

地球上的天然气水合物：现状与展望

关进安（中国科学院广州能源研究所）

宁伏龙（中国地质大学（武汉）工程学院）

1、什么是水合物

天然气水合物是由水分子和小分子组成的具有笼状结构的白色或浅灰色冰雪状结晶化合物，因其中气体分子以甲烷（ CH_4 ）为主（>90%），也称为甲烷水合物或简称水合物（下同），而且遇火可以燃烧，又常被称为“可燃冰”（见图 1）。自从 1810 年英国化学家 Humphrey Davy 爵士在实验室偶然发现氯气水合物固体后，在约一百多年间水合物仅局限于实验室学术好奇的研究上，1934 年 Hammerschmidt 证实了堵塞天然气输送管线的固体物质是水合物而不是冰，从而引起工业界的关注，50 年代初研究人员通过 X 射线衍射证实水合物实际上是笼型物质，60 年代中期俄罗斯的 Y.Makogon 及同事认识到只要保持低温和高压的环境在自然界沉积物中水合物也能赋存，70 年代初在北极冻土圈美国、加拿大相继在阿拉斯加北坡、马更些（Mackenzie）三角洲-波弗特海等区域发现天然气水合物储层，80 年代初美国、加拿大、俄罗斯、日本等十几个国家联合实施了深海钻探计划（DSDP）和大洋钻探计划（ODP），相继在鄂霍茨克海、墨西哥湾、大西洋和太平洋北美沿岸、南海海槽等 14 处采集到了水合物样品，人们才确认水合物是自然环境的重要组成部分和一种巨大而又未重视的有机碳宝库。进入本世纪，美国、日本、加拿大、德国、印度 5 国合作，实施加拿大马更些三角洲冻土带 Mallik 计划，以 Mallik5L-38 井水合物开发试验为标志，天然气水合物的研究进入了试验开采阶段。

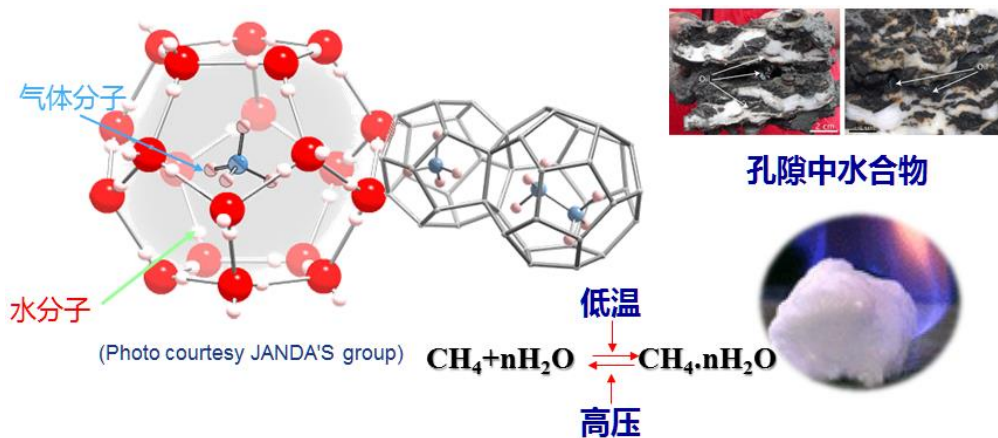


图1 天然气水合物分子组成、化合方应及自然界孔隙中水合物试样

到目前为止，已发现了三种不同结构类型的水合物：I型、II型和H型，它们主要的差别在于单晶的结构以及气水分子比例不同，我们通常说的水合物是能包含甲烷分子的I型，自然界中水合物的密度一般在 $0.8-1.0\text{g/cm}^3$ 间，除热膨胀性和热传导性外，其光谱性质、力学性质及传递性质与冰类似，但是水合物能高效的储存气体，1单位体积的水合物分解能释放出常压下164-172单位体积的甲烷，这就决定了其作为一种新能源的巨大前景。

