

doi:10.13756/j.gtxyj.2026.240224.

光传感与检测技术

朱磊,张丁丁,刘成勇,等.基于DAS传感的充填管道堵塞识别影响因素研究[J].光通信研究,2026(4):233-241.

Zhu L, Zhang D D, Liu C Y, et al. Research on the Influencing Factors of Blockage Identification in Filling Pipeline based on DAS Sensing[J]. Study on Optical Communications, 2026(4):233-241.

基于 DAS 传感的充填管道堵塞识别影响因素研究

朱磊¹,张丁丁^{2,3},刘成勇¹,吴玉意^{1,4},古文哲¹,秋丰岐²,柴敬^{2,3},马晨阳²

(1. 中煤能源研究院有限责任公司,西安 710054; 2. 西安科技大学能源学院,西安 710054; 3. 西安科技大学教育部西部矿井开采与灾害防治重点实验室,西安 710054; 4. 中国矿业大学矿业工程学院,江苏徐州 221116)

摘要:【目的】为了解决煤矸石浆体充填管道堵塞识别难题,文章提出了一种基于分布式声波传感(DAS)的管道堵塞识别方法,并分析了影响识别精度的因素。【方法】文章基于流致振动及 DAS 监测的光纤振动传感理论建立了充填管道堵塞试验平台,以阀门模拟堵塞位置,分析了有无堵塞时堵塞位置前后振幅的变化情况,并确定了最佳光纤粘贴角度,通过敲击法和水浴加热法确定了基于 DAS 监测的管道堵塞定位误差为 0.6 m。【结果】试验结果表明,该方法能够有效识别充填管道的堵塞位置,在堵塞发生时,光纤布设角度为 60°时具有最佳效果,为工程现场提供了一定的理论基础。【结论】文章所提方法可以实现管道堵塞位置的识别,通过对管道堵塞识别影响因素的分析,给出了合理的光纤布设方式及角度,为矸石浆体充填管道安全运行提供了新的监测手段与技术支持,具有一定的实用价值及推广意义。

关键词:充填管道;堵塞;识别精度;分布式声波传感;振幅降低率

中图分类号: TN929

文献标志码: A

Research on the Influencing Factors of Blockage Identification in Filling Pipeline based on DAS Sensing

ZHU Lei¹, ZHANG Dingding^{2,3}, LIU Chengyong¹, WU Yuyi^{1,4}, GU Wenzhe¹, QIU Fengqi², CHAI Jing^{2,3}, MA Chenyang²

(1. China Coal Energy Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China; 2. Energy College, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 3. Xi'an University of Science and Technology Ministry of Education Key Laboratory of Western Mine Mining and Disaster Prevention, Xi'an 710054, China; 4. School of Mining Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: 【Objective】This study aims to address the challenge of identifying blockages in the coal gangue slurry filling pipeline by proposing a novel method based on Distributed Acoustic Sensing (DAS) and analyzing the factors influencing the accuracy of this identification. 【Methods】Based on the principles of flow-induced vibration and DAS monitoring, a test platform was developed to emulate the blockages in a filling pipeline. By using a valve to simulate blockage locations, we analyzed amplitude changes before and after the simulated blockage, even without physical blockages. Additionally, we determined the optimal angle for adhering to the optical fiber. The positioning error for blockage detection using DAS was quantified at 0.6 m through tapping and water bath heating methodologies. 【Results】The experimental results demonstrate the effective identification of blockage locations within the filling pipeline based on the proposed method. The optimal angle for the optical fiber layout during blockage incidents was determined to be 60°, providing the most effective results and offering a solid theoretical support for practical engineering applications. 【Conclusion】The method presented in this study successfully identifies the blockage locations within the filling pipeline, enabling timely interventions when blockages occur. By analyzing the factors influencing pipeline blockage identification, a reasonable optical fiber layout method and angle are proposed. This provides a new monitoring approach and technical support for the safe operation of gangue slurry filling pipelines, offering practical value and potential for further promotion.

Key words: filling pipeline; blockage; identification accuracy; DAS; amplitude reduction rate

0 引 言

我国“富煤、贫油、少气”的能源禀赋特点造成以煤为主的基本国情在短期内难以改变^[1-2]。大规模

的煤炭开采及加工利用中产生了大量煤矸石固体废弃物,截至 2023 年,我国有煤矸石山 1 600 多座,累计堆存煤矸石 70 亿吨以上,占地 1.5 万公顷。矸石浆体充填可实现矿井固废的原位充填和地面零排

收稿日期:2024-10-31; 修回日期:2024-12-03; 纸质出版日期:2026-08-10

基金项目:陕西省秦创园“科学家+工程师”团队建设资助项目(2023KXJ-144);西安市秦创源“科学家+工程师”团队建设资助项目(23KGDW0027-2022)

作者简介:朱磊(1982—),男,安徽阜阳人。教授级高级工程师,博士,主要研究方向为矿区固废利用及生态修复。

通信作者:吴玉意,高级工程师。E-mail: 994019253@qq.com

© Editorial Office of *Study on Optical Communications*. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

放^[3]。为确保研石浆体输送管道的安全稳定运行,对管道运行状态进行实时的监测至关重要。传统的管道健康监测如应力应变法^[4]、声波法^[5]、超声监测技术^[6]和闭路电视法(Closed Circuit Television, CCTV)^[7]等,存在监测非实时性、定位精度差和容易漏报误报等缺陷^[8]。

