

浮顶罐中央排水管泄漏油气扩散激光检测研究

李栋 郭曦 王迪 马鹏博 孙伟栋 王明吉

Laser detection of oil-gas diffusion in central drain pipe of floating-roof tank

LI Dong, GUO Xi, WANG Di, MA Pengbo, SUN Weidong, WANG Mingji

引用本文:

李栋,郭曦,王迪,等.浮顶罐中央排水管泄漏油气扩散激光检测研究[J].*应用光学*,2021,42(5):913–918. DOI: 10.5768/JAO202142.0507001

LI Dong, GUO Xi, WANG Di, et al. Laser detection of oil-gas diffusion in central drain pipe of floating-roof tank [J]. *Journal of Applied Optics*, 2021, 42(5): 913–918. DOI: 10.5768/JAO202142.0507001

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0507001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[气体浓度激光光谱检测温度影响修正研究](#)

Study on temperature influence correction of gas concentration laser spectrum detection

应用光学. 2020, 41(2): 348–353 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0203002>

[空间平台主被动激光探测技术研究](#)

Active and passive laser detection technology in space platform

应用光学. 2021, 42(3): 550–556 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0307004>

[激光超声检测带过渡圆角平板表面缺陷的数值研究](#)

Numerical study on surface defects detection of plate with transition fillet by laser ultrasound

应用光学. 2020, 41(1): 214–219 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0107005>

[油雾扩散过程中浓度对偏振激光传输特性的影响](#)

Effect of concentration on propagation characteristics of polarized laser in oil-mist diffusion

应用光学. 2017, 38(6): 1012–1017 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0607002>

[一种基于形状的红外图像泄漏气体检测方法](#)

Shape-based infrared image leakage gas detection method

应用光学. 2019, 40(3): 468–472 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0303002>

[大尺寸太赫兹平顶波束的产生研究](#)

Generation of large-size terahertz flat-topped beam

应用光学. 2021, 42(4): 622–629 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0401008>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号:1002-2082(2021)05-0913-06

浮顶罐中央排水管泄漏油气扩散激光检测研究

李 栋¹, 郭 曦¹, 王 迪^{1,2}, 马鹏博¹, 孙伟栋³, 王明吉²

(1. 东北石油大学 土木建筑工程学院, 黑龙江 大庆 163318; 2. 东北石油大学 物理与电子工程学院,
黑龙江 大庆 163318; 3. 中国石化管道储运有限公司, 江苏 徐州 221008)

摘要: 浮顶罐中央排水管油气泄漏研究对及时制定合理的应急措施、预防重大事故发生有重要意义。介绍了一种判断中央排水管泄漏的方法。通过数值模拟分析了不同泄漏位置对中央排水管泄漏后报警时间的影响, 模拟发现 3 个泄漏位置的报警时间最大相差 1 308 s, 说明泄漏位置对报警时间的影响较大。采用浓度为 10% 的甲烷代替油气进行了中央排水管油气泄漏激光检测可行性的实验验证。结果表明: TDLAS 技术可用于中央排水管泄漏报警系统中油气浓度的检测, 对浮顶罐中央排水管泄漏报警系统的设计有一定的参考意义。

关键词: 浮顶罐; 中央排水管; 泄漏; 数值模拟; 激光检测

中图分类号: TN249

文献标志码: A

DOI: [10.5768/JAO202142.0507001](https://doi.org/10.5768/JAO202142.0507001)

Laser detection of oil-gas diffusion in central drain pipe of floating-roof tank

LI Dong¹, GUO Xi¹, WANG Di^{1,2}, MA Pengbo¹, SUN Weidong³, WANG Mingji²

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China; 2. School of Physics and Electronic Engineering, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China;
3. SINOPEC Pipeline Storage and Transportation Co., Ltd., Xuzhou 221008, China)