2、水合物在哪，有多少

海洋和极地的广大地区都满足天然气水合物生成的条件，分析认为在地球上大约有27%的陆地是可以形成天然气水合物的潜在地区，在世界大洋水域中约有90%的面积也属这样的潜在区域（图2）。Kvenvolden等(1993)估算海洋及大陆冻土带中天然气水合物碳数量是常规油气藏碳储量的两倍左右，J. B. Klauda等(2005)的模型计算表明约 $1.2 \times 10^{17} \text{ m}^3$ 甲烷(STP)以水合物形式赋存在海洋沉积物，还有大约 10^{15} mol 的甲烷以游离或者溶解的形式存在于沉积层内，由于天然气水合物的非渗透性，其常常可以作为其下游离天然气的封盖层，因而，整个水合物赋存区域的碳资源量可能比估算的更大些，如果能证明这些预计属实的话，天然气水合物将成为一种丰富的重要未来能源，美国能源部预测在本世纪中叶世纪能完全实现商业化开采水合物。世界上主要已探明的大陆冻土区水合物矿藏主要分布在美国阿拉斯加、加拿大麦肯齐三角洲和俄罗斯西伯利亚，全球海洋天然气水合物资源量主要分布在：分隔的大洋外部包括主动大陆边缘或被动大陆边缘地区，

深水湖泊之中，大洋板块的内部地区。目前全球海底水合物藏已经被确定的区域包括：日本、印度、墨西哥湾、白令海峡、中国南海、韩国东海、特立尼达和多巴哥，全球天然气水合物分布图如图 2 所示。

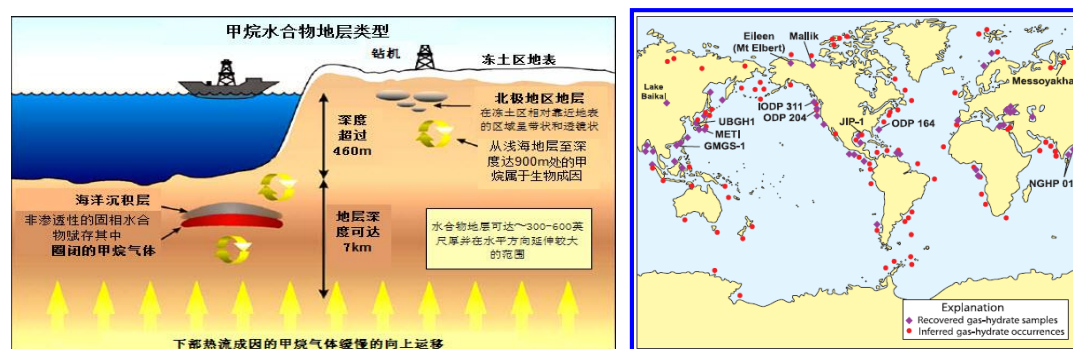


图 2 水合物一般赋存简图（左）及全球预测水合物可能分布区域（右）(T. S. Collett, 2009)

自然界中的水合物烃类气体一般来源于生物成因或者热成因，水合物似油气系统理论指出，评价水合物储层的要素包括：1) 温压条件，2) 气源，3) 水源，4) 气体运移，5) 储集岩，和 6) 时间，由此说明并不是所有的水合物资源都值得开采，Boswell 等(2009)提出了由四种不同的天然气水合物带组成的资源金字塔模型，如图 3。在该资源金字塔中，最有希望开发和利用的储藏位于塔顶，而最难开发的部分位于塔底，从上到下依次为：极地富砂储层、富粘土的裂缝型储层、大量位于海底的水合物沉积层及弥散沉积于非渗透性粘土中的低浓度储层，处于于塔尖的两种类型储藏由于能够提供水合物高浓度聚集所需的储集渗透性而最有可能实现远景勘探和商业利用，从塔顶到塔底，虽然水合物原地资源量增加，但是储层品质却在降低，资源评价的可信度也随之降低，相应的生产难度加大使得可能的采收率很低。近年来，研究人员对自然界水合物赋存有了更进一步的认识，不能笼统的计算所有甲烷资源量，需要对原始水合物资源量进行分类，包括能源和气候两个方面，在能源方面，应重点考虑那些可回收的、可被人类所开采利用的资源量。因此，天然气水合物资源量的估算不应以全部的水合物类型作为估算基础，而是集中于水合物资源金字塔顶端的几种最具有潜在经济意义的水合物聚集类型，如冻土区中砂岩储层中的水合物、海洋环境中砂岩层储层中的水合物、海洋环境中泥质裂缝中的水合物等。

