

# 青南乌丽冻土区天然气水合物钻进工艺及应用研究

李小洋, 张永勤, 孙建华, 梁健, 王汉宝, 李鑫淼, 吴纪修, 李宽, 尹浩

(中国地质科学院勘探技术研究所, 河北廊坊 065000)

**摘要:**在介绍了国内外冻土区天然气水合物勘探开发现状的基础上, 针对我国青南冻土区水合物的勘探要求, 设计了水合物勘探孔 TK-2 孔的钻孔结构, 合理配置了钻探设备, 采用了大直径绳索取心钻进工艺+泥浆制冷技术。同时, 分析了冻土覆盖层融化扩孔和钻杆内壁结泥皮现象, 并采取了相应的解决措施。野外试验结果表明, 钻进台月效率达到 702.07 m, 全孔平均岩心采取率为 93.5%, 且在孔深 229~234 m 处岩心有冒泡助燃现象, 验证了 TK-2 孔配套的钻进工艺是切实可行的。

**关键词:**冻土区; 天然气水合物; 绳索取心; 钻孔结构; 钻具组合; 泥浆制冷

**中图分类号:** P634 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2016)06-0013-05

**Gas Hydrate Drilling Technology and Application Research in Wu-li Qinghai South Permafrost Region/LI Xiao-yang, ZHANG Yong-qin, SUN Jian-hua, LIANG Jian, WANG Han-bao, LI Xin-miao, WU Ji-xiu, LI Kuan, YIN Hao**  
(The Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China)

**Abstract:** Based on the introduction of the present situation of exploration and development of permafrost gas hydrates in the world and aiming at exploration requirements of gas hydrate in permafrost region of southern Qinghai, the hole structure of TK-2 is designed and large diameter wire-line coring and mud cooling technologies are used. Moreover, the problems of hole enlarging caused by permafrost melting and mud-cover in the inner wall of drill stem are emphatically discussed with effective solutions being adopted. The field experiment shows that key technologies of TK-2 are feasible. The meterage per rig-month is 702.07 m, the average core recovery rate reaches 93.5% and core bubbling and combustion-supporting are found at the depth of 229~234m.

**Key words:** permafrost region; gas hydrate; wire-line coring; hole structure; drilling tools assembly; mud cooling

## 1 国内外天然气水合物勘探开发现状

天然气水合物俗称可燃冰, 是由天然气气体分子与水分子在低温高压条件下形成的结晶状固体物质<sup>[1-2]</sup>。在标准大气压和常温状态下, 1 m<sup>3</sup> 水合物可释放出 164 m<sup>3</sup> 的甲烷气体<sup>[3-4]</sup>, 且产生单位能量所释放的二氧化碳等温室气体仅为煤炭的一半。国际天然气潜力委员会的统计表明, 世界各大洋中天然气水合物如转化成天然气, 其换算储量高达 2 × 10<sup>16</sup> m<sup>3</sup>, 且含碳量是迄今世界上已探明石油、天然气、煤炭总矿产储量的 2 倍<sup>[5-6]</sup>。对于这种储量巨大的清洁能源, 已受到世界各国关注。

1965 年, 前苏联在西伯利亚发现了麦索亚哈气田, 并首次证实了天然气水合物矿藏的存在, 且具有商业开发价值<sup>[7]</sup>。1972 年, Arco 公司和 Exxon 公司

在阿拉斯加北坡发现了天然气水合物, 并用加压桶取得了实物样品<sup>[8]</sup>。同期, 加拿大帝国石油公司于马更些三角洲进行石油勘探井时发现天然气水合物<sup>[9]</sup>。1993 年, Andarko 石油公司、Maure 技术公司和美国能源部三方合作, 在阿拉斯加北坡永冻层进行天然气水合物勘探, 布置了“热冰 1 井”<sup>[10]</sup>。1998 年, 加拿大地调局与日本石油公团联合再次在马更些三角洲永冻层进行天然气水合物勘探, 钻深达到了 1150 m, 在 890~952 m 孔段取得了水合物实物样品<sup>[11]</sup>。2002 年, 加拿大地调局、美国地调局、日本石油公团等在马更些三角洲再次布置 3 口勘探井, 并于 2007—2008 年间, 对 3 口试采井通过降压法进行水合物试采试验<sup>[12]</sup>。2007 年, 美国能源部和地调局对阿拉斯加北坡进行大规模的水合物调查

