

天然氢赋存状态、经济可行性、发展前景及对地下储藏的启示

参考资料： Ngoc N. Nguyen, et al. Focused Review on Natural Hydrogen: Occurrence, Economic Viability, Perspectives, and Implications for Underground Hydrogen Storage[J]. Energy & Fuels, 2026, 40: 3509–3524.

整理推荐： 中国化工学会烃资源评价加工与利用专委会 田松柏

目录

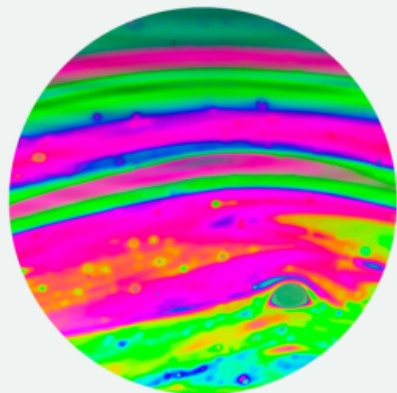
CONTENTS

1. 研究背景与意义
2. 天然氢的赋存状态与成因
3. 勘探方法与技术挑战
4. 资源潜力与经济可行性争议
5. 对地下储氢的启示
6. 地下储氢库类型与特征
7. 独特潜力与科学挑战
8. 未来展望与结论

PART 01

研究背景与意义

氢能彩虹与制氢方法概述



氢能彩虹分类

氢能彩虹将不同制氢方法按颜色分类，天然氢被称为金氢或白氢，区别于通过电解水产生的绿氢和通过化石燃料加碳捕集产生的蓝氢。这种分类有助于区分氢能的环保性和经济性。

制氢方法对比

天然氢成本约为1美元/千克，远低于绿氢的3-5美元/千克。马里和南非的天然氢井已商业化运营，成本低至0.5美元/千克，展示了天然氢的经济优势。

制氢技术发展

随着能源转型推进，制氢技术从纯地质研究转向经济开发。天然氢因其清洁性和低成本，成为能源转型中的重要选择，减少了对化石燃料的依赖。

天然氢作为绿色能源的潜力



环保优势

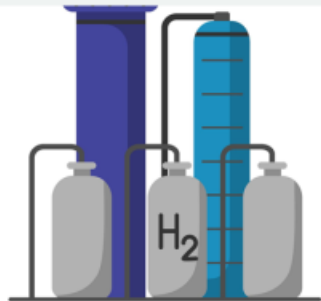
天然氢是天然的清洁能源，无需碳捕集过程，直接符合碳中和目标。其生产过程中不产生二氧化碳排放，显著降低碳足迹。

