

长江下游(安徽)地区页岩气钻井工程 难点及对策分析

朱迪斯^{1,2}, 赵洪波^{1,2,3}, 刘恩然¹, 岳伟民^{1,2}, 康海霞^{1,2}, 王胜建^{1,2},
徐秋晨¹, 石砥石¹, 单文军^{1,2}, 迟焕鹏^{1,2}, 郑红军⁴, 李大勇^{*1,2}

(1. 中国地质调查局油气资源调查中心, 北京 100083; 2. 中国地质调查局非常规油气工程技术中心, 北京 100083;
3. 中国地质大学(北京), 北京 100083; 4. 中国地质调查局南京地质调查中心, 江苏 南京 210016)

摘要:为推进长江下游地区页岩油气等清洁能源调查工作, 2015—2021年中国地质调查局在安徽地区部署了25口页岩气井。针对勘探区域地质构造复杂、软硬互层、断层裂隙发育以及地层破碎等地质条件引起的恶性漏失、难钻进、难取心、井壁失稳等钻井复杂情况, 通过制定针对性堵漏方案, 优选多种类钻头, 优化钻具组合、钻井液配置和钻井工艺, 初步形成了长江下游(安徽)地区页岩气钻井技术体系, 包括: 破碎带高效高质取心工艺、软硬互层斜控斜钻具组合研究、强研磨性硬地层钻头优选、恶性漏失卡钻处理方法、水平井段钻井液堵漏技术以及水敏地层井壁稳定处理等。为该区后续钻井工程设计和施工作业提供有益借鉴。

关键词:页岩气地质调查; 页岩气井; 钻井复杂; 钻井技术体系; 钻具组合; 安徽地区; 长江下游地区

中图分类号: P634; TE2 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2022)05-0011-11

Shale gas drilling difficulties and their solutions in the lower reach of the Yangtze River (Anhui)

ZHU Disi^{1,2}, ZHAO Hongbo^{1,2,3}, LIU Enran¹, YUE Weimin^{1,2}, KANG Haixia^{1,2}, WANG Shengjian^{1,2},
XU Qiuchen¹, SHI Dishu¹, SHAN Wenjun^{1,2}, CHI Huanpeng^{1,2}, ZHENG Hongjun⁴, LI Dayong^{*1,2}

(1. Oil & Gas Survey, China Geological Survey, Beijing 100083, China;

2. Unconventional Oil and Gas Engineering Technology Center, China Geological Survey, Beijing 100083, China;

3. China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

4. Nanjing Geological Survey Center, China Geological Survey, Nanjing Jiangsu 210016, China)

Abstract: To seek breakthroughs and discoveries in shale gas resource exploration in the lower reach of the Yangtze River, China Geological Survey deployed 25 shale gas wells in Anhui province from 2015—2021. In view of malignant leakage, difficult coring, difficult drilling and well wall instability due to complex geological conditions in the exploration area, including complex geological formations, soft and hard interbedding, fault development and broken formation, a shale gas drilling technology system has been developed for the lower reaches of the Yangtze River (Anhui) through the selection of multiple types of drill bits, optimization of drilling tool combinations, drilling fluid configuration and drilling techniques. The technology system includes high-efficiency and high-quality coring

收稿日期: 2022-06-16; 修回日期: 2022-08-03 DOI: 10.12143/j.ztgc.2022.05.003

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目“合肥盆地及周缘油气资源战略调查(中国地质调查局油气资源调查中心)”(编号: DD20190725)、
“下扬子地区古生界页岩气基础地质调查(北京探矿工程研究所)”(编号: DD20179082)、“下扬子地区古生界页岩气基础地质调查”
(编号: DD20160180)

第一作者: 朱迪斯, 男, 汉族, 1982年生, 正高级工程师, 地质工程专业, 硕士, 从事钻井工程、地勘设备研发等工作, 北京市海淀区奥运大厦,
judith163@163.com。

通信作者: 李大勇, 男, 汉族, 1971年生, 高级工程师, 钻井工程专业, 从事钻井工程技术研究及管理工作, 北京市海淀区奥运大厦, brv-lee@163.
com。

引用格式: 朱迪斯, 赵洪波, 刘恩然, 等. 长江下游(安徽)地区页岩气钻井工程难点及对策分析[J]. 钻探工程, 2022, 49(5): 11-21.

ZHU Disi, ZHAO Hongbo, LIU Enran, et al. Shale gas drilling difficulties and their solutions in the lower reach of the Yangtze River
(Anhui)[J]. Drilling Engineering, 2022, 49(5): 11-21.

technology for the fracture zone, research on soft and hard interbedding deviation correction and control BHA, optimization of bits in strong abrasive hard formations, treatment methods for malignant leakage and sticking, drilling fluid plugging technology for horizontal well sections, and wellbore stability treatment in water sensitive formations. The research may provide beneficial reference for optimal well drilling design and drilling operations for shale gas survey.

Key words: shale gas geological survey; shale gas well; drilling complexity; drilling technology system; drilling tool combination; Anhui region; lower reach of the Yangtze River

0 引言

长江经济带覆盖了我 11 个省市, 面积约 205.23 万 km^2 , 占全国总面积的 21.4%, 人口和生产总值均超过全国的 40%, 是我国经济高质量发展和生态文明建设的先行示范带^[1]。当前能源供应结构限制着长江经济带的绿色、高质量发展。研究表明, 目前长江经济带能源消费仍以煤为主, 占比 49.2%, 而天然气占比仅约 7%^[2]。2021 年中国天然气消费量约为 3726 亿 m^3 , 其中长江经济带 11 省市消费量为 1299.39 亿 m^3 , 占比 34.9%, 比 2018 年 (占比 36.2%) 降低了 1.3 个百分点。另一方面, 长江经济带页岩气资源丰富, 地质资源量 92 万亿 m^3 , 技术可采资源量 17 万亿 m^3 (不含上海市), 分别占全国页岩气相应资源量的 75%、77%^[3-4]。所以, 加快长江经济带页岩气勘探开发具有服务国家能源安全、优化能源结构、建立清洁能源体系和减缓环境污染等重要意义。

