

# 激光与光电子学进展

## 激光/光纤传感技术研究及其在煤矿安全监测预警中的应用

刘统玉<sup>1,2,3\*</sup>, 王兆伟<sup>1</sup>, 李振<sup>1</sup>, 金光贤<sup>2</sup>, 王纪强<sup>1</sup>, 胡杰<sup>2</sup>, 李艳芳<sup>1</sup>, 魏玉宾<sup>1</sup>, 宁雅农<sup>1</sup>, 杨青山<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>齐鲁工业大学(山东省科学院), 激光研究所, 山东 济南 250103;

<sup>2</sup>山东微感光电子有限公司, 山东 济南 250103;

<sup>3</sup>广东感芯激光科技有限公司, 广东 佛山 528226

**摘要** 我国煤矿工作条件复杂, 存在瓦斯爆炸、火灾、设备故障、次生火灾等安全隐患。光纤/激光传感器以其无源、本质安全的特性, 以及高精度、低漂移等性能, 在煤矿安全领域具有传统电子类传感器无法比拟的优势。本文介绍了激光甲烷、一氧化碳等气体传感器, 光纤光栅风速传感器和光纤分布式温度传感器的研究进展, 及其在智能矿山建设中的煤矿瓦斯监控、智能防火和安全监测预警等典型应用。

**关键词** 光纤光学; 煤矿安全; 激光气体传感器; 光纤光栅风速传感器; 光纤分布式温度传感器

中图分类号 TP212.6

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1306016

## Advance of Laser and Fiber Optic Sensors for Applications of Coal Mine Safety Monitoring and Early Warning

Liu Tongyu<sup>1,2,3\*</sup>, Wang Zhaowei<sup>1</sup>, Li Zhen<sup>1</sup>, Jin Guangxian<sup>2</sup>, Wang Jiqiang<sup>1</sup>, Hu Jie<sup>2</sup>,  
Li Yanfang<sup>1</sup>, Wei Yubin<sup>1</sup>, Ning Yanong<sup>1</sup>, Yang Qingshan<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Laser Institute, Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences),  
Jinan, Shandong 250103, China;

<sup>2</sup>Shandong Micro-Sensor Photonics Ltd., Jinan, Shandong 250103, China;

<sup>3</sup>Guangdong Ganxin Laser Technology Ltd., Foshan, Guangdong 528226, China

**Abstract** The working conditions of coal mines in our country are complex, and there are potential safety hazards such as gas explosion, fire, equipment failure, and subsequent safety hazards. Optical fiber/laser sensors, with their features of passive, intrinsically safe characteristics, high precision, low drift and other performance, have incomparable advantages in the field of coal mine safety that traditional electronic sensors cannot match. This paper introduces the research progress and application of the laser methane sensors, carbon monoxide sensors, optical fiber Bragg grating wind speed sensor, and fiber distributed temperature sensor in the construction of intelligent mines, for coal mine gas monitoring, intelligent fire prevention, safety monitoring, and early warning.

**Key words** fiber optics; coal mine safety; laser gas sensor; fiber Bragg grating wind speed sensor; fiber distributed temperature sensor

**OCIS codes** 060.3510; 060.3735; 280.3420; 060.2370

收稿日期: 2021-05-03; 修回日期: 2021-06-04; 录用日期: 2021-06-07

基金项目: 山东省重大科技创新工程(2019JZZY020501)、山东省自然科学基金(ZR2020QF098, ZR2020KC012)、山东省激光装备创新创业共同体(JGZB-Y-001)、齐鲁工业大学(山东省科学院)科教产融合创新试点工程项(2020KJC-ZD04)

通信作者: \*tongyu.liu@vip.iss-ms.com

## 1 引言

中国现有约 5000 余座煤矿,95% 以上为井工煤矿,存在瓦斯、自然发火、冲击地压等动力灾害。2020 年度煤矿安全事故 122 起,死亡 225 人<sup>[1]</sup>,煤炭开采属于高危行业。在煤炭开采过程中,瓦斯爆炸、自然发火、水害、动力灾害等是主要安全隐患。提升煤矿井下巷道掘进、采煤、运输、提升、通风、供排水等专业的机械化和自动化程度,减少井下作业人员,是安全高效生产的根本出路。对井下环境有害气体、支护受力、围岩变形、岩石稳定性等地质参数、水文参数,以及火灾隐患标志性气体、温度等多参数的在线监测,是实现煤炭安全生产、灾害预警和防控的信息基础。在煤矿井下建设用于采掘、运输、通风、排水、胶带运输、井筒提升等关键装备的多参数状态监测的物联网,也是实现矿用装备由自动化提升到智能化的重要基础。在煤矿井下,电子类传感器所需要的供电及信号传输线缆对于覆盖环境、结构和设备安全监测所需要的海量传感器物联网构成了制约瓶颈;而光纤传感器的传输光纤不带电,具有长距离、大容量、分布式、多参数的检测特点,成为矿山物联网传感器的优选方案<sup>[2]</sup>。

煤矿井下使用的激光和光纤传感器可分为三类:1) 基于气体吸收光谱分析的激光甲烷( $\text{CH}_4$ )、一氧化碳(CO)等气体传感器;2) 基于光纤光栅的温度、位移、压力、振动等光纤多点式或准分布式物理量传感器;3) 基于拉曼散射、布里渊散射或瑞利散射原理的光纤分布式温度、应变、振动等传感器。

煤矿  $\text{CH}_4$  检测自 20 世纪 50 年代起一直使用催化燃烧式传感器<sup>[3]</sup>,该技术存在易中毒、选择性差,以及检测灵敏度漂移需要频繁标校等缺点<sup>[4]</sup>。红外气体传感器采用宽带红外光源和光学滤波器差动式光电检测,易受湿度和温度影响<sup>[5]</sup>,在煤矿井下潮湿环境下,可靠性和稳定性较差。随着光通信技术的发展,半导体激光器近年来得到长足发展,进而为激光和光纤气体传感器的发展奠定了技术基础。自 20 世纪 80 年代初 Reid 等<sup>[6]</sup>报道  $\text{CH}_4$  激光光谱二次谐波检测和遥测技术<sup>[7]</sup>以来,在光纤式<sup>[8]</sup>,以及微型化、低功耗<sup>[9]</sup>等方面都取得了工程化进步,自 2017 年以来在我国煤矿逐步开展现场应用<sup>[10]</sup>,激光  $\text{CH}_4$  传感器维护周期从传统催化燃烧式  $\text{CH}_4$  传感器所需要的两周延长到 6 个月,为减少煤矿井下作业人员数量,提升煤矿安全生产水平发挥了技术支撑作用。

