

氢溯科技



# 国内外氢气排放 监测及测量 进展研究

---

**RESEARCH PROGRESS ON  
DOMESTIC AND INTERNATIONAL  
HYDROGEN EMISSION MONITORING  
AND MEASUREMENT**

2025.12



## 作者：

肖晨江 氢溯科技(上海)有限公司

樊 祎 氢溯科技(上海)有限公司

赵 东 氢溯科技(上海)有限公司

冉 泽 美国环保协会北京代表处

李蕴洁 美国环保协会北京代表处

# 目录

---

引言 .....	2
<b>一、氢气的安全挑战与温室效应分析 .....</b>	<b>4</b>
(一) 氢能潜在安全风险分析 .....	5
(二) 氢气间接温室效应分析 .....	5
(三) 基于安全和气候视角下氢气监测的区别 .....	6
(四) 建立监测测量体系的重要性 .....	6
<b>二、氢气排放监测标准法规体系对比分析 .....</b>	<b>7</b>
(一) 国际氢气排放监测标准与政策 .....	8
(二) 中国氢气排放监测标准 .....	9
(三) 国内外标准与政策对比分析 .....	10
<b>三、典型场景氢气排放监测技术路线评估 .....</b>	<b>11</b>
(一) 氢气泄漏监测技术原理与分类 .....	12
(二) 不同应用场景的技术路线选择与评估 .....	14
<b>四、技术发展趋势与挑战 .....</b>	<b>17</b>
(一) 当前面临的主要挑战 .....	18
(二) 技术发展趋势 .....	18
(三) 对策与发展建议 .....	19

# 引言



在全球能源结构加速向清洁低碳转型的背景下，氢能作为实现“双碳”目标的关键载体，正逐步成为新一代能源体系的重要组成部分。然而，氢气因其独特的物化性质，如易燃易爆、易扩散、易引发氢脆等，在制取、储存、运输和使用全链条中均存在显著安全风险。更值得注意的是，氢气本身也是一种间接温室气体，其全球变暖潜能值（GWP）在20年尺度内约为二氧化碳的37倍，在100年尺度内约为二氧化碳的12倍，源自泄漏和运行相关的排放将对气候系统产生不可忽视的影响。因此，构建精准、可靠且全覆盖的氢气排放监测体系，已成为保障氢能产业安全运行、提升环境合规性、实现全链条碳追踪的迫切需求。

目前，国内外已在泄漏检测技术研发、标准法规建设等方面取得一系列进展，涵盖从催化燃烧、电化学到激光光谱等多种技术路线，并逐步形成针对制氢、储运、加注等典型场景的监测方案。然而，行业仍面临传感器精度不足、标准体系不完善、量化方法欠缺等挑战。本研究旨在系统梳理国内外氢气排放监测的技术发展与标准现状，对比分析不同技术路线的适用性与发展趋势，以及为中国氢能行业监测能力的提升和国际对标提供参考。



氢气的全球变暖潜能值（GWP）在  
20年尺度内约为二氧化碳的37倍，  
在100年尺度内约为12倍。

# 氢气的安全挑战 与温室效应分析



1

## (一) 氢能潜在安全风险分析

### 1. 易燃易爆性

氢气具有较宽的爆炸极限范围，在空气中为4%-75%，同时，最低点火能量极低仅0.017 mJ，较小的静电火花就可能引燃泄漏的氢气。与汽油相比，氢气更容易形成爆炸性气氛，且火焰传播速度快，爆燃威力大，对人员和设施构成严重威胁。

### 2. 高泄漏性与扩散性

氢气是最小的分子，密度极低仅为空气的1/14，因此其渗透性和扩散能力极强。它能够轻易穿过许多金属材料中微小的孔隙、密封不良的接口甚至聚合物材料分子间隙。这种特性使得氢泄漏在不知不觉中发生的概率远高于其他常见燃气，且泄漏后迅速向各个方向扩散，在封闭或半封闭空间（如机房、车库）顶部极易积聚，形成爆炸气云。

### 3. 氢脆现象

在一定压力和温度条件下，氢原子会渗入金属材料内部，与金属原子发生相互作用，导致材料的塑性和韧性下降，发生脆化，从而在低于材料屈服强度的应力下产生裂纹甚至失效。氢脆是一个缓慢的、累积性的过程，会显著降低储氢容器、管道及阀门的机械强度和疲劳寿命，可能引发突发性的毁灭性破裂和泄漏事故，是氢能储运环节中一个长期且隐蔽的重大安全隐患。

## (二) 氢气间接温室效应分析

尽管氢气本身不是《京都议定书》规定的温室气体，但其大量直接排放到大气中，会通过一系列复杂的化学反应对全球气候产生显著的间接变暖效应，主要体现在延长大气中甲烷的寿命、促进对流层臭氧和平流层水蒸气的生成。

