

文章编号 1004-924X(2024)05-0670-08

煤热解中痕量乙烯在线激光吸收光谱检测

段 政¹, 孟星星¹, 李凯亮¹, 孙小聪¹, 田亚莉¹, 官 廷¹,
李传亮¹, 邱选兵^{1*}, 蔡廷栋²

(1. 太原科技大学 应用科学学院, 山西省精密测量与在线检测装备工程研究中心,
山西省光场调控与融合应用技术创新中心, 山西 太原 030024;
2. 江苏师范大学 物理与电子工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘要:为了实现煤热解过程中痕量乙烯(C_2H_4)标识气体的在线识别与检测, 结合波长调制与长光程技术, 搭建了煤热解乙烯在线激光吸收光谱检测装置。采用中心波长为 1 620 nm 通信波段 DFB 激光器作为激光光源, 有效光程为 15 m 的多光程吸收池为样品吸收池, 利用 SR830 进行波长解调, 通过二次谐波信号反演得到乙烯浓度。使用高精度流量控制器, 利用高纯氮气稀释乙烯配比, 制备得到 10×10^{-6} 到 90×10^{-6} 的标准乙烯样气, 其线性拟合的相关系数 R^2 为 0.998 9; 对浓度为 20×10^{-6} 的乙烯进行连续 4 000 s 的 Allan 方差分析, 实验结果表明, 检测极限为 121×10^{-9} 。为了研究不同气体氛围下煤热解过程中乙烯浓度的演化规律, 控制气体流速为 150 mL/min, 分别在氮气、空气以及合成空气中对乙烯标识气体的释放过程进行热重分析实验。研究发现, 当温度小于 500 °C 时, 3 种气体环境下乙烯释放量较少且基本一致, 当温度在 500~700 °C 时, 氮气环境中乙烯释放量要远高于其他两种气体, 但空气中乙烯释放的增速最快, 最大释放量约为 40×10^{-6} , 温度高于 700 °C 时乙烯释放量均开始减少。这一结果为进一步探索煤热解中乙烯的生成机理提供了理论和实验基础。

关键词: 可调谐半导体激光吸收光谱技术; 乙烯; Allan 方差; 波长调制; 煤热解

中图分类号: O439 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20243205.0670

Online laser absorption spectroscopy detection of trace ethylene in coal pyrolysis

DUAN Zheng¹, MENG Xingxing¹, LI Kailiang¹, SUN Xiaocong¹, TIAN Yali¹, GONG Ting¹,
LI Chuanliang¹, QIU Xuanbing^{1*}, CAI Tingdong²

(1. School of Applied Science, Taiyuan University of Science and Technology, Shanxi Precision Measurement and Online Testing Equipment Engineering Research Center, Shanxi Province Light Field Regulation and Integration Application Technology Innovation Center, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China;
2. College of Physics and Electronic Engineering, Jiangsu Normal University, Xuzhou 221116, China)
* Corresponding author, E-mail: qiuxb@tyust.edu.cn

收稿日期: 2023-10-05; 修订日期: 2023-10-27.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. U1810129, No. 52076145, No. 12304403); 山西省留学人员科技活动项目(No. 20230031); 山西省省筹资金资助回国留学人员科研资助项目(No. 2023-151); 山西省基础研究计划资助项目(No. 202203021222204); 太原科技大学科研启动资助基金(No. 20222124, No. 20232035)

