

新型洁净能源可燃冰的研究发展

张颖异, 李运刚*

(河北理工大学 冶金与能源学院, 河北 唐山 063009)

摘要: 可燃冰是天然气水合物的俗称, 是公认的 21 世纪替代能源和清洁能源, 开发利用潜力巨大, 我国已将其纳入科技重大项目 973 计划, 并已成功获得了天然气水合物的岩心样品。本文简要介绍了可燃冰的储量、分布和研究现状, 重点介绍了可燃冰的开采方法以及开采过程中的难点问题。其中, 减压法和综合法是现有水合物开采技术中经济前景比较好的开采技术。最后对可燃冰的发展前景做了展望, 认为 2015—2020 年发达国家实现工业规模开采天然气水合物在技术上是可行的, 但要实现商业开采则值得探讨。

关键词: 可燃冰; 清洁能源; 开采方法; 减压法; 综合法

中图分类号: F407.1

文献标识码: A

文章编号: 1673-2464(2011)03-0050-06

RESEARCH ADVANCES OF FLAMMABLE ICE AS A NEW CLEAN ENERGY

ZHANG Ying-yi, LI Yun-gang*

(School of Metallurgy and Energy, Hebei Polytechnic University, Tangshan 063009, China)

Abstract: Flammable ice is commonly known as gas hydrates, which is regarded as an alternative and clean energy in the 21st century, with a huge potential for development and utilization, China has brought it into national key scientific and technological program (973 Program), and has successfully obtained a core sample of gas hydrate. This paper briefly introduces the reserves, distribution and development research status of flammable ice, with a focus on the mining methods and issues in mining, and finally gives prospects on the development of flammable ice in the future.

Key words: flammable ice; clean energy; mining method; decompression method; comprehensive method

1 概述

可燃冰存在于海底或陆地冻土带内, 具有非常高的使用价值, 1 m³可燃冰等于 164 m³的常规天然气藏, 是其他非常规气源岩(如煤层、黑色页岩)能量密度的 10 倍, 是常规天然气能量密度的 2~5 倍^[1]。据保守估算, 世界上天然气水合物所含的有机碳的总资源量, 相当于全球已知煤、石油和天然气总量的 2 倍。其主要成分是甲烷, 燃烧后几乎没有污染, 是一种绿色的新型清洁能源。可燃冰主要分布在海底以下 0~1 500 m 深的大陆架或北极等地

的永久冻土带。根据我国海洋地质调查部门的调查, 发现南海北部具有良好的可燃冰资源前景, 并将南海可燃冰富集规律与开采基础研究纳入了 973 计划, 标志着中国对替代能源可燃冰重大基础研究已全面展开。目前, 对可燃冰的研究发展已经引起了各国政府和能源专家的广泛关注。

2 可燃冰简介

可燃冰又叫天然气水合物, 主要成分是甲烷与水分子, 是由天然气与水在高压低温条件下结晶形成的具有笼状结构的似冰状结晶化合物, 气体分子

收稿日期: 2010-05-03; 修订日期: 2011-03-26; 责任编辑: 刘英姿。

第一作者简介: 张颖异(1985—), 男, 硕士生, 主要从事资源能源的综合利用研究。E-mail: 15931909258@163.com

* 通讯作者: 李运刚(1958—), 男, 博士、教授, 主要从事资源能源的综合利用研究。E-mail: lyg@heut.edu.cn

多以甲烷为主 (>90%)，所以也被称为甲烷水合物 (Methane Hydrates)^[2]。纯净的天然水合物呈白色，形似冰雪，可以像固体酒精一样直接被点燃，因此，又被形象地称为“可燃冰”。其形成有两条途径：一是气候寒冷致使矿层温度下降，加上地层的高压力，使原来分散在地壳中的碳氢化合物与地壳中的水形成气—水结合的矿层；二是由于海洋里大量的生物和微生物死亡后留下的遗尸不断沉积到海底，并分解成甲烷、乙烷等有机气体，有机气体钻进海底结构疏松的沉积岩微孔，与水形成笼状包合物^[3-4]，是在独特的低温、高压条件下形成的一个甲烷分子周围若干个水分子固态凝聚物，其分子结构如图1所示。目前，全球天然气水合物分布明显呈现受地理格局控制的特点。主要存在于世界范围内的沟盆体系、陆坡体系、边缘海盆陆缘，尤其是与泥火山、热水活动、盐泥底辟及大型断裂构造有关的深海盆地中；另外还包括扩张盆地和北极地区的永久冻土区，大西洋的85%、太平洋的95%和印度洋的96%的地区中也含有天然气水合物，并且主要分布于海平面下200~600 m的深度内^[5-6]。其主要勘探方法有地球物理法、地球化学法、标型矿物法和自生沉积矿物学法等，采用多学科综合勘探是天然气水合物勘探的发展方向。

