

引用格式:孙艳坤,周良昌,龙涛,等. 光纤监测在碳封存中的现状、应用及展望[J]. 有色设备,2025,39(4):1-15.

SUN Yankun, ZHOU Liangchang, LONG Tao, et al. Current status, application and prospect of optical fiber monitoring in carbon sequestration[J]. Nonferrous Metallurgical Equipment, 2025, 39(4): 1-15.

光纤监测在碳封存中的现状、应用及展望

孙艳坤^{1,2}, 周良昌^{1,2}, 龙涛^{1,2}, 孙天宇^{1,2}, 彭鹏^{1,2}, 张旭³, 金城杰^{1,2}

(1. 中国地质大学(武汉)油气勘探开发理论与技术湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430074;

2. 中国地质大学(武汉)资源学院 构造与油气教育部重点实验室, 湖北 武汉 430074;

3. 安徽省勘查技术院(安徽省地质矿产勘查局能源勘查中心), 安徽 合肥 230041)

[摘要] 碳封存(CCS)技术作为应对气候变化的关键手段,其安全性与高效监测技术紧密相关。本文深入剖析了光纤监测技术在碳封存领域的应用现状,尤其聚焦于光纤布拉格光栅(FBG)与分布式声波传感(DAS)技术。FBG技术凭借高精度测量应变、温度等参数的优势,可实时监测储层压力与泄漏风险;DAS技术则利用其分布式声波感知能力,动态追踪CO₂羽流迁移及诱发地震活动。通过多技术融合,如光纤与地震、化学监测的协同,显著提升了监测系统的综合性能,实现了对封存过程的全方位覆盖。然而,光纤监测技术在高温高压环境下的适应性、低频信号敏感性不足以及经济性等方面仍面临挑战。未来,需通过优化传感器设计、开发智能算法、推动标准化应用等途径,提升技术可靠性与规模化潜力,为碳封存安全提供坚实保障。

[关键词] 碳封存; 泄漏监测; 光纤监测; 分布式声波传感(DAS); 多技术融合; 光纤布拉格光栅(FBG)

[中图分类号] X701; TP212 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1003-8884(2025)04-0001-15

DOI: 10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2025.04.001

0 引言

碳封存(Carbon Capture and Storage, CCS)是一种关键技术,旨在通过从大气或工业排放源中捕集二氧化碳(CO₂),并将其长期储存于地下,以减少温室气体排放并减缓全球变暖的进程^[1-2]。

CCS技术的发展对于实现全球气候目标至关重要。随着技术的进步和成本的降低,CCS有望在全球范围内得到更广泛的应用。然而,CCS技术的成功实施还需要政策支持、公众接受度提高以及跨学科合作,以确保其安全性、经济性和环境可持续性。未来,CCS技术的研究将集中在提高捕集效率、降低成本、优化运输和储存方案以及开发新的监测技术,以确保CO₂的安全长期封存。

1 CCS技术概述

CCS技术涵盖了捕集、运输和封存3个主要步骤^[3-4],该主要流程如图1所示。

1)在捕集阶段,需进行CO₂的分离和捕集。现今,CO₂主要从大型排放源如发电厂和工业设施中通过化学吸收、物理吸附、膜分离和低温分离等技术手段被分离和捕集^[5]。这些技术各有优势和局限性,化学吸收法因其较高的CO₂捕集效率而被广泛使用,应用最为成熟为燃烧后CO₂捕集,但可能面临较高的能耗和成本问题^[6]。选用合适的化学吸收剂有利于节省碳捕集的成本。张双梅等^[7]通过对CO₂捕集工艺节能降耗的化学吸收剂的专利进行深入分析,结果发现有机胺吸收剂占比最高。

[收稿日期] 2025-05-23

[基金项目] 安徽省重点研究与开发计划“复杂地质条件下页岩气资源绿色勘查关键技术及综合开发利用研究”(2022n07020003);中国石油化工股份有限公司西北油田分公司项目(KJ202133);中国地质大学(武汉)高层次人才科研启动项目“基于光纤传感技术的高精度监测井下油气藏运移渗流可视化研究”(102-162301212673)。

[第一作者] 孙艳坤(1987—),男,河南周口人,博士,教授,博士生导师,主要从事CO₂地质封存、非常规能源开发与深地光纤智能感知等教学科研工作。

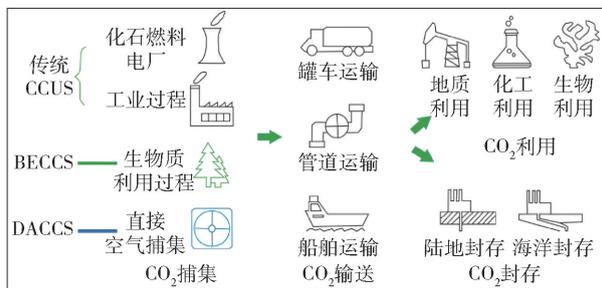


图1 CCS技术示意

Fig.1 Schematic diagram of CCS technology

2) 运输阶段涉及将捕集到的 CO₂ 通过管道、船舶或专用车辆等不同方式运输至储存地点。由于捕集液化后的二氧化碳与注入地点通常相距甚远,因此管道输送以其输送量大、输送距离远而成为二氧化碳远距离输送最经济、最便捷的途径^[8]。船舶运输适用于跨国或远距离的 CO₂ 运输,而专用车辆适用于短途或小规模的运输。

3) 碳封存技术是指通过各种技术手段将二氧化碳(CO₂)长期储存在地下,以减少大气中的温室气体含量。封存阶段是 CCS 技术的最后环节,涉及将 CO₂ 注入地下深处的地质构造中,必须具备足够的容量、良好的密封性以及较低的环境风,以确保其长期封存^[9]。封存主要有:深部盐水层封存、枯竭的油气藏封存、深部不可采煤层封存或矿化封存。①深部盐水层,因其天然的密封性和较大的储存容量而被认为是理想的储存场所。马馨蕊等^[10]从咸水层封存机制和封存效率主控因素等方面讨论了咸水层封存 CO₂ 的有效性。②枯竭的油气藏,则因其已存在的井筒和基础设施而便于 CO₂ 的注入和监测。同时,由于其自身良好的封闭性(可长时间将油气封存),与其他地质体相比,二氧化碳封存于其中的泄漏风险最小,并且由于油气藏中已部署了生产井和注入井,对二氧化碳进行封存更为方便,经济效益也更好^[11]。③深部不可采煤层,我国 1 000 m 以上深的煤炭资源储量约占国内总储量的 53%,其中包含大量灾害严重煤层和不可采煤层。同时,每年均有大量煤矿关闭退出,可为煤层碳封存提供源源不断的天然场所^[12]。CO₂ 被注入地下储层,与玄武岩中的含铁镁矿物反应,形成稳定的碳酸盐矿物,这些碳酸盐矿物能够长期储存 CO₂,并防止其逸出到大气中^[13]。④矿化封存,包琦等^[14]通过对海南洋浦、海口及福建漳州地区的天然玄武岩样品进行

试验研究,得出玄武岩矿化反应效率随温度升高和反应时间延长而提高。同时,可以通过工业固废进行 CO₂ 矿化封存,相较于地下储层玄武岩矿化封存,工业固废矿化封存在封存介质、路径、获取难度上更加容易实现^[15]。

在 CCS 技术中,由于封存在地下的 CO₂ 可能会发生逃离封存区域及向封存位置以外的区域泄漏或渗漏的现象,一旦发生泄漏,将会对环境以及周围生物造成影响,甚至破坏生态环境平衡。王展鹏等^[16-17]在 CO₂ 地质封存泄漏监测技术研究进展中给出了主要的泄露途径,如图 2 所示。因此,对地质封存项目中可能泄漏或渗漏的 CO₂ 进行监测与识别尤为重要。谢启红等^[18]基于二氧化碳在煤储层、深部咸水层及油气藏 3 种不同地质体中封存的微观机理分析,在应力场、裂隙场、渗流场“三场”耦合关系的基础上,对其封存过程中可能出现的泄漏路径进行了探讨。综上,有效的监测技术不仅可提高碳封存项目的安全性和可靠性^[19],还可增强公众对碳封存技术的信任,促进其在更大范围内的应用。

2 监测技术

2.1 监测技术现状

为了预防和应对泄漏情况的发生,则需要对封存的地质体进行长时间监测。2024 年 6 月中华人民共和国自然资源部发布的二氧化碳地质封存监测技术指南提出了监测体系的工作流程,如图 3 所示。

根据监测方法的不同,碳封存监测技术主要包括地球物理监测、化学监测和光纤监测等 3 大类。地球物理监测利用地震波、电磁场等探测地下构造变化;化学监测则通过分析储集层中采集的样品中的化学成分,评估二氧化碳的行为;光纤监测作为新兴技术,通过传感光纤感知物理和化学参数的变化,提供了更高的灵敏度和更长的监测寿命。