光纤光栅作为波长调制器件,为光纤温度、应变、位移、压力、振动等多参数检测提供了基础<sup>[11]</sup>。根据煤矿安全生产需求,人们研发生产了光纤光栅式应变、位移、压力<sup>[12]</sup>、倾角<sup>[13]</sup>、振动、微震<sup>[14]</sup>等传感器。光纤光栅传感器、光栅波长解调检测技术,以及光栅的复用技术使得被测量免受光缆接头损耗影响,其环境适应性强,信号传输长度和监测范围可达数十千米,为煤矿井下建立多点多参数传感器网络提供了便利。

光纤分布式传感器利用光子在纤芯传输中的散射效应实现沿光纤长度各点的分布式温度<sup>[15]</sup>、应变<sup>[16]</sup>及振动的监测<sup>[17-18]</sup>。近十余年来,光纤分布式温度传感器在煤矿采空区自然发火、胶带运输机摩擦起火<sup>[19]</sup>以及电缆火灾<sup>[20]</sup>等监测预警方面的应用研究和发展激起煤矿矿山用户的强烈兴趣,也取得了较多进展。分布式应变传感器为矿体力学相似模型岩石变形、坍塌,以及煤矿应力场随采动变化规律的研究工作提供了有效手段<sup>[21-22]</sup>。分布式振动在设备振动包括胶带运输机托辊振动<sup>[18]</sup>及应急救援被困人员定位方面的研究比较活跃<sup>[23-24]</sup>。光纤长距离分布式无源多参数感知技术,在煤矿安全应急救援领域的应用研究日趋活跃<sup>[25]</sup>。

## 2 激光气体传感器及煤矿瓦斯、火灾监测预警应用

激光气体传感器与传统煤矿电子式、电化学式气体传感相比,具有免标校、灵敏度高、响应速度快、寿命长、抗干扰能力强等优点,对煤矿井下有毒有害气体进行实时在线监控,可有效解决传统气体传感器误报、漏报等问题,避免井下瓦斯及火灾等事故的发生,目前已逐步在煤矿安全监测预警领域应用推广。

### 2.1 激光 $\text{CH}_4$ 气体传感器

在煤矿开采中,会有  $\text{CH}_4$  气体释放在井下不同地点,如果浓度(体积分数)在 5%~16% 区间的  $\text{CH}_4$  遇明火,就会立即发生爆炸。通过从地面向煤矿井下压送新鲜空气风流,可以为井下提供  $\text{O}_2$ 、降低  $\text{CH}_4$  浓度。按照《煤矿安全规程》规定,在采掘工作面,回风巷道瓦斯浓度较高的地点及瓦斯集聚区域,都需要安装固定式或移动式  $\text{CH}_4$  传感器,实现对  $\text{CH}_4$  浓度的在线监测及超限报警。当甲烷浓度达到 1.0% 时发出声光报警,达到 1.5% 时对关联区域设备进行断电<sup>[26]</sup>。

$\text{CH}_4$  气体在 3.3  $\mu\text{m}$  和 1.65  $\mu\text{m}$  波段存在吸收

峰,并常用于半导体激光器光谱分析和CH<sub>4</sub>气体浓度检测。由于1.65 μm波段与光纤通信L波段相近,可以方便地使用分布式反馈(DFB)激光器光源进行检测。Stewart等<sup>[8]</sup>研究表明半导体激光器光谱的线宽较窄,作为光谱分析的光源可以提高检测灵敏度。CH<sub>4</sub>在1650 nm波段的吸收峰如图1所示,在该波段通常选择一个吸收峰譬如1653.72 nm进行光谱分析<sup>[7]</sup>,通过调制激光器驱动电流在该吸收峰波长附近约±0.2 nm范围进行扫描,按照比尔-朗伯定律,气体浓度*c*可以通过下式测量<sup>[27]</sup>。

$$C = \frac{1}{aL} \ln\left(\frac{I_0}{I}\right), \quad (1)$$

式中:*a*为被测气体在吸收峰波长λ上单位浓度的吸收系数;*I*<sub>0</sub>和*I*分别为在该波长下气体吸收前后的激光强度;*L*为气室长度。

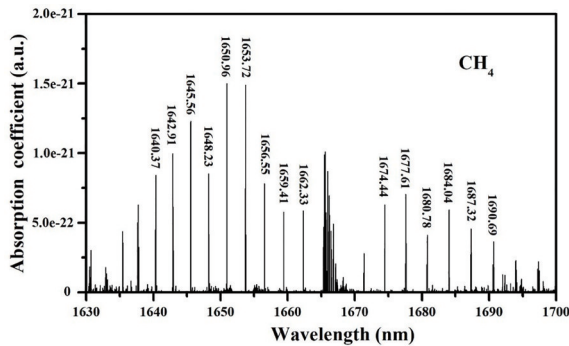


图1 CH<sub>4</sub>气体在1650 nm波段的吸收光谱

Fig. 1 Absorption spectra of methane gas in the 1650 nm region

通过锯齿波电流调制激光器波长扫描气体吸收信号,可实现直接吸收检测;在低频锯齿波扫描信号上,叠加高频正弦信号,进行二次谐波检测<sup>[6]</sup>,可进一步提高检测灵敏度,并实现CH<sub>4</sub>遥测<sup>[28]</sup>,遥测仪通常给出的是在整个光程内的平均浓度。通过小波变换等对激光遥测微弱检测信号进行处理,可提升检测灵敏度<sup>[29]</sup>。采用数字信号处理器(DSP)进行快速信号处理,可实现车载式远距离、10<sup>-6</sup>灵敏度CH<sub>4</sub>气体快速遥测<sup>[30]</sup>。

激光CH<sub>4</sub>传感器在2007年开始用于煤矿井下现场检测时<sup>[31]</sup>,即发现降低传感器的整体功耗至关重要,因为所有激光器均需靠井下本安供电电源供电,如果每个CH<sub>4</sub>传感器功耗过高,一个本安供电电源将不能提供足够数量的CH<sub>4</sub>传感器来满足煤矿井下检测的要求。因此,激光CH<sub>4</sub>传感器在煤矿井下应用除了需要对温度、湿度、压力等参数进行自适应和实时补偿外,还需要尽量减小传感器的电流和

功耗,实现传感器探头与电源供电分站之间更长的检测距离,满足煤矿安全监控系统升级改造规定的6 km传输距离要求。垂直腔面发射(VCSEL)激光器具有阈值电流、工作电流和工作功耗远低于DFB激光器的特点<sup>[32]</sup>,因此作为激光传感器的光源具有较好的吸引力。Lytkine等<sup>[33-34]</sup>研发了基于VCSEL的CO、环氧乙烷以及苯等多种气体传感器, Hangauer等<sup>[35]</sup>报道了关于VCSEL用于CO<sub>2</sub>和水蒸气的检测。VCSEL激光器的另一个特点是比DFB激光器具有更高的电流-波长调谐性能<sup>[36]</sup>。传统的激光光谱分析气体检测系统不论使用VCSEL还是DFB激光器,都需要半导体激光器在恒温条件下运行。激光器制冷或加温所需要的功率以及传感器电源启动时的冲击电流,在煤矿井下应用时都对本安供电电源带来较大挑战。

