

羌塘盆地油气地质调查井地层条件与施工难点

王志祥¹, 陈冲², 郭如伦², 陈国鹏², 许非¹, 蒲俊佚²,
次旦², 袁忠伦², 巴桑次仁², 欧涛¹, 格桑²

(1. 四川省第七地质大队, 四川 乐山 614000; 2. 西藏自治区地质矿产勘查开发局第六地质大队, 西藏 拉萨 851400)

摘要:羌塘盆地油气资源勘查工作力度不大, 存在大量空白区域有待进一步探索。地质调查井是羌塘盆地油气资源调查研究的重要工程手段, 主要采用绳索取心钻进工艺获取全孔段高质量岩心与测井通道, 在10余年已逐渐替代提钻取心钻进工艺。羌塘盆地地理位置与气候条件特殊, 地层条件复杂, 绳索取心钻进工艺在该区域应用遇到了许多施工难点。笔者结合岩性测试数据和地层应力条件, 分析阐明绳索取心钻进工艺与全面钻进工艺在井身结构、钻进参数、钻井液、堵漏堵涌等方面存在显著差异, 相关参数指标与实践经验无法简单照搬。同时, 整理羌塘盆地多年地质调查井典型问题, 围绕绳索取心钻进工艺井壁稳定、钻井液、涌水漏失、工程实施等方面进行详细阐述分析, 可为今后该区域地质调查井设计与施工提供重要参考。

关键词:油气地质调查井; 绳索取心钻进; 全面钻进; 井壁稳定; 钻井液; 羌塘盆地

中图分类号: P634.5 **文献标识码:** B **文章编号:** 2096-9686(2025)04-0111-10

Stratigraphic conditions and construction difficulties of oil and gas geological survey wells in Qiangtang Basin

WANG Zhixiang¹, CHEN Chong², GUO Rulun², CHEN Guopeng², XU Fei¹, PU Junyi²,
CI Dan², YUAN Zhonglun², BASANG Ciren², OU Tao¹, GE Sang²

(1. The 7th Geological Brigade of Sichuan, Leshan Sichuan 614000, China; 2. The 6th Geological Brigade of the Xizang Autonomous Region Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Lhasa Xizang 851400, China)

Abstract: The exploration intensity of oil and gas resources in the Qiangtang Basin is not high, and a large number of blank areas need further exploration. Geological survey wells are an important engineering tool for the investigation and research of oil and gas resources in the Qiangtang Basin. Wireline core drilling technology is commonly used to obtain the high quality in-situ cores and logging channels for the entire borehole, which has gradually replaced the conventional core drilling technology over the past decade. The Qiangtang Basin has a unique geographical location and climatic conditions, with complex geological conditions. The application of wireline coring drilling technology in this area has encountered many construction difficulties. This paper combines the lithological testing data and geological stress conditions to analyze and clarify that the wireline coring drilling process and the non-coring oil and gas drilling process are significantly different in terms of well configuration, drilling parameters, drilling fluid, plugging and surging, thus relevant parameter indicators and practical experience cannot be simply copied. At the same time, typical problems of geological survey wells in the Qiangtang Basin over the years were sorted out and analyzed in detail, aspects such as wellbore stability, drilling fluid, drilling leakage, and engineering implementation are elaborated, which can provide important references for the design and operation of geological survey wells in the region.

收稿日期: 2024-07-30; 修回日期: 2024-07-30 DOI: 10.12143/j.ztgc.2025.04.015

基金项目: 四川省地质矿产勘查开发局 2025 年度科技项目 (编号: SCDZ-KJXM202509); 西藏自治区重点研发计划项目 (编号: XZ202403ZY0040)

第一作者: 王志祥, 男, 汉族, 1983 年生, 高级工程师, 勘查技术与工程专业, 主要从事钻探技术研发及服务, 四川省乐山市峨眉山市峨九街 87 号, 182352585@qq.com。

引用格式: 王志祥, 陈冲, 郭如伦, 等. 羌塘盆地油气地质调查井地层条件与施工难点[J]. 钻探工程, 2025, 52(4): 111-120.

WANG Zhixiang, CHEN Chong, GUO Rulun, et al. Stratigraphic conditions and construction difficulties of oil and gas geological survey wells in Qiangtang Basin[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(4): 111-120.

Key words: oil and gas geological survey well; wireline core drilling; non-coring drilling; wellbore stability; drilling fluid; Qiangtang Basin

0 引言

中国地质调查局、中国石油等单位组织地质工作者对羌塘盆地实施了近30年系统的油气地质调查与研究,采用路线地质调查、石油地质填图、二维地震勘探、大地电磁测深、地质调查井等多种手段,比较系统地评价了该区域主要烃源岩及油气资源潜力。截至目前为止,羌塘盆地油气资源勘查因诸多原因影响,工作力度仍然不大,存在大量空白区域有待进一步探索。

有学者认为,羌塘盆地是我国最有希望取得突破的陆地油气勘探新区。然而,也有学者认为,高原隆升与剥蚀作用导致盆地内缺乏有效封盖层,且缺乏优质烃源岩^[1]。在已有羌塘油气系统评价资料的基础上,有计划地实施钻井工程可获得油气资源是否富集的直接证据。迄今为止,羌塘盆地实施最深的地质调查井为QS-10井,井深2213.60 m,完成时间2024年;实施最深的油气参数井为QK-1井,井深4696.18 m,完成时间2019年。相比油气参数井,地质调查井实施深度较浅,但实施成本与周期、岩心采取率等方面优势明显。例如:2000 m深的地质调查井可在一个年度内完成,包括钻井、测录井等费用一般不超过1千万元,岩心采取率可达95%以上;超过4000 m深的油气参数井通常要跨年度实施,整体成本超1亿元甚至更高,以收集岩屑为主,仅特定井段少量取心。地质调查井是羌塘盆地油气资源调查最主要的工程技术手段,主要采用绳索取心钻进工艺获取全井段高质量岩心与测井通道,在10余年间逐渐替代了提钻取心钻进工艺。据不完全统计,近20年实施的地质调查井有50余口,部分代表性地质调查井统计见表1。