2.2 监测技术类型

2.2.1 地球物理监测技术

地球物理监测技术是碳封存监测中应用较早且较为成熟的一类技术,主要通过探测地下物理场的变化来监测 CO₂ 的封存情况。面对二氧化碳地质封存过程中可能出现的各种地质力学问题,针对性地采用各种地球物理监测方法。地球物理技术贯穿于二氧化碳地质封存的整个过程,从 CO₂ 注入前的选

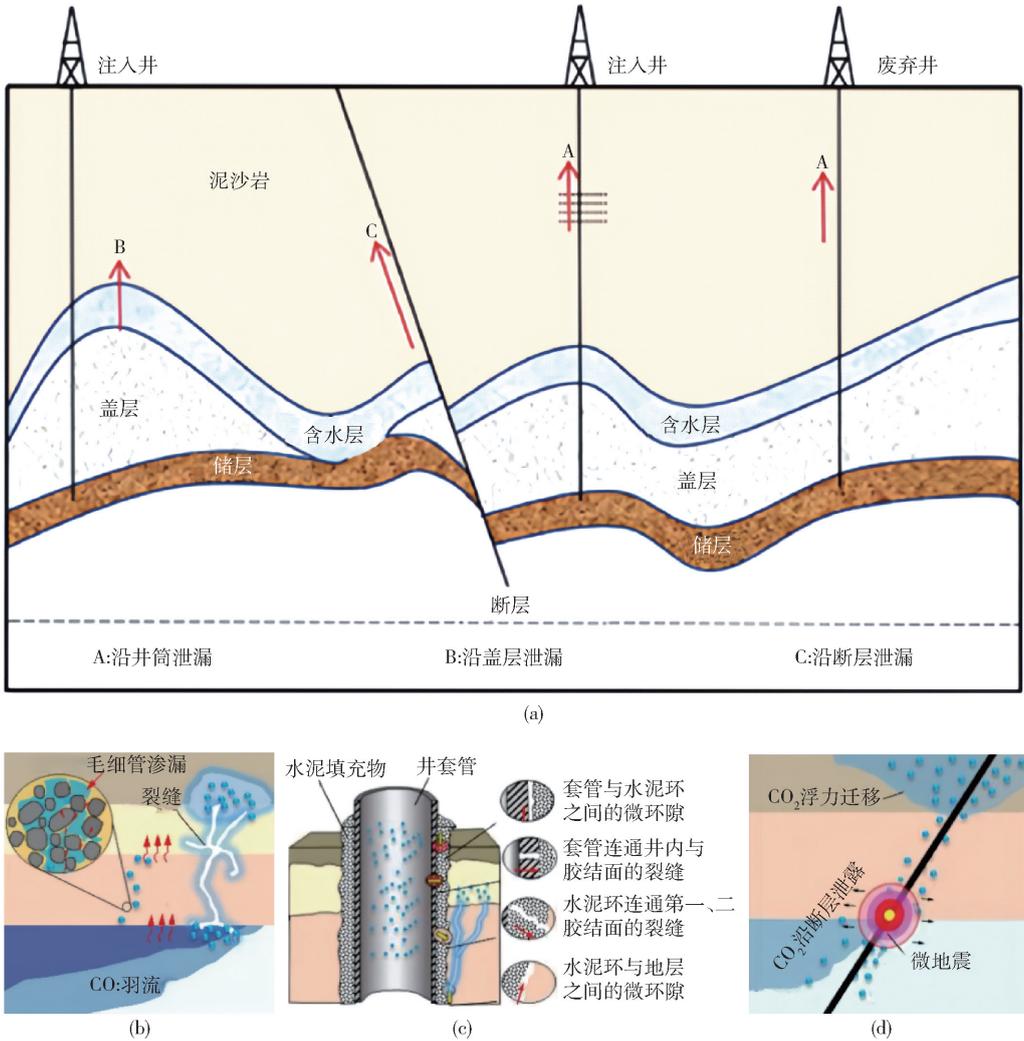


图2 (a) CO₂地质封存主要泄漏途径^[16]; (b) 盖层泄露^[17]; (c) 井筒泄露^[17]; (d) 断层泄露^[17]
 Fig.2 (a) The main leakage pathways of CO₂ geological storage^[16]; (b) Cap leakage^[17]; (c) Wellbore leakage^[17]; (d) Fault leakage^[17]

址到注入过程中的注入井、流体和地质体等一系列的状态监测,再到注入后的长期安全性监测,都起到了重要的作用。而二氧化碳注入前后储层物性参数的改变为地震、重力及电磁等地球物理监测方法奠定了理论依据^[20]。

2.2.1.1 地震监测

利用地震波在地下传播时遇到不同介质界面会发生反射、折射等现象的原理,通过在地面或井下布置检波器接收地震波信号,反演地下地质构造和CO₂的分布情况。其中应用典型的时移地震技术,成熟度相对较高,是指通过在不同时间对同一工区按相同观测方式进行重复性地震观测所获取的差异地震信息监测油气藏动态的过程,对于追踪和监测

油气藏中流体动态变化、评估CO₂驱油效果和优化油藏管理都有着显著和重要的作用^[21]。将时移地震差异属性与地质构造或地质环境相结合,可以更好地判断研究靶区。例如,将时移地震差异属性与断层断距相结合,可对断层封堵性进行判断,生产动态和新钻井验证判断结果具有较高的可靠性;将沉积相与时移地震阻抗差异属性相结合,可以刻画注入水的平面推进趋势及范围^[22]。然而,在二氧化碳注入之前,地震方法对于预测溶解度、毛细管和矿物圈闭的能力较弱。但随着二氧化碳注入,地震方法在监测与结构、毛细管和溶解度捕获相关的二氧化碳羽流的物理演化方面是有效的^[23]。

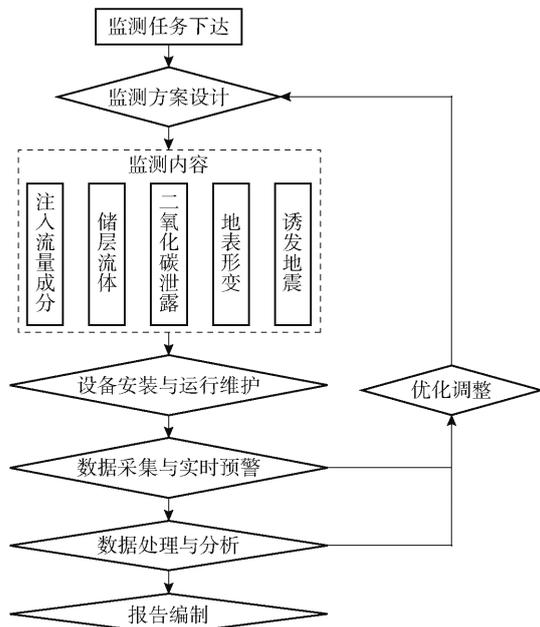


图 3 二氧化碳地质封存监测工作流程

Fig. 3 Workflow of monitoring geological carbon dioxide storage

2. 2. 1. 2 重力监测

重力监测方法原理是基于 CO₂与周围岩石密度差异导致的重力场变化,通过高精度重力仪测量地面或井下的重力值,进而推算出 CO₂的注入量和分布范围。这种方法对 CO₂的大规模迁移和累积较为敏感,适用于长期监测封存效果。在 CO₂地质封存方面,重力监测能够直接反映地下质量分布的变化,有助于评估 CO₂的迁移和储存情况。研究表明^[24],储层渗透率对重力变化有显著影响,在低渗透率条件下,注入期间重力减少量较小,而停止注入后重力减少量较大;在高渗透率条件下,CO₂羽流快速扩展,导致注入区上方的重力减少量较小。此外,重力变化的检测时间取决于储层的渗透率和深度,浅层储层的重力变化检测时间更短。在油藏监测中,重力监测用于追踪水驱油或水驱气的前沿位置,但面临着信号弱、数据不足、噪声多和读数有误差等挑战^[25]。为了提高数据质量,提出了使用多传感器井下工具的算法,以便更准确地反演水油或水气接触位置。时延重力技术则是通过监测储层密度变化,

表 1 典型地球物理监测方法^[20]

Table 1 Typical geophysical monitoring methods^[20]

监测方法	观测参数	监测目的	典型应用
地震监测	P 波和 S 波速度	追踪储层 CO ₂ 的运移及分布	Weyburn (Wilson et al., 2004)、Frio (Hovorka et al., 2006)、Otway (Dodds et al., 2009)、Snøhvit (Eiken et al., 2011)、In Salah (Ringrose et al., 2013)、Sleipner (Furre et al., 2017)、神华 CCS 示范工程(赵海英等, 2018)、Tomakomai (Tanase et al., 2019)、中联煤 CO ₂ 驱煤层气项目(Li et al., 2022)
	反射界面		
	地震振幅衰减		
重力监测	流体驱替引起的密度变化	追踪储层 CO ₂ 的向上运移 地下 CO ₂ 的质量分布	Sleipner (Alnes et al., 2008)、Dover 33 (Bonneville et al., 2021)
电磁监测	地层电导率 电磁感应	追踪储层 CO ₂ 运移	Ketzin (Kiessling et al., 2010)、中联煤 CO ₂ 驱煤层气项目(崔方智等, 2020)

