

中国陆域冻土层可燃冰勘探开发现状与前景

付亚荣^{1, 2, 3}, 李明磊⁴, 王树义¹, 李云峰¹, 李莉⁵

- (1. 中国石油华北油田分公司, 河北辛集 052360;
2. 中国石油大学(北京), 北京 102249;
3. 长江大学, 武汉 430100;
4. 中国石油物资有限公司, 北京 100029;
5. 中国石油西南油田分公司, 成都 610041)

摘要: 作为世界公认的最具潜力的清洁高效能源, 可燃冰越来越受到世界各国的高度重视, 对其的关注热度呈几何级数增长。全球大于 27% 的陆域和 90% 海域存在可燃冰, 其储量达 $2 \times 10^{16} \text{m}^3$, 在陆域至少有 38 处永久冻土带发现了可燃冰。我国陆域冻土层可燃冰主要分布在青藏高原、西部高原和东北大小兴安岭地区, 面积约 $215 \times 10^4 \text{km}^2$, 占国土面积的 22.4%, 资源量约 350×10^8 吨油当量。综述了我国对陆域可燃冰调查研究现状、勘探开发现状; 对陆域可燃冰识别技术、钻井技术、测井技术、开发技术进行了剖析, 指出了陆域可燃冰商业化开采面临的温室效应、地质灾害、环境效应、法律法规等问题, 对我国陆域可燃冰勘探开发前景进行了展望。

关键词: 可燃冰; 陆域冻土区; 分布; 勘探开发; 环境影响

中图分类号: TE13

文献标识码: A

文章编号: 1674-4969(2018)05-0440-11

引言

可燃冰, 学名天然气水合物。堪称“中国天然气水合物之父”的国务院参事张洪涛认为^[1]: 全世界范围内, 对天然气水合物的关注和重视在持续发酵, 并且这种热度呈几何级数增长。全球大于 27% 的陆域和 90% 海域存在可燃冰, 储量达 $2 \times 10^{16} \text{m}^3$, 碳含量超过所有已探明化石燃料碳含量总和的 2 倍, 已有 79 个国家和地区发现了可燃冰气藏。至少在陆域 38 处永久冻土带发现了可燃冰^[2-5]。可燃冰已成为世界各国能源战略平衡发展必须考虑的重要因素^[6], 俄罗斯总统普京曾亲自乘坐潜艇, 下潜到千余米深的贝加尔湖中, 与科研人员一起探寻可燃冰^[7]。2008 年 10 月~2009 年 10 月, 我国青海木里海拔 4110m 的永久冻土

带钻获了陆域可燃冰, 我国成为了全球第三个成功钻获陆域可燃冰的国家(1992 年加拿大在北美肯齐三角洲钻获陆域可燃冰、2007 年美国阿拉斯加山北坡获陆域可燃冰^[7]), 但陆域冻土区可燃冰与深海可燃冰从组成和开采方法上存在本质的区别, 陆域可燃冰大规模开采技术仍在探索之中^[8-11]。2013 年 12 月 17 日举行的《2013 年海域天然气水合物勘探成果》新闻发布会上, 国土资源部透露今后我国将全面组织实施海域、陆域可燃冰资源勘查评价^[12]; 2017 年 7 月专家对《陆域天然气水合物分布特征及资源潜力评价》评审后, 最终确定了祁连山地区可燃冰的最有利气源岩^[13-14]。2017 年我国实现海域可燃冰试采连续稳产 60 天, 标志着由我国引领的“天然气水合物革命”将推动全球能源格局的变革^[15-16]。目前全球已形成了 2 个

海域(日本和中国各1个)和3个陆域(美国、加拿大和俄罗斯各1个)试采矿点。但陆域可燃冰的空间分布、储量、开采经济技术参数等问题亟待解决,陆域可燃冰仍是“带刺的玫瑰”。

1 中国陆域冻土层可燃冰分布情况

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与莫斯科大学列别琴科博士合作,1990年在高压容器中恒温恒压下采用 CH_4 和蒸馏水成功合成了可燃冰。我国首个拥有自主知识产权的海洋天然气水合物模拟实验室于2001年在青岛海洋地质研究所由中国地质调查局建成,同年11月3日成功合成、取出可燃冰并点燃,使我国成为了世界上首次在中低纬度冻土区陆域实现可燃冰取用过程的国家^[7]。我国永久冻土区域面积位居全球第三,约占全球永久冻土面积的10%,仅次于俄罗斯和加拿大,面积约 $215 \times 10^4 \text{ km}^2$,占国土面积的22.4%,资源量约 350×10^8 吨油当量,可供我国使用近90年^[17-19]。主要分布于我国青藏高原、西部高原和东北大小兴安岭地区。陆域可燃冰在青藏高原的主要分布地区包括:祁连山冻土区木里盆地中侏罗统江仓组133m~396m深度范围^[20-21]、昆仑山垭口上新世-中更新世断陷盆地250m~450m深度范围^[22]、哈拉湖地区150m~300m深度范围内(平均厚度超过40m,局部厚度达120m)^[23]、西藏羌塘盆地400m~680m深度范围内^[24]。陆域可燃冰在东北大小兴安岭主要分布的地区包括:处于亚布洛诺夫-鄂霍茨克褶皱弧与大兴安岭褶皱带交汇处的漠河盆地发育20m~80m厚的冻土可燃冰成藏系统^[25-26]、根河盆地60m~80m深度范围^[27]、大杨树盆地和孙吴-嘉荫盆地、拉布达林盆地、海拉尔盆地^[16、28],总面积约 $3.85 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[29]。

张永勤、张寒松和王智明等2008年对我国可燃冰资源总量进行了估算^[17、30-31],我国可燃冰资源总量为 $84 \times 10^{12} \text{ m}^3$,其中陆域的数据为:青藏高原永久冻土区 $12.5 \times 10^{12} \text{ m}^3$,面积占世界

永久冻土面积的7%,约占我国永久冻土面积的60%~70%;东北冻土区 $2.8 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。

2 中国陆域冻土层可燃冰勘探开发现状

2.1 调查研究现状

1965年,前苏联在Messoyakha油气田首次发现陆域可燃冰;1972年美国利用加压桶在阿拉斯加北坡Endicott的Eileen State-2井陆域永久冻土中取到可燃冰样品;同年加拿大Mallik L-38井测井资料显示了陆域永久冻土中可燃冰的存在^[21、32]。国内研究可燃冰的学者认为,中国陆域可燃冰调查起步较晚^[17]。

