

doi: 10.12029/gc20210913002

赵洪波, 朱芝同, 梁涛, 赵志涛, 朱迪斯, 单文军, 刘文武, 何远信. 2023. 页岩气基础地质调查钻井技术研究进展及展望[J]. 中国地质, 50(2): 376–394.

Zhao Hongbo, Zhu Zhitong, Liang Tao, Zhao Zhitao, Zhu Disi, Shan Wenjun, Liu Wenwu, He Yuanxin. 2023. Shale gas geological survey drilling technologies: Progress and prospect[J]. Geology in China, 50(2): 376–394(in Chinese with English abstract).

页岩气基础地质调查钻井技术研究进展及展望

赵洪波^{1,2,3}, 朱芝同⁴, 梁涛⁵, 赵志涛⁵, 朱迪斯^{2,3}, 单文军^{2,3}, 刘文武⁵, 何远信^{1,2,3}

(1. 中国地质大学(北京), 北京 100083; 2. 中国地质调查局油气资源调查中心, 北京 100083; 3. 中国地质调查局非常规油气工程技术中心, 北京 100083; 4. 中国地质科学院勘探技术研究所, 河北 廊坊 065000; 5. 北京探矿工程研究所, 北京 100083)

摘要:【研究目的】近年来, 中国地质调查局部署实施了 173 口页岩气勘查井, 完成 31 万余米进尺, 重点开展长江经济带页岩气调查科技攻坚战, 取得了震旦系、寒武系和志留系页岩气调查的重大突破和二叠系页岩气调查重要发现, 开辟了页岩气勘查的新区、新层系、新类型和新认识。基础地质调查井作为油气发现的重要手段, 可实现全井段取心, 具有成本低、周期短等特点, 一般部署在邻井资料缺乏的勘探空白区。【研究方法】为了给页岩气调查提供钻井工程方面的技术支持, 本文梳理了十年来中国地质调查局部署实施的钻井工程, 对取得的一系列钻井技术进行了分类和归纳整理。【研究结果】总结了一整套在地质钻探装备与技术基础上创新发展的高效页岩气钻井装备与技术体系: (1) 形成了页岩气地质调查井地面装备, 包括适应于页岩气井井控安全的改进型立轴钻机、符合绿色勘探要求的钻井液固控循环系统等; (2) 高效取心工具及钻进工艺, 重点介绍了大直径绳索取心钻具、KT 系列取心钻具等取心钻具, 倒塔式钻具组合工艺、空气跟管技术等钻进工艺等; (3) 阐述了高效取心钻头研究进展, 包括异形齿 PDC 钻头、孕镶块钻头、孕镶金刚石钻头 3 类钻头及其应用效果; (4) 简要论述了安全钻井技术及复杂处理进展, 介绍了页岩气勘探钻井液技术、控压钻进技术以及失返、卡钻等钻井复杂处理。此外, 围绕新区新层系页岩气勘探特点, 给出下一步开展页岩气钻井技术研究的方向。【结论】通过综述上述研究进展, 可为页岩气勘探钻井工程设计和施工提供有益参考。

关键词:页岩气; 地质调查井; 钻井技术; 取心工具; PDC 钻头; 安全钻进; 油气调查工程

创 新 点: (1) 本文研究总结页岩气调查井钻井装备、取心工具及新型钻头、井眼稳定技术等最新成果; (2) 提出小井眼固井技术、复杂地层套管技术、钻头设计与优选、钻井液技术等安全钻进与钻井提速发展方向。

中图分类号: P634.5 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2023)02-0376-19

Shale gas geological survey drilling technologies: Progress and prospect

ZHAO Hongbo^{1,2,3}, ZHU Zhitong⁴, LIANG Tao⁵, ZHAO Zhitao⁵, ZHU Disi^{2,3},
SHAN Wenjun^{2,3}, LIU Wenwu⁵, HE Yuanxin^{1,2,3}

(1. China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Oil & Gas Survey, China Geological Survey, Beijing 100083, China; 3. Unconventional Oil & Gas Engineering Technology Center, China Geological Survey, Beijing 100083, China; 4. Institute

收稿日期: 2021-09-13; 改回日期: 2022-05-09

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20221653、DD20221674、DD20190725、DD20190561)联合资助。

作者简介: 赵洪波, 男, 1988 年生, 博士生, 高级工程师, 主要从事科学钻探、油气钻井技术及工艺研究工作; E-mail: zhaohb@email.cugb.edu.cn。

通讯作者: 何远信, 男, 1964 年生, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事地质钻探、石油钻井技术研究与管理; 工作;

E-mail: hyuanxin@mail.cgs.gov.cn。

of Exploration Techniques, Chinese Academy of Geological Science, Langfang 065000, Hebei, China; 5. Beijing Institute of Exploration Engineering, Beijing 100083, China)

Abstract: This paper is the result of oil and gas survey engineering.

[Objective] Focusing on the scientific and technological task of shale gas investigation in the Yangtze River economic belt, China Geological Survey has deployed and implemented 173 shale gas exploration wells, completed more than 310000 m of drilling footage in recent years. Major breakthroughs in the shale gas investigation of Sinian system, Cambrian system, and Silurian system, and important discoveries in the shale gas investigation of Permian system has been achieved. It opened new areas, new strata, new types, and new insights of shale gas exploration. The basic geological survey wells are used to drill cores with low cost and short cycle. They are generally deployed in new blocks and new strata with insufficient data from adjacent wells. Aiming to provide technical support in drilling engineering for shale gas investigation. **[Methods]** This article analyzes the related research progress of drilling projects deployed and implemented by China Geological Survey over the past decade, and a series of drilling technologies achieved have been classified and summarized. **[Results]** The high-efficiency shale gas drilling equipment and technology system based on the innovative development of geological drilling equipment and technology are summarized: (1) Surface equipment for shale gas geological survey wells has been formed, including improved vertical shaft drilling rig suitable for well control safety of shale gas wells, drilling fluid solid control circulation system meeting the requirements of green exploration, etc.; (2) High-efficiency coring tools and drilling technology, focusing on the coring tools such as large-diameter wireline coring tools, KT series coring tools, inverted tower drilling tool assembly technology, air pipe following technology, etc.; (3) The research progress of high efficiency coring bits is described, including three types of bits, such as special-tooth PDC bits, impregnated block bits and impregnated diamond bits, and their application effects; (4) The progress of safe drilling technology and complex treatment is briefly discussed. The shale gas exploration drilling fluid technology, pressure control drilling technology, and drilling complex treatment such as lost return and sticking is introduced. In addition, the direction of shale gas drilling technology research is given. **[Conclusions]** The review of above research progress can provide useful reference for shale gas exploration drilling engineering design and construction.

Key words: shale gas; geological survey well; shale gas drilling technology; coring drilling tools; PDC bits; safe drilling; oil and gas survey engineering

Highlights: (1) This paper summarizes the latest achievements of shale gas survey well drilling equipment, coring tools, new drill bits and wellbore stability technology; (2) The development directions of the safe drilling and drilling speed increase such as slim hole cementing technology, complex formation casing technology, drill bit design and optimization, and drilling fluid technology are proposed.

About the first author: ZHAO Hongbo, male, born in 1988, doctor candidate, senior engineer, engaged in scientific drilling, oil and gas drilling technology and process research; E-mail: zhaohb@email.cugb.edu.cn.

About the corresponding author: HE Yuanxin, male, born in 1964, doctor, professor of engineering, engaged in research and management of geological drilling and oil drilling technology; E-mail: hyuanxin@mail.cgs.gov.cn.