成为了动态监测储层的高效方法。尽管面临仪器漂移、噪声干扰等挑战,但随着仪器性能的提高、数据处理技术的进步以及多种监测手段的综合运用,重力监测技术的应用前景将更加广阔^[26]。通过进一步提升仪器性能,优化数据处理方法,结合多种地球物理方法,将使重力监测在二氧化碳地质封存项目中发挥更大的作用。

2. 2. 1. 3 电磁监测

当二氧化碳注入地下储层后,会逐渐替代储层

孔隙中的盐水,导致储层的电阻率发生变化。同时,人工发射的电磁波在地下介质中传播时,其频率、相位和振幅等特性会因介质的电性差异而发生变化。电磁监测技术通过测量储层的电阻率变化以及接收和分析电磁波传播特性的变化,反演出地下介质的电性结构,从而间接获取二氧化碳在储层中的分布和饱和度信息。

在碳捕集、利用与封存 (CCUS, Carbon Capture, Utilization and Storage) 项目中,可控源电磁法

(CSEM, controlled-source electromagnetic) 被用于监测二氧化碳(CO₂) 在储层中的注入和迁移。CO₂ 注入会使储层流体的电阻率发生变化, 形成可用电磁方法探测的异常信号。通过多次时移测量, 可以观察到 CO₂ 注入引起的电阻率变化, 从而评估 CO₂ 的分布和迁移情况。此外, 在提高石油采收率技术(EOR, enhanced oil recovery) 中, CSEM 用于监测水驱或蒸汽驱等流体注入过程。通过检测注入流体与原油之间的电阻率对比, 可以确定驱替前缘的位置, 提高油藏采收率^[27]。可控源大地电磁法(CSMT, controlled-source magnetotelluric) 在有页岩气和地热的地质储层中能够检测到导电和电阻性储层结构, 但在某些情况下需要使用低频信号、强源和高灵敏度仪器, 或者采用井中-地面或跨孔配置以提高信号强度和异常大小^[28]。未来需要研究更复杂的几何形状和更详细的电阻率与岩石物理

性质关系的信息, 以进一步验证 CSMT 的实际应用效果。

2.2.2 化学监测技术

化学监测的主要原理是通过检测二氧化碳(CO₂) 与周围地质环境相互作用引发的化学变化, 捕捉 CO₂ 封存引发离子组成、气体浓度、同位素比值等变化, 结合多维度数据构建动态响应模型, 从而追踪 CO₂ 移动、泄漏。因此, 监测的化学物质包括 CO₂ 本身及其在地下水中形成的溶解化学物质, 可作为储存过程的指标。天然 CO₂ 储层、富含 CO₂ 的地下水和盐泉可以用于研究与地下 CO₂ 储存相关的流体运输过程^[29]。其原理不仅依赖化学反应的直接观测, 还需通过背景校正和技术协同, 确保监测结果的准确性与可靠性, 为 CCS 技术的安全实施提供科学支撑。常见的地球化学监测方法包括气体分析、水样分析和示踪剂技术等, 见表 2。

表 2 主要地球化学监测技术

Table 2 Major geochemical monitoring techniques

监测技术	监测对象	监测目的	主要监测参数
气体分析	近地表土壤气、浅层地下水溶解气、井口气体	检测 CO ₂ 泄漏, 区分封存 CO ₂ 与天然/生物源 CO ₂ , 监测伴生气释放	CO ₂ 浓度、 $\delta^{13}\text{C}$ (碳同位素)、 ^{14}C (放射性碳)、CH ₄ 、H ₂ S 等伴生气体浓度
水样分析	地下水、孔隙水、注入的 CO ₂ 流体	追踪 CO ₂ 溶解过程, 评估矿物溶解/沉淀反应对储层的影响	pH 值、Ca ²⁺ 、Mg ²⁺ 、HCO ₃ ⁻ 、Fe ²⁺ 浓度, 溶解无机碳 (DIC)
示踪剂技术	CO ₂ 气体、地下水、伴生气体	追踪 CO ₂ 来源 (化石源/生物源), 识别迁移路径, 检测微量泄漏信号	$\delta^{13}\text{C}$ (碳同位素)、 $\delta^{18}\text{O}$ (氧同位素)、SF ₆ 、Kr-85 (放射性示踪剂)、He/Ne 比值

2.2.2.1 气体分析

在地表或潜在泄漏区域设置监测点, 定期采集气体样本, 分析其中二氧化碳的浓度及其与其他气体的成分比例, 判断 CO₂ 的封存状态和泄漏情况。如果监测到二氧化碳浓度异常升高, 且二氧化碳与其他气体的成分比例符合地质封存区域的特征, 则可能表明发生了泄漏。

CO₂ 浓度比空气大, 易在通风不畅或地势较低地区聚集, 浓度累积到高水平时, 会对人体和动物产生伤害。监测点应布设在封井口、主导风向向下风处以及地势低洼处等环境敏感点, 通过遥感技术、光谱差异来获取特定谱段红外影像和长势异常的植被数据, 来判断 CO₂ 是否发生泄漏及泄露地点^[30]。例如, 利用无人机进行遥感监测, 滕腾等^[31] 通过环境背景值监测、试验监测、理论模拟和数据对比分析的方法为无人机遥感监测技术对 CCS 泄漏风险事故

的响应效果进行了研究, 结果表明无人机遥感监测系统能够对泄漏的 CO₂ 做出响应, 能够应用到实际 CCS 泄漏事故中, 但因为工业尺度下的泄漏量很大, 无人机遥感监测平台仅能够对大空间场做出有效的监测响应。同时, CO₂ 升高可以酸化土壤, 改变土壤矿物质和有机物的循环, 从而影响土壤微生物多样性和物质代谢。陈浮等^[32] 通过构建 CO₂ 泄漏模拟试验平台, 研究发现不同微生物群落结构与组成在中、低浓度 CO₂ 胁迫下表现为抑制性, 但在高和极高浓度下菌群反应差异显著, 且拟杆菌目相对丰度具有极大的可变性, 可作为微生物敏感性指标用来评估 CO₂ 泄漏风险。

2.2.2.2 水样分析

地下水化学分析是二氧化碳地质封存中不可或缺的监测手段, 通过分析地下水中的化学成分变化, 可以追踪 CO₂ 的溶解、运移、与储层岩石的相互作用

以及潜在的泄漏风险。从地下含水层采集水样,分析水中 CO_2 的溶解度、pH 值、离子浓度等指标,评估 CO_2 对地下水资源的影响。

Berger 等^[33]通过地球化学模型模拟了不同二氧化碳泄漏情景下,地下水参数的变化情况。研究发现,铁(Fe)、钙(Ca)、钾(K)、镁(Mg)、二氧化碳(CO_2)和 pH 值对二氧化碳的添加敏感,而铝(Al)、氯(Cl)、钠(Na)和硅(Si)则不敏感。表明在监测二氧化碳泄漏时,应重点关注敏感参数,而可以减少或排除对不敏感参数的监测,从而提高监测效率并降低成本。Keating 等^[34]通过对新墨西哥州某地区二氧化碳对浅层地下水化学的影响的研究,发现咸水可能直接从 CO_2 储层泄漏或在 CO_2 通过储层上方岩石时被卷入 CO_2 羽流中,这可能对浅层地下水质量产生比 CO_2 本身更大的影响。混合和稀释、pH 值缓冲反应、含水层矿物中痕量金属的有限可用性以及二次矿物沉淀对痕量金属的捕获等,均可能减轻 CO_2 泄漏对水质的影响。在缓冲能力较低、混合和稀释有限的条件下, CO_2 泄漏可能对水质产生显著影响。水样分析能够及时发现 CO_2 是否渗漏至含水层,为采取防护措施提供依据。通过长期监测含水层的水质变化,确保了地下水资源的安全。

2.2.2.3 示踪剂技术

基本原理是利用 CO_2 中不同同位素的特征,通过在注入的 CO_2 中添加特定的化学标记,然后在地下样品中检测这些标记的分布和变化,追踪 CO_2 的迁移路径和封存效果。示踪剂技术具有高灵敏度和高精度的特点,能够准确评估 CO_2 的封存效果和泄漏风险,一般示踪剂类型为放射性标记、稳定性同位素标记和化学示踪剂。因此,选择合适的示踪剂对于监测 CO_2 的羽流行为具有重要意义。刘子剑等^[35]探讨了同位素标记 CO_2 在咸水层的化学行为,指出研究咸水层 CO_2 -水-岩作用同位素地球化学行为,可为识别和量化时间尺度上咸水层储层 CO_2 的不同捕获过程提供直接有力的证据,进一步为揭示 CO_2 -水-岩作用的地球化学反应机理拓宽研究思路。薛璐等^[36]通过模拟地质封存 CO_2 泄漏产生的超高 CO_2 浓度对植物稳定碳同位素组成 $\delta^{13}\text{C}$ 的影响,分析 C_3 、 C_4 植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值与超高 CO_2 浓度之间的关系,结果发现 C_3 和 C_4 植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值能够迅