针对长江经济带对页岩气等清洁能源巨大而迫切的需求, 中国地质调查局从 2015 年开始实施长江经济带页岩气调查科技攻坚战, 在长江上游、中游地区陆续实现贵州省志留系, 湖北省震旦系、志留系和寒武系, 云南省志留系等多个地区多套层系页岩气的重大突破和发现^[4-5], 初步形成了长江经济带页岩气勘查开发新格局 (见图 1)。基于以上突破, 中国地质调查局于 2018 年开展了长江下游 (安徽) 页岩气攻坚战, 在安徽地区部署了多口参数井和地质调查井。

1 安徽地区钻井工程部署概况

2015—2021 年, 中国地质调查局在安徽地区部署了 25 口页岩气井工程, 其中皖北地区 7 口, 皖南地区 18 口, 总进尺近 50000 m (见表 1)。通过这些工程的实施, 厘清了地层序列, 标定了已有地球物理资料, 深化了区域构造演化认识, 获取了页岩气关键

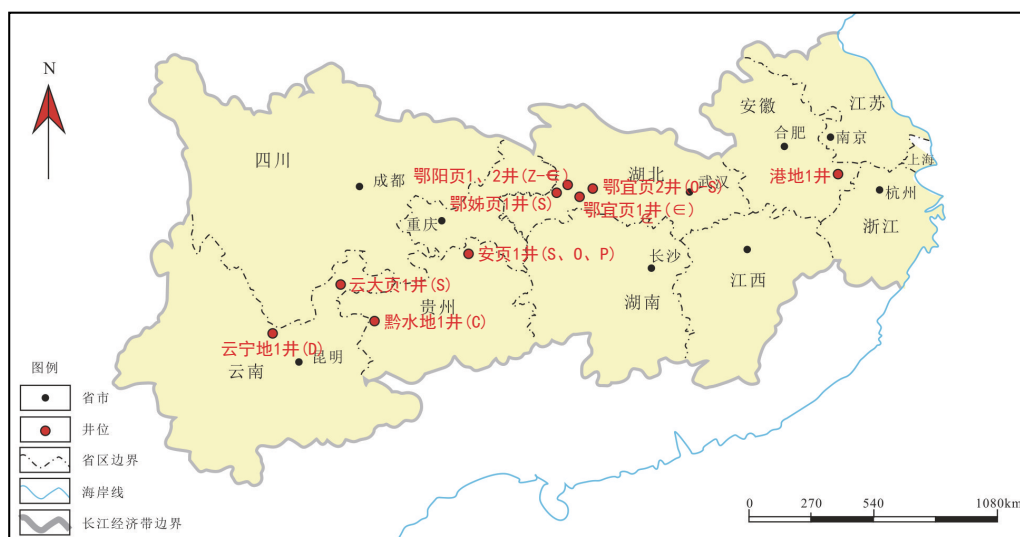


图 1 中国地质调查局长江经济带页岩气调查成果 (据中国地质调查局, 2020 年)

Fig.1 Shale gas survey achievements in the Yangtze River Economic Belt by China Geological Survey (according to China Geological Survey, 2020)

评价参数,为安徽地区页岩气资源潜力评价提供了宝贵资料。同时,中国地质调查局协同施工单位,针对安徽地区构造复杂、软硬互层、断层裂隙发育、地层破碎等难点,通过制定针对性堵漏方案,优选多种类钻头,优化钻具组合、钻井液配置和钻井工艺,解

决了恶性漏失和卡钻、破碎带高效高质取心、特殊层段纠斜控斜、水平段水敏地层井壁失稳、风化壳失返卡钻等钻进难题及钻井复杂^[6],取得了良好效果,为该区后续钻井作业提供了可借鉴的宝贵经验。

表1 安徽地区钻井部署概况
Table 1 Drilling deployment in Anhui

序号	年度	井名	井型	井别	设计井深/m	行政区划	地理位置	构造单元	目标层位	备注
1	2015	港地1	直井	小口径地质调查井	1500	宣城市	宣州区黄渡乡	宣城水东向斜	二叠系	皖南
2	2015	南地1	直井	小口径地质调查井	1500	芜湖市	南陵县三里镇	南陵三里复背斜	志留系	皖南
3	2016	皖宣地1	直井	小口径地质调查井	1500	宣城市	宣州区新田镇	宣城新田镇向斜	二叠系	皖南
4	2016	皖潘地1	直井	小口径地质调查井	1500	淮南市	潘集区耿村	淮南潘集耿村复向斜	石炭-二叠系	皖北
5	2017	皖南地1	直井	小口径地质调查井	1500	芜湖市	南陵县烟墩镇	南陵烟墩复背斜	志留系	皖南
6	2017	皖含地1	直井	小口径地质调查井	1370	马鞍山市	含山县	巢湖-含山复向斜	志留系	皖南
7	2017	皖埇地1	直井	小口径地质调查井	1500	宿州市	埇桥区固镇	宿州埇桥向斜	石炭-二叠系	皖北
8	2017	皖宣页1	直井	参数井	2750	宣城市	宣州区杨柳镇	宣城宝丰复向斜	二叠系	皖南
9	2018	皖油地1	直井	大口径地质调查井	2000	宣城市	宣州区黄渡乡	宣城水东复向斜	二叠系	皖南
10	2018	皖宝地1	直井	大口径地质调查井	2000	宣城市	宣州区杨柳镇	宣城宝丰复向斜	二叠系	皖南
11	2018	皖旗地1	直井	大口径地质调查井	2000	马鞍山市	含山县环峰镇	巢湖-含山复向斜	志留系	皖南
12	2019	皖为页1	直井	参数井	2400	芜湖市	鸠江区	沿江拗陷无为凹陷	二叠系	皖南
13	2019	皖页1HF	水平井	参数井	2000	宣城市	宣州区黄渡乡	宣城水东复向斜	二叠系	皖南
14	2019	皖太参1	直井	参数井	2300	阜阳市	太和县坟台镇	周口拗陷古城低凸起	奥陶系风化壳	皖北
15	2019	皖亳参1	直井	参数井	2800	亳州市	谯城区	周口拗陷王楼斜坡	石炭-二叠系	皖北
16	2019	皖阜地1	直井	大口径地质调查井	2000	阜阳市	颍东区正午镇	周口拗陷阜阳凹陷	石炭-二叠系	皖北
17	2019	皖望地1	直井	小口径地质调查井	1300	安庆市	望江县	望江拗陷	二叠-三叠系	皖南
18	2020	皖为页2	直井	参数井	3200	芜湖市	无为县	沿江拗陷无为凹陷	二叠系	皖南
19	2020	皖亳地1	直井	小口径地质调查井	1800	亳州市	谯城区芦庙镇	周口拗陷亳州凸起	寒武系	皖北
20	2020	皖风地1	直井	大口径地质调查井	1800	淮南市	凤台县刘集乡	长山隆起淮南断褶带	石炭-二叠系	皖北
21	2020	皖望地2	直井	小口径地质调查井	1600	安庆市	望江县	望江拗陷	二叠系	皖南
22	2020	皖泾地1	直井	小口径地质调查井	2100	宣城市	泾县	扬子准地台下扬子台坳	二叠系	皖南
23	2020	皖泾地2	直井	大口径地质调查井	2300	宣城市	泾县	扬子准地台下扬子台坳	二叠系	皖南
24	2021	皖望地3	定向井	大口径地质调查井	1950	安庆市	望江县	望江拗陷	二叠-三叠系	皖南
25	2021	皖望地4	直井	大口径地质调查井	2500	安庆市	望江县	望江拗陷	二叠-三叠系	皖南

