

Research Progress of Quick and Quantitative H₂S Detection Methods in Natural Gas

Ying Li¹, Li Li², Zheng Mu², Tongtong Zhao², Mingyang Liu^{1,2}

¹Department of Environmental and Chemical Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian Liaoning

²Centre of Technique, Liaoning Entry-Exit Inspection and Quarantine Bureau, Dalian Liaoning

Email: liying@djtu.edu.cn, liumy@mail.tsinghua.edu.cn

Received: Feb. 9th, 2017; accepted: Feb. 24th, 2017; published: Feb. 28th, 2017

Abstract

H₂S has great effect on the transportation, storage and use safety of natural gas. It is an absolutely necessary measuring project for natural gas quality control. So it has important significance to quickly and precisely monitor H₂S content. The summary is made about the present national and international standard test method for H₂S in natural gas. Based on these, sensor-based type for quantifying H₂S including semiconductor metal oxide, electrochemical and optical sensor are reviewed. Different quality-assurance parameters (e.g., operating principles, limit of detection, response time and common operating range of concentration) are evaluated and compared. Finally, the limitations and the future prospects of these sensor-based methods are highlighted.

Keywords

H₂S Detection, Natural Gas, Standard Test Method, Sensor-Based Method

天然气中H₂S快速定量检测研究进展

李英¹, 李莉², 慕铮², 赵彤彤², 刘名扬^{1,2}

¹大连交通大学环境与化学工程学院, 辽宁 大连

²辽宁出入境检验检疫局技术中心, 辽宁 大连

Email: liying@djtu.edu.cn, liumy@mail.tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2017年2月9日; 录用日期: 2017年2月24日; 发布日期: 2017年2月28日

摘要

H₂S对天然气的运输、贮存及使用安全会产生破坏性的影响, 其含量是天然气检测必不可少的项目, 快

速准确测定其含量具有极其重要的意义。本文对天然气中 H_2S 检测所用到的国内国际标准进行了总结分析。在此基础上,综述了满足快速定量检测 H_2S 的半导体氧化物、电化学和光学传感器研究进展,比较各种 H_2S 检测传感器的操作标准(如操作原理、检测限、响应时间、检测浓度范围)。最后,探讨各种传感器的不足并指出今后的发展方向。

关键词

H_2S 检测, 天然气, 标准, 传感器

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

天然气中的硫化物对其运输、贮存和使用安全及环境均会产生不利影响,不仅会腐蚀设备、污染环境,还会危害人体健康。天然气中 H_2S 可以使管道内壁发生电化学腐蚀和硫化物腐蚀开裂,造成事故[1]。在天然气生产加工过程中,必须严格控制 H_2S 的工艺指标,减少其对设备的损害和对大气的污染。如何能够准确、的测定出 H_2S 含量,也成为天然气净化工艺中的一个重要环节[2]。本文将对现有天然气硫化氢检测技术、所形成标准进行简单介绍,由目前检测中存在问题引发开来,综述气相中快速定量硫化氢检测的最新进展,并探讨今后的发展方向。

2. H_2S 检测标准

常用的天然气中硫化氢的检测方法有碘量法、亚甲蓝法、乙酸铅反应速率法、检测管着色长度法和色谱法。碘量法是分析气体中硫化氢含量的权威化学分析方法,其方法准确可靠,测量范围广。但是在做现场天然气中硫化氢含量测量比对分析时,由于样品流量、标准溶液的标定、指示剂的添加等因素影响,重现性不好。亚甲蓝分光光度法只适用于浓度较低的净化天然气中硫化氢的测量。同样作为化学分析方法,与碘量法相同,不确定影响较多。为了满足日益增长的硫化氢在线检测的需求,醋酸铅反应速

