

DOI: 10.19666/j.rlfed.202311181

压缩空气储能盐穴储气库技术及其 智能建造工艺技术研究

徐高¹, 谢芳毅², 曹振瑞³, 赵星源¹, 崔建华², 韩少峰³, 何青³
(1.中能建数字科技集团有限公司, 北京 100044; 2.北京洛斯达科技发展有限公司, 北京 100044;
3.华北电力大学能源动力与机械工程学院, 北京 102206)

[摘要] 当前, 盐穴型储气库建造技术已较为成熟, 并朝着智能化方向发展。根据盐穴储气库技术现状, 对盐穴储气库当前建造技术进行分析; 从全生命周期管理角度, 将盐穴储气库智能建造划分为智能选址、智能设计、智能施工、智能运维 4 个阶段, 并对每个阶段涉及的关键技术进行研究; 提出盐穴储气库智能建造工艺技术框架及其具体内容; 最后, 从系统、技术、理论、模型 4 个方面, 提出并总结盐穴储气库智能建造未来研究重点。相关技术在应城 300 MW 级压缩空气储能示范工程上得到有效应用。

[关键词] 压缩空气储能; 盐穴储气库; 智能建造; 工艺; 全生命周期管理

[引用本文格式] 徐高, 谢芳毅, 曹振瑞, 等. 压缩空气储能盐穴储气库技术及其智能建造工艺技术研究[J]. 热力发电, 2024, 53(9): 48-59. XU Gao, XIE Fangyi, CAO Zhenrui, et al. Research on salt cavern gas storage of compressed air energy storage and its intelligent construction process[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(9): 48-59.

Research on salt cavern gas storage of compressed air energy storage and its intelligent construction process

XU Gao¹, XIE Fangyi², CAO Zhenrui³, ZHAO Xingyuan¹, CUI Jianhua²,
HAN Shaofeng³, HE Qing³

(1.China Energy Digital Technology Group Co., Ltd., Beijing 100044, China; 2.Beijing North-Star Technology Development Co., Ltd., Beijing 100044, China;
3.School of Energy Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: At present, the construction technology of salt cavern gas storage has been mature, and it is developing in the direction of intelligence. Based on the technical status of salt cavern gas storage, the current construction technologies of salt cavern gas storage are analyzed. From the perspective of whole life cycle management, the intelligent construction of salt cavern gas storage is divided into four stages: intelligent location, intelligent design, intelligent construction and intelligent operation and maintenance, and the key technologies involved in each stage are studied. The technical framework of intelligent construction technology of salt cavern gas storage and its specific content is put forward. Moreover, the future research focus of intelligent construction of salt cavern gas storage is proposed and summarized from four aspects: system, technology, theory and model. The relevant technologies have been effectively applied in Yingcheng 300 MW compressed air energy storage demonstration project.

Key words: compressed air energy storage; salt cave gas storage; intelligent construction; process; whole life cycle management

我国正在建立以新能源为主体的新型电力体系, 储能是该体系中不可缺少的重要一环。目前, 抽水蓄能、压缩空气储能和电化学储能 3 种储能技术较为成熟, 并能进行大规模的应用和推广^[1]。

收稿日期: 2023-11-30 网络首发日期: 2024-04-19

基金项目: 中国能源建设股份有限公司重大科技项目 (CEEC2021-KJZX-07)

Supported by: Major Science and Technology Foundation of CEEC (CEEC2021-KJZX-07)

第一作者简介: 徐高 (1987), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为能源电力数字化方向, gxu0259@ceec.net.cn.

通信作者简介: 何青 (1962), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为压缩空气储能技术, heq@ncepu.edu.cn.

其中,压缩空气储能是将弃风弃光电、低谷电以高压空气的形式储存,并在用电高峰时段利用透平膨胀做功,驱动发电机发电,产生电能^[2-3]。该储能系统核心部件由压缩机、膨胀机、储气装置等组成。储气装置是该系统中存储空气的压力容器,按照地质不同,一般划分为盐穴型、含水层型、枯竭气藏型、硬岩洞穴型4种类型^[4-6]。盐穴型储气库既可用于压缩空气储能,也可用于天然气、油气、氢气的存储。但相较于天然气等长达1年甚至20年的存储周期,压缩空气储能系统的充放气过程,可在1天内完成。频繁且快速的注采频率,决定了压缩空气储能盐穴储气库须能承受高强度的交变载荷以及剧烈的温度变化^[7]。研究表明,压缩空气储能系统储气腔室在充放电过程中最高温度可达60~80℃,储气压力可达10 MPa及以上^[8]。其中,空气作为一种储能密度较低的介质,其压力和温度决定了储能电站的效率,被认为是压缩空气储能系统最关键的参数^[9]。压缩机工质流量以及膨胀机排气温度,随储气压力的升高而降低。整个系统的运行效率,则随储气压力升高,出现先升高后降低的趋势^[10]。由此,对压缩空气储能系统盐穴储气库的设计、建造、监测、运维,提出了更高的技术要求。

盐穴储气库的智能建造,指借助物联网、大数据、云计算、人工智能、建筑信息模型(bulding information modeling, BIM)等先进技术,实现从选址、设计到施工、运维的全生命周期管理。其涉及建立智能高效的选址体系、造腔优化设计方法、基于BIM的盐穴5D施工管理、数字化交付和智能运维等方面。在盐穴储气库全生命周期管理过程中,对盐穴进行运行监测、状态分析、动态仿真、风险预警等操作,并完善盐穴应急响应机制,最终实现盐穴储气库建造数字化、虚拟化、协同化、可视化、智能化等功能。

当前,在地下储气库智能建造研究中,中石油基于.Net技术和Oracle数据库,搭建了可用于储气库静/动态数据采集、管理、分析和应用的数字化信息管理平台^[11]。中石化基于SpringBoot等技术,设计了储气库信息化管理一体化平台,并建立了各类型储气库选址评价体系以及基于数字孪生的一体化仿真及辅助生产决策系统。其相关研究成果,已成功应用于文96储气库、文23储气库等的建设之中^[12]。此外,众多学者针对地下

空间智能建造开展了广泛研究。Satkin等人^[13]利用ArcGIS软件开发了一种压缩空气储能电站的选址方法,通过考虑输入数据的边界条件生成因子图,并根据输出图创建地理数据库。Li等人^[14]基于机器学习,提出了一种可快速预测储能盐穴容量和优化施工参数的方法,并建立了一种基于BP神经网络的盐穴建设预测模型,该方法可用于未来储能盐穴建设的设计工具。Shao等人^[15]利用层次分析法和贝叶斯网络对地下空间的风险评估和预警进行了研究,并将数字孪生技术应用于地下空间的设计、建造、监测、防灾等方面,实现了地下空间的智能总体规划。Zhang等人^[16]对智能运维的关键技术要素进行了分析,构建了基于大数据、机械学习、数字孪生等先进技术的油气安全生产智能运维技术体系。Ma等人^[17]设计了一种基于声纳原理的探测控制系统,可用于监测直径数百米的大容量水平盐穴形态特征。陈健^[18]基于深度学习算法,设计了一种盐穴储气库造腔过程中油水界面的监测方法,并通过现场实验,验证了该方法能有效提高油水界面的监测精度。安国印等^[19]设计了一种分布式光纤监测技术用以监测储气库井筒泄露,并通过实例验证了该监测方法的有效性和可行性。这些研究能够为盐穴建设提供重要参考。但从整体上看,中国储气库数字化、智能化水平,正处于起步阶段^[20]。关于盐穴储气库智能建造的系统性研究尚不多见。

本文面向大容量长时压缩空气储能系统首先对盐穴储气库的现状、相关技术等进行阐述。其次提出盐穴储气库的智能建造体系,分析研究盐穴储气库的智能建造技术。最后,从选址、设计、施工、运维4个阶段出发,探讨盐穴储气库的全生命周期管理。

1 盐穴储气库技术

储气库建造之前,应在地质勘探的基础上,建立标准的选址评价体系。当前,盐穴储气库建设分为2种:1)利用采卤老腔进行改造;2)利用水溶造腔工艺新建盐穴储气库^[21]。同时,在盐穴建造和运维过程中,盐穴各项监测也至关重要。本文在当前盐穴建库技术中,着重介绍盐穴选址与评价、老腔改造工艺、水溶造腔工艺以及相关的监测技术。