Abstract: To achieve the online identification and detection of trace ethylene gas during coal pyrolysis, we constructed a vinyl gas concentration detection system using tunable diode laser absorption spectroscopy (TDLAS). This system combines wavelength modulation with long optical path technology. We employed a distributed feedback (DFB) laser with a central wavelength of 1 620 nm, situated in the communication band, and a 15-meter long optical path cell for sample absorption. The SR830 was used for wavelength demodulation, enabling us to determine ethylene concentrations through second harmonic signal inversion. We used high-precision flow controllers to dilute ethylene with high-purity nitrogen gas, creating standard ethylene gas samples with concentrations ranging from 10×10^{-6} to 90×10^{-6} , achieving a linear fitting correlation coefficient R^2 of 0.998 9. An Allan variance analysis experiment on a 20ppm ethylene sample over 4 000 s determined the minimum detection limit to be 121×10^{-9} . To examine the evolution of ethylene concentration in various gas environments during coal pyrolysis, we maintained a gas flow rate at 150 mL/min. We analyzed the online release process of identified ethylene gas in nitrogen, air, and synthetic air (22% oxygen, 78% nitrogen) environments. Our findings revealed that below 500 °C, ethylene release in all three environments was low and consistent. Between 500 to 700 °C, ethylene release in a nitrogen environment was notably higher than in the other two gases, with the release rate in air being the fastest, peaking at about 40ppm. Above 700 °C, ethylene release in all environments began to decline. These results provide a critical scientific basis for further exploration into the mechanism of ethylene generation during coal pyrolysis, the refinement of coal pyrolysis techniques, the enhancement of coal utilization efficiency, and the advancement of environmental preservation.

Key words: tunable diode laser absorption spectroscopy; ethylene; allan variance; wavelength modulation

1 引 言

煤炭作为全球重要化石燃料,其发电量约占全球电力的 40%^[1]。近几十年来,煤炭需求不断增加,然而其燃烧利用效率低,且燃烧尾气对空气污染严重。煤热解作为一种较为有效的煤炭转化技术,19 世纪以来得到了国内外学者的广泛关注。煤热解工艺可以产生固体燃料半焦,含有苯、酚等重要化工原料的煤焦油以及用作燃气的煤气,是实现煤炭分级高效、清洁利用的一种十分具有潜力的工艺^[2-3]。但热解过程中还会释放出部分有害气体,其中,影响大气化学特性和臭氧(O₃)生成的重要气体——乙烯在一定程度上会污染环境;另外,乙烯易燃,与空气混合可生成易爆物质,常作为标识气体,以预示煤炭自燃。因此,煤热解过程中开展乙烯浓度的检测对环境保护、安全生产意义重大^[4]。

传统的乙烯检测方法包括气相色谱仪和化学分析法。气相色谱法是一种动态方法,将气

体(或蒸汽)的混合物分离出来^[5],精度高、检测组分多,但其仪器复杂、操作难度高、响应时间长,且需要对样品预处理。化学分析法可以实现气体样品的采样、分析和检测^[6],但测量气体单一,且容易受相同化学性质的气体组分干扰,无法实现对乙烯的实时精准监测。因此,可调制半导体激光吸收光谱技术(Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy, TDLAS)在痕量气体检测方面具有选择性好、灵敏度高,可实现原位实时非侵入式测量,无需任何预处理样品等优点^[7-10],因此成为煤热解乙烯标识气体在线检测装置的最佳选择。2012 年,潘卫东^[11]等研制了 White 型气体池的 TDLAS 检测系统,结合波长技术实现了检测极限为 10×10^{-6} 的乙烯测量。2015 年,Wei^[12]等以近红外 1 620 nm 为中心波长,设计了 Herriott 型气体池的乙烯气体检测传感器,精度达到 10×10^{-6} ,基本满足煤矿加速氧化阶段的自燃预警。2017 年,梁博^[13]结合波长调制技术,通过优化调制频率和调制系数,将油

井下乙烯体积分数的检测极限降低至 10×10^{-6} 。

为了探索煤热解过程中乙烯标识的演化规律,本文结合热重法和 TDLAS 技术,提出了一种热重-可调谐半导体激光吸收光谱技术(TG-TDLAS)技术,用于煤热解乙烯气体浓度的在线测量。由于山东烟煤具有高发热量、低硫含量、可磨性好、可燃性强等优点,本文对山东烟煤的热解特性及动力学进行研究,最终得到不同气氛下煤样各温度阶段的气相活化能和频率因子。通过对比分析,低阶煤的热解特性和动力学与其复杂的化学结构密切相关。