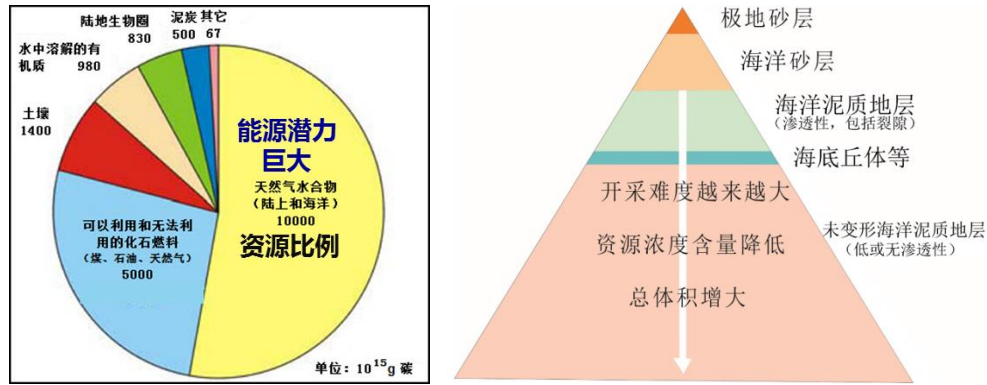


图 3 水合物作为新能源的巨大潜力 (左) 及相应水合物资源金字塔 (Boswell, 2009) (右)

3、水合物能有效开发吗

自 1993 年始每三年一次的国际水合物大会迄今已举办了 8 次，专门讨论水合物作为潜在新能源和新技术等相关领域的发展前景，包括管道抑制防堵的流动保障、地层钻井安全及地质灾害、储气储氢和气体分离、海水淡化、碳循环与全球气候变化等问题，然而，最受各国政府和工业界关注的仍然是水合物作为一种新的高清洁化石能源的潜力和开发利用研究。各国政府、各大油气公司和各类学术研究机构持续开展了大量地质、地球物理、地球化学、钻探等相关调查工作，主要集中在水合物的成藏机理、物性特征、资源潜力、勘探和开采利用技术等课题，水合物已成为当前地球科学和能源领域研究的一大热点。美国和日本率先制订了全面的天然气水合物研究发展计划，并投入了巨大的人力和物力资源，美国先后通过两次立法加强水合物的研究工作，围绕天然气水合物的资源特征、开发、全球碳循环、安全及海底稳定性四个主题，美国能源部制定了长达 10 年（2000-2010）的详细研发计划（U.S.G.S.,1999），2014 年末又宣布未来 4 年投资 5800 万美元用于研究水合物储层形成、分布及其原位物理力学性质，其最终目标是 2025 年前实现海上商业化开采；日本先后投入数十亿美元进行水合物勘探开发研究，先后并制定了两个天然气水合物研究发展规划：1995-1999 年的通产省设立的“甲烷水合物研究及开发推进初步计划”及“21 世纪甲烷水合物开发计划（简称 MH21）”；欧洲自然科学基金委的海洋综合研究科学计划对天然气水合物的研究工作也异常重视，对天然气水合物的生物地球化学、水合物-沉积物-水

-气体系统的物化特性和环境特征、及水合物调查技术进行重点研究(ESF-Marine Board,2002)。值得注意的是日本 MH21 计划于 2002 年在加拿大冻土带进行的天然气水合物实验试开采获得了成功，2013 年还进行了全球首次海洋水合物试开采试验，为后续商业试开采迈出了关键一步，并拟五年内在日本海域进行开发试验，为商业生产做技术准备。当前水合物资源开采利用问题已经紧锣密鼓的进行，美国和日本分别制定了 2015 和 2016 年进行商业试开采的时间表，其他国家如印度、韩国、俄罗斯、加拿大、德国、墨西哥等均先后制订了开发天然气水合物的技术研究和计划（图 4）。同时，针对天然气水合物基础理论研究的大洋钻探计划（DSDP、ODP 和 IODP）航次研究也极大地推动了相关研究的发展，并取得了令人瞩目的成果。

