

天然氢气藏赋存机理及成因机制

龙 淦, 左银辉*

成都理工大学能源学院, 四川 成都

收稿日期: 2025年12月25日; 录用日期: 2026年2月28日; 发布日期: 2026年3月9日

摘 要

随着全球对清洁能源的需求日益增长, 天然氢作为一种高效清洁能源, 其巨大的资源潜力和可再生性, 使其成为了实现能源转型和碳中和的关键能源。天然氢气藏赋存机理及勘探开发是天然氢资源开发利用的关键。文章通过调研全球天然氢气勘探开发现状及典型氢气藏赋存机理研究进展, 归纳了天然氢的形成机制, 分析了现阶段天然氢的勘探开发现状及典型氢气藏赋存机理, 介绍了国内外典型氢气藏赋存机理及勘探开发现状, 最后展望了我国未来天然氢的重点研究方向和勘探开发前景。研究认为深部流体活动区与断裂系统的耦合控制氢气运移通道, 而白垩纪至第四纪多套地层均展现储氢能力, 表明我国古老克拉通和新生代裂谷盆地具备勘探前景。本研究不仅完善了天然氢系统成藏机理的理论框架, 同时为我国天然氢气藏的研究和勘探开发提供理论参考依据。

关键词

天然氢气藏, 勘探开发, 地质特征, 赋存机理

Occurrence Mechanism and Genetic Mechanism of Natural Hydrogen Reservoirs

Gan Long, Yinhui Zuo*

College of Energy, Chengdu University of Technology, Chengdu Sichuan

Received: December 25, 2025; accepted: February 28, 2026; published: March 9, 2026

Abstract

With the increasing global demand for clean energy, natural hydrogen has emerged as a pivotal resource for achieving energy transition and carbon neutrality, owing to its high efficiency, immense resource potential, and renewability. Understanding the occurrence mechanism and exploration strategies of natural hydrogen reservoirs is critical for the effective exploitation of this resource.

*通讯作者。

This paper systematically reviews the current status of global natural hydrogen exploration and the research progress regarding the occurrence mechanisms of typical hydrogen reservoirs. It summarizes the formation mechanisms of natural hydrogen, analyzes the geological characteristics of typical domestic and international reservoirs, and forecasts key research directions and exploration prospects for natural hydrogen in China. The study indicates that the coupling of deep fluid active zones and fault systems controls hydrogen migration pathways. Furthermore, multiple stratigraphic sequences from the Cretaceous to the Quaternary demonstrate hydrogen storage capacity, suggesting significant exploration potential in China's ancient cratons and Cenozoic rift basins. This research not only refines the theoretical framework of natural hydrogen accumulation mechanisms but also provides a theoretical reference for the future research, exploration, and development of natural hydrogen resources in China.

Keywords

Natural Hydrogen Reservoir, Exploration and Development, Geological Characteristics, Occurrence Mechanism

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

天然氢是指由地下地质作用生成并运移至储集层的天然气体。相较于化石能源制氢(灰氢、蓝氢)及电解水制氢(绿氢),天然氢兼具低成本与低碳排放的双重优势,被视为完善能源体系、弥补清洁能源缺口的重要资源[1]。尽管天然氢成因与赋存机制复杂,但其形成周期远短于油气,具有可再生的潜力。自1987年马里 Bourakebougou 发现高纯度天然氢并于2012年实现商业化开采以来,全球勘探热情持续高涨。面对2023年全球氢气需求激增与低排放氢供应不足的矛盾,美、法、波兰等国相继出台法律框架或启动联合研究项目,加速推进天然氢的资源化进程。

然而,目前对于天然氢的运移赋存机理及成藏规律的认识仍处于起步阶段,制约了其规模化勘探开发。基于此,本文旨在服务国家能源绿色低碳发展战略,在广泛调研国内外研究现状的基础上,系统综述天然氢的成因机制、地质特征及产出模式。结合中国氢气勘探背景,分析我国天然氢的资源分布与勘探前景,并尝试提出针对性的勘探策略,以期为我国天然氢资源的理论研究与勘探实践提供参考。

2. 天然氢气藏赋存机理

全球范围内的研究证实天然氢气能赋存于不同的地质环境,包括但不限于洋中脊、蛇绿岩带、以前寒武纪为代表的构造稳定区和岩浆及温泉等构造活动带等地质环境,从宏观层面,天然氢气在蛇绿岩、超镁铁质岩等源区形成后,通常会通过断层和构造裂隙向上运移,同时会伴随着微生物、溶解性等消耗,之后遇到低渗地层时,氢气的运移会被阻挡,从而在这些地层中聚集形成天然氢气藏,这一过程有效地将氢气圈闭起来进而形成天然氢气藏。在微观层面上,天然氢气在储层中以游离态、包裹体态以及溶解态存在,并在游离态氢气、溶解态氢气和吸附态氢气中相互转变[2]。

2.1. 天然氢赋存状态及转化机制

地下天然氢气的赋存状态随地质环境差异呈现多相态、多尺度共存特征,其相态转化及临界条件对

资源潜力的影响机制尚未明确, 深入研究该过程是优化氢探方案与开发策略的关键。天然氢在地表到深部主要赋存形式包括浅部游离态、溶解态、吸附态及深部金属氢化物、超临界态: 游离态为当前直接可开采相, 地表渗漏形成的“仙女圈”是重要勘探标志[3], 马里气藏浅部白云质碳酸盐岩中其纯度达 98% [4], 封闭体系中以流体包裹体形式见于前寒武纪岩石、岩浆岩, 巴西圣弗朗西斯科盆地土壤氢渗漏呈周期性变化, 推测与深部蛇绿岩带氢补充相关[5]; 溶解态赋存于孔隙水或热液系统, 稳定性受温压条件、矿物流体作用及水矿比调控, 温压降低时可解溶形成游离态[6], 发挥氢气临时储存“缓冲层”作用; 吸附态主要被黏土矿物、硅质沉积物及岩石微孔、介孔结构吸附, 吸附氢随压力升高增强、温度升高减弱[7]; 深部高温高压环境下, 氢因亲铁性与铁镁矿物形成可逆金属氢化物, 较高温度下随压力降低逐级释氢, 为深部持续供气提供地质动力。

深部环境下, 金属氢化物以动态过程合成与分解, 随温压降低, 逐级释放氢原子, 之后结合形成分子放热, 一部分氢分子溶于地下流体进行富集, 以溶解态继续运移, 一部分氢分子或将被可吸附岩层以范德华力捕获形成富集区进行动态的解吸和吸附过程。高温低压条件解吸后的游离氢气溶于地下流体或直接通过地表渗漏结构进行释放。浅部环境下, 溶解态氢气在浅部环境下通过裂隙等通道释放, 一方面运移至渗漏结构以游离态在地表渗漏, 一方面运移过程与包裹体形成包裹态进行封闭/破碎动态过程。在构造作用下, 浅地表包裹态和游离态氢在封闭和破碎的过程中相互转化。游离态的氢气主要以渗漏结构及优势运移通道在浅地表释放至大气(图 1)。

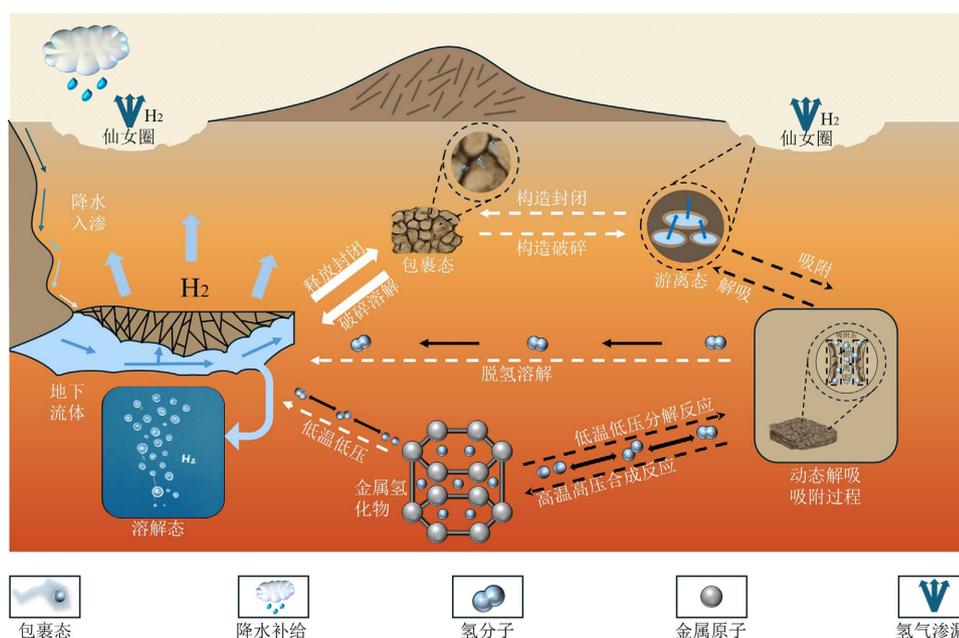


Figure 1. Occurrence and transformation mechanism of natural hydrogen
图 1. 天然氢气赋存转化机理图

