



压缩空气储能智慧场站盐穴储气库监测技术发展与应用研究现状

谢宇轩¹, 高齐², 宋渤¹

(¹西安交通大学能源与动力工程学院热流科学与工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710049;

²中电建(肥城)新能源有限公司, 山东 肥城 271600)

摘要: 随着新能源与智能化技术的不断发展, 压缩空气储能智慧场站对盐穴储气库监测的需求也与日俱增, 然而目前相关的系统性研究较为有限。本文充分借鉴火电、油气开采等领域的成熟经验, 以盐穴储气稳定性影响因素为切入点, 围绕盐穴温度与压力、气体注采参数、盐岩蠕变及损伤3个方面, 系统总结了各项监测内容的必要性、工作原理及技术研究进展, 重点分析了多种现有主流与新兴技术在盐穴监测情境下的适用性, 并提供了针对性的工程应用方案。通过综述现有研究与可行方案, 为盐穴储气库监测的多维度立体化监测网络发展提供理论指导。

关键词: 压缩空气储能; 智慧场站; 盐穴储气库; 监测技术

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2026.0348

中图分类号: TK 02

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2026) 08-3244-18

Research status on development and application of monitoring technology for salt cavern gas storage in compressed air energy storage intelligent field stations

XIE Yuxuan¹, GAO Qi², SONG Bo¹

(¹Key Laboratory of Thermo-Fluid Science and Engineering, Ministry of Education, School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi, China; ²Power China (Feicheng)

Renewable Energy Co., Ltd., Feicheng 271600, Shandong, China)

Abstract: With the rapid development of renewable energy and intelligent technologies, the demand for monitoring salt cavern gas storage in intelligent compressed air energy storage field stations has increased substantially. However, comprehensive and systematic studies in this area remain limited. Drawing on mature monitoring practices established in thermal power generation and the oil and gas industries, this study reviews the current state of research and the engineering applications of monitoring technologies for salt cavern gas storage. Focusing on the key factors affecting the stability of salt cavern storage, the necessity, operating principles, and recent technological advances in monitoring systems are systematically analyzed from three perspectives: salt cavern temperature and pressure, gas injection and withdrawal parameters, and salt rock creep and damage. Particular emphasis is placed on

收稿日期: 2026-04-23; 修改稿日期: 2026-05-26。

基金项目: 中电建新能源集团股份有限公司科技项目 (14DDJSYJFGS-05-2025-013)。

第一作者: 谢宇轩 (2002—), 男, 硕士研究生, 研究方向为压缩空气储能, E-mail: 3124103263@stu.xjtu.edu.cn; 通信作者: 宋渤, 副教授, 研究方向为新型物理储能, E-mail: song.bo@xjtu.edu.cn。

引用本文: 谢宇轩, 高齐, 宋渤. 压缩空气储能智慧场站盐穴储气库监测技术发展与应用研究现状[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(8): 3244-3261.

Citation: XIE Yuxuan, GAO Qi, SONG Bo. Research status on development and application of monitoring technology for salt cavern gas storage in compressed air energy storage intelligent field stations[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(8): 3244-3261.

evaluating the applicability of both established and emerging monitoring technologies for salt cavern gas storage and proposing targeted engineering solutions for their practical implementation. By comprehensively reviewing the current state of research and available engineering approaches, this study provides theoretical guidance and technical support for the development of multidimensional, integrated monitoring systems for salt cavern gas storage in intelligent compressed air energy storage field stations.

Keywords: compressed air energy storage; intelligent field station; salt cavern gas storage; monitoring technology

随着全球能源结构转型和以可再生能源为核心的新型能源体系建设, 间歇性能源的规模化消纳与平稳化调度成为当代能源领域的重要研究方向。作为大规模长时性物理储能技术的代表, 压缩空气储能 (compressed air energy storage, CAES) 以其清洁高效、综合经济性以及安全实用性等特性, 被认为是降低弃电率、提高电网稳定性的关键手段和有效途径^[1]。

基于 CAES 技术的电站, 依据所选用储气库类型的不同, 可分为空气储气罐^[2]、人工硐室^[3]、废弃矿井^[4]、盐穴^[5]、多孔地层^[6]、含水储层^[7]等多种形式。相比于空气储气罐, 以盐穴与人工硐室为代表的地下储气库普遍具有单位功率平均投资低、储量高等特性^[8-9], 但也受到区域地质条件的制约。目前, 已建成并投入商业运行的 CAES 电站以盐穴 CAES 电站为主^[10]。

智慧场站架构作为物联网技术的拓展应用, 在我国能源体系普遍信息化、智能化的趋势下, 已然成为能源领域的重要发展方向^[11]。从定义角度看, 智慧场站是指以高度自动化、充分信息化、整体智能化为主要特征, 基于现代信息技术, 以实现设备智能监控、智慧运维管理、实时能源调度与系统能效优化为目标的一种新型场站形态^[12]。其全站一体化架构符合传统能源产业及储能电站的发展路径, 但由于盐穴埋深大、温度和压力波动频繁、受围岩长期蠕变影响等特点, 当前相关研究仍局限于光伏、风电等新能源领域^[13-14], 缺乏对 CAES 电站, 尤其是盐穴储气库监测环节的针对性探讨。

本文将围绕基于盐穴储气库的 CAES 电站, 在现有理论研究成果的基础上, 结合 CAES 盐穴储气库的固有特征, 尝试探索 CAES 智慧场站的盐穴储气库监测方案。

1 盐岩蠕变力学研究

盐穴来源于对地下盐矿的水溶开采, 其围岩以盐岩和泥岩为主, 由于具有低孔隙率、低渗透率以及高可塑性等特性, 盐穴被认为是一种优良的地下储能结构^[15-16]。然而近年来, 有实验研究和工程实践表明既有盐穴腔体在长期的循环工况下存在失效风险, 且与盐岩蠕变、地质构造等因素有关。

盐岩蠕变通常源于材料内部变形机制间复杂的共同作用, 国内外围绕温度、应力、成分等对蠕变行为表征的影响, 开展了广泛的试验研究与理论探索^[17-18]。Wang 等^[19]基于盐岩非线性蠕变模型的数值对比分析, 阐明了蠕变时的疲劳效应对盐穴稳定性的重要影响。Zhao 等^[20-21]、Lny 等^[22]的研究也证实了蠕变损伤和疲劳损伤之间相互作用的负面效应。而 Li 等^[23]、Lu 等^[24]基于对含杂质盐岩的破坏研究则表明, 围压的增加能够有效抑制这种负面作用, 但会致使盐岩的破坏模式转变为塑性膨胀破坏。Lyu 等^[25]建立了一种分数阶导数蠕变-损伤本构模型, 揭示了盐穴在长期运行下的应变和体积收缩行为。Liu 等^[26]研究了三轴蠕变试验参数下 Norton-Power 模型结果与实际值间的差异, 指出了试验条件在预测超深地层盐穴收缩方面的局限性。Li 等^[27]通过对盐岩长期蠕变疲劳试验数据的对比分析, 指出盐穴的蠕变形变量与加载应力速率成反比, 其形变速率又与应力状态变化相关。Zhang 等^[28]通过研究气体压力与循环频率对盐穴稳定性的影响, 发现偏低的恒定气体压力和压力循环频率会加剧盐穴的位移、塑性区和体积收缩。Dong 等^[29]结合盐岩三轴蠕变试验及数值模拟结果, 认为盐岩的早期载荷历史将导致其机械性能下降, 进而加剧蠕变过程中的瞬时应变与瞬态蠕变。Li 等^[30]针对不同温度下盐岩的三轴蠕变-疲劳试验, 阐明了温度提升对盐岩蠕变速

率和整体形变量的促进作用。Chen等^[31]提出了一个热-力耦合模型,以探究温度对盐穴应力反应和蠕变变形的影响,证实了气体注采循环的温度波动对盐穴收缩行为的作用。Li等^[32]的一项研究指出在快速采气及低压空闲期中,盐穴在积累热损伤和顶部特殊形状等多重因素下存在垮塌风险。Noroozi等^[33]系统性地研究了腔体形状对盐穴稳定性的影响,图1的部分结果表明,腔体的形状差异会显著改变盐穴的长期体积收缩率。Lyu等^[34]提出了一种基于PSO算法的理论模型,揭示了盐穴形状和埋深在地表沉降过程中的重要作用。Vitali等^[35]研究了覆盖岩层刚度对盐穴群上方应力场及盐岩蠕变变形的影响,揭示了盐穴区域地表沉降的部分成因。Yu^[36]的一项研究则表明,在长期运行下,即便工况压力选择合适,盐穴的蠕变仍会引发无可避免的地表沉降。Zeng等^[37]研究了受损盐岩的形变程度与其吸湿速度的关系,发现吸湿现象通过加速腔体边缘的变形与裂缝演化,加剧了腔体的收缩。Zhang等^[38]分析了盐岩成分与蠕变规律的相关性,相同偏应力下的不同成分盐岩表现出了显著的蠕变速率差异。Zhang等^[39]则进一步研究了杂质含量及分布对盐岩蠕变特性和破坏模式的影响,结果显示杂质的低流变性能能够有效延缓盐岩的稳态蠕变速率,进而提升其长期强度。然而,对于已成型盐穴,早期载荷历史、埋深、覆盖岩层特性和围岩成分等均为固定参量,其稳定性监测指标应围绕温度、压力、气体注采参数、蠕变及损伤情况等方面展开。

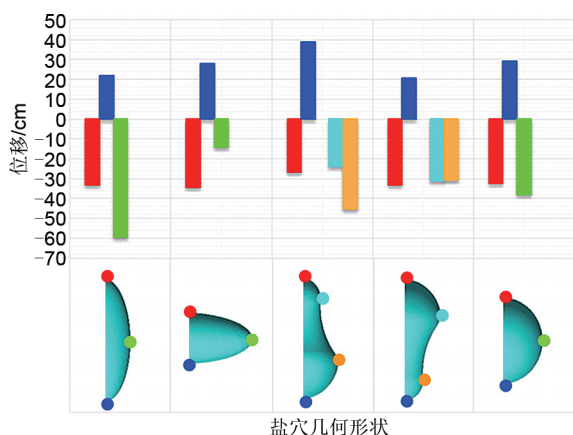


图1 几何形状对盐穴收敛的影响^[33]

Fig. 1 The influence of geometric shapes on the convergence of salt caverns^[33]

2 盐穴温度与压力监测

2.1 地下温压监测技术

虽然温度和压力相关参量的监测对于CAES电站的运维方案和经营规划而言至关重要,但受限於技术条件、施工成本、地质情况等因素,目前主流工程实践与部分试验研究还是仅以井口数据为主^[26,40],如图2所示。然而,一方面我国盐穴普遍深度达800~1200 m,这意味着井筒的长度将远大于盐穴本身尺度^[41];另一方面随着盐穴内气体压力的不断上升,储气密度会逐步增大^[42],这将使得盐穴腔体顶部气体压力与井口压力数据间出现显著差异,并进一步影响智慧场站算法和运维部门对于盐穴状态的判断。也有学者提出可以利用大数据技术实现对盐穴物理场的低成本、高精度测量,如蒋华全等^[43]的一项针对天然气盐穴存储的研究指出,通过设计和引入基于井口参数的数据预测模型,可以实现对井底压力的高精度预测。但该类预测模型的相关应用实例较为有限,长期可靠性仍有待进一步研究。

