# 高压环境下 2 种 NDIR 型 CO<sub>2</sub>红外传感器的 响应规律

# 方晶晶,任小孟,徐新宏,江璐,王世锋,马骏,闫硕,方以群

(海军特色医学中心,上海 200433)

摘要:目的 研究压力变化环境对 NDIR 型 CO<sub>2</sub> 气体传感器的影响,获得不同压力范围内传感器的响应变化 规律。方法 采用小型加压舱,在 CO<sub>2</sub> 分压不变的情况下,分别采用 N<sub>2</sub>阶梯缓慢加压和冲击快速加压方式, 研究英国 C20 和国产 G4 传感器在高压环境中稳定时间和漂移度等性能指标的波动规律,考察传感器对压力 变化的响应规律。结果 在低于 607 950 Pa 的高气压稳压状态下,基本不会造成机械损伤,但信号会发生较 大的漂移,国产 G4 分体式传感器出现信号震荡现象。CO<sub>2</sub> 分体式传感器及整机的浓度输出值随着压力的升 高,标准气样值与实测值的比值接近幂函数形式,分体式传感器的输出浓度值比整机的输出浓度值要大。 结论 不同 CO<sub>2</sub>浓度分压下的压力响应规律具有比较良好的一致性,冲击加压的漂移比阶梯加压显著,浓度 真值可以通过测量总压和内置多次函数来修正。

关键词:高压;非分光型红外传感技术;二氧化碳;传感器;响应规律;信号漂移 中图分类号:X703 文献标识码:A 文章编号:1672-9242(2022)07-0129-08 DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2022.07.017

#### Response Law of Two Kinds of NDIR CO<sub>2</sub> Sensor in Hyperbaric Environment

FANG Jing-jing, REN Xiao-meng, XU Xin-hong, JIANG Lu, WANG Shi-feng, MA Jun, YAN Shuo, FANG Yi-qun (Navy Medical Center, Shanghai 200433, China)

**ABSTRACT:** The influence of pressure-changing environment on NDIR  $CO_2$  gas sensor was studied by using a small pressurized chamber, and the response variation law of the sensor in different pressure ranges was obtained thus. Under the condition of constant partial pressure of  $CO_2$ , N2 static slow pressurization and impact fast pressurization were used respectively to study the fluctuation law of such performance indexes as stability time and drift of the two sensors, one is the C20 sensor made in Britain and the other is G4 sensor made in China The response law of the sensor to the changes of pressure and temperature was investigated, and the pressure compensation scheme under high pressure was proposed. When the pressure was lower than 60 meters,

**Corresponding author:** WANG Shi-feng (1976-), Male, Master, Researcher, Research focus: diving medicine and diving rescue research. **引文格式:** 方晶晶, 任小孟, 徐新宏, 等. 高压环境下 2 种 NDIR 型 CO<sub>2</sub> 红外传感器的响应规律[J]. 装备环境工程, 2022, 19(7): 129-136. FANG Jing-jing, REN Xiao-meng, XU Xin-hong, et al. Response Law of Two Kinds of NDIR CO2 Sensor in Hyperbaric Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(7): 129-136.

收稿日期: 2021-06-08; 修订日期: 2021-11-15

Received: 2021-06-08; Revised: 2021-11-15

基金项目:海军装备部基金(15A311)

Fund: Naval Equipment Department Fund (15A311)

作者简介:方晶晶(1978—),女,博士,副研究员,主要研究方向为有害化学物质检测及控制、非金属材料毒性评估。

**Biography:** FANG Jing-jing (1978-), Female, Doctor, Associate researcher, Research focus: detection and control of hazardous chemicals, non-metallic material toxicity assessment.

通讯作者:王世锋(1976—),男,硕士,研究员,主要研究方向为潜水医学和援潜救生。

the mechanical damage did not occur but the signal drifted greatly. G4 sensor had a phenomenon of signal oscillation. The concentration output value of the two  $CO_2$  sensors and the whole machine increased with the pressure, and the ratio of the standard gas sample value to the measured value was close to the form of power function, besides, the output concentration value of the two sensors was larger than that of the whole machine. In conclusion, the pressure response law under different partial pressure of  $CO_2$  concentration shows good consistency. The signal drift of sensor under impact fast pressurization is more significant than that of  $N_2$  static slow pressurization. Moreover, the true value of concentration can be corrected by measuring total pressure and built-in multiple functions.

