



中国煤炭行业知识服务平台 (中国煤炭期刊网)  
www.chinacaj.net



您可能感兴趣的文章、专题：

盘点《煤炭学报》2020年热点论文

《煤炭学报》2021年第1期

“新锐科学家”专题

“深部岩体力学与开采理论”专题

“煤加工与洁净化工技术”专题

“黄河流域矿区生态保护与可持续发展”专题

“煤矿热动力灾害防控技术与装备”专题

“煤矿快速智能掘进理论与技术”专题

“煤系天然气聚集理论与勘探开发技术”专题

“低品质煤浮选过程强化”专题

“煤矿热动力灾害防控技术与装备”专题

## 我国煤矿气体检测技术研究进展

梁运涛<sup>1,2,3</sup>, 田富超<sup>1,2,3</sup>, 冯文彬<sup>1</sup>, 邵振鲁<sup>2</sup>, 孟祥宁<sup>1</sup>, 陈成锋<sup>1</sup>

(1. 中煤科工集团沈阳研究院有限公司 煤矿安全技术国家重点实验室, 辽宁 沈抚示范区 113122; 2. 中国矿业大学 安全工程学院, 江苏 徐州 221116; 3. 中国矿业大学(北京) 应急管理与安全工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 煤矿井下环境气体组分复杂且具有必需性、致灾性、预警性的特点, 煤矿气体的定量检测对于矿井灾害危险性早期辨识、继发性次生灾害准确预警、应急救援科学决策具有重要意义。首先, 分析了常用的催化燃烧式、热导式、光干涉式和电化学式等气体传感器技术, 色谱分析技术, 傅里叶变换红外光谱、非分散红外光谱和可调谐半导体激光吸收光谱等光谱分析技术的方法原理和研究进展, 总结了各类气体检测技术的应用效果; 其次, 指出煤矿井下存在大气压力及温度变化范围大、相对湿度和粉尘质量浓度高、电磁干扰强的极端工况环境, 从适用气体、优缺点、应用领域、代表仪器等方面对比了不同检测技术在煤矿井下的技术适用性; 然后, 在交叉干扰分析的基础上, 针对 $\text{CH}_4$ 、 $\text{O}_2$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{C}_2\text{H}_4$ 、 $\text{C}_2\text{H}_2$ 、 $\text{H}_2$ 等单一气体检测、多组分气体在线监测及矿山应急救援期间爆炸环境有毒有害气体原位分析提出了应用建议, 以检测精度、量程为首要条件, 并应综合考虑性价比、背景气干扰、零点漂移等因素影响; 最后, 提出煤矿痕量气体低检出限、多组分混合气体交叉干扰、特定波长激光器及高性能检测器成本昂贵等“卡脖子”难题, 为实现煤矿气体的原位定量分析和动态监测指明了研究方向。

**关键词:** 煤矿气体; 检测技术; 传感器; 色谱分析; 光谱分析; 交叉干扰

**中图分类号:** TD752      **文献标志码:** A      **文章编号:** 0253-9993(2021)06-1701-14

## Research progress of coal mine gas detection technology in China

LIANG Yuntao<sup>1,2,3</sup>, TIAN Fuchao<sup>1,2,3</sup>, FENG Wenbin<sup>1</sup>, SHAO Zhenlu<sup>2</sup>, MENG Xiangning<sup>1</sup>, CHEN Chengfeng<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Coal Mine Safety Technology, CCTEG Shenyang Research Institute, Shenfu Demonstration Zone 113122, China; 2. School of Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 3. College of Emergency Management and Safety Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

**Abstract:** The gases in underground coal mines are composed of multiple components characterized by necessity, disaster triggering and early warning. The quantitative measurement of coal mine gases is of significance for the early identification of hazardous sources, the accurate warning of relevant secondary disasters, and scientific decision-making for emergency rescue. Firstly, the principles and research progress of commonly used gas analysis techniques are presented, i. e., gas sensors (catalytic combustion type, thermal conductivity type, optical interference type and electrochemical type), chromatographic analysis technology, Fourier transform infrared spectroscopy, non-dispersive infrared spec-

收稿日期: 2021-03-14      修回日期: 2021-06-04      责任编辑: 常明然      DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.HZ21.0456

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2018YFC0807900); 国家自然科学基金资助项目(51774181); 辽宁省自然科学基金资助项目(2020-KF-23-01)

作者简介: 梁运涛(1974—), 男, 河北晋州人, 研究员, 博士生导师。E-mail: liangyuntao@syceri.com

通讯作者: 田富超(1984—), 男, 河南项城人, 副研究员, 博士。E-mail: tianfuchao@cumt.edu.cn

引用格式: 梁运涛, 田富超, 冯文彬, 等. 我国煤矿气体检测技术研究进展[J]. 煤炭学报, 2021, 46(6): 1701-1714.

LIANG Yuntao, TIAN Fuchao, FENG Wenbin, et al. Research progress of coal mine gas detection technology in China[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(6): 1701-1714.



移动阅读

troscopy and tunable diode laser absorption spectroscopy. The field application of the above-mentioned gas detection technologies is summarized. Secondly, the extreme working conditions in coal mines including large atmospheric pressure and temperature variation, high relative humidity and dust concentration, as well as strong electromagnetic interference are pointed out. The technical applicability of different detection technologies is also compared from the aspects of applicable gas, pros and cons, application fields, and representative instruments. Then, on the basis of cross-interference analysis, some suggestions for single gas detection (such as  $\text{CH}_4$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_2$  and  $\text{H}_2$ ) and multi-component gas mixture online monitoring as well as in-situ analysis of toxic gases in explosive environments during emergency rescue are put forward. When selecting a detection method under the premise of measurement accuracy and range, some comprehensive considerations should be given to cost performance, background interference, and zero drift. Finally, the bottleneck problems such as the low detection limit of trace gas, cross-interference of multi-component gas mixture, high cost of specific wavelength laser and high-performance detector are presented, which shows the research direction for realizing the in-situ quantitative analysis and dynamic monitoring of coal mine gas.

**Key words:** coal mine gas; detection technology; sensor; chromatographic analysis; spectral analysis; cross-interference

煤矿气体是煤矿井下环境中各种气体的总称,主要包括氮气( $\text{N}_2$ )、氧气( $\text{O}_2$ )、二氧化碳( $\text{CO}_2$ )、一氧化碳( $\text{CO}$ )、甲烷( $\text{CH}_4$ )、乙炔( $\text{C}_2\text{H}_2$ )、乙烷( $\text{C}_2\text{H}_6$ )、丙烷( $\text{C}_3\text{H}_8$ )、正丁烷( $n\text{-C}_4\text{H}_{10}$ )、异丁烷( $i\text{-C}_4\text{H}_{10}$ )、丙烯( $\text{C}_3\text{H}_6$ )、氢气( $\text{H}_2$ )、二氧化硫( $\text{SO}_2$ )、硫化氢( $\text{H}_2\text{S}$ )及一氧化氮( $\text{NO}$ )、二氧化氮( $\text{NO}_2$ )、氨气( $\text{NH}_3$ )等<sup>[1]</sup>。煤矿气体组分复杂且具有多面性:1是必需性,2是致灾性,3是预警性<sup>[2-3]</sup>。必需性是指矿井通风风流对维系井下人员作业环境所必须的职业健康保障功能,例如 $\text{O}_2$ ;致灾性是指矿井灾害气体对煤矿安全生产的危害性,例如 $\text{CH}_4$ 是瓦斯爆炸过程中的主要灾害气体;预警性是指煤矿特定气体成分和浓度变化特征与灾害的发生发展存在一定的对应关系,可以预测灾害发生的概率和危险程度<sup>[4-5]</sup>,例如 $\text{CO}$ 是煤自然发火的主要标志气体。

我国煤矿灾害的种类较多,根据国家矿山安全监察局公布的历年煤矿灾害事故数据,2000—2020年由煤矿气体引发或参与的火灾、爆炸、突出、窒息等重特大事故起数达462起,占全国煤矿重特大事故起数的78.89%。因此,准确高效分析煤矿气体成分和浓度,对于早期预警矿井火灾、瓦斯爆炸等灾害,有效防范次生事故,保障作业和救援人员的生命安全等具有重大意义<sup>[6]</sup>。

目前,煤矿气体检测主要包括催化燃烧式、热导式、光干涉式、电化学式等各类传感器技术,色谱分析技术,傅里叶变换红外光谱(Fourier Transform Infra-Red, FTIR)、非分散红外光谱(Non-Dispersive Infra-Red, NDIR)以及可调谐半导体激光吸收光谱(Tunable Semiconductor Laser Absorption Spectroscopy, TD-LAS)等各类光谱分析技术。笔者对煤矿井下典型气

体检测技术特征、研究现状及应用效果进行论述,总结各种检测技术的优缺点及适用条件,提出煤矿气体检测技术的应用建议和发展方向,为灾害预警和事故救援提供科学依据。

## 1 传感器技术

### 1.1 催化燃烧式

催化燃烧式气体检测是利用可燃气体在涂有催化剂的催化元件表面发生氧化还原反应的一种传感技术。图1为催化元件结构原理<sup>[7]</sup>,该元件是以氧化铝作为载体,外表面涂有铂等稀有金属催化层,载体内部为铂丝线圈,通常采用惠斯通电桥检测电阻变化,通过测量电桥输出电压的大小,即可得到可燃气体体积分数<sup>[8]</sup>。

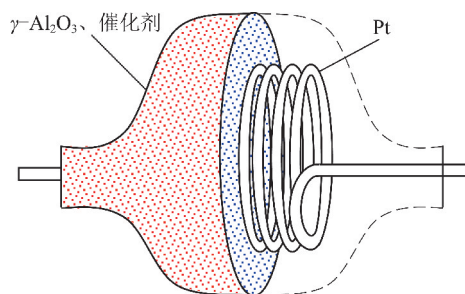


图1 催化元件结构<sup>[7]</sup>

Fig. 1 Structure of catalytic element<sup>[7]</sup>

催化燃烧式气体传感器主要用于煤矿中0~4%  $\text{CH}_4$  气体的检测,具有电路可靠、结构简单的显著特点<sup>[9-10]</sup>。但使用寿命较短、调校周期需要15 d、贫氧环境检测误差大且易硫化物中毒。 $\text{CH}_4$  体积分数在0~4%时,测量值与 $\text{CH}_4$  体积分数呈良好的线性对应关系;当 $\text{CH}_4$  体积分数超过13%时,催化反应随着 $\text{CH}_4$  体积分数上升而逐渐减弱,测量值下降出现同一