Fund support: Supported by the projects of China Geological Survey (No.DD20221653, No.DD20221674, No.DD20190725, No.DD20190561).

1 引言

中国页岩气资源潜力巨大,页岩气地质资源量超过 $100 \times 10^{12} \text{ m}^3$,其中可采资源量约 $20 \times 10^{12} \text{ m}^3$,是天然气倍增发展的生力军,是未来高质量发展的重中之重(赵文智等,2020;Li et al.,2022)。自2009年8月17日,原国土资源部油气资源战略研究中心在重庆市綦江县启动中国首个页岩气资源勘查项目

以来,页岩气勘查开采技术发展迅速,取得了良好的开发效果(Zhai et al.,2018)。2015年,位于四川盆地以东的正安地区安页1井(AY1)获得重大突破(翟刚毅等,2017)。2018年,基于正安地区五峰组—龙马溪组为主要勘探层系的正安地区2口新井(AY2、AY3)开钻,并于次年成功点火试气(张福等,2021)。2019年,常规油气勘查不断在新区、新领域和新层系取得新突破,页岩气新增探明地质储量

7644.24 亿 m^3 , 同比增长 513.1%, 其中, 中国石油在四川盆地的长宁页岩气田、威远页岩气田、太阳页岩气田等 3 个页岩气田新增探明地质储量均超过千亿立方米, 形成川南万亿方页岩气大气区(付小东等, 2021)。中国地质调查局于 2019 年 1 月组织实施页岩气调查科技攻坚战, 先后查明长江下游皖南, 中游湘中、鄂西, 上游黔西、滇东北等重点地区构造特征、沉积演化和岩相古地理格局, 初步形成贵州遵义、湖北宜昌两大页岩气资源基地并实现页岩气商业开发(宋腾等, 2018; 周志等, 2018, 2020; 李浩涵等, 2020; 张保民等, 2021)。鄂西地区在震旦系、寒武系、志留系 3 个地质层系也均获高产页岩气流, 鄂西页岩气地质资源量达 11.68 万亿 m^3 , 具有建成年产能 100 亿 m^3 的基础, 与重庆涪陵、四川长宁—威远“三足鼎立”, 有望成为中国页岩气勘查开发和天然气增储上产的新基地(傅丛等, 2021)。随着扬子地块北缘下寒武统和震旦系页岩气勘探取得重大突破(Zhang et al., 2020), 下扬子地区常规油气、页岩气资源调查工作逐渐受到重视。中国地质调查局先后在苏皖南沿江拗陷带、江西萍乐—浙江钱塘拗陷带、南华北地区“两带一区”实施了 28 口页岩气调查井和参数井(郑红军等, 2020), 也标志着中国页岩气勘查开发已由长江上游向中下游战略拓展, “缺煤、少油、乏气”的长江经济带有望形成绿色能源勘查开发新格局, 有力地拓展与推动了公益性基础性页岩气调查与勘探(张文浩等, 2021)。

地质调查井作为获取全井岩心的唯一手段, 在

支撑后续钻探工程部署、压裂试油试气助力页岩气调查取得发现或突破具有重要意义, 尤其在南方下古生界页岩资料空白区, 构造、地貌及地面条件极为复杂, 其部署实施可直接查明勘探区域地层、构造以及沉积等地质条件, 得到油气显示实物资料。既可修正补充物探、地质等手段所得到的数据, 也可以配合物探、地质等手段揭示该区域成藏机理和富集规律, 并为后期页岩气钻探工程部署实施提供必要的依据和借鉴, 对页岩气地质调查起到重要支撑作用(朱迪斯等, 2020)。经过近十余年的实施、改进, 基于地质岩心钻探发展起来的小口径页岩气钻井装备及技术和基于常规油气钻井技术发展起来的大口径地质调查技术得到了融合和发展。2021 年 5 月, 《页岩气调查钻完井技术规程》(DZ/T 0365-2021) 推荐性地质行业标准正式实施。

2 页岩气基础地质调查井概况

中国地质调查局在国家财政经费支持下, 成功实施了 173 口页岩气井(图 1), 累计完成进尺 31 万余米, 其中小口径地质调查井 137 口。重点开展长江经济带页岩气调查科技攻坚战, 通过部署钻井工程(表 1), 取得了震旦系、寒武系和志留系页岩气调查的重大突破和二叠系页岩气调查重要发现。完成了长江经济带“三位一体”页岩气资源潜力评价, 对优化能源消费结构、实现绿色发展、保障国家能源安全具有重要意义(庞飞等, 2020)。

基础地质调查井主要包括小口径地质调查井

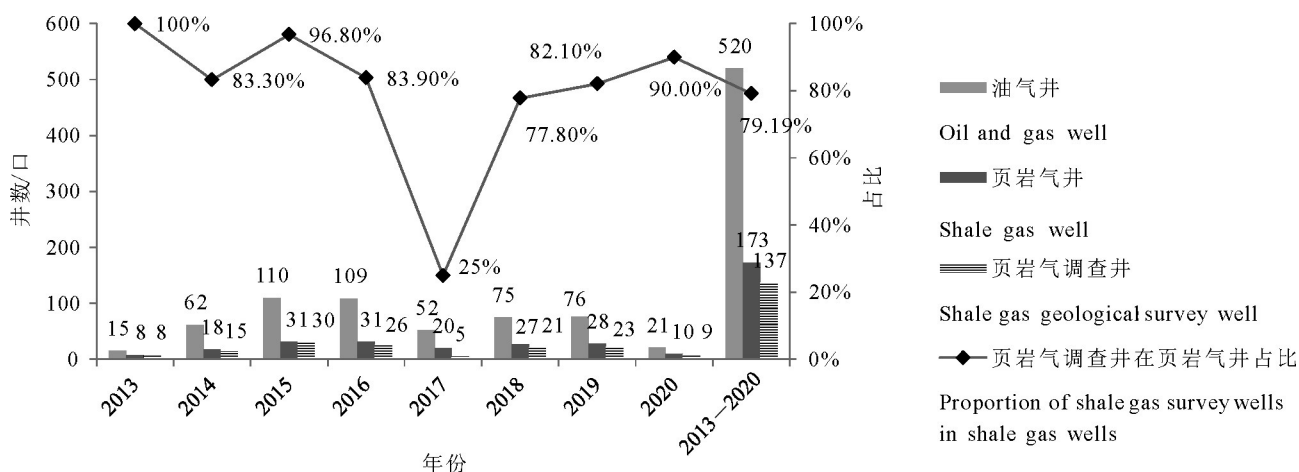


图 1 中国地质调查局部署实施的页岩气钻井概况

Fig.1 Shale gas drilling deployed and implemented by China Geological Survey

表1 中国地质调查局部署实施的典型页岩气井概况

Table 1 Overview of typical shale gas wells deployed and implemented by China Geological Survey