Table 1. Contrast of standard test method of H_2S in natural gas

表 1. 天然气中 H_2S 检测标准对比

方法	国家标准号	国际标准号	检测范围	优点	缺点	
碘量法[3]	GB/T 11060.1-2010	ASTM D2385	体积分数 0~100%	方法简单、成本低	手工操作,步骤繁琐,对低浓度检测时间长,误差大	
亚甲蓝法[4]	GB/T 11060.2-2008	ASTM D2725	0~23 mg/m ³	方法简单、成本低	检测限低,有SO ₂ 存在时,检测结果偏低	
乙酸铅反应速率法	双光路[5]	GB/T 11060.3-2010	ASTM D4084-05	0.1~22 mg/m ³	结构简单	检测精度差,计算复杂
	单光路[6]	GB/T 18605.2-2001	ASTM D4084-94	1~990 mg/m ³		
检测管着色长度法[7]	GB/T 11060.11-2014	ASTM D4810-2006	0.5%~40%	结构及操作简单,价格低廉,能快速分析气体	检测精度差,需经常更换	
色谱法[8]	GB/T 11060.10-2014	ISO 19739-2004	0.1~500 mg/m ³	检测限低、重现性好	价格昂贵、不能用于现场检测	

率法和检测管法因结构及操作简单,价格低廉,能快速分析气体而广泛应用,但总体检测精度较差。随着环保压力日益增加,人们对 H_2S 含量更为关注,一些高科技含量的测量手段相继出现,气相色谱法最为典型。该法通过不同气相色谱柱和检测器联用,用色谱柱分离硫化物,检测器进行检测,得到硫化物含量。由于其检测限低,重现性好,在低浓度、微量及痕量硫的检测中应用越来越广泛。气相色谱仪价格昂贵且操作方法繁琐,增加了分析检测的时间。天然气中 H_2S 常用监测方法及所形成标准列与表 1,其检测范围和优势劣势分析可帮助检测者根据实际情况选择。

3. H_2S 检测传感器

传感器具有携带方便、响应快、灵敏度高、易微型化、能用于现场分析和监控等特点成为近年的研究热点,本文将重点对各种类型硫化氢在线检测传感器研究进展做出综述。 H_2S 传感器类型主要分为:半导体金属氧化物、电化学以及光学传感器。

Table 2. Contrast of sensor-based method for H_2S detection

表 2. H_2S 检测传感器对比

传感器	原理	检测限ppb	响应时间s	测量浓度ppm
半导体金属氧化物	传导阻抗	715 (± 1181)	8~120	0.01~1200
电化学	电流或电势	100	10	0.1~100
光学	吸收或比色	46 (± 50)	0.2	0.01~100

3.1. 半导体氧化物传感器

半导体金属氧化物作为气体传感元件的有效敏感材料已经为广大研究者熟知多年,这是由于其电导性随环境气氛的变化而变化,通过检测半导体金属氧化物的导电性变化可实现对有毒有害气体的有效监测。半导体金属氧化物根据其载流子不同可分为电子作为载流子的 n 型半导体和空穴作为载流子的 P 型半导体两类。常用于气敏传感器的 n 型半导体金属氧化物主要有 SnO_2 、 ZnO 、 WO_3 、 Fe_2O_3 、 In_2O_3 、 TiO_2 等[9]; P 型半导体金属氧化物有 CuO 、 Cu_2O 、 NiO 、 Co_3O_4 等[10]。

纳米结构的半导体金属氧化物具有大的比表面积、独特的电学、化学、光学和化械特性,因而引起了广大研究者的关注。 SnO_2 作为半导体金属氧化物($E_g = 3.6 \text{ eV}$),具有优越的电学及化学等性能和费用优势,成为当前研究最深入,应用最广泛的气敏材料。为了提高对 H_2S 的响应,可以在 SnO_2 材料中添加不同的物质改变元件的选择性。Fang 等[11]通过溶胶凝胶制备的 CeO 负载 SnO_2 薄膜在室温下用于 H_2S 检测。在实验室条件下可测 H_2S 浓度在 1~15 ppm,响应和恢复时间为 20-40s。同样,负载 CuO 提高催化活性的 SnO_2 相比于不负载 SnO_2 灵敏度增强,如对 20 ppm 的 H_2S 响应时间为 15 s [12]。Patil and Patil [13] 在实验室条件下测得 CuO 改进 SnO_2 在 H_2S 浓度 1~300 ppm 的响应时间为 15 s。5 wt% Cu 担载 SnO_2 在低浓度时响应速率较低[14],而 CuO-SnO_2 纳米纤维[15]、 CuO 纳米粒子- SnO_2 薄膜[16]、多层结构 $\text{SnO}_2\text{-CuO}$ [17]、 $\text{CuO/SnO}_2/\text{ZnO}$ [18]复合膜即便在低浓度时均具有很高的响应速率。另外,Fe 负载 SnO_2 在 H_2S 浓度为 10~250 ppm 的响应时间为 5~15 s [19]; 0.1 wt% V 担载 SnO_2 在 H_2S 为 10 ppm 时响应时间为 2 s [20]。Tanda 等[21]发明了手提 ZnO 半导体传感器用于硫监测日常研究。Chaudhari 等[22]使用负载 TiO_2 厚膜检测 H_2S 浓度范围 200~1000 ppm,操作温度 250°C ~ 350°C 。胡明江和王忠[23]采用同轴静电纺丝技术制备了 $\text{SnO}_2\text{-CuO}$ 复合纳米纤维,采用提拉法将 $\text{SnO}_2\text{-CuO}$ 纳米纤维涂覆于印有梳状 Au 电极的氧化铝陶瓷管表面形成敏感薄膜,设计了一种新型薄膜式 H_2S 传感器。其结构如图 1 所示。以氧化铝陶瓷

