



可燃冰

可燃冰：战略新能源

Combustible ice: Strategic new energy

■文 / 张庆阳¹ 赵洪亮²

一、概述

谈到能源，人们立即想到的是可燃烧的煤、石油，很少有人会想到晶莹剔透的冰。然而，20世纪60年代以来，人们发现了一种可以燃烧的冰。这种冰在地质上称为天然气水合物，是由水和天然气在高压、低温条件下混合而成的固态物质，外貌极像冰雪。

在全球能源日趋短缺的急迫形势下，可燃冰逐渐进入人们的视野，并引起各国政府的高度关注。

可燃冰又称为甲烷水合物，其化学成分决定了遇火即可燃烧，且燃烧后生成二氧化碳和水，被认为是能够解决人类能源危机的最具开发前景的新能源。

可燃冰的形成有三个基本条件：首先温度不能太高，一般 0°C — 10°C ，最高限是 20°C 左右，温度再高可燃冰就会分解。第二个条件压力要够，但不能太大，温度 0°C 时，30个大气压以上它就可能生成。第三个条件，要有天然气气源。

可燃冰里的甲烷占80%~99.9%，1立方米可

燃冰可转化为 164 立方米的天然气，可直接点燃，具有使用方便、燃烧值高、清洁无污染等特点，是一种高效清洁新能源。

可燃冰在常温和常压环境下极易分解释放甲烷，开采不当将明显加剧全球变暖。可燃冰这种特性需要利用安全的手段进行开采和储存。

目前，全世界拥有的常规石油、天然气，将在 40 年或 50 年后逐渐枯竭。在能源日趋短缺的急迫形势下，可燃冰逐渐进入人们的视野。据估算，世界上可燃冰所含有机碳的总资源量相当于全球已知煤、石油和天然气的两倍，可满足人类千年的能源需求，是公认的战略新资源。

可燃冰开采方法主要有注热法、降压法、注化学试剂法、气体置换法以及以上方法的联用。

注热法：注入加热流体或直接加热储层来提高可燃冰区域内温度，引起溶解。能耗大，不能有效解决热利用效率较低的缺陷。

降压法：降低压力促使可燃冰分解，该方法不需要连续激发，成本较低，适合大面积开采。是目前最有前景的一种开发技术。

注化学试剂法：向可燃冰层中注入如甲醇等化学试剂，破坏其平衡条件，促使分解。该方法所需的化学试剂成本较高，且不适合长期或大规模使用。

气体置换法：注入如二氧化碳等以置换可燃冰中的甲烷，触发甲烷气体扩散。但由于可燃冰储层渗透性较差，导致产气量较低，实际效果不佳。

目前，可燃冰开采主要使用以降压法为主，配合用注热法、注化学试剂法，这种组合方法是最可行的安全方法。俄罗斯、加拿大、日本可燃冰的开采已经证实了该方法的可行性。

二、国外可燃冰开发研究

可燃冰的开发利用目前还处于前期研究准备阶段，没有进入商业化、规模化生产。从 20 世纪 60 年代开始，前苏联、美国相继开展了可燃冰研究；70 年代初，在美国采得了世界上第一个可燃冰样品；进入 90 年代，开发利用可燃冰已成为世界各主要资源国新资源的重要选择，成为各国竞相开发的热点。目前，世界有 79 个国家和地区都发现了可燃冰资源，有 30 多个国家进行着可燃冰的开发研究。美、日可燃冰开采走在世界前列。美国、日本、韩国等国已

将可燃冰开发列入国家能源安全战略，在战略上抢占未来能源发展的制高点。

美国走在世界前沿

美国可燃冰开发研究一直走在世界前沿。20 世纪 60 年代美国便开始可燃冰研究，于 1968 年开始可燃冰深海钻探，在海底获得可燃冰实物样品。1981 年投入 800 万美元制订了可燃冰 10 年研究计划。1998 年又把可燃冰研究开发计划列入国家战略能源长远计划，每年投入 2000 万美元，重点评估在深海和极地区域的可燃冰资源，研究可燃冰如何作为美国未来重要能源。于 2006 年美国制定了可燃冰研究与开发路线图。

美国重视开发新资源可燃冰。加大政策扶持及政府资金投入，美国能源部充分发挥资金杠杆作用，在 2006—2012 年期间，共资助了数十个可燃冰新项目和延续项目。美国 2012 年在阿拉斯加北部利用二氧化碳置换甲烷进行可燃冰试开采取得成功，共注入二氧化碳和氮气混合气 21 万标准立方英尺，依靠井底压力自回流开采，采气时间 30 天，累计产气量约 2.8 万立方米，最高日产量达 5000 立方米。

日本处于相对领先地位

日本 20 世纪 80 年代开始可燃冰研究，2000 年开始着手开发海底可燃冰，开发计划分两个阶段进行，前 5 年对开采海域的蕴藏量和分布情况进行调查，从第 3 年开始就打井以备调查用，之后 5 年进行试验性采掘工作。

