

祁连山永久冻土带天然气水合物钻探工艺与应用

张永勤¹, 祝有海²

ZHANG Yong-qin¹, ZHU You-hai²

1. 中国地质科学院勘探技术研究所, 河北 廊坊 065000;

2. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037

1. *Institute of Exploration Techniques, Chinese Academy of Geological Sciences, Langfang 065000, Hebei, China;*

2. *Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China*

摘要:大量的研究和钻探取样证明, 不仅海洋深处存在着天然气水合物, 陆地永久冻土带也存在天然气水合物。从目前的地质探测技术发展现状看, 确定冻土层水合物的储藏深度、含量等物理化学特性还必须靠取样钻探技术。论述了全球陆地永久冻土带天然气水合物的钻探现状, 介绍了陆地永久冻土带天然气水合物取心钻具的结构设计、试制过程和在海拔 4200m 的青海祁连山地区进行永久冻土带天然气水合物钻探技术研究过程中取得的成果。

关键词:永久冻土带; 天然气水合物; 钻具; 钻探取样

中图分类号: P618.13

文献标志码: A

文章编号: 1671-2552(2011)12-1904-06

Zhang Y Q, Zhu Y H. Research and application of the natural gas hydrate drilling technique in Qilian Mountain permafrost. *Geological Bulletin of China*, 2011, 30(12):1904-1909

Abstract: Large quantities of research and drilling sampling work shows that gas hydrates(GH) exist not only in the deep ocean but also in the permafrost zone. Viewed from the development status of the geological exploration, the determination of the storage depth, content and other physical and chemical properties of the GH has to depend on the drilling technique. The global research status of the GH in the permafrost is expounded and the drilling tool design and manufacture process and research achievements of the GH at 4200m above the sea level are described in this paper.

Key words: permafrost zone; natural gas hydrate; drilling tool; drilling and sampling

作为非常规天然气资源的天然气水合物被誉为 21 世纪新的替代能源, 对其研究受到世界上许多国家的高度重视。大量的研究和实践证明, 不仅海洋深处存在着天然气水合物, 陆地永久冻土带也存在大量的天然气水合物。前苏联 20 世纪 60 年代在梅索亚哈油田陆地永久冻土带发现了天然气水合物。1998 年, 加拿大在北极附近的马更些三角洲(Mackenzie Delta)的 Mallik 地区实施了世界上第一个专门进行陆地永久冻土区天然气水合物调查研究的钻探工程, 迄今已先后完成了 5 口天然气水合物

调查研究探井(Mallik L-38、2L-38、3L-38、4L-3、5L-38)。这项世界上第一个对陆地永久冻土区进行天然气水合物全面调查评价的科学研究项目引起了许多国家的兴趣和关注, 先后有加拿大、日本、美国、德国、印度、国际大陆钻探计划(ICDP)等国家和机构参与。2004 年 12 月, 这项重大的国际合作项目在日本千叶进行了成果总结, 为人类开展冻土天然气水合物研究提供了重要的资料。

20 世纪 90 年代, 美国对阿拉斯加北坡海岸带永久冻土区进行天然气水合物调查评价, 并实施了

收稿日期: 2011-08-31; 修订日期: 2011-09-25

资助项目: 中国地质调查局项目《青藏高原冻土带天然气水合物调查评价》(编号: 1212010818055)

作者简介: 张永勤(1960-), 男, 教授级高级工程师, 从事钻探取心技术、钻掘施工设备、器具研究与开发。E-mail: zyqiet@cniect.com

钻探施工。2003年3月31日,Andarko石油公司、Maurer技术公司和美国能源部开始在阿拉斯加州钻探第一口专门进行天然气水合物调查研究的井——“热冰1”井,该井钻探的目的是验证北极天然气水合物存在的地质学、地球物理和地球化学模型。2008年10月,以美国能源部和美国地质调查局为首的项目组开始对阿拉斯加北坡大规模的陆地永久冻土区天然气水合物进行综合调查评价和开采试验研究。钻探结果表明,阿拉斯加北坡地区天然气水合物中的甲烷资源量为 85.4×10^{12} 英尺³(85.4 trillion cubic feet gas)。在504英尺厚的水合物层段的岩心采取率为85%,采用的泥浆温度为华氏30°F。美国在阿拉斯加北坡实施的永久冻土区天然气水合物取样钻探施工主要借助低温环境,采用普通绳索取心钻探施工技术,配合低温泥浆护心方式。