分布式光纤声波传感(Distributed Acoustic Sensing, DAS)技术利用光纤作为传感器对外界进行感知测量,通过在光纤中加入微小结构实现对声波信号的实时、分布式和非接触式测量^[9]。吴慧娟等人^[10]利用分布式光纤振动传感技术对水管泄漏进行了室内外试验,实现了孔径为4 mm和泄漏量>11 L/s泄漏孔的定量及定位监测;付士崇^[11]等人基于分布式声波传感技术实现了输气管道泄漏检测,并根据快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)对泄露信号进行了精确定位,定位精度达到0.24 m;Ying^[12]等人通过解调DAS相位反演出油井管道内部流体流动对管壁的冲击信号,实现了0.73~2.48 m³/h范围内的流量测试;赵乃卓^[13]等人利用分布式光纤,通过小波变换对光纤监测到的

$$\Delta\varphi = \frac{\partial\varphi}{\partial x}x + \frac{\partial\varphi}{\partial n}n = \frac{4\pi nx}{\lambda x}\Delta x + \frac{4\pi nx}{\lambda n}\Delta n = \frac{4\pi n\xi L_g}{\lambda x}\Delta x, \quad (1)$$

式中: φ 为背向散射光的相位; x 为散射体的位置; n 为光纤的折射率; λ 为激光脉冲的波长,单位为nm; ξ 为弹光系数; L_g 为标距长度,单位为m; Δx 为散射体位置的变化量; Δn 为弹光效应引起的折射率变化。

由式(1)可知,由振动引起的应变 ϵ 可表示为

$$\epsilon = \frac{\Delta x}{x} = \frac{\lambda\Delta\varphi}{4\pi n\xi L_g}. \quad (2)$$

1.2 基于DAS相位表征的管道堵塞流致振动表征

流体在管道中流动时受管壁限制,只能沿轴向流动。这一流动会与管道内壁相互作用,导致流固耦合现象,流动液体可能演变为湍流,湍流中漩涡的形成与脱落伴随流速和压力的波动,从而对管壁产生影响,导致微弱振动,称为流致振动(Flow-Induced Vibration, FIV)。当流体发展为稳定的湍流后,管道内会出现压力波动,这种压力波动进而引起流速的变化,从而进一步诱发管壁振动。管道内压力波动与流速之间的关系可表示为^[15]

$$P' = \frac{2\rho}{brI^2}u_i(t)v_i(t), \quad (3)$$

式中: P' 为压力波动; ρ 为管内液体密度; b 为管壁厚度; r 为管道内径; I 为管道材料刚度; $u_i(t)$ 为轴向速度; $v_i(t)$ 为纵向速度; t 为时间; i 为空间方向索引。

相位信号进行处理,实现了500 m长石油管道冰堵的监测及定位,定位误差为7.9 m。虽然DAS监测在管道泄漏等领域取得了一定的研究进展,但在浆体充填管道领域相关研究还处于探索阶段,研究成果难以直接用于充填管道堵塞监测。基于此,本文提出了一种基于DAS的管道堵塞识别方法,同时针对其堵塞识别精度影响因素进行了分析,为DAS监测充填管道堵塞的工程应用奠定了一定的理论基础。

1 基于DAS相位变化的管道堵塞测试原理

1.1 基于DAS监测的光纤振动传感理论分析

当光纤受到外界振动、应力和温度等物理参数影响时,光纤的长度、纤芯和折射率会发生改变,进而引起光程差或相位的变化。DAS技术通过对光纤中相位变化进行解调,实现对外界振动的测量。光纤相位变化由外界物理参数改变引起的光纤拉伸和光纤自身弹光效应导致的光纤折射率改变组成,其改变量 $\Delta\varphi$ 可表示为^[14]

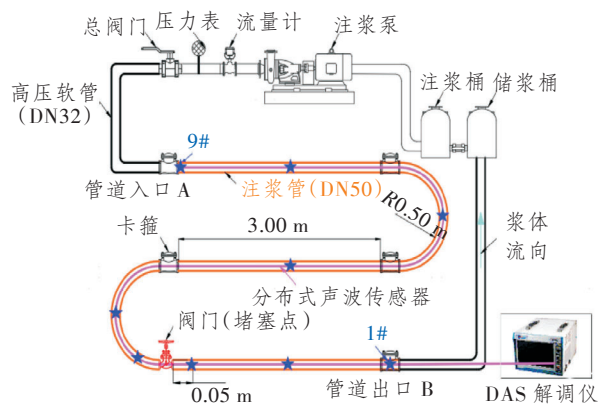
当管道发生堵塞时,其堵塞位置的流速会发生改变,进一步引起该位置产生压力波动导致粘贴在管道上的光纤随之发生振动,通过DAS对光纤相位解调即可实现对管道振动及由管道振动引起的应变变化的表征。

2 基于DAS传感的充填管道堵塞试验研究

2.1 试验测试平台及系统

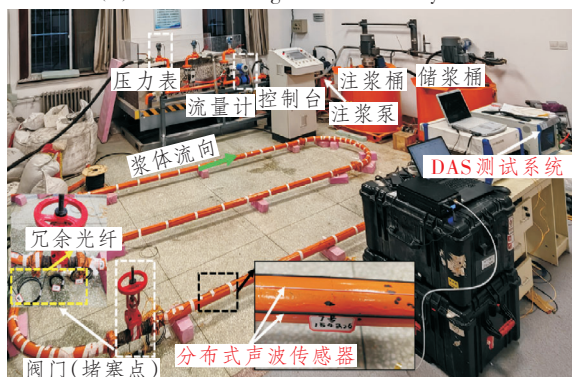
试验测试平台由储浆桶、注浆桶、注浆泵、流量计、压力表、阀门及注浆管路组成。注浆管道共布置15.14 m,其中,注浆钢管为12.14 m,由3根内径为50 mm、长度为3 m的直管及2根直径为1 m的弯管组成,均为耐磨无缝钢管;出水口及排水口各连接1.5 m高压软管。以管道出口B的中心为坐标原点,定义坐标为(0,0,0),管道出口A点为坐标终点,定义坐标为(12.14,0,0)。试验测试系统布置如图1所示。

