



氢构造与海底氢能系统

李三忠^{1,2*}, 索艳慧^{1,2}, 姜兆霞^{1,2}, 吴立新^{1,2}

1. 中国海洋大学, 深海圈层与地球系统教育部前沿科学中心, 青岛 266100;

2. 崂山实验室, 青岛 266237

* 联系人, E-mail: sanzhong@ouc.edu.cn

氢元素是宇宙大爆炸之初融合形成的首个元素, 广泛存在于宇宙中, 构成了宇宙质量的75%, 是恒星核聚变的原材料. 其同位素有氘、氚、氦, 其中, 失去电子的氘原子核即氦离子或质子. 质子是生命利用的最小能量形式. 氢气是氢元素的气体分子形式, 可燃烧或极易与氧气反应直接生成水, 是高效燃烧、绿色环保、清洁的能源, 是氢能的一种.

人类以往通过一定方式, 将氢能转化为电能、热能等加以利用, 称为氢能利用. 由此, 氢能源以往被认为是一种二次能源, 即必须通过太阳能光合作用、生物制氢(如微生物作用下淀粉及纤维素、糖等含氢元素物质的酶生化反应)、天然气重整(如甲烷催化热分解)、水电解($2\text{H}_2\text{O}=2\text{H}_2+\text{O}_2$)、矿物燃烧(如 $\text{C}+2\text{H}_2\text{O}=\text{CO}_2+2\text{H}_2$, $\text{CH}_4+2\text{H}_2\text{O}=\text{CO}_2+4\text{H}_2$)、光伏储能技术等方式制取, 而不像直接可从地下开采的、不可再生的煤、石油、天然气和水合物等化石燃料或原始能源、初始能源. 氢气为人类科学利用可以上溯到1807年卡文迪什, 是200多年前的发明, 随后首先用作内燃机的燃料. 到1960年, 液氢首次被人类用作航天动力燃料. 进入21世纪, 面对环境污染、全球变暖等危机, 氢能燃料电池快速发展, 氢能作为解决当前人类所面临困境的新能源而成为各国大力研究的对象. Knez和Zamani^[1]依据制氢技术和初始底物, 将氢能(氢能的一种)分为7种, 即绿氢、蓝氢、黄氢、青氢、粉氢、灰氢和黑氢, 底物分别为水、甲烷或煤. 但是, 要获得这些二次氢能, 不可避免首先要消耗大量已有能源, 有的工业流程导致氢能收益甚微、得不偿失, 甚至还产生温室气体等负面环境效应.

然而, 最近在一些特定地质环境下的地表渗滤、地下矿井和钻孔中^[2-4], 均发现了天然富氢流体, 自然界的这些发现促使人们质疑氢气分子具有强迁移性和易于再活化而难以在地下积累成藏^[3]的早期观点. 这些发现也使得氢能不再仅属二次能源, 而且还是重要的初始能源, 并以固、液、气三态广泛赋存于地球不同圈层, 特别是, 岩石圈浅层的自然氢气藏成为当下一个急迫的勘探对象, 也是可媲美石油、天然气和水合物的新能源之一^[4,5].



李三忠 中国海洋大学教授. 长期从事洋底动力学、前寒武纪地球动力学、大陆动力学和地球系统动力学研究.

1 氢构造及其多样性

碳构造不能解释宇宙中一切, 而“氢构造”可触及宇宙诞生之初的结构构造样式^[6]. 氢构造是氢元素或其化合物、构成物作为独立运行单元形成的多尺度结构、构造形变模式或相态转换等过程. 氢构造与油气构造类似, 包括生氢机理、聚氢途径、储氢圈闭等^[7], 涉及生、储、盖、圈、运、保等构造要素.

宇宙中最大的氢构造是各种恒星. 例如, 太阳系中最大的氢构造是球对称热“气”球——太阳, 其71%的质量为氢; 太阳持续不断地发生天然核聚变, 即两个氢原子核结合成较重的原子核(氦)的链式反应过程, 氢燃烧的核聚变过程是主序带恒星的生命得以维持的根本机制, 会释放出称为太阳能的巨大辐射能量. 排列其次的氢构造是木星, 表现为从浅及深的气态、液态到金属态氢为主的圈层式氢构造, 这些圈层中氢没有被点燃, 内部温度没达到氢燃烧核聚变临界点, 但不可否认金属氢是一种清洁能源, 由氢原子组成, 属于简并态物质; 由于氢原子之间的距离在超高压的条件下被极大地压缩, 因此, 金属氢的密度要比传统氢气分子密度大至少7倍; 进一步研究表明, 由于木星是太阳系中的超大气态行星, 中心的压力可达到地球大气压的上百万倍, 温度也可以达到上万摄氏度, 因此金属氢偏向存在于木星的内部圈层, 并以金属塑性流变方式不断发生快速对流循环.

宇宙中最小的氢构造当是质子(H^+), 是一切生命利用的

最小能量单元。以往认为地球生命自诞生以来就主要依赖太阳能而生存,所谓万物生长靠太阳;古代人类也不自觉地利用氢能,懂得利用太阳能的方式,以阳光晒干物件、制作食物,如制盐和晒咸鱼等。但是,与此相反,20世纪70年代海底大发现揭示,很多海底微生物依靠的是氢能或化能合成途径生存^[8],因此探索深海极端环境下暗生命生存方式、能量代谢机制时,应高度重视其特定的氢构造途径;这些特定的最小尺度氢构造必然是弥散性泛在的产氢途径,在海底洋壳和洋幔中也极其广泛和弥散性分布^[9,10]。可见,地球上的生态系统不只是传统认为的两种,即地表或浅水依赖阳光的光合生态系统、深海海底的化能生态系统^[11];除此两种外,还有一种可深入海底并超6 km的、极微观尺度的氢能生态系统。后者涉及生命起源或暗生命及其生存极限,如寥若辰星般弥散在洋壳内部的细菌^[12],其新陈代谢方式可能就是从洋壳裂隙中获得质子(H⁺)。