20世纪60、70年代,中国科学院兰州冰川冻土研究所分别在祁连山海拔4000m永久冻土区和青藏高原海拔4700m的五道梁永久冻土区钻探发现了类似可燃冰的大量征兆和现象。1982年国内首篇可燃冰基础理论研究学术论文《气体水合物生成温度的下降与阻止剂水溶液冰点的下降关系》由西南石油学院贺承祖发表。1998年中国地质调查局在祁连山永久冻土区野外露头首次采获可燃冰样品^[33-34]。同年中国科学院政策局在《中国油气资源开发现状、前景与对策分析》报告中指出:“青藏地区具有形成天然气水合物矿藏(亦称可燃冰)的条件和可能,值得引起注意”^[35]。1999年国内首篇永久冻土区可燃冰研究学术论文《青藏高原多年冻土区天然气水合物的研究前景和建议》由中国科学院兰州冻土研究所徐学祖等人发表^[35]。1999年国内首个可燃冰基础理论科研项目《气体水合物生成过程机理及其分形理论的研究》由国家自然科学基金委、中国科学院广州能源研究所承担^[34]。郑军卫在中国科协2000年学术年会上提出了加快我国天然气水合物研究工作步伐的建议^[36]。2001年中国科学院兰州冰川冻土工程国家重点实验室依据青藏高原羌塘盆地(面积约 $4.02 \times 10^4 \text{ km}^2$)的地球物理勘探资料,预测青藏高原永久冻土区具备可燃冰发育的物源和圈

闭构造条件,赋存的可能性很大^[37]。2002年中国地质调查局预测了青藏高原可燃冰资源^[38];且先后设立了《青藏高原多年冻土区天然气水合物地球化学勘查预研究》、《青藏铁路沿线天然气水合物遥感识别标志研究》、《我国陆域永久冻土带天然气水合物资源远景调查》、《陆地永久冻土天然气水合物钻探技术研究》等4个项目,初步圈定了青藏高原羌塘盆地、祁连山木里地区和东北漠河盆地为可燃冰勘查的有利靶区^[22,32]。2003年中国科学院针对青藏高原中低纬度高海拔区冻土层厚度和地温梯度特征,采用可燃冰的热力学稳定域预测方法,预测可燃冰的产出特征^[39]。2004年中国海洋大学通过对西藏羌塘盆地可燃冰地球物理特征识别与预测认为:该地存在可燃冰的可能性很大^[40]。2005年中国地质大学根据青藏高原西大滩-安多556km永久冻土区烃类有机地球化学剖面的测量结果,初步建立了永久冻土区可燃冰的形成及地球化学勘查模式^[41]。2006年中国地质科学院卢振权等认为青藏铁路沿线永久冻土区地质、地球化学特征异常,可能与可燃冰有关^[42]。2004年~2006年吉林大学依托中国地质调查局《我国陆域天然气水合物远景调查》项目资助,建立了漠河盆地永久冻土区可燃冰空间分布的电测方法探测模型^[43]。2006年~2008年中国石油大学(华东)承担了863计划《天然气水合物模拟开采技术研究》中的子课题,提出了可燃冰降压开采实验与数值模拟的方法^[44]。由中国地质调查局于2004年设立的《我国陆域永久冻土带天然气水合物资源远景调查》研究表明:青藏高原和东北永久冻土区具备较好的可燃冰形成条件和找矿前景;并首次编制出我国永久冻土区可燃冰稳定带分布图和找矿远景区分布图等综合性图件;项目于2007年12月15日通过专家评审^[45]。2008年10月18日中国地科院矿产资源研究所、勘探技术研究所和青海煤炭地质局105队联合承担的《祁连山冻土区天然气水合物DK1科学钻探试验

孔》项目开钻,2008年11月5日在DK-1孔井深133.5m~135.5m处首次发现可燃冰实物样品,11月7日在142.9m~147.7m、11月10日在165.3m~165.5m发现可燃冰,11月26日完钻,进尺182.25m;2009年5月31日~8月12日DK-2孔施工,进尺645.22m;2009年8月16日~10月11日DK-3孔施工,进尺765.01m;2009年9月4日~10月1日DK-4孔施工,进尺466.65m;在DK-2、DK-3孔多个层位钻获可燃冰实物样品,在DK-4孔发现系列与可燃冰有关的异常标志;DK-1、DK-2、DK-3可燃冰埋深133m~396m^[46]。

2010年研究人员在东北漠河盆地钻取得到冰层岩心样品^[17]。2011年以来,基于我国在永久冻土区已取得的研究成果,拓展的可燃冰勘查范围包括:西藏羌塘盆地、东北漠河盆地、青海省祁连山、可可西里等。中国地质调查局设立了《羌塘盆地天然气水合物资源调查与评价》、《漠河盆地天然气水合物资源调查与评价》等调查项目^[34,47]。

2012年中国矿业大学(北京)李靖等^[48]研究表明:木里地区可燃冰为广义自生自储、短距运移成藏模式;曹代勇等人分析认为木里地区可燃冰气源具有偏煤型气的混合气成因^[49]。2012年中国地质科学院卢振权等对祁连山永久冻土区DK-2钻孔岩心进行了储集岩热解分析,钻孔中油气显示现象与可燃冰密切伴生,或许能作为可燃冰勘查的一种指示^[50]。2013年9月中国地质调查局油气资源调查中心水合物室对祁连山木里永久冻土区可燃冰岩心进行复查^[51]。2014年中国煤炭地质总局航测遥感局万余庆等利用遥感探测方法,搜索可燃冰直接和间接遥感解译标志,为大范围可燃冰的遥感调查和有利靶点区的圈定提供基础方法^[52]。2013年~2014年神华青海能源开发有限责任公司设立《青海省天峻县聚乎更煤矿区三露天天然气水合物调查评价》项目,在可燃冰赋存特征、形成与分布的主要地质控制因素、成

藏模式、勘查方法、勘查判定技术手段、资源评估、可采经济性等方面取得了新进展^[53]。在2015年全国沉积学大会上,李超等认为^[54]:羌塘盆地鸭湖地区发育的永久冻土层具有内冻胀丘、冻胀草丘等冰缘地貌标志,符合可燃冰形成的低温条件和封盖条件;和源等^[55]公布了羌塘盆地鲤鱼山-长梁山地区永久冻土的发育特征,初步估计可燃冰的储量约为 $1.2 \times 10^{11} \sim 2.4 \times 10^{14} \text{ m}^3$ 。2016年中国地质科学院张富贵等认为:酸解烃指标能指示永久冻土层可燃冰的分布情况、预测和识别可燃冰储层^[56];王超群等长期实时监测祁连山永久冻土区DK-9钻孔地温后,依据可燃冰形成的温-压条件分析,聚乎更矿区具备较好的可燃冰形成条件,可燃冰稳定带底界深度在510m~617m之间^[20,57]。2017年由中国地质调查局地质力学研究所承担的《陆域天然气水合物分布特征及资源潜力评价》项目,通过中国地质调查局组织的成果评审并获优秀,形成了祁连山陆域新构造活动区可燃冰调查技术方法体系,建立了该区域可燃冰的成藏过程与成藏模式^[58-59],祁连山陆域冻土区可燃冰调查取得重要进展。

