

引用本文:张翀,詹洋,张志伟,等. 基于 F-P 腔的地浸采铀水位实时监测传感器研制[J]. 光通信技术,2025,49(1):71-77.

基于 F-P 腔的地浸采铀水位实时监测传感器研制

张翀¹,詹洋²,张志伟²,贾皓¹,王译那²,郭迎庆²,卢泓方³

(1.核工业北京化工冶金研究院,北京 101149;2.南京林业大学 机械电子工程学院,南京 210037;

3.东南大学 中国-巴基斯坦重大基础设施智慧防灾“一带一路”联合实验室,南京 211189)

摘要:为了实时监控我国地浸铀矿山井场群井水位,设计了一种基于法布里-珀罗腔(F-P)腔的地浸采铀水位实时监测传感器。该传感器的腔长由电动精密位移平台和定制夹具进行控制,传感头由硅片、基座、陶瓷插芯经胶粘耦合工艺加工而成,并在内蒙古某地浸采铀矿山进行了实地验证实验。实验结果表明,该传感器的压力测量范围为 0~1.5 MPa,压力灵敏度为 1.68 $\mu\text{m}/\text{MPa}$,线性度为 0.998,实现了地浸生产井水位参数在线监测。

关键词:水位实时监测;光纤传感器;水位传感器;法布里-珀罗;地浸采铀

中图分类号:TP212 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2025)01-0071-07

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2025.01.012

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Development of real-time monitoring sensor for in-situ leaching uranium mining water levels based on F-P cavity

ZHANG Chong¹, ZHAN Yang², ZHANG Zhiwei²,

JIA Hao¹, WANG Yi'na², GUO Yingqing², LU Hongfang³

(1. Beijing Research Institute of Chemical Metallurgy of Nuclear Industry, Beijing 101149, China; 2. College of

Mechanical and Electronic Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 3. China-Pakistan Belt

and Road Joint Laboratory on Smart Disaster Prevention of Major Infrastructures, Southeast University, Nanjing 211189, China)

Abstract: To monitor the water level of the well field in the in-situ leaching uranium mine in real time, a real-time monitoring sensor for the water level of in-situ leaching uranium mining based on Fabry-Perot(F-P) cavity is designed. The cavity length of the sensor is controlled by an electric precision displacement platform and a custom fixture. The sensing head is fabricated by bonding and coupling silicon wafers, bases, and ceramic ferrules. Field verification tests are conducted in a certain in-situ leaching uranium mine in Inner Mongolia. The results indicate that the sensor's pressure measurement range is 0 to 1.5 MPa, with a pressure sensitivity of 1.68 $\mu\text{m}/\text{MPa}$ and linearity of 0.998, achieving online monitoring of water level parameters in production wells.

Key words: real-time water level monitoring, fiber optic sensor, water level sensor, Fabry-Perot, in-situ leaching uranium mining

0 引言

在地浸采铀实际生产中,涉及到水位、流量、压力、涌水量、渗流速度等水文参数,其中生产井的水位会

收稿日期:2024-10-22。

基金项目:中核集团青年英才项目([2022]379)资助;北京市通州区科技计划项目(JCQN2023016)资助。

作者简介:张翀(1988—),男,博士,高级工程师,主要从事铀矿采冶工艺及专用装备研发工作。主持了中核集团全产业链科研攻关项目等课题 5 项,并获得了包括国防科技进步二等奖在内的 10 项科技奖励和 4 项人才称号。以第一作者身份发表论文 11 篇,获专利授权 30 余项,并研发了专用型号设备 3 款。



随着抽注液量的不同而实时变化,且它直接影响浸出液的循环效率和铀矿溶解过程的稳定性,但目前在役地浸矿山井场可获取的实时水力参数十分有限,且维度单一;同时,由于单个地浸矿山中通常有数百口生产井同时运作,行业一直面临着缺乏高精度、低成本且布设便捷的群井水位数据获取技术的难题。地浸采铀的水位测量环境具有水位深、液体成分复杂、强电磁和振动干扰等特性,这使得传统液位计在这种环境下普遍表现出不适应性,并且难以实现群井数据的获取。