试验监测系统主要由DAS传感系统组成。DAS传感器沿管道上方轴向中心线布设,共布设30.54 m,管道上布设14.04 m,管道出口B与DAS设备端口预留16.50 m跳线。在阀门与卡箍处分



(a) 测试系统示意图

(a) Schematic diagram of the test system



(b) 测试系统实物图

(b) Physical photograph of the test system

图 1 试验测试系统布局图

Figure 1 Layout diagram of experimental testing system
别冗余 1.0 和 0.3 m 光纤;同时在管道上布置 9 个标记点,以管道出口 B 为 1#,管道入口 A 为 9#。

2.2 DAS 定位精度分析

以 1#(管道出口 B)、3#(堵塞点后)、4#(堵塞点前)和 9#(管道入口 A)为例,分别进行敲击及局

部水浴加热,采用武汉光谷互连型号为 MS-DAS2000 的 DAS 监测系统及日本 NEUBRUX 公司的布里渊光时域分析仪(Brillouin Optical Time Domain Analysis,BOTDA)进行测试,试验过程及测试设备如图 2 所示。



(a) 敲击管道

(a) Tap the pipeline

(b) 水浴加热

(b) Water bath heating



(c) MS-DAS 系统

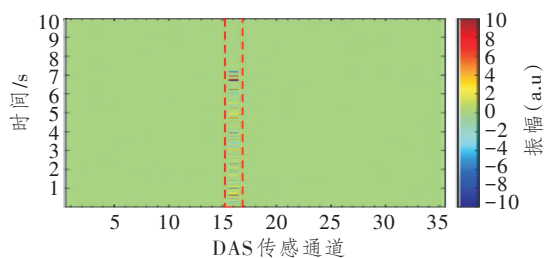
(c) MS-DAS system

(d) BOTDA

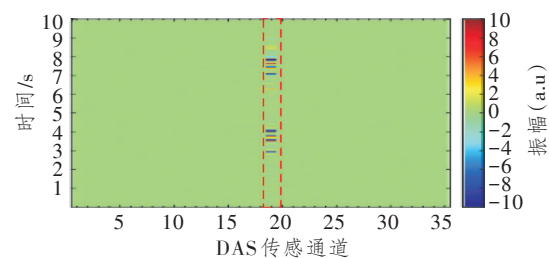
图 2 定位测试及设备

Figure 2 Positioning test and equipment

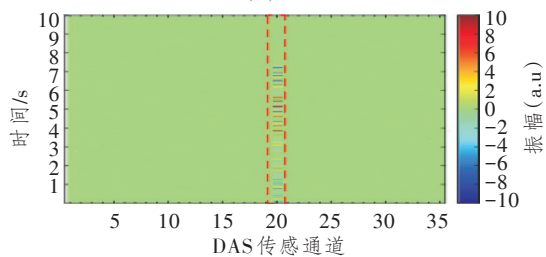
MS-DAS 监测系统空间分辨率设定为 1 m,采样频率选择为 1 kHz,10 s 保存一组数据。NBX-6055 光纳仪(BOTDA)空间分辨率设定为 5 cm,采样间隔设置为 1 cm,平均化次数选择 2^{18} 。各标记点 DAS 定位结果如图 3 所示,由 DAS 定位可知,1#、3#、4#和 9#标记点分别对应第 16、19、20 和 30 通道。



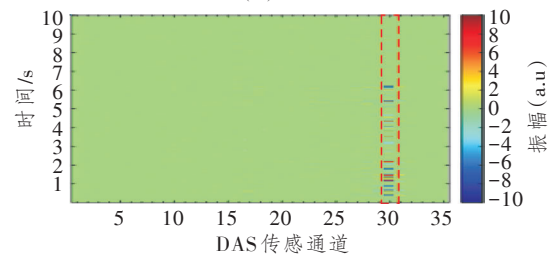
(a) 1#



(b) 3#



(c) 4#



(d) 9#

图 3 DAS 标记点定位结果

Figure 3 Localization results of DAS marking point

BOTDA 空间定位结果如图 4 所示。其中，20.257 和 30.811 m 位置处。1#、3#、4#和 9#标记点分别对应 16.811、19.879、

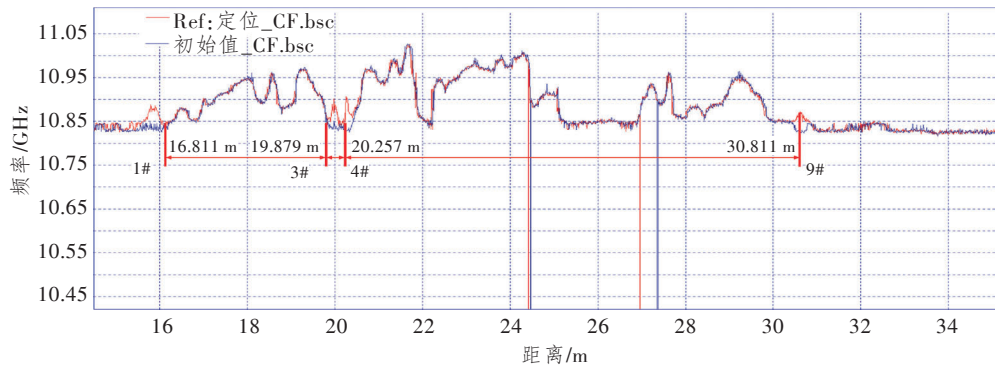


图 4 BOTDA

设置 DAS 空间分辨率为 1 m,即每通道间距为 1 m,故可认为测试结果各道所对应的通道数值大小即为布设在管道上的光纤长度。分析 DAS 定位精度及误差如表 1 所示。