2 检测原理与装置

2.1 波长调制原理

根据 Lambert-Beer 定律,当激光波长扫过待测气体吸收线时,光强的衰减量与待测浓度成正比^[14-15]。为了避免低频信号的干扰,可以将较高频率 f 的正弦调制信号叠加到低频扫描信号上作为激光器的驱动信号,通过获取激光器的出射光的瞬时频率和光强,位于吸收谱线中心的波长调制二次谐波信号 S_{2f} 可以表达为:

$$S_{2f} \approx -GI_0 P \chi L S H_2 / 2, \quad (1)$$

其中: G 是光电探测系统的增益, I_0 是平均光强, P

为待测气体的环境压强, x 为待测气体的摩尔体积分, L 为通过待测气体的有效光程, S 为谱线的吸收强度, H_2 是 2 次哈密顿量。由式(1)可知,二次谐波信号受到待测气体浓度、吸收强度、有效光程以及压强等参数的影响。当 G, P, x, S 以及 L 为常数时,待测气体的体积分数会与解调出的各次谐波幅值成正比例关系。

2.2 检测装置

如图 1 所示,检测装置是由驱动电路控制系统、吸收光谱测量以及煤热解气体环境模拟 3 部分组成。为了使激光与乙烯的吸收线对应,装置采用中心波长为 $1.62 \mu\text{m}$ 的分布式反馈激光器,设置工作温度为 20°C ,其驱动电流由高频正弦信号和扫描信号通过加法器叠加而成。为了得到最佳的 $2f$ 信号的信噪比,利用高精度锁相放大器确定正弦信号的频率为 1.2956 kHz ,调制幅度为 600 mV ;扫描信号频率为 1 Hz ,扫描范围为 200 mV 。激光采用光纤准直器对激光准直聚焦,然后输送到多光程吸收池中。多光程吸收池基长 0.28 m ,反射 55 次,有效光程为 15.4 m 。它输出的微弱光信号由光电探测器接收并且转换成电信号,对此信号进行前置放大后输入锁相放大器进行解调处理,二次谐波信号通过采集卡进行数据采集,最后对数据处理