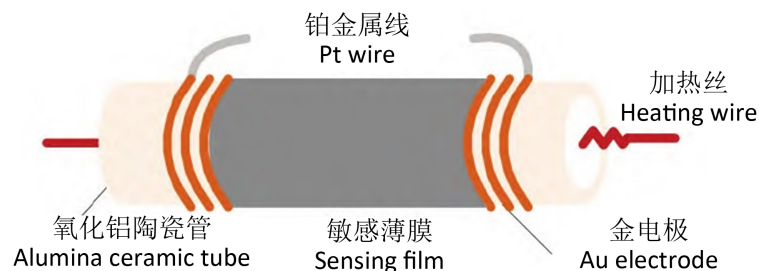


Figure 1. Structure schematic of metal oxide H_2S sensor [23]

图 1. 半导体氧化物 H_2S 传感器结构示意图[23]

管为基体，在其表面光刻制 Au 电极作为基准电极。采用提拉法将气敏浆料均匀镀膜于陶瓷管表面，Pt 线固定在传感薄膜两端作为检测电极，加热丝焊接于陶瓷管端面用来控制工作温度。

虽然半导体氧化物传感器有很多优势，但其还有自身的缺陷。最为值得一提的是对水蒸气比较敏感和选择性差。另外，半导体金属氧化物传感器输出是高度非线性的，能提供的动态测试范围比较小(0~10 ppm)。

3.2. 电化学传感器

电化学传感器、易于自动化和连续分析，快捷、灵敏度高、选择性好、经济、检测范围广，在检测低浓度的硫化氢方面取得了良好的效果[24]。尤其是基于氧化还原电极的传感器[25]。对 H_2S 气体分析，采用固体聚合物电解质的传感器最为常用。固体聚合物电极-Pt 实验室条件下用来定量测试气相 H_2S ，检测限低、重现性好、快速响应(10 s) [26]。同样，Pt 粒子分散在固体聚合物电解质多孔扩散电极中的电极结构也用于 H_2S 的定量测定，测量范围 0~100 ppm，在每天使用 4 小时情况下寿命可长达 7 个月[27]，典型的固体聚合物 H_2S 传感器如图 2 所示。其中 4 为工作电极、5 为 Nafion 膜、6 为反比电极、7 为参比电

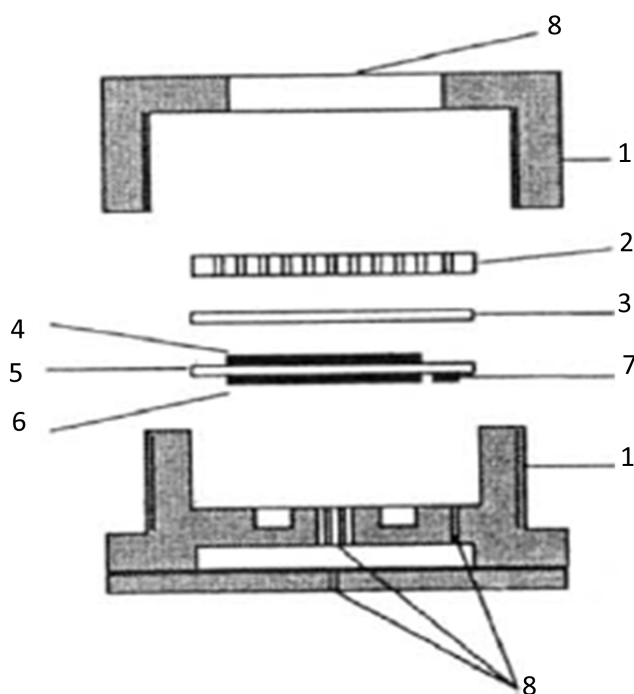


Figure 2. Scheme of the solid polymer electrolyte H_2S sensor [27]