表 1 定位误差表

Table 1 Table of positioning error

标记点编号	目标点定位测量值		标记点光纤长度/m	定位误差绝对值/m	
	DAS 定位/m	BOTDA 定位/m		与 BOTDA	与标记点
1#	16	16.811	16.50	0.811	0.50
3#	19	19.879	19.30	0.879	0.30
4#	20	20.257	20.70	0.257	0.70
9#	30	30.811	30.54	0.811	0.54

由表可知,在选择的 4 个标记点进行定位,DAS 的定位误差与 BOTDA 相比分别为 0.811、0.879、0.257 和 0.811 m,平均定位误差为 0.690 m; DAS 的定位误差与标记点相比分别为 0.50、0.30、0.70 和 0.54 m,平均定位误差为 0.51 m。综合水浴加热定位及标记点定位,DAS 定位精度为 0.60 m。

2.3 基于 DAS 的充填管道堵塞识别

为判断 DAS 监测信号对堵塞位置的精确识别,在阀门全开及阀门关闭 1/2 状态下进行试验。提取两种状态下通道 17~22 在 10 s 内的时域强度变化曲线,如图 5 所示,时域强度变化由其所在通道的振幅大小反映。在阀门全开状态下,即无堵塞点产生时,各传感通道振幅基本保持不变;当阀门关闭

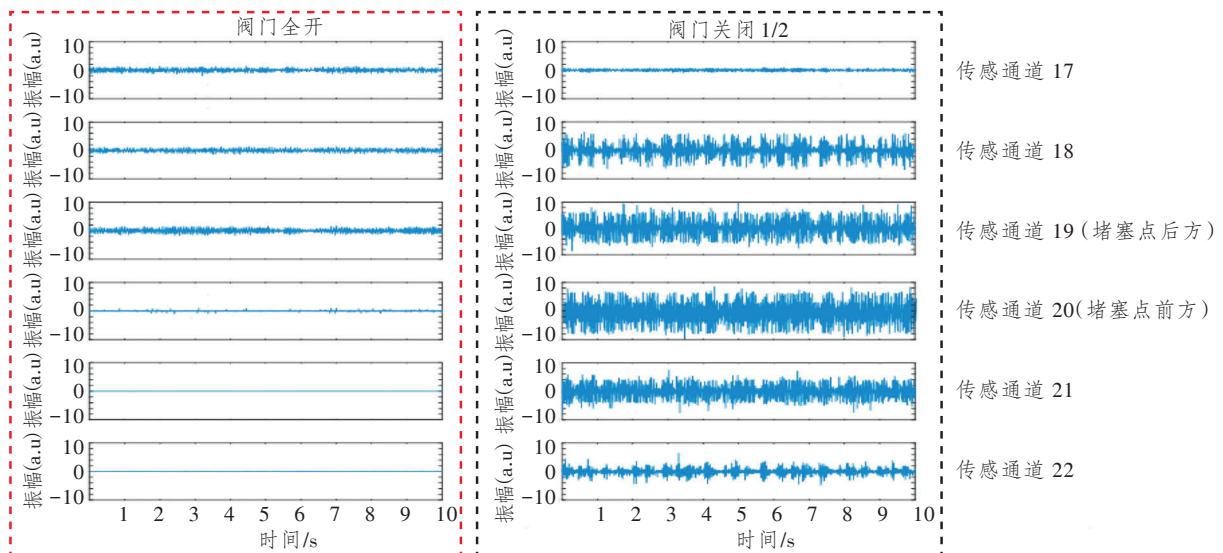


图 5 堵塞点附近 DAS 传感通道时域强度变化曲线

Figure 5 Time domain intensity variation curve of DAS sensing channel near the blockage point

1/2 时,通道 18~22 振幅明显增大,相比于远离堵塞点的通道 17 及 22,通道 18~21 变化尤为明显,且堵塞点前方振幅变化明显大于堵塞点后方,堵塞点前方传感通道 21 振幅由 ± 0.1 增大至 ± 6.0 a. u.,堵塞点后方传感通道 18 振幅由 ± 1.5 增大至 ± 6.0 a. u.。由于管道上产生堵塞,其堵塞点前方流量减小,流速增大,以堵塞点为界,振幅呈现先增大后减小的变化趋势。基于此,利用 DAS 监测信号的振幅变化大小可以准确识别出管道堵塞位置。

3 管道堵塞识别精度影响因素研究

在进行试验时,分布式声波传感器直接粘贴于管道表面,使其与管道振动协调变形。当分布式光纤传感器粘贴于管道后,管道真实振动与光纤感测

到的振动信号存在传递系数。基于光纤应变传递机制,影响光纤与被测基体应变传递率的主要因素为光纤粘贴长度、胶体宽度及厚度、胶体的剪贴模量及光纤自身半径和弹性模量^[16]。对于同种类型的分布式光纤,其半径及弹性模量差异忽略不计。同时,分布式光纤布设在管道上时,可通过改变光纤粘贴角度来改变被测光纤长度。基于此,本文仅开展不同光纤粘贴角度及选择不同胶结剂时,DAS 对管道堵塞识别影响程度的研究。

3.1 光纤粘贴角度

为研究不同光纤粘贴角度对 DAS 监测系统空间定位精度的影响,使用环氧树脂分别对光纤水平(0°)及螺旋 30° 、 45° 、 60° 和 80° 进行粘贴,如图 6 所示。