从图1可以看出,在1642.91 nm与1653.72 nm之间存在多个吸收峰,相邻吸收峰之间的间距约为2.8 nm。利用VCSEL激光器波长随电流变化敏感的特点(典型值为0.4~0.5 nm/mA),李艳芳等<sup>[37]</sup>报道了多吸收峰智能跟踪技术,根据VCSEL激光器波长随温度变化规律(典型值为100 pm/°C),建立气体检测吸收峰随温度动态调整关系,实现了在环境温度-20~60 °C连续运行模式下功耗小于100 mW。

由于气体的可压缩特性,所有激光光谱气体检测都需要实时检测环境温度、压力并进行动态补偿。对于多吸收峰检测技术,需要研究该气体各个吸收峰的温度、压力系数,进行独立的温度、压力补偿,以实现理想的测量精度。煤矿井下存在高湿度、粉尘,因此也需要进行防水、防尘及耐冲击、抗电磁干扰等煤矿电器设备所必需的工程化设计。图2(a)和图2(b)分别为矿用激光CH<sub>4</sub>传感器模块和便携仪照片。

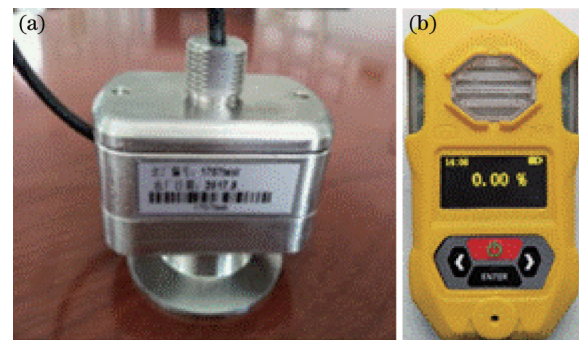


图2 实物图。(a)激光CH<sub>4</sub>传感器模块;(b)激光CH<sub>4</sub>便携仪  
Fig. 2 Physical map. (a) Laser CH<sub>4</sub> sensor module; (b) laser CH<sub>4</sub> portable instrument

煤矿的多个场所都需要进行  $\text{CH}_4$  在线监测报警,包括对瓦斯抽放管道的浓度测量<sup>[38]</sup>,激光检测技术抗潮湿能力较强,在管道高湿度瓦斯检测中已经得到越来越普遍的应用<sup>[37]</sup>,对于 VCSEL 用作光源的低功耗激光  $\text{CH}_4$  传感器,也被用于无线传感模式,在煤矿采掘工作面或瓦斯抽放管道进行远程检测<sup>[39]</sup>。激光  $\text{CH}_4$  传感器目前已经在我国近千座煤矿推广应用,应用表明其稳定性、抗潮湿等优势已经得到行业认可,激光传感器理论上无需标校,煤矿安全行业规定维护周期为 6 个月,与传统甲烷传感器 15 天维护周期相比,显著减少了维护工作量和维护人员数量,提升了煤矿安全生产水平。

## 2.2 激光 CO 气体传感器

火灾是煤矿生产重大安全隐患之一,煤炭自然发火、胶带输送机摩擦起火或机电设备故障着火等都会产生 CO 等有毒有害气体或导致次生爆炸等风险,容易造成群死群伤事故。我国 95% 的煤矿属于井工煤矿,60% 以上具有自然发火倾向。当采煤过程中遇到地质断层,采煤速度放缓、采空区煤炭容易氧化自燃甚至发展成火灾。CO、乙炔( $\text{C}_2\text{H}_2$ )、乙烯( $\text{C}_2\text{H}_4$ )是在煤炭自然发火初期、煤炭氧化及着火前剧烈氧化过程中释放的气体,可作为火灾预警的标志性气体。氧气( $\text{O}_2$ )、 $\text{CH}_4$  和二氧化碳( $\text{CO}_2$ )也是煤炭自然发火控制所需要监测的重要气体<sup>[40]</sup>。井下柴油机车尾气排放也会产生 CO 气体,我国对空气中 CO 气体的安全标准是不超过  $24 \times 10^{-6}$ ,检测灵敏度通常需要  $1 \times 10^{-6}$ <sup>[41]</sup>。

传统的自然发火监测预警设备中主要采用塑料束管连接气泵,将采空区抽取的气样送到地面实验室,通过气相色谱仪进行分析,这些设备存在系统维护工作量较大,测量滞后等缺点。由于激光 CO 气体传感器可实现高灵敏度检测,近年来引起了矿产业的较大兴趣。鉴于对光纤传输低损耗波段的考虑,首先希望尝试使用 1566 nm 波段吸收谱进行 CO 检测。Sonnenfroh 等<sup>[42]</sup>采用 1567 nm 外腔式半导体激光器实现了 CO 和  $\text{CO}_2$  的同时检测,使用了 20 m 长光程气室,实现了  $5 \times 10^{-6}$  检测灵敏度<sup>[43]</sup>。中国科学院安徽光学精密机械研究所研究人员在 1566.6 nm 波段采用 56 m 光程和二次谐波监测,实现了  $0.25 \times 10^{-6}$  检测灵敏度<sup>[44]</sup>。但是,长光学气室在煤矿振动冲击、潮湿、淋水等恶劣应用环境下的长期稳定性和可靠性方面存在技术瓶颈。CO 在 2.33  $\mu\text{m}$  波段有比 1.5  $\mu\text{m}$  波段更强的吸收特

性,因此传感器气室可以进一步小型化。中国科学院安徽光学精密机械研究所在 2334 nm 吸收峰实现了 CO 监测  $0.06 \times 10^{-6}$  检测灵敏度,因此,对于煤矿应用也具有吸引力<sup>[45]</sup>。Chen 等<sup>[46]</sup>采用 2.3  $\mu\text{m}$  VCSEL 作为光源,利用波长调制和引入参考气室的方法实现了痕量 CO 的检测。Wang 等<sup>[47]</sup>使用 2.3  $\mu\text{m}$  DFB 激光器和光程为 20 m 的气室,实现了  $0.1 \times 10^{-6}$  检测灵敏度,典型测量数据如图 3 所示。

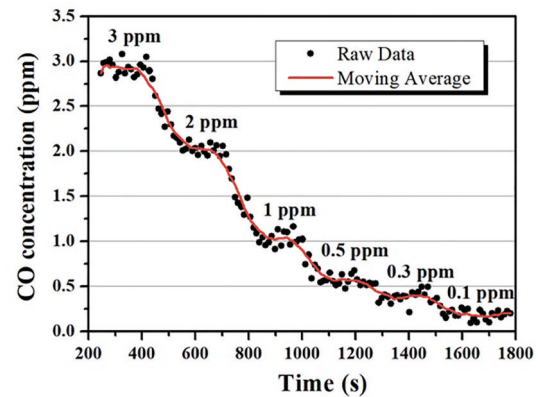


图 3 激光 CO 气体在 2.3  $\mu\text{m}$  波段光谱检测数据<sup>[47]</sup>

Fig. 3 Laser CO detection data via 2.3  $\mu\text{m}$  absorption spectral analysis<sup>[47]</sup>