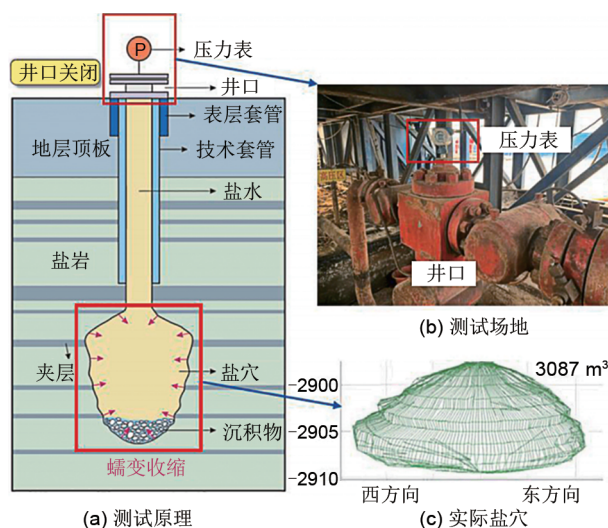


图2 测量井口压力数据用于地层蠕变测试^[26]

Fig. 2 The pressure data measured at the wellhead are used for the test of formation creep^[26]

此外,作为CAES系统中地面设施与地下储气库的联通结构,井筒的完整性监测也应纳入考量。大量研究表明,井筒的失效情境以管柱变形、材料腐蚀、金属损伤等状态下的泄漏为主,而这些情境已被证实与结构温度和压力存在关联性^[44-47]。

基于上述分析,为满足CAES智慧场站对盐穴

和井筒的监测需求，有必要设计一种能够实现对地下温度、压力进行长距离连续在线监测的方案。

得益于多年的科学研究和丰富的工程应用，油气开采领域的地下储气库及井筒检测技术具备较高成熟度，这对于 CAES 地下温压监测的设计具有重要参考价值。考虑到基于电磁学、同位素等原理的常规检测技术在实时性和经济性等方面的局限性，CAES 系统的地下温压监测可以围绕分布式光纤传感（distributed fiber optic sensor, DFOS）技术展开^[48]。该技术原理如图 3 所示，其主要以光纤材料为传感器和信号传输介质，利用光脉冲在非均匀环境下的散射特性，以及背向散射光对外界环境变化的敏感性，通过对背向散射光光学路径的持续解析，实现对光纤布设区域温度场、压力场的反演^[49]。目前，相关设备已初步投入实际应用，并在各类测井试验中表现良好，如 Feo 等^[50]利用分布式光纤温度（DTS）、声波（DAS）传感设备，证实了该技术在海洋立井环境下检测早期井涌的可行性；Schölderle 等^[51]同样基于 DTS 和 DAS，制造了一种温度时均分辨率 0.13 K、空间采样间隔 1 m 的光纤监测系统，其测井结果符合理论预期。可见，基于 DFOS 的 DTS 和 DAS 监测架构能够基本满足地下监测需要。

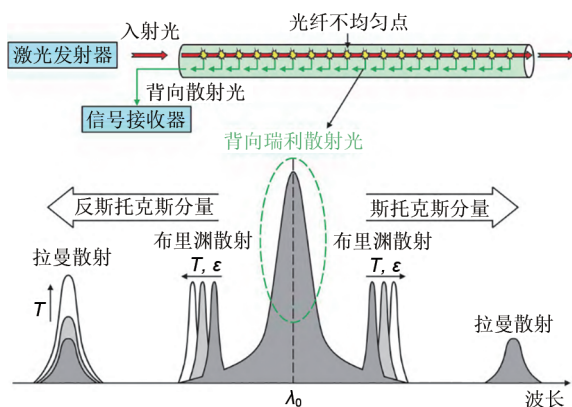


图 3 分布式传感光纤监测原理示意图^[49]
Fig. 3 Schematic principle of distributed optical fiber-based monitoring^[49]

在结构方面，DFOS 一般根据光缆中所嵌入的光纤数量，分为单模光纤和多模光纤，具体如图 4 所示。单模光纤的长距离损耗较低，信号精度较高，被广泛应用于长途、高比特率场合；而多模光纤的信道容量较高，且具备良好的长期稳定性，但

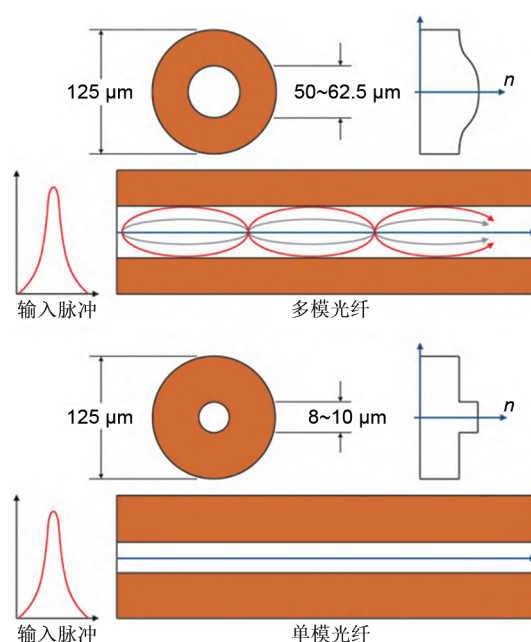
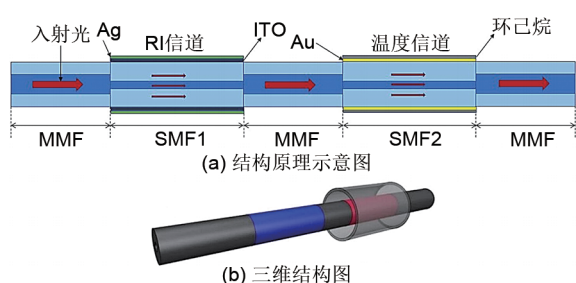
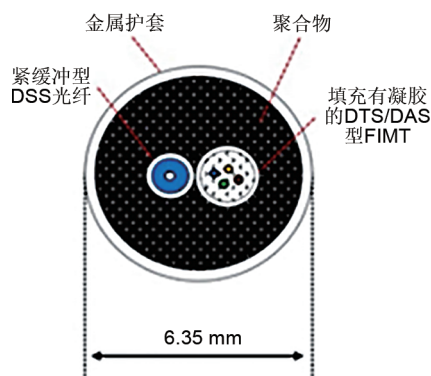


图 4 入射光在单模光纤和多模光纤中的传输^[49]
Fig. 4 Transmission of incident light via single & multi mode optical fibers^[49]

模间色散现象的存在限制了其传输距离，适用于复杂信号传输场景^[52-53]。

从原理角度，DTS 技术基于拉曼散射，对光功率存在一定的需求，常采用多模光纤；而 DAS 技术采用背向瑞利散射光，其光强显著高于其他类型散射光，为进一步提升信号光精度，降低损耗，多采用单模光纤^[54]。但在当前的实际应用中，这种理论性分析并不完全准确，技术的快速迭代，使得采用单模光纤的 DTS 系统也能取得良好的检漏效果^[55]。此外，还有学者研究了单模与多模组合的光纤结构在性能表现上的特点，如 Yan 等^[56]设计了一种多-单-多-单-多（MSMSM）光纤结构的双通道表面等离子体共振传感器（图 5），双通道实验表明该传感器具备远高于同类型传感器的灵敏度；Dey 等^[57]则对比研究了 MSM 与 SMS 结构的性能差异，证实了 MSM 结构在温度、应变监测灵敏度方面的优势。

考虑到单一光纤无法满足地下长距离多目标背景下的监测需要，光缆内不同类型光纤间的布置方式也就变得尤为重要。其中各光纤间的强耦合布置是一类探索方向，如 Luo 等^[58]设计了一种集成温度和应力监测功能的光缆，用于工况下井筒的完整性监测，该光缆采用黏合光纤的布置模式（图 6），通过将分布式光纤应变传感（DSS）的单模光纤黏合在 DTS 松套光纤外部，在降低光缆成本的同时，

图5 MSMSM传感器结构示意图^[56]Fig. 5 Schematic diagram of the MSMSM sensor structure^[56]图6 黏合光缆的横截面结构^[58]Fig. 6 Cross-section of the bonded fiber optic cable^[58]

实现了对井筒温度和应力的同步测量。但目前多数应用仍以各光纤独立布置形式为主^[59-60]。

2.2 DFOS 设备安装与应用

对于地下DFOS设备，基于监测指标的倾向性与对象系统的特性选用合适的安装方案，是其实现预期性能的关键之一。通常而言，为确保光纤结构与井筒结合的稳固性，DFOS设备会先在地表与井筒套管或注采管管节完成固定，并与后者同步安装。根据DFOS在井筒中安装位置的不同，共分为3种安装方式：永久式安装、半永久式安装和可回收式安装^[61]，如图7所示。

永久式安装是利用特制夹具，将DFOS设备捆扎在套管外侧，并经由水泥胶结实现对井下套管-DFOS结构的永久性固封。该方案的优势在于结构耦合性强、监测数据质量高、受井筒运行维护影响小^[58]，可用于辅助开展固井质量评估，同时还能够兼顾对地温梯度、地质沉降、套管及水泥环密封完整性^[62]的在线监测。但由于光纤的脆性与弯曲敏感性^[63]，在实际操作中，该方案受钻井斜度、扶正器间距等因素影响，极易因井下碰撞造成DFOS设

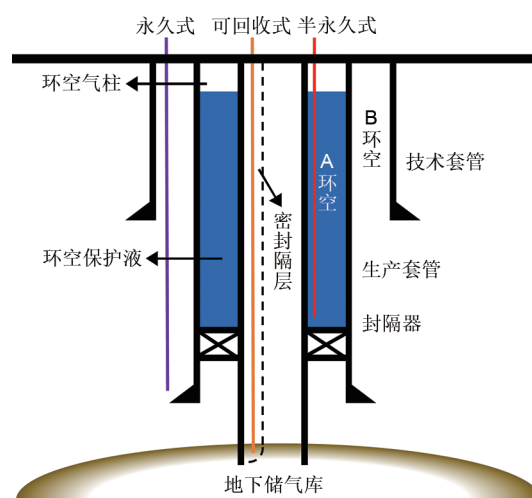


图7 地下DFOS安装方式

Fig. 7 Underground DFOS installation method

备损坏。

半永久式安装是指将DFOS设备安装于套管与注采管之间的环形空间内，实际为避免设备位移而多将其直接捆扎固定于注采管外壁面或套管内壁面^[61]（图8），而根据捆扎形式前者又可进一步分为平行捆扎和缠绕捆扎^[49]。由于以DAS为主的部分光纤仅对轴向应变和振动较为敏感，缠绕捆扎形式的综合监测效果往往更优^[64]。该方案的优势是布置方式灵活、安装便捷，通过设置导管，可以实现必要时将DFOS设备取出与更换，而浸泡在环空保护液中能有效保障设备的寿命和长期稳定性，同时由于紧贴注采管，还能够兼顾对井筒轴向温度场分布、气体流量曲线、井下气体泄漏^[65]的高精度实时监测。但一方面，相关气体流量监测需要引入特殊封隔器以便DFOS设备穿越；另一方面由于设备整体与注采气体完全隔离，该方案与永久式安装均无法实现对井下压力的监测。

可回收式安装是将DFOS设备直接安装于注采管内部，经由固定装置紧贴注采管内壁或悬空放置。该方案的优势是安装简单快捷、可与多种传感器配合使用、可实现DFOS设备的回收和替换，有效解决了设备故障情况下前两类安装方案更换困难或无法更换的问题，而借由在底端增设传感器，还有助于实现井下多参数同步监测。但由于注采管内工作环境较为恶劣，为避免设备磨损和腐蚀，通常需要配合特制防护导管或线缆使用。针对这一短板，可以采用一体化制造的方式在注采管内部增设密封隔层，如图8所示，在隔绝注采气体与DFOS