图 6 光纤不同缠绕角度

Figure 6 Different winding angles of optical fibers

图 7 所示为不同光纤粘贴角度下阀门前方 4#标识点的振幅变化情况。由图可知,在光纤粘贴角度由水平(0°)粘贴、螺旋 80° 、 60° 、 45° 和 30° 减小的过程中,4#标识点位置处振幅分别分布在

± 4.0 、 ± 3.8 、 ± 3.0 、 ± 1.0 和 ± 0.8 a. u.。随着光纤粘贴角度的减小,布设在管道上的光纤长度减小,由于空间分辨率的限定,可监测的通道数减少,故其可识别振幅范围也在减小。

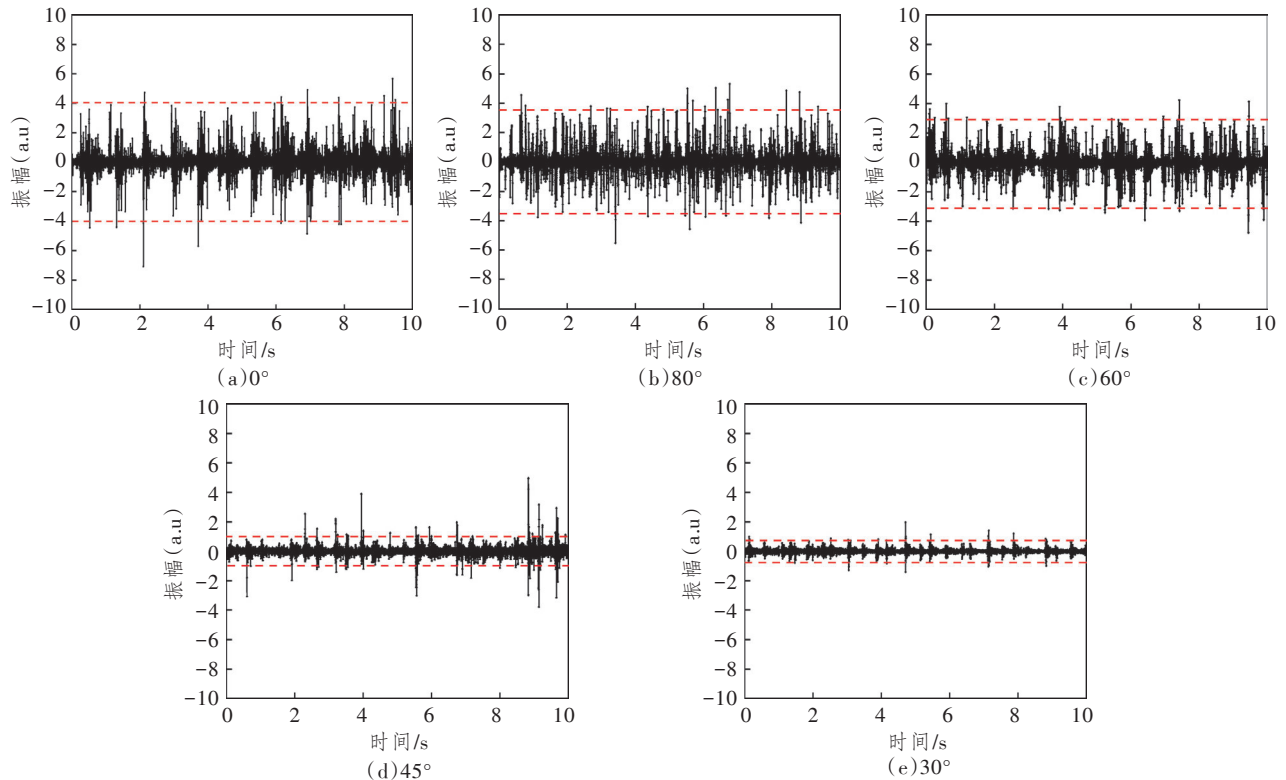


图 7 不同光纤粘贴角度下 4#标记点振幅变化情况

Figure 7 Amplitude variation of point 4# under different fiber winding angles

将管道堵塞点前后方的标记点4#和3#进行组合,判别不同粘贴角度下堵塞点位置识别特征,如图8所示。图中,0~10和10~20 s分别为4#和3#标识点在同时间段内的振幅变化。当光纤水平(0°)粘贴于管道上时,堵塞点前后方位置振幅由 ± 4.0 降

低至 ± 3.5 a.u,降低率为12.5%,随着光纤粘贴角度由80°、60°、45°减小至30°,管道堵塞点前后方的振幅分别由 ± 3.8 、 ± 3.0 、 ± 1.0 、 ± 0.8 降低至 ± 3.0 、 ± 1.9 、 ± 0.7 、 ± 0.6 a.u,降低率分别为21.05%、36.67%、30.00%和25.00%。