速响应 CO_2 浓度的变化,可以利用 C_4 植物 $\delta^{13}\text{C}$ 可有效识别 CO_2 的泄漏。但由于 CO_2 封存地点地质和大气条件差异较大,示踪剂、 CO_2 在扩散介质(土壤、岩石、大气和水体等)中的吸附扩散行为会直接影响示踪效果^[37]。

2.2.3 光纤监测技术

光纤监测技术是一种利用光纤作为传感器的监测手段,作为新兴技术,在碳封存监测中展现出独特的优势,主要包括光纤布拉格光栅(FBG)技术和分布式声波传感(DAS)技术。两者的对比数据见表3。

表3 FBG与DAS技术对比

Table 3 Comparison of FBG and DAS technologies

特性	FBG	DAS
测量类型	点式(离散传感器)	分布式(连续空间覆盖)
物理量	应变、温度	振动、声波、应变(动态)
空间分辨率	毫米级(单点)	米级(分布式)
灵敏度	高(静态测量)	中高(动态测量)
成本	较高(需刻写光栅)	较低(普通光纤即可)
适用场景	局部精细化监测(如关键结构点)	大范围动态监测(如管线、储层)

2.2.3.1 光纤布拉格光栅(FBG)技术

FBG 技术通过监测光栅反射波长的变化,实现对温度、压力、应变等物理量的高精度测量。FBG 传感器不仅具有高灵敏度和抗电磁干扰的特点,还能在一根光纤上集成多个传感器,实现分布式测量^[38-41]。

FBG 技术的工作原理是,通过将单模光纤纤芯暴露在具有周期性图案的强紫外光下,这种曝光会永久性地增大光纤纤芯的折射率,并产生固定的折射率调制,即光栅。当光波通过 FBG 时,满足布拉格条件的光(即光栅周期约为入射光波长的一半时),会产生强烈的反射,而其他波长的光则几乎不受影响,继续传输。当 FBG 受到应力或温度的扰动时,其中心波长漂移呈线性变化,为应力和温度等物理参数的检测提供了一种很好的传感元件^[42]。布拉格条件是实现光波反射的特定波长条件,可以用公式表示为: $\lambda_B = 2n_e A$,其中 λ_B 是被反射的光波长, n_e 是光纤的有效折射率, A 是折射率变化的周期。

当外部环境(如温度、应力等)发生变化时,这些参数会改变,从而改变 Bragg 中心波长。通过检测反

射光的 Bragg 波长变化,可以获得待测参量的变化情况,如图 4 所示。

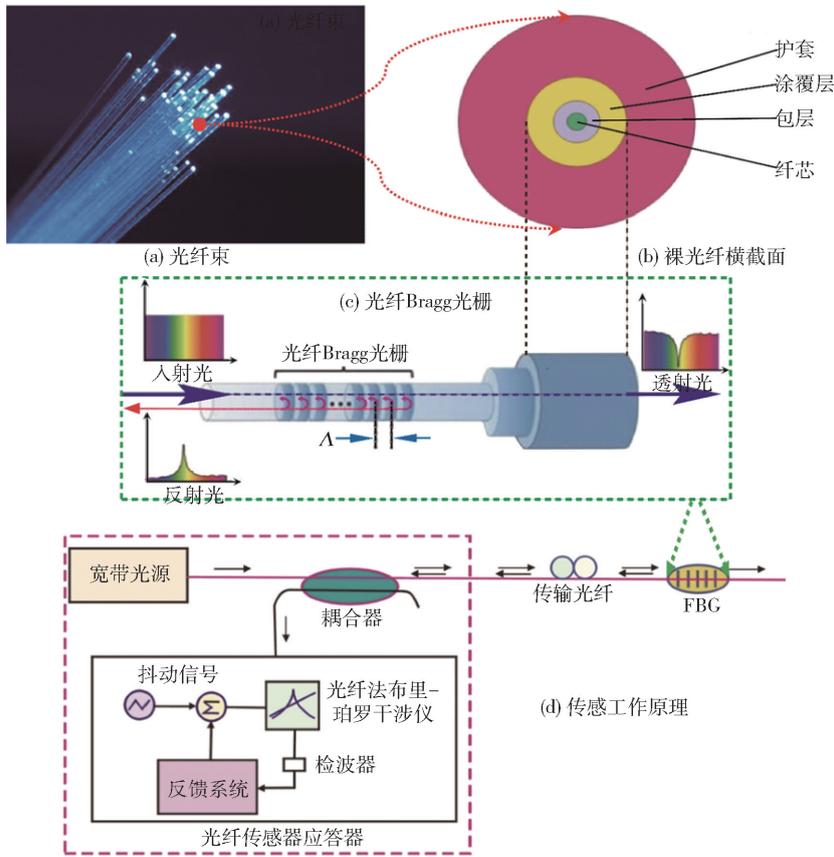


图 4 FBG 结构及原理示意图^[43,44]

Fig. 4 Schematic diagram of FBG structure and principle^[43,44]

在一些高温高压的封存项目中,FBG 传感器被广泛应用于储层内部压力和温度的实时监测,为预测储层的稳定性和封存效果提供了重要数据。例如,在美国某深部盐穴封存项目中,通过在储层中布置大量的 FBG 传感器,实时监测储层的温度和压力变化,及时发现了一些潜在的泄漏风险,并采取了有效的封堵措施。

2.2.3.2 分布式声波传感(DAS)技术

DAS 技术通过监测光纤沿线的声波振动信号,实现对 CO₂ 注入过程中的动态变化和泄漏监测。DAS 技术具有高空间采样密度、实时监测和抗电磁干扰等优点,能够提供长距离、连续的监测数据。

DAS 技术是通过测量由光纤轴向应变的改变引起的光相位变化实现声波感知的,其传感原理分为感知和定位两部分。声波作用在光纤上,会使光纤在轴向产生应变,从而改变光纤中瑞利散射信号

的相位。DAS 通过监测后向瑞利散射光的相位变化,得到光纤的轴向应变变化,最终实现声波和振动的定量感知。此外,由于不同位置的瑞利散射光可通过其反射回光纤发射端的时间进行区分,因此根据到达时间可以实现不同位置的声波传感^[45]。分布式声波传感系统主要使用了相位光时域反射(OTDR, optical time domain reflectometry)技术,基于背向瑞利散射光的相位和时间的关系曲线实现声波信号探测。OTDR 的主要结构如图 5 所示。

在一些大规模的 CO₂ 封存项目中,DAS 技术被用于监测 CO₂ 注入过程中的羽流迁移、诱发地震活动以及油井和储存的完整性。例如,在澳大利亚的 Otway 项目中,通过在多个监测井和注入井中布置 DAS 系统,监测了 CO₂ 注入期间的压力变化、羽流迁移路径以及诱发的微地震活动,为项目的实施提供了有力保障。

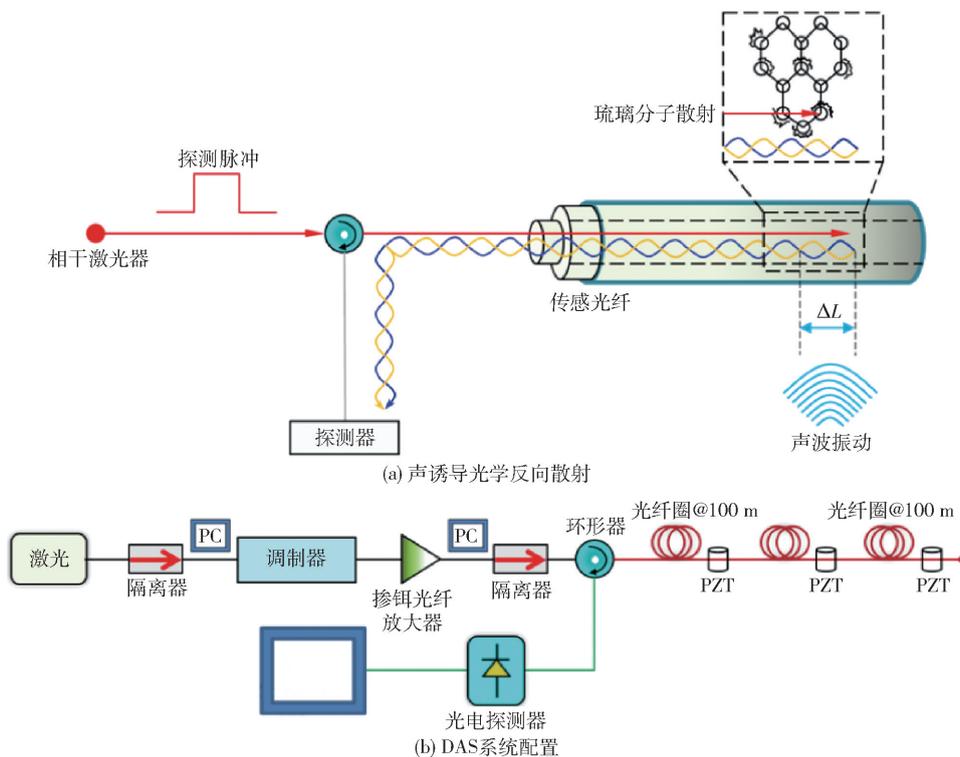


图 5 OTDR 系统的典型结构^[44,46]