2.2 勘探开发技术现状

2.2.1 陆域可燃冰识别技术

2.2.1.1 地球物理识别技术

可燃冰形成的地质模式有低温、沉积和过滤三种,最基本的识别标志是赋存的地质标志^[60]。地球物理响应是识别可燃冰的主要手段^[61],多频地震、高分辨率二维地震、高分辨率三维地震、地震正演模拟、AVO正反演、随钻SWD地震反演、全波形地震反演、弹性波地震反演、海底四分量地震、准三维地震调查面元参数优化等地球物理识别组合技术,已在南海北部神狐、东沙、琼东南等海域可燃冰勘探靶点区取得成功应用^[62-64]。

陆域永久冻土区可燃冰勘查是地震探测的难点,且与石油天然气、海域可燃冰地震探测存在

差异^[60,65]。同时,我国永久冻土区分布于中纬度地带,与西伯利亚、阿拉斯加、马更些三角洲等分布于极地冻土区的状态不完全相同,采用的地震探测方法也不相同。2004年中国海洋大学刘怀山等将1995年地震探测资料与1997年地质雷达调查地震资料结合在一起,识别西藏羌塘盆地可燃冰的地球物理特征^[66]。2011年宁宏晓等^[67]针对祁连山山地表层结构复杂、出露区域不同的岩性或相同岩性区不同构造位置地震勘探激发效果差异很大的问题,提出了横向上选点激发、纵向上强波阻抗界面激发、小药量激发等技术,改善了地震资料的品质。2013年中国地质大学(北京)钱荣毅研究团队^[68]为准确获取漠河盆地浅层永久冻土层可燃冰厚度,采取了增加浅井眼炮位、小药量激发,结合大药量激发低频长排列接收的地震勘探方法。2015年中国地质科学院于常青等^[65]对平均海拔高度4800m左右的可可西里盆地与藏北高原之间沱沱河地区中低纬度高海拔冻土进行地震探测时,利用小道距、小炮距、高覆盖观测系统采集野外地震动数据;永久冻土区、山体区、过渡区阶梯药量设计,均衡整个面上单炮资料能量,提高复杂地段资料信噪比;利用高程静校正、折射静校正、层析反演法,更好地提取正确的静校正量。2016年韩建光等^[69]将能同时获得纵波和转换波资料的多波地震引入到陆域可燃冰勘探中,对陆域可燃冰进行多波地震数值模拟研究,依据祁连山永久冻土区可燃冰实际地震地质资料,建立逼近真实地质情况的陆域可燃冰数值模型,多波地震数值陆域可燃冰试算表明,多波地震资料有利于查明陆域永久冻土区可燃冰精细的地质构造。2017年王新全等^[70]在南祁连盆地HLH地区天然气水合物二维地震勘探中,研究和应用了小道距、高覆盖观测系统、低频可控震源宽频激发和数字检波器宽频接收等技术,可燃冰储层对6Hz激发下低频地震信号响应明显。

2.2.1.2 地球化学异常识别技术

占主导地位的陆域可燃冰识别技术包括地球

物理识别及地球化学识别^[71]。中国地质科学院孙忠军等^[72]对中纬度带祁连山木里可燃冰进行地球化学勘查试验表明,中纬度带可燃冰矿藏上部存在非常明显的判断可燃冰成因类型、圈定可燃冰矿藏范围的地球化学信息,地球化学信息可以为可燃冰普查提供参考信息。唐瑞玲等选择祁连山永久冻土区三露天可燃冰矿藏进行了土壤 I 和 Cl 的地球化学勘查试验,揭示了土壤 I、Cl 和 I/Cl 的可燃冰异常模式及影响因素,讨论了土壤 Cl 元素的地球化学障和 I 元素异常形成机理;阐明了卤族元素 I 和 Cl 是陆域永久冻土区可燃冰的探途元素^[73]。

2.2.1.3 其他识别技术

刘松等认为卫星遥感探测的大气 CH₄ 含量可用于永久冻土带大气 CH₄ 的时空变化规律分析,祁连山永久冻土带 SCIAMACHY 传感器反演的大气 CH₄ 数据含量随季节呈现单峰-单谷变化,反映了祁连山永久冻土带是可燃冰的潜在赋存区^[74]。田玉昆等为解决永久冻土层可燃冰对地震信号的衰减问题,在哈拉湖利用低频可控震源开展了地震资料采集试验、精细速度分析、正演模型模拟研究、地震属性分析,速度突变和空白反射带的地球物理响应特征可作为哈拉湖地区陆域可燃冰识别的敏感因素^[75]。杨明国等认为陆域可燃冰与围岩电阻率差异大,符合电磁法勘探的物性要求,青海木里冻土区可燃冰瞬变电磁法勘探试验结果表明,瞬变电磁法具有探测永久冻土带深部高阻的能力,可用于陆域永久冻土带可燃冰的勘探^[76]。2016 年四川省地质矿产勘查开发局物探队,在青海沱沱河地区利用频谱激电法开展可燃冰勘查,确定可燃冰赋存地层和深度,探索可燃冰赋存特点,为可燃冰的勘查提供了可靠的地球物理依据^[77]。