2.2. 天然氢气赋存条件与储层 - 盖层体系

天然氢因分子量小、扩散性强, 其赋存机制与储 - 盖要求显著区别于常规油气。地质体内的氢气赋存受温度、压力、盐度及氧化还原环境等多因子动态调控, 其中高温(300°C~450°C)及高二氧化碳分压易诱发费托合成反应, 从而制约氢源通量[8], 构造应力场的强扰动可显著加剧氢与干酪根等有机质的相互作用, 促进烃类气体的生成与排出(图 2)。其储集体系呈现沉积岩互层与基性 - 超基性岩裂隙 - 孔隙型的

二元特征：前者依托差异岩溶及粒间溶孔构筑游离态储集空间；后者则凭借构造裂隙与蛇纹石化衍生的微-介孔系统实现生成与储集的原位耦合。尽管氢气在不同岩性介质中具有极强的扩散运移能力(图 2)，但高比表面积的黏土矿物、硅藻土及高盐度还原环境可发挥显著的物理-化学吸附与动态封闭效应，有效延缓氢气逸散。

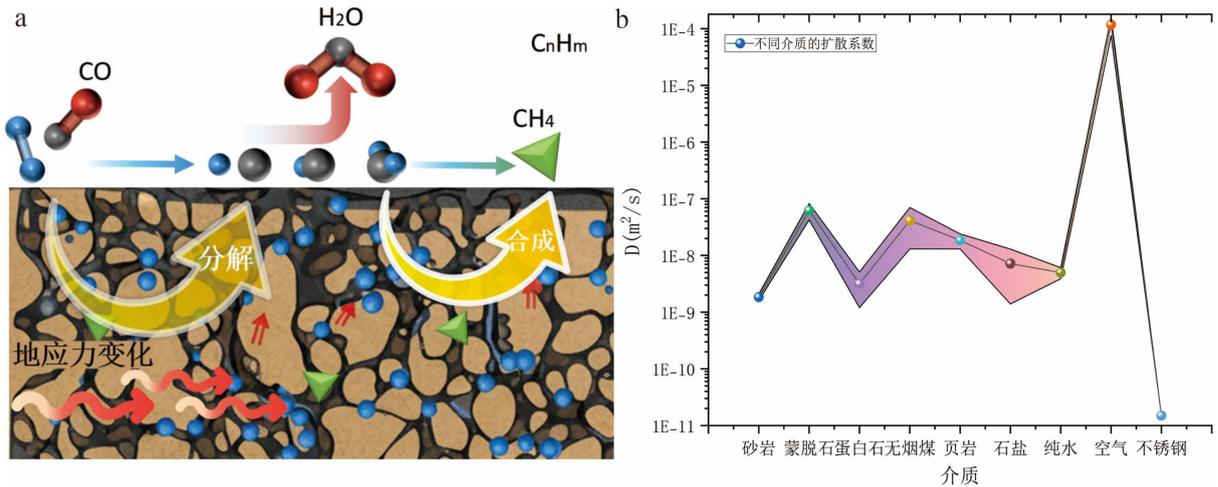


Figure 2. (a) Interaction between hydrogen and organic matter (e.g., kerogen) under intense geostress changes; (b) Hydrogen diffusion capacities in different media (Data source: [9])

图 2. (a) 强地应力变化氢与干酪根等有机质的相互作用；(b) 不同介质中氢扩散能力(数据来源：[9])

天然氢气藏的有效保存依赖于由蒸发岩、致密沉积岩、火成岩及流体层构成的多元化盖层体系，其封闭机理涉及物理阻滞、水力封堵与界面化学行为的复杂耦合。蛇绿岩氢系统中，深部含水层可作为有效盖层，且随深度增加氢气溶解度趋近饱和，据菲克定律，氢气通过水饱和和多孔介质的向上迁移通量较纯水低 10 倍，该阻滞效应在盐水层中更为突出；致密泥页岩层具有低孔隙特征，依靠微纳米级的孔喉产生高毛细管入口压力减少氢气扩散空间，其氢损耗量与介质扩散系数直接相关(图 3)，但 H₂ 润湿性会随压力、有机酸浓度及 TOC 升高而增强，进而降低封闭效率[10]；与致密泥页岩相较，蒸发岩如盐岩的扩

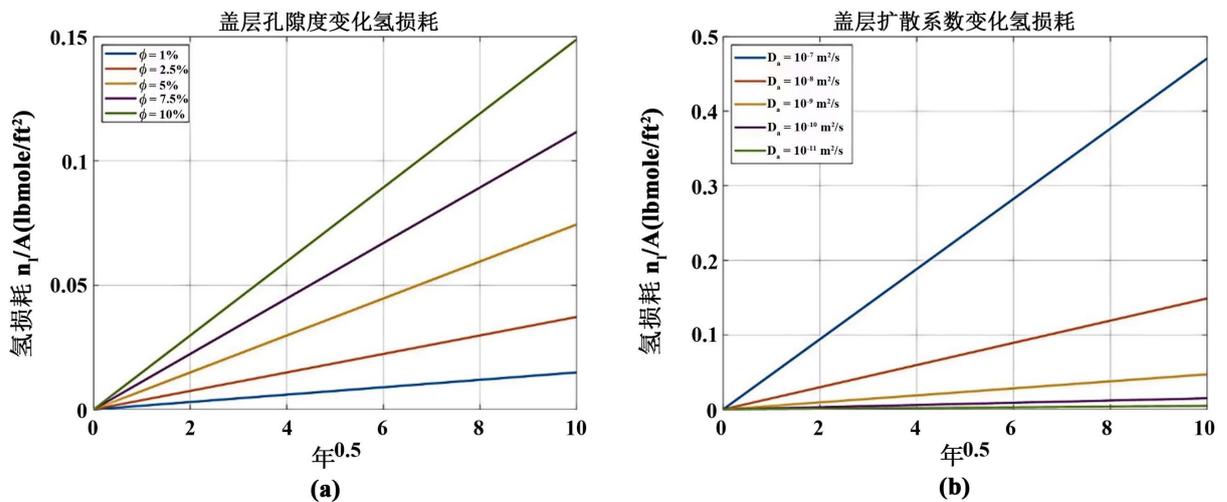


Figure 3. Hydrogen loss under variations of caprock porosity (a) and diffusion coefficient (b) (Modified from [12])

图 3. 盖层孔隙度变化(a)和扩散系数(b)变化下的氢损耗(修改自[12])

散系数更小(图 2), 能够有效遏制氢气的长期耗散, 蠕变带来的自愈合能力能防止氢气沿裂隙逃逸, 对构造作用的敏感性更小, 纯盐岩的化学惰性保证了封闭的长期稳定性; 纯净的致密石灰岩或白云岩若无裂缝, 其基质孔隙度极低, 可作为有效盖层。但在酸性流体作用下易发生溶蚀, 破坏完整性; 致密火成岩可通过次生矿物填充提高封闭能力, 辉绿岩可作为良好的盖层, 岩层厚度与氢气圈闭成正相关, 厚度越大, 盖层下的氢气浓度越高, 但火成岩冷却过程中易发育柱状节理和微裂缝, 若无后期矿物充填, 易成为渗漏通道。含火成岩沉积盆地中, 松辽盆地营城组凝灰岩、流纹岩等岩浆岩凭借微孔喉发育及较高毛细入口压控制氢气扩散, 储层产氢率达 13%~25% [11], 而 CH_4 的存在会形成优势通道加速氢气扩散。