2 皖北地区钻井工程难点与对策

皖北地区构造复杂(见图2),多套火山岩顺层侵入,地层软硬不均;风化壳广泛发育,伴生溶蚀孔洞;石炭二叠系多套煤层和碳质泥岩发育,地层破碎^[7-9]。这些因素都很大程度制约了钻井工程的顺利实施。皖北地区部署的7口页岩气井工程主要面临破碎带取心难、硬岩地层钻进难、失返性漏失、井

斜控制难等钻井技术难题(见表2)。

2.1 破碎带取心难

皖北地区主要目的层为石炭-二叠系上石盒子组、下石盒子组、山西组和太原组,其中取心段发育多套煤层和碳质泥岩,并伴有火成岩侵入、地层破碎且岩性复杂(见图3、图4),多口井出现取心困难问题。

以皖亳参1井为例:该井在上石盒子组、下石盒

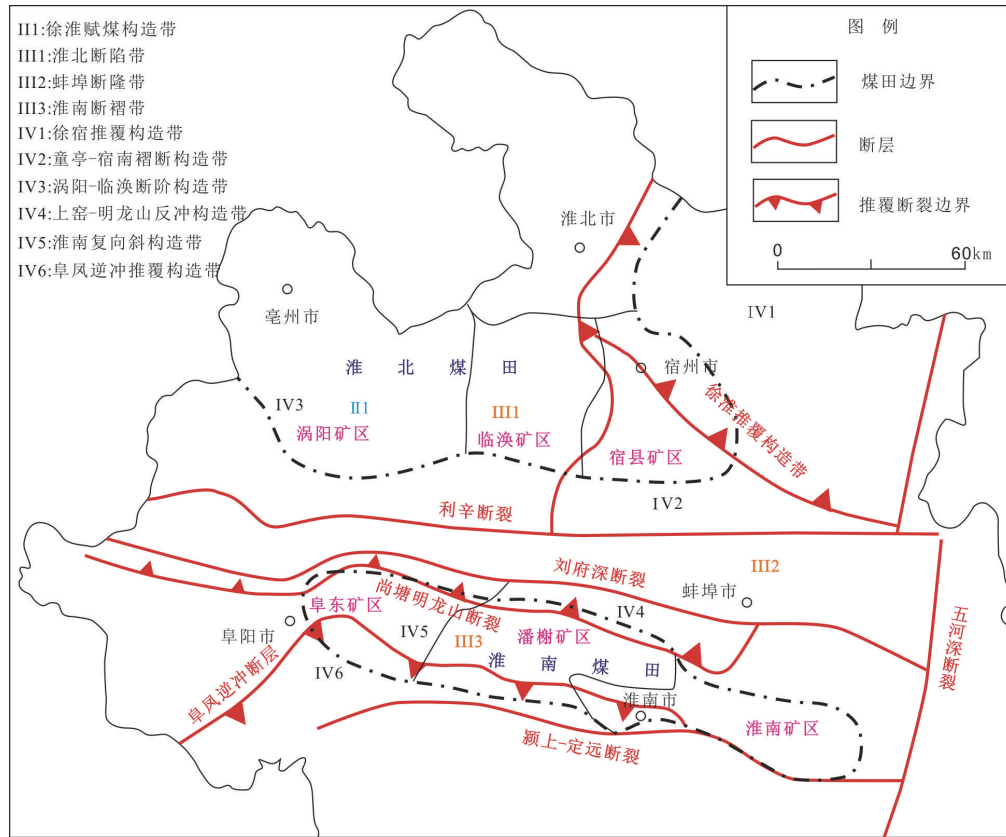


图2 皖北地区构造

Fig.2 Tectonics in Northern Anhui

表2 皖北地区钻井工程概况

Table 2 Overview of drilling works in Northern Anhui

井名	完钻井深/m	施工周期/d	终孔口径/mm	取心情况			主要技术问题
				取心进尺/m	心长/m	岩心采取率/%	
皖亳参1井	2848	96	215.9	230	222.7	91.49	硬度大、研磨性高,卡钻、掉块、难取心
皖阜地1井	2020.18	62	215.9	216.45	202.5	93.56	岩层破碎,难钻进、难取心
皖太参1井	2300	89	215.9	160	146.39	91.49	硬度大、研磨性高,失返性漏失、卡钻
皖亳地1井	1800.28	162	100	1455.07	1381.71	94.96	岩层破碎,难钻进、难取心
皖凤地1井	1801	103	152	121.79	120	98.6	岩层破碎,难钻进、难取心
皖埇地1井	1500	117	127	1180.72	1158	98.1	岩层破碎,掉块、难取心
皖潘地1井	1500	105	110	1279.8	1261.9	98.6	岩层破碎,掉块、难取心