Abstract: The research on oil-gas leak from the central drain pipe of floating-roof tank is of great significance for the timely formulation of reasonable emergency measures and the prevention of major accidents. A method for judging the leak of the central drain pipe was introduced. The influence of different leak locations on the alarm time after the leak of central drain pipe was analyzed through the numerical simulation. The simulation showed that the maximum difference between alarm times of the three leak locations was 1 308 s, which meant that the leak location had a greater impact on the alarm time. The feasibility of laser detection of oil-gas leak in central drain pipe was verified by using CH₄ with a concentration of 10% instead of the oil-gas. The results show that the tunable diode laser absorption spectroscopy (TDLAS) technology can be used to detect the oil-gas concentration in the leak alarm system of central drain pipe, which provides a certain reference meaning for the design of the leak alarm system of central drain pipe of floating-roof tank.

Key words: floating-roof tank; central drainage pipe; leak; numerical simulation; laser detection

引言

中央排水管是大型浮顶罐必需的排水装置, 其有效防止浮顶雨雪堆积, 但由于储液腐蚀、储罐沉降、受力不均等原因导致其破损发生油品微泄漏, 其泄漏通常难以察觉, 若不及时发现则将导致环

境污染, 甚至引发燃爆事故^[1-2]。因此, 开展中央排水管泄漏油品扩散研究对监控系统设计和安全预警措施制定具有重要工程意义。

目前, 关于浮顶罐中央排水管油气泄漏的相关研究较少, 而对输油输气管道及储罐泄漏的研究

收稿日期: 2021-04-14; 修回日期: 2021-06-07

基金项目: 提高油气采收率教育部重点实验室开放课题 (NEPU-EOR-2019-14); 博士后研究人员落户黑龙江科研启动资助项目 (BHL-Q20101); (东北石油大学优秀中青年科研创新团队项目 (KYCXTD201901)

作者简介: 李栋 (1979—), 男, 博士, 教授, 主要从事油气介质激光检测技术研究。E-mail: lidonglvyan@126.com

通信作者: 王迪 (1992—), 男, 在读博士, 主要从事激光检测及信号处理研究。E-mail: 15776598521@163.com

较多^[3-5]。中央排水管泄漏油气扩散不同于现有管道及储罐泄漏研究, 其需要考虑半封闭空间内多组分气体扩散过程。谢飞等人采用 FLACS 软件对浮顶罐密封圈油气泄漏状态进行分析, 建议在容易泄漏处安装可燃气体监测装置^[6]。而中央排水管管径较小, 无法在泄漏口安装气体监测装置。可调谐二极管激光吸收光谱技术(tunable diode laser absorption spectroscopy, TDLAS)不同于传统的气体检测方法, 具有检测灵敏度高、精度高、响应快等优点, 成为气体泄漏安全监测领域研究的热点^[7-10]。然而该技术是否适用于对浮顶罐中央排水管泄漏油气浓度的检测, 目前尚未发现相关研究。

基于以上研究成果, 本文建立了浮顶罐中央排水管泄漏油气扩散模型, 以中央排水管出口监测点的浓度为对象, 模拟分析了泄漏位置对中央排水管泄漏油气扩散的影响, 并通过实验验证了中央排水管出口油气泄漏激光检测的可行性。

1 模型建立

1.1 中央排水管泄漏问题

图 1 所示浮顶罐中央排水管出现破损点后, 受压力及重力影响罐内储液(通常为原油)从破损点流出。油品泄漏后中央排水管内会聚集大量的轻烃组分(简称油气)。当排水阀处于关闭状态时, 浮盘排水入口在中央排水管泄漏状态下变成了油气扩散出口, 故出口处油气浓度检测结果可作为判断中央排水管是否发生泄漏的重要依据。

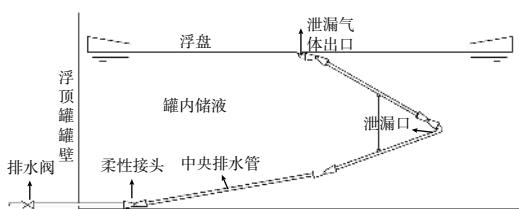


图 1 浮顶罐中央排水管结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of central drain pipe of floating-roof tank