优势盖层中, 厚层未破裂辉绿岩作为致密火成岩, 以极低孔隙率形成物理屏障阻止气相对流迁移, 同时可与碳酸盐发生接触变质作用形成更致密的大理岩以强化封闭性能, 但马里 Bourakebougou 氢气藏的实践表明, 致密砂页岩盖层封隔效果显著优于辉绿岩层, 推测其低孔隙度与高毛细管压共同抑制了氢气突破。

2.3. 迁移与运移通道

地下地质体中氢气的迁移受分子扩散与宏观平流机制的动态耦合制约。微观尺度上, 氢气扩散遵循菲克定律并具有显著的结构依赖性, 高矿化度流体诱发的“水桥”效应(图 4)通过增加路径迂曲度有效抑制其扩散通量。在长距离运移过程中, 氢气不仅面临硫酸盐热化学还原及产甲烷菌的生物化学消耗, 还在富有机质带参与加氢裂解生烃反应[13]。平流机制则严格受多相界面性质调控: 高盐度产生的毛细管阻滞效应抑制渗流, 而深部高温环境通过降低界面能促进气相聚集成藏, 从而形成优势载流通道实现高效运移。

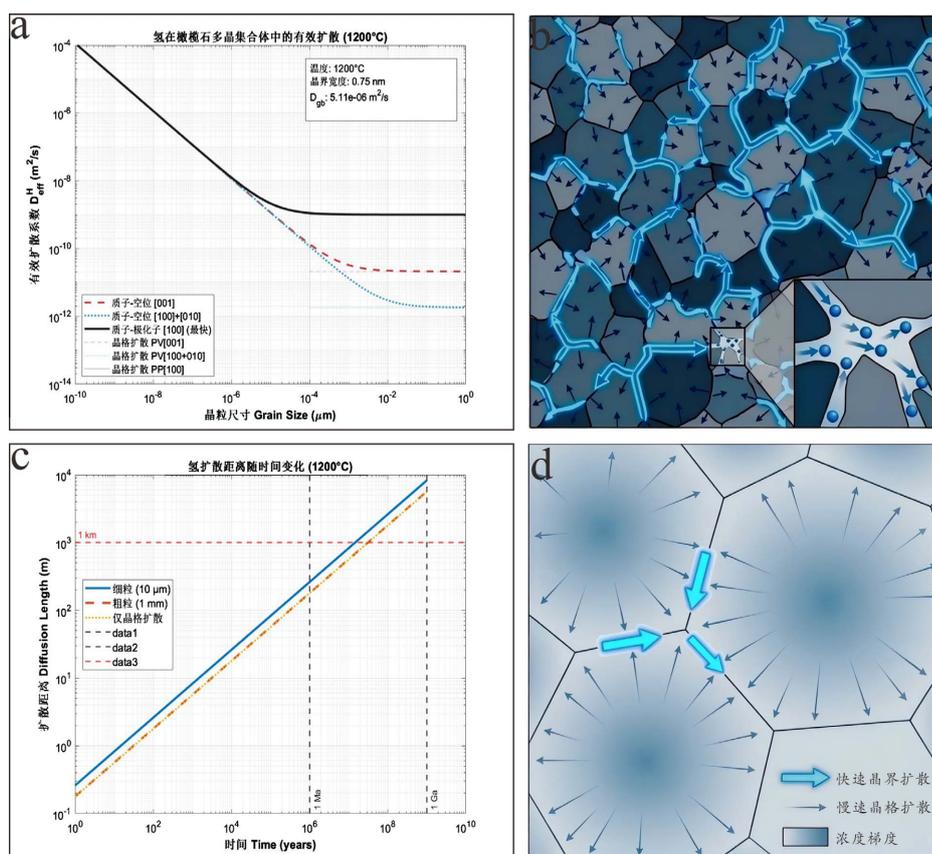


Figure 4. Hydrogen diffusion modes, variations in diffusion coefficients, and diffusion distances over time at different grain sizes (Adapted from [17])

图 4. 不同晶粒尺寸下氢气扩散方式、扩散系数变化和扩散距离随时间变化(自[17])

在宏观尺度地质格架下,天然氢的运移受控于孔隙-裂隙介质与区域断裂网络的多重耦合机制,动力学行为遵循扩散-平流方程及 Péclet 数判别准则:在构造活跃区及圣安德烈亚斯型深大断裂带中,压力驱动和平流作用显著优于扩散作用并主导动态成藏过程,深部热流与断裂系统不仅构成了氢气快速垂向运移的优势通道及与弱透水层叠置的临时聚气场所,还通过引导深部流体运移至上覆蛇纹岩体诱发水岩反应实现二次生氢[14];而在低渗致密层或非均质粘土-砂质互层带,氢气运移表现出强烈的路径选择性,倾向于沿微裂缝等高渗优势通道渗流;构造-地震活动对运移系统具有双重调控效应,既通过活化裂隙网络增强平流输导导致地表出现阵发性渗漏峰值,亦可经由应力调整形成侧向封闭界面阻滞横向逃逸;数值模拟方面,在新西兰塔拉纳基盆地的应用的集成达西流与侵入渗流机制的耦合模型已证实能更精确地刻画天然氢在复杂地质体中的非线性运移特征[15]。

地表氢气迁移往往与“仙女圈”及类似构造密切相关。监测数据显示,此类构造的氢气释放通量具有显著的昼夜周期性特征,即“昼高夜低”的脉冲式变化。该现象的成因主要归结为两方面:一是土壤环境与相态变化。白昼强烈的土壤蒸发作用降低了浅层含水率,减少了气体运移阻力;同时,氢气在上移过程中因温压降低,溶解度随之下降,导致浅层脱气效应增强,表现为监测信号的斜率攀升。二是大气压力的“泵吸作用”。Moretti 等人[16]在巴西圣弗朗西斯科盆地的研究发现,氢气峰值多滞后出现在午后。这主要归因于大气压力波动:午后气压降低产生“抽吸”效应,促使土壤气逸出;而夜间气压回升则抑制了气体扩散。此类受环境因素调控的周期性释放特征,在断层及断裂带发育区域的氢气渗漏中也普遍存在。

断层既是氢气的运移通道,也是导致氢气无法保存并泄漏到地表的直接原因。巴西、澳大利亚、俄罗斯等地的地表圆形凹陷结构往往存在于构造活动带上方(图 5),其渗漏特征与深部断层线高度重合,当断层处于开启状态,氢气从深部逃逸至地表,导致深部氢气难以长期积累形成储气库。从盖层破坏角度,激活断裂带会导致盖层岩体发生形变和产生破裂,显著增大盖层渗透率,储层内部氢气组分饱和度随断裂活动下降,同时,断层与储层的相对位置关系对氢气藏造成不同程度的泄露风险[18]。从氧化角度,一方面深部富氢流体与浅部氧化流体在断裂带混合,形成剧烈的化学反应带,另一方面,断裂活动引入的嗜氢细菌加速消耗氢气,降低纯度。相较于传统的气藏,氢气分子半径小、扩散系数大的特点导致氢对构造活动区更敏感,而在稳定克拉通区域更适合长期保存。