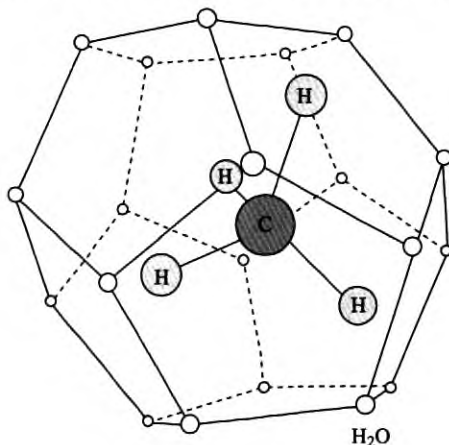


图1 可燃冰的结构图

3 可燃冰的储量

目前，世界上有79个国家和地区都发现了天然气水合物气藏。各国科学家对全球天然气水合物资源量较为一致的评价为 $2 \times 10^{16} \text{ m}^3$ ，是剩余天然气储量 ($156 \times 10^{14} \text{ m}^3$) 的128倍^[7]。据第28届国

际地质大会提供的资料显示，海底有大量存在的天然气水合物，可满足人类1000年的能源需要。同时，我国对可燃冰的重大基础研究也已全面展开，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。仅南海北部陆坡的可燃冰资源量就达185亿t油当量，相当于南海深水勘探已探明的油气地质储备的6倍^[8]。并且已经在南海部神狐海域获取了天然气水合物的岩心样品，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。标志着我国天然气水合物调查研究水平一举步入了世界先进行列^[9]，以下是南海有利的天然气水合物勘探远景区块及范围，见表1。

表1 南海有利的天然气水合物

勘探远景区块及范围	10 ⁴ km ²
区块	面积
台西南	2.4 ± 0.3
东沙南	1.3 ± 0.2
神狐东	0.7 ± 0.1
西沙海槽	0.6 ± 0.1
西沙北	0.8 ± 0.1
西沙南	0.6 ± 0.1
中建南	1.3 ± 0.2
万安北	0.7 ± 0.1
北康北	2.6 ± 0.3
南沙中	0.8 ± 0.1
礼乐东	0.7 ± 0.1
合计	12.5 ± 1.7

据中国科学数字馆的测算，在全球有机碳总含量中，可燃冰竟超过50%，总储量达10万亿t^[10]，是全球煤、石油和天然气总和的2~3倍。世界各大洋中已发现的可燃冰总资源碳热量为2.0亿亿m³，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倍左右^[11]。仅我国，已初步探明的海域至少有 $7 \times 10^{10} \text{ t}$ 可燃冰资源，相当于陆上石油、天然气资源总量的50%。

4 可燃冰的分布

科学家们公认，可燃冰在世界范围内有广泛存在的可能性，在陆地上，大约有27%的面积是可

以形成可燃冰的潜在地区,而大洋水域中90%的面积也属这样的潜在区域。海底可燃冰分布的范围约为 $4 \times 10^7 \text{ km}^2$,占海洋总面积的10%,海底可燃冰的储量够人类使用1 000年。图2是可燃冰的世界分布图^[10]。