个输出电压信号对应2个体积分数值的现象,即二值性问题(图2),在应用过程中存在高体积分数 $\text{CH}_4$ 被误测偏低的风险<sup>[11]</sup>。此外,当环境中 $\text{O}_2$ 体积分数过低时, $\text{CH}_4$ 催化燃烧反应不完全,导致传感器输出值远远低于实际值,不适用于煤矿井下密闭区、灾害事故区域等贫氧环境 $\text{CH}_4$ 检测;并且,硫中毒会使催化元件失去活性,也不适用于存在 $\text{SO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{S}$ 等气体的含硫煤层、废弃采空区等地点的 $\text{CH}_4$ 检测<sup>[12]</sup>。

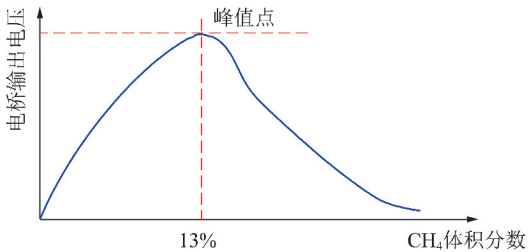


图2 甲烷催化燃烧传感器的二值性问题<sup>[11]</sup>

Fig. 2 Two-value problem of catalytic combustion methane sensor<sup>[11]</sup>

## 1.2 热导式

热导式气体检测是通过对比被测气体与空气热导率的差异而分析气体体积分数的一种检测方式。热导式气体检测传感器通常包括2个气室(图3):一个是充满干空气的参比气室,另一个是充满被测气体的测量气室,每个气室中都包含一个热敏电阻,其电阻随温度、湿度和气体成分而变化。当2个气室的温度和湿度相同时,热敏电阻的差异将表征气体体积分数的<sup>[13]</sup>。

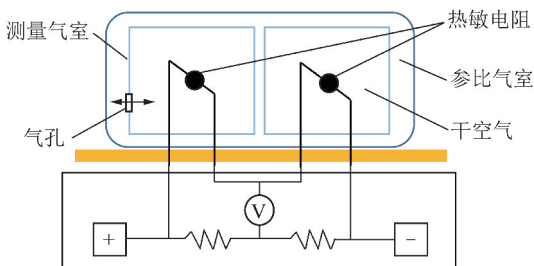


图3 热导式气体传感器结构示意图<sup>[13]</sup>

Fig. 3 Schematic diagram of thermal conductivity gas sensor<sup>[13]</sup>

热导式气体传感器主要用于煤矿中1%~100% $\text{CH}_4$ 气体的检测,如抽采管道瓦斯检测。热导式气体传感器结构简单、价格便宜、检测范围广、无催化剂老化问题,可在贫氧气体环境中使用。但由于气体的导热系数都较小,如 $\text{CH}_4$ 的导热系数为 $0.029 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ,仅是空气导热系数的1.296倍,当 $\text{CH}_4$ 体积分数低于1%时,传感器的输出信号很弱导致测量精度不足<sup>[14]</sup>。由于煤矿井下 $\text{CO}_2$ 、 $\text{C}_2\text{H}_4$ 、 $\text{C}_2\text{H}_2$ 气体的导热系数差异不大,因此对混合气体则适用性较

差。此外,水蒸气和 $\text{CO}_2$ 对测量结果有较大影响,分别造成正偏差与负偏差,且绝对值几乎相等并具有相消作用,因此热导检测技术应用于煤矿井下时首先要通过吸收剂消除水蒸气和 $\text{CO}_2$ 的影响<sup>[15]</sup>。

## 1.3 光干涉式

光干涉式气体检测是通过对比被测气体与参比气体折射率不同而导致的干涉条纹变化特征来分析气体浓度的一种检测方式。图4为光干涉式气体传感器检测原理,当测量气室未通入气样,与参比气室气体成分相同时,两束光光程相等,干涉条纹不移动。如测量气室中气体的成分、压力或温度等条件发生变化,会使干涉条纹移动,若气样化学成分已知,则可用于定量分析该气体的体积分数。

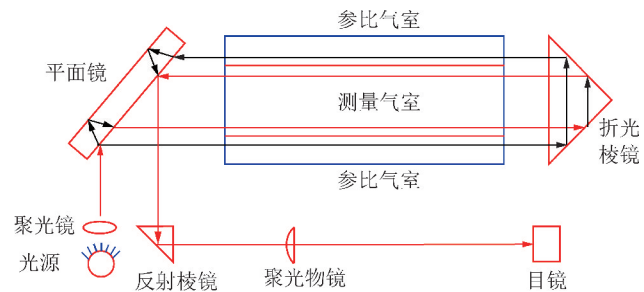


图4 光干涉式气体传感器检测原理<sup>[16]</sup>

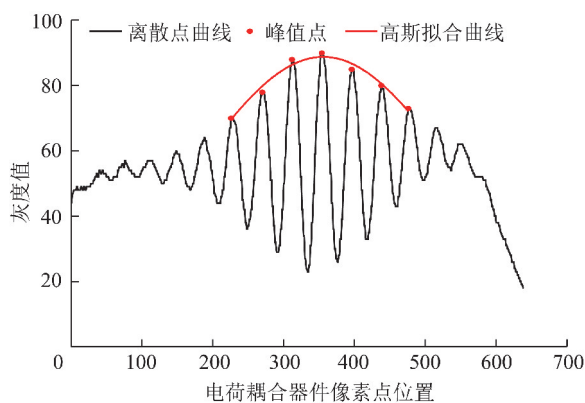
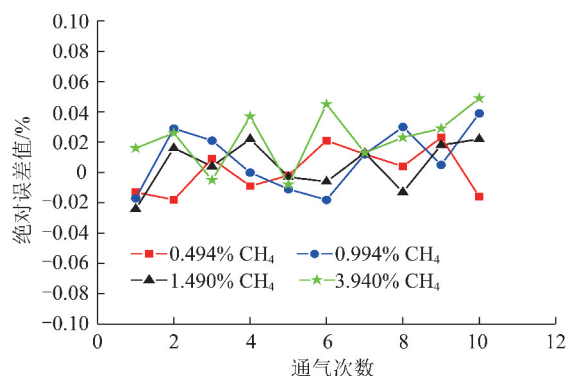
Fig. 4 Detection principle of optical interference gas sensor<sup>[16]</sup>

光干涉式检测器是我国 $\text{CH}_4$ 体积分数检测的标准便携仪器,适用于煤矿井下全量程 $\text{CH}_4$ 体积分数检测。光干涉式检测器较催化燃烧式和热导式传感器有着更高的测量精度、更长的使用寿命<sup>[17]</sup>,但易受 $\text{CO}_2$ 交叉干扰,温度、压力等参数的差异也会引起折射率的变化,并且在采空区、密闭区等贫氧条件下检测误差较大。

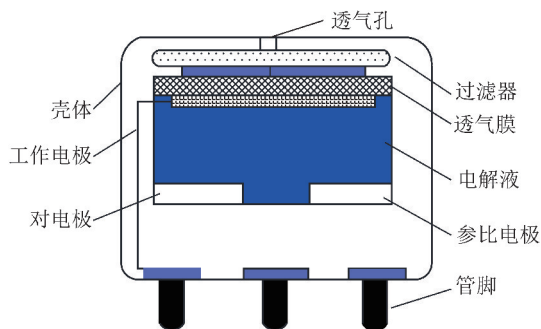
近年来,梁运涛等<sup>[18]</sup>采用峰值提取和高斯拟合方法,研究了不同 $\text{CH}_4$ 体积分数时的零级条纹位置和干涉条纹位移量,实现了光干涉零级条纹的自动定位和光干涉条纹位移量的精准识别(图5);并根据煤矿井下复杂的气体环境研究了 $\text{CO}_2$ 、 $\text{O}_2$ 等环境气体对 $\text{CH}_4$ 测量结果的影响,理论推导了环境气体的测定器显示值,研发了便携式CJG10X型光干涉式数显 $\text{CH}_4$ 测定器,基本误差优于煤炭行业标准《MT/T 1098—2009 煤矿用光干涉式甲烷气体传感器》的规定<sup>[19]</sup>,如 $\text{CH}_4$ 体积分数1.49%时,测量绝对误差在 $\pm 0.03\%$ 以内(图6)。

## 1.4 电化学式

电化学式气体检测是通过测量气体在电极处发生氧化或还原反应产生的电信号来分析气体体积分数的一种检测方式,电信号的强度与气体体积分数成正比。电化学传感器一般采用密闭结构设计,由电

图5 峰值提取和高斯拟合曲线<sup>[18]</sup>Fig. 5 Peak extraction and Gaussian fitting curve<sup>[18]</sup>图6 4种不同体积分数的甲烷标气测量绝对误差分析<sup>[18]</sup>Fig. 6 Absolute error analysis of methane standard gas with four different concentrations<sup>[18]</sup>

极、过滤器、透气膜、电解液、管脚等组成,结构原理如图7所示<sup>[20]</sup>。待测气样经过滤器和透气膜扩散到电极-电解液中,对工作电极和对电极施加恒定电压,电活性物质在电场作用下将会吸附在电极表面,进而发生氧化还原反应产生电流。

图7 电化学气体传感器工作原理<sup>[20]</sup>Fig. 7 Principle of electrochemical gas sensor<sup>[20]</sup>

电化学传感器最早用于 $O_2$ 体积分数测量。20世纪80年代中期,能测量多种不同有毒有害气体体积分数的电化学传感器已经被开发,具有良好的敏感性与选择性。在煤矿气体检测领域,电化学传感器主要用于煤矿井下 $O_2$ 、 $CO$ 、 $H_2S$ 、 $SO_2$ 等气体检测,功耗

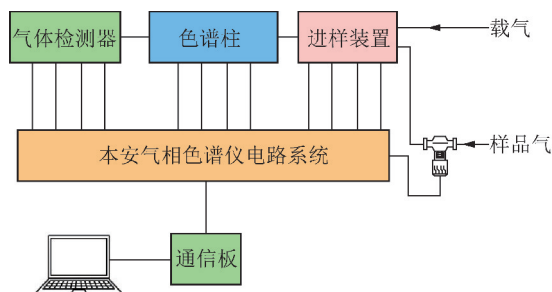
低、对目标气体具有一定的靶向性,但测量结果易受温度影响,通常采取内部温度补偿的方式来保证测量准确度;同时电化学传感器容易受到其他气体的干扰,导致读数错误或误报警<sup>[21]</sup>,需要对气样进行过滤处理。