序号	井号	井深/m	区域	勘探层系	主要进展或见气情况
长江经济带取得页岩气调查重大突破或重要发现钻井(部分)					
1	云宁地1井	1500.68	上扬子、滇东北	泥盆系	滇黔桂地区第一口在泥盆系获稳定天然气流(张子亚等, 2019),日产气2000 m ³
2	黔水地1井	2500.00	上扬子、黔西	石炭系	在打屋坝组获得海相页岩气发现,后续试油日产页岩气1.1万 m ³ ,证实了垭紫罗裂陷槽页岩气勘探潜力(陈相霖等, 2021)
3	黔宁地1井	1133.05	上扬子、黔西	石炭系	进一步证实了垭紫罗裂陷槽的页岩气勘探潜力,为长江经济带上游滇黔桂地区石炭系页岩气调查突破提供了重要支撑
4	安页1井	2900.17	上扬子、黔北	奥陶系、志留系	单层压裂试气日稳产10万 m ³ ,新区新类型新层系新理论新模式重大突破
5	黔紫页1井	3010.00	上扬子、黔南	石炭系	总含气量最高达1.68 m ³ /t,实现了中国南方地区上古生界海相页岩气的新区重大发现(苑坤等,2017)
6	贵丹地1井	1125.30	上扬子、黔南	黔南坳陷震旦—寒武系	首次在寒武系乌训组发现页岩气,寒武系变马冲组、牛蹄塘组和震旦系陡山沱组等多个层系均发现页岩气,开辟了中国南方页岩气调查新层系,实现了雪峰隆起西南缘震旦—寒武系多层系勘查新局面,取得了页岩气调查重大发现。
7	湘慈地1井	1587.50	中扬子、湘西北	寒武系	为湘慈页1井部署提供依据,支撑湘慈页1井取得重大发现
8	湘新地4井	1450.00	中扬子、湘中	石炭系	钻获高含气层段,获得新区新层系页岩气调查发现
9	湘新页1井	2680.00	中扬子、湘中	泥盆系	页岩气、致密泥岩气新发现
10	鄂稀地2井	1445.81	中扬子、鄂西	震旦系、寒武系	下震旦统陡山沱组和下寒武统牛蹄塘组获得重大页岩气发现,其中牛蹄塘组含气量高达4.45 m ³ /t,是当前武陵山地区获得的最高含气量
11	鄂宜地2井	1806.97	中扬子、鄂西	奥陶系、寒武系	钻遇页岩气,页岩厚度大(14 m),含气量高(0.579~5.48 m ³ /t,平均值2.047 m ³ /t),为鄂阳页2井及鄂阳页2HF井及后续油气发现提供重要部署依据(陈孝红等,2017,2018)
12	鄂阳页2HF井	5200.00	中扬子、鄂西	震旦系	获产量5.53×10 ⁴ m ³ /d工业气流
13	皖阜地1井	2020.18	下扬子、皖北	石炭系、二叠系	钻获海陆过渡相高品质烃源岩(高棚等,2021)
14	皖油地1井 (刘兵等,2020)	2012.70	下扬子、皖南	二叠系、三叠系	钻遇大隆组泥页岩厚度40.3 m,孤峰组黑色硅质炭质泥页岩厚度29.2 m,证实下扬子地区二叠系泥页岩具有较好的页岩气资源潜力(石岗等,2021)
15	皖为页1井	2398.00	下扬子、皖南	二叠系、三叠系	长江下游地区首次钻遇中三叠统超压天然气,发现卤水型富锂-硼-溴-碘综合矿产资源
16	皖望地1井	1300.00	下扬子、皖南	二叠系孤峰组	气测录井和TOC(均值4.52%,主体分布在2%~4%)数据显示,孤峰组页岩中部含气性较好(廖圣兵等,2021)
17	赣丰地1井	1501.20	下扬子、赣中	二叠系	萍乐坳陷中部二叠系乐平组获“三气”(页岩气、煤层气、致密气)发现(滕龙等,2021)
18	浙桐地1井	1103.16	下扬子、浙西北	奥陶系	钻遇奥陶系胡乐组和宁国组硅质页岩,见气测异常显示,有望形成连片勘查面积为11618 km ² ,从而开拓下扬子区奥陶系胡乐—宁国富有机质硅质页岩的资源勘查局面
其他区域重大突破或重要发现钻井(部分)					
19	桂融地1井	1509.00	广西融水地区	石炭系	探获石炭系鹿寨组页岩气,为桂融页1井部署提供依据
20	桂柳地1井	2004.80	广西柳州侏容	石炭系	发现气测异常4段,现场最大解吸气量为2.9 m ³ /t

注:安页1井、黔紫页1井、湘新页1井、鄂阳页2HF井、皖为页1井为参数井,其余为地质调查井。

和大口径地质调查井,公益性油气调查工作主要布置在油气勘探开发企业矿权区域以外,地球物理勘探等工作部署较少,通过实施钻探工程,获取地层序、烃源岩特征并为油气储藏发现提供地质资料和测试数据,用以查明富含有机质泥页岩层系的分布特征、岩性组合、有机地化、岩石矿物学及含气性特征,初步评价调查区内页岩气资源的勘查前景。其中,小口径页岩气地质调查井特指以了解富含有机质泥页岩垂向分布、厚度,获取有机地化、岩石矿物、含气性等基本参数部署的机械岩心钻探,开孔直径 ≤ 216 mm,终孔直径通常在75~122 mm为主,设计深度在1500~2000 m,一般穿透第四系覆盖层后,对全井段取心,并配合地球物理测井和气测录井。小口径地质调查钻井技术不仅能较好满足页岩气勘探初期的钻井目的,而且能缩短钻井周期,降低钻井成本,取得较大的经济效益(刘治,2017)。页岩气地质调查井与常规探井装备及技术、工艺对比见表2。

3 页岩气调查井钻井技术进展

3.1 页岩气调查井关键装备

3.1.1 钻机优选

大口径地质调查井钻机选型主要是常规石油转盘钻机,在复杂地层、尤其是在定向钻进过程中,提下钻时会经常发生遇阻卡钻、塌孔埋钻等事故,基于解决复杂地层深孔钻进时孔内卡钻事故频发难题,提速增效降耗,系列新型电动永磁直驱顶驱钻机系统的研发很好地满足了大口径地质调查井的实施,但由于成本的增高,在实际应用中较少。

在小口径地质调查井钻机选型时,国内比较成熟的岩心钻机是XY系列,代表机型主要有XY-6

型、XY-8型、XY-6B型和XY-8B型等(表3)。其中,XY-8B型钻机是在XY-8型钻机上增加了转盘,既可作为传统的立轴钻机使用,又可作为转盘钻机使用,实现一机多用。

3.1.2 井控装备

大口径地质调查井可直接采用油气探井井控装备。小口径页岩气地质调查井施工一般采用立轴岩心钻机,该类钻机适用于绳索取心钻进,特别适应于小口径终孔、全井段取心、金刚石高转速钻进的钻探要求,采用机械岩心钻探工艺,当应用于页岩气勘查时,为了满足加装井控装置的空间,需要配备预留2~3 m钻机底座。小口径绳索取心钻探配套钻塔、泥浆泵等,不适用于井控设备安装和井控操作,导致在井控、HSE、储备加重钻井液等方面还存在诸多亟须解决的问题(张德龙等,2015;伍晓龙等,2019)。

由于配备泥浆泵泵量小、最大泵压低,当发生井喷溢流时无法满足压井作业。由于价格昂贵、规格尺寸大(满足安装空间要求)、转速较低等原因,旋转防喷器不能直接用于金刚石绳索取心工艺。目前,小口径地质调查井井控设备主要包含单闸板、双闸板、放喷管线等。常见井控装置多为双闸板防喷器+四通+套管头+防喷管线,小口径调查井深度一般不超过2000 m,井控压力等级选择21 MPa或35 MPa。页岩气地质调查井一般开孔直径较石油钻井小,多为150 mm,终孔直径为95 mm或75 mm,进一步限定了井控装置的通径大小(丁涛,2018)。因此井口装置可采用套管头+井口四通+双闸板防喷器+防溢管的形式,降低了井口装置的高度,满足常规立轴钻机底座空间。闸板液压防喷器通径大小适应于岩心钻机小口径的特点,压力级别能满足大部分页岩气地质调查井对井控压力的要求。

