

洗峰. 基于分布式光纤声波传感技术的管道泄漏探测应用[J]. 净水技术, 2024, 43(8): 154-159.

XIAN F. Application of pipeline leakage detection based on distributed fiber optic acoustic sensing technology[J]. Water Purification Technology, 2024, 43(8): 154-159.

## 基于分布式光纤声波传感技术的管道泄漏探测应用

洗峰\*

(上海城投水务<集团>有限公司,上海 200082)

**摘要** 文章介绍了分布式光纤声波传感(distributed fiber optic acoustic sensing, DAS)技术的工作原理及其在管道泄漏检测中的应用。DAS系统通过光纤中背向瑞利散射光的变化来检测光纤上沿途感知到的声波信息,再结合光时域反射技术获取外部扰动事件所处的位置,从而通过检测和分析背向散射的光信号,提取外界扰动对应的位置和相位。文章搭建了一套试验系统,通过试验检测了DAS运用于管道泄漏探测的可靠性。试验表明,DAS技术可以检测并识别不同位置和类型的泄漏事件。为了进一步提高泄漏检测效果,文章设计了一种分析方法,通过数据预处理、特征提取、事件检测和泄漏识别与分类,实现了对泄漏事件的精准识别和定位,并提高了其在泄漏检测中的灵敏度和实时性。该方法结合DAS的技术特点,可以在长距离和大范围内提供高效、可靠的泄漏监测。

**关键词** 分布式光纤声波传感(DAS) 泄漏检测 瑞利散射 频谱分析 光纤光学

中图分类号: TU990 文献标识码: A 文章编号: 1099-0177(2024)08-0154-06

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2024.08.021

## Application of Pipeline Leakage Detection Based on Distributed Fiber Optic Acoustic Sensing Technology

XIAN Feng\*

(Shanghai Chengtou Water <Group> Co., Ltd., Shanghai 200082, China)

**Abstract** This paper introduced the working principle of distributed fiber optic acoustic sensing (DAS) technology and its application in pipeline leakage detection. The DAS system detected the acoustic information perceived along the fiber by the change of backward Rayleigh scattering light in the fiber, and combined the optical time domain reflectometry technique to obtain the location of the external disturbance event. Thus, by detecting and analyzing the backward scattered optical signal, the position and phase corresponding to the external disturbance were extracted. In this paper, a set of experimental system was set up to test the reliability of DAS used in pipeline leakage detection through experiments. The experiments showed that DAS technology could detect and identify different locations and types of leakage events. In order to further improve the leakage detection effect, this paper designed an analytical method. Through data preprocessing, feature extraction, event detection, leakage identification and classification, the precise identification and location of leakage events were achieved, and the sensitivity and real-time performance in leakage detection were improved. This method combined with the technical characteristics of DAS, can provide efficient and reliable leakage monitoring in long distances and large ranges.

**Keywords** distributed fiber optic acoustic sensing (DAS) leakage detection Rayleigh scattering spectrum analysis fiber optics

泄漏检测在现代工业和基础设施管理中扮演着至关重要的角色。无论是石油和天然气输送管道、供水管网,还是化工储罐和供热系统,泄漏问题都可

能产生严重的经济影响及环境和安全隐患。在水利水务系统中,管道泄漏检测更是不可或缺。目前,常见的泄漏检测方法有声学检测法、压力检测法、红外检测法、电化学检测法、光纤传感器检测法等,其中光纤传感器检测法具有明显的优势<sup>[1-4]</sup>。

光纤传感器检测法利用光纤作为传感介质,用探测到的光信号变化感知环境参数(如温度、压力、

[收稿日期] 2024-04-03

[基金项目] 国家重点研发计划项目(2022YFC3801000)

