

**天然气水合物**

天然气水合物[[1]](#footnote-1)（Natural Gas Hydrate/Gas Hydrate），有机化合物，化学式CH4·*x*H2O。即可燃冰，是分布于深海沉积物或陆域的永久冻土中，由天然气与水在高压低温条件下形成的类冰状的结晶物质。

因其外观像冰一样而且遇火即可燃烧，所以又被称作“可燃冰”（Combustible ice）或者“固体瓦斯”和“气冰”。其实是一个固态块状物。天然气水合物在自然界广泛分布在大陆永久冻土、岛屿的斜坡地带、活动和被动大陆边缘的隆起处、极地大陆架以及海洋和一些内陆湖的深水环境。

2013年6月至9月，在广东沿海珠江口盆地东部海域首次钻获高纯度天然气水合物样品，并通过钻探获得可观的控制储量。2014年2月1日，南海天然气水合物富集规律与开采基础研究通过验收，建立起中国南海“可燃冰”基础研究系统理论。2017年5月，中国首次海域天然气水合物（可燃冰）试采成功。2017年11月3日，国务院正式批准将天然气水合物列为新矿种。

# 简介

天然气水合物又称“可燃冰”，是分布于深海沉积物或陆域的永久冻土中，由天然气与水在高压低温条件下形成的类冰状的结晶物质。因其外观像冰一样而且遇火即可燃烧，所以又被称作“可燃冰”。其资源密度高，全球分布广泛，具有极高的资源价值，因而成为油气工业界长期研究热点。自上世纪60年代起，以美国、日本、德国、我国、韩国、印度为代表的一些国家都制订了天然气水合物勘探开发研究计划。迄今，人们已在近海海域与冻土区发现水合物矿点超过230处，涌现出一大批天然气水合物热点研究区。

可燃冰燃烧方程式：

# 理化性质

天然气水合物燃烧后几乎不产生任何残渣，污染比煤、石油、天然气都要小得多。1立方米可燃冰可转化为164立方米的天然气和0.8立方米的水。开采时只需将固体的“天然气水合物”升温减压就可释放出大量的甲烷气体。

天然气水合物在海洋浅水生态圈，通常出现在深层的沉淀物结构中，或是在海床处露出。甲烷气水包合物据推测是因地理断层深处的气体迁移，以及沉淀、结晶等作用，于上升的气体流与海洋深处的冷水接触所形成。

在高压下，甲烷气水包合物在 18 °C 的温度下仍能维持稳定。一般的甲烷气水化合物组成为 1摩尔的甲烷及每 5.75 摩尔的水，然而这个比例取决于多少的甲烷分子“嵌入”水晶格各种不同的包覆结构中。据观测的密度大约在 0.9 g/cm&sup3;。一升的甲烷气水包合物固体，在标准状况下，平均包含 168 升的甲烷气体。

1立方米的可燃冰可在常温常压下释放164立方米的天然气及0.8立方米的淡水）所以固体状的天然气水合物往往分布于水深大于 300 米 以上的海底沉积物或寒冷的永久冻土中。海底天然气水合物依赖巨厚水层的压力来维持其固体状态，其分布可以从海底到海底之下 1000 米 的范围以内，再往深处则由于地温升高其固体状态遭到破坏而难以存在。

天然气水合物从物理性质来看，天然气水合物的密度接近并稍低于冰的密度，剪切系数、电解常数和热传导率均低于冰。天然气水合物的声波传播速度明显高于含气沉积物和饱和水沉积物，中子孔隙度低于饱和水沉积物，这些差别是物探方法识别天然*气*水合物的理论基础。此外，天然气水合物的毛细管孔隙压力较高。

可燃冰分子结构就像一个一个由若干水分子组成的笼子。

形成可燃冰有三个基本条件：温度、压力和原材料。

首先，低温。可燃冰在0—10℃时生成，超过20℃便会分解。海底温度一般保持在2—4℃左右；

其次，高压。可燃冰在0℃时，只需30个大气压即可生成，而以海洋的深度，30个大气压很容易保证，并且气压越大，水合物就越不容易分解。

最后，充足的气源。海底的有机物沉淀，其中丰富的碳经过生物转化，可产生充足的气源。海底的地层是多孔介质，在温度、压力、气源三者都具备的条件下，可燃冰晶体就会在介质的空隙间中生成。

# 历史沿革

1810年，首次在实验室发现天然气水合物。

1934年，前苏联在被堵塞的天然气输气管道里发现了天然气水合物。由于水合物的形成，输气管道被堵塞。这一发现引起前苏联人对天然气水合物的重视。

1960年，前苏联在西伯利亚发现了可燃冰，1965年，前苏联首次在西西伯利亚永久冻土带发现天然气水合物矿藏；并于1969年投入开发；1970年，前苏联开始对该天然气水合物矿床进行商业开采。

1970年，国际深海钻探计划(DSDP)在美国东部大陆边缘的布莱克海台实施深海钻探，在海底沉积物取心过程中，发现冰冷的沉积物岩心嘶嘶地冒着气泡，并达数小时。当时的海洋地质学家非常不解。后来才知道，气泡是水合物分解引起的，他们在海底取到的沉积物岩心其实含有水合物。

美国于1969年开始实施可燃冰调查，1998年把可燃冰作为国家发展的战略能源列入国家级长远计划；日本开始关注可燃冰是在1992年；完成周边海域的可燃冰调查与评价。但最先挖出可燃冰的是德国。