光纤法布里-珀罗(F-P)传感器^[1-2]凭借其体积小、重量轻、抗电磁干扰能力强、动态响应高、线性度好等

张翀,詹洋,张志伟,等:基于F-P腔的地浸采铀水位实时监测传感器研制

特点,具有低成本、高灵敏度、非导电性以及适应恶劣环境等优点,在地浸矿山井场群井水位实时水力参数获取方面展现出巨大潜力,是解决以上问题的有效工具。近年来,国内外许多学者对F-P传感器的制作工艺和材料开展了广泛研究。张韬杰等人^[3]通过微机电系统(MEMS)技术加工硅-空气-Pyrex#7740玻璃的键合结构研制出F-P压力传感器。ZHANG Y N等人^[4]通过飞秒激光对敏感膜片进行减薄和粗化,使传感器不受环境折射率变化的影响,但该传感器在高温环境中测量压力具有低温依赖性。张慧君^[5]通过CO₂激光器熔接准直管与敏感结构以及准直管与光纤2个部位,实现了传感器在高温信号下的稳定传输。与此同时,蓝宝石、聚合物、石墨烯等新型材料的不断研发,也为F-P传感器的性能提升做出了重要贡献。HAI Z Y等人^[6]设计了一种蓝宝石夹层结构的压力传感器,借助蓝宝石的高稳定性和高温环境适应性的优点,可适用于航空航天等极端环境下的压力测量。赵云楠等人^[7]通过在玻璃管端口涂覆琼脂薄膜,再将光纤插入玻璃管形成F-P结构。NI W J等人^[8]通过将石墨烯薄膜作为敏感元件,与光纤端面构成喇叭状的腔体,可以在空气和水下进行声压测量。尽管目前F-P传感器制作工艺显著提高,材料科学高速发展,但仍存在一些问题,如加工设备昂贵、加工工艺复杂、传感器使用环境受限、稳定性差以及使用寿命不佳等,尤其是针对地浸采铀特定环境下的光纤F-P水位传感器如何适应深井复杂液体环境、应对强振动环境以及实现高精度测量等问题仍需进一步探究。

针对地浸采铀的应用背景,本文设计一种基于F-P腔的地浸采铀水位实时监测传感器(下文简称光纤F-P腔水位传感器)。

1 光纤F-P腔水位传感原理

光纤F-P腔水位传感器是一种具有高灵敏度的光纤压力传感器。国内外学者根据对液位测量的不同要求,提出并研制了多种原理和结构不同的光纤液位传感器。依据不同的物理参数转换方法,可将用于光学领域中液位测量的传感器分为2类:一类是将液位变化转化为液体内部压强变化的光纤传感器;另一类是将液位变化转化为光纤折射率变化的传感器。采用第二类原理所制作的传感器易受光源、液位波动、液体密度和粘度等因素的影响,导致其动态范围小,测量精度不高。因此,本文采用第一类光纤液位检测方式,即通过监测液位引起的压强变化来进行测量,以

确保更高的稳定性和准确性。

光纤F-P腔水位传感器通常由一个压力敏感的硅膜片和一根光纤组成。这种传感器利用膜片直接感受外界压力的变化,当硅膜片受到压力作用时会发生形变,从而改变传感器内部F-P腔的长度。这一变化会引起反射光谱的变化,通过分析这些光谱变化,可以将水位信号转换为光谱信号,进而实现水位检测。光纤F-P腔水位传感器,其结构示意图如图1所示。

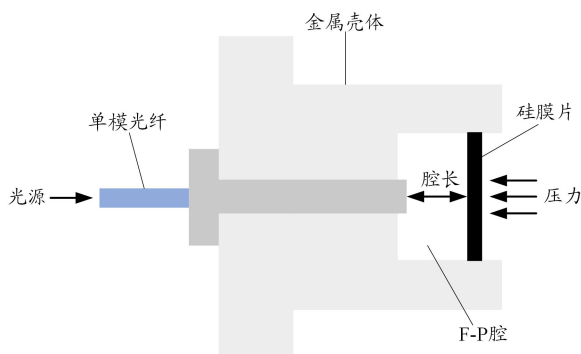


图1 光纤F-P腔传感器结构示意图

图1中,光纤通过陶瓷插芯垂直固定在金属外壳的一端,光纤的末端与硅膜片的内表面共同形成了F-P腔的2个反射面。激光通过传导光纤进入F-P腔,并在硅膜片的内表面上反射,经耦合后回到传导光纤中^[9-11]。当液体施加压力于硅膜片上时,膜片产生形变,导致F-P腔的腔长发生变化,这会使得干涉信号的光谱特征也随之改变。通过解调技术分析这些光谱信息,可以精确地测量出腔长的变化,从而解读出对应的压力值和水位信息。

