

冻土天然气水合物开采技术进展及 海洋水合物开采技术方案研究

张永勤, 李鑫淼, 李小洋, 王志刚

(中国地质科学院勘探技术研究所, 河北 廊坊 065000)

摘要:调查发现,陆域永久冻土层及海域都存在着天然气水合物资源。我国2007年和2008年先后在南海海域及祁连山木里地区发现水合物实物样品。中国地质调查局于2010年开始实施冻土水合物试采技术研究及现场开采试验,2017年将在我国南海海域实施海洋水合物试采,相关准备工作正在进行中。本文介绍了陆域水合物试采进展及海洋水合物试采技术方案的构思。

关键词:天然气水合物;赋存状态;永久冻土层;中国南海海域;试采;资源

中图分类号:P634 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2016)10-0154-06

Technical Progress of Gas Hydrate Production in Permafrost and Research on Oceanic Gas Hydrate Production/
ZHANG Yong-qin, LI Xin-miao, LI Xiao-yang, WANG Zhi-gang (Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China)

Abstract: It has been found that there are rich gas hydrate resource in the permafrost on land and deep sea bottom. Gas hydrate samples were found in the bottom of South China Sea and permafrost mountain area in Qilian in 2007 and 2008 respectively. China is planning to conduct a trial production of gas hydrate in South China Sea in 2017 and is now making preparations for it. This article introduces the progress of gas hydrate trial production on land and preliminary technical plan for trial production of gas hydrate in the sea.

Key words: gas hydrate; permafrost zone; South China Sea; trial production; resource

0 引言

陆地永久冻土层及海洋深处存在天然气水合物已被事实所验证,科学家推测,海洋及陆地永久冻土区存在的天然气水合物资源远景资源量的能量当量相当于目前已经探明煤、石油及天然气总量的1~2倍,能量巨大,是未来人类最有希望的洁净接替能源。因此,对天然气水合物的探索研究和开发利用,以及可能带来的环境与生态的影响已成为当今地学界及能源界争相研究的热点。我国已成为世界第一大能源第二大石油消费国,目前原油进口已占石油消耗总量的60%,随着我国经济的持续发展和人们物质生活水平的不断提高,对石油的消耗量越来越大,对外的依存度越来越大,甚至未来可能的石油短缺对我国经济持续发展及国防安全将构成极大的威胁。另外,我国政府对国际社会关于减少碳排放的承诺,调整了我国以煤炭作为主要能源的消费结构。因此,迫切需要寻找新的油气资源或其他非常规洁

净能源。天然气水合物的发现为我国寻找新型洁净能源开辟了新的希望。我国管辖的海域面积约300万 km^2 ,拥有的陆域永久冻土面积215万 km^2 ,为我国勘探开发天然气水合物资源提供了可能。

2007年我国在南海海域首次发现天然气水合物后,又于2008年在青海省天峻县祁连山脉的木里地区组织实施了陆地永久冻土带天然气水合物调查科学试验井,并首次在我国永久冻土带发现了天然气水合物实物样品,在国内外引起了较大反响,引起党和国家领导人的关注和重视。2009年和2010年,中国地质调查局又曾先后在青海省木里地区及东北漠河盆地实施了冻土水合物调查科学钻探试验井施工,并取得新的进展。调查研究水合物的根本目的是开发利用,因此,2010年,我国首次在青海木里水合物发现区实施了开采试验井施工及开采装置和开采工艺的试验。2011年我国又将海洋及陆域冻土天然气水合物资源调查评价列为国家专项(127专项),开

收稿日期:2016-07-31; 修回日期:2016-09-08

基金项目:中国地质调查局地质调查项目“陆域冻土区天然气水合物钻采技术方法集成”(编号:DD20160225)

作者简介:张永勤,男,汉族,1960年生,研究室主任,教授级高级工程师(二级),从事深孔及复杂地层绳索取心钻探技术、反循环钻探技术、各种地质调查取样技术、水合物钻采技术、科学钻探技术、钻探设备的研究及工程施工管理等工作,河北省廊坊市金光道77号,zyqietlfbh@sina.com。