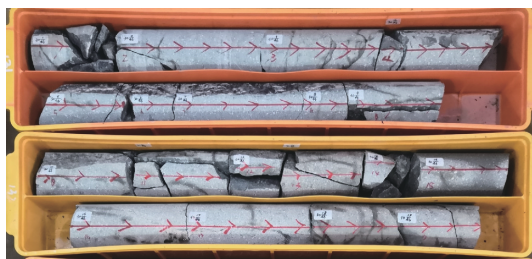


图3 侵入的火成岩——闪长玢岩

Fig.3 Intrusive igneous rock diorite porphyrite



图4 皖亳参1井破碎岩心

Fig.4 Broken cores from Well Wanbocan-1

子组、山西组取心 230 m,堵心、卡心频发,单趟取心进尺短,平均为 1.5~5.3 m;在中古生界地层共钻遇 18 层累计 276.58 m 厚闪长玢岩,其中山西组钻遇 6 层累计 128.58 m,火成岩侵入井段取心平均钻时

120 min/m,最高达 318 min/m,远高于取心井段平均钻时 36.1 min/m(见图 5),进尺速度慢,增大堵心概率。另一方面高钻压钻进硬岩地层导致岩心增粗,加大进心摩阻,甚至压弯取心筒,造成堵心。

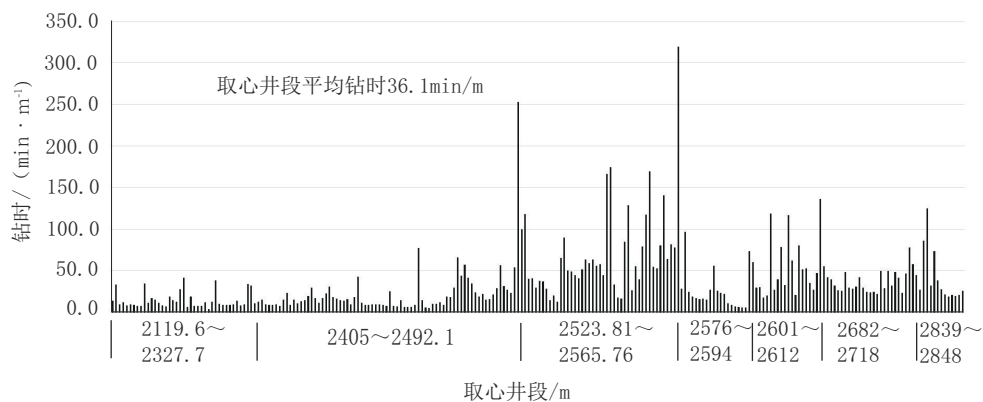


图 5 皖亳参 1 井取心井段钻时

Fig.5 Drilling time chart of the coring section of Well Wanbocan-1

采取的钻井措施:(1)采用单动双管取心工艺,取心时内筒不转动,避免了钻具振动、摆动和摩擦对岩心的破坏;(2)使用弹性较好的岩心爪,便于进心,调整岩心爪与钻头间隙到 5~7 mm,降低卡心的概率;(3)针对闪长玢岩、碳质泥岩等难钻进、破碎地层,优选进口尖圆齿复合片取心钻头(见图 6),将取心机械钻速从 0.5 m/h 提高到 1.87 m/h,降低堵心概率;(4)优化取心钻进参数,通过实践,降低钻压为 40 kN、转速为 50 r/min,减少取心筒的受压弯曲变形,提高钻头工作的稳定性,利于岩心成柱便于进心^[10]。通过以上针对性措施,最终顺利完成了取心作业,取心进尺 230 m,心长 222.7 m,岩心采取率达到了 96.83%。



图 6 尖圆齿复合片取心钻头

Fig.6 Imported sharp round tooth PDC coring bit

2.2 硬岩地层钻进难

皖北地区多口井钻遇了硬岩地层,地层硬度大、研磨性强,钻进困难。以皖太参 1 井为例:该井在二叠系钻遇了大套砂泥岩互层地层,软硬不均,其中石盒子组砂岩以石英砂岩为主(石英含量 > 80%,长石含量 10%~20%),山西组 2^3 砂岩(见图 7)、太原组砂岩(见图 8)矿物成分中石英含量达 70%,这类高石英含量砂岩对钻头磨损严重,单只进口钻头进尺仅为 100~200 m 之间;下部钻遇了奥陶系、寒武系等古老碳酸盐岩地层,这些地层形成时间早、埋藏深度大、成岩作用强,受长期压实作用影响,孔隙度和渗透率较低,奥陶系上马家沟组孔隙度为 3.49%,渗透率为 33.7 md(该层存在碳酸岩盐溶洞发育,渗透率较高);下马家沟组孔隙度为 2.62%,渗透率为 0.022 md;寒武系张夏组孔隙度为 3.28%,平均渗透率仅为 0.038 md,地层致密难钻进(见图 9、图 10)。



图 7 山西组(1417m)灰白色含气中粒石英砂岩

Fig.7 Shanxi Formation (1417m) gray white gas bearing medium-grained quartz sandstone



图8 太原组(1480m)灰白色中细石英砂岩

Fig.8 Taiyuan Formation(1480m)gray white medium to fine quartz sandstone

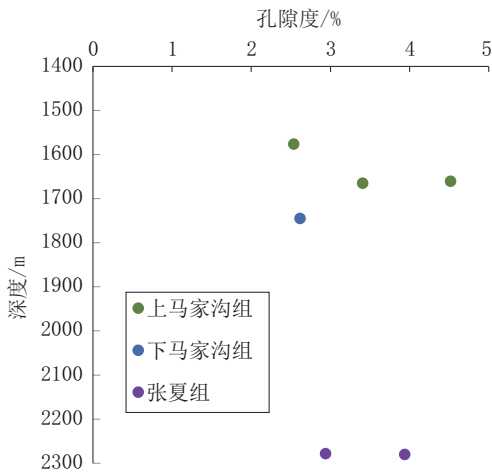


图9 皖太参1井孔隙度分布

Fig.9 Porosity distribution at Well Wantaican-1

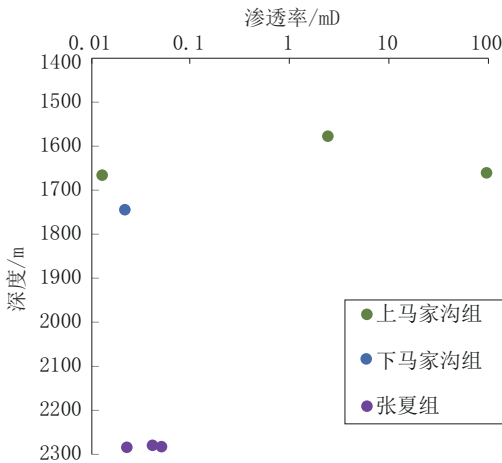


图10 皖太参1井渗透率分布

Fig.10 Permeability distribution at Well Wantaican-1

采取的钻井措施:(1)通过实钻地层特点和地层可钻性分析进行钻头优选,采用5刀翼复合片三角聚晶混镶齿PDC钻头,取得较好的效果,同比钻时减少,达到提速增效的作用。(2)采用井底动力钻进技术,配合PDC钻头和等壁厚螺杆马达,螺杆马达直接带动连接在其传动轴上的钻头回转,避免了通