1 地层条件

1.1 地层岩性条件

羌塘盆地地层岩性主要有泥岩、页岩、石膏、灰岩、白云岩、砂岩、砾岩等沉积岩,以及表层第四系冻土层。岩石可钻性级别都在8级以下,绝大部分低于4级,钻进难度不大,但井壁稳定等问题突出。泥岩、页岩、石膏地层因水敏性较强带来严重井壁稳定和钻井液稳定等问题;灰岩、白云岩地层因溶

表1 近20年部分代表性地质调查井统计
Table 1 Statistics of representative geological survey wells in the past 20 years

序号	井号	井深/m	完成年份
1	QZ-1	816.00	2005
2	D2	847.47	2006
3	QZ-3	887.40	2010
4	QK-1	882.01	2011
5	QZ-5	1001.40	2012
6	QK-5	772.19	2013
7	QZ-10	601.35	2014
8	QZ-14	1206.43	2015
9	藏尼地1井	2001.10	2016
10	QD-17	2001.77	2017
11	QK-9	1705.60	2018
12	藏双地1井	1206.78	2019
13	QD-18	1582.15	2020
14	QS-5	2006.66	2023
15	QS-10	2213.60	2024

洞、裂隙带来涌水漏失问题,进而影响钻井液性能,改变井内液柱压力,井壁稳定问题进一步突出;砂岩、砾岩地层的井壁稳定问题相对较少,个别出现构造破碎掉块漏失现象;表层第四系冻土层因钻井液浸泡、钻具扰动导致液化坍塌问题^[2]。整体来说,泥岩是影响钻进安全的重要因素,为深入了解羌塘盆地泥岩组成情况,对典型钻遇的泥岩进行了取样分析,其全岩和黏土矿物X射线衍射分析数据见表2。

由表2可以看出,泥岩岩心样品中的黏土矿物含量很高,处于50%~70%之间。从水化膨胀能力来说,蒙皂石>伊蒙混层>伊利石>高岭石>绿泥石,虽然检测无蒙皂石,但伊蒙混层和伊利石总量占到黏土矿物的绝大部分,水化问题仍然相当严重。黏土矿物水化软化和易溶盐溶蚀作用,会导致石英、方解石、长石等非水敏性矿物从井壁大量剥落,严重时造成井壁坍塌^[3-5]。典型岩心照片见图1。

1.2 地层应力条件

羌塘盆地地理位置特殊,地质构造应力研究还十分薄弱。据相关研究,大致可将羌塘盆地划分为

表 2 全岩和黏土矿物 X 射线衍射分析数据
Table 2 X-ray diffraction analysis data of whole rock and clay minerals

井号 (取样井深/ m)	全岩矿物质量分数/%												黏土矿物相对含量/%						混层比 (s%)	
	石英	钾长石	斜长石	菱铁矿	方解石	石膏	芒硝	白云母	赤铁矿	黄铁矿	黏土矿物	其它	伊/蒙	伊利石	高岭石	绿泥石	蒙皂石	绿/蒙	伊/蒙	绿/蒙
藏双地一井 (565)	21.9	—	3.8	0.6	7.2	0.6	1.3	8.8	2.1	—	52.8	1.0	35.0	57.0	4.0	5.0	—	—	15.0	—
藏双地一井 (1082)	22.1	—	5.9	0.6	10.2	—	—	2.3	—	0.8	57.1	1.0	25.0	59.0	5.0	11.0	—	—	10.0	—
QS7(241)	11.4	—	1.7	—	17.6	—	—	—	1.9	—	67.4	—	42.3	53.8	—	3.9	—	—	69.0	—
QS7(253)	11.7	—	1.7	—	18.1	3.6	—	—	1.9	—	63.0	—	59.3	34.6	—	6.1	—	—	82.0	—
QS7(1565)	26.6	—	5.3	—	1.0	—	—	—	2.2	—	64.9	—	34.0	61.0	3.0	3.0	—	—	15.0	—
QS7(1568)	30.3	—	5.9	—	—	—	—	—	—	1.1	62.7	—	43.0	52.0	2.0	2.0	—	—	15.0	—



图 1 羌塘盆地典型岩心照片
Fig.1 Typical core photo of Qiangtang Basin

北部边缘断褶带、拉雄错—雀莫错复式褶皱带、玛依岗日断隆区、帕度错褶断带、土门格拉平行褶皱带等 5 个构造变形区^[6]。有学者根据 QK-2 井实钻资料,对不同钻井液密度下井眼周围围岩应力分布和井眼坍塌或拉裂变形规律进行研究,提出在井深 141.00~157.00 m 井段的钻井液安全密度窗口应在 1.3~1.8 g/cm³ 之间^[7],因研究井深较浅,实际参考价值不高。中石化中原石油工程有限公司根据地震资料进行地层压力系数预测,在羌塘盆地 QK-1 参数井施工方案中提出地层压力系数参考数据如