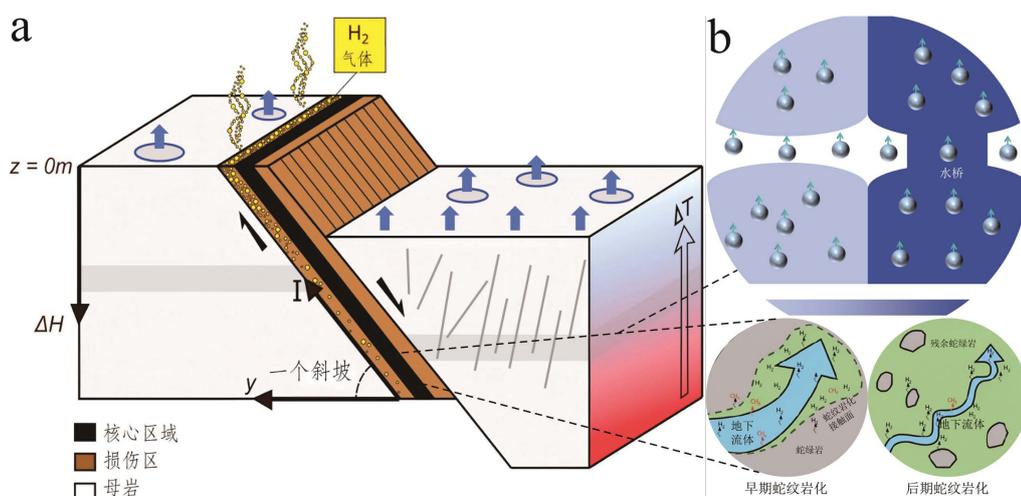


Figure 5. (a) Fluid model of faults (Modified from [19]); (b) Water bridge formation induced by changes in salinity and water saturation

图 5. (a) 断层的流体模型(据[19]修改); (b) 盐度及饱水变化引起水桥形成

2.4. 天然氢气藏赋存模式系统

天然氢气藏赋存模式系统(图 6)的形成受控于严苛的“生-储-盖”时空耦合与多场动态平衡机制。区别于传统烃类系统百万年级的演化,天然氢多源于基底结晶岩系的水-岩反应,具“瞬时”生成与动态补给特征,其空间跨度纵贯岩石圈。由于氢气具有极强的扩散性与化学活性,其运聚过程伴随显著的生物-化学双重耗散风险,构建“低过程损耗、高物理封闭”的保存体系成为成藏关键。致密火成岩、蒸发岩或盐穴等构成了优越的封盖系统,马里及西比利牛斯等地的典型实例验证了断控型与岩性复合圈闭的有效性[20];海洋环境下,成藏模式随构造分带呈现分异,受巨厚沉积物、碳酸盐岩及转换断层侧向封隔的共同调控[21]。系统的保存稳定性受流体-岩石相互作用及地层力学性质制约,特别是氢流体侵入引发的盖层脆韧性转化是导致逸散的主要风险。未来勘探应聚焦“氢-热协同开发”等动态通量开采模式,推动资源评价体系从静态认知向动态机理重构转变。

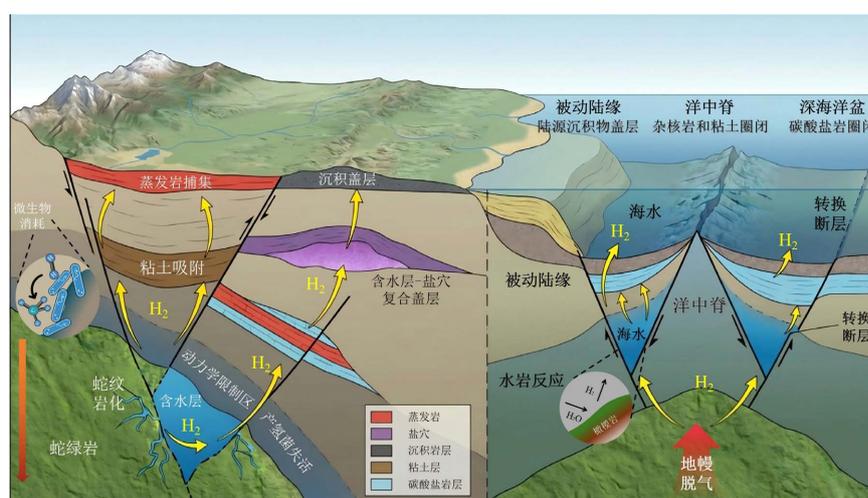


Figure 6. A simplified view of the natural hydrogen system
图 6. 天然氢系统简易视图

3. 天然氢气藏成因机制

全球天然氢气通常可分为无机成因气和有机成因气,无机成因气一般与非生物的物理化学过程有关,其中包括深层岩浆和从原始材料脱气、地壳中的水/岩石相互作用、通过辐射分解或晶体裂解破坏水、岩石破碎、有机质成熟分解等过程;而有机成因气一般与热作用和微生物的活动和化学作用有关。

3.1. 地壳中的水-岩石相互作用

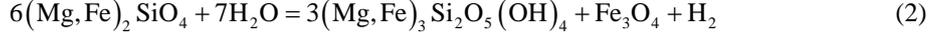
现阶段关于水岩反应产氢机制的研究重点聚焦于蛇绿岩套的蛇纹石化、亚铁氧化及硫化作用,其中铁的氧化过程本质上是含铁矿物的水合氧化,该机制不仅主导了洋壳环境中橄榄石、正辉石等基性-超基性矿物的蚀变产氢,亦广泛存在于陆相环境中黑云母等其他富铁矿物的氧化反应中,是地下氢气通量的重要贡献来源。其反应本质与经典的蛇纹石化产氢机制高度一致,因此为便于系统阐释氢气的成因机理,本研究将涉及含铁矿物氧化及蛇绿岩水化蚀变的产氢过程统一归纳为广义的蛇纹石化作用范畴。

(1) 蛇纹石化

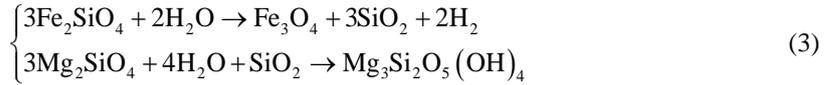
蛇纹石化作用作为天然氢无机成因机制研究的先导与核心关注点,广泛发育于土耳其等典型蛇绿岩分布区,该类区域多对应古大洋中脊扩张或板块俯冲带的地质构造背景[22]。初期为富三价铁离子矿物与水作用,形成 H_2 , 第二阶段为 H_2 与水溶的 CO_2 的反应形成 CH_4 :



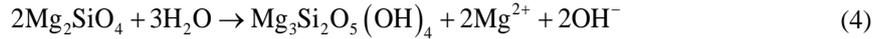
研究发现在第二阶段并未完全消耗前驱生成的氢气, 这一反应动力学的不平衡性会形成高氢气含量的气藏; 在部分板块交界处(欧洲被动边缘与阿普利亚板块)的基性或超基性岩石富含铁镁等元素受到海底热液作用和俯冲带受到各种流体的作用也会产生蛇纹石化[23]:



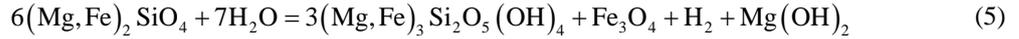
在部分研究中, 蛇纹石化可分为几种几步, 第一是含铁橄榄石与水反应, 第二是含镁橄榄石与水反应的两种形式, 第一种是镁橄榄石与上式过量的 SiO_2 反应:



第二种是直接与水反应:



除典型洋壳蛇绿岩套外, 前寒武纪富铁克拉通基底及其发育的条带状铁建造(BIF)亦被证实具备显著的生氢潜力, 其富铁矿物与含氧热液或海水的接触交代作用是诱发氢气生成的关键机制; 以华北克拉通为例, 研究揭示了磁铁矿在近地表氧化环境下可发生次级蚀变, 分解生成赤铁矿、菱铁矿并伴生氢气释放, 进一步证实了铁氧化产氢机制在地质历史与空间分布上的广泛性[24], 综上, 可将蛇纹石化反应综合简化为:



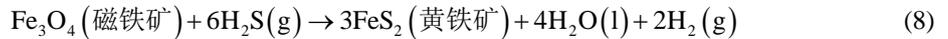
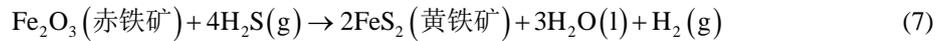
从上述过程中, 蛇纹石化反应作为天然氢生成的关键无机机制, 其动力学过程严格受控于热力学环境、矿物微观几何特征及催化介质的非线性耦合作用。一般而言, 该反应在碱性环境($\text{pH} > 7$)中进行, 产氢速率随温度呈非对称钟形演化规律, 在约 300°C 达到动力学峰值, 且当橄榄石粒径大于 $5\ \mu\text{m}$ 时, 反应速率与颗粒比表面积呈显著正相关, 表明晶体表面溶解是主要控速步骤, 然而, 近期研究揭示了低温动力学的可控性, 微量 Ni^{2+} (1%) 的催化介入可在 90°C 条件下将产氢效率提升约两个数量级, 证实了除温度外的催化氧化路径对突破低温动力学瓶颈的关键作用[25]。尽管含盐流体对主反应影响有限, 但不同地质单元地下水中氢-铁相关性的截然相反观测结果, 指示了自然界原位成因的复杂性与多源混合特征。