1.1 盐穴储气库选址与评价

盐岩是一种由蒸发岩(如石盐、石膏、硬石膏等)

及泥岩等组成的混合物,包括盐丘和盐层 2 种。盐丘是天然盐沉积形成的厚地层,其直径可达 1.5 km,高度可达 10 km,多为大型圆顶型结构。盐层是较浅薄的盐岩地层,高度通常不超过 300 m,具有宽度大、高度薄的特点^[22]。因此,盐丘和厚度较大的盐层,适宜盐穴储气库的建造。

我国拥有丰厚的盐岩资源,多数形成于湖相沉积下,具有层状构造,通常被称为层状盐岩,其地质结构如图 1 所示。层状盐岩具有盐层薄、含盐比例低、非盐夹层多、局部地质复杂等特点^[23]。在建设过程中,存在井下施工难度大、事故频发等问题。因此,在层状盐岩中建造盐穴储气库具有较高的技术难度^[24],形成一套高效且完整的选址评价体系,也成为盐穴储气库建设的重中之重。

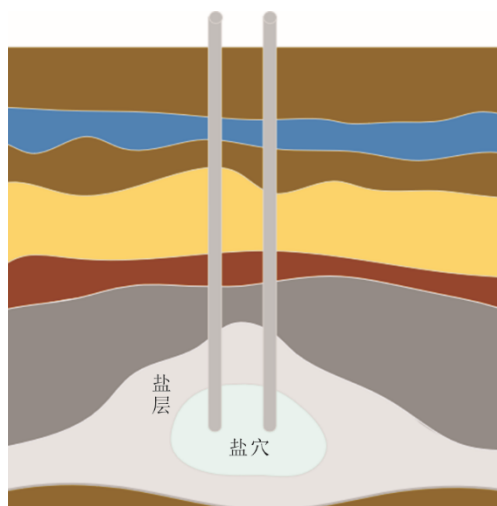


图 1 盐穴地质结构示意图

Fig.1 Geological structure diagram of salt cavern

盐穴储气库选址具体评价内容见表 1^[26-27]。首先,通过岩心测试、测井、三维地震勘测技术 etc 对地质结构进行勘查;然后,采用以精细层位标定技术、地震反演技术等为代表的三维地震解释技术,对盐层地质三维空间特征进行高精度解释^[25]。在此基础上,实现对盐穴储气库的选址评价。盐穴储气库选址评价包括密封性与稳定性评价、断层稳定性评价、夹层与盖层完整性评价等。

1.2 造腔工艺

1.2.1 老腔改造工艺

老腔改建盐穴储气库,指利用盐化企业采卤制盐留下的盐腔进行改造。其原理是在腔体评价、井筒改造的基础上,通过注采井向采卤盐腔中注入气

体,将腔内原有卤水通过排卤井排至地表,从而形成储气腔体^[28]。常用的老腔改建形式有单井单腔和对接连通老腔 2 种^[29-30]。

表 1 CAES 盐穴储气库选址评价内容
Tab.1 Content of site selection evaluation for CAES salt cavern gas storage

名称	因素	内容
地质条件	1) 储层	1) 盐层构造完整、夹层少、厚度大、品位高;
	2) 盖层	2) 周边水源充足,便于水溶造腔; 3) 盖层厚度大,30m 以上,强度高,密封性好; 4) 远离断层、埋深适宜 500~1 500 m
选址原则		1) 靠近电力使用负荷中心、间歇性电力供给地区;
	1) 安全可靠	2) 交通便利,便于设备和建筑材料运输;
	2) 技术可行	3) 区域地质构造稳定、水文条件良好;
	3) 经济合理	4) 与再生能源结合,应尽可能靠近风电场、光伏发电厂;
		5) 无大型工厂、建筑物、居民生活区及敏感区
选址评价	1) 密封性与稳定性	1) 盐层的沉积特征、展布规律、岩石化学特征;
	2) 断层稳定性	2) 夹层的数量、性质、分布规律;
	3) 夹层与盖层完整性	3) 顶板的密封性和稳定性、围岩与含盐地层稳固性;
		4) 与盐体有关的断裂特征、断层分布及走向;
	5) 不溶物的类型、组成及计算	

我国是井矿盐产大国,拥有大量的地下盐腔资源。据统计,仅湖北、河南等省就有 500 多个老腔处于废弃闲置状态^[31]。利用采卤老腔改造盐穴储气库,其工艺流程是在原有腔体的基础上,通过井筒改造、注气排卤等工艺,完成腔体的改造过程。其具体工艺流程如图 2 所示。

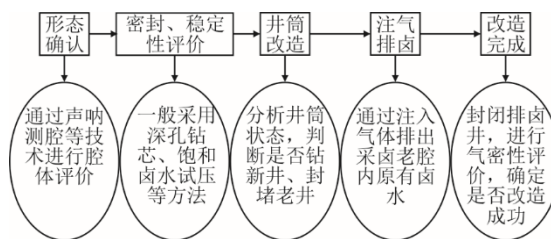


图 2 采卤老腔改造工艺流程

Fig.2 Brine extraction old cavity transformation process

采卤老腔改建储气库,具有建库时间短、投资少、能缓解建库造腔卤水出路压力等优势^[32]。可在短时间内实现规模庞大的储气能力,并带来显著的经济效益,为国家能源战略发展做出重要贡献。根据统计^[33],在盐穴储气库建设中,钻井、造腔、注气排卤分别占储气库建设投资比例为 20.3%、53.7%、26.0%。其中,造腔工程占比最大。以金坛储气库为例^[34],老腔改造单库建设投资 1 515 万元,水溶造腔新建储气库单库建设投资 2 913 万元。相

较于新建储气库，老腔改造单库建设投资可节约 1 398 万元。其建库周期可缩短 3~4 年，其投资和时间占比见表 2。

表 2 2 种工艺投资和建库周期差异

Tab.2 The difference in investment and construction period between two kinds of process

造腔工艺	老腔改造	新建储气库
钻井工程/万元		672
造腔工程/万元		2 241
井筒改/万元	965.5	
老腔评价检测/万元	549.5	
合计/万元	1 515	2 983
建库周期/年	1	4~5

当前，在金坛储气库建设中，已经成功将多个单井单腔改建为储气库^[35]。但是，对接连通老腔的研究几乎处于空白^[36]。加之盐化企业大都采用双井或者三井对接形式。所以，老腔改造盐穴储气库研究重点在于对接连通老腔改造。有关技术内容及改造难点见表 3^[37-38]。

表 3 老腔改建储气库技术内容及难点

Tab.3 Technical contents and difficulties of converting old cavities into gas storage reservoirs

技术	内容	难点
形态监测	一般利用声呐技术进行监测，形成综合报告内容，包括腔体深度、体积、各主要水平剖面直径和图表、各主要垂直剖面图表、三维图像等	复杂老腔腔体形态检测困难；对接井连通情况无法确定
气密性测试	一般使用氮气作为检测气体，检测期间生产管鞋处所承受的最大压力；根据泄漏速率与时间关系曲线、气水界面深度变化数值，对井筒及盐腔密封性进行评价	井筒密封不严、体积利用率低；套管腐蚀、水泥环老化
腔体修复	对未充分溶解腔体进行回溶，对严重偏溶部分使用阻溶剂进行修补	继续造腔时界面阻溶剂控制困难；套管腐蚀、水泥环老化
稳定性分析	通过腔体形态模型，利用数值模拟的方法对盐腔拉张应力、塑性变形、蠕变量、套管鞋应变等进行评价	采卤过程盐层损失难以控制
井筒改造	一般有直接封堵+新井、锻铣封堵+新井、全井套铣 3 种形式	井矿差；井身结构复杂；地层压力低

湖北应城 300 MW 级压缩空气储能电站示范工程利用已有采盐压裂井 A 井、B 井等周边地下盐腔，进行压缩空气储能。由于盐穴储气库基于老腔改建，在改造前，通过声呐测腔、地震勘测等技术手段，对老腔形态进行探测。通过深孔取芯等操作对盐穴腔体的稳定性进行评价。该阶段技术路线及要点如图 3 所示^[39]。