Fig. 5 Typical structure of an OTDR system^[44,46]

2.2.3.3 光纤监测技术的优势

光纤监测技术(如 FBG、DAS)在碳封存监测中展现出显著的综合优势(表 4)。相较于地球物理监测技术依赖周期性数据采集(如时移地震)和化学监测技术需定期采样分析的局限性,光纤技术支持连续实时监测,动态响应 CO₂ 迁移和储层变化,具备秒级响应能力;在空间分辨率上,分布式光纤(DAS)可达米级连续覆盖,FBG 单点精度达毫米级,远超地球物理监测的百米级分辨率与化学监测的离散采样缺陷。光纤体积小、重量轻,可灵活嵌入井筒、储层或管线,适应高温高压等复杂环境,而地球物理设备布设庞大,化学监测受地形限制^[47-51];其抗电磁干扰特性与耐恶劣工业环境的优势,显著优于易受环境噪声影响的地球物理方法和易受大气条件干扰的化学手段。此外,单根光纤可集成温度、应变、振动等多参数测量,突破传统技术单一物理场或化学参数的监测瓶颈。长期运维成本低(如 DAS 使用普通光纤)、适合大规模部署的特点,进一步凸显其成本效益。澳大利亚 Otway 项目通过 DAS 精准追踪 CO₂ 羽流迁移,德国 Ketzin 项目利用 FBG 实时监测超临界 CO₂ 相态。工程实践中,验证了光纤技术在

数据密度、时效性及全生命周期适用性上的不可替代性,为碳封存安全提供了高灵敏度、分布式覆盖与多技术协同的核心技术支撑。

3 光纤监测在碳封存中的工程应用

3.1 澳大利亚 Otway 项目

Otway 项目是澳大利亚首个完整的从源到汇的碳封存研究项目,也是碳封存领导论坛(CSLF)和国际能源署(IEA)认可的国际合作项目。该项目由澳大利亚温室气体技术合作研究中心(CO₂ CRC)牵头,旨在研究和示范二氧化碳(CO₂)的地质封存技术^[52]。项目的主要目标是研究和示范 CO₂ 的地质封存,涵盖 CO₂ 的捕获、运输、注入和长期监测。在此基础上,预测在枯竭的 Naylor 油田有 150% 的所需储存容量,并且通过数值模拟研究得出该地点有足够的实现该项目目标^[53]。然而,公众对 CCS 技术的主要担忧在于储存的二氧化碳可能会发生泄漏,从而抵消减排效果。D. Etheridge 等^[54]开发了一种大气监测策略,用于检测和量化二氧化碳地质储存项目潜在的泄漏情况,并将其应用于 CO₂ CRC Otway 项目,以验证其有效性。虽然这种监测方法

表 4 光纤监测技术与地球物理、化学监测技术的对比

Table 4 Comparison of optical fiber monitoring technology with geophysical and chemical monitoring technology

特性	光纤监测技术	地球物理监测技术	化学监测技术
实时性	支持连续实时监测, 动态响应 CO ₂ 迁移和储层变化	依赖周期性数据采集(如时移地震), 实时性较低	需定期采样与分析, 响应时间滞后
空间分辨率	分布式光纤(DAS)可达米级; FBG 单点精度高	地震监测分辨率较低(百米级), 重力/电磁监测覆盖范围大但精度有限	依赖离散采样点, 难以实现空间连续覆盖
部署灵活性	光纤体积小、重量轻, 可嵌入井筒、储层或管线, 适应复杂环境	设备庞大(如地震检波器阵列), 布设复杂, 成本高	需布设地表或井口采样点, 受地形和地质条件限制
抗干扰能力	抗电磁干扰, 耐高温高压, 适用于恶劣工业环境	易受环境噪声影响(如机械振动、电磁场)	易受大气条件(风速、湿度)和背景化学因素干扰
多参数监测	单根光纤可集成温度、应变、振动等多参数测量	单一物理场参数(如地震波速、电阻率)	单一化学参数(如 CO ₂ 浓度、同位素比值)
成本效益	长期运维成本低, DAS 使用普通光纤, 适合大规模部署	设备购置与维护成本高(如高精度重力仪、地震源)	重复采样与实验室分析成本高, 示踪剂添加增加复杂度
环境适应性	适用于高温高压储层, 可长期稳定工作	深部储层信号衰减严重, 浅层监测效果更佳	浅层泄漏检测有效, 但对深部储层动态响应能力弱
数据维度	提供时空连续的高密度数据, 支持人工智能动态建模与预警	数据离散且频次低, 依赖人工解译	数据稀疏, 需结合模型推测 CO ₂ 迁移路径

能够一定程度上监测到 CO₂ 的泄漏, 但是仅能够在 CO₂ 泄漏并迁移至地表甚至大气中才可以起到一定的效果, 并不能做到提前预测、预防 CO₂ 泄露。因此, 需要监测地下 CO₂ 的羽流状态, 即 CO₂ 在储层中的迁移路径, 以便做出相应的策略。

Roman Pevzner 等^[55]通过试验探索地球物理方法探测和监测含盐地层中温室气体混合物的能力, 即评估时移地震反射成像方法是否能够检测到向 Paaratte 含水层中注入少量 CO₂、CH₄ 混合物所引起的地震响应变化。所开发的可行性评估工作流程及其在 Otway 现场的应用结果可用于评估地震方法检测和监测其他 CCS 项目中温室气体泄漏的能力。R. Pevzner 等^[56]通过研究发现, 将检波器埋置在地下 4 m 深处, 显著降低了环境噪声水平, 提高了数据的信噪比, 平均噪声减少 20 ~ 30 dB, 见图 6。通过使用埋置的高灵敏度检波器阵列, 实现了比使用地面阵列更好的信噪比, 检测到了注入的 CO₂/CH₄ 羽流, 并观察到了其演化过程。并且使用永久接收器阵列减少了对土地权属人的影响, 缩短了采集时间, 降低了地震监测的成本。在 CO₂ 地质封存项目中, 监测井的数量是有限的, 因此时移地震技术在油藏模拟校准中的作用显得更加重要。而 Stanislav

Glubokovskikh 等^[57]基于 CO₂ CRC Otway 项目 2C 阶段, 通过调查时移地震声波来反演表征一个小型 CO₂ 羽流的一般能力。首先, 使用来自平坦羽流的简单 TL 地震响应来研究所提出的工作流程的优点和局限性。然后, 使用真实的虚拟 Otway 2C 勘测来评估 1D 卷积模型对于 3D 地震数据的适用性。合成试验的真实模型可量化不同类型噪声的影响, 并为噪声场反演结果中的羽流检测设计一个统计标准。该标准考虑了岩石刚度降低的幅度和观测异常的空间连通性。通过比较观测到的 CO₂ 羽流演变和历史匹配的油藏模拟来闭合循环。最后, 总结了所提出的羽流成像工作流程的优点和潜在的弱点, 并将其与现有技术进行比较。

通过研究, 系统证明了时移地震在小规模 CO₂ 泄漏监测中的有效性。优化的反演工作流程能够高精度提取羽流形态, 并为储层模型校准提供关键约束, 对 CCS 项目的安全监测与法规合规性验证具有重要应用价值。

Alexey Yurikov^[58]等在 Otway 第 3 阶段项目中详细介绍了多井 4D VSP 数据的采集和处理, 然后对 CO₂ 羽流的时移图像进行了分析, 并与 Otway 项目中使用的其他地震监测方法进行了交叉验证, 显

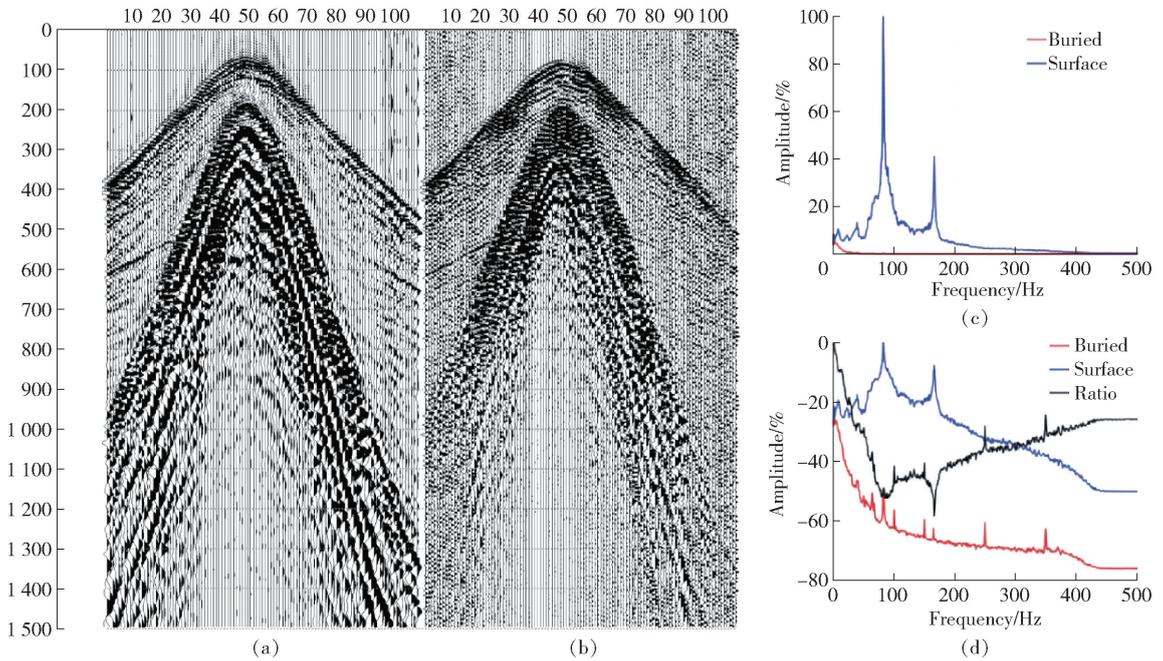


图 6 (a)、(b) 地下(左)和地表(右)地震检波器数据比较; (c)、(d) 埋地和地表地震检波器数据在线性(上)和对数(下)尺度上的环境噪声水平比较^[56]