过钻杆传递动能的沿程损失。而且等壁厚螺杆马达强度高,使用时间长,提高了钻井时效。

通过采取以上2项措施,机械钻速提高了2.74倍。

2.3 失返性漏失

皖北地区风化壳广泛发育,风化壳顶部的淋滤溶蚀作用,形成了次生淋滤溶蚀孔隙和溶蚀孔洞,极易发生恶性漏失(见图11)。以皖太参1井为例:该井1595.43~1737.12 m共发生恶性漏失5次,均发生在奥陶系上马家沟组碳酸盐岩风化壳井段,累计漏失2201 m³,损失时间17 d 18 h。其中1595.43 m处为失返性漏失,悬重从575 kN增加到656 kN,钻压下降为0,井筒液面下降,造成上部地层垮塌并卡钻^[11]。



(a)邻井古城1井钻遇奥陶系灰岩风化壳,孔洞发育



(b)皖太参1井1739.12 m,灰色灰岩,见方解石晶体,裂隙方解石填充,见溶洞



(c)皖太参1井1756.9 m,灰白色白云岩,见方解石晶体,裂隙方解石填充



(d)皖太参1井1666.85 m,灰白色灰岩,裂隙方解石填充,见溶洞

图11 皖北地区钻遇的孔隙和孔洞发育地层

Fig.11 Pore developed strata in Northern Anhui

采取的钻井措施:(1)采用地面震击器进行震击400余次无效,并连续向井眼和环空注入堵漏浆。(2)电测法提拉钻具测卡点后爆炸松扣,注入堵漏浆。(3)套铣倒扣,处理爆炸松扣产生的井底落鱼。下套铣钻具组合,多次套铣、倒扣,减少了落鱼的长度,接超级震击器震击28次解卡,起出落鱼。(4)强钻打穿漏层后再堵漏,先泵入堵漏浆15 m³,再泵入

水泥浆 10 m³堵漏,堵漏成功。

2.4 强造斜地层井斜控制难

皖风地1井是部署在淮南市凤台县的1口大口径地质调查井,构造位置位于皖北长山隆起阜风逆冲推覆构造带,该井在一开井段钻遇了寒武系-二叠系推覆体。由于逆冲推覆构造作用,地层顺着逆冲推覆体方向发生变型,导致地层倾角变大(见图12),同时形成大段块状高陡硬地层,钻进过程中井斜难以控制。

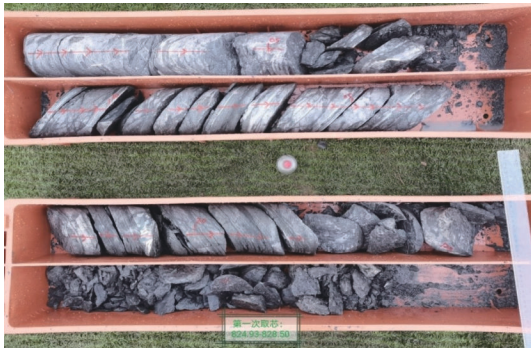


图12 逆冲推覆体井段岩心

Fig.12 Cores from the well section in the thrust nappe

采取的钻井措施:采用硬岩强造斜地层随钻纠斜技术,一开井段采用 $\varnothing 311$ mm PDC钻头+ $\varnothing 197$ mm单弯螺杆(1°)+MWD预弯曲防斜打直钻具组合防斜钻进,同时加密测斜35次,一旦发现井斜超标,更换 1.25° 螺杆定向随钻纠斜。最终控制到最大井斜为 3.85° ,满足设计要求。

3 皖南地区钻井工程难点与对策

皖南地区属于下扬子板块。区内构造活动标志以断裂构造活动为主,断裂构造活动十分强烈,区内有1级断裂2条,二级断裂3条,三级断裂6条,这些断裂将研究区划分成井格形状,构造单元面积小且个数多,构造较为复杂(见图13)。同时中小断层、不整合面发育,且断层多为开启性的拉张型断层为主,这些都是潜在的高渗透层通道,不仅不利于油气保存,还容易引起恶性漏失;主要目的层二叠系泥页岩地层水敏性强、承压能力弱,极易发生缩径、井壁垮塌等复杂情况^[12-20]。中国地质调查局在皖南地区部署的18口钻井工程均受到了复杂地质条件的影响,以部署在宣城市黄渡乡皖页1HF井为例,该井是下扬子地区第一口页岩气水平井,是1口侧钻井,

导眼井是2000 m深的大口径地质调查井皖油地1井,井身结构见图14,目的层为二叠系大隆、龙潭和孤峰组。皖页1HF井工程钻遇水敏性地层、出现坍塌掉块,导向困难,失返性漏失等区域性技术难题。

3.1 地层水敏、易坍塌掉块

皖页1HF井造斜井段为大隆组和龙潭组,大隆组、龙潭组均属水敏地层,坍塌掉块严重。根据导眼井皖油地1井岩心实验分析,大隆组岩心粘土矿物含量为43%~52%,以强水敏矿物伊蒙混层为主(见表3),岩石吸水后产生的膨胀导致岩石力学强度降低,岩心水化后应力分布不均易导致井眼坍塌,岩心扫描电镜结果显示,地层微裂缝发育,缝宽26 nm~1.71 μ m(见图15),钻井过程中钻井液在毛管力的作用下易沿微裂缝侵入地层深处造成地层水化坍塌。

在钻进过程中,造斜段1380~1520 m多次出现复杂,钻井液返出大量掉块,最大尺寸达到17 cm(见图16),导致后期起下钻扩划眼困难,反复起下钻,导致钻具疲劳断裂,“落鱼”长度达200多米。