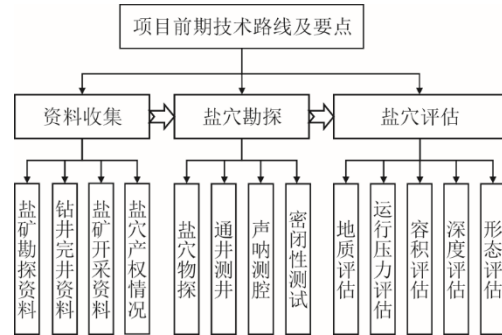


图 3 老腔改建储气库技术路线及技术要点
Fig.3 Technical route and key points of gas storage reconstructed by old cavity

1.2.2 水溶造腔工艺

盐穴储气库由井筒和腔体两部分组成，主体工程是盐穴储气库的造腔过程。其原理是在钻完井基础上，通过下入造腔管柱进行注水。利用盐岩溶于水的特性，溶蚀盐岩，排出卤水，从而形成腔体。一般造腔管柱由中心管、中间管以及生产套管 3 部分组成^[40]。

盐穴储气库水溶造腔通常使用单井垂直造腔工艺，该工艺只用一口井将地上设备收集到地下目标盐层，用一口井完成造腔排卤作业^[41-42]，其工艺流程如图 4 所示。

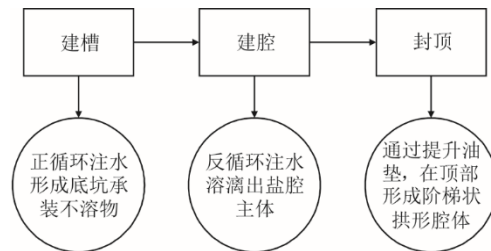


图 4 单井垂直造腔工艺流程
Fig.4 Single well vertical cavitation technology process

单井垂直造腔工艺有单井单腔和单井双腔 2 种形式，如图 5 所示。单井双腔^[43]常针对 2 种地质情况进行建腔：1) 储层之中，存在着难以溶断的厚夹层；2) 在适宜的地质条件下，存在着 2 个储层。其造腔过程为，钻 1 口贯通厚夹层或 2 个储层的井，通过下入造腔管柱，对下部盐层进行溶蚀形成腔体。之后，提升造腔管柱，进行上部盐层的溶蚀，直至 2 个独立腔体的形成。

随着当前研究向薄盐层方向发展，双井造腔工艺也逐渐成为研究重点。该工艺可分为双井垂直造腔工艺以及双井水平造腔工艺^[44]，示意如图 6 所示。双井垂直造腔工艺通过钻 2 口直井，单独建槽至

2 个腔体连通。连通后，2 口直井采用“一注一抽”的套管作业模式进行建腔。

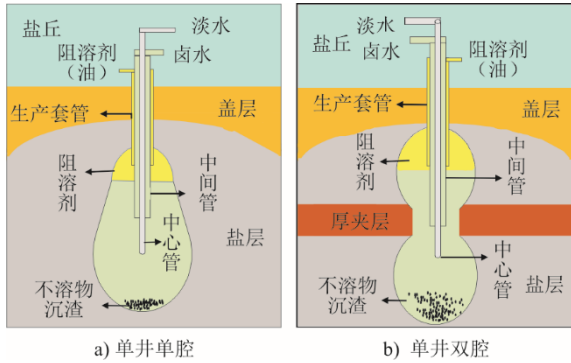


图 5 单井垂直造腔工艺

Fig.5 Vertical cavitation technology for single well

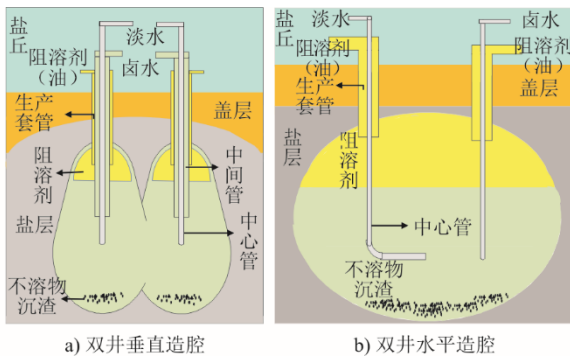


图 6 双井造腔工艺

Fig.6 Double-well cavity making process

双井水平造腔工艺造腔特点是在直井建槽形成溶腔的基础上，钻 1 口水平井与之连通。之后，2 口井注水、排卤交替作业，从而形成盐腔。在 3 种造腔工艺中，阻溶剂（柴油、氮气等）用来控制腔体上溶，保护顶板。3 种造腔工艺各有优缺点，具体对比见表 4。

表 4 3 种造腔工艺对比

Tab.4 Comparison of three cavity building processes

工艺	优点	缺点
单井垂直造腔	1) 能更好控制腔体形态; 2) 施工技术简单且成熟	1) 对地质要求严格, 如盐岩厚度足够大、品味高、夹层少等; 2) 我国可满足该工艺的盐层地质较少
双井垂直造腔	1) 造腔速度较快; 2) 耗能低、投资成本较低; 3) 施工效率较高、体积较大	1) 两井之间的距离过短, 会严重影响卤水浓度和施工效率; 2) 洞室形状控制困难
双井水平造腔	1) 适合我国薄盐层、多夹层地质; 2) 不需要跨多个夹层, 工艺安全性好; 3) 投资成本低; 4) 油管布置简单; 5) 洞室发育率高、洞室体积大; 6) 注气效率高、施工速度快	1) 施工技术复杂且不成熟; 2) 洞室形状监测困难; 3) 腔体形态控制困难

1.3 盐穴监测技术

盐穴储气库的监测，是压缩空气储能电站运行过程中不可缺少的一部分。对电站的正常运行发挥着重要作用。盐穴监测包括腔体形态监测、腔体带压监测、密封性监测、井筒泄露监测、地面沉降监测等，具体内容见表 5^[45]。

表 5 盐穴监测技术

Tab.5 Salt cavern monitoring technology

监测内容	监测方法	监测重点
腔体形态	声呐测腔、三维地震勘测等	盐穴几何形状、体积、腔体顶部及底部的发展趋势
腔体带压	声纳探测技术、微地震监测等	识别腔体的垮塌、蠕变
腔体密封	氮气气密封测试、气体示踪剂等	识别腔体是否发生泄露
井筒泄露	光纤检测、漏磁检测、中子方法等	井筒是否泄露
地面沉降	微地震监测、全球定位技术等	地层偏移、沉降情况

2 盐穴储气库智能建造工艺技术

盐穴储气库的智能建造，应贯穿从勘探选址、设计施工到运维管理的全生命周期过程。本文依托大数据、人工智能、物联网、BIM 等技术，对 300 MW 压缩空气储能电站项目提出盐穴储气库的智能建造技术体系。将盐穴储气库智能建造划分为智能选址、智能设计、智能施工以及智能运维 4 个阶段。智能选址阶段主要是在地质勘探和建模的基础上，通过多准则选址原则，对地质进行评价。智能设计阶段是在原有技术上，对钻井、建腔、监测等进行全方位的优化设计，从而提高施工质量和水平打下基础。智能施工阶段主要是实现盐穴储气库施工可视化、风险实时监控和预警等功能，从而提升施工的效率和安全水平。智能运维阶段是在盐穴储气库竣工交付的基础上，完善其监测体系，实现盐穴储气库运行全方位实时监测，并通过人工智能等技术，帮助运维人员实现盐穴储气库的智能决策。各阶段包含的相关技术如图 7 所示。

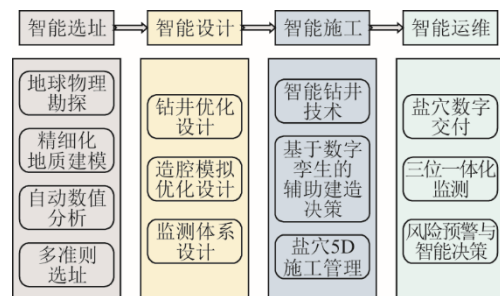


图 7 盐穴储气库智能建造工艺及关键技术

Fig.7 Intelligent construction process and key technologies of salt cavern gas storage