煤矿井下 CO 检测的主要难点是如何消除  $\text{CH}_4$ 、 $\text{CO}_2$  及湿度对测量的影响。图 4 和图 5 分别为在 1566 nm 和 2.33  $\mu\text{m}$  波段 CO 和  $\text{CH}_4$  的吸收谱。从图中可以看出,在这两个波段  $\text{CH}_4$  对 CO 的干扰都比较严重。虽然,理论上可以通过测量  $\text{CH}_4$  气体浓度来补偿 CO 的测量值,在实际应用中,由于受  $\text{CH}_4$  气体测量精度的限制,对交叉干扰的补偿效果会有一些的局限性。为了从根本上抑制多气体对 CO 的干扰误差,则需要在中红外波段进行 CO 的光谱测量。

随着量子级联激光器(QCL)技术的快速发展<sup>[48]</sup>,基于 4.6  $\mu\text{m}$  波段 QCL 光源的 CO 检测日益得

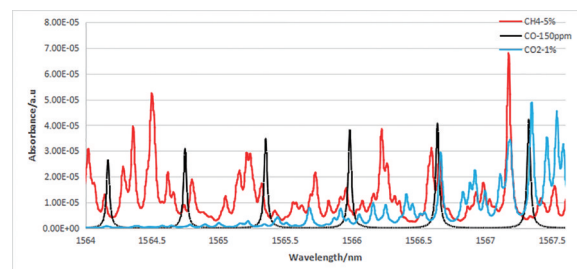


图 4 CO、 $\text{CH}_4$  和  $\text{CO}_2$  气体在 1566 nm 波段的光谱吸收特性  
Fig. 4 Absorption peaks of CO,  $\text{CH}_4$ , and  $\text{CO}_2$  gases in the 1566 nm wavelength region

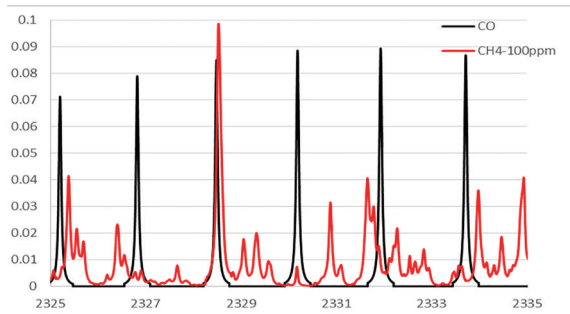


图5 CO和CH<sub>4</sub>气体在2.33 μm波段光谱吸收峰

Fig. 5 Absorption peaks of CO and CH<sub>4</sub> gas in the 2.33 μm wavelength region

到重视<sup>[49]</sup>。在4.6 μm中红外波段,存在几个CO强吸收峰,且不受CH<sub>4</sub>和CO<sub>2</sub>气体干扰。山东微感光电子有限公司团队采用中国科学院半导体研究所研制的4.6 μm量子级联激光器,在20 cm光程研发了激光CO气体传感器。图6为CO气体在4610 nm波段典型吸收光谱,可以看出,检测灵敏度优于 $1 \times 10^{-6}$ 。量子级联激光器工作电流较大,连续运行功耗较大(典型值约为350 mA×13 V),因此需要间歇式或脉冲式运行。在脉冲运行模式,驱动电流的启动和关闭需要优化设计、减小对激光器的冲击损害。

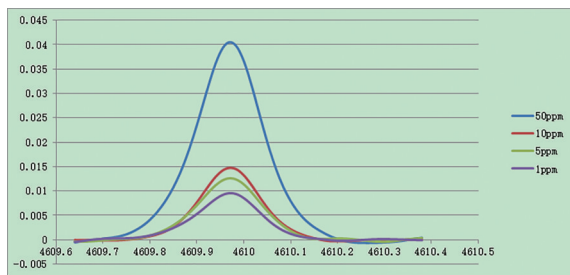


图6 CO气体在4.6 μm波段吸收光谱

Fig. 6 Absorption spectra of CO gas with 4.6 μm wavelength region

### 2.3 激光CO<sub>2</sub>、O<sub>2</sub>、C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>、C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>等其他气体传感器

CO<sub>2</sub>和C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>在近红外波段的光谱分析也得到较多研究。高晓明等<sup>[50]</sup>使用DFB激光器进行CO<sub>2</sub>检测,实现 $6 \times 10^{-4}$ 测量灵敏度。李宁等<sup>[51]</sup>报道了利用1558 nm VCSEL双光谱分析对CO<sub>2</sub>浓度和温度的测量研究。李亚飞等<sup>[52]</sup>利用1572 nm DFB激光器和密集光斑型气室研制了一种近红外激光CO<sub>2</sub>传感系统。马帅等<sup>[53]</sup>报道了基于中红外中空波导光纤的呼吸气体CO<sub>2</sub>实时测量。而对O<sub>2</sub>的光谱测量,刘文清团队采用760 nm DFB激光器和20 m气室实现了 $5.3 \times 10^{-5}$ 检测灵敏度<sup>[54]</sup>。对于使用DFB和

VCSEL光源的O<sub>2</sub>激光检测,Weldon等<sup>[55]</sup>进行了对比研究,VCSEL光源存在低功耗优势。利用C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>在1626.8 nm波段的吸收峰,采用半导体激光器可实现 $1 \times 10^{-5}$ 检测灵敏度<sup>[56]</sup>。采用4.3 μm波段量子级联激光器,得到了对C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>气体 $1 \times 10^{-6}$ 检测灵敏度,基本满足煤矿安全应用需求<sup>[57]</sup>。

目前在中国,激光CH<sub>4</sub>传感器已经在近千座煤矿得到成功应用,其无需标校、不受交叉干扰的优势,减少了人员维护和CH<sub>4</sub>超限误报漏报,未来将逐步替代煤矿传统的红外或催化燃烧式CH<sub>4</sub>传感器。同时,该技术也已在天然气泄漏检测方面得到拓展应用。随着中红外激光技术的快速发展,激光CO和C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>、C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>等气体传感器在灵敏度和抗交叉干扰方面,也已引起越来越多的重视,有望在行业应用方面取得类似激光CH<sub>4</sub>传感器的成果。

