

# 冻土区天然气水合物试采对接井冲洗液技术

李鑫森, 张永勤, 梁 健, 王汉宝, 李小洋, 尹 浩, 吴纪修, 李 宽

(中国地质科学院勘探技术研究所, 河北 廊坊 065000)

**摘要:** 2015 年, 在祁连山木里冻土区进行了天然气水合物试采对接井施工。根据木里地区的地质条件, 针对孔壁易出现的水化、坍塌、掉块等现象, 制定了冲洗液配方, 通过合理调整处理剂的用量, 达到良好的护壁及润滑效果。使用过程中对密度、粘度、含砂量、失水量等参数进行了监测, 并对冲洗液性能作出及时调整。应用结果表明, 该冲洗液配方具有良好的综合性能, 能够满足冻土区天然气水合物试采井钻探施工要求。

**关键词:** 冻土区; 天然气水合物; 试采; 对接井; 冲洗液; 木里地区

**中图分类号:** P634.6    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1672-7428(2016)12-0028-05

**Technology of Flushing Fluid for Gas Hydrate Trial Mining Horizontally Butted Well in Permafrost Area//LI Xin-miao, ZHANG Yong-qin, LIANG Jian, WANG Han-bao, LI Xiao-yang, YIN Hao, WU Ji-xiu, LI Kuan** (The Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China)

**Abstract:** In 2015, gas hydrate trial mining horizontally butted well was constructed in Qilian Mountain Muli permafrost area, The formula of flushing fluid was designed optimally according to the formation conditions such as hydration, collapsing and chipping. Good wall protection and lubrication results were achieved by adjusting the dosage of drilling mud additives reasonably. Mud parameters such as density, viscosity, sand content, filter loss and some others were monitored in the application, and the properties of flushing fluid were timely adjusted. The application results show that the flushing fluid has good comprehensive properties and can meet the requirements of trial mining well drilling construction.

**Key words:** permafrost area; natural gas hydrate; trial mining; horizontally butted well; flushing fluid; Muli area

## 0 引言

我国实施陆地冻土天然气水合物调查研究已有 10 余年的历史。祁连山木里地区水合物的产出方式可能存在裂隙型和孔隙型 2 种, 裂隙型水合物以薄层状、片状赋存于粉砂岩、泥岩、油页岩的裂隙面中, 孔隙型水合物赋存于细粉砂岩的孔隙中<sup>[1-4]</sup>。根据以往勘探孔施工经验, 水合物所赋存的地层易出现坍塌、掉块、缩径等现象, 在油页岩、泥岩等水敏性地层钻进时, 应尽量抑制岩层的水化作用, 合理预防上述现象的发生。钻探施工要求冲洗液的失水量要小, 护壁性能要好, 冲洗液使用过程中合理调整防塌、护壁、润滑等处理剂的用量, 综合达到良好的携粉、降失水、护壁及冷却润滑能力<sup>[5-8]</sup>。天然气水合物试采井由 1 口主井和 2 口水平对接井组成。水平井施工进入造斜段后, 上井壁的稳定变差, 对应用的冲洗液提出了较高的要求, 本次试采井用冲洗液意在通过多种处理剂的合理配比, 抑制水敏性地层的水化作用, 预防地层的水化剥落及缩径现象, 冲洗

液的含砂量要小, 达到良好的防塌、护壁及降失水性。

## 1 地层情况

天然气水合物试采井钻探施工区域的地层相对复杂, 地层岩性及特征如表 1 所示。根据以往此区域钻探施工取得的岩心情况来看, 表层 0~4 m 主要是第四系洪积物, 松散并伴有卵砾石; 4~42 m 以粉砂泥岩为主, 夹薄煤层, 渗透, 易水化剥落; 42~121 m 以粉砂岩为主, 夹煤层, 地层裂隙发育, 易掉块、渗漏; 121~151 m 以砂岩为主, 夹有断层泥、煤层, 易水化、缩径、坍塌; 151~316 m 以泥岩为主, 夹砂岩、页岩、断层泥、煤层, 易缩径、坍塌、掉块; 316~440 m 以砂岩和泥岩为主, 易塌、掉块。木里地区以往没有进行过对接井钻探施工, 由于地层复杂, 钻孔可能出现的问题较多, 对冲洗液性能提出了进一步的要求。与常规直井钻探施工相比, 水平对接井的施工难度要大的多, 进入造斜段后, 上孔壁稳定性变差, 较易

