

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2026.01.010

压气储能人工硐室储气库的研究现状与工程应用

哈真^{1,2}, 程少振^{2,3}, 陈佩佩¹, 张代玉³, 张波³, 潘政⁴, 涂洪亮⁵

(1. 北京建筑大学, 北京 100044; 2. 中国能源建设集团有限公司工程研究院, 北京 100044;

3. 酒泉能建玉能科技有限公司, 甘肃 酒泉 735000; 4. 陕西秦耀储能科技有限公司, 陕西 铜川 727000;

5. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 压缩空气储能(CAES)作为一种规模化物理储能技术,通过电能-高压空气内能-电能的转换机制,在可再生能源消纳与电网调峰中具有重要战略意义。人工硐室储气库凭借选址灵活、适配硬岩地质等优势,成为CAES系统核心装备,其研究聚焦于储气库选址选型、围岩稳定性、热力学响应及结构气密性等关键问题。我国CAES技术实现了从“跟跑”到“领跑”的跨越,装机规模与效率均全球领先。但人工硐室仍面临复杂地质条件下选址难、多场耦合模型相对简化及密封材料耐久性不足等挑战。未来需重点攻关复杂地质条件下人工硐库选址技术体系、高压高氧干湿交替环境下密封技术及储气库运营状态智能感知技术研发,以推动CAES在“沙戈荒”新能源基地及新型电力系统中的规模化应用。本文系统总结了人工硐室储气库的技术进展,为CAES工程设计与标准制定提供理论参考,助力“双碳”目标下能源结构转型。

关键词: 压气储能;人工硐室;储气库;研究现状;工程应用

中图分类号: TK02

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2026)01-0083-11

Research Progress and Engineering Applications of Compressed Air Energy Storage in Artificial Cavern Gas Storage

HA Zhen^{1,2}, CHENG Shaozhen^{2,3}, CHEN Peipei¹, ZHANG Daiyu³, ZHANG Bo³,

PAN Zheng⁴, TU Hongliang⁵

(1. Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China;

2. Engineering Research Institute of China Energy Engineering Group Co., Ltd., Beijing 100044, China;

3. Jiuquan CEEC Yuneng Technology Co., Ltd., Jiuquan, Gansu 735000, China;

4. Shaanxi QinYao Energy Storage Technology Co., Ltd., Tongchuan, Shaanxi 727000, China;

5. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Compressed Air Energy Storage (CAES), as a large-scale physical energy storage technology, operates through the conversion mechanism of electrical energy - high-pressure air internal energy - electrical energy, and holds significant strategic importance in renewable energy integration and power grid peak shaving. Artificial cavern gas storage has become a core equipment of CAES systems due to its advantages such as flexible site selection and adaptability to hard rock geology, with research focusing on key issues including site and type selection of gas storage, surrounding rock stability, thermodynamic response, and structural airtightness. China has achieved leapfrog development in CAES technology, marking the nation's spanning from "following" to "leading" in the energy storage field, with both installed capacity and efficiency leading the world. However, artificial caverns still face challenges such as difficult site

收稿日期:2025-09-09

修稿日期:2025-11-01

基金项目: 国家自然科学基金项目“复杂温度路径下饱和黏土耦合热响应试验研究及无网格数值分析”(51808026);中国能源建设股份有限公司重大科技项目“600MW级压缩空气储能电站关键技术和装备研究”(CEEC2024-KJZX-01);酒泉市重大科技专项“压缩空气储能人工硐室储气库设计理论与关键参数研究”

作者简介: 哈真(1998—),男,博士研究生,主要研究压气储能人工硐室储气库相关科研工作。E-mail:18810167331@163.com

通讯作者: 程少振(1986—),男,高级工程师,主要从事压气储能人工硐室储气库相关的科研和技术创新等工作。

E-mail:szcheng2937@ceec.net.cn

selection under complex geological conditions, relatively simplified multi-field coupling models, and insufficient durability of sealing materials. In the future, key efforts should be focused on the research and development of technical systems for artificial cavern site selection under complex geological conditions, sealing technologies in high-pressure, high-oxygen, dry-wet alternating environments, and intelligent sensing technologies for the operational status of gas storage facilities. This will promote the large-scale application of CAES in "desert, Gobi, and barren land" new energy bases and new power systems. This work systematically summarizes the technical progress of artificial cavern gas storage, provides theoretical references for CAES engineering design and standard formulation, and contributes to the transformation of energy structure under the "dual carbon" goals.

Keywords: compressed air energy storage; artificial rock cavern; gas storage reservoir; research status; engineering applications

压缩空气储能 (CAES) 作为一种长时物理储能技术,其核心机制是将电能转化为压缩空气的内能进行存储。其储能原理为:在用电低谷(或低电价位)时,将电网多余电力驱动压缩机以压缩空气,并将其储存在耐高压储气结构之中,电能转化为空气内能;而在用电高峰时,将压缩空气通过膨胀机,推动透平发电机发电,将空气内能转换为电能,以补充电网电力所需,工作过程遵循电能-内能-电能的能量转换形式,其储能原理如图 1 所示。

压缩空气储能可以实现能量的大规模存储与调节,从而促进可再生能源的高效利用与消纳;其次,该技术不产生直接碳排放,有助于减少对化石燃料的依赖,推动低碳经济的发展;从经济效益而言,尽管初期投资较大,但长期运行成本低,且能够通过峰谷电价差等方式获得收益,具备较好的经济可行性。因此,构建压气储能电站对于优化能源结构、保障能源安全、保护生态环境等方面均具有不可替代的作用,是实现能源可持续发展目标的重要途径之一。

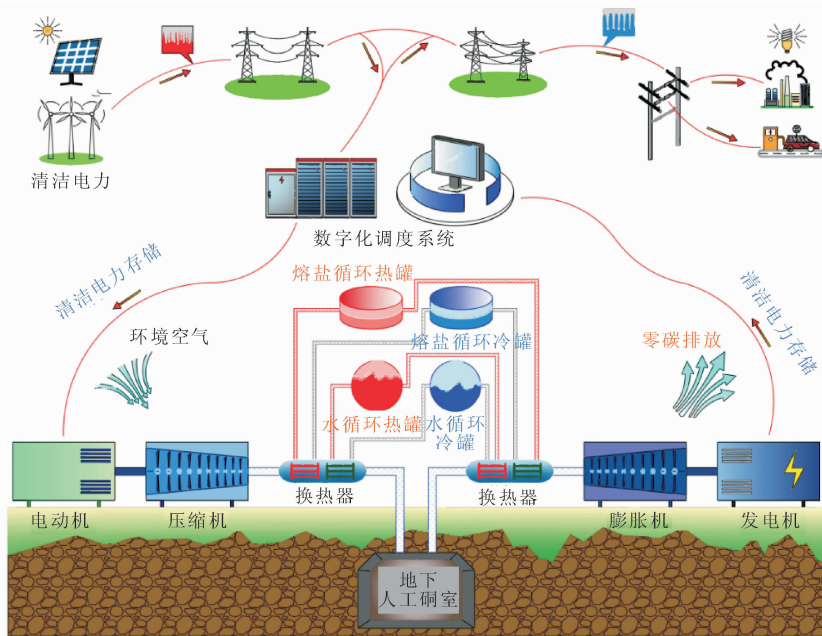


图 1 压气储能电站储能原理示意图

压气储能电站由压缩机系统、储换热系统、膨胀发电系统和高压储气系统四大系统组成^[1]。高压储气系统形式主要有地面管线钢、天然盐穴、新建人工硐室及废弃矿洞等。其中,人工硐室储气库系统是 CAES 的核心装备,通过在地下岩体开挖硐室并在内壁施作密封结构,配备相应的控制和监测系统

