

神奇可燃冰





# 可燃冰是什么？

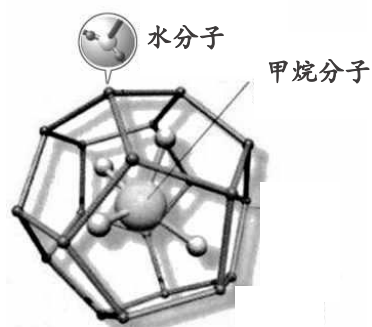
**可燃冰**，顾名思义形状像冰一样的固体，点火能燃烧，是一种非常规能源。是由天然气与水在高压低温条件下结晶形成的固态混合物，又叫**天然气水合物**或固体气。（图1上为实验室合成的可燃冰点火实验；图1下为天然开采的可燃冰实物）

天然气水合物的基本结构特征是主体水分子通过氢键在空间相连，形成一系列不同大小的多面体孔穴，这些多面体孔穴或通过顶点相连，或通过面相连，向空中发

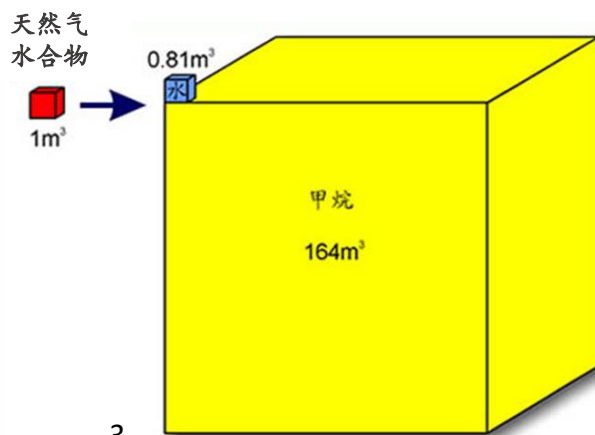
展形成**笼型水合物晶格**。（图2）如果不考虑客体分子，空的水合物晶格如果不考虑客体分子，空的水合物晶格可以被认为是一种不稳定的冰。当这种不稳定冰的孔穴被客体分子填充后，它就变成了稳定的气体水合物。

充填甲烷的可燃冰1m<sup>3</sup>可产生164m<sup>3</sup>甲烷气体和0.81m<sup>3</sup>的水。

（图3）其能量密度是煤和黑色页岩的10倍左右，是常规天然气能量密度的2-5倍，**资源潜力十分惊人**。



2



3



1



# 可燃冰

## 形成条件

首先，温度不能太高，零度以上， $0-10^{\circ}\text{C}$ 为宜，最高限是 $20^{\circ}\text{C}$ ，在高就会分解；其次压力要够，但也不能太大，零度时，30个标准大气压以上它就能生成。除此之外，地底有气源也是必要条件，只有在物质来源充分的情况下，气体才能和结合形成水合物。

## 在哪里

永久冻土带  
海底沉积物

图4.海底可燃冰出露区域形貌

# 永久冻土带可燃冰埋藏

**永久冻土带**是指持续多年冻结的土石层。可分为上下两层：上层每年夏季融化，冬季冻结，称活动层，又称冰融层；下层常年处在冻结状态，称**永冻层**或多年冻层。

**性质与结构：**1、永冻层一般分布在地下30~40厘米处，通常又分为上下两层，上层夏季融化，下层仍处于冰冻状态；2、永久冻土地带的泥土不一定有水分；3、一般的冻土层在气候回暖或受到强压时，冻土内的冰会溶解成为水；但永久冻土的所在之处，即使在天气回暖之时，气温仍然在冻点以下，使冻土内的冰不能再次溶解成为水，其持续冰冻时间可长达1000年以上。



**形成条件：**永久冻土的形成，需要同时具备以下两个必要条件：**气温要很低**，如果年平均气温高于零度，虽然可以形成季节性冻土，却无法形成永久冻土；**持续时间较长**，研究发现，北极地区的冻土层一般都有几百米厚，而大气的低温要传导到地表以下几百米的深度，要用几百、几千年甚至更长的时间才能完成。

地球上的永久冻土约占陆地面积的20%，从世界永久冻土分布来看，主要分布在欧洲、亚洲的北部、北美洲、北冰洋浅大陆架以及中低纬度地区的高山、高原。

中国永久冻土的面积较广。高纬度永久冻土主要集中分布在大小兴安岭。高海拔永久冻土分布在青藏高原、阿尔泰山、天山、祁连山、横断山、喜马拉雅山，以及东部某些山地，如长白山、黄岗梁山、五台山、太白山等。