2.1 智能选址

智能选址是通过建立以综合地质勘测信息为基础的精细化地质模型,为盐穴储气库建造打下基础。结合专家经验等信息,对不同地质模型进行综合评价,从而实现盐穴储气库的多准则选址。

1) 地球物理探勘^[46] 依托三维地震勘测、三维地震数据处理、三维地震数据解释等技术,对地质条件进行详细评价,从而确定盐层的三维分布特征。评价内容包括盐层空间分布、盐岩性质、盐层密封性和稳定性、氯化钠含量、夹层性质等。

2) 精细化地质建模 综合地震勘探、钻孔、地质调查等各方面的地质勘察信息,在 BIM 核心建模软件中,利用其参数化功能创建岩土结构族和相应的岩土材质^[47]。通过构建所有相关地质面,建立盐穴地质构造模型。同时,将地质信息数据集成在三维地质模型中。

3) 自动数值分析 通过数据格式转换,将精细化地质模型导入数值分析软件中,以岩体力学为基础,通过建立的地质力学模型,对地质稳定性进行评价。在数值分析过程中,通过编写代码等形式对数值模型进行预处理。减少人工干预程度,尽可能实现数值分析自动化^[48]。

4) 多准则选址^[49] 多准则选址指标和决策方法见表 6。

在对地质精细化建模和自动数值分析的基础上,结合专家经验数据、决策者态度等,确定盐穴储气库选址评价标准和权重分配,建立多准则选址体系。在确定选址指标权重后,对指标权重进行敏感性分析。通过研究各指标变动对不同方案综合评价的影响以及指标调整的现实可行性及经济性,从而消除敏感区域,识别潜在备选方案^[54]。在此基础上,对不同方案进行综合比较,确定最优选址。

2.2 智能设计

盐穴储气库智能设计指在创建盐穴三维模型的基础上,对盐穴进行优化设计,从而更好地模拟造腔过程,控制腔体形态,获得更大的有效体积和更好的稳定性^[55]。同时,通过合理设计和及时监测,避免造腔过程中产生畸形腔体^[56],减少施工过程夹层垮塌等风险的发生。通过对盐穴储气库优化设计,确定设计方案,包括钻井方案、造腔工艺方案及造腔监测方案。其关键技术包括钻井优化设计、造腔模拟优化设计、盐穴监测体系设计 3 种。

1) 钻井优化设计 机器学习通过海量的数据,进行训练学习,能实现同一模型在不同环境下模型的修正和调整。以大数据和人工智能等技术为依托,建立智能钻井优化设计和管理系统。通过搭建人工神经网络、遗传算法^[57]、决策树及随机森林算法^[58]、BP 神经网络^[59]等机器学习方法对钻头选型、钻井参数设计、钻井液设计、钻具组合设计、钻井轨道设计、固井设计等进行优化^[60]。

2) 造腔模拟优化设计 通过造腔物理模拟和造腔数值模拟 2 种方式,分析各工艺参数对造腔的影响。造腔物理模拟一般利用大、中型盐岩块进行腔体形成过程模拟。模拟内容包括注水流量、循环次数、阻溶剂位置、盐溶蚀角、卤水浓度等^[61]。造腔数值模拟研究依托流体力学、热动力学等学科背景,构建水溶造腔、流动场等模型,从而更准确地预测造腔形态等方面的变化。当前造腔模拟数值算法主要有纳维-斯托克斯方程、浮羽流、达西流、平衡法 4 种^[62]。综合 2 种模拟方式,对管柱位置等工艺参数进行优化设计,并掌握水溶建腔形态控制方法,形成最优造腔方案,指导储气库工程建设。

3) 盐穴监测体系设计 确立以地质体密封性监测、储气库内部运行动态监测、井筒动态监测以及地面设施监测为主的监测体系设计方向^[63]。对盐穴-井筒-地面三位一体监测体系进行设计。在确定选址的基础上,规划地面沉降监测点数量和位置、井筒和盐

表 6 多准则选址
Tab.6 Multi-criteria site selection

名称	研究方向	内容
多准则 选址 指标 ^[49]	经济	建造成本、投资回收、年运营成本、各种损耗成本等
	环境	资源可利用性、废物排放等
	社会	民众和政府支持度、工程服务半径、创造就业机会、拉动 GDP 增长等
	地理	区域稳定性、水文地质条件等
	技术	供电效率、储气库储气能力等
	风险	极端天气、地质活动、空气泄露等
多准则 选址 决策 方法 ^[50]	指标 权重法	多指标综合决策,包括主观赋权、客观赋权,主客观赋权 ^[51]
	模糊层次 分析法	通过确定指标的相对权重,采用灰色关联分析法,对指标与指标之间的关联系数进行计算,从而建立与之对应的评价关联序列 ^[52]
	模糊多准 则决策法	利用概率语言术语集和后悔理论,定义综合感知效用函数;通过熵权法建立加权模型,利用最小距离偏差建立标准权重模型 ^[49] 采用逼近理想解排序方法对各个评价对象进行优劣排序,结合矩估计理论对指标权重进行优化集成 ^[53]

穴施工过程传感设备安装位置和数量、腔体施工过程形态及进度实时监测方法等。运维场景中，结合盐穴储气库竣工后实际形态等因素，在原有监测体系基础上，对监测点和监测位置等进行优化设计。

2.3 智能施工

盐穴储气库智能施工阶段，依托智能钻井技术、数字孪生技术等实现施工过程实时可视化、进度可视化、风险实时监控和预测等功能。

1) 智能钻井技术 通过智能传感器，实时收集钻井数据、井下环境数据，结合人工智能技术、智能钻井优化设计和管理系统，对实时监测数据进行处理与分析，利用在线训练等方法对机械钻速等钻井参数实时优化^[64]。应用人工智能技术，通过建立神经网络等方式对钻井井眼轨迹进行导向和控制，保证实际井眼轨迹和设计井眼轨迹高度吻合^[65]。钻井过程依托大数据、智能传感、人工智能等技术，对钻井设备和钻井过程进行动态监测和分析，实现钻头等设备的实时监控和预警、井眼清洁及水力学

实时监控、井涌实时监控、卡钻预测等功能^[66]。

2) 基于数字孪生的辅助建造决策技术^[67] 基于数字孪生的辅助建造决策技术将历史数据、实时数据、预测数据融合在一起。实现追踪过去、监控现在、预测未来的功能。将所有需要的数据与3维模型可视化集成在一起。综合全要素信息感知技术、增强现实技术、三维可视化监测技术等进行储气库的观测和研究，从而做出优化决策。具体形式为：建立基于高精度动态模型的盐穴储气库数字孪生体。该数字孪生体准确反映各参数动态波动，动态跟踪各参数变化。建立基于机器学习智能算法的仿真综合模型，集成包括地质边界、井筒、管道、腔体、地面过程模拟模型在内的各种信息，实现施工和运维过程实时动态监测、注采优化、实时预测、可视化等功能，确保虚拟数据与真实数据进行实时交互和动态优化。该技术可划分为数据层、模型层、逻辑层和交互层，从而实现盐穴储气库的辅助建造和决策，详细内容如图8所示。