收稿日期: 2016-02-26; 修回日期: 2016-08-29

基金项目: 中国地质调查局国家海洋地质专项子项目“陆域天然气水合物试采技术与工程”(编号: GZH201400307)

作者简介: 李鑫森, 男, 汉族, 1985 年生, 工程师, 硕士, 从事钻探工程科研工作, 河北省廊坊市金光道 77 号, lixinmiaosmile@163.com。

出现坍塌、掉块等现象,造成卡钻、埋钻等事故。在冲洗液配制时,应注重提高冲洗液的防塌及护壁性能,含砂量要小,控制冲洗液失水量,防止水敏地层的水化剥落,对孔内可能出现的问题起到良好的预防作用。定期检测冲洗液密度、粘度、失水量、含砂量等参数的变化,根据地层情况调整冲洗液各性能参数,使冲洗液保持良好的携粉、护壁及润滑性能,综合达到最佳钻进效果,保障本次试采井施工顺利完成。

表1 地层岩性及特征

层号	井深/m	地层岩性	地层特征
①	0~4	第四系洪积物,含砾石、鹅卵石	易塌,易漏
②	4~42	粉砂泥岩为主,夹薄煤层	渗漏,易水化剥落
③	42~121	砾石、粉砂岩为主,夹有煤层	地层裂隙较发育,易掉块,渗漏
④	121~151	砂岩为主,夹有断层泥、煤层	断层泥易水化,缩径,坍塌
⑤	151~316	泥岩为主,夹砂岩、页岩、断层泥、煤层	易塌,掉块
⑥	316~440	砂岩,泥岩为主	易塌,掉块

## 2 钻孔结构与钻进工艺

根据以往我单位在木里地区水合物钻探取心情况,木里地区水合物富集层主要分为3段,第一段深度150m左右,岩性以砂岩为主,完整性较好,为空隙-裂隙型水合物显示层段,但水合物储量相对较少。第二段深度250m左右,岩性以泥岩、粉砂质泥岩为主,此层段为裂隙型水合物显示层段,岩心破碎,易坍塌掉块,容易出现卡钻、埋钻等事故,水平对接井钻探施工难度非常大。第三段深度350~360m,为水合物的主要富集层,并且通过以往的气测录井情况看,具有良好的油气显示,此层段总体岩性以砂岩为主,岩性完整,横向变化小,工程施工难度相对较小。通过对水合物富集层储量以及地层钻探施工难易程度等方面进行综合考虑,对接井水平段穿过水合物第三段富集层为最佳选择,既降低了钻探施工风险,又达到了提升水合物开采量的目的。

本次试采井由主井SK-0、水平对接井SK-1、SK-2三口井组成,钻孔结构设计如图1所示。SK-0井主要用于排水降压及天然气采集,SK-1、SK-2井用于注热,加速水合物分解。采用对接井方案对陆域天然气水合物进行试开采在我国尚属首例,水平对接井施工采用了MWD(Measuring While

Drilling)技术,对井眼轨道进行控制,造斜段及水平段的施工利用PDC全面钻头配合弯壳体螺杆钻具、定向短节、无磁钻杆等完成,最终实现2口水平井与主井井底连通<sup>[9]</sup>。

