

激光与光电子学进展

基于特征波长积分吸收光谱法的 H₂S 体积分数监测

胡晟煜, 王飞*, 崔海滨

浙江大学能源工程学院能源清洁利用国家重点实验室, 浙江 杭州 310027

摘要 通过厌氧消化产生清洁燃气是目前处理餐厨垃圾的主要手段之一。由于餐厨垃圾中含有硫元素, 厌氧消化过程中会不可避免地产生 H₂S 气体。H₂S 不仅会腐蚀管路还会污染环境, 因此对其体积分数进行在线测量具有重要意义。传统的 H₂S 体积分数测量方法如亚甲基蓝分光光度法、碘量法和电化学法等具有操作复杂、测量速度慢、易受其他气体干扰等缺点, 无法用于指导脱硫系统工况及时调整。将紫外吸收光谱法和连续波长积分法相结合用于 H₂S 体积分数的在线测量, 选择 210~230 nm 波段作为特征波段, 得到吸收光谱积分特征值与 H₂S 体积分数之间的线性关系, 其拟合度大于 0.999。对实验室配制 200×10^{-6} ~ 1200×10^{-6} 范围的 H₂S 标气进行体积分数测量, 测量值的最大误差为 3.1%, 结果表明, 该技术能够应用于沼气中 H₂S 体积分数的准确监测。最后将测量仪器应用于餐厨垃圾厌氧消化工程并进行现场测试, 结果表明, 该仪器能够较准确地监测厌氧消化过程中沼气中的 H₂S 体积分数变化。

关键词 紫外线; 吸收光谱; 沼气; 硫化氢; 实时监测

中图分类号 TN247 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP230495

H₂S Volume Fraction Monitoring Based on Characteristic Wavelength-Integrated Absorption Spectroscopy

Hu Shengyu, Wang Fei*, Cui Haibin

State Key Laboratory of Clean Energy Utilization, School of Energy Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang, China

Abstract At present, producing clean gas through anaerobic digestion is one of the main means to treat food waste. As food waste contains sulfur, H₂S gas will inevitably be generated during anaerobic digestion. H₂S gas is inevitably generated during anaerobic digestion due to the presence of sulfur in food wastes. The produced H₂S can lead to corrosion in pipelines and environmental pollution. Thus, it is essential to measure its volume fraction online. Traditional H₂S volume fraction measurement methods, such as methylene blue spectrophotometry, iodometry, and electrochemical methods, involve complex operation, slow measurement speed, and can easily be affected by other gases. In addition, these methods cannot be used to guide the timely adjustment of the working conditions of the desulfurization system. Therefore, we develop an approach combined the ultraviolet absorption spectroscopy and continuous wavelength integration method for the online measurement of H₂S volume fraction. The linear relationship between the characteristic value of the absorption spectrum integration and H₂S volume fraction is obtained by selecting a 210–230 nm band as the characteristic band, with a fitting degree >0.999. To measure the volume fraction of H₂S, we prepare 200×10^{-6} – 1200×10^{-6} of H₂S standard gas in a laboratory, and the maximum error of the measured value is 3.1%. Finally, the measurement device is applied to the anaerobic digestion of kitchen wastes, and the field test is conducted. The results demonstrate that the instrument can accurately monitor the change in H₂S volume fraction of biogas during the anaerobic digestion process.

Key words ultraviolet; absorption spectrum; biogas; hydrogen sulfide; real time monitoring

1 引言

随着经济和生活水平提高, 国内产生的餐厨垃圾

量也随之增加。据记录, 近年来我国每年产生约 1.9×10^5 万吨餐厨垃圾, 且这个数字还在逐年上升^[1]。餐厨垃圾具有以下特征: 有机物含量高、含水率高、易

收稿日期: 2023-01-12; 修回日期: 2023-02-14; 录用日期: 2023-03-01; 网络首发日期: 2023-03-09

基金项目: 宁波市科技创新 2025 重大专项(2018B10023)