2.2.2 陆域可燃冰钻井技术

20 世纪 60 年代,在西西伯利亚的麦索亚哈永久冻土区可燃冰钻井时,为保证安全钻井、缩短钻井时间,采用高比重泥浆冷却维持-3~-3 循环

方式^[78]。2002 年成都理工大学邱存家等^[79]总结了国外依据冻土区可燃冰物性,钻井采用的分解抑制法和分解容许法所取得的勘探经验,针对我国在可燃冰钻井液的研究是一片空白的问题,进行了可燃冰钻井液在低温流动状态热转换规律、流变性、钻井液类型和钻井介质等方面的研究工作。同年中国地质大学和圣彼得堡矿业学院的学者阐明了可燃冰正常钻井时钻井液的温度必须低于所钻岩石温度的观点,指出了冲洗液在钻井液中的作用,厘清了井内温度与冲洗液冰点、冲洗液初始温度、冲洗液循环时间、冲洗液类型和性能的关系^[80]介绍了可燃冰钻探取样技术^[81]。2005 年~2006 年中国地质大学(武汉)汤凤林团队依托国家自然科学基金《天然气水合物地层钻井的热压力特性研究》项目,分析了可燃冰及其蕴含地层的热物理及力学性质,借鉴石油天然气井井壁稳定理论和方法,对可燃冰储层井壁稳定的力学机理、影响因子、井壁稳定技术进行了详细探讨^[82];蒋国盛团队依托国家自然科学基金《钻井过程中天然气水合物的诱发分解和抑制分解机理研究》项目,对可燃冰赋存地层钻井液进行试验研究,设计出了适合陆域永久冻土带可燃冰赋存地层钻井使用的各种钻井液;厘清了可燃冰钻井液体系不仅要关注对水合物的抑制性外,还要关注钻井液的相对密度、可滤失性和流变性^[83]。2007 年成都理工大学以中国地质科学院承担的地质大调查《高原冻土天然气水合物钻探技术研究》项目为依托,以流体低温特性为指导,研制出了高原冻土带可燃冰钻探的低温泥浆体系,作为青藏高原永久冻土带可燃冰钻探低温泥浆的技术储备^[84]。同年吉林大学孙友宏课题组^[85]建立了可燃冰孔底冷冻取样方法的理论基础,设计出了取样器样机;张永勤等依托中国地质大调查《陆地永久冻土天然气水合物钻探技术研究》项目,对高原永久冻土层可燃冰钻探过程中使用的冲洗液进行了研究^[86]。2008 年~2009 年中国地质科学院为保证《祁连山

冻土区天然气水合物科学钻探工程》成功实施,采用了大孔径绳索取芯、低温泥浆、半合板钻具、PVC 内管等钻探施工工艺^[46]。2010 年吉林大学孙友宏研究团队针对 2009 年在木里盆地钻探使用的泥浆冷却存在的问题,用 FLUENT 软件对现场运行参数进行数值模拟,将套管式换热器内管由光滑管改为螺纹管,成功应用于漠河盆地可燃冰科学钻探中,泥浆进出口温差控制在 3 左右,泥浆温度符合 0 ~2 的钻探工艺规程要求,为我国首次在陆域永久冻土带保真可燃冰样品起到了关键作用^[87]。2010 年郭威等建立了陆域永久冻土可燃冰孔底冷冻取样方法^[88]。2010 年~2012 年漠河盆地永久冻土带可燃冰钻探应用了高效减阻低温仿生耦合金刚石钻头、大直径绳索取心技术、低温泥浆技术、泥浆制冷系统、快速获得岩心技术、井口压力控制装置、钻井参数检测系统等^[89-91]。2013 年李宽等对在青海祁连冻土带可燃冰科学钻探中使用的泥浆冷却系统进行参数优化,换热面积和对流换热系数大幅度提高^[92]。2014 年吴纪修等依据试验井 QK-2 实钻资料,为西藏羌塘盆地永久冻土带可燃冰钻探工程设立了地层不坍塌、不缩径、不漏失的钻井液安全密度窗口^[93]。2016 年中国地质科学院^[94]在青南乌丽永久冻土区 TK-2 孔可燃冰钻探时,采用了“ $\phi 152\text{mm}$ 钻头+ $\phi 146\text{mm}$ 岩心管+ $\phi 146\text{mm}$ 绳索取心钻杆+ $\phi 89\text{mm}$ 主动钻杆、 $\phi 122\text{mm}$ 钻头+ $\phi 114\text{mm}$ 岩心管+ $\phi 146\text{mm}$ 绳索取心钻杆+ $\phi 89\text{mm}$ 主动钻杆”两种取心钻具组合,解决了冻土层融化扩孔、钻杆内壁结泥皮的技术难题;在祁连山永久冻土区采用 MWD 技术及慧磁中靶导向系统,解决了钻井过程中多次出现的卡钻现象,实现了小曲率半径下精准对接钻井施工^[95-96]。

2.2.3 陆域可燃冰测井技术

经过近 20 年的发展,可燃冰测井系统从单一的测井识别发展到随钻测井、电缆测井,建立了测井评价理论体系^[97]。2016 年西南石油大学赵军等阐述了不同地球物理测井技术在天然气水合物

储层定性识别和定量评价中的应用,分析了储层评价过程中的难点^[98]。

2.2.4 陆域可燃冰开采技术

世界上第一个也是唯一一个采用降压法进行工业性开发的陆域可燃冰气藏位于西西伯利亚麦索亚哈气田游离天然气产层上部,至 1998 年共 5 个采气阶段,从分解可燃冰中开采了约 $30 \times 10^8 \text{m}^3$ 天然气,为全球陆域冻土带可燃冰的勘探开发提供了技术借鉴^[99]。

2004 年~2007 年中国石油大学(华东)杜庆军课题组^[100]依托国家 863 项目,建立了包括物质守恒方程、能量守恒方程、分解动力学方程及辅助方程的可燃冰注热开采数学模型。2007 年辽宁工程技术大学宋维源团队^[101]认为降压开采最为经济,提出了水压至裂的降压开采方案。2008 年清华大学左林等^[102]在可燃冰井压固定的前提下,建立了轴对称结构下的物理与数学模型,计算了储层中可燃冰在不同环境条件下的温度、压力、分解锋面与井间距离和以时间为函数的产气率。2009 年中国石油大学(华东)沈海超博士^[103]针对国内外可燃冰降压开采数学模型的缺陷,从可燃冰分解热力学、分解动力学、分解过程质量守恒和能量守恒、多孔介质气水两相流、传热及可燃冰分解效应出发,建立了可燃冰降压开采相变渗流模型。2012 年大连理工大学宋永臣团队^[104]依据青海祁连山木里永久冻土带 DK-3 井可燃冰产出特征,应用 Tough Hydrate 模拟软件,利用垂直单井降压法,对祁连山冻土区可燃冰开发潜力进行数值模拟,建议采用降压和注热相结合的开采方法或水平井开采方式。同年中国石油大学优化设计出了可燃冰二氧化碳置换模拟实验装置^[105]和可燃冰排水采气室内模拟试验装置^[106]。2011 年~2016 年吉林大学采用 Tough Hydrate 软件进行试采工程数值模拟^[107],提出了高温脉冲热激发开采技术(热激与降压的综合开采方法)^[9,108],并进行了 101 小时的矿场试验,采出天然气 95m^3 。2017