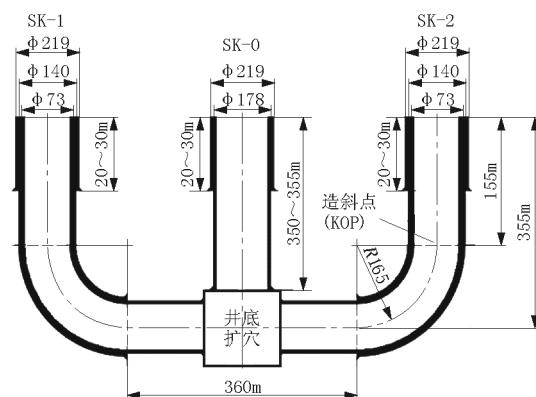


图1 试采井钻孔结构示意图

SK-0井一开采用 $\varnothing 311$  mm牙轮钻头全面钻进至26m,表层下 $\varnothing 219$  mm套管,水泥固结;二开采用 $\varnothing 200$  mm牙轮钻头全面钻进355m,下 $\varnothing 178$  mm第二层套管,主井井底扩穴,水平对接井钻进至距离主井70m时,下入慧磁高精度中靶探管,实现两口水平井与主井的精准对接。水平对接井SK-1、SK-2均采用 $\varnothing 311$  mm牙轮钻头开孔,全面钻进,下入 $\varnothing 219$  mm套管20~30m;二开采用 $\varnothing 200$  mm牙轮钻头继续钻进至155m处造斜点,更换水平井施工钻具完成造斜段施工,造斜段曲率半径控制在165m左右,采用 $\varnothing 200$  mm PDC全面钻头,配合5LZ127 $\times 7.0$ L(1.75°,1.50°)弯壳体螺杆钻具完成造斜段施工,预计井深435~440m进入水平段,钻进至水平段切入点,提钻下入 $\varnothing 140$  mm第二层套管,第一段及第二段水合物储层使用筛管,其余用实管,通过筛管与实管的合理组合,一定程度上提高天然气开采量;三开采用 $\varnothing 118$  mm PDC全面钻头配合5LZ95 $\times 7.0$ L(1.50°)弯壳体螺杆马达完成水平段钻探施工,钻进至515~520m,在主井井底完成对接,下入 $\varnothing 73$  mm第三层套管,水平段套管全部为筛管,垂直段及造斜段套管仍为筛管与实管的组合形式。试采井施工钻具组合如表2所示。

## 3 冲洗液材料体系的选配与性能测试

### 3.1 冲洗液材料体系的选配

本次试采井施工区域地层易出现坍塌、掉块、

表2 钻具组合

井号	一 开	二 开	三 开
SK-0	Ø311 mm 牙轮钻头 + Ø120 mm 螺旋钻铤 + Ø89 mm 钻杆 + Ø50 mm 主动钻杆	Ø200 mm 牙轮钻头 + Ø120 mm 螺旋钻铤 + Ø89 mm 钻杆 + Ø50 mm 主动钻杆	
SK-1/ SK-2	Ø311 mm 牙轮钻头 + Ø120 mm 螺旋钻铤 + Ø89 mm 钻杆 + 89 mm 六方主动钻杆	Ø200 mm 牙轮钻头 + Ø120 mm 螺旋钻铤 + Ø89 mm 钻杆 + 89 mm 六方主动钻杆 / Ø200 mm PDC 钻头 + 5LZ127 × 7.0L (1.75°, 1.50°) 螺杆马达 + 定向短节 + 无磁钻杆 + Ø89 mm 钻杆 + 89 mm 六方主动钻杆	Ø118 mm PDC 钻头 + 5LZ95 × 7.0L (1.50°) 螺杆马达 + 定向短节 + 无磁钻杆 + Ø73 mm 钻杆 + 89 mm 六方主动钻杆

水化剥落、缩径、漏失等现象,对冲洗液的性能提出了较高的要求,冲洗液应具有良好的防塌及护壁性能,失水量要小,并且对地层的水化现象起到良好的抑制作用,冲洗液的粘度低,流动性好,具有较好的携粉及润滑性能。另外,螺杆钻具的转子、定子、轴承等极易磨损,冲洗液在满足携粉护壁要求的前提下,含砂量要小,并具有良好的冷却润滑的功能,能