(2) 硫氧化

硫的氧化产氢机制主要富集于火山热液活动区, 作为无机成因氢的重要补充。高温热流体环境驱动了硫-氮元素的深部地球化学循环, 岩浆脱气来源的 H_2S 与含氮流体在特定热力学条件下发生氧化还原耦合反应, 通过硫元素的价态变化协同生成 N_2 与 H_2 [26], 反应路径可描述为:



据目前模拟的化学反应研究[27], 在酸性热液或火山喷气系统等特定地质环境中, 氢气的生成受控于矿物转化的氧化还原平衡, 有两种与氢气生成的反应, 一种与赤铁矿 Fe_2O_3 有关, 一种与 Fe_3O_4 磁铁矿有关:



尽管现阶段实验模拟已涉及地面热解条件下的硫氧化生氢路径, 但深部高温地层环境被确认为该机

制发生的主导地质场所。虽然目前关于硫氧化的实地研究较少, 但目前模拟硫氧化的生成氢气对之后在火山区域对氢气的勘探具有良好的借鉴意义和理论支撑, 也对火成岩的地下反应有了更深入的理解。

(3) 水辐解

水的辐解产氢一般是地下水与地壳、大陆基底的放射性元素(Th、U、K)的放射性衰变有关, 一方面, 辐射能量直接驱动水分子发生解离反应将水分解成 H_2O_2 和 H_2 , H_2O_2 易分解成 H_2 和 O_2 , 另一方面, 高能辐射导致水分子分解成自由基, 这些自由基又可以相互结合产生氢气。

水辐解产氢机制已在巴西 Maricá 花岗岩体、加拿大阿萨巴斯卡 Cigar Lake 铀矿床及南非 Witwatersrand 盆地等典型富铀-钍地质单元中得到确证, 其生氢效率表现出显著的岩石物理属性依赖性, 特别是岩石孔隙度对自由基扩散与复合的调控作用至关重要[28], 基于全球结晶基底 1%~2% 的平均孔隙度模型估算, 该机制年均氢气产率可达 10^{11} mol 量级。此外, 矿物组分中的铁、铝等金属元素在辐解系统中扮演关键角色, 放射性衰变释放的高能粒子通过激发金属表面活性位点, 诱导水分子发生辐射-化学耦合氧化还原反应, 进一步拓宽了产氢路径:



关于水岩反应和辐解反应生氢的产率的比较(图 7), 相较于单纯的热驱动水岩相互作用, 辐射介入能显著加速反应进程并提升平衡产率。在 $n\text{-ZrO}_2\text{-}n\text{-Al}_2\text{O}_3$ 等复合介质体系中, 辐射-热耦合环境下的水分解反应速率与最终氢气产率均显著优于单一热催化体系, 表明辐射能量的注入能有效降低反应活化能, 从而在更短时间尺度内达到化学平衡[29], 从中也能发现不同氢气成因的差异。

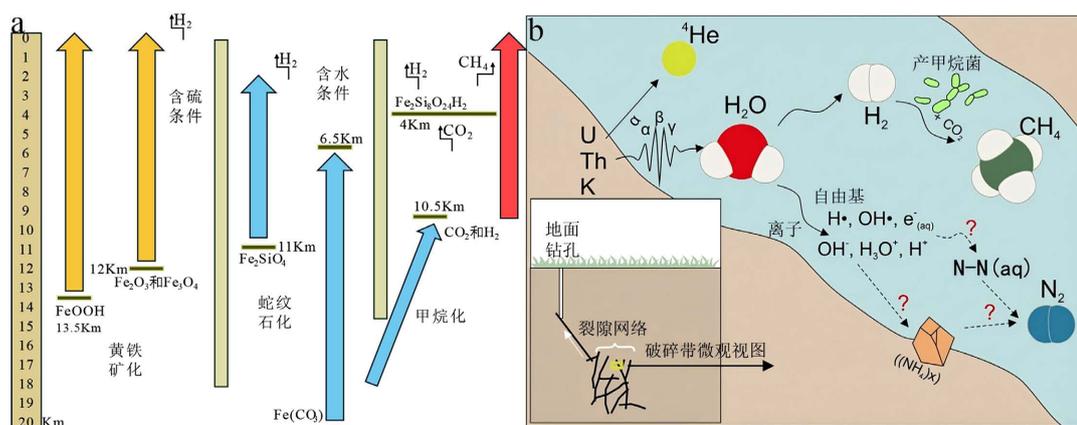


Figure 7. (a) Overview of water-rock interactions in the Earth's crust (Modified from [27]); (b) Schematic representation of hydrogen generation via water radiolysis (Adapted from [28])

图 7. (a) 地壳中的水/岩石相互作用综述(据[27]修改); (b) 含水辐解的氢气示意图(据[28])

3.2. 含铀岩系“氢源岩”成因

含铀岩系作为“氢源岩”的潜力评估需结合地球化学组分、实验模拟及地质实测进行多维度研判。以阿萨巴斯卡盆地 Cigar Lake 铀矿床为例, 加热实验及皮尔逊相关性分析(图 8)显示, 岩石基质中氢、铁与铀含量间无显著相关性, 铀岩周边粘土矿物的热解吸产物中氢气相关性亦较弱[30]。这表明铀的富集并不直接对应高强度的氢气释放, 其产氢机制主要源于辐射分解水的间接能量传递, 且易受微生物介导的氢还原作用限制。此外, Strange Lake 碱性杂岩体的流体包裹体研究亦证实氢气并非含铀环境中唯一的主导组分[31]。从地球化学机理上看, 铀元素通常以分散形式存在于副矿物或水溶液中(图 8), 其产氢机制

主要源于辐射分解水的间接能量传递,而非直接以氢气形式释放[32]。鉴于实证案例尚显不足且产氢受铀迁移机制及构造环境的非线性影响,将含铀岩系明确定义为独立“氢源岩”仍需持审慎态度,其产氢效率与地质环境的耦合机制有待进一步深入探讨。

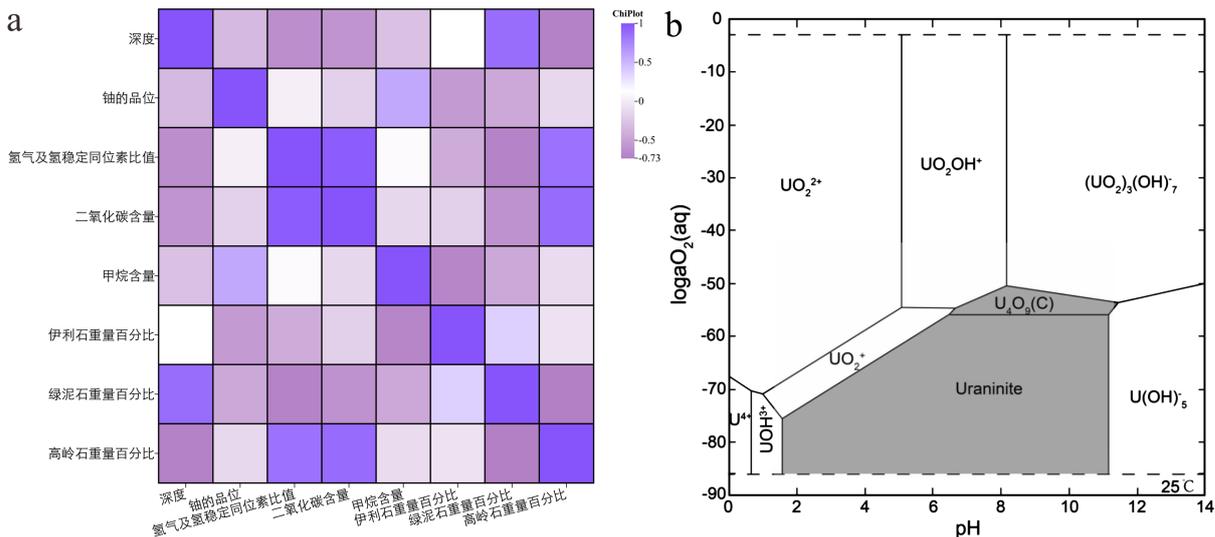


Figure 8. (a) Heatmap of correlations between clay mineral thermal desorption products; (b) Speciation of Uranium (U) in water under different pH and O₂ conditions at 25°C and 1atm (Adapted from [32])
图 8. (a) 粘土矿物热解吸产物相关性热图; (b) U 在水中不同 pH 和含 O₂ 条件下存在形式图解(25°C、1atm) (据[32])