[通信作者] 洗峰(1978—),男,硕士,主要从事信息化、智慧水务工作,E-mail:xianfeng@shanghaiwater.com。

振动)变化。在泄漏检测的应用中,正是可以利用探测到的光信号变化实现泄漏的监测。这种方法具有诸多优点,如:强绝缘性与强化学稳定性、强抗电磁干扰能力、高韧性、高灵敏度、易于融合现有网络、宽频带、强耐腐蚀性等。具体而言,由于光纤传感器的优势,特别是其高灵敏度与抗电磁干扰能力,使其在泄漏检测中表现尤为突出。这也使得光纤传感器不仅能够长距离和大范围内提供精确的泄漏检测,还能在复杂和恶劣的环境中进行可靠工作。此外,光纤传感器的耐用性和高安全性,使其特别适用于需要长期稳定监测的场景和环境。因此,光纤传感器的综合性能和长期效益使其成为泄漏检测的优选方案<sup>[5-6]</sup>。

对于光纤传感器而言,用光纤传感器可以分为传感型和传光型两类。传感型光纤传感器中,光纤本身不仅用于传光,还作为传感头,直接感应外界环境的变化;而在传光型光纤传感器中,光纤仅用于传光,感应任务则由与光纤耦合的传感头完成。本文侧重于介绍传感型光纤传感器的应用。根据光的调制方式,光纤传感器可以分为波长调制型、强度调制型、相位调制型和偏振调制型几种类型。按传感器的分布方式,光纤传感器可以分为点式传感器、准分布式传感器和全分布式传感器。本文将聚焦于相位调制型的全分布式光纤传感器。

基于相位光时域反射(optical time domain reflectometry, OTDR)技术的分布式光纤声波传感(distributed fiber optic acoustic sensing, DAS)系统流体泄漏就是一种常见的相位调制型全分布式光纤传感器。DAS系统利用光纤作为传感介质,通过光纤中返回的光信号变化检测沿光纤沿途的声波信号。DAS系统的物理原理主要基于瑞利散射原理,光纤中的散射光信号会因外界声波的作用而发生变化,通过检测这些变化来识别和定位泄漏事件<sup>[7-8]</sup>。其主要优点包括以下几个方面。

1)长距离监测能力:DAS系统能够覆盖数十千米的距离,非常适合长输管道的泄漏检测。

2)实时性:DAS能够实时监测光纤沿线的动态变化,及时发现和定位泄漏事件。

3)高精度性:通过先进的信号处理技术,DAS能够提供高精度的泄漏定位和识别,减少误报漏报。

本文将基于该DAS系统,介绍其传感技术在管道泄漏监测中的应用,测量目标主要为监测测试管

道和在不同方向上释放的模拟泄漏的警报。

## 1 DAS测漏原理

### 1.1 DAS的工作原理

DAS系统主要使用了OTDR。由于瑞利散射效应,声波或振动作用在光纤上时会引起光纤中的微小应变变化,这些应变变化会激励相干瑞利散射信号<sup>[9-12]</sup>。

#### 1.1.1 瑞利散射光的数学模型

由于制作工艺引起的差异,光纤中掺杂的不均匀或者折射率分布的不一致可以用大小不一的颗粒来形象地表示。这种颗粒通常被称为散射粒子。在光纤中传播的激光遇到这些散射粒子时,就会产生瑞利散射。

在光纤的瑞利散射中,探测脉冲光按照全反射原理在光纤中传播,并与其在行进过程中遇到的散射粒子产生了作用,从而形成了瑞利散射光。对形成的瑞利散射光的脉冲行进路径进行等效拉直,并对拉直后的路径在二维平面上进行投影。此时,返回到光纤注入端口的散射光就被称为背向瑞利散射光<sup>[13-14]</sup>。

对于光电探测器而言,其在特定时刻感受到的散射光一般是脉冲宽度范围内所有背向瑞利散射光的矢量集合。假设所有瑞利散射光在光纤注入端口的初始相位为0,那么在忽略偏振态影响的条件下,探测器探测到的综合光场可表达成 $N$ 个散射光子的集合。在光纤注入端口处,背向瑞利散射光的功率与瑞利散射光振幅和相位相关,一旦改变了探测脉冲宽度范围内某个散射粒子对应背向散射光的振幅、相位,或者改变了探测脉冲宽度范围内散射粒子的数目和分布时,都将改变探测器探测到的背向瑞利散射光的功率。基于背向瑞利散射光的功率,就可以推得OTDR仪的基本定位方法<sup>[15]</sup>。