够保证螺杆钻具较长的使用寿命<sup>[10-11]</sup>。根据地层情况,总结以往钻探施工经验,并考虑对接井施工的特殊性,针对不同地层可能出现的情况分别制定了冲洗液配制方法,使用过程中严格控制各种冲洗液材料的用量及搅拌时间,不同层位的冲洗液配制方法如表3所示。

表3 冲洗液配方

层号	井深/m	地层特征	冲洗液的组成(与水的质量比)及加入顺序
①	0~4	易塌易漏	清水 + 15% 钠基膨润土 + 1% 广谱护壁剂Ⅲ型 + 0.2% 高粘防塌剂
②	4~42	渗漏,易水化剥落	清水 + 0.5% 广谱护壁剂Ⅲ型 + 0.2% 高粘防塌剂 + 0.3% PAC-141 + 0.1% 氯化钾 + 0.5% 高粘堵漏剂
③	42~121	易掉块渗漏	清水 + 0.5% 广谱护壁剂Ⅲ型 + 0.3% 高粘防塌剂 + 0.3% PAC-141 + 0.2% 氯化钾 + 0.5% 高粘堵漏剂
④	121~151	断层泥易水化,缩径,坍塌	清水 + 10% 钠基膨润土 + 0.5% 广谱护壁剂Ⅲ型 + 0.1% 高粘防塌剂 + 4% 磺化褐煤树脂 + 0.4% PAC-141 + 8% 重晶石粉 + 0.3% 氯化钾
⑤	151~316	易塌掉块	清水 + 7% 钠基膨润土 + 0.5% 广谱护壁剂Ⅲ型 + 0.1% 高粘防塌剂 + 4% 磺化褐煤树脂 + 22% 重晶石粉 + 0.3% 氯化钾
⑥	316~440	易塌掉块	清水 + 0.5% 广谱护壁剂Ⅲ型 + 0.1% 高粘防塌剂 + 4% 磺化褐煤树脂 + 0.4% 氯化钾 + 14% 重晶石粉

利用潍坊钠基膨润土先配制基浆,根据不同地层情况,合理选择广谱护壁剂、高粘防塌剂、褐煤树脂等处理剂的用量,利用搅拌罐充分搅拌,再将调配好的冲洗液注入到泥浆池中循环使用。高粘防塌剂具有良好的护壁、防塌及携砂性能,具有良好的维护井壁稳定及岩屑携带能力,保持井内干净,实现起下钻畅通无阻。广谱护壁剂Ⅲ型具有良好的防塌护壁、润滑减阻及降低冲洗液失水量的性能,可把冲洗液失水量降至 4 mL/30 min 以下,同时能够增加冲洗液的切力和粘度。磺化褐煤树脂能够降低冲洗液失水量,抑制泥页岩水化,润滑防塌,稳固井壁,改善高密度冲洗液流动性,抗温抗盐抗钙性能好。高粘堵漏剂可用于堵渗漏、小漏,增粘效果好,有利岩粉携带。重晶石粉用于提高冲洗液密度,平衡地层压力,增加冲洗液的治塌能力,最高可把冲洗液密度提到 2.3 g/cm<sup>3</sup>。氯化钾能够抑制水敏性泥页岩水化膨胀、剥落掉块,抑制岩屑分散造浆。PAC-141 具有降低冲洗液失水量及增粘作用,同时能够调节冲洗液流型,改进冲洗液的剪切稀释性能。