## 2 色谱分析技术

色谱分析是利用待测气样中不同气体成分在固定相和流动相中扩散系数的差异性实现气体分离的检测技术<sup>[22-23]</sup>,根据色谱图流出曲线的位置进行定性分析,根据峰面积或峰高进行定量分析。

20世纪70年代初,原煤炭科学研究总院抚顺分院率先将色谱分析法应用于煤矿气体分析领域<sup>[24-25]</sup>,开发了用于测定常量气体和微量气体的煤矿专用型色谱分析装备系统,配置热导检测器、火焰离子化检测器、电子捕获检测器、火焰光度检测器,可以实现一次进样对 $O_2$ 、 $N_2$ 、 $CO$ 、 $CO_2$ 、 $CH_4$ 、 $C_2H_6$ 、 $C_2H_4$ 、 $C_2H_2$ 等多组分气体进行定性定量分析。20世纪80年代以来,我国又相继研发了ZS32F型地面色谱束管监测系统<sup>[26]</sup>、JSG8型色谱束管监测系统<sup>[27]</sup>,通过束管系统取气至地面色谱分析仪自动分析,最低检测体积分数可达到 $0.5 \times 10^{-6}$ 。色谱技术极大提高了我国煤矿气体分析能力,全面提升了我国家自然发火预测预报水平<sup>[28]</sup>。

色谱技术具有灵敏度高、分离度好、定量准确度高优点,目前已经成为煤自然发火标志气体和矿井环境气体定量分析的常用技术。但现有传统色谱分析技术的缺点也很明显,火焰离子化检测器反应温度高于 $150\text{ }^\circ\text{C}$ ,转化炉温度一般为 $360\text{ }^\circ\text{C}$ ,无法直接应用到井下爆炸危险环境;此外,分析周期长、束管管路维护难,仪器操作相对复杂,气样真实性和时效性差,无法适应灾变时期应急救援的快速分析。为解决该问题,梁运涛等<sup>[29]</sup>在国内研发了本质安全型气相色谱仪(图8)及井下本安型色谱束管监测系统,分析时间小于3 min,工业试验效果良好。

图8 本安型气相色谱示意图<sup>[29]</sup>Fig. 8 Schematic diagram of intrinsic safety gas chromatogram<sup>[29]</sup>

### 3 红外光谱分析技术

红外光谱法是基于极性气体分子独有的元素种类及空间关系所对应的特定红外谱段,分析红外光谱图的吸收波长位置,通过对比气体实时光谱吸收强度与红外谱图库的数据,进而检测出待测气体的方法。根据实现方式不同,分为色散型、非色散型,主流红外吸收光谱气体分析技术包括 FTIR, NDIR 和 TDLAS 等,煤矿气体红外吸收光谱分布如图 9 所示<sup>[30]</sup>。

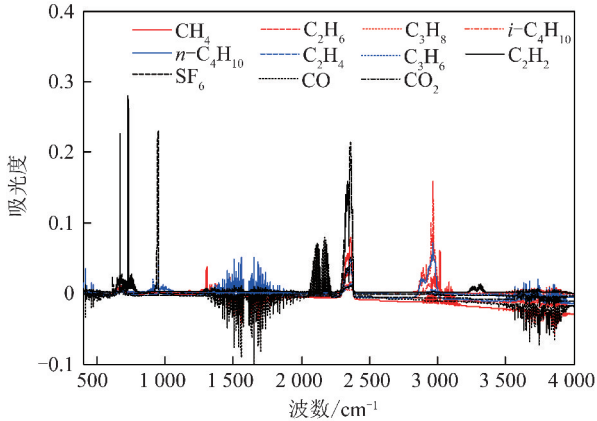


图 9 煤矿气体红外吸收光谱分布<sup>[30]</sup>

Fig. 9 Infrared absorption spectrogram of coal mine gas<sup>[30]</sup>

#### 3.1 FTIR 分析技术

FTIR 的原理是利用气体分子对红外光的选择性吸收特性,对干涉后的红外光进行傅里叶变换,从而实现目标气体的分析,属于分散型红外吸收光谱技术,适用于煤矿气体在线分析,可同时分析 CH<sub>4</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>, *i*-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>, *n*-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> 等气体,其技术原理如图 10 所示。

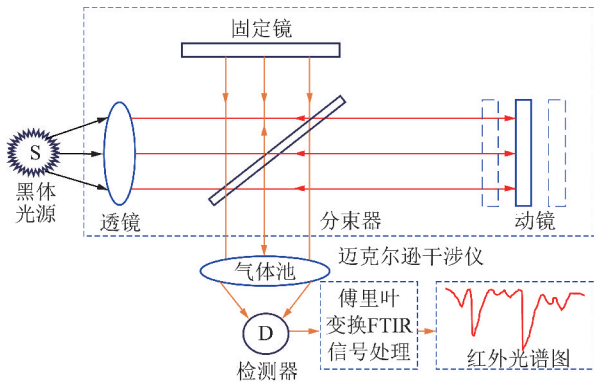


图 10 FTIR 气体分析技术原理<sup>[31]</sup>

Fig. 10 Principle of FTIR gas analysis technology<sup>[31]</sup>

国外率先将 FTIR 技术应用于大气环境的检测, GRIFFITH 等<sup>[32]</sup>使用开放光程 FTIR 系统在外场环境下检测气体成分及浓度, MARZEC<sup>[33]</sup>第 1 次将这种方法应用于煤矿气体检测领域,此后, GENG 等<sup>[34]</sup>认为,煤中的灰分含量与 3 620 cm<sup>-1</sup> 处结晶水

的光谱峰面积密切相关,洪林等<sup>[35]</sup>采用管式电阻炉和傅里叶变换红外光谱仪,分析了神东矿区煤样在燃烧过程不同阶段的 C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> 等标志气体的红外光谱图。

梁运涛等<sup>[36-37]</sup>应用 FTIR 方法得到了 8 种不同变质程度的原煤样及氧化煤样的气体产物实时生成规律,同时利用红外光谱仪对 CO, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> 和 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> 等矿井典型自然发火气体进行了体积分数预测分析,得到了煤矿井下 10 种极性气体用于光谱定量分析的特征吸收峰、对应的波数区间及相关性系数,见表 1;同时针对多组分混合烷烃类气体红外光谱定性定量分析过程中特征吸收峰谱线交叠的问题,分别找出了 CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>, *n*-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> 和 *i*-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> 等 5 种矿井烷烃类气体的特征指纹吸收峰,如图 11 所示<sup>[38-40]</sup>。指纹吸收峰作为气体红外光谱辅助定性定量方法,解决了矿井烷烃类气体在特征频率区谱图交叠严重无法分离的难题,实现了烷烃类气体的辅助定性定量分析<sup>[41]</sup>。

表 1 煤矿井下 10 种极性气体吸收峰与特征吸收峰<sup>[38]</sup>

Table 1 Absorption peaks and characteristic absorption peaks of 10 polar gases in underground coal mines<sup>[38]</sup>

气体种类	吸收峰/cm <sup>-1</sup>	特征吸收峰/cm <sup>-1</sup>	相关性系数
CH <sub>4</sub>	3 200~2 800	3 200~2 800	0.953 8
	1 400~1 200		
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	3 100~2 825	3 100~2 825	0.937 2
	1 500~1 375		
	880~750		
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	3 050~2 825	3 050~2 825	0.960 5
<i>n</i> -C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	3 025~2 800	3 025~2 800	0.913 5
	1 500~1 340		
<i>i</i> -C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	3 000~2 850	3 000~2 850	0.968 5
	1 500~1 340		
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	3 250~2 900	1 100~800	0.982 6
	1 950~1 830		
	1 500~1 410		
	1 100~800		
C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	3 000 左右	960~920	0.934 0
	1 500 左右		
	960~920 700~660		
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	1 050~825	1 050~825	0.971 2
CO	2 250~2 025	2 250~2 025	0.952 3
CO <sub>2</sub>	2 390~2 280	2 390~2 280	0.939 7

汤晓君等<sup>[42-44]</sup>采用支持向量机(SVM)算法回归模型,实现了对 7 种烷烃气体的定量分析,李玉军等<sup>[45]</sup>利用粒子群算法(PSO)与支持向量机(SVM)算法相结合的方法建立了分析模型,对 CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> 和 C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> 三组分气体主吸收峰区域的 550 个红外光谱数

据进行了特征变量提取,并基于本底值直接消除的红外光谱分析方法,采集特定浓度的水蒸气图谱作为标

尺,建立水蒸气扣除算法得到了水蒸气对背景功率光谱的影响及优化方法。

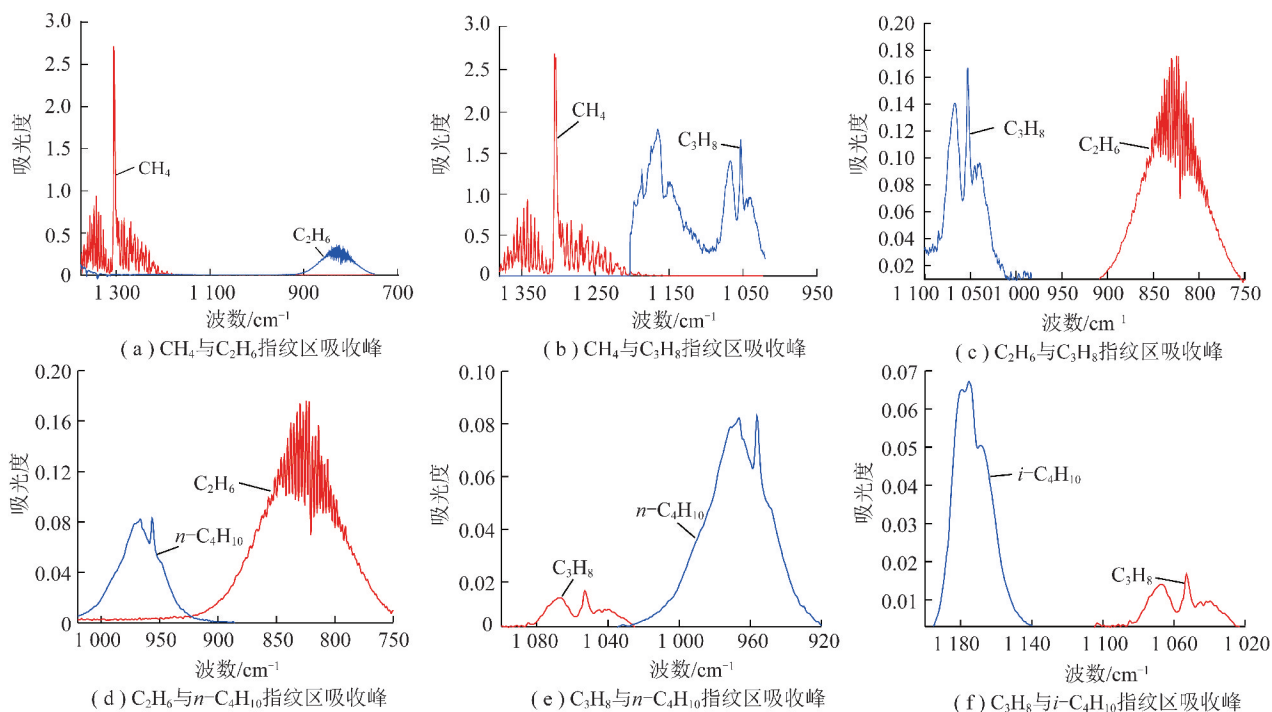


图 11 煤矿烷烃类气体红外光谱特征及指纹区吸收峰<sup>[38]</sup>

Fig. 11 Characteristic fingerprint absorption peaks of alkane gas in coal mine<sup>[38]</sup>

