

# 羌塘盆地岩石物理力学特性分析及孔壁泥浆稳定技术

吴纪修<sup>1</sup>, 尚玉虎<sup>2</sup>, 李鑫森<sup>1</sup>, 薛倩冰<sup>1</sup>

(1.中国地质科学院勘探技术研究所,河北廊坊 065000; 2.山东正元建设工程有限责任公司,山东济南 250101)

**摘要:**羌塘盆地是青藏高原年平均地温最低、冻土层相对较厚的地区,所处的水文地质及工程地质环境极其复杂。由于羌塘盆地勘探程度低,深孔钻探的实钻资料较少,缺乏对该区深部岩层的岩石物理力学特性研究。因此,结合地球物理测井技术、取心和实验测试结果对羌塘盆地天然气水合物钻探 QK-7 孔钻遇地层岩石物理力学参数进行分析,并对冻土带异常孔隙水压力极复杂地层孔壁泥浆稳定技术进行总结和探索,以期对羌塘盆地油气资源战略开发深孔钻探的顺利实施提供实践经验。

**关键词:**羌塘盆地;岩石物理力学特性;冻土带异常孔隙水压力;孔壁稳定

**中图分类号:**P634 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2018)03-0009-05

**Analysis on Rock Physical and Mechanical Properties and the Mud Stability Technology for Borehole Wall in Qiangtang Basin/WU Ji-xiu<sup>1</sup>, SHANG Yu-hu<sup>2</sup>, LI Xin-sen<sup>1</sup>, XUE Qian-bing<sup>1</sup>** (1.The Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China; 2.Shandong Zhengyuan Construction Engineering Co., Ltd., Jinan Shandong 250101, China)

**Abstract:** Qiangtang basin is an area with the lowest annual mean ground temperature and a relatively thick frozen soil layer in the Qinghai-Tibet Plateau, the hydrogeology and engineering geological environment are extremely complex. Because of low exploration degree in Qiangtang basin, there are few real drilling data of deep hole drilling, the study on rock physical and mechanical properties of deep rock strata in this area is lack. Therefore, combining with geophysical well-logging technology, coring and tests measuring results, the analysis is made on rock physical and mechanical parameters of the formations in QK-7 borehole drilling process for natural gas hydrate exploration, and the summarization and exploration are carried out for mud technology of borehole wall stability in extremely complex tundra abnormal pore water pressure in order to provide the practical experience for the smooth implementation of deep drilling in the strategic development of oil and gas resources in Qiangtang basin.

**Key words:** Qiangtang basin; rock physical and mechanical properties; tundra abnormal pore water pressure; borehole wall stability

## 0 引言

羌塘盆地位于青藏高原腹地的藏北地区,是青藏高原冻土最为发育、冻土相对较厚的地区,同时也是成油气最好的地区。目前,羌塘盆地的基础地质及深部岩石物理力学特性研究水平较低,研究区实施的全孔取心岩心钻探多为浅孔。QK-7 孔为中国地质科学院勘探技术研究所 2016 年在羌塘盆地完成的一口全孔取心天然气水合物钻探试验孔,终孔孔深 1011.36 m。该孔处于工程及地层条件复杂的多年冻土带典型区域,依次钻遇三叠系土门格拉组泥岩、砂质泥岩、泥质粉砂岩、粉砂岩、细粒砂岩、中粒砂岩等,全孔段地层破碎、地层条件复杂并且钻

遇多个夹泥夹沙破碎带、成孔困难、取心困难、孔壁极其不稳定,钻时坍塌、漏失,取心即大量涌水、涌泥,导致多起孔内事故。

## 1 钻探区水文地质及工程地质环境(图 1)

根据钻探区地层揭露情况,第四系覆盖层深度为 48~180 m,主要由冲积、洪积堆积的半固结黄褐色泥岩、多年冻土层组成,第四系中含有孔隙潜水,为第一含水层。第一含水层以多年冻土层的上限为依托,贮藏在受季节影响变化的活动层中,属潜水类型,这类含水层具有非常显著的季节变化特征,只有当多年冻土层的上限活动层在秋季的冻结阶段出现

收稿日期:2018-01-02

基金项目:中国地质调查局天然气水合物勘查与试采专项项目“羌塘盆地天然气水合物资源勘查(钻探试验井工程)”(编号:GZHL20110306);地质调查标准制修订与升级推广“护壁堵漏技术规程制定”(编号:DD20160096-20)