年中国科学院卢静生等针对可燃冰开采出砂的难题, 提出了防砂的具体研究思路及解决办法^[109]。

3 陆域冻土层可燃冰开发对环境的影响

3.1 对环境的影响

不管是海域可燃冰, 还是陆域可燃冰的开发, 均存在潜在的环境影响风险。可燃冰中的 CH_4 是具有强温室效应的气体, 因此可燃冰的开采具有巨大的环境效应, 可燃冰究竟是“上帝的恩赐”还是“诱人的陷阱”或是“潘朵拉”盒子, 值得深思^[34]。陆域永久冻土层可燃冰的开发对环境的潜在影响有其自身特征, 主要集中在对全球气候、冻土退化和高寒草甸的破坏、塌方地陷等方面^[9]。陆域可燃冰形成于冻土带, 没有巨厚海水覆盖, 当可燃冰分解释放出 CH_4 并发生泄露, CH_4 沿着裂隙等通道运移, 遇有与大气沟通的裂隙, 可燃冰释放的 CH_4 会迅速进入大气圈。我国首发的陆域可燃冰分布于高海拔永久冻土区, 地表多被高寒草甸、草场等覆盖, 区域地理环境、地质构造、岩性、水文和植被特征等共同作用, 通过物质和能量交换发育形成客观地质实体, 存在独特的自身演变规律, 环境敏感度极强。可燃冰开发过程中不可避免地需要修筑道路、铺设管道、建设厂房、搭建钻井工程设备等, 将直接改变永久冻土的原有状况。冻土层退化促进沙漠化的发展, 冻土层中封存大量的碳, 将向大气中释放巨量的温室气体, 从而加速全球气候变暖。开采过程中也可能出现塌方和地陷, 使得冻土进一步退化, 加速环境破坏。

3.2 应对环境影响风险的措施

近年来发展起来的可燃冰开采技术主要包括^[9]: CO_2 置换法、固体开采法、气体提升法等。开发陆域可燃冰热激发开采法、减压开采法、化学抑制剂注入开采法以及 CO_2 置换法在理论上是可行的。应借鉴青藏铁路建设先进经验和技

术。同时, 对可燃冰开发进行细致的立法是非常必要的。

4 我国陆域可燃冰勘探开发前景

4.1 陆域可燃冰资源丰富

可燃冰是 21 世纪最具潜力的新能源, 越来越受到世界各国的高度重视, 各国已纷纷从国家层面开展资源调查、勘探并制定了开发研究计划。我国永久冻土区域位居全球第三, 面积约 $215 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占国土面积的 22.4%, 资源量约 350×10^8 吨油当量。

4.2 可借鉴的海域可燃冰成功试采经验

2017 年我国南海神狐可燃冰成功试采的“窄密度窗口平衡钻井、水力割缝储层改造、储层试采防砂、水合物二次生成预防、完井与测试系统集成”等技术可为陆域可燃冰的勘探开发提供借鉴。

4.3 具有自主知识产权的陆域可燃冰勘探开发技术

吉林大学首创具有自主知识产权的可燃冰开采技术, 与国际上通用的“被动式保压保温取样”钻探原理不同, 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、可燃冰孔底快速冷冻取样方法和高温脉冲热激发开采技术, 基本上解决了我国陆地冻土带可燃冰的开采问题。

5 结论

(1) 可燃冰是全球公认的最具潜力的清洁高效能源, 虽然我国在陆域可燃冰勘探开发上取得了一些进展, 但陆域可燃冰的识别、勘探、测井、录井、开采等理论和技术亟待丰富和完善。