#### 1.1.2 基于OTDR的定位方法

OTDR最基本的定位方法是基于背向瑞利散射光的功率和时间的关系曲线实现的。由于瑞利散射和吸收损耗等因素的存在,探测脉冲光在沿着光纤传输时,其功率会不断下降。例如,对于1550 nm的激光而言,在G.652单模光纤中,激光每传输1 km功率下降约0.2 dB。探测脉冲光功率的下降则进一步导致了背向瑞利散射光功率的下降。

背向瑞利散射光在返回光纤注入端口的过程中

也遵循相似的规律,这将使得背向瑞利散射光的功率随着光纤长度的增加而下降。定义探测器探测到的光强度为一定脉冲宽度内散射粒子的散射光的集合,它直接对应最终探测到的原始信号。由于光纤中散射粒子及折射率分布的不均匀,对于同一个脉冲产生的背向瑞利散射光而言,探测器在不同的无限小的时刻里探测到的相位和幅度都是随机的。当脉冲光是宽带光源时,即可以假设这种光源是由各种不同的单色光源组合而成的。对于不同的单色光源,其产生的背向瑞利散射光具有不同的随机波动的空间分布特征,而这种不同空间分布特征的背向瑞利光叠加的结果就是功率-时间的曲线显得比较平滑。而当脉冲光是窄线宽的高相干光源时,可以认为该光源是单色光,背向瑞利散射光经过探测器反映出来的幅度和相位则自然呈现出随机性。此时,整体上背向瑞利散射光的功率还是随着传输距离的增加而逐渐下降,但功率关于时间的曲线不再平滑,变得凹凸起伏。尽管如此,不管是宽带光源,还是窄线宽的高相干光源,只要没有扰动事件作用于光纤上,功率-时间的曲线便不会发生变化。而一旦某个位置处有扰动事件作用在光纤上时,功率-时间曲线或者其脉冲间的差分曲线会变异常。而异常的时间点正是扰动事件发生的位置,这两者的关系如式(1)。

$$z = \frac{ct'}{2\bar{n}} \quad (1)$$

其中: $c$ ——光在真空中的传播速度,m/s;

$\bar{n}$ ——光纤的平均折射率;

$z$ ——距离光纤注入端口的距离,m;

$t'$ ——光脉冲发射后探测器的探测时间,s。

根据此定位方法,探测脉冲光产生的具体位置,从而确定实际情况下管道泄漏的位置。

### 1.2 DAS 测管道泄漏的工作原理

根据上文所列的原理,可以在实际的工作场景中分析背向散射的信号,测量扰动的最大声音频率带宽 $f_{\max}$ ,计算泄漏点的位置。具体如式(2)。

$$f_{\max} = \frac{c_0/n}{4L} \quad (2)$$

其中: $c_0$ ——光在空气中的传播速度,m/s;

$L$ ——泄漏点的距离,m。

当试验装置探测到异常频率的峰值时,通过式(2)即可推测出泄漏点在管道中具体的位置。基于以上理论,本文搭建了相关的试验装置。

## 2 试验装置及数据处理

### 2.1 试验装置简介

本试验使用的泄漏检测设备为 DAS 系统,系统的配置简图如图 1 所示。DAS 系统由 DAS 仪器处理单元和数据存储单元组成。系统可测量的声学带宽取决于连接传感器的光纤长度,其测量对象为监测测试管道,系统用于监测在不同方向上产生的泄漏可能。



图 1 DAS 系统配置

Fig. 1 DAS System Configuration

DAS 连接了总长度约为 2 000 m 的光纤。光纤主要固定在 3 个位置:其一固定在漏水点 1 管道上,主要是螺纹铠装光缆和皮线光缆;其二固定在消防栓上,主要为铠装螺纹光缆和皮线光缆;其三固定在阀门位置,为皮线光缆和跳线。具体结构如图 2 所示。