KEY WORDS: high pressure; non-dispersive infrared; carbon dioxide; sensor; response law; signal drift

高压气体检测在天然气管道输送监测、深潜探 测、航空发动机诊断等工业与国防领域都有重要需 求。在密闭舱室内,气体浓度、分压的微小变化可 能会对人员的生命安全造成重大威胁。潜艇环境呼 吸气中二氧化碳(CO<sub>2</sub>)浓度的增高会引起中毒,艇 员的生命安全保障与对气体检测的准确度、灵敏度、 响应迅速程度提出了很高的要求。大多数气体传感 器都是为常压使用环境而设计的,虽然部分传感器 引入了针对压力波动的压力补偿模块,这种压力的 补偿范围通常为(101±8) kPa, 在环境总压变化范围 较小的情况下取得了良好的效果,但少有考虑到压 力大幅升高后对检测带来的影响。传统的半导体及 电化学传感器均为接触式测量,在高压环境下易出 现失效和误报现象,对恶劣环境的适应能力较差, 难以满足高压环境连续在线检测的应用需要。光谱 检测技术具有非接触测量的优势,以红外光谱技术 为代表的新型光谱检测技术,因其具有的高灵敏、 非接触式检测、对恶劣环境适应能力强等优点,近 年来成为高温高压等极端条件下气体检测应用的研 究热点<sup>[1-6]</sup>。CO<sub>2</sub>非分光型红外传感器(NDIR)工业 化成熟,是当今最先进的传感器,体积小,性能卓 越。NDIR 红外 CO2 传感器一般包括红外发射光源、 气室、反射镜、接收转换器、光电二极管等。各个 厂家设计的光路不同,有常规的对射式(发射光源 与接收转换器相对)和紧凑的反射式(通过反射镜 将发射出去的光线反射回来)[7-10]。本文主要研究高

压下 CO<sub>2</sub>红外传感器的响应规律,利用公式法对由 环境总压变化引起的 CO<sub>2</sub>不同分压值测量误差进行 多项式拟合,为未来开发高压应急救援环境监测设 备提供技术支持。

### 1 材料与方法

#### 1.1 传感器及整机选型参数

#### 1.1.1 英国 C20 红外 CO2传感器及整机设计

C20 传感器是英国 GSS 公司生产的一款 NDIR 型红外气体传感器,可用于检测 CO<sub>2</sub>浓度,购自深圳 市新世联科技有限公司,设备采用 LED 光源和光电 二极管,在一定光照强度下产生电流(见图1)。CO2 的红外光特征吸收谱线为 4.26 μm,因此光源和光电 二极管设计的工作范围在 4.26 µm 窄带区。LED 光源 寿命比较长,且不需要滤光系统,气室采用的是反射 式光路,从而省去了传统的参比气室结构,体积较小。 实验选取量程为 0~5%的传感器,采用整机和分体式 传感器 2 种方法进行,由北京凌天科技有限公司协助 做成分体式传感器和整机,其中浓度显示屏采用 LED 发光二级管设计, 整机设计采用扩散式测量, 不带抽 气泵,部分组件如图1所示。整机直接放入高压舱进 行压力响应试验,分体式传感器利用接线柱将两端管 脚接出高压舱后,利用外用表测量其值。在加压舱中 进行阶梯加压试验和冲击压试验。



图 1 英国 C20 传感器外观及整机设计

Fig.1 Appearance and machine design of C20 sensor: a) C20 sensor; b) sensor motherboard; c) appearance of split sensor