### 1. 延长甲烷寿命

氢气会与大气中的羟基自由基( $\cdot\text{OH}$ )发生反应，而 $\cdot\text{OH}$ 是大气中最重要和最活跃的氧化剂，能够清除甲烷。排放到大气中的氢气与 $\cdot\text{OH}$ 反应会削弱 $\cdot\text{OH}$ 清除甲烷的能力，导致甲烷——一种强效温室气体——在大气中的存留时间延长，带来潜在的增温效应。

### 2. 促进对流层臭氧生成

氢气与 $\cdot\text{OH}$ 反应的产物氢原子(H)会参与一系列光化学反应，最终在对流层中促进臭氧的生成。对流层臭氧是一种强效的温室气体和有害的空气污染物。

### 3. 促进平流层水蒸气生产

此外， $\text{H}_2$ 与 $\cdot\text{OH}$ 的反应也会产生 $\text{H}_2\text{O}$ ，在平流层中，水蒸气也是一种重要的温室气体。

根据政府间气候变化专门委员会IPCC第五次评估报告（AR5）的评估，氢气的全球变暖潜能值（GWP）约为5.8。而根据最新的研究<sup>1</sup>表明，氢气在20年尺度的全球增温潜势约为二氧化碳的37倍，100年尺度下仍达12倍。因此，在规模化发展氢能的过程中，必须对从生产、储运到应用的整个链条的氢气排放进行严格管控和精准量化，否则其气候效益将大打折扣。

### （三）基于安全和气候视角下氢气监测的区别

在氢气排放监测领域，基于安全与气候视角的监测源于两种截然不同的关切。氢安全视角的核心在于预防灾害，它重点关注设备密封点等处的逸散排放（或称为无意排放），因其可能在局部空间积聚，引发燃烧或爆炸的直接风险。而气候视角的监测则着眼于评估氢能产业链的潜在温室效应，它需要量化包括逸散排放和工艺排放（由技术和工艺原因的氢气释放）在内的所有进入大气的氢分子，因为即便是微小的、分布式的泄漏，其累积总量也会对全球气候产生间接的增温影响。

### （四）建立监测测量体系的重要性

鉴于上述安全与环境挑战，建立全面、精准、可靠的氢气排放监测测量体系非常重要：

#### 1. 保障生命与财产安全

一套部署合理、响应迅速的泄漏监测系统是氢能设施的“哨兵”，能够在氢气浓度达到危险水平前发出预警，并联动通风、切断等安全联锁系统，第一时间消除险情，是预防火灾爆炸事故、保障人员与设施安全不可或缺的技术手段。

#### 2. 支撑产业规模化与商业化发展

安全是产业发展的生命线。只有建立了得到广泛认可和信任的安全标准与监测规范，公众和社会才能接受氢能技术的广泛部署。可靠的监测技术是制定这些标准规范的数据基础，为工程设计、风险评估和保险定价提供依据，从而降低整个产业的系统性风险，助推其走向规模化与商业化。

#### 3. 准确评估氢能全生命周期气候效益

要实现发展氢能的降碳初衷，就必须精确核算其“从摇篮到坟墓”的碳足迹。这其中，上下游各个环节的氢气逃逸排放是不可忽视的部分。建立标准化、高精度的排放测量体系，是量化其气候影响、确保氢能是真正“清洁氢”的核心环节，对于国际贸易中的氢产品认证等政策至关重要。

---

<sup>1</sup> <https://www.nature.com/articles/s43247-023-00857-8>

# 氢气排放监测标准 法规体系对比分析



2

## （一）国际氢气排放监测标准与政策

在国际层面，氢气安全监测标准已形成较为成熟和系统的架构，其核心特征在于强调“性能导向”和“基于风险”的管理理念。以国际标准化组织（ISO）和国际电工委员会（IEC）为主导，辅以区域和国家标准，构成了全球通用的技术基准。而在气候导向性上，国际领先的标准与政策体系已经展现出前瞻性，部分国家和地区已经开始关注氢气的间接增温影响，并计划将其纳入温室气体评估体系。

### 1. 氢气安全检测标准

#### （1）国际标准化组织（ISO）

ISO 19880-1《气态氢-加氢站-第1部分：一般要求》标准除了规定探测器的具体安装数量和位置，更侧重于规定系统的最终安全目标性能，如报警响应时间、覆盖范围的有效性等，要求设计方通过定量风险分析（QRA）来确定最优的监测方案。

#### （2）国际电工委员会（IEC）

- IEC 60079系列标准

对在爆炸性环境中使用的设备（如氢气探测器）提出了统一的防爆安全要求，氢气被划分为要求最严格的IIC T1组，这直接决定了探测器的制造标准和选型依据。

- IEC 62282系列标准

聚焦燃料电池技术相关的电气安全和性能要求，其中涉及氢气泄漏监测的部分，主要从电气设备与氢气环境的兼容性角度出发，规定了设备在氢气泄漏情况下的防爆、防火等安全性能指标。例如，对电气设备的外壳防护等级、内部电路的绝缘性能等提出了详细要求，防止因电气故障引发氢气燃烧或爆炸。

