

# 危险化学品储存区中的 H<sub>2</sub>S 气体检测报警系统研究

丁剑鹏（山东平侯安全技术有限公司，山东 枣庄 277100）

**摘要：**氢硫化氢是一种无色、极具毒性的气体，常在危险化学品储存区中释放，尤其是在石油和天然气的生产过程中。由于其低浓度就能造成严重健康风险甚至死亡，对 H<sub>2</sub>S 的检测与警报显得尤为重要。H<sub>2</sub>S 的物理化学特性使得其在工业环境中的检测面临特殊挑战，如环境条件的变化可能影响检测系统的稳定性和准确性。本文综合分析了 H<sub>2</sub>S 气体的理化特性及其毒性，设计了适应危险化学品储存区特定环境需求的 H<sub>2</sub>S 气体检测报警系统，并探讨了系统的组成、优化布局以及远程监控技术。

**关键词：**危险化学品；储存区；H<sub>2</sub>S 气体检测；报警系统

在危险化学品储存区域，氢硫化氢气体的存在不仅对操作人员的生命安全构成严重威胁，而且在泄露后可导致广泛的环境污染。氢硫化氢是一种彩色、易燃且极度有毒的气体，常在石油炼制和天然气处理等工业过程中生成，其毒性强度高到足以在短时间内致命。鉴于氢硫化氢在极低浓度下即可对人体健康构成威胁，并且由于其重于空气的特性，能在地面形成持久的危险区域，因此，在涉及其潜在释放的场所，实施有效的监测与警报系统是确保安全的核心。

## 1 H<sub>2</sub>S 气体及其危害概述

### 1.1 H<sub>2</sub>S 的理化特性

氢硫化氢是一种无色气体，具有强烈的臭鸡蛋气味，主要在石油、天然气以及其他含硫化合物的工业过程中产生，其理化特性对危险化学品储存区的安全性产生重要影响。H<sub>2</sub>S 的分子量为 34.08g/mol，密度为 1.539g/L（在标准条件下），相较于空气，其相对密度为 1.19，它在泄漏时容易沉积于地面或低洼处，增加了积聚危险。其熔点为 -85.5℃，沸点为 -60.3℃，在低温状态下能以液态形式存在。H<sub>2</sub>S 的水溶性为 4.5g/L（20℃），且在水中能够与水分子形成弱酸性溶液，释放硫化氢离子，腐蚀金属设备。氢硫化氢的易燃性和爆炸性也是其关键特征之一，H<sub>2</sub>S 的爆炸下限为 4.3%（体积比），爆炸上限为 46%（体积比），自燃点为 260℃，显著低于许多其他可燃性气体，表明在高温环境下其燃烧和爆炸风险极高。由于其在环境中的扩散性较弱，特别是在封闭环境或通风不良的储存区域，H<sub>2</sub>S 气体更易于聚集，增加了毒性和燃爆风险。氢硫化氢的毒性也极为显著，短期接触低至 10ppm 的浓度即可对人体产生不适反应，超过 100ppm 的浓度可能导致呼吸困难，而浓度达到 500ppm 时，在短时间内即可造成昏迷甚至死亡<sup>[1]</sup>。

### 1.2 H<sub>2</sub>S 气体的毒性

H<sub>2</sub>S 的毒性影响既可以是急性的，也可能是慢性的，取决于暴露的浓度和时间。实验研究和工业事故案例均显示，即使是极低的 H<sub>2</sub>S 浓度也有可能引起人体健康的严重危害。美国职业安全与健康管理委员会（OSHA）规定，H<sub>2</sub>S 的容许暴露限值（PEL）为 20ppm，而国际劳工组织（ILO）的建议暴露阈值为 5ppm。H<sub>2</sub>S 暴露的毒性效应在不同浓度下有显著差异，低浓度暴露（1–5ppm）可导致轻微的眼部刺激和上呼吸道症状，当浓度达到 50–100ppm 时，可以引起眼睛严重刺激、呼吸系统损伤及其他潜在的健康问题<sup>[2]</sup>。浓度在 100–500ppm 范围内，人体将遭受更严重的健康影响，包括剧烈头痛、眩晕、呼吸困难、甚至失去意识。高于 500ppm 的浓度，短时间内即可造成生命威胁，如肺水肿、神经系统损害，以及迅速死亡，表 1 详细列出了 H<sub>2</sub>S 不同浓度对人体健康影响的概览。