#### 1.1.2 国产 G4 红外 CO2 传感器

G4 红外气体传感器(见图 2)是基于 NDIR 原 理设计的智能微型气体传感器,由上海翼芯红外传 感技术有限公司研发并量产,能直接输出经线性化 处理和温度补偿的气体浓度值信号。试验选取量程 为 0~10%的传感器,由深圳科尔诺电子科技有限公 司协助做成分体式传感器和整机,其中浓度显示屏 采用 LCD 液晶显示屏设计,比传统的 LED 显示板,



a G4 传感器

LCD 液晶显示屏体积和耗电量都小,可以做成操控效果和视觉效果都比较好的控制面板,此次加压试验也可以同时考察 LCD 液晶显示屏的耐压能力。选用整机和分体式传感器对照的方法进行试验,分体式传感器利用接线柱将两端管脚接出后,利用外用表测量其值,舱内的整机采用泵吸式的抽气方式,抽气流量为 50 mL/min。在加压舱中进行阶梯加压试验和冲击压试验。



b 高压实验舱外观



#### 1.2 高气压环境压力舱

传感器高压响应规律在小型的压力容器中进行,加压舱长 65 cm,直径为 37cm,两侧有观察窗,观察窗直径为 15 cm,材质为有机玻璃,可通过高压舱自带压力表测试舱内压力,高压舱一侧有进气阀和排气阀,另一侧有导线接入头。在加压舱中进行阶梯加压试验和冲击压试验。用真空泵抽真空(PCV-4MSV 藤

原单级旋片式真空泵,浙江藤原五金有限公司),在 常压下用 CO<sub>2</sub>标气钢瓶冲入一定浓度 CO<sub>2</sub>气体,反 复数次,直到浓度不变为止。其中标气质量分数分别 为 0.5%、1.0%、1.5%、2.5%、4.5%(规格为 40 L, 误差为 0.1%,伟创标准气体有限公司)。测试系统如 图 3 所示,由 CO<sub>2</sub>标准气气瓶、氮气瓶、加压舱、温 压一体变送器、风扇组成。



图 3 高压实验舱加压试验示意图 Fig.3 Schematic diagram of pressurization test for high pressure test chamber

#### 1.3 测定流程

初始状态为1个大气压,利用通风洗舱的方式预 先充入高纯 N<sub>2</sub>(规格为40 L,纯度为99.99%, 伟创 标准气体有限公司),分体式传感器和整机显示应均 为0%。反复用 N<sub>2</sub>加减压置换数次,观察分体式传感 器和整机和响应情况。 向舱内充入一定量的 CO<sub>2</sub>标准气,在大气压下 平衡,然后抽真空,反复数次,直至仪器显示不变。 此时,舱内 CO<sub>2</sub>浓度为标气瓶的实际浓度。舱外校 准方法为气相色谱法校准,用气袋采集舱内气体, 用气相色谱(GC910,上海科创仪器设备有限公司) 进行分析。

采用 N<sub>2</sub>向舱内加压,选取压力范围为 101 325~

607 950 Pa,加压分别为阶梯加压和快速冲击加压,减压程序实行快速减至常压。阶梯式加压程序为以101 325 Pa/min 升高到 151 987.5 Pa,停止 1~2 min,然后继续升高到 202 650 Pa,以 50 662.5 Pa 为步长,以此类推,最终升高到 607 950 Pa。冲击加压试验方案为 1~2 min 迅速加压到 607 950 Pa,在该压力下保持 5 min 以上,观察数据变化情况。

#### 2 结果与讨论

#### 2.1 阶梯加压试验传感器响应规律

试验结果显示, CO2分压不变的条件下, 随着环 境压力的逐级升高, CO<sub>2</sub> 的浓度输出值出现了先增 加、后降低的现象,这种趋势在压力小于 202 650 Pa 时表现得较为明显。温度也出现了和 CO<sub>2</sub> 的浓度输出 值一样先增加、后降低的规律,阶梯加压升压速率低, 温度升高变化程度不大。CO2分体式传感器及整机的 浓度输出值规律为:随着压力的升高,CO2的测量值 逐渐变大,但不超过实际值的2倍;随着压力的增大, 标准气样值与实测值的比值接近幂函数形式;分体式 传感器的输出浓度值比整机的输出浓度值要大;传感 器的响应受温度和压力的共同影响,不同 CO2浓度分 压下的压力响应规律具有比较良好的一致性。这和闫 硕等<sup>[11]</sup>的研究结果有所不同,他们得出了 MSH-P/ CO<sub>2</sub>/NC/X 传感器在 CO<sub>2</sub>分压不变的条件下,随着环 境加压力的升高, CO2的电压输出值总体出现了偏小 的结果。他们研究的升压范围较小,而且信号不是连 续输出,估计压力受温度影响产生回弹。马维光等[12] 在对 CO2气体在 2v3 带 R3 支的吸收特性进行研究的 过程中发现,分压不变,总压从 101 325 Pa 上升至 1013 250 Pa 的过程中, 气体的吸收系数峰值在总压 大于 202 650 Pa 时出现了明显的下降情况,并认为此 下降趋势的原因是压力增大引起的 CO, 气体分子与 其他组分气体分子间的碰撞加剧,导致吸收光谱的谱 线出现洛伦兹展宽,使得源光强被吸收而强度减小, 从而导致比尔朗伯定律中的吸收系数  $a(\lambda)$ 变小。郑海 明等<sup>[13]</sup>对 SO<sub>2</sub> 气体吸收系数峰值的研究也得出了类 似的结论。