#### （3）美国

- 美国国家消防协会（NFPA）

美国国家消防协会（NFPA）发布的NFPA 2 Hydrogen Technologies标准，主要针对氢气设施的消防安全和运营安全，该标准并非强制性标准，除非被联邦、州或地方当局正式采纳。在加氢站的泄漏监测方面，标准要求安装多技术融合监测系统，如催化燃烧传感器与红外光谱仪的组合。该标准还明确了不同场景的报警阈值。在开放区域，氢气浓度达4%，爆炸下限（Lower Explosive Limit）时报警，因为开放区域通风条件相对较好，但一旦氢气浓度达到一定程度，仍存在爆炸风险；在封闭空间，报警阈值设定为0.5% LEL，由于封闭空间内氢气不易扩散，较低的浓度就可能引发严重事故，所以需要更严格的监测和报警机制。

- 美国机械工程师协会（ASME）

美国机械工程师协会（ASME）制定的ASME BPVC Section VIII规范在高压储氢容器的设计、制造和检测方面具有权威性。该规范规定高压储氢容器泄漏率 $\leq 1 \times 10^{-9} \text{mbar} \times \text{L/s}$ ，这一极低的泄漏率要求，体

现了对高压储氢容器密封性的极高标准。为了满足这一标准，在容器的材料选择上，通常采用高强度、抗氢脆的特殊钢材；在制造工艺上，严格控制焊接质量和加工精度，确保容器的整体密封性。

## 2. 氢气气候导向政策与标准

### (1) 欧盟

2024年5月欧洲理事会通过了“氢气和脱碳气体市场一揽子立法”（Hydrogen and Decarbonized Gas Market Package），旨在推动欧盟天然气系统转向低碳和可再生气体，实现欧盟的去碳化目标。值得关注的是，新立法进一步明确了低碳气体（包括低碳氢）的定义，以及温室气体排放阈值，并首次明确承认了氢气排放的风险以及气候影响，这将对未来欧盟的氢气市场产生重要影响。其中提出：

氢气网络、储存和终端运营商应采取措施，防止并尽量减少其运营过程中的氢气排放，并定期对运营商负责的所有相关部件进行氢气泄漏检测和维修调查。欧盟委员会也需要向欧洲议会和理事会提交一份报告，评估氢气泄漏的环境和气候风险、技术特性以及最大氢泄漏率。在此基础上，欧盟委员会还应酌情提交一份立法提案，引入措施最大限度地降低氢泄漏的可能风险、设定最大氢泄漏率并建立合规机制。此外这些措施也应当纳入“低碳气体温室气体减排量评估方法”中。

### (2) 英国

2022年4月，英国发布了低碳氢标准（Low Carbon Hydrogen Standard），并于2023年12月发布的低碳氢标准第三版中为氢气生产的温室气体排放量设定了阈值，并规定了计算氢气温室气体排放量的方法，以及生产商为证明其生产的氢气符合标准而应采取的步骤。此外，该标准中也提出应尽量减少氢气生产设施（包括现场氢气储存期间）向大气中排放氢气，避免造成间接的温室效应。根据英国低碳氢标准，虽然氢气逃逸性排放目前无需纳入温室气体排放强度计算方法中，但运营方应在氢气生产设施投入运行前完成一份逸散性氢气排放风险降低计划，说明如何最大限度地减少氢气生产设施的氢气排放，提供氢气排放的预期估计值，监测运行过程中的氢气排放，并每年提供一份《氢气逸散性排放年度报告》，未完成该逸散性氢气排放风险降低计划的运营商将无法满足本标准的要求。

## (二) 中国氢气排放监测标准

中国在氢气排放监测方面，制定了一系列符合本国国情和产业发展需求的国家标准，主要聚焦于安全防控这一基本诉求。对于氢气作为一种间接温室气体的属性，以及由此产生的排放量化、系统性报告与第三方核查的方法学标准，目前还尚未建立。中国现有的企业温室气体排放核算与报告指南主要针对二氧化碳、甲烷等传统温室气体，并未将氢气纳入其中。

### 1. GB/T 29729-2022《氢系统安全的基本要求》

这是一项基础性、通用性的国家标准。它不针对某一特定设备或场所，而是为所有涉及氢气处理、储存和使用的“氢系统”提供了最基本的安全管理框架。可以理解为是中国氢能安全领域的“宪法”。适用

