情况。
- 7.5.12 安全阀、爆破片等压力释放装置的接口和安装座应满足设计流量要求，其泄放方向应导向安全区域，并避开人员密集场所和重要设备。
- 7.5.13 紧急切断阀（ESV）的驱动装置、本地操作手柄及其连接件应牢固可靠，具备在紧急情况下快速切断或开启阀门的能力，并具备明确的位置指示。
- 7.5.14 设备上的接地连接点应清晰标识，位置便于接地连接，并确保与主体设备的可靠导通，满足静电接地的要求。
- 7.5.15 用于连接安全仪表系统（SIS）的传感器、变送器等接口和安装应满足 SIS 功能安全等级的要求，并具备必要的冗余或诊断功能。
- 7.5.16 在需要设置手动紧急操作的附件处，应有醒目的标识和操作说明，并确保操作通道畅通。
- 7.5.17 对于可能因火灾或其他外部热源导致内部压力急剧升高的设备，其附件接口和安装应考虑防火

要求，必要时采取防火保护措施。

## 8 作业人员安全要求

### 8.1 一般要求

- 8.1.1 从事氢能储运、泄漏预警及安全防护（监测）相关作业的人员（以下简称“作业人员”）应具备相应的安全知识和操作技能。
- 8.1.2 作业人员应身体健康，无妨碍从事相应作业的疾病和生理缺陷。
- 8.1.3 作业人员上岗前应经过专业培训和安全教育，考核合格后方可上岗。
- 8.1.4 作业单位应建立健全作业人员安全管理制度，明确各岗位安全职责。

### 8.2 培训与考核

- 8.2.1 作业单位应制定详细的培训计划，定期对作业人员进行安全培训、技术培训和应急演练。
- 8.2.2 培训内容应至少包括：
  - a) 国家及地方关于氢能安全的法律、法规、标准和规范；
  - b) 氢气的物理化学性质、主要危险性及危害后果；
  - c) 所操作的氢能储运设备、泄漏预警及安全防护（监测）系统的结构、原理、性能及操作规程；
  - d) 作业场所潜在的危险因素、风险辨识及控制措施；
  - e) 个人防护装备（PPE）的正确选择、佩戴、使用和维护保养知识；
  - f) 氢气泄漏的识别方法、监测报警系统的原理及响应程序；
  - g) 应急处置预案、现场急救知识、消防器材的使用方法及疏散逃生路线；
  - h) 作业安全注意事项及典型事故案例分析。
- 8.2.3 作业人员应按规定参加培训，并通过书面或实际操作考核。考核记录应存档备查。
- 8.2.4 对于采用新技术、新工艺、新设备的情况，应进行专项培训和考核。
- 8.2.5 应定期进行再培训和再考核，确保作业人员持续具备必要的安全知识和技能。再培训周期不宜超过1年。

### 8.3 个人防护装备（PPE）

- 8.3.1 作业单位应根据作业环境的危险因素和作业性质，为作业人员配备合格、足量的个人防护装备。
- 8.3.2 作业人员在进入作业区域或进行相关操作时，应按规定正确佩戴和使用个人防护装备。
- 8.3.3 基本的个人防护装备应包括但不限于：
  - a) 防静电工作服、工作帽；
  - b) 防静电、防砸、防滑安全鞋；
  - c) 防护眼镜或面罩；
  - d) 适合的防护手套（如防低温手套、防化学品手套等，根据具体作业选择）。
- 8.3.4 在可能发生氢气泄漏或缺氧的环境中作业时，应根据风险评估结果，配备并使用便携式氢气检测报警仪、氧气检测报警仪及必要的呼吸防护装备（如空气呼吸器、长管呼吸器等）。
- 8.3.5 作业人员应掌握所使用个人防护装备的性能、使用方法、局限性及维护保养要求，并确保其处于完好状态。严禁使用过期或损坏的个人防护装备。