通信作者: *wangfei@zju.edu.cn

腐烂且容易造成环境污染。常规填埋处理法会污染土壤并给环境带来不利影响^[2]。随着垃圾资源化利用的推进,厌氧消化技术凭借其能够将餐厨垃圾通过生物质能转化为沼气和沼渣的优势而逐渐得到推广应用^[3-5]。沼气中的气体成分复杂,主要成分中CH₄体积分数约为50%~70%、CO₂体积分数约为25%~50%、H₂S体积分数约为200×10⁻⁶~3000×10⁻⁶^[6]。其中H₂S气体气味难闻且有剧毒,会对一线工作人员的健康产生不利影响,还会腐蚀运输管道,此外,H₂S体积分数过高还会影响沼气的热值。对沼气中H₂S气体体积分数进行实时监测,不仅有利于了解沼气中H₂S体积分数变化,还能够指导后续脱硫工艺的优化^[7-8]。

目前常用的H₂S气体体积分数测量方法包括亚甲基蓝分光光度法、碘量法^[9]、电化学传感器法^[10]和光学测量法。利用亚甲基蓝分光光度法和碘量法进行浓度测量时需要先取样再进行分析,操作过程复杂且不能实时反映气体浓度变化。电化学传感器法则易受到环境和其他气体干扰且传感器寿命不长。光学测量法以其非接触、响应快和灵敏度高优势被越来越多地应用于各种环境气体检测场合^[11-15]。厌氧消化产沼气过程中会伴随着高体积分数CO₂的产生,在红外波段,CO₂吸收谱线与H₂S吸收谱线重合会严重影响测量结果,因此使用近红外吸收光谱技术进行H₂S体积分数测量时会产生较大的干扰。杨雅涵等^[16]运用可调谐激光吸收光谱技术配合偏最小二乘法测量H₂S的体积分数,降低了背景气体的干扰,但这种方法需要建模并进行多次迭代运算。H₂S在紫外(UV)波段具有较强的吸收谱线,且可以避免CO₂、H₂O和CH₄等气体干扰,所以利用紫外吸收光谱技术对H₂S体积分数进行测量具有较高的准确度。Cui等^[17]在190~210 nm波段利用傅里叶变换结合差分吸收光谱技术开展了低体积分数H₂S的测量研究,得到傅里叶变换幅值与H₂S体积分数之间的线性关系,拟合度 $R^2 > 0.99$ 。但190~200 nm波段属于真空紫外波段,紫外线在空气中会受到氧气吸收作用的影响^[18],且噪声影响严重,因此不适合现场测量。邹芸芸等^[19]利用直接吸收法对H₂S的体积分数进行测量,但测得的吸收截面和标准截面相差较大,具有一定的误差。为减小差分吸收光谱快慢波分离和获取气体吸收截面所带来的误差,本文搭建了基于特征波长积分紫外吸收光谱法的H₂S测量平台,研究了特征波长范围积分值与H₂S体积分数之间的线性关系,通过积分法降低噪声的影响并对H₂S体积分数进行定量分析,该方法不需要预先获取H₂S气体的吸收截面,有效地提高了测量准确性,可用于沼气中H₂S体积分数的实时监测。

2 基本原理

2.1 测量原理

根据Beer-Lambert气体吸收定律可知,特定波长光在穿过待测气体介质时因被吸收而发生光强衰减,

透射光强和发射光强的函数关系为

$$A(\lambda) = \ln \frac{I_0(\lambda)}{I(\lambda)} = \sigma(\lambda)CL, \quad (1)$$

式中: $A(\lambda)$ 为吸收度; $I(\lambda)$ 为透射光强; $I_0(\lambda)$ 为发射光强; C 为气体体积分数; L 为光穿过待测气体的光程; $\sigma(\lambda)$ 为气体吸收截面,与压力和温度有关。