1971年，美国学者Stoll等人在深海钻探岩心中首次发现海洋天然气水合物，并正式提出“天然气水合物”概念。

1974年，前苏联在黑海1950米水深处发现了天然气水合物的冰状晶体样品。

1979年，DSDP第66和67航次在墨西哥湾实施深海钻探，从海底获得91.24米的天然气水合物岩心，首次验证了海底天然气水合物矿藏的存在。

1981年，DSDP计划利用“格罗玛·挑战者号”钻探船也从海底取上了3英尺长的水合物岩心。

1992年，大洋钻探计划(ODP)第146航次在美国俄勒冈州西部大陆边缘Cascadia海台取得了天然气水合物岩心。

1995年，ODP第164航次在美国东部海域布莱克海台实施了一系列深海钻探，取得了大量水合物岩心，首次证明该矿藏具有商业开发价值。

1997年，大洋钻探计划考察队利用潜水艇在美国南卡罗来纳海上的布莱克海台首次完成了水合物的直接测量和海底观察。同年，ODP在加拿大西海岸胡安-德夫卡洋中脊陆坡区实施了深海钻探，取得了天然气水合物岩心。至此，以美国为首的DSDP及其后继的ODP在10个深海地区发现了大规模天然气水合物聚集：秘鲁海沟陆坡、中美洲海沟陆坡(哥斯达黎加、危地马拉、墨西哥)、美国东南大西洋海域、美洲西部太平洋海域、日本的两个海域、阿拉斯加近海和墨西哥湾等海域。

1996年和1999年期间，德国和美国科学家通过深潜观察和抓斗取样，在美国俄勒冈州岸外Cascadia海台的海底沉积物中取到嘶嘶冒着气泡的白色水合物块状样品，该水合物块可以被点燃，并发出熊熊的火焰。

1998年，日本通过与加拿大合作，在加拿大西北Mackenzie三角洲进行了水合物钻探，在890～952米深处获得37米水合物岩心。该钻井深1150米，是高纬度地区永冻土带研究气体水合物的第一口井。

1999年，日本在其静冈县御前崎近海挖掘出外观看起来象湿润雪团一样的天然气水合物。

1999～2001年，中国地质调查局科技人员首次在南海西沙海槽发现了显示天然气水合物存在的地震异常信息（似海底地震发射波“BSR”）。2002年国务院批准设立我国海域天然气水合物资源调查专项。

2000年开始，可燃冰的研究与勘探进入高峰期，世界上至少有30多个国家和地区参与其中。其中以美国的计划最为完善——总统科学技术委员会建议研究开发可燃冰。为开发这种新能源，国际上成立了由19个国家参与的地层深处海洋地质取样研究联合机构，有50个科技人员驾驶着一艘装备有先进实验设施的轮船从美国东海岸出发进行海底可燃冰勘探。这艘可燃冰勘探专用轮船是当今世界上唯一的一艘能从深海下岩石中取样的轮船，船上装备有能用于研究沉积层学、古人种学、岩石学、地球化学、地球物理学等的实验设备。这艘专用轮船由得克萨斯州A·M大学主管，英、德、法、日、澳、美科学基金会及欧洲联合科学基金会为其提供经济援助。

自2002年起，中国地质调查局对我国冻土区特别是青藏高原冻土区开展了地质、地球物理、地球化学和遥感调查，发现我国冻土区具备较好的天然气水合物成矿条件和找矿前景，其中羌塘盆地为Ⅰ级远景区，祁连山、漠河盆地和风火山—乌丽地区为Ⅱ级远景区。

1999年在国家发展改革委、财政部等大力支持下，国土资源部正式启动天然气水合物资源调查，包括在珠江口盆地开展天然气水合物综合调查40个航次，完成高分辨率多道地震测量45800公里、多波束测量36800公里、浅地层剖面测量7100公里、海底地质取样1480个站位、海底热流测量222个站位等调查工作。

2005年4月14日，中国在北京举行中国地质博物馆收藏中国首次发现的天然气水合物碳酸盐岩标本仪式。宣布中国首次发现世界上规模最大被作为“可燃冰”即天然气水合物存在重要证据的“冷泉”碳酸盐岩分布区，其面积约为430平方公里。

2007年5月1日凌晨，中国在南海北部的首次采样成功，证实了中国南海北部蕴藏丰富的天然气水合物资源，标志着中国天然气水合物调查研究水平已步入世界先进行列。中国在南海北部成功钻获天然气水合物实物样品“可燃冰”，从而成为继美国、日本、印度之后第4个通过国家级研发计划采到水合物实物样品的国家。

2009年9月中国地质部门公布，在青藏高原发现了一种名为可燃冰(又称天然气水合物)的环保新能源，预计十年左右能投入使用。初略的估算，远景资源量至少有350亿吨油当量。

2013年6月~9月，我国海洋地质科技人员在广东沿海珠江口盆地东部海域首次钻获高纯度天然气水合物（俗称“可燃冰”）样品，并通过钻探获得可观的控制储量。此次发现的天然气水合物样品具有埋藏浅、厚度大、类型多、纯度高4个主要特点。控制储量1000亿立方米~1500亿立方米，相当于特大型常规天然气矿规模。

日本2013年3月12日成功从爱知县附近深海可燃冰层中提取出甲烷，成为世界上首个掌握海底可燃冰采掘技术的国家。日本希望2018年开发出成熟技术，实现大规模商业化生产。

采掘试验由日本经济产业省属下的石油天然气金属矿物资源机构实施。该机构利用地球深处探测船“地球”号，从爱知县渥美半岛附近约1000米的海底挖入330米，到达可燃冰层后，通过把可燃冰中的水分抽出降低其压力，使水和甲烷分离，然后提取出甲烷，整个过程约用了4小时。该机构将继续在该海域进行为期两周左右的采掘试验，以进一步完善技术。

2014年，由中国地质调查局与中国科学院主办的第八届国际天然气水合物大会29日在北京开幕，记者从大会上获悉，我国计划于2015年在中国海域实施天然气水合物的钻探工程，将有力推动中国“可燃冰”勘探与开发的进程，引发中国能源开发利用的“革命”。

2017年1月，经10余年技术攻关，吉林大学科研团队研发出陆域天然气水合物冷钻热采关键技术，填补了国内该领域空白，总体达到国际先进水平。

与国际上通用的“被动式保压保温取样”钻探原理不同，新技术首次提出“主动式降温冷冻取样”原理，发明了钻井泥浆强化制冷方法、水合物孔底快速冷冻取样方法和高温脉冲热激发开采技术，主要技术指标超过国外同类技术。