表2 页岩气基础地质调查井与常规油气探井对比

Table 2 Comparison between geological survey drilling for shale gas and drilling for oil and gas

	常规探井(参数井)	页岩气基础地质调查井(大口径)	页岩气基础地质调查井(小口径)
钻井装备	转盘、顶驱钻机(ZJ-30/40/50等)	转盘钻机	地质岩心立轴式钻机(XY-6/XY-8)
取心工艺	提钻取心	提钻取心	绳索取心/提钻
取心特点	部分段(目的层)取心	部分段(目的层)取心	全孔取心
井深/m	2000~6000	1800~2500	1000~2000
钻井费用/(元/m)	≥ 3000 ,较高	1500~3000,适中	1500左右,偏低
后续试油气	满足要求	可满足要求	不满足
代表井	桂融页1井(覃英伦等,2021)、 陕南页1井(李娟等,2021)	川沐地2井(樊腊生等,2021)、 皖阜地1井	黔普地1井(郝海洋等,2019)、湘永地1井(黄 晟辉等,2019)、黔宁地1井(高棚等,2022)

表3 页岩气地质调查井常用钻机及其能力
Table 3 Performance of drilling rigs for shale gas geological survey

钻机类别	立轴钻机	立轴+转盘	转盘
适应井类型	小口径地质调查井		大口径调查井
典型机型	XY-6/XY-8/HXY-8	XY-8B/HXY-8B	ZJ-20/30/40
一开口径/mm	150	150~216	444.5
适应深度/m	1000~2000	1000~2500	2000~3500

3.1.3 钻井液固控循环系统

页岩气钻井所产生的废弃物对施工现场周边环境影响较大。钻井液固控处理系统俗称泥浆不落地系统,可以提高钻井液固相控制和随钻治理的环保技术水平,降低环保压力,为油气钻井“绿色”、高效作业提供强有力的技术支撑与装备支持(冯美贵等,2020)。小口径页岩气钻井固控循环系统(图2,表4)主要由离心工艺和压滤工艺组成。满足钻井液的筛分—除气—除砂—除泥—离心机5级固相控制、钻井液配置、加重及储备等工艺要求。最大处理量6 m³/h,可满足开孔直径150~216 mm,井深

2000~2500 m的调查井施工对钻井液处理的需求。

3.2 高效取心工具及钻进工艺

3.2.1 大口径绳索取心工具及钻进工艺

密闭取心和密闭保压取心被认为是页岩气钻井获取资料最准确的方法,但是费用较高,在天然气水合物取心中应用较多(彭奋飞等,2021;刘协鲁等,2021),在页岩气应用方面也开展了相关研究,如配套密闭取心钻头的理论研究(曹龙龙等,2021)。兼顾成本和效果的前提下,绳索取心技术能够缩短取心时间,是目前油气基础地质调查含气量测试常用的取心方式(彭黎璨等,2013)。小口径绳索取心钻具在机械岩心钻探中广泛应用,因口径较小难以满足测井需要,朱恒银等(2016a)以成熟的小口径绳索取心钻具结构为基础,优化钻具设计,研发了Ø 152 mm、Ø 140 mm、Ø 122 mm等系列大口径绳索取心钻具,配合绳索取心液动潜孔锤,实现了钻孔直径127 mm、岩心直径80 mm绳索取心钻进最大钻深达2700 m。在页岩气勘查中,通过加大钻杆与钻孔环空间隙,减小深井钻进钻井液上返

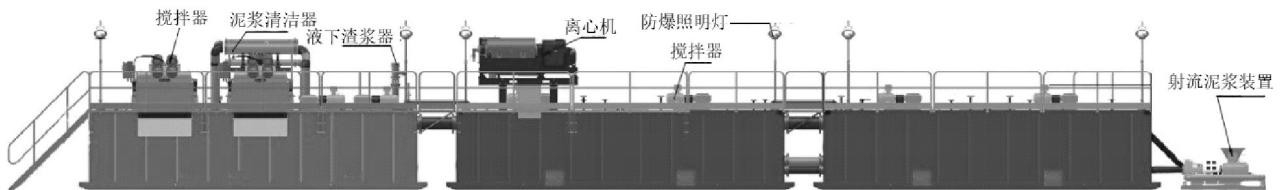


图2 钻井液固控循环系统布置
Fig.2 Drilling fluid solid control system

表4 小口径页岩气井用钻井液固控循环系统主要部件
Table 4 Main components of drilling fluid solid control system for slim hole shale gas well

序号	名称及型号	单位及数量	备注
1	固控罐	1套	
2	循环罐	1套	
3	制浆罐	1套	
4	QJQ100泥浆清选器	1台	功率:0.12 kW;重量:110 kg 处理量:5~12 m ³ /h;最小处理粒度:40 μm
5	TGLW350离心机	1台	功率:11 kW;重量:800 kg 最大处理量:6 m ³ /h;最小处理粒度:5 μm 转速:1500 rpm
7	1 1/4 LP-6水泵	1台	流量:6 m ³ /h,电机功率:1.1 kW
8	YW10-30水泵	2台	
9	NJ-5.5搅拌机	2台	配备850 mm叶轮,电机功率7.5 kW
10	NJ-2.2搅拌机	1台	配备500 mm叶轮,电机功率2.2 kW
11	罐周操作平台	1套	
12	附件	1套	管线、阀门等
13	控制电路	1套	

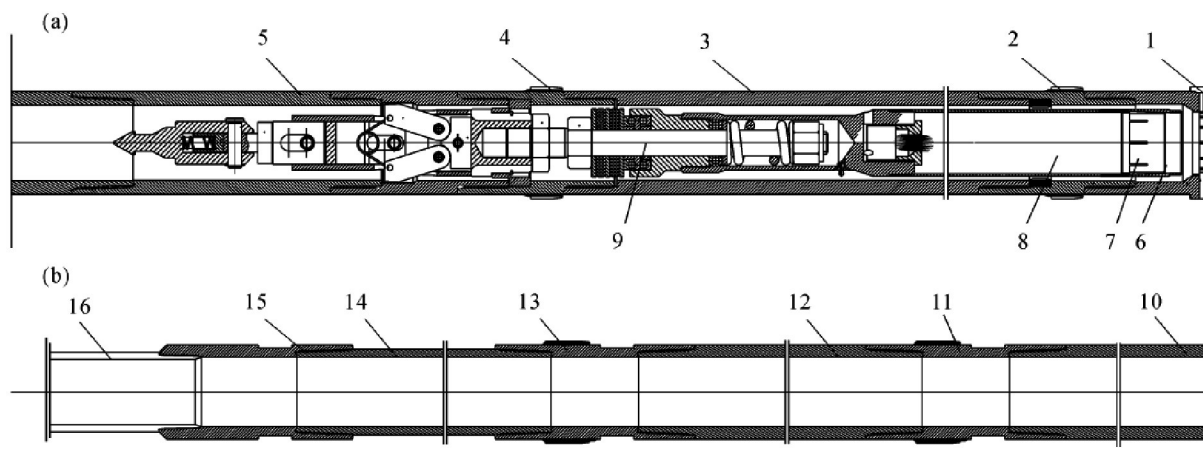


图3 大直径加重管组合绳索取心钻具结构(据朱恒银等,2016b)

1—钻头;2—下扩孔器;3—外管;4—上扩孔器;5—短节;6—卡簧座;7—卡簧;8—内管;9—内管单动岩心打捞装置;10—加重管;11—下扶正器;12—加重管;13—上扶正器;14—过渡加重管;15—过渡加重管扶正器;16—绳索取心钻杆