1.2 数理模型

如图 2 所示为中央排水管泄漏油气扩散物理模型。

原油挥发的油气成分复杂, 根据文献 [11], 挥发过程的油气组分中丙烷、丁烷及戊烷所占体积分数较高, 因此本文选用了丙烷、丁烷、戊烷的混合气作为泄漏油气。

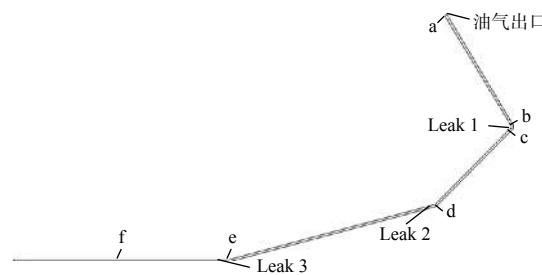


图 2 物理模型

Fig. 2 Physical model

中央排水管内油气泄漏扩散满足以下方程^[12]:

连续性方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

式中: ρ 为油气密度; u 为油气在中央排水管内的流速。

动量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_j} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + (\rho - \rho_a)g \quad (2)$$

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \delta_{ij} \quad (3)$$

式中: P 为油气微团上的压力; μ 为油气动力黏度; τ 为分子粘性作用而产生的作用在微元体表面上的粘性应力; ρ_a 为空气密度。

能量守恒方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j T)}{\partial x_j} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu}{\sigma_T} \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + \frac{c_{pv} - c_{pa}}{c_p} \cdot \\ &\quad \left[\left(\frac{\mu}{\sigma_c} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] \frac{\partial T}{\partial x_j} \end{aligned} \quad (4)$$

式中: T 为油气温度; σ_T 、 σ_c 分别为油气表面拉应力和表面压应力; ω 为各组分的质量分数; c_{pv} 、 c_{pa} 、 c_p 分别为油气定压比热容、空气定压比热容、混合气体定压比热容。

标准 $k-\varepsilon$ 方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i k)}{\partial x_i} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \\ &\quad G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i \varepsilon)}{\partial x_i} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + \\ &\quad G_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \end{aligned} \quad (6)$$

式中: k 、 ε 分别为湍动能和耗散率; μ_t 为湍流黏度; G_k 、 G_b 分别为由平均速度梯度和浮力影响引起的湍动能产生; Y_M 为可压湍流项中脉动扩张的贡献; S_k 、 S_ε 为源项; $C_{1\varepsilon}=1.44$ 、 $C_{2\varepsilon}=1.92$ 、 $C_{3\varepsilon}=0.09$ 。

组分运输方程

$$\frac{\partial(\rho\omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \omega)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho D \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) \quad (7)$$

1.3 边界条件及模型求解

泄漏口采用速度入口边界, 泄漏速度为 0.5 m/s, 泄漏孔径为 5 mm; 出口边界采用压力出口边界条件, 出口压力采用标准大气压; 其余均采用壁面边界且无滑移。基于压力求解器进行求解, 压力与速度耦合选用 SIMPLE 算法, 除能量方程残差收敛标准设定为 10^{-6} , 其余均设为 10^{-3} , 迭代时间步长设为 0.1 s。

1.4 TDLAS 技术浓度测量原理

根据比尔-朗伯定律, 推导得出直接吸收光谱法待测油气浓度表达式为^[13]:

$$C = \frac{A}{PS(T)L} \quad (8)$$

式中: C 为待测油气体积分数, %; A 为油气光谱吸光度; P 为环境压强, atm; $S(T)$ 为待测油气在该波段的吸收谱线强度, 仅与环境温度有关, $\text{cm}^{-2} \cdot \text{atm}^{-1}$; L 为吸光光程, cm。