作者简介:吴纪修,男,汉族,1984年生,地质工程专业,硕士,从事钻探工艺技术研究工作,河北省廊坊市金光道77号,Wujixiu2008@126.com。

瞬时弱承压状态,该层主要由大气降水、冰川、雪融水、河流入渗和活动层中第四系含冰层融化水补给,地下径流方向由盆地四周向中心或低洼处运动,并在这些地区以地下径流或者地上径流方式输出,在第一含水层中实施钻探多表现为塌孔、涌水;上三叠统土门格拉群深度为180~1000 m(未见底),岩性主要以泥灰色中薄层状泥岩、砂岩为主,局部夹劣质煤层并多处发育破碎带,为第二含水层。第二含水层以多年冻土层为隔水顶板,具有承压水性质,从上游河湖的贯穿区域补给,在下游通过断裂或深切河谷等排泄,承压水性质随季节性变化较小<sup>[2-9]</sup>。由于第二含水层具有弱承压水的性质,且地层多发育小断层和裂隙,因此,受承压水渗流作用影响、孔壁围岩物理力学性质影响在实施钻探过程中孔壁失稳、坍塌、漏失,孔内大量涌水、涌泥。

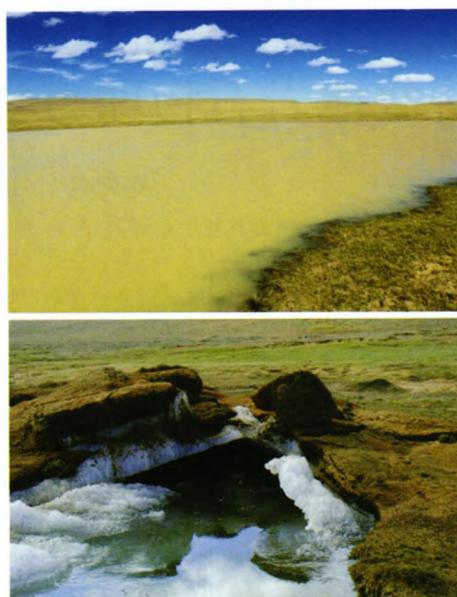


图1 钻探区水文及工程地质环境

## 2 地层岩性及物性特征分析

综合测井解释井段为0~1000 m,共解释36层地层,岩性8种,分别为泥岩、砂质泥岩、泥质粉砂岩、

粉砂岩、细粒砂岩、中粒砂岩及表土砂砾层(QK-7孔位置见图2)。

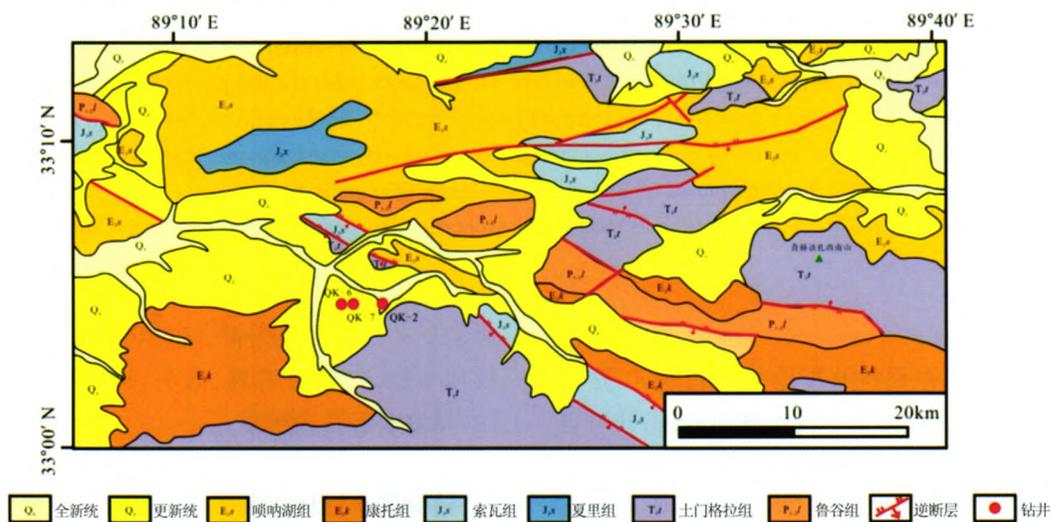


图2 鸭湖地区地质图及天然气水合物地质调查钻孔位置<sup>[1]</sup>

砂砾层主要岩性为棕黄色砂土与棕黄色、灰色粘土互层,含砾石。中粒砂岩层平均密度为2.47 g/cm<sup>3</sup>,孔隙度为10.27%,渗透率为0.74,分析表明该岩层较致密,孔壁稳定;细粒砂岩平均密度为2.45 g/cm<sup>3</sup>,孔隙度为11.07%,渗透率为1.03,分析表明该岩层分布不均匀,部分较破碎,孔壁坍塌和掉块;粉砂岩在该孔较为发育,颜色一般为浅灰、灰及深灰色,泥质含量较细粒砂岩增多,平均密度为2.40 g/cm<sup>3</sup>,孔隙度为11.22%,渗透率为1.26;泥质粉砂岩在该孔