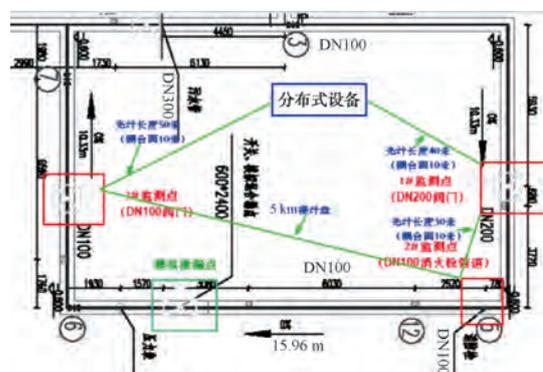


图 2 DAS 的光缆连接配置

Fig. 2 Optical Cable Connection Configuration for DAS

沿着测试管道安装的光缆内部均为 G. 652-D 单模光纤,两端熔接 FC/APC 尾纤,然后通过连接光缆连接到 DAS 仪器上,DAS 系统安装在距离测试管道大约 30 m 的操作室内,系统放置在试验室工作台上。

### 2.2 试验结果

测试数据如表 1 所示。

表 1 漏水试验测试  
Tab. 1 Water Leakage Test

模拟漏水点	漏水类型	开始时间	结束时间
漏水点 1	半喷射	16:44	16:55
	全开泄漏	17:02	17:10
漏水点 2	半喷射	17:26	17:33
	全开泄漏	17:33	17:40

本试验模拟的漏水状态分为半喷射状态与全开泄漏状态。测试点包括消火栓以及管道,光缆性质均为单模铠装螺纹。在此列出相应的试验结果如

表 2 及图 3 所示。

表 2 试验参数  
Tab. 2 Parameters for Experiment

项目	内容
模拟喷水状态	喷射
测试点 1	管道
泄漏点距离	75 m
光缆性质	单模铠装螺纹
描述	频谱在 248~600 Hz 有多个峰值,其中有 250、306、460、525、595 Hz