及核心辅助装置,实现高压空气稳定、安全和高效的输入、存储和输出。人工硐室储气库选址灵活,可在全国范围内的硬岩地区广泛建设。大规模人工硐室型压气储能电站可以高度匹配国家新能源大基地分布,尤其是“三北”及“沙戈荒”地区,是支撑我国新型电力系统建设和发展的重要选择。压气储能人工

硐室储气库的研究与建设正处于起步阶段,国内外学者及工程技术人员开展了大量的研究,为压气储能行业的发展做出了重要贡献。

1 研究现状

现阶段有关 CAES 地下人工硐室的科研工作主要围绕储气库选址选型、围岩稳定性、空气热力学、结构气密性等展开。其中,储气库选址是 CAES 系统建设的先决条件,需结合地质特征、经济效益和环境因素综合考虑。储气库选型将直接关系到系统的储能效率以及建设成本。储气库在高内压循环荷载工况下面临着复杂的热力学问题,研究空气热力学规律有助于为衬砌结构及密封层的材料选取提供理论依据。围岩稳定性和结构气密性是地下人工硐室的焦点问题,二者都是保证储气库安全平稳运行的重要因素。掌握如何通过工程改造技术(如围岩加固、局部置换、结构补强等)来进一步拓展人工硐库在复杂地质条件下的选址适应能力、通过储气库结构受力分析对结构进行优化设计以及通过新材料的研发与应用来控制空气泄漏率,将有助于推动压气储能人工硐室的商业化推广。

1.1 地下储气库选址选型

“地下决定成败,地上决定好坏”,体现了地下储气库在压气储能电站建设中的重要性。现阶段的地下储气库选址主要选择盐岩和硬岩,盐穴储气库一般设置于盐岩中,人工硐室储气库一般设置于硬岩中,目前硬质岩以花岗岩、灰岩等为代表。金维平等^[2]建立了硬岩储气洞室选址的综合评价体系,该体系可直观、清晰、系统地评价所选库址的综合适配程度。彭威等^[3]进一步细化并完善了人工硐室的选址原则。蒋中明等^[4]着重于盐岩、硬岩两种类型储气库进行对比论述,指出由于硬岩分布广泛使得人工硐室储气库的选址具备突出的优势。压气储能地下储气库选址应用方面,盐穴是目前唯一一种已经成功实现商业化运行的储气库型式,硬岩人工硐室储气库的建设正处于工程化探索和产业化推广阶段。未来,随着硬岩储气库推广应用,针对地下水、地质构造相对复杂的地质条件下的选址技术有待建立和完善。

人工硐库的类型可划分为隧道式、大罐式和厂房式三种典型结构,隧道式普遍采用直径 ≥ 10 m 的圆型截面;大罐式通常选用仓筒形式,直径范围为 25~45 m,高度达 60~100 m,顶部为半球形穹顶;厂房式则是介于隧道式和大罐式之间,作为过渡形态,

其截面通常采用顶部为拱形、底部为平直壁面的矩形截面,兼具隧道式与大罐式的结构特征^[5]。各类型硐库的结构示意图如图 2 所示,其中,隧道式目前的理论研究和设计施工相对成熟,大罐式由于储气容量大而具有较大的潜力。

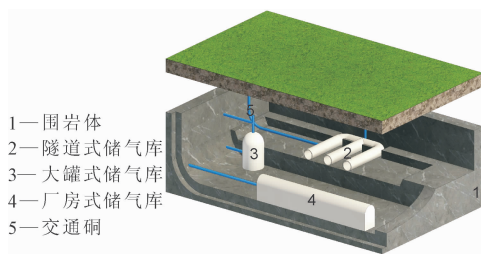


图2 不同类型硐库的结构示意图

在压气储能电站规划设计中,需基于电站装机规模对储气装置的储能容量及体积尺寸进行精准计算,以保障其满足既定的设计功率指标^[6]。在储气库的选型过程中,需同步考虑洞室稳定性与结构密封性,洞室稳定性需考虑上覆岩体的性状、力学参数以及周边地质构造情况,储气库结构密封性需考虑密封结构对围岩变形的适应能力,包括围岩塑性区分布和洞周应变等。影响洞周应变的主要因素有洞型、洞室尺寸和埋深,洞周应变随着洞室尺寸的增大而增加,随着埋深的增大而减少,其中埋深对大罐式洞室的影响更加突出^[7]。蒋中明等^[8]通过 COMSOL 建立三维瞬态储气库模型,对比分析了隧道式、大罐式、球形三种不同形式的储气库压缩空气热力学响应及温度空间分布规律,研究认为球形和大罐式储气库局部高温效应优于隧道式储气库。此外,蒋中明等^[9]基于能量守恒定律,结合地下储气库主要经历的四个阶段(充气阶段、高压储气阶段、放气阶段和低压储气阶段),给出考虑气体泄漏影响时地下储气库的储能效率和容积的确定方法,并指出储气库选型时应优先选用运行压力高、运行压力差大的设备运行方案,以降低建设成本。孙冠华等^[5,10]研究发现洞型(长径比)将会引发储气库的闷顶效应从而导致局部高温,因此大罐式储气库具备更好的空气热力学性能。

上述研究成果丰富了地下人工硐室储气库的选址选型依据,在储气库选址选型方面建立了一定的理论基础。为支撑人工硐室储气库的建设和推广,需进一步研究地下水、地质构造对储气库选址选型的影响,并亟需完善复杂地质条件下的储气库选址选型技术。