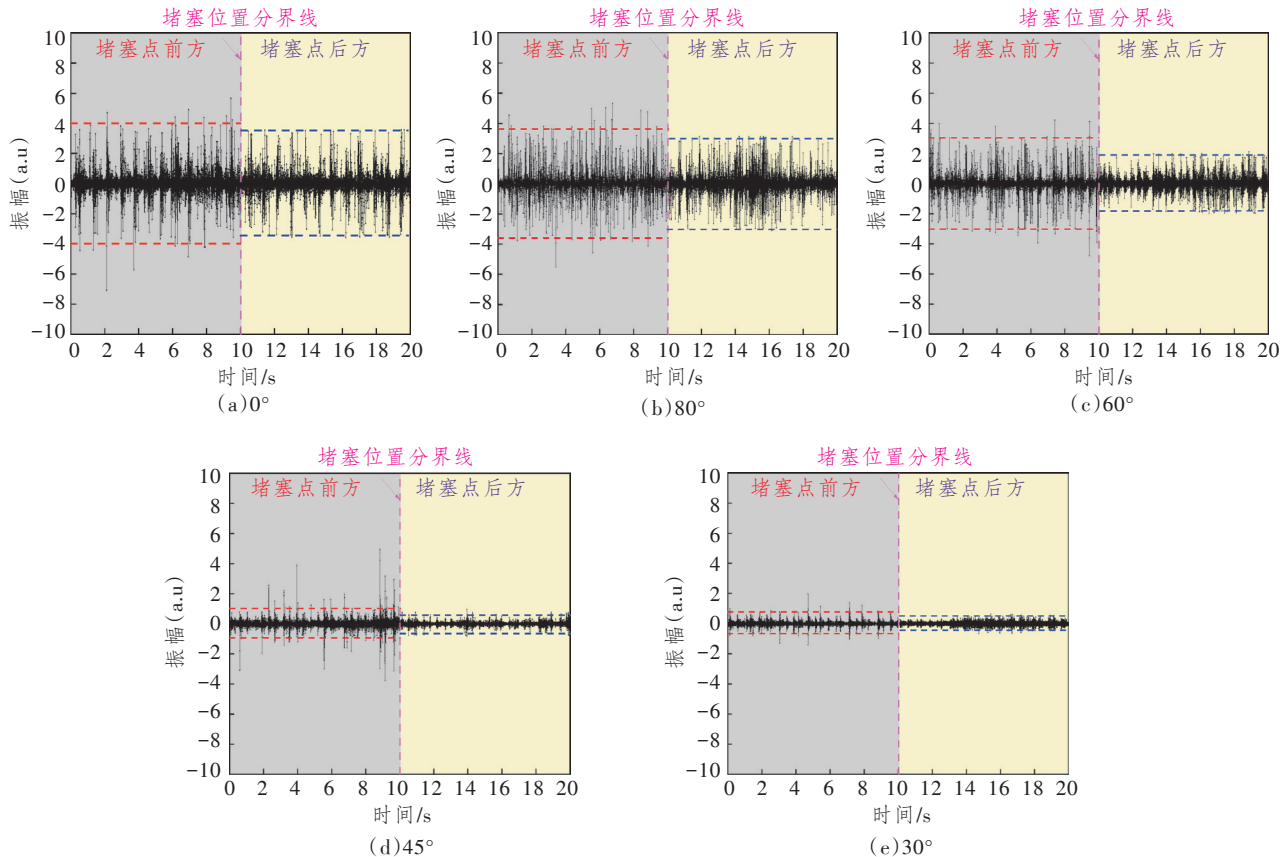


图8 不同光纤粘贴角度堵塞点前后振幅变化

Figure 8 Amplitude changes before and after blockage points at different fiber winding angles

取上述不同光纤粘贴角度下振幅降低率关系变化如图9所示,由图可知,随着光纤粘贴角度的增大,振幅降低率并非一直增大,而是先增大后减小,

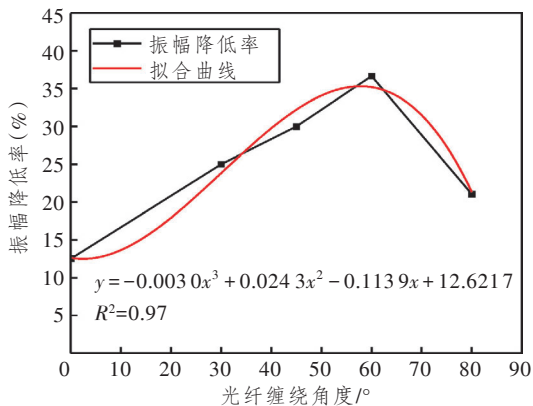
对其进行拟合后得到的拟合函数为 $y = -0.0030x^3 + 0.0243x^2 - 0.1139x + 12.6217$,对其在 $x=0\sim 90^\circ$ 时求最大值,得到 $x=57.75^\circ$ 时,得到振幅降低率最大为35.32%。结合试验及工程现场光纤布设,当光纤粘贴角度为60°时即可满足得到最大的振幅降低率,实现堵塞点的快速定位,同时便于传感器布设。

3.2 光纤耦合方式

为探究不同胶结剂耦合方式下DAS监测系统的识别精度,如图10所示,在管道上分别用3种不同胶结方式进行螺旋60°布设,在注浆泵开启阀门关闭4圈时开展试验。

3种粘贴方式的力学性能参数如表2所示。

以阀门前方4#标识点振幅变化测试结果为例,测试结果如图11所示。当改变光纤粘贴方式后,阀门前方位置4#标记点处振幅明显增大。随着不同耦合方式的改变,即光纤与管道的耦合程度增大时,



注: R^2 为拟合曲线拟合优度。

图9 不同光纤缠绕角度振幅降低率

Figure 9 Amplitude reduction rate at different fiber winding angles



图 10 光纤不同胶结方式

Figure 10 Different bonding methods for optical fibers

表 2 3 种不同粘贴方式的力学性能参数

Table 2 Mechanical performance parameters of four different pasting methods

粘贴方式	黏度/ $\text{mPa}\cdot\text{s}$	剪切模量/ GPa	抗剪强度/ MPa
纸胶带	10~50	0.1~1.0	1~3
电工胶带	40~100	0.5~2.0	3~6
环氧树脂	3 000~6 000	1.0~4.0	10~30