2 模型验证

为验证本文模型, 与文献 [14] 天然气管道泄漏扩散模型进行了对比。文献中二维模型尺寸为 200 m×2 m, 泄漏口为速度入口, 泄漏速度为 100 m/s, 泄漏孔径为 10 mm。本文建立了与文献中尺寸相同的模型, 其余设置参考 1.3 节模拟条件。

如图 3 所示, 通过对比本文和文献中模拟 10 s 的结果, 发现气体有着相似的形状和扩散规律, 说明本文模型及求解方法的正确性。

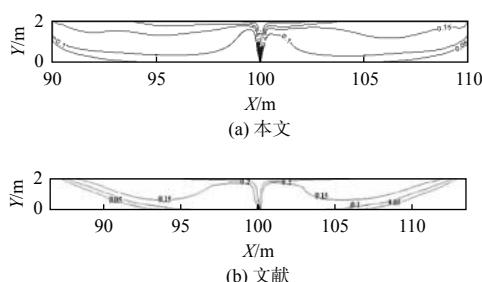


图 3 模型验证

Fig. 3 Model validation

3 结果与分析

3.1 模拟结果分析

当泄漏口在 Leak1、Leak2、Leak3 位置时(见图 2), 报警时间为分别为 561.5 s、1 023.5 s、1 869.5 s

(报警时间为取泄漏初始时刻至监测点 a 体积分数到达 0.3% 的时间^[15])。

通过模拟得到监测点 a、b、c、d、e、f 浓度变化曲线(监测点位置见图 2)。观察图 4 的油气浓度变化曲线, 发现虽然 3 幅图的曲线变化规律明显不同, 但结合各监测点的位置, 依然可以找到相似的扩散规律: 当监测点位于泄漏口同一侧时, 各监测点的曲线斜率接近, 而不同侧的监测点曲线斜率相差较大。因此可以通过分析管内各点浓度变化曲线的斜率, 大致分析出泄漏点的位置。

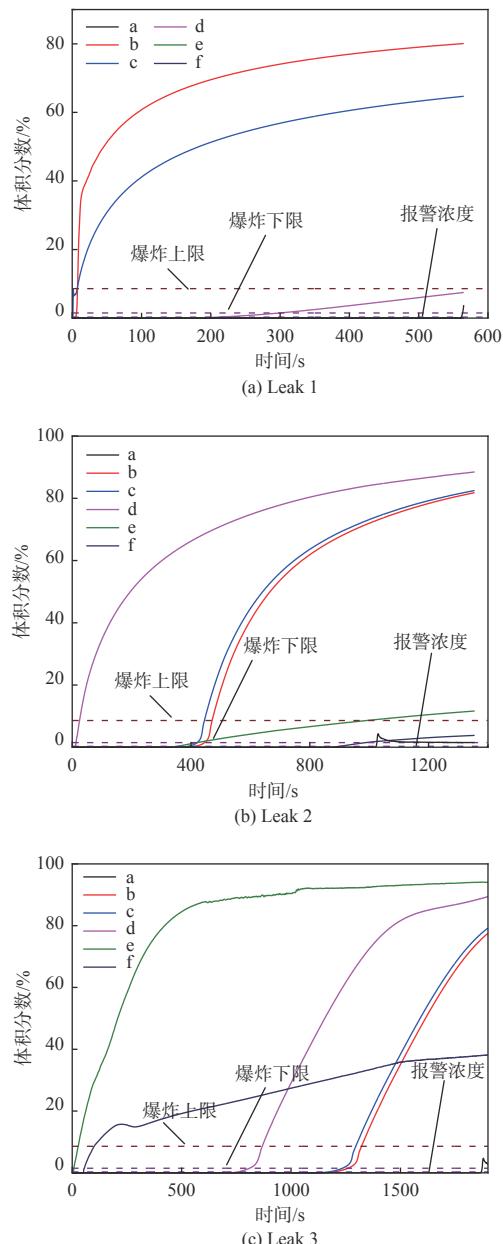


图 4 不同泄漏位置各监测点浓度变化曲线

Fig. 4 Concentration change curves of each monitoring point at different leak locations