图 2. 固体聚合物电极 H_2S 传感器示意图[27]

极。Yu 等[28]使用 H_2SO_4 预处理的 Nafion 膜做固体电解质,可检测 H_2S 浓度 1~100 ppm, 响应时间 9 s。除了这种检测电流的传感器,还有基于电势的 H_2S 传感器。Liang 等[29]提出了使用硅酸钠和负载 Pr_6O_{11} 的 SnO_2 做电极的紧凑管式传感器,在 5~50 ppm 检测范围内响应时间为 4~8 s。最近,石墨基纳米材料电化学传感器发展迅速[30] [31]。

电化学传感器具有价格便宜易于使用的优点,但电解质容易与混在硫化氢气体里的其他杂质反应,输出交叉灵敏度使检测精度降低,同时其他气体杂质与电解质反应使传感器中毒,失去对硫化氢气体浓度的检测作用。而基于气体光谱特性的方法能很好地解决这些问题。

3.3. 光学传感器

光学传感器通常利用光传导技术产生输出信息,设计这类传感器通常使用光纤和涂层,当被分析物质放置于光纤和涂层界面,与光发生作用,输出信号由于吸收或散射现象被记录下来。唐东林等[32] [33]采用近红外光谱吸收检测气体中 H_2S 浓度,可检测到最小浓度值为 5.1 ppm。Dong 等[34]利用近红外腔增强吸收光谱测定燃料重整中的 H_2S 含量,传感器响应速度快(2 s),准确度高(0.1 ppm),检测范围宽(0~1000 ppm),检测限低(1 s 内 0.09 ppm)。Petruci 等[35]通过浓度预处理装置和 UV 转换系统与中空波长诱导近红外传感器组合,首次实现了 H_2S 和 SO_2 的现场实时检测。Hippler [36]采用带有小功率二极管激光器的腔增强的拉曼光谱用于监测具有灵敏度和色谱选择性包含 H_2 、 H_2S 、 N_2 、 CO_2 的天然气混合物。

直接感应的光学传感器基于吸收或放出质子,不受温度和湿度影响,但通常需要一个相对较大,比较昂贵的光探测器。比色法不需要借助于任何昂贵的仪器设备,可以直接用肉眼对目标物进行分析。Jarosz 等[37]提出一个简单的气体中 H_2S 检测的微孔板比色法。下置涂有负载 Ag^+ 离子的 Nafion 聚合物的 96 孔微孔板盖,硫化氢作为易挥发气体,与银离子反应产生 Ag_2S 纳米粒子,通过监测形成纳米粒子的吸收改变实现硫化氢实时监测,其结构如图 3 所示。Zhang 等[38]根据金纳米粒子(AuNPs)的反聚提出了一个简单便宜的可视化在线检测硫化氢方法。吹入硫化氢可固定 AuNPs 保持红色,否则 AuNPs 聚合颜色从红色变为蓝色。检测限 0.5 ppm,该方法呈现良好的视觉敏感性。

三种不同 H_2S 检测传感器比较列于表 2,可知电化学和光学传感器具有更快的响应时间和更低的检测限。

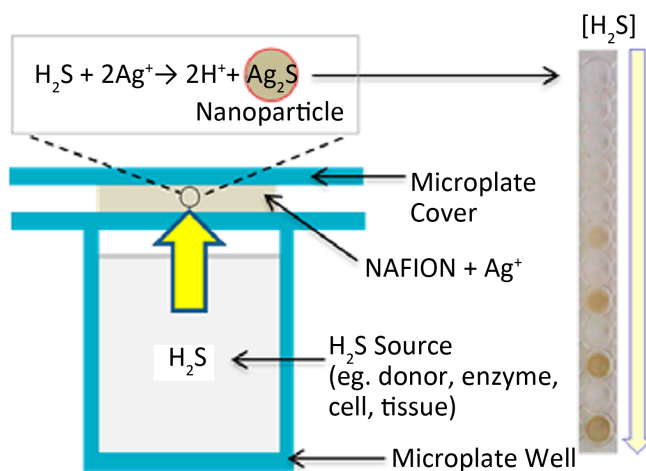


Figure 3. Schematic of the H_2S assay [37]