启了陆域及海洋天然气水合物资源调查的新篇章。

1 我国陆域冻土天然气水合物首次试采

1.1 方案研究

2010 年在我国祁连山木里永久冻土区首次开展了天然气水合物开采试验。为了达到试采目的,必须制定可行的试开采方案。根据水合物的组分、埋深及生存条件,在理论分析、钻探施工现场钻获的实物样品的验证、国内外有关室内试验及建议的基础上,结合水合物在其赋存的温压平衡条件遭到破坏时,水合物即可分解释放出甲烷气体的特点,制定了降压及加热综合试采方案。试采的目的是验证开采方案是否可行,工艺方法是否经济合理,并为未来商业化开发应用提供技术支撑。因此,开采过程中必须考虑能耗和产出,即开采过程所获得的甲烷气体能量要远远大于所消耗的能量。

虽然水合物是以固态结晶体存在于永久冻土区地下深处或深海底一定深度,但却不能像开采煤炭或其他固体矿产那样采用挖掘的方法,不论陆域冻土天然气水合物还是海洋水合物,开发利用最基本的方法就是将水合物在原地转换气体,通过一定的通道输送到储藏装置收集起来。理论研究和实验室实验证实,通过降压或加热来打破水合物赋存状态就可将其从固态转换成气态。但要想将气体收集起来,则必须利用钻探技术手段,形成钻孔通道,该钻孔既是降压和加热的通道,又是将甲烷气体输送采集装置的通道。按照上述分析,我国陆域冻土天然气水合物试采技术方案:利用钻探技术手段实施钻探取样施工,确定水合物的储层及分布,下入相应管道,进行排水降压和向地下注入热能,加速水合物分解和释放。并以此方案设计钻孔结构、试制开采装置、确定降压加热技术参数。本次试采方案采用电潜泵排水降压、电磁加热和蒸汽加热综合方式。总体开采方案如图 1 所示。

由于安放高压电潜泵的特殊需要,钻孔通道需要有足够大的直径。在完成足够大钻孔通道之后,为了确保开采装置的安装到位和甲烷气体顺利地输送到地表,需要下入必要的保护套管和开采套管,并进行固结。为了更好疏通开采层,在固结套管之后,需要进行射孔,以便使释放出的甲烷气体能容易流入开采管内。在完成上述钻井、完井过程和射孔之后,需要安装孔内及地表开采装置。孔内开采装置

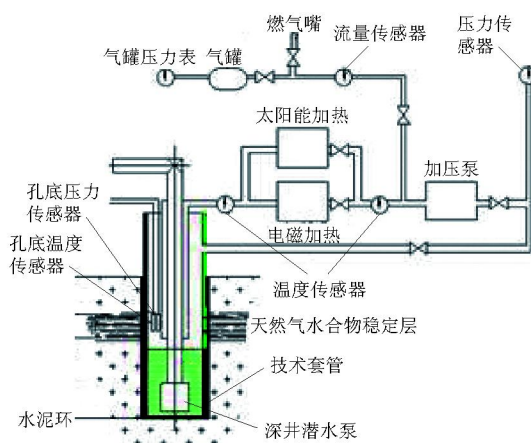


图 1 第一次陆域冻土水合物试采方案原理图

主要包括高压电潜泵、铠装电缆、双通道排水及加热输送管道、压力及温度传感器等。地表开采装置包括电磁及太阳能加热器、输送泵、监测仪器、信号传输及监控系统、打印记录装置、甲烷收集罐及排空试燃装置等。在安装地下及地表装置后,首先利用高压潜水泵将孔内水位降至天然气水合物稳定层以下,以降低地下水对水合物稳定层的压力,实现水合物的降压分解,分解出的甲烷气体在开采套管内上升至地表,通过地表的管道、分离装置及监测记录仪器进入采气罐。随着水合物的分解,所分解出的水及地下水都通过开采滤管进入孔底,当达到一定水量和一定水位高度时,安放在孔底的水位传感器将对地下电潜泵发出启动指令,电潜泵启动工作,将孔底水排到地表,以维持孔内一定水位和较低的水压。在用降压开采时,如地下水水合物分解释放速度较慢,产气量太小,安放在地表的太阳能和电磁加热装置可通过自动控制系统启动,通过输送泵将热量传递到地下水合物层,以增加水合物层的温度,加速水合物层的分解和释放,提高开采效率。为了降低开采成本,在允许的条件下,尽可能采用太阳能加热方式。