2017年5月，中国首次海域天然气水合物（可燃冰）试采成功。5月18日，中共中央、国务院向参加这次任务的全体参研参试单位和人员，表示热烈的祝贺。

2007年实施的天然气水合物取样，首次成功获取了实物样品，证实了我国南海北部蕴藏有丰富的天然气水合物资源。由此，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采到天然气水合物实物样品的国家。

2009年，中国地质调查局组织实施的《祁连山冻土区天然气水合物科学钻探工程》施工完成的8个钻井中，有5个钻井钻获天然气水合物实物样品。这是我国冻土区首次钻获天然气水合物实物样品，也是全球首次在中低纬度高山冻土区发现天然气水合物实物样品。

2011年国务院批准设立了新的天然气水合物国家专项。中国地质调查局广州海洋地质调查局通过进一步勘查，在珠江口盆地东部海域发现了天然气水合物有利目标区。2013年5月～9月，在该区域实施了3个航段共计102天的钻探取样工作。

2013年，日本在世界上首次开采出海底可燃冰。日本在2013年3月12日成功地在爱知县渥美半岛以南70公里、水深1000米处海底开采出可燃冰并提取出甲烷，成为世界上首个掌握海底可燃冰采掘技术的国家。日本于3月12日-18日，6天之内成功开采出12万立方米气体，后因泥沙堵住钻井通道而中止。

2013年8月，《祁连山及邻区天然气水合物资源勘查》项目组再次在青海省天峻县木里镇DK-9科学钻探试验井中，成功钻获天然气水合物实物样品，单层厚度超过20米。

2016年6月25日上午，广州海洋地质调查局通报，继我国在南海发现大面积可燃冰分布后，我国首次在南海北部陆坡西部海域发现规模空前的活动性冷泉“海马冷泉”，分布面积约618平方公里。它的发现是我国天然气水合例勘查的重大突破！

2017年，我国在南海北部神狐海域进行的可燃冰试采获得成功。本次试采作业区位于珠海市东南320千米的神狐海域。3月28日第一口试采井开钻，5月10日下午14时 52分点火成功，从水深1266米海底以下203-277米的天然气水合物矿藏开采出天然气。到5月18日上午10时，连续产气近8天，平均日产超过1.6万立方米，超额完成“日产万方、持续一周”的预定目标。国土资源部部长姜大明在现场宣布我国海域天然气水合物首次试采成功，中共中央、国务院发来贺电。至5月26日，试采井连续产气16天，平均日产超过1万立方米。5月27日开始，按照施工方案开展温度、压力变化对储层、井底、井筒、气体流量等影响的科学测试研究工作。截至目前，已连续产气超过22天，平均日产8350立方米，气压气流稳定，井底状态良好。试采安全评估和环境监测结果显示，钻井作业安全，海底地层稳定，大气和海水甲烷含量无异常变化。取得了持续产气时间长、气流稳定、环境安全等多项重大突破性成果。截至6月10日下午，试采总产气量达到21万立方米，平均日产6800立方米。目前产气过程平稳，井底状况良好，获得各项测试数据264万组，为下一步工作奠定了坚实基础。

2017年11月3日，国务院正式批准将天然气水合物列为新矿种，成为我国第173个矿种。

# 组成结构

天然气水合物是一种白色固体物质，有极强的燃烧力，主要由水分子和烃类气体分子（主要是[甲烷](https://baike.baidu.com/item/%E7%94%B2%E7%83%B7)）组成，它是在一定条件（合适的温度、压力、气体饱和度、水的盐度、PH值等）下由水和天然气在中高压和低温条件下混合时组成的类冰的、非化学计量的、笼形结晶化合物（水分子中氧原子的电负性较大，在高压下能吸引与之相近的水分子中的氢原子形成氢键，构成笼状结构）。一旦温度升高或压强降低，甲烷气则会逸出，固体水合物便趋于崩解。

“天然气水合物”，是天然气在0℃和30个大气压的作用下结晶而成的“冰块”。“冰块”里甲烷占80%～99.9%，可直接点燃。可用***mCH4·nH2O***来表示，***m***代表水合物中的气体分子，***n***为水合指数（也就是水分子数）。组成天然气的成分如CH4、C2H6、C3H8、C4H10等同系物以及CO2、N2、H2S等可形成单种或多种天然气水合物。形成天然气水合物的主要气体为甲烷，对甲烷分子含量超过99%的天然气水合物通常称为甲烷水合物（***Methane Hydrate***）。每单位晶胞内有两个十二面体（20 个端点因此有 20 个水分子）和六个十四面体（***tetrakaidecahedra***l）（24 个水分子）的水笼结构。其水合值（***hydratation value***）20 可由 MAS NMR 来求得。 甲烷气水包合物频谱于 275 K 和 3.1 MPa下记录，显示出每个笼形都反映出峰值，且气态的甲烷也有个别的峰值。

# 分布范围

天然气水合物在自然界广泛分布在大陆永久冻土、岛屿的斜坡地带、活动和被动大陆边缘的隆起处、极地大陆架以及海洋和一些内陆湖的深水环境。在标准状况下，一单位体积的天然气水合物分解最多可产生164单位体积的甲烷气体。

世界上海底天然气水合物已发现的主要分布区是大西洋海域的墨西哥湾、加勒比海、南美东部陆缘、非洲西部陆缘和美国东海岸外的布莱克海台等，西太平洋海域的白令海、鄂霍茨克海、千岛海沟、冲绳海槽、日本海、四国海槽、中国南海海槽、苏拉威西海和新西兰北部海域等，东太平洋海域的中美洲海槽、加利福尼亚滨外和秘鲁海槽等，印度洋的阿曼海湾，南极的罗斯海和威德尔海，北极的巴伦支海和波弗特海，以及大陆内的黑海与里海等。