图5.祁连山冻土层发现可燃冰



图6.喜马拉雅山脉冻土层





7



8

## 海底沉积物可燃冰埋藏

可燃冰一般分布在海底以下300m深度范围内的浅表层沉积物中，从目前钻遇水合物的海区来看，主要集中在大陆边缘海域沉积物中，该区域接受了河流等方式输送的大量有机质，为天然气水合物的形成提供了充足的气源。

目前关于海底天然气水合物主要从三个方面识别，即地球物理识别标志、地球化学识别标志、海底地质识别标志。**地球物理技术**是水合物识别的最核心的技术。利用反射地震技术，在上世纪70年代就发现了似海底反射层（BSR）。BSR具有与海底大体平行、与海底反射波极性相反、强振幅的特点。这是由于BSR上部地层含有的天然气水合物波速高，而下伏地层含有游离气体波速低引起的。因而BSR对于天然气水合物的识别具有十分重要的意义。**地球化学方法**的重要性在于可以弥补地球物理手段带来的多解性不足。而地球化学主要是通过海底钻探获取沉积物岩芯，进行相关分析，通常如果获取的沉积物中含有

较高含量的甲烷，可以反映该区域可能存在天然气水合物，此外很多元素含量及同位素组成的变化也对天然气水合物有较强的指示意义。

而对于天然气水合物最直观的识别方式是**海底地质地貌观测**。由于天然气水合物的不稳定性，导致甲烷容易分解向上扩散，从而在海底形成独特的地貌与生物群落，其中最典型的是**麻坑**、**冷泉**。

**麻坑**是超压流体渗漏到海底形成的凹地，其在平面上多呈圆形或椭圆形，直径从数米到数千米，深度为数米到数百米。**冷泉**是冷泉流体由深部向上渗漏过程中，在海底附近发生的物理、化学、生物作用的产物。代表产物主要有**冷泉碳酸盐岩**（图7）；**化能自养生物群落**：包括席菌、深海双壳类及蠕虫（图8）。



# 中国在南海海域连续稳定 试开采可燃冰成功！



图10. 加拿大极地冻土区可燃冰开采



图11. 刚开采出的可燃冰样品

# 可燃冰开采方法

可燃冰具有不稳定性质，在常规温度与压力状态下，非常容易分解，所出现的温室效应大于二氧化碳的10~20倍。根据相关估计，在可燃冰当中，固化的甲烷的整体数量等于大气当中甲烷数量的3000倍。依据相关数据显示得出，可燃冰可通过减少水合物所面临的压力、升高水合物的环境温度，借助化学方式调整变相，平衡曲线完成对天然气水合物的分解工作。以下是对可燃冰的开发方式展开的具体探究。

**二氧化碳置换法：**部分专业研究人员提出使用二氧化碳置换开采的方式。把二氧化碳通到天然气水合物储层当中，借助构成二氧化碳水合物流放的热量来分解天然气水合物，与此同时，可应用对工业排放的二氧化碳，有助于实现低碳经济。

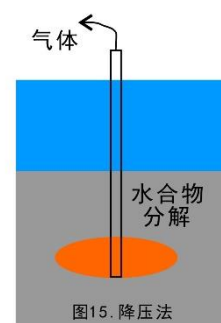
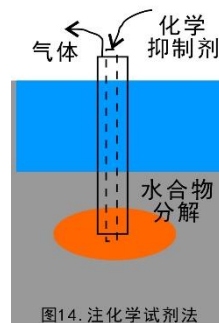
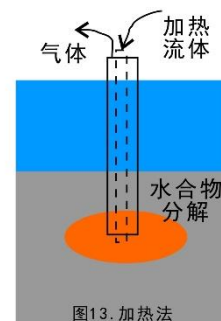
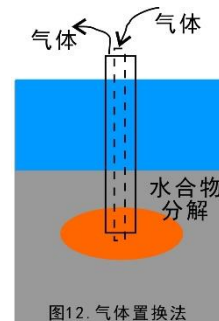
**加热法：**热激发法是加热法的另外一种称呼。具体是把热水、蒸汽以及热盐水或者是另外热流体在地面泵入水合物地层当中，实施微波加热或者是电磁加热，使水合物分解、

温度提升。这种方式比较适用于水合物层相对较密集的水合物藏的开发。假设水合物之中每水合物层间有非常厚的夹层，那么不适合使用这种方式进行开发工作。这种方式的弊端是会出现诸多热损失，效率低下。甲烷蒸汽不容易收集。尤其是永久冻土带，即便是应用绝热管道，永冻层会减少传递给储层的有效热量。因此，降低热量损失，科学分配管道，与此同时高效聚集甲烷蒸汽，是当前最应该处理的状况。

**增添化学试剂的方法：**借助在井孔向水合物储层泵入化学试剂，譬如丙三醇、盐水甲醇，调整水合物构成的相平衡因素，减少水合物稳固温度，使水合物获得分解。化学试剂方式的作用力比热激发方式慢，需要较高的资金成本，但是其优势是，能够减少最初能源输入。