1.2 试采进展

2011 年,按照上述方案及过程,我国首次成功地进行了陆域冻土天然气水合物开采试验,证实了预定的降压、加热、控制方法、监测、记录、天然气采集等方案是完全可行有效的。通过本次的研究分析、室内实验及野外现场试验,对冻土天然气水合物分解释放过程及开采利用技术有了初步的认识,为进一步优化完成开采技术方法、提高开采效率及海洋水合物开采试验提供了重要参考资料。开采及试燃现场见图 2。



图2 2011年我国冻土天然气水合物试采排空试燃现场

由于陆域冻土天然气水合物生存在地下几百米低温及高压岩石裂隙及孔隙里,从首次的冻土水合物开采试验看,采用单井直井开采,降压及加热在水平辐射区域效果是有限的,根据分析,结合油气及煤层气开采经验,我们制定了多井及水平定向钻探技术,将多井在地下水合物层相互连通,增加水合物分解释放的自由度,使得降压和加热的作用覆盖到更多的区域,这无疑会增加水合物的开采效率。为此,我们设计试验了一

口主井,并在主井左右两端布置2个副井,利用定向钻探技术使3口井在地下水合物层连通,每口井之间下入水平透管,为水合物分解施工处的甲烷气体进入采集主井提供通道。多井地下连通开采方案如图3所示。目前3口直井都已完成钻探取心施工,其中一口副井与主井已经地下对接成功,并已下入水平透管。另一副井与主井的对接正在施工中。在完成主副井地下对接后,地表也通过加热管线连接,在主井排水降压,从2个副井向地下加热,从主井采集甲烷气体并通过管道或压缩装置将甲烷注入高压储气罐里。

为了进一步完善和优化水合物开采技术,加快开采技术的实用进度,我们开展了二氧化碳等其他化学试剂室内置换模拟试验研究,提出了通过加大水合物分解自由度的方式来提高开采效率的新思路。计划将二氧化碳置换开采方法用于下一步的野外开采试验中,从副井向地下注入二氧化碳气体,试验其置换及产气效果。并进行总结评价,为进一步完善和优化开采技术提供参考。

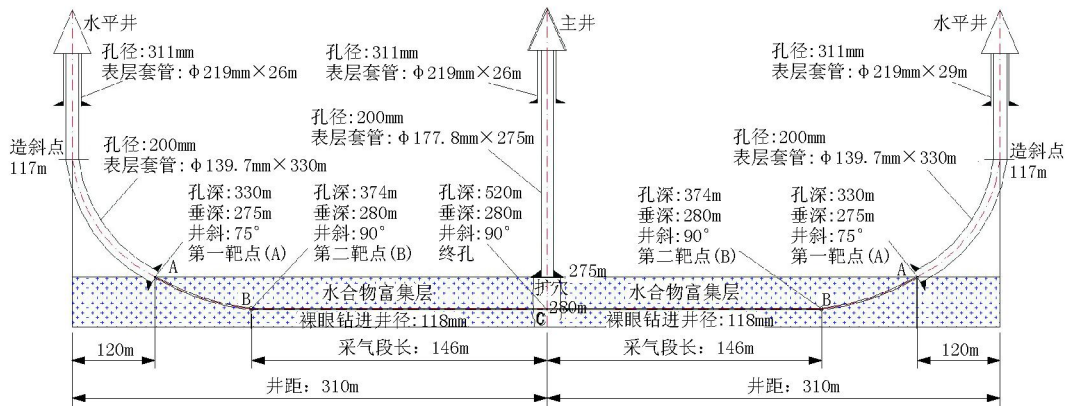


图3 冻土天然气水合物多井地下连通开采方案

2 海洋天然气水合物开采方案研究

海洋天然气水合物试采的复杂程度和难度要比在陆地大得多。目前仅有日本在其南海海槽进行了初步海洋水合物开采试验。日本所进行的开采试验发现遇到的最大问题是采层塌陷和进入竖管的气孔被淤砂堵塞。采层塌陷是一个很难控制的现实问题,因为赋存于海底沉积层的水合物被包裹在泥沙层里,它不像陆地永久冻土水合物、煤层气、页岩气或常规油气生存在有坚硬顶底板或岩层支撑的裂隙或空隙里,这些资源在利用水平井穿过他们所赋存的层段时,压裂剂可以在释压后地层闭合时,起到支