同样较为发育,一般为灰黑、黑色层状,泥质含量较高,炭质纹层较发育,地层破碎,平均密度为2.33 g/cm<sup>3</sup>,孔隙度为21%,渗透率为1.31;泥岩在该孔最为发育,为深灰、灰黑色泥岩,夹灰色薄层状岩屑石英砂岩,由于泥质含量高平均密度为2.33 g/cm<sup>3</sup>,孔隙度为21%,渗透率为1.41,孔壁坍塌、缩径、取心困难,成孔困难。图3是QK-7孔孔隙度、渗透率随深度变化曲线,图4是QK-7孔围岩密度随深度变化曲线,图5是QK-7孔渗透率随孔隙度变化曲线。

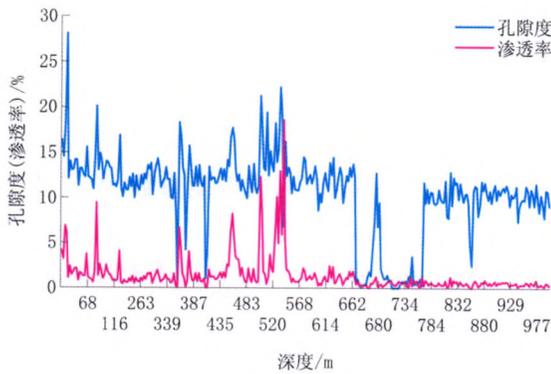


图 3 QK-7 孔孔隙度、渗透率随深度变化曲线

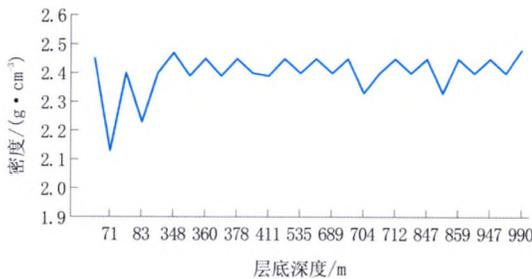


图 4 QK-7 孔围岩密度随深度变化曲线

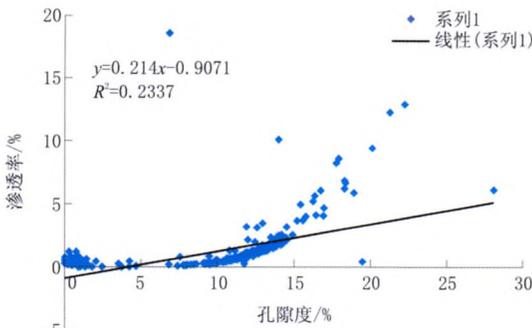


图 5 QK-7 孔围岩渗透率随孔隙度变化曲线

### 3 地层岩石弹性力学参数分析

岩石力学性质通过岩石弹性力学参数来表征,主要有杨氏模量  $E$ 、体积模量  $K$ 、剪切模量  $G$  和泊松比  $\mu$  等。岩石力学参数是地层纵、横波时差的函数,可根据测井资料所获得的纵波时差及岩性、密度测井资料计算地层的岩石力学参数。QK-7 孔地层纵波速度主要集中在  $2400 \sim 4800 \mu\text{s}/\text{m}$ ,横波速度主要分布在  $1200 \sim 2400 \mu\text{s}/\text{m}$ ;杨氏模量分布范围较大,  $6 \sim 44 \text{ GPa}$  都有分布,主要集中在  $16 \sim 30 \text{ GPa}$ ;体积模量分布在  $10 \sim 32 \text{ GPa}$ ;切变模量主要分布在  $4 \sim 13 \text{ GPa}$ ;泊松比变化范围较小,主要为  $0.27 \sim 0.30$ 。QK-7 孔属中孔中渗地层,以砂泥岩为主,地层的非均质性造成了测井响应与岩石力学