能源供应潜力

全球天然氢储量估计为 5.6×10^{12} 吨，即使仅开采1%，也足以支持全球低碳经济200年。这种巨大的储量为其作为长期能源供应提供了保障。

经济竞争力

天然氢的成本仅为工业制氢的十分之一，马里氢井的长期运营证明了其经济可行性。这种低成本特性使其在能源市场中具有显著竞争力。



地下储氢发展需求与关联

储氢技术挑战

传统压缩和液化储氢方法因氢的低密度和高反应性面临技术难题。地下储氢 (UHS) 成为大规模储氢的潜在解决方案，但需解决泄漏和化学反应等问题。



天然氢的启示

天然氢的地质行为研究为UHS提供了重要参考。了解氢在地质环境中的迁移和储存机制，有助于优化储氢场地的选择和设计。

技术协同效应

天然氢和UHS的研究相互促进，天然氢的地质特性为工业氢的地下储存提供了理论基础。这种协同效应推动了氢能技术的整体发展。

PART 02

天然氢的赋存状态与成因

全球天然氢分布特征



区域分布特征

天然氢在全球分布不均，主要集中在美国、欧洲、澳大利亚和南非等地区。这种分布可能受限于勘探技术而非实际储量，未来随着技术进步可能发现更多富集区。



浓度差异

不同地区的氢浓度差异显著，从ppm级（如地表逸出的“仙女圈”）到近98%（如马里布拉克布古的天然氢井）。这种差异反映了生成机制和迁移过程的复杂性。



海洋资源潜力

近年发现大洋中脊等海底区域存在天然氢源，如太平洋昆仑管群的氢通量达1Mt/年，拓展了天然氢的资源边界。

主要生成机制：水岩反应与蛇纹石化

反应原理

铁镁质岩石（如橄榄岩）在低温（ $<500^{\circ}\text{C}$ ）水热条件下发生蛇纹石化，通过氧化亚铁矿物释放氢气（ $2\text{FeO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{H}_2$ ）。该过程受岩石矿物组成和温度梯度调控。



地质条件

最活跃的蛇纹石化发生在 $300\text{-}400^{\circ}\text{C}$ 的中低温环境，常见于板块俯冲带和洋中脊。反应速率受流体pH值、盐度及岩石渗透率影响。

经济意义

该机制生成的氢纯度较高（如马里井达98%），且部分储层呈现动态补给特性，为商业化开发提供了潜在可能。



次要生成机制：水的辐射分解



放射性驱动

地壳中铀、钍等放射性元素衰变释放 α/β 粒子，使水分子解离产氢 ($\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2$)。该过程效率受辐射类型和地层孔隙结构共同影响。

能量消耗

每摩尔氢生成需 $0.48-9.65 \times 10^7 \text{kJ}$ 能量，产率低于蛇纹石化，但在富含放射性矿物的沉积盆地中贡献显著。

伴生特征

常与氦气等稀有气体共存，可作为勘探指示标志。美国中大陆裂谷带的氢氦共生气田即为此类典型。

微生物过程对氢循环的影响

1 产氢途径

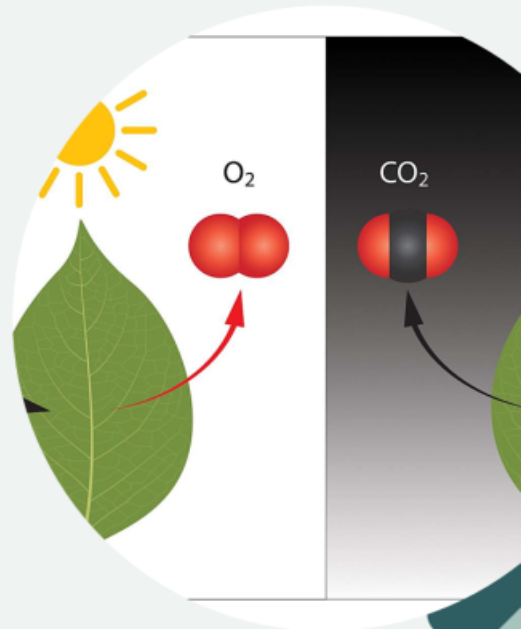
厌氧微生物通过发酵（如梭菌分解有机物）或光合作用（如蓝藻光解水）产生氢气，但效率受底物类型和氧化还原电位限制。

2 耗氢作用

约80%大气氢被氢氧化微生物消耗（如放线菌通过 $\text{H}_2 + \frac{1}{4}\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$ 反应获取能量），形成动态平衡。深海热液区的甲烷古菌便是典型氢消费者。