FTIR 技术光谱范围宽,可使用多种红外光源,满足大多数气体分子对于其特定波段红外光的吸收;分辨率高,在特定范围内分辨率可达到  $0.100 \sim 0.005 \text{ cm}^{-1}$ ,可检测多组分混合气体的复杂光谱图;信噪比高,先通过干涉仪产生干涉图像,再经傅里叶变换转变为红外光谱图,能量损耗小,增强了探测器的信噪比,可测量微量气体成分;扫描速度快,完成一次多组分混合气体分析过程不超过  $1 \text{ min}$ ,且不需要定期调校。但红外光谱吸收带较宽,烷烃类气体图谱交叠严重。此外,由于该类仪器体积大、对环境要求高,不适用于井下高温、高湿、高粉尘和复杂电磁环境干扰。FTIR 目前主要用于煤微观结构和氧化燃

烧特性的实验研究<sup>[46-50]</sup>。

### 3.2 NDIR 分析技术

NDIR 利用测量气体对特定波段光具有选择性吸收的特点,根据波长强度的变化计算出被测气体的浓度值,可检测多种煤矿气体,如  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$  等<sup>[51-52]</sup>。NDIR 气体传感器分析系统原理如图 12 所示<sup>[53]</sup>。

NDIR 气体分析技术诞生于 19 世纪 30 年代,首先应用于工业环境单一气体分析领域,20 世纪 90 年代后期,随着红外光源、探测器技术的发展,通过改进调制装置、光源以及嵌入式系统,趋于功耗更低、体积更小的方向发展<sup>[54-55]</sup>。国外几种典型的 NDIR 多组分气体分析性能参数见表 2<sup>[56]</sup>。

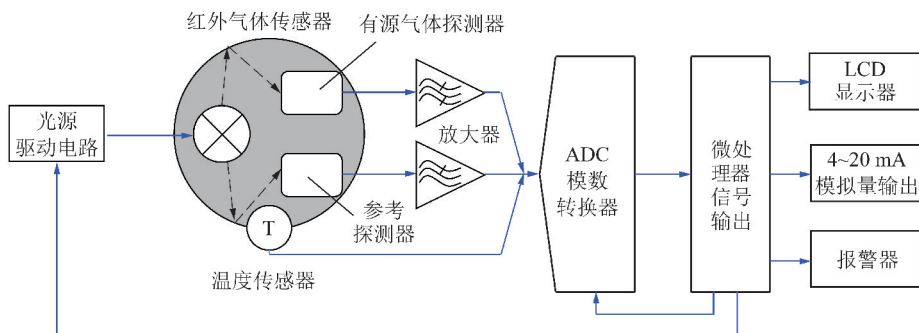


图 12 NDIR 气体传感器典型分析系统<sup>[53]</sup>

Fig. 12 Typical analysis system of NDIR gas sensor<sup>[53]</sup>

表 2 国际上几种典型的 NDIR 多组分气体分析仪<sup>[56]</sup>  
Table 2 Several typical NDIR multi-component gas analyzers worldwide<sup>[56]</sup>

类别	美国 Thermo 公司 Model-60i	法国 ESA 公司 MIR9000	英国 XENTRA 公司 4900	日本 HORIBA 公司 ENDA-600	加拿大 ABB 公司 AO-2000	德国 SmartGas 公司 R134A
测量组分	O <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> , CO, NO <sub>2</sub> , NO	HCl, SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> 等 10 种	O <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> , CO, NO	O <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> , CO, NO <sub>x</sub>	N <sub>2</sub> O, CH <sub>4</sub> , NO, CO, CO <sub>2</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	NO, CH <sub>4</sub> , SF <sub>6</sub> , CO, CO <sub>2</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>
检测范围	O <sub>2</sub> : 1%~25% SO <sub>2</sub> : 10 <sup>-6</sup> ~10 <sup>-2</sup> CO <sub>2</sub> : 2%~25% CO: 10 <sup>-6</sup> ~2.5×10 <sup>-3</sup> NO <sub>2</sub> : 10 <sup>-6</sup> ~5×10 <sup>-4</sup> NO: 10 <sup>-6</sup> ~2×10 <sup>-3</sup>	HCl: 1%~25% SO <sub>2</sub> : 0~500 mg/m <sup>3</sup> CO <sub>2</sub> : 0~500 mg/m <sup>3</sup> CO: 0~60 mg/m <sup>3</sup> NO <sub>x</sub> : 0~500 mg/m <sup>3</sup>	O <sub>2</sub> : 1%~25% SO <sub>2</sub> : 10 <sup>-6</sup> ~2×10 <sup>-4</sup> CO <sub>2</sub> : 0~25% CO: 10 <sup>-6</sup> ~2×10 <sup>-4</sup> NO: 10 <sup>-6</sup> ~2×10 <sup>-4</sup>	NO <sub>x</sub> : 10 <sup>-5</sup> ~5×10 <sup>-3</sup> SO <sub>2</sub> : 5×10 <sup>-5</sup> ~5×10 <sup>-3</sup> 10 <sup>-3</sup> CO <sub>2</sub> : 5%~50% CO: 5×10 <sup>-5</sup> ~5×10 <sup>-3</sup> 10 <sup>-3</sup> O <sub>2</sub> : 10%~25%	NO <sub>x</sub> : 0~1.5×10 <sup>-3</sup> SO <sub>2</sub> : 0~5×10 <sup>-4</sup> CO <sub>2</sub> : 0~5×10 <sup>-4</sup> CO: 0~10 <sup>-3</sup> C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> : 0~3×10 <sup>-4</sup> CH <sub>4</sub> : 0~5×10 <sup>-4</sup>	NO: 0~2×10 <sup>-3</sup> CH <sub>4</sub> : 0~2×10 <sup>-3</sup> SF <sub>6</sub> : 0~2×10 <sup>-3</sup> CO: 0~2×10 <sup>-3</sup> CO <sub>2</sub> : 0~2×10 <sup>-3</sup> C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> : 0~2×10 <sup>-3</sup>
最低检测限	O <sub>2</sub> : 0.01% SO <sub>2</sub> : 10 <sup>-6</sup> CO <sub>2</sub> : 0.5% CO: 10 <sup>-6</sup> NO <sub>2</sub> : 0.5×10 <sup>-6</sup> NO: 10 <sup>-6</sup>	O <sub>2</sub> : <0.05% SO <sub>2</sub> : <5×10 <sup>-6</sup> CO <sub>2</sub> : <2% CO: <2×10 <sup>-6</sup> NO: <2×10 <sup>-6</sup>	O <sub>2</sub> : <0.05% SO <sub>2</sub> : <5×10 <sup>-6</sup> CO <sub>2</sub> : <2% CO: <2×10 <sup>-6</sup> NO: <2×10 <sup>-6</sup>	O <sub>2</sub> : <5% SO <sub>2</sub> : <5×10 <sup>-5</sup> CO <sub>2</sub> : <5% CO: <5×10 <sup>-5</sup> NO <sub>x</sub> : <10 <sup>-5</sup>	NO <sub>x</sub> : <2×10 <sup>-5</sup> SO <sub>2</sub> : <2.5×10 <sup>-5</sup> CO <sub>2</sub> : <5×10 <sup>-6</sup> CO: <10 <sup>-5</sup> C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> : <5×10 <sup>-6</sup> CH <sub>4</sub> : <10 <sup>-5</sup>	NO: 2×10 <sup>-6</sup> CH <sub>4</sub> : 2×10 <sup>-6</sup> SF <sub>6</sub> : 2×10 <sup>-6</sup> CO: 2×10 <sup>-6</sup> CO <sub>2</sub> : 2×10 <sup>-6</sup> C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> : 2×10 <sup>-6</sup>

2000 年后我国才开始深入研究红外气体检测技术及装备,相继研发了 Gasboard-3000 在线红外烟气分析仪,可以同时测量 SO<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, NO, O<sub>2</sub> 五种气体浓度。钱伟康等<sup>[57]</sup>开展了基于 NDIR 原理的多组分气体监测研究,通过多窗口红外传感器组合实现了对大气中常规气体的定量检测与分析;叶刚等<sup>[58]</sup>开展了基于 NDIR 原理的多组分气体在线监测系统的设计研究;梁运涛等<sup>[59]</sup>以 NDIR 气体窄带吸收技术为基础,提出了不同温差下的零点校正吸光度温度补偿方法,得到了温度补偿后的矿用 NDIR 气体传感器气体浓度计算模型,解决了环境温度差异引起的测量误差(图 13),并研发了井下 JSG 系列红外光谱束管在线监测系统(图 14),实现了采空区 CH<sub>4</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> 等 9 种气体的在线监测,并在全国成功推广。此外, GJG10H, GJG100H(B) 等类型 NDIR 红外传感器也在煤矿井下气体检测方面得到了应用,提高了 CH<sub>4</sub> 检测精度<sup>[60-62]</sup>。

NDIR 技术具有精度高、响应快、性能稳定、寿命长的特点,但其使用的红外光源波长位于中红外波段(2.5~25.0 μm),CH<sub>4</sub> 气体会吸收 3.31 μm 处波长而引起光强度的减弱,而其他烷烃气体如 C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> 也会吸收该区域的红外光,导致吸收谱线重叠,容易增大测量误差。