采取的钻井措施:解决地质条件引起的井壁稳定性问题,首要也是最重要的解决方案就是针对地层特性和工程特点,采用合适的钻井液体系^[21-22]。(1)钻前进行了充分的岩心敏感性评价,对多种油基、水基钻井液体系进行对比分析,研发出了强封堵油基防塌钻井液体系配方,相比高性能水基钻井液和常规油基钻井液体系具有更强的抑制性和封堵防塌效果(见图17)。配方为:400 mL柴油+3%主乳化剂+2%辅乳化剂+100 mL CaCl₂溶液(25%)+2%CaO+3%有机土+4%降滤失剂。(2)钻井过程中进行现场室内试验,针对现场情况及时调整钻井液参数。

通过采用强封堵油基防塌钻井液体系并及时调整钻井液参数,较顺利地穿越皖页1HF井造斜段易坍塌掉块地层和水平段多套断层及破碎带地层。在发生失返性漏失,钻井液当量密度下降到0.5 g/cm³的情况下,仍能够保持井壁稳定,及时上提旋转导向工具,避免了卡钻、埋钻等复杂发生。经过多次堵漏作业,循环的油基钻井液中堵漏材料含量高达10%,钻井液的破乳电压由高峰时的1450 V降低到400 V,现场技术人员在钻井液中加入大量的氧化沥青、主乳化剂、辅乳化剂,钻井液破乳电压由400 V提升到900 V,保证了井下安全^[23-24]。



图 13 长江下游地区区域构造格架

Fig.13 Regional tectonic framework in the lower reach of the Yangtze River

3.2 失返性漏失

皖页 1HF 井钻进到 1908 m 后多次钻遇裂缝性漏失,漏速 2~4.5 m³/h,堵漏作业成功后钻进至 2004 m 沟通了栖霞组灰岩溶洞,发生失返性漏失,液面随之下降到井口下 800 m,漏失当量密度 0.5 g/

cm³、漏速达 181 m³/h,累计漏失 846 m³油基泥浆。

采取的钻井措施:现场针对不同漏失类型及漏速,采取一漏一策,累计堵漏 12 次,在最后一次失返性漏失堵漏过程中采用了水平井分层堵漏技术。由于本井水平段井身轨迹上翘,所以在重力作用下固

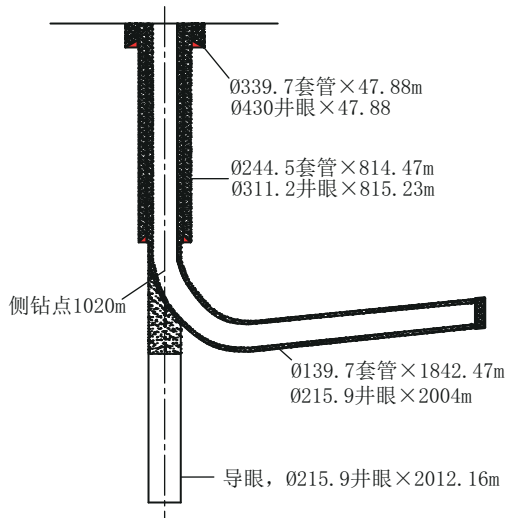


图 14 皖页 1HF 井井身结构
Fig.14 Wellbore structure of Well Wanyou-1HF

表 3 皖油地 1 井大隆组岩心矿物组分分析
Table 3 Mineral composition of Dalong Formation cores from Well Wanyou-1

深度/m	矿物含量/%			粘土矿物相对含量/%		
	石英	粘土矿物	其它矿物	伊蒙混层	伊利石	高岭石
1174.1	39.0	50.7	10.3	75	22	1
1181.1	32.3	42.7	25	67	21	7
1190.0	30.4	40.5	29.1	86	8	6
1203.4	45.2	51.7	3.1	82	12	6

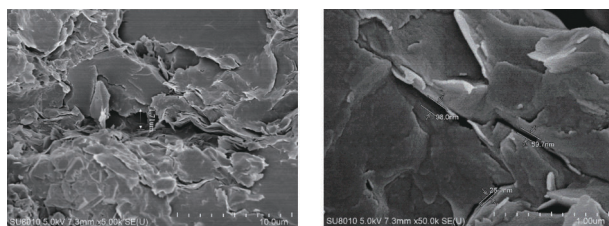


图 15 皖油地 1 井大隆组岩心电镜扫描图
Fig.15 Scanning electron microscope of Dalong Formation cores from Well Wanyou-1



图 16 皖页 1HF 井 17 cm 掉块
Fig.16 17cm falling stone in Well Wanyou-1HF

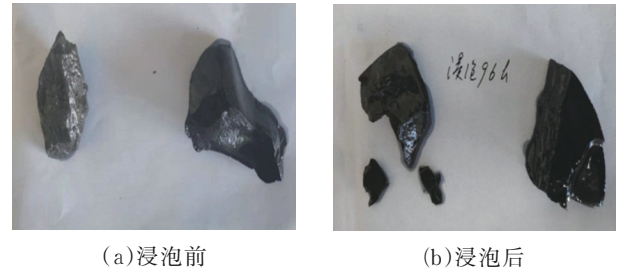


图 17 皖油地 1 井大隆组岩心油基泥浆浸泡 96 h 试验
Fig.17 96h immersion test of core oil-based mud in Dalong formation of Well Wanyou-1

化材料无法以段塞形式在水平段滞留固化,前期采用了多次高浓度大颗粒的桥塞堵漏方案和水泥堵漏方案堵漏均未成功。分析堵漏失败原因后,现场创新采取了分层堵漏法进行堵漏,首先使用高密度水泥固化封堵水平段下井壁部分,使用低密度(1.17 g/cm³)无机凝胶固化后封堵上井壁部分,以缩小水平段井筒的尺寸和有效通道,通过钻杆泵入油基高浓度大颗粒桥塞堵漏浆,成功地将水平段井筒封堵并承压达到 5 MPa,堵漏成功(见图 18)。