3 勘探启示

微生物群落组成可指示地下氢通量，如阿尔巴尼亚Bulqize铬矿的高流量氢喷口与特异微生物群落相关。



代表性富氢储层案例分析

■ 马里布拉克布古

氢浓度98%的天然井群，持续开采10年未衰竭，生产成本仅0.5美元/kg。储层可能通过深部蛇纹石化持续补氢。

■ 阿尔巴尼亚Bulqize铬矿

年喷发量200吨的氢喷口，浓度84%，伴生甲烷13.2%。构造断裂带为氢迁移提供了通道。

■ 阿曼西部哈贾尔山脉

日释氢量达 $1300\text{m}^3/\text{km}^2$ ，浓度93.8%。超镁铁质岩体与地下水反应形成区域性氢储集系统。



PART 03

勘探方法与技术挑战

地表气体监测与遥感技术

气体传感器网络部署

采用高灵敏度氢传感器（如固态电化学传感器）在疑似渗漏区建立网格化监测站，法国Lorraine地区通过该方法发现 H_2 浓度达20%的富集区。

卫星热红外成像

利用Landsat-8卫星TIRS传感器识别地表温度异常，马里Bourakebougou油田通过热异常圈定直径2km的氢渗漏环形构造。

无人机航测系统

搭载激光光谱仪的无人机在澳大利亚Perth盆地实现每小时 $5km^2$ 的快速扫描，检出限达10ppm。



地球物理勘探与钻探取样

综合地球物理手段与定向
钻探构成当前最可靠的勘
探组合。

电磁法 (CSAMT) 应用

俄罗斯西伯利亚克拉通通过可控源音频大地电磁法识别出电阻率 $>1000\Omega\cdot\text{m}$ 的蛇纹石化岩体，钻探验证 H_2 含量达47%。

岩心流体分析

美国堪萨斯州深部钻探采用保压取心技术，在Arbuckle组白云岩中测得孔隙流体含 H_2 12.8 mmol /kg, $\delta^2\text{H}$ 同位素值-710‰证实深源成因。

随钻测井 (LWD) 技术

阿曼蛇绿岩区采用声波-中子联测实时判定裂缝发育带，氢储层识别准确率提升至83%。

不同勘探技术的优势与局限



地表监测技术

- **成本效率比：**无人机航测单日作业成本约5000美元，仅为传统地面调查的1/5，但受限于10m以下的探测深度。
- **数据干扰因素：**土壤微生物活动会导致地表H₂浓度日波动达30%，需建立昼夜连续监测模式。



地球物理方法

- **多解性挑战：**电磁法在含盐盆地易将高导卤水层误判为氢储层，需结合重力异常数据进行约束。
- **深度分辨率：**地震反射法在3000m以深储层识别中垂向误差达±50m，需配合VSP测井校正。



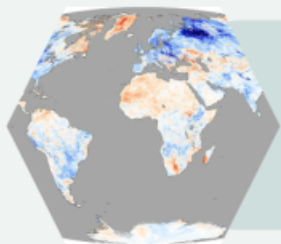
钻探验证

- **经济风险：**深部勘探井单口成本超200万美元，成功率仅20-30%，需建立三级靶区优选体系。
- **样品代表性：**常规取心过程平均损失30%原位气体，需采用冷冻保压取心技术。

PART 04

资源潜力与经济可行性争议

全球天然氢资源量估算

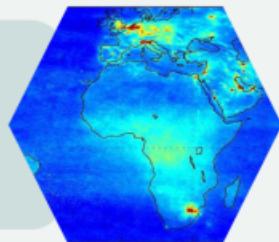


地质通量模型预测

根据Viacheslav等学者整合的全球地质数据，天然氢从地壳向大气的年释放通量估算为 23 ± 8 百万吨，与Ellis和Gelman的24百万吨/年模型预测高度吻合。

总资源量范围

基于地球化学过程模拟，全球原位天然氢资源量跨度达7个数量级（ 10^3 – 10^{10} 百万吨），最可能值为 5.6×10^6 百万吨，其中可开采量按1%计算可满足全球200年低碳能源需求。



海洋资源新发现

太平洋Kunlun Pipe Swarm热液区实测氢浓度 5.9 – 6.8 mmol/kg流体，推算年通量近1百万吨；大西洋Lost City热液场深部样本检出 740 μ M高浓度氢。