由式(1)可知,在温度和压力一定且光程不变时,吸收度与气体的体积分数成正比,因此可以通过测量穿过待测气体的发射光强和透射光强进而建立吸收度和待测气体体积分数之间的线性关系。但由于暗噪声和杂散光的影响,实际测量时往往不能得到很好的拟合曲线,测量过程中得到的吸收曲线包括气体自身特性吸收所产生的快变吸收曲线和因散射造成的随波长缓慢变化的慢变吸收曲线。为了降低环境因素的影响,往往采用差分处理的方式处理紫外吸收特征波段,通过拟合方式将暗噪声和颗粒等环境因素引起的误差分离,只留下包含气体吸收特性的快变吸收曲线^[20]。SG(Savitzky Golay)滤波是一种通过移动窗口进行多项式拟合的常见快慢波分离的方法,它是利用多项式拟合来降低噪声对信号的影响^[21]。如图1所示,H₂S气体的吸收截面在紫外波段是一条变化缓慢的曲线^[22],气体主要吸收信息在低频范围内,该范围内有效信号和噪声信号相互重叠,难以区分。SG滤波法进行差分处理时拟合滤波会将气体吸收信号和噪声一起去掉,导致使用差分处理方法进行体积分数反演时误差较大。

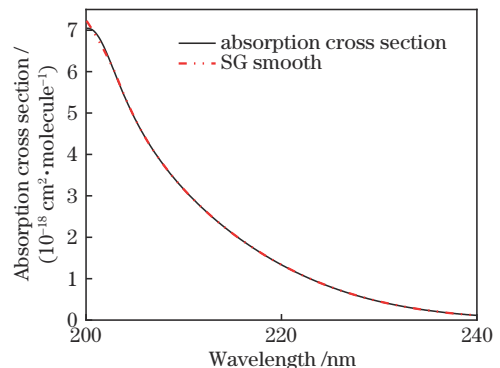


图1 200~240 nm波段H₂S气体吸收截面

Fig. 1 H₂S absorption cross section in 200–240 nm band

根据H₂S在紫外波段吸收截面的分布特点,选择连续波长范围的吸收度值,因为连续波长的吸收度值积分是整个波长范围内的光强信号的平均值,能够降低暗噪声的影响。式(1)可以转变为

$$\int A(\lambda) d\lambda = \int \sigma(\lambda) d\lambda \cdot CL. \quad (2)$$

其中气体吸收截面 $\sigma(\lambda)$ 在波长范围内积分值不变,不随体积分数变化。光程一定时吸收度在一定波长范围内的积分值与体积分数成正比,因此只需对测量得到的吸收曲线进行积分便可反演出气体体积分数。

2.2 实验装置

H_2S 测量装置原理图如图 2 所示, 装置主要由紫外光源、光谱仪和气体吸收池组成。紫外光源为氘灯, 配有散热风扇以降低氘灯发热造成的影响, 保证连续输出光强的稳定性。光谱仪型号选择 Mayapro 2000, 测量光谱范围为 200~340 nm, 分辨率为 0.5 nm。气体吸收池光程根据实际沼气中 H_2S 体积分数范围而确定, 短光程可以保证更高体积分数的气体测量范围, 而长光程可以保证在低体积分数时测量准确性更高。对选取的光源和光谱仪性能进行分析, 确定光程长度为 60 cm。为了减小吸收池长度, 在吸收池一端安置反射镜, 采用单次反射的方式, 使最终设计得到的吸收池长度仅为 30 cm。光源、光谱仪和气体吸收池通过光纤连接, 氘灯发出的光束通过准直透镜进入吸收池, 经反射镜反射后通过聚焦透镜进入光谱仪, 光谱仪将收集的光谱信号通过 USB 数据线传输到上位机进行体积分数处理和分析。用于配置不同体积分数 H_2S 的标气体积分数为 2000×10^{-6} , 稀释气体为 N_2 , 利用两台质量流量计配制不同体积分数的标气并通入吸收池进行系统性能测试。

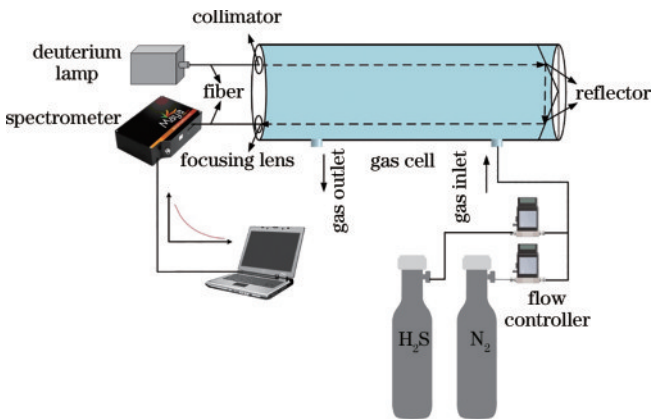


图 2 基于紫外吸收光谱的 H_2S 体积分数测量装置图

Fig. 2 Diagram of the H_2S volume fraction measurement device based on UV absorption spectroscopy