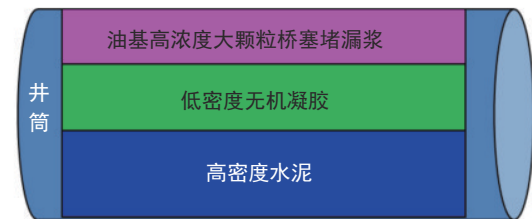


图 18 水平井分层堵漏示意
Fig.18 Layered plugging of horizontal wells

3.3 构造不确定性大、导向困难

皖页 1HF 井所在区域页岩气勘探程度低,仅有二维地震资料,且地震测线未过井位,只能将井轨迹投影在地震剖面上;区域内小断层发育^[25],本井在 500 多米的水平段内就钻遇了断距 11~16 m 的 4 个逆断层。由于断距较小,无法在地震图上进行识别,地质追层难度很大,同时反复调整钻井轨迹也使井身曲率不规则,诱发钻具疲劳断裂;下扬子地区存在多期不整合面,构造活动具有期次多、构造活动强度大的特点,多期构造事件叠加导致裂缝发育且复杂,总体上该区裂缝发育具有多期、多方向、多类型、多尺度及多形成机制叠置的特点,导致地层预测难度大。

采取的钻井措施:(1)建立储层模型。将孤峰组优质页岩段分为8个小层,根据皖油地1井的储层特征分析,结合地震反射剖面投影深度形成储层模型,结合皖油地1井测井资料和区域地质资料从而得到钻前地质导向模型图。(2)采用旋转导向技术。采用贝克休斯 AutoTrak Curve 旋转导向工具,建立复杂断块旋转导向并眼轨迹控制技术,动态监测并眼轨迹,并根据情况快速调整。

4 结论及建议

近年来,中国地质调查局在安徽地区部署的25口页岩气钻井工程实施过程中,强化地质与工程一体化技术攻关,地质调查人员、工程技术人员紧密结合,建立“地质调查指导技术攻关,技术攻关支撑地质调查”工作思路,组建“地质、测录井、钻井”联合协同工作小组,克服施工难点顺利完成钻探工作量,为长江下游地区页岩气勘探和区域钻井技术提供了宝贵的技术资料。通过对25口钻井工程技术总结,取得的主要成果及建议如下:

(1)通过钻井工程部署、技术攻关与现场试验,针对地质构造复杂、软硬互层、断层裂隙发育以及地层破碎等地质条件引起的恶性漏失、难取心、难钻进、井壁失稳等钻井复杂情况,初步形成了长江下游(安徽)地区页岩气钻井技术体系,包括:破碎带高效高质取心工艺、软硬互层纠斜控斜钻具组合研究、强研磨性硬地层钻头优选、恶性漏失卡钻处理方法、水平井段钻井液堵漏技术以及水敏地层井壁稳定处理等。

(2)下一步针对长江下游(安徽)地区页岩气钻井工程难点,强化地质—物探—工程—一体化,多学科联合攻关,打破专业孤岛效应,保障部署科学性。在钻探工程部署前,提前开展解决方案设计,加强钻井过程控制,坚持预防为主的原则。在钻探工程实施中,以预防井漏为主,针对二叠系泥页岩地层水敏性强、承压能力弱,选用具有更强抑制性、防塌性能好的钻井液体系;根据地层情况优选钻头,针对硬地层,建议采取冲击钻进工艺;针对连续取心井段长,在含煤、碳质泥岩等难取心地层,建议采用“少打多提”工艺。从技术攻关角度出发,加强随钻防漏堵漏研究,加强井下提速技术、高效碎岩技术,钻井自动化技术和钻完井液环保处理技术研发。

参考文献(References):

- [1] 中共中央政治局.长江经济带发展规划纲要[R].北京:2016. Political Bureau of the Central Committee of the Communist Party of China. Outline of Yangtze River economic belt development plan[R]. Beijing: 2016.
- [2] 李国欣,朱如凯.中国石油非常规油气发展现状、挑战与关注问题[J].中国石油勘探,2020,25(2):1-13. LI Guoxin, ZHU Rukai. Progress, challenges and key issues in the unconventional oil and gas development of CNPC[J]. China Petroleum Exploration, 2020,25(2):1-13.
- [3] 傅丛,丁华,陈文敏.我国长江经济带页岩气勘探开发与政策探析[J].煤质技术,2021,36(6):13-21. FU Cong, DING Hua, CHEN Wenmin. Research on exploration and development layout of shale gas with policy support in China's Yangtze River Economic Belt[J]. Coal Quality Technology, 2021,36(6):13-21.
- [4] 许光,韩志军,张君峰,等.公益性陆域油气地质调查工作进展与发展建议[J].地质通报,2022(网络首发). XU Guang, HAN Zhijun, ZHANG Junfeng, et al. Progress of public oil and gas geological survey during the 13th Five-Year Plan period and prospect forecast for the 14th Five-Year Plan [J]. Geological Bulletin of China, 2022.
- [5] 郑红军,周道容,殷启春,等.下扬子页岩气地质调查新进展及突破难点思考[J].地质力学报,2020,26(6):852-871. ZHENG Hongjun, ZHOU Daorong, YIN Qichun, et al. New progress and breakthrough difficulties on shale gas geological survey in the Lower Yangtze area [J]. Journal of Geomechanics, 2020,26(6):852-871.
- [6] 赵洪波,朱芝同,梁涛,等.页岩气基础地质调查钻井技术进展及展望[J].中国地质,2022(网络首发). ZHAO Hongbo, ZHU Zhitong, LIANG Tao, et al. Shale gas geological survey drilling technologies: Progress and prospect [J]. Geology in China, 2022.
- [7] 王步清,徐秋晨,王艳红,等.南华北盆地断裂构造特征与油气勘探[J].地质科学,2020,55(1):109-121. WANG Buqing, XU Qiuchen, WANG Yanhong, et al. Structural characteristic of the faults in the Southern North China Basin and its relationship with petroleum exploration [J]. Chinese Journal of Geology, 2020, 55(1):109-121.
- [8] Liu Enran, Shi Dishu, Wang Yanhong, et al. Sequence stratigraphic framework and sedimentary model of Shanxi Formation in Northeast Zhoukou Depression of the North China Plate [J]. China Geology, 2020,3(4):575-590.
- [9] 李双应,谢伟,赵丽丽,等.郟庐断裂带(安徽段)周缘盆地页岩气资源成因与勘探前景[J].安徽地质,2020,30(4):255-264. LI Shuangying, XIE wei, ZHAO Lili, et al. Origin and exploration prospect of shale gas in the peripheral basins of the Tan-Lu Fault Zone (Anhui Section) [J]. Geology of Anhui, 2020, 30(4):255-264.
- [10] 赵洪波,朱迪斯,黄正,等.南华北盆地亳州—阜阳地区页岩气