于所有类型的固定式氢系统，包括生产、储存、压缩、输送、使用等各个环节。虽然燃料电池汽车的车载系统也可参考其基本原则，但具体细节更多由专门的车辆标准规定。标准强调在设计阶段必须进行风险评估，识别潜在的泄漏源和危险场景，并以此为依据制定相应的安全措施，包括泄漏监测系统的设置。要求在可能发生氢气泄漏和积聚的场所，必须安装氢气泄漏检测报警系统。该系统应能及时发出报警，并具备联锁控制功能（如自动启动事故通风、切断气源等）。同时，对氢气放空系统（如泄压管）的安全设计提出了要求，包括出口位置、高度、扩散计算等，以确保排放的氢气能安全扩散，而非规定一个具体的“残氢排放浓度”限值。

## 2. GB 50516《加氢站技术规范》

这是一项强制性工程建设技术规范，专门针对加氢站（包括合建站）的规划、设计、施工和验收。其法律效力高于推荐性标准（GB/T），是加氢站建设必须遵守的底线要求。涵盖了加氢站的站址选择、总平面布置、工艺系统、设备配置、电气安全、消防设施等全方位技术要求。标准明确规定加氢站内“必须设置氢气泄漏检测报警系统”。并要求探测器应设置在氢气最易泄漏和积聚的部位。

### （三）国内外标准与政策对比分析

在全球范围内，氢气排放的管控策略正在经历深刻变革，呈现出从仅关注安全问题，逐步向兼顾安全与气候风险的演进趋势。这一趋势在不同国家和地区表现出明显的阶段性特征。目前，仅有少数国家和地区开始从气候角度将氢气排放纳入监管体系，而大多数国家仍将政策焦点集中于传统的安全风险管控。

欧盟和英国已经关注到了氢气的气候影响问题，逐步将气候纳入整体的监管框架。欧盟通过立法明确要求运营商减少氢气排放并定期开展泄漏检测与维修，同时欧盟委员会正致力于评估氢气泄漏的环境和气候风险并建立最大氢泄漏率等合规机制。英国则在其标准中建立了具体的排放报告制度，强制要求生产商提交“氢气逸散性排放年度报告”。这些举措标志着对氢气的环境管理正从原则性要求，向可监测、可报告的实际操作规范迈进。

相比之下，包括中国在内的世界其他主要国家的政策与标准仍普遍侧重于安全维度的管控。中国标准体系目前主要聚焦于安全防控，建立了系统的规定性安全标准体系，形成了覆盖氢能全产业链的安全管控网络。美国则以国家安全消防协会的安全规范为核心，监测重点集中于防爆领域，呈现出分散式监管特点。虽然普遍采纳NFPA 2 Hydrogen Technologies等技术标准，但缺乏全国统一的泄漏管控框架。值得注意的是，美国的氢能枢纽项目已开始要求将输配过程中的全部排放纳入生命周期评估，并要求氢能枢纽安装传感器对氢气损失进行监测，显示出气候维度管控的初步尝试。

# 典型场景氢气排放 监测技术路线评估



3

氢能产业链条长、应用场景复杂，不同环节的工艺条件、风险特征和监测需求存在显著差异。因此，需根据具体场景的特点选择最优的监测技术路线。

## （一）氢气泄漏监测技术原理与分类

### 1. LEL级检测技术

#### （1）催化燃烧（CAT）式

催化燃烧式传感器是历史最悠久、应用最广泛的技术之一。其工作原理是利用铂、钯等贵金属催化剂，使氢气在 300-400°C 的催化元件表面发生无焰燃烧，释放的热量导致催化元件电阻变化，通过与补偿元件的信号对比，输出与氢气浓度成比例的电信号，实现 0-100%LEL（对应氢气浓度 0-4% VOL）的全量程检测。该技术的优势在于响应速度快、本质安全，且输出信号强、线性度好，能精准匹配工业安全预警的实时性需求，同时成本相对较低，适合规模化部署。但局限性也较为明显，催化元件需依赖氧气环境工作，易受硫化物、硅化合物等杂质中毒，导致催化效率衰减，且高温工作状态下存在潜在点燃风险，需通过限能设计规避，长期使用后需定期校准以维持精度。因此，催化燃烧传感器主要适用于需要监测爆炸下限浓度级别的安全报警场合，如加氢站、储氢罐区等易燃易爆场景，成为工业氢气泄漏快速预警的首选技术。

#### （2）传统半导体式传感器

传统半导体式氢气传感器以氧化锡等金属氧化物为敏感材料，利用氢气分子吸附于材料表面后引起的电导率变化实现浓度检测，检测范围覆盖 0-100%LEL 至 0-10%VOL，适用于中低精度的安全级监测场景。其核心优势集中在成本低廉、体积小且制备工艺成熟，便于规模化生产和民用化普及，同时结构简单、无复杂光路或电路设计，维护成本较低。但技术局限性显著，温湿度波动会直接影响材料表面活性，导致基线漂移和检测误差，且易受硅氧烷等污染物侵蚀，长期稳定性较差，连续使用后需频繁校准；此外，传感器对一氧化碳、硫化氢等气体存在交叉敏感，在复杂工业环境中误报率相对较高。该技术目前主要应用于民用氢能设备监测领域，如家用氢气报警器、实验室简易安全监测等场景，虽性能不及催化燃烧式传感器，但通过定期维护可满足基础安全预警需求。