3.3. 动力学 - 深层岩浆和从原始材料脱气

深层岩浆活动和原始材料脱气是天然氢气生成的重要机制之一,分为深层岩浆脱气生氢机制和原始材料脱气生氢机制,前者与地球深部岩浆活动和地震、断裂等构造活动有关,后者释氢与地幔柱脱气和板块俯冲带有关。

3.3.1. 深层岩浆脱气生氢机制

深层岩浆与构造活动共同驱动地幔氢气的释放。深部高温高压环境下,氢以金属氢化物形式赋存,随岩浆底辟上升引发压力卸载,诱导熔体氧化还原平衡移动并促进水分裂解产氢,使其成为监测火山演化的重要地球化学指标[33]。构造活动则通过重塑应力场开启微裂隙系统(图 9),诱发深部物理圈闭内氢气的脉冲式释放,并利用矿物表面的机械更新强化水-岩反应生氢机制,使氢气浓度波动具备显著的地震预警意义[34]。对比研究揭示,火山热液系统释放通量中 H₂ 组分占优(图 9),而单纯地震活动流体则相对富集 He 等惰性气体,这种成因分异特征为辨识构造-岩浆复合活跃区的流体来源提供了理论基础[35]。

3.3.2. 原始材料脱气

地球深部作为天然氢的原始储库,其氢元素的迁移与释放主要受控于地幔柱脱气与板块俯冲动力学机制。下地幔中氢的迁移受矿物晶格扩散各向异性制约,且水-氢流体不混溶特征直接影响了地幔柱上升过程中的氢富集通量[37]。俯冲带背景下,板片脱水诱发的强蛇纹石化作用是氢气生成的主导因素,且组分特征受构造背景显著调制:洋-陆型俯冲带因沉积物参与 Sabatier 反应易呈现富 CH₄ 特征,而洋-洋型则产氢更为纯粹(图 10)。此外,富氢流体在垂向运移中存在显著的色谱分异与组分演化规律,表现为从深部 H₂-CH₄ 相态向浅部富 N₂ 相态的更替,这一演化趋势为深部氢源示踪及渗漏点判识提供了关键地球化学依据[38]。

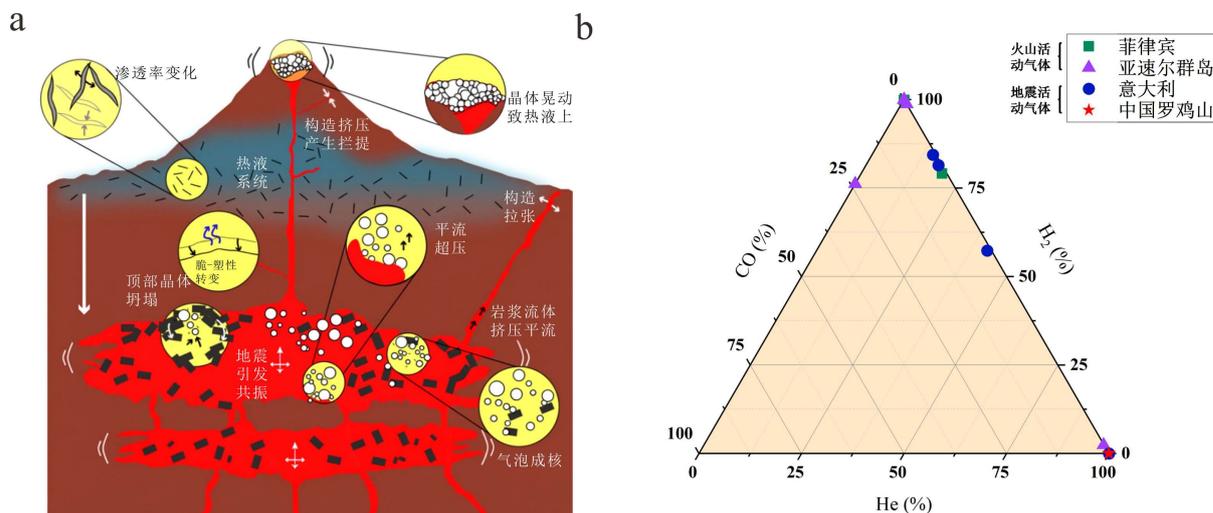


Figure 9. (a) Mechanism of earthquake-induced volcanism (Adapted from [35]); (b) Analysis of selected gas components (Data source: [36])

图 9. (a) 简单地震引发火山机制(据[35]); (b) 部分气体组分分析(数据来源[36])

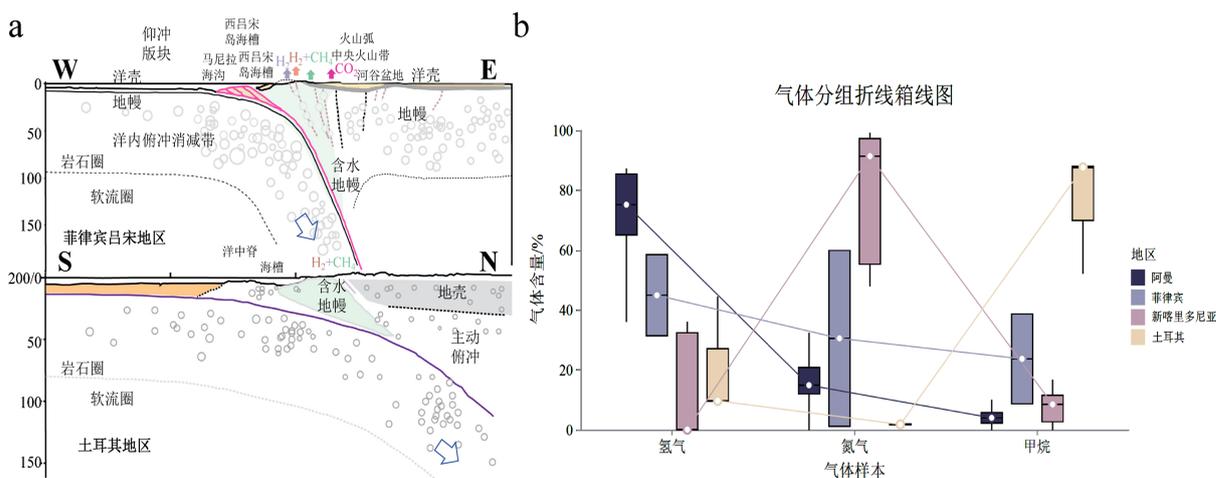


Figure 10. (a) Gas reservoir formation mechanisms in subduction zones of Türkiye and the Luzon plate, Philippines (Adapted from [22] [38]); (b) Box-and-whisker plots of gas components in Oman, the Philippines, and other regions

图 10. (a) 土耳其地区和菲律宾吕宋板块俯冲带气藏形成机理(据[22] [38]); (b) 阿曼、菲律宾等地气体组分折线箱图

3.3.3. 微观 - 岩石破碎生氢(表 1)

Table 1. Cases of hydrogen generation through rock fracturing (mechanochemical process)

表 1. 岩石破碎生氢案例(机械化学过程)

地区	作用机制	参考文献
陵兰岛等地	冰川集水区下硅酸盐岩石破碎通过矿物表面二氧化硅自由基反应或生成的过氧化氢分解	文献[39]
英国	矿物颗粒之间或羟基反应	文献[40]
威兰斯湖	湖相沉积物进行机械破碎过程中可释放氢气	文献[41]
日本	硅自由基和羟基反应制氢	文献[42]