(2) 我国海域可燃冰勘探开发经验、国家能源结构调整和需求将影响陆域可燃冰的勘探开发进程。

参考文献

- [1] 王少勇. “可燃冰”,一把终将燃起的火焰——国务院参事张洪涛谈天然气水合物开发利用前景[J]. 资源导刊, 2014(8): 8-9.
- [2] 刘 华, 李相方, 夏建蓉, 隋秀香, 张 益. 关于天然气水合物钻采工艺技术进展的研究[J]. 钻采工艺, 2006, 29(5): 54-57.
- [3] 王 星, 孙子刚, 张自印, Lawrence Lau, 粟 玲, 王彬. 海域天然气水合物试采实践与技术分析[J]. 石油钻采工艺, 2017, 39(6): 744-750.
- [4] 杨明清, 赵佳伊, 王 倩. 俄罗斯可燃冰开发现状及未来发展[J]. 石油钻采工艺, 2018, 40(1): 17-25.
- [5] 孟 弘. 关于加强青藏高原多年冻土区天然气水合物开发研究的建议[J]. 中国科技论坛, 2011, (3): 73-78.
- [6] 郭 威, 孙友宏, 陈 晨, 赵江鹏, 赵建国, 贾 瑞, 李国圣. 干冰升华式天然气水合物孔底冷冻取样器的研制[J]. 机械设计与制造, 2011(2): 99-101.
- [7] 李长安. “可燃冰”: 21 世纪新型能源的“宠儿”[J]. 西部论丛, 2009(11): 64-66.
- [8] 常华进, 曹广超, 陈克龙. 海洋和陆域天然气水合物开发的环境影响比较[J]. 青海师范大学学报(自然科学版), 2012, (1): 6-11.
- [9] 廖 静. 可燃冰试采记[J]. 海洋与渔业, 2017(8): 55-58.
- [10] 康维海. 抢占世界新能源前沿的竞赛——中国在青海省海西木里地区冻土发现并成功钻获“可燃冰”纪略[J]. 青海国土经略, 2009(5): 43-45.
- [11] 孙艳莉. 陆域可燃冰: 带刺的玫瑰[J]. 中国石油石化, 2009, (22): 44-45.
- [12] 舟 丹. 我国可燃冰全面勘察将启动[J]. 中外能源, 2015(4): 91.
- [13] 中国石油新闻中心. 祁连山确定天然气水合物最有利气源岩[N/OL]. (2017-07-17)[2018-02-17].
- [14] 李占东, 李海红, 刘义坤. 黑龙江省冻土天然气水合物前景及对能源转型的机遇[J]. 齐齐哈尔大学学报(哲学社会科学版), 2017(10): 16-18.
- [15] 东南海. 天然气水合物开采现状及相关思考[J]. 国际石油经济, 2017, 25(6): 19-25.
- [16] 付亚荣. 可燃冰研究现状及商业化开采瓶颈[J]. 石油钻采工艺, 2018, 40(1): 1-16.
- [17] 张永勤. 国外天然气水合物勘探现状及我国水合物勘探进展[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2010, 37(10): 1-8.
- [18] 石 田. 青海发现可燃冰[J]. 石油钻采工艺, 2009, 31(6): 5.
- [19] 武 斌, 邹 俊, 马代海, 陈 宁, 张 皓. 频谱激电法在天然气水合物勘查中的应用[J]. 四川地质学报, 2016, 36(1): 135-138.
- [20] 王超群, 丁莹莹, 胡道功, 戚帮申, 张耀玲, 陶 涛, 吴环环. 祁连山冻土区 DK-9 孔温度监测及天然气水合物稳定带厚度[J]. 现代地质, 2017, 31(1): 158-165.
- [21] 王平康, 祝有海, 卢振权, 郭星旺, 黄 霞. 祁连山冻土区天然气水合物岩性和分布特征[J]. 地质通报, 2011, 30(12): 1839-1850.
- [22] 吴青柏, 蒋观利, 张 鹏, 邓友生, 杨玉忠, 侯彦东, 张宝贵. 青藏高原昆仑山垭口盆地发现天然气水合物赋存的证据[J]. 科学通报, 2015(60): 68-74.
- [23] 田玉昆, 李桂林, 刘 晖, 祝有海, 马彦彦, 李 娟, 周 惠, 王德润, 王 林. 哈拉湖地区低频可控震源天然气水合物地球物理响应特征研究[J]. 地球物理学报, 2016, 59(11): 4287-4296.
- [24] 王平康, 祝有海, 张 帅, 付修根, 吴纪修, 李 宽, 王大勇, 姚大为, 肖 睿, 张旭辉, 罗大双, 范瑞宝, 李国江. 西藏羌塘盆地鸭湖地区天然气水合物成藏条件[J]. 地质通报, 2017, 36(4): 601-615.
- [25] 唐瑞玲, 张富贵, 杨志斌, 李庆霞, 孙忠军. 漠河盆地冻土区天然气水合物地球化学特征及意义[J]. 中国矿业, 2016, 25(S1): 177-182.
- [26] 赵省民, 邓 坚, 李锦平, 陆 程, 宋 健. 漠河多年冻土区天然气水合物的形成条件及成藏潜力研究[J]. 地质学报, 2011, 85(9): 1536-1550.
- [27] 程弘飞, 文志刚. 根河盆地多年冻土区天然气水合物形成条件研究[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版), 2016, 18(6): 41-44.
- [28] 张金华, 魏 伟, 魏兴华, 王媛媛, 李小龙. 我国主要冻土区天然气水合物形成条件及成藏模式探讨[J]. 中国石油勘探, 2013, 18(5): 74-78.
- [29] 赵 荣. 俄罗斯天然气水合物研究进展概述[J]. 青海师范大学学报(自然科学版), 2014(2): 43-48.
- [30] 张寒松. 清洁能源可燃冰研究现状与前景[J]. 应用能源技术, 2014(8): 54-58.
- [31] 王智明, 曲海乐, 菅志军. 中国可燃冰开发现状及应用前景[J]. 节能, 2010(5): 4-6.
- [32] 郭星旺. 祁连山冻土区天然气水合物测井响应特征及评价[D]. 北京: 中国地质科学院, 2011: 1-15.
- [33] 贺承祖. 气体水合物生成温度的下降与阻止剂水溶液冰点的下降之关系[J]. 化工学报, 1982(4): 383-387.
- [34] 张洪涛, 祝有海. 中国冻土区天然气水合物调查研究[J]. 地质通报, 2011, 30(12): 1809-1815.
- [35] 徐学祖, 程国栋, 俞祁浩. 青藏高原多年冻土区天然气水合物的研究前景和建议[J]. 地球科学进展, 1999, 14(2): 201-204.
- [36] 郑军卫. 加快我国天然气水合物研究工作步伐[C] //西部大开发科教先行与可持续发展——中国科协 2000 年学术年会文集. 北京: 中国科学技术出版社, 2000: 683.