根据弹性力学原理,在小挠度弹性形变时,硅膜片受到均压后,变形方程如式(1)所示。

$$\frac{P(a^2 - r^2)^2}{EL^4} = \frac{16y}{3(1 - \mu^2)L} \quad (1)$$

其中, P 为膜片上所承受横向压力, a 为膜片的有效半径, r 为膜片上任意一点的形变位置到膜片中心的距离, y 为腔长, L 为膜片的厚度, μ 和 E 分别为材料的泊松比和杨氏模量。

膜片在外界压力作用下形变情况如式(2)所示。

$$y = \frac{3(1 - \mu^2)P(a^2 - r^2)^2}{16EL^3} \quad (2)$$

膜片的中心位置($r=0$)的形变量最大时,则腔长变化 Δy 与压力变化 Δp 关系如式(3)所示。

$$\Delta y = \frac{3(1 - \mu^2)a^4}{16EL^3} \Delta p \quad (3)$$

若知原始腔长为 h , 则当前腔长 h_c 可表示为

$$h_c = h - \Delta y \quad (4)$$

当 F-P 腔的 2 个界面处无吸收损耗时, 设 I_{i1} 为入射光强, 反射光强 (输出光强) I_{o1} 的表达式^[12]如式 (5) 所示。

$$I_{o1} = I_{i1} \frac{R_1 + R_2 + 2\sqrt{R_1 R_2} \cos \phi}{1 + R_1 R_2 + 2\sqrt{R_1 R_2} \cos \phi} \quad (5)$$

其中, R_1 、 R_2 为两界面的反射率, λ 为入射光波长, n 为 F-P 腔内介质的折射率, β 为光线在腔体内的传播角度。 ϕ 为相邻光束的相位差, $\phi = \frac{4\pi}{\lambda} nh \cos \beta$ 。

由式 (4)~式 (5) 可得, 输出光强 I_{o1} 与当前腔长 h_c 之间存在余弦关系, 周期为 $\lambda/2$, 求解出弹性膜片变化量即为腔长变化量 Δy , 每发生变化 $\lambda/2$, 输出光强 I_{o1} 变化一个周期 (一个条纹)。

因此, 通过条纹计数解调, 可以将光谱信号转换为对应的水位高度信息。本文采用式 (6) 可以建立液体内部压力与液位深度之间的关系。结合式 (4) 和式 (6), 可以标定 F-P 腔腔长变化与水位深度之间的线性关系。因此, 当前腔长 h_c 变化可以准确地转换为水位深度 z 。

$$P = \rho g z \quad (6)$$

其中, g 为重力加速度, ρ 为液体密度。

2 传感器的设计与制作

本文提出的光纤 F-P 腔传感器的制作流程主要分为三部分: 结构设计、光纤制备与传感器封装。

2.1 结构设计

本文使用 SolidWorks 软件对传感器的结构进行了设计, 其剖视图和三维结构图分别如图 2、图 3 所示。传感器腔头分为腔头基座和腔头防护罩两部分, 均采用 316 不锈钢材料, 以确保传感器具有优良的耐

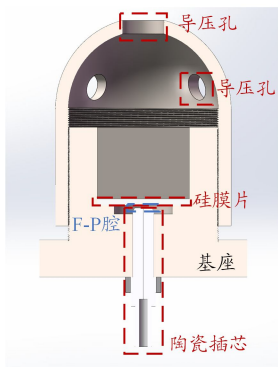


图2 传感器结构剖视图

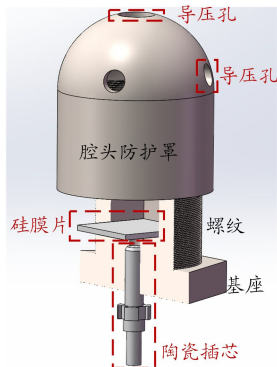


图3 传感器三维结构图

磨、耐腐蚀和抗水压性能, 从而延长其使用寿命。

1) 腔头防护罩设计。腔头防护罩设计有 5 个圆形导压孔, 在检测过程中起到引流和导压的作用, 确保压力信号能够准确传递到传感器内部。

2) 腔头基座设计。在基座底部预留了一个陶瓷插芯固定用的圆形导口, 用于安装光纤组件。考虑到圆形反射膜的制作工艺较为复杂, 本文选择了正方形硅膜片, 并将其固定在基座平台内的预留槽口中。为了不影响传感器压力特性模型的分析结果, 基座中膜片与光纤端面的接触口被设计为圆形槽口, 通过胶合处理实现膜片与基座之间的刚性连接, 确保了结构的稳定性和测量的准确性。