赵延军等<sup>[14]</sup>发现,NO 气体随着 Ar、He 等外加 气体的加入,会出现吸收能力先增大、后减小的情况。 参照朗伯比尔吸收定律,当 CO<sub>2</sub>分压不变,α(λ)减小 时,衰减后的光强 I<sub>4</sub>增大,则线性输出的电压值增大, 与本试验结果所表现的趋势一致。杨绪军<sup>[5]</sup>在管道红 外甲烷传感器压力变化测量试验中也都得到了类似 的结论,随着压力的升高,甲烷的测量值逐渐变大。

试验发现,每次加压后,用氮气进行常压反复冲 洗回零,传感器和整机均能快速回到零点,且回零时 间不超过 5 min。用不同标气进行测量发现,传感器 和整机均能正常显示,C20 分体式传感器和整机未见 损坏,整机在试验范围的高压环境下未出现失效或响 应失灵的情况(见图 4),但 C4 分体式传感器在 1.0% CO<sub>2</sub>分压和 1.5% CO<sub>2</sub>分压出现信号采集震荡现象(见图 5)。







#### 2.2 冲击加压传感器响应规律

冲击加压传感器和整机的响应规律与阶梯加压 实验相似,由图 6 和图 7 可以看到,CO<sub>2</sub>分压不变的 条件下,随着环境冲击压的升高,2 种传感器 CO<sub>2</sub>的 浓度输出值总体出现了先增加、后降低的变化趋势。 温度也出现了和 CO<sub>2</sub>的浓度输出值一样先增加、后降 低的规律,变化程度较阶梯加压波动幅度大。C20 传 感器的稳定性要优于 G4 传感器,因此冲击加压试验 C20 采用整机和分体式传感器。G4 分体式传感器由 于出现信号震荡现象,只采用了整机进行冲击加





increased gradually under different CO<sub>2</sub> partial pressure

压。C20分体式传感器的浓度输出值随着压力的升高 迅速增加,并超过了实际值的2倍,C20整机的飘移 明显小于分体式传感器。随着压力的增大,测量值与 实际值的比值函数接近幂函数形式。C20分体式传感 器的输出浓度值比C20整机的输出浓度值要小,温度 对传感器的影响大于压力的影响。G4整机在高浓度 下的漂移大于低浓度下的漂移,在高压下,不同浓度 气样的压力响应规律具有比较良好的一致性。同时, 每次加压后用氮气进行常压反复冲洗回零,传感器和 整机均能快速回到零点,且回零时间不超过5 min。 常压下用不同标气进行测量发现,传感器和整机均能 正常显示,试验的传感器和整机未见损坏,未出现失





Fig.6 Response curve of C20 sensor and analyzer as pressure impulsive increasing under different CO<sub>2</sub> partial pressure



图 7 不同 CO<sub>2</sub>分压下 G4 整机冲击加压响应曲线 Fig.7 Response curve of G4 sensor as pressure impulsive increasing under different CO<sub>2</sub> partial pressure

· 134 ·

效或响应失灵的情况。

#### 2.3 红外传感器压力信号响应规律拟合曲线

大部分有机和无机多原子分子气体在红外区都 有特征吸收波长,当红外光通过时,这些气体分子对 特定波长的红外光有吸收作用,其吸收关系服从朗伯 --比尔(Lambert-Beer)定律:

$$I'=I_0e^{-kpt}$$
 (1)  
因此,出射光强 I 可表示为:  
 $I=I_0-I'=I_0(1-e^{-kpt})$  (2)