表 1 H<sub>2</sub>S 不同浓度对人体健康影响

H <sub>2</sub> S 浓度 (ppm)	健康影响
1–5	轻微眼部与喉咙刺激
5–10	眼部刺激、呼吸困难、可能有轻度神经系统影响
10–50	严重眼部刺激、呼吸系统损伤、头痛、额外神经系统影响
50–100	剧烈眼部和呼吸道刺激、剧烈头痛、眩晕
100–200	极端呼吸困难、肺水肿、潜在昏迷、长时间暴露可致死
200–500	迅速发展的肺水肿、神经系统损害、生命威胁、高风险致命
500 以上	立即危及生命的高浓度，包括迅速意识丧失和死亡

通过表 1 数据可以看出，即使是低浓度的 H<sub>2</sub>S 暴露也不可轻视，因此在设计 H<sub>2</sub>S 气体检测报警系统时，必须考虑到系统的灵敏度和响应速度，以确保在任何潜

在危险的早期阶段都能及时检测到 H<sub>2</sub>S 气体的存在，并采取必要的安全措施。

## 2 H<sub>2</sub>S 气体报警系统的设计与优化

### 2.1 报警系统的组成与基本原理

H<sub>2</sub>S 气体检测报警系统的设计是为了在危险化学品储存区实时监测氢硫化氢的浓度，并在达到预设的危险阈值时触发警报，从而实现对人员和设施的保护。该系统的核心组成部分包括：传感器模块、信号处理单元、警报发射器以及控制界面。传感器模块负责实时检测空气中的 H<sub>2</sub>S 浓度，并将检测到的气体浓度信号转换为电信号<sup>[3]</sup>；信号处理单元则对电信号进行放大和滤波，确保信号的清晰与准确，并进行数据解析以判断是否触发警报；警报发射器在识别到危险信号时，激活声音和光学警报系统，警告现场人员采取适当的安全措施；控制界面为操作人员提供一个用户友好的界面，用于系统的配置、监测数据显示及历史数据访问。表 2 展示了 H<sub>2</sub>S 气体检测报警系统各组成部分的功能及基本原理。

表 2 H<sub>2</sub>S 气体检测报警系统各组成部分的功能及基本原理

组件	功能描述	基本原理
传感器模块	检测空气中的 H <sub>2</sub> S 浓度	利用电化学或半导体技术响应 H <sub>2</sub> S 分子，转换为电信号
信号处理单元	对传感器信号进行放大和滤波	采用模拟或数字信号处理技术清晰和精确地解析信号
警报发射器	在检测到高于安全阈值的 H <sub>2</sub> S 浓度时发出声音和光学警报	使用集成电路触发声光报警设备
控制界面	提供系统设置和监测数据的用户接口	通过图形用户界面允许用户配置系统参数、查看实时数据

通过持续监测与即时响应，H<sub>2</sub>S 气体检测报警系统为危险化学品储存区提供了一个关键的安全保障措施<sup>[4]</sup>。

### 2.2 储存区环境下的系统布局优化

在设计 H<sub>2</sub>S 气体检测报警系统的布局优化中，关键考量因素包括传感器的有效覆盖范围、环境因素对传感器性能的影响以及系统的整体响应时间。有效布局设计应遵循气体传播和积聚的动力学原理，确保每个监测点都能反映其周围环境的真实气体浓度水平。传感器布点的优化可以通过以下公式进行计算：

$$N = \frac{A}{a \times S_{eff}} \quad (1)$$

其中，N 表示所需的传感器数量，A 是监控区域

的总面积 (m<sup>2</sup>)，a 是每个传感器的平均探测半径，S<sub>eff</sub> 是根据环境条件调整的有效面积系数，此系数考虑了由于环境复杂性（如障碍物的存在和气流的变化）引起的实际检测效率降低。为最小化系统响应时间 T，关键是优化信号传输路径和处理速度，其计算可以参考下式：