3 分析与讨论

根据式(2)反演 H_2S 体积分数需要得到吸收度曲线, 即记录未通入气体和通入气体在吸收池中的光强信号。通过质量流量计配制不同体积分数的 H_2S 气体, 在每次 H_2S 通入气体吸收池前, 先通入 N_2 进行清洗, 然后分别记录 H_2S 通入前的光强和通入后的透射光强, 通过式(1)计算得到吸收度曲线, 如图 3 所示。由图 3 可知, H_2S 主要吸收曲线在 200~240 nm 波段范围内, 气体体积分数越大吸收度曲线越高, 但体积分数较大时吸收度在 200 nm 附近波段变化不明显, 出现了饱和情况, 而较小的体积分数 H_2S 在 230~240 nm 波段吸收度很小, 不容易和噪声区分开。

运用连续波长积分法的关键在于选择合适的特征

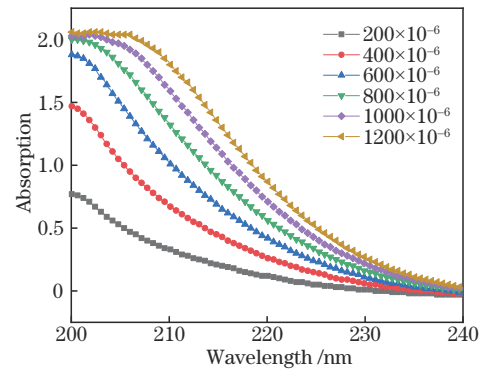


图 3 不同体积分数 H_2S 吸收度曲线

Fig. 3 Absorbance curves for different volume fractions of H_2S

波段, 为了获取更多的气体有效信号, 选取的范围应该越多越好。此外, 根据得到的吸收度曲线可知, 光谱仪在 200 nm 附近的波长范围得到的光强信号不稳定, 并且当气体体积分数较低时, 在 230~240 nm 波长范围吸收度较小, 综合考虑选择 210~230 nm 特征波段范围作为 H_2S 体积分数反演波段。通过积分计算得到不同体积分数对应的积分值并将积分值与对应气体体积分数做线性拟合分析。通过线性拟合可知, 此范围内连续波长特征值与体积分数拟合较好, 拟合后 $R^2 > 0.999$, 表明连续波长积分可以很好地表示 H_2S 的体积分数值, H_2S 的体积分数反演表达式为

$$y = 0.01613x - 0.396. \quad (3)$$

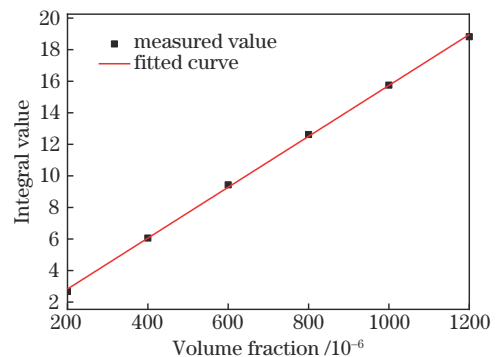


图 4 不同体积分数和积分值之间的线性拟合

Fig. 4 Linear fitting between different volume fractions and integral values

在实际测量时, 通过获取待测 H_2S 气体的吸收度曲线, 可以计算得到其在 210~230 nm 波段范围内的光强积分值, 然后代入到式(3)中即可计算出体积分数值。为了验证方法的准确性, 首先用 N_2 对气体吸收池进行吹扫, 然后通入不同体积分数的 H_2S 气体进行测量, 测量结果如表 1 所示, 测量得到的体积分数值与标准体积分数值较吻合, 最大相对误差为 3.1%。测量体积分数与标准体积分数值线性拟合较好, $R^2 = 0.998$ 。