图 3. H_2S 光学传感器示意图[37]

4. 结论与展望

现有的半导体金属氧化物传感器都应用在 ppm 级, 容易受干扰气体影响、灵敏度有限, 需要开发具有更高灵敏度、更高选择性和更稳定的传感器能测量达到 ppb 级的 H_2S 。电化学传感器具有很好的检测能力, 检测 H_2S 浓度可达到几百个 ppb、响应时间低于 10 s、费用低、线性输出, 并容易小型化, 但容易受到温度影响。对于光学传感器, 借助于传感器平台中促进光化学反应的试剂, 如: 光纤、光电电池, 石英晶体、显色染料等这些感应物质, 灵敏度可显著提升。最为重要的是, 现有传感器大都在实验室条件下测试, 需要在严苛的环境条件下开展系统的证实研究, 开发出在实际条件下操作稳定的精确定量检测 H_2S 的各类传感器。

基金项目

大连市科技计划项目资助(编号: 20150519)。

参考文献 (References)

- [1] 张子龙, 白冰, 宋华. 国内硫化氢含量的检测方法浅析[J]. 化学工程师, 2012(4): 34-37.
- [2] 雷红琴, 张旭龙, 胡建民, 李芳, 粟有志, 李艳美. 天然气中硫化物检测方法标准的分析探讨[J]. 石油与天然气化工, 2012, 41(4): 422-425.
- [3] 全国天然气标准化技术委员会. GB/T 11060.1-2010 天然气含硫化化合物的测定 第 1 部分: 用碘量法测定硫化氢含量[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- [4] 全国天然气标准化技术委员会. GB/T 11060.2-2008 天然气含硫化化合物的测定 第 2 部分: 用亚甲蓝法测定硫化氢含量[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [5] 全国天然气标准化技术委员会. GB/T 11060.3-2010 天然气含硫化化合物的测定 第 3 部分: 用乙酸铅反应速率双光路检测法测定硫化氢含量[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- [6] 全国天然气标准化技术委员会. GB/T 18605.2-2001 天然气中硫化氢含量的测定——醋酸铅反应速率单光路检测法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2001.
- [7] 全国天然气标准化技术委员会. GB/T 11060.11-2014 天然气含硫化化合物的测定 第 11 部分: 用着色长度检测管法测定硫化氢含量[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- [8] 全国天然气标准化技术委员会. GB/T 11060.10-2014 天然气含硫化化合物的测定 第 10 部分: 用气相色谱法测定硫化物[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- [9] Comini, E., Baratto, C., Concina, I., Faglia, G., Falasconi, M., Ferroni, M., Galstyan, V., Gobbi, E., Ponzoni, A., Vomiero, A., Zappa, D., Sberveglieri, V. and Sberveglieri, G. (2013) Metal Oxide Nanoscience and Nanotechnology for Chemical Sensors. *Sensors and Actuators B: Chemical*, **179**, 3-20. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2012.10.027>
- [10] Kim, H.J. and Lee, J.H. (2014) Highly Sensitive and Selective Gas Sensors Using P-Type Oxide Semiconductors: Overview. *Sensors and Actuators B: Chemical*, **192**, 607-627. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2013.11.005>
- [11] Fang, G., Liu, Z., Liu, C. and Yao, K. (2000) Room Temperature H_2S Sensing Properties and Mechanism of $\text{CeO}_2\text{-SnO}_2$ Sol-Gel Thin Films. *Sensors and Actuators B: Chemical*, **66**, 46-48. [https://doi.org/10.1016/S0925-4005\(99\)00467-0](https://doi.org/10.1016/S0925-4005(99)00467-0)
- [12] Chowdhuri, A., Gupta, V. and Sreenivas, K. (2003) Fast Response H_2S Gas Sensing Characteristics with Ultra-Thin CuO Islands on Sputtered SnO_2 . *Sensors and Actuators B: Chemical*, **93**, 572-579. [https://doi.org/10.1016/S0925-4005\(03\)00226-0](https://doi.org/10.1016/S0925-4005(03)00226-0)
- [13] Patil, L.A. and Patil, D.R. (2006) Heterocontact Type CuO-Modified SnO_2 Sensor for the Detection of a ppm Level H_2S Gas at Room Temperature. *Sensors and Actuators B: Chemical*, **120**, 316-323. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2006.02.022>
- [14] Liu, J., Huang, X., Ye, G., Liu, W., Jiao, Z., Chao, W., Zhou, Z. and Yu, Z. (2003) H_2S Detection Sensing Characteristics of CuO/ SnO_2 Sensor. *Sensors*, **3**, 110-118. <https://doi.org/10.3390/s30500110>
- [15] Choi, S.W., Katoch, A., Zhang, J. and Kim, S.S. (2013) Electrospun Nanofibers of CuO- SnO_2 Nanocomposite as Semiconductor Gas Sensors for H_2S Detection, *Sensors and Actuators B: Chemical*, **176**, 585-591. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2012.09.035>