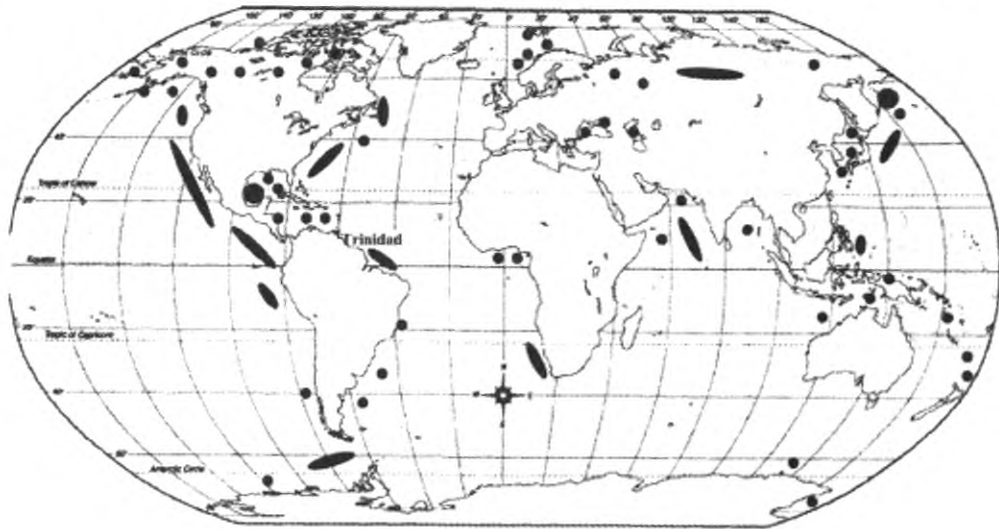


图2 可燃冰的世界分布图

注:黑点为可燃冰分布位置

我国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 $64.97 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 、 $3.38 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 、 $12.5 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 和 $2.8 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ^[12]。其中,南海北部陆坡的可燃冰资源量达185亿t油当量,相当于南海深水勘探已探明的油气地质储备的6倍,达到我国陆上石油总量的50%。此外,在西沙海槽已初步圈出可燃冰分布面积为5 242 km^2 ,其资源估算达4.1万亿 m^3 。而且,在我国东海和台湾省海域也存在大量可燃冰。经海内外专家学者多年探测研究,证实中国台湾省西南面积约77 000 km^2 的海域蕴藏着极为丰富的可燃冰球。据科学家粗略估算,远景资源量至少有350亿t油当量^[13]。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。

5 可燃冰的开采方法

由于可燃冰非常不稳定,在常温和常压环境下极易分解,所产生的温室效应要比二氧化碳高10~20倍。据测算,在可燃冰中固化的甲烷总量相当于大气中甲烷数量的3 000倍。一旦沉睡中的可

燃冰矿藏受到扰动,包括人为的开采和自然的破坏,都可能导致甲烷气体大量逃逸到大气中,从而导致无法想象的后果。对此,科学家们表示出了担忧:对于可燃冰矿藏开采的破坏,可能导致甲烷气体大量泄漏,释放到大气层中,造成海啸、海底

滑坡、海水毒化、全球气候变暖等灾害。所以目前对可燃冰的开采仍处于试验阶段,主要的开采方法有加热法、减压法、添加化学试剂法、 CO_2 置换法和综合法^[14]。从天然气水合物的相平衡(图3)角

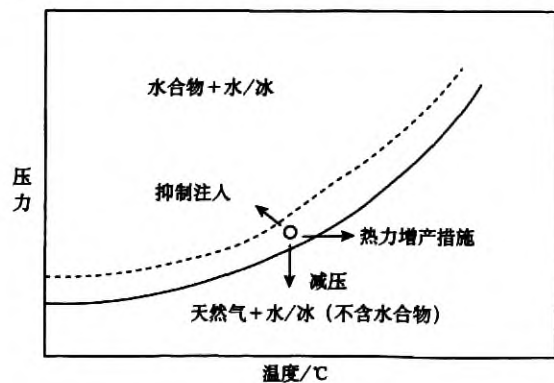


图3 天然气水合物分解机理

度可以看出,升高水合物的环境温度、降低水合物所处的压力、通过化学方法改变相平衡曲线等都可以实现天然气水合物的分解^[15]。

5.1 加热法

加热法又称热激发法,是将蒸汽、热水、热盐

水或其他热流体从地面泵入水合物地层，进行电磁加热和微波加热，促使温度上升、水合物分解（图4）。该法更适用于对水合物层比较密集的水合物藏进行开采，如果水合物藏中各水合物层之间存在很厚的夹层，则不宜用此方法进行开采。该方法的主要缺点是会造成大量的热损失，效率很低，甲烷蒸汽不好收集。特别是在永久冻土带，即使利用绝热管道，永冻层也会降低传递给储层的有效热量。所以，减小热量损失、合理布设管道并高效收集甲烷蒸汽是急于解决的问题。

