
杨春和院士：碳中和目标下深地储能及其挑战 Engineering

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/29617.html>

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

杨春和院士：碳中和目标下深地储能及其挑战 Engineering。论文标题：Deep Underground Energy Storage: Aiming for Carbon Neutrality and Its Challenges

期刊：Engineering

作者：Chunhe Yang, Tongtao Wang

发表时间：October 2023

DOI：<https://doi.org/10.1016/j.eng.2023.02.010>

微信链接：点击此处阅读微信文章

Views & Comments

Deep Underground Energy Storage: Aiming for Carbon Neutrality and Its Challenges

Chunhe Yang, Tongtao Wang

[Show more](#) ▼[+](#) Add to Mendeley [Share](#) [Cite](#)<https://doi.org/10.1016/j.eng.2023.02.010>[Get rights and content](#)[Under a Creative Commons license](#)[open access](#)

1、深地储能内涵

实施深地储能是保证我国能源供给、国防安全和双碳战略目标实现的重大战略需求。2021年，我国石油和天然气消费量分别达到7.12亿吨和3726亿立方米，对外依存度分别达到了约72%和45%，而储备量仅达到安全供应和调峰需求的30%，亟需进行大规模储备以确保国家能源和国防安全。同年，我国太阳能和风能装机容量分别达到 3.28×10^8 kW和 3.10×10^7 kW。由于太阳能和风能供给具有典型的间歇性、地域性，将其转换为压缩空气势能和氢能并实施大规模存储，是实现它们安全高效利用的关键，是实现双碳战略目标的重要途径。另外，对二氧化碳（CO₂）实施大规模地质封存是实现双碳战略目标的另外一个重要途径。

氢气作为重要的战略物质，广泛应用于航空航天、芯片制造和精密医疗等领域。我国氢气对外依存度达98%。根据美国和俄罗斯经验[1]，储存10年左右消费量的氢气，是确保我国氢气供给安全的压舱石。地质封存是大规模储备氢气的最佳选择之一。

深部地下能源储备（深地储能）是指将石油、天然气、氢气、压缩空气及CO₂等能源物资和氢气等战略物质储存于深部地层中。盐岩地层是国际上首选的储能地质体，利用盐岩地层储能也是我国大规模储能的重要发展方向[2]。深地储能包括储能介质、储能地质体和储能库。

（1）对于储能介质而言：在高温、高压和高应力储能条件下，储能介质的相态、状态和运动发生显著改变且会与储能地质体发生物理化学作用，物性变化规律复杂。储能介质在向储能地质体运移过程中表现出较为典型的界面张力、润湿性、滑脱效应、扩散及布朗运动、达西流动和福希海默高速流动等多尺度和跨尺度特征，运移规律多变。

(2) 对于储能地质体而言：地层纵向异性显著，储能地质体周边分布控盆大断层、内部次级断层发育且断层出现不同程度的错动，地质体自身结构复杂。地质体原位地应力达到几十到上百兆帕，储能过程中温度变化达到几十到上百摄氏度，储能介质压力达到几兆帕到几十兆帕，储能介质物理化学作用及多尺度运移效应显著，地质体所处环境复杂。

(3) 对于储能库而言：单个储能库体积达到几万到上百万立方米、形状复杂、设计寿命达到30年以上，需要承受地应力、高频注采、高温、渗流和化学腐蚀等多场耦合作用，储库围岩损伤预测难[3]。深地储能一般由几十到上百个单库[2]构成，局部建库地层条件差异大、建库工艺复杂，库群体积达到上千万立方米、群集效应显著，运行工况复杂多变，储库群建造和功能保障挑战大。储能介质、储能地质体和储能库的上述特征使得深地储能面临一系列理论和技术挑战。

2、我国深地储能的关键科学难题与技术瓶颈

深地储能作为国际学术界和工程界最新发展前沿，在我国更是刚处在起步阶段，研究基础薄弱、系统性差，无法为深地储能关键技术突破提供理论支撑，滞后于国家对深地储能快速发展的要求。同时，与国外盐丘型盐岩相比，我国盐岩地层为典型湖相沉积的层状盐岩、禀赋差[3]，客观上增加了深地储能的难度。利用我国深部层状盐岩实施大规模储能主要存在以下系列科学难题与技术瓶颈。