- [16] Chowdhuri, A., Gupta, V., Sreenivas, K., Kumar, R., Mozumdar, S. and Patanjali, P.K. (2004) Response Speed of SnO₂-Based H₂S Gas Sensors with CuO Nanoparticles. *Applied Physics Letter*, **84**, 1180-1182. <https://doi.org/10.1063/1.1646760>
- [17] Verma, M.K. and Gupta, V. (2012) A Highly Sensitive SnO₂-CuO Multilayered Sensor Structure for Detection of H₂S Gas. *Sensors and Actuators B: Chemical*, **166-167**, 378-385. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2012.02.076>
- [18] Wagh, M.S., Patil, L.A., Seth, T. and Amalnerkar, D.P. (2004) Surface Cupricated SnO₂-ZnO Thick Films as a H₂S Gas Sensor. *Materials Chemistry and Physics*, **84**, 228-233. [https://doi.org/10.1016/S0254-0584\(03\)00232-3](https://doi.org/10.1016/S0254-0584(03)00232-3)
- [19] Vaishampayan, M.V., Deshmukh, R.G., Walke, P. and Mull, I.S. (2008) Fe-Doped SnO₂ Nanomaterial: A Low Temperature Hydrogen Sulfide Gas Sensor. *Materials Chemistry and Physics*, **109**, 230-234. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2007.11.024>
- [20] Sukunta, J., Wisitsoraatb, A., Tuantranontb, A., Phanichphantc, S. and Liewhiran, C. (2016) Highly-Sensitive H₂S Sensors Based on Flame-Made V-Substituted SnO₂ Sensing Films. *Sensors and Actuators B: Chemical*, **242**, 1095-1107. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2016.09.140>
- [21] Tanda, N., Washio, J., Ikawa, K., Suzuki, K., Koseki, T. and Iwakura, M. (2007) A New Portable Sulfide Monitor with a Zinc-Oxide Semiconductor Sensor for Daily Use and Field Study. *Journal of Dentistry*, **35**, 552-557. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2007.03.003>
- [22] Chaudhari, G.N., Bende, A.M., Bodade, A.B., Patil, S.S. and Manorama, S.V. (2006) Detection of Liquid Petroleum Gas Using Mixed Nanosized Tungsten Oxide-Based Thick-Film Semiconductor Sensor. *Talanta*, **69**, 187-191. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2005.09.024>
- [23] 胡明江, 王忠. 基于纳米纤维的薄膜型传感器研究[J]. 分析化, 2016, 44(9): 1315-1321.
- [24] Pandey, S.K., Kim, K.H. and Tang, K.T. (2012). A Review of Sensor-Based Methods for Monitoring Hydrogen Sulfide. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, **32**, 87-99. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2011.08.008>
- [25] Lawrence, N.S., Jiang, L. and Compton, R.G. (2003). Voltammetric Characterization of a N, N-Diphenyl-p-Phenylenediamine-Loaded Screen-Printed Electrode: A Disposable Sensor for Hydrogen Sulfide. *Analytical Chemistry*, **75**, 2054-2059. <https://doi.org/10.1021/ac020728t>
- [26] Wang, Y., Yan, H. and Wang, E. (2001) The Electrochemical Oxidation and the Quantitative Determination of Hydrogen Sulfide on a Solid Polymer Electrolyte-Based System. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, **497**, 163-167. [https://doi.org/10.1016/S0022-0728\(01\)00531-9](https://doi.org/10.1016/S0022-0728(01)00531-9)