下:索瓦组—夏里组 1.0,布曲组 1.0~1.4,雀莫错组 1.2~1.4,肖茶卡组 1.0~1.4,波里拉组 1.4~1.7,钻井深度预计在 4900 m 以内。除大的区块划分及相关应力水平预测之外,羌塘盆地地层还会因岩性不同产生上覆岩层拱曲隆起构造现象,如石膏、盐岩的溶解迁移结晶膨胀作用,图 2 为 QS-7 井长井段泥岩应力破碎岩心照片。因此,对于具体钻井工程而言,可根据相关构造条件及地层应力参数提前做好有关预案,但影响地层应力因素很多,施工中应根据实际情况及时做出合理调整。



图 2 QS-7 井长井段泥岩破碎岩心照片
Fig.2 Photos of fractured mudstone core in the long well section of QS-7

2 绳索取心钻进工艺与全面钻进工艺差异

2.1 井身结构

绳索取心钻进工艺与全面钻进工艺具有不同的井身结构特点。绳索取心钻进工艺最早应用于固体矿产勘查,在推广到羌塘盆地油气地质调查井的 10 余年间,为满足油气钻井在防喷、防毒、测录

井、环保等方面的要求,配套引入了大量新的设备与工艺,包括防喷器安设、硫化氢检测、油气测录井、废弃物处置等,其可视作缩小版的全孔取心的油气地质参数井。

油气地质调查井深度一般在2000 m以内,钻进时效低,整体配套物资少,钻井单价及总价低,技术门槛相对不高,遇到高压油气层的概率较小,各级套管仅作临时隔离,完钻后需回收使用,通常采用同级钻杆当套管,除测录井工作外,基本都由钻井机台独立完成。油气地质参数井深度一般>4000 m,钻进时效高,整体配套物资多,钻井单价及总价高,技术门槛高,遇到高压油气层的几率较大,各级套管需要水泥固井,包括成井、定向、钻井液、测录井、固井等基本都有专业机构提供技术支撑。

两种工艺常用钻井口径及理论环状间隙大小整理如表3所示,其中全面钻进工艺以常用的Φ114、Φ127 mm钻杆为例。绳索取心钻进钻头直径略大于钻杆外径,环状间隙很小,相比全面钻进工艺更是呈数量级的差别。绳索取心钻杆壁薄,承载力远低于全面钻进钻杆。因此,无论从钻井口径、环状间隙,还是钻杆承载力来说,绳索取心钻进工艺容许的地层缩径量和坍塌量更小,更容易因缩径、垮塌造成抱钻、卡钻、断钻杆事故^[8-9]。

2.2 钻进参数

绳索取心钻进工艺一般是对整段地层进行取心钻进,采用金刚石取心钻头,而全面钻进工艺采

用牙轮钻头或PDC复合片钻头,仅对钻井液携带上来的岩屑进行取样。因绳索取心钻进工艺在钻头类型、钻井口径、环状间隙、钻杆壁厚等方面与全面钻进工艺存在明显差异,造成钻进参数明显不同。全面钻进工艺要求“一低两高”,即低转速、高钻压、高泵量,以切削碎岩方式为主,钻具需要承受较大的扭矩;而绳索取心钻进工艺要求“一高两低”,即高转速、低钻压、低泵量,以磨削碎岩为主,钻具承受扭矩相对较小。绳索取心钻头单位钻压推荐范围0.5~1.0 kN/cm²,线速度推荐范围1.5~3.0 m/s,上返流速推荐范围0.5~1.5 m/s。全面钻进工艺除转速推荐的数值与范围均较小之外,钻压、泵量的推荐数值和范围均很大,其地表设备输出能力、井内钻具承载能力明显更强。表4为钻进参数推荐值,相关数据来源于钻探规程与有关设计文件。

表4 绳索取心钻进与全面钻进推荐钻进参数对比
Table 4 Comparison of recommended drilling parameters between wireline core drilling and non-coring drilling technology

工艺	钻头直径/mm	钻杆外径/mm	转速/(r·min ⁻¹)	钻压/kN	泵量/(L·min ⁻¹)
绳索取心钻进	76	71	400~800	10~12	40~70
	96	89	350~700	12~15	60~90
	122	114	250~500	14~18	90~110
	150	140	200~400	16~20	100~130
全面钻进	215.9	127	60~110	40~120	1600~2000
	244.5	127	60~110	40~150	1800~2400
	311.1	127	60~100	50~200	2100~3000
	444.5	127	40~70	50~200	3000~3600
	660.4	127	40~70	50~200	3000~3600

表3 绳索取心钻进与全面钻进常用钻头直径及理论环状间隙对比

Table 3 Comparison of commonly used bit diameters and theoretical annular clearance sizes between wireline core drilling and non-coring drilling technology

工艺	钻头直径/mm	钻杆外径/mm	环状间隙/mm
绳索取心钻进	76	71	2.5
	96	89	3.5
	122	114	4.0
	150	140	5.0
	152.4	114	19.2
全面钻进	215.9	127	44.5
	244.5	127	58.8
	311.1	127	92.1
	444.5	127	158.8
	660.4	127	266.7

2.3 钻井液

油气井全面钻进工艺的钻井液配方通常非常复杂,成本很高,可占整个施工经费预算的10%左右。钻井液具有剪切力高、失水量小、抑制性强、剪切稀释效果好、密度调节范围大等特点。钻井液密度可在1.0~2.2 g/cm³之间调节,低流速或静止时加重材料和岩屑颗粒不易沉淀,大环状间隙下泥浆泵的驱动泵压又不会太高。