#### （3）超声波检测式

超声波检测技术独辟蹊径，它不直接检测气体浓度，而是通过捕捉氢气泄漏时产生的 25-100kHz 高频超声波信号，结合声学特性与气体物理性质的关联捕捉高压氢气泄漏时产生的高频声波信号实现泄漏监测。其优势在于非接触式检测，无需与被测介质直接接触，能够在距离泄漏点数米范围内探测快速对泄漏点进行精准定位。同时抗干扰能力强，不受风向和气体扩散模型的干扰，通过滤波电路和算法抑制环境低频噪声，能检测低至 0.01mm 孔径的微小泄漏（1bar 压力下）。但局限性同样突出，其检测依赖气体泄漏时的湍流振动，需一定压力差（通常  $\geq 1\text{Bar}$ ）才能产生足够强度的超声波，低压场景下灵敏度显著下降。虽新型技术实现量化，但精度仍低于电化学、红外等技术，且在强噪声工业环境中需搭配耳机监听或声学成像辅助，否则可能遗漏微弱泄漏信号。因此，它适配高温、高压、腐蚀性等危险环境，适合工业复杂场景的快速巡检。通常作为其他检测技术的有效补充，用于泄漏点确认。

## 2. ppm-ppb级检测技术

### (1) 电化学(EC)式

电化学技术基于氢气在电极表面的氧化还原反应实现低浓度量化检测，氢气分子扩散至工作电极后发生氧化反应释放氢离子与电子，氢离子通过电解质迁移至对电极，电子经外电路形成稳定电流，电流大小与氢气浓度呈线性关系。

该技术的核心优势是灵敏度高，选择性强，通过电极材料优化可实现对氢气的专一响应，且低功耗、体积小，适合便携式设备与在线监测系统集成。但其短板在于寿命与环境适应性，传统液态电解质传感器寿命仅1-2年，需定期更换电解液，且工作电极的贵金属催化剂易受NO、NO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>等气体交叉响应，导致测量误差；新型固态电解质将寿命延长至3-5年，但其性能易受环境温湿度变化的影响，高温(>80°C) 高湿(>95% RH) 环境下精度衰减超过20%，同时成本也略高于传统型号。这使得它成为巡检和微量泄漏检测的理想选择。

### (2) 红外(IR)吸收式

在高端应用领域，红外吸收技术，特别是可调谐二极管激光吸收光谱技术(TDLAS)表现出卓越的性能。TDLAS利用氢气在2.1μm波长附近的特征吸收峰，通过光强衰减计算浓度，从而实现定量分析。该技术的优势显著，具有高精度、高选择性、响应速度快、长期稳定性好、抗电磁干扰能力强，且支持开放光路长距离监测，无需与气体直接接触等诸多优点；但其高昂的成本是目前制约其大规模部署的主要因素。该技术已在环境排放监测、工业氢纯度分析等领域规模化应用，未来将向多组分同时检测与智能化校准方向发展，以应对复杂场景的干扰问题。

### (3) 光纤传感式

光纤传感技术是一种新兴的监测手段。它将对氢气敏感的特殊材料涂覆在光纤上，当氢气浓度变化时，会导致光信号的强度、波长或相位等参数发生改变。其核心优势在于本质安全(无电火花风险)、抗电磁干扰能力极强，适配高压、强电磁辐射等极端环境；同时支持长距离分布式布设，单根光纤可覆盖数十公里，且通过温度补偿算法易实现精度校准。该技术尚未完全成熟，响应速度整体偏慢，仅在低温高湿环境中能获得较短响应时间，且长期稳定性及使用寿命较低；同时传感器制造工艺复杂，需专业设备解调光信号，成本较高，限制了大规模商业应用。

## 3. 排放溯源及量化方法

以上检测技术可以用于测量环境中的氢气浓度，但如果要量化具体点位的氢气排放量，还需要和量化方法共同使用。

### (1) 示踪气体法

示踪气体法是一种用于量化区域或场站级别氢气排放总量的大气测量技术。其原理是在目标排放区域内，以已知速率释放一种物理扩散特性与氢气相似的示踪气体。同时在下风向使用高精度、快速响应的

分析仪同步测量示踪气体与氢气的浓度。基于质量平衡假设，目标氢气的总排放速率可通过其与示踪气体的浓度比值以及已知示踪剂的释放速率计算得出。该方法的优势在于其无需精确建模即可获得高精度的量化结果。然而，其应用也面临挑战，包括操作复杂且成本高昂，需要现场部署示踪剂释放装置并确保其与目标源充分扩散，这通常要求获得场地准入许可，因此难以适用于大范围、多源头的快速筛查场景。