4 仪器的应用

基于以上工作制备了 H_2S 体积分数在线监测仪器,

表 1 H₂S 体积分数的测量结果

Table 1 Measurement results of H₂S volume fraction

Standard volume fraction / 10 ⁻⁶	Measured volume fraction / 10 ⁻⁶	Relative error / %
200	193.81	3.10
400	403.97	0.10
600	615.56	2.60
800	812.99	1.50
1000	1005.71	0.57
1200	1182.03	1.50

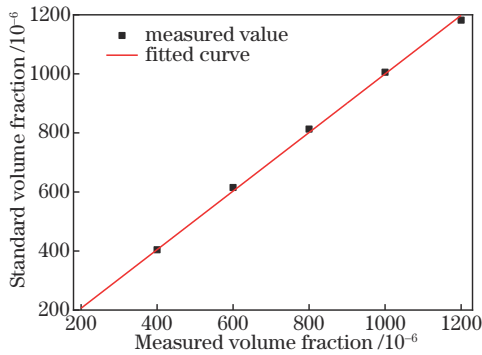


图 5 测量体积分数与标气体积分数之间的线性拟合

Fig. 5 Linear fitting of measured volume fraction and standard volume fraction

如图 6 所示,仪器主要包括电源模块、氘灯光源、气体吸收池和光谱仪,通过光纤和转接头集成。现场测量中打开电源开关,将气体通过软管接入外部进气口就能开始测量,计算机能够实时显示和记录 H₂S 体积分数的变化。为了提高测量的稳定性和准确性,在实验室中观察未通入气体时光源发出的光强信号变化,选择 215 nm 处的光强信号记录,如图 7 所示,发现在 3 h 内光强变化较小,比较稳定,波动程度约 0.5%。配制不同体积分数的 H₂S 通入仪器中进行测试,通入气体的流速约 1 L/min,根据图 8 实验结果可知,仪器测量最大误差约为 3%,稳定性较好,波动偏差在 $\pm 1 \times 10^{-6}$ 范围内。

在宁波餐厨厌氧消化工程中使用此套装备进行实验,如图 9 所示,城市产生的餐厨垃圾经过预处理后进入厌氧罐进行厌氧发酵,罐内温度约 35~40 °C,产生的沼气通过管路运输,经过冷凝干燥后进入脱硫塔,经过脱硫处理后进入储气罐收集用于燃烧。仪器安装在冷凝罐上阀门处,开启微型泵抽取空气对吸收池进行吹扫,记录此时的光谱 I_0 。然后开启并调节阀门使流量约为 1 L/min,通过软管将沼气引出并接入进气口,测得的数据通过计算机进行在线显示,进行实时的 H₂S 体积分数连续测量。现场环境温度等因素可能会使记录的 I_0 发生变化,因此采用现场的便携式沼气分析仪 (Gasboard-3200 Plus, 湖北锐意自控系统有限公司,武汉) 进行结果对比,如图 10 所示。利用电化学方式进行 H₂S 体积分数测量,现场每隔 20 min 测量一次,待仪