2.1 关键科学难题

2.1.1. 储能地质体多尺度渐进破坏表征

在利用深部盐穴储能过程中，盐穴地质体将会受到化学侵蚀、温度和应力等多种因素作用，可能会发生纳米级微裂隙连通、米级围岩开裂和千米级的断层活化等多尺度破坏，同时这些围岩劣化随着时间变化而变化。准确描述地质体在多场多相耦合条件下的多尺度渐进破坏是深部盐穴储能库储能介质优选、储能库优化设计和安全运行的基础。储能介质种类比较多，包括石油、天然气、压缩空气、氢气、CO₂、氦气和电解液等。而盐穴储能库围岩类型包括：盐岩、泥岩和硬石膏等。在储能过程中的高温高压作用下，储能介质可能会与地质体发生化学反应，劣化地质体物理力学性能。同时，盐岩的物理力学性能参数对温度和应力的变化较为敏感，盐岩破坏表现出很强的尺度效应。因此，如何准确描述深部储能条件下储能地质体的多尺度渐进破坏特征充满挑战。

2.1.2. 深地储能介质多尺度渗透演化规律

不同储能介质分子尺寸和黏滞系数差别较大，在高内压作用下储能介质向地质体中不断运移渗漏可能会导致地质体发生微裂缝、连通已有孔隙和强度降低，甚至诱发地质断层活化，引发灾变。通过对已有的地下储能库失效数据[4]进行分析，约70%是由渗漏造成，但是由于每次事故原因复杂，渗漏灾变演化过程及其临灾条件的识别仍然不明确。

甲烷分子直径为0.38 nm，而氢分子直径为0.26 nm，意味着氢分子可以在孔隙和渗透率更小的地质体中发生渗漏。在深地储能过程中储能介质的注采荷载将会导致储能地质体发生劣化、渗透率增加，进一步增加储能库的泄漏风险。多场多相耦合条件下储能介质在地质体中的渗漏和致裂理论模型、储能介质长期渗漏运移规律及储能地质体渗漏破坏的临界梯度、渗漏途径、渗漏量和渗透范围等尚不明确。

2.2 关键技术瓶颈

我国盐岩地层具有盐层薄、杂质含量高和夹层多的地质特征，腔体形态控制、不溶物堆积形态预测、卤水浓度场描述和盐岩溶解速度控制等关键技术还有待于攻关，以解决突破技术瓶颈中的科学问题。我国用于深地储能盐穴的体积一般可以达到几十万立方米、高度达到100多米且腔体形态规则性较差，同时需要承受储能介质压力和相态变化等综合影响，导致储能库性能逐渐劣化、安全性降低，给准确预测储能库长期性能及其劣化规律带来严峻挑战。例如，金坛盐穴储气库某盐穴顶部出现了较为显著的垮塌，垮塌体长度约为20 m，厚度为2~4 m，垮塌区域体积达到3300 m³，直接威胁到了该储气库的安全[5]。大规模储能需要建设储能库群，如何预防和调控单库失效破坏时对库群性能的影响的理论还比较缺乏。

3、研究思路与方向

针对上述关键科学技术难题和挑战，国外已有基础科学理论和相关技术，但难以直接用于我国，尤其是在低碳清洁能源和新能源储备方面，国际上也未形成成熟理论和技术体系。因此，我国必须通过基础科学创新探索储能新技术发展路径，实现深地储能关键技术的自主可控，引领我国深地储能核心理论创新和技术突破，确保国家能源安全，带领我国该领域的科技水平走向世界前沿。

深地储能总体思路：从研究储能介质的理化特性入手，揭示不同分子尺寸的储能介质在地质体中的运移机理，探索深地储能地质体损伤演化规律与多场多相耦合效应，建立复杂地质条件下深地储能库智能建造理论，形成深地储能库群全生命周期智慧运行与控制理论，如图1所示。