收稿日期: 2016-01-16; 修回日期: 2016-05-19

基金项目: 国家“127”专项子项目“青南藏北冻土区天然气水合物资源勘查(勘探所)”(编号: GZH 201400301)。

作者简介: 李小洋, 男, 汉族, 1988 年生, 硕士, 从事天然气水合物钻采及深部钻探技术研究工作, 河北省廊坊市金光道 77 号, lixy\_cniet@qq.com。

通讯作者: 张永勤, 男, 汉族, 1960 年生, 研究室主任、二级教授, 中国地质科学院第一批科技创新基地成员、国土资源部专家库成员、全国专业标准化技术委员会委员、科技部咨询专家, 探矿工程专业, 从事地质勘探领域钻探工艺、器具、设备及施工工程的研究, 河北省廊坊市金光道 77 号, zyqietlflhb@sina.com。

评价,并布置了勘探井。国外开展冻土区天然气水合物的勘探开发情况,见表 1。

表 1 国外冻土天然气水合物钻探开发情况

| 时间   | 参加机构(或国别)                     | 勘探地点   | 钻探技术             | 泥浆制冷温度/℃ | 备 注                                                                                         |
|------|-------------------------------|--------|------------------|----------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1965 | 前苏联                           | 西伯利亚   | 天然气勘探钻井          |          | 1968 年进行商业开采                                                                                |
| 1972 | Arco 公司和 Exxon 公司             | 阿拉斯加北坡 | 石油勘探钻井           |          | 用加压桶取心获取了水合物样品                                                                              |
| 1972 | 加拿大帝国石油公司                     | 马更些三角洲 | 石油天然气勘探钻井        |          | Mallik L-38 井,在 800~1100 m 发现水合物                                                            |
| 1993 | Andarko 石油公司、Maure 技术公司、美国能源部 | 阿拉斯加北坡 | 绳索取心钻进           | -2~-1    | 进行“热冰 1 井”的钻探工作                                                                             |
| 1998 | 加拿大地调局和日本石油公团                 | 马更些三角洲 | 绳索取心钻进(辅助保压取心技术) | 2        | Mallik 2L-38 井,在 890~952 m 发现水合物                                                            |
| 2002 | 加拿大地调局、美国地调局、日本石油公团等          | 马更些三角洲 | 大直径绳索取心钻进        | -1       | 2007—2008 年对 Mallik 3L-38、Mallik 4L-38 和 Mallik 5L-38 三口试采井,试采 6 天,共产气 13000 m <sup>3</sup> |
| 2007 | 美国能源部和地调局等                    | 阿拉斯加北坡 | 大直径绳索取心钻进        | -5       | 在井深 175.40 m 处发现水合物                                                                         |

我国进行水合物的勘探开发工作起步较晚,经过多年研究优选了冻土发育较好的青藏高原作为陆域水合物开发的重点区域。2008 年,首先在祁连山地区布置了水合物勘探孔 DK-1 孔,并首次钻获我国陆域冻土水合物实物样品<sup>[13]</sup>。2009 年至今,我国在西藏羌塘盆地<sup>[14]</sup>、青海青南沱沱河流域以及青海祁连山木里地区相继布置了十余口勘探井,并多次钻获水合物实物样品以及发现岩心异常现象,青藏高原天然气水合物勘探主要区域见图 1。本文结合国内外水合物勘探开发现状,同时针对青南乌丽地层变化情况,设计了勘探孔 TK-2 孔的钻孔结构,选配了钻探设备,并对钻进工艺进行了应用研究。

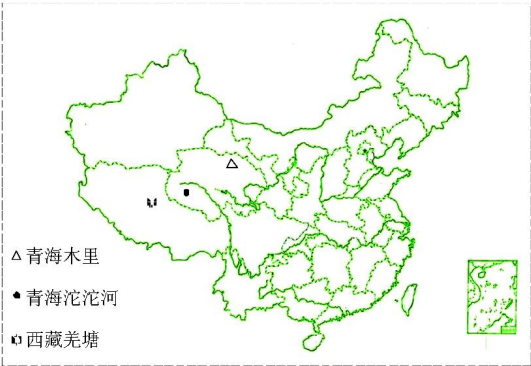


图 1 青藏高原陆域水合物勘探开发主要区域

2 工程概况

2.1 地理与气候环境

青南乌丽煤矿区地处青藏高原沱沱河流域上游,平均海拔在 4500 m 以上,具有永久冻土带,同时有大量的中生代沉积,为天然气水合物的形成提供了有利条件。该区域在地貌上属小起伏高山宽谷盆地,有大片的冲积平原和冲洪积平原,地面冲沟发