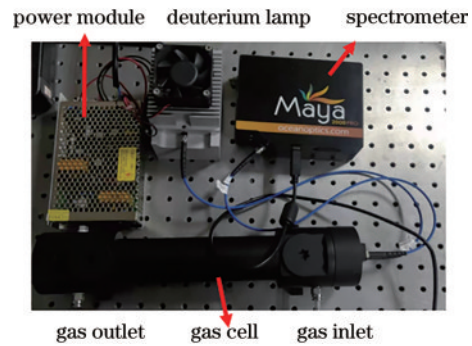


图 6 H₂S 测量装置内部图和外部图

Fig. 6 Internal and external drawing of H₂S measurement device

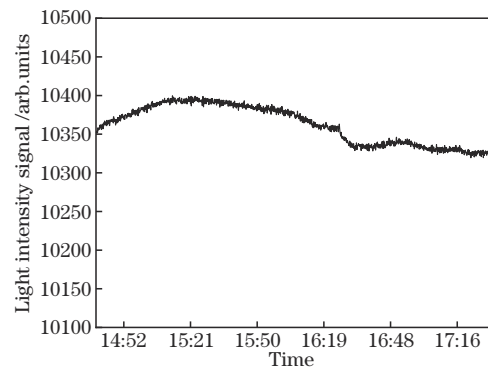


图 7 215 nm 处光强信号变化曲线

Fig. 7 Variation curve of light intensity signal at 215 nm

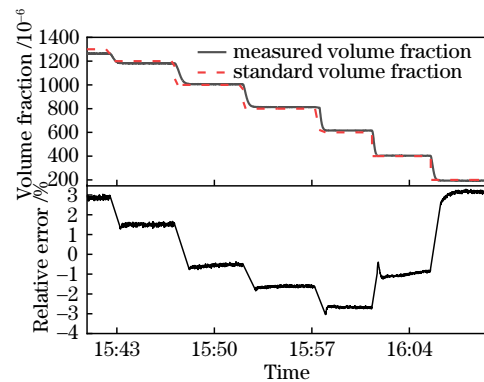


图 8 H₂S 仪器测量体积分数和相对误差

Fig. 8 Volume fraction and relative error measured by H₂S instrument

器示数稳定后记录数据。

现场沼气中 H₂S 气体体积分数测量结果如图 11 所

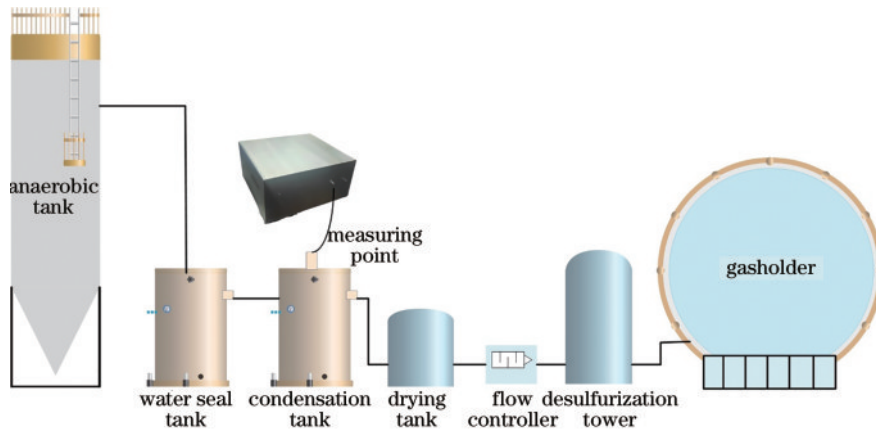


图 9 现场沼气运输和仪器安装示意图

Fig. 9 Diagram of on-site biogas transportation and instrument installation



图 10 现场仪器安装测量示意图和便携式仪器图
Fig. 10 Diagram of on-site instrument installation and portable instrument

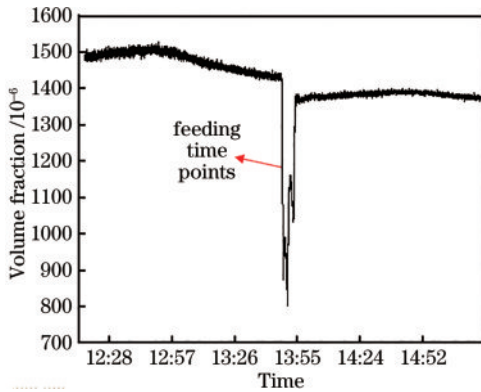


图 11 现场沼气中的 H₂S 体积分数变化
Fig. 11 H₂S volume fraction change in on-site biogas

示,连续测量时间约 3 h,在进料前工况中 H₂S 平均体积分数约为 1438×10^{-6} , H₂S 体积分数缓慢上升后又缓慢下降。在 13:30 左右进料,因为打开阀门时,空气进入厌氧罐体内导致罐内压力发生变化,测量得到的 H₂S 体积分数下降。待进料完成后, H₂S 体积分数迅速上升并恢复到稳定状态,在进料后工况中 H₂S 平均体积分数为 1374×10^{-6} 。根据测量结果,仪器能够及时反映出现场沼气中 H₂S 的体积分数变化,可以用于推断现场的工况变化。现场便携式沼气分析仪测得的结果与仪器测得