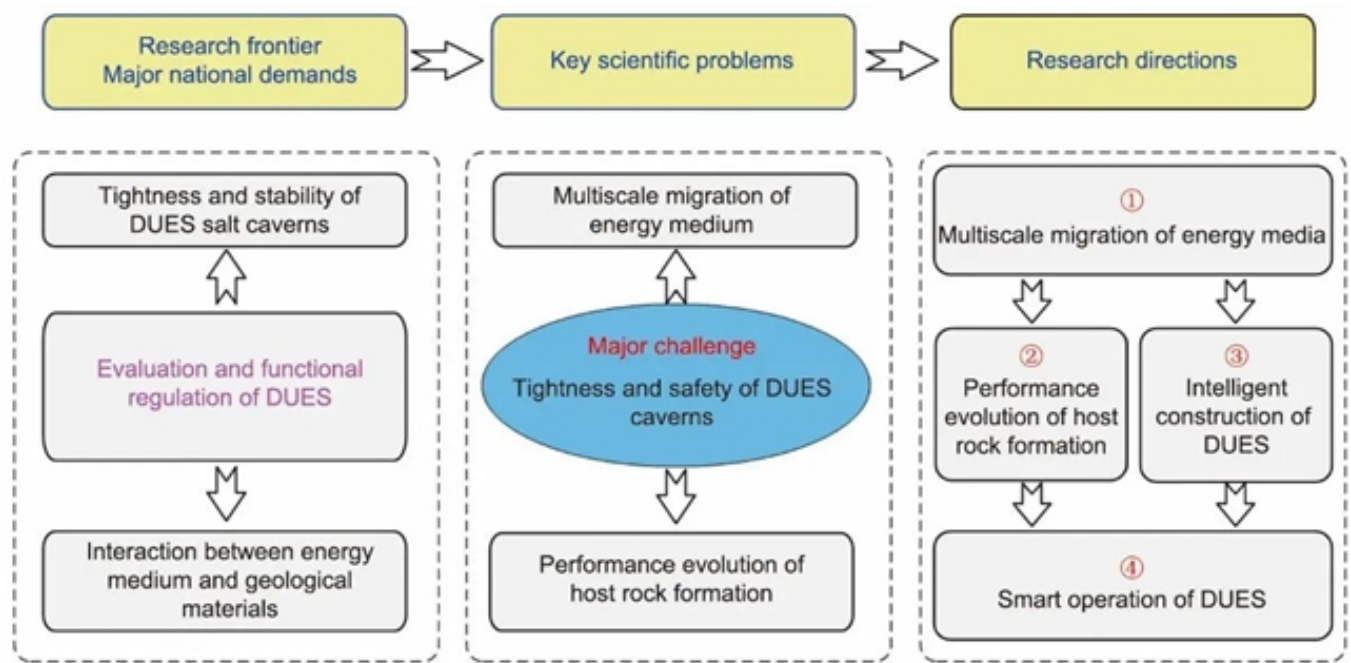


图1 深地储能的研究思路和研究方向。

3.1 储能介质多尺度运移

模拟储能介质的温度、应力和化学腐蚀等多场耦合条件，开展储能介质理化特性演化以及多尺度运移规律研究，具体包括：高温高压条件下石油、天然气、氢气、压缩空气、CO₂、氦气和电解液的物性参数测试及其相态、状态和运动方程等研究，明确深地储能过程中储能介质物性参数

的演化规律； 多场耦合条件下储能地质体与储能介质间物理化学反应规律研究，建立储能地质体与储能介质间宏、细观化学反对其力学和渗透性影响的表征模型，形成储能介质与地质体匹配原则和评价方法； 多场耦合条件下储能介质在地质体界面渗流和泄漏理论研究，揭示储能介质沿着界面渗流多尺度运移机理，量化储能地质体渗漏破坏的临界梯度、渗漏途径、渗漏量及渗透范围等关键参数与储能介质的关系，形成储能介质在地质体中多尺度渗流运移的理论、方法和仿真技术。

3.2 储能地质体性能演化

通过对深地储能地质体开展温度、应力、化学腐蚀作用下多尺度渐进破坏规律的研究，揭示储能地质体性能演化规律，开发储能地质体渐进破坏数值模拟软件，实现对储能地质体性能演化的表征和预测，具体包括： 建立储能地质体温度（T）、渗流（H）、应力（M）、化学（C）耦合的多尺度性能演化的理论模型，揭示储能地质体在储能库服役期内性能演化机理及其主控因素；

研发THMC耦合的储能地质体多尺度条件下渗流演化实验系统，开展多场多尺度耦合条件下储能地质体密闭性演化规律实验，揭示储能地质体渗漏机理和多场耦合机制，给出储能地质体渗漏定量表征方法； 提出THMC耦合条件下储能地质体多尺度力学性能和渗透率演化的数值仿真方法，开发深地储能地质体性能演化全过程的数值模拟计算系统，实现对深地储能地质体性能演化的精确描述。