3.2 实验研究

采用 10% 浓度的 CH₄ 代替成分复杂的油气进行 TDLAS 系统监测中央排水管出口浓度的可行性研究, 实验检测原理如图 5 所示。

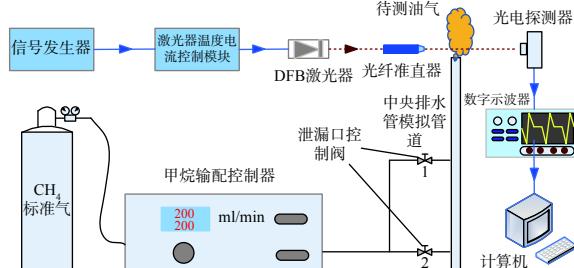


图 5 激光检测实验系统示意图

Fig. 5 Schematic diagram of laser detection experimental system

图 6 所示为本实验系统的实物图。本实验在压力为 1 atm、温度为 20 °C 的室内进行。具体操作如下: 开启系统所有设备, 校准激光器和光电探测器位置, 使数字示波器输出信号为锯齿波的形状。关闭控制阀 1 并打开控制阀 2, 调节甲烷输配控制器, 设定流量为 100 ml/min 后打开气瓶。CH₄ 在一段时间后扩散至模拟管道外, 当看到数字示波器吸收峰稳定后开始记录 20 组波形数据。继续将流量分别调为 150 ml/min、200 ml/min, 各测 20 组数据。

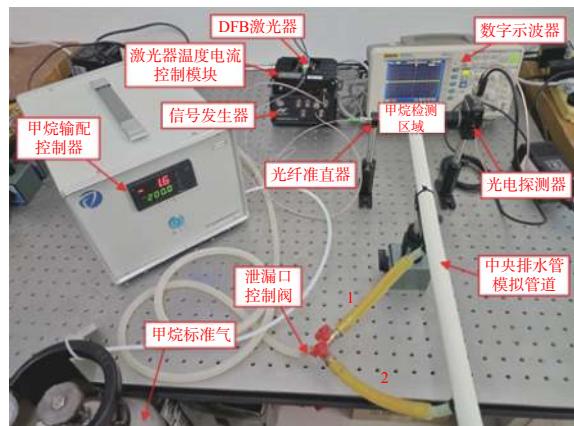


图 6 实验系统图

Fig. 6 Picture of experimental system

本文采用直接吸收光谱法进行浓度反演, 将实验数据导入至计算机中进行筛选得到如图 7 所示的 CH₄ 分子原始吸收谱线波形。通过对该原始信号进行 S-G 卷积平滑降噪处理以及 Voigt 线型函数拟合得到 CH₄ 光谱吸光度曲线积分面积 A , 特定环境温度下吸收谱线强度 $S(T)$ 可根据