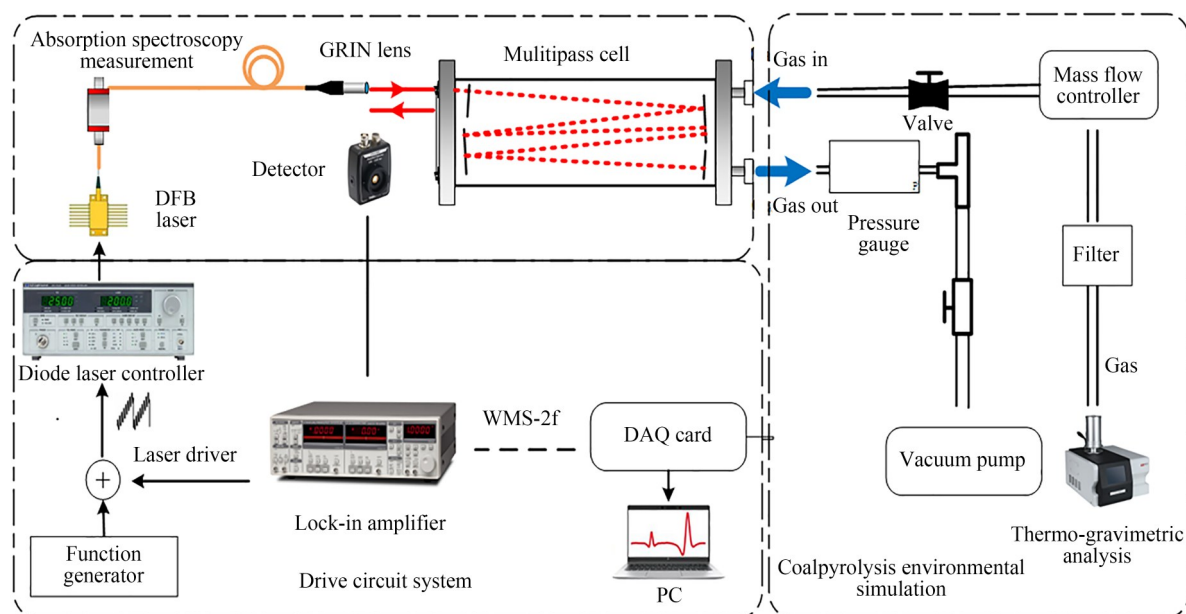


图 1 乙烯检测装置原理

Fig. 1 Principle of ethylene detection devices

得出乙烯浓度。

为了研究煤热解过程中乙烯标识气体的演化规律,构建煤热解气体环境模拟装置。使用热重分析仪对待测煤样进行加热,并通过过滤装置过滤掉释放气体中的水、烟尘等杂质,随后通过气体流量计后进入多光程吸收池,多光程吸收池内待测气体压强通过数字气压计监测。

3 实验与结果分析

3.1 吸收谱线的选择

为了提高煤热解乙烯标识气体的在线检测精度,在选择最佳吸收带的同时需要避免相邻谱线以及其他气体成分的干扰。由于近红外波段激光器制备技术更为成熟,价格低廉,性价比高,因此,实验选取 1 620.05 nm 的吸收线对乙烯浓度进行测定。文献[16]表明,尽管 1 620.05 nm 不是乙烯的最强吸收谱线,但此波段的吸收谱线具有较好的线型和较高的吸收强度,且煤热解产生的其他气体,如 CO , CO_2 , CH_4 等在此波段的吸收相对较弱,对乙烯浓度探测的干扰较弱。

3.2 检测装置校准与 Allan 方差

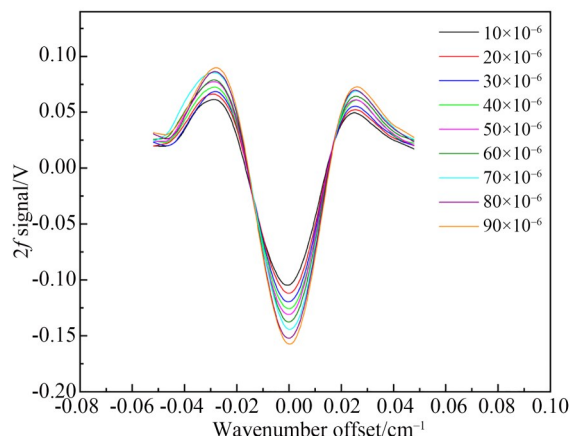
为了获得不同标准浓度的乙烯以校准检测装置,使用氮气将标准浓度为 100×10^{-6} 的乙烯进行稀释。当压强为 14.665 kPa 时,通过控制混合气体中氮气的含量配置了 9 种不同浓度的气体。在多光程吸收池中通入浓度为 10×10^{-6} 到 90×10^{-6} 的乙烯进行测量,得到不同浓度下的乙烯气体吸收信号,如图 2(a) 所示。当浓度为 10×10^{-6} 时,信噪比为 48.327。

当有效光程、气体压强以及吸收强度等参数一定时,气体浓度和二次谐波信号(WMS-2f)的幅值呈线性关系,如图 2(b) 所示。其线性拟合公式为:

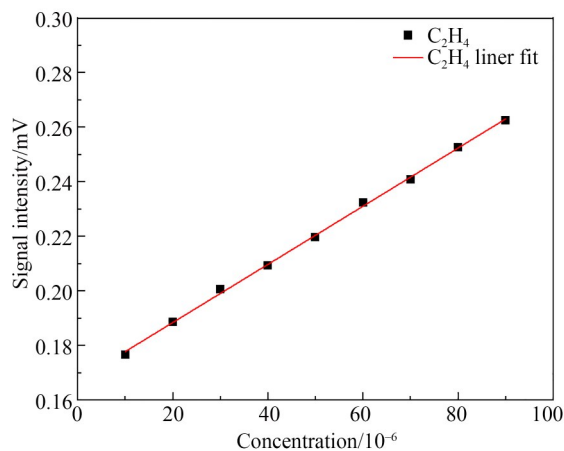
$$y = 0.00107x + 0.16699, \quad (2)$$

其中: x 为待测气体浓度, y 为待测气体的二次谐波信号幅值。利用所采集的二次谐波信号幅值来反演乙烯浓度变化。如图 2(b) 所示,其相关系数 R^2 为 0.9989,有着良好的线性度。