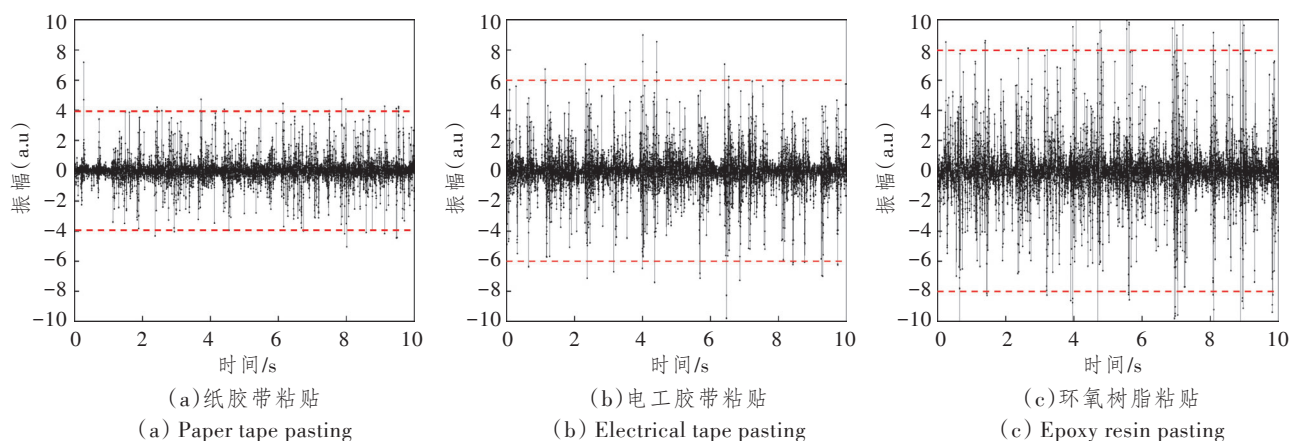


图 11 光纤不同胶结方式下 4#标记点振幅变化

Figure 11 Amplitude variation of marker point 4 # under different bonding methods of optical fibers

阀门前方位置振幅变化范围由 ± 3 逐渐增加至 ± 8 a. u., 增加了 1.67 倍。

选择阀门前后位置 4#和 3#标记点位置分析不同光纤耦合方式下,堵塞点位置识别情况,如图 12 所示。随着光纤与管道耦合方式的改变,在堵塞位

置分界线处的振幅辨识度逐渐增大。纸胶带粘贴、电工胶带粘贴及环氧树脂粘贴的分布式声波传感器振幅由管道前方的 ± 4 、 ± 6 和 ± 8 分别降低至 ± 2.7 、 ± 3.8 和 ± 4.0 a. u.。降低率分别为 48.15%、57.90% 和 100%。

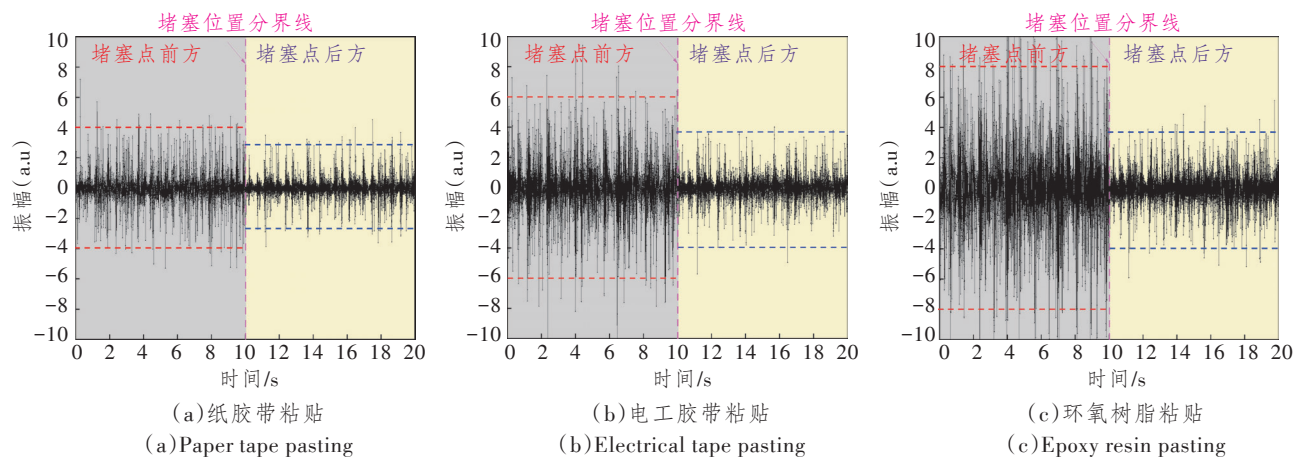


图 12 光纤不同胶结方式下堵塞点前后振幅变化

Figure 12 Amplitude changes before and after blockage point under different bonding methods of optical fiber

光纤在不同胶结方式下振幅降低率关系变化如图 13 所示。在本文选取的 3 种胶结方式下,随着胶结体剪切模量的增大,DAS 所感测的振幅降低率也

随之增大,当振幅降低率越大时,可极大降低对后续区分管道是否堵塞及其堵塞点定位的难度。基于此,在选择胶结体时,应选择剪切模量较大的胶结剂。

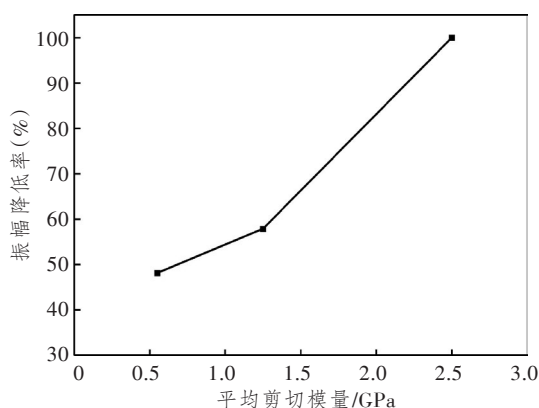


图13 不同胶结方式振幅降低率

Figure 13 Amplitude reduction rate of different bonding methods

4 结束语

针对充填管道堵塞识别难度大的问题,本文提出了一种基于DAS的管道堵塞位置监测方法,通过搭建充填管道堵塞试验平台,验证了监测方法的可行性及有效性,确定了DAS监测管道堵塞定位误差为0.6 m,光纤以螺旋粘贴60°时可更好地对堵塞位置进行识别,同时在粘贴光纤时,应选择剪切模量较大的胶结剂,可提高管道堵塞信号的识别程度。研究成果为管道输送堵塞光纤监测提供了新的技术支持,具有一定的实用价值及推广意义。