- [27] Wang, Y., Yan, H. and Wang, E. (2002) Solid Polymer Electrolyte-Based Hydrogen Sulfide Sensor. *Sensors and Actuators B: Chemical*, **87**, 115-121. [https://doi.org/10.1016/S0925-4005\(02\)00227-7](https://doi.org/10.1016/S0925-4005(02)00227-7)
- [28] Yu, C., Wang, Y., Hua, K., Xing, W. and Lu, T. (2002) Electrochemical H₂S Sensor with H₂SO₄ Pre-Treated Nafion Membrane as Solid Polymer Electrolyte. *Sensors and Actuators B: Chemical*, **86**, 259-265. [https://doi.org/10.1016/S0925-4005\(02\)00200-9](https://doi.org/10.1016/S0925-4005(02)00200-9)
- [29] Liang, X., He, Y., Liu, F., Wang, B., Zhong, T., Quan, B. and Lu, G. (2007) Solid-State Potentiometric H₂S Sensor Combining NASICON with Pr₆O₁₁-Doped SnO₂ Electrode. *Sensors and Actuators B: Chemical*, **125**, 544-549. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2007.02.050>
- [30] Cho, S., Lee, J.S., Jun, J., Kim, S.G. and Jang, J. (2014). Fabrication of Water-Dispersible and Highly Conductive PSS-Doped PANI/Graphene Nanocomposites Using a HighmoleculaWeight PSS Dopant and Their Application in H₂S Detection. *Nanoscale*, **6**, 15181-15195. <https://doi.org/10.1039/C4NR04413D>
- [31] Choi, S.J., Jang, B.H., Lee, S.J., Min, B.K., Rothschild, A. and Kim, I.D. (2014). Selective Detection of Acetone and Hydrogen Sulfide for the Diagnosis of Diabetes and Halitosis Using SnO₂ Nanofibers Functionalized with Reduced Graphene Oxide Nanosheets. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **6**, 2588-2597. <https://doi.org/10.1021/am405088q>
- [32] 唐东林, 王莹, 郭峰, 赵东. 光谱吸收硫化氢气体浓度传感器[J]. 传感技术学报, 2010, 3(4): 458-460.
- [33] 唐东林, 柯志军, 代志勇, 窦春霞, 贾品元. 油气田硫化氢气体浓度光纤消逝场传感检测技术[J]. 石油学报, 2016, 37(1): 106-110.
- [34] Dong, F., Junaedi, C., Roychoudhury, S. and Gupta, M. (2011) Rapid, Online Quantification of H₂S in JP-8 Fuel Reformate Using Near-Infrared Cavity-Enhanced Laser Absorption Spectroscopy. *Analytical Chemistry*, **83**, 4132-4136. <https://doi.org/10.1021/ac200300t>
- [35] Petrucci, J.F. Da, S., Wilk, A., Cardoso, A.A. and Mizaikoff, B. (2015) Online Analysis of H₂S and SO₂ via Advanced Mid-Infrared Gas Sensors. *Analytical Chemistry*, **87**, 9605-9611. <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.5b02730>
- [36] Hippler, M. (2015) Cavity-Enhanced Raman Spectroscopy of Natural Gas with Optical Feedback CW-Diode Lasers. *Analytical Chemistry*, **87**, 7803-7809. <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.5b01462>
- [37] Jarosz, A.P., Yep, T. and Bulent, M. (2013) Microplate-Based Colorimetric Detection of Free Hydrogen Sulfide. *Ana-*

lytical Chemistry, **85**, 3638-3643. <https://doi.org/10.1021/ac303543r>

- [38] Zhang, Z., Chen, Z., Wang, S., Qu, C. and Chen, L. (2014) On-Site Visual Detection of Hydrogen Sulfide in Air Based on Enhancing the Stability of Gold Nanoparticles. *ACS Applied Materials Interfaces*, **6**, 6300-6307. <https://doi.org/10.1021/am500564w>

Hans 汉斯

期刊投稿者将享受如下服务：

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：aac@hanspub.org