设备直接接触的同时，通过在设备侧注入氮气^[66]，维持注采管内压力平衡以及 DFOS 设备对温度、压力等井筒参数的监测功能。

总体而言，DFOS 设备的各类地下安装方式均有利弊，具体选用应结合不同地质条件和工程需要，权衡成本与风险。

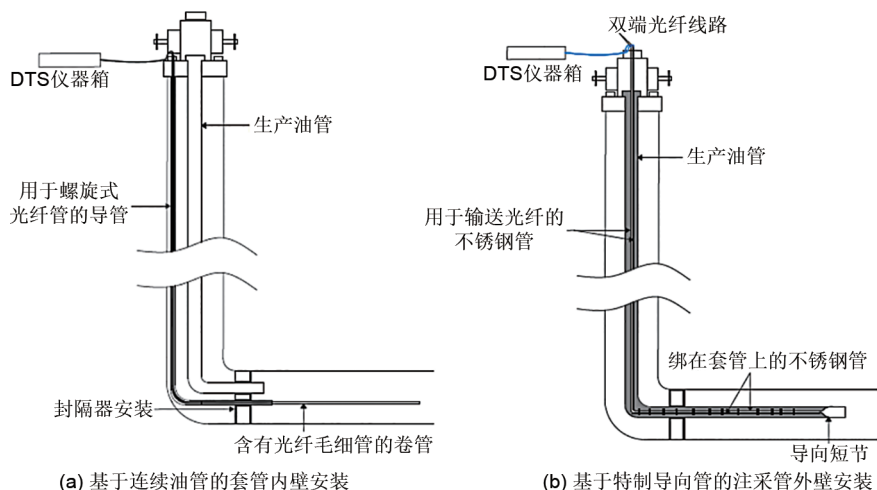


图 8 两类半永久式安装形式^[61]
 Fig. 8 Two types of Semi-Permanent Installation configurations^[61]

3 气体注采参数监测

如上文所述，注采循环频率、加载应力速率等指标同样会对盐穴的稳定性产生影响。其中，注采循环频率主要来源于 CAES 系统对电网侧宏观调控的响应，无需单独监测；而加载应力速率则主要取决于注采气体流速和流量。此外，为降低注采循环过程中可能产生的结垢损耗和腐蚀风险，还需考虑对注采气体的含水量、颗粒物浓度开展监测。

3.1 含水量监测

通常，压缩空气在进入盐穴前会经由汽水分离器等设备完成干燥，以降低空气水分对盐穴容积、管道腐蚀的影响。然而，在造腔的注气排卤工序中，由于盐穴底部不溶性碎屑的存在，为方便取管，排卤管末端往往需要高于碎屑层，这使得腔底会不可避免地存在由盐水和不溶性碎屑组成的盐水池^[67]。具体流程如图 9 所示。

盐水池与注气含水量是导致盐穴内湿度波动的重要因素。Zeng 等^[68]采用 TMFD 模型（thermo-moisture-fluid dynamics model，热-湿-流动力学模型）对盐穴内空气湿度波动规律进行了全面分析，结果表明，在注气过程中，腔内相对湿度会随温度压力的升高而逐渐降低，并同步促进盐水池内卤水的蒸发；在采气减压过程中，腔内温度的下降

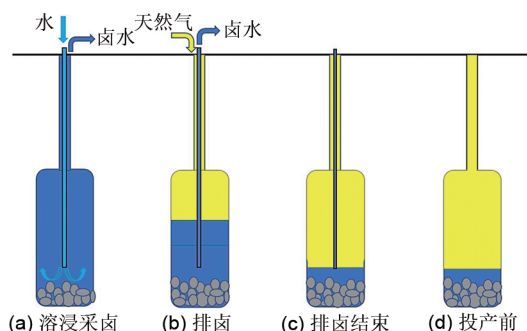


图 9 造腔工序示意图^[67]
 Fig. 9 Schematic diagram of the cavity creation process^[67]

会使得水蒸气达到过饱和状态，进而引发腔内凝结和潮解现象。这种循环相变有助于缓和注采循环过程中的腔体温度波动，同时也是盐岩实现自我修复的必要条件和促进剂^[69-70]，但会对盐穴长期可用体积和储能容量产生影响^[68]。

3.2 颗粒物浓度监测

长期运行环境下，盐穴注采管存在结垢和腐蚀风险。Cai 等^[71]探究了在实验室条件下压缩空气携带 NaCl 的可能性，结果显示空气流无法借由蒸发提取出盐水池中的盐分，并指出井壁腐蚀可能来源于压力循环引发的盐水池飞溅。而 Zhao 等^[72]则通过仿真模拟证实了在腔底无卤水条件下，高速气流能够卷吸大量尺寸在 5 mm 左右的不溶性碎屑或盐

渣颗粒进入管道,威胁管道安全。然而,这些结论无法解释部分基于大高宽比且存在盐水池的盐穴CAES系统出现管道腐蚀和结垢的现象。

部分地质学研究指出,腔体表面盐岩的风化和磨损作用会使得地下气体携带包含NaCl在内的多种矿物质颗粒,而NaCl本身的吸湿性,让其在腔内潮湿环境下,主要以溶液液滴或小颗粒形式存在于气溶胶中,并跟随流场运动^[73-74]。在采气时,NaCl溶液或颗粒会吸附在注采管道内壁,进而引发管道结垢与腐蚀。

从腐蚀机理角度看,在高含氧量、高湿度和含盐工况下,注采管道的腐蚀主要分为盐腐蚀和氧腐蚀两类。其中,盐腐蚀主要与Cl离子有关,后者较强的穿透与吸附能力,使其能够轻易渗透含Mo、Ni等元素的钢材的自然氧化膜,引起钢材缺陷处的局部腐蚀^[75-76]。而氧腐蚀则源于液相溶解氧由氧化还原反应引起的电化学腐蚀,其腐蚀机理如图10所示,在这一过程中,氧由于自身的强去极化作用,可以在较低的含量或分压下引发较为严重的管道腐蚀破坏^[77]。

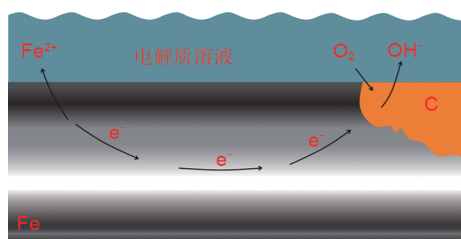


图10 钢材管道氧腐蚀机理示意图^[77]

Fig. 10 Schematic diagram of the oxygen corrosion mechanism in steel pipelines^[77]

3.3 流速和流量监测

注采气体的流速和流量是CAES系统常见的监测指标,其必要性源于对全站系统功率调控的量化信息指导功能。通过结合电网侧的调峰需求与各关键流段的流速、流量数据,调整管道阀门等设备,进而实现系统的负荷响应。而对于盐穴CAES系统,尤其是大容量的机组而言,注采气体流速与流量还是判断注采管道磨损情况的重要依据之一。

井筒的卷管规格通常受限于国标而无法参照装机容量定制。为满足释能阶段膨胀机组的气体流量需求,工程上往往采用增大注采气流速、增设注采井以及选用大规格井筒管道的综合方案。然而,由

于NaCl颗粒的存在,腔内高压气体在排出过程中形成的高速气固两相流会造成一定程度的注采管道冲蚀磨损,造成安全隐患。

冲蚀磨损一般指固体颗粒冲击导致靶向材料表面发生损伤或破坏的现象^[78]。目前聚焦于气固两相流的研究普遍认为,冲蚀磨损率与气流流速、颗粒物尺寸和质量流量、管道材料、管道结构等因素有关^[79-80]。这表明注采气体的流速存在安全阈值,即在注采管尺寸固定的前提下,单个井筒的日注采气体量存在上限。Yang等^[81]根据API RP 14E设计标准,结合不同冲蚀模型在井筒关键结构处的模拟结果,认为气体注采管道的临界冲蚀系数(C值)应设置为180,动态工况下也建议保持在175~200区间范围内(图11),以确保设备的长期使用寿命。

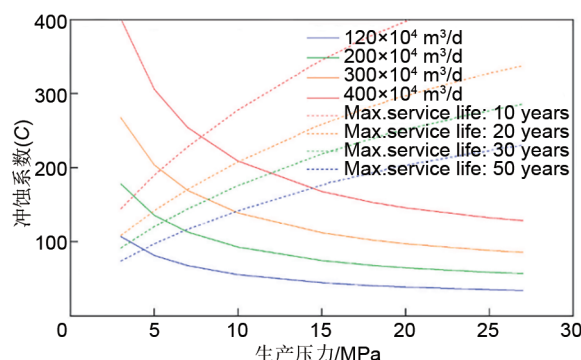


图11 大尺寸井临界冲蚀系数图:产砂率为1.0 g/s条件下,不同压力和产气速度时的冲蚀系数计算值^[81]

Fig. 11 Chart of critical erosion coefficient for large-size wells: Erosion coefficient calculated under different pressure and gas production speed under the condition of sand production rate of 1.0 g/s^[81]

部分研究还显示,在连续水平采气工况下,注采管道的冲蚀磨损并非线性过程,由于流场与冲蚀效应达成了某种平衡,磨损量会随时间呈现明显的收敛趋势^[82]。但目前缺乏针对CAES系统竖井长期注采循环下冲蚀磨损影响的进一步研究。

3.4 技术综述与安装应用

现有的气体含水量、颗粒物浓度、流速和流量监测技术及设备种类丰富,具体选用时应充分考虑CAES系统注采气对设备的长期腐蚀风险和干扰程度,兼顾量程、灵敏度等指标的适配性。

在含水量方面,目前主流或前沿的在线监测技术包含可调谐二极管激光吸收光谱技术、近红外光

谱技术、石英晶体微天平技术和冷镜技术等^[83]。其中,可调谐二极管激光吸收光谱技术是一类基于朗伯-比尔定律,通过气体不同成分的吸收光谱差异测定气体组分的非接触式监测技术,测量响应快、灵敏度高,能够实现对多种气体组分的实时监测^[84],但应考虑腐蚀和盐颗粒物造成的潜在影响;近红外光谱技术同样基于待测气体组分的吸收光谱实现监测,适用于高压工况,但需要多元校准模型辅助预测^[85];石英晶体微天平技术利用电压下石英晶体吸附水分后振荡频率的下降程度反映气体含水量,响应快、污染物耐性良好,但也存在测量实时性差、带液工况精度低、亲水涂层易损坏等问题;冷镜技术依据冷却式镜面仪器表面产生露点的温度换算对应条件下的气体含水量,结构简单,但测量精度低、结果受流体中潜在污染物影响较大。

在颗粒物浓度方面,满足在线监测要求的技术以非接触式为主,有电荷感应法、光散射法等^[86]。其中,电荷感应法利用颗粒物经碰撞、摩擦、化学反应所产生的静电荷与探测器金属电极之间的电荷感应原理工作,维护成本低廉、灵敏度高,适用于高颗粒物浓度环境,但低浓度工况误差大、电荷极性不稳定^[87-88];光散射法基于 Mie 散射理论,依据颗粒物质的量浓度与散射光强度的正比关系实现监测,相关设备构成通常如图 12 所示,具备长期实时性良好、低浓度工况精度低等优势,但采样管路易堵塞、需频繁维护且对颗粒物尺寸变化较为敏感^[89]。