1.2 围岩稳定性

人工硐室储气库由围岩、衬砌、密封层等多层结构复合而成,其中围岩承担高内压储气库绝大部分荷载,其承载能力是保障储气库安全平稳运行的关键。地下储气库在工作过程中要承受高压和循环充、放气作用,高内压作用下的围岩抗抬动稳定性,以及循环荷载作用下岩体劣化等问题一直是行业关注的焦点。Lu^[11]、Zimmels 等^[12]使用 FLAC 模拟了不同工况下地下储气库洞室的稳定性,并计算了洞室的径向位移和围岩塑性区,给出了洞室的合理布置间距。Fraldi 等^[13]根据 Hoek-Brown 失效准则,分析了地下洞室的破坏模式,可以为人工硐室储气库的稳定性分析提供理论支撑。夏才初等^[7,14]采用有限元建模分析了洞室围岩的塑形区分布和洞周应变,计算得出了开挖和运行工况下储气库埋深对洞室稳定性的影响,并通过热力耦合数值模型研究了考虑温度影响工况下的埋深对内衬洞室稳定性的影响规律。刘智振等^[15]将广义非线性 Baker 破坏准则与极限分析法相结合,分析了洞室的三维破坏模式,计算结果相比于 Mohr-Coulomb 破坏准则更为精确。周瑜等^[16]提出了采用迭代计算方式进行围岩应力与位移求解的方法,为储气库围岩稳定性计算提供理论基础。蒋中明等^[17-19]借助我国建设的第一个硬岩浅埋衬砌地下储气库开展充放气循环试验,验证了浅埋地下储气库的可行性,同时结合压气储能平江实验库以及浙江遂昌压气储能电站的地下储气库建立三维模型,基于热力耦合理论研究了循环充放气工况下储气库结构的温度时空分布规律和应力变形特性。Rutqvist 等^[20]利用 TOUGH-FLAC 研究了储气库围岩及结构在非等温和多相流体耦合作用下的受力和稳定性问题。王其宽等^[21]针对深部硬石膏矿井内衬式储气库群的高压稳定性展开研究,确立了洞库群的优化布局参数,其结果表明:在高内压环境下,洞室埋深是影响内衬式岩洞储气库围岩变形与稳定性的最关键因素,其次为洞室间距和洞室直径,三者影响程度依次递减。张国华等^[22]构建了储气库衬砌-围岩结构的力学计算模型,给出了储气库处于弹性工作状态下的运行压力区间计算方法。

高内压隧道式储气库失稳模式理论研究方面,国内外学者也进行了一系列的研究与探索,并取得丰硕的成果。1970 年挪威学者提出挪威抗抬准则^[23],其要求内压洞室上覆岩体重量不小于垂直上抬压力,因未考虑岩体自身强度影响,用于浅埋压缩

空气储能硐室设计时偏于保守^[24-25]。Kim 等^[26]提出了基于竖直破裂面的极限平衡计算模型,考虑了岩体强度、地应力系数等参数的影响,但其局限性在于破裂面假定为一条直线。Perazzelli 等^[27]构建了简化的等效连续岩体模型,研究了浅埋隧道式人工硐室储气库在穿越软弱围岩时的上覆岩体稳定性问题。Carranza-Torres 等^[28]通过有限差分模型指出,太沙基极限平衡法在用于设计浅埋洞室时计算所得的安全系数不够可靠。针对上覆岩体稳定性的研究未综合考量岩体强度参数和破坏机制的影响,致使最小覆盖厚度计算失准^[24]。基于上述理论存在的问题,徐英俊等^[24]在关联流动 Hoek-Brown 准则框架下,结合极限分析上限定理解析出洞室隆起破坏曲线,并建立了考虑岩体强度参数和破坏模式的抗隆起破坏准则。孙冠华等^[25]建立了隧道式储气硐室上覆岩体潜在失稳模式的数学模型和求解的 Euler 方法,提出潜在破裂面的影响因素和几何参考值。基于大罐式储气库抗抬动稳定性问题,孙冠华等^[29]建立了大罐式内衬硐库上覆岩体稳定性力学模型,并探讨了埋深、储气压力等关键参数对结构安全系数的影响。

上述的研究主要针对高内压储气库围岩宏观失稳破坏,未考虑细观的局部地质缺陷影响。岩石内部天然存在断裂、节理、微裂隙及孔隙等结构性缺陷,在荷载作用与环境因素影响下,原有节理和微裂隙会发生扩展,同时可能伴随新裂隙的萌生与发育,进而导致岩石结构产生不同程度的损伤演化;硬岩储气库在运行工况下将受到循环荷载作用,围岩的损伤会逐渐累积并最终可能引发失稳破坏。为了保障储气库在循环充放气作用下能够平稳运行,蒋中明等^[30]借助 FLAC3D 开发出地下储气库围岩变形参数累积损伤计算程序,探究了洞室型式、埋深和运行下限压力对围岩损伤的影响规律。此外,地质缺陷如断层、空洞、蚀变带、裂隙密集带等是地下岩层中普遍存在的地质现象,而由于储气库密封结构对地质缺陷的敏感度高,地质缺陷的存在会使围岩-结构-密封层局部变形增大,加速围岩-结构-密封层劣化,继而对储气库的安全平稳运行带来潜在威胁。黄达等^[31]通过数值分析得出,断层的存在会不同程度改变围岩的应力分布,同时可能会伴随局部应力集中现象出现。赵青等^[32]依托某石油储备地下水封洞库工程,探究了断层破碎带与洞室间距对洞室稳定性的影响。李海轮等^[33]针对两条与洞室群相交的断层进行数值模拟,研究了洞室围岩的

应力应变发展规律。但是,针对压气储能人工硐室储气库运营工况下的地质缺陷对高内压储气库安全稳定性的影响研究相对较少。

目前,国内外学者针对人工硐室储气库围岩稳定性开展了一定的理论、数值模拟和小型试验研究,对于储气库建设的两个关键参数(埋置深度和布设间距)的选取仍需进一步细化,储气库硐室群效应亟待结合地质条件等因素进一步研究。此外,现有研究成果聚焦于人工硐室储气库的整体稳定性,而局部稳定性问题鲜有报道。现阶段有关地质缺陷对地下洞室稳定性的分析多考虑断层的影响,且研究多集中于探究断层距离、断层宽度、断层倾角等参数影响下的围岩力学响应规律,考虑高内压工况下多断层相互作用和叠加效应研究较少,其他缺陷如地质空洞、裂隙密集带等的影响规律有待进一步探究。