参数的差异。粉砂岩岩石力学特征表现为“三高一低”,即杨氏模量、体积模量和剪切模量表现为高值,泊松比相对较低。砂岩杨氏模量一般大于  $15 \text{ GPa}$ ;体积模量一般大于  $14 \text{ MPa}$ ;剪切模量  $5 \sim 12 \text{ GPa}$ ;泊松比在  $2.27$  左右,变化较小。泥岩岩石力学特征表现为“三低一高”,泥岩杨氏模量变化不大,一般在  $7 \sim 12 \text{ GPa}$ ;体积模量在  $9 \text{ MPa}$ ;剪切模量  $2.7 \sim 4.3 \text{ GPa}$ ;泊松比  $0.26 \sim 0.33$ ,平均为  $0.28$ ,表明该井泥岩具有很强的可塑性。图 6 是 QK-7 孔杨氏模量频率分布直方图,图 7 是 QK-7 孔体积模量频率分布直方图,图 8 是 QK-7 孔剪切模量频率分布直方图,图 9 是 QK-7 孔泊松比频率分布直方图。

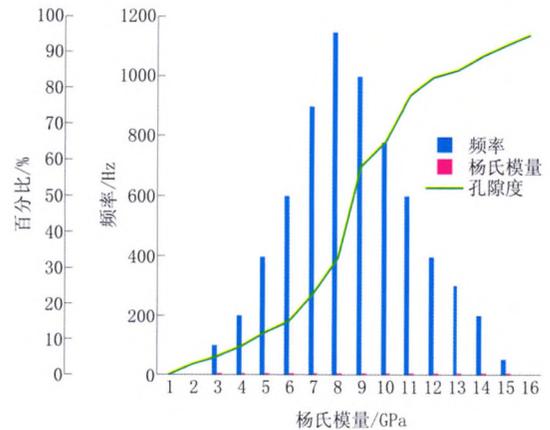


图 6 QK-7 孔杨氏模量频率分布直方图

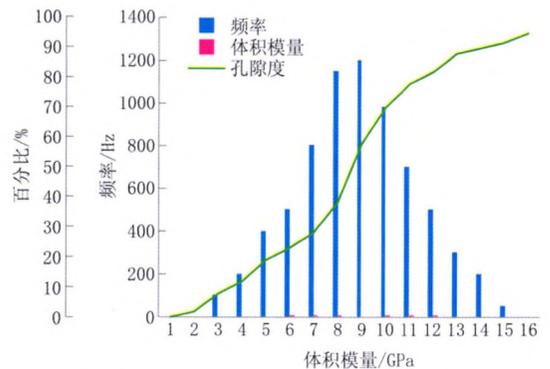


图 7 QK-7 孔体积模量频率分布直方图

### 4 孔壁稳定泥浆工艺

由于钻遇地层处于冻土带异常孔隙水压力极复杂地层的典型区域,对泥浆性能提出了较高的要求。在钻进过程中根据地层孔隙水压力变化情况适时调整泥浆密度以平衡异常孔隙水压力,防止压差卡钻,涌水、涌泥。根据地层情况,总结以往钻探施工经验及孔壁围岩物理力学特性分别制定了泥浆配制方法。