育,局部有湿地存在;常年平均气温为 -4.4℃,一年中四季不分明,可据气温分为两季(5—9 月份为夏季,10 月—次年 4 月份为冬季);年降水量少,蒸发量大,气候条件恶劣<sup>[15]</sup>。

2.2 地层概况

根据有关地质资料,预测了青南 TK-2 孔的主要地层及岩性等,为后续的钻孔结构设计和钻具配备提供参考依据。TK-2 孔地层以沉积岩为主,主要为砂岩和泥岩,施工区域内断层发育。地表为暴露的沙土,干燥松散,抗冲蚀能力差,覆盖层厚约 30 m,夹杂有较大颗粒的碎石和卵石,孔壁稳定性差;30~50 m 是断层作用产生的破碎带,岩石主要为弱胶结的泥岩和破碎的砂岩,坍塌掉块;50 m 以深地层是较为完整的泥岩、砂岩和灰岩,硬度为 6~7 级,部分泥岩遇水膨胀产生缩径。

3 钻孔结构

3.1 设计依据

青南 TK-2 钻孔设计的技术要求如下:

- (1) 钻孔设计孔深 700 m;
- (2) 钻孔终孔直径 $\leq 100$  mm;
- (3) 全孔岩心取心率 $\leq 85\%$ ,裂隙发育及水合物可疑地层 $\leq 90\%$ ;
- (4) 岩心直径 $\leq 60$  mm;
- (5) 孔斜 $\geq 2^\circ/100$  m;
- (6) 孔深误差 $\geq 1$  m/1000 m。

3.2 钻孔结构设计

根据水合物勘探的技术要求和钻孔区域的地层情况,设计了 TK-2 孔的钻孔结构,如图 2 所示。具体钻孔结构如下。

- (1) 一开:开孔用 $\varnothing 172$  mm 硬质合金钻头,下

- Ø168 mm 套管,计划下管深度 30 m。
- (2)二开:换径采用 Ø152 mm 硬质合金钻头,地层破碎,下 Ø146 mm 套管,计划下管深度为 50 m。
- (3)三开:采用 Ø114 mm 大直径绳索取心钻具,钻头为 Ø122 mm 孕镶金刚石钻头或金刚石复合片钻头,计划钻进孔深为 400 m。为了防止缩径、塌孔,需下入 Ø114 mm 套管护孔。
- (4)四开:终孔采用 Ø89 mm 绳索取心钻具,钻头使用 Ø100 mm 的孕镶金刚石钻头,终孔孔深为 700 m。

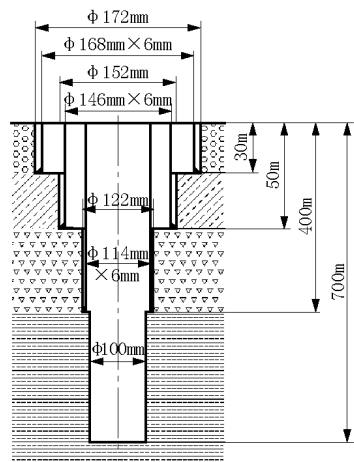


图 2 TK-2 孔钻孔结构图

4 钻探设备选配

- 根据国内外天然气水合物钻井的经验及 TK-2 孔的钻进需要,选配钻探设备时主要考虑以下几点:
- (1)钻机的钻进能力要满足设计孔深的钻进需求;
- (2)泥浆泵的泵量和泵压要满足冷却钻头和携带岩粉的要求;
- (3)配备的柴油发电机功率能够满足野外试验

- 用电要求(由于高原缺氧,柴油燃烧不充分,柴油发电机的能量利用率仅为正常情况下的 70%);
- (4)为了抑制水合物分解,泥浆进井温度  $\geq 3^{\circ}\text{C}$ ;
- (5)野外试验道路不便,选配的钻探设备要便于搬迁。
- 为此,根据实际需要,水合物勘探孔 TK-2 孔配备的钻探设备参见表 2。