式中: *I*<sub>0</sub>为入射光强; *I*为吸收光强; *l*为气体介 质厚度; *k*为吸收系数; *p*为气体分压; *t*为温度。吸 收系数 *k* 除了与气体种类、入射光波长有关外,还 受环境温度和气压的影响<sup>[15-20]</sup>。因此,对于变温、变 压工作环境,吸收系数 *k* 是一个变值,从而直接影响 吸收光强 *I*。

由于梯度加压和冲击加压过程中温度的变化范

围不超过5℃,且仪器本身有温度补偿功能(温度有 多点补偿和线性补偿),因此暂不考虑温度的影响, 此次试验 CO<sub>2</sub>的分压也不变。基于上述假设,CO<sub>2</sub> 气体浓度测量值与实际值可以用简化为关于总压的 函数,见式(3)。

$$C_{\mathfrak{X}} = K(P) \times C_{\mathfrak{M}} \tag{3}$$

式中: C<sub>\*</sub>为实际值; C<sub>\*\*</sub>为红外 CO<sub>2</sub> 传感器的测 量值; K(P)为 CO<sub>2</sub> 气样标准值与实测比值对应压力函 数; P 为总压力。将试验数据通过 Excel 软件进行拟 合, 从图 8 可以看出, 不同 CO<sub>2</sub>浓度显示值和不同压 力变化速率下的拟合曲线为非线性, 为多次函数。在 压力不发生剧烈波动情况时,建立不同浓度 CO<sub>2</sub>的函 数拟合曲线二维图库,进行高压环境压力补偿的计算 时, 只需要采集高压舱内的压力值和仪器显示值进行 修正即可。压力剧烈波动情况比较复杂, 需采用多维 响应曲面、神经网络算法等方法, 或者分别进行校准 修正后进行多阶拟合<sup>[21-25]</sup>。





Fig.8 Function fitting curve of whole machine pressure signal: a) step pressurization of C20 complete machine; b) C20 whole machine impact pressurization; c) G4 whde machine imbact pressurization

## 3 结语

NDIR 式红外 CO<sub>2</sub> 传感器是实现高压下检测相对 可靠的选择,常用电子元器件在低于 607 950 Pa 的高 气压稳压状态下基本不会造成机械损伤,但信号会发 生较大的漂移,冲击加压的漂移比阶梯加压显著。 CO<sub>2</sub>分压不变的情况下,不考虑温度的影响,CO<sub>2</sub>气 体浓度测量值与实际值可以用简化为关于总压的多 次函数。采用试验方法是建立压力补偿模型的有效途 径,先建立不同浓度 CO<sub>2</sub>的函数拟合曲线二维图库, 然后通过采集高压舱内的压力值和仪器显示值来反 演计算浓度真实值。

#### 参考文献:

 王聪,魏衡华,赵宇. 非分光红外瓦斯传感器压力补偿 分析[J]. 微型机与应用, 2014, 33(6): 74-76.
 WANG Cong, WEI Heng-hua, ZHAO Yu. The Pressure Compensation about Non-Dispersive Infrared Methane Transducer[J]. Microcomputer & Its Applications, 2014, 33(6): 74-76.

- [2] 杨震,梁永直. 矿用红外甲烷传感器温度补偿算法模型研究[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(10): 102602.
   YANG Zhen, LIANG Yong-zhi. Algorithmic Model of Temperature Compensation for Infrared Methane Sensors[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(10): 102602.
- [3] 李晓刚. 矿用红外线甲烷传感器压力补偿方法[J]. 煤 矿安全, 2014, 45(7): 88-90.
  LI Xiao-gang. Pressure Compensation Method for Mine-Used Infrared Methane Sensor[J]. Safety in Coal Mines, 2014, 45(7): 88-90.
  [4] 杨震. 基于高斯回归过程的红外甲烷传感器温度补偿
  - 算法研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2017. YANG Zhen. Research on Temperature Compensation Algorithm of Infrared Methane Sensor Based on Gaussiang Regression[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2017.