撑作用,为气体向开采主井运移提供一定的通道。针对我国即将实施的海洋水合物试采工程,我们除了在考虑应对日本遇到的采层塌陷和砂堵问题外,还应首先考虑用最简单、最经济和最安全的方法进行试验。根据陆地冻土水合物试采经验,经过分析研究提出以下想法及建议。

2.1 直井试采方案的思考

2.1.1 钻完井

为了经济实用及安全可靠,可以利用大直径钻杆(以下称钻管)进行全面钻进,在钻进到预定深度时,不提出井内钻管、钻具及钻头,钻管留在井内作为钻进成井后的套管。钻管直径可以选择 345 mm,其壁

厚可以尽量薄一点(9~11 mm),以便后续射孔容易。关于井深及井径,根据钻探取心确定的水合物埋藏深度,其井深应为水合物主采层深度以下50 m,主采层以下的50 m作为开采过程中沉沙收集井。钻头直径比钻管直径大50~60 mm,钻管应采用内平外不平,内平的目的是准备在钻管内下入与其内壁相适应的防砂滤管,在防砂滤管及钻管之间填砾,减少砂堵问题。如果要在钻管和井壁之间按照陆地水井成井方式填砾作为防砂的一道屏障,从船上经过海水将砾石填到钻管和井壁之间几乎是不太可能的,因为其一一是水深有1200 m左右,无隔水导管,其二是钻管在钻进到预定深度后需要固井,钻管和井壁之间无法投放砾石。因此,笔者认为采用钻管内放一层滤管,滤管和钻管之间填砾,从而减少砂堵的方式是比较可行实用的。这种方案无须采用隔水导管,可大大减少工序、施工时间和成本。

2.1.2 固井

在钻进到预定深度后,直接通过钻管压入水泥浆进行固井。确保海水不沿着套管和井壁之间渗入开采层。在注入水泥浆并固结到符合强度要求后,开始扫水泥塞,将套管内清理干净,为射孔提供方便。

2.1.3 射孔

根据钻探取样得到的水合物层段、厚度及深度等实际信息,确定采层。根据要试采的层段布置射孔。保证射孔位置对准采层。

2.1.4 压裂及压裂液

在完成射孔后,开始压裂。关于压裂的压力参数,要根据采层的地层情况而定。建议采用的压裂液是一种通过实验室实验而配制的两种液体的混合液,这两种液体混合之前各自保持自己液体形态,在被压入地层混合一定的时间后,两者发生化学反应,并能释放出热量和生成一种具有一定强度的蜂窝状支撑体,该支撑体起到水合物采层塌陷时仍能为水合物释放出的气体提供运移通道的功能,为加速水合物分解施工提供可能。目前正在同有关研究机构合作研制试验这种特殊的压裂液。

2.1.5 清除压裂液

由于所采用的压裂液是两种液体的混合液,要求混合后在水合物沉积层能发热并形成一定强度的蜂窝状支撑体,所以在套管内长时间存在会生成不需要的固体物,影响下一步的排水降压。因此,需要向套管内压入一种液体,使得两种压裂液在固结之