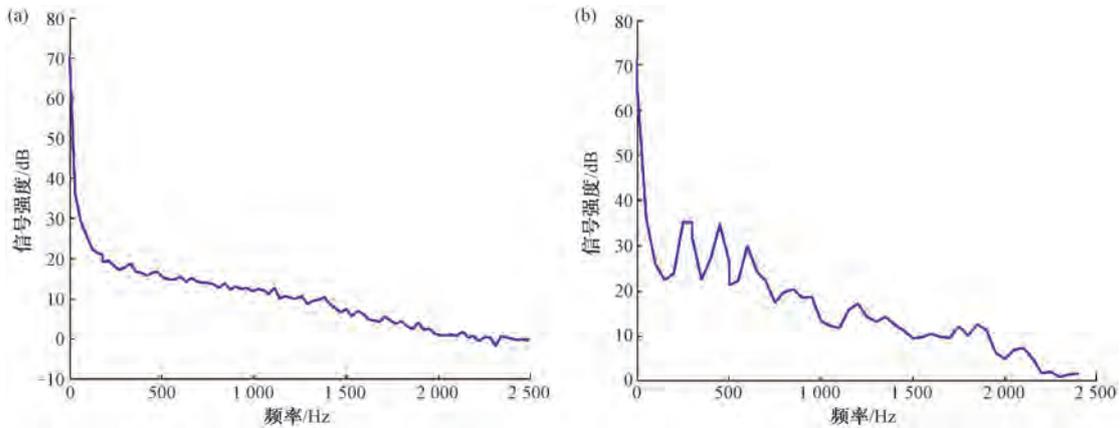


图 3 管道泄漏频谱

Fig. 3 Pipeline Leakage Spectrum

图 3(a) 为管道未发生泄漏时的频谱图,图 3(b) 为发生泄漏后的频谱图。在试验中,测试点位于管道中,测试的模拟漏水状态为喷射状态,泄漏点距离为 75 m,光缆性质为单模铠装螺纹。对比两张频谱图可知,图 3(b) 的泄漏频谱图在 248~600 Hz 有多个峰值,包括 250、306、460、525 Hz 以及 595 Hz。从图中分析可得,在 250 Hz 和 306 Hz 的频率下,信号强度较高,对应位置处产生泄漏。其他频率如 460、525 Hz 和 595 Hz 的信号强度相对较低,但仍然高于背景噪声水平,表明在这些位置下也存在泄漏。

综合分析试验的结果,可得结论: DAS 系统能够有效检测并识别不同位置和类型的泄漏事件,通过频谱分析,能够识别泄漏类型并定位泄漏点。试验中的频谱变化特征表明, DAS 系统对不同泄漏状态下的频率响应具有较高的灵敏度和准确性,能够较好地完成管道泄漏检测的任务。

### 2.3 泄漏分析系统设想

在上述系统的基础之上,在此设计一个泄漏分

析系统。系统的主要目标是通过分析数据,识别出泄漏事件的发生、定位泄漏位置并确定泄漏类型。该系统能够有效地提高了泄漏检测的灵敏度、准确度和实时性。

系统的设计思路如下。

1) 数据预处理: 输入 DAS 系统采集的背向散射信号数据,应用滤波器(如低通滤波器)去除高频噪声,对信号进行归一化处理,以消除不同测量条件下的幅度差异。

2) 特征提取: 对信号进行快速傅里叶变换,提取频谱特征,识别频谱中的主要峰值及其对应的频率,并将主要峰值的频率和幅度作为特征向量。

3) 事件检测: 设置频率和幅度阈值,检测超过阈值的事件,并在一定时间窗口内对信号进行累积分析,识别持续时间较长的异常事件。

4) 泄漏识别与分类: 将检测到的事件特征与已知泄漏模式进行匹配,确定事件类型,根据信号返回时间和光速计算泄漏位置,利用机器学习分类算法(如支持向量机或随机森林等)对事件进行分类。

5) 输出结果: 泄漏事件的检测结果, 包括发生时间、位置、类型和强度。

系统流程如图 4 所示。

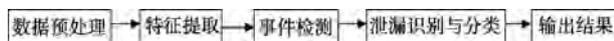


图 4 泄漏分析系统

Fig. 4 Leakage Analysis System

### 3 总结

本文从物理原理、泄漏检测系统与泄漏分析系统 3 个方面探索了 DAS 技术在探测管道泄漏中的应用。

1) DAS 系统物理原理的描述: DAS 系统基于瑞利散射原理和 OTDR, 通过光纤中传输的光信号变化来检测沿光纤长度上的声波信号。通过对背向散射的光信号进行检测并分析, 系统可以提取外界扰动的频率和振幅信息。DAS 系统的优势包括其长距离监测能力、实时监测和高精度的泄漏定位与识别能力。DAS 系统能够适用于长输管道和大范围的监测应用。

2) 泄漏检测系统的展示: 本文通过实际的试验检测了 DAS 系统的性能。在试验中, DAS 系统连接约为 2 000 m 的光纤, 其分别固定在模拟泄漏点、消防栓和阀门位置上。通过试验验证, DAS 系统能够成功地检测到不同位置泄漏产生的频率峰值, 从而准确地识别不同位置和类型的泄漏事件。通过该试验可以得出结论: DAS 系统对不同泄漏状态下的频率响应具有较高灵敏度和准确性。

3) 泄漏分析系统的规划: 为了进一步提高泄漏检测效果, 本文设计了泄漏分析系统。该系统包括数据预处理、特征提取、事件检测、泄漏识别与分类以及结果输出 5 个步骤。通过数据预处理去除噪声和归一化处理, 使用快速傅里叶变换提取频谱特征, 事件检测设置频率和幅度阈值, 泄漏识别与分类通过机器学习分类算法实现精确识别和定位。该分析系统有望能够更好地分析 DAS 装置测得的频率数据, 进一步提高系统的准确性与泛用性。

### 参考文献

[ 1 ] RODRIGUEZ-COBO L, LOMER M, COBO A, et al. Optical fiber strain sensor with extended dynamic range based on specklegrams[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2013, 203: 341–345. DOI: 10.1016/j.sna.2013.09.006.