2.2 光纤制备

传感器的光纤制备具体步骤如下:

1) 剥除光纤涂覆层。使用米勒钳小心地剥除光纤涂覆层至所需的长度。

2) 清洁光纤表面。使用酒精浸湿的棉片仔细清洁裸露的光纤部分, 以去除表面的杂质。

3) 调配并涂抹环氧树脂胶。按照制造商推荐的比例调配 353ND 环氧树脂胶, 并均匀涂抹于光纤表面。

4) 光纤穿入陶瓷插芯。将光纤穿入陶瓷插芯的微孔中, 确保光纤居中且直线插入。

5) 固化处理。将组件放入烘箱中, 在指定温度下进行固化, 以驱除胶水中的气泡和水分, 并确保胶水充分硬化。

6) 切割光纤端部。当 353ND 胶水完全固化后, 使用专业的光纤切割工具精确切割裸露在外的光纤端部, 保证切割面平整。

7) 固定尾柄并研磨光纤端面。将尾柄安全固定在夹持装置上。

8) 采用光纤研磨机对端面进行精细研磨和抛光, 直到其与陶瓷插芯端面齐平。

9) 检查光纤端面质量。利用光纤熔接机或类似的检测设备检查光纤端面的质量。如果设备显示端面平整, 则可以继续下一步; 若不平整, 则需要返回到步骤 7), 重新进行研磨直至满意为止。

2.3 传感器封装

传感器的封装具体步骤如下:

1) 安置硅膜片。将硅膜片精确地安置在传感器基座预留的方形凹槽内, 使用 353ND 胶水将硅膜片与基座粘接, 确保二者之间形成坚固的刚性连接。

2) 调整平行度。为保证 F-P 腔 2 个反射端面的绝对平行, 在硅膜片中心位置放置一个小圆球作为水平

张翀,詹洋,张志伟,等:基于F-P腔的地浸采铀水位实时监测传感器研制

指示器,通过观察小圆球的状态来调整硅膜片的位置,直至其端面达到水平状态。

3)同轴对齐。确保陶瓷插芯与基座底部的圆形导口同轴对齐。本文采用了一种自主设计的调芯夹具(实物图如图4所示)进行封装,具体操作如下:

◆将固定支柱固定在工作台上。

◆将传感器基座放置于固定支柱上的圆形槽口中,并通过固定螺柱将其稳置在支柱上。

◆将光纤陶瓷插芯置于下活动底座预留的接口内,并用固定螺柱使其稳定。

◆将下活动底座固定在三维超精密移动平台上。

◆通过微调三维移动平台,同时监测解调仪上显示的干涉信号。当解调仪显示出对比度高且呈现正弦变化的干涉信号时,表明传感头与光纤已良好对准。

4)固定光纤。此时,应用无影胶(UV固化胶)涂覆在光纤陶瓷插芯与基座的交接处,以固定光纤。

5)完成整体组装。待光纤与硅膜片分别封装到基座的相应位置后,最后一步是将基座与腔头防护装置通过螺纹连接起来,完成整个传感器的组装。

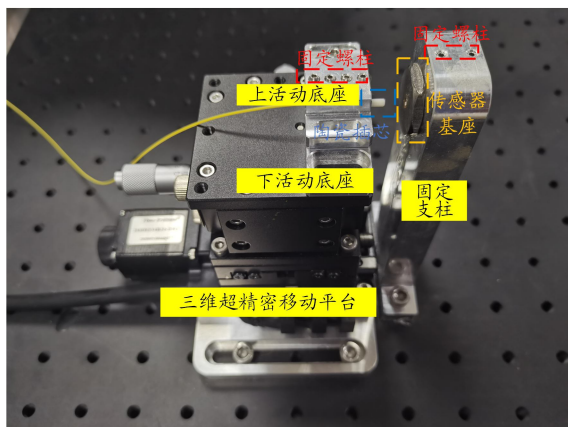


图4 调芯夹具实物图

3 实地实验测试

3.1 实验地点与井下设备安装

本次实验在内蒙古自治区的一个浸采铀矿山实地进行。该地浸采铀抽液井的井口内径为128 mm。井下结构从底部向上依次安装有潜水电泵、供电电缆和提升管等浸出液处理设备系统。为了便于后期的设备维护和操作,传感器被固定在井下的位置,采用了与浸出液提升装备系统相结合的安装方案。