表 2 TK-2 孔钻探设备及其主要参数

| 设备            | 主要性能参数                                                                                                                                      |
|---------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| XY-5 型钻机      | 钻进孔深 900 m(Ø89 mm 绳索钻杆), 钻孔倾角 $90^{\circ} \sim 80^{\circ}$ , 回转器最大扭矩 5500 N·m, 立轴最大提升力 150 kN, 动力电机最大功率 55 kW, 主机质量 3.5 t, 可拆卸, 单块最大 500 kg |
| BW250 型泥浆泵    | 功率 15 kW, 最大流量 250 L/min, 最大泵压 7.0 MPa, 整机质量为 500 kg                                                                                        |
| 潍柴 150 型发电机   | 功率 150 kW, 转速 1500 r/min, 总质量 1850 kg                                                                                                       |
| BW160 型泥浆泵    | 功率 7.5 kW, 最大流量 160 L/min, 最大泵压 8 MPa, 整机质量为 190 kg                                                                                         |
| 泥浆            |                                                                                                                                             |
| 制冷 玉柴 80 型发电机 | 功率 80 kW, 转速 1500 r/min, 总质量为 650 kg                                                                                                        |
| 系统 制冷机组       | 总功率 48 kW, 包括制冷机、换热器、载冷剂循环泵和温度传感器                                                                                                           |

5 钻进工艺

在钻进的过程中由于钻头破碎岩石等原因会产生很多热量,破坏水合物的温压条件,引起水合物的分解。为了获取有效的水合物样品,TK-2 孔拟采用大直径绳索取心钻进工艺 + 低温泥浆制冷技术,抑制岩心内水合物的分解。

5.1 钻具组合优选

为了实现大直径取心的目的,兼顾地层稳定性和钻机能力,钻探现场主要配备了以下 4 种规格的取心钻具,取心钻具如图 3、图 4 示意图所示。

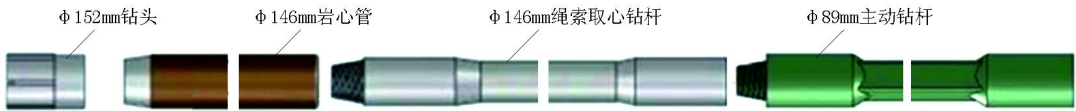


图 3 Ø152 mm 单管取心钻具示意图



图 4 Ø114 mm 绳索取心钻具示意图

- (1)Ø172 mm 单管取心钻具:主动钻杆 + 变径接头 + Ø114 mm 绳索取心钻杆 + 变径接头 + Ø168 mm 取心单管 + Ø172 mm 硬质合金钻头;
- (2)Ø152 mm 单管取心钻具:主动钻杆 + 变径

接头 + Ø114 mm 绳索取心钻杆 + 变径接头 + Ø146 mm 取心单管 + Ø152 mm 硬质合金钻头;

(3) Ø114 mm 绳索取心钻具: 主动钻杆 + 变径接头 + Ø114 mm 钻杆 + Ø114 mm 内外管总成 + Ø122 mm 孕镶金刚石钻头或金刚石复合片钻头;

(4) Ø89 mm 绳索取心钻具: 主动钻杆 + 变径接头 + Ø89 mm 钻杆 + Ø89 mm 内外管总成 + Ø99.5 mm 孕镶金刚石钻头。

5.2 钻进参数选择

影响钻进效率的因素较多,为保障水合物钻探施工的有效进行,钻进参数的选择显得尤为重要。为选择合理的钻进参数,对钻压和泵量进行了计算<sup>[16]</sup>。同时结合地层、钻孔结构、钻头种类和钻井设备等因素,选择的钻进参数见表3。

表3 TK-2孔钻进参数

| 孔段/m          | 钻头类型                 | 转速范围/<br>(r·min <sup>-1</sup> ) | 轴向压<br>力/kN | 泵量/<br>(L·min <sup>-1</sup> ) |
|---------------|----------------------|---------------------------------|-------------|-------------------------------|
| 0~24.50       | 硬质合金钻头               | 85~166                          | 10~30       | 90~120                        |
| 24.50~44.16   | 硬质合金钻头               | 85~166                          | 20~25       | 90~120                        |
| 44.16~381.90  | 孕镶金刚石钻头或<br>金刚石复合片钻头 | 261~294                         | 10~15       | 90~120                        |
| 381.90~702.07 | 孕镶金刚石钻头              | 261~355                         | ≤10         | 90                            |

5.3 大直径绳索取心技术

根据天然气水合物赋存的温压条件,并参考加拿大、美国在永久冻土天然气水合物钻探取样施工中采用的技术方法,采用大直径绳索取心技术进行取心。在钻进过程中钻孔内循环的泥浆始终维持在3℃以下,钻取的水合物岩心也始终处于低温泥浆中,加上泥浆液柱的压力,水合物在钻进过程中不会分解。