[ 2 ] 张化光, 王天彪, 胡旭光, 等. 从管段走向管网: 管道泄漏诊

断技术研究进展[J]. *控制工程*, 2024, 31(6): 3–4.

ZHANG H G, WANG T B, HU X G, et al. From pipe section to pipe network: Research progress on pipeline leakage diagnosis technology[J]. *Control Engineering of China*, 2024, 31(6): 3–4.

[ 3 ] 张雪琴. 管道泄漏检测技术发展历程及展望[J]. *油气储运*, 2024, 43(3): 35–38.

ZHANG X Q. Development history and prospect of pipeline leak detection methods[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2024, 43(3): 35–38.

[ 4 ] 张国晟, 刘洪波, 张显忠. 供水系统安全保障与韧性城市建设综述[J]. *净水技术*, 2023, 42(1): 8–14, 127.

ZHANG G S, LIU H B, ZHANG X Z. Review of safety assurance and resilience urban construction on water supply system[J]. *Water Purification Technology*, 2023, 42(1): 8–14, 127.

[ 5 ] PERRET L, CHASSAGNE L, TOPÇU S, et al. Fiber optics sensor for sub-nanometric displacement and wide band width systems[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2011, 165(2): 189–193.

[ 6 ] 侯云鹤, 李微, 董紫君, 等. 城市街区供排水系统水质安全事件分析及控制对策[J]. *净水技术*, 2023, 42(11): 143–145.

HOU Y H, LI W, DONG Z J, et al. Analysis and control solutions of water quality safety events for water supply and drainage system in urban blocks [J]. *Water Purification Technology*, 2023, 42(11): 143–145.

[ 7 ] XING J J, ZHANG Y, WANG F, et al. A method based on time-scale factor for correcting the nonlinear frequency sweeping in an OFDR system[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019, 11(3): 7101808. DOI: 10.1109/JPHOT.2019.2919775.

[ 8 ] 张旭莘, 张益昕. 分布式光纤传感技术研究和应用的现状及未来[J]. *光学学报*, 2024, 44(41): 11–13.

ZHANG X P, ZHANG Y X. Current status and future of research and applications for distributed fiber optic sensing technology [J]. *Acta Optica Sinica*, 2024, 44(41): 11–13.

[ 9 ] 王子恒, 景洪. 分布式光纤声波传感的管道泄漏监测指标分析[J]. *中国仪器仪表*, 2021(8): 61–65.

WANG Z H, JING H. Analysis of pipeline leakage monitoring index based on distributed optical fiber acoustic wave sensing system[J]. *China Instrumentation*, 2021(8): 61–65.

[ 10 ] ZHANG M L, SUN Q Z, WANG Z, et al. A large capacity sensing network with identical weak fiber Bragg gratings multiplexing[J]. *Optics Communications*, 2012, 285(13/14): 3082–3087. DOI: 10.1016/j.optcom.2012.02.100.

[ 11 ] 杜元凯. 基于分布式光纤声波传感的管道流量监测技术研究[D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2023.