Fig. 6 (a), (b) Comparison of geophone data below ground (left) and surface (right); (c), (d) Comparison of ambient noise levels on linear (top) and logarithmic (bottom) scales of buried and surface geophone data^[56]

示出四维分布式声波传感垂直地震剖面(4D DAS VSP)有潜力用于监测气体注入到气体饱和的储层。通过时移差异体显示,在 2C 阶段 CO₂羽状体内部存在微弱但清晰的时移异常响应。该 2C 阶段羽状体的空间定位通过四维地表地震数据得以确认^[59]。这一发现具有双重意义:首先表明第 3 阶段羽状体已向东扩展,与 2C 阶段羽状体形成连通并引发其再活化;其次在 2C 阶段羽状体内部观测到时移差异。需要指出的是,这种异常响应强度较弱,仅略微超出噪声水平,且其成因(羽状体增厚或 CO₂饱和度和增加)有待定量研究验证。结果证实,4D DAS VSP 作为储层监测的灵敏工具,具备探测气驱注气过程的潜在能力。

3.2 德国 Ketzin 项目

Ketzin 试验场是德国唯一的二氧化碳储存场地,也是欧洲首个在咸水含水层中进行陆上二氧化碳储存试验的场地,Ketzin 场地的 CO₂注入操作被证明是安全、平稳和可靠的。注入井 Ktzi 201 和监测井 Ktzi 200 和 Ktzi 202 分别建在距离注入井 50 m 和 112 m 处^[60]。而在 2012 年钻了一口新的监测井

Ktzi 203。

该项目中,为了保证监测的有效性、准确性,采用了多种监测技术,包括地震监测、地球物理、地球化学和微生物学等方法。在井中配备了大量的布拉格光栅电缆和传感器。通过压力温度日志和 DTS (分布式温度传感)系统监测到 CO₂到达后井内的物理化学变化,包括密度梯度的变化和 CO₂的相态(超临界、液体或气体)。井下压力监测显示,储层压力对注入操作的变化几乎达到即时响应。DTS 监测不仅支持了典型的操作过程,而且有助于长期控制 CO₂注入管道的完整性,这对于任何安全长期的 CO₂注入和储存都是必要的^[61-62]。

Bernd Wiese^[63]研究了德国 Ketzin 基于分布式温度传感(DTS)和压力数据的 CO₂注入井的热力学和热传递情况,提出了 2 种确定热流密度的方法,即热力学方法和屈曲方法,并对两者性能进行了比较。在 10 m 和 548 m 之间积分计算的热通量与观察到的温度屈曲的时间行为如图 7 所示,表明两者随时间变化吻合得很好。通过结合 2 种方法,可补偿各自的不足,提高热流计算的准确性,DTS 数据可以提

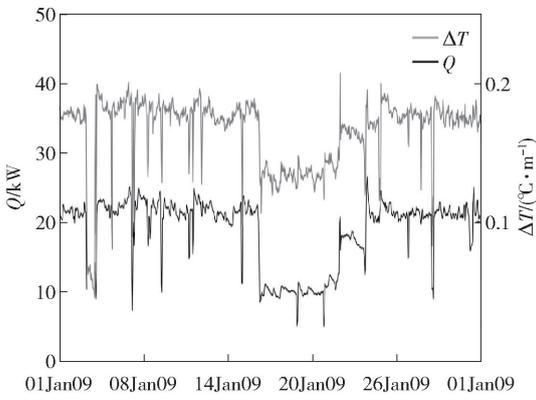


图7 在 10 ~ 548 m 深度范围内的热力学计算的热通量 Q (左轴, 下曲线) 和温度屈曲 T 的大小 (右轴, 上曲线) 的比较^[63]

Fig.7 Comparison of the magnitude of the thermodynamically calculated heat flux Q (left axis, lower curve) and temperature buckling T (right axis, upper curve) at depths ranging from 10 m to 548 m^[63]

供有关井操作期间热交换过程的更深入见解。

J. Götz 等^[64] 在德国 Ketzin 二氧化碳 (CO_2) 储

存场地进行的一项垂直地震剖面 (VSP) 试验, 试验使用了 23 个源点位置和 4 个井中的光纤电缆串联部署作为接收器阵列。

通过在每个源位置堆叠长振动扫描, 生成了垂直地震剖面 (VSP) 数据, 其信噪比与使用地震电话获得的数据相当。试验生成了一个 3D VSP 立方体, 补充了大规模 3D 表面地震测量, 提供了注入井附近储层的高分辨率图像。在 Ktzi202 井中, DAS-VSP 数据与常规三分量地震电话 VSP 数据进行了比较, 如图 8 所示。结果显示, DAS 技术在未固井的套管段中保持了更高的信噪比。DAS VSP 数据的采集快速且成本效益高, 尤其适用于复杂采集几何形状。永久部署的光纤电缆使得在井的不同生命周期进行时间延时 VSP 分析成为可能, 减少了与传统电缆采集相关的后勤工作。

4 结论与展望

4.1 结论

本文深入探讨了光纤监测技术在碳封存领域的应用现状、优势以及面临的挑战, 并通过对多个实际

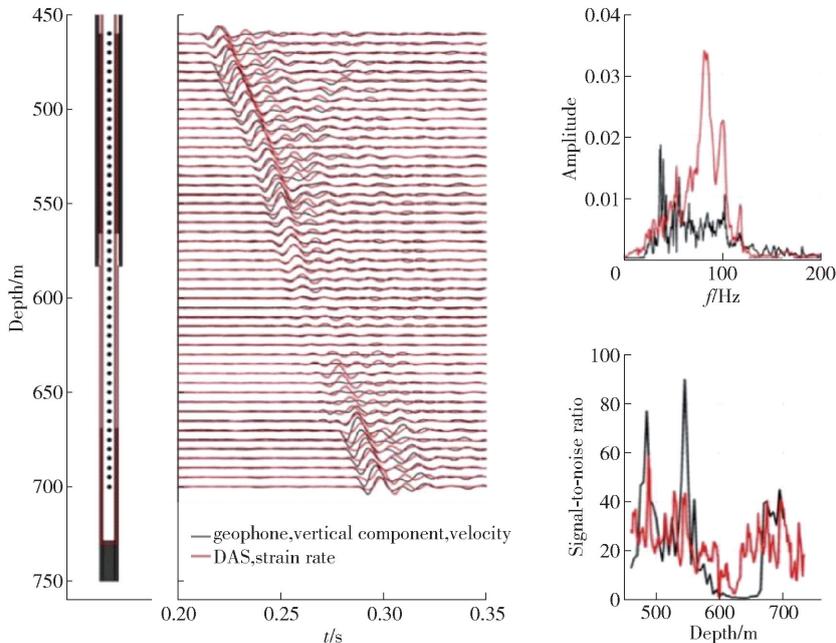


图8 钻孔地震检波器垂直分量和 DAS 记录之间的比较 (左图: Ktzi 202 井的完井图, 以及 3C 检波器 (黑点) 和光纤电缆 (红线) 的位置; 中间: 地震道的摆动图; 右图: 450 ~ 700 m 深度段的振幅谱和信噪比较)^[64]

Fig.8 Comparison between the vertical component of the borehole geophone and the DAS record (left: completion diagram of well Ktzi 202 with the location of the 3C geophone (black spot) and fiber optic cable (red line); Middle: Oscillation diagram of a seismic track; right: comparison of amplitude spectra and signal-to-noise ratio at a depth of 450 ~ 700 m)^[64]

工程案例的分析,验证了该技术在提升碳封存安全性与效率方面的显著成效。光纤监测技术以其精准、实时、适应性强的特点,已经成为碳封存监测体系中不可或缺的一部分,为实现全球碳中和目标提供了重要的技术支撑,主要结论如下。