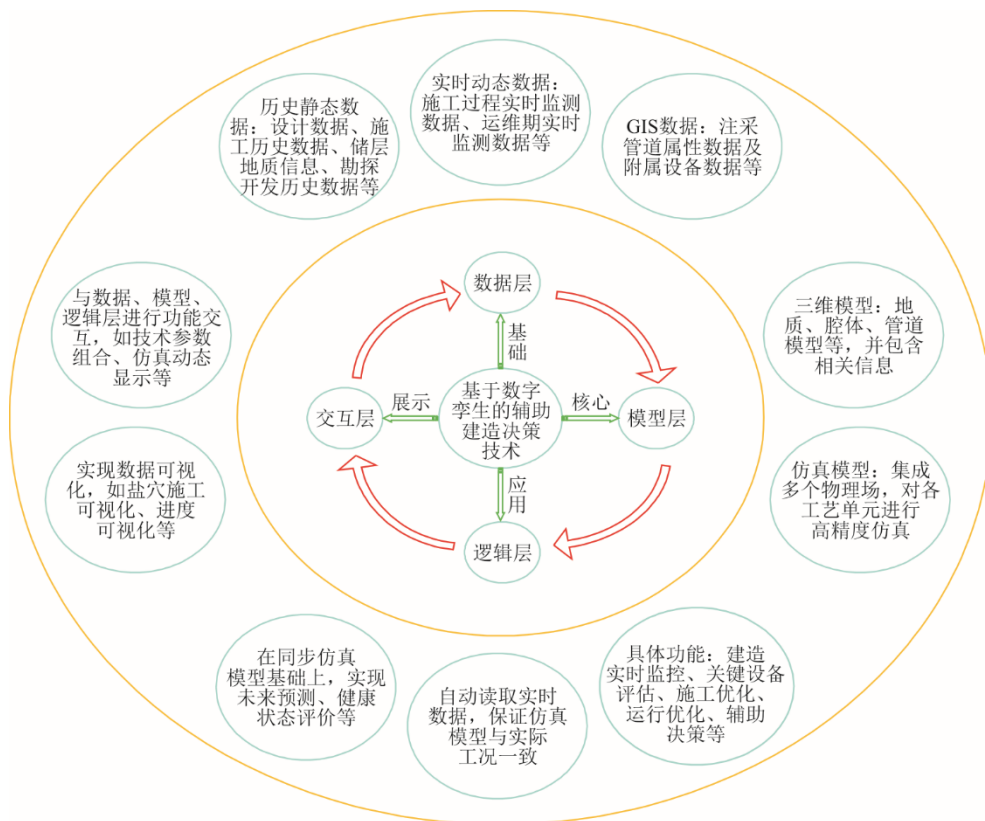


图8 基于数字孪生的辅助建造决策技术
Fig.8 Digital twin based assisted construction decision making technology

3) 盐穴 5D 施工管理 结合 BIM 技术和先进监测技术，通过地下盐穴三维数字化模型，直观展示地下盐穴的地层类别及其分布。通过盐穴洞室颜

色和透明度变化，直观展示盐穴实际施工进度。对盐穴施工过程中岩体蠕变、开裂、夹层性质、流量、温度、井筒实时状态等进行自动识别监测，实现对

盐穴施工可视化、盐穴实时监测管理，保证整个施工阶段的业务数据协同和共享。

2.4 智能运维

盐穴储气库智能运维应涉及全面感知、真实分析、实时控制、持续优化四大功能。具体包括盐穴储气库监控、预警、预测、分析、决策等，关键技术如下。

1) 盐穴储气库数字交付 盐穴储气库的数字交付建立在盐穴三维模型基础上。通过相关技术实现盐穴三维模型、文档资料和属性参数的关联映射，实现其数据可视化。数字交付主要内容包括盐穴三维模型、与盐穴相关属性（包括盐穴的基本属

性、各阶段技术指标、施工参数等）、各阶段施工过程中管理及盐穴竣工资料等。盐穴储气库数字交付统一于压缩空气储能电站数字化交付平台。该平台是压缩空气储能电站设计建设阶段并延伸至运维阶段使用的大数据信息管理系统。可确保从设计施工到运营期各应用系统数据资料的完整性和准确性。其盐穴数字化交付平台架构如图9所示。其中，数字化交付平台模型层包含盐穴三维数字化模型以及从选址、设计到施工阶段关联的各项数据。模块层对数据进行接入、复制、提取、转换加载等操作，并实现数据的计算存储。应用层实现数据分析、数据可视化等数据服务。

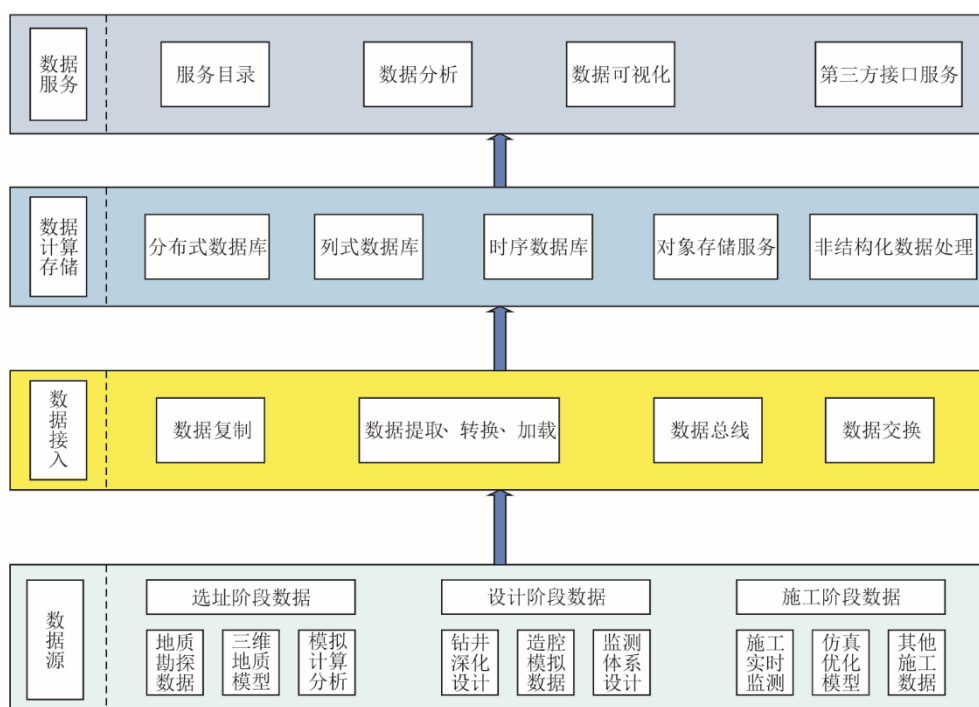


图9 盐穴数字化交付平台架构

Fig.9 Architecture of salt cave digital delivery platform

在应城 300 MW 级压缩空气储能示范工程项目建设中，结合地震勘探等技术，探测深层地下盐穴空间形态和性质。将获取的资料进行分析后，在综合地质资料的基础上，利用 BIM 技术构建盐穴地形地质三维模型。通过电厂标识系统实现盐穴三维模型和文档资料的关联映射，统一交付至盐穴储气库数字化交付平台中。该平台可实现盐穴储气库三维可视化和数据可视化等功能。同时，通过接收实时采集的盐穴静/动态数据，对数据进行存储、计算和分析，从而帮助相关人员更好地了解盐穴运行状态。

2) 三位一体化监测 基于先进传感、智能在

线监测等技术，建立完善的“盐穴-井筒-地面”三位一体的三维可视化监测体系^[20]，实现三位一体全面感知。通过基于 5G+WIFI 的泛在感知低延时、高宽带物联网多网融合全覆盖网络，将实时监测数据传输到大数据信息管理平台。实时监测数据包括盐穴内部运行数据、井筒数据、地面数据等。

3) 风险预警与智能决策 构建以微地震监测为主的“三位一体”实时风险预警体系。通过对监测数据挖掘、数值模拟分析等方式，对盐穴储气库运行状态进行风险评估。按照风险评级做出相应预警，并通过专家系统做出反馈，生成最优解决方案。

帮助决策人员更好地进行决策。

3 未来研究重点

在 300 MW 级压缩空气储能电站示范工程中,盐穴储气库基于老腔改建,进行钻新井、封堵老井、注气排卤等操作。在该工程中,利用地球物理勘探和声呐测腔技术,建立了盐穴三维地质模型,并实现了盐穴地面沉降监测。同时,采用 BIM 的 5D 施工管理实现盐穴施工过程和进度可视化,并进行工期预测。电站建成后计划依托 3 维全息投影技术建立压缩空气储能电站全厂数字化展厅。从全生命周期管理来看,盐穴储气库在建造过程中智能化应用程度还有待提升,对建库核心理论的认识还有待完善。未来应加强盐穴储气库智能建造工程技术研究,完善基于模型仿真对应的流固热耦合等相关理论,从技术、系统、理论、模型 4 个方面构建起一套完善的盐穴储气库智能建造体系。其相关的重点研究内容如图 10 所示^[68-69]。