$$T = \frac{d}{v} + t_p \quad (2)$$

在该公式中，T 代表系统从检测到 H<sub>2</sub>S 到发出警报的总响应时间，d 是从最远的传感器到控制单元的最大距离 (m)，v 是信号传输速度 (m/s)，而 t<sub>p</sub> 是信号处理时间 (s)。通过对信号传输线路和数据处理算法的优化，可以显著降低 t<sub>p</sub>，从而减少总响应时间，确保在 H<sub>2</sub>S 浓度达到危险阈值时系统能迅速反应。系统布局优化不仅要考虑传感器的空间分布和数量，还需要综合考虑环境因素和设备性能，以确保整个监测网络在动态和复杂的储存区环境中维持高效率和准确性。

### 2.3 数据传输与远程监控的技术

在 H<sub>2</sub>S 气体检测报警系统中，数据传输与远程监控的技术是关键组成部分，确保信息从传感器到监控中心的及时和准确传递。此技术涉及采用先进的通信协议与网络架构，包括无线传输技术（如 LoRaWAN、5G），以及具有高数据传输能力和低延迟性的有线通信技术（如以太网）。数据传输效率的最大化可通过公式：

$$R = \frac{L}{T_d + T_p} \quad (3)$$

其中 R 代表数据传输率 (bps)，L 是数据负载大小 (bits)，T<sub>d</sub> 是数据传输延迟 (s)，T<sub>p</sub> 是处理延迟 (s)。在实际应用中，优化 T<sub>d</sub> 和 T<sub>p</sub> 对于实时监控系统的性能至关重要。远程监控则依赖于综合数据管理与分析平台，该平台不仅收集和存储数据，而且对数据进行实时分析，生成洞察和警报。信息处理流程可由下述公式概括：

$$T_{total} = T_{acq} + T_{trans} + T_{proc} \quad (4)$$

T<sub>total</sub> 是从数据采集到信息呈现的总时间，T<sub>acq</sub> 是数据采集时间，T<sub>trans</sub> 是数据传输时间，而 T<sub>proc</sub> 是数据处理时间。通过减少 T<sub>trans</sub> 和 T<sub>proc</sub>，系统能够更快地响应潜在的 H<sub>2</sub>S 泄露，从而在危险化学品储存区实现更高级别的安全保障。

### 3 H<sub>2</sub>S 气体检测报警系统的应用

#### 3.1 系统的灵敏度、准确性、稳定性分析

灵敏度是指检测系统能够识别出最低浓度的 H<sub>2</sub>S 气体的能力。本研究中系统设计采用了高精度电化学传感器，通过在控制环境中暴露于不同浓度的 H<sub>2</sub>S 气体，测定其响应时间和恢复时间。在 0.1ppm 的低浓度 H<sub>2</sub>S 气体环境中，系统能够在 5 秒内成功检测到气体存在，并在撤离气体后 15 秒内回到基线状态，显示出高灵敏度。准确性分析涉及系统输出与实际气体浓度之间的一致性。通过对比系统读数与已知标准气体浓度，评估其误差率。在进行多点校准实验中，系统在 0.1ppm 至 100ppm 范围内的平均误差率维持在 ±3% 之内，确保了高准确性。长期稳定性测试显示，系统连续运行 6 个月后，检测结果的波动率不超过 2%，这证明了其在长期运行中依然能保持良好的检测性能<sup>[5]</sup>。系统不仅响应迅速，而且能够在极低浓度下进行准确检测，同时在长期运行中表现出优异的稳定性，是保障储存区安全的关键技术。表 3 是在测试中收集的实时数据与生成的表格，展示了系统在不同浓度下的灵敏度和准确性表现。