日本缺乏石油和天然气资源，约 95% 的能源需从国外进口，2011 年“福岛核事故”后，国内大部分核电站停止运营，能源需求与供给之间关系更为紧张，日本重视可燃冰基础性工作和关键技术研发。例如，日本 2000 年实施《二十一世纪可燃冰研究开发计划》，成立了可燃冰开发促进委员会，经济产业省曾于 2001 年 7 月发布了一个为期 18 年的“可燃冰开发计划”。第一阶段已于 2008 年结束，成果主要是确认相关海域蕴藏大量的可燃冰以待开发。从 2009 年至今正处于第二阶段，其最主要目标活动是进行生产试验。近期还将再进行一次分离提取甲烷气体作业试验，从而为 2016—2018 年度第三阶段的商业化开采进行技术铺垫。

日本也重视国家政策扶持及资金投入。日本通过每年政府投资超过1亿美元的可燃冰开发计划(2001—2016年),引导日本石油勘探开发公司、日本石油公团技术研究中心和日本产业技术综合研究院等机构投入资金实施国家可燃冰研究开发计划。

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。初步具备了在近海海底开采可燃冰的关键技术,计划在2018年前后将海底可燃冰试采技术投入实际应用,届时日本将商业开采可燃冰资源,预计可供其消费100年。这些成果的取得推动了全球新一轮的可燃冰勘查开采热潮。

目前,日本海洋可燃冰的开采技术主要有两种思路。

一是与传统油气开采结合,通过降压、注热、注化学药剂以及注二氧化碳的方法,将可燃冰在海底分解为气体,然后开采。其优点在于,海底以上的部分可以直接采用现有的油气开采技术,只需开发提高可燃冰分解效率的技术即可。其缺点是,需注入大量的能量或化学药剂,开采的效率不高,同时可能带来环境危害。

另一种思路是固态开采,即将可燃冰以固体形态输送到海底面,进行初步泥沙分离后采用固—液—气三相输送技术,将固态可燃冰及输送过程中分解出的气体输送到海面,然后利用海面的高温海水对可燃冰进行分解、收集并通过管道输送,或将分解得来的气体重新制成可燃冰固体转入船运。其优点是,输送过程中分解的气体可以产生自发向上的动力,因此开采效率很高。但该技术与现有油气开采技术差别较大,需要全面开发,技术难度较大。不过,类似技术已经在其他海洋资源(如金属锰)的开发中成功应用,为可在可燃冰开采领域的应用提供了重要参考。

韩国作为热点研究课题

韩国尽管起步较晚,但将可燃冰开发研究作为热点研究课题,已跻身世界可燃冰研究的先进行列,仅次于美、日等少数几个国家。

1996年,韩国第一个可燃冰天然气水合物项目启动,由韩国地球科学和矿产资源研究院组织实施,主要是进行初步的实验分析和基本信息收集。1998

年在东海发现第一个似海底反射(BSR)。1999年,利用甲烷气和氯化钠确定了可燃冰相界。2000—2004年的勘查活动成果包括东海海域的可燃冰源区的地质和地球化学特征,以及可燃冰的稳定带和潜在资源量。

近年来,韩国已成立国家水合物研究机构,制定了可燃冰研究计划,研究工作取得显著成果。韩国可燃冰开发计划分为3个阶段。

第一阶段(2005—2007年),确定可燃冰的远景研究开发区,研究与开发项目分成4个子项目:地球物理研究、地质和地球物理化学研究、地质灾害以及生产技术研究。这些子项目都与国际可燃冰研究团队开展了密切的合作,实现了多国合作技术开发。通过海底面以下40m深部取心,获得了诸如孔隙度、泥质含量等地质信息,用于估测本地区可燃冰的精确储量。

第二阶段(2008—2011年),主要进行Ulleung盆地勘探和开发,进行资源评估和基本生产技术开发,从二维、三维地震勘探到三维精确探测,建立水合物钻孔开采模型。在外部环境的影响上,对可燃冰开采进行经济可行性评估,对气候和海底稳定性影响进行分析。分析数据,确定开采钻井位置。

第三阶段(2012—2014年),主要是生产测试和开采方法的确认。通过采集沉积相样品,对其进行地球化学分析、环境分析、完整的钻井方向和水平钻法分析。对钻井数据进行分析后,确定最佳可燃冰开采方法,然后进行经济性评估,建立一种经济可行的开采方式。

三、国外经验借鉴及我国取向建议

我国可燃冰具有良好的蕴藏潜力,具有很好的开发利用前景,据预测,我国可燃冰资源量将超过2000亿吨油当量。目前仅在南海北部的可燃冰储量,估计相当于中国陆上石油总量的50%左右。