青藏高原永久冻土区的面积占中国永久冻土区面积的60%~70%,而且属于高海拔和较低纬度的地区。中国地质学家调查研究后认为,青藏高原永久冻土区具备形成重烃类天然气水合物的温度和压力条件,同时可能存在由“自保护效应”引起的轻烃类天然气水合物。

中国地质科学院勘探技术研究所从2000年起就开始关注水合物调查和钻探技术研究,收集、掌握了有关水合物钻探技术等方面的国内外资料。2004年勘探技术研究所向中国地质调查局提出《陆地永久冻土天然气水合物钻探技术研究》的地质调查项目,并从此开始冻土天然气水合物钻探取样器具和施工工艺研究。

1 祁连山冻土区的施工环境

祁连山天峻县木里地区广泛分布着永久冻土,总体属于高原亚寒带半干旱气候区,日平均气温低于0℃的天数每年达160~240天之久。在海拔2700~4000m的地带内,年平均气温为零下4℃。大量的实际调查资料表明,整个祁连山冻土区的年平均地表地温为0~-2.4℃,冻土层厚度为8~193.3m,其中连续冻土区的年平均地表地温为-1.5~2.4℃,冻土层厚度为50~139.3m。以往研究表明,该地区地下存在有煤炭资源。青海有关地质勘探队在该地区进行煤田取心钻探施工时,经常发生孔内缩径、钻具无法下到预定深度、油页岩和泥岩地层钻进效率低、有时孔内冒出可燃气体等现象,取心钻探施工非常困难,经

常发生钻孔报废事故。针对上述地质地理环境,项目组开展了取样钻具和施工工艺研究。

2 祁连山冻土区天然气水合物取样钻具

根据有关专家的建议,项目组开展了保压保温取样钻具的研制。依据收集到的国外有关天然气水合物保压取样钻具的结构,结合地质钻探绳索打捞不提钻和机械球阀旋转关闭的机械原理,试制了基于绳索取心钻机的以保压为主、保温为辅的冻土天然气水合物取心钻具(图1)。考虑到钻进施工中可能存在孔壁不稳定等因素,施工过程中有可能换径,所以钻具结构尺寸初步考虑3种规格,第一种规格的钻杆可以作为第二规格的套管。

2.1 保压钻具的结构及工作原理

项目组设计的冻土天然气水合物取心钻具的结构采用主动保压和被动保温方式,并采取绳索打捞不提钻取心方式。从钻具的结构、岩心进入岩心容纳管的方式看,最佳的保压方式是利用球阀封闭岩心容纳管的下端面,球阀封闭方式占用的空间最小。要想关闭球阀,必须给球体转轴施加一定的转矩。经过分析,给球体转轴施工转矩的方式可能有多种,以齿轮齿条方式比较简单可行。随着钻进的进行,当岩心装满岩心容纳管后,利用绳索打捞装置提拉内管总成的矛头,使钻具内弹卡钳收缩,以便穿过球阀并到达钻头内台阶的岩心卡簧座上行到球阀球体上端一定距离,随着卡簧座的上行,齿条开始受到轴向力,并带动齿轮转动90°,当球阀转动90°后,齿条上与齿轮啮合的齿刚好走完,齿条随着提升再继续上行,齿轮也不转动,所以球阀封住岩心容纳管的下端。此时继续提升打捞装置,钻具的外弹卡钳开始收缩,此时整个钻具的内管总成即被提出钻杆外到达地表,完成钻进和打捞过程。两种规格的保压取心钻具在室内试验关闭的成功率超过了98%,保持压力可达到10MPa。试制的保压取心钻具见图2、图3。

2.2 钻具的结构尺寸

根据取心直径、球阀关闭机构最小允许尺寸、可能得到的地质岩心钻探常用管材直径、陆地岩心钻机的钻进能力等现实情况,试制了 $\phi 127$ 、 $\phi 108$ 两种保压保温取心钻具。钻具的基本尺寸见表1。