为了验证装置的稳定性,通过 Allan 方差^[17-18]对该装置的最低检测限和稳定性进行分析。实验对浓度为 20×10^{-6} 的乙烯进行 4 000 s 的连续测量,采集到 4 000 个峰峰值,将采集到的数据按照时间间隔进行排序。对于每个时刻,计算与前一时刻的时差,然后计算所有时差的平均值,将平均时差值按照不同的时间间隔进行分组,对于每个时间间隔,计算平均时差值的方差。分析结果如图 3 所示,对于乙烯气体检测,在 78 s 前的信号基本是线性的,该装置在 78 s 达到最佳测量时间,此时检测极限可达到 121×10^{-9} 。



(a) 在 $10 \times 10^{-6} \sim 90 \times 10^{-6}$ 乙烯的光谱吸收曲线
(a) Spectral absorption curve of ethylene in the range of $10 \times 10^{-6} \sim 90 \times 10^{-6}$



(b) 乙烯信号强度随浓度变化的线性关系
(b) Linear relationship between ethylene signal intensity and concentration variations

图2 校准结果

Fig. 2 Calibration results

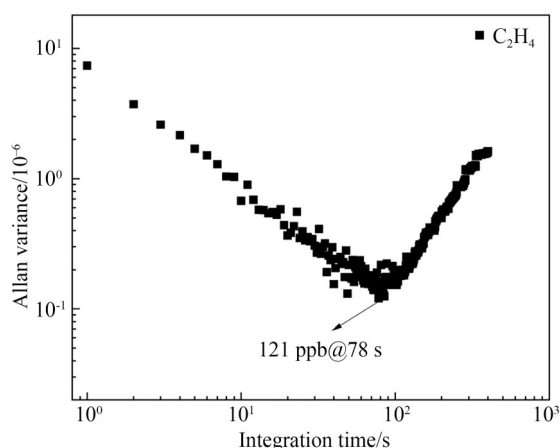


图3 乙烯的Allan方差分析结果

Fig. 3 Results of Allan variance analysis for ethylene

3.3 煤热解过程中乙烯在线测量

检测装置如图4所示,实验选用TGA-1型热重分析仪,通过改装的炉盖外接到多光程吸收池,将TGA样品加热产生的气体通入多光程吸收池中检测乙烯浓度。煤样品用量在310 mg左右,温度为室温约为850 ℃,控制气体流速为150 mL/min,在氮气、空气以及合成空气(22%氧气,78%氮气)3种不同气氛环境下进行实验。表1给出了煤样的工业、元素分析结果。

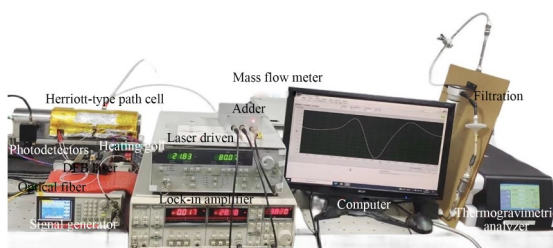


图4 煤热解乙烯检测装置

Fig. 4 Coal pyrolysis ethylene detection devices

表1 山东煤样的工业分析和元素分析

Tab. 1 Industrial analysis and elemental analysis of Shandong coal samples

工业分析	全硫-Std	灰分-Aad	挥发分-Vdaf
质量分数/%	6.35	31.80	14.18
元素分析(daf)	碳-C	氢-H	氮-N
质量分数/%	52.69	2.58	0.72