### 3.3 TDLAS 分析技术

激光具有窄带特性,气体浓度能通过激光的特征吸收谱线来测定。近年来, TDLAS 技术已成为研究

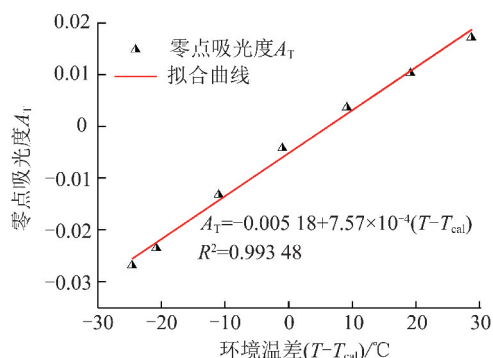
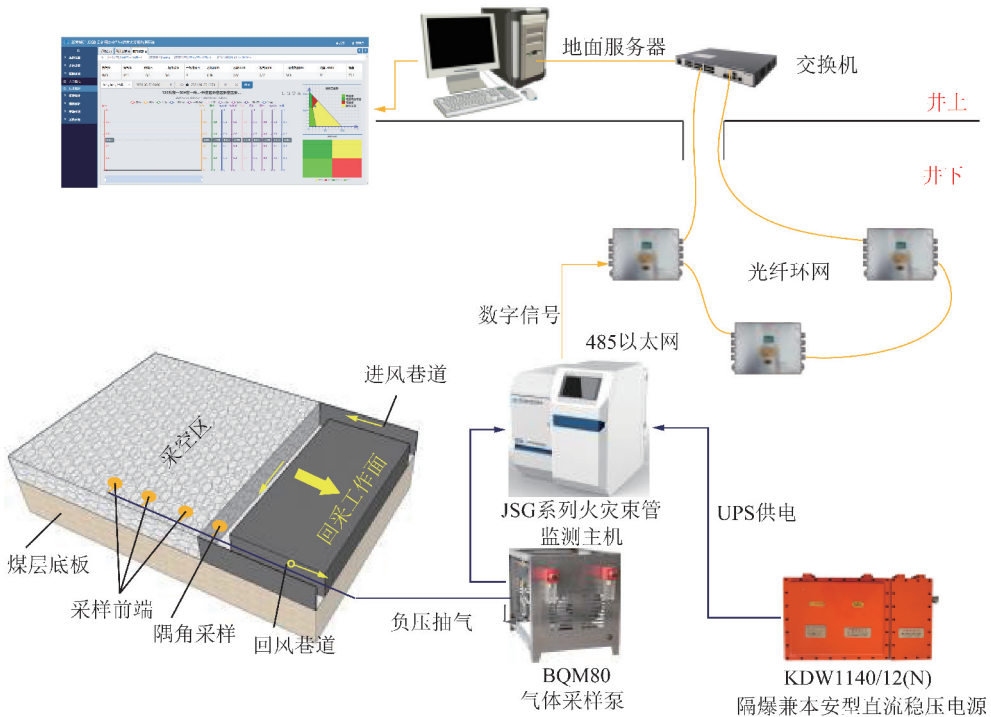
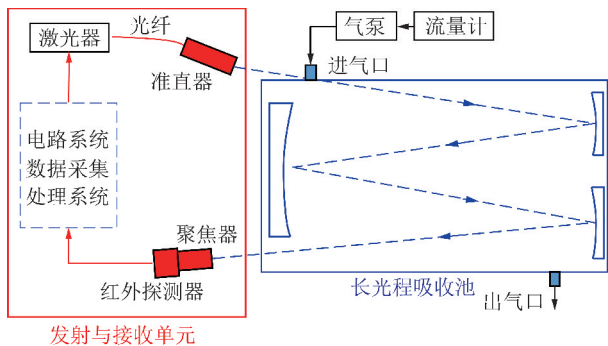


图 13 不同温差下的零点校正吸光度温度补偿<sup>[59]</sup>

Fig. 13 Temperature compensation of zero correction absorbance under different temperature difference<sup>[59]</sup>

热点,其原理如图 15 所示<sup>[63]</sup>。该技术使用激光作为光源,一般波长位于近红外区(0.78~2.50 μm),利用可调谐半导体激光器的窄线宽和波长随注入电流变化特性实现气体分子的单条或数条近距离吸收线定量分析,可同时检测多种煤矿气体,如 CH<sub>4</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S 等。

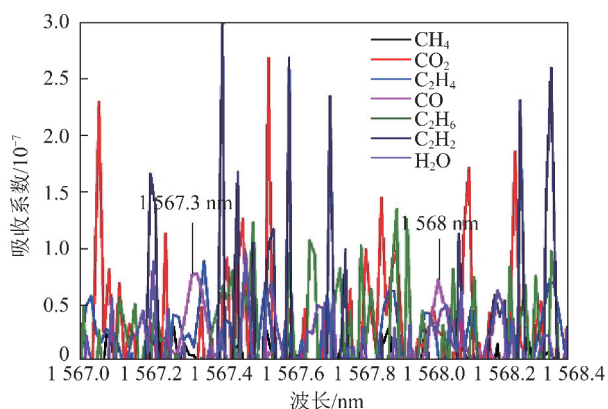
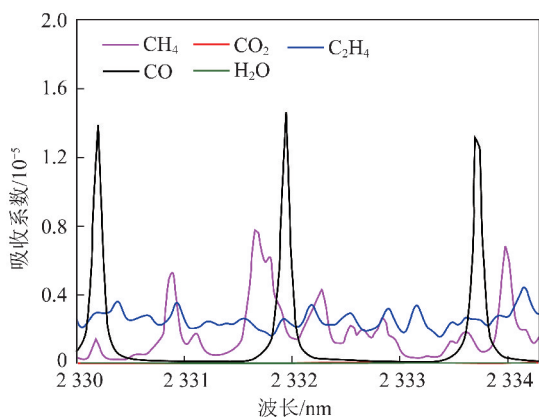
国外在 TDLAS 分析技术研究方面起步较早, KORMANN 等<sup>[64]</sup>采用 QCL 激光器和 TDLAS-WMS 技术,利用 CO 在 4.6 μm 附近的吸收峰在 36 m 超长气室取得了 0.5×10<sup>-9</sup> 的检测下限; MOESKOPS 等<sup>[65]</sup>利用 NO 气体在 5.4 μm 处的吸收峰,采用 WMS 技术和 76 m 的气室成功检测了下限为 0.2×10<sup>-9</sup> 的 NO; LATHDAVONG 等<sup>[66]</sup>在高温、高湿环境下开展了谐波技术检测 CO 浓度的研究。近年来 TDLAS 技术

图 14 JSG 系列红外光谱束管监测系统应用拓扑图<sup>[53]</sup>Fig. 14 Application topology diagram of JSG-type infrared spectrum tube bundle system<sup>[53]</sup>图 15 TDLAS 分析技术原理<sup>[63]</sup>Fig. 15 Principle of TDLAS analysis technology<sup>[63]</sup>

逐渐在煤矿气体检测领域得到应用,潘卫东等<sup>[67]</sup>利用 TDLAS 技术,选取 1 626.8 nm 附近的吸收峰作为检测谱线,结合波长调制和弱信号提取技术实现了痕量  $C_2H_4$  气体  $10 \times 10^{-6}$  的检测下限;于庆等<sup>[68]</sup>、冯文彬等<sup>[69-70]</sup>研发了矿用光谱设备中的多气体谱线调制技术和矿用激光光谱多参数有害气体分析检测装置,具有高精度、高灵敏度、宽量程、低误差等特点,克服了水蒸气、粉尘、背景气体等因素的干扰,并在煤矿井下气体检测领域进行了一定的推广;魏玉宾等<sup>[71-72]</sup>从混合气体成分检测和定量分析两方面开展了基于光声光谱技术的混合气体实时检测技术研究,采用可调谐  $CO_2$  激光器作为光源,设计的混合气体检测系统对大气环境中  $NH_3$ 、 $C_2H_4$ 、 $SF_6$  气体的检出限分别为  $1.65 \times 10^{-6}$ 、 $0.6 \times 10^{-6}$ 、 $0.023 \times 10^{-6}$ 。倪家升

等<sup>[71,73]</sup>开展了基于光纤气体检测技术的煤矿自然发火预测预报系统研究,利用分布反馈式半导体激光器实现了对  $CO$  体积分数  $10^{-6}$  量级的定量分析,并研发了一种基于光纤传感技术的煤矿  $CH_4$  在线检测系统;王伟峰等<sup>[74-75]</sup>利用 TDLAS 技术设计了一种煤自燃多组分指标气体激光光谱动态监测装置,可以实现对煤自燃过程中产生的  $CH_4$ 、 $CO$ 、 $CO_2$ 、 $O_2$ 、 $C_2H_4$  和  $C_2H_2$  气体的实时监测。姜萌等<sup>[76]</sup>选用美国太平洋西北国家实验室 (PNNL) 的谱图库,针对 TDLAS 分析技术 1.6  $\mu m$  波段  $CO$  吸收峰被  $CO_2$ 、 $CH_4$ 、 $C_2H_2$ 、 $C_2H_6$ 、 $C_2H_4$  等烷烃气体交叠的问题(图 16),分析了 2 330 nm 波段  $CO$  和  $CH_4$  吸收峰线宽、调制系数的差异(图 17),提出一种采用二次谐波波谷宽度作为评价因子的方法,实现了  $CH_4$  气氛下  $CO$  痕量气体的定量识别。

TDLAS 技术具有检测下限低、交叉干扰小、定量精度高、标校时间长、寿命长、可实时监测等优点。受研发和制造成本限制,主要采用 1.66  $\mu m$  波长激光器检测  $CH_4$ ,同时由于国内 DFB 激光器的制造技术进展缓慢,在煤矿气体监测领域仅开展了探索性研发,现有的 JSG6N 型激光束管监测系统<sup>[77]</sup>、KJ428 矿用分布式激光火情监测系统,初步解决了  $C_2H_4$ 、 $C_2H_2$  等痕量气体分析精度低的问题<sup>[78-79]</sup>,但交叉干扰问题依然未有效解决。

图16 1.6 μm波段CO吸收峰的交叠特征<sup>[76]</sup>Fig. 16 Overlapping characteristics of CO absorption peaks at 1.6 μm band<sup>[76]</sup>图17 PNNL数据库CO气体2330 nm处的吸收峰<sup>[76]</sup>Fig. 17 Absorption peaks of CO at 2330 nm by PNNL database<sup>[76]</sup>