Fig.3 Structure of combined large-diameter wire line drilling tool with a heavy pipe (after Zhu Hengyin et al., 2016b)

1—Drill bit; 2—Lower reamer; 3—Outer tube; 4—Upper reamer; 5—Barrel nipple; 6—Circlip seat; 7—Circlip; 8—Inner barrel; 9—Core fisher; 10—Heavy weight pipe; 11—Lower centralizer; 12—Heavy weight pipe; 13—Upper centralizer; 14—Extra heavy weight pipe; 15— Extra centralizer; 16—Wire line core drill pipe

阻力和对地层的压力,增加钻具的稳定性,改变钻具受力状态,匹配加重钻杆,组合大口径加重绳索取心钻具系统(图3),其组合方式为:Ø 152 mm 钻头+绳索取心双管钻具总成+ Ø 140 mm 加重管+ Ø 127 mm 钻杆+扶正器+ Ø 114 mm 绳索取心钻杆。

以浙江临安 LC01 井为例,通过地面加压及加重管孔底加压,孔内受力状况改善,钻具稳定性好,可实现降低井斜率,相比同地区其他钻孔,井斜率由 $1.1^{\circ}/100\text{ m}$ 降低至 $0.32^{\circ}/100\text{ m}$,同时减少了井内断钻杆等井下复杂发生,实施了页岩气井中长筒取心作业,累计完成钻探工作量 7412.24 m,最深钻孔 2328.18 m,最大终孔口径为 152 mm。随着口径变大,为了降低钻机回转负荷,实现深部钻进,选取的钻杆柱尽可能轻便、强度高、柔性好,配套使用的金刚石钻头选取尖齿型,接触岩石面积小,排粉通畅,

内外保径强等特点,以提高钻进效率和钻头寿命等。解决了深孔大直径薄壁绳索取心钻杆孔底加压、大流量冲洗液孔内背压高、孔斜、钻杆内壁结垢等技术难题。

3.2.2 KT型大口径提钻取心钻具及钻进工艺

KT型取心钻具(图4)在科学钻探、地质勘探、石油天然气勘探、非常规油气勘探等领域应用广泛,是中国大陆科学钻探攻克复杂地层常用的一种钻具,目前已实现标准化、系列化,可实现大口径同径取心(朱芝同等,2019;张恒春等,2021)。在页岩气井同径取心条件下,KT-194型钻具切削面积比为64.7%,川8-4型钻具切削面积比为76.2%,前者切削面积比为后者的84.9%(熊虎林等,2019)。在页岩气井相同井径条件下,KT-216型钻具所取岩心直径较石油钻井相同规格的钻具大20 mm,显著

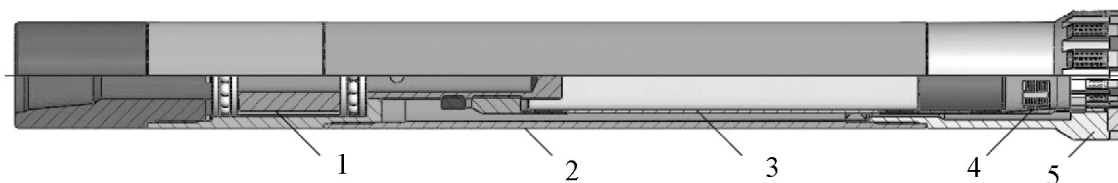


图4 KT系列取心钻具结构

1—悬挂结构;2—外管;3—岩心管;4—卡簧;5—取心钻头

Fig.4 Structure of KT series coring tool

1—Suspension structure; 2—Outer pipe; 3—Core tube; 4—Snap ring; 5—Coring bit

提高了取心量,又减小了钻头的碎岩面积,有利于钻速的提高(朱永宜等,2018)。KT系列钻具将传统的石油钻井大口径特点及地质岩心钻探金刚石薄壁取心技术的特点相融合,对沉积岩、变质岩及岩浆岩具有较广泛的岩石适应性。可配套使用金刚石、PDC、巴拉斯、硬质合金等多种钻头,与螺杆钻具、涡轮钻具及液动锤等井底钻具配套使用,可实现高效率、长钻程取心作业。

以松辽盆地页岩油气勘查为例(白静等,2020),松辽盆地钻遇的青山口组泥岩致密、硬度高,局部含钙,普遍机械钻速低等问题,开展多种类钻具试验对比,结果表明,KT-194匹配孕镶金刚石钻头在机械钻速和取心质量上均优于常规川7-4和密闭取心钻具(图5)。KT取心钻具组合为:Ø215.9 mm取心钻头+KT-194型取心钻具+LZ172-6螺杆+Ø178.8 mm钻铤+接头+Ø158.8 mm钻铤+接头+Ø127 mm加重钻杆+Ø127 mm钻杆+方钻杆。取心钻进参数为:钻压10~60 kN,转速:60~250 r/min,排量为20~25 L/s。

3.2.3 倒塔式钻具组合钻进工艺

在地层条件允许的情况下,钻井井身结构越简单越好,可有效提高钻探施工效率,节约施工成本。但由于地质调查井口径较小,遇到井壁坍塌、漏失等复杂问题处理难度大,一般预留一级或多级套管,用于处理井内复杂。常规调查井的取心钻进一般是采用二开方式钻进,备用三至四开钻进。当

采用常规钻具组合时,上部井段环空较大。倒塔式钻具组合相比常规等口径钻具组合或塔式钻具组合,其优势主要体现在可以合并使用不同口径钻杆,同时减少环空间隙,增加水力性能,利于钻井液携带岩屑上返,减少井下复杂事故的发生(徐云龙等,2014)。

以皖毫地1井为例,设计井深1500 m,井身结构为:一开采用Ø130 mm常规钻进,Ø165 mm扩孔,下Ø146 mm套管,固井,安装井口装置;二开采用Ø100 mm绳索取心钻进至终孔,备用Ø122 mm绳索取心钻进,下Ø108 mm套管,封隔二开段复杂层段;若遇地层特别复杂或设计加深,需要套管护壁时,可以下Ø89 mm套管,采用Ø76 mm绳索取心钻进至完钻。在实际钻进过程中,二开采用Ø122 mm PQ常规绳索取心钻进至1229 m,受限于钻机能力,三开采用倒塔式钻具组合(Ø100 mm金刚石取心钻头+Ø100.5 mm扩孔器+Ø96 mm HQ绳索取心钻具+Ø100.5 mm扩孔器+Ø91 mm绳索取心钻杆+变径+Ø114 mm绳索取心钻杆+主动钻杆),动态调整两种不同规格绳索取心钻杆数量比例,钻进至目标井深。

3.2.4 空气跟管钻进技术

空气钻井优点之一是能有效应对恶性溶洞性井漏,实现安全快速钻井。空气跟管钻进原理是通过空压机将压缩空气送入孔内,为潜孔锤提供动力,送入压缩空气量与岩屑上返速度相关。跟管钻进技术广泛应用于西部沙漠戈壁缺水地区固体矿产勘查,而在