2.3 非保压绳索打捞不提钻快速取心钻具

天然气水合物保温保压取心钻具是一项结构比

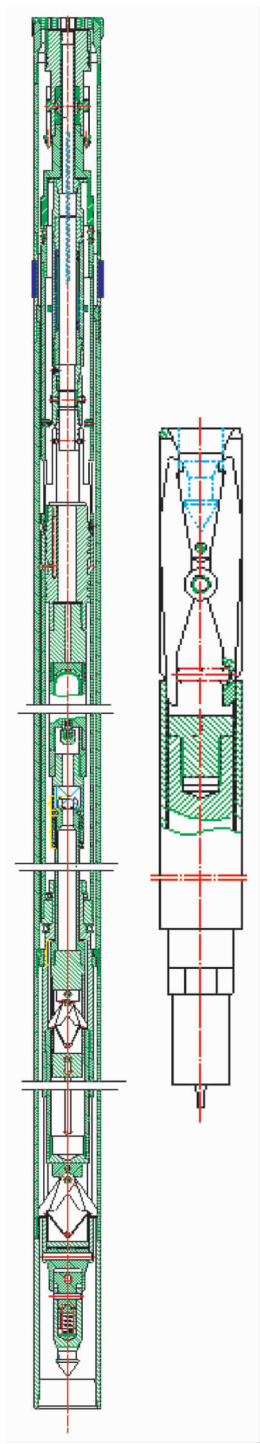


图 1 绳索打捞不提钻冻土水合物保压取心钻具

Fig. 1 Pressurized coring boring tool for rope salvage of frozen earth hydrate without pulling out

较复杂、难度较大和可靠性较低的特种钻探取心工具。目前,虽然有些国家已经试制出天然气水合物保温保压取心钻具,但在应用的可靠性及取心率方面还不尽满意。日本与美国 Aumann & Associates 公司合作,经过 8 年的不断试验、改进、再试验、再改进和完善才达到了比较理想的取心效果,但平均采取率



图 2 试制出的保压、非保压取心钻具与室内调试

Fig. 2 Trial-produced pressurized, non-pressurized coring boring tool and indoor debugging



图 3 现场准备下井的保压取心钻具内管一部分

Fig. 3 On-site preparation of part of inner pipe assembly of pressurized coring boring tool for running back into the hole

不到 80%。因此,加拿大、美国在陆地冻土水合物钻探取样施工中仍采用绳索打捞不提钻快速取样技术。根据加拿大、美国等在冻土带天然气水合物钻探施工方面的经验,项目组除了试制出保温保压钻具外,还试制出了与保温保压钻具共用同一种规格钻杆的非保压不提钻快速取样钻具,试制的钻具见图2。

表 1 陆地冻土天然气水合物取心钻具结构尺寸

Table 1 Structure and size of coring boring tool for land frozen earth gas hydrate

规 格	钻孔直径 /m	岩心直径 /mm	钻杆直径 /mm	保持压力 /MPa	取心长度 /m	备 注
LDS-127	135.5	38	127/114	10	3	保压钻具
LDS-108	113	28	108/96	10	3	保压钻具
LDS-127-P	135.5	95	127/114	/	3~1.5	特制绳索钻具
LDS-108-P	113	71.5	108/96	/	3~1.5	特制绳索钻具
LDS-89-P	96	89	89	/	3	特制绳索钻具