前仍保持各自的液态而便于从套管内排出。

2.1.6 内衬滤管安放及填砾

在清除了钻管内的压裂液后,开始下入滤管。滤管的长度、滤孔直径可根据水合物的厚度及砂砾的粒径需要确定,可以采用缠丝、贴砾等方式。滤管的长度可以是整个海底开采层的厚度,也可以根据射孔段分层下入滤管。滤管和套管之间的环隙50~60 mm。钻管尺寸为 $\varnothing 345\text{ mm} \times 9\text{ mm}$,滤管采用 $\varnothing 219\text{ mm} \times 9\text{ mm}$ 。在射孔、排出压裂液之后,在钻船上利用钻机下入滤管,滤管带有定心三爪,确保滤管与钻管基本同心。在滤管安放到位后,将滤管在井口与钻管牢固连接。然后在钻船上直接从井口投入砾径10~20 mm的砾石进入滤管和钻管之间的环隙采层深度。然后在井口将滤管和钻管之间的环隙进行密封,防止海底水合物分解释放的甲烷气体从滤管和钻管之间的环隙泄漏。

2.1.7 井下设备安放

井下设备包括电潜泵、井底传感器、电磁加热装置、排水管及电缆等。在钻管和滤管固定、填砾到位及井口密封安装好之后,利用船载钻机将上述井下设备从滤管内下放到井下预定深度。

2.1.8 开采树及船载试采设备安装

由于完井后钻杆被作为开采套管,所以钻杆还被夹持固定在钻采的井口,此时在船上安装开采树、输送及采集管道、监测和记录装置比较方便。在钻采船的甲板井口,开采树与井口的钻管通过变丝接头连接起来,并确保密封。开采树有各种压入、采集、释放等侧向接头,所以完成井控是比较容易实现的。

2.1.9 排水降压

在完成上述工程后,开始启动电潜泵排出套管内及采层的海水,随着套管内海水的排出,开采层的压力就会逐步降低,水合物就有可能开始分解释放出甲烷气体。当开采套管内水位降到水合物层以下时,水合物层的压力应该和钻采船甲板大气压力相同,开采套管的甲烷气体就会自动向井口上移,通过开采树的相关接口传输到采集罐或排空点燃。

2.1.10 加热

由于在开采套管内对着射孔的采层安装有电磁加热装置,随着加热装置的动力接通,产生的热能通过辐射方式穿过滤管、填砾、开采套管传递到套管周围的水合物层,水合物层受热后加速水合物温压平衡条件的破坏,促使水合物不断快速分解释放。

2.1.11 开采试验及监测记录

开采试验可以采用单一降压方法,也可用降压与加热组合法。随着降压和加热的进行,甲烷气体可以在钻采船上收集起来,监测仪器可以监测和记录开采参数及主井附近的监测井内的相关参数。根据海底压力、温度变化及采气量变化,调整排水时间及加热时间。海底排水电潜泵可以根据海底水位高度通过水位传感器自动启动和关闭,电磁加热也由海底温控传感器控制通断。初步开采试采要全面监测和记录开采井的各项参数、海底塌陷、周围的海水变化情况等,最终完成初步的综合开采试验,进行阶段分析总结。

2.1.12 防沙与除沙

试采过程中,随着气、水及沙三相流向开采直井的运移,小颗粒的沙有可能穿过填砾层及滤管沉入集沙井底(采层以下留有50 m的沉沙井段),较大颗粒则被填砾层及滤管所过滤,所以利用填砾层及滤管起到了防沙的作用。长时间开采及沙砾不断向填砾层及滤管运移和堆积,填砾层及滤管外壁有可能被沙堵死,井底50 m的沉沙段也可能逐渐将采层埋没。对于填砾层及滤管外壁的积沙可以利用空气洗井方式清除。利用空压机向井内压入高压空气,达到一定压力,突然释压,反复多次,即可疏松填砾层及滤管外壁管壁的积沙,从而解决消除管壁沙堵的问题。井底的沉沙可以在开采套管内下入双壁导管,从双壁导管内外环隙压入高压空气,实现气举反循环,将沉沙从双壁导管中心通道携带上返至开采管之外,从而达到除沙目的。