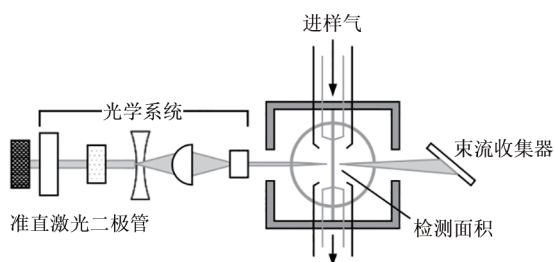


图 12 光散射设备构成简图^[86]

Fig. 12 Schematic diagram of the composition of the light scattering device^[86]

在流速和流量方面,当前适用的相关监测技术有光学、超声波、差压式、速度式等^[90-91]。其中,光学监测技术基于光的折射、反射、散射等现象,包括相位多普勒测速、粒子图像测速等,响应快、抗干扰能力强,通常需要配套分析设备;超声波监

测技术利用介质流速对超声波传播的影响进行测速,工程上常以主动式为主,包括时差式测速、超声多普勒测速等,安装便捷、维护成本低,但对流体热力学性质的变化较为敏感;差压式监测技术通过节流件前后压差计算流量,包括孔板流量计、文丘里管流量计等,成本低、应用广,但应用于含固流体时存在冲蚀和堵塞风险;速度式监测技术根据待测量与流速的关联性反映流量,包括涡轮流量计、涡街流量计等,响应快,但同样受冲蚀或结垢的影响。还有部分监测技术能够实现对气体复数参数的监测,如科里奥利流量计、电容层析成像技术等^[92]。

在设备安装方案上,气体参数监测设备多采用法兰连接或在管道上预留装配孔的安装方式,其应用于井下时会破坏井筒结构的完整性,增加注采管长期运行时的泄漏和腐蚀风险,还会造成相关设备维护困难。因此,目前 CAES 工程普遍将注采气体的流速、流量监测设备布设在井口上下游,但少有针对含水量、颗粒物浓度等气体参数开展监测。

4 盐岩蠕变及损伤监测

盐岩在压力循环过程中所表现出的类金属塑性变形特性,一直是盐穴储气领域的研究重点之一^[93]。这种独特的蠕变特性,赋予了盐岩在一定温度、湿度环境下的损伤自愈能力,保障了盐穴储气时的密封性能,但也会导致腔体收缩,并引发地表沉降或地面塌陷^[94-95]。因此,监测盐穴储气库的围岩蠕变及损伤情况,对 CAES 系统的长期安全尤为重要。

4.1 盐穴直接监测

开展针对盐穴围岩长期蠕变及损伤情况的直接监测是可行方案之一。由于盐穴普遍埋深较大,此类方案往往依托独立监测井实现设备的近距离布置,以降低环境干扰,提升监测精度。相关监测技术以声发射技术、声波反射成像技术、微地震监测技术等为代表。

4.1.1 技术综述

(1) 声发射 (acoustic emission, AE) 技术

材料在外部载荷作用下产生的形变或微裂纹,会引发其内部应力的快速再分布,并使得部分机械能转化为以弹性波形式向外扩散的声能,这一现象被称为 AE^[96]。作为一种被动接收弹性波信号的动

态无损检测技术, AE 技术已广泛应用于岩石形变和损伤监测领域^[97]。大量应用研究表明, AE 技术具有响应快、精度高、灵敏度高等特点, 如 Li 等^[98]通过 AE 技术捕捉了盐岩样品在多阶段循环加载过程中所产生的动态 AE 信号, 认为恒定的下限应力会显著促进盐岩剪切裂纹的发展; Zhu 等^[99]基于拉伸试验监测数据还原了样品 AE 事件时空图, 结果与样品失效过程相吻合; Zeng 等^[100]采用 AE 技术监测了样品在湿度循环工况下的纳米尺度结构演变, 证实了重结晶在缓解裂纹扩展、强化盐岩机械性能方面的积极作用。然而, 当前盐穴的 AE 监测多以实验室场景为主, 尚无工程应用案例。

区别于实验室的有限岩体, 现场监测涉及无限或半无限岩体测量, 此时 AE 能量衰减和设备校准就成为主要难题^[101]。一方面, 作为被动测量技术, AE 监测的准确性高度依赖高频信号源强度。在盐岩地层, 尤其是夹层较多的盐岩层中, 高频信号衰减程度较大, 有效的 AE 信号监测范围仅有几米至几十米。这意味着相应的监测井需要尽量贴近被测盐穴腔体, 且不能破坏盐穴的完整性, 工程难度和风险较高。另一方面, 现场 AE 监测设备通常需根据环境差异进行针对化校准, 但地下环境复杂、干扰信号较多, 导致 AE 监测的实际效果受限。因此, AE 技术在盐穴蠕变和损伤监测中的应用效果仍有待验证, 目前尚难作为可靠方案。

(2) 声波反射成像 (acoustic reflection imaging log, ARIL) 技术

所谓 ARIL 技术, 是在传统声波测井的基础上, 通过增大声源的辐射功率, 使高频声波穿透井壁进入周围地层, 同时利用声波在接触声学阻抗突变界面 (如裂缝、相界面等) 后会形成反射波的特性, 接收并处理反射信号, 最终形成地层界面分布图像的一种技术^[102]。该技术的基本原理如图 13 所示。而根据所利用反射波性质的不同, ARIL 技术又分为单极子反射纵波成像和偶极子反射横波成像, 其中, 后者以较好的流-固界面反射性、方位指向性以及较高的反射波信噪比而广泛应用于油气勘探领域^[103]。

从原理与工程可行性角度看, ARIL 技术适用于盐穴储气库的长期蠕变与宏观损伤监测, 但受限于探测范围与分辨率, 其实际应用仍然存在挑战。部分现场调测案例表明, ARIL 的径向探测距离在

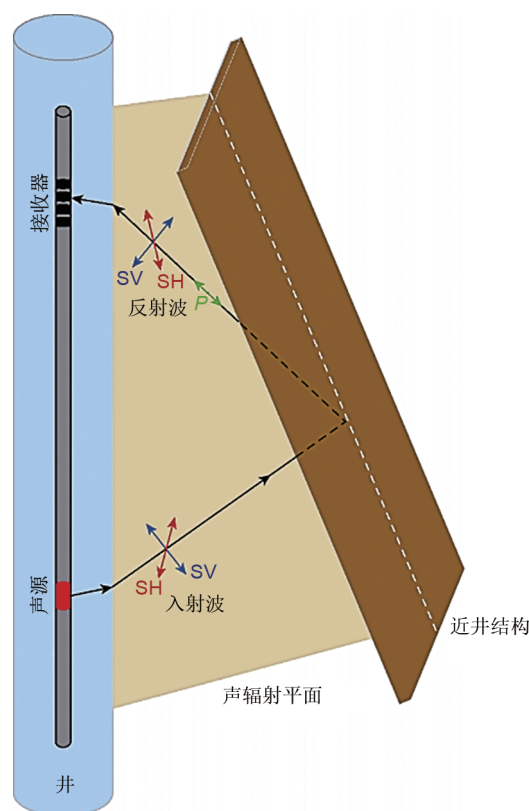


图 13 ARIL 原理示意图^[102]

Fig. 13 Schematic of the ARIL principle^[102]

50 m 左右, 但分辨率仅为 1 m, 远低于盐穴蠕变速率, 且方位角分辨率也有限, 监测效果可能并不理想^[102]。针对该问题, Ran 等^[104]提出了一种综合剪切波变换和克希霍夫偏移的数据处理方法, 通过提取微弱的有效信号, 能够提升 ARIL 技术的成像分辨率; Zhao 等^[105]通过将井眼方位声波反射成像测井仪中的弧形相控阵组合为圆柱形相控阵, 增大了 ARIL 的方位角和仰角分辨率。然而, 有限的探测距离与空间角度分辨率, 仍意味着 ARIL 技术可能需要采用多监测井方案, 才能实现对盐穴储气库的全方位监测。

(3) 微地震 (microseismic, MS) 监测技术

与 AE 技术类似, MS 监测技术同样通过捕捉岩体破裂时所产生的弹性波, 实现对地下被测结构稳定性的评估^[106]。但 MS 的破裂信号的波频率较 AE 的更低, 这也使得 MS 技术具备更大的有效监测距离^[107]。

数据采集环节是 MS 监测技术的关键, 目前主流的采集方法包括地面监测、单井检波器监测以及多井检波器监测等^[108-109]。

地面监测是指将 MS 检波器以特定的布局方案布设在地面或地下数米的浅层地表，通过分析不同点位单分量或三分量检波器接收到的 MS 信号差异，反演 MS 事件位置等信息。该方法成本低、安装便捷、布置灵活、监测范围广，但受环境噪声影响较大、数据信噪比低，并不适用于中深层低能量 MS 信号监测。

单井检波器监测通常将多个检波器间隔布置于单一监测井中（图 14），前者可根据极化分析反演 MS 事件方向与位置，并经由电缆实现数据传输。由于此时检波器更接近 MS 事件源点，该方法的信号质量较高、监测数据精度较好，但监测范围有限，且极化分析算法适配性对结果影响较大，在大规模盐穴监测情境下的效果有限。

多井检波器监测是一种综合了地面监测和井下监测优势的大规模地下储气库监测方法。该方法利用间隔安置于多个监测井内的检波器，在监测整个盐穴所在区域的同时，还兼具井下监测高精度、高信噪比的特点。然而，监测井数量的增加，也导致该方法的建设成本高昂。

综上，从监测范围、精度、场景适用性等方面考量，多井检波器监测法更符合盐穴 CAES 系统对监测稳定性的需求。

4.1.2 井下检波设备安装与应用

常用的 MS 监测技术前端检波设备，依据工作原理可分为电学和光学两类。其中，电学设备包括

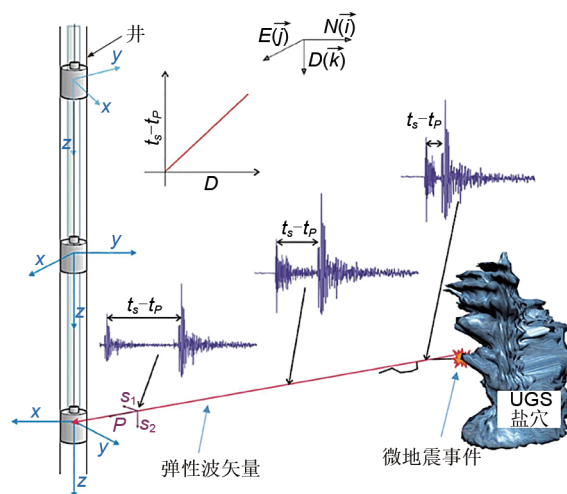


图 14 单井检波器监测示意图^[109]

Fig. 14 Schematic diagram of single-well microseismic geophone monitoring^[109]

压电型、动线圈型和电容型等，具有高灵敏度、对电磁和高温环境敏感等特点；光学设备则以光纤检波器为主，动态范围较宽，但频率范围有限^[110-111]。现有工程案例表明，两种检波设备均可应用于井下 MS 监测。

在安装方面，为最大程度确保信号质量，井下检波设备往往需要紧密贴合在井壁的同侧^[112]。工程上常采用机械、电磁夹持方案，而鉴于盐穴地层可能的温度环境，实际推荐优先选用前者。图 15 展示了 Nakata 等^[113]研发的一种针对增强型地热系统储层的机械夹持式 MS 监测设备，该设备耐受温度为 260℃。