## (2) 贝叶斯羽流模型反演法

贝叶斯羽流模型反演法是一种基于物理模型的间接测量方法，其原理是将下风向测得的气体浓度与高斯扩散模型的预测值进行比对，并利用贝叶斯定理反演最可能的排放源强。该方法的优势在于其可扩展性和灵活性，无需现场示踪剂即可对难以进入的场地进行远程评估，经济性更佳。但其主要局限性在于量化结果的准确性严重依赖于所选扩散模型对实际复杂地形和大气条件的适用性，模型参数的误差会直接传导至源强估计中，导致其不确定性通常高于示踪气体法，更适用于大范围排放筛查和趋势分析。

## (3) 全流量采样系统

全流量采样系统 (Full-Flow Sampling) 是一种高精度的直接测量系统，该系统能够将泄漏源释放的全部气体与大量稀释空气一同吸入采样管并混合，再利用高精度的检测技术测量气流中的排放气体浓度，并结合质量流量数据直接计算出泄漏源的排放率。该方法的关键优势在于其能够捕获全部泄漏物质，避免了因局部取样带来的误差，因此具有很高的准确度。该方法在甲烷排放量量化领域已广泛使用，未来也可应用于氢气排放量化。

## (4) 便携式排放测量系统

便携式排放测量系统 (Portable Emissions Measurement System) 主要应用于移动源排放测量，如汽车的尾气排放。PEMS系统将气体分析仪、排气流量计和GPS数据集成在一个便携式平台上，实现在车辆实际道路行驶过程中对其尾气进行实时、在线的测量。该系统目前已广泛应用于汽车尾气排放的测量和监管，若结合更加先进的气体分析仪，未来也能够应用于氢燃料电池汽车尾气中氢气排放的量化。

# (二) 不同应用场景的技术路线选择与评估

## 1. 场景一：氢能制取

氢能制取是氢能链条的源头，也是潜在排放量集中的环节。在氢能制取场景，如电解水制氢厂或重整制氢工厂中，核心风险主要集中在电解槽、纯化单元以及大量的管道阀门和法兰连接处。针对这一场景，在安全监测层面，工厂需要构建一个多层次的防护体系。推荐采用“固定式监测+便携巡检+专项排查”的多层次技术路线。首先，在装置区如压缩机房、电解槽阵列等密闭或半密闭工艺区，需密集布设固定式催化燃烧式探测器，确保在氢气浓度接近爆炸下限的25%时发出警报。在通风不畅或设备密集的关键点位，则补充布置电化学传感器，利用其更高的灵敏度发现ppm级的微小泄漏，实现对微量泄漏的早期预警。其次，操作人员应配备便携式电化学或半导体检测仪进行日常巡检，对固定探测器无法覆盖的盲区进行定期巡检与泄漏确认。此外，定期使用红外热成像仪对关键区域进行扫描，可以高效、直观地发现

隐蔽泄漏点。这一组合方案兼顾了经济性和有效性，既能满足日常安全监控的基本需求，又能通过先进手段进行预防性维护。

在气候角度的监测方面，制氢工厂是履行温室气体排放核算义务和评估产品碳足迹的核心。为实现对排放总量的量化，可在厂界四周布设开路式可调谐二极管激光吸收光谱系统。该系统能实时测量穿越厂区的整条路径上氢气的平均浓度，结合气象站数据，通过逆模型算法反演出整个厂区的小时级或日级氢气排放通量。此外，在工艺区下风向安装高精度的点式TDLAS分析仪，可以持续监测本底浓度和峰值浓度，为溯源分析提供数据支撑。

## 2. 场景二：储运

在氢气储运场景，包括长管拖车、输氢管道及储氢罐，其特点是空间范围大、泄漏点不确定，且设备处于动态或长期承压状态。主要风险来自装卸接口、管道焊缝损伤或第三方施工破坏。对此，安全监测技术在此场景下需兼顾固定与移动。对于大型固定储氢罐区，布设固定式探测器是基本要求。而对于长达数百公里的输氢管道，分布式光纤传感系统展现出巨大优势，将整条管线转化为一个可实时感知和定位泄漏的连续传感器。同时，利用无人机搭载轻型传感器进行定期巡线，灵活应对复杂地形。对于长管拖车等移动运输工具，其监测依赖于车辆自身集成的紧凑型传感器以及在场站进行装卸作业时，由场站提供的固定探测器进行防护。

气候角度监测的挑战在于如何有效发现和量化分散式、间歇性的泄漏和排空。技术路线正从传统的被动响应转向主动巡检。通过搭载高灵敏度的电化学或光声光谱传感器，无人机可按照预设航线对管道沿线、储罐区进行大规模、高效率的定期巡查，生成浓度分布云图，快速锁定疑似泄漏点。一旦发现异常，可立即派遣地面巡检人员使用手持式TDLAS检测仪进行现场精确定量和核查。这种“空中巡检-地面核实”的模式，极大地提升了环境监测的覆盖范围和效率。此外，储运过程中存在排空等操作，可能导致短时间出现大量排放，可通过流量测量或热力学建模等替代方法进行定量分析。