DU Y K. Research on pipeline flow monitoring technology based on distributed optical fiber acoustic wave sensing[D]. Jinan:

- Qilu University of Technology, 2023.
- [12] BAO X Y, CHEN L. Recent progress in distributed fiber optic sensors[J]. *Sensors*, 2012, 12(7): 8601–8639.
- [13] 路阳. 准分布式声波传感系统瑞利散射串扰抑制技术[J]. *光学学报*, 2024, 44(1): 451–452.
- LU Y. Reducing crosstalk induced by rayleigh backscattering light-waves in a quasi-distributed acoustic sensing system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2024, 44(1): 451–452.
- [14] 朱坤垚. 光频域反射计研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2024, 61(5): 23–30.
- ZHU K Y. Research progresses of optical frequency domain reflectometer[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2024, 61(5): 23–30.
- [15] AHMED N, ALJUNID S, FADIL A, et al. Hybrid OCDMA/WDM system using complementary detection technique for FTTH access networks [C]. Langkawi: 2011 IEEE Symposium on Industrial Electronics and Applications, 2011.

## (上接第 44 页)

- [17] SHAO B B, LIU Z F, TANG L, et al. The effects of biochar on antibiotic resistance genes (ARGs) removal during different environmental governance processes: A review [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 435: 129067. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2022.129067.
- [18] DU L Q, AHMAD S, LIU L N, et al. A review of antibiotics and antibiotic resistance genes (ARGs) adsorption by biochar and modified biochar in water[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 858: 159815. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.159815.
- [19] LI F, LIU K W, BAO Y P, et al. Molecular level removal of antibiotic resistant bacteria and genes: A review of interfacial chemical in advanced oxidation processes[J]. *Water Research*, 2024, 254: 121373. DOI: 10.1016/j.watres.2024.121373.
- [20] YU X, WANG Z P, LOU Y, et al. Highly efficient elimination performance of graphene/supramolecular porphyrin-based photocatalysis-self-fenton system towards sulfonamide antibiotics, resistant bacteria and resistance genes[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 484: 149552. DOI: 10.1016/j.cej.2024.149552.
- [21] ZHOU H, XU X, WANG J Y, et al. Degradation of sulfamethoxazole and antibiotic resistance genes from surface water in the photocatalyst-loading bionic ecosystems[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 895: 165045. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.165045.
- [22] NI X Y, HOU X, MA D F, et al. Simultaneous removal of antibiotics and antibiotic resistant genes using a CeO<sub>2</sub>@CNT electrochemical membrane-NaClO system [J]. *Chemosphere*, 2023, 338: 139457. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2023.139457.
- [23] FANG H, LIU Y H, QIU P X, et al. Simultaneous removal of antibiotic resistant bacteria and antibiotic resistance genes by molybdenum carbide assisted electrochemical disinfection [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 432: 128733. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2022.128733.
- [24] WANG Y, LU Y W, LIU H. Nanowire electroporation-induced cell pores on antibiotic-resistant bacteria to promote chlorine permeation for eliminating intracellular antibiotic resistance genes [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 479: 147801. DOI: 10.1016/j.cej.2023.147801.
- [25] LI J, FENG C M, XIN B. Study on the effect of a tea polyphenol disinfectant on antibiotic resistance genes in drinking water[J]. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 2022, 8(12): 3101–3112.
- [26] FENG C M, YU H Y, WANG T, et al. Effect of ozone-tea polyphenols as a drinking water disinfection process on antibiotic resistance genes [J]. *Water Infrastructure, Ecosystems and Society*, 2022, 71(4): 507–517.
- [27] PANT A, JAIN R, AHAMMAD S Z, et al. Removal of antibiotic resistance genes from wastewater using diethylaminoethyl cellulose as a promising adsorbent [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2023, 55: 104109. DOI: 10.1016/j.jwpe.2023.104109.
- [28] LIU Z, YU X, ZHOU Z, et al. 3D ZnO/activated carbon alginate beads for the removal of antibiotic-resistant bacteria and antibiotic resistance genes[J]. *Polymers*, 2023, 15(9): 2215. DOI: 10.3390/polym15092215.
- [29] 张国芳. 饮用水处理工艺对抗生素抗性基因的去除现状 [J]. *净水技术*, 2020, 39(s1): 1–6, 105.
- ZHANG G F. Removal of antibiotic resistance genes by drinking water treatment processes [J]. *Water Purification Technology*, 2020, 39(s1): 1–6, 105.