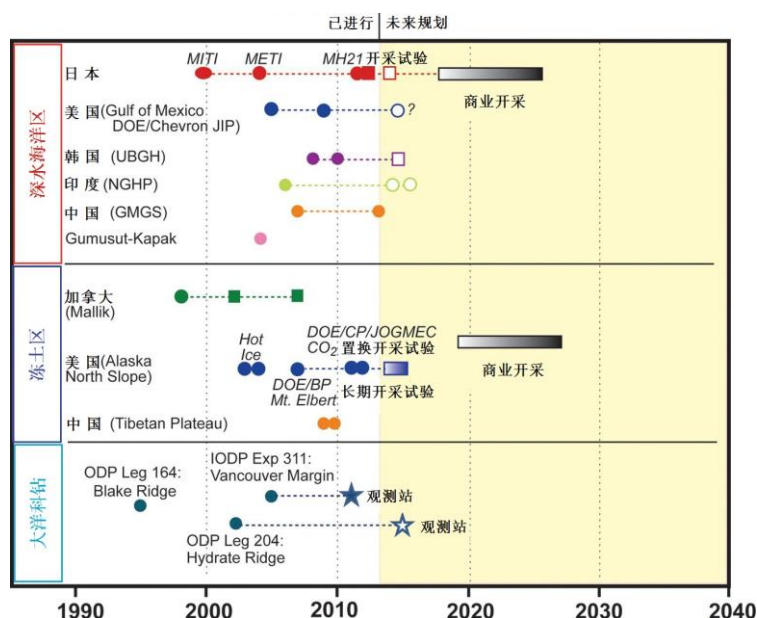


图 4 水合物钻探项目历程和未来发展规划(修改自 Collett et al., 2015)

迄今国际上已经钻探了超过 100 口专门用于水合物研究和勘探以及其资源量评估的试井，目前已提出的有效开采方案包括：1) 注水升温法，通过钻孔将热水泵注入水合物沉积层内，使地层稳定超过水合物的分解点从而释放甲烷；2) 降压法，通过上层钻孔穿透水合物储层，释放当地的原位压力，当压力降低到水合物稳定区域外水合物就会分解并释放甲烷气体；3) CO₂ 置换法，由于稳定相限不同，通过注入工业废置的 CO₂ 气体进入水合物储层，从而置换出笼型晶体

中的甲烷。通过室内实验和现场测井试验结果表明，所有的这些方法实用性上都存在着一些问题，如注热水法很不经济，降压法会导致水合物分解速度降低，而置换法又过于缓慢，因此对水合物的经济性开发还需要科学界更多的研究。

4、中国的水合物

我国天然气水合物的研究工作起步较晚，1999年起先后开展了南海、东海、陆上冻土区和国际海底区域天然气水合物的调查研究，相继发现了一系列地质、地球物理和地球化学异常标志，研究表明，南海具备良好的天然气水合物成矿条件和找矿前景，尤其以北部和南部陆坡区为佳，中国地调局通过复查原有地震资料在西沙海槽、东沙群岛南部、笔架南盆地、南沙断陷盆地等地发现天然气水合物存在的拟海底反射层（BSR）标志，2007年-2016年先后四次在南海北部实施了天然气水合物钻探航次（图5），获得了多种类型天然气水合物的实物样品，这使我国成为继美国、日本、印度之后第四个通过国家级研发计划在海底钻探获得可燃冰实物样品的国家，并证实了我国也存在这极具前景的水合物资源，2008年国家973计划启动“南海天然气水合物富集规律与开采基础研究”，开展了南海天然气水合物形成机理及相关基础理论研究，澄清了南海北部海洋水合物系统的动态成藏机制，我国台湾西南海域大陆坡盆地水合物调查不仅发现了大区域连片分布的BSR，而且在海底发现了大量的甲烷高值区、海底冷泉生物、冷泉碳酸盐岩等渗漏型天然气水合物发育的标志。此外，我国冻土带水合物研究也取得了重要成果，青藏高原多年冻土带面积广阔，陆相盆地和海相盆地都具有良好的生油气条件，符合天然气水合物形成的条件，有可能形成具有一定规模的天然气水合物聚集带，其中羌塘盆地，可可西里陆相盆地、祁连山多年冻土区等都是理论上较好的勘探靶区，并进一步在祁连山木里地区的冻土层内钻井获得了天然气水合物实物样品(2008年)，东北漠河盆地多年冻土带也报道了生物成因水合物储层可能赋存的调查证据(2015年)。总体而言，我国水合物资源前景巨大，科研人员估算，在50%概率条件下，南海海域天然气水合物资源总量约为 $6.5 \times 10^{13} \text{ m}^3$ ，东海海域水合物资源量约为 $3.38 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ，陆上青藏高原和东北冻土带的水合物资源量 $1.2 \times 10^{11} \text{ m}^3$ 到 2.4×10^{14} ，数值模拟的结果也显示神狐区域水合物储藏具备经济性开采价值，在国家“十二五”规划中，已将天然气水合物资源的开发利用纳