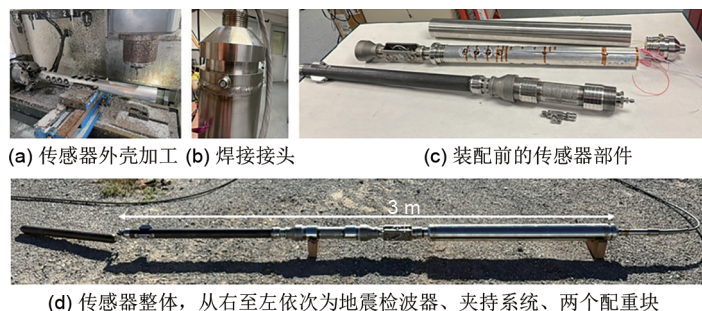


图 15 传感器制造过程^[113]

Fig. 15 Sensor manufacturing^[113]

4.2 盐穴间接监测

针对盐穴长期蠕变可能造成的一系列间接影响开展监测，也是盐穴 CAES 系统监测体系的重要组成部分。根据工程实际调研，相关监测目标以地表沉降为主。而对于上文所述的盐穴腔体收缩现象，则可以考

虑引入火电行业较为成熟的软测量技术进行监测。

4.2.1 地表沉降监测技术

（1）合成孔径雷达差分干涉测量（DInSAR）技术

DInSAR 是地表沉降监测领域的常用技术。

InSAR (interferometric synthetic aperture radar, 干涉雷达) 技术通常利用搭载于极轨卫星上的主动合成孔径雷达传感器, 通过比较不同轨道位置获取的 SAR 干涉像对的相位差, 反演目标区域的地表高程^[114]。在此基础上, DInSAR 能够结合 SAR 干涉像对、轨道数据和外部数字高程模型等

信息, 通过去除地形等非形变相位、将形变相位转换为地表位移的方式, 形成高精度地表位移图像^[115]。具体原理及差异如图 16 所示。但由于存在大气延迟、轨道误差和相关性噪声等多重因素造成的误差, DInSAR 技术的测量精度仍然较为有限^[116]。

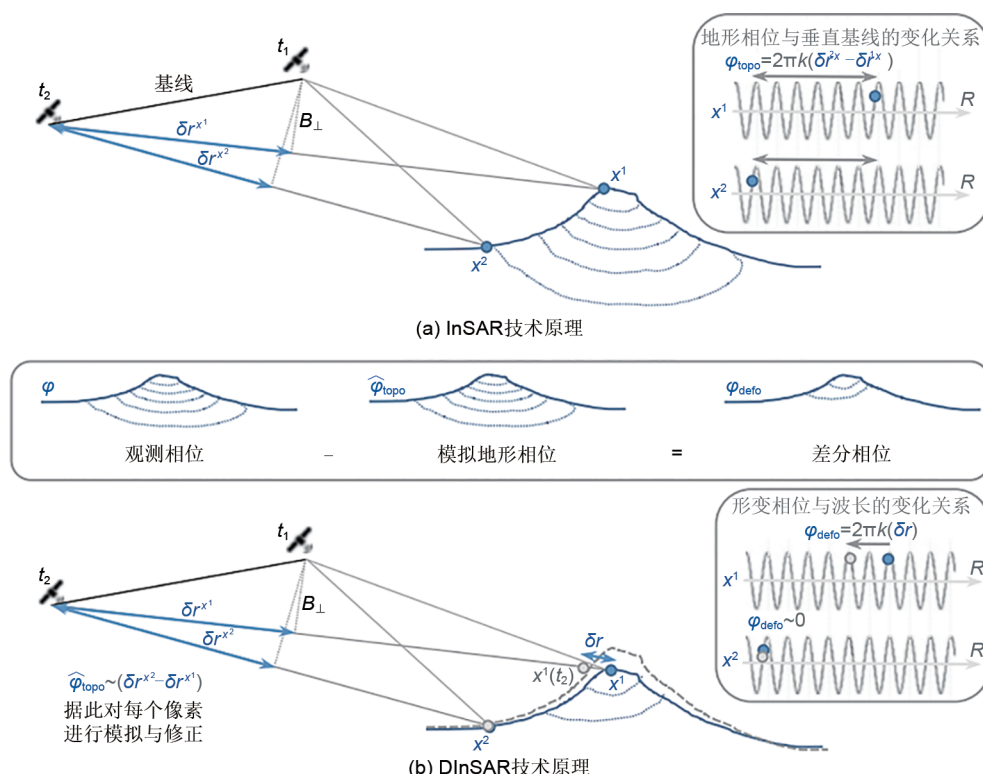


图 16 卫星雷达干涉测量图^[114]

Fig. 16 Satellite radar interferometry diagrams^[114]

近年来, 学者提出了诸多基于 DInSAR 的新兴技术。这些被统称为多时相 InSAR (MTInSAR) 的技术, 能够改善 DInSAR 的局限性, 进一步提升地表沉降监测的准确性。

MTInSAR 技术采用了长时间复数干涉图处理思路, 通过识别具备稳定反向散射特征的像素区块, 有效抑制了长期监测工况下的时间空间相关性失真问题和大气影响, 这使其能够广泛应用于大规模变形的时间序列监测情境中^[117]。而根据图像处理算法的不同, MTInSAR 技术还可分为小基线集合 InSAR 技术、永久散射体 InSAR 技术等。其中, 前者利用时空间隔极为接近的图像生成干涉图, 以最大程度减少相关性失真、提高信号可靠性, 适用于分布式散射体情境下的测量; 后者则聚焦于具备稳定向后散射的永久散射体, 通过其与变形数据之间

的关联性, 实现高分辨率监测^[118]。

在应用方面, Fibbi 等^[119-120]探究了 MTInSAR 技术在盐穴天然气储存沉降监测中的工程可行性, 结果展现了该技术在识别地面垂直和水平位移分量时的精准性与可靠性。然而, 相关研究侧重于盐穴群储气所引发的地表沉降, 此时集群的规模效应会使得年沉降量以及沉降范围较大, 有利于 MTInSAR 技术的识别与计算。而现有盐穴 CAES 项目多围绕单个或几个腔体建设, 沉降尺度往往非常有限, 如 Chen 等^[121]的一项理论和仿真研究表明, 单盐穴 10 年地表最大沉降量不及 14 mm, 影响范围局限在以盐穴为中心的 2 km² 区域内, 远小于 DInSAR 及 MTInSAR 技术的监测覆盖范围, 这可能会对监测结果产生影响。

(2) 全球导航卫星系统 (GNSS)

GNSS (global navigation satellite system)

是一种应用广泛的定位技术。该技术通过4颗轨道卫星向地面接收器发射正弦载波信号,后者基于信号的载波相位,结合RTK(real-time kinematic,实时动态载波相位差分技术)等算法消除误差项,实现对自身坐标的毫米级定位^[114,122]。GNSS很好地弥补了DInSAR因固有重访周期导致的监测实时性不足问题,具有精确性、完整性和连续性等特点,但作为点测量技术,其单个接收器的监测范围较为有限,无法判断区域内沉降的长期演变趋势,通常需要多个接收器配合使用以组成地面监测网络。

部分学者针对GNSS与DInSAR在沉降监测中的实际表现进行了对比研究,结论普遍认为两类技术均能取得不错的效果^[123]。其中,Rodriguez-Lloveras等^[124]和Fabris等^[125]还指出,同时采用GNSS与DInSAR进行监测,能够有效促进两类技术间的优势互补,也有助于开展对沉降成因的深层次分析。

4.2.2 盐穴收缩监测技术

鉴于直接在腔体内安装监测设备的困难程度,针对盐穴长期收缩率的监测,可以引入软测量技术。该技术通常以易测指标与难测指标之间的数学关系为基础,构建相应的数学模型,同时结合实际易测指标的监测数据信息流,达到取代硬件设备、实时监测难测指标的目的^[126-127]。现阶段,软测量技术在火电、钢铁等行业的应用已趋于成熟。

对于盐穴CAES系统,可以通过整合注采气体流量、日充放时长、系统循环效率等数据,基于先进模型或算法,实现对盐穴长期收缩率的在线监测与调节控制。此外,还可以考虑引入AI技术,进一步提升软测量的综合预测性能^[127]。

5 结论与展望

本文以盐穴储气的固有特点为切入点,围绕盐穴温度与压力、气体注采参数、盐岩蠕变及损伤3个方面,综述了各类监测技术的研究进展与工程应用案例,综合评估了各项技术在CAES盐穴监测情境下的适用性。本文的主要结论如下:

蠕变损伤与疲劳损伤及其相互作用是影响盐穴稳定性的直接原因。对于已成型的盐穴而言,早期载荷历史、埋深、围岩成分等均为固定参数,其稳定性监测应当围绕盐穴温度与压力、气体注采参数、盐岩蠕变及损伤3个方面展开。

针对盐穴温度与压力的多维监测工程可以围绕DFOS展开,结合DTS与DAS技术,以永久式、半永久式和可回收式等安装方式实现。

为避免高速环境下腔内水蒸气和风化盐岩颗粒对管道的腐蚀与冲蚀磨损,盐穴注采气体参数的监测应当涵盖气体流速、流量、含水量、颗粒物浓度等多个方面,并兼顾井口管道监测设备的适用性。

盐岩蠕变及损伤的相关监测应当由直接监测和间接监测两部分组成。直接监测可以采用由ARIL与MS监测技术组成的地下声学网络,而间接监测则可以通过DInSAR+GNSS地表沉降复合监测技术,配合盐穴收缩率软测量实现。

未来,随着监测技术的持续发展与分析算法的不断迭代,CAES盐穴储气库的监测将向涵盖太空、地面、井下的多维度立体化监测网络迈进。监测模块的逐步完善,对于CAES电站运维策略的改进及CAES行业的整体智慧化转型发展具有重要意义。

参考文献

- [1] 陈海生,李泓,徐玉杰,等. 2024年中国储能技术研究进展[J]. 储能科学与技术, 2025, 14(6): 2149-2192.
CHEN H S, LI H, XU Y J, et al. Research progress on China's energy storage technology in 2024[J]. Energy Storage Science and Technology, 2025, 14(6): 2149-2192.
- [2] ZHANG W L, ZHANG Y F, LI X D, et al. Performance analysis and configuration method optimization of AA-CAES-based air storage tanks[J]. Journal of Renewable and Sustainable Energy, 2024, 16(4): 044101. DOI:10.1063/5.0206283.
- [3] 杜冬梅,段树洋,蒋志容,等. 压缩空气储能系统地下人工硐室技术及其评价技术研究[J]. 热力发电, 2024, 53(10): 1-10. DOI: 10.19666/j.rld.202405112.
DU D M, DUAN S Y, JIANG Z R, et al. Underground artificial chamber technology and its evaluation technology of compressed air energy storage system[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(10): 1-10. DOI:10.19666/j.rld.202405112.
- [4] NIU L H, YAN S J, ZHAO F C, et al. Effect of burial depth, cavern shape, and sealing layer on the mechanical behaviour of abandoned mines for compressed air energy storage[J]. Processes, 2025, 13(9): 2737. DOI:10.3390/pr13092737.
- [5] LI H, MA H L, LIU J, et al. Large-scale CAES in bedded rock salt: A case study in Jiangsu Province, China[J]. Energy, 2023, 281: 128271. DOI:10.1016/j.energy.2023.128271.
- [6] GASANZADE F, BAUER S. Approximating coupled power plant and geostorage simulations for compressed air energy storage in porous media[J]. Applied Energy, 2025, 380: 125070. DOI:

- 10.1016/j.apenergy.2024.125070.
- [7] WEI L Z, CHEN W, QIN C L, et al. Cross-scale dynamic simulation and operational strategy optimization of the compression process in aquifer-based compressed air energy storage systems[J]. *Energy*, 2025, 335: 138092. DOI: 10.1016/j.energy.2025.138092.
- [8] 王富强, 王汉斌, 武明鑫, 等. 压缩空气储能技术与发展[J]. *水力发电*, 2022, 48(11): 10-15. DOI:10.3969/j.issn.0559-9342.2022.11.003. WANG F Q, WANG H B, WU M X, et al. Compressed air energy storage technology and development[J]. *Water Power*, 2022, 48(11): 10-15. DOI:10.3969/j.issn.0559-9342.2022.11.003.
- [9] LIU W, LI Q H, YANG C H, et al. The role of underground salt Caverns for large-scale energy storage: A review and prospects [J]. *Energy Storage Materials*, 2023, 63: 103045. DOI: 10.1016/j.ensm.2023.103045.
- [10] 王汉鹏, 武允昊, 张冰, 等. 废弃矿井压缩空气储能技术研究现状与新设计构想[J]. *煤炭科学技术*, 2025, 53(4): 29-44. DOI:10.12438/cst.2024-1357. WANG H P, WU Y H, ZHANG B, et al. Research status and new design concept of compressed air energy storage technology in abandoned mine[J]. *Coal Science and Technology*, 2025, 53(4): 29-44. DOI:10.12438/cst.2024-1357.
- [11] 赵盛开, 刘国君. 浅谈燃气智慧场站主动预警模块在生产运行中的应用[J]. *石化技术*, 2023, 30(7): 176-178. DOI:10.3969/j.issn.1006-0235.2023.07.059. ZHAO S K, LIU G J. Discussion on the application of active early warning module in gas smart station in production and operation [J]. *Petrochemical Industry Technology*, 2023, 30(7): 176-178. DOI:10.3969/j.issn.1006-0235.2023.07.059.
- [12] 左玖玲, 朱宝红, 梁金年. 基于物联网技术的新能源智慧场站能效优化研究[J]. *智慧中国*, 2025(3): 107-108. ZUO J L, ZHU B H, LIANG J N. Research on energy efficiency optimization of new energy smart station based on Internet of Things technology[J]. *Wisdom China*, 2025(3): 107-108.
- [13] 周程晟, 方世东. 漂浮式海上光伏智能气候预警平台的实践与研究[J]. *南方能源建设*, 2025, 12(1): 75-82. ZHOU C S, FANG S D. Practice and research of floating offshore photovoltaic intelligent climate early warning platform[J]. *Southern Energy Construction*, 2025, 12(1): 75-82.
- [14] RINALDI G, PILLAI A C, THIES P R, et al. Multi-objective optimization of the operation and maintenance assets of an offshore wind farm using genetic algorithms[J]. *Wind Engineering*, 2020, 44(4): 390-409. DOI: 10.1177/0309524x19849826.
- [15] LI J L, WANG Z T, ZHANG S, et al. Machine-learning-based capacity prediction and construction parameter optimization for energy storage salt Caverns[J]. *Energy*, 2022, 254: 124238. DOI: 10.1016/j.energy.2022.124238.
- [16] VANDEGINSTE V, JI Y K, BUYSSCHAERT F, et al. Mineralogy, microstructures and geomechanics of rock salt for underground gas storage[J]. *Deep Underground Science and Engineering*, 2023, 2(2): 129-147. DOI:10.1002/dug2.12039.
- [17] 杜超, 杨春和, 马洪岭, 等. 深部盐岩蠕变特性研究[J]. *岩土力学*, 2012, 33(8): 2451-2456, 2520. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7598.2012.08.032. DU C, YANG C H, MA H L, et al. Study of creep characteristics of deep rock salt[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(8): 2451-2456, 2520. DOI:10.3969/j.issn.1000-7598.2012.08.032.
- [18] FOURMEAU M, LIU W, LI Z Z, et al. Research status of creep-fatigue characteristics of salt rocks and stability of compressed air storage in salt Caverns[J]. *Earth Energy Science*, 2025, 1(1): 98-116. DOI:10.1016/j.ees.2024.08.004.
- [19] WANG X P, WANG J B, ZHANG Q, et al. Long-term stability analysis and evaluation of salt cavern compressed air energy storage power plant under creep-fatigue interaction[J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 55: 105843. DOI:10.1016/j.est.2022.105843.
- [20] ZHAO K, YANG C H, MA H L, et al. A creep-fatigue model of rock salt and its application to the deformation analysis of CAES salt caverns[J]. *Computers and Geotechnics*, 2023, 156: 105311. DOI:10.1016/j.compgeo.2023.105311.
- [21] ZHAO K, LNY W. Creep-fatigue interaction of rock salt using discrete element simulation[J]. *Computers and Geotechnics*, 2024, 176: 106771. DOI:10.1016/j.compgeo.2024.106771.
- [22] LNY W, ZHAO K. Numerical analysis of triaxial creep-fatigue interaction of rock salt[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2025, 17(11): 6964-6976. DOI: 10.1016/j.jrmge.2024.12.011.
- [23] LI Z Z, KANG Y F, FAN J Y, et al. Creep-fatigue mechanical characteristics of salt rocks under triaxial loading: An experimental study[J]. *Engineering Geology*, 2023, 322: 107175. DOI:10.1016/j.enggeo.2023.107175.
- [24] LU L L, HUANG S P, LIU T J, et al. Research on creep constitutive model of salt rock based on nonlinear integer-order viscous dashpot[J]. *Mechanics of Time-Dependent Materials*, 2025, 29(2): 45. DOI:10.1007/s11043-025-09782-z.
- [25] LYU C, LIU J F, ZHAO C X, et al. Creep-damage constitutive model based on fractional derivatives and its application in salt cavern gas storage[J]. *Journal of Energy Storage*, 2021, 44: 103403. DOI:10.1016/j.est.2021.103403.
- [26] LIU Y X, LI Y P, LI J J, et al. Stability evaluation and key operational parameter design of ultra-deep salt cavern gas storage based on *in-situ* creep tests[J]. *Geoenergy Science and Engineering*, 2025, 255: 214111. DOI:10.1016/j.geoen.2025.214111.
- [27] LI Z Z, FAN J Y, FOURMEAU M, et al. Long-term deformation of rock salt under creep-fatigue stress loading paths: Modeling and prediction[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2024, 181: 105861. DOI:10.1016/j.ijrmms.2024.105861.
- [28] ZHANG S L, XIAO N, XU S G, et al. Feasibility and stability study of single-well retreating horizontal cavern gas storage in deep bedded salt rock of Liulin, China[J]. *Energy*, 2025, 333: 137360. DOI:10.1016/j.energy.2025.137360.
- [29] DONG Z K, LI Y P, LI H R, et al. Influence of loading history on creep behavior of rock salt[J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 55: 105434. DOI:10.1016/j.est.2022.105434.

- [30] LI H, MA H L, YANG C H, et al. Creep-fatigue model of rock salt based on a fractal-order derivative considering thermo-mechanical damage[J]. *Computers and Geotechnics*, 2024, 174: 106605. DOI:10.1016/j.compgeo.2024.106605.
- [31] CHEN J S, BAI X F, FAN L L, et al. Impact of injection-withdrawal thermal effects on the operating pressure and optimization of salt cavern gas storage[J]. *Results in Engineering*, 2025, 28: 107615. DOI:10.1016/j.rineng.2025.107615.
- [32] LI W J, NAN X, CHEN J S, et al. Investigation of thermal-mechanical effects on salt cavern during cycling loading[J]. *Energy*, 2021, 232: 120969. DOI:10.1016/j.energy.2021.120969.
- [33] NOROOZI M, REZAEI A, FATHIPOUR-AZAR H. Determination of optimal shape for gas storage salt caverns[J]. *Energy Storage*, 2025, 7(1): e70109. DOI:10.1002/est2.70109.
- [34] LYU C, DAI H Y, MA C, et al. Prediction model for three-dimensional surface subsidence of salt cavern storage with different shapes[J]. *Energy*, 2024, 297: 131265. DOI: 10.1016/j.energy.2024.131265.
- [35] VITALI O P M, VITALI F P M. Influence of overburden rock characteristics on stress arching and surface subsidence over salt caverns[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2024, 42(5): 4245-4255. DOI:10.1007/s10706-024-02773-w.
- [36] YU J Y. Surface subsidence induced by salt cavern gas storage and its impact on railway safety: Numerical simulation and fuzzy evaluation[J]. *Results in Engineering*, 2025, 26: 105331. DOI: 10.1016/j.rineng.2025.105331.
- [37] ZENG Z, MA H L, LIANG X P, et al. Deliquescence of damaged rock salt under high humidity and its effect on inter-seasonal salt cavern gas storage[J]. *Energy*, 2024, 313: 133880. DOI:10.1016/j.energy.2024.133880.
- [38] ZHANG H B, WANG Z Y, ZHENG Y L, et al. Study on tri-axial creep experiment and constitutive relation of different rock salt[J]. *Safety Science*, 2012, 50(4): 801-805. DOI: 10.1016/j.ssci. 2011. 08.030.
- [39] ZHANG S L, LIANG W G, XU S G, et al. Experimental study on creep properties of deep impurity salt rocks[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2025, 58(1): 787-806. DOI: 10.1007/s00603-024-04162-4.
- [40] 杨海军. 中国盐穴储气库建设关键技术及挑战[J]. *油气储运*, 2017, 36(7): 747-753.
- YANG H J. Construction key technologies and challenges of salt-cavern gas storage in China[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2017, 36(7): 747-753.
- [41] YANG X C, QIN Y, LI S P, et al. Study on surrounding rock stability during solution mining and operation of salt cavern gas storage with different height-to-diameter ratios and burial depths [J]. *Applied Sciences*, 2025, 15(19): 10723. DOI: 10.3390/app 151910723.
- [42] 刘欣, 杜廷召, 张利媛, 等. 基于 CAES 的管道-井筒储气室充气过程的数值模拟[J]. *科学技术与工程*, 2025, 25(11): 4559-4566. DOI: 10.12404/j.issn.1671-1815.2403677.
- LIU X, DU T Z, ZHANG L Y, et al. Numerical simulation on the inflation process of pipeline-wellbore gas storage chamber based on CAES[J]. *Science Technology and Engineering*, 2025, 25(11): 4559-4566. DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2403677.
- [43] 蒋华全, 曾娟, 李力民, 等. 基于数据驱动的储气库井底压力预测[J]. *特种油气藏*, 2025, 32(4): 122-129. DOI: 10.3969/j. issn. 1006-6535.2025.04.014.
- JIANG H Q, ZENG J, LI L M, et al. Data-driven bottomhole pressure prediction for gas storage reservoirs[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2025, 32(4): 122-129. DOI:10.3969/j. issn. 1006-6535.2025.04.014.
- [44] 金航. 基于脉冲涡流的油气井套管结构变形检测方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
- JIN H. Research on deformation detection method of casing structure in oil and gas wells based on pulse eddy current[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021.
- [45] 和志明, 伍东. 套损图像特征模式匹配识别技术及应用[J]. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 2020, 42(2): 175-181. DOI: 10.11885/j. issn.1674-5086.2019.03.29.01.
- HE Z M, WU D. Casing damage image technology of feature pattern recognition and matching of casing damage image and its application[J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 2020, 42(2): 175-181. DOI: 10.11885/j.issn.1674-5086.2019.03.29.01.
- [46] MAO Y L, ZEIDOUNI M, DUNCAN I. Temperature analysis for early detection and rate estimation of CO₂ wellbore leakage[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2017, 67: 20-30. DOI:10.1016/j.ijggc.2017.09.021.
- [47] 张艺怀, 汤历平, 钟翔, 等. 高温高压气井油套环空泄漏参数敏感性仿真研究[J]. *科学技术与工程*, 2025, 25(20): 8474-8482.
- ZHANG Y H, TANG L P, ZHONG X, et al. Simulation study on sensitivity of tubing-casing annulus leakage parameters in high temperature and high pressure gas wells[J]. *Science Technology and Engineering*, 2025, 25(20): 8474-8482.
- [48] 宋学锋, 李志彬, 刘金铭, 等. 深层深井井筒完整性检测技术发展现状[J]. *新疆石油天然气*, 2024, 20(4): 8-18. DOI: 10.12388/j.issn. 1673-2677.2024.04.002.
- SONG X F, LI Z B, LIU J M, et al. Development status of wellbore integrity inspection technology for deep strata and deep wells[J]. *Xinjiang Oil & Gas*, 2024, 20(4): 8-18. DOI:10.12388/j.issn.1673-2677.2024.04.002.
- [49] 李晓蓉, 刘旭丰, 张毅, 等. 基于分布式光纤声传感的油气井工程监测技术应用与进展[J]. *石油钻采工艺*, 2022, 44(3): 309-320. DOI: 10.13639/j.odpt.2022.03.007.
- LI X R, LIU X F, ZHANG Y, et al. Application and progress of oil and gas well monitoring techniques based on distributed optical fiber sensing[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2022, 44 (3): 309-320. DOI:10.13639/j.odpt.2022.03.007.
- [50] FEO G, SHARMA J, KORTUKOV D, et al. Distributed fiber optic sensing for real-time monitoring of gas in riser during offshore drilling[J]. *Sensors*, 2020, 20(1): 267. DOI:10.3390/s20010267.
- [51] SCHÖLDERLE F, LIPUS M, PFRANG D, et al. Monitoring cold water injections for reservoir characterization using a permanent