- [37] 张立新, 徐学祖, 马 巍. 青藏高原多年冻土与天然气水合物[J]. 天然气地球科学, 2001, 12(1-2): 22-26.
- [38] 黄 朋, 潘桂棠, 王立全, 胡宁静. 青藏高原天然气水合物资源预测[J]. 地质通报, 2002, 21(11): 794-798.
- [39] 陈多福, 王茂春, 夏 斌. 青藏高原冻土带天然气水合物的形成条件与分布预测[J]. 地球物理学报, 2005, 48(1): 165-172.
- [40] 刘怀山, 韩晓丽. 西藏羌塘盆地天然气水合物地球物理特征识别与预测[J]. 西北地质, 2004, 37(4): 33-38.
- [41] 吴自成, 吕新彪, 王造成. 青藏高原多年冻土区天然气水合物的形成及地球化学勘查[J]. 地质科技情报, 2006, 25(4): 9-14.
- [42] 卢振权, 吴必豪, 饶 竹, 祝有海, 罗续荣, 白瑞梅. 青藏铁路沿线多年冻土区天然气水合物的地质、地球化学异常[J]. 地质通报, 2007, 26(8): 1029-1040.
- [43] 张志厚, 刘国兴, 唐君辉, 韩江涛. 漠河地区天然气水合物远景调查之-电法探测岩石性永久冻层的应用研究[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(3): 887-895.
- [44] 张新军. 天然气水合物藏降压开采实验与数值模拟研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东): 1-20.
- [45] 中国地质调查局网站消息. 我国冻土带天然气水合物调查研究取得重要进展[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2008(1): 65.
- [46] 祝有海, 张永勤, 文怀军, 卢振权, 贾志耀, 李永红, 李清海, 刘昌岭, 王平康, 郭星旺. 青海祁连山冻土区发现天然气水合物[J]. 地质学报, 2009, 83(11): 1762-1771.
- [47] 冯 岩, 杨 才, 林海涛, 张亭荣, 辛 昭, 夏 宁. 冻土区天然气水合物研究现状与内蒙古多年冻土区地质条件概述[J]. 西部资源, 2015, (5): 117-120.
- [48] 李 靖, 曹代勇, 豆旭谦, 王 丹. 木里地区天然气水合物成藏模式[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2012, 31(4): 484-488.
- [49] 曹代勇, 王 丹, 李 靖, 豆旭谦. 青海祁连山冻土区木里煤田天然气水合物气源分析[J]. 煤炭学报, 2012, 37(8): 1364-1368.
- [50] 卢振权, 祝有海, 刘 晖, 张永勤, 王平康, 黄 霞. 祁连山冻土区含天然气水合物层段的油气显示现象[J]. 现代地质, 2013, 27(2): 231-238.
- [51] 人民网-时政频道. 中国地质调查局油气资源调查中心水合物室“80后”科研团队: 在雪域高原奏响青春之歌[N/OL]. (2014-12-11)[2018-02-20].
- [52] 万余庆, 吕俊娥, 谭富荣, 刘 卓, 乔军伟. 青藏高原天然气水合物遥感探测研究[J]. 煤田地质与勘探, 2014, 42(5): 25-29.
- [53] 文怀军, 卢振权, 李永红, 王伟超, 刘文进, 李 星. 青海木里三露天井田天然气水合物调查研究新进展[J]. 现代地质, 2015, 29(5): 983-994.
- [54] 李 超, 朱利东, 杨文光, 史建南, 陶 刚. 羌塘盆地鸭湖地区天然气水合物异常标志研究[C] //2015 年全国沉积学大会沉积学与非常规资源论文摘要集. 武汉: 长江大学地球科学学院, 2015: 241-242.
- [55] 和 源, 朱利东, 杨文光, 陶 刚. 羌塘盆地鲤鱼山-长梁山地区冻土发育特征[C] // 2015 年全国沉积学大会沉积学与非常规资源论文摘要集. 武汉: 长江大学地球科学学院, 2015: 88-90.
- [56] 张富贵, 杨志斌, 唐瑞玲, 张舜尧, 周亚龙, 孙忠军. 酸解烃技术在青海祁连山天然气水合物勘探中的应用[J]. 中国矿业, 2016, 25(S1): 227-233.
- [57] 王淑红, 宋海斌, 颜 文. 外界条件变化对天然气水合物相平衡曲线及稳定带厚度的影响[J]. 地球物理学进展, 2005, 20(3): 761-768.
- [58] 胡道功, 张耀玲, 于新兵. 祁连山天然气水合物调查取得重要进展[N]. 中国矿业报, 2017-07-01(5).
- [59] 胡道功, 张耀玲, 于新兵. 祁连山天然气水合物控矿因素研究取得重要进展[N]. 中国矿业报, 2017-07-08(5).
- [60] 刘 华, 李相方, 隋秀香, 夏建蓉. 天然气水合物勘探技术研究现状[J]. 石油钻探技术, 2006, 34(5): 87-90.
- [61] 吴志强, 陈建文, 龚建明, 肖国林, 文 丽. 海域天然气水合物的 BSR 成因[J]. 海洋地质动态, 2004, 20(6): 25-30.
- [62] 吴志强, 文 丽, 童思友, 闫桂京. 海域天然气水合物的地震研究进展[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(1): 218-227.
- [63] 赵庆献. 天然气水合物准三维地震调查面元参数优化研究[J]. 热带海洋学报, 2011, 30(1): 70-77.
- [64] 胡仲义. 天然气水合物地震数据反演方法优化组合研究及应用[D]. 北京: 中国地质大学, 2010: 1-20.
- [65] 谈顺佳, 于常青, 聂逢君, 皮金云, 王 琪, 周 宇, 瞿 辰, 罗 慷. 青海南部天然气水合物二维地震探测技术方法试验研究[J]. 地球物理学进展, 2015, 30(2): 817-828.
- [66] 刘怀山, 韩晓丽. 西藏羌塘盆地天然气水合物地球物理特征识别与预测[J]. 西北地质, 2004, 37(4): 33-38.
- [67] 宁宏晓, 张艳红, 章多荣, 蒋永祥, 焦文龙. 祁连山山地震勘探激发方法[J]. 石油地球物理勘探, 2011, 46(3): 370-373.
- [68] 王博雅. 漠河地区天然气水合物地震勘探数据采集与处理[D]. 北京: 中国地质大学, 2013: 1-25.
- [69] 韩建光, 于常青, 张晓波, 谷丙洛, 王 赟, 陈 鹏. 陆域冻土区天然气水合物多波地震数值模拟研究[J]. 地质学报, 2016, 90(9): 2502-2512.
- [70] 王新全, 刘 晖, 王 林, 高启才, 何俊杰, 刘 阳.