天然气水合物在在地球上大约有27%的陆地是可以形成天然气水合物的潜在地区，而在世界大洋水域中约有90%的面积也属这样的潜在区域。已发现的天然气水合物主要存在于北极地区的永久冻土区和世界范围内的海底、陆坡、陆基及海沟中。由于采用的标准不同，不同机构对全世界天然气水合物储量的估计值差别很大。

据潜在气体联合会（***PGC，1981***）估计，永久冻土区天然气水合物资源量为**1.4×1013～3.4×1016m3**，包括海洋天然气水合物在内的资源总量为7.6×1018m3。但是，大多数人认为储存在汽天然气水合物分布区域水合物中的碳至少有1×1013t，约是当前已探明的所有化石燃料（包括煤、石油和天然气）中碳含量总和的2倍。由于天然气水合物的非渗透性，常常可以作为其下层游离天然气的封盖层。因而，加上汽水合物下层的游离气体量这种估计还可能会大些。如果能证明这些预计属实的话，天然气水合物将成为一种未来丰富的重要能源。

甲烷气水包合物受限于浅层的岩石圈内（即 <2000m深）。发现在一些必要条件下，惟独在极地大陆的沉积岩，其表面温度低于0°C，或是在水深超过300m ，深层水温大约2°C的海洋沉积物底下。大陆区域的蕴藏量已确定位在西伯利亚和阿拉斯加800m深的砂岩和泥岩床中。海生型态的矿床似乎分布于整个大陆棚，且可能出现于沉积物的底下或是沉积物与海水接触的表面。他们甚至可能涵盖更大量的气态甲烷。

全球蕴藏的常规石油天然气资源消耗巨大，很快就会枯竭。科学家的评价结果表明，仅在海底区域，可燃冰的分布面积就达4000万平方公里，占地球海洋总面积的 1/4。2011年，世界上已发现的可燃冰分布区多达116处，其矿层之厚、规模之大，是常规天然气田无法相比的。科学家估计，海底可燃冰的储量至少够人类使用1000年。

中国国内可燃冰主要分布在南海海域、东海海域、青藏高原冻土带以及东北冻土带，据粗略估算，其资源量分别约为64.97x10^12m3、3.38x10^12m3、12.5x10^12m3和2.8x10^12m3。并且已在南海北部神狐海域和青海省祁连山永久冻土带取得了可燃冰实物样品。

在本州岛海岸线30英里外，科学家们发现了一条蕴藏量惊人的海沟：在海沟里的甲烷呈水晶状，大约有500米厚，总量达40万亿立方米。这个储量尽管还不能与沙特或者俄罗斯的石油资源相比，但也足够日本用上一阵了。

2018年10月18日，在天津举行的2018（第二十届）中国国际矿业大会上，《中国矿产资源报告2018》正式发布。据报告显示，初步预测，中国海域天然气水合物资源量约800亿吨油当量。

# 形成原因

### 天然气水合物海洋生成

有两种不同种类的海洋存量。最常见的绝大多数（> 99%）都是甲烷包覆于结构一型的包合物，而且一般都在沉淀物的深处才能发现。在此结构下，甲烷中的碳同位素较轻（δ13C < -60‰），因此指出其是微生物由CO2的氧化还原作用而来。这些位于深处矿床的包合物，一般认为应该是从微生物产生的甲烷环境中原处形成，因为这些包合物与四周溶解的甲烷其δ13C值是相似的。

这些矿床坐落于中深度范围的区域内，大约300-500m厚的沉积物中（称作气水化合物稳定带(***GasHydrate Stability Zone***)或 GHSZ），且该处共存着溶于孔隙水的甲烷。在这区域之下，甲烷只会以溶解型态存在，并随着沉积物表层的距离而浓度逐渐递减。而在这之上，甲烷是气态的。在大西洋大陆脊的布雷克海脊，GHSZ在190m的深度开始延伸至450m处，并于该点达到气态的相平衡。测量结果指出，甲烷在GHSZ的体积占了0-9% ，而在气态区域占了大约12%的体积。

在接近沉积物表层所发现较少见的第二种结构中，某些样本有较高比例的碳氢化合物长链（<99% 甲烷）包含于结构二型的包合物中。其甲烷的碳同位素较重（δ13C 为 -29 至 -57 ‰），据推断是由沉积物深处的有机物质，经热分解后形成甲烷而往上迁移而成。此种类型的矿床在墨西哥湾和里海等海域出现。

某些矿床具有介于微生物生成和热生成类型的特性，因此预估会出现两种混合的型态。

气水化合物的甲烷主要由缺氧环境下有机物质的细菌分解。在沉积物最上方几厘米的有机物质会先被好氧细菌所分解，产生CO2，并从沉积物中释放进水团中。在此区域的好氧细菌活动中，硫酸盐会被转变成硫化物。若沉淀率很低（<1厘米/千年）、有机碳成分很低（<1%），且含氧量充足时，好氧细菌会耗光所有沉积物中的有机物质。但该处的沉淀率和有机碳成分都很高，沉积物中的孔隙水仅在几厘米深的地方是缺氧态的，而甲烷会经由厌氧细菌产生。此类甲烷的生成是更为复杂的程序，需要各个种类的细菌活动、一个还原环境（Eh -350 to -450 mV），且环境pH 值需介于6至8之间。在某些海域（例如墨西哥湾）包合物中的甲烷至少会有部份是由有机物质的热分解所产生，但大多是从石油分解而成。包合物中的甲烷一般会具有细菌性的同位素特征，以及很高的 δ13C 值（-40 to -100‰），平均大约是-65‰。在固态包合物地带的下方处，沉积物里的大量甲烷可能以气泡的方式释放出来。