## 4 技术适用性

### 4.1 工况环境分析

煤矿井下应用工况环境复杂,具有大气压力波动范围广、温度及相对湿度变化范围大、粉尘质量浓度高、电磁干扰强的特点,见表3<sup>[80-82]</sup>。同时存在煤岩垮落、机械振动、意外冲击等其他因素,且不同应用地点的环境条件差异较大,对煤矿气体检测技术的应用有着不同程度的影响。

表3 煤矿井下极端工况环境参数及变化范围<sup>[80-82]</sup>Table 3 Environmental parameters and change ranges of extreme working conditions in coal mines<sup>[80-82]</sup>

特征参数	变化范围
大气压力/kPa	80~116
环境温度/℃	15~35
相对湿度/%	70~100
粉尘质量浓度/(mg·m <sup>-3</sup> )	50~1 000
电磁强度/MHz	148~168

### 4.2 交叉干扰分析

催化燃烧式气体检测易受硫化物影响,不适用于在高硫矿井和超过4%以上瓦斯环境使用;热导式气体检测无选择性,不适用于在4%以下低瓦斯段精准测量时使用;光干涉式气体检测无选择性,不适用于贫氧环境使用;电化学式的强氧化性电解液不具备靶向性,气体检测存在着大量交叉干扰问题,表4给出了煤矿中常用的不同被测目标气体的交叉干扰特征。FT-IR, NDIR气体检测受湿度的影响较大,存在烃类气体吸收峰的交叉干扰;激光的单色特性决定了激光气体检测抗交叉干扰能力强,但采用近红外段激光器检测CO, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>时与CH<sub>4</sub>吸收峰有交叠现象。

表4 电化学原理几种常见气体间的交叉干扰

Table 4 Electrochemical cross interference between several common coal mine gases

序号	目标气体	干扰气体
1	H <sub>2</sub> S	SO <sub>2</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>
2	NH <sub>3</sub>	H <sub>2</sub> S, SO <sub>2</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>
3	CO	H <sub>2</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>
4	SO <sub>2</sub>	CO, NO, NO <sub>2</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>
5	NO	H <sub>2</sub> S, NO <sub>2</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>
6	NO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S, SO <sub>2</sub>
7	H <sub>2</sub>	CO, NO, C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>
8	烃类(C-H)	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> S, CO, SO <sub>2</sub> , NO, NO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub>

注:“C-H”表示CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>等烃类气体。

### 4.3 技术对比分析

目前采用的传感器、色谱分析、光谱分析技术在煤矿井下实际应用过程中均取得了一定的效果,并制定了NB/T 10162—2019《煤矿用红外气体分析仪通用技术条件》<sup>[83]</sup>和煤炭行业标准MT/T 757—2019《煤矿自然发火束管监测系统通用技术条件》<sup>[84]</sup>,规定了煤矿井下常见灾害气体检测相关的测量范围、测量误差等技术指标。但受限于方法本身或现场环境条件,存在不同程度的局限性。表5对不同气体检测技术从适用气体、优缺点、应用领域、代表仪器几方面进行了对比分析,以便根据煤矿井下不同工况条件选择合适的气体检测技术。

## 5 气体检测技术展望

### 5.1 单一气体检测

对于CH<sub>4</sub>,建议采用光干涉法、NDIR法、TDLAS法;对于O<sub>2</sub>,建议采用电化学法;对于CO,目前煤矿

监控系统中以电化学法为主、TDLAS 法为辅,使用电化学法在对敏感元件选型时,应避免烯烃类气体的干扰;对于  $C_2H_4$ ,建议采用电化学法和 TDLAS 法,使用电化学法需考虑  $CO$ ,  $C_2H_2$  等背景气的影响,选用近红外波段激光器时需考虑交叉干扰现象,同时可参考

色谱分析结果;对于  $C_2H_2$ ,建议采用 TDLAS 法,选择吸收峰  $1\ 590.2\ nm$ ,避开其他烃类气体的交叉干扰;对于  $H_2$ ,建议采用电化学法,需考虑  $CO$ ,  $C_2H_4$ ,  $C_2H_2$  等背景气的影响,但应考虑零点漂移现象;对于  $CO_2$ ,色谱法、光谱分析法均可采用。

表 5 不同气体检测技术对比分析

Table 5 Contrastive analysis of different gas detection technologies

类别	传感器技术				色谱分析技术	红外光谱技术		
	催化燃烧式	热导式	光干涉式	电化学式		FTIR	NDIR	TDLAS
适用气体	$CH_4$	$CH_4$	$CH_4$	$O_2, H_2S, NH_3, CO, SO_2, NO, NO_2, CH_4, C_2H_4, C_2H_2, H_2$	煤矿全组分气体	$CH_4, CO, CO_2, C_2H_6, C_2H_4, C_2H_2, C_3H_8, i-C_4H_{10}, n-C_4H_{10}$ 等	$CH_4, CO, CO_2, C_2H_4, SF_6$ 等	$CH_4, CO, CO_2, C_2H_4, C_2H_2, H_2S$ 等
优点	灵敏度高、线性度高、精度高	检测范围广、寿命长、可贫氧环境使用	精度高、寿命长	精度高、灵敏度	灵敏度高、分离度好、多组分测量	光谱范围宽、分辨率高、信噪比高	灵敏度高、可测组分多	检测下限低、灵敏度及精度高、单色性好
缺点	范围窄、寿命短、高浓度激活、硫化物中毒	湿度影响大、 $CO_2$ 气体干扰	气压及温湿度影响大、烷烃气体干扰	寿命短、零点漂移、存在交叉干扰	分析周期长、操作维护复杂	气体交叉干扰、湿度影响大、无法分析双原子气体	烷烃气体谱线重叠、受温度影响大	受温湿度影响
应用领域	井下日常 (0~4%) $CH_4$ 检测	抽采管道 (1%~100%) $CH_4$ 检测	全量程 (0~100%) $CH_4$ 巡检	便携式、监测监控	井下自然发火监测、实验室多组分气体分析	实验室多组分气体分析	井下气体在线监测	井下气体在线监测
代表仪器	GJC4, KG9701A	GJT100S	CJG10X	GTH1000, GTH500	KBGC-4A, GC-4000	CFTIR1000, Tensor 27, Spectrum100	JSG5/6/8, GJG10H	GJG100J

## 5.2 多组分气体监测

井上实验室建议采用传统色谱分析法,色谱分析法精度高,可实现对  $CH_4$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $O_2$ ,  $N_2$ ,  $C_2H_4$ ,  $C_2H_2$  等煤矿气体的定量分析,但不能做到实时监测,且操作相对复杂。此外随着 FTIR 分析技术的发展,有望在煤矿实验室多组分气体定量分析领域得到推广应用。

(1)对于煤矿井下气体的原位日常监测,建议采用集成 TDLAS、NDIR、电化学等多种检测技术的在线监测系统,置于井下近工作面端,实现对  $CH_4$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $O_2$ ,  $C_2H_4$ ,  $C_2H_2$  等煤矿气体的在线定量分析。此外,随着本质安全型气相色谱仪的技术突破,为色谱束管监测系统在煤矿井下的应用奠定了基础。

(2)对于矿山应急救援期间的有毒有害气体原位监测,建议根据应急救援实战方案,选用基于不同检测技术研发的本安型便携式多参数气体分析仪、移动式智能监测系统等,可监测气体种类应涵盖《煤矿安全规程》第 135 条要求检测的有毒有害气体范

围,并与不同应用场景救灾通讯及调度系统兼容,实现矿井爆炸环境气体的原位分析、爆炸危险性智能识别及报警等,为矿山灾害救援决策提供科学依据。

## 5.3 展 望

我国煤矿气体检测在传感器技术、色谱分析技术、光谱分析技术等方面取得了长足进步,基本满足了井下气体的日常检测需求,但煤矿自燃火灾、瓦斯爆炸等复合灾害耦合演变过程复杂,仍缺乏复合灾害灾变感知与动态预警的有效技术手段,亟需在满足高精度、宽量程条件下,集成 TDLAS、时间分辨光谱和离子迁移谱等技术,重点解决痕量气体的低检出限、多组分混合气体交叉干扰、特定波长激光器及高性能检测器成本昂贵等“卡脖子”难题,实现煤矿气体的原位定量分析和动态监测;同时围绕矿山应急救援期间对爆炸环境信息原位分析的实战需求,研发智能化便携式爆炸环境有毒有害气体分析技术。建立基于多元异构信息融合的灾害预警模型与辨识指标,为准确识别煤矿灾害事故的发生发展状态、指导应急救援