## 3 光纤物理量传感器及其煤矿安全应用

### 3.1 光纤风速传感器

光纤光栅由于测量信息采用光波长编码,测量精度不受光强变化影响,对于煤矿井下光缆接头损耗的要求不高,适用于煤矿井下较恶劣的现场实施条件。基于光纤光栅的温度、位移、压力、振动等传感器都得到越来越多的应用<sup>[58]</sup>。保证矿井通风满足风量风速要求,是井下安全生产的重要条件,传统的电子类风速传感器存在灵敏度低,精度差的技术瓶颈。特别是对于采空区微弱漏风的测量,已成为监测盲区。光纤热线式风速传感器,以掺杂光纤作为光热转换器件,掺杂光纤在1480/1550 nm泵浦光源的激光抽运下,将光能转化为热能,并引起光纤布拉格光栅(FBG)温度升高,当流体流经FBG套管表面时发生对流传热,热量散失,FBG周围温度降低,其中心波长发生漂移;通过光纤光栅解调仪解调得到FBG波长漂移量,进而推算出风速传感器的温度变化,根据热线测风原理获得流经探头表面的风速。实现无电源传感器探头,可以布设在煤矿采空区监测煤柱坍塌或漏风。香港城市理工大学团队研究了基于空芯光纤充填金属吸光发热和FBG温度检测的风速传感器<sup>[59]</sup>。景霞等<sup>[60-61]</sup>报道了使用光纤光栅传感器通过转动计数的方式进行风速监测,灵敏度还比较低,风速起始点高达0.9 m/s。利用掺铒光纤和优化的传感器结构设计,Li等<sup>[62]</sup>报道了在掺铒光纤上刻写光纤光栅的微风

传感器,实现了在 0.5 m/s 速度下 0.1 mm/s 的检测灵敏度,对于煤矿采空区或密闭墙内漏风检测具有较好的应用前景。

图 7(a)为光纤热线式风速传感器检测原理示意图,图 7(b)为波长变化随风速变化的瞬态曲线,可以看出,在风速变化的瞬间,温度变化导致波长

变化,随着时间延长,进入热平衡。该传感器的温度响应时间快,可以精确地测量风量变化。光纤风速传感器与光纤温度、湿度、振动传感器一起共用矿用光纤光栅解调仪,在煤矿井下进行在线多参数测量。图 8 为煤矿井下现场安装照片,图 9 为测量数据。

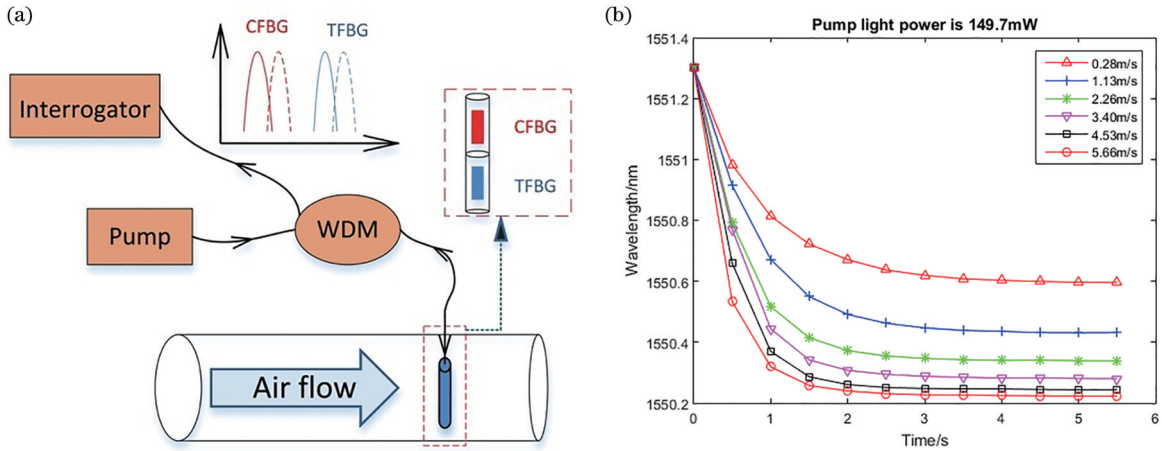


图 7 光纤风速传感器。(a)光纤热线式风速测量原理框图;(b)热线传感器波长随温度及时间变化<sup>[62]</sup>

Fig. 7 Fiber wind velocity sensor. (a) Schematic of fiber hot-wire wind velocity sensor; (b) wavelength of hot-wire sensor changes with temperature and time<sup>[62]</sup>