使用电子天平称取质量约为310 mg的山东烟煤,放到TGA-1型热重分析仪的坩埚中,启动控制程序,并设定相应参数。其中,加温过程分为两个阶段:第一阶段,温度为室温~100 ℃,每组实验用不同气氛在流量为150 mL/min的流速下吹扫30 min;第二阶段,温度为100~850 ℃,升温速度稳定在30 ℃/min,气体流量仍为150 mL/min,热解最终温度为850 ℃。实验采用粒度大小为80目的山东烟煤在3种不同气氛下进行3组实验。结果如图5所示,不同气氛环境下山东烟煤随着温度的升高,乙烯的释放量有着显著的变化。3种氛围下,温度为530 ℃同时进入快速热解阶段,氮气中乙烯释放量在670 ℃达到最大,约为 110×10^{-6} ;空气和合成空气氛围下,乙烯释放量在530~670 ℃基本保持不变,最大分别为 40×10^{-6} 和 30×10^{-6} 。在温度500 ℃以内3种气体中乙烯释放量较少且基本一致,温度达到530 ℃,煤热解进入快速热解阶段,然而,氮气中乙烯的释放量要远高于其他两种气体,高于670 ℃后,乙烯释放量均开始减少,但氮气中乙烯的释放量仍高于其他两种气体。

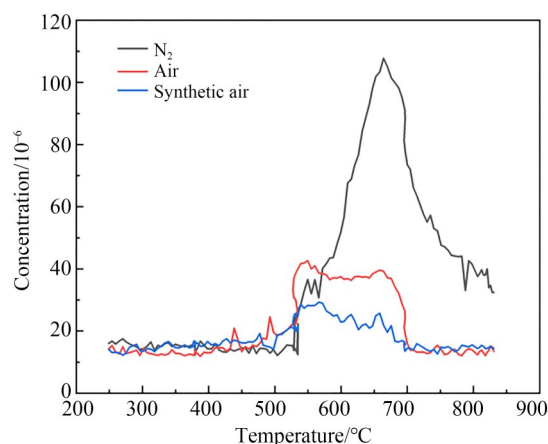


图5 山东烟煤在3种气体中的乙烯释放量

Fig. 5 Ethylene emission from Shandong bituminous coal in three different gases

通过对比不同气氛中的失重比,如图6所示,在室温到300 ℃之间,山东烟煤在不同气氛下的失重比基本一致,说明此时还未发生化学反应,同时检测装置也没有探测到乙烯气体。

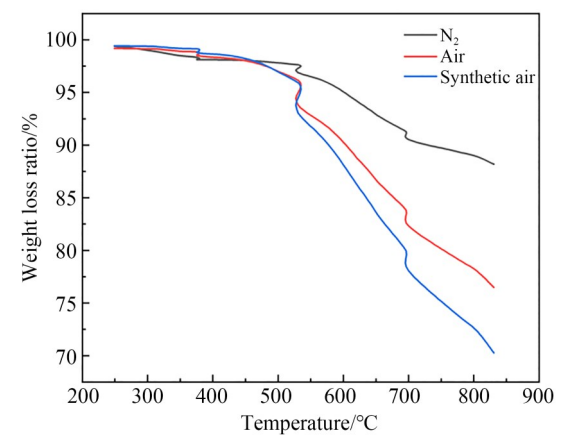


图 6 山东烟煤样品在 3 种气氛下的失重比
Fig. 6 Weight loss ratio of Shandong bituminous coal sample in three gases

在到达 450 ℃后,氮气中的失重比开始小于其他两种气氛,且失重速率也小于其他两种气氛。其原因可能是由于空气和合成空气中氧气在高温下与煤样发生了氧化反应,产生了 CO, CH₄ 以及 CO₂ 等气体,导致其失重比和失重率偏大。

根据文献[19],计算了不同气氛下煤样在加热速率为 30 ℃/min 的活化能和频率因子,如表 2 所示。由于煤样的热解反应主要在快速热解阶段,因此在不同气氛下煤样快速阶段的气相活化能和频率因子均高于缓慢热解阶段和快速热解阶段。在快速热解阶段,发生了许多降解和分解反应,释放了大量的焦油和轻气体,特别是大分子碎片的反应需要更多活化能。煤样在空气下热解反应活性高,在氮气下反应活性低。

参考文献:

[1] 2022 年太阳和风力发电占世界电力创纪录的 12% [J]. 中外能源, 2023, 28(8): 100.
In 2022, solar and wind power generation accounted for a record 12% of the world's electricity[J]. *Sino-Global Energy*, 2023, 28(8): 100. (in Chinese)
[2] 李春刚, 安梅. 基于热重-质谱联用技术的新疆准东煤热解特性研究[J]. 宁夏工程技术, 2023, 22 (3): 193-198.
LI CH G, AN M. Study on pyrolysis characteristics of Xinjiang Zhundong coal based on TG-MS analysis

表 2 山东烟煤样在 30 ℃/min 加热速率下的热解动力学参数

Tab. 2 Thermal decomposition kinetic parameters of Shandong bituminous coal sample at heating rate of 30 ℃/min

不同气氛	阶段温度 T /℃	活化能 E /(kJ·mol ⁻¹)	频率因子 A /min ⁻¹	相关系数 R ²
氮气	136.4—426.3	5 624.91	8.94	0.988
	426.3—535	4 448.87	7.48	0.951
	535—832.7	29 844.38	552.34	0.985
合成空气	136—379	3 088.02	1.45	0.925
	379—535	12 960.99	10.9	0.915
	535—820.6	29 534.22	466.297	0.991
空气	134.7—380	1 890.68	2.48	0.962
	380—532.2	9 358.29	7.59	0.908
	532.2—825.3	27 575.90	368.95	0.986

4 结 论

本文选择 1 620.05 nm 附近的吸收线为乙烯分子吸收谱线,搭建了一套基于 TDLAS 技术的煤热解痕量气体乙烯检测装置。结合波长调制和锁相放大技术提高了该装置的检测精度与稳定性,标定实验和 Allan 方差分析表明,在各种浓度的乙烯气体中,二次谐波信号的幅值表现出很好的线性关系,其最低检测极限可达到 121×10⁻⁹。对比分析了不同气体氛围下山东煤热解过程中乙烯释放的演化规律,确定煤样的快速热解起止温度。对煤的热解反应进行分析,在一定程度上可以为相关研究提供理论指导。

[J]. *Ningxia Engineering Technology*, 2023, 22 (3): 193-198. (in Chinese)
[3] NIU B, NIU M L, ZHANG J T, *et al.* Novel insight into the mechanism of coal hydropyrolysis using deuterium tracer method[J]. *Fuel*, 2022, 321: 124109.
[4] MENG H Y, WANG M Z, WU Z Q, *et al.* Physico-chemical structure and gasification performance of co-pyrolytic char produced by the pyrolysis of polyvinyl chloride blends with two rank coals[J]. *ACS Omega*, 2022, 7(36): 32280-32291.