入日程，随着中国天然气水合物的调查研究进程进一步加快，在不久的将来有望过渡到试生产阶段和商业性生产阶段。

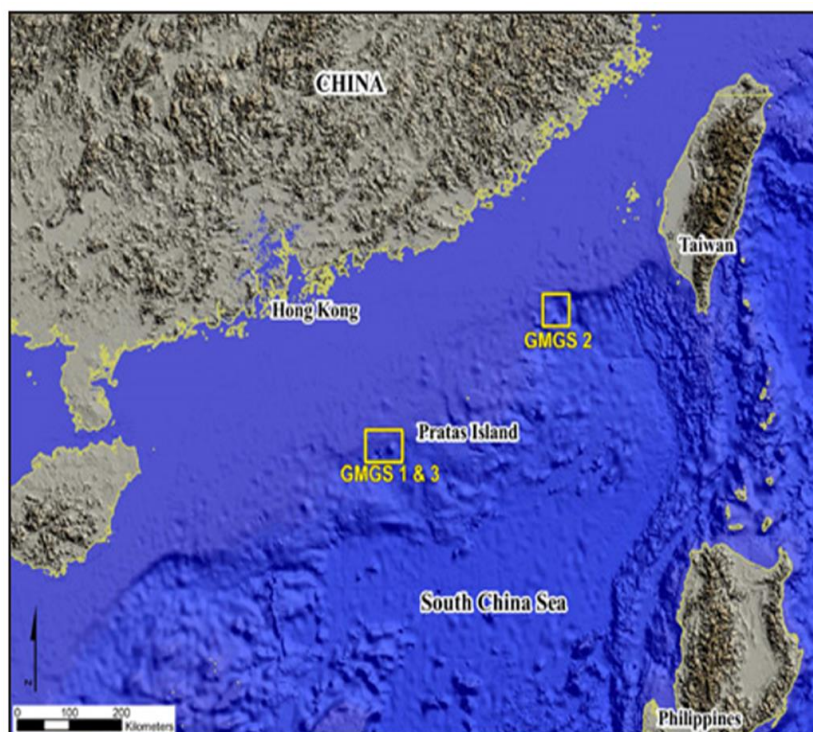


图 5 我国南海北部已取得水合物岩心的调查区域(Yang et al., 2015)

5、水合物的未来

全球水合物沉积国模巨大，其经济价值足以令人垂涎，特别是对那些能源进口大国，如日本和韩国，水合物开采被视为能摆脱油气进口依赖的有效途径之一，试验性的钻探结果也表明从大陆边缘海底和冻土带采取水合物是完全有可能的。然而，尽管在冻土和海洋水合物研究方面取得了巨大进步和丰硕成果，从松软洋底沉积物及冻土地层开采水合物与常规油气资源开采的技术要求是不一样的，当前仍然有三朵“乌云”笼罩在水合物勘探开发的天空上：一是储层准确精细的定量描述不足，二是高效经济的开采技术不过关，三是安全可靠的风险控制技术不够，对于前者需要高精度的三维地震、测井和原位监测技术，对于开采需要深入揭示沉积物中水合物分解与流体和固体颗粒（出砂）运移的复杂耦合作用机制，并脱离常规思路，寻找能持续生产且低耗无附加污染的新方法，对于最后一个则涉及到环境气候动态变化导致水合物分解诱发的地质灾害、勘探开发钻井过程中水合

物分解和再形成导致的井壁失稳、流动阻塞、井涌甚至井喷等井内安全事故以及开采过程地层沉降、变形并诱发生套管变形、气体泄漏及加剧气候变暖等问题，也是难度最大的挑战。这需要全面掌握水合物系统物理力学性质，并建立全流程风险预测、评价和控制技术。

虽然要从水合物中商业化采收甲烷可能还需要至少 10 年、甚至更长的时间，但万事开头难，随着最终开采技术的逐步成熟，我们有理由乐观到本世纪中水合物将成为人类清洁化石燃料的重要组成部分。