在给定的地点内判定该处是否含有包合物，大多可以透过观测“海底仿拟反射”（***BottomSimulatingReflector***，或称BSR）分布，以震测反射（***seismicreflection***）的方式来扫描洋底沉积物与包合物稳定带之间的接口处，因而可观测出一般沉积物和那些蕴藏包合物沉积物之间的密度差异。

海洋生成的甲烷包合物，蕴藏量鲜为人知。自从1960至1970年代，包合物首次发现可能存在海洋中的那段时期，其预估的蕴藏量就每十年以数量级的概估速度递减。曾经预估过的蕴藏量（高达3×1018m&sup3;）是建构在假设包合物非常稠密地散布在整片深海海床上。然而，随着我们对包合物化学和沉积学等知识进一步的了解，发现水合物只会在某个狭窄范围内（大陆棚）的深度下形成，以及某些地点的深度范围内才会存在（10-30%部分的 GHSZ 区），而且通常是在低浓度（体积的0.9-1.5%）的地点。最新的估计强制采用直接取样的方式，指出全球含量介于 1×1015 和 5×1015 m&sup3; 之间。这个预估结果，对应出大约500至2500个十亿吨单位的碳 (Gt C)，比预估所有矿物燃料的5000GtC数量还少，但整体上却超过所预估其他天然气来源的约230Gt C。在北极圈的永冻地带，其储藏量预估可达约400Gt C[13]，但在南极区域并未估出可能的蕴藏量。这些是很大的数字。相较于大气中的总碳数也才大约700个Gt C。

这些近代的估计结果，与当初人们以为包合物为矿物燃料来源时（MacDonald 1990,Kvenvolden 1998）所提出的10,000to11,000 Gt C （2×1016 m&sup3;），数量上明显的要少。包合物藏量的缩减，并未使其失去经济价值，但缩减的整体含量和多数产地明显过低的采集密度[10]，的确指出仅限某些地区的包合物矿床才能提供经济上的实质价值。

### 天然气水合物大陆生成

在大陆岩石内的甲烷包合物会受限在深度800m以上的砂岩或粉沙岩岩床中。采样结果指出，这些包合物以热力或微生物分解气体的混合方式形成，其中较重的碳氢化合物之后才会选择性地被分解。这类的型态存在于阿拉斯加和西伯利亚。

储量比地球上石油的总储量还大几百倍。这些可然冰都蕴藏在全球各地的450米深的海床上，表面看起来，很象干冰，实际却能燃烧。在美东南沿海水下2700平方米面积的水化物中，含有足够供应美国70多年的可燃冰。其储量预计是常规储量的2．6倍，如果全部开发利用，可使用100年左右。中国地质大学(武汉)和中南石油局第五物探大队在藏北高原羌塘盆地开展的大规模地球物理勘探成果表明：继塔里木盆地后，西藏地区很有可能成为中国21世纪第二个石油资源战略接替区。

# 开采方法

由于可燃冰在常温常压下不稳定，因此开采可燃冰的方法设想有：①热解法。②降压法。③二氧化碳置换法。（技术仍不完善，由此泄露的甲烷可造成比二氧化碳严重十倍的温室效应）

### 天然气水合物传统开采

(1) 热激发开采法　热激发开采法是直接对天然气水合物层进行加热，使天然气水合物层的温度超过其平衡温度，从而促使天然气水合物分解为水与天然气的开采方法。这种方法经历了直接向天然气水合物层中注入热流体加热、火驱法加热、井下电磁加热以及微波加热等发展历程。热激发开采法可实现循环注热，且作用方式较快。加热方式的不断改进，促进了热激发开采法的发展。但这种方法至今尚未很好地解决热利用效率较低的问题，而且只能进行局部加热，因此该方法尚有待进一步完善。

(2) 减压开采法 减压开采法是一种通过降低压力促使天然

气水合物分解的开采方法。减压途径主要有两种： ①采用低密度泥浆钻井达到减压目的；②当天然气水合物层下方存在游离气或其他流体时，通过泵出天然气水合物层下方的游离气或其他流体来降低天然气水合物层的压力。减压开采法不需要连续激发，成本较低，适合大面积开采，尤其适用于存在下伏游离气层的天然气水合物藏的开采，是天然气水合物传统开采方法中最有前景的一种技术。但它对天然气水合物藏的性质有特殊的要求，只有当天然气水合物藏位于温压平衡边界附近时，减压开采法才具有经济可行性。

(3) 化学试剂注入开采法　化学试剂注入开采法通过向天然气水合物层中注入某些化学试剂，如盐水、甲醇、乙醇、乙二醇、丙三醇等，破坏天然气水合物藏的相平衡条件，促使天然气水合物分解。这种方法虽然可降低初期能量输入，但缺陷却很明显，它所需的化学试剂费用昂贵，对天然气水合物层的作用缓慢，而且还会带来一些环境问题，所以，对这种方法投入的研究相对较少。 并且添加化学剂较加热法作用缓慢，但确有降低初始能源输入的优点。添加化学剂最大的缺点是费用太昂贵。

### 天然气水合物新型开采

(1)CO2置换开采法。这种方法首先由日本研究者提出，方法依据的仍然是[天然气水合物稳定带](https://baike.baidu.com/item/%E5%A4%A9%E7%84%B6%E6%B0%94%E6%B0%B4%E5%90%88%E7%89%A9%E7%A8%B3%E5%AE%9A%E5%B8%A6)的压力条件。在一定的温度条件下，天然气水合物保持稳定需要的压力比CO2水合物更高。因此在某一特定的压力范围内，天然气水合物会分解，而CO2水合物则易于形成并保持稳定。如果此时向天然气水合物藏内注入CO2气体，CO2气体就可能与天然气水合物分解出的水生成CO2水合物。这种作用释放出的热量可使天然气水合物的分解反应得以持续地进行下去。

(2)固体开采法。固体开采法最初是直接采集海底固态天然气水合物，将天然气水合物拖至浅水区进行控制性分解。这种方法进而演化为混合开采法或称矿泥浆开采法。该方法的具体步骤是，首先促使天然气水合物在原地分解为气液混合相，采集混有气、液、固体水合物的混合泥浆，然后将这种混合泥浆导入海面作业船或生产平台进行处理，促使天然气水合物彻底分解，从而获取天然气。