### 8.4 作业安全规定

- 8.4.1 作业人员应严格遵守本单位制定的安全生产规章制度和操作规程。
- 8.4.2 作业前，应对作业环境、设备设施、安全防护装置、监测报警系统及应急设备进行检查，确认安全条件满足要求后方可开始作业。
- 8.4.3 在氢气浓度可能超标的区域作业时，应执行作业许可制度，并采取强制通风、连续监测等措施。
- 8.4.4 严禁在氢能作业场所吸烟、使用明火或进行可能产生火花的作业（如需动火作业，应严格执行动火作业许可制度）。
- 8.4.5 严禁携带火种、非防爆通讯工具、易产生静电的物品进入防爆区域。应采取有效的防静电措施。
- 8.4.6 作业过程中应密切关注氢气泄漏监测报警系统及其他安全仪表的状态，发现异常情况应立即停

止作业，并按应急预案处置。

8.4.7 作业人员应熟悉作业区域的紧急疏散通道、安全出口及应急设施（如洗眼器、紧急淋浴装置、消防器材）的位置和使用方法。

8.4.8 不应单独一人在存在高浓度氢气泄漏风险或密闭/半密闭空间内进行作业，应设监护人员。

8.4.9 作业人员有权拒绝违章指挥和强令冒险作业，发现直接危及人身安全的紧急情况时，有权停止作业或者在采取可能的应急措施后撤离作业场所。

8.4.10 作业结束后，应清理现场，关闭相关阀门和设备，并做好交接班记录。

## 8.5 应急处置能力

8.5.1 作业人员应熟悉本岗位的应急处置方案和专项应急预案。

8.5.2 作业人员应能正确识别各类安全报警信号（声、光等）。

8.5.3 发生氢气泄漏或其他紧急情况时，作业人员应能迅速、准确地判断情况，并按规定程序进行初期处置（如切断气源、报警、疏散等）。

8.5.4 作业人员应掌握基本的急救知识，特别是针对氢气可能造成的冻伤、窒息等伤害的初步处理方法。

8.5.5 作业人员应积极参加应急演练，熟练掌握应急处置流程和应急器材的使用。

## 9 应急管理要求

### 9.1 应急预案

9.1.1 应根据风险评估结果，制定氢能储运事故专项应急预案和现场处置方案。

9.1.2 应急预案应涵盖氢气泄漏、火灾、爆炸、中毒、设备故障等各类可能发生的事故情景。

9.1.3 预案内容应明确应急组织体系及职责、预警机制、信息报告与发布、应急响应程序、应急处置措施（如紧急切断、隔离、通风、灭火、疏散、医疗救护等）、应急资源保障、事故调查与恢复等。

9.1.4 应急预案应定期评审和修订，确保其时效性和可操作性。

### 9.2 应急组织与职责

9.2.1 应建立健全应急指挥机构，明确各层级、各部门、各岗位的应急职责和权限。

9.2.2 应组建专业的应急救援队伍或指定兼职应急人员，并明确其训练要求。

### 9.3 应急响应

9.3.1 应建立快速、有效的事故报告机制，确保事故信息能及时、准确地传递至相关部门和人员。

9.3.2 应根据预案，及时启动应急响应，采取初期处置措施，控制事故发展。

9.3.3 现场应急指挥应明确，统一协调各方力量进行事故处置。

9.3.4 应与当地政府应急部门、消防、医疗等外部救援力量建立联动机制。

### 9.4 应急资源

9.4.1 应配备满足应急预案要求的应急装备、器材和物资，并定期检查、维护，确保其完好有效。

9.4.2 应保障应急通信畅通，配备必要的通信设备。

### 9.5 应急演练

9.5.1 应制定年度应急演练计划，定期（如每年至少一次）组织开展应急演练。

9.5.2 演练类型可包括桌面演练、专项演练、综合演练等。

9.5.3 演练后应及时进行总结评估，发现问题并改进预案和响应能力。

### 9.6 事故调查与评估

9.6.1 事故发生后，应及时组织开展事故调查，查明事故原因，总结经验教训。

9.6.2 应对事故造成的损失进行评估，并采取措施防止类似事故再次发生。