- fiber optic installation in a geothermal production well in the Southern German Molasse Basin[J]. *Geothermal Energy*, 2021, 9 (1): 21. DOI:10.1186/s40517-021-00204-0.
- [52] DEEN M J, KUMAR S. *Fiber Optic Communications: Fundamentals and Applications*[M]. Hoboken: John Wiley and Sons Ltd, 2014.
- [53] EKECHUKWU G, SHARMA J. Degradation analysis of single-mode and multimode fibers in a full-scale wellbore and its impact on DAS and DTS measurements[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2023, 23(9): 9287-9300. DOI:10.1109/JSEN.2023.3257264.
- [54] SU F Y, LI X R, FENG Y C, et al. Sophisticated distributed acoustic sensing (DAS) for real-time monitoring and analysis of wellbore integrity[J]. *Geoenery Science and Engineering*, 2026, 256: 214162. DOI:10.1016/j.geoen.2025.214162.
- [55] JIANG T T, CAO D L, LIAO Y Q, et al. Leakage monitoring and quantitative prediction model of injection-production string in an underground gas storage salt cavern[J]. *Energies*, 2023, 16(17): 6173. DOI:10.3390/en16176173.
- [56] YAN X, HU T T, CHENG T L, et al. Optical sensing of refractive index (RI) and temperature by dual-channel surface plasmon resonance (SPR) using two single-mode fibers (SMFs) and three multi-mode fibers (MMFs) [J]. *Instrumentation Science & Technology*, 2024, 52(2): 176-190. DOI:10.1080/10739149. 2023. 2233103.
- [57] DEY K, MAJEE A, ROY S. Exploration of assembly-free fabricated single-multi-single mode and multi-single-multi mode fiber structures exhibiting ultra high sensitivities[J]. *Chinese Journal of Physics*, 2025, 95: 219-230. DOI: 10.1016/j. cjph. 2025.02.012.
- [58] LUO L Q, ABDULHAMEED D, TAO G, et al. Large-scale experimental validation of real-time monitoring in underground gas storage wells using distributed fiber optic sensing[J]. *IEEE Access*, 2025, 13: 19523-19532. DOI: 10.1109/ACCESS. 2025. 3533389.
- [59] 邹琦, 辛野, 刘志龙, 等. 井下多元参数长效监测光缆管结构的设计与研制 [J]. *测井技术*, 2024, 48(1): 53-58. DOI: 10.16489/j. issn.1004-1338.2024.01.007.
- ZOU Q, XIN Y, LIU Z L, et al. Design and development of multi-parameter long-term monitoring cable tube structure in underground[J]. *Well Logging Technology*, 2024, 48(1): 53-58. DOI:10.16489/j.issn.1004-1338.2024.01.007.
- [60] XU S B, LI A L, ZHOU L J. Reflective optical fiber sensing network for monitoring in well logging[J]. *Applied Optics*, 2025, 64 (29): 8722-8728.
- [61] JOHNY J, AMOS S, PRABHU R. Optical fibre-based sensors for oil and gas applications[J]. *Sensors*, 2021, 21(18): 6047. DOI: 10.3390/s21186047.
- [62] AMER R, XUE Z Q, HASHIMOTO T, et al. Distributed fiber optic temperature and strain sensing in cementing and water injection: Insights to well integrity monitoring and multisensing optical fiber cable design[J]. *Gas Science and Engineering*, 2024, 130: 205430. DOI:10.1016/j.gjsce.2024.205430.
- [63] KIIVERI P, KUUSISTO M, KOPONEN J, et al. Refractive index profiles and propagation losses in bent optical fibers[J]. *Optical Engineering*, 2022, 61(12): 126106. DOI: 10.1117/1. oe. 61.12. 126106.
- [64] WANG J Y, LIU B, ZHU J, et al. Application of distributed helically wound cable technology in ground seismic exploration[J]. *Journal of Seismic Exploration*, 2025, 34(4): 18. DOI: 10.36922/jse0253 00040.
- [65] ZOU X J, WANG T T, HU X Y, et al. Gas leakage physical simulation and its distributed optical fiber sensing experiments in the casing annulus of injection-production pipe column for underground gas storage[J]. *Geoenery Science and Engineering*, 2024, 242: 213252. DOI: 10.1016/j. geoen. 2024. 213252.
- [66] 王文权, 贾建超, 赵明千, 等. 盐穴储气库井筒泄漏监测室内模拟实验[J]. *石油钻采工艺*, 2020, 42(4): 513-517.
- WANG W Q, JIA J C, ZHAO M Q, et al. Laboratory simulation experiment of well-leak monitoring of salt-cavern gas storage[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2020, 42(4): 513-517.
- [67] BÉREST P, LOUVET F. Aspects of the thermodynamic behavior of salt caverns used for gas storage[J]. *Oil & Gas Science and Technology-Revue D'IFP Energies Nouvelles*, 2020, 75: 57. DOI: 10.2516/ogst/2020040.
- [68] ZENG Z, MA H L, YANG C H, et al. Effect of the dynamic humid environment in salt caverns on their performance of compressed air energy storage: A modeling study of thermo-moisture-fluid dynamics[J]. *Applied Energy*, 2025, 377: 124403. DOI:10.1016/j. apenergy.2024.124403.
- [69] LI Z Z, KANG Y F, FAN J Y, et al. Macroscopic experimental study and microscopic phenomenon analysis of damage self-healing in salt rock[J]. *Engineering Geology*, 2024, 338: 107634. DOI:10.1016/j.enggeo.2024.107634.
- [70] ZENG Z, MA H L, YANG C H, et al. Self-healing behaviors of damaged rock salt under humidity cycling[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2024, 174: 105636. DOI:10.1016/j.ijrmms.2024.105636.
- [71] CAI R, MA H, YANG C, et al. Research on the issue of NaCl carried by compressed air during the injection and withdrawal process in CAES system[C]//*Proceedings of the 55th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*. Houston: American Rock Mechanics Association, 2021: ARMA 21-1331.
- [72] ZHAO W Q, SONG X J, WANG N, et al. Discharge-induced slag entrainment in salt cavern CAES systems: A CFD-DEM numerical study[J]. *Energies*, 2026, 19(3): 727. DOI: 10.3390/en19030727.
- [73] PUŁAWSKA A, MANECKI M, FLASZA M, et al. Origin, distribution, and perspective health benefits of particulate matter in the air of underground salt mine: A case study from Bochnia, Poland[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2021, 43(9): 3533-3556. DOI:10.1007/s10653-021-00832-2.
- [74] PUŁAWSKA A, MANECKI M, FLASZA M. Mineralogical and chemical tracing of dust variation in an underground historic salt mine[J]. *Minerals*, 2021, 11(7): 686. DOI:10.3390/min11070686.