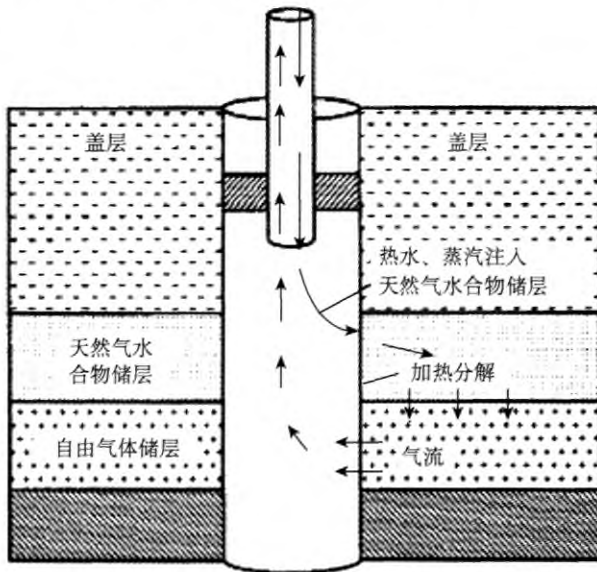


图4 加热法开采原理图

5.2 减压法

减压法是通过降低压力而使天然气水合物稳定的相平衡曲线移动，从而达到促使水合物分解的目的。一般是在水合物层之下的游离气聚集层中降低天然气压力或形成一个天然气空腔（可由热激发或化学试剂作用人为形成），使与天然气接触的水合物变得不稳定并且分解为天然气和水（图5）。在该方法中，由于没有额外的热量注入水合物开采层，分解所吸收的热量必须由周围物质提供，但是当水合物分解吸收的热量达到一定程度，水合物周围环境温度降低会抑制水合物的进一步分解^[16]。研究表明，这种方法在气体全面分解过程中有利于控制开采气体的流量，适合于那些储藏中存在大量自由气体的水合物储层，是现有水合物开采技术中经济前景比较好的开采技术。

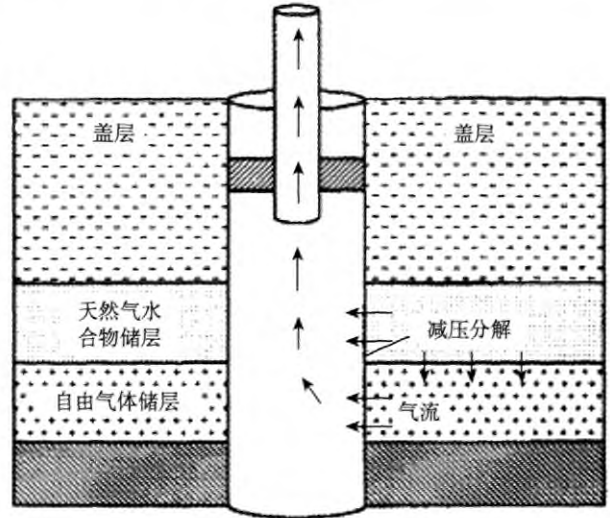


图5 减压法开采原理图

5.3 添加化学试剂法

通过从井孔向水合物储层泵入化学试剂（图6），如盐水甲醇、乙醇、乙二醇、丙三醇等^[17]，改变水合物形成的相平衡条件，降低水合物稳定温度，引起水合物的分解。化学试剂法较热激发法作用缓慢，费用昂贵，但确有降低初始能源输入的优点。