在停泵取心过程中,随着钻具的上提,泥浆液柱压力不断下降,岩心外层的天然气水合物开始分解,之后会在水合物表面形成一层冰膜,阻止了岩心内部裂隙中的水合物进一步分解,这种现象称之为水合物的“分解自保护效应”,有利于水合物岩心样品的保存。利用水合物的分解自保护效应,在第四系松散覆盖层取心采用单管提钻取心,孔深较浅,样品能及时提至地表;水合物目标层及以下成岩地层,采用大直径绳索取心技术,能将岩心快速取至地表,再加上岩心直径大,能保证岩心内部的水合物不分解。同时配合少打勤提、短回次钻进和样品速冷保存等方法,能够保证水合物样品的真实性和原位性。

5.4 低温泥浆配制及制冷

泥浆的配制不仅对钻进安全有着至关重要的作用,同时还应满足制冷系统的技术要求。进行水合物勘探的区域大多油气较富集,且地层破碎,为了防止泥浆溢流和孔壁失稳,配制密度较大的低固相聚合物泥浆,泥浆配方为:1%粘土粉+2% SMC+5%护壁堵漏剂+3% HA-K+1%重晶石粉(易坍塌地层时需要)。泥浆性能测试结果为:密度1.02~1.15 g/cm<sup>3</sup>,凝固点-4~-2℃,漏斗粘度26~30 s,含砂率≤2%,失水量10~14 mL/30 min,泥皮厚度1~3 mm,pH值8.5~9.5。

泥浆经制冷系统降温至2.5℃以下(见图4,记录了某时段泥浆进出井温度变化),冷却后的泥浆再泵送至孔内,在维护孔壁稳定的同时,降低了岩心温度,有效地抑制了水合物的分解。钻进至229~234 m孔段发现岩心有强烈冒泡及助燃现象,证实了水合物的存在。

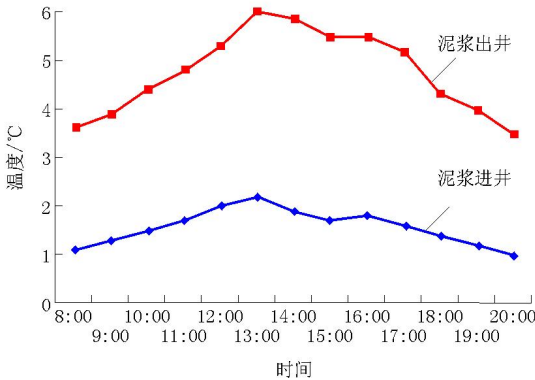


图4 泥浆制冷效果图

5.5 钻进难点及解决措施

(1)冻土层融化扩孔。钻开地层后,发现冻土层的厚度达到了75 m,尤其是开孔24.5 m厚的沙土覆盖层,土质松散,夹杂有部分碎石和卵石。在钻进过程中出现了冻土层的融化扩孔现象,每次提钻取完岩心之后,井壁出现坍塌,造成孔径越来越大,进尺缓慢。为此根据现场条件采取了以下措施:①控制泥浆流量,把原来的泵量从90 L/min降低到60 L/min,满足钻头的冷却和携带岩屑即可,尽可能减少对井壁的冲刷;②降低泥浆温度,把泥浆温度制冷到1℃,尽量减少泥浆和冻土层之间的温差;③使用短套管跟管钻进,维护孔壁稳定。经过数轮试验,终于控制住了冻土层的融化扩孔现象,顺利通过该层。

(2)钻杆内壁结泥皮。当钻进到410~430 m孔段时,出现钻杆内壁结泥皮现象,且主要集中在主

动钻杆以下第 2~3 个立根内,泥皮最厚可达 7 mm。此时是采用  $\varnothing 89$  mm 绳索取心钻进,转速为 355 r/min,泵量为 90 L/min,用打捞器打捞内管时拉不动,甚至拉断打捞器上的钢丝绳。等到内管取出来之后,发现捞矛头上糊满了岩粉,这种结泥皮现象大大

增加了绳索取心的时间,甚至有时候拉断取心钢丝绳还要提大钻取心,这都错过了水合物取心的最佳时机。下面分析了这种现象产生的原因并在钻进过程中采取了相应的技术措施(见表 4),钻杆内壁结泥皮现象大大减轻,绳索取心钻具可以顺利打捞。