**降压法：**借助减少压力的方式，使天然气水合物分解。通常是在水合物层以下的游离气聚集层当中减少天然气压力或者构成天然气空腔，

促使和天然气相融合的水合物呈现不稳定的状况，与此同时分解成水与天然气。在使用降压方式中，不具备额外热量注射到水合物的开采层当中的状况，稀释所吸收的容量的提供单位务必是附近的物质，但在水合物稀释吸收的热量到达一定标准后，水合物附近环境温度减少会阻止水合物的更进一步稀释。





# 可燃冰研究历程与进展

## 世界天然气水合物研究历程回顾：

从1810年英国Davy在实验室首次发现气水合物和1888年Villard人工合成天然气(甲烷)水合物后,人类就再没有停止过对气水合物的研究和探索。在这将近200年的时间内,全世界对天然气水合物的研究大致经历了3个阶段。

**第一阶段**是从1810年Davy合成氯气水合物和次年对气水合物正式命名并著书立说到20世纪30年代初。在这120年中,对气水合物的研究仅**停留在实验室**,且争议颇多。

自美国Hammerschmidt1934年发表了关于水合物造成输气管道堵塞的有关数据后,人们开始注意到气水合物的工业重要性,从负面加深了对气水合物及其性质的研究。这就是气水合物研究史上的**第二个阶段**。在这个阶段,研究主题是工业条件下水合物的预报和清除、水合物生成阻化剂的**研究和应用**。

第三个阶段是从20世纪60年代开始

把气体水合物**作为一种能源**进行全面研究和实践开发,世界各地科学家对气水合物的类型及物化性质、自然赋存和成藏条件、资源评价、勘探开发手段以及气水合物与全球变化和海洋地质灾害的关系等进行了广泛而卓有成效的研究。

**国内研究进展：**我国对气水合物的研究起步较晚。1990年中国科学院兰州冰川冻土研究所冻土工程国家重点实验室人工合成了甲烷水合物并对其性质进行了分析。1992年以后,我国陆续出现了系统介绍天然气水合物的文献;1995年加入大洋钻探计划;2002年,国家863计划关于水合物的专项启动;2005年,中德合作发现九龙甲烷礁;2007年,国土资源部在我国南海神弧海域钻探取样得到天然气水合物岩芯;2009年,在我国祁连山冻土带发现水合物;此后,广州地质海洋调查局对南海进行多次勘探,终于在2017年7月在**神弧海域试开采可燃冰成功**,使得中国可燃冰研究居于世界领先地位。



图16.依次是姚伯初、吴能友、李小森、樊栓狮教授

# 可燃冰研究的意义

作为“后石油时代”最有希望的战略资源，天然气水合物（可燃冰）**分布非常广泛**。据统计，全球已累计发现超过230个天然气水合物矿区。我国天然气水合物资源主要分布在南海、东海海域、青藏高原以及东北冻土带。

天然气水合物**储量十分丰富**，有专家估计，全球天然气水合物资源量可达2万万亿立方米，其碳含量超过所有已探明化石燃料碳含量总和的两倍。由于天然气水合物具有非渗透性，常常可以作为其下层游离天然气的封盖层，因此实际天然气蕴藏量可能会更大。据美国水合物能源国际评价，全球砂岩中较高饱和度水合物地质储量中值为1230万亿立方米。在海底区域，天然气水合物的分布面积达4000万平方千米，占地球海洋总面积的1/4。粗略估算，我国天然气水合物资源总量约为84万亿立方米，其中南海海域、东海海域分别约为65万亿立方米和3.4万亿立方米，陆上青藏高原、东北冻土带分别为12.5万亿立方米和2.8万亿立方米。

**利用清洁高效**。天然气水合物的成分与常规天然气十分相近，但更为纯净，使用方便，燃烧值高，清洁无污染。

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，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。

有专家认为，天然气水合物这种新型能源一旦得到规模开采，将使人类的燃料使用史延长几个世纪，并将缓解能源供应日益紧缺的局面，改变世界能源供给格局，改善能源消费结构，为经济社会可持续发展提供有力支撑。天然气水合物作为一种重要的潜在未来资源，很可能成为21世纪具有商业开发前景的战略资源，成为**第三次能源转型革命性的替代品**。

**但是**天然气水合物的勘探开发是一个系统工程，涉及地质、地球物理、地球化学、流体动力学、热力学、钻探工程等众多学科，而且在开采过程中会发生温压变化及相变，因此与传统的煤炭、石油和天然气等化石能源以及致密气、页岩气、煤层气等非常规资源相比，天然气水合物的开采更为不易，特别是受成本、技术、安全环保等方面的制约，至今全球范围内**尚未实现规模化商业开采**。



杨飞  
2017.10.12