的结果对比如表 2 所示,相对平均误差较小。因为两个仪器测量的不是同一个时间点的 H₂S 体积分数,会造成一定的误差,测量过程中环境条件随时间的变化对气灯和光谱仪也有一定的影响,这与仪器性能稳定性相关联,但误差在允许范围内。同时便携式仪器需要人工进行取样操作,不能反映 H₂S 在时间上的体积分数变化。

表 2 便携式仪器和在线式仪器测量体积分数结果对比
Table 2 Comparison of the volume fraction measured by portable instrument and online instrument

No.	Volume fraction measured by portable instrument / 10^{-6}	Volume fraction measured by online instrument / 10^{-6}	Relative error
1	1384	1472	0.05978
2	1401	1423	0.01546
3	1321	1367	0.03365
4	1383	1323	-0.04535
5	1386	1258	-0.10175
6	1273	1189	-0.07065
7	1353	1246	-0.08587
8	1277	1176	-0.08588
9	1165	1171	0.00512

5 结 论

本文选择紫外波段 210~230 nm 作为特征波长范围,利用连续波长积分法得到 H₂S 体积分数和在范围波长内吸收度积分值的拟合曲线,拟合度 $R^2 > 0.999$,能够较好地实现 H₂S 体积分数反演。选择合适的紫外测量模块,实现了 H₂S 体积分数的在线监测。在实验室中配制不同体积分数 ($200 \times 10^{-6} \sim 1200 \times 10^{-6}$) 的 H₂S 气体进行测量,测量平均误差小于 3%,稳定性较好。将仪器装置在工程现场进行安装实验,有效地避免了沼气中环境气体对测量的影响。对比便携式沼气分析仪的测量结果,相对平均误差约 3%。本装置能够更快速地测得 H₂S 气体体积分数,实现厌氧消化中 H₂S 的体积分数变化监测,指导现场脱硫工艺的优化,