成本效益分析与技术经济评估



马利案例实证

Bourakebougou气田商业化生产氢纯度98%，成本仅0.5美元/千克，持续供应当地电力10年未衰竭，验证特定地质条件下经济可行性。



澳洲TEA研究

假设含氢83%的气藏模型显示生产成本1.1美元/千克，较绿氢（4.78–7.43美元/千克）具绝对优势，但需考虑提纯、运输等附加成本。



资源分布不均挑战

全球90%天然氢以低浓度扩散形式存在，目前仅封闭性储层（如马利、阿尔巴尼亚Bulqize矿）具备开发价值。

天然氢生产成本显著
低于绿氢，但经济性
高度依赖资源富集程
度。

支持与反对商业化开发的观点

支持方核心论据



- **碳中和战略价值：**理论储量 5.6×10^6 百万吨氢相当于 1.4×10^{16} MJ能量，两倍于全球已探明天然气储量，可支撑深度脱碳。
- **成本优势证据链：**马利0.5美元/千克、澳洲模型1.1美元/千克等数据形成完整证据链，较电解水氢成本降低60–90%。
- **技术外溢效应：**天然氢勘探积累的地质认知可直接服务于地下储氢（UHS）选址与风险评估。

反对方主要质疑



- **资源可采性争议：**美国地质调查局指出99%天然氢赋存于非储集层岩体，现有技术难以经济开采。
- **动态补给不确定性：**除马利等极少数案例外，多数天然氢系统补给速率与机制尚未量化，长期产能存疑。
- **监测标准缺失：**目前缺乏统一的资源评估规范，各国储量报告差异率达300%，阻碍投资决策。

PART 05

对地下储氢的启示

传统储氢方式的局限性



01

压缩储氢技术瓶颈

高压压缩 (>500 bar) 虽提升氢能体积密度, 但伴随高能耗 (压缩能耗占氢能30%) 与安全风险 (氢脆效应导致材料失效), 经济性显著受限。

02

液化储氢的物理限制

氢液化需超低温 (-253°C), 且每日蒸发损失达0.5%-1%, 长期储存成本高昂, 难以满足大规模商业应用需求。

03

固态储氢材料缺陷

金属氢化物虽具高体积密度, 但吸/放氢动力学缓慢 (需高温活化), 且循环稳定性差 (每100次循环容量衰减>20%), 制约实际应用。

地下储氢作为可行替代方案

地质封存规模优势

盐穴储氢单库容可达 $5 \times 10^8 \text{ m}^3$ (等效1.5万吨 H_2)，较地表储罐成本降低60%-80%，适合季节性调峰需求。

成熟基础设施复用

枯竭油气田改造储氢库可节省60%开发成本，现有井筒、监测系统等设施可直接适配，缩短商业化周期。

自然氢矿床的启示

马里Bourakebougou气田持续产氢30年未衰竭，证实多孔介质中氢的长期稳定性，为人工储库选址提供天然参照系。



储氢过程中的关键挑战：泄漏与损耗

分子扩散逃逸机制

氢分子直径 (0.289 nm) 仅为CH₄的60%，在页岩盖层中的渗透率高达10⁻¹⁶ m²，需纳米级孔隙结构优化封堵技术。



微生物代谢损耗风险

地下嗜氢菌（如产甲烷古菌）可消耗20%-30%的储存氢，需开发生物抑制剂或选择无菌地质层位。

矿物反应不可逆损失

氢与含铁矿物反应生成水（ $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{H}_2 \rightarrow 2\text{FeO} + \text{H}_2\text{O}$ ），导致年损耗率可能达0.5%-2%，需开展储层化学稳定性评估。

天然氢储层对UHS的类比价值

01.

圈闭机制解析

天然氢富集于断层遮挡型圈闭（如马里气田），启示人工储库应优选构造稳定的穹隆构造，侧向封闭性需 $>10\text{ MPa/m}$ 。

02.