1.3 空气热力学

压气储能电站的储能和释能过程中储气库循环充放气,人工硐室型储气库相比其他类型储气库工作压差大、库内温度变化显著,对衬砌结构及密封层受力影响较大,掌握储气库内的空气热力学响应规律并研究热力学响应对结构的影响,对于指导人工硐室储气库的设计与建造具有一定意义。Rutqvist 等^[34]研究了 CAES 地下储气库混凝土衬砌的复杂热力学问题,给出了运行工况下压力、温度和应力的演变规律。Rutqvist 的研究因未能直接考虑洞室内气体-围岩体结构的对流换热机制,导致温度场模拟偏差显著。周舒威等^[35]据此提出了适用于地下压气储能内衬洞室的时变内压-温度耦合应力计算方法。Kim 等^[36]使用 TOUGH-FLAC 模拟研究了压气储能内衬洞室的耦合热力学、多相流体流动和热传递规律。Kushnir 等^[37-38]研究了地下绝热洞室对压气储能电站充放气循环的热力学响应,推导了储气库内温度和压力变化的数值解与近似解析解,通过敏感性分析确定了影响储气库温度和压力波动的主要参数。周舒威等^[39]基于解析解^[37],考虑了压缩空气与地下洞室热交换以及围岩热传导的影响,运用拉普拉斯变换和叠加原理推导得出了内衬洞室温度和气压的解析解,并利用热弹性轴对称模型确定了由温度和气压引起的围岩与结构的应力和位移。Xia 等^[40]在考虑热传导的条件下,对此解析解^[37]做出简化,提出了一种形式更为简洁的非绝热解析解。进一步地,周瑜等^[16]在简化解析解^[40]的基础上,考虑了空气泄漏的影响因素,提出了计算洞室压力、空气泄漏率、围岩应力及位移的迭代计算

法。蒋中明等^[41]在前人研究的基础上深入探讨了压缩因子变化特性对地下储气库压缩空气热力学过程分析的影响,此外他们还通过算例^[18]计算得出了循环充放气条件下压缩因子的变化规律以及温度和压力的变化规律,即压缩因子随循环充放气的累积呈渐进性增大趋势,但在后期增长幅度逐步收敛,同时压缩空气的温度也伴随循环充放气次数的增多而显著升高,后期同样逐步趋于稳定。

随着储气库内压缩空气的温度和压力变化,密封层、围岩等结构的温度、应力及变形都会随之变化,所以研究储气库内压缩空气的热力学响应是合理设计压气储能电站运行参数的关键要素之一。刘澧源等^[42]提出了压气储能电站地下储气库内压缩空气热力学过程分析的差分计算方法,相较于传统围岩温度为常量的假定,该方法利用 FLAC3D 软件实现洞壁温度变化过程的计算与压缩空气热力学过程的差分计算,从而更加实际地反映储气库内压缩空气的热力学变化过程。蒋中明等^[43]在压缩空气温度和压力的计算之中考虑了围岩换热及传热特性的实时影响,从而进一步减小了解析解算法^[40]的误差。Zhang 等^[44]考虑了储气库与环境之间的热交换作用,构建了恒容恒温模型、恒容绝热模型、恒压恒温模型以及恒压绝热模型,并分析了四种模型在充放电过程中的压缩空气热力学变化特征。

万发和蒋中明等^[45-46]指出,现有的求解储气库压缩空气热力学变化规律的解析解,其计算结果多为温度和压力的平均值,而均值不能真实地拟合压缩空气热力学特性的空间分布规律。储气库洞室内部实际为不均匀的温度应力,极端情况下会使洞室围岩和衬砌产生局部热损伤破坏。针对以上问题,万发等^[45]使用 COMSOL 等温共轭传热模型,对 Huntorf 电站单储气库的日循环运行过程开展了模拟研究,认为变温层位于洞壁附近、硐室内压力分布均匀,并研究了储气库体型参数对压缩空气热力学特性空间分布的影响。蒋中明等^[46]基于压缩空气热力学数值方法,建立了储气库的三维瞬态模型,分析比对了隧道式、大罐式及球式储气库压缩空气热力学特性变化过程以及温度空间分布规律。储气库在充放气循环中会导致压缩空气湿度发生变化,所以还应当考虑湿度因子对热力学过程的影响^[47]。He 等^[48]考虑了围岩的热传导作用,建立了数学模型模拟不同运营工况和热传导条件下硐库中的空气动力学变化规律,以探究压气储能的储能容量。蒋中明等^[47]考虑了湿度影响下压缩空气的热力学变

化特性,对模型^[48]加以修正,针对储气库内初始含湿量及入库气体含湿量对压缩空气温度和压力的影响机制展开了研究,实现了对地下储气库空气冷凝现象的模拟。

针对压缩空气热力学响应的研究,现有理论模型多基于理想气体假设,未来研究建议进一步考虑非理想气体状态方程、湿度效应及多相流耦合模型,同步采用高精度数值方法构建储气库空气热力学、围岩应力场及渗流场的动态交互模型,以准确预测极端工况下的温度梯度分布、密封层失效风险及围岩损伤演化,从而提升人工硐室热力学设计的可靠性。

1.4 结构气密性

储气库是保障电站运行性能和可靠的关键系统,其中密封是核心。硬岩人工硐室储气库通常由围岩、衬砌结构和密封层组成,储气库密封结构示意图如图 3 所示。压气储能内衬洞室的密封性问题,涉及洞室结构力学、热力学与密封材料渗透特性的复杂多场耦合问题。为保障人工硐室的密封性能,密封层需与围岩及结构形成变形协调机制。

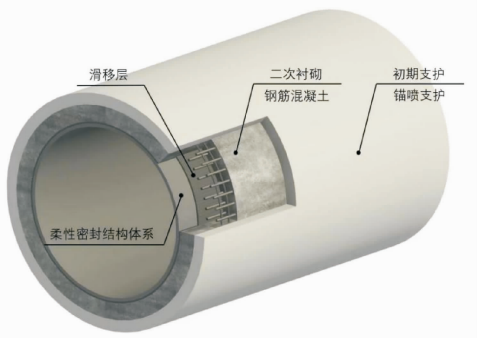


图 3 人工硐室储气库密封结构示意图

为了更为全面地认识硐室的密封特性并指导工程建设,国内外诸多学者从硐室热力学响应、密封材料渗透规律、力学特性等角度展开探索。Allen 等^[49]指出,储气库每天的空气泄漏量应控制在 1% 以内,以保障电站的运行效率。Kim 等^[36,50]使用数值分析的方法,模拟了硐室埋深为 100 m,储气压力在 5~8 MPa 时的工况,探究了开挖扰动区内硐室围岩应力分布特性与变形机制,揭示了气体泄漏主要发生于衬砌密封界面初始缺陷或荷载循环作用下诱生的裂缝处。蒋中明等^[51]依托 FLAC3D 软件并结合钢筋混凝土裂缝分析理论,系统探究了衬砌配筋方式、配筋率、钢筋保护层厚度、围岩类别及温压循环荷载工况等因素对衬砌开裂演化特征的作用机理。钟巍等^[52]基于达西定律,给出了内含空腔围岩