1) 光纤监测技术展现巨大潜力。光纤布拉格光栅(FBG)技术凭借高精度测量应变、温度等参数的优势,可实时监测储层压力与泄漏风险;分布式声波传感(DAS)技术则利用其分布式声波感知能力,动态追踪二氧化碳(CO₂)羽流迁移及诱发地震活动。二者结合,实现了对储层压力、温度、形变及CO₂迁移路径的精准监测,为碳封存过程提供了重要数据支持。

2) 工程案例验证技术可靠性。澳大利亚 Otway 项目和德国 Ketzin 项目均为光纤监测技术的成功应用实例。Otway 项目通过时移地震技术等监测手段,检测到了注入的 CO₂ 羽流,并观察到了其演化过程;Ketzin 项目则结合地震监测、地球物理、地球化学和微生物学等方法,证明了监测的有效性、准确性。这些工程实践验证了光纤系统在高温高压环境下的稳定性和可靠性。

3) 多技术融合提升监测效能。通过将光纤监测技术与地震、化学监测技术等进行协同,显著提升了监测系统的综合性能,实现了对封存过程的全方位覆盖,优化了数据精度与监测效率。

4.2 展望

新一代的光纤传感监测技术在 CO₂ 地质封存工程应用中的潜力巨大,是深地智能监测的首选工具,目前正在全球 CCUS 领域加速推广使用。未来光纤监测碳封存的发展空间广泛,今后的主要发展方向和趋势如下。

1) 优化传感器设计,降低成本。当前光纤监测技术受限于部署成本、低频信号敏感性及温度补偿复杂性问题。未来研究应聚焦于优化光纤传感器材料与结构设计,以降低成本并增强环境适应性,推动技术的更广泛应用。

2) 开发多源数据融合算法。开发多源数据融合算法,提升异常检测与动态预测能力。通过整合光纤监测数据与其他监测手段获取的信息,实现更精准的风险预警和决策支持,进一步提高碳封存监测的智能化水平。

3) 构建全生命周期监测体系。构建涵盖碳封

存项目全生命周期的监测体系,结合人工智能技术实现实时预警与决策支持。这一体系将能够对封存过程进行持续监控,并及时响应潜在的泄漏风险,确保碳封存的安全性和长期有效性。

4) 推动标准化与规模化应用。目前光纤监测技术在碳封存领域的应用尚未形成统一标准。未来需推动标准化技术规范的制定与规模化应用,加速商业化进程,促进该技术在全球范围内的推广和应用,使其成为碳封存安全的核心支撑,助力全球碳中和目标的实现。

[参考文献]

- [1] Ghamdan AL-khulaidi, Yankun Sun, Ahmed. G. Alareqi. Review on carbon capture, utilization, and storage for enhancing gas recovery[J]. Energy Fuels, 2024, 38:8355 - 8384.
- [2] Ghamdan AL-khulaidi, Yankun Sun, Xu Zhang, et al. Spatiotemporal impact of CO₂ injection rates on plume dynamics and fault reactivation in geological reservoirs: insights from numerical simulation[J]. Energy Fuels, 2025, 39: 2122 - 2142.
- [3] 张墨翰. 二氧化碳捕集、运输与储存技术进展及趋势[J]. 当代化工, 2017, 46(9): 1883 - 1886.
- [4] 陈兵,肖红亮,李景明,等. 二氧化碳捕集、利用与封存研究进展[J]. 应用化工, 2018, 47(3): 589 - 592.
- [5] 盛依依. 二氧化碳捕集技术研究及工业化进展[J/OL]. 现代化工, 1 - 6[2025 - 03 - 04].
- [6] 金伟,李贵弘,阮虹嘉,等. 碳中和目标下二氧化碳捕集路径及技术研究进展[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 2024, 49(3): 265 - 274.
- [7] 张双梅,刘群,姚芳芳,等. 基于专利数据的 CO₂ 捕集工艺节能降耗化学吸收剂的技术研究方向研究[J]. 中国发明与专利, 2024, 21(S1): 50 - 59.
- [8] 郑建坡,史建公,刘志坚,等. 二氧化碳管道输送技术研究进展[J]. 中外能源, 2018, 23(6): 87 - 94.
- [9] 廖志伟,羊俊敏,钟翔宇,等. 二氧化碳地质封存技术研究进展综述[J]. 地下空间与工程学报, 2024, 20(S1): 497 - 507.
- [10] 马馨蕊,梁杰,李清,等. 咸水层 CO₂ 地质封存研究进展及前景展望[J]. 海洋地质前沿, 2024, 40(10): 1 - 18.
- [11] 姜睿. 二氧化碳封存技术在油气行业应用进展[J]. 当代石油石化, 2022, 30(2): 34 - 38.
- [12] 何学秋,田向辉,宋大钊. 煤层 CO₂ 安全封存研究进展与展望[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(1): 212 - 219.
- [13] 邱宁,付启承,刘彬,等. 玄武岩 CO₂ 矿化封存实验备选

- 场地勘查和潜力评价: 雷州半岛田洋火山断陷盆地实例[J/OL]. 环境工程学报, 1-11[2025-03-06].
- [14] 包琦, 赵文韬, 王春凯, 等. 玄武岩 CO₂ 矿化反应效率与封存潜力评价[J]. 洁净煤技术, 2024, 30(10): 110-119.
- [15] 吴春丽, 陈哲, 夏勇, 等. 工业固废矿化封存 CO₂ 的研究进展及固碳潜力评估[J]. 广东建材, 2024, 40(11): 174-178.
- [16] 王展鹏, 刘琦, 叶航, 等. CO₂ 地质封存泄漏监测技术研究进展[J]. 环境工程, 2023, 41(10): 69-81.
- [17] Bowen Chen, Qi Li, Yongsheng Tan. Caprock sealing for geologic CO₂ storage: research advances, challenges and prospects[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2025.02.006>.
- [18] 谢启红, 褚程程, 邵先杰, 等. 基于不同地质体封存二氧化碳机理的泄漏路径分析[J]. 煤炭技术, 2024, 43(11): 152-156.
- [19] 张成龙, 郝文杰, 胡丽莎, 等. 泄漏情景下碳封存项目的环境影响监测技术方法[J]. 中国地质调查, 2021, 8(4): 92-100.
- [20] 章月华, 刘彦, 吕庆田, 等. 二氧化碳地质封存地球物理监测技术研究进展与应用展望[J]. 中国地质, 2025, 52(1): 159-179.
- [21] 张军华, 杨梅, 陈永芮, 等. CO₂ 驱油地震监测技术的研究现状与进展[J]. 石油地球物理勘探, 2025, 60(2): 532-543.
- [22] 陈筱, 杨希濮, 肖鹏, 等. 时移地震技术在油藏监测中的应用——以西非深水扇 A 油田为例[J]. 石油物探, 2023, 62(3): 538-547.
- [23] Osama Massarweh, Ahmad S. Abushaikha. CO₂ sequestration in subsurface geological formations: a review of trapping mechanisms and monitoring techniques [J]. Earth-Science Reviews, 2024. DOI:10.1016/j.earscirev.2024.104793.
- [24] H. Goto, T. Ishido, M. Sorai. Numerical study of reservoir permeability effects on gravity changes associated with CO₂ geological storage: implications for gravimetric monitoring feasibility [J]. Greenhouse Gases: Science and Technology, 2020, 10(3): 557-566.
- [25] A. N. Vasilevskiy, Yu. A. Dashevsky. Gravity monitoring at oil and gas fields: data inversion and errors [J]. Russian Geology and Geophysics, 2015, 56: 762-772.
- [26] 章月华, 刘彦, 吕庆田, 等. 二氧化碳地质封存时延重力监测技术及发展前景[J]. 地球物理学进展, 2025, 40(2): 495-510.
- [27] César Barajas-Olalde, Donald C. Adams, Ana Curcio, et al. Application of electromagnetic methods for reservoir monitoring with emphasis on carbon capture, utilization, and storage [J]. Minerals, 2023, 13: 1308.
- [28] Rita Streich, Michael Becken, Oliver Ritter. Imaging of CO₂ storage sites, geothermal reservoirs, and gas shales using controlled-source magnetotellurics: modeling studies [J]. Chemie der Erde, 2010, 70: 63-75.
- [29] Franz May, Svenja Waldmann. Tasks and challenges of geochemical monitoring [J]. Greenhouse Gases: Science and Technology, 2012, 2: 9-16.
- [30] 白云云, 师洋阳, 卢美娟, 等. 双碳目标下 CO₂ 地质封存泄露途径及监测方法研究进展[J]. 榆林学院学报, 2021, 31(6): 43-46.
- [31] 滕腾, 陈新新, 李鹏飞, 等. 无人机遥感监测技术在 CO₂ 地质封存泄漏风险事故监测中的应用[J]. 水土保持通报, 2018, 38(3): 136-142.
- [32] 陈浮, 杨宝丹, 马静, 等. CO₂ 地质封存泄漏对土壤微生物群落的影响[J]. 中国矿业大学学报, 2016, 45(6): 1285-1293, 1299.
- [33] Peter M. Berger, Bracken Wimmer, Abbas Iranmanesh. Sensitivity thresholds of groundwater parameters for detecting CO₂ leakage at a geologic carbon sequestration site [J]. Environ Monit Assess, 2019, 191: 685.
- [34] Elizabeth H. Keating, Julianna Fessenden, Nancy Kanjorski, et al. The impact of CO₂ on shallow groundwater chemistry: observations at a natural analog site and implications for carbon sequestration [J]. Environ Earth Sci, 2010, 60: 521-536.
- [35] 刘子剑, 张楠, 张凤君. CO₂ 地质封存技术及其同位素在咸水层的化学行为研究进展[J]. 科技导报, 2015, 33(11): 108-113.
- [36] 薛璐, 马俊杰, 胡芊, 等. C4 植物稳定碳同位素分析助力地质封存 CO₂ 泄漏风险识别[J]. 干旱区资源与环境, 2020, 34(1): 79-86.
- [37] 金显杭, 方佳伟, 王永胜, 等. 咸水层 CO₂ 地质封存泄漏监测的示踪剂优选[J]. 天然气化工(C1 化学与化工), 2020, 45(5): 72-76.
- [38] 孙艳坤, 李琦, 李霞颖, 等. 基于光纤 Bragg 光栅的油气工业实时监测技术研究进展[J]. 科技导报, 2015, 33(13): 84-91.
- [39] Yankun Sun, Qi Li, Chengkai Fan. Laboratory core flooding experiments in reservoir sandstone under different sequestration pressures using multichannel fiber Bragg grating sensor arrays [J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2017, 60: 186-198.