3.2 隔减振装置的研制与传感器的固定

当潜水电泵启动运行时,产生的振动通过弹性连接件传递至传感器的安装位置,从而引发传感器内部

陶瓷插芯和基座的振动。如果振动频率与系统的某一阶固有频率相匹配,则会发生共振现象,这会导致传感器内部腔体长度的变化和膜片承受压力的分布不均匀。这些因素最终会降低传感器的测量精度,甚至可能导致传感器失效。因此,为了减少潜水电泵振动对传感器性能的影响,并确保水位检测的稳定性和准确性,本文根据传感器、井口及潜水电泵的具体尺寸,设计了一种边长为5 cm的立方体网状隔减振装置,实物图如图5所示。

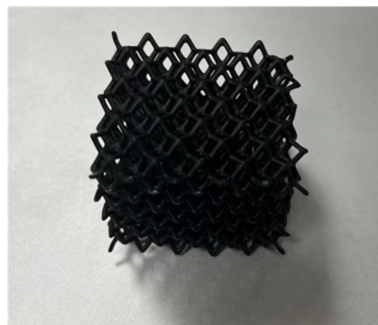


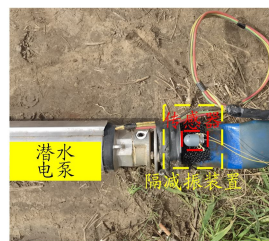
图5 隔减振装置实物图

鉴于潜水电泵为刚性结构,其振动干扰显著,而软管处的直径会随着抽水流量的变化而波动,这增加了传感器固定的难度。为解决这些问题,本文在实验中将传感器固定在潜水电泵与软管的转接位置。同时,将传感器置于隔减振装置内部预留的凹槽中,并用橡胶外壳包裹整个外部,以提供额外保护。使用扎带和防水胶带将传感器牢固地捆绑固定,确保其在潮湿环境中也能保持稳定。考虑到光纤本身的脆弱性及其最小弯曲半径的要求,为了避免宏弯损耗,本文采用凯夫拉线(Kevlar)将光纤固定于传感器基座端,确保线体绷直后通过扎带和防水胶带与电泵上的软管连接,从而避免直接对光纤施加力。

此外,现场应用了多功能特种光电复合缆,这种电缆不仅密封性能优异,还能有效降低电磁干扰,其结构和强度特别适合应对光纤易弯折和抗压能力差的问题,减少了损坏风险和材料浪费。传感器的减振防护及固定实物如图6所示。



(a) 传感器减振防护图



(b) 传感器固定实物图

图6 传感器减振防护及固定实物图

3.3 实验井的选择与数据采集过程

为了充分评估传感器在群井水位动态监测中的性能和潜水电泵运行时振动对其的影响,本次实验选

择了6口地浸生产井,编号分别是C0101、C0203、C0304、C0303、C0501及Z0306。其中,Z0306为注液井,其余均为抽液井。在安装过程中,对于C0101、C0203、C0304号井,保持潜水电泵静默下放;而C0303、C0501、Z0306号井则是在潜水电泵下放到预定位置后进行启动并执行运行测试。

在群井布局中,每口井的传感器通过光电复合缆与地表解调设备相连,并进一步通过网线连接到计算机,以实现多传感器数据的群井水位测量。

正式实验前,需要使用吊机将潜水电泵从井口提升到地面,并在预定位置安装传感器,完成调试检查工作。检查无误后,缓慢地将潜水电泵连同传感器一起下放到井下150 m的位置。

3.4 升压实验与数据分析

在升压实验阶段,随着潜水电泵逐步下潜,上位机不断接收来自传感器的光谱信号,每隔10 m采集一次数据。当潜水电泵到达指定深度后,需保持静止30 min,并在此期间采集4组数据。最后,使用条纹计数法对收集到的光谱信息进行解调。本文采用Origin软件绘制升压时传感器腔长随水位变化关系曲线如图7所示,并对图7的数据进行了线性拟合分析,得

到线性拟合关系式为

$$\begin{cases} y_1 = -0.016\ 44x + 255.995\ 74 \\ y_2 = -0.016\ 26x + 261.985\ 85 \\ y_3 = -0.016\ 23x + 258.313\ 3 \end{cases} \quad (7)$$