# 开采实例

**麦索亚哈气田天然气水合物的开采**

麦索亚哈气田发现于20 世纪60 年代末，是第一个也是迄今为止唯一一个对天然气水合物藏进行了商业性开采的气田。该气田位于前苏联西西伯利亚西北部，气田区常年冻土层厚度大于500 m，具有天然气水合物赋存的有利条件。麦索亚哈气田为常规气田，气田中的天然气透过盖层发生运移，在有利的环境条件下，在气田上方形成了天然气水合物层。该气田的天然气水合物藏首先是经由减压途径无意中得以开采的。通过开采天然气水合物藏之下的常规天然气，致使天然气水合物层压力降低，天然气水合物发生分解。后来，为了促使天然气水合物的进一步分解，维持产气量，特意向天然气水合物藏中注入了甲醇和氯化钙等化学抑制剂。

**麦肯齐三角洲地区天然气水合物试采集**

麦肯齐三角洲地区位于加拿大西北部，地处北极寒冷环境，具有天然气水合物生成与保存的有利条件。该区天然气水合物研究具有悠久的历史。早在1971～1972 年间，在该区钻探常规勘探井MallikL238 井时，偶然于永冻层下800～1 100 m 井段发现了天然气水合物存在的证据；1998 年专为天然气水合物勘探钻探了Mallik 2L238 井，该井于897～952 m 井段发现了天然气水合物，并采出了天然气水合物岩心。2002 年，在麦肯齐三角洲地区实施了一项举世关注的天然气水合物试采研究。该项目由加拿大地质调查局、日本石油公团、德国地球科学研究所、美国地质调查局、美国能源部、印度燃气供给公司、印度石油与天然气公司等5 个国家9 个机构共同参与投资，是该区有史以来的首次天然气水合物开采试验，也是世界上首次这样大规模对天然气水合物进行的国际性合作试采研究。

**阿拉斯加北部斜坡区天然气水合物开采试验**

美国阿拉斯加北部普拉德霍湾—库帕勒克河地区，位于阿拉斯加北部斜坡地带。1972年阿科石油公司和埃克森石油公司在普拉德霍湾[油田](https://baike.baidu.com/item/%E6%B2%B9%E7%94%B0)钻探常规油气井时于664～667m层段采出了天然气水合物岩心。其后在阿拉斯加北部斜坡区进行了大量天然气水合物研究。在此基础上，2003年在该区实施了一项引人注目的天然气水合物试采研究项目。该项目由美国Anadarko石油公司、Noble公司、Mau2rer技术公司以及美国能源部甲烷水合物研究与开发计划处联合发起，目标是钻探天然气水合物研究与试采井———热冰1井。这是阿拉斯加北部斜坡区专为天然气水合物研究和试采而钻的第一口探井。

# 开采中的环境问题

天然气水合物藏的开采会改变天然气水合物赖以赋存的温压条件，引起天然气水合物的分解。在天然气水合物藏的开采过程中如果不能有效地实现对温压条件的控制，就可能产生一系列环境问题，如温室效应的加剧、海洋生态的变化以及海底滑塌事件等。

（1）甲烷作为强温室气体，它对大气辐射平衡的贡献仅次于二氧化碳。一方面，全球天然气水合物中蕴含的甲烷量约是大气圈中甲烷量的3 000倍；另一方面，天然气水合物分解产生的甲烷进入大气的量即使只有大气甲烷总量的0.5 %，也会明显加速全球变暖的进程。因此，天然气水合物开采过程中如果不能很好地对甲烷气体进行控制，就必然会加剧全球温室效应。除温室效应之外，海洋环境中的天然气水合物开采还会带来更多问题。①进入海水中的甲烷会影响海洋生态。甲烷进入海水中后会发生较快的微生物氧化作用，影响海水的化学性质。甲烷气体如果大量排入海水中，其氧化作用会消耗海水中大量的氧气，使海洋形成缺氧环境，从而对海洋微生物的生长发育带来危害。②进入海水中的甲烷量如果特别大，则还可能造成海水汽化和海啸，甚至会产生海水动荡和气流负压卷吸作用，严重危害海面作业甚至海域航空作业。

（2）开采过程中天然气水合物的分解还会产生大量的水，释放岩层孔隙空间，使天然气水合物赋存区地层的固结性变差，引发地质灾变。海洋天然气水合物的分解则可能导致海底滑塌事件。研究发现，因海底天然气水合物分解而导致陆坡区稳定性降低是海底滑塌事件产生的重要原因。钻井过程中如果引起天然气水合物大量分解，还可能导致钻井变形，加大海上钻井平台的风险。

（3）如何在天然气水合物开采中对天然气水合物分解所产生的水进行处理，也是一个应该引起重视的问题。

**中国首次海域可燃冰试采**

2017年7月，中国海域天然气水合物首次试采圆满成功，取得了持续产气时间最长、产气总量最大、气流稳定、环境安全等多项重大突破性成果，创造了产气时长和总量的世界纪录。截至7月9日14时52分，中国天然气水合物试开采连续试气点火60天，累计产气30.9万立方米，平均日产5151立方米，甲烷含量最高达99.5%。获取科学试验数据647万组，为后续的科学研究积累了大量的详实可靠的数据资料。

# 主要危害

天然气水合物在给人类带来新的能源前景的同时，对人类生存环境也提出了严峻的挑战。天然气水合物中的甲烷，其温室效应为CO2的20倍，而全球海底天然气水合物中的甲烷总量约为地球大气中甲烷总量的3000倍，若有不慎，让海底天然气水合物中的甲烷气逃逸到大气中去，将产生无法想象的后果。而且固结在海底沉积物中的水合物，一旦条件变化使甲烷气从水合物中释出，还会改变沉积物的物理性质，极大地降低海底沉积物的工程力学特性，使海底软化，出现大规模的海底滑坡，毁坏海底工程设施，如：海底输电或通讯电缆和海洋石油钻井平台等。