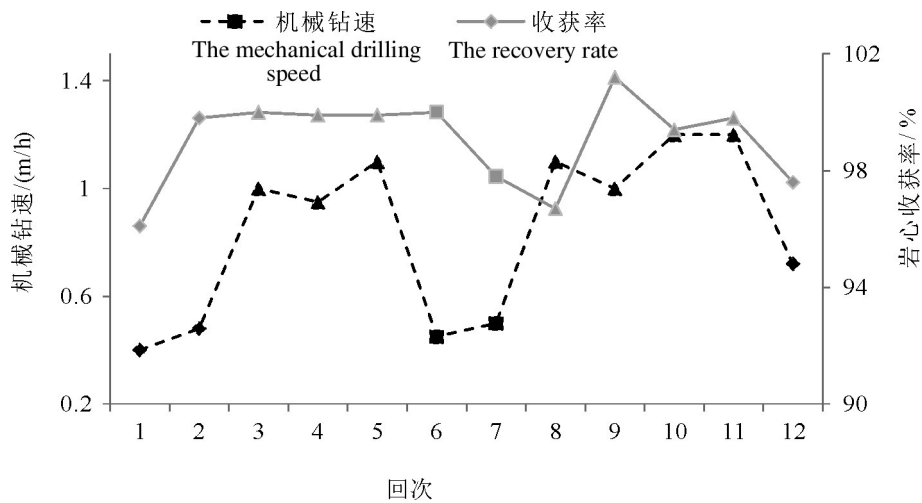


图5 3种钻具机械钻速和岩心收获率对比(据朱芝同等,2019)

Fig.5 Comparison of mechanical drilling speed and core recovery rate of three drilling tools(after Zhu Zhitong et al., 2019)
◆—川7-4; ▲—KT-194; ■—密闭取心钻具

南方页岩气勘探区域,针对浅部地层裂隙、溶洞发育,破碎带多,井漏、井垮严重,泥浆护壁钻进成孔难度较大等情况,将潜孔锤技术和跟管技术融合在一起,并结合了同心滑块特性形成同心滑块跟管钻进技术,可以很好地解决近地表的浮土层、破碎带、裂隙、溶洞等所引起的恶性漏失、井壁垮塌等各种井下复杂情况(郭军等,2020;苏舟等,2021)。

以黔水地1井为例,导管段钻探施工前期,钻遇地层裂隙、溶洞发育,井漏、井壁坍塌等各种复杂情况频现。采用转盘+同心滑块跟管钻进技术,施工井段20~33.7 m,进尺13.7 m,工程实施过程中未出现掉钻、卡钻等井下故障。进入基岩层,成功封隔浅部复杂地层后,停止跟管钻进施工,进行固井作业,导管下深33.7 m,相比回填黏土、商砼封堵、顶漏钻进、岩屑打捞等方式,空气跟管钻进+套管封隔有效解决了复杂地层坍塌、溶洞性地层钻进难题(迟焕鹏等,2020;郭军等,2021)。黔水地1井优快钻进技术及井身质量,为后续储层压裂改造和试气获得日产1.1万 m^3 工业气流奠定了基础,助力中国南方复杂构造区页岩气调查取得重要突破,对该地区页岩气勘探开发具有引领示范作用(陈相霖等,2021)。

3.3 高效取心钻头、冲击器

3.3.1 新型取心钻头研制及应用

页岩气地质调查井与常规地质岩心钻探(煤炭、金属矿产钻探)相比,钻遇岩层不同,深度不同,因此基于岩性的钻头适应性不同。页岩气地质调

查井主要目的层以页岩为主,非硅质页岩一般硬度不高,往往富含黏土质,容易对钻头形成泥包。在南方川黔地区石炭系—二叠系页岩气储层钻进中,当出现火成岩或软硬互层时,效率较为低下,基于此,针对不同层系围绕三个方向自主研发高效率长寿命取心钻头:一是异形PDC切削齿取心钻头(图6 a、b、c)。针对软硬互层、火成岩等复杂地层,选取屋脊齿及锥形齿等异形齿在钻头设计中的应用,提高地层吃入能力,较常规PDC钻头单只进尺以及机械钻速均取得了显著的提升,提高了钻头与地层的配伍性,钻井效率可提高至30%~80%;二是孕镶块钻头。针对硬岩地层钻头磨损形式、磨损机理和磨损分布规律进行了系统研究,开展孕镶块钻头研究(图6d),孕镶块钻头具有PDC钻头破岩效率高和金刚石钻头工作寿命长的双重优点(刘笑傲等,2017;于金平,2020)。在PDC+孕镶块混合钻头设计中,通过优化PDC与孕镶块布齿高差,可实现其机械钻速、钻头寿命相比常规PDC钻头提高1.5倍(杨顺辉等,2014;王滨等,2018a、b);三是新型金刚石钻头(图7)。针对泥岩等较硬地层金刚石钻头出刃差,效率低下难题,通过偏心斜齿、高胎体、高比压、强化胎体支撑、保径、岩屑自排屑等结构设计,研发高胎体偏心斜齿孕镶金刚石钻头,在黔宁地1井1006~1106 m井段泥岩、灰岩取心钻进中,相比常规金刚石钻头实现提速20%~30%(图8),寿命提高10%以上。