通过Origin软件对数据拟合分析,得出 R^2 分别为0.999 14、0.999 09、0.999 34,由此可见传感器线性度良好,且与理论数值相接近。

3.5 降压实验与结果分析

本文采用吊机将潜水电泵间隔10 m拔出,静置3 min待传感器完全平稳光谱且无波动时采集数据。降压时传感器的腔长随水位变化关系曲线如图8所示。可以看出,当潜水电泵静默运行水位发生变化时,传感器的线性度良好,可以准确地测量水位的变化。

3.6 潜水电泵下放运行实验及影响分析

为进一步验证传感器在潜水电泵工作运行时的检测性能,本文进一步开展了潜水电泵下放运行实验,下放步骤与静默下放步骤一致。潜水电泵在下放到10 m时开启运作,由于潜水电泵工作时水位处于动态波动过程,故每隔10 m悬置3 min,采集3组数据进行平均,计算出传感器的腔长变化如图9所示。对图9的数据进行拟合,得到线性拟合关系式为

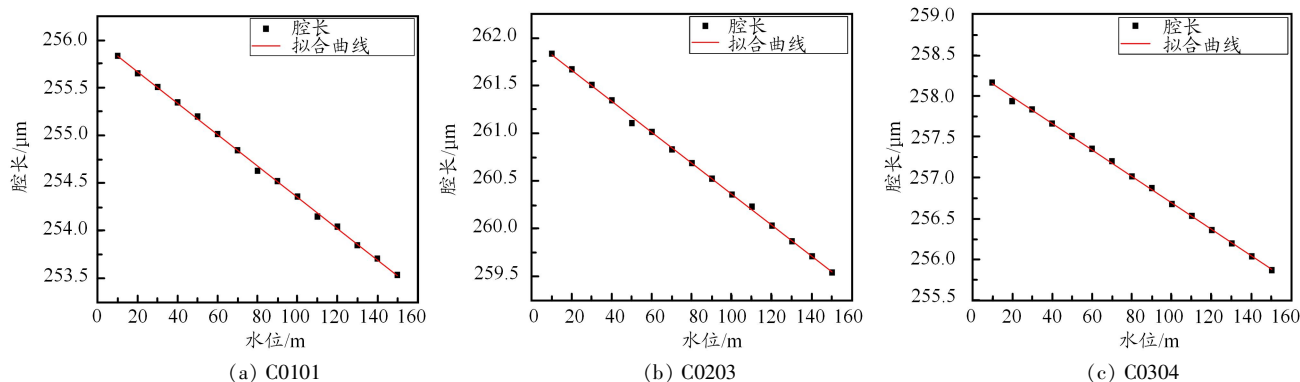


图7 升压时传感器腔长随水位变化关系曲线

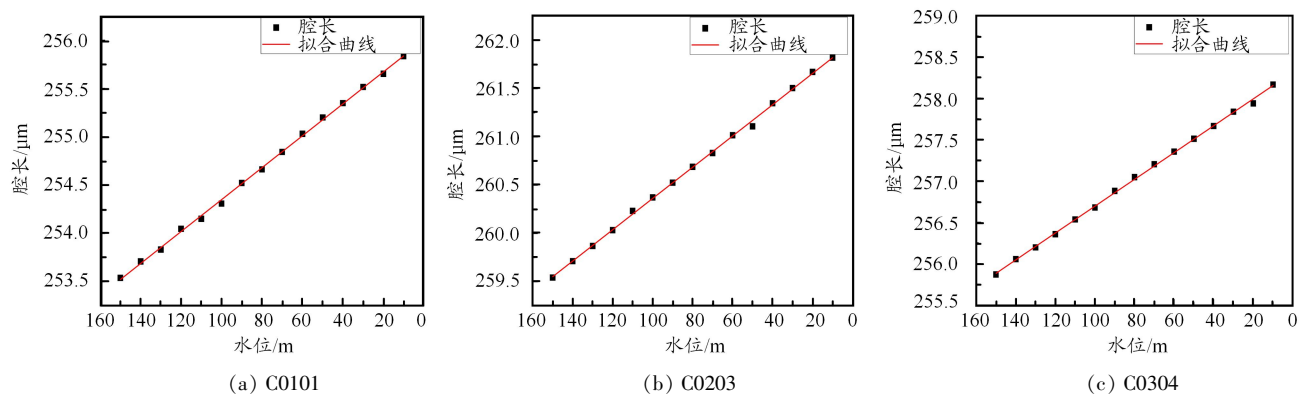