绳索取心钻进的钻井液通常以聚丙烯酰胺、羧甲基纤维素钠、植物胶等无固相或低固相体系为

主,主要满足适度增黏以悬浮岩屑并护壁和润滑钻杆的作用,较低的黏度和剪切力有利于岩屑的自然沉淀,清水钻进在有时仍被采用,极少采用加重钻井液,钻井液密度通常 $<1.1\text{ g/cm}^3$,成本相对更低。

2.4 井涌漏失

钻井堵漏方面,绳索取心钻进工艺是否采取堵漏措施要视具体情况而定,钻进过程中适度漏失并补充新浆有利于降低固相含量,在钻机负荷、掉块卡钻、施工用水等问题并不突出,即将终孔或有备用口径时,施工人员通常不愿意停钻堵漏,但为满足防喷、录井等要求则应堵漏。绳索取心采用水泥浆液堵漏比较常见,但一般仅在1000 m以内使用,井深太大及井内水位较高时会明显增大灌注埋钻、浆液污染、扫孔浮浆埋钻等风险^[10-11]。若采用惰性材料堵漏,其在粒径选择范围、单次用量等方面都明显小于全面钻进工艺。油气井全面钻进通常不允许顶漏钻进,现阶段仍以惰性材料堵漏为主,堵漏经费投入远高于绳索取心。

处理井涌方面,绳索取心钻进采用钻井液平衡地层孔隙压力的方式并不多见,涌水时通常采用套管隔离,而全面钻进采用平衡钻进工艺技术成熟。

3 施工难点分析

3.1 井壁稳定问题

羌塘盆地油气调查井井壁失稳主要为岩石因剪切破坏或塑性流动造成井壁的坍塌或缩径。井壁失稳是地层原始地应力状态、井筒液柱压力、地层岩石力学特性、钻井液性能以及工程施工等多种因素综合作用的结果^[12-14]。钻进过程中,钻井液会造成围岩地层水化、盐溶,并产生渗透破坏和井壁冲蚀,成井过程和起下钻会出现地应力变化和液柱压力激动,这些因素结合地层自身条件,产生非常复杂的物理化学作用,诸多因素相互影响促进,最终导致井壁失稳。绳索取心钻杆与井壁的环状间隙很小,特别在深部遇到构造破碎、软弱地层、钻井涌漏等情况时,更易出现严重井壁稳定问题,藏双地1井、QS-7井、QZ-16井等施工艰难就与这些因素有关,井壁稳定问题最终成为羌塘盆地油气地质调查井成败的关键。

(1)泥页岩等地层因黏土矿物水化造成缩径或软化分散垮塌,测试分析岩心样品含有大量黏土矿物,其水化作用的强度和影响范围会随着时间不断

增大,几乎所有水基钻井液都不可避免。虽然具有良好抑制性的钻井液可降低水化程度,但对泥页岩来说,只是降低多少和降低快慢的问题。例如藏双地1井、QS-7井均在完钻井段遇到强水化泥岩地层,并在地应力等因素作用下,出现严重井壁失稳问题。取块状泥岩岩心浸泡在清水中,不到1 h可分散成碎屑状,如图3所示,倘若钻进过程中泵入清水,井壁垮塌程度可想而知。



(a) 浸泡前的泥岩

(b) 浸泡后的泥岩

图3 藏双地1井泥岩浸泡水化分散照片

Fig.3 Photo of mudstone soaking, hydration and dispersion in Well 1 of Zangshuangdi

(2)膏岩、盐岩地层因石膏、芒硝等易造成溶蚀坍塌或吸水膨胀坍塌,例如QD-17井出现近百米半透明石膏层,井径扩大明显。天然石膏产出形态为硬石膏(CaSO_4)、二水石膏($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$),或2种石膏常伴生。当硬石膏吸水变成二水石膏,密度会由 $2.8 \sim 3.0\text{ g/cm}^3$ 降低至 2.3 g/cm^3 左右,体积增加约26%。

(3)羌塘盆地地层岩性强度很低,地层应力影响井壁稳定异常突出。采用莫氏硬度笔测试QS-7井等泥岩硬度仅为1~2,自身强度承载能力很低。若忽略构造应力影响,铅垂地应力 P_v 为上覆岩层压力,水平地应力 P_c 则为 $\lambda_c P_v$,若要保持成井前后井壁围岩水平应力相当,则钻井液液柱压力需达到 P_c ,不足部分需用自身强度弥补,强度不够则发生井壁失稳。资料显示,硬岩 $\lambda_c=0.1 \sim 0.43$,软岩 $\lambda_c=0.21 \sim 0.67$ ^[15],如取 $\lambda_c=0.5$,泥岩密度 2.4 g/cm^3 ,则计算钻井液密度需达到 1.2 g/cm^3 。由于 λ_c 参数取值范围很大,各段岩石性质又有不同,自身强度可利用程度无法测算,用此计算分析井壁稳定仅方便参考理解。

若以岩石三轴抗压强度进行理解,用 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 表示某处井壁围岩最大、中间、最小主应力。当地层未钻开前,地层应力处于平衡状态,则 σ_1 为铅垂地应力, σ_2 、 σ_3 为水平地应力, σ_2 通常等于 σ_3 。当地层被钻

开后,平衡状态被打破,钻井液液柱压力替代原位岩石支撑作用,通常支撑作用会减小,此时 σ_1 仍为铅垂地应力, σ_3 为径向应力即液柱压力, σ_2 为切向应力。