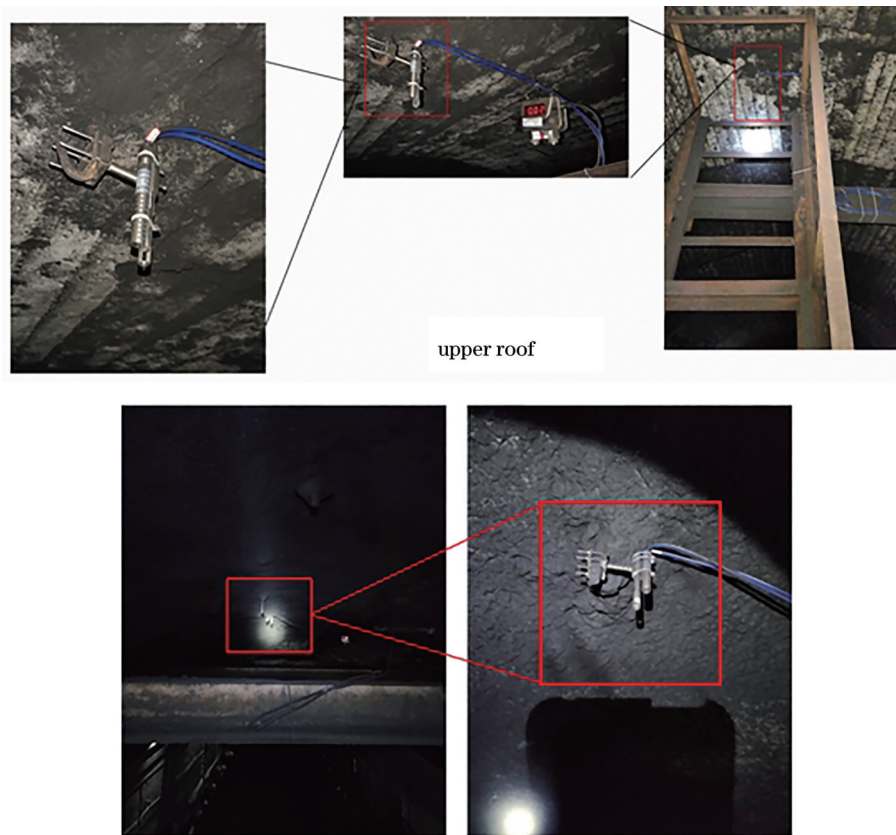


图 8 光纤风速传感器在煤矿现场安装照片

Fig. 8 Photo of fiber wind velocity sensor installation at coal mine site

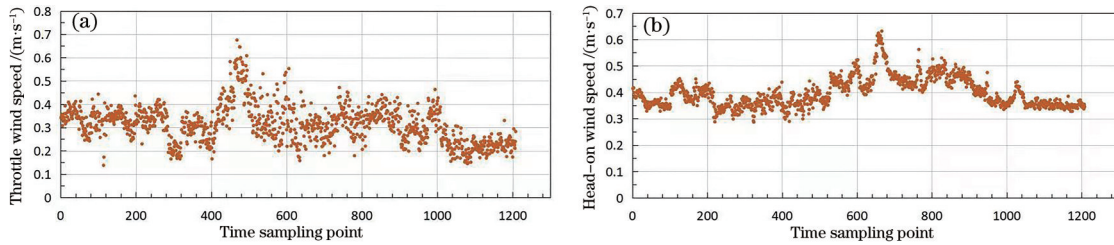


图9 光纤风速传感器在煤矿现场测量数据

Fig. 9 Measurement data of fiber wind velocity sensor at the coal mine site

### 3.2 光纤分布式温度检测及煤矿火灾监测预警

井下煤矿一旦发生火灾极易造成群死群伤事故。2020年11月28日重庆松藻煤矿胶带输送机摩擦起火,产生大量CO气体造成16人中毒死亡。基于拉曼散射技术的光纤分布式测温仪比较成熟,成功用于多个煤矿实现了对采空区发火的预警定位。矿用光缆预先布设在煤矿采掘工作面巷道,随着煤炭回采,把光缆留在采空区内部,一旦采空区漏风,煤炭发生氧化且热量形成累积导致温度升高,通过在线连续监测布设在采空区内部光缆,可自动检测热点位置及变化趋势,联动自动灭火装置。图10为2019年3月在中国东北地区某煤矿成功对采空区进行热点检测定位的数据,该信息被用于智能防灭火,避免了火灾事故发生。



图10 2019年3月在中国东北地区某煤矿成功对采空区进行热点检测定位的数据

Fig. 10 Data of successful hot zone detection and positioning of coal mine goaf in Northeast China in March 2019

## 4 结束语

光纤传感器在高性能、本质安全等方面的特点,使其在煤矿等高危行业对于易燃易爆气体、设备状态、火灾等安全隐患监测预警方面具有极大的

吸引力。我国是煤炭生产和利用大国,存在煤矿瓦斯超限爆炸隐患、煤炭自然发火隐患、设备故障及次生灾害等多种隐患。经过二十年左右的努力,我国光纤传感器与煤矿安全科技人员一道,着力研发激光光谱分析的CH<sub>4</sub>、CO、O<sub>2</sub>等气体传感器;光纤光栅类温度、位移、压力、振动、风速、湿度等传感器,以及分布式温度、振动、应变传感器研究和煤矿现场应用。研发了基于1650 nm波段DFB和VCSEL激光器的全量程激光CH<sub>4</sub>传感器,使产品维护周期从原来的两周延长到6个月,显著减少运维人力物力需求。特别是基于VCSEL的多吸收峰无温控超低功耗激光CH<sub>4</sub>传感器,功耗低于电子类传感器,以及光学无线及移动传感器已在全国1000多个煤矿推广应用。量子级联中红外激光CO、C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>等痕量气体传感器研究,也已形成低功耗、小尺寸等多项技术,有望在近几年突破产业化制造和应用技术瓶颈。在煤矿防火方面,光纤拉曼散射分布式测温传感器不受采空区坍塌应力影响,可长期在线监测定位,按照煤矿用装备安全标志要求,本安型分布式光纤测温(DTS)解调仪也已在全国采空区发火预警、电缆热点监测等方面展示出巨大应用潜力。

### 参 考 文 献

[1] Mine Safety Supervision Bureau. The National Mine Safety Supervision Bureau holds its first press conference in 2021[EB/OL]. (2021-01-12)[2021-04-25]. [http://www.gov.cn/xinwen/2021-01/12/content\\_5579046.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2021-01/12/content_5579046.htm).  
 矿山安监局网站. 国家矿山安全监察局召开2021年首次新闻发布会[EB/OL]. (2021-01-12)[2021-04-25]. [http://www.gov.cn/xinwen/2021-01/12/content\\_5579046.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2021-01/12/content_5579046.htm).  
 [2] Sun J P. New technologies and new equipments of coal mine monitoring[J]. Industry and Mine Automation, 2015, 41(1): 1-5.  
 孙继平. 煤矿监控新技术与新装备[J]. 工矿自动化,

- 2015, 41(1): 1-5.
- [3] Wang Y. Influence of preparation methods on property of methane catalytic pellistors[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2012.  
王莹. 瓦斯催化元件制备方法对性能影响的研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2012.
- [4] Chen J. 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.  
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.
- [5] Wu Y Z, Chen D Y, Guo T F, et al. Development of non-dispersive infrared methane gas transducer[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(11): 1224-1227.  
吴永忠, 陈丹艳, 郭太峰, 等. 非分光红外甲烷传感器的研制[J]. 煤炭学报, 2007, 32(11): 1224-1227.
- [6] Reid J, Labrie D. Second-harmonic detection with tunable diode lasers: comparison of experiment and theory[J]. Applied Physics B, 1981, 26(3): 203-210.
- [7] Uehara K, Tai H. Remote detection of methane with a 1.66-microm diode laser[J]. Applied Optics, 1992, 31(6): 809-814.
- [8] Stewart G, Culshaw B, Tandy C, et al. Multipoint fibre sensors for trace gas monitoring using derivative spectroscopy[J]. Proceedings of SPIE, 1998, 3483: 132-136.
- [9] Li Y F, Chang L, Zhao Y J, et al. A fiber optic methane sensor based on wavelength adaptive vertical cavity surface emitting laser without thermoelectric cooler[J]. Measurement, 2016, 79: 211-215.
- [10] Wei Y B, Hu J, Zhang T T, et al. Mine laser methane sensor and its application development[C]// 2017 2nd International Conference for Fibre-optic and Photonic Sensors for Industrial and Safety Applications (OFSIS), January 8-10, 2017, Brisbane, QLD. New York: IEEE Press, 2017: 56-62.
- [11] Rao Y J. Recent progress in applications of in-fibre Bragg grating sensors[J]. Optics and Lasers in Engineering, 1999, 31(4): 297-324.
- [12] Zhao W S, Zhong K, Chen W Z, et al. A fiber Bragg grating borehole deformation sensor for stress measurement in coal mine rock[J]. Sensors, 2020, 20(11): 3267.
- [13] Liang M F, Fang X Q, Li S, et al. A fiber Bragg grating tilt sensor for posture monitoring of hydraulic supports in coal mine working face[J]. Measurement, 2019, 138: 305-313.
- [14] Tao G, Zhang X L, Liu X R, et al. A new type of fiber Bragg grating based seismic geophone[J]. Applied Geophysics, 2009, 6(1): 84-92.
- [15] Hartog A. A distributed temperature sensor based on liquid-core optical fibers[J]. Journal of Lightwave Technology, 1983, 1(3): 498-509.
- [16] Parker T R, Farhadiroushan M, Handerek V A, et al. A fully distributed simultaneous strain and temperature sensor using spontaneous Brillouin backscatter[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1997, 9(7): 979-981.
- [17] Sun Q Z, Liu D M, Wang J, et al. Distributed fiber-optic vibration sensor using a ring Mach-Zehnder interferometer[J]. Optics Communications, 2008, 281(6): 1538-1544.
- [18] Liu J X. Research progress of distributed optical fiber sensing and monitoring technology based on  $\phi$ -OTDR [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(8): 080021.  
刘建霞.  $\phi$ -OTDR 分布式光纤传感监测技术的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(8): 080021.
- [19] Feng J Y, Guo W Q, Cheng Z Y. Application of distributed optical fiber temperature measurement system on coal mine belt conveyor[J]. Technology Innovation and Application, 2012(26): 120.  
冯金义, 郭文秋, 程智勇. 分布式光纤测温系统在煤矿皮带运输机上的应用[J]. 科技创新与应用, 2012(26): 120.
- [20] Xiao J M, Liu P C. Application of fiber optic temperature measurement system in coal mine cable temperature monitoring based on Raman scattering [J]. Coal Mine Machinery, 2012, 33(7): 197-199.  
肖俊明, 刘鹏程. 基于拉曼散射的光纤测温系统在煤矿井下电缆温度监测中的应用[J]. 煤矿机械, 2012, 33(7): 197-199.
- [21] Zhou D D, Gao Q, Zhai S H, et al. Application of distributed optical fiber sensor based on BOTDR in the model tests of backfill mining[J]. Metal Mine, 2009(9): 169-172.  
周冬冬, 高谦, 翟淑花, 等. BOTDR 分布式光纤传感技术在充填法采矿模型试验中的应用[J]. 金属矿山, 2009(9): 169-172.
- [22] Chai J, Li S J, Zhang D D. Experimental study on deformation characteristics monitoring of overlying strata based on distributed optical fiber[J]. Safety in Coal Mines, 2020, 51(4): 47-51.  
柴敬, 李淑军, 张丁丁. 基于分布式光纤的覆岩变形特征监测试验研究[J]. 煤矿安全, 2020, 51(4): 47-51.