## 3. 场景三：加注与使用

在加注与使用场景，以加氢站为代表，安全要求最为严格和直接。风险高度集中于加氢机、压缩机、储氢罐和阀门等高压部件。该场景安全监测是此场景的重中之重，技术路线强调“高密度、高可靠性、快速联动”。由于氢气扩散很快，需要在所有关键点位密集布设传感器，确保无监测盲区。催化燃烧式探测器因其技术成熟和成本可控，被广泛用于站区的整体环境监测。而在密封的压缩机柜、加氢机内部等关键空间，则需集成更耐用的MOS半导体传感器或微型化TDLAS模块，形成局部高密度监测。所有探测器都须与紧急切断系统、通风系统实现毫秒级的连接，确保安全。

对于气候角度的监测，可在加氢站的下风向边界处安装高精度的在线监测仪，用于持续评估站区对周边环境的微量排放影响，并为研究加氢站的实际排放因子积累数据。此外，加氢站也可能存在大量的排空氢气，可用前述方式进行量化。

#### 4. 场景四：氢燃料电池系统

对于氢燃料电池系统（如车辆、发电设备），在安全监测方面其监测方案需重点聚焦高压储氢罐与燃料电池电堆两大核心部件。该场景空间紧凑、振动频繁，对传感器的体积、耐振性及功耗要求极为苛刻。在储氢罐舱、电堆舱等密闭空间内，通常高密度布设微型化、耐振动的催化燃烧或半导体传感器，以实现 $\%LEL$ 级氢浓度的快速响应和安全联锁，保障基本安全。为进一步监控电堆的微量“跨膜渗透”或密封泄漏，以及量化“吹扫排放”，可辅以微型电化学传感器或新兴的MEMS-TDLAS模块，实现对ppm级浓度的精确感知。最终，通过集成化数据处理单元，对多传感器信号进行融合分析，可实现从异常泄漏报警到预测性维护的智能升级。

在气候角度监测方面，燃料电池汽车的尾气中可能含有排放的氢气，可以考虑在停车场或维修车间内布设固定式传感器，用于收集车辆在静置和启动时的累积排放数据。此外，可考虑定期（如每月或每季度）采用便携式排放测量系统（PEMS）测量车辆尾气排放。而对于固定式发电系统，则可参考制氢工厂的模式，在通风口或厂界进行持续监测，以评估其运行过程中的全周期排放水平。

#### 5. 氢气全价值链排放测量实践

为填补氢能全价值链排放实测方面的研究空白，美国环保协会（Environmental Defense Fund, EDF）于2025年初主导开展了一项氢气排放的实测研究。该研究聚焦于实地测量氢能基础设施在实际运行过程中的排放情况，覆盖整个氢能价值链的各个环节。测量对象涵盖蒸汽甲烷重整装置、管道系统、压缩机、液化设施、炼油厂、加氢站、氢燃料汽车等各类氢能相关基础设施。

该研究与多个知名企业、学术机构合作开展。空气化工产品公司、法国液化空气集团、壳牌公司和道达尔能源等全球领先的能源化工企业为该实地研究开放了氢能运营设施；美国环保协会与乌得勒支大学、罗德岛大学、康奈尔大学和西弗吉尼亚大学组建的科研团队将共同开展实地测量与数据分析，确保研究的科学性和准确性。

此外，全球知名大气科学仪器公司Aerodyne Research为本研究提供了其最新研发的氢气传感器，可在5秒内实现5ppb级别的测量精度。借助该传感器，研究能够实现氢气排放的高精度测量，为该研究最终获得准确、详实的实测数据奠定了坚实基础。该实地测量将持续开展至2026年初，项目完成后，所有实测数据将被汇总分析，研究成果将公开发布。

# 技术发展趋势 与挑战



4

## （一）当前面临的主要挑战

### 1. 技术层

技术层面核心挑战在于如何突破传感器技术的瓶颈，实现低成本、高可靠性、长寿命传感元件的规模化制备。现有主流技术（如催化燃烧和电化学传感器）在精度、抗中毒性，或使用寿命上存在明显短板。目前主要面向安全风险，其检测下限通常在ppm至%LEL级别，无法有效捕捉对气候有影响的ppb级微量泄漏和工艺排放（如排空、吹扫），这导致大量不具备燃爆风险但对气候有潜在影响的排放被完全忽视。而能够实现ppb级高精度量化、满足气候排放监测需求的技术（如TDLAS）则价格昂贵、维护复杂，难以在全产业链大规模部署，这严重制约了对分布式、无组织排放的精准核算。同时，复杂环境下的可靠性也是一大难题，风雨、温差、振动等现场条件会显著影响传感器性能，尤其对户外管道等场景的长期稳定性提出更高要求。此外，排放量化与溯源技术本身尚不成熟，当前基于模型反演等技术的不确定性较大，难以实现对微小泄漏的有效定位和精确量化。对于已知的排放源，制定经济高效的减排策略也是一项难题，当前气体回收技术虽可行但尚未具备经济效益，需要技术持续进步才能提升其成本效益。