图4为特定岩石破坏的摩尔包络线图,分析井壁稳定只需考虑最大、最小主应力。 C 为岩石黏聚力, θ 为岩石内摩擦角, σ_3 为钻井液液柱压力, σ_1 为该处围岩在此液柱压力下所能支撑的极大铅垂地应力。相同围岩在不同液柱压力下,则有与之对应不同的极大铅垂地应力,图中3个摩尔圆则表示3个不同 σ_3 对应的不同 σ_1 。

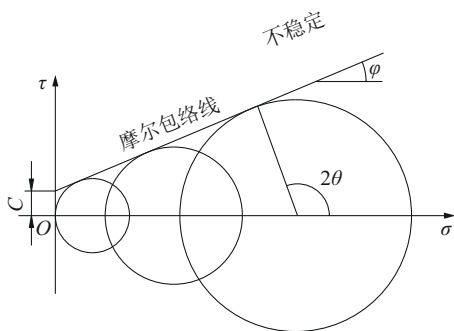


图4 岩石破坏摩尔包络线图

Fig.4 Mohr envelope diagram of rock failure

钻井施工中,地层实际铅垂地应力不能人为改变,仅能通过提高液柱压力 σ_3 ,将摩尔圆往右侧推,以提高所能支撑的极大铅垂地应力 σ_1 ,当地层实际铅垂地应力小于此 σ_1 时,则井壁围岩稳定,否则不稳定。测试易失稳井段岩石性能参数,绘制摩尔包络线,结合井深则可量化计算满足不被剪切破坏的 σ_1 、 σ_3 ,因铅垂地应力、液柱压力与井深都呈正比例关系,所以关于地应力对井壁稳定的影响最终转移到了对钻井液密度的设计。

3.2 钻井液问题

羌塘盆地钻井液技术要求高,直接影响井壁稳定和其自身稳定,极端条件下需实现“低黏低切低失水高密度高抑制强封堵”的苛刻属性。

(1)泥页岩等地层黏土矿物含量高,磨削产生的岩屑会严重造浆,大幅提高钻井液黏度,降低流动性,固相颗粒难以分离,钻井液污染快,仅能生成厚而松散的劣质泥皮,图5为严重造浆地层导致的钻井液流动性降低和钻具结垢问题。使用泥页岩抑制剂可有效抑制地层造浆,但会破坏钻井液中有益胶体的稳定,适用绳索取心的低固相钻井液使用

受到限制。



(a) 泥岩严重造浆导致钻具结垢

(b) 泥岩严重造浆影响钻井液流动性

图5 钻井液流动性降低和钻具结垢

Fig.5 Reduced fluidity of drilling fluid and scaling of drilling tools

(2)石膏、芒硝等会使钻井液出现钙侵、盐侵,造成膨润土、阴离子型钻井液材料的快速絮凝失效,钻井液pH降低^[16-19]。例如,藏尼地1井使用的阴离子聚丙烯酰胺PHP、植物胶等配置的无固相钻井液,经过井内循环后,漏斗黏度从30~40 s快速降低到20 s内;QZ-16井使用低固相钻井液,经过井内循环后,其pH值从10左右快速降低至7,黏度同样降低明显。同时,QZ-16井地层与地表水体pH值6呈弱酸性,采用持续加碱方式维持钻井液稳定效果差、副作用明显,其原因为:加碱引入过量 Na^+ 会交换出地层原本吸附的 H^+ ,使 OH^- 浓度快速降低;过量 Na^+ 、 OH^- 会共同促进地层黏土矿物快速水化,维持低固相钻井液稳定与维持井壁稳定存在矛盾^[20]。

(3)维持软弱泥岩井壁稳定,需要高密度钻井液平衡地层应力,而绳索取心钻进工艺实现难度很大。常规重晶石粉等材料加重需要钻井液具有较高的黏度和切力,但易带来泵压异常高、岩屑沉淀难等诸多问题。绳索取心钻进岩粉与加重材料固相颗粒粒径范围重叠较大,难以采用固控设备将岩屑等有害固相与重晶石粉等有用固相有效分离。绳索取心钻进钻井液加重采用可溶盐,如工业盐、氯化钠、氯化钾等,可用于配制密度 $<1.30 \text{ g/cm}^3$ 的钻井液,继续提高则可采用二价盐或有机盐,如钙盐、甲酸钾等,如甲酸钾饱和溶液密度可达 1.58 g/cm^3 。因易溶盐加重会带来静电屏蔽作用,众多高

分子材料的溶解伸展程度会大幅降低,钻井液黏度提升困难。总之,绳索取心钻进工艺可采用的加重钻井液方案存在制作成本高、加重幅度小、钻具腐蚀快、材料配伍性差、性能指标兼顾难等诸多问题。

(4)即使有加重方案,若无可靠钻井液安全密度窗口仍然不行。钻井液密度窗口是地层破裂压力与孔隙压力(或地层坍塌压力)之间的差值,是地层允许钻井液液柱压力变化的范围,即 $\Delta P=P_{\text{破}}-P_{\text{孔}}(P_{\text{塌}})$ 。通常破裂压力 $P_{\text{破}}$ 为高值,孔隙压力 $P_{\text{孔}}$ 与地层坍塌压力 $P_{\text{塌}}$ 为低值,采用公式计算时取 $P_{\text{孔}}$ 和 $P_{\text{塌}}$ 中的大值。钻井液液柱压力一般要略大于地层孔隙压力,以防止出现井喷,同时也要大于地层坍塌压力,以防止出现井壁坍塌。地层坍塌压力与破裂压力会随着孔隙压力增大而增大,前者增长速度大于后者,致使安全钻进的钻井液密度窗口变窄。羌塘盆地泥岩等地层强度低,需要高的钻井液密度以提高井壁稳定性,若在深部遇到构造破碎带时,会让维持井壁稳定的钻井液密度高至接近甚至超过地层破裂压力,安全窗口变窄甚至没有。钻井液安全密度窗口见图6所示,其中例3则无安全密度窗口,此时需快速通过套管隔离或者采取地层封堵增强手段。因地层条件复杂多变,不同井段问题可能不同,致使钻井液难以兼顾,井内情况将变得异常复杂。