冲洗液的初次配制方法为:清水中加入 15% 钠基膨润土预先配制基浆,在配制好的基浆中加入 1% 广谱护壁剂Ⅲ型充分搅拌溶解后,加入 0.2% 高粘防塌剂充分搅拌,待完全溶解后不沉淀再使用。随着钻进过程中地层的不断变化,针对易出现坍塌掉块的地层,调整高粘防塌剂及广谱护壁剂Ⅲ型的用量,达到良好的防塌护壁效果;对于易渗漏地层,调整高粘堵漏剂用量,预防渗漏地层可能出现的问题;针对易水化剥落、膨胀缩径地层,合理控制磺化褐煤树脂、氯化钾、广谱护壁剂Ⅲ型及 PAC-141 等处理剂的加入量,降低冲洗液的失水量,有效抑制地层的水化作用,防止地层水化剥落及缩径现象的发生;随着孔深不断加深,利用重晶石粉提高冲洗液密度,平衡地层压力,保持孔壁稳定。针对不同地层可能出现的问题制定了冲洗液配制方法(参见表3),每次加入处理剂都需经过充分搅拌,待加入的处理剂完全溶解后,再加入下一种处理剂进行搅拌,当搅拌后的冲洗液无沉淀后,再注入泥浆池进行循环使用。

### 3.2 性能测试与分析

冲洗液现场使用过程中,利用冲洗液密度计、粘度计、含砂量计、失水量仪及pH试纸等,对密度、粘度、含砂量、失水量等参数进行了定期监测,并对冲洗液进行取样,进行了室内检测,测得数据见表4。

表4 冲洗液性能参数

层号	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	漏斗粘度/s	失水量/(mL·(30 min) <sup>-1</sup> )	泥皮厚度/mm	pH值	含砂量/%	胶体率/%
①	1.10~1.13	55~65	8~10	0.3~0.5	8	3	98
②	1.01	32~40	10~14	0.2	8	1	98
③	1.05	35~42	13~19	0.2	8.5	1	>98
④	1.15~1.17	38~42	7~9	0.3	8	2	>98
⑤	1.20~1.25	40~43	5~7	0.4	9	1	>98
⑥	1.28~1.35	43~48	3~4	0.5	8	2	>98

根据水合物地层的特性,为防止孔壁坍塌等情况出现,冲洗液密度相对较大,并且能够人为调整,以适应孔内情况的不断变化。粘度适中的冲洗液可以起到良好的携粉及护壁性能,过高粘度的冲洗液在循环时产生的“激动”压力会破坏孔壁稳定性,过低粘度冲洗液对岩屑的悬浮作用降低,导致冲洗液的携粉性能不好。冲洗液使用时应严格控制失水量,失水量越大,孔壁失稳的机率越高。泥皮要薄,并且韧性好,从而起到良好的护壁效果<sup>[12-13]</sup>。直井钻探施工通常控制冲洗液含砂量 $\geq 8\%$ ,失水量 $\geq 15$  mL/30 min,胶体率 $\leq 90\%$ ,泥浆的pH值应当在6~11<sup>[6]</sup>,当pH值达到11以上时,会加剧页岩的水化作用,促进页岩剥落掉块<sup>[14]</sup>。考虑到螺杆钻具的使用工况,冲洗液含砂量要小,pH值应控制在合理范围内,过高或过低都会对螺杆钻具的零件产生破坏作用,缩短螺杆使用寿命。另外,在满足洗井的前提下,尽可能减小冲洗液的密度和粘度,从而发挥出螺杆钻具应有的性能,达到最佳使用效果。

由测得的数据可以看出,冲洗液密度随孔深的增加逐渐增大,平均值在1.14 g/cm<sup>3</sup>左右,最大值1.35 g/cm<sup>3</sup>,起到了平衡地层压力及维护井壁稳定的作用;冲洗液的漏斗粘度除刚开孔时略大外,其余数值变化平稳,均值维持在43.7 s左右,具有良好的携粉及润滑能力,满足试采井钻探使用要求,保证孔底钻具正常钻进,密度及粘度的变化曲线如图2所示。失水量除渗透地层较大外,其余均在10 mL/30 min以内,总体来看比较理想,第3层段钻进结束时,冲洗液失水量达到了19 mL/30 min,进入第4层段后,增加了磺化褐煤树脂的使用,适当加大了氯化