- 南祁连盆地天然气水合物地震勘探技术[J]. 地球物理勘探, 2017, 52(4): 644-650.
- [71] 牛滨华, 孙春岩, 苏新, 赵克斌, 吴能友, 李 佳, 王宏语. 勘查地球化学方法适用于勘查天然气水合物的依据[J]. 现代地质, 2005, 19(1): 61-66.
- [72] 孙忠军, 杨志斌, 秦爱华, 张富贵, 周亚龙. 中纬度带天然气水合物地球化学勘查技术[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2014, 44(4): 1063-1070.
- [73] 唐瑞玲, 孙忠军, 张舜尧, 李庆霞, 杨志斌, 张富贵, 周亚龙. 冻土区天然气水合物的探途元素——卤族元素 I 和 Cl[J]. 物探化探计算技术, 2016, 38(4): 553-559.
- [74] 刘 松, 邢 学, 张 强, 杨明国. 祁连山冻土带天然气水合物遥感探测数据分析与评价[J]. 国土资源遥感, 2014, 26(3): 106-112.
- [75] 田玉昆, 李桂林, 刘 晖, 祝有海, 马彦彦, 李 娟, 周 惠, 王德润, 王 林. 哈拉湖地区低频可控震源天然气水合物地球物理响应特征研究[J]. 地球物理学报, 2016, 59(11): 4287-4295.
- [76] 杨明国, 邢学文, 刘 松. 木里冻土带天然气水合物瞬变电磁法应用研究[J]. 物探与化探, 2016, 40(6): 1097-1102.
- [77] 武 斌, 邹 俊, 马代海, 陈 宁, 张 皓. 频谱激电法在天然气水合物勘查中的应用[J]. 四川地质学报, 2016, 36(1): 135-138.
- [78] 张红梅. 天然气水合物的钻井和开采技术[J]. 国外油田工程, 1998(6): 31-33.
- [79] 邱存家, 陈礼仪, 朱宗培. 天然气水合物钻探中钻井液的使用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2002, (4): 36-37.
- [80] 汤凤林, 张生德, 蒋国盛, КудряшовББ, 吴 翔, 窦斌, 高 辉. 在天然气水合物地层中钻进时井内温度规程与钻井液的关系[J]. 地质科技情报, 2002, 21(4): 96-100.
- [81] 汤凤林, 张时忠, 蒋国盛, 刘晓阳, 窦 斌. 天然气水合物钻探取样技术介绍[J]. 地质科技情报, 2002, 21(2): 97-99.
- [82] 宁伏龙. 天然气水合物地层井壁稳定性研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2005: 1-121.
- [83] 张 凌. 天然气水合物赋存地层钻井液试验研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2006: 1-111.
- [84] 王 胜. 高原冻土天然气水合物钻探泥浆体系研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2007: 1-68.
- [85] 郭 威. 天然气水合物孔底冷冻取样方法的室内试验及传热数值模拟研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2007: 1-112.
- [86] 张永勤, 孙建华, 赵海涛, 刘秀美, 王汉宝. 高原冻土水合物钻探冲洗液的研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2007, (9): 16-19.
- [87] 李国圣. 天然气水合物钻探泥浆冷却系统数值模拟及应用研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2011: 1-80.
- [88] 郭 威, 孙友宏, 陈 晨, 张祖培. 陆地天然气水合物孔底冷冻取样方法[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2011, 41(4): 1116-1120.
- [89] 张 强. 漠河盆地 MK-1 与 MK-2 井天然气水合物钻探施工关键技术[D]. 吉林: 吉林大学, 2012: 1-86.
- [90] 孙友宏, 马银龙, 黄晟辉, 高 科, 刘宝昌, 李小洋, 郭威, 赵 研. 天然气水合物勘探用仿生耦合金刚石钻头的研制与应用[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2012, 42(S2): 295-300.
- [91] 于 磊, 赵大军, 孙友宏, 张永勤, 郭 威, 贾 瑞, 段会军. 漠河冻土地区天然气水合物钻探施工技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2011, 38(6): 13-16.
- [92] 李 宽, 张永勤, 孙友宏, 郭 威, 李 冰. 天然气水合物钻井泥浆冷却系统研究及优化[J]. 钻采工艺, 2013(4): 34-36.
- [93] 吴纪修, 张永勤, 梁 健, 李 宽, 李鑫森, 王汉宝. 羌塘盆地天然气水合物钻探试验井工程井壁稳定性分析[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2014, 41(6): 8-13.
- [94] 李小洋, 张永勤, 孙建华, 梁 健, 王汉宝, 李鑫森, 吴纪修, 李 宽, 尹 浩. 青南乌丽冻土区天然气水合物钻进工艺及应用研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2016, 43(6): 13-17.
- [95] 李鑫森, 张永勤, 尹 浩, 梁 健, 王汉宝, 李小洋, 王志刚. 水平对接钻井技术在天然气水合物试采中的应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2017, 44(8): 13-17.
- [96] 李鑫森, 张永勤, 李 宽, 刘秀美, 尹 浩, 李小洋, 王志刚. 天然气水合物试采对接井卡钻事故分析与处理[J]. 2017, 44(9): 12-16.
- [97] 宁伏龙, 刘 力, 李 实, 张 可, 蒋国盛, 吴能友, 孙长宇, 陈光进. 天然气水合物储层测井评价及其影响因素[J]. 石油学报, 2013, 34(3): 591-606.
- [98] 赵 军, 武延亮, 周灿灿, 及成林, 韩能润. 天然气水合物的测井评价方法综述[J]. 测井技术, 2016, 40(4): 392-398.
- [99] 胡奥林. 天然气水合物资源勘探开发现状[J]. 石油与天然气化工, 1995, 24(2): 101-106.
- [100] 杜庆军, 陈月明, 李淑霞, 孙君君, 姜兰其. 天然气水合物注热开采数学模型[J]. 石油勘探与开发, 2007, 34(4): 470-487.
- [101] 孙 超. 陆地永久冻土区天然气水合物降压法开采的研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2007: 1-57.
- [102] 左 林, 由长福. 天然气水合物固定井压开采过程数值模拟[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2008, 48(11): 1957-1961.
- [103] 沈海超. 天然气水合物藏降压开采流固耦合数值模拟研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2009: 1-140.
- [104] 于 涛. 祁连山冻土区水合物藏降窖开采的数值模拟

- [D]. 大连: 大连理工大学, 2012: 1-86.
- [105] 安莹. 天然气水合物开发模拟实验装置评价与最优化研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2012: 1-90.
- [106] 刘 强. 天然气水合物排水采气系统工艺方案研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2012: 1-90.
- [107] 李 冰. 祁边山冻土区天然气水合物试采数值模拟及置换开采实验研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2016: 1-130.
- [108] 李 宽. 冻土区天然气水合物蒸汽法气开采系统数值模拟与野外试验[D]. 吉林: 吉林大学, 2012: 1-79.
- [109] 卢静生, 李栋梁, 何 勇, 梁德青, 熊友明. 天然气水合物开采过程中出砂研究现状[J]. 新能源进展, 2017, 5(5): 394-402.

Present Situation and Prospect of Flammable Ice Exploration and Development in Permafrost in China

Fu Yarong^{1,2,3}, Li Minglei⁴, Wang Shuyi¹, Li Yunfeng¹, Li Li⁵

(1. Huabei Oilfield Co., CNPC, Xinji, Hebei 052360, China;

2. China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

3. Yangtze University, Wuhan 430100, China;

4. China Petroleum Materials Corporation, Beijing 100029, China;

5. PetroChina Southwest Oil Company, Chengdu 610041, China)

Abstract: As the world's most promising clean and efficient energy, combustible ice has attracted more and more attention from all over the world, and the heat has increased in a geometric series. There is combustible ice in the 27% land and 90% sea areas of the world. The reserves amount to $2 \times 10^{16} \text{m}^3$, and the carbon content is more than twice of all the proven fossil fuels combined. There have been 79 countries and regions where flammable ice reservoirs have been discovered, and at least 38 permafrost zones have found flammable ice in the land region. The flammable ice in the permafrost is mainly distributed in the Qinghai-Tibet Plateau, the western plateau and the Greater Xiaoxing'an Mountains in Northeast China. The area is about $215 \times 10^4 \text{km}^2$, accounting for 22.4% of the land area, and the amount of resources is about 350×10^8 tons of oil equivalent. The present situation of investigation and research on flammable ice in land area, the present situation of exploration and development in China, the identification technology, drilling technology, logging technology and development technology of flammable ice in land area are summarized. It is pointed out that commercial exploitation of flammable ice in land area is faced with problems such as Greenhouse Effect, geological hazard, environmental effect, laws and regulations, etc. The prospect of exploration and development of flammable ice in land area of China is prospected.

Keywords: flammable ice; continental permafrost region; distribution; exploration and development; environmental impact