工作提供基础支撑。

## 参考文献 (References):

- [1] 王德明. 煤矿热动力灾害学[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- [2] 梁运涛, 罗海珠. 中国煤矿火灾防治技术现状与趋势[J]. 煤炭学报, 2008, 33(2): 126-130.  
LIANG Yuntao, LUO Haizhu. Current situation and development trend for coal mine fire prevention & extinguishing techniques in China[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(2): 126-130.
- [3] 王连聪, 梁运涛, 罗海珠. 我国矿井热动力灾害理论研究与展望[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(7): 1-9.  
WANG Liancong, LIANG Yuntao, LUO Haizhu. Research progress and outlook on theory of thermodynamic disaster of coal mine in China[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(7): 1-9.
- [4] 梁运涛. 煤自然发火期快速预测研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.  
LIANG Yuntao. Study on rapid forecast of coal spontaneous combustion period[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010.
- [5] 王德明, 邵振鲁, 朱云飞. 煤矿热动力重大灾害中的几个科学问题[J]. 煤炭学报, 2021, 46(1): 57-64.  
WANG Deming, SHAO Zhenlu, ZHU Yunfei. Several scientific issues on major thermodynamic disasters in coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(1): 57-64.
- [6] 梁运涛, 侯贤军, 罗海珠, 等. 我国煤矿火灾防治现状及发展对策[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(6): 1-6.  
LIANG Yuntao, HOU Xianjun, LUO Haizhu, et al. Development countermeasures and current situation of coal mine fire prevention & extinguishing in China[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(6): 1-6.
- [7] 童敏明. 催化传感器的研究与应用技术[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2002.
- [8] 陈杰. 矿用 CH<sub>4</sub>, CO 传感器失效机理与解决方案[D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2014.  
CHEN Jie. The failure mechanism of CH<sub>4</sub>, CO sensor used in coal mine and the corresponding solutions[D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2014.
- [9] 张铁群. 高性能燃烧催化剂的制备及其甲烷气敏特性的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2012.  
ZHANG Yiqun. Preparation of high-performance combustion catalyst and research of its sensing property to methane[D]. Changchun: Jilin University, 2012.
- [10] 于微微. 矿用自校准多参数传感器的研究[D]. 南昌: 东华理工大学, 2015.  
YU Weiwei. Research of mining self-calibration multi-parameter sensor[D]. Nanchang: East China University of Technology, 2015.
- [11] 李朝霞. 基于双敏感模式的全量程甲烷检测仪设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2015.  
LI Zhaoxia. The design of full-scale methane detector based on double-sensitive modes[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2015.
- [12] 于洋. 具有抗中毒功能的催化燃烧式甲烷浓度检测仪[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2016.  
YU Yang. The catalytic combustion type methane concentration detector with anti-poisoning function[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2014.
- [13] VAN Herwaarden A. Overview of calorimeter chips for various applications[J]. Thermochimica Acta, 2005, 432(2): 192-201.
- [14] 陈越超. 热导式全量程甲烷变送器研制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2014.  
CHEN Yuechao. The development of thermal conductivity full-scale methane transmitter[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2014.
- [15] 何道清, 张禾, 谌海云. 传感器与传感器技术[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [16] 林浩, 李恩, 梁自泽, 等. 光干涉甲烷检测器的光路改进与零点补偿[J]. 煤炭学报, 2015, 40(1): 218-225.  
LIN Hao, LI En, LIANG Zize, et al. Configuration improvement and zero-drift error compensation of light interference methane detector[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(1): 218-225.
- [17] 翟波, 戴峻, 王晓虹. 光干涉甲烷传感器标校与非线性补偿研究[J]. 煤矿安全, 2017, 48(4): 115-117.
- [18] ZHAI Bo, DAI Jun, WANG Xiaohong. Research on calibration and nonlinear compensation of light interference methane sensor[J]. Safety in Coal Mines, 2017, 48(4): 115-117.
- [19] 梁运涛, 陈成锋, 田富超, 等. 甲烷气体检测技术及其在煤矿中的应用[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(4): 40-48.  
LIANG Yuntao, CHEN Chengfeng, TIAN Fuchao, et al. Methane gas detection technology and its application in coal mines[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(4): 40-48.
- [20] MT/T 1098—2009, 煤矿用光干涉式甲烷气体传感器[S]. 北京: 国家安全生产监督管理总局, 2010.
- [21] 何根. 矿用一氧化碳变送器[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2014.  
HE Gen. Mining carbon monoxide transmitter[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2014.
- [22] 刘召娜. 新型纳米结构材料在电化学传感器中的研究与应用[D]. 济南: 山东大学, 2012.  
LIU Zhaona. The application of novel nanostructural materials on electrochemical sensors[D]. Jinan: Shandong University, 2012.
- [23] 俞惟乐, 欧庆瑜. 毛细管气相色谱和分离分析新技术[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [24] 傅若农. 国内气相色谱近年的进展[J]. 分析实验室, 2003, 22(2): 94-107.  
FU Ruonong. Advances on gas chromatography in China[J]. Chinese Journal of Analysis Laboratory, 2003, 22(2): 94-107.
- [25] 梁运涛. 煤自燃过程热物理场效特性实验研究[D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2002.  
LIANG Yuntao. Experimental research on the molophysical field properties of coal in spontaneous combustion process[D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2002.
- [26] 罗海珠, 梁运涛. 煤自然发火预测预报技术的现状与展望[J]. 中国安全科学学报, 2003, 13(3): 76-78.  
LUO Haizhu, LIANG Yuntao. Current status and perspective of forecast and prediction techniques for spontaneous combustion of coal[J]. China Safety Science Journal, 2003, 13(3): 76-78.

- [26] 张军杰. 煤矿束管监测系统的现状与发展趋势[J]. 煤矿安全, 2019,50(12):89-92.  
ZHANG Junjie. Current situation and development trend of coal mine beam tube monitoring system[J]. Safety in Coal Mines, 2019,50(12):89-92.
- [27] 邓军,张群,金永飞,等. JSG-8型矿井火灾束管监测系统应用关键技术[J]. 矿业安全与环保,2013,40(3):47-49.  
DENG Jun,ZHANG Qun,JIN Yongfei, et al. Key technologies for application of JSG-8 mine fire bundle tube monitoring system[J]. Mining Safety & Environmental Protection,2013,40(3):47-49.
- [28] 张隆科,杨杰,郭景发,等. 连续自动监测系统在矿井防灭火工作中的应用[J]. 煤矿安全,2007,38(12):23-26.  
ZHANG Longke,YANG Jie,GUO Jingfa, et al. Application of continuous automatic monitoring system in underground fire prevention and control[J]. Safety in Coal Mines,2007,38(12):23-26.
- [29] 张军杰,梁运涛,秦玉金,等. 一种本质安全型气相色谱仪及使用的方法[P]. 中国专利:ZL 202010293295.1,2020-08-11.
- [30] 梁运涛,汤晓君,罗海珠,等. 煤层自然发火特征气体的光谱定量分析[J]. 光谱学与光谱分析,2011,31(9):2480-2484.  
LIANG Yuntao,TANG Xiaojun,LUO Haizhu, et al. Quantitative spectrum analysis of characteristic gases of spontaneous combustion coal[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis,2011,31(9):2480-2484.
- [31] 冯明春,徐亮,金岭,等. 傅里叶变换红外光谱仪动镜倾斜和动态校准研究[J]. 光子学报,2016,45(4):163-167.  
FENG Mingchun,XU Liang,JIN Ling, et al. Tilt and dynamic alignment for the moving mirror in the Fourier transform infrared spectrometer[J]. Acta Photonica Sinica,2016,45(4):163-167.
- [32] GRIFFITH D W,GALLE B. Flux measurements of  $\text{NH}_3$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  and  $\text{CO}_2$  using dual beam FTIR spectroscopy and the flux-gradient technique[J]. Atmospheric Environment,2000,34(7):1087-1098.
- [33] MARZEC A. New structural concept for carbonized coals[J]. Energy & Fuels,1997,11(4):837-842.
- [34] GENG W,NAKAJIMA T,TAKANASHI H, et al. Analysis of carboxyl group in coal and coal aromaticity by Fourier transform infrared (FT-IR) spectrometry[J]. Fuel,2009,88(1):139-144.
- [35] 洪林,王继仁,邓存宝,等. 煤炭自燃生成标志气体的红外光谱分析[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2006,25(5):645-648.  
HONG Lin,WANG Jiren,DENG Cunbao, et al. Analysis on infrared spectrum study of significant gas produced by coal spontaneous combustion[J]. Journal of Liaoning Technical University,2006,25(5):645-648.
- [36] LIANG Y,TIAN F,LUO H, et al. Characteristics of coal re-oxidation based on microstructural and spectral observation[J]. International Journal of Mining Science and Technology,2015,25(5):749-754.
- [37] 梁运涛,王树刚,蒋爽,等. 煤炭自然发火介尺度分析:从表征体元宏观模型到孔隙微观模型[J]. 煤炭学报,2019,44(4):1138-1146.  
LIANG Yuntao,WANG Shugang,JIANG Shuang, et al. Analysis of mesoscale in coal spontaneous combustion:From macro-model of representative elementary volume scale to micro-model of pore scale[J]. Journal of China Coal Society,2019,44(4):1138-1146.
- [38] 王连聪. 基于光谱定量的矿井极性气体特征吸收峰提取[A]. 第十届全国煤炭工业生产一线青年技术创新文集[C]. 北京:煤炭工业出版社,2016:526-534.
- [39] LIANG Y,TANG X,ZHANG X, et al. Portable gas analyzer based on fourier transform infrared spectrometer for patrolling and examining gas exhaust[J]. Journal of Spectroscopy,2015,136516:1-7.
- [40] 王连聪,梁运涛. 煤无氧升温中CO产生及变化规律的光谱分析[J]. 煤炭学报,2017,42(7):1790-1794.  
WANG Liancong,LIANG Yuntao. Spectral analysis on laws of generation and variability of CO during oxygen-free programmed temperature of coal[J]. Journal of China Coal Society,2017,42(7):1790-1794.
- [41] 梁运涛,孙勇,罗海珠,等. 基于小样本的煤层自然发火烷烃气体的光谱分析[J]. 煤炭学报,2015,40(2):371-376.  
LIANG Yuntao,SUN Yong,LUO Haizhu, et al. Spectral analysis of alkane gases of coal spontaneous combustion with a small quantity sample[J]. Journal of China Coal Society,2015,40(2):371-376.
- [42] TANG X,LIANG Y,DONG H, et al. Analysis of index gases of coal spontaneous combustion using fourier transform infrared spectrometer[J]. Journal of Spectroscopy,2014,414391:1-7.
- [43] 白鹏,刘君华. SVM在混合气体光谱分析中的应用[J]. 仪器仪表学报,2006,27(10):1242-1247.  
BAI Peng,LIU Junhua. Application of SVM to mixed gas spectrum analysis[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2006,27(10):1242-1247.
- [44] 郝惠敏,汤晓君,白鹏,等. 基于核主成分分析和支持向量回归机的红外光谱多组分混合气体定量分析[J]. 光谱学与光谱分析,2008,28(6):1286-1289.  
HAO Huimin,TANG Xiaojun,BAI Peng, et al. Quantitative analysis of multi-component gas mixture based on KPCA and SVR[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis,2008,28(6):1286-1289.
- [45] 李玉军,汤晓君,刘君华. 基于粒子群优化的最小二乘支持向量机在混合气体定量分析中的应用[J]. 光谱学与光谱分析,2010,30(3):774-778.  
LI Yujun,TANG Xiaojun,LIU Junhua. Application of least square support vector machine based on particle swarm optimization in quantitative analysis of gas mixture[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis,2010,30(3):774-778.
- [46] 葛岭梅,薛韩玲,徐精彩,等. 对煤分子中活性基团氧化机理的分析[J]. 煤炭转化,2001,24(3):23-28.  
GE Lingmei,XUE Hanling,XU Jingcai, et al. Study on the oxidation mechanism of active groups of coal[J]. Coal Conversion,2001,24(3):23-28.
- [47] 冯杰,李文英,谢克昌. 傅立叶红外光谱法对煤结构的研究[J]. 中国矿业大学学报,2002,31(5):362-366.  
FENG Jie,LI Wenying,XIE Kechang. Research on coal structure using FT-IR[J]. Journal of China University of Mining & Technology,2002,31(5):362-366.
- [48] 张国枢,谢应明,顾建明. 煤炭自燃微观结构变化的红外光谱分析[J]. 煤炭学报,2003,28(5):473-476.