- [5] 杨绪军. 一种管道红外传感器压力补偿模型研究[J]. 工业控制计算机, 2016, 29(10): 45-46.
   YANG Xu-jun. A Model Research of Pipeline Infrared Methane Sensor Pressure Compensation[J]. Industrial Control Computer, 2016, 29(10): 45-46.
- [6] 牛萍娟,程峥,田海涛,等.非色散红外 CO<sub>2</sub> 传感器温 度补偿模型研究[J]. 仪表技术与传感器, 2019(8): 17-20.
  NIU Ping-juan, CHENG Zheng, TIAN Hai-tao, et al. Research on Temperature Compensation Model of Non-Dispersive Infrared CO<sub>2</sub> Sensor[J]. Instrument Tech-
- nique and Sensor, 2019(8): 17-20.
  [7] 张海庆. 矿用红外二氧化碳传感器设计[J]. 煤矿机电, 2015(6): 5-7.
  ZHANG Hai-qing. Design of Mine Infrared Carbon Dioxide Sensor[J]. Colliery Mechanical & Electrical Technology, 2015(6): 5-7.
- [8] 杜鹏, 谭秋林, 薛晨阳, 等. 吸收光谱型气体红外传感器的设计与实现[J]. 仪表技术与传感器, 2008(6): 1-2. DU Peng, TAN Qiu-lin, XUE Chen-yang, et al. Design and Realization of Absorption Spectrum Gas Infrared Sensor[J]. Instrument Technique and Sensor, 2008(6): 1-2.
- [9] 冯月华. 二氧化碳红外传感器读出电路芯片设计[D]. 北京:北京交通大学, 2014.
   FENG Yue-hua. The Readout Circuit Chip Design for CO<sub>2</sub>Infrared Sensor[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014.
- [10] 李小伟, 桑志锋, 庄汝科, 等. 基于 NDIR 原理的便携 式 CO<sub>2</sub>浓度检测仪[J]. 山东科学, 2009, 22(3): 50-52.
   LI Xiao-wei, SANG Zhi-feng, ZHUANG Ru-ke, et al. A NDIR Based Portable CO<sub>2</sub> Detector[J]. Shandong Science, 2009, 22(3): 50-52.
- [11] 闫硕,方以群,鲁刚. 高气压环境对红外二氧化碳传感器检测的影响[J]. 中华航海医学与高气压医学杂志,2014,21(4):256-259.
  YAN Shuo, FANG Yi-qun, LU Gang. Effects of Hyperbaric Environment on the Detection of the Infrared CO<sub>2</sub> Sensor[J]. Chinese Journal of Nautical Medicine and Hyperbaric Medicine, 2014, 21(4): 256-259.
- [12] 马维光, 尹王保, 黄涛, 赵延霆, 李昌勇, 贾锁堂. 气体峰值吸收系数随压强变化关系的理论分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2004, 24(2): 135-137.
  MA Wei-guang, YIN Wang-bao, HUANG Tao, et al. Analysis of Gas Absorption Coefficient at Various Pressures[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2004, 24(2): 135-137.
- [13] 郑海明,蔡小舒,陈军. 压力对 SO<sub>2</sub>近紫外区吸收特性 影响的实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(18): 101-105.

ZHENG Hai-ming, CAI Xiao-shu, CHEN Jun. Experimental Study of Pressure Effect on  $SO_2$  Absorption Characteristic in NUV Region[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(18): 101-105.