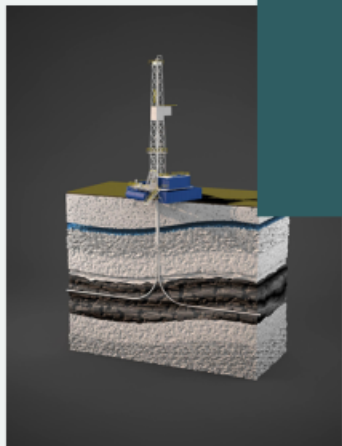
流体行为标定

天然储层中氢-水-岩三相接触角（约 60° ）数据，为人工储库润湿性改造提供基准参数，降低毛细管滞留损失。

03.

动态补给模型

天然氢持续生成速率（ $10^{-4}\text{ kg/m}^3\cdot\text{年}$ ）验证了原位生物/化学反应维持库存的可能性，为人工储库活化设计提供理论依据。



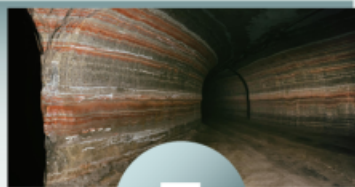
PART 06

地下储氢库类型与特征

盐穴储氢库

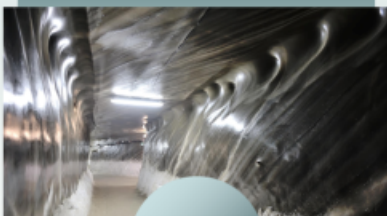
地质优势

盐穴储氢库因其低渗透性和高化学稳定性成为理想选择。盐岩层能够有效防止氢气泄漏，且盐穴可通过溶解采矿快速形成，适合大规模储氢需求。



技术挑战

盐穴内氢气可能引发盐岩蠕变或溶解，需精确控制压力与温度。长期储存还需解决盐穴结构稳定性问题，避免因氢气渗透导致储存效率下降。



经济性分析

盐穴储氢库建设成本较高，但运营维护费用较低。其规模化潜力可降低单位储存成本，适合作为战略储备设施。



枯竭油气藏储氢库



改造潜力

枯竭油气藏具备现成基础设施（如井筒和监测系统），可大幅降低初始投资。其孔隙结构和盖层完整性已通过历史开采验证，适合氢气储存。



反应风险

残留烃类可能与氢气发生微生物或化学反应，导致氢气纯度下降。需评估储层矿物组成及微生物活性，必要时进行预处理。



容量评估

枯竭油气藏的储存容量通常较大，但需考虑氢气扩散损失。动态模拟可优化注入/采出方案，平衡储存效率与经济性。

咸水层储氢库



化学兼容性

咸水可能溶解氢气或引发矿物沉淀，需评估地层水化学性质。长期储存需监测氢气溶解度变化对储存效率的影响。



资源广泛

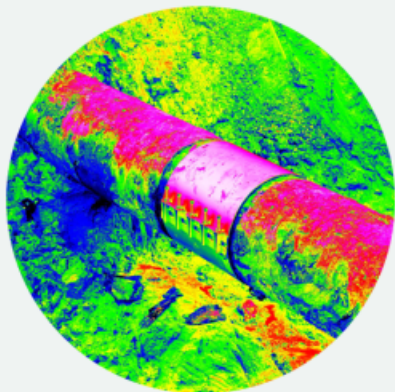
咸水层分布广泛且未开发，是潜在的分布式储氢选择。其高孔隙度和渗透率有利于氢气快速注入与提取。