实际上,类似的氢构造广泛存在于地球的不同圈层,循环往复,而且氢循环不是孤立的过程,常与铁循环、氧循环或碳循环紧密相伴^[13]。例如,极端高压状态下的核幔边界也存在类似木星内部的自由金属氢,下地幔矿物中溶解的自由氢气(下地幔下部 $2\text{FeOOH} \rightarrow 2\text{FeO}_2 + \text{H}_2$,下地幔上部 $2\text{FeO}_2 \rightarrow 2\text{FeO} + \text{O}_2$)^[14],和大型横波低速异常区(LLSVP)附近的自由金属氢(图1)。后者也因俯冲板片或微幔块^[15]坠入而触发,变得不稳定而上升,并随着减压而发生相态转换,最终会无选择地在岩石圈不同深度层次的不同构造环境或构造背景聚集成藏,形成广泛分布的天然氢气系统(图1)。海底天然氢气系统是以氢气为运行单元形成的相对独立的结构、构造或运行模式,以多种形式发育于占地球三分之二的海底,受多种多样的海底构造控制^[7]。此外,地球不同演化阶段的构造体制、构造环境、构造层次、构造类型等,也决定着地球不同时期、不同层次、不同环境的氢构造具有复杂多样性(图1)。

本文仅关注海底天然氢气系统(简称海底氢能系统)的构造环境多样性。最为常见的氢构造类型就是海底出露的微幔块^[16],包括两种类型,即海洋核杂岩(oceanic core complex, OCC)和洋陆转换带(ocean-continent transition zone, OCT)。海洋核杂岩主要分布在洋中脊内侧角部位,由一条蛇纹石化超基性糜棱岩带,即拆离断层,分割为上下两部分:上部为多米诺式脆性断块构成,下部为相对塑性形变的大洋岩石圈地幔(主要是各种橄榄石)组成。拆离断层可能因多期洋中脊跃迁或非等速阶段性扩张而出现叠加,表现出多期复合特点,进而使得拆离面下盘也出现脆性断层,一些断裂进而深切到莫霍面(Moho)下的地幔橄榄岩中,因而海水可以下渗到拆离断层面以下^[9,10]。

另一种海底氢构造是位于被动大陆边缘的洋陆转换带,与洋中脊的海洋核杂岩一样,形成于伸展环境。这类氢构造在结构上与海洋核杂岩完全相似,但两者有两个差异:第一个差异是洋陆转换带这类氢构造中,剥露海底的是大陆岩石

圈地幔或陆幔^[17],而不像海洋核杂岩中剥露的大洋岩石圈地幔或洋幔;第二个差异是盖层不同,洋陆转换带可以发育大陆架陆源沉积的远端相泥质沉积岩,氢构造发育较厚的盖层,但海洋核杂岩的盖层可能是薄层的碳酸盐壳或远洋软泥、钙质软泥等,虽薄,但也可以起到良好的氢气圈闭或封堵效应。

第三种海底氢构造广泛发育在洋陆转换带和海洋核杂岩之间的深海洋盆。深海洋盆的洋壳厚度稳定,平均厚达6 km。深海洋盆的洋壳增生于洋中脊,最初广泛发育张裂缝、张裂隙、剪节理、正断裂等,随着远离洋中脊,一些裂隙会逐渐被方解石脉等堵塞^[18]。但大量海底探测表明,热液喷口的氢气和铁等其他金属离子溢出是海水沿着海底裂隙渗入洋壳发生交换所致^[9],据此在洋壳增生初期并移离洋中脊的过程中,海水沿着一些裂隙可以深渗透到Moho面以下,统计表明这个过程可持续25 Ma^[19],进而有可能使得Moho面以下一定厚度发生了橄榄岩的蛇纹石化。

在海底构造系统中,洋中脊与俯冲带往往是成对耦合的构造单元^[20]。洋中脊存在氢构造,在热液喷口羽状流中也常检测到氢气;洋中脊与俯冲带之间的洋盆也广泛存在氢构造;但俯冲带的氢构造则是另外一种样式。俯冲系统俯冲盘的外缘隆起带往往再次密集发育纵向正断层^[21],使得海水沿着这些深切的正断层深渗透到Moho面附近,使得俯冲挠曲度最大部位的大洋岩石圈被水化或蛇纹石化,进而出现塑性缩颈化、香肠化,这会产生大量氢气,并释放大热量,此处热流值也异常高。但是,俯冲板片脱水产生的水与地幔楔的橄榄岩发生交代作用,会形成氢气,这些氢气在俯冲系统的仰冲盘(即上盘板块)底部聚集;而上盘板块局部伸展还会产生弧后盆地,其洋中脊也可以出现海洋核杂岩等富氢的构造型式,如帕里西维拉盆地、冲绳海槽等。

除了自然界的氢构造外,还有一些人为的氢构造,其不一定由氢及其化合物构成,但与氢能或氢及其化合物运行有关,例如,光伏储能的太阳能电池板及可控热核聚变反应堆。前者能量来自太阳中的氢聚变产生的辐射能;后者能量来自人工核聚变,即来自人为控制的热核反应或原子核的聚变反应,两者都是当前很有前景的新能源途径。例如,托卡马克装置(Tokamak)是一种可控热核聚变反应堆,其英文名字来源于环形(toroidal)、真空室(kamera)、磁(magnet)、线圈(kotushka)的缩合,可向人类提供清洁而又可再生的能源;然而,一些氢构造的人工装置都首先需要把氢化合物转换为氢气后再作为其初始燃料。

2 海底氢能系统基本过程与产氢机制

海底产氢是指海底产生天然氢气的过程,是一种司空见惯的地质现象,长期以来总是当作一种水-岩相互作用开展研究,从来没从能源效应角度当作具有经济价值的氢气成藏机制给予关注。海底广泛发育氢气系统取决于现今地球的三