中,气体渗入量和气体渗流到达时间的解析式。周瑜等^[53]构建了压气储能洞室的多场耦合控制方程,该方程可系统实现对洞室温度、压力、空气泄漏率的求解。夏才初等^[54]考虑了洞室空气渗漏过程和混凝土衬砌孔隙的影响,推导了压气储能洞室的空气非稳态渗流方程,并给出衬砌内空气压强分布的近似解析解。叶斌等^[55]采用球形储气洞室模型,根据达西渗流定律推导得出硬岩内衬洞室中空气泄漏量的理论计算公式,并量化解析了维持压气储能电站基本运行的临界渗透率阈值。孙冠华等^[56]依据真实气体 Redlich-Kwong 状态方程计算得到储气库的实时泄漏率计算方法,并提出一套泄漏监测系统用以实践。

密封层是保证人工硐室气密性的关键结构,密封层材料的选择及其对储气库内部环境的适应性决定了储气库密封的耐久性。早期在北欧发展了 Lined Rock Cavern (LRC) 的技术,该技术以钢板作为密封层材料,钢板作为非承压单元仅用于高压气体的密封,钢衬受力后经混凝土传递至围岩承载体系^[57]。后来,日本和韩国的学者探索采用高分子板材替代钢衬的工程方案,高分子材料具有气体渗透特性,因此在硐室运营期间高压气体会穿透密封层^[53]呈现一定的泄漏率。混凝土抗渗方面,夏才初等^[54]通过计算得出,在运行压力为 5~8 MPa、衬砌厚度为 0.5 m 的情况下传统的抗渗混凝土并不能满足洞室的空气渗透率要求,所以需要使用特殊抗渗混凝土或高分子材料等来进一步加强硐室的密封性。关于选取高分子材料,在典型运营工况条件下,周瑜等^[53]筛选了丁基橡胶 (IIR)、三元乙丙橡胶 (EPDM)、天然橡胶 (NR) 和玻璃钢 (FRP) 四类高分子材料,认为其适用于压气储能内衬洞室的密封系统,并提出丁基橡胶与玻璃钢应作为优先选择材料。目前,随着压气储能工程化应用的发展,需要进一步研发适用于高温、高压、高氧及干湿交替环境的人工硐室储气库密封材料。

储气库密封层材料的耐久性决定了储气库的安全性以及运营成本。夏才初等^[58]通过研究认为应力疲劳法与应变疲劳法因未考量裂纹扩展阶段演化规律导致疲劳寿命计算值偏大,因此钢衬疲劳寿命计算须考虑裂纹扩展效应影响;钢衬疲劳寿命除与材料本体力学性能有关外,主要与围岩弹性模量、洞室运营压力和初始裂纹尺寸有关,钢衬疲劳寿命与围岩弹性模量成正相关、与洞室运营压力及初始裂纹尺寸成负相关。蒋中明等^[59]对衬砌配筋机制展开研究,提出储气库处于运行压力上限时,衬砌配筋

率越低贯穿性裂缝数量越多,裂缝宽度越大。配筋率相同时,采用钢筋直径和间距小的配筋方式更容易达到衬砌限裂目标。选址时选择围岩质量好的地层可大幅度降低衬砌中出现的裂缝数量和减少裂缝开裂宽度。高分子材料耐久性主要受温度、压力、循环荷载作用影响,但是高内压人工硐室储气库的高分子密封层耐久性相关的研究较少。

压气储能人工硐室储气库的气密性是保障储气库安全运行的核心,其研究聚焦于多场耦合机制与材料-结构协同设计。当前研究表明,硐室在充放气循环中,温度、压力动态变化会引发衬砌开裂、密封层缺陷和围岩裂隙渗漏,进而可能会导致气体泄漏。但是现有研究仍存在些许不足,比如多场耦合模型未充分整合热-力-渗流的动态交互,高分子密封层长期耐温压循环性能验证不足,且工程实证数据缺乏。未来需进一步发展多物理场耦合模型,开发高性能密封材料(如自修复高分子、纳米改性混凝土等),并结合智能监测技术实现泄漏预警与动态监测,以推动人工硐室储气库向更高安全性、更长使用寿命方向发展。

2 国内外典型项目介绍

2.1 国外典型项目简介

1978年,世界上第一座商业化运行的CAES电站——Huntorf电站问世。Huntorf电站位于德国下萨克森州,利用地下盐穴作为储气库,并采用传统的补燃式压气储能技术类型,在释放能量时需要使用天然气加热空气以提高效率。Huntorf电站虽然在其初始设计上依赖于化石燃料进行补燃,但它的建设和运行经验对于后来发展出更高效、更环保的CAES系统(如非补燃或绝热CAES系统)起到了重要的奠基作用,开创了压气储能建设的先河。美国阿拉巴马州的McIntosh电站是全球第二座投入运营

的CAES电站,于1991年开始运行,是继德国Huntorf电站之后的重要里程碑,标志着CAES技术在全球范围内的进一步发展和应用。McIntosh电站仍采用地下盐穴作为储气库,储能容量约为2 600 MW·h,尽管McIntosh电站仍属于补燃式CAES,但其不仅在技术上实现了对Huntorf电站的优化和升级,还进一步验证了CAES技术在实际电力系统中的可行性和经济性。它的建设和运行对全球储能行业的发展产生了深远影响,特别是在电网调峰、可再生能源整合以及低碳能源转型领域发挥了重要的作用。

LRC(Lined Rock Cavern)的概念最早由瑞典在20世纪80年代中期提出,即在稳定岩体中通过爆破或机械开挖形成地下洞室,并在其表面铺设混凝土衬砌以形成人工储气库。2002年,瑞典建成了全球首个大罐式LRC试验库(Skallen试验储气库),该试验库用于储存高压天然气,埋深115 m,容积4万m³,最高内压可达20~25 MPa;结构形式为垂直圆柱体,顶部半球形,底部弧形;硐室采用人工爆破开挖并施作混凝土衬砌,围岩以片麻岩为主。Skallen试验储气库的建设,验证了地下人工硐室的可行性,其优势在于可以克服天然地质条件的限制。2001年,日本建成了上砂川町CAES示范项目,该项目的储气库利用废弃煤矿巷道进行改建,巷道呈圆柱形结构,直径6 m,长57 m,埋深450 m,容积约1 600 m³,最高运行压力8 MPa,输出功率为4 MW;外层衬砌采用0.7 m厚的分块式混凝土预制块,块间填充密封材料,并外覆回填混凝土层,内层衬砌由3层3 mm厚的丁基橡胶和尼龙加强网组成。