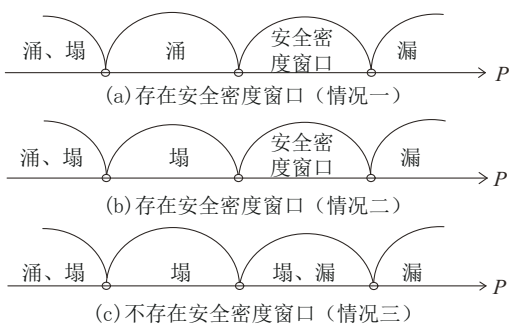


图6 钻井液安全密度窗口示意

Fig.6 Schematic diagram of drilling fluid safety density window

(5)钻井液上返流速影响井眼净化、井壁稳定等,绳索取心钻进工艺对此研究很少,羌塘盆地钻井井壁稳定性差,此项工作具有现实意义。现代钻井液通常含有膨润土、高分子聚合物等材料,可视为有静切力 τ_s 的黏塑性流体。当外力超过静切力时,钻井液才与井壁(管壁)断开,并像塞子般开始流动,流速由低到高要经历塞流-层流-紊流等阶

段。塞流过渡到层流期间有一段平板型层流,其相比层流可更好上返岩屑,相比紊流能减少对井壁冲刷。因此,钻进过程通常试图实现流核直径宽即平板化程度高的平板型层流,资料显示动塑比 $\tau_0/\mu_p > 0.5$ 后流核直径增大将不再明显^[12,15]。现以动塑比0.5 Pa/(mPa·s)的钻井液进行平板型层流计算:(1)上返流速取绳索取心钻进工艺推荐低值0.5 m/s,计算可实现的流核直径 d_0 ;(2)若要实现钻杆与井壁环状间隙50%大小的流核直径,计算钻井液上返流速 v 。采用《钻井液工艺学》[修订版]推荐公式计算结果如表5所示。

$$d_0 = \frac{(\tau_0/\mu_p)(D-d)}{24v + 3(\tau_0/\mu_p)(D-d)}$$

式中: d_0 ——流核直径,cm; v ——钻井液上返流速,m/s; D ——井径(钻头外径),cm; d ——钻杆外径,cm; τ_0/μ_p ——动塑比,mPa·s;

表5 满足给定条件下的平板层流数据计算表
Table 5 Calculation of flat plate laminar flow data under given conditions

钻孔公称口径/mm	孔径/mm	钻杆直径/mm	流核直径 d_0 /mm	上返流速 v /(m·s ⁻¹)
N	76	70	0.233	0.0458
H	96	89	0.268	0.0396
P	122	114	0.303	0.0333
S	150	140	0.370	0.0208
备注	取钻头外径	取钻杆杆体外径	条件:上返流速0.5 m/s	条件:50%环状间隙流核直径依次为1.5、1.75、2.0、2.5 mm

调整钻井液动塑比达到0.5 mPa·s,由表5可知:(1)将钻井液流速降到0.5 m/s,所能实现的流核直径均 <0.5 mm,不具备现实功能;(2)若要实现钻杆与井壁环状间隙50%大小的流核直径,需要将流速调整到0.05 m/s以下,此时除渣能力明显不足,普通泥浆泵也难以实现。因此,当羌塘盆地钻井遇到井壁稳定问题时,想实现钻井液平板型层流很难,实际以能实现井内清洁的最小流量为优,最大程度减弱冲刷破坏,特殊情况下可采取减缓钻进速度和增加冲孔时间来变相弥补流速不足。

(6)钻井液对具有荧光显示影响测录井的钻井

液材料限制使用,比如沥青类、褐煤类及其衍生品。羌塘盆地水温低,高分子材料水化速度慢,应考虑液体材料、预水化、加热、增加搅拌时间等措施。

3.3 钻井漏涌问题

近10年来,羌塘盆地钻井漏失主要出现在裂隙发育的灰岩、砂岩地层。有资料显示,藏北地区砂岩有效孔隙度为0.3%~5.0%,该地区井漏非渗透性漏失和大型溶洞漏失,为裂缝裂隙层的中型漏失^[13]。近几年最严重漏失出现在QZ-16井,井深255 m出现约0.8 m溶洞,有地下水,钻井液失返,水位维持在145 m左右,溶洞以下岩心完整,无漏失通道。采用惰性材料和水泥浆液堵漏无效,顶漏钻进到450.70 m下套管隔离失败,钻进至468.93 m取出非常完整岩心(图7),重新扩孔到该深度后下套管隔离仍然失败。套管隔离溶洞原本是最好的办法,但在流动地下水抽吸、145 m压差、钻具扰动等作用下,即使套管鞋的缝隙很小,也会产生强抽吸作用,钻井液难以返出井口,如图8所示。