图8 降压时传感器腔长随水位变化关系曲线

张翀, 詹洋, 张志伟, 等: 基于 F-P 腔的地浸采铀水位实时监测传感器研制

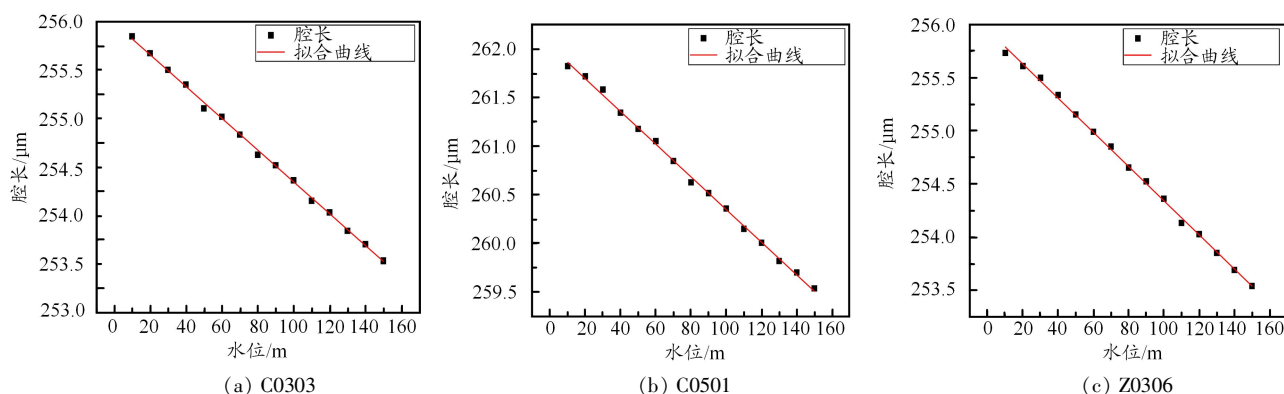


图9 潜水电泵运行升压时腔长随水位变化关系曲线

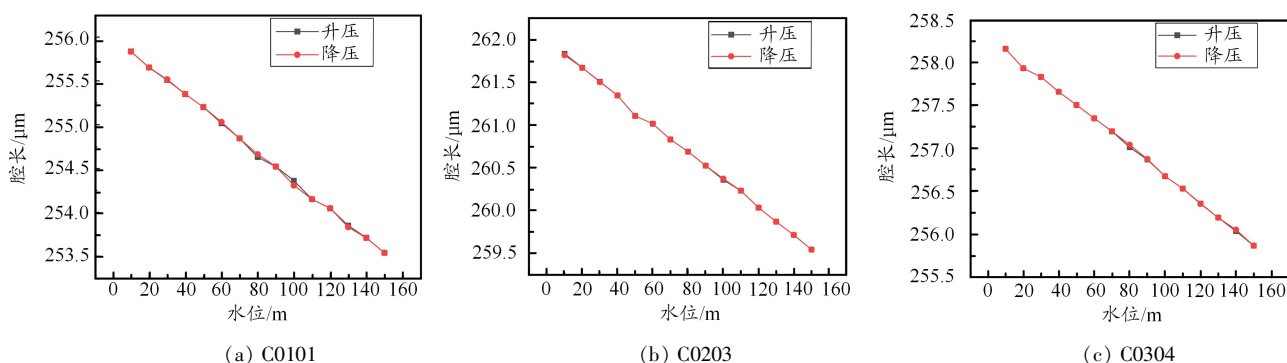


图10 传感器重复性实验

$$\begin{cases} y_1' = -0.01636x + 255.98512 \\ y_2' = -0.01682x + 262.03192 \\ y_3' = -0.01610x + 255.95263 \end{cases} \quad (8)$$

通过 Origin 软件对数据拟合分析, 得出 R^2 分别为 0.999 03、0.998 21、0.998 55, 与潜水电泵静默运行时的线性度有些许差距。这表明潜水电泵运行带来的振动对传感器的检测性能有一定的影响。从图 9 可知, 振动主要对低水位阶段影响相对较大。这可能是由于水压低对潜水电泵的振动抑制作用较低; 水位高时, 水压大, 潜水电泵的振动会受到更大的抑制, 精度受影响小。