上述压气储能项目标志着CAES技术从依赖地质条件到人工硐室创新的跨越,为全球能源转型提供了关键储能解决方案。国外已建成的典型CAES项目汇总如表1所示。

表 1 国外典型项目汇总

项目名称	国家	建设时间	电站容量/MW	埋深/m	储气方式	储气库容积/万 m ³	备注
Huntorf 电站	德国	1978 年	290,后扩充为 321	650~800	盐穴储气	31	世界首座商业运行的 CAES 电站
McIntosh 电站	美国	1991 年	110	450	盐穴储气	53.8	世界第二座 CAES 电站
Skallen 试验储气库(储天然气)	瑞典	2002 年	—	115	人工硐室	4	基于 LRC 概念建成,验证了硬岩地质条件下高压储气建设的可行性
上砂川町压缩空气储能项目	日本	2001 年	2	450	废弃矿道	0.16	衬砌为分块式混凝土预制块,内衬由 3 层 3 mm 厚的丁基橡胶板与尼龙加强网组成
韩国 CAES 电站试点项目	韩国	2011 年	—	100	人工硐室	—	内衬由丁基橡胶和钢板组成,探究了浅埋混凝土内衬洞室的可行性

2.2 国内典型项目简介

我国的 CAES 电站起步较晚,整体发展历程体现了从理论研究、技术验证到工程示范直至商业化应用的逐步演进过程。现阶段国内的 CAES 技术已经走在世界前列,无论是装机规模还是储能效率均远高于国际同类项目,压气储能电站的建设正在克服地质条件的束缚,如雨后春笋般涌出。

前期的压气储能电站选址主要以盐穴为主,江苏金坛盐穴 CAES 项目是目前国内首个实现商业化运行的 CAES 电站,一期工程装机容量为 60 MW,储能周期为 4 h 充放电,采用非补燃式 CAES 技术,设计寿命 30 年,支持每日充放电循环。该项目是中国在 CAES 领域实现技术自主化、规模化和商业化应用的里程碑,其盐穴资源利用、非补燃技术突破及零碳特性,为构建新型电力系统、推动“双碳”目标提供了关键支撑。随着湖北应城盐穴 CAES 项目正式并网发电,标志着我国在 300 MW 级大规模物理储能技术领域实现了重大突破,成为绿色能源转型的“中国方案”之一。湖北应城盐穴 CAES 项目是全球首个 300 MW 级非补燃盐穴 CAES 电站,也是国内首座全容量发电的 300 MW 级 CAES 电站,其装机容量 300 MW/1500 MW·h,利用地下约 500 m 处的盐穴作为储气库,容积 70 万 m³,并通过“高位注气、低位排卤”的技术解决盐穴沉渣空间利用难题。该项目采用非补燃技术,零碳排放,创造了单机功率、储能规模、转换效率三项世界纪录。

然而,由于盐穴资源的选址受限,势必会影响到压气储能地下储气库的规模化发展,为此我国开展了对于地下人工硐室储气库建设的探索。平江压气储能试验硐项目是中国首个在硬岩地层中建造的浅埋式 CAES 储气硐室示范工程,储气硐室埋深 110

m、直径约 4 m、长度 5 m,工作压力达 10 MPa。平江试验硐的建成,填补了我国在硬岩地层进行高压储气库工程实践的空白。河北张北 CAES 电站项目采用地上管线钢和地下储气库相结合的形式,装机容量为 100 MW/400 MW·h,储气库容积约 10 万 m³,采用钢板密封,目前地面系统已并网发电,地下储气库建设中。宁夏大唐中宁 CAES 电站项目,装机容量为 100 MW/400 MW·h,储气库埋深 150 m、储气容积 10 万 m³,采用环形硐室建造技术,突破了软岩地质储气库建设难题,目前储气库正在建设中。湖南望城压气储能实验硐是中国能建集团投资建设的全球最大的人工硐室原位试验平台,试验硐室内径 6 m,设计压力 18 MPa,配备高压空气注入系统,可模拟储气库充放气循环、保压及多场耦合环境,为硬岩地质和高内压储气库的建设提供关键数据支撑。

甘肃酒泉 CAES 电站项目是全球首台 300 MW 级人工硐室 CAES 电站,储能容量为 300 MW/1800 MW·h,储能时长 8 h,发电时长 6 h,硐库类型为隧道式人工硐室,埋深 110 m,密封方式采用柔性密封层,目前正处于设备调试阶段。甘肃酒泉作为“陆上三峡”风电基地和太阳能富集区,具备巨大的储能潜力,该项目实现了核心设备全面国产化,不仅是国内储能技术的又一里程碑,更是全球首个成功应用人工硐室的大规模 CAES 工程,标志着中国在储能领域实现了从“跟跑”到“领跑”的跨越。此外,河南信阳 300 MW 级压气储能电站项目、陕西铜川 350 MW 级压气储能电站项目等,采用不同形式的人工硐库类型和密封形式,相继问世。我国的典型人工硐室 CAES 项目汇总如表 2 所示,可见现存项目的装机规模正快速向 300 MW 级迈进^[60]。

表 2 国内典型人工硐室项目总结

项目名称	容量	储气库形式	储气库容积/万 m ³	埋深 /m	运行压力 /MPa	密封方式	工程状态
河北张北 100 MW 项目	100 MW/ 400 MW·h	地上储气罐 和地下储气库	10	—	—	钢板	地面储气系统并 网发电/储气库建设中
宁夏中宁 100 MW 项目	100 MW/ 400 MW·h	环形人工 硐室	10	150	10	柔性刚 内衬	建设中
甘肃酒泉 300 MW 项目	300 MW/ 1800 MW·h	隧道式 人工硐室	22	—	—	柔性内衬	建设中
河南信阳 300 MW 项目	300 MW/ 1200 MW·h	隧道式 人工硐室	30	200	—	钢板	建设中
陕西铜川 350 MW 项目	350 MW/ 1800 MW·h	大罐式圆形截面 3 条隧道连通	26	180	—	薄钢板	建设中
湖南岳阳 300 MW 项目	300 MW/ 1500 MW·h	隧道式 人工硐室	28	240	—	—	完成可研评审
新疆阜康 100 MW 项目	100 MW/ 1000 MW·h	人工硐室	10	—	—	内部高弹性材料, 外部高压材料	结束招标

3 发展趋势与展望

当前研究已在人工硐室储气库的选址选型、围岩稳定性、热力学响应及结构气密性四大方面建立了基础的理论体系,但仍面临显著挑战:复杂地质条件下选址技术体系不够成熟,地下水与地质构造的影响机制尚未完善;围岩稳定性研究中埋置深度、布设间距、衬砌厚度等关键参数有待细化,硐室群效应及不同地质缺陷类型的影响研究较少;热力学模型是否可以精准反映实际工况下的温度和压力动态变化情况有待验证;高分子密封材料的长期耐温压循环性能缺乏考量,多场耦合机制与智能监测技术应用不足等,上述问题解决后将快速推进人工硐室储气库的规模化和产业化大发展。

人工硐室储气库作为 CAES 系统的核心装备,其技术突破与规模化应用是实现“双碳”目标下能源结构转型的关键支撑,可为“沙戈荒”新能源基地开发及新型电力系统构建提供坚实保障。为提升人工硐室储气库的安全性、可靠性与经济性,笔者认为未来人工硐室的发展应关注如下几个方面:

(1) 建立多维度储气库选址评价指标体系,优先选择 II、III 级硬质围岩,针对“沙戈荒”新能源基地的特点,结合区域日照、风速等资源禀赋,实现储气库与新能源基地、电网节点的就近布局,开发适配多地层条件和地质参数的综合选址技术,降低输电损耗。融合大数据与人工智能技术,构建地质构造、地下水分布等参数的动态评估模型,提升复杂地质条件下选址的科学性与效率。

(2) 理论研究方面,着重于优化围岩力学响应模型与热力学模型,建立考虑高温高内压循环、蠕变、疲劳等的围岩本构模型,以及交变、突变温压条件下的围岩-衬砌结构的应力应变响应规律。

(3) 密封层材料方面,由于储气库的运行压力正随着 CAES 电站的建设规模逐步增大,势必需要发掘更高效、更安全的金属及高分子密封材料,推进自修复高分子材料的研发应用。同时,高内压工况下的混凝土衬砌渗透性能、钢材的疲劳耐久性以及高分子材料的布设安装仍需进一步考量和完善。

(4) 储气库结构方面,应关注储气库硐室群的叠加效应,细化储气库群的合理埋深和布置方式,建立埋深选取的设计理论体系。储气库的钢筋混凝土衬砌是允许带裂缝工作的,但是裂缝的开裂程度及裂缝宽度上限还需建立有针对性的控制标准来完善。此外,应关注密封堵头结构在长期循环荷载作

用下的应力应变响应,保障堵头的结构安全和气密性。

(5) 构建智能化监测与预警系统,实现对温压变化、气体泄漏等参数的实时监控与定位,结合远程监控与故障诊断技术,形成全生命周期动态运维体系。

(6) 完善行业标准体系与工程实证研究,基于国内外典型项目实践,制定人工硐室储气库选址、设计、施工及运维的统一行业标准,明确气密性、围岩稳定性、埋深等关键指标的量化要求,并开展大型人工硐室储气库示范工程建设,积累复杂环境下的工程实证数据,为技术推广提供实践支撑。

参考文献:

- [1] 孙冠华,朱开源,纪文栋,等. 压缩空气储能电站地下硐库的基本概念、设计理念与方法[J]. 隧道与地下工程灾害防治,2024,6(1):14-23.
- [2] 金维平,彭益成. 硬岩地区压缩空气储能工程地下储气洞室选址方法研究[J]. 电力与能源,2017,38(1):63-67.
- [3] 彭 威,商浩亮,纪文栋,等. 压缩空气储能电站人工硐室选址关键流程[J]. 电力勘测设计,2023(6):46-49.
- [4] 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.
- [5] 孙冠华,王 娇,于显杨,等. 压缩空气储能电站地下内衬硐库基本原理与分析方法研究进展[J]. 岩土力学,2025,46(1):1-25.
- [6] He Wei, Luo Xing, Evans D, et al. Exergy storage of compressed air in cavern and cavern volume estimation of the large-scale compressed air energy storage system[J]. Applied Energy, 2017,208:745-757.
- [7] 夏才初,张平阳,周舒威,等. 大规模压气储能洞室稳定性和洞周应变分析[J]. 岩土力学,2014(5):1391-1398.
- [8] 蒋中明,欧阳钰榕,韩克武,等. 地下储气库压缩空气温度时空分布与温控方法[J]. 工程热物理学报,2023,44(12):3433-3444.
- [9] 蒋中明,郭 菁,唐 栋. 基于储能效率分析的 CAES 地下储气库容积分析[J]. 储能科学与技术,2020,9(3):892-900.
- [10] 孙冠华,耿 璇,于显杨,等. 压缩空气储能电站地下硐库首次充气的温度响应与局部高温控制方法[J]. 热力发电,2024,53(9):29-38.
- [11] Lu Ming. Finite element analysis of a pilot gas storage in rock cavern under high pressure[J]. Engineering Geology, 1998,49(3-4):353-361.

- [12] Zimmels Y, Kirzhner F, Krasovitski B. Design criteria for compressed air storage in hard rock[J]. *Energy and Environment*, 2002, 13(6):851-872.
- [13] Fraldi M, Guarracino F. Limit analysis of collapse mechanisms in cavities and tunnels according to the Hoek-Brown failure criterion[J]. *International journal of rock mechanics and mining sciences*, 2009, 46(4):665-673.
- [14] 夏才初,赵海斌,梅松华,等.埋深对压气储能内衬洞室稳定性影响的定量分析[J].*绍兴文理学院学报*, 2016, 36(9):1-7.
- [15] 刘智振,曹平,林杭,等.基于非线性 Baker 破坏准则的地下洞室三维上限极限分析[J].*中国有色金属学报(英文版)*, 2020, 30(7):1916-1927.
- [16] 周瑜,夏才初,赵海斌,等.压气储能内衬洞室的空气泄漏率及围岩力学响应估算方法[J].*岩石力学与工程学报*, 2017, 36(2):297-309.
- [17] 蒋中明,李鹏,赵海斌,等.压气储能浅埋地下储气库性能试验研究[J].*岩土力学*, 2020, 41(1):235-241, 252.
- [18] 蒋中明,刘澧源,李双龙,等.压气储能平江试验库受力特性数值研究[J].*长沙理工大学学报(自然科学版)*, 2017, 14(4):62-68.
- [19] 蒋中明,李小刚,万发,等.压气储能遂昌地下储气库结构应力变形特性数值研究[J].*长沙理工大学学报(自然科学版)*, 2021, 18(3):79-86.
- [20] Rutqvist J, Kim H M, Ryu D W, et al. Modeling of coupled thermodynamic and geomechanical performance of underground compressed air energy storage in lined rock caverns[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2012, 52:71-81.
- [21] 王其宽,张彬,王汉勋,等.内衬式高压储气库群布局参数优化及稳定性分析[J].*工程地质学报*, 2020, 28(5):1123-1131.
- [22] 张国华,王薪锦,柯洪,等.压气储能地下内衬储气库运行压力区间确定方法[J].*岩石力学与工程学报*, 2024, 43(12):2874-2891.
- [23] Basnet C B, Panthi K K. Analysis of unlined pressure shafts and tunnels of selected Norwegian hydropower projects[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2018, 10(3):486-512.
- [24] 徐英俊,夏才初,周舒威,等.基于极限分析上限定理的压气储能洞室抗隆起破坏准则[J].*岩石力学与工程学报*, 2022, 41(10):1971-1980.
- [25] 孙冠华,易琪,姚院峰,等.压缩空气储能电站高内压隧道式储气洞室潜在稳模式研究[J].*岩石力学与工程学报*, 2024, 43(1):41-49.
- [26] Kim H M, Park D, Ryu D W, et al. Parametric sensitivity analysis of ground uplift above pressurized underground rock caverns[J]. *Engineering Geology*, 2012, 135:60-65.
- [27] Perazzelli P, Anagnostou G, Amberg J. Uplift analysis for CAES tunnels[C]//*Computer Methods and Recent Advances in Geomechanics*, 2014:1691-1696.
- [28] Carranza-Torres C, Fosnacht D, Hudak G. Geomechanical analysis of the stability conditions of shallow cavities for compressed air energystorage (CAES) applications[J]. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 2017, 3(2):131-174.
- [29] 孙冠华,易琪,于显杨,等.压缩空气储能电站大罐式地下内衬洞库上覆岩体稳定性分析[J].*中国科学:技术科学*, 2024, 54(12):2377-2391.
- [30] 蒋中明,秦双专,唐栋.压气储能地下储气库围岩累积损伤特性数值研究[J].*岩土工程学报*, 2020, 42(2):230-238.
- [31] 黄达,黄润秋,张永兴.断层位置及强度对地下洞室围岩稳定性影响[J].*土木建筑与环境工程*, 2009, 31(2):68-73.
- [32] 赵青,邵晓妹,张辉,等.断层破碎带与洞室间距对地下水封洞库洞室稳定性的影响研究[C]//*中国水利学会地基与基础工程专业委员会.2023 水利水电地基与基础工程技术创新与发展.武汉长江科创科技发展有限公司,长江水利委员会长江科学院, 2023:476-481.*
- [33] 李海轮,李刚,李奇,等.控制性断层对洞室群围岩稳定及衬砌破坏形态的影响[J].*人民长江*, 2021, 52(2):158-163.
- [34] Rutqvist J, Kim H M, Ryu D W, et al. Modeling of coupled thermodynamic and geomechanical performance of underground compressed air energy storage in lined rock caverns[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2012, 52:71-81.
- [35] 周舒威,夏才初,张平阳,等.地下压气储能圆形内衬洞室内压和温度引起应力计算[J].*岩土工程学报*, 2014, 36(11):2025-2035.
- [36] Kim H, Rutqvist J, Ryu D, et al. Exploring the concept of compressed air energy storage (CAES) in lined rock caverns at shallow depth: a modeling study of air tightness and energy balance[J]. *Applied Energy*, 2012, 92:653-667.
- [37] Kushnir R, Dayan A, Ullmann A. Temperature and pressure variations within compressed air energy storage caverns[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2012, 55(21/22):5616-5630.
- [38] Kushnir R, Ullmann A, Dayan A. Thermodynamic models for the temperature and pressure variations within