HITRAN 数据库查出, 在环境压强 P 和测量光程 L 已知的情况下, 根据(8)式即可计算得到待测 CH₄ 体积分数。

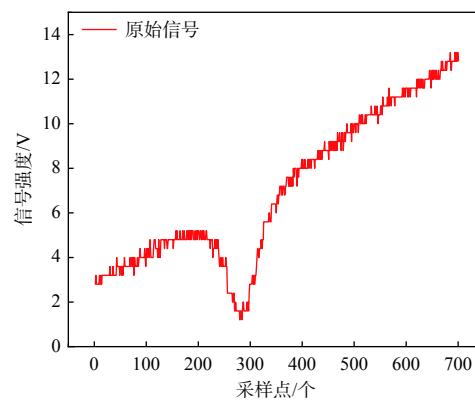


图 7 原始吸收谱线波形

Fig. 7 Original absorption spectral-line waveform

图 8 所示 Voigt 线型函数拟合残差, 可以看出 Voigt 线型函数的拟合残差在±5% 以内, 曲线拟合优度为 0.9979。

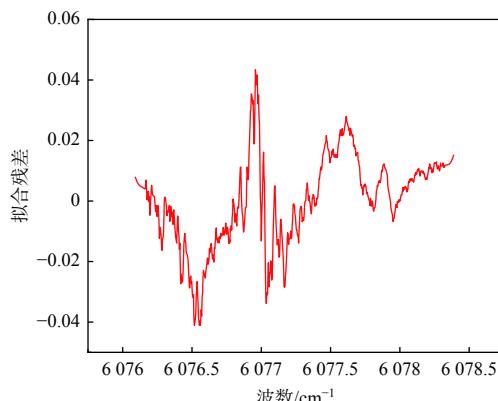
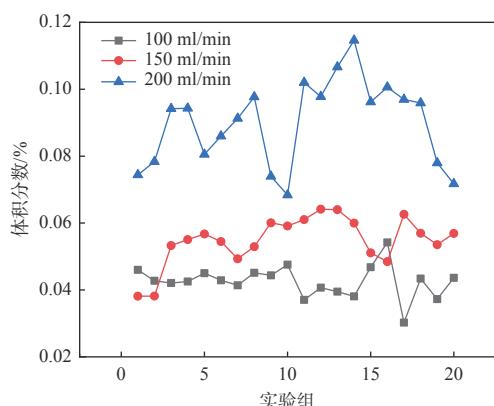


图 8 Voigt 线型函数拟合残差

Fig. 8 Voigt linear function fitting residual

计算结果如图 9 所示, 图中 CH₄ 的浓度出现了较大的波动, 这是室内空气的扰动和气体扩散的不确定性造成的结果。排水管出口 CH₄ 的浓度随流量的增大而增大, 原因是当气体流量较小时, 气体动能较小, 运移至排水管出口时立即向周围空气中扩散, 导致浓度较低。当流量为 200 ml/min 时, 个别实验组 CH₄ 浓度高于 10%, 可能因为浓度在反演的过程中, 平滑降噪、Voigt 拟合等处理均会产生误差, 对反演结果造成影响。由此实验说明, TDLAS 技术可以用于油气扩散检测实验, 并具有适用于中央排水管泄漏油气检测的前景, 但尚需进一步完善其具体测量方法和求解算法。

图 9 不同流量下 CH_4 浓度反演结果Fig. 9 Inversion results of CH_4 concentration at different flow rates

4 结论

本文通过数值模拟分析了不同泄漏位置对油气扩散特性的影响,找到了中央排水管内各点浓度变化曲线的斜率与泄漏口间的规律性。开展了TDLAS技术检测原理的激光检测实验,对排水管出口的 CH_4 浓度进行连续监测,验证了浮顶罐中央排水管泄漏激光检测的可行性,为中央排水管监控系统设计提供了一定的参考价值。

参考文献:

- [1] 陈风兴. 外浮顶储罐排水管的泄漏分析及选用[J]. 油气储运, 2002(7): 54-57+7.
- CHEN Fengxing. Leakage analysis and selection of drain pipe of external floating roof tank[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2002(7): 54-57+7.
- [2] 戴昊. 大型外浮顶油罐基础沉降造成中央排水系统失效分析[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2018, 38(8): 87-88.
- DAI Hao. Analysis of central drainage system failure caused by foundation settlement of large external floating roof oil tank[J]. *China Petroleum and Chemical Standard and Quality*, 2018, 38(8): 87-88.
- [3] 石一丁, 葛天明, 张足峰. 海底输气管道气体泄漏扩散模拟及影响因素研究[J]. 石油与天然气化工, 2020, 49(5): 109-115.
- SHI Yiding, GE Tianming, ZHANG Zufeng. Simulation of the subsea gas pipeline leakage and the study of influence factors[J]. *Chemical Engineering of Oil & Gas*, 2020, 49(5): 109-115.
- [4] 王岩, 黄弘, 黄丽达, 等. 土壤大气耦合的燃气泄漏扩散数值模拟[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2017, 57(3): 274-280.
- WANG Yan, HUANG Hong, HUANG Lida, et al. Numerical simulations of leakage gas dispersion based on soil and atmosphere coupling[J]. *Journal of Tsinghua University(Science and Technology)*, 2017, 57(3): 274-280.
- [5] 王向阳, 杜美萍, 汪彤, 等. 埋地燃气管道泄漏扩散过程数值模拟[J]. 中国安全科学学报, 2018, 28(2): 45-50.
- WANG Xiangyang, DU Meiping, WANG Tong, et al. Numerical simulation of leakage of gas from buried pipeline and its diffusion process[J]. *China Safety Science Journal*, 2018, 28(2): 45-50.
- [6] 谢飞, 罗炎平, 张玉龙. 大型浮顶罐密封圈油气泄漏扩散分析[J]. 消防科学与技术, 2017, 36(10): 1458-1460.
- XIE Fei, LUO Yanping, ZHANG Yulong. Analysis on the diffusion of oil gas leakage with large floating roof tank seal ring[J]. *Fire Science and Technology*, 2017, 36(10): 1458-1460.
- [7] 禹迎春, 王晗, 王志敏, 等. 基于QCL-TDLAS的 NH_3 浓度测量仿真研究[J]. 应用光学, 2020, 41(6): 1255-1261.
- YU Yingchun, WANG Han, WANG Zhimin, et al. Simulation study of NH_3 concentration measurement based on QCL-TDLAS[J]. *Journal of Applied Optics*, 2020, 41(6): 1255-1261.
- [8] 姚德龙, 陈松. 固体火箭发动机羽流流速TDLAS测量方法研究[J]. 应用光学, 2020, 41(2): 342-347.
- YAO Delong, CHEN Song. Study on TDLAS measurement method for plume velocity of solid rocket motor[J]. *Journal of Applied Optics*, 2020, 41(2): 342-347.
- [9] NAOYA K, TATSUMI T, TAKERU S, et al. Propane gas leak detection by infrared absorption using carbon infrared emitter and infrared camera[J]. *NDT & E International*, 2011, 44(1): 57-60.
- [10] 徐景德, 郝旭, 李晖, 等. 天然气高压输送管道微量泄漏TDLAS检测技术理论研究[J]. 安全与环境学报, 2017, 17(6): 2195-2199.
- XU Jingde, HAO Xu, LI Hui, et al. Theoretical probe on the TDLAS detection technology for minor leakage of natural gas transmission pipeline[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2017, 17(6): 2195-2199.
- [11] 康颖鹏. 原油挥发过程油气组分测定及迁移规律研究[D]. 青岛: 中国石油大学, 2016.
- KANG Yingpeng. Research on determination and migration of volatile gases from the crude oil[D]. Qingdao:

- China University of Petroleum, 2016.
- [12] 沈书乾, 李海三, 刘延雷, 等. 天然气管道泄漏孔径对激光检测的影响研究 [J]. 激光杂志, 2017, 38(9): 54-57.
SHEN Shuqian, LI Haisan, LIU Yanlei, et al. Research on the influence of natural gas pipeline leakage aperture on laser detection [J]. Laser Journal, 2017, 38(9): 54-57.
- [13] 段卜月. 管输天然气含水量激光检测及其高温辐射影响研究 [D]. 大庆: 东北石油大学, 2020.
DUAN Buyue. Research on the laser detection of water content in natural gas and the influence of high temperature radiation [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2020.
- [14] 王雪梅. 入廊天然气管道泄漏扩散模拟与危险性分析 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
WANG Xuemei. The diffusion simulationand risk analysis ofthe gas leakage in the urban utility tunnel[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [15] 罗振敏, 林京京, 郭正超, 等. 煤矿其他可燃气体对空气中甲烷爆炸极限的影响 [J]. 中国安全科学学报, 2015, 25(1): 91-97.
LUO Zhenmin, LIN Jingjing, GUO Zhengchao, et al. Influence of various other flammable gases in coal mine on explosion limits of methane[J]. China Safety Science Journal, 2015, 25(1): 91-97.