钾及PAC-141的用量,将失水量降低至9 mL/30 min以下,有效抑制了地层的水化作用,保持井壁稳定,后续钻进过程中失水量变化稳定,具有逐渐减小的趋势;泥皮厚度保持在0.2~0.5 mm,泥皮薄、致密、韧性好,从钻进中孔内情况看,达到了良好保护井壁的目的,失水量及泥皮厚度变化曲线如图3所示。随孔深的变化,冲洗液pH值及含砂量变化较稳定,pH值基本控制在8~9,含砂量除开孔段略大外,其余基本稳定在1~2,均值在1.40左右,pH值满足钻探施工要求,冲洗液含砂量对于直井钻探来讲是比较合理的,但考虑到螺杆钻具的使用工况,冲洗液含砂量仍然略高,应进一步加大冲洗液的除砂力度,pH值及含砂量变化情况如图4所示。胶体率测定结果良好,达到98%以上。

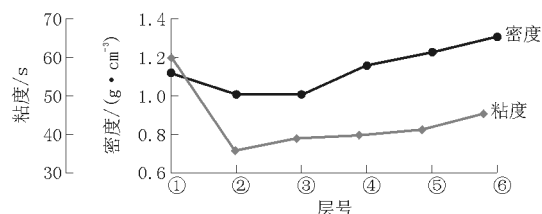


图2 密度及粘度的变化曲线

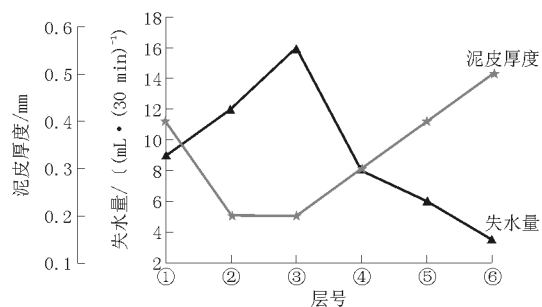


图3 失水量及泥皮厚度变化曲线

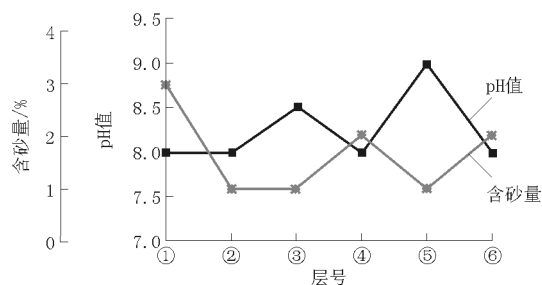


图4 pH值及含砂量变化曲线

### 4 现场应用效果

现场冲洗液循环使用时,注重观察泥浆池中冲洗液量的增减、冲洗液在循环槽内流动性好坏、泥浆

泵排量及压力变化、起下钻是否顺畅等与冲洗液相关的现场情况,定期检测冲洗液性能,并及时调整冲洗液性能参数,适应地层的不断变化,使冲洗液具有良好的携粉、护壁性能,保持孔底螺杆马达的正常运转,从而达到最佳的钻进效果。

冲洗液含砂量过高,直接影响冲洗液的流变性能。水平对接井施工中,冲洗液除砂工作尤为重要。本次试采井冲洗液除砂主要包括2个方面,一是自然沉淀人工捞砂,二是机械除砂。为了降低冲洗液的含砂量,现场冲洗液循环槽长度30 m,并设置了多个沉淀坑,使冲洗液中的大颗粒岩粉在回流泥浆池的过程中,靠自身的重力作用得到充分的沉淀,现场人员定期捞砂,清理循环槽及沉淀坑。为了去除冲洗液里含有的小颗粒岩粉,应用了除砂器,该除砂器集旋流除砂与振动除砂为一体,结构紧凑,质量轻,野外施工使用方便,效果好。通过以上2种方法的结合,可以有效控制冲洗液含砂量,提高冲洗液的使用性能。