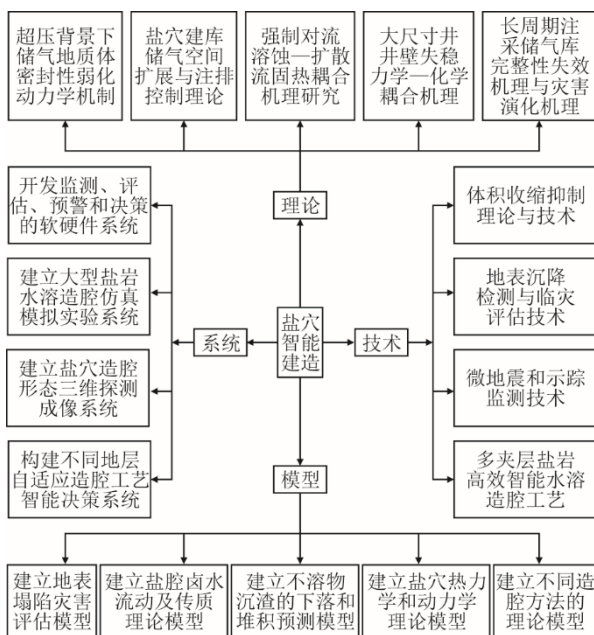


图 10 盐穴智能建造技术

Fig.10 Intelligent construction technology for salt cavern

4 结 论

1) 从选址、改建、溶腔、监测 4 个角度,对盐穴储气库当前建造技术进行讨论。总结了目前盐穴储气库的选址评价体系、老腔改建关键技术和难点、3 种水溶造腔工艺及其优缺点,以及相关的监测技术。

2) 研究分析了盐穴储气库智能化建造技术。

将盐穴储气库智能建造划分为智能选址、智能设计、智能施工、智能运维 4 个阶段。依托大数据、物联网、人工智能等先进技术,对 4 个阶段应用到的关键技术进行讨论,从而实现盐穴储气库全生命周期的智能管理。

3) 结合 300 MW 级压缩空气储能电站示范工程建设项目,对盐穴储气库智能建造过程中的应用进行描述。整体而言,该项目盐穴储气库基于现有老腔改建,相关智能建造技术在该项目中得到了深度应用,智能化水平较高。最后,本文从模型、技术、理论、系统 4 个方面,指出盐穴储气库智能建造未来需要研究的重点技术及理论。

[参考文献]

- [1] 吴斌,李睿,李季,等. 压缩空气储能的定位与发展[J]. 发电设备, 2023, 37(5): 283-286.
WU Bin, LI Rui, LI Ji, et al. Orientation and development of compressed air energy storage[J]. Power Equipment, 2023, 37(5): 283-286.
- [2] 魏军英,王鹏,王吉岱,等. 微型压缩空气储能系统工作特性研究[J]. 热力发电, 2019, 48(3): 28-34.
WEI Junying, WANG Peng, WANG Jidai, et al. Working characteristics of micro compressed air energy storage system[J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(3): 28-34.
- [3] 姜萍,赵振家,常然然. 压缩空气储能系统储气室多变量反馈线性化控制[J]. 热力发电, 2015, 44(8): 79-83.
JIANG Ping, ZHAO Zhenjia, CHANG Ranran. multivariable feedback linearization control for gas storage chamber in compressed air energy storage system [J]. Thermal Power Generation, 2015, 44(8): 79-83.
- [4] 范云鹏. 地下储气库的作用及功能综述[J]. 石化技术, 2015, 22(7): 267.
FAN Yunpeng. Summarization of composition and function of underground gas repository[J]. Petrochemical Industry Technology, 2015, 22(7): 267.
- [5] 褚庆福,吴杰,徐博. 欧美地下储气库管理体制及对我国的启示[J]. 物流技术, 2015, 34(6): 94-97.
ZHU Qingfu, WU Jie, XU Bo. Enlightenment underground gas storage management system in Europe and the US to China[J]. Logistics Technology, 2015, 34(6): 94-97.
- [6] 刘炜,陈敏,吕振华,等. 地下储气库的分类及发展趋势[J]. 油气田地面工程, 2011, 30(12): 100-101.
LIU Wei, CHEN Min, LYU Zhenhua, et al. Classification and development trend of underground gas storage[J]. Oil-Gas Field Surface Engineering, 2011, 30(12): 100-101.
- [7] ZHOU S W, XIA C C, DU S G, et al An analytical solution for mechanical responses induced by temperature and air pressure in a lined rock cavern for underground compressed air energy storage[J]. Rock Mechanics & Rock Engineering, 2015, 48(2): 749-770.
- [8] KIM H M, RUTQVIST J, KIM H, et al. Failure monitoring and leakage detection for underground storage of compressed air energy in lined rock caverns[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016, 49(2): 573-584.
- [9] LI P, KANG H, ZHU Q, et al. Numerical and experimental investigations of concrete lined compressed air energy

- storage system[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 390: 136-153.
- [10] 凌晨, 吴斌, 朱学成, 等. 350 MW级先进压缩空气储能系统建模与特性分析[J]. *能源研究与利用*, 2023(5): 28-32.
- LING Chen, WU Bin, ZHU Xuecheng, et al. Modeling and characteristic analysis of 350 MW advanced compressed air energy storage system[J]. *Energy Research & Utilization*, 2023(5): 28-32.
- [11] 张刚雄, 郑得文, 张春江, 等. 地下储气库信息数据管理平台开发及应用[J]. *油气储运*, 2015, 34(12): 1284-1287.
- ZHANG Gangxiong, ZHENG Dewen, ZHANG Chunjiang, et al. Development and application of information and data management platform for underground gas storage[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2015, 34(12): 1284-1287.
- [12] 糜利栋, 曾大乾, 李遵照, 等. 中国石化地下储气库智能化建设进展及展望[J]. *世界石油工业*, 2023, 30(6): 88-95.
- MI Lidong, ZENG Daqian, LI Zunzhao, et al. Progress and prospect of intelligent of Sinopec underground gas storage[J]. *World Petroleum Industry*, 2023, 30(6): 88-95.
- [13] SATKIN M, NOOROLLAHI Y, ABBASPOUR M, et al. Multi criteria site selection model for wind-compressed air energy storage power plants in Iran[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 32: 579-590.
- [14] LI J, WANG Z, ZHANG S, et al. Machine-learning-based capacity prediction and construction parameter optimization for energy storage salt caverns[J]. *Energy*, 2022, 254: 124-238.
- [15] SHAO F, WANG Y. Intelligent overall planning model of underground space based on digital twin[J]. *Computers and Electrical Engineering*, 2022, 104: 108-393.
- [16] ZHANG L, WANG J. Intelligent safe operation and maintenance of oil and gas production systems: connotations and key technologies[J]. *Natural Gas Industry B*, 2023, 10(3): 293-303.
- [17] CHUNYAN M, YAN C, XIAOHENG C. The level of underground salt cavern morphological detector control system design[C]//2013 2nd International Symposium on Instrumentation and Measurement, Sensor Network and Automation (IMSNA), Toronto, ON, Canada, 2013: 282-285.
- [18] 陈健. 基于深度学习的盐穴储气库油水界面监测方法[J]. *石油工业技术监督*, 2022, 38(12): 36-39.
- CHEN Jian. Oil-water interface monitoring method in salt cavern gas storage based on deep learning[J]. *Technology Supervision in Petroleum Industry*, 2022, 38(12): 36-39.
- [19] 安国印, 王文权, 陈春花, 等. 盐穴储气库井筒泄露监测技术现场试验研究[C]//中国石油学会天然气专业委员会. 第31届全国天然气学术年会论文集: 2019年卷安徽, 华北石油管理局有限公司江苏储气库分公司, 2019: 224-233.
- AN Guoying, WANG Wenquan, CHEN Chunhua, et al. Field test study on wellbore leak monitoring technology of salt-cavern gas storage[C]//Natural Gas Professional Committee of China Petroleum Society. Proceedings of the 31st National Natural Gas Academic Annual Conference: 2019 Volume Anhui, Jiangsu Gas Storage Branch of North China Petroleum Administration Co., Ltd., 2019: 224-233.
- [20] 马新华, 郑得文, 魏国齐, 等. 中国天然气地下储气库重大科学理论技术发展方向[J]. *天然气工业*, 2022, 42(5): 93-99.
- MA Xinhua, ZHENG Dewen, WEI Guqi, et al. Development directions of major scientific theories and technologies for underground gas storage[J]. *Natural Gas Industry*, 2022, 42(5): 93-99.
- [21] 丁建林. 利用现有采卤溶腔改建地下储气库技术[J]. *油气储运*, 2008, 27(12): 42-46.
- DING Jianlin. Reconstruction of existing salt-caverns into underground gas storage[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2008, 27(12): 42-46.
- [22] KUSHNIR R, ULLMANN A, DAYAN A. Thermodynamic and hydrodynamic response of compressed air energy storage reservoirs: a review[J]. *Reviews in Chemical Engineering*, 2012, 28(2/3): 123-148.
- [23] 何奇, 冯永存, 邓金根, 等. 国内盐穴储气库空间利用技术及展望[J]. *石油钻采工艺*, 2022, 44(6): 711-718.
- HE Qi, FENG Yongcun, DENG Jingen, et al. Review and outlook of space utilization technology for salt-cavern gas storage in China[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2022, 44(6): 711-718.
- [24] 姜德义, 陈结, 刘伟, 等. 盐岩溶腔造腔关键技术及综合利用概述[C]. 首届地下储库科技创新与智能发展国际会议论文集. 2016: 37-43.
- JIANG Deyi, CHEN Jie, LIU Wei, et al. Overview of key technologies and comprehensive utilization of salt karst cavity[C]. Proceedings of the 1st International Conference on Technological Innovation and Intellectualization of UGS. 2016: 37-43.
- [25] WAN Y Q, DING G, ZHAO Y, et al. Key technologies for salt-cavern underground gas storage construction and evaluation and their application[J]. *Natural Gas Industry B*, 2018: 623-630.
- [26] 郑雅丽, 完颜祺琪, 邱小松, 等. 盐穴地下储气库选址与评价新技术[J]. *天然气工业*, 2019, 39(6): 123-130.
- ZHENG Yali, WANYAN Qiqi, QIU Xiaosong, et al. New technologies for site selection and evaluation of salt-cavern underground gas storages[J]. *Natural Gas Industry*, 2019, 39(6): 123-130.
- [27] 蒋中明, 唐栋, 李鹏, 等. 压气储能地下储气库选型选址研究[J]. *南方能源建设*, 2019, 6(3): 6-16.
- JIANG Zhongming, TANG Dong, LI Peng, et al. Research on section method for the types and sites of underground repository for compressed air storage[J]. *Southern Energy Construction*, 2019, 6(3): 6-16.
- [28] 任众鑫, 巴金红, 任宗孝, 等. 盐岩储气库堆积物注气排卤试验研究[J]. *油气田地面工程*, 2018, 37(11): 50-53.
- REN Zhongxin, BA Jinhong, REN Zongxiao, et al. Experimental study on gas injection and brine ejection deposits in hock sat gas storages[J]. *Oil-Gasfield Surface Engineering*, 2018, 37(11): 50-53.
- [29] 富隋小庆, 张勇, 康延鹏, 等. 山东岩盐溶腔储气造腔技术研究展望[J]. *山东国土资源*, 2023, 39(2): 56-61.
- FUSUI Xiaoqing, ZHANG Yong, KANG Yanpeng, et al. Prospect of gas storage and cavity making technology in salt karst cavity in Shandong province[J]. *Shandong Land and Resources*, 2023, 39(2): 56-61.
- [30] 巴金红, 康延鹏, 姜海涛, 等. 国内盐穴储气库老腔利用现状及展望[J]. *石油化工应用*, 2020, 39(7): 1-5.
- BA Jinhong, KANG Yanpeng, JIANG Haitao, et al. Present situation and prospect of the utilization of old cavity in domestic salt cavern gas storage[J]. *Petrochemical Industry*, 2020, 39(7): 1-5.