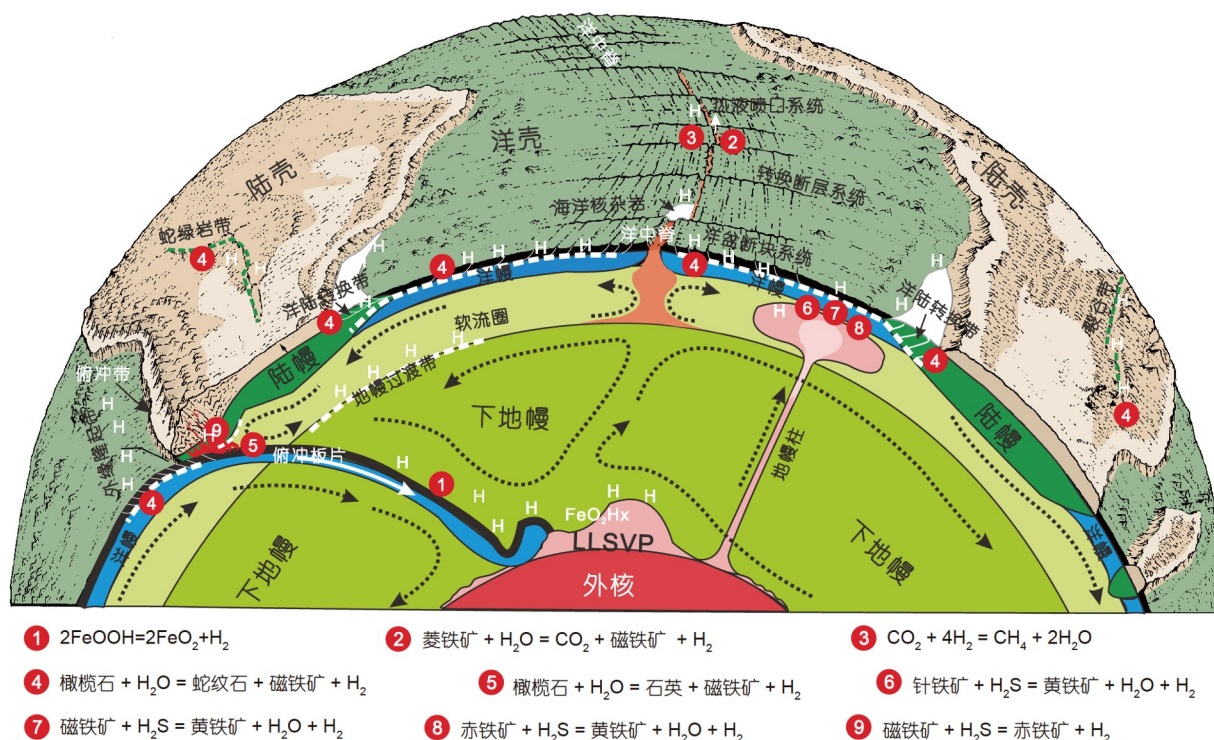


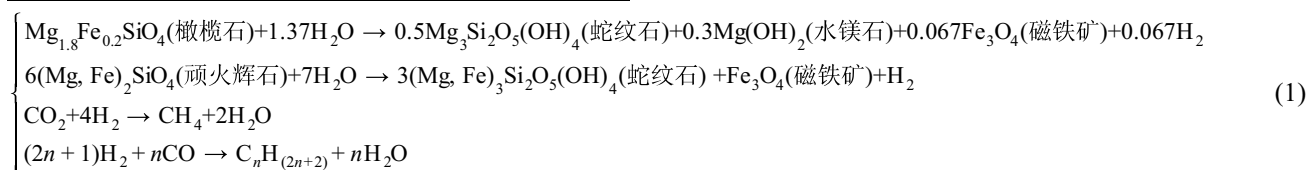
图 1 地球氢构造多样性与相关环境的产氢反应. 红色圆圈中数字为相关化学反应, 白色虚线为剖面上蛇纹石化产氢场所, 粗黑色线为洋壳, 带箭头的粗点线为地幔对流方向, 白色字母H所在位置为剖面上蛇纹石化产氢场所, LLSVP为核幔转换带附近的大型横波低速异常省

Figure 1 Diverse hydrogen tectonics in the Earth and hydrogen production reactions in the related tectonic settings. Numbers in the red circle are the related chemical reactions, the white dot line marks hydrogen production locations in the cross-section, the thick black line represents oceanic crust, the thick dot line with arrows represents mantle convection direction, “H” is hydrogen production sites in plan view, and LLSVP is the large low shear velocity province near the core-mantle transition zone

大特性: 组成地幔的大量橄榄岩、组成海洋的巨量海水和地球独特的板块构造. 现今, 正常海底环境下, 橄榄岩和海水之间被平均6 km厚的洋壳分隔而难以直接接触并发生反应. 然而, 板块构造过程可导致这两者普遍地发生充分接触, 并导致了如上节所介绍的各种各样天然氢构造. 无论何种海底产氢的构造环境下, 生产氢气的根本机制还是各种橄榄石或基性矿物(如角闪石、辉石等)参与的水-岩反应.

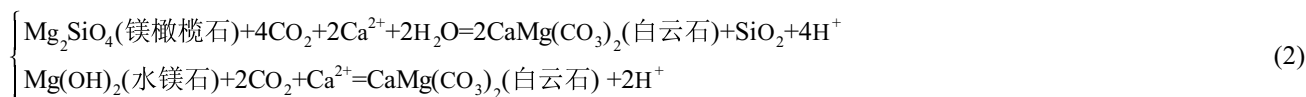
现今, 海底不仅总体处于还原环境, 没有陆源巨量的沉积有机质, 底层海水也难以被辐射而分解, 其氢气成因必然是水-岩反应所致. 海底的洋壳不产石油, 因其标准的岩石物

质组成自上而下主要是: 远洋沉积层、枕状玄武岩、辉绿岩墙群、辉长岩等组成, 因俯冲消减残存于陆壳中的对应产物及部分洋幔就称为蛇纹岩套. 因此, 洋壳的下部(即下洋壳)和Moho面以下的上地幔(主要是洋幔)为超基性岩, 其中的超基性岩富含橄榄石类和辉石类矿物, 这些矿物在低温(< 150°C)和极高的pH(>10)条件下发生水-岩反应的蚀变过程, 即蛇纹石化等作用. 王先彬等人^[22]总结了还原条件下蛇纹石化过程的费-托聚合反应, 该反应可以生成氢气和磁铁矿, 当然氢气也可与环境中的CO₂继续反应生成甲烷和长链烷烃等, 反应方程如下:



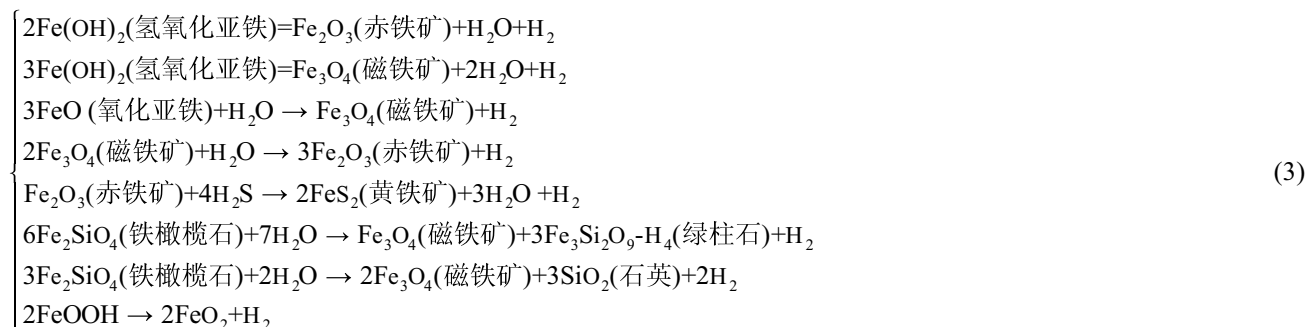
特别是, 在碳酸盐的条件下, 蛇纹石的沉淀速率比橄榄石的溶解速率慢, 导致溶液中Mg²⁺和溶解态SiO₂的浓度迅速

升高, Ca²⁺浓度有所降低, 这个过程常形成白云岩, 具有固碳功能^[23,24].



其余富铁环境下, 比如深俯冲地幔中, 也会发生生成氢气或金属氢的产氢反应^[13], 在核幔边界附近超高压环境下甚

至产生金属氢, 这些深地幔氢的存在会改变地幔的物理化学行为^[25], 其在地幔中不同深度层次的反应式如下:



这些反应生成的含铁矿物^[26,27], 特别是铬铁矿, 是赋存于蛇绿岩中的重要战略矿产资源。

总之, 以上反应过程是海底天然氢气系统形成的基本过程, 以橄榄岩为主的超镁铁岩在蛇纹石化或白云石化过程中会释放富氢(氢气或氢离子)的流体。依据上述这些反应, 如果在自然界的橄榄岩发育层位, 在获取海底地热同时, 通过一定的人工途径, 实现二氧化碳或水输入途径、氢气输出途径的隔离, 避免二氧化碳与氢气直接接触生成甲烷等不利过程, 人们就可以同时实现“减碳、增氢、产铁、取热”这四个目标。这一现象在当今洋中脊、造山带橄榄岩和蛇绿岩中已获深入研究, 如大西洋洋中脊Lost City^[28]和阿曼蛇绿岩^[29-31]。

橄榄石 $[(\text{Mg}, \text{Fe})_2\text{SiO}_4]$ 是组成地幔岩石的主要矿物, 其中的 Fe^{2+} 可与水反应并被氧化为 Fe^{3+} , 同时, 水中的氢离子还原为氢气 $(3\text{Fe}_2\text{SiO}_4 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 + 3\text{SiO}_2 + 2\text{H}_2)$ 。由此, 包括蛇纹石化机制在内, 海底氢能系统中氢气来源有三种可能机制: 岩石中的古流体释放、现今活跃的低温蛇纹石化成因、深部地质来源^[14,25,32]。

氢气藏一旦形成, 还可以在地质时间尺度上积累和保存。例如, 在稳定前寒武地盾的钻孔和地下矿井中, 都发现了隔离达数十亿年之久的富氢流体。此外, 在陆地上, 蛇绿岩深层温度为 $40\sim 160^\circ\text{C}$, 比较干燥, 这有利于阻碍微生物活动(太热)和非生物氧化还原反应(太冷)对氢气的消耗。一些研究还揭示, 大洋岩石圈残片仰冲到大陆之上形成的蛇绿岩, 不仅是一种有效的氢源岩, 而且还具有储存高质量、富氢气藏的潜力。在蛇绿岩环境下, 氢气还可以集中储集在裂缝带和圈闭中, 具有大规模聚集的潜力, 有望成为今后氢气藏勘探的目标, 因此可能对当今及未来的新能源勘探产生重大影响。但是, 对蛇绿岩中氢气的生成机制, 依然存在一些问题值得

深入探讨: (1) 影响氢气运移路径和聚集的构造和岩石物理因素; (2) 蛇绿岩环境下构造和圈闭的性质; (3) 铬铁矿和氢气排放之间的可能联系; (4) 氢气资源的性质和对于依附氢气生存的深层微生物生态系统的影响。无论如何, 蛇绿岩作为保存在大陆之上的古大洋岩石圈残片, 不仅在板块构造研究中扮演着关键角色, 还为氢气这一清洁能源的深部地质成因提供了一个新类型, 而且对于当今和深时全球气候环境变化也具有重要影响。至此, 蛇绿岩, 这一古老的岩石学概念, 正在为其他学科所关注并焕发出新的活力, 这对很多领域的研究人员而言, 既是机遇也是挑战。

从深时地球系统角度考虑, 早期地球不仅富橄榄石, 而且富铁, 可谓是个橄榄石球和铁球。在早期地球壳幔分异之前, 橄榄岩、科马提岩等超基性岩直接出露地表, 且直接与早期海水接触, 两者之间不存在原始洋壳阻隔, 因而蛇纹石化现象遍及早期地球地表, 这个过程可能决定了早期大气的组成和演化, 不断推动早期地球向宜居地球演变, 这有必要通过探索深空类似星球(如木星的第二颗卫星—欧罗巴星)的海底环境来检验。