- [14] 赵延军, 王式民, 穆宁, 潘琦, 张学峰. 光散射平均值 法在线监测颗粒排放物浓度的研究[J]. 中国电机工程 学报, 2004, 24(11): 217-221.
  ZHAO Yan-jun, WANG Shi-min, MU Ning, et al. Online Continuous Measurement of Dust Concentration in the Exhaust Duct by Laser Scattering Mean Method[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(11): 217-221.
- [15] 袁博. 基于 NDIR 原理的 CO<sub>2</sub>浓度传感器的制备与研究
  [D]. 成都: 电子科技大学, 2019.
  YUAN Bo. A Research and Manufacturing of CO<sub>2</sub> Sensor Based on NDIR Technology[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2019.
- [16] 任丽君, 马斌, 刘国宏, 等. 气体非色散红外传感器研究进展[J]. 分析测试学报, 2020, 39(7): 922-928.
  REN Li-jun, MA Bin, LIU Guo-hong, et al. Research Progress of Non-Dispersive Infrared Sensor for Gas Detection[J]. Journal of Instrumental Analysis, 2020, 39(7): 922-928.
- [17] 殷亚龙,赵红梅,汪献忠,等.基于 NDIR 技术的油气 传感器设计[J]. 传感器与微系统, 2020, 39(5): 74-76. YIN Ya-long, ZHAO Hong-mei, WANG Xian-zhong, et al. Design of Gasoline Vapor Sensor Based on NDIR Technology[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2020, 39(5): 74-76.
- [18] 张浩, 王钊, 李悦, 等. 基于 NDIR 的 CO<sub>2</sub>探测系统设计[J]. 湖北大学学报(自然科学版), 2018, 40(3): 220-225.
  ZHANG Hao, WANG Zhao, LI Yue, et al. Designing of Carbon Dioxide Gas Detection System Based on NDIR[J]. Journal of Hubei University (Natural Science),
- 2018, 40(3): 220-225.
  [19] 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.
  YE Gang, ZHAO Jing, CHEN Jian-wei. Design and Implementation of Multicomponent Gas Online Monitoring System Based on Ndir[J]. Computer Applications and Software, 2019, 36(8): 115-119.
- [20] 陈森,黄政伟,王一.基于 NDIR 原理单光源单光路实现多组分测量的技术开发[J].分析仪器,2017(3):20-25.
   CHEN Miao, HUANG Zheng-wei, WANG Yi. Develop-

ment of Multicomponent Measurement by Single Light Source and Optical Path Based on a Infrared Gas Analyzer of NDIR Principle[J]. Analytical Instrumentation, 2017(3): 20-25.

[21] 张珅, 王煜, 赵欣, 等. 基于 NDIR 开放光路 CO<sub>2</sub>浓度 测量的标定方法研究[J]. 仪表技术与传感器, 2020(3): 100-104.

> ZHANG Shen, WANG Yu, ZHAO Xin, et al. Research on Calibration Method of CO<sub>2</sub> Concentration Measurement Based on NDIR Open Optical Path[J]. Instrument Technique and Sensor, 2020(3): 100-104.

- [22] 陈凯彦,朱斌成,毛科技.基于曲面拟合的 NDIR 单通 道 CO<sub>2</sub> 气体传感器快速标定算法[J]. 传感技术学报, 2021, 34(1): 103-108.
  CHEN Kai-yan, ZHU Bin-cheng, MAO Ke-ji. Fast Calibration Algorithm for NDIR Single-Channel CO<sub>2</sub> Gas Sensor Based on Surface Fitting[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2021, 34(1): 103-108.
- [23] 汪青, 刘永平, 李卫龙. 红外 CO<sub>2</sub>气体传感器量程温度 补偿方法的研究[J]. 淮南师范学院学报, 2019, 21(2): 122-126.

WANG Qing, LIU Yong-ping, LI Wei-long. Research on Range Temperature Compensation Method for Infrared CO<sub>2</sub>gas Sensor[J]. Journal of Huainan Normal University, 2019, 21(2): 122-126.

- [24] 孙亚飞. 基于神经网络算法补偿的红外 CO<sub>2</sub> 气体传感 器系统研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2018. SUN Ya-fei. Research on Infrared CO<sub>2</sub> Gas Sensor System Based on Neura Network Algorithm Compensation[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2018.
- [25] 马砺,范新丽,张晓龙,等. 矿用 CH<sub>4</sub>-CO<sub>2</sub> 红外传感器 温度补偿算法模型研究[J]. 激光与红外, 2020, 50(12): 1456-1462.
  MA Li, FAN Xin-li, ZHANG Xiao-long, et al. Study on Temperature Compensation Algorithm Model of Mine CH<sub>4</sub>-CO<sub>2</sub> Infrared Sensor[J]. Laser & Infrared, 2020,

50(12): 1456-1462.

责任编辑:刘世忠