- adiabatic caverns of compressed air energy storage plants [J]. *Journal of Energy Resources Technology*, 2012, 134(2):021901.
- [39] Zhou Shuwei, Xia Caichu, Du Shigui, 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 and Rock Engineering*, 2015, 48(2):749-770.
- [40] Xia Caichu, Zhou Yu, Zhou Shuwei, et al. A simplified and unified analytical solution for temperature and pressure variations in compressed air energy storage caverns [J]. *Renewable Energy*, 2015, 74:718-726.
- [41] 蒋中明,刘澧源,胡炜,等. 考虑空气压缩因子变化影响的地下储气库热力学过程分析[J]. *储能科学与技术*, 2018, 7(5):902-907.
- [42] 刘澧源,蒋中明,王江营,等. 压气储能电站地下储气库之压缩空气热力学过程分析[J]. *储能科学与技术*, 2018, 7(2):232-239.
- [43] 蒋中明,刘澧源,赵海斌,等. 地下储气库热力耦合数值分析动态边界条件研究[J]. *岩土力学*, 2019, 40(3):1149-1157.
- [44] Zhang Yuan, Yang Ke, Li Xuemei, et al. The thermodynamic effect of air storage chamber model on advanced adiabatic compressed air energy storage system[J]. *Renewable energy*, 2013, 57:469-478.
- [45] 万发,蒋中明,唐栋. CAES 储气库设计参数对其热力学特性影响[J]. *储能科学与技术*, 2021, 10(1):370-378.
- [46] 蒋中明,欧阳钰榕,韩克武,等. 地下储气库压缩空气温度时空分布与温控方法[J]. *工程热物理学报*, 2023, 44(12):3433-3444.
- [47] 蒋中明,郭菁,唐栋. 压气储能地下储气库压缩湿空气热力学模型[J]. *储能科学与技术*, 2021, 10(2):638-646.
- [48] He Wei, Luo Xing, Evans D, et al. Exergy storage of compressed air in cavern and cavern volume estimation of the large-scale compressed air energy storage system [J]. *Applied Energy*, 2017, 208:745-757.
- [49] Allen R D, Doherty T J, Fossum A F, et al. Geotechnical issues and guidelines for storage of compressed air in excavated hard rock caverns [R]. Richland: Pacific Northwest Laboratory, 1982.
- [50] Kim H, 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.
- [51] 蒋中明,甘露,张登祥,等. 压气储能地下储气库衬砌裂缝分布特征及演化规律研究[J]. *岩土工程学报*, 2024, 46(1):110-119.
- [52] 钟巍,田宙,王铁良等. 内含空腔围岩中气体渗流动力学问题的解析计算与试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2014, 36(2):339-345.
- [53] 周瑜,夏才初,周舒威,等. 压气储能内衬洞室高分子密封层的气密与力学特性[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(12):2685-2696.
- [54] 夏才初,徐英俊,王辰霖,等. 基于非稳态渗流过程的压气储能洞室空气渗透率计算[J]. *岩土力学*, 2021, 42(7):1765-1773, 1793.
- [55] 叶斌,程子睿,彭益成. 压气储能洞室气密性影响因素分析[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2016, 44(10):1526-1532.
- [56] 孙冠华,耿璇,张金涛,等. 压缩空气储能地下内衬硐库泄漏率定义、计算与监测[J]. *安全与环境工程*, 2025, 32(5):15-20.
- [57] Salter M DE G, Macfarlane I M, Willett D C, et al. Design aspects for an underground compressed air energy storage system in hard rock [C]// *ISRM Symposium: Design and Performance of Underground Excavation*, [S. l.]: ISRM, 1984:37-44.
- [58] 夏才初,秦世康,赵海鸥,等. 循环热力作用下压气储能洞室钢衬的疲劳耐久性[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2023, 51(10):1564-1573.
- [59] 蒋中明,甘露,张登祥,等. 压气储能地下储气库衬砌裂缝分布特征及演化规律研究[J]. *岩土工程学报*, 2024, 46(1):110-119.
- [60] Xin Chuanqi, Wang Wenquan, Chen Wei, et al. Multi-dimensional application and development paths of compressed air energy storage technology[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2025, 14(9):3636-3647.