3 海底氢能系统生产率与利用潜力

能源、资源及环境问题已成为当下一种社会危机、全球危机, 迫切需要氢能源来化解, 但氢能源的制备还不成熟, 大多储氢材料的研究仍处于实验室的探索阶段。氢能源的制备主要集中在生物制氢、水电解制氢、化石能源制氢这三方向^[33], 虽有小规模工业利用, 其他制氢方法尚不可持续, 现有科技又还难以实现大规模商业利用。例如, 生物制氢中的微生物制氢, 需要基因工程与化学工程有机结合, 才能尽快开发出符合要求的产氢生物。生物制氢还需要技术的不断改进和大力推广, 但目前都还处于一个艰难的发展阶段。

在这个科技发展背景下,天然地质成因的氢气,也称地质氢、金氢或白氢,作为清洁燃料或生活能源,就显得非常重要,但目前人们对于岩石圈中氢气形成机制、地质背景和聚散过程的理解仍然有限;同时,对于天然氢气可采资源量 and 经济资源量的量化不足,目前还难以判断其作为可开采初级能源的潜力.当前对天然氢气能源认识受限的主要原因,在于深部地质流体直接采样难度大,以及潜在的氢气富集地区缺乏观测设施,但可以通过矿物中流体包裹体加强研究.因此,人们质疑的关键问题是:地球上是否存在与石油或天然气相媲美的天然氢气系统?尽管氢气化学性质活泼和还原能力强而极易被氧化,在地质条件下很难发现氢气单独聚集成藏或高含量的氢气藏;但是,截止到2020年,地球上已有300处浓度超过10%的天然氢气藏被发现,柴达木盆地灌顶气中甚至发现浓度超过90%的氢气,估算陆地上地表逸出量达2000万吨/年以上^[3,4,34],这令人鼓舞.

在陆地上,氢气田、氢气藏发现近年来不断被报道,广泛分布于蛇绿岩或蛇绿岩带中.最典型的地点是阿尔巴尼亚的布尔奇察地区,是世界上最大的蛇绿岩型铁铬矿产地之一,是研究蛇绿岩深部氢气释放的理想实验场^[32].此矿区于地表620 m深处,首次发现可燃气体是1992年,此后2011年、2017年和2023年分别发生过重大爆炸,至今地表以下500~1000 m仍强烈脱气,在断裂发育处的排水池中出现强烈的气泡活动.利用气体流量计和传感器观测排放气体的流量和 H_2 浓度,得到某矿井几个剧烈冒泡区的气体流速为 5 ± 1 L/s(25℃和 1.031×10^5 Pa条件下),由 H_2 (84.0 vol%), CH_4 (13.2 vol%)与少量 N_2 (2.7 vol%)组成,计算得到氢气流量总计为158吨/年^[32].同样,测得在38个相互连通的钻孔内提供了42吨/年的额外氢气流量.因此,每年至少有200吨氢气从矿井中释放出来(1.0×10^8 mol/a).这是迄今为止记录到的最大的氢气流量,大大超过了之前报道的蛇绿岩中渗滤和高碱性热泉的脱气速率^[32].此外,依据Zgonnik等人^[35]估计,阿曼蛇绿岩每天的氢气释放量也非常可观,其中橄榄岩每平方千米每天产氢气量达73~147 m^3 ,在其分布的185 km^2 内,每天可产 1.35×10^4 ~ 2.72×10^4 m^3 氢气.对此,如有可行的技术^[36],商业开发价值还是巨大的.近年来,各国加大了对天然氢气的研究与勘探,更多新天然氢气藏不断被发现,2023年7月在法国发现了储量约4600万吨的天然氢气,同年10月澳大利亚也首次钻到了浓度73%的天然氢气.对此,美国、法国、澳大利亚、西班牙等国已开始布局陆地天然氢气藏的商业开发.

对于海底而言,Bach等人^[37]报道了依据大洋钻探估计的结果,洋壳每年有近百万吨氢气产出.按照现今每吨5万元人民币计算^[38],将近每年500亿元的产值.然而,也有模拟揭示,全球洋脊增生系统的累积产氢总量可达 35×10^{12} 吨^[17],总产值达175万亿元.按照现今洋壳最老年龄1.75亿年计算,真实累积产氢总量可能比模拟的总量还得增加8倍,但考虑到氢气逸散部分,其总量估值大体处于合理的范围内.这也显然表

明,海底天然氢气系统产能并不亚于石油和天然气资源量,应当具有显著的利用开发价值,具有巨大的产业前景.尽管深海海底天然氢气藏的发现和商业开发迄今尚无先例,但也有大洋钻探钻孔发现^[39],展现出光明前途.海底氢气开发虽然不会像油气开发可能导致的溢油生态灾难,也不会出现水合物开发可能触发的海底滑坡等灾害,更不可能产生如海底金属矿产开发造成的深海生态系统破坏,但有时也会发生爆炸、输氢管脆裂等灾害,需要加强相关氢气藏开发灾害的前瞻研究.当然,全球油气开发绝大多数是安全的,但相比之下,海底氢气是相对绿色环保的、更安全的.

4 海底氢气能源革命与深海开发新机遇

人类自采摘时代就在利用自然植物中的氢构造,到捕猎时代则利用肉类蛋白中的氢构造,进入农业时代利用农作物或人工植物中的氢构造,进入工业时代则利用埋藏和积累亿万 years 之久煤炭中的碳-氢构造,随后的石油时代则开始利用石油、天然气或水合物中的碳-氢构造.无论如何,地球生态系统生产、传输和消费的能源本质上是氢能,碳构造中的碳基生物大分子和碳循环结构只是氢能储存和传导的工艺方法^[40].随着人类利用的能量级别愈来愈高、数量越来越大,特别是,进入21世纪信息时代以来,不仅人类对能源的需求如此,而且人类利用的智能机器对能源的需求也都在猛增,人类再也等不起太阳能先储存于植物、然后经漫长埋藏并裂解转化为碳-氢构造,而是直接摄取自然能量的方式,越过一切自然产能过程,迫切开发光伏储能系统,直接将空中无形的太阳能转换为能量.理论上太阳能无穷尽,但人类在一定时期内还是应以地球自身所具有的能量为主要利用对象,如地热能、海底氢能等.