参考文献:

- [1] 王双明,刘浪,朱梦博,等. “双碳”目标下煤炭绿色低碳发展新思路[J]. 煤炭学报, 2024, 49(1): 152–171.
Wang S M, Liu L, Zhu M B, et al. New Way for Green and Low - Carbon Development of Coal Industry under the Target of “Daul-Carbon”[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1): 152–171.
- [2] 袁亮. 煤炭工业碳中和发展战略构想[J]. 中国工程科学, 2023, 25(5): 103–110.
Yuan L. Strategic Conception of Carbon Neutralization in Coal Industry[J]. Strategic Study of CAE, 2023, 25(5): 103–110.
- [3] 朱磊,古文哲,宋天奇,等. 采空区煤矸石浆体充填技术研究进展与展望[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(2): 143–154.
Zhu L, Gu W Z, Song T Q, et al. Research Progress and Prospect of Coal Gangue Slurry Backfilling Technology in Goaf[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(2): 143–154.
- [4] Zhao C, He B, Wang Y, et al. Experimental Study on the Diagnosis of Operation State of Gas Extraction Pipeline based on Pressure Gradient Method [J]. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 2025, 47(1): 11555–11568.
- [5] 朱雪峰,冯早,黄国勇,等. 基于声学特征的埋地管道堵塞故障的聚类识别方法[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2018, 40(4): 665–675.
Zhu X F, Feng Z, Huang G Y, et al. A Clustering Method for Underground Drainage Pipeline Blockage Identification based on Acoustic Features[J]. Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition), 2018, 40(4): 665–675.
- [6] 路浩,朱政,邢立伟. 高钢级管道残余应力超声波法检测及小孔法验证[J]. 油气储运, 2021, 40(5): 533–538.
Lu H, Zhu Z, Xing L W. Residual Stress Measurement of High-Grade Steel Pipeline via Ultrasonic Method and Verification by Small Hole Method[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2021, 40(5): 533–538.
- [7] Cheng J C P, Wang M. Automated Detection of Sewer Pipe Defects in Closed-Circuit Television Images Using Deep Learning Techniques [J]. Automation in Construction, 2018, 95: 155–171.
- [8] 吴同,邓忠华,沈亮,等. 长距离输油管道泄漏监测技术研究进展[J]. 油气储运, 2023, 42(3): 259–275.
Wu T, Deng Z H, Shen L, et al. Research Progress of Long-Distance Oil Pipeline Leakage Monitoring Technology [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2023, 42(3): 259–275.
- [9] 张旭苹,张益昕,王亮,等. 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(1): 0106001.
Zhang X P, Zhang Y X, Wang L, et al. Current Status and Future of Research and Applications for Distributed Fiber Optic Sensing Technology[J]. Acta Optica Sinica, 2024, 44(1): 0106001.
- [10] 吴慧娟,陈忠权,吕立冬,等. 基于DOFVS的新型压力输水管道泄漏在线监测方法[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(1): 159–165.
Wu H J, Chen Z Q, Lü L D, et al. Novel Pressurized Water Pipe Leak Monitoring Method based on the Distributed Optical Fiber Vibration Sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(1): 159–165.
- [11] 付士崇,张丹,罗群. 基于分布式声波传感的输气管道泄漏识别与定位方法[J]. 激光与光电子学进展, 2025, 62(3): 0306003.
Fu S C, Zhang D, Luo Q. Leakage Identification and

- Localization Method for Gas Transmission Pipeline based on Distributed Acoustic Sensing[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2025, 62(3): 0306003.
- [12] Shang Y, Wang C, Zhang Y, et al. Non - Intrusive Pipeline Flow Detection based on Distributed Fiber Turbulent Vibration Sensing[J]. Sensors, 2022, 22(11): 4044.
- [13] 赵乃卓, 郭光朝. 检测石油管道冰堵与定位的光纤传感器的研究[J]. 传感器与微系统, 2010, 29(9): 30—32.
- Zhao N Z, Guo G C. Study on Optical Fiber Sensor for Detection and Positioning of Oil Pipeline Ice - Blocking [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2010, 29(9): 30—32.
- [14] 王辰, 刘庆文, 陈典, 等. 基于分布式光纤声波传感的管道泄漏监测 [J]. 光学学报, 2019, 39(10): 1006005.
- Wang C, Liu Q W, Chen D, et al. Monitoring Pipeline Leakage Using Fiber-Optic Distributed Acoustic Sensor[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(10): 1006005.
- [15] Li T, Fan C, Li H, et al. Nonintrusive Distributed Flow Rate Sensing System based on Flow - Induced Vibrations Detection [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 7001808.
- [16] Lei W, Chai J, Zhang D, et al. Experimental Study on Overburden Deformation Evolution under Mining Effect based on Fiber Bragg Grating Sensing Technology[J]. Journal of Sensors, 2020, 2020(1): 8850547.