- [40] Yankun Sun, Qi Li, Chengkai Fan, et al. Fiber-optic monitoring of evaporation-induced axial strain of sandstone under ambient laboratory conditions [J]. *Environ Earth Sci*, 2017, 76:379.
- [41] Yankun Sun, Qi Li, Duoxing Yang, et al. Investigation of the dynamic strain responses of sandstone using multi-channel fiber-optic sensor arrays [J]. *Engineering Geology*, 213:1–10.
- [42] 丁宝艳, 赵强, 陈东营, 等. 光纤布拉格光栅压力传感技术与应用进展 [J]. *光通信研究*, 2024 (3): 75–86.
- [43] Yankun Sun, Ziqiu Xue, Hyuck Park, et al. Optical sensing of CO₂ geological storage using distributed fiber-optic sensor: from laboratory to field-scale demonstrations [J]. *Energy and Fuels*, 2021, 35:659–669.
- [44] Yankun Sun, Jinqun Liu, Ziqiu Xue, et al. A critical review of distributed fiber optic sensing for real-time monitoring geologic CO₂ sequestration [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2021, 88:103751.
- [45] 李豪, 范存政, 肖翔鹏, 等. 散射增强微结构光纤及其分布式传感技术研究进展 [J]. *光学学报*, 2024, 44 (1): 173–187.
- [46] 朱胜强, 刘聪, 庄德玉, 等. 分布式光纤声波传感技术在煤矿带式输送机状态监测中的应用 [J]. *煤矿机电*, 2024, 45(6): 43–50.
- [47] Yankun Sun, Ziqiu Xue, Tsutomu Hashimoto. Fiber optic distributed sensing technology for real-time monitoring water jet tests; implications for wellbore integrity diagnostics. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2018, 58[J]:241–250.
- [48] Yankun Sun, Ziqiu Xue, Tsutomu Hashimoto, et al. Distributed fiber optic sensing system for well-based monitoring water injection tests—a geomechanical responses perspective [J]. *Water Resources Research*, 2020, 56(1): e2019WR024794–e2019WR024794.
- [49] Yankun Sun, Ziqiu Xue, Tsutomu Hashimoto, et al. Optically quantifying spatiotemporal responses of water injection-induced strain via downhole distributed fiber optics sensing [J]. *Fuel*, 2021, 283.
- [50] Yankun Sun, Ziqiu Xue, Tsutomu Hashimoto. Towards a spatiotemporal understanding of subsurface water injection-induced strain responses tracked by fiber-optic sensing [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2021, 95:104209.
- [51] 丁宝艳, 赵强, 陈东营, 等. 光纤布拉格光栅压力传感技术与应用进展 [J]. *光通信研究*, 2024(3): 75–86.
- [52] 张二勇. 澳大利亚 Otway 盆地二氧化碳地质封存示范工程 [J]. *水文地质工程地质*, 2012, 39(2): 131–137.
- [53] Tess Dance. Assessment and geological characterisation of the CO₂ CRC Otway Project CO₂ storage demonstration site: from prefeasibility to injection [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2013, 46: 251–269.
- [54] D. Etheridge, A. Luhar, Z. Loh, et al. Atmospheric monitoring of the CO₂ CRC Otway Project and lessons for large scale CO₂ storage projects [J]. *Energy Procedia*, 4: 3666–3675.
- [55] Roman Pevzner, Milovan Urosevic, Eva Caspari, et al. Feasibility of time-lapse seismic methodology for monitoring the injection of small quantities of CO₂ into a saline formation, CO₂ CRC otway project [J]. *Energy Procedia*, 2013, 37: 4336–4343.
- [56] R. Pevzner, M. Urosevic, K. Tertysnikov, et al. Stage 2C of the CO₂ CRC Otway Project: seismic monitoring operations and preliminary results [J]. *Energy Procedia*, 2017, 114: 3997–4007.
- [57] Stanislav Glubokovskikh, Roman Pevzner, James Gunning, et al. How well can time-lapse seismic characterize a small CO₂ leakage into a saline aquifer: CO₂ CRC Otway 2C experiment (Victoria, Australia) [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2020, 92:102854.
- [58] Alexey Yurikov, Konstantin Tertysnikov, Sinem Yavuz, et al. Seismic monitoring of CO₂ geosequestration using multi-well 4D DAS VSP: Stage 3 of the CO₂ CRC Otway project [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2022, 119:103726.
- [59] Roman Pevzner, Milovan Urosevic, Dmitry Popik, et al. 4D surface seismic tracks small supercritical CO₂ injection into the subsurface: CO₂ CRC Otway Project [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2017, 63:150–157.
- [60] Tianxiang Liu, Qi Li, Xiaying Li, et al. A critical review of distributed fiber optic sensing applied to geologic carbon dioxide storage [J]. *Greenhouse Gases: Science and Technology*, 2024, 14:676–694.
- [61] Axel Liebscher, Fabian Möllera, Andreas Bannach, et al. Injection operation and operational pressure-temperature monitoring at the CO₂ storage pilot site Ketzin, Germany-Design, results, recommendations [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2013, 15:163–173.
- [62] Hilke Würdemann, Fabian Möller, Michael Kühn, et al. CO₂ SINK-From site characterisation and risk assessment to monitoring and verification: one year of operational ex-

- perience with the field laboratory for CO₂ storage at Ketzin, Germany [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2010, 4: 938 – 951.
- [63] Bernd Wiese. Thermodynamics and heat transfer in a CO₂ injection well using distributed temperature sensing (DTS) and pressure data [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2014, 21: 232 – 242.
- [64] Julia Gotz1, Stefan Luth, Jan Henninges, et al. Vertical seismic profiling using a daisy-chained deployment of fibre-optic cables in four wells simultaneously—case study at the Ketzin carbon dioxide storage site [J]. *Geophysical Prospecting*, 2018, 66: 1201 – 1214.

Current status, application and prospect of optical fiber monitoring in carbon sequestration

SUN Yankun^{1,2}, ZHOU Liangchang^{1,2}, LONG Tao^{1,2}, SUN Tianyu^{1,2}, PENG Peng^{1,2},
ZHANG Xu³, JIN Chengjie^{1,2}

(1. Hubei Provincial Key Laboratory of Oil and Gas Exploration and Development Theory and Technology,
China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China;

2. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources Ministry of Education,
China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China;

3. Geological Exploration and Technology Institute of Anhui Province, Energy Exploration Center, Hefei 230041, China)

Abstract: Carbon capture and storage (CCS) technology, a critical way in combating climate change, hinges its safety on high-efficiency monitoring solutions. The paper provides an in-depth analysis of the current application of fiber-optic monitoring in CCS, with particular emphasis on Fiber Bragg Grating (FBG) and Distributed Acoustic Sensing (DAS). Owing to its high-precision measurement of strain, temperature and other parameters, FBG enables real-time surveillance of reservoir pressure and leakage risk. DAS, leveraging its fully distributed acoustic sensitivity, dynamically tracks CO₂ plume migration and induced seismicity. Integrating fiber optics with seismic and chemical monitoring markedly enhances system performance, delivering full-coverage surveillance of the storage process. Nonetheless, challenges persist in high-temperature/high-pressure environments, low-frequency signal sensitivity, and cost-effectiveness. Future efforts should focus on sensor optimization, intelligent algorithm development, and standardization to boost reliability and scalability, thereby securing CCS operations.

Keywords: carbon capture and storage (CCS); leakage monitoring; fiber optic monitoring; Distributed Acoustic Sensing; multi-technology convergence; Fiber Bragg Grating ▲