主井SK-0井、水平对接井SK-2井的垂直段及造斜段施工中,没有出现卡钻、埋钻等事故,钻具上提下放自然顺畅,SK-0井钻进至355 m后,顺利完成了 $\varnothing 178$  mm套管的下放,螺杆马达在使用过程中未出现问题,纯钻进时间达到196 h,单根 $1.75^\circ$ 弯外壳螺杆的使用时间达到了150 h,提钻检查没有出现质量问题,为达到造斜要求,更换 $1.50^\circ$ 弯外壳螺杆继续钻进至439.84 m,并完成了437.19 m $\varnothing 140$  mm套管一次下放到底。主井SK-0井、水平对接井SK-2井的垂直段及造斜段施工顺利完成,并完成套管一次性下放,说明此次配制冲洗液性能良好,有效抑制了页岩地层的水化作用,对孔内可能出现的坍塌、掉块、缩径等现象起到了较好的预防作用,达到了携粉、护壁的目的,保证孔壁稳定的同时,基本满足螺杆马达的使用要求,在天然气水合物试采对接井施工中起到了积极的作用,为后续试采井水平对接施工奠定良好的基础。

## 5 结论

(1)根据木里地区地层情况及可能出现的孔内问题,制定了冲洗液的配制方法。对于易水化剥落

地层,适当提高广谱护壁剂、磺化褐煤树脂及氯化钾用量,对于易塌、掉块地层,调整广谱护壁剂及高粘防塌剂的用量以达到护壁效果。从现场的使用情况来看,本次冲洗液调配能够满足试采井的施工要求,具有一定借鉴意义。

(2)对冲洗液性能参数进行了检测与分析,粘度、泥皮、失水量、pH值等参数基本在合理范围内变化,有效抑制了地层水化作用,对孔内可能出现的坍塌、掉块、缩径等现象起到了较好的预防,具有良好的携粉、护壁及润滑性能。

(3)冲洗液性能既要满足地层钻进要求,又要兼顾螺杆钻具使用寿命。保证冲洗液的携粉、护壁及润滑性能同时,通过人工除砂和机械除砂的组合方式合理控制含砂量,进一步提高冲洗液性能。

## 参考文献:

- [1] 卢振权,祝有海,张永勤,等.青海省祁连山冻土区天然气水合物基本地质特征[J].矿床地质,2010,29(1):182-191.
- [2] 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.
- [3] 祝有海,张永勤,文怀军.祁连山冻土区天然气水合物科学勘探工程概况[J].地质通报,2011,30(12):1816-1822.
- [4] 祝有海,张永勤,文怀军,等.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.
- [5] 王胜.高原冻土天然气水合物钻探泥浆体系研究[D].四川成都:成都理工大学,2007.
- [6] 程金宏.基于地质钻探工程的钻井泥浆设计与配置[J].山东煤炭科技,2010,(1):106-107.
- [7] 郝振军,马保祥.防塌低固相泥浆在油页岩钻进的应用[J].吉林地质,2011,30(2):134-136.
- [8] 王禹,刘波,高洪志.油页岩地层绳索取心钻探冲洗液技术探讨[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2007,34(10):32-34.
- [9] 胡汉月.人工磁导航定向钻进中靶系统研究[D].北京:中国地质大学(北京),2008.
- [10] 陈湖滨,刘同富,裴建忠,等.影响螺杆钻具工作寿命的使用因素分析[J].钻采工艺,2007,30(1):25-26,34.
- [11] 吴景华.螺杆定向钻进工艺及存在的问题[J].地质与勘探,1997,33(5):60-63.
- [12] 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.
- [13] 陈立敏.青海省江仓矿区防塌钻井液技术研究[D].北京:中国地质大学(北京),2008.
- [14] 宋少博.大庆水平井防塌钻井液技术研究[D].黑龙江大庆:东北石油大学,2012.