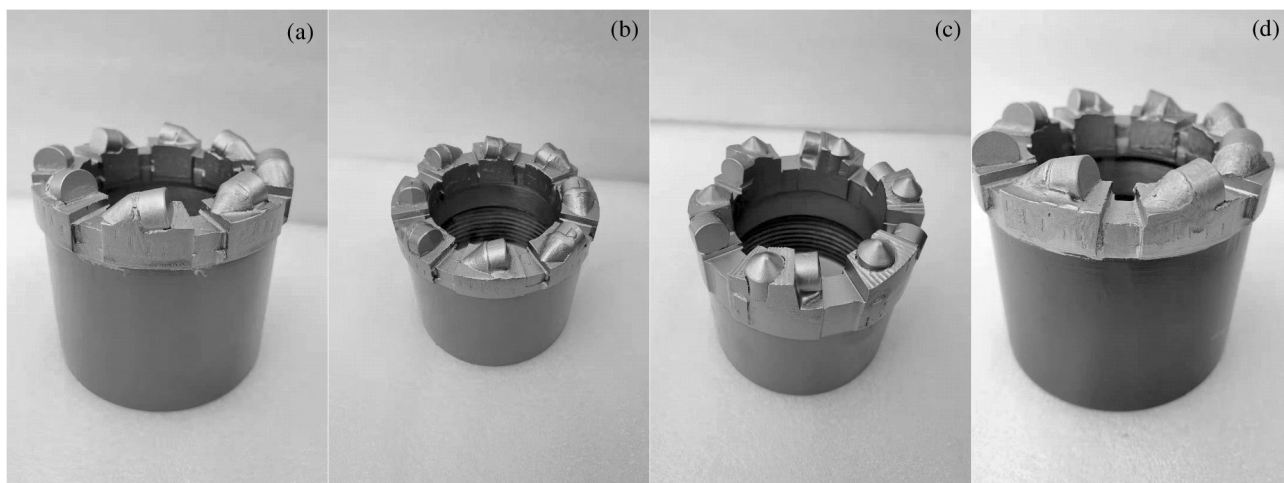


图6 异形齿PDC取心钻头及孕镶块钻头
a—常规齿钻头;b—屋脊齿钻头;c—锥形齿钻头;d—孕镶块钻头

Fig.6 Special PDC coring bit and diamond bit

a—Conventional teeth bit; b—Ridge teeth bit; c—Conical teeth bit; d—Diamond bit

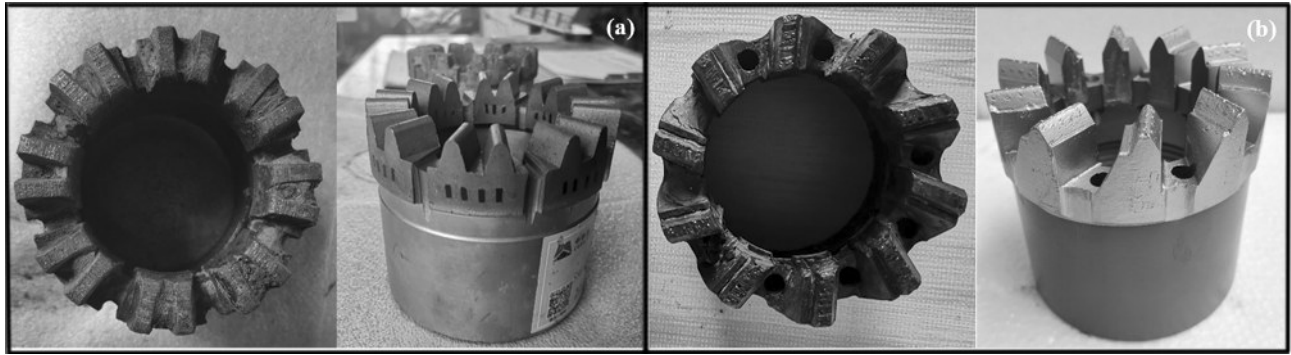


图7 常规硬岩齿轮钻头(a)和高胎体偏心斜齿孕镶金刚石钻头(b)
Fig.7 Conventional bit (a) and high matrix eccentric helical impregnated diamond bit (b)

3.3.2 扭力冲击器

为解决PDC钻头破岩过程中发生黏滑效应,在页岩气储层硬岩钻进过程中存有蹩跳钻现象严重、单只钻头进尺低及机械钻速低等问题。充分利用钻井液能量,采用涡轮组作为动力源,通过万向节和减速器进行扭矩传递,最终通过冲击组件旋转实现扭转冲击,向PDC钻头施加一个连续高频冲击力,不需要积聚能量即可瞬间对岩石进行剪切破碎(李小洋等,2019)。

“PDC钻头+扭力冲击器”相比“PDC钻头+螺杆钻具”和“孕镶金刚石钻头+涡轮钻具”在特殊地层使用,其提速效果明显(侯子旭等,2013;甘心,2021)。扭力冲击器能够适应深孔高温钻井环境,在页岩气储层硬岩地层钻进中取得了较好的应用效果,是页岩气勘探中应用较广泛的一种提速工具。目前常用的扭力冲击器主要有旋冲式、液压

式、高频液力、双作用扭力、回转式扭力等类型冲击器(王杰,2015;齐列锋,2016;王红希,2018)。

3.4 钻井液技术

页岩气地层岩性主要为泥岩、砂岩、页岩、炭质板岩、灰岩,该类地层裂隙发育、岩层破碎、水敏性强,钻进中易出现孔壁失稳,发生缩径、坍塌、卡钻、埋钻等井内事故及复杂情况,在钻井过程中,如何解决井壁稳定、悬浮携带岩屑、降低摩阻和减少对藏气地层污染堵塞等问题是选择钻井液的关键。在地层不很复杂或浅井施工的情况下,使用合成基钻井液和具有较强抑制性的无固相或低固相水基钻井液具有污染小、成本低等优势,需要解决的核心问题是如何保证页岩地层的井壁稳定,钻井液密度不合理是泥页岩井壁失稳的主要原因(程万等,2021),可通过物理封堵和化学抑制相结合的方式阻滞页岩水化(杨现禹等,2021)。要求钻井液具有3

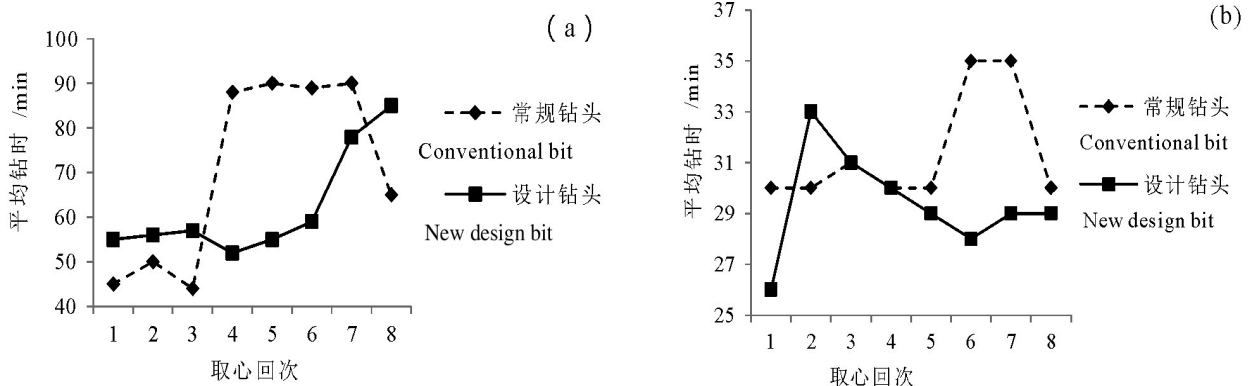


图8 常规硬岩齿轮钻头和 高胎体偏心斜齿孕镶金刚石钻头(设计钻头)取心效率对比
a—泥岩层取心效率对比;b—灰岩层取心效率对比

Fig. 8 Comparison of coring efficiency between conventional hard rock gear bit and high matrix eccentric helical impregnated diamond bit (design bit)

a—Comparison of coring efficiency of mudstone layer; b—Comparison of coring efficiency of limestone layer

个特点:合理的钻井液密度;足够的水化抑制性;良好的微裂隙封堵能力。

中国南方页岩气储层主要集中于石炭系一二叠系,岩性以泥岩、灰岩或砂岩为主,在钻井液密度不能升高的情况下,加入高一中黏羧甲基纤维素(CMC)/高效增黏剂提高钻井液黏度至30 s以上,增大了钻井液切力,提高了钻井液悬浮能力,使其携带出大量沉渣,降低了钻井液含砂量,且CMC还具有一定的润滑性,减小钻具和井壁之间的摩擦和降低钻井液循环流动阻力。同时加入腐殖酸钾/磺化褐煤(SMC)钻井液失水量至4.5 mL/30 min以下,减小自由水向井壁的渗透,提高了钻井液防塌能力,起到稳定井壁的效果(朱恒银和王强,2013)。目前常用的页岩气调查井钻井液体系见表5。

3.5 高效安全钻进与复杂处理

3.5.1 控压钻进技术

针对南方页岩层段岩性矿物含量复杂,在钻井过程中面临的钻井环境和常规油气层段比较相似,必然也会面临诸多井内事故及复杂情况。搞清页岩地层岩性发育情况对预防井内事故及复杂情况的发生有较好的指导意义。南方页岩主力生气层目前主要以志留系龙马溪组和寒武系牛蹄塘组为主,三叠系、二叠系和震旦系也均有发育。页岩地层主要以碳质和硅质泥、页岩为主,其中还夹杂有少量砂岩、碳酸盐岩及白云岩等多种矿物。利用常压法控压钻井技术可以快速、安全有效地钻穿窄密度钻井液窗口页岩地层,有效遏制地层坍塌破裂事故频繁发生,也可以保护裂缝发育相对较好的页岩

油气储层,不容易污染储层。

3.5.2 井眼稳定技术

通过对地层理化特性和力学不稳定性评价进行分析,认为页岩强度各向异性、弹性各向异性、井周渗流作用和传热效应是影响页岩井眼垮塌失稳的重要原因,其中,页岩强度各向异性是井眼失稳的主要力学机制。通过优化井眼轨迹、优化钻井液密度、减少钻井液浸泡时间和降低钻井液的侵入能力,能够有效解决页岩垮塌问题(Ma et al., 2020)。主要措施包括:一是匹配钻井液体系。通过定量分析方法在井壁稳定段及失稳段对钻井液密度窗口进行动态优化,合理确定钻井液密度,增强钻井液封堵能力和降低滤失量(赵莉萍等,2020);二是优化井身结构及钻井工艺优化设计;三是快速钻穿页岩地层,通过下套管固井等技术措施防止页岩井眼垮塌。使井眼保持稳定,以避免或少漏、涌、塌、卡等井下复杂。