选址标准

理想的咸水层储氢库需具备稳定盖层和低流速地下水。地质建模与示踪剂测试可验证储存安全性。

硬岩洞穴储氢库



结构特性

火成岩或变质岩构成的硬岩洞穴机械强度高，适合高压储氢。其低孔隙度可减少氢气渗漏，但需人工扩孔增加容量。

密封技术

硬岩裂隙可能成为泄漏通道，需采用水泥灌浆或聚合物密封。微震监测技术可实时评估洞穴完整性。

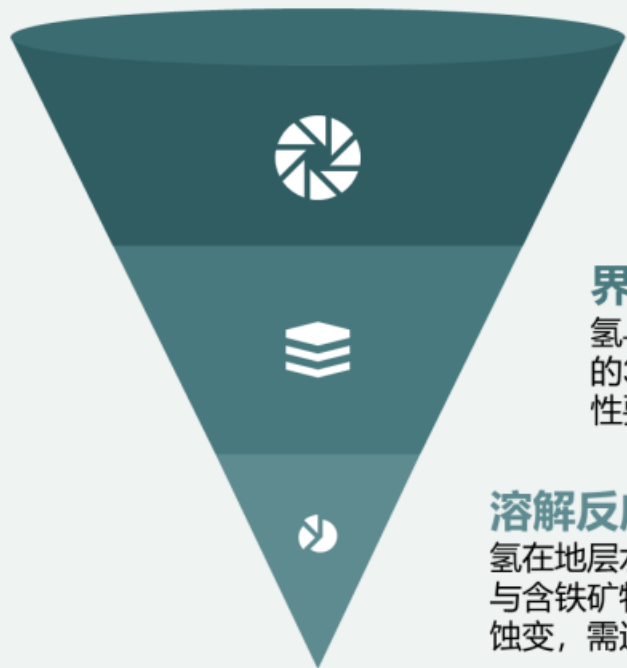
应用场景

硬岩洞穴适合小规模、高频次储氢需求，如配合可再生能源制氢项目。其快速响应特性有助于电网调峰。

PART 07

独特潜力与科学挑战

氢在孔隙介质中的独特行为



分子扩散特性

氢分子因其最小分子尺寸 (0.29 nm) 和低粘度, 在孔隙介质中表现出超常扩散能力。相较于甲烷 (0.38 nm) 和 CO_2 (0.33 nm), 氢的扩散系数高1-2个数量级, 需建立专属渗流模型以预测其运移规律。

界面相互作用机制

氢与岩石表面的吸附能显著低于其他气体 (如甲烷吸附能为氢的3-5倍), 导致其在多孔介质中的滞留量减少。这种弱吸附特性要求重新评估传统储层的气体封存效率标准。

溶解反应动力学

氢在地层水中的溶解度 (1.6 mg/L at 25°C) 虽低于 CO_2 , 但会与含铁矿物发生还原反应生成水。这种反应可能导致储层化学蚀变, 需通过原位地球化学监测来量化长期影响。

储氢对地质结构完整性的影响



岩石力学响应

氢注入会改变储层应力场，尤其对页岩等低渗透岩层可能诱发微裂缝。实验数据显示，10 MPa氢压可使砂岩抗压强度降低8-12%，需开发氢致损伤本构模型指导安全压力设计。



矿物相变效应

长期接触氢会导致赤铁矿 (Fe_2O_3) 还原为磁铁矿 (Fe_3O_4)，伴随4.8%体积膨胀。这种相变可能破坏盖层完整性，需通过X射线衍射 (XRD) 定期监测矿物组成演变。



微生物群落扰动

地下氢环境会激活产甲烷菌 (如Methanobacterium)，其代谢产物可能堵塞孔隙。16S rRNA测序显示氢注入后微生物多样性下降40%，需评估生物膜对渗透率的长期影响。

安全关切与进一步研究方向

泄漏风险评估

氢的爆炸下限 (4% vol) 远低于甲烷 (5% vol) , 且扩散速度是甲烷的3倍。建议采用计算流体力学 (CFD) 模拟结合分布式光纤传感, 建立泄漏预警阈值体系。

长期封存有效性

现有模拟预测100年存储周期内氢损失率可达15-30% , 主要源于扩散和微生物消耗。需开展示范工程 (如HyStock项目) 验证实际损耗率与理论模型的吻合度。