图7 套管底部完整岩心照片

Fig.7 Photo of the complete core at the bottom of the casing

为有效封堵套管鞋,现场采用了不同方式的“3次下套管,5次下水泥固井”均未能成功:(1)采用无钻头的钻具作为套管底管,满焊下扩孔器的水口,并在下扩孔器丝扣处缠尼龙绳,起刚性扶正和隔水作用,其它位置再增设9个尼龙绳隔水点,封堵未能成功;(2)采用水泥浆固井会被轻易抽吸掉,套管内外均难以留存水泥,此后采用配置高稠度前置液、增加浆液灌注量、浆液添加早强剂-重晶石粉-麻绳纤维、井口封闭减压等综合手段,封堵仍未能成功。

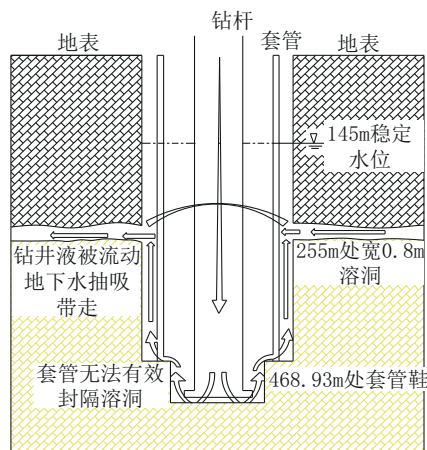


图8 流动地下水强抽吸作用导致套管无法有效封隔溶洞示意

Fig.8 Schematic diagram of the ineffective sealing of karst caves by casing due to the strong suction effect of flowing groundwater

采取综合手段可使水泥留存且凝固强度高,但从取出的水泥柱(图9)可以看到明显抽吸通道,该通道贯穿整个水泥柱并与溶洞相连,每次扫水泥前井内水位均接近145 m也可间接验证溶洞影响之大。

钻井出现涌水的情况相对较少,地层裂隙容腔



(a)套管内加筋增阻的水泥柱



(b)套管内水泥柱被抽吸形成的贯穿通道

图9 套管固井时取出的水泥柱

Fig.9 Cement core taken out during casing cementing

在不同压力波动下可能出现涌漏交替,一般表现为钻进时漏失,停泵时涌水,若伴随严重的涌砂现象,则情况将变得复杂。例如在 QZ-16 井 1547.22~1593.22 m 井段,采用 NQ 新钻杆钻进连续出现 3 次钻杆断裂事故,事故头位置分别在 1483.38、1485.52、1493.86 m,断钻杆深度接近,测井排除井斜因素。事故钻具内管总成上端发现有涌入的卵石,停钻 1 d 井底沉砂可达 40 余米,分析断钻杆原因:地层涌水将卵石带入井内,突然卡在钻杆与井壁间,钻杆在高速转动过程中被钻机扭断。

3.4 工程实施问题

羌塘盆地地理位置特殊,气候条件恶劣,对施工影响主要体现为:(1)每年的施工期很短,对于 2000 m 左右深井,按气候安排工期尤为重要,正常情况应在 4 月前完成设计工作,4 月中下旬冻土未解冻前设备进场,5 月中上旬开钻,6—9 月为最好的施工季节,10 月表层土开始冻结,用水管线将受影响,应在此前完钻并撤场,工期拖入冬季将带来诸多不便和安全隐患;(2)施工区域多为无人区,6—9 月为雨季,道路通行情况极差,往往在河流、沼泽地带频发陷车事故,后勤保障需提前谋划准备,否则将严重耽误工期;(3)海拔 5000 m 左右区域,以燃油为动力驱动的钻探装备功率缩减 40%~50%,须加大功率配置,同时须备足相关易损装备及备件;(4)高海拔地区施工,人员配置必须经过严格筛选,高血压、严重高原反应人员不宜参与相关工作,需配备相关医疗、通讯、有毒气体检测等装备,包括制氧机、卫星电话、北斗短报文、车载定位、H₂S 气体检测等装备;(5)生态环境脆弱,需要对工程施工产生的钻井废液等进行无害化处理,对地形地貌进行恢复等。

4 应对思路

羌塘盆地钻井施工黄金期很短,从成本、安全等方面来说,跨年度施工都不可取。项目管理应从以下方面做好配备:经验丰富的施工班组、动力强劲的地表设备、性能可靠的钻杆钻具、适宜的钻进工艺、有效的后勤保障、通畅的联络工具等。遇到钻井困难问题时,应积极会同项目班组人员认真分析、准确判断、快速应对,尽最大可能将影响降低,防止问题持续扩大。

总的来说,采用综合手段积极预防才是解决问题的关键,近年来主要思路如下:(1)从钻头选型、

工艺优化、组织管理等方面努力实现“以快制胜”,快速钻进通过,快速套管隔离;(2)优化井身结构,增加钻井口径级数,设备能力允许时尽量增加大口径钻进深度,预留备用口径套管用于隔离坍塌井段;(3)提前进行地表钻井液及堵漏材料测试实验,探索优化钻井液体系配方,预备适当加重钻井液方案,预备更快捷安全高效的井漏井涌处理方案,现场储备相关加重材料及堵漏材料。

5 结语

本文从绳索取心工艺与全面钻进工艺存在差异出发,结合羌塘油气地质条件,整理归纳了羌塘盆地油气地质调查井近十年施工中在井壁稳定、钻井液、钻井漏涌、工程实施方面存在的难点,以及应对思路,可为后期钻井设计与施工提供参考借鉴。

参考文献(References):