3.3 深地储能智能建造

聚焦如何在我国杂质含量高、夹层多和盐层薄等不利储能地质体中实现多建库和建大库中存在的一系列理论和技术问题，具体包括： 建立多夹层盐岩地层水溶造腔过程中盐腔内卤水流动、传质、不溶物杂质下落和堆积预测理论模型，给出正、反循环造腔条件下卤水流动规律、浓度特征和腔底不溶物堆积形态，明确影响造腔速度和腔体形态的主控因素； 开发完成适用于我国多夹层盐岩的水溶造腔软件和硬件实验平台，实现对盐岩水溶造腔全过程的精确模拟和反演，构建不同地层条件下的自适应造腔工艺智能决策系统； 提出小间距对井、水平井多步法和非对称式造腔等方法，研究建立不同造腔方法的理论模型，明确影响造腔效率的主控因素，形成针对不同地层的水溶造腔工艺。

3.4 深地储能智慧运行

针对深地储能群全生命周期功能演化规律进行研究，建立深地储能群全生命周期的安全运行与控制基础理论，形成储能群智慧运行与控制关键技术，具体包括： 建立储能库体积收缩预测理论模型，开发抑制盐穴体积收缩的运维技术。通过引入人工智能及神经网络算法开发确保腔体不发生过大收缩的智慧决策系统，提出基于体积收缩、腔周变形、应力分布等指标的深地储能库长期可用技术规范。 研究储能地质体与储能介质长期耦合作用下地表沉降规律，建立基于水准法、合成孔径雷达（InSAR）等技术的深地储能库地表沉降长期自动化监测网，量化地表沉降安全阈值。 建立基于微地震监测和微渗漏检测的储能库安全评价与预警系统，实现对储能库灾变发生、发展和临灾等全过程的监测和预警。基于上述研究，开发储能库群安全监测、评估、预警和决策的硬件及软件系统，实现对储能库群安全监测大数据采集和安全运行状态实时评估和播报，紧急情况自动预警和智能决策，构建深地储能智慧运行体系。

4、总结与结论

（1）深地储能通过将石油、天然气、氢气、压缩空气、CO₂和氦气等储存在深部地下空间进行

大规模储能，是实现我国能源清洁化和低碳化的有效途径，是保证我国能源和国防安全的重大战略需求。

（2）利用深部盐岩地层实施大规模能源储备是国际上能源主要储备方式，也是我国深地能源储备实施的理想地质体。我国盐岩资源丰富、地理位置优越，可以满足大规模储能需求。

（3）利用深部地下盐岩地层进行压缩空气储能和氢气储能是我国十四五期间大规模储能的重点发展方向，江苏金坛、淮安，湖北应城和河南平顶山等盐矿具有较好的地质和区位优势。

（4）我国盐岩主要是湖相沉积的层状盐岩，盐层薄、夹层多、杂质含量高，深地储能需要重点攻克储能地质体多尺度渐进破坏表征、储能介质多尺度渗流和储能库高效建造等理论和技术难题。

参考文献

文章信息：

Deep Underground Energy Storage: Aiming for Carbon Neutrality and Its Challenges

碳中和目标下深地储能及其挑战

作者：

杨春和, 王同涛

引用：

Chunhe Yang, Tongtao Wang. Deep Underground Energy Storage: Aiming for Carbon Neutrality and Its Challenges[J]. Engineering, 2023, 29(10):11 – 14.



Open access

开放获取全文

<https://doi.org/10.1016/j.eng.2023.02.010>

推荐阅读

专题征稿：能源转型的技术路径、风险与公平

专题征稿：常规能源的低碳转型

徐春保院士：碳中和背景下生物质能源和绿色氢能在大规模储能中的作用

北航向锦武院士团队研发直升机驾驶机器人 推动有人飞行器无人化进程

清华大学研究团队：建筑全生命周期碳排放——内涵、计算和减量

特别声明：本文转载仅仅是出于传播信息的需要，并不意味着代表本网站观点或证实其内容的真实性；如其他媒体、网站或个人从本网站转载使用，须保留本网站注明的“来源”，并自负版权等法律责任；作者如果不希望被转载或者联系转载稿费事宜，请与我们联系。

来源：Engineering

更多 科学进展 请访问 <https://www.iikx.com/news/progress/>

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，[爱科学iikx.com](https://www.iikx.com)转发