表 4 钻杆内壁结泥皮原因分析及解决措施

| 原 因 分 析                                                                  | 解 决 措 施                                              |
|--------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| 在钻进过程中,泥浆中的固体颗粒在高速旋转情况下产生离心力,造成泥浆中的固体颗粒有一部分附着在钻杆内壁上                      | 把钻机转速由 355 r/min 降低到 266 r/min 或 294 r/min,并适当控制进尺速度 |
| 该段主要是泥岩,产生的岩粉水化之后分散在泥浆中,未能及时进行捞砂和清理,造成泥浆含砂率过高                            | 使用 120 L/min 的泵量进行冲孔,将岩粉冲出孔外,及时捞砂清理                  |
| 泥浆从主动钻杆流进钻杆中心孔,流速骤减,泥浆中的固体颗粒也由直线向下运动变成了螺旋向下运动,泥浆流速和运动状态的改变都加剧了钻杆内壁结泥皮的程度 | 在泥浆中增加一些润滑剂,改善泥浆的润滑性和流变性                             |

## 6 结论

TK-2 孔终孔深度 702.07 m,从开孔到终孔用时 30 天,台月效率达到了 702.07 m,全孔岩心采取率达到 93.5%,顺利完成了最初的设计任务,证明了采用的钻进工艺是实际可行的。通过水合物勘探孔 TK-2 孔的实施,可以得出以下结论。

(1) 根据地质情况和水合物勘探要求,合理设计了 TK-2 孔的钻孔结构,确保了水合物勘探孔的顺利实施。

(2) 优选了钻探设备,采用了大直径绳索取心钻进工艺和泥浆制冷技术最大限度抑制了水合物分解,有效地保证了水合物岩心的获取,在孔深 229~234 m 发现岩心有强烈冒泡及助燃现象,证实了水合物的存在。

(3) 针对冻土层的融化扩孔和钻杆内壁结泥皮现象进行了详细的分析,并在钻井过程中采取了相应的技术措施,取得了较好的应用效果。

## 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 祝有海, 张永勤, 文怀军, 祁连山冻土区天然气水合物及其基本特征[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2010, 31(1): 7-15.
- [3] 胡海良, 唐海雄, 罗俊丰, 等. 深水天然气水合物钻井及取心技术[J]. 石油钻采与工艺, 2009, 31(1): 27-30.

- [4] 蒋国盛, 王达, 汤凤林, 等. 天然气水合物的勘探与开发[M]. 湖北武汉: 中国地质大学出版社, 2002: 1-10.
- [5] 王智锋, 许俊良. 深海天然气水合物钻探取心的难点与对策[J]. 石油钻采与工艺, 2009, 31(4): 24-26.
- [6] 窦斌, 高辉, 范彬彬, 等. 海洋天然气水合物分解过程中上部地层稳定性分析[J]. 海洋地质前沿, 2012, 28(12): 30-34.
- [7] 曾繁彩, 吴琳, 何拥军. 国外天然气水合物调查研究综述[J]. 海洋地质动态, 2003, 19(11): 19-23.
- [8] Timothy S. Collett. Natural gas hydrates of the Prudhoe Bay and Kupruk River area, North Slope, Alaska[J]. AAPG Bulletin, 1993, 77(5): 793-812.
- [9] 祝有海. 加拿大马更些冻土区天然气水合物试生产进展与展望[J]. 地球科学进展, 2006, 21(5): 513-517.
- [10] 叶建良, 殷琨, 蒋国盛, 等. 天然气水合物勘探技术综述[J]. 探矿工程, 2003, (4): 43-46.
- [11] 张金昌. 天然气水合物勘探开发: 从马里克走向未来-加拿大北极地区天然气水合物勘探开发情况综述[J]. 地质通报, 2005, 24(7): 4-7.
- [12] YAMAMOTOK, DALLIMORE S. Aumon - JOGMEC - NRCan. Mallik 2006 - 2008 gas hydrate research project progress[J]. Fire In The Ice, 2008, (8)3: 1-5.
- [13] 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.
- [14] 杨林, 赵大军, 郭威, 等. 天然气水合物泥浆制冷系统的野外试验研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2013, 40(12): 25-27.
- [15] 吴珊珊. 沱沱河流域冰川变化对气候变化的响应及其对径流的影响[D]. 北京: 中国科学院地理科学与资源研究所, 2012.
- [16] DZ/T 0227-2010, 地质岩心钻探规程[S].