3 祁连山冻土区天然气水合物钻探实践

祁连山冻土区天然气水合物的取心钻具及钻探施工工艺是中国地质取心钻探所面临的全新课题,尤其是在海拔 4000m 施工环境下,施工地层部分孔段为永冻层,软硬互层、破碎不稳定,地层极为复杂,施工难度较大,特别是永冻层,遇到一般的冲洗液容易发生融化和坍塌。因此,钻具和钻探工艺要在保证钻进的同时,尽可能保证取出真实的地质样品,特别是有水合物异常的地层,要求能够保持较完整或较真实的岩心样品。所以,取心钻具和施工工艺的研究除了具有常规取心钻探的特点外,必须从钻孔结构、钻头切削刃类型及唇面结构、钻压、回转速度、泥浆性能及循环量、泥浆温度、取心方式、回次进尺等方面进行认真的考虑,尤其是泥浆要具有耐低温和护壁保心的性能。根据施工前收集到的祁连山地区的地层资料及以往的施工经验,该地区地层破碎、坍塌、遇水膨胀和泥质页岩、油页岩地层进尺极慢等是钻探施工过程中最关键的工艺难题。要想取得较好的钻探效果,除了具有上述结构的钻具外,还必须保证泥浆具有良好的稳定护壁和冷却岩心性能,且钻头也应具有较好的刻取性能。为此,专门配制了水合物低温盐水泥浆(表 2)。实践结果表明,上述泥浆虽然在低温状态下具有良好的流动性,但在抑制泥页岩及破碎地层方面不够可靠。

在钻头结构方面,由于该地区的地层以泥页岩、油页岩等塑性地层为主,所以钻头结构主要以金刚石复合片钻头为主。这种结构唇面的钻头具有较大的切削刃,能够减少糊钻的可能性。

2008 年 10 月 18 日,经过多年的精心准备,中国第一口陆地冻土区天然气水合物科学钻探试验并在海拔 4053m 处的青海木里地区正式开钻,施工现

场如图版 I-a 所示。钻探施工过程中,曾先后采用了所研制的保压钻具和绳索打捞不提钻快速取心钻具。试验结果表明,保压钻具虽然能够取出岩心,但球阀密封效果不好,且取出的岩心直径较细。钻孔直径达到 135mm,而取心直径只有 38mm。由于地层较复杂,要求泥浆比重大、粘度高和含砂量较高,影响了钻具密封的可靠性。冻土地层钻进要求的特殊性能泥浆与保压钻具的可靠性是一对矛盾。为了能够钻进到预定深度并能钻获天然气水合物样品,我们主要采用特制的大直径绳索取心钻具进行取样施工。

在 2008 年首次对冻土天然气水合物的钻进过程中,曾在 133.5~135.5m、142.9~147.7m、165.3~165.5m 3 个层段发现了天然气水合物,并取出了人们所期望的水合物岩心样品(图版 I-b),初步成果证明所研制的钻具及工艺方法是可行的,增强了人们继续实施冻土水合物钻探取样的信心。

为了进一步证实该地区水合物的存在并获得更多的水合物样品,2009 年项目组继续在祁连山木里实施钻探工程。施工过程中,针对 2008 年所遇到的技术难题,项目组从钻具结构、泥浆性能、取心方法、钻头唇面形式、钻孔结构等方面进行了改进。首先,采用美国百瑞得公司(Baroid)的泥浆材料,配合国产抗盐高聚物配置低温高性能泥浆。泥浆初期性能为比重 1.06~1.14,漏斗粘度 23~26s,凝固点-2℃,泥皮厚度 1.5mm,失水量 6~7mL。由于钻进过程中受地下水、岩粉等的影响,泥浆的性能在不断发生变化,所以要时刻观测泥浆以便及时调整泥浆的性能。由于本次采用的泥浆具有良好的稳定孔壁、抑制泥岩和油页岩膨胀等性能,使得钻孔较稳定,在破碎地层中取心效果较好。在钻头结构方面,由于泥岩和油页岩地层塑性较大,孕镶钻头钻进速度较慢,所以采