- [5] 金荣, 冷晶晶. 气相色谱法测定工业乙烯含量的方法[J]. 化学, 2022(2): 199-200.
- JIN R, LENG J J. Method for determining industrial ethylene content by gas chromatography [J]. *Chemical Engineering & Equipment*, 2022(2): 199-200. (in Chinese)
- [6] GUERRERO-PENˆA A, VˆAZQUEZ-HERNˆANDEZ L, BUCIO-GALINDO A, *et al.* Chemical analysis and NIR spectroscopy in the determination of the origin, variety and roast time of Mexican coffee [J]. *Heliyon*, 2023, 9(8): e18675.
- [7] KIM G, SHIM H, JUNG S, *et al.* Robustness and performance evaluation of TDLAS sensor for scramjet intake [J]. *Aerospace Science and Technology*, 2023, 141: 108561.
- [8] 康虎, 张夏, 郑世杰等. 基于调制激光光谱吸收的高稳定性气体检测[J/OL]. 激光技术, 2023(9): 1-13.
- KANG H, ZHANG X, ZHENG S J, *et al.* High-stability gas detection based on modulated laser spectral absorption [J/OL]. *Laser Technology*, 2023 (9): 1-13. (in Chinese)
- [9] 季文海, 吕晓翠, 胡文泽, 等. TDLAS技术在烯烃生产过程中的多组分检测应用[J]. 光学精密工程, 2018, 26(8): 1837-1845.
- JI W H, LÜ X C, HU W Z, *et al.* Application of TDLAS technology to multicomponent detection in olefin production process [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(8): 1837-1845. (in Chinese)
- [10] 张志荣, 夏滑, 董凤忠, 等. 利用可调谐半导体激光吸收光谱法同时在线监测多组分气体浓度[J]. 光学精密工程, 2013, 21(11): 2771-2777.
- ZHANG ZH R, XIA H, DONG F ZH, *et al.* Simultaneous and on-line detection of multiple gas concentration with tunable diode laser absorption spectroscopy [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(11): 2771-2777. (in Chinese)
- [11] 潘卫东, 张佳薇, 戴景民, 等. 可调谐半导体激光吸收光谱技术检测痕量乙烯气体的系统研制[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(10): 2875-2878.
- PAN W D, ZHANG J W, DAI J M, *et al.* Tunable diode laser absorption spectroscopy system for trace ethylene detection [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, 32(10): 2875-2878. (in Chinese)
- [12] WEI Y B, CHANG J, LIAN J, *et al.* A coal mine multi-point fiber ethylene gas concentration sensor [J]. *Photonic Sensors*, 2015, 5(1): 67-71.
- [13] 梁博. 基于可调谐激光技术的煤矿用乙烯痕量气体检测系统研究[D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2017.
- LIANG B. *Determination of Trace Ethylene in Coal Mine Based on Tunable Laser Technology Research on Gas Detection* [D]. Beijing: Chinese Institute Of Coal Science, 2017. (in Chinese)
- [14] 魏永卜, 邱选兵, 张恩华, 等. 基于数字锁相的激光光谱早期火灾预警系统[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2020, 48(3): 52-57.
- WEI Y B, QIU X B, ZHANG E H, *et al.* Early fire warning system based on digital lock-in amplifier using laser spectroscopy technology [J]. *Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition)*, 2020, 48(3): 52-57. (in Chinese)
- [15] 李晋, 闫浩, 孟杰. 光子晶体光纤气体吸收光谱探测技术研究进展[J]. 光学精密工程, 2021, 29(10): 2316-2329.
- LI J, YAN H, MENG J. Research progress of gas absorption spectrum detection technology based on photonic crystal fiber [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2021, 29(10): 2316-2329. (in Chinese)
- [16] 陈颖, 高光珍, 蔡廷栋. 基于光声光谱的乙烯探测技术[J]. 中国激光, 2017, 44(5): 0511001.
- CHEN Y, GAO G ZH, CAI T D. Detection technique of ethylene based on photoacoustic spectroscopy [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(5): 0511001. (in Chinese)
- [17] 刘英, 胡迈, 王兴平, 等. Ppb级探测灵敏度的CO₂腔衰荡光谱仪[J]. 光学精密工程, 2023, 31(20): 2921-2929.
- LIU Y, HU M, WANG X P, *et al.* Cavity ring-down spectrometer of CO₂ with ppb detection sensitivity [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2023, 31(20): 2921-2929. (in Chinese)
- [18] 孔安栋, 杨德旺, 郭全家, 等. 腔增强气体拉曼光谱仪在气测录井中的应用[J]. 光学精密工程, 2022, 30(10): 1151-1159.
- KONG A D, YANG D W, GUO J J, *et al.* Application of cavity-enhanced gas Raman spectroscopy

- py in gas logging [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2022, 30(10): 1151-1159. (in Chinese)
- [19] SONG H, LIU G, ZHANG J, *et al.* Pyrolysis

characteristics and kinetics of low rank coals by TG-FTIR method [J]. *Fuel Processing Technology*, 2017, 156.

作者简介:



段 政(1999—),男,山西吕梁人,硕士研究生,2021年于山西农业大学获得学士学位,主要从事 TDLAS 气体检测的研究。E-mail: 1027178465@qq.com

通讯作者:



邱选兵(1980—),男,四川资中人,博士,教授,2003年于重庆大学获得学士学位,2006年于太原理工大学获得硕士学位,2013年于太原科技大学获得博士学位,主要从事光电微机接口技术、嵌入式系统等方面的研究。E-mail: qiuxb@tyust.edu.cn