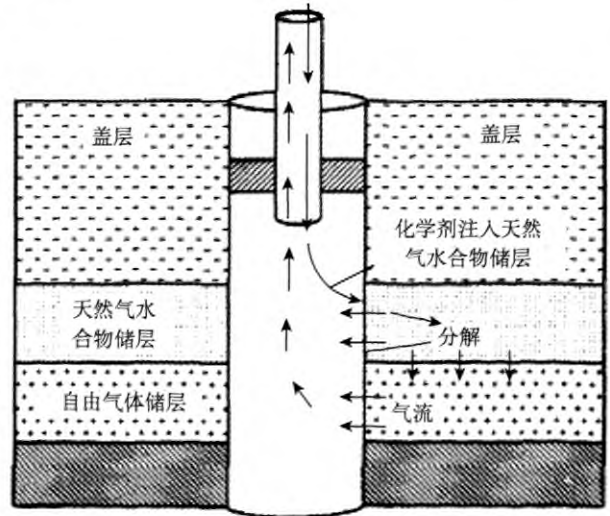


图6 添加化学试剂法开采原理图

5.4 CO₂ 置换法

近期有学者提出用CO₂置换开采（图7），将CO₂通入天然气水合物储层，通过形成二氧化碳水合物放出的热量来分解天然气水合物，同时可以用

来处理工业排放的 CO_2 ，发展低碳经济。

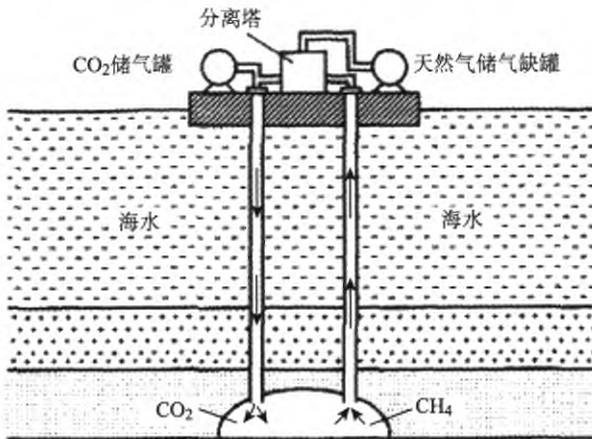


图7 CO_2 置换开采法原理

5.5 综合法

综合法是综合利用降压法和热开采技术的优点对天然气水合物进行有效开采。其具体方法是先用热激发分解天然气水合物，后用降压法提取游离气体（图8）。目前，这种方法已得到了人们的广泛推崇，已投产的俄罗斯 Messoyakha 气田和加拿大 Mackensie 气田均以该法为主要开采技术，其技术在国内具有良好的应用前景^[19]。

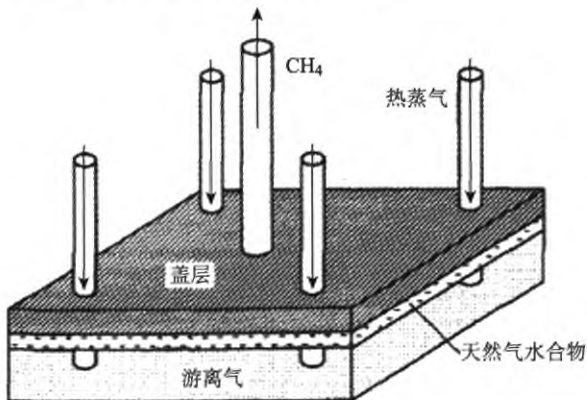


图8 综合法开采原理

6 可燃冰研究发展现状及前景

6.1 国内外可燃冰的研究发展现状

迄今，世界上至少有 30 多个国家和地区在进行可燃冰的研究与调查勘探。1960 年，前苏联在西伯利亚发现了第一个可燃冰气藏，并于 1969 年投入开发，采气 14 年，总采气 50.17 亿 m^3 。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，计划到 2015 年进行商业性试开采。日本关注可燃冰是在 1992 年，目前，已基本完成周边海域的可燃冰调查与评价，钻探了 7 口探井，圈定了 12 块矿集区，并成功取得可燃冰样本，目标是在 2012 年进行商业性试开采。我国对可燃冰的重大基础研究也已全面展开，就南海北部陆坡的可燃冰（天然气水合物）资源量达 185 亿 t 油当量，相当于南海深水勘探已探明的油气地质储备的 6 倍。并且已经在南海部神狐海域获取了天然气水合物的岩心样品。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，标志着我国天然气水合物调查研究水平一举步入了世界先进行列。