3.7 传感器水位测量的重复性与稳定性研究

本文选用潜水电泵静默运行时的数据, 分析传感器在进行升压和降压时曲线的重合程度, 重复性实验结果如图 10 所示。可以看出, 在同样水位条件下, 升压和降压时的腔长有微小波动, 但波动范围在允许范围内, 对结果影响较小。这说明该传感器具有良好的重复性并且重复性相近。

为验证传感器水位检测的稳定性, 每间隔 2 min 对 C0303、C0501、C0304 号井采集 1 次数据, 每口井各采集 15 组数据, 得到结果如图 11 所示。可以看出, 随

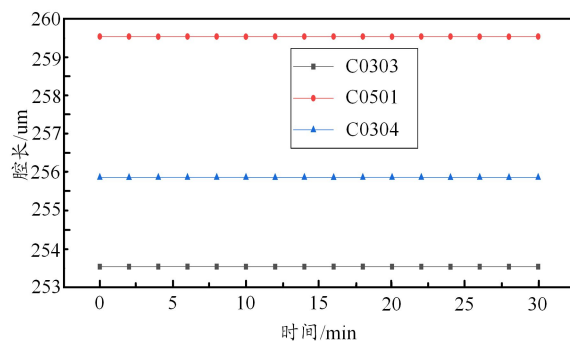


图11 传感器稳定性实验

时间变化, 3 口井传感器的腔长均有轻微的波动, 但波动量较小, 基本可以忽略不计。综上所述, 研制的传感器具有良好的稳定性。

4 结束语

本文基于 F-P 干涉原理, 并结合弹性形变理论, 提出并成功制备了一种专为地浸采铀应用设计的光纤 F-P 腔水位传感器。实验结果表明, 在 0~1.5 MPa 的压力范围内, 该传感器的灵敏度可达 $1.68 \mu\text{m}/\text{MPa}$, 线性度良达到了 0.998。该款 F-P 传感器不仅具备高精度、低成本、结构简单及易于安装的优势, 还能够实

现对地浸采铀矿山群井水位数据的实时且可靠的监测。这为推动我国地浸采铀行业的数字化和智能化进程提供了重要的数据支持、技术手段和设备保障。

参考文献:

- [1] WANG Z, CHEN J, WEI H, et al. Sapphire Fabry-Perot interferometer for high-temperature pressure sensing[J]. Applied Optics, 2020, 59(17): 5189–5196.
- [2] QI X G, WANG S, JIANG J F, et al. Fiber optic Fabry-Perot pressure sensor with embedded MEMS micro-cavity for ultra-high pressure detection[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(11): 2719–2725.
- [3] 张韬杰, 江毅, 马维一. 一种高精细度 MEMS 光纤 F-P 压力传感器[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(17): 314–318.
- [4] ZHANG Y N, YUAN L, LAN X W, et al. High-temperature fiber-optic Fabry-Perot interferometric pressure sensor fabricated by Femtosecond laser[J]. Optics Express, 2013, 38: 4609–4612.
- [5] 张慧君. 膜片式光纤动态压力传感器的研制[J]. 计测技术, 2022, 42(3): 30–35.
- [6] HAI Z Y, SU Z X, LIANG R, et al. Numerical and experiment analysis of sapphire sandwich-structure Fabry-Perot pressure sensor through fast fourier transform and mean square error demodulation algorithm[J]. Materials 2024, 17(15): 3649–1–3649–10.
- [7] 赵云楠, 王伟, 牛慧莉, 等. 基于琼脂薄膜的微型端面光纤 F-P 湿度传感器[J]. 光电子·激光, 2022, 33(5): 465–470.
- [8] NI W J, LU P, FU X, et al. Ultrathin graphene diaphragm-based extrinsic Fabry-Perot interferometer for ultra-wideband fiber optic acoustic sensing[J]. Optics Express, 2018, 26(16): 20758–20767.
- [9] 肖磊, 邵宇鹰, 庞拂飞, 等. 基于氧化锆陶瓷的光纤 F-P 腔压力传感器研究[J]. 光通信技术, 2019, 43(8): 28–31.
- [10] 刘铁根, 于迅, 王双, 等. 高温环境下光纤法布里 - 珀罗微腔传感技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(3): 26–38.
- [11] 于清旭, 贾春艳. 膜片式微型 F-P 腔光纤压力传感器[J]. 光学精密工程, 2009, 17(12): 2887–2892.
- [12] 骆宇锋, 刘志麟, 赵中华. 高精度连续型光纤 F-P 腔液位传感器[J]. 光电工程, 2006(1): 72–76.