天然可燃冰呈固态，不会像石油开采那样自喷流出。如果把它从海底一块块搬出，在从海底到海面的运送过程中，甲烷就会挥发殆尽，同时还会给大气造成巨大危害。为了获取这种清洁能源，世界许多国家都在研究天然可燃冰的开采方法。科学家们认为，一旦开采技术获得突破性进展，那么可燃冰立刻会成为21世纪的主要能源。

# 制备方法

“可燃冰”的开采方法主要有热激化法、减压法和置换法三种。开采的最大难点是保证井底稳定，使甲烷气不泄漏、不引发温室效应。

开采方案主要有三种。第一是热激化法。利用“可燃冰”在加温时分解的特性，使其由固态分解出甲烷蒸汽。但此方法难处在于不好收集。海底的多孔介质不是集中为“一片”，也不是一大块岩石，而是较为均匀地遍布着。如何布设管道并高效收集是急于解决的问题。

方案二是减压法。有科学家提出将核废料埋入地底，利用核辐射效应使其分解。但它们都面临着和热解法同样布设管道并高效收集的问题。

方案三是“置换法”。研究证实，将CO2液化，注入1500米以下的洋面，就会生成二氧化碳水合物，它的比重比海水大，于是就会沉入海底。如果将CO2注射入海底的甲烷水合物储层，因CO2较之甲烷易于形成水合物，因而就可能将甲烷水合物中的甲烷分子“挤走”，从而将其置换出来。

# 鉴别方法

天然气水合物可以通过底质沉积物取样、钻探取样和深潜考察等方式直接识别，也可以通过拟海底反射层（BSR）、速度和震幅异常结构、地球化学异常、多波速测深与海底电视摄像等方式间接识别。下面介绍一些间接标志。

**地震标志**

海洋天然气水合物存在的主要地震标志有拟海底反射层（BSR）、振幅变形（空白反射）、速度倒置、速度-振幅异常结构（VAMP）。大规模的甲烷水合物聚集可以通过高电阻率（>100欧米）声波速度、低体积密度等号数进行直接判读。

BSR是地震剖面上的一个平行或基本平行于海底、可切过一切层面或断层的反射界面，天然气水合物稳定带之下还常圈闭着大量的游离甲烷气体，从而导致在地震反射剖面上产生BSR。现已证实，BSR代表的是气体水合物稳定带的基底，其上为固态的水合物层段，声波速率高，其下为游离气或仅孔隙水充填的沉积物，声波速率低，因而在地震剖面上形成强的负阻抗反射界面。因此，BSR是由于低渗透率的水合物层与其下大量游离天然气及饱和水沉积物之间在声阻抗（或声波传播速度）上存在较大差别引起的。因为水合物层的底界面主要受所在海域的地温梯度控制，往往位于海底以下一定的深度，因此BSR基本平行于海底，被称为“拟海底反射层”。BSR除被用来识别天然气水合物的存在和编制水合物分布图外，还被用来判明天然气水合物层的顶底界和产状，计算水合物层深度、厚度和体积。

然而，并不是所有的水合物都存在BSR。在平缓的海底，即使有天然气水合物，也不易识别出BSR。BSR常常出现在斜坡或地形起伏的海域。另外，也并不是所有的BSR都对应有天然气水合物。在极少数情况下，其它因素也可能导致BSR.还应注意的是，尽管绝大部分水合物层都位于BSR之上，但并不是所有的水合物层都位于BSR之上，这已被深海钻探证明。因此，BSR不能被作为天然气水合物的唯一标志，应结合其它方法综合判断。近几年，分析和研究地震的速度结构成为该学科领域的前沿。水合物层是高速层，其下饱气或饱水层是低速层。在速度曲线上，BSR界面处的速度会出现突然降低，表现出明显的速度异常结构。此外，分析振幅结构也可识别天然气水合物。相比而言，水合物层是刚性层，其下饱气或饱水层是塑性层，在振幅曲线上，BSR界面处的振幅会出现突然减小，表现出明显的振幅异常结构。这些方法对海底平缓的海域来说，尤其显的重要。

**地球化学标志**

浅层沉积物和底层海水的甲烷浓度异常高、浅层沉积物孔隙水Cl-含量（或矿化度）和δ18O异常高、出现富含重氧的菱铁矿等，均可作为天然气水合物的地球化学标志。

**海底地形地貌标志**

在海洋环境中，水合物富集区烃类气体的渗逸可在海底形成特殊环境和特殊的微地形地貌。天然气水合物的地貌标志主要有泄气窗、甲烷气苗、泥火山、麻点状地形、碳酸盐壳、化学合成生物群等。在最近几年德国基尔大学　Geomar研究所通过海底观测，在美国俄勒冈州西部大陆边缘Cascadia水合物海台就发现了许多不连续分布、大小在5cm2左右的水合物泄气窗，泄气窗中甲烷气苗一股一股地渗出，渗气速度为每分钟5公升。在该渗气流的周围有微生物、蛤和碳酸盐壳。

# 经济影响

全球天然气水合物的储量是现有天然气、石油储量的两倍，具有广阔的开发前景，美国、日本等国均已经在各自海域发现并开采出天然气水合物，据测算，中国南海天然气水合物的资源量为700亿吨油当量，约相当中国陆上石油、天然气资源量总数的二分之一。

**中国在可燃冰开采领域**

在人类日益为能源所困的今天，可燃冰的成功试采自然是万众瞩目。此次我国在全球范围内首次成功试开采，实现了六大技术体系二十项关键技术自主创新。但这仅是万里长征迈出关键性一步，未来要实现产业化和商业化开采，仍有长路要走——