- [23] Li C R. Rescue monitoring system after underground accident based on distributed all-optical fiber vibration sensing technology[D]. Shanghai: Fudan University, 2012.  
李楚瑞. 基于分布式全光纤振动传感技术的井下事故后救援监测系统[D]. 上海: 复旦大学, 2012.
- [24] Chen L J, Chen L G, Zhang W X. Research on positioning method of distributed optical fiber sensor for underground rescue system[J]. Journal of Heilongjiang University of Science and Technology, 2017, 27(5): 560-564.  
陈丽娟, 陈立国, 张文祥. 煤矿井下分布式光纤传感系统的救援定位方法[J]. 黑龙江科技大学学报, 2017, 27(5): 560-564.
- [25] Guo J K, Chen S H, Lan X M. Application of distributed optical fiber sensing technology in underground coal mine[C]//Coal Mine Automation and Informatization-The 27th National Coal Mine Automation and Informatization Academic Conference and the 8th China Coal Mine Informatization and Automation High-level Forum Proceedings, May 19, 2018, Luoyang, China. Beijing: China Coal Society, China Coal Industry Technical Committee, 2018: 11-15.  
郭继坤, 陈司晗, 兰沂梅. 分布式光纤传感技术在煤矿井下的应用[C]//煤矿自动化与信息化: 第 27 届全国煤矿自动化与信息化学术会议暨第 8 届中国煤矿信息化与自动化高层论坛论文集. 洛阳, 2018: 11-15.
- [26] Sun J P. Proposal of revision for monitoring, communication and video surveillance of coal mine safety regulation[J]. Industry and Mine Automation, 2014, 40(3): 1-6.  
孙继平. 《煤矿安全规程》监控、通信与监视修订意见[J]. 工矿自动化, 2014, 40(3): 1-6.
- [27] Ni J S, Song Z Q, Liu T Y, et al. Research on a trace gas fiber optic detection system[J]. Shandong Science, 2008, 21(6): 13-18.  
倪家升, 宋志强, 刘统玉, 等. 光纤痕量气体检测系统的研究[J]. 山东科学, 2008, 21(6): 13-18.
- [28] Iseki T, Tai H, Kimura K. A portable remote methane sensor using a tunable diode laser[J]. Measurement Science and Technology, 2000, 11(6): 594-602.
- [29] Zhou Y W, Miao S Z, Yao D, et al. Laser methane remote sensor system based on wavelength modulation spectroscopy and wavelet denoising[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(6): 0611001.  
周言文, 苗澍苗, 姚丹, 等. 基于波长调制光谱和小波去噪的激光甲烷遥测系统[J]. 中国激光, 2020, 47(6): 0611001.
- [30] Guo D G, Chen H Y, Jia L T, et al. Design of vehicle-mounted laser methane remote system[J]. Computer Measurement & Control, 2020, 28(7): 9-13.  
郭东歌, 陈海永, 贾林涛, 等. 车载激光甲烷遥测系统的设计[J]. 计算机测量与控制, 2020, 28(7): 9-13.
- [31] Ni J S, Chang J, Liu T Y, et al. Fiber methane gas sensor and its application in methane outburst prediction in coal mine[C]//2008 1st Asia-Pacific Optical Fiber Sensors Conference, November 7-9, 2008, Chengdu, China. New York: IEEE Press, 2008: 1-4.
- [32] Koyama F. Recent advances of VCSEL photonics[J]. Journal of Lightwave Technology, 2006, 24(12): 4502-4513.
- [33] Lytkine A, Jaeger W, Tulip J. Multi-species gas detection with long-wavelength VCSEL[J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5594: 155-163.
- [34] Lytkine A, Lim A, Jäger W, et al. Tunable diode laser spectroscopy of benzene near 1684 nm with a low-temperature VCSEL[J]. Applied Physics B, 2010, 99(4): 825-832.
- [35] Hangauer A, Chen J, Seemann K, et al. VCSEL-based CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O sensor with inherent wavelength calibration for safety and air-quality applications[C]//Conference on Lasers and Electro-Optics: Applications 2010, May 16-21, 2010, San Jose, California, United States. Washington, D.C.: OSA, 2010: JThB3.
- [36] Chang-Hasnain C J. Tunable VCSEL[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2000, 6(6): 978-987.
- [37] Li Y F, Yue J H, Meng H. Optic fiber sensing technology based safety monitoring system for coal mine gas drainage[J]. Shandong Science, 2014, 27(3): 51-56.  
李艳芳, 岳建会, 孟辉. 基于光纤传感技术的瓦斯抽采管道安全监测系统[J]. 山东科学, 2014, 27(3): 51-56.
- [38] Zhao Y J, Wang C, Liu T Y, et al. Application in methane extraction of fiber methane monitoring system based on spectral absorption[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2010, 30(10): 2857-2860.  
赵燕杰, 王昌, 刘统玉, 等. 基于光谱吸收的光纤甲烷监测系统在瓦斯抽采中的应用[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(10): 2857-2860.
- [39] Jin G X, Meng H, Jia G H, et al. Application of laser methane sensor in on-line monitoring of gas