- [31] 薛雨, 王元刚, 张新悦. 盐穴地下储气库对流井老腔改造工艺技术[J]. 天然气工业, 2019, 39(6): 131-136.
XUE Yu, WANG Yuangang, ZHANG Xinyue. A technology of reconstructing salt cavern underground gas storages by use of the old chambers of those existing convection wells[J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(6): 131-136.
- [32] 田中兰, 夏柏如, 苟凤. 采卤老腔改建储气库评价方法[J]. 天然气工业, 2007, 27(3): 114-116.
TIAN Zhonglan, XIA Bairu, GOU Feng. Evaluation method for reconstruction of gas storage with old brine extraction[J]. Natural Gas Industry, 2007, 27(3): 114-116.
- [33] 张海梁, 于玉良, 王逊, 等. 天然气盐穴储气库建库方式比较[C]//中国土木工程学会燃气分会. 中国燃气运营与安全研讨会论文集: 2017年卷. 北京燃气集团技术信息部, 北京优奈特燃气工程技术有限公司, 2017: 6.
ZHANG Hailiang, YU Yuliang, WANG Xun, et al. Comparison of construction methods of natural gas salt cavern storage[C]//Gas Branch of China Civil Engineering Society. Proceedings of China Gas Operation and Safety Symposium: 2017 vol. Beijing Gas Group Technical Information Department, Beijing Unite Gas Engineering Technology Co., Ltd., 2017: 6.
- [34] 成渊朝. 盐穴地下储气库工程投资控制策略探析[J]. 国际石油经济, 2017, 25(4): 87-91.
CHENG Yuanchao. Strategy analysis on investment control of salt cavern underground gas storage project[J]. International Petroleum Economics, 2017, 25(4): 87-91.
- [35] 刘继芹, 乔欣, 李建君, 等. 复杂对流井连通老腔改建储气库技术[J]. 油气储运, 2019, 38(3): 349-355.
LIU Jiqin, QIAO Xin, LI Jianjun, et al. Key technology and application of reconstruction of existing brine extraction caverns into salt cavern gas storage[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2019, 38(3): 349-355.
- [36] 垢艳侠, 完颜琪琪, 丁国生, 等. 高效利用复杂连通老腔新方法 with 效果分析[J]. 科技创新导报, 2019, 16(29): 89-93+97.
GOU Yanxia, WANYAN Qiqi, DING Guosheng, et al. New method and effect analysis for efficient utilization of complex connected old cavity[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2019, 16(29): 89-93.
- [37] 石悦, 郭文朋, 徐宁, 等. 采卤老腔改建盐穴储气库关键技术及应用[J]. 特种油气藏, 2021, 28(5): 134-139.
SHI Yue, GUO Wenpeng, XU Ning, et al. Key technology and application of reconstruction of existing brine extraction caverns into salt cavern gas storage[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2021, 28(5): 134-139.
- [38] 门吉. 盐穴储气库技术的发展和应[J]. 煤气与热力, 2019, 39(6): 4-7.
MEN Ji. Development and application of salt cavern gas storage technology[J]. Gas & Heat, 2019, 39(6): 4-7.
- [39] 万明忠, 王辉, 纪文栋, 等. 压缩空气储能电站盐穴选址关键流程及控制因素[J]. 电力勘测设计, 2022(12): 1-4.
WAN Mingzhong, WANG Hui, JI Wendong, et al. Critical process and controlling factor of salt cavern site selection in compressed air energy storage power station[J]. Electric Power Survey & Design, 2022(12): 1-4.
- [40] 陈结, 姜德义, 刘伟, 等. 盐矿水溶造腔及溶腔综合利用研究进展[J]. 中国科学基金, 2021, 35(6): 911-916.
CHEN Jie, JIANG Deyi, LIU Wei, et al. Research progress on water-soluble cavity formation and comprehensive utilization of salt mine[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2021, 35(6): 911-916.
- [41] 郑雅丽, 赖欣, 邱小松, 等. 盐穴地下储采技术[J]. 盐科学与化工, 2021, 50(1): 7-14.
ZHENG Yali, LAI Xin, QIU Xiaosong, et al. Underground storage and production technology of salt cavity[J]. Journal of Salt Science and Chemical Industry, 2021, 50(1): 7-14.
- [42] 王建夫, 朱阔远, 李友才, 等. 金坛盐穴储气库造腔关键参数优化[J]. 石油钻采工艺, 2020, 42(4): 471-475.
WANG Jianfu, ZHU Kuoyuan, LI Youcai, et al. Optimization of key cavity construction parameters of Jintan salt-cavern gas storage[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2020, 42(4): 471-475.
- [43] 田中兰, 夏柏如. 盐穴储气库造腔工艺技术研究[J]. 现代地质, 2008, 22(1): 97-102.
TIAN Zhonglan, XIA Bairu. Research of solution mining techniques on salt cavern gas storage[J]. Geoscience, 2008, 22(1): 97-102.
- [44] PENG T, WAN J, LIU W, et al. Choice of hydrogen energy storage in salt caverns and horizontal cavern construction technology[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 60: 106-489.
- [45] 朱礼萍. 国内外地下储气库监测技术概述[J]. 石油管材与仪器, 2022, 8(4): 1-7.
ZHU Liping. An overview of monitoring technology for underground natural gas storage[J]. Petroleum Tubular Goods & Instruments, 2022, 8(4): 1-7.
- [46] 郭朝斌, 王志辉, 刘凯, 等. 特殊地下空间应用与研究现状[J]. 中国地质, 2019, 46(3): 482-492.
GUO Chaobin, WANG Zhihui, LIU Kai, et al. The application and research progress of special underground space[J]. Geology in China, 2019, 46(3): 482-492.
- [47] 方海龙, 曾亚武. 基于 Revit 的 BIM 技术在地下结构设计中的应用研究[J]. 建筑技术, 2016, 47(4): 353-356.
FANG Hailong, ZENG Yawu. Application research of BIM technology based on Revit in underground structure design[J]. Architecture Technology, 2016, 47(4): 353-356.
- [48] LI H, CHEN W Z, TAN X J, et al. Digital design and stability simulation for large underground powerhouse caverns with parametric model based on BIM-based framework[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2022, 123: 104-375.
- [49] GAO J, MEN H, GUO F, et al. A multi-criteria decision-making framework for compressed air energy storage power site selection based on the probabilistic language term sets and regret theory[J]. Journal of Energy Storage, 2021, 37: 102-473.
- [50] 王兵, 刘朋帅, 邓凯磊. 基于模糊多准则决策模型的废弃矿井抽水蓄能电站选址研究[J]. 矿业科学学报, 2021, 6(6): 667-677.
WANG Bing, LIU Pengshuai, DENG Kailei. Site selection of pumped storage power station in abandoned mines: results from fuzzy-based multi criteria decision model[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2021, 6(6): 667-677.
- [51] 任静. 提高多指标决策客观性的赋权方法[J]. 管理评论, 2012, 24(5): 160-169.
REN Jing. Empowerment methods to improve the objectivity of multi-indicator decision making[J]. Management Review, 2012, 24(5): 160-169.
- [52] DING H, WU Q, ZHAO D, et al. Risk assessment of karst