6月9日，经济日报·中国经济网记者乘坐直升机从珠海起飞，在浩瀚的南海上空飞行一个半小时后，稳稳降落在一个屹立于海面的庞然大物上——“蓝鲸一号”钻井平台。

这是一座37层楼高的大家伙，是我国自主建造的目前世界最大作业水深、最深钻井深度的半潜式钻井平台。近来这里正吸引着全世界的目光，我国在这里成功实现了可燃冰的试开采。

可燃冰，简而言之，即可以燃烧的冰块，学名为“天然气水合物”，是由甲烷为主的有机分子被水分子包裹而成，其热值约相当于石油的1/6，燃烧后只生成二氧化碳和水，储量据称可供人类使用千年。

在人类日益为能源所困的今天，可燃冰的成功试采自然是万众瞩目。因此，5月18日，我国宣布试采可燃冰成功，成为全球首个海域可燃冰试采获得连续稳定气流的国家后，夸赞和质疑扑面而来。有人说，可燃冰开采没那么容易，环保是否过关得打个问号。还有人认为，开采成功后很快将产业化，资本市场上沾些边的股票随之一飞冲天。

记者此番前来，就是要一探究竟，我们可以安全环保地开采可燃冰吗？技术上我们能在全球实现领跑吗？产业化究竟还有多长的路要走？

环境保护处在优先位置

从“蓝鲸一号”钻井平台往海中望去，蔚蓝的海面上波光粼粼，时不时有硕大的鱼跳跃出来。

可燃冰被誉为“未来的能源”。1立方米的固体可燃冰分解后可释放出164立方米标准状况的气态天然气，只相当于1/6立方米的液体或固体天然气，因此热值只相当于石油的约1/6。

但是，可燃冰开采难度之大也是业界公认的。可燃冰靠低温高压封存，如温度升高，水合物中的甲烷可能溢出；或者如冰块消融、压力回升，一旦控制不当，可能造成海底滑坡等地质灾害。

中国地质调查局总工程师严光生说，对于这两个难点，试采前就已经充分考虑、反复论证，部署了多个监测点实时监测，目前周边气体和海底地形都没有变化。

据了解，在试采前，中国地质调查局开展了10余个航次的环境基线调查，获取了海洋地质、海洋生物、海水化学等本底数据，以及海底地层力学参数等。在试采过程中，按照国际环境管理体系、工艺安全风险管理等标准，采取了严格的环境保护措施。

试采现场指挥部办公室副主任陆敬安说，试采过程中，通过大气、海水、海底和井下四位一体监测体系，对甲烷、二氧化碳等及海底沉降实行了实时监测。与本底数据对比显示，甲烷无异常变化，海底地形无变化，没有环境污染，未发生地质灾害。同时，我国第一台4500米作业级水下机器人“海马号”潜入海底，也没有发现海底地形变化和甲烷泄漏。

“蓝鲸一号”钻井平台长117米，宽度也有近百米。甲板很是开阔，试采现场指挥部办公室副主任谢文卫告诉记者，这个钻井平台配有双钻塔，可分别作业，井下环境监测仪，可实时监测数据，试采结束后，将一并取出。

陆敬安表示，试采结束后，还将继续进行全方位的立体环境监测，为制定天然气水合物开采的环境保护方案提供科学依据。

实现多项理论技术突破

在“蓝鲸一号”钻井平台外，一个熊熊火炬耀眼地燃烧着。为安全起见，巨大的水幕把火炬和平台隔开。这个火炬燃烧的，就是从水深1266米海底以下200多米开采出来的天然气。

广州海洋局总工程师杨胜雄说，这是全球首次实现泥质粉砂型可燃冰的安全可控开采。这种类型的可燃冰，资源量占全球90%以上，开发难度最大。

据介绍，此次试采中我国实现了六大技术体系二十项关键技术自主创新。第一，防砂技术3项。包括“地层流体抽取”、未成岩超细储层防砂和天然气水合物二次生成预防技术。第二，储层改造技术3项。包括储层快速精细评价、产能动态评价等技术。第三，钻井和完井技术3项。包括窄密度窗口平衡钻井、井口稳定性增强和井中测试系统集成技术。第四，勘查技术4项。包括4500米级无人遥控潜水器探测、保压取样、海洋高分辨率地震探测和海洋可控源电磁探测技术等。

目前，不少大国在可燃冰领域开展角逐。其中，美国5月12日宣布，正在墨西哥湾开展可燃冰开采研究。2013年，日本在南海海槽开展了海上试采，但因出砂等技术问题失败。2017年4月份日本在同一海域第二次试采，5月15日再次因出砂问题中止产气。

有关专家表示，可燃冰是未来全球能源发展的战略制高点，我们在全球率先试采成功，实现了在这一领域的领跑而不是跟随。

产业化仍有长路要走

可燃冰在全球主要分布在两类地区：一是水深300米至3000米的海底；二是陆上冻土区，尤其是南北极冻土区。有预测显示，全球天然气水合物资源量相当于21万亿吨油当量。

试采现场指挥部办公室主任邱海峻表示，我国海域天然气水合物资源量约800亿吨油当量。通过重点地区普查，已经圈定11个有利远景区，19个成矿区带。经过钻探验证圈定了两个千亿方级的矿藏。

有关专家表示，此次我国在全球范围内实现首次成功试开采，仅是万里长征迈出关键性一步，未来要实现产业化和商业化开采，仍有长路要走。

邱海峻表示，今后将围绕加快推进产业化进程的目标，争取神狐海域试采成果最大化。同时，继续加大天然气水合物资源调查力度，开展重点目标区的详查，提供2个至4个大型资源基地，为推进产业化奠定资源基础。此外，开展不同类型天然气水合物试采，把加强环境保护放在突出位置。

他表示，基于中国可燃冰调查研究和技术储备的现状，预计我国在2030年左右有望实现可燃冰的商业化开采

1. 别称：可燃冰、甲烷水合物、笼形包合物 [↑](#footnote-ref-1)