- 钻井技术[J].石油钻采工艺,2020,42(6):679-683.
ZHAO Hongbo, ZHU Disi, HUANG Zheng, et al. Shale gas drilling technology in Southern North China Basin Bozhou-Fuyang[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2020, 42(6): 679-683.
- [11] 赵洪波,单文军,朱迪斯,等.裂缝性地层漏失机理及堵漏材料新进展[J].油田化学,2021,38(4):740-746.
ZHAO Hongbo, SHAN Wenjun, ZHU Disi, et al. Advance of fractured formation lost circulation mechanism and lost circulation materials in oil and gas wells: A review [J]. Oilfield Chemistry, 2021, 38(4): 740-746.
- [12] 潘继平,乔德武,李世臻,等.下扬子地区古生界页岩气地质条件与勘探前景[J].地质通报,2011,30(2-3):337-343.
PAN Jiping, QIAO Dewu, LI Shizhen, et al. Shale-gas geological conditions and exploration prospect of the Paleozoic marine strata in Lower Yangtze area, China[J]. Geological Bulletin of China, 2011, 30(2-3): 337-343.
- [13] 徐曦,孙连浦,肖梦楚,等.下扬子区新生代断陷盆地的断裂构造特征与活动规律[J].高校地质学报,2018,24(5):723-733.
XU Xi, SUN Lianpu, XIAO Mengchu, et al. Structural characteristics and activity rules of faults in the cenozoic faulted-basins in the Lower Yangtze region[J]. Geological Journal of China Universities, 2018, 24(5): 723-733.
- [14] 宋腾,陈科,林拓,等.下扬子苏皖南地区上二叠统页岩油气地质条件研究[J].中国地质调查,2019,6(2):18-25.
SONG Teng, CHEN Ke, LIN Tuo, et al. Study on geological conditions of upper permian shale oil and gas in Lower Yangtze area of Southern Jiangsu-Anhui province[J]. Geological Survey of China, 2019, 6(2): 18-25.
- [15] 徐春华,仇卫东,秦新龙,等.下扬子地区页岩气勘探新认识[J].河北地质大学学报,2019,42(3):32-39.
XU Chunhua, QIU Weidong, QIN Xinlong, et al. New acquirement of shale gas exploration and development in the Lower Yangtze region[J]. Journal of Hebei GEO University, 2019, 42(3): 32-39.
- [16] 郭军,李岩,王文彬,等.下扬子皖南地区皖泾地2井地质特征与优快钻井对策[J].中国地质调查,2021,8(5):45-52.
GUO Jun, LI Yan, WANG Wenbin, et al. Geological characteristics of Well Wanjingdi 2 and drilling strategy in southern Anhui of Lower Yangtze region[J]. Geological Survey of China, 2021, 8(5): 45-52.
- [17] 朱迪斯,岳伟民,单文军,等.页岩气地质调查井浙桐地1井钻探施工技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(9):15-20.
ZHU Disi, YUE Weimin, SHAN Wenjun, et al. Drilling technology of Zhetongdi Well-1 for shale gas geological survey[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(9): 15-20.
- [18] 袁光杰,付利,王元,等.我国非常规油气经济有效开发钻井完井技术现状与发展建议[J].石油钻探技术,2022,50(1): 1-12.
YUAN Guangjie, FU Li, WANG Yuan, et al. The up-to-date drilling and completion technologies for economic and effective development of unconventional oil & gas and suggestions for further improvements [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2022, 50(1): 1-12.
- [19] 赵亮,汪程林.页岩气地质调查皖含地1井施工工艺[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(4):42-47.
ZHAO Liang, WANG Chenglin. Drilling of Well Wanhandi 1 for shale gas geological survey [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019, 46(4): 42-47.
- [20] 刘文武,赵志涛,翁炜,等.页岩气基础地质调查皖南地1井钻探施工技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2018,45(10):66-70.
LIU Wenwu, ZHAO Zhitao, WENG Wei, et al. Drilling of Wannandi Well-1 for basic shale gas geological survey[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018, 45(10): 66-70.
- [21] 陈小元,严忠.许X36A下扬子中深探井钻井施工技术[J].复杂油气藏,2021,14(1):85-89,101.
CHEN Xiaoyuan, YAN Zhong. Drilling technology of Xu X36A mid-deep exploration well in Lower Yangtze [J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2021, 14(1): 85-89, 101.
- [22] 秦鹏飞,吴承国,蒋东东,等.安徽皖江地区页岩气钻井施工技术难点及对策探讨[J].安徽地质,2018,28(1):56-60.
QIN Pengfei, WU Chengguo, JIANG Dongdong, et al. Discussion on technical difficulties of shale gas drilling in the Anhui Wanjiang area and countermeasures [J]. Geology of Anhui, 2018, 28(1): 56-60.
- [23] 李大勇,肖超,王胜建,等.下扬子地区页岩气井失返性漏失堵漏技术研究——以WY-1HF井为例[J].油气藏评价与开发,2021,11(2):122-126.
LI Dayong, XIAO Chao, WANG Shengjian, et al. Plugging technology applied for total loss in shale gas wells of Lower Yangtze region: Taking Well-WY-1HF as an example [J]. Reservoir Evaluation and Development, 2021, 11(2): 122-126.
- [24] 樊继强,刘学娜.皖页1HF井油基钻井液技术研究及应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(10):23-28.
FAN Jiqiang, LIU Xuena. Research and application of oil-based drilling fluid technology for Well Wanye1HF [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(10): 23-28.
- [25] 石刚,徐振宇,郑红军,等.下扬子地区“三气一油”钻探发现及成藏地质条件——以皖南港地1井钻探发现为例[J].地质通报,2019,38(9):1564-1570.
SHI Gang, XU Zhenyu, ZHENG Hongjun, et al. “Three-Gas-One-Oil” drilling findings and reservoir formation geological conditions in the Lower Yangtze area: Exemplified by Gang Di 1 well in South Anhui [J]. Geological Bulletin of China, 2019, 38(9): 1564-1570.

(编辑 李艺)