表 3 系统在不同浓度下的灵敏度和准确性表现

浓度 (ppm)	响应时间 (秒)	恢复时间 (秒)	误差率 (%)
0.1	5	15	±1.5
1	4	12	±2.0
10	3	10	±2.5
100	2	8	±3.0

通过对表 3 数据的分析，进一步确认了检测系统的灵敏度和准确性均符合安全监测的严格要求。

#### 3.2 通过报警系统的优化来提高事故预防与应急处理的效率

系统优化不仅包括提高传感器的灵敏度和反应速度，还涉及数据集成、实时分析及自动化响应机制的应用。通过这种全面的系统优化，可以确保在 H<sub>2</sub>S 泄露的早期阶段及时发现并采取措施，从而有效减少潜在的人员伤害和环境污染。以某大型石油加工厂为例，该厂采用了一种高级 H<sub>2</sub>S 气体检测报警系统，该系统包括多点布置的传感器网络，传感器能在不到 5 秒的时间内检测到 0.1ppm 以上的 H<sub>2</sub>S 浓度变化，并通过无线网络实时传输数据到中央监控室。监控系统还包括一个高级数据处理平台，该平台能够实时分析传入的数据，并在检测到潜在危险水平时自动启动应急响应程序。表 4 展示了一个典型月份内系统监测到的 H<sub>2</sub>S 浓度及响应时间。

表 4 系统监测到的 H<sub>2</sub>S 浓度及响应时间

日期	检测到的 H <sub>2</sub> S 浓度 (ppm)	响应时间 (秒)
2023/1/5	0.5	4.8
2023/1/15	1.2	4.6
2023/1/25	0.7	4.7
2023/2/4	2.1	4.5
2023/2/14	0.9	4.6

优化后的系统不仅提高了 H<sub>2</sub>S 浓度的检测准确度，而且减少了从检测到响应的总时间，这是通过减少数据传输延迟和加速数据处理过程实现的。系统的自动化响应机制包括自动启动通风系统和关闭高风险操作区域的功能，进一步提高了应急处理的效率。通过优化措施，石油加工厂显著提升了对 H<sub>2</sub>S 泄露的管理能力，减少了事故发生的风险，保障了工作人员的安全和工厂的连续运营。

#### 4 结语

综上所述，H<sub>2</sub>S 气体检测报警系统在化学品储存安全领域的研究，通过集成创新的传感技术和数据分析方法，不仅提高了氢硫化氢泄漏的应急响应速度，也提升了事故预防的前瞻性和系统的整体性能。该研究方向的深入将推动安全技术的进步，为化工及石油天然气行业的安全监管树立更高标准。因此，本领域的研究不仅增强了对 H<sub>2</sub>S 危险的防范能力，也为危险化学品储存安全管理提供了科学依据和技术支持，有助于避免重大安全事故的发生，保障人员安全和环境保护。

#### 参考文献：

- [1] 王彪, 张国军, 黄硕, 等. TDLAS 型采用 VCSEL 光源的 H<sub>2</sub>S 气体检测系统的研制 [J]. 激光杂志, 2020, 41(07):47-51.
- [2] 刘兆琪, S.Lokeswara Reddy. Ag 掺杂二氧化锡纳米颗粒的制备和 H<sub>2</sub>S 气体检测研究 [J]. 工业技术与职业教育, 2020, 18(02):35-39.
- [3] 陈书旺, 尹晓伟, 王真真, 等. 差分吸收光谱检测 H<sub>2</sub>S 气体的反演算法 [J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2020, 18(04):734-737.
- [4] 李国林, 袁子琪, 季文海. 应用于油田伴生气 H<sub>2</sub>S 气体检测实验研究 [J]. 红外与激光工程, 2019, 48(08):156-162.
- [5] 刘克成, 张立军, 石荣雪, 等. WO<sub>3</sub> 气体传感器用于 SF<sub>6</sub> 分解气体 H<sub>2</sub>S 的检测 [J]. 仪表技术与传感器, 2019, (08):21-23.

#### 作者简介：

丁剑鹏 (1983-) , 男, 汉族, 本科, 工程师, 主要研究方向: 危险化学品企业安全管理。