### 2. 标准与管理层面

在标准与管理层面，挑战主要体现在管理体系存在空白与滞后。中国现有监测标准体系尚不完善，现有标准绝大多数聚焦于防爆安全（%LEL级别），而针对氢气作为间接温室气体的排放监测方法学、报告与核查标准体系几乎空白，缺乏统一的监测布点、质量控制和排放因子计算指南，亟需建立完善的管理和标准体系，以促使氢能的发展更为可持续。

### 3. 行业层面

目前行业对氢能安全应用问题较为重视，但对于氢气全产业链排放及其对气候所带来的影响方面关注不足。除了所需的安全管理之外，几乎没有关于当前氢气泄漏率和风险的数据和监管。目前，全球范围内都缺乏对氢能全产业链各环节真实排放率的系统实测数据，这导致当前的生命周期评估大量使用理论值或完全忽视氢气排放，无法真实验证氢能项目的气候效益。

## (二) 技术发展趋势

面对挑战，技术正朝着融合化与网络化的方向发展，未来将形成“点-线-面-体”的立体监测网络：通过布设低成本传感器作为“点”进行区域安全预警，利用光纤传感覆盖管道“线”路，采用开路激光和无人机巡测扫描“面”积厂界，最终结合模型算法，融合多源数据形成一个三维的“体”系，实现泄漏源反演和通量计算。这一趋势也推动了监测目标的根本性演变，从“安全”迈向“安全与气候并重”，而能够准确量化排放量并快速溯源的技术方案，将成为下一代监测系统的核心竞争力。

同时，智能化与预测性维护已成为不可逆转的趋势。通过物联网平台汇聚传感器数据，并利用人工智能和机器学习算法，可以实现智能诊断以区分真实泄漏与环境干扰、大幅降低误报率，并能基于数据趋势进行预测性维护，在设备发生故障或泄漏前提前预警，变被动响应为主动防控。其次微型化与集成化是扩大应用场景的关键。MEMS技术有望显著降低TDLAS等先进技术的尺寸、功耗和成本，使其能够应用于燃料电池汽车等空间和功耗受限的场景。另外，新型传感原理不断涌现。基于纳米敏感材料、光声光谱、等离子体光学等新原理的传感器技术，有望在灵敏度、选择性和稳定性上实现阶跃式提升，为下一代监测技术奠定基础。

相应地，标准法规也在同步演进，国际标准正逐步引入对排放监测的要求，将氢气排放纳入全生命周期评估，如欧盟“氢气和脱碳气体市场一揽子立法”等政策，正逐步将氢气的气候影响纳入整体监管框架，建立最大氢泄漏率等合规机制，从监管角度推动监测技术发展。



监测目标正从单一的“安全”转向“安全与气候并重”，  
能够准确量化排放并快速溯源的技术方案，  
将成为下一代监测系统的核心竞争力。

### (三) 对策与发展建议

聚焦技术攻关，构建精准感知能力。应重点突破ppb级高精度、低成本氢气传感技术，加强基础传感技术研发，推动ppb级、高选择性、低功耗的氢气传感器产业化。大力发展移动监测与通量反演方法学，并推动物联网与人工智能技术融合，构建“感-知-控”一体化的智能监测生态系统。随着技术的发展，未来各个场景的氢气排放监测将出现更多的解决方案。

完善标准体系，筑牢排放数据根基。需加快制定覆盖氢气泄漏监测与排放计量的方法学标准，并积极参与CEN、ISO等国际标准化组织关于氢气监测方法的制定，推动国内标准与国际接轨互认，为全国温室气体排放精准核算与国际气候履约提供统一、可靠的数据基础。

加速示范推广，驱动产业生态成熟。通过在全产业链开展大规模技术示范，验证不同技术路线的经济性与可靠性。支持跨学科合作，促进光学、材料、气象、数据科学等多学科在氢气监测领域的融合。同时，利用财税、市场等政策工具激励企业主动减排，培育健康的产业生态，确保氢能真正发挥其气候效益。



通过技术攻关、标准完善与示范推广协同推进，构建精准感知、统一核算、可验证的氢气排放监测与治理体系，确保氢能真正发挥其气候效益。



氢溯科技



美国环保协会北京代表处

中国北京市东城区安定门东大街28号  
C501室, 100007  
+86-10-64097088  
[www.edf.org](http://www.edf.org) | [www.cet.net.cn](http://www.cet.net.cn)