- collapse using an integrated fuzzy analytic hierarchy process and grey relational analysis model[J]. *Geomechanics and Engineering*, 2019(5): 18.
- [53] 薛黎明, 苏超, 郑志学, 等. 基于矩估计-TOPSIS 评判模型的顶煤冒放性分级评价[J]. *矿业科学学报*, 2018, 3(1): 61-67.
XUE Liming, SU Chao, ZHENG Zhixue, et al. Grading assessment of top coal cavability based on moment estimation and TOPSIS model[J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2018, 3(1): 61-67.
- [54] WU Y, ZHANG J, YUAN J, et al. Study of decision framework of offshore wind power station site selection based on ELECTRE-III under intuitionistic fuzzy environment: a case of China[J]. *Energy Conversion and Management*, 2016: 66-81.
- [55] 李康, 完颜祺琪, 王立献, 等. 盐穴储气库水溶造腔数值模拟技术研究进展[J]. *盐科学与化工*, 2017, 46(12): 1-5.
LI Kang, WANYAN Qiqi, WANG Lixian, et al. Review of salt cavern leaching numerical simulation[J]. *Journal of Salt Science and Chemical Industry*, 2017, 46(12): 1-5.
- [56] 王建夫, 巴金红, 王文权. 金坛盐穴储气库畸形对盐腔体积影响[J]. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 2022, 44(6): 105-113.
WANG Jianfu, BA Jinhong, WANG Wenquan. Distortion influence on cavern volume of Jintan salt cavern gas storage[J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 2022, 44(6): 105-113.
- [57] TOBATAYEVA A, MESBAHI A P, MUZAPAROV M, et al. Development of a numerical tool for design of the bottom hole assembly (BHA) using artificial neural networks[J]. *Energy Exploration*, 2011, 29(4): 357-378.
- [58] BATRUNY P, ZUBIR H, SLAGEL P, et al. Drilling in the digital age: Machine learning assisted bit selection and optimization[C]. *International Petroleum Technology Conference, Virtual*, 2021.
- [59] ROY V, PANDEY A, SAXENA A, et al. Assessment of machine learning techniques for real-time prediction of equivalent circulating density[C]. *Offshore Technology Conference Asia, Virtual and Kuala Lumpur, Malaysia*. 2022.
- [60] 徐楷, 苏堪华, 李猛, 等. 机器学习在油气钻井工程中的应用[J]. *非常规油气*, 2023, 10(5): 8-17.
XU Kai, SU Kanhua, LI Meng, et al. Application and development of machine learning in oil and gas drilling engineering[J]. *Unconventional Oil & Gas*, 2023, 10(5): 8-17.
- [61] 完颜祺琪, 丁国生, 赵岩, 等. 盐穴型地下储气库建库评价关键技术及其应用[J]. *天然气工业*, 2018, 38(5): 111-117.
WANYAN Qiqi, DING Guosheng, ZHAO Yan, et al. Key technology and application for evaluation of salt cavern underground gas storage[J]. *Natural Gas Industry*, 2018, 38(5): 111-117.
- [62] 孙军治, 陈加松, 井岗, 等. 国内盐穴储气库建库关键技术研究进展[J]. *盐科学与化工*, 2022, 51(10): 1-7.
SUN Junzhi, CHEN Jiasong, JING Gang, et al. Research progress on key technologies of salt cavern gas storage construction in China[J]. *Journal of Salt Science and Chemical Industry*, 2022, 51(10): 1-7.
- [63] 罗金恒, 李丽锋, 王建军, 等. 气藏型储气库完整性技术研究进展[J]. *石油管材与仪器*, 2019, 5(2): 1-7.
LUO Jinheng, LI Lifeng, WANG Jianjun, et al. The research progress on integrity technology of underground storage with gas reservoirs[J]. *Petroleum Tubular Goods & Instruments*, 2019, 5(2): 1-7.
- [64] 李华洋, 邓金根, 谭强, 等. 智能钻井技术应用体系构建及研究进展[J]. *现代化工*, 2023, 43(10): 41-45.
LI Huayang, DENG Jingen, TAN Qiang, et al. Application system construction and research progress of intelligent drilling technology[J]. *Modern Chemical Industry*, 2023, 43(10): 41-45.
- [65] 魏盈盈. 人工智能在钻井工程中的应用[J]. *中国石油和化工标准与质量*, 2022, 42(23): 127-129.
WEI Yingying. Application of artificial intelligence in drilling engineering[J]. *China Petroleum and Chemical Standard and Quality*, 2022, 42(23): 127-129.
- [66] 王茜, 张菲菲, 李紫璇, 等. 基于钻井模型与人工智能相耦合的实时智能钻井监测技术[J]. *石油钻采工艺*, 2020, 42(1): 6-15.
WANG Xi, ZHANG Feifei, LI Zixuan, et al. Real-time intelligent drilling monitoring technique based on the coupling of drilling model and artificial intelligence[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2020, 42(1): 6-15.
- [67] WANG P, LI Z, WANG X, et al. Assisting production decision technology in gas storage operation based on digital twin technologies[C]. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, Texas, USA*. 2022.
- [68] 杨春和, 王同涛. 深地储能研究进展[J]. *岩石力学与工程学报*, 2022, 41(9): 1729-1759.
YANG Chunhe, WANG Tongtao. Advance in deep underground energy storage[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2022, 41(9): 1729-1759.
- [69] 丁国生, 王云, 完颜祺琪, 等. 不同类型复杂地下储气库建库难点与攻关方向[J]. *天然气工业*, 2023, 43(10): 14-23.
DING Guosheng, WANG Yun, WANYAN Qiqi, et al. Construction difficulties and research directions of various complex UGSs[J]. *Natural Gas Industry*, 2023, 43(10): 14-23.

(责任编辑 杨嘉蕾)