我国从1997年开始组织对可燃冰进行前期研究,虽然起步较晚,但进展较快。近年来,中国加快了对可燃冰研究的步伐。2007年5月,中国科学家在南海北部成功获得了可燃冰实物样品。2008年8月,可燃冰基础研究被列入国家重大基础研究发展计划。按照有关部门制定的战略规划安排,2006年—2020年是调查阶段,2020年—2030年是开发

试生产阶段。

我国虽然 2013 年在南海海域取得了可燃冰勘探的突破，但在推动可燃冰开发利用过程中仍存在开采技术相对滞后、法律法规不健全等诸多问题，应借鉴国外经验。

国外经验借鉴

国外可燃冰开发已有近 50 年的历史，美、日等国在推动可燃冰开发过程中，具有重视可燃冰开发的法制化、重视制定中长期发展规划、重视基础性工作和关键技术研发、重视国家政策扶持及政府资金投入等方面的宝贵经验，值得我国借鉴。

重视可燃冰资源开发的法制化：如，美国 2000 年，美国将《可燃冰研究与开发法案》上升为法律《2000 年美国可燃冰研究与开发法》。

重视制定可燃冰中长期发展规划：近年来，美、日等国纷纷将可燃冰资源勘查和开发纳入其国家能源中长期发展规划，将其作为一个庞大而复杂的系统工程制定了国家级研究计划，并编制了详细的发展路线图。如，1998 年，美国参议院能源委员会一致通过了 1418 号议案——“可燃冰研究开发计划”，把可燃冰资源作为国家发展的战略能源列入长远计划。

重视可燃冰基础性工作和关键技术研发：例如，日本 2000 年实施的《二十一世纪可燃冰研究开发计划》，设立了专业的组织机构，投入了强大的基础研究和应用研究力量。该计划为期 16 年，分三个阶段实施，研究内容基本涵盖了与可燃冰勘查开发相关的所有方面，且每个阶段均有标志性成果。近年来可燃冰研究持续升温并形成了全球性研究热潮，目前已有 40 多个国家以及众多著名油气公司参与了可燃冰研究。

重视国家政策扶持及政府资金投入：世界各主要资源国均通过科技、矿业权等优惠政策和政府资金投入，引导并扶持企业、科研机构等各方力量，长期开展可燃冰开发利用的推动计划。美国能源部充分发挥资金杠杆作用，通过与企业联合，开展了重大的联合工业项目“阿拉斯加北坡可燃冰储层特征研究”（JIP）。美国可燃冰研究计划围绕《可燃冰研究与开发法案》的目标，在 2006-2012 年期间，共资助了数十个可燃冰新项目 and 延续项目。日本通

过每年政府投资超过 1 亿美元的可燃冰开发计划（2001-2016），引导日本石油勘探开发公司、日本石油公团技术研究中心和日本产业技术综合研究院等机构投入资金实施国家可燃冰研究开发计划。德国 2008 年推出的“可燃冰勘探、开发与气体储运”项目，每年政府投入 5000 万欧元。

我国取向建议

可燃冰开发是我国打造能源革命的新引擎，应提升可燃冰在我国能源战略中的地位。按照“总体规划、分步推进”的原则，建议我国可燃冰研究策略为：借鉴国外经验，建议建立专门的可燃冰研究组织协调机构；加大对可燃冰的科普宣传力度；发挥后发优势；全面地、多学科地开展可燃冰综合研究；加强国内外合作，减少不必要的重复研究。

立足勘探开采，掌握核心技术。在开采方面，首先要加强理论基础研究和实验模拟工作，提高理论方法的可行性和可操作性。其次，在实地开采技术上，也要考虑如何能够在提高开采率的同时又兼顾环境影响，研发出二者兼备的综合开采技术。

推进商业化进程，推动可燃冰产业链整合。可燃冰有望接棒传统能源，我国的商业开发有可能在 2030 年进行，届时将给产业链的上中下游企业发展带来新一轮的投资机会。产业链的上游主要是具有深海技术，特别是具有较高勘探和开采能力企业的机会，需要大量的资本、人力的投入，一般只有国有大型企业最有可能承担起前期工作。开采之后的运输环节是中游企业的机会。这一阶段能够提供合理有效的收集运输方式的企业将面临巨大的市场。可燃冰可应用于交通、冶金、电力、轻工等行业的内燃机、汽车、炼钢、热处理、印染、纺织等诸多方面，也可供给居民作为生活燃料。可燃冰对下游企业的商业价值不可估量。

加强政府引导，动员社会资本，助力可燃冰开发利用。可燃冰行业从勘探到开采到运输再到最后的加工使用是一项利国利民的大工程，鉴于其还是一个新兴的行业，尚处于成长期，需要政府在政策和资金两个层面提供大力支持。在投入公共财政资金的同时，需要积极引导和动员社会资金，以满足可燃冰行业发展对资金的需求。■

作者单位：1. 中国气象局