地球自身所具有的重要能量之一就是天然氢气.李德生和李伯华^[5]指出,22世纪人类将建成一个由可再生能源和新能源保障的经济社会,氢能源将是未来最具发展潜力的新能源之一.天然氢气是一种无碳清洁能源、零碳能源,但如今天然氢气储量始终不够明朗,也没有得到清晰揭示,因而一直被长期忽视.当下,在全球变暖背景下,迫切需要对其进行系统的海底地质和蛇绿岩带地质勘探和有效利用,这不仅有助于减少碳排放,实现“双碳”目标,而且有助于“生氢减碳”并举^[41],从而实现经济社会的能源结构转型,打破石油垄断全球,进而改变世界政治格局和版图,同时实现全球气候治理,维护地球健康宜居.

随着未来进入智能机器人时代,地球行星上能量需求者有人类自身,还有更多各类智能机器人,能源需求指数级快速增长.为了尽早应对这类行星文明级别的能量需求,在陆地浅层能源越来越少的背景下,人类除了必须对地球内部能量开源节流外,一个值得未来重视的地球内部能量,就是占地球三分之二的海底所蕴藏的氢能源,即海底氢能.特别是,“深海沙漠”的海底长期被视作无用之地,经上述论证表明,海

底氢能未来必将超越成本高昂的石油、天然气、水合物等能源,成为未来极具开采价值的顶极能源,人类必将启动覆盖全部海底的全球能源开发模式。对此,本文建议将“海底氢能”作为中国“深海开发”重大计划的核心内容,中国应尽快利用2024年即将交付使用的中国大洋钻探船——梦想号,实现深钻、深潜、深网联合探氢,将南海打造为一个“海底氢能”勘探、开发的天然试验场、示范区,抢占国际海底开发先机。一些大型能源企业也应尽早作出战略选择,快速加大研发投入,

为转型“下海”开展相关商业开采,奠定科技竞争的先发优势。

总之,海底氢构造类型多样,全球海底广泛分布,是海底天然氢气的储集场所,与输导系统、生氢系统共同构成海底氢能系统。加强海底氢能系统研究,可为海底氢能勘探提供基础理论支撑。海底氢能开发是人类可持续发展的海洋新质生产力。海底氢能的大规模利用,必将意味着人类在不久的将来迎来新的发展机遇。

致谢 本文受益于焦念志院士2019~2023年期间在ONCE国际大科学计划学术交流和朱日祥院士2023年11月在三亚崖州湾所做学术报告的启发,特此一并致谢。也特别感谢三位匿名审稿人提出的宝贵修改意见。感谢国家自然科学基金(42121005, 92358302)、崂山实验室科技创新项目(LSKJ202204400)、泰山学者攀登计划(tspd20210305)、山东省重大基础科学研究项目(ZR2021ZD09)和中央高校基本科研业务费(202172003)资助。

推荐阅读文献

- 1 Knez D, Zamani O A M. Up-to-date status of geoscience in the field of natural hydrogen with consideration of petroleum issues. *Energies*, 2023, 16: 6580
- 2 Vacquand C, Deville E, Beaumont V, et al. Reduced gas seepages in ophiolitic complexes: Evidences for multiple origins of the H_2 - CH_4 - N_2 gas mixtures. *Geochim Cosmochim Acta*, 2018, 223: 437–461
- 3 Zgonnik V. The occurrence and geoscience of natural hydrogen: A comprehensive review. *Earth Sci Rev*, 2020, 203: 103140
- 4 Jin Z J, Wang L. Is there hydrogen reservoir in nature (in Chinese)? *Earth Sci*, 2022, 47: 3858–3859 [金之钧, 王璐. 自然界有氢气藏吗? *地球科学*, 2022, 47: 3858–3859]
- 5 Li D S, Li B H. Towards a new era of diversified energy development: Innovation in theoretical petroleum geology to meet “dual carbon target” (in Chinese). *Earth Sci Front*, 2022, 29: 1–9 [李德生, 李伯华. “双碳”背景下石油地质学的理论创新与迈向能源发展多元化新时代. *地学前缘*, 2022, 29: 1–9]
- 6 Li S Z, Liu L J, Suo Y H, et al. Carbon tectonics: A new paradigm for Earth system science (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2023, 68: 309–338 [李三忠, 刘丽军, 索艳慧, 等. 碳构造: 一个地球系统科学新范式. *科学通报*, 2023, 68: 309–338]
- 7 Suo Y H, Jiang Z X, Li S Z, et al. Ocean-floor hydrogen accumulation model and global distribution (in Chinese). *Earth Sci Front*, 2024, 31: 175–182 [索艳慧, 姜兆霞, 李三忠, 等. 海底氢气成藏模式与全球分布. *地学前缘*, 2024, 31: 175–182]
- 8 Lang S Q, Fröh-Green G L, Bernasconi S M, et al. Microbial utilization of abiogenic carbon and hydrogen in a serpentinite-hosted system. *Geochim Cosmochim Acta*, 2012, 92: 82–99
- 9 Klein F, Bach W, Jöns N, et al. Iron partitioning and hydrogen generation during serpentinization of abyssal peridotites from 15°N on the Mid-Atlantic Ridge. *Geochim Cosmochim Acta*, 2009, 73: 6868–6893
- 10 Klein F, Bach W, McCollom T M. Compositional controls on hydrogen generation during serpentinization of ultramafic rocks. *Lithos*, 2013, 178: 55–69
- 11 McCollom T M, Seewald J S. Serpentinities, hydrogen, and life. *Elements*, 2013, 9: 129–134
- 12 Lang S Q, Lilley M D, Baumberger T, et al. Extensive decentralized hydrogen export from the Atlantis Massif. *Geology*, 2021, 49: 851–856
- 13 Arrouvel C, Prinzhofer A. Genesis of natural hydrogen: New insights from thermodynamic simulations. *Int J Hydrogen Energy*, 2021, 46: 18780–18794
- 14 Hu Q, Kim D Y, Yang W, et al. FeO_2 and $FeOOH$ under deep lower-mantle conditions and Earth's oxygen–hydrogen cycles. *Nature*, 2016, 534: 241–244
- 15 Cao X Z, Li S Z, Suo Y H, et al. Telecommunication interactions between microplates and basal mantle LLSVPs (in Chinese). *Acta Petrol Sin*, 2023, 39: 659–669 [曹现志, 李三忠, 索艳慧, 等. 微板块与深部地幔LLSVP的遥相关作用. *岩石学报*, 2023, 39: 659–669]
- 16 Li S Z, Suo Y H, Zhou J, et al. Microplate and megaplate: Fundamental principles and paradigm transition (in Chinese). *Acta Geol Sin*, 2022, 96: 3541–3558 [李三忠, 索艳慧, 周洁, 等. 微板块与大板块: 基本原理与范式转换. *地质学报*, 2022, 96: 3541–3558]
- 17 Liu Z, Perez-Gussinye M, Garcia-Pintado J, et al. Mantle serpentinization and associated hydrogen flux at North Atlantic magma-poor rifted margins. *Geology*, 2023, 51: 284–289