2.1.13 防塌技术方案研究

泥沙沉积层水合物开采的最关键的问题是采层的塌陷,完全避免采层塌陷难度较大,因此需要想办法在塌陷后仍能保持分解的甲烷气体运移到开采井里。笔者建议在采层的“底板”及“顶板”压入特殊的混合压裂液,这种压裂液可以在被压入的地方发生化学反应,并生成一种蜂窝状的固体。关于压入的方法,可以在开采井内水合物采层的“顶板”和“底板”位置进行射孔,通过射孔将特制的压裂液压入地层。也可以采取在开采井内上述射孔的位置开窗,利用小直径的连续油管在开采井四周水平插入采层“底板”及“顶板”的地层里,利用连续油管将上述特殊的压裂液压入地层。这种技术方法的关键是确保压裂液的性能及有效地压入所期望的地层。这

种压裂液可以在实验室内进行反复实验,确定比例及混合后发生化学反应及固结和发热与膨胀的时间,在达到固结的同时,还能发生膨胀和放热,既能起到防塌又能起到加热水合物分解的双重作用。

2.2 水平井开采方案预研究

2.2.1 钻进方法

天然气水合物在海底大多被包裹在松软的泥沙当中,如果采用常规的定向造斜进行水平井钻进,由于沉积层较松软,定向时钻头没有足够的反向支撑力,则很难完成造斜。因此采用连续油管旋转喷射钻进水平井或许是一个可行的办法。

2.2.2 直井钻进技术

直井段钻进仍采用上述钻进方法,在直井完成以后,下入“开窗”工具进行侧钻“开窗”,为水平钻进提供可能。

2.2.3 水平井钻进技术

在“开窗”完成以后,可以采用连续油管旋转喷射钻进技术进行水平井钻进。该钻进技术涉及的井下工具主要包括旋转喷射头、高压软管、变径接头、连续油管、转向器、锚定器等。在直井“开窗”位置将锚定器及转向器固定,将连续油管连接的喷射钻具下放到锚定器位置,利用转向器内J形腔引导旋转喷射头进入采层,通过高压喷射液及连续油管的推力,喷射头引领连续油管沿水平方向前进。在连续油管向前推进过程中,连续油管不旋转,喷射头能够旋转并向径向及轴向喷射出高压液流进入采层。

2.2.4 喷射液及其性能

水平钻进是靠旋转喷射头喷出的高压喷射液及连续油管的推力实现的,主要目的是设法将上述压裂液注入水合物采层,以便为输送水合物分解的气体提供通道。由于海底水合物储层松软,在完成水平井钻进提出钻具后,井筒很容易坍塌,因此,要求喷射液具有作为水平钻进动力介质和作为压裂液并在采层内形成支撑体的双重作用,所以要求水平钻进的喷射液具有上述压裂液的性能,即在旋转喷射钻进的同时,喷射液被压入水合物储层,并能在储层及水平井筒内形成蜂窝状的固体物,这样即使地层塌陷,也能支撑部分储层及井壁,为水合物分解的甲烷气提供流向开采直井的通道。

3 认识及建议

目前科学家对水合物的物源及生存条件、内部

结构、物化特性等都研究得比较清楚,所以室内研究没有必要花费大量的人力、物力分析研究、模拟、合成等这种重复性的工作。笔者认为,当前的首要工作是加快验证海底及陆地永久冻土层天然气水合物的真实及可用资源量,其次是加速经济实用开采技术的研究,第三是加速对开采水合物可能引起的地质灾害、海洋环境及生态破坏预测及治理技术的研究。只有这样,开展天然气水合物研究及开发应用对人类才有实际意义。

关于水合物的开发应用,自从 20 世纪 60 年代前苏联首次开发应用水合物资源至今,人们没有再开发应用水合物资源。2000 年以后,加拿大、美国及中国在陆域冻土区进行了水合物的开采试验,也都开采出一定的甲烷气,但单位时间的产气量及开采的时间都没有达到人们所期望值。日本 2013 年在世界上首次进行了海洋水合物开采试验,虽然开采出了甲烷气,但单位产气量及产气时间并不理想。特别是日本开采试验遇到的采层塌陷及开采井沙堵问题,是未来海洋水合物开采应用的最大障碍。因此,人们对水合物的研究应重点集中在开采技术及工程施工方面。