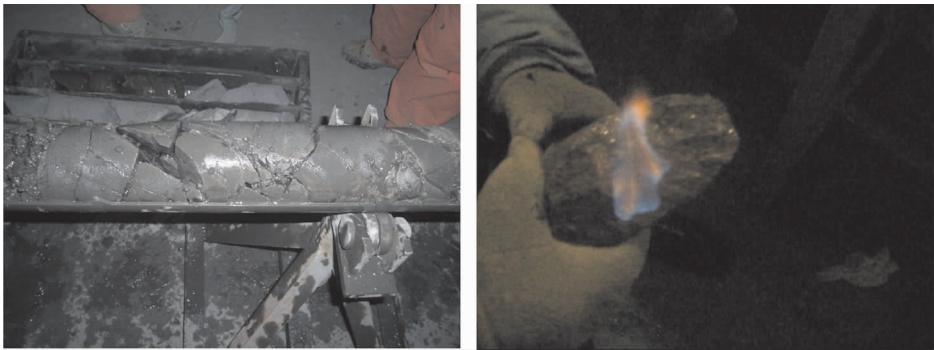
图版 I Plate I



a. 中国第一口陆地永久冻土带水合物 DK-1 科学钻探试验孔施工现场



b. DK1 孔取出的水合物样品



c. DK-2 孔取出的水合物样品



d. PVC 透明 3 层衬管取样

表 2 不同低温泥浆体系配方和性能控制

Table 2 Formulae for different low-temperature slurry systems and their function controls

泥浆类别	配 方	密度 /g·m ⁻³	凝固点 /℃	温度 /℃	漏斗粘度 /s	表观粘度 /mPa.s	塑性粘度 / mPa.s	失水量 /mL	泥皮厚 /mm
无固相 钻进液 体系	1000mLH ₂ O+8% ^c KL	1.14	-12	常温 -10	1' 2"	47	30	/	/
	+0.5% ^c NaOH+				2' 12"	65	55	/	/
	15%NaCl+5% ^c FA								
	1000mLH ₂ O+8% ^c XC	1.14	-12	常温 -10	1' 44"	42	21	/	/
	+0.5% ^c NaOH+				3' 20"	52	28	/	/
	15%NaCl+5% ^c FA								
低固相 泥浆 体系	基浆+1% ^c NaOH+	1.15	-12	常温 -10	28"	18	15	8	1
	15%NaCl+1%HT				54"	30	26	7	1
	基浆+1% ^c NaOH+	1.13	-12	常温 -10	25"	16	14	9	1
	15%NaCl+1%HT				42"	28	28	9	1
	+1%SHR								

用特制唇面的大水口和带底喷水眼复合片金刚石钻头。在钻具和取心方面,采用 1.5m 短岩心管、半合管和 PV 透明三层衬管的技术措施(图版 I -c),以便能够观察到较原始结构的岩心样品。因此,2009 年钻探取得了更好的取样效果(图版 I -d)。

4 讨 论

陆域冻土带天然气水合物取样钻具及其施工技术在国内外都是较新的课题,特别是本次冻土区天然气水合物钻探施工,在国内尚属首次。通过本次科学钻探施工,笔者认识到,由于冻土带天然气水合物的特殊环境和冻土地层的复杂性,对冻土带水合物样品的钻取必须从钻具结构、泥浆性能、工艺参数、操作技术等方面综合考虑。施工实践证明,保压取样钻具在结构原理上是可行的,但在复杂条件下取样施工的可靠性有待提高,特别是小直径,其难度更大,因为直径小,钻具的个别机构和功能受到限制,实现起来比较困难。这也可能是日本、美国合作多年研究保压钻具但成功率不到 80%的主要原因。

从本次钻具的结构原理和室内、现场试验情况

看,如果钻具口径做得足够大,成功率会大大提高。本次研究立足于经济实用和满足地质取样的要求,开发出适合高海拔冻土复杂地层区天然气水合物钻探取样的钻具、工艺方法和取样技术,成功钻获天然气水合物的实物样品,摸索总结出在陆地永久冻土带施工的经验。

施工实践证明,陆地冻土天然气水合物钻探取样采用绳索打捞不提钻取心工艺、大直径钻具(岩心直径 90~95mm)、低温泥浆(0~2℃)、短回次进尺(1~1.5m)、合理的工艺参数等技术措施,完全可以高效低成本地满足钻探要求。本钻具和施工工艺的应用结果表明,大直径钻具、低温泥浆、绳索打捞不提钻快速取心的施工方案是可行实用的。该研究成果不仅对中国陆地冻土天然气调查研究具有一定的现实意义,同时对指导海洋天然气水合物钻探取样施工具有一定的参考价值。下一步,项目组将进一步对钻具结构、施工方案及工艺进行优化和完善,提高钻探施工效率和取样质量,降低施工成本,更好地满足水合物样品的测试分析要求,为中国大规模实施陆地冻土或海洋天然气水合物钻探施工提供具有中国自主知识产权的取样钻具和技术方法。