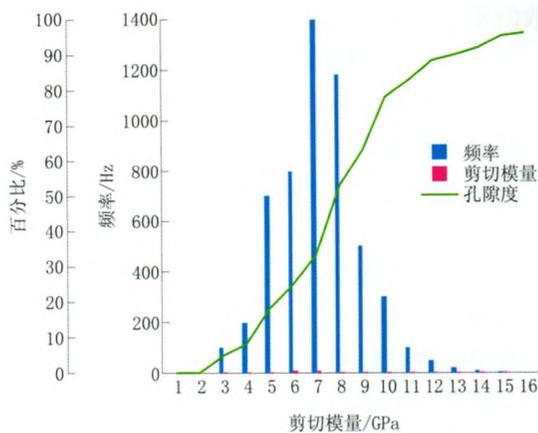


图8 QK-7孔剪切模量频率分布直方图

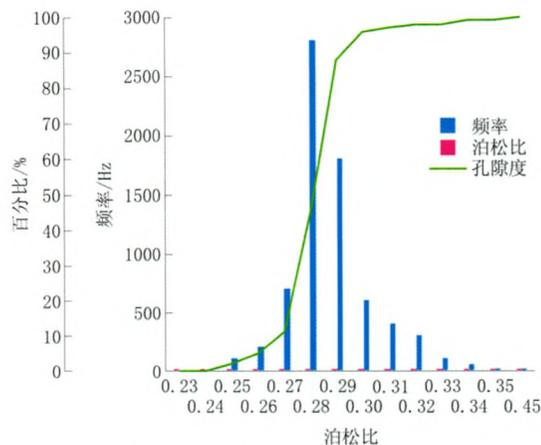


图9 QK-7孔泊松比频率分布直方图

泥浆材料主要有进口粘土粉(QUIK-GLE)、降失水剂(PAC-LE)、广谱护壁剂Ⅲ型、聚丙烯酸钾、堵漏剂(N-SEAL)、增粘剂(CMC)等。加入粘土粉和处理剂前先在水中加入适量纯碱,将pH调整至8.0~8.5。孔壁稳定时泥浆性能参数:泥浆密度为1.02~1.04 g/cm<sup>3</sup>,粘度在26 s左右,失水量8~10 mL/30 min,含砂量<0.6%,钻遇不稳定地层的泥浆调配及配方见表1。

利用泥浆密度计、粘度计、含砂量计、失水量仪及pH试纸等,在现场每班对泥浆的密度、粘度、含砂量、失水量等参数进行监测,采用泥浆密度微调法控制调整泥浆密度,各孔段泥浆性能参数见表2。

为了解决冻土区异常孔隙水压力地层钻时坍塌、漏失,取心即涌水、涌泥的难题,对泥浆进口与出口的密度、返浆率等参数进行监测以便于及时进行堵漏和平衡地层孔隙水压力。QK-7孔自开钻至终孔多次出现孔内漏失、涌水、坍塌等问题,而且分别在348、517、624 m处出现恶性漏失、坍塌,以致一度出现越钻越浅的现象,针对上述问题所采取的技术措施为先确定漏失点进行堵漏,堵漏完成后平衡泥浆压力从而钻穿漏层。第一次堵漏:钻进至170 m全孔漏失,停钻即大量涌水、坍塌,随后提出全面钻进钻具,下入绳索取心钻具后泵入堵漏泥浆

表1 各孔段泥浆配方

层号	井深/m	地层特征	泥浆的组成
1	0~180	坍塌、漏失、涌水	1 m <sup>3</sup> 清水+15%QUIK-GLE+1%广谱护壁剂Ⅲ型+0.2%高粘防塌剂+2%PAC-LE+10%~20% 200目以上重晶石粉
2	180~351	水化、缩径、坍塌、涌水	1 m <sup>3</sup> 清水+15%QUIK-GLE+2%广谱护壁剂Ⅲ型+0.2%高粘防塌剂+5%PAC-LE+0.1%氯化钾+0.5%N-SEAL+15%~25% 200目以上重晶石粉
3	351~616	坍塌、掉块、涌水	1 m <sup>3</sup> 清水+15%QUIK-GLE+2%广谱护壁剂Ⅲ型+0.3%高粘防塌剂+0.3%PAC-LE+0.2%氯化钾+0.5%高粘堵漏剂+0.2%聚丙烯酸钾+15%~25% 200目以上重晶石粉
4	616~1000 (未见底)	易塌、掉块、漏失	1 m <sup>3</sup> 清水+7%QUIK-GLE+0.5%广谱护壁剂Ⅲ型+0.1%高粘防塌剂+4%磺化褐煤树脂+0.3%氯化钾+15%~25% 200目以上重晶石粉