- [1] 王剑,王忠伟,付修根,等.青藏高原羌塘盆地首口油气科探井(QK-1)新发现[J].科学通报,2022,67(3):321-328.
WANG Jian, WANG Zhongwei, FU Xiugen, et al. New discoveries on the first petroleum scientific drilling (QK-1) of the Qiangtang Basin, Tibetan Plateau[J]. Chinese Science Bulletin, 2022, 67(3): 321-328.
- [2] 屈展,王萍.泥页岩井壁蠕变损伤失稳研究[M].北京:科学出版社,2016.
QU Zhan, WANG Ping. Study on Creep Damage and Instability of Mud Shale Well Wall[M]. Beijing: Science Press, 2016.
- [3] 高翔.黏土矿物学[M].北京:化学工业出版社,2017.
GAO Xiang. Clay Mineralogy[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2017.
- [4] 柴肇云.泥岩物性与改性[M].北京:科学出版社,2017.
CHAI Zhaoyun. Physical Properties and Modification of Mudstone[M]. Beijing: Science Press, 2017.
- [5] 陈涛.伊利石的微结构特征研究[M].北京:科学出版社,2012.
CHEN Tao. Study on the Microstructure Characteristics of Illite [M]. Beijing: Science Press, 2012.
- [6] 雷振宇,李永铁,刘忠,等.藏北羌塘盆地构造变形及其动力学背景[J].地质论评,2001,47(4):415-419.
LEI Zhenyu, LI Yongtie, LIU Zhong, et al. Structural deformation and dynamic mechanism of the Qiangtang Basin, North Tibet[J]. Geological Review, 2001, 47(4): 415-419.
- [7] 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.
WU Jixiu, ZHANG Yongqin, LIANG Jian, et al. Analysis on wall stability of gas hydrate drilling test well in Qiangtang Basin of Tibet[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2014, 41(6): 8-13.
- [8] 郭如伦,王志祥.西藏尼玛盆地超 2000 m 油气调查井施工技术实践[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(12):26-29.
GUO Rulun, WANG Zhixiang. Practice of construction technology for more than 2000m oil and gas investigation well in Tibet

- Nima Basin[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017, 44(12):26-29.
- [9] 李之军,陈礼仪,贾军,等.汶川地震断裂带科学钻探一号孔(WFSD-1)断层泥孔段泥浆体系的研究与应用[J].探矿工程-岩土钻掘工程,2009,36(12):13-15, 19.
LI Zhijun, CHEN Liyi, JIA Jun, et al. Research and application of drilling fluid system for fault gouge section of the hole WFSD-1 of Wenchuan Earthquake Fault Scientific Drilling Project[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2009, 36(12):13-15, 19.
- [10] 王志祥,郭如伦,韩庆,等.钻孔失返顶漏钻进中的冲孔问题及其技术措施分析[J].四川地质学报,2022,42(S1):151-154.
WANG Zhixiang, GUO Rulun, HAN Qing, et al. Analysis of the punching problem and its technical measures in the lost circulation top leakage drilling[J]. Acta Geologica Sichuan, 2022, 42(S1):151-154.
- [11] 段国荣,杨涛.水泥基材料用表面活性剂[M].成都:电子科技大学出版社,2015.
DUAN Guorong, YANG Tao. Surfactants for Cement-based Material [M]. Chengdu: University of Electronic Science & Technology of China Press, 2015.
- [12] 鄢捷年.钻井液工艺学[M].北京:中国石油大学出版社,2018.
YAN Jienian. Drilling Fluid Technology [M]. Beijing: China University of Petroleum Press, 2018.
- [13] 张大钧.藏北地区钻井工程复杂问题及对策建议[J].石油钻探技术,1995(2):15-16.
ZHANG Dajun. Complex problems and countermeasures of drilling engineering in northern Tibet [J]. Petroleum Drilling Technology, 1995(2):15-16.
- [14] 张金昌,刘秀美.13000 m 科学超深井钻探技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(9):1-6.
ZHANG Jinchang, LIU Xiumei. 13000m drilling technology of super-depth scientific drilling well[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2014, 41(9):1-6.
- [15] 曾祥熙,陈志超.钻孔护壁堵漏原理[M].北京:地质出版社,1986.
ZENG Xiangxi, CHEN Zhichao. Principle of Borehole Wall Protection and Plugging [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1986.
- [16] 杜佳.微细伊利石颗粒表面水化特性及机理研究[D].淮南:安徽理工大学,2018.
DU Jia. Study on the surface hydration characteristic and mechanism of fine illite particles in aqueous solutions[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2018.
- [17] 宋天佑,程鹏,徐家宁,等.无机化学(第四版)[M].北京:高等教育出版社,2019.
SONG Tianyou, CHENG Peng, XU Jianing, et al. Inorganic Chemistry (Fourth Edition) [M]. Beijing: Higher Education Press, 2019.
- [18] 吴隆杰,杨凤霞.钻井液处理剂胶体化学原理[M].成都:成都科技大学出版社,1992.
Wu Longjie, Yang Fengxia. Colloidal Chemistry Principles of Drilling Fluid Treatment Agents [M]. Chengdu: Chengdu University of Science and Technology Press, 1992.
- [19] 李艳梅,赵圣印,王兰英,等.有机化学(第二版)[M].北京:科学出版社,2014.
LI Yanmei, ZHAO Shengyin, WANG Lanying, et al. Organic Chemistry (Second Edition) [M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [20] 王志祥,李之军,次旦,等.酸性条件自稳定钻井液体系的研究及探讨[J].四川地质学报,2024,44(S1):9-14.
WANG Zhixiang, LI Zhijun, CI Dan, et al. Research and discussion on the self stabilizing drilling fluid system under acidic conditions[J]. Acta Geologica Sichuan, 2024, 44(S1):9-14.

(编辑 王文)