- 18 Li S, Suo Y, Yu S, et al. Orientation of joints and arrangement of solid inclusions in fibrous veins in the Shatsky Rise, NW Pacific: Implications for crack-seal mechanisms and stress fields. *Geol J*, 2016, 51: 562–578
- 19 Honnorez J. Hydrothermal alteration vs. ocean-floor metamorphism. A comparison between two case histories: The TAG hydrothermal mound (Mid-Atlantic Ridge) vs. DSDP/ODP Hole 504B (Equatorial East Pacific). *Comptes Rendus Geosci*, 2003, 335: 781–824
- 20 Zheng Y F. Plate tectonics in the twenty-first century. *Sci China Earth Sci*, 2023, 66: 1–40 [郑永飞. 21世纪板块构造. *中国科学: 地球科学*, 2023, 53: 1–40]
- 21 Zhang J, Zhang F, Lin J, et al. Yield failure of the subducting plate at the Mariana Trench. *Tectonophysics*, 2021, 814: 228944
- 22 Wang X B, Ouyang Z Y, Zhuo S G, et al. Serpentinization, abiogenic organic compounds, and deep life. *Sci China Earth Sci*, 2014, 57: 878–887 [王先彬, 欧阳自远, 卓胜广, 等. 蛇纹石化作用: 非生物成因有机化合物与深部生命. *中国科学: 地球科学*, 2014, 44: 1096–1106]
- 23 Lafay R, Montes-Hernandez G, Janots E, et al. Simultaneous precipitation of magnesite and lizardite from hydrothermal alteration of olivine under high-carbonate alkalinity. *Chem Geol*, 2014, 368: 63–75
- 24 Sun Z X, Zhang M F, Wang X B, et al. A review of the coupling relationship between serpentinization and carbonization of ultrabasic rocks (in Chinese). *Bull Mineral Petrol Geochem*, 2018, 37: 1190–1197 [孙泽祥, 张明峰, 王先彬, 等. 超基性岩的蛇纹石化和碳酸盐化耦合关系. *矿物岩石地球化学通报*, 2018, 37: 1190–1197]
- 25 Mao H K, Hu Q, Yang L, et al. When water meets iron at Earth's core–mantle boundary. *Natl Sci Rev*, 2017, 4: 870–878
- 26 McCollom T M, Bach W. Thermodynamic constraints on hydrogen generation during serpentinization of ultramafic rocks. *Geochim Cosmochim Acta*, 2009, 73: 856–875
- 27 McCollom T M, Klein F, Robbins M, et al. Temperature trends for reaction rates, hydrogen generation, and partitioning of iron during experimental serpentinization of olivine. *Geochim Cosmochim Acta*, 2016, 181: 175–200
- 28 Kelley D S, Karson J A, Früh-Green G L, et al. A serpentinite-hosted ecosystem: The lost city hydrothermal field. *Science*, 2005, 307: 1428–1434
- 29 Neal C, Stanger G. Hydrogen generation from mantle source rocks in Oman. *Earth Planet Sci Lett*, 1983, 66: 315–320
- 30 Ellison E T, Templeton A S, Zeigler S D, et al. Low-temperature hydrogen formation during aqueous alteration of serpentinized peridotite in the Samail ophiolite. *J Geophys Res Solid Earth*, 2021, 126: e2021JB021981
- 31 Leong J A, Nielsen M, McQueen N, et al. H₂ and CH₄ outgassing rates in the Samail ophiolite, Oman: Implications for low-temperature, continental serpentinization rates. *Geochim Cosmochim Acta*, 2023, 347: 1–15
- 32 Truche L, Donzé F V, Goskolli E, et al. A deep reservoir for hydrogen drives intense degassing in the Bulqizë ophiolite. *Science*, 2024, 383: 618–621
- 33 Xie H, Zhao Z, Liu T, et al. A membrane-based seawater electrolyser for hydrogen generation. *Nature*, 2022, 612: 673–678
- 34 Liu Q Y, Zhu D Y, Meng Q Q, et al. The scientific connotation of oil and gas formations under deep fluids and organic-inorganic interaction. *Sci China Earth Sci*, 2019, 62: 507–528 [刘全有, 朱东亚, 孟庆强, 等. 深部流体及有机-无机相互作用下油气形成的基本内涵. *中国科学: 地球科学*, 2019, 49: 499–520]
- 35 Zgonnik V, Beaumont V, Larin N, et al. 2019. Diffused flow of molecular hydrogen through the Western Hajar mountains, Northern Oman. *Arabian J Geosci*, 2019, 12: 71
- 36 Jiang Z X, Li S Z, Suo Y H, et al. Technological prospective of detecting and mining of oceanfloor hydrogen energy (in Chinese). *Earth Sci Front*, 2024, doi: 10.13745/j.esf.sf.2024.6.10 [姜兆霞, 李三忠, 索艳慧, 等. 海底氢能探测与开采技术展望. *地学前缘*, 2024, doi: 10.13745/j.esf.sf.2024.6.10]
- 37 Bach W, Paulick H, Garrido C J, et al. Unraveling the sequence of serpentinization reactions: Petrography, mineral chemistry, and petrophysics of serpentinites from MAR 15°N (ODP Leg 209, Site 1274). *Geophys Res Lett*, 2006, 33: L13306
- 38 Yu Z Q, Liu H C, Zhu G Y, et al. New thoughts on hydrogen production method based on the influencing factors of hydrogen generation in serpentinization reaction (in Chinese). *Nat Gas Industry*, 2023, 43: 156–169 [于志琪, 刘汇川, 朱光有, 等. 基于蛇纹石化生氢影响因素的制氢方式新思考. *天然气工业*, 2023, 43: 156–169]
- 39 Lin H T, Cowen J P, Olson E J, et al. Dissolved hydrogen and methane in the oceanic basaltic biosphere. *Earth Planet Sci Lett*, 2014, 405: 62–73
- 40 Kang J. Introduction to macrodynamics of Earth's ecosystems (in Chinese). *Solar Energy*, 2013, 3: 8–12 [康健. *地球生态系统宏观动力学概论*. 太阳能, 2013, 3: 8–12]
- 41 Wang W J, Peng B, Li S, et al. Research on synergetic development of hydrogen energy and carbon capture, utilization and storage industry (in Chinese). *Thermal Power Generation*, 2021, 50: 18–23 [王伟杰, 彭勃, 李顺, 等. 氢能与碳捕集、利用与封存产业协同发展研究. *热力发电*, 2021, 50: 18–23]