6.2 可燃冰的发展前景

天然气几乎是燃烧值最高的常规能源形态，燃烧时，1 m^3 天然气释放的热量几乎是 1 kg 煤炭的 3 倍，1 kg 汽油的 2 倍。1 m^3 可燃冰等于 164 m^3 的常规天然气藏，是其他非常规气源岩（如煤层、黑色页岩）能量密度的 10 倍，是常规天然气能量密度的 2~5 倍，粗略算下来，1 m^3 的可燃冰，其燃烧值竟约等于 0.5 t 煤炭。可满足人类 1 000 年的能源需要，这与其他常规化石能源形成了巨大的反差。据推算，目前已经发现的石油储备量还可用 40 年，天然气还可用 70 年，煤炭还可用 190 年。当全世界的石油煤炭资源将消耗殆尽的时候，可燃冰的发现，让陷入能源危机的人类看到新希望。但是，虽然全世界天然气水合物资源量非常可观，除了小型现场试验之外，目前唯一实现开采的只有俄罗斯的麦索亚哈天然气水合物气田，全球未来的天然气水合物产量尚不确定。目前，天然气水合物的研究主要集中在天然气水合物资源的勘测与评估，天然气水合物基础物理化学性质的研究、天然气水合物开采模拟与环境评价以及天然气水合物储运与利用方面。根据近年来试验性开采的成果和技术进步来看，2015—2020 年发达国家实现工业规模开采天然气水合物在技术上是可行的，但要实现商业开采则值得探讨。

7 结论

可燃冰是公认的 21 世纪替代能源和清洁能源，

开发利用潜力巨大,我国已将其纳入科技重大项目973计划,并已成功获得了天然气水合物的岩心样品。减压法和综合法是现有水合物开采技术中经济前景比较好的开采技术。目前,对可燃冰的开采仍处于试验阶段,要实现工业规模开采和商业化开采还有很长一段时间。

参考文献

- [1] 吴震. 新型洁净能源可燃冰的研发现状[J]. 节能, 2009(2): 7-8
- [2] 秦建军. 陆地天然气水合物资源及开发技术[J]. 勘探开发, 2009(4): 14-15
- [3] 龙楠. 世人瞩目中国可燃冰战略[J]. 新型能源, 2009(2): 48-51
- [4] Dawe R A, Thomas S. A large potential methane source-natural gas hydrates [J]. Energy Sources, 2007(29): 217-229
- [5] 江怀友, 乔卫杰, 钟太贤, 等. 世界天然气水合物资源勘探开发现状与展望[J]. 中外能源, 2008, 13(6): 19-24
- [6] 秦伟军. 陆地天然气水合物资源及开发技术[J]. 石油知识, 2009(4): 14-15
- [7] 邵仲妮. 天然气水合物资源分布及勘探开发进展[J]. 当代石油石化, 2007, 15(5): 24-26
- [8] 王菡娟. 南海北部探明大量可燃冰储量相当185亿吨石油[N]. 人民政协报. 2008-12-04(3)
- [9] 于兴河, 张志杰, 苏新, 等. 中国南海天然气水合物沉积成藏条件初探及其分布[J]. 地学前缘, 2004, 11(1): 311-315
- [10] Johnson A H, Max M D, Hydrate energy international, Kenner, Louisiana, USA. The path to commercial hydrate gas production [J]. The Leading Edge May, 2006(5): 648-651
- [11] Benoit Beauchamp. Natural gas hydrates: myths, facts and issues [J]. C. R. Geoscience, 2004(336): 751-765
- [12] 张金华, 魏伟, 王红岩. 天然气水合物研究进展与开发技术概述[J]. 天然气技术, 2009, 3(2): 67-69
- [13] 刘军. 我国陆域发现“可燃冰”远景资源量350亿吨油当量[EB/OL]. (2009-09-25) [2010-04-20]. http://news.xinhuanet.com/newscenter/2009-09/25/content_12111977.htm
- [14] 江怀友, 钟太贤, 齐仁理, 等. 世界可燃冰勘探开发方兴未艾[J]. 石油与装备, 2009(1): 42-43
- [15] 宋永臣, 阮徐可, 梁海峰, 等. 天然气水合物热开采技术研究进展[J]. 过程工程学报, 2009, 9(5): 1035-1040
- [16] 窦斌, 蒋国盛, 吴翔, 等. 海洋天然气水合物开采方法及产量分析[J]. 热带海洋学报, 2009, 28(3): 82-84
- [17] 宁伏龙, 蒋国盛, 汤凤林, 等. 利用地热开采海底天然气水合物[J]. 天然气工业, 2006, 26(12): 1-3
- [18] 江怀友, 乔卫杰, 钟太贤, 等. 世界天然气水合物资源勘探开发现状与展望[J]. 中外能源, 2008, 13(6): 19-25
- [19] 张志杰, 于兴河, 郑秀娟, 等. 天然气水合物的开采技术及其应用[J]. 天然气工业, 2005, 25(4): 128-130