3.4. 有机成因

天然氢的有机成因主要划分为岩石有机质热裂解与微生物代谢两大路径, 其中热解生氢的规模通常优于生物成因。热裂解机制主要发生于深部高温高压下的富有机质页岩或煤岩中, 产氢潜力与 TOC 丰度 (>1%为门限值)及热演化程度呈正相关, 即便在高-过成熟阶段页岩仍具备生氢能力[43]。生物成因则源于特定地质生境中的微生物代谢活动, 氢气虽常作为中间代谢产物被产甲烷菌消耗, 但在海洋、煤系地层或经超临界 CO₂ 调控的枯竭油藏中, 仍可实现原位生物制氢资源的有效富集[44]。

4. 我国潜在天然氢气藏及资源潜力

我国地质构造演化复杂, 多条深断裂带、蛇绿岩带与缝合带的广泛发育为天然氢成藏奠定了物质基础。其中松辽盆地属于“冷壳热幔”岩石圈热结构, 伴生气中氢气组分占 13%~25%, 具有良好深部热动力学条件, 平均地温梯度在 32°C/km, 地球物理资料显示居里面深度在 20 km 左右, 莫霍面深度在 40 km 左右, 平均大地热流值可达 70 mW/m² 以上, 中部热流超过 80 mW/m², 高热流环境为深部基底富铁镁质岩石的蛇纹石化反应提供了极佳的热动力学条件, 同时, 松辽盆地作为含火山岩沉积盆地气藏, 氢源由水的辐射分解、水-岩相互作用和地幔来源构成; 盆地深部发育的下白垩统营城组火山岩系既是潜在的氢源岩, 又是优质储层; 徐西、徐东等断裂作为优势运移通道, 进行动态成藏; 营城组凝灰岩、流纹岩发育的微孔隙与裂缝网络为氢气提供了储集空间, 且较高的毛细管入口压力使其具备了一定的封盖能力, 广泛发育的白垩系泥岩作为区域性盖层[11][45]。此外, 郯庐断裂带及周缘裂陷盆地区、阿尔金断裂带及两侧盆地区、三江构造带—龙门山断裂带及周缘盆地区产氢潜力巨大[46], 然而, 高频的强震活动不断破坏盖层的完整性, 导致氢气难以在浅层长期聚集成藏, 更多表现为沿断裂带的温泉气或土壤气逸散。此类区域的勘探重点应放在寻找断裂带旁侧的稳定构造单元或具有快速动态充注特征的“短暂性”气藏, 而蛇绿岩带和断裂带叠加区域可能是今后氢探和产氢的突破点。

鉴于天然氢的高扩散性与动态演化特征, 亟需建立长时序原位监测网络与多指标地球化学判识体系, 革新完井工艺以保障取样真实性。在勘探方面, 应深化“机器学习+地质模拟”融合, 构建适配中国复杂构造的预测模型, 推动从偶发发现向“甜点区”主动优选转变。此外, 需完善资源评价标准与顶层设计, 构建“产-学-研”协同生态, 将天然氢提升至战略高度以加速商业化进程。

5. 结论

(1) 天然氢赋存呈现游离、溶解、吸附多相态动态转化特征, 成藏严格受控于“源-运-储-盖”协同体系。鉴于氢气的高扩散性, 致密火成岩、蒸发岩等优质盖层与断裂-裂隙运移通道的有效耦合是气藏长期保存的关键。

(2) 天然氢气成因机制遵循“无机主导、多源协同”规律。蛇纹石化作用是主导产氢机制, 深部流体脱气与水辐解作用构成重要补充, 而有机热解与微生物代谢在特定环境下提供局部富集。多机制的时空叠加是形成大型商业性气藏的基础。

(3) 全球典型氢气藏案例揭示了以“前寒武纪基底源-沉积储”为特征的克拉通盆地型和以“水岩反应源-裂隙储”为特征的裂谷带型两类优势成藏模式, 为我国勘探提供重要借鉴。

参考文献

- [1] 邹才能, 张福东, 郑德温, 孙粉锦, 张金华, 薛华庆, 潘松圻, 赵群, 赵永明, 杨智. 人工制氢及氢工业在我国“能源自主”中的战略地位[J]. 天然气工业, 2019, 39(1): 1-10.
- [2] 李强, 孟庆强, 韩超, 周袁, 吴晗, 代守瑞. 天然氢赋存状态及转化机制[J]. 中国地质调查, 2024, 11(5): 9-20.

- [3] 宇波, 李敬法, 田坤, 秦守强, 章涛. 天然氢勘探开发与集输研究现状及展望[J]. 油气储运, 2025, 44(3): 241-260.
- [4] Wei, Y., Liu, Q., Zhu, D., Meng, Q., Xu, H., Zhang, W., *et al.* (2025) Helium and Natural Hydrogen in the Bohai Bay Basin, China: Occurrence, Resources, and Exploration Prospects. *Applied Energy*, **383**, Article ID: 125398. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.125398>
- [5] Prinzhofner, A., Moretti, I., Françolin, J., Pacheco, C., D'Agostino, A., Werly, J., *et al.* (2019) Natural Hydrogen Continuous Emission from Sedimentary Basins: The Example of a Brazilian H₂-Emitting Structure. *International Journal of Hydrogen Energy*, **44**, 5676-5685. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.01.119>
- [6] 叶青, 宋洁, 侯坤, 郭志远, 徐桂芝, 邓占锋, 李宝让. 质子交换膜电解制氢氢气渗透研究进展[J]. 工程科学学报, 2022, 44(7): 1274-1281.
- [7] Zhang, Q., Wang, J., Zhang, L., Masoudi, M., Hassanpouryouzband, A. and Song, Y. (2025) Hydrogen Adsorption Kinetics and Diffusion of Clays: Implications for Hydrogen Geo-Storage and Natural Hydrogen Exploration. *Journal of Colloid and Interface Science*, **700**, Article ID: 138440. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2025.138440>
- [8] Kim, H.S. (2025) Thermodynamic Modeling of the Serpentinization of Ultramafic Rocks from the Korean Peninsula: Insights into Natural Hydrogen (H₂) Generation. *Episodes*, **49**, 57-74. <https://doi.org/10.18814/epiiugs/2025/025007>
- [9] 韩双彪, 王缙, 黄劼, 王成善. 全球天然氢气研究现状与发展趋势[J]. 石油与天然气地质, 2025, 46(3): 790-808.
- [10] Hosseini, M., Fahimpour, J., Ali, M., Keshavarz, A. and Iglauer, S. (2022) Capillary Sealing Efficiency Analysis of Caprocks: Implication for Hydrogen Geological Storage. *Energy & Fuels*, **36**, 4065-4075. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.2c00281>
- [11] Liu, Q., Wei, Y., Li, P., Huang, X., Meng, Q., Wu, X., *et al.* (2025) Natural Hydrogen in the Volcanic-Bearing Sedimentary Basin: Origin, Conversion, and Production Rates. *Science Advances*, **11**, eadr6771. <https://doi.org/10.1126/sciadv.adr6771>
- [12] Ghaedi, M., Andersen, P.Ø. and Gholami, R. (2023) Hydrogen Diffusion into Caprock: A Semi-Analytical Solution and a Hydrogen Loss Criterion. *Journal of Energy Storage*, **64**, Article ID: 107134. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.107134>
- [13] Thaysen, E.M., McMahon, S., Strobel, G.J., Butler, I.B., Ngwenya, B.T., Heinemann, N., *et al.* (2021) Estimating Microbial Growth and Hydrogen Consumption in Hydrogen Storage in Porous Media. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **151**, Article ID: 111481. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111481>
- [14] Shestopalov, V.M. (2020) On Geological Hydrogen. *Geofizicheskiy Zhurnal*, **42**, 3-35. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v42i6.2020.222278>
- [15] Abdullahi, M., Gay, A., Saspiturry, N., Hidalgo, J.C., Godard, M. and European Association of Geoscientists & Engineers (2025) Modelling Radiolytic Natural Hydrogen Generation from Fractured Basements: A Case Study from the Taranaki Basin, New-Zealand.
- [16] Moretti, I., Prinzhofner, A., Françolin, J., Pacheco, C., Rosanne, M., Rupin, F., *et al.* (2021) Long-Term Monitoring of Natural Hydrogen Superficial Emissions in a Brazilian Cratonic Environment. Sporadic Large Pulses versus Daily Periodic Emissions. *International Journal of Hydrogen Energy*, **46**, 3615-3628. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.11.026>
- [17] Demouchy, S. (2010) Diffusion of Hydrogen in Olivine Grain Boundaries and Implications for the Survival of Water-Rich Zones in the Earth's Mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, **295**, 305-313. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2010.04.019>
- [18] Talukdar, M., Zheng, F. and Jha, B. (2025) Hydrogen Leakage via Caprock Fracturing and Fault Reactivation during Subsurface Porous Media Storage. *International Journal of Hydrogen Energy*, **149**, Article ID: 149786. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.05.416>
- [19] Cao, P. and Ning, F. (2025) Origins, Migrations and Accumulations of Natural Hydrogen. *Applied Energy*, **401**, Article ID: 126726. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.126726>
- [20] Lefevre, N., Truche, L., Donzé, F., Gal, F., Tremosa, J., Fakoury, R., *et al.* (2022) Natural Hydrogen Migration along Thrust Faults in Foothill Basins: The North Pyrenean Frontal Thrust Case Study. *Applied Geochemistry*, **145**, Article ID: 105396. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2022.105396>
- [21] 索艳慧, 姜兆霞, 李三忠, 吴立新. 海底氢气成藏模式与全球分布[J]. 地学前缘, 2024, 31(4): 175-182.
- [22] 孟庆强, 金之钧, 孙冬胜, 刘全有, 朱东亚, 刘佳宜, 黄晓伟, 王璐. 高含量氢气赋存的地质背景及勘探前景[J]. 石油实验地质, 2021, 43(2): 208-216.
- [23] Dugamin, E., Truche, L. and Donze, F. (2019) Natural Hydrogen Exploration Guide. *ISRN Geonum-NST*, **1**, 16.
- [24] 房大任, 裴秋明, 王海华, 张炜, 赵睿, 李姝乐. 天然氢气成因与全球氢资源勘探进展[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2024, 51(6): 989-1007, 1021.
- [25] Song, H., *et al.* (2021) An Overlooked Natural Hydrogen Evolution Pathway: Ni²⁺ Boosting H₂O Reduction by Fe(OH)₂