Summary for “氢构造与海底氢能系统”

Hydrogen tectonics and oceanfloor hydrogen systems

Sanzhong Li^{1,2*}, Yanhui Suo^{1,2}, Zhaoxia Jiang^{1,2} & Lixin Wu^{1,2}

¹ Frontiers Science Center for Deep Ocean Multispheres and Earth System, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;

² Laoshan Laboratory, Qingdao 266237, China

* Corresponding author, E-mail: sanzhong@ouc.edu.cn

Hydrogen is the first element formed by the initial fusion at the beginning of the Big Bang, widely distributed in the universe, accounting for 75% of the universal mass. Hydrogen is also widely distributed on the Earth, especially in or under the oceanic crust. Hydrogen energy as the top and clean energy is a hot topic in the context of China's global “dual carbon” goals. All recent reports on natural hydrogen reservoirs are located in the sedimentary basins or ophiolites on land. However, we find it widespread in the global oceanfloor. This article systematically describes scientific concepts such as hydrogen tectonics, oceanfloor hydrogen energy and natural hydrogen systems for the first time. Unlike similar studies, this article mainly explores the spatio-temporal ubiquitous distribution and potential economic value of oceanfloor hydrogen energy from the perspectives of global oceanfloor hydrogen energy formation mechanisms and structural control mechanisms. Hydrogen tectonics refers to the multi-scale structures, deformation styles, or phase transition processes formed by hydrogen element or their compounds or components as independent operating units. The different forms of hydrogen tectonics in nature were utilized by humans in different stages of human civilization from the harvesting era to the information age. Oceanfloor hydrogen energy is one type of hydrogen energy, which is a widely-distributed inorganic hydrogen energy sources in or under the oceanic crust from the Earth's interior. It is an efficient combustion, clean and zero carbon energy source, and a future energy with more attention. It has enormous commercial value. The hydrogen system is a relatively independent structure, tectonics, or operating pattern formed by hydrogen as the operating unit, developing in various forms in the oceanfloor that accounts for two-thirds of the Earth, and being controlled by a variety of oceanfloor tectonics. The fundamental hydrogen tectonics is the hydrogen production mechanism, which is essentially a chemical reaction. The key reactions are: $3\text{Fe}_2\text{SiO}_4$ (olivine) + $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{Fe}_3\text{O}_4$ (magnetite) + 3SiO_2 (quartz) + 2H_2 and Mg_2SiO_4 (olivine) + 4CO_2 + 2Ca^{2+} + $2\text{H}_2\text{O} = 2\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ (dolomite) + SiO_2 + 4H^+ . Based on these reactions, it not only helps to reduce carbon emission and achieves the “dual carbon” goal, but also helps to simultaneously promote “hydrogen production, carbon reduction, iron emission and heat extraction”. Especially in recent years, natural hydrogen-rich fluids have been discovered in land as surface infiltration, underground mines and drilling boreholes, which are produced actually by these reactions in residual oceanfloor-related serpentinites. Therefore, oceanfloor hydrogen energy is one of the most promising new energy sources in the future, which has attracted high attention from some developed countries. However, there is still scientific evaluation in terms of carbon absorption efficiency, hydrogen generation laws, iron discharge destination and geothermal stability. In the future, it is particularly necessary to strengthen research on pathways of hydrogen production, laws of hydrogen accommodation and exploration and utilization techniques in or under the oceanfloor. There are various types of oceanfloor hydrogen tectonics, widely distributed in or under the global oceanic crust. Hydrogen traps in hydrogen tectonics are its reservoirs for natural hydrogen. Hydrogen traps with their transportation systems and generation systems consist of oceanfloor hydrogen energy systems. An enhanced study on oceanfloor hydrogen energy systems can provide fundamental theoretical support for an exploration and exploitation of oceanfloor hydrogen energy. The oceanfloor hydrogen energy is a new-quality marine productive forces for human sustainable development. The large-scale utilization of oceanfloor hydrogen energy will undoubtedly mean that human being will get some new development opportunities in the near future.

Hydrogen tectonics, oceanfloor hydrogen energy system, oceanfloor tectonics, hydrogen generation-carbon reduction-iron emission-heat extraction

doi: [10.1360/TB-2024-0368](https://doi.org/10.1360/TB-2024-0368)