- ZHANG Guoshu, XIE Yingming, GU Jianming. Infrared spectral analysis of microstructure change during the coal spontaneous oxidation[J]. *Journal of China Coal Society*, 2003, 28(5): 473-476.
- [49] 王德明. 煤氧化动力学理论及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [50] 王继仁, 金智新, 邓存宝. 煤自燃量子化学理论[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [51] WONG J Y, SCHELL M. Zero drift NDIR gas sensors[J]. *Sensor Review*, 2011, 31(1): 70-77.
- [52] CALAZA C, MECA E, MARCO S, et al. Assessment of the final metrological characteristics of a MOEMS-based NDIR spectrometer through system modeling and data processing [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2003, 3(5): 587-594.
- [53] 田富超. 煤矿采空区火灾气体红外光谱在线分析技术[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
- TIAN Fuchao. The real-time analysis of infrared spectrum for fire gas in coal mine goaf [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.
- [54] FONOLLOSA J, CARMONA M, SANTANDER J, et al. Limits to the integration of filters and lenses on thermoelectric IR detectors by flip-chip techniques[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2009, 149(1): 65-73.
- [55] PENG J, JI X M, SHI Y W, et al. A novel NDIR CO<sub>2</sub> sensor using a mid-IR hollow fiber as a gas cell[A]. 10th IEEE International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology [C]. Shanghai: IEEE, 2010: 1489-1491.
- [56] 孙友文. 温室气体的 NDIR 现场检测技术及红外 DOAS 遥感方法[D]. 北京: 中国科学院大学, 2013.
- SUN Youwen. NDIR on-site detection technology and infrared DOAS remote sensing method of greenhouse gases[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013.
- [57] 钱伟康, 黄晓琅, 钱建秋. 基于非分光 (NDIR) 原理实现多组分气体监测研究[J]. *计算机工程与应用*, 2012, 48(S2): 92-95.
- QIAN Weikang, HUANG Xiaoyin, QIAN Jianqiu. Research of implementation for multi-component gas monitoring based on principle of NDIR [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2012, 48(S2): 92-95.
- [58] 叶刚, 赵静, 陈建伟. 基于 NDIR 原理的多组分气体在线监测系统的设计与实现[J]. *计算机应用与软件*, 2019, 36(8): 115-119, 188.
- YE Gang, ZHAO Jing, CHEN Jianwei. Design and implementation of multicomponent gas online monitoring system based on NDIR [J]. *Computer Applications and Software*, 2019, 36(8): 115-119, 188.
- [59] 梁运涛, 田富超, 董浩喆, 等. 一种矿用 NDIR 气体传感器及浓度定量分析温度补偿方法[P]. 中国专利: CN 202110314407. 1, 2021-03-24.
- [60] 刘怀森, 程伟, 高修忠, 等. GJG10H 型红外甲烷传感器[J]. *煤炭科技*, 2010(1): 80-81.
- LIU Huaisen, CHENG Wei, GAO Xiuzhong, et al. GJG10H infrared methane sensor [J]. *Coal Science & Technology Magazine*, 2010(1): 80-81.
- [61] 何云文. 红外甲烷传感器的研究及应用[J]. 硅谷, 2013(15): 26-27.
- HE Yunwen. Research and application of infrared methane sensor [J]. *Silicon Valley*, 2013(15): 26-27.
- [62] 郑顺卿, 刘炎伟, 刘正威, 等. GJG4/100-H 型甲烷传感器在超化煤矿的应用[J]. *中州煤炭*, 2010(7): 89, 116.
- ZHENG Shunqing, LIU Yanwei, LIU Zhengwei, et al. Application of GJG4/100-H methane sensor in Chaohua Coal Mine [J]. *Zhongzhou Coal*, 2010(7): 89, 116.
- [63] 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 Weidong, ZHANG Jiawei, DAI Jingmin, et al. Tunable diode laser absorption spectroscopy system for trace ethylene detection [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, 32(10): 2875-2878.
- [64] KORMANN R, FISCHER H, GURK C, et al. Application of a multi-laser tunable diode laser absorption spectrometer for atmospheric trace gas measurements at sub-ppbv levels [J]. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2002, 58(11): 2489-2498.
- [65] MOESKOPS B M, CRISTESCU S, HARREN F M. Sub-part-per-billion monitoring of nitric oxide by use of wavelength modulation spectroscopy in combination with a thermoelectrically cooled, continuous-wave quantum cascade laser [J]. *Optics Letters*, 2006, 31(6): 823-825.
- [66] LATHDAVONG L, SHAO J, KLUCZYNSKI P, et al. Methodology for detection of carbon monoxide in hot, humid media by telecommunication distributed feedback laser-based tunable diode laser absorption spectrometry [J]. *Applied Optics*, 2011, 50(17): 2531-2550.
- [67] 潘卫东. 基于 TDLAS 的痕量乙烯气体检测技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- PAN Weidong. Research on tunable diode laser absorption spectroscopy for gas analysis of trace ethylene [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [68] 于庆. 基于光谱吸收的气体检测技术在煤矿中的应用[J]. *矿业安全与环保*, 2012, 39(3): 26-29, 32.
- YU Qing. Application of gas detection technology based on spectral absorption in coal mine [J]. *Mining Safety & Environmental Protection*, 2012, 39(3): 26-29, 32.
- [69] 冯文彬. 矿用激光光谱多参数有害气体分析检测装置[J]. *煤矿安全*, 2015, 46(4): 100-102, 105.
- FENG Wenbin. Multi-parameter disaster gas analysis and detection device of mine-used laser spectrum [J]. *Safety in Coal Mines*, 2015, 46(4): 100-102, 105.
- [70] 冯文彬. 矿用光谱设备中的多气体谱线调制技术[J]. *煤矿安全*, 2015, 46(5): 117-120.
- FENG Wenbin. Modulation technology of multi-gas spectrum line in mine-used spectral equipment [J]. *Safety in Coal Mines*, 2015, 46(5): 117-120.
- [71] 倪家升, 李艳芳, 刘统玉, 等. 光纤气体传感器在采矿安全中的应用[A]. 全国第十三次光纤通信暨第十四届集成光学学术会议论文集[C]. 北京: 电子工业出版社, 2007: 468-473.

- NI Jiasheng, LI Yanfang, LIU Tongyu, et al. Application of fiber-optic gas sensor in the coal mining safety [A]. Proceeding of the 13th national optical fiber communication and the 14th integrated optics academic conference [C]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2007: 468-473.
- [72] 魏玉宾. 光纤气体传感器及其安全工程应用中的关键技术研究 [D]. 济南: 山东大学, 2016.
- WEI Yubin. Research on key technologies of optical fiber gas sensor and its application in safety engineering [D]. Jinan: Shandong University, 2016.
- [73] 倪家升, 常军, 刘统玉, 等. 基于光纤气体检测技术的煤矿自然发火预测预报系统 [J]. 应用光学, 2009, 30(6): 996-1002.
- NI Jiasheng, CHANG Jun, LIU Tongyu, et al. Spontaneous combustion prediction in coal mine goaf based on fiber sensing of gas [J]. Journal of Applied Optics, 2009, 30(6): 996-1002.
- [74] 王伟峰, 邓军, 侯媛彬. 煤自燃危险区域高密度网络化监测预警系统设计与应用 [J]. 煤炭技术, 2018, 37(3): 218-220.
- WANG Weifeng, DENG Jun, HOU Yuanbin. Design and application of high density network monitoring and warning system in coal spontaneous combustion hazardous area [J]. Coal Technology, 2018, 37(3): 218-220.
- [75] 杜京义, 殷聪, 王伟峰, 等. 基于 TDLAS 的痕量 CO 浓度检测系统及温压补偿 [J]. 光学技术, 2018, 44(1): 19-24.
- DU Jingyi, YIN Cong, WANG Weifeng, et al. Detection system of trace CO based on TDLAS and temperature and pressure compensation [J]. Optical Technique, 2018, 44(1): 19-24.
- [76] JIANG M, WANG X, XIAO K, et al. A calibration-free carbon monoxide sensor based on TDLAS technology [A]. Proceeding of Applied Optics and Photonics China [C]. Beijing: International Society for Optics and Photonics, 2020: 115690P.
- [77] 吴兵, 雷柏伟, 彭燕, 等. JSG4 井下型火灾束管监测系统的开发 [J]. 矿业安全与环保, 2013(5): 48-51.
- WU Bing, LEI Baiwei, PENG Yan, et al. Development of JSG4 underground bundle tube fire monitoring system [J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2013(5): 48-51.
- [78] 朱海龙, 高华. 仪器仪表的智能化与科技创新 [J]. 才智, 2013(25): 223-223.
- ZHU Hailong, GAO Hua. Intelligent and technological innovation of instruments and meters [J]. Caizhi, 2013(25): 223-223.
- [79] 谢巧军, 刘杰. 分布式激光火情监控系统在寸草塔二矿的应用 [J]. 陕西煤炭, 2019, 38(3): 102-105, 62.
- XIE Qiaojun, LIU Jie. Application of distributed laser fire monitoring system in Cuncaota coal mine [J]. Shaanxi Meitan, 2019, 38(3): 102-105, 62.
- [80] 曹利波. 煤矿井下环境对甲烷催化元件性能影响的探讨 [D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2008.
- CAO Libo. The discussion about the coal mine shaft environment's influence on the methane catalytic component [D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2008.
- [81] 张江石, 李志伟, 安宇, 等. 矿井气压变化和瓦斯涌出的关系分析与实证研究 [J]. 煤矿安全, 2009, 40(9): 83-85.
- ZHANG Jiangshi, LI Zhiwei, AN Yu, et al. Analysis and empirical study on the relationship between mine air pressure change and gas emission [J]. Safety in Coal Mines, 2009, 40(9): 83-85.
- [82] 石发强. 矿井煤尘和湿度对红外瓦斯传感器的影响 [J]. 煤矿安全, 2013, 44(8): 172-174.
- SHI Faqiang. The influence of coal dust and humidity on infrared gas sensor [J]. Safety in Coal Mines, 2013, 44(8): 172-174.
- [83] NB/T 10162—2019, 煤矿用红外气体分析仪通用技术条件 [S]. 北京: 国家能源局, 2019.
- [84] MT/T 757—2019, 煤矿自然发火束管监测系统通用技术条件 [S]. 北京: 国家安全生产监督管理总局, 2019.