从前苏联、日本、加拿大、美国的研究现状看,水合物开发应用决非人们所想象的那么容易。加拿大在 Mallik 及美国阿拉斯加北坡的永久冻土水合物的研究目前基本处于半停止状态。美国在 20 世纪末和 21 世纪初,曾提出了 2015 年进行商业开采的计划,日本也在 2000 年提出了 2015—2016 年商业开发利用的计划,从目前的实际情况看,他们的计划都没有实现。最近他们又提出了 2025—2030 年开发利用水合物资源的计划,这说明开发利用水合物资源还是有相当大难度的。

中国开展天然气水合物资源调查及开采利用技术研究起步都较晚,特别是开采技术方面,国内外都没有成熟的技术参考和借鉴,在此情况下,不应急于求成,应当在认真总结日本首次试采塌陷及砂堵的基础上,真正掌握我国试采区域水合物储层的地质构造、泥沙类型等地层条件,制定多种试采方案,进行近海底水平井钻进施工试验。在日本第二次开采试验的基础上,修改完善和优化我国的开采方案。笔者认为,在当前还没有完全真正确定我国水合物资源量的情况下,投入大量经费进行开发应用,此举应慎行。试采方案,投入的设备、器具及技术方法不

能只考虑出几万立方米气和点一把火,必须考虑后续的实用价值及经济效益。不要为了争一口气,花掉几个亿,要问问值得不值得。

以上仅是笔者个人的一点粗浅的认识,望同行们由此提出更好的开采技术方案及见解,为开发利用水合物资源和缓解我国未来能源短缺献计献策。

参考文献:

- [1] 田志坤,张永勤.天然气水合物勘探与开发技术”译文集[R]. 2001.
- [2] 张永勤,孙建华,赵海涛,等.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),2007,34(9):16-19.
- [3] 张永勤,孙建华,赵海涛,等.天然气水合物保真取样钻具的试验研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2007,34(9):62-65.
- [4] 张永勤,孙建华,赵海涛,等.天然气水合物保真取样钻具的试验研究及施工方案研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2007,34(S1):57-61.
- [5] 张永勤,孙建华,贾志耀,等.中国陆地永久冻土带天然气水合物钻探技术研究与应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2009,36(S1):22-28.
- [6] 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.
- [7] 张永勤,王汉宝,等.陆域冻土天然气水合物开采装置研制及试采工艺研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2011,38(S1).
- [8] Hideaki Takahashi. Japan explores for hydrates in Nankai Trough [J]. Oil & Gas Journal, 2005, (9):48-53.
- [9] Hedeki Minagawa, Takuma Ito. Depressurization and Electrical Heating of Hydrate Sediment for Gas Production [C]// Proceedings of the Twenty-fifth (2015) International Ocean and Polar Engineering Conference, Hawaii, USA, 2015:82-88.
- [10] Xin Zhao, Zhengsong Qiu. Experimental Study on Methane Hydrate Inhibitors for Hydrate Control in Deep-sea Drilling [C]// Proceedings of the Twenty-fifth (2015) International Ocean and Polar Engineering Conference, Hawaii, USA, 2015:89-94.
- [11] Tsutosu Shimizu, Yaoshitaka Yamamoto. Electric-Submersible-Pump Performance under Methane/Water/Methane-Hydrate Pipe Flows [J]. Proceedings of the Twenty-fifth (2015) International Ocean and Polar Engineering Conference, Hawaii, USA, 2015:132-138.
- [12] Takeshi Komai. Status of Methane Hydrates production R&D Enhanced Recovery Technologies [C]// Proceedings of the Twenty-fourth (2014) International Ocean and Polar Engineering Conference, Busan, Korea, 2014:15-20.
- [13] 张炜,王铭喆,邵明娟.日本甲烷水合物开发计划第三阶段实施方案的编制及第二次近海试采的计划[J].海洋地质信息,2016,(4):1-5.
- [14] 美国甲烷水合物研发计划进展跟踪[J].海洋地质信息,2016,(7):1-6.
- [15] 张凡.天然气水合物开采模拟实验技术综述[J].非常规能源信息,2016,54(6):1-15.
- [16] Collett T S. Energy resource potential of natural gas hydrates [J]. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 2002,86(11):1971-1992.