- [75] 施智玲, 何竹梅, 唐玉华, 等. 金坛盐穴储气井生产套管的腐蚀行为及其防护措施[J]. 腐蚀与防护, 2018, 39(2): 141-143, 151. DOI: 10.11973/fsyfh-201802013.
- SHI Z L, HE Z M, TANG Y H, et al. Corrosion behavior and protection measures of casings for production in salt cavern gas storage well in Jintan[J]. Corrosion and Protection, 2018, 39(2): 141-143, 151. DOI:10.11973/fsyfh-201802013.
- [76] 张明, 邢泰高, 易镔, 等. 盐穴压缩空气储能系统N80注采管柱腐蚀特性研究[J]. 湖北电力, 2023, 47(1): 85-90.
- ZHANG M, XING T G, YI P, et al. Study on corrosion characteristics of N80 injection-production pipe column in salt cavern compressed air energy storage system[J]. Hubei Electric Power, 2023, 47(1): 85-90.
- [77] 万继方, 纪文栋, 李景翠, 等. 盐穴压缩空气储能库注采井筒体系优化设计[J]. 天然气工业, 2024, 44(6): 169-180.
- WAN J F, JI W D, LI J C, et al. Design optimization of injection and production wellbore system in salt-cavern compressed air energy storage[J]. Natural Gas Industry, 2024, 44(6): 169-180.
- [78] 胡四海, 赵广慧, 张川, 等. 关井过程防喷器胶芯的冲蚀性能研究[J]. 表面技术, 2024, 53(23): 159-168. DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2024.23.014.
- HU S H, ZHAO G H, ZHANG C, et al. Erosion resistance of rubber core of BOP ram during shut-in process[J]. Surface Technology, 2024, 53(23): 159-168. DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2024.23.014.
- [79] ZHU X H, PENG P, JING J, et al. Research on casing erosion in reservoir section of gas storage wells based on gas-solid two-phase flow[J]. Engineering Failure Analysis, 2022, 142: 106688. DOI:10.1016/j.engfailanal.2022.106688.
- [80] ZHU L X, LI L F, LUO J H, et al. Investigating erosion of string in underground hydrogen storage under high flow velocity[J]. Processes, 2023, 11(10): 2894. DOI:10.3390/pr11102894.
- [81] YANG Y X, HE M Q, YU P, et al. Investigation on critical erosion of gas production channel for sand carrying during injection and production process in gas storage[J]. Geoenergy Science and Engineering, 2024, 239: 212945. DOI: 10.1016/j.geoen. 2024. 212945.
- [82] ASAD A, AWOTUNDE A A, JAMAL M S, et al. Simulation of wellbore erosion and sand transport in long horizontal wells producing gas at high velocities[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2021, 89: 103890. DOI: 10.1016/j.jngse.2021.103890.
- [83] TORRES L F, BARBALHO T, SEGOVICH I, et al. A critical review of experimental methods, data, and predictions of water content[J]. Fluid Phase Equilibria, 2025, 589: 114259. DOI: 10.1016/j.fluid.2024.114259.
- [84] LI J Y, ZHANG C G, WEI Y Y, et al. *In situ*, portable and robust laser sensor for simultaneous measurement of ammonia, water vapor and temperature in denitrification processes of coal fired power plants[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2020, 305: 127533. DOI:10.1016/j.snb.2019.127533.
- [85] TORRES L F, DAMASCENA M A, ALVES M M A, et al. Use of near-infrared spectroscopy for the online monitoring of natural gas composition (hydrocarbons, water and CO₂ content) at high pressure[J]. Vibrational Spectroscopy, 2024, 131: 103653. DOI: 10.1016/j.vibspec.2024.103653.
- [86] 周渝皓, 王杰, 张咏琪, 等. 粉尘浓度监测关键技术及发展趋势[J]. 矿业安全与环保, 2026, 53(2): 190-199. DOI:10.19835/j.issn.1008-4495.20250286.
- ZHOU Y H, WANG J, ZHANG Y Q, et al. Key technologies and development trends of dust concentration monitoring[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2026, 53(2): 190-199. DOI: 10.19835/j.issn.1008-4495.20250286.
- [87] ZHANG K, PENG Y Q, YU H, et al. The influence of concentration and size on the error of particulate matter detection using charge induction method[J]. Atmospheric Pollution Research, 2024, 15(11): 102254. DOI:10.1016/j.apr.2024.102254.
- [88] CHEN J G, LI D W, LIU G Q, et al. Development of a coal dust concentration sensor based on the electrostatic induction method [J]. ACS Omega, 2023, 8(14): 13059-13067.
- [89] HAN J K, LIU X W, JIANG M, et al. A novel light scattering method with size analysis and correction for on-line measurement of particulate matter concentration[J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 401: 123721. DOI:10.1016/j.jhazmat. 2020.123721.
- [90] FAN Z H, ZENG Q W, HUANG Y H, et al. A review of gas - liquid two-phase flow measurement: Sensing technologies and intelligent data analysis methods[J]. Applied Thermal Engineering, 2026, 284: 129173. DOI: 10.1016/j.applthermaleng. 2025.129173.
- [91] 梁法春, 梁晓瑜, 郭立功, 等. 管道流量计量技术挑战与展望[J]. 前瞻科技, 2024, 3(2): 121-132.
- LIANG F C, LIANG X Y, GUO L G, et al. Challenges and prospects of pipeline flow measurement technologies[J]. Science and Technology Foresight, 2024, 3(2): 121-132.
- [92] SHUNASHU I L, KAUNDE O, MWAKIPESILE D. Characterizing trends in metering techniques for wet gas measurement: A critical review[J]. Journal of Flow Control, Measurement & Visualization, 2025, 12(1): 1-35. DOI:10.4236/jfcmv.2025.121001.
- [93] LI Z Z, YANG Z Y, FAN J Y, et al. Fatigue mechanical properties of salt rocks under high stress plateaus: The interaction between creep and fatigue[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2022, 55(11): 6627-6642. DOI:10.1007/s00603-022-02983-9.
- [94] LIANG X F, MENG T, FENG G, et al. Evolution of permeability and pore structure of salt rock and its self-healing mechanism under coupled thermo-hydro-mechanical environment[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 66: 107476. DOI: 10.1016/j.est. 2023.107476.
- [95] CHEN F, WANG Z H, MENG X, et al. Inversion of creep parameters and their application in underground salt cavern energy storage systems for enhancing wind power integration[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2024, 162: 110237. DOI:10.1016/j.ijepes.2024.110237.
- [96] LI Z Z, SUO J J, FAN J Y, et al. Damage evolution of rock salt

- under multilevel amplitude creep-fatigue loading with acoustic emission monitoring[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2023, 164: 105346. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2023.105346.
- [97] DAI J J, LIU J F, RAN L N, et al. Acoustic emission characteristics and energy evolution of salt rock for deep-salt-cavern engineering under triaxial loading and unloading[J]. *Journal of Central South University*, 2023, 30(3): 962-974. DOI: 10.1007/s11771-022-5213-4.
- [98] LI H, MA H L, YANG C H, et al. Acoustic emission characteristics of rock salt under multi-stage cyclic loading[J]. *International Journal of Fatigue*, 2023, 176: 107911. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2023.107911.
- [99] ZHU A Q, LIU J F, WU Z D, et al. Energy dissipation and damage evolution characteristics of salt rock under uniaxial cyclic loading and unloading tension[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2021, 2021(1): 6627959. DOI:10.1155/2021/6627959.
- [100] ZENG Z, MA H L, LI Y P, et al. Acoustic emission insights into rock salt damage under humidity cycling[J]. *Geoenergy Science and Engineering*, 2025, 251: 213898. DOI: 10.1016/j.geoen.2025.213898.
- [101] GROSSE C U, OHTSU M, AGGELIS D G, et al. Acoustic emission testing: Basics for research-applications in engineering[M]. Cham: Springer International Publishing, 2022 DOI:10.1007/978-3-030-67936-1.
- [102] LI N, LIU P, WU H L, et al. Development and prospect of acoustic reflection imaging logging processing and interpretation method[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2024, 51(4): 839-851. DOI: 10.1016/S1876-3804(24)60510-0.
- [103] 董经利, 许孝凯, 张晋言, 等. 声波远探测技术概述及发展[J]. *地球物理学进展*, 2020, 35(2): 566-572. DOI:10.6038/pg2020CC0180.
- DONG J L, XU X K, ZHANG J Y, et al. Overview and development of acoustic far detection technology[J]. *Progress in Geophysics*, 2020, 35(2): 566-572. DOI: 10.6038/pg2020CC0180.
- [104] RAN Z, HAO Z, HONGJU H E, et al. Eight directional acoustic logging remote detection reflection wave imaging technology: A collaborative imaging framework combining shear wave transformation and Kirchhoff migration[J]. *CT Theory and Applications*, 2026, 35(2): 294-302.
- [105] ZHAO Q Q, CHE X H, ZUO C J, et al. Measurement resolution of acoustic reflection imaging logging with a cylindrical phased array acoustic receiver station[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, 219: 111073. DOI: 10.1016/j.petrol.2022.111073.
- [106] JIANG R C, DAI F, LIU Y, et al. A novel method for automatic identification of rock fracture signals in microseismic monitoring [J]. *Measurement*, 2021, 175: 109129. DOI: 10.1016/j.measurement.2021.109129.
- [107] LU Y S, LI P F, CAI W. Experimental study on the evolutionary characteristics of acoustic signals produced by granite under biaxial compression with different intermediate principal stresses[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2023, 11: 1271355. DOI: 10.3389/feart.2023.1271355.
- [108] XIE Q M, WU C L, LIAO H L, et al. Development of wireless transmission system for microseismicity in complex mountainous area[J]. *Mobile Information Systems*, 2022, 2022(1): 7049377. DOI:10.1155/2022/7049377.
- [109] YANG C H, WANG T T. Underground rock salt used for energy storage: Theory and engineering practice[M]. Singapore: Springer Nature Singapore, 2025 DOI: 10.1007/978-981-97-8156-0.
- [110] LI S L, NI Y, WANG Y, et al. Highly sensitive fiber optic microseismic monitoring system for tunnel rockburst[J]. *Measurement*, 2022, 189: 110449. DOI: 10.1016/j.measurement.2021.110449.
- [111] SHI Y N, JIANG S S, LIU Y, et al. Design and optimization of a triangular shear piezoelectric acceleration sensor for microseismic monitoring[J]. *Geofluids*, 2022, 2022(1): 3964502. DOI:10.1155/2022/3964502.
- [112] VAEZI Y, VAN DER BAAN M. Interferometric assessment of clamping quality of borehole geophones[J]. *Geophysics*, 2015, 80(6): WC89-WC98. DOI:10.1190/geo2015-0193.1.
- [113] NAKATA N, COOK P, NAYAK A, et al. Development of high-temperature seismometers for near-field microearthquake monitoring[C]//*Proceedings of the 51st Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*. Stanford, CA, USA: Stanford University, 2026: SGP-TR-230.
- [114] CHAUSSARD E, JONES C, CHEN J A, et al. Remote sensing for characterization of geohazards and natural resources[M]. Cham: Springer International Publishing, 2024 DOI: 10.1007/978-3-031-59306-2.
- [115] NIRAJ K C, GUPTA S K, SHUKLA D P. Kotrupi landslide deformation study in non-urban area using DInSAR and MTInSAR techniques on Sentinel-1 SAR data[J]. *Advances in Space Research*, 2022, 70(12): 3878-3891. DOI:10.1016/j.asr.2021.11.042.
- [116] LIU H. Error analysis of InSAR models and parameter estimation with spatial constraints[D]. The Hong Kong Polytechnic University, 2024.
- [117] DU Y N, FENG G C, LIU L, et al. Understanding land subsidence along the coastal areas of Guangdong, China, by analyzing multi-track MTInSAR data[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(2): 299. DOI:10.3390/rs12020299.
- [118] SÁNCHEZ V, CABRERA-TORRES F, ARCINIEGAS S, et al. Monitoring tailings storage facilities with multi-temporal DInSAR: A systematic review[J]. *Science of the Total Environment*, 2026, 1011: 181161. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2025.181161.
- [119] FIBBI G, LANDINI N, INTRIERI E, et al. Open-source InSAR data to detect ground displacement induced by underground gas storage reservoirs[J]. *Earth Systems and Environment*, 2025, 9(4): 3083-3100. DOI:10.1007/s41748-025-00593-3.

- [120] FIBBI G, MONTALTI R, DEL SOLDATO M, et al. Unlocking the InSAR potential for managing underground gas storage in salt Caverns[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2025, 141: 104656. DOI: 10.1016/j.jag.2025.104656.
- [121] CHEN F, YE L L, MA H L, et al. Subsidence above gas storage in salt caverns predicted with viscoelastic theory[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2022, 103: 104620. DOI: 10.1016/j.jngse.2022.104620.
- [122] DEL SOLDATO M, CONFUORTO P, BIANCHINI S, et al. Review of works combining GNSS and InSAR in Europe[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(9): 1684. DOI:10.3390/rs13091684.
- [123] PARWATA I N S, SHIMIZU N, GRUJIĆ B, et al. Monitoring the subsidence induced by salt mining in Tuzla, Bosnia and Herzegovina by SBAS-DInSAR method[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2020, 53(11): 5155-5175. DOI:10.1007/s00603-020-02212-1.
- [124] RODRIGUEZ-LLOVERAS X, PUIG-POLO C, LANTADA N, et al. Two decades of GPS/GNSS and DInSAR monitoring of Cardona salt mines (NE of Spain)-natural and mining-induced mechanisms and processes[J]. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 2020, 382: 167-172. DOI:10.5194/piahs-382-167-2020.
- [125] FABRIS M, BATTAGLIA M, CHEN X, et al. An integrated InSAR and GNSS approach to monitor land subsidence in the Po river delta (Italy) [J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(21): 5578. DOI: 10.3390/rs14215578.
- [126] LUO Y Y, ZHANG X M, KANO M, et al. Data-driven soft sensors in blast furnace ironmaking: A survey[J]. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 2023, 24(3): 327-354. DOI:10.1631/FITEE.2200366.
- [127] PERERA Y S, RATNAWEERA D A A C, DASANAYAKA C H, et al. The role of artificial intelligence-driven soft sensors in advanced sustainable process industries: A critical review[J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2023, 121: 105988. DOI:10.1016/j.engappai.2023.105988.