表2 各孔段泥浆性能参数

层号	井深/m	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	漏斗粘度/s	滤失量/[mL·(30 min) <sup>-1</sup> ]	泥皮厚/mm	pH值	含砂量/%	胶体率/%
1	0~180	1.15~1.20	55~65	8~10	0.2	8	0.8	98
2	180~351	1.15~1.25	32~40	10~14	0.3~0.5	8	1.0	98
3	351~616	1.15~1.18	38~42	7~9	0.3	8	1.0	>98
4	616~1000	1.15~1.25	43~48	7~9	0.5	8	1.0	>98

静置3 h,然后扫孔钻进。堵漏泥浆配方为:1 m<sup>3</sup>清水+18%QUIK-GLE+1%高粘防塌剂+5%单向压力封闭剂+3%堵漏剂。密度控制在1.10~1.15 g/cm<sup>3</sup>,粘度40~50 s。钻至178 m此时泥浆返浆

率80%,密度1.08~1.10 g/cm<sup>3</sup>,堵漏效果较好。第二次堵漏:绳索取心钻进至517 m,泥浆密度1.18 g/cm<sup>3</sup>,泥浆上返率为20%,说明此时泥浆液柱压力大于地层压力。随后调整泥浆密度至1.06 g/cm<sup>3</sup>,

上返率为80%,泥浆上返后孔口密度为 $1.04\text{ g/cm}^3$ ,泥浆液柱压力略小于地层压力并伴有少量涌水。第三次堵漏:绳索取心钻进至724 m,泥浆密度 $1.18\text{ g/cm}^3$ ,泥浆上返率为零,全孔漏失,停钻即大量涌水。采用高粘堵漏配方:1 m<sup>3</sup>清水+10% QUIK-GLE+2%高粘防塌剂+5%单向压力封闭剂。密度控制在 $1.08\sim 1.15\text{ g/cm}^3$ ,泥浆上返率为80%,堵漏效果良好。

## 5 结论

(1)对羌塘盆地冻土带异常孔隙水压力典型区域的水文地质及工程地质环境进行了经验总结和理论分析,并对钻探区孔隙水压力赋存条件和赋存方式进行了分类。

(2)羌塘盆地勘探程度低,深孔钻探的实钻资料较少,缺乏对该区深部岩层的岩石物理力学参数研究,结合地球物理测井技术、取心和实验测试结果对QK-7孔钻遇地层岩石物理力学参数进行分析,明确了QK-7孔地层岩性、密度、孔隙度、渗透率等物性指标以及物性参数随孔深分布曲线;并对杨氏模量( $E$ )、体积模量( $K$ )、剪切模量( $G$ )和泊松比( $\mu$ )等岩石弹性力学参数进行了计算,对了解羌塘盆地鸭湖地区岩石物理力学特性提供了支持。

(3)根据羌塘盆地冻土带钻探区的水文地质及

工程地质环境提出了冻土带异常孔隙水压力钻探孔壁稳定泥浆配方,并根据钻探工程实践及岩石物理力学性质进行了优化和完善,为羌塘盆地油气资源战略开发深孔钻探的顺利实施提供了实践经验。

## 参考文献:

- [1] 王平康,祝有海,张帅,等.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):11-15.
- [2] 吴纪修,张永勤,薛倩冰,等.深水海底天然气水合物浅覆盖层钻井井壁稳定预测研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(10):170-175.
- [3] 吴纪修,张永勤,梁健,等.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.
- [4] 程国栋,赵林.青藏高原开发中的冻土问题[J].第四纪研究,2000,20(6):521-530.
- [5] 李述训,吴通华.冻土温度状况研究方法和应用分析[J].冰川冻土,2004,26(4):377-383.
- [6] 吴青柏,朱元林,刘永智.工程活动下多年冻土热稳定性评价模型[J].冰川冻土,2002,24(2):130-133.
- [7] 蒋国盛,周刚,汤凤林,等.冻土钻孔内的温度分布[J].探矿工程,2002,(1):41-44.
- [8] 高钦,刘争平.青藏铁路格拉段多年冻土区工程钻探的特点[J].岩土工程界,2002,5(12):35-36.
- [9] 何维维,盛煜,周飞,等.多年冻土区矿山开采研究现状及展望[J].冰川冻土,2011,33(2):389-396.
- [10] 李鑫森,张永勤,梁健,等.冻土区天然气水合物试采对接井冲洗液技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(1):28-32.