也为之后测量 H₂S 更低体积分数的方法提供借鉴。

参 考 文 献

- [1] Hafid H S, Rahman N A A, Shah U K M, et al. Feasibility of using kitchen waste as future substrate for bioethanol production: a review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 74: 671-686.
- [2] Saleem R, Ermgassen E K H J, Kim M H, et al. Environmental and health impacts of using food waste as animal feed: a comparative analysis of food waste management options[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 140: 871-880.
- [3] 秦丞志, 张奇, 赵建伟, 等. 餐厨垃圾干式厌氧发酵技术研究进展及展望[J]. *现代化工*, 2022, 42(2): 1-5, 9.
Qin C Z, Zhang Q, Zhao J W, et al. Research progress and prospect in dry anaerobic fermentation technology for kitchen waste[J]. *Modern Chemical Industry*, 2022, 42(2): 1-5, 9.
- [4] Jha P, Schmidt S. Reappraisal of chemical interference in anaerobic digestion processes[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 75: 954-971.
- [5] Ge Y D, Tao J Y, Wang Z, et al. Modification of anaerobic digestion model No. 1 with Machine learning models towards applicable and accurate simulation of biomass anaerobic digestion[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 454: 140369.
- [6] 姚彬, 张文存, 朱瑞龙. 生物质能源制备合成气的技术探讨及研究现状[J]. *现代化工*, 2021, 41(5): 54-58.
Yao B, Zhang W C, Zhu R L. Technical discussion and research status of syngas from biomass energy[J]. *Modern Chemical Industry*, 2021, 41(5): 54-58.
- [7] Tian G L, Xi J Y, Yeung M, et al. Characteristics and mechanisms of H₂S production in anaerobic digestion of food waste[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 724: 137977.
- [8] 韩文彪, 王毅琪, 徐霞, 等. 沼气提纯净化与高值利用技术研究进展[J]. *中国沼气*, 2017, 35(5): 57-61.
Han W B, Wang Y Q, Xu X, et al. Progress on purification and high value application of biogas[J]. *China Biogas*, 2017, 35(5): 57-61.
- [9] 曾永达, 黄国家, 李悦. 硫化氢气体检测方法及其传感器研究发展现状[J]. *理化检验-化学分册*, 2019, 55(7): 827-832.
Zeng Y D, Huang G J, Li Y. Research development status of hydrogen sulfide gas detection methods and sensors[J]. *Physical Testing and Chemical Analysis (Part B: Chemical Analysis)*, 2019, 55(7): 827-832.
- [10] 于文双, 刘玲, 郭响, 等. H₂S 电化学气体传感器的敏感特性评价[J]. *上海大学学报(自然科学版)*, 2015, 21(1): 46-53.
Yu W S, Liu L, Guo Y, et al. Sensitive characteristics evaluation of electrochemical H₂S gas sensor[J]. *Journal of Shanghai University (Natural Science Edition)*, 2015, 21(1): 46-53.
- [11] 李仲, 詹徽, 罗圣洁, 等. 天然气中 H₂S 在线分析 TDLAS 技术的应用前景[J]. *石油与天然气化工*, 2021, 50(4): 120-123.
Li Z, Zhan H, Luo S J, et al. Application prospect of TDLAS technology for online analysis of natural gas[J]. *Chemical Engineering of Oil & Gas*, 2021, 50(4): 120-123.
- [12] Zou J S, Wang F. Simultaneous measurement of SO₂ and NO₂ concentration using an optical fiber-based LP-DOAS system[J]. *Chinese Optics Letters*, 2020, 18(2): 021201.
- [13] Shao L G, Fang B, Zheng F, et al. Simultaneous detection of atmospheric CO and CH₄ based on TDLAS using a single 2.3 μm DFB laser[J]. *Spectrochimica Acta. Part A, Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2019, 222: 117118.
- [14] 斯贝贝, 刘家祥, 司赶上, 等. 基于反谐振空芯光纤的甲烷气体检测[J]. *光学学报*, 2022, 42(19): 1906003.
Si B B, Liu J X, Si G S, et al. Methane gas detection based on anti-resonant hollow-core fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(19): 1906003.
- [15] 孙柳雅, 牛明生, 陈加雪, 等. 基于光声光谱技术的 NO₂ 探测[J]. *中国激光*, 2022, 49(23): 2310002.
Sun L Y, Niu M S, Chen J X, et al. Nitrogen dioxide detection based on photoacoustic spectroscopy[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(23): 2310002.
- [16] 杨雅涵, 李国林, 李小鹏, 等. 基于 TDLAS 技术的天然气中痕量硫化氢分析的 PLS 算法应用[J]. *光子学报*, 2017, 46(2): 0230002.
Yang Y H, Li G L, Li X P, et al. Partial least squares algorithm application in TDLAS based trace H₂S analyses in natural gas[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(2): 0230002.
- [17] Cui Z L, Zhang X X, Cheng Z, et al. Quantitative analysis of SO₂, H₂S and CS₂ mixed gases based on ultraviolet differential absorption spectrometry[J]. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2019, 215: 187-195.
- [18] 齐润泽, 张锦龙, 吴佳莉, 等. 极紫外-真空紫外薄膜光学元件研究[J]. *光学学报*, 2022, 42(11): 1134003.
Qi R Z, Zhang J L, Wu J L, et al. Thin film optical elements in extreme ultraviolet and vacuum ultraviolet[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(11): 1134003.
- [19] 邹芸芸, 蔡小舒, 赵琴, 等. 紫外吸收光谱法监测硫化氢浓度的实验研究[J]. *环境工程*, 2009, 27(1): 89-92.
Zou Y Y, Cai X S, Zhao Q, et al. Study on measuring concentration of H₂S with UV absorption spectrometry[J]. *Environmental Engineering*, 2009, 27(1): 89-92.
- [20] 卢慧, 王一红, 周宾, 等. 基于光强免校准的差分吸收光谱反演算法及其在 NO 测量中的应用[J]. *应用激光*, 2022, 42(4): 140-146.
Lu H, Wang Y H, Zhou B, et al. Calibration-free retrieval algorithm of DOAS and its application in NO measurement[J]. *Applied Laser*, 2022, 42(4): 140-146.
- [21] Candan Ç, Inan H. A unified framework for derivation and implementation of Savitzky-Golay filters[J]. *Signal Processing*, 2014, 104: 203-211.
- [22] Grosch H, Fateev A, Clausen S. UV absorption cross-sections of selected sulfur-containing compounds at temperatures up to 500 °C [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2015, 154: 28-34.