- Oxidation during Low-Temperature Serpentinization. *Angewandte Chemie*, **133**, 24256-24260. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/ange.202110653>
- [26] Moretti, I., Geymond, U., Pasquet, G., Aimar, L. and Rabaute, A. (2022) Natural Hydrogen Emanations in Namibia: Field Acquisition and Vegetation Indexes from Multispectral Satellite Image Analysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, **47**, 35588-35607. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.08.135>
- [27] Arrouvel, C. and Prinzhofer, A. (2021) Genesis of Natural Hydrogen: New Insights from Thermodynamic Simulations. *International Journal of Hydrogen Energy*, **46**, 18780-18794. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.03.057>
- [28] Karolytė, R., Warr, O., van Heerden, E., Flude, S., de Lange, F., Webb, S., *et al.* (2022) The Role of Porosity in H₂/He Production Ratios in Fracture Fluids from the Witwatersrand Basin, South Africa. *Chemical Geology*, **595**, Article ID: 120788. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2022.120788>
- [29] Agayev, T.N., Melikova, S.Z. and Hadzhiyeva, H.F. (2019) Radiation-Termocatalytic Processes for Hydrogen Production from Water. *Problems of Atomic Science and Technology*, No. 2, 50-54. <https://doi.org/10.46813/2019-120-050>
- [30] Truche, L., Joubert, G., Dargent, M., Martz, P., Cathelineau, M., Rigaudier, T., *et al.* (2018) Clay Minerals Trap Hydrogen in the Earth's Crust: Evidence from the Cigar Lake Uranium Deposit, Athabasca. *Earth and Planetary Science Letters*, **493**, 186-197. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2018.04.038>
- [31] 韩双彪, 唐致远, 等. 天然气中氢气成因及能源意义[J]. 天然气地球科学, 2021, 32(9): 1270-1284.
- [32] 王鲲, 邓江洪, 郝锡萃. 铀的地球化学性质与成矿——以华南铀成矿省为例[J]. 岩石学报, 2020, 36(1): 35-43.
- [33] Di Martino, R.M.R., Camarda, M. and Gurrieri, S. (2021) Continuous Monitoring of Hydrogen and Carbon Dioxide at Stromboli Volcano (Aeolian Islands, Italy). *Italian Journal of Geosciences*, **140**, 79-94. <https://doi.org/10.3301/ijg.2020.26>
- [34] Zhou, X., Yan, Y., Fang, W., Wang, W., Shi, H. and Li, P. (2021) Short-Term Seismic Precursor Anomalies of Hydrogen Concentration in Luojishan Hot Spring Bubbling Gas. *Frontiers in Earth Science*, **8**, Article ID: 586279. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.586279>
- [35] Seropian, G., Kennedy, B.M., Walter, T.R., Ichihara, M. and Jolly, A.D. (2021) A Review Framework of How Earthquakes Trigger Volcanic Eruptions. *Nature Communications*, **12**, Article No. 1004. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-21166-8>
- [36] Minissale, A., Evans, W.C., Magro, G., *et al.* (1997) Multiple Source Components in Gas Manifestations from North-Central Italy. *Chemical Geology*, **142**, 175-192. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(97\)00081-8](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(97)00081-8)
- [37] Peng, Y. and Deng, J. (2024) Hydrogen Diffusion in the Lower Mantle Revealed by Machine Learning Potentials. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **129**, e2023JB028333. <https://doi.org/10.1029/2023jb028333>
- [38] Vacquand, C., Deville, E., Beaumont, V., Guyot, F., Sissmann, O., Pillot, D., *et al.* (2018) Reduced Gas Seepages in Ophiolitic Complexes: Evidences for Multiple Origins of the H₂-CH₄-N₂ Gas Mixtures. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **223**, 437-461. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2017.12.018>
- [39] Gill-Olivas, B., Telling, J., Skidmore, M. and Tranter, M. (2023) Abrasion of Sedimentary Rocks as a Source of Hydrogen Peroxide and Nutrients to Subglacial Ecosystems. *Biogeosciences*, **20**, 929-943. <https://doi.org/10.5194/bg-20-929-2023>
- [40] Parkes, R.J., Berlendis, S., Roussel, E.G., Bahruji, H., Webster, G., Oldroyd, A., *et al.* (2018) Rock-Crushing Derived Hydrogen Directly Supports a Methanogenic Community: Significance for the Deep Biosphere. *Environmental Microbiology Reports*, **11**, 165-172. <https://doi.org/10.1111/1758-2229.12723>
- [41] Gill Olivas, B. (2018) Rock Comminution of Subglacial Lake Sediments as a Potential Source of Energy and Nutrients to the Subglacial Lake Whillans Microbial Ecosystem. *Atmospheric Environment*, **41**, 5110-5121.
- [42] Liang, Y., Cui, W., Masuda, Y., Hirose, T. and Tsuji, T. (2024) Identifying General Reaction Conditions for Mechano-radical Natural Hydrogen Production.
- [43] Kimayim Gaduwang, A., Tawabini, B., Abu-Mahfouz, S.I. and Al-Yaseri, A. (2024) Assessing Hydrogen Production Potential from Carbonate and Shale Source Rocks: A Geochemical Investigation. *Fuel*, **378**, Article ID: 132923. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.132923>
- [44] Vilcáez, J. and Chowdhury, E. (2025) Biogenic Hydrogen Production from Oil Hydrocarbons at Geological Carbon Storage Conditions. *Energy Conversion and Management*, **325**, Article ID: 119438. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.119438>
- [45] 张健, 何雨蓓, 范艳霞. 松辽盆地地壳热结构与深部热源条件[J]. 地球科学与环境学报, 2023, 45(2): 157-167.
- [46] 窦立荣, 刘化清, 李博, 齐雯, 孙东, 尹路, 韩双彪. 全球天然氢气勘探开发利用进展及中国的勘探前景[J]. 岩性油气藏, 2024, 36(2): 1-14.