- pipeline[M]//Mining goes digital. Boston: CRC Press, 2019: 640-646.
- [40] Deng J, Xu J C, Ruan G Q, et al. Review of the prediction and forecasting techniques of coal self heating both at home and abroad[J]. Journal of Xi'an Mining Institute, 1999, 19(4): 293-297, 337.  
邓军, 徐精彩, 阮国强, 等. 国内外煤炭自然发火预测预报技术综述[J]. 西安矿业学院学报, 1999, 19(4): 293-297, 337.
- [41] Hou M W, Ma H L. Application of optical fiber sensing system in coal mine fire prediction and early warning[J]. Technology Wind, 2013(17): 116-117, 119.  
侯毛伟, 马海林. 光纤传感系统在煤矿火灾预测预警的应用[J]. 科技风, 2013(17): 116-117, 119.
- [42] Sonnenfroh D M, Allen M G. Observation of CO and CO<sub>2</sub> absorption near 1.57 μm with an external-cavity diode laser[J]. Applied Optics, 1997, 36(15): 3298-3300.
- [43] Chen S J, Hovde D C, Peterson K A, et al. Fire detection using smoke and gas sensors[J]. Fire Safety Journal, 2007, 42(8): 507-515.
- [44] Xia H, Wu B, Zhang Z R, et al. Stability study on high sensitive CO monitoring in near-infrared[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(21): 214208.  
夏滑, 吴边, 张志荣, 等. 近红外波段 CO 高灵敏检测的稳定性研究[J]. 物理学报, 2013, 62(21): 214208.
- [45] Dang J M, Yu H Y, Song F, et al. Development of a CO sensor for early fire detection[J]. Optics and Precision Engineering, 2018, 26(8): 1876-1881.  
党敬民, 于海业, 宋芳, 等. 应用于早期火灾探测的 CO 传感器[J]. 光学精密工程, 2018, 26(8): 1876-1881.
- [46] Chen J. Compact laser-spectroscopic gas sensors using vertical-cavity surface-emitting lasers[D]. Munich: Technical University of Munich, 2016.
- [47] Wang Z W, Li Y F, Zhang T T, et al. A long-term stable monitoring system for atmospheric carbon monoxide based on 2.3 μm laser absorption[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2018, 1065: 252017.
- [48] Liu F Q, Zhang J C, Liu J Q, et al. Progress in quantum cascade lasers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(7): 0701007.  
刘峰奇, 张锦川, 刘俊岐, 等. 量子级联激光器研究进展[J]. 中国激光, 2020, 47(7): 0701007.
- [49] Li C G, Dang J M, Chen C, et al. Multi-pass absorption spectroscopy for CO detection using a quantum cascaded laser[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2016, 36(5): 1308-1312.  
李春光, 党敬民, 陈晨, 等. 使用量子级联激光器和多通吸收光谱技术用于 CO 探测[J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(5): 1308-1312.
- [50] Gao X M, Huang W, Li Z Y, et al. Sensitive detection of CO<sub>2</sub> molecule using near infrared diode laser absorption spectroscopy[J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23(5): 609-611.  
高晓明, 黄伟, 李子尧, 等. CO<sub>2</sub> 分子的近红外二极管激光吸收光谱灵敏探测[J]. 光学学报, 2003, 23(5): 609-611.
- [51] Li N, Yan J H, Wang F, et al. Temperature measurement of CO<sub>2</sub> gas VCSEL diode laser at 1.58 μm[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2008, 14(5): 458-462.  
李宁, 严建华, 王飞, 等. 利用 VCSEL 激光二极管在 1.58 μm 波段对 CO<sub>2</sub> 气体温度的测量[J]. 燃烧科学与技术, 2008, 14(5): 458-462.
- [52] Li Y F, Liu Z W, Zhang T Y, et al. Development and application of near-infrared laser carbon dioxide gas sensor system[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(5): 0514003.  
李亚飞, 刘志伟, 张天羽, 等. 近红外激光二氧化碳传感系统的研制及应用[J]. 光学学报, 2020, 40(5): 0514003.
- [53] Ma S, Wu T, Sun C L, et al. Real-time exhaled CO<sub>2</sub> gas measurement using a mid-infrared hollow waveguide fiber[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(11): 1130001.  
马帅, 吴涛, 孙城林, 等. 基于中红外中空波导光纤的呼吸气体 CO<sub>2</sub> 实时测量[J]. 光学学报, 2020, 40(11): 1130001.
- [54] Gao Y W, Zhang Y J, Chen D, et al. Measurement of oxygen concentration using tunable diode laser absorption spectroscopy[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(3): 0330001.  
高彦伟, 张玉钧, 陈东, 等. 基于可调谐半导体激光吸收光谱的氧气浓度测量研究[J]. 光学学报, 2016, 36(3): 0330001.
- [55] Weldon V, O'Gorman J, Pérez-Camacho J J, et al. Laser diode based oxygen sensing: a comparison of VCSEL and DFB laser diodes emitting in the 762 nm region[J]. Infrared Physics & Technology, 1997, 38(6): 325-329.
- [56] 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.
- 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.
- [57] Cheng T. The study of trace ethylene detection system in mid-infrared region[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2018.
- 程涛. 中红外波段痕量乙烯探测系统的研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2018.
- [58] Liu X H, Wang C, Liu T Y, et al. Fiber grating water pressure sensor and system for mine[J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(1): 112-114.
- 刘小会, 王昌, 刘统玉, 等. 矿井下用光纤光栅水压传感器及系统[J]. 光子学报, 2009, 38(1): 112-114.
- [59] Wang J, Liu Z Y, Gao S R, et al. Fiber-optic anemometer based on Bragg grating inscribed in metal-filled microstructured optical fiber[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(21): 4884-4889.
- [60] Jing X, Liu A L, Zhao Z G, et al. Design of fiber Bragg grating anemometer using principle of number counting[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2015, 34(6): 79-81.
- 景霞, 刘爱莲, 赵振刚, 等. 计数式光纤 Bragg 光栅风速仪设计[J]. 传感器与微系统, 2015, 34(6): 79-81.
- [61] Wang C, Ni J S, Wang J Q, et al. All-fiber velocity sensors applied in wind power generation and their fabrication process[J]. Laser Technology, 2012, 36(5): 689-692.
- 王昌, 倪家升, 王纪强, 等. 风力发电中全光纤风速传感器及制作工艺研究[J]. 激光技术, 2012, 36(5): 689-692.
- [62] Li Z, Wang J Q, Liu T Y, et al. High-sensitivity "hot-wire"-based gas velocity sensor for safe monitoring in mining applications[J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(24): 10192-10198.