多物理场耦合研究

当前缺乏氢-水-岩-微生物耦合作用的全尺度模型。建议发展基于机器学习的数据同化方法, 整合实验室尺度 (cm级) 和场地尺度 (km级) 的观测数据。

PART 08

未来展望与结论

深化氢在多孔介质中行为认知

氢分子扩散特性

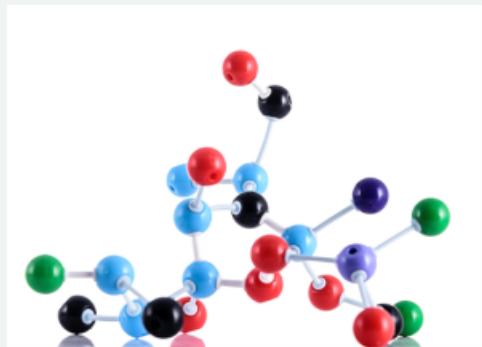
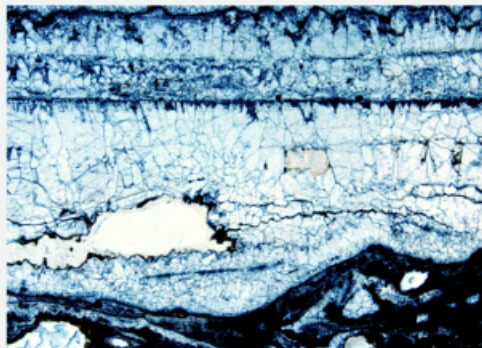
氢分子在岩石孔隙中的扩散速率显著高于甲烷和二氧化碳，需建立氢专属的扩散模型以预测其在储层中的迁移规律。扩散系数受孔隙结构、温度及压力梯度影响，需通过实验与模拟相结合的方式量化。

界面反应机制

氢与矿物表面的化学反应（如氧化还原、吸附解吸）可能改变储层物性。需系统研究不同岩性（如砂岩、页岩）对氢的化学稳定性影响，评估长期储存的可行性。

多相流动行为

氢-水-气多相体系在孔隙中的分布规律尚未明确。需结合微流控实验和数字岩心技术，揭示毛细管压力与相对渗透率对氢封存效率的影响。



量化氢对地质结构的影响



岩石力学响应

高压氢注入可能诱发储层岩石微裂缝扩展或闭合。需开展三轴压缩试验，分析氢环境下岩石弹性模量、泊松比等参数的变化规律。

。

长期地质稳定性

持续氢循环（注入/抽取）可能改变储层应力场。需建立耦合流固相互作用模型，预测储层变形对盖层完整性的影响。

矿物相变效应

氢与含铁矿物反应可能导致磁铁矿/赤铁矿转化。需通过高温高压实验结合X射线衍射，量化矿物相变对孔隙度和渗透率的长期影响。



评估天然氢地质资源潜力



资源分级标准

需建立基于浓度、流量和可采性的天然氢资源分级体系（如证实/概略/推测储量）。参考Mali案例（98%纯度），制定经济开采阈值。



动态补给机制

针对自补给型储层（如Bourakebougou），需研究深部氢生成速率与浅部抽取的平衡关系，建立可持续开采模型。



全球资源图谱

整合卫星遥感、气体通量测量和地质建模数据，绘制高潜力区分布图。重点关注蛇纹石化带和古克拉通边缘等地质单元。

发展技术经济分析与安全框架



全生命周期成本模型

涵盖勘探、钻井、净化及运输环节的成本核算。对比绿氢（3-5美元/kg），天然氢需控制总成本 <1.5 美元/kg才具竞争力。

泄漏监测技术

开发基于光纤传感和示踪剂的实时监测系统，量化储存过程中氢损失率（目标 $<0.1\%$ /年）。

风险评价体系

建立涵盖地质完整性、微生物活动及人为操作的HAZOP分析框架，制定分级应急预案。

THANKS!

感谢关注!

参考资料: Ngoc N. Nguyen, et al. Focused Review on Natural Hydrogen: Occurrence, Economic Viability, Perspectives, and Implications for Underground Hydrogen Storage[J]. Energy & Fuels, 2026, 40: 3509–3524.

整理推荐: 中国化工学会烃资源评价加工与利用专委会 田松柏