3.5.3 井下复杂处理

以皖太参1井长裸眼井段发生失返性漏失、卡钻为例,采用多种堵漏配方堵漏,以及复合震击-卡点爆炸-套铣等一系列工序成功解卡(赵洪波等,2020);云宣地1井则针对长裸眼井段恶性漏失、裂缝性漏失、岩石挤压破碎及井内掉块等复杂情况,通过优化钻井液、采取多种堵漏方法等进行处理(李岩等,2021);针对井下落鱼或断钻具等井内事故及复杂情况采用侧钻绕障技术配合水力切割器可以成功绕过井内各种事故钻具,减少了使用反丝钻杆起绳索钻杆的次数,节约井下复杂情况处理的

表5 页岩气钻井液体系特性(据单文军等,2016 a, b;郭军等,2021)

Table 5 Drilling fluid system for shale gas drilling(after Shan Wenjun et al., 2016 a, b; Guo Jun et al., 2021)

体系	配方	性能参数	主要优点
双聚防塌钻井液体系	1%~4%膨润土+0.1%~0.5%包被剂(BBJ)+0.5%~2%降失水剂(GPNA)+0.5%~1.5%腐植酸钾+1%~2%随钻堵漏剂(GPC)+0.1%~0.5%增黏剂GTQ	漏斗黏度:20~30 s 密度:1.03~1.10 g/cm ³ 失水量≤8 mL/30 min	护壁效果好,针对破碎、坍塌掉块地层,具有强封堵性能,抑制孔壁坍塌掉块效果良好
成膜防塌低固相冲洗液体系	0~4%膨润土+0.1%~0.5%包被剂(BBJ)+0.5%~2%降失水剂(GPNA)+0.5%~1.5%腐植酸钾+1%~2%随钻堵漏剂(GPC)+0.1%~0.5%增黏剂GTQ+0.5%~1%环保型固体润滑剂+1%~5%成膜A剂+0~5%成膜B剂	漏斗黏度:20~30 s 密度:1.03~1.10 g/cm ³ 失水量:≤5 mL/30 min	有效防分散,能在松散岩心表面形成一层致密韧性保护膜,有利于提高取心质量和取心率
聚磺钻井液体系	10%~15.0%膨润土+0.3%~0.5%PAM+0.2%~0.3%CMC+0.5%防塌防卡剂+0.3%磺化褐煤树脂+0.3%广谱护壁剂+0.2%磺化酚醛树脂+0.5%消泡剂+4%NaOH+1%~2%地层压力增强剂	漏斗黏度:45~55 s 密度:1.20~1.23 g/cm ³ 失水量≤5 mL/30 min	防塌防卡剂和磺化酚醛树脂等材料,可提高对水敏性泥页岩的防塌抑制能力;地层压力增强剂提高了地层承压能力;磺化褐煤树脂和磺化酚醛树脂降低了失水量

时间和成本;针对低固相钻井液中钻具悬停发生黏卡的问题,采用泡碱处理可实现快速解卡,对环境及原有钻井液体系影响小。

4 页岩气调查井钻井技术研究展望

4.1 加强固井设计,优化小井眼固井工艺

目前,页岩气地质调查井固井技术主要是配合井控要求,进行套管的封固,防止气体从套管与地层之间的环空上窜,确保施工的安全性。地质调查井由于口径较小,下套管后,环状间隙较小(一般不超过20 mm),给固井带来极大的挑战,易产生水泥桥,造成水泥环的强度与界面胶结性不好。下一步加强固井设计和优化固井工艺。从井身质量、井眼稳定、井底清洁、钻井液和水泥浆性能、固井施工等方面全面考虑,确保施工安全和固井质量。针对黔桂地区表层及碳酸盐岩地层漏失、煤系地层承压能力低等特点,探索干法固井工艺,固井前先提承压,封堵漏失层位,合理匹配水泥浆体系;针对井径不规则、存在“大肚子”或“糖葫芦”井眼的井,可以考虑采用合理的排量,探索利用“紊流”+“塞流”顶替的方法提高水泥浆顶替效率。此外,固井工艺应重点管控固井套管的壁厚、水泥浆的上返高度、固井设备与工具的选择、作业过程的监控等,加强固井质量评价与套管试压。

4.2 加强井控等关键装备和膨胀管等创新技术升级推广

小口径井控装备目前主要是在常规油气探井的基础上改进而成,一旦钻遇高压地层与硫化氢地层,受限于钻机、泥浆泵等地面装备自身的局限性,重浆泵入难度高、关井能力不足等情况将严重威胁钻井施工安全。下一步针对四川盆地及周缘碳酸盐岩地层压力预测技术不成熟、地层含硫性不掌握等情况,开展小口径地质调查井井控设备升级优化,加强安全作业,实现井控安全。

膨胀套管技术作为井身结构优化的发展方向,主要用于优化井深结构、复杂层位封堵、套管补贴,可以在油气井中实现小井眼固井,目前成为国内外研究热点(吴柳根等,2013)。复杂结构井和特殊工艺井钻遇高压层、漏失层等复杂地层时,常因常规技术难以封堵或井眼尺寸受限而导致后续钻井和完井方案无法实施。膨胀套管钻完井技术能有效解

决页岩气复杂地层封堵、井身结构优化和完井内径过小等复杂钻完井难题,膨胀悬挂器作为膨胀套管技术的衍生产品,可为复杂井况条件下尾管完井提供技术手段(侯婷等,2015)。等井径膨胀套管技术作为膨胀套管技术和井身结构优化的发展方向,可以在不“牺牲”井眼直径尺寸的前提下对复杂层段进行封堵,作为一种应急预案用在裸眼井段来封隔不稳定储层段。相比常规钻井井身结构和膨胀套管结构(图9),等井径膨胀套管可满足无内径损失地回接至上级套管,从而可以采用同样的钻具及钻头规格继续钻进,很好地解决减缩式井身结构带来的完井尺寸小等问题,达到最终完井井眼更大的目的,在小口径页岩气地质调查井中具有良好的应用前景,为后续地层含油气性测试提供了可能。等井径膨胀套管技术还有利于井控系统配备,实现井口标准化,同时缩短钻井周期,节约钻井成本。针对黔西、渝东等页岩气勘探区域,加强高强度、轻便型膨胀管研发,推广等井径套管技术试验及应用,以期优化井身结构,解决浅部坍塌破碎地层难钻进、易漏失卡钻井下等复杂问题,实现南方岩溶地区高效安全钻进。

4.3 加强井下提速工具、钻头优选、钻井液体系研究

强化高效PDC钻头、高强度螺杆、水力振荡器等提速工具协同,完善小井眼提速配套技术;开展PDC+小口径取心涡轮钻具($\text{O}89\text{ mm}$)研发及应用推广;开展PDC钻头+螺杆钻具的复合钻井技术,合理匹配钻具组合,提高机械钻速,针对易斜段进行防斜纠斜。

基于钻柱-井壁-钻头-岩石系统动力学和钻头逆向设计理论,探索破岩、磨损机理研究,开展个性化钻头与钻井参数智能控制研究;针对南华北盆地安徽北部地区泥岩地层、软硬互层及硅质岩等多种岩性,结合地层特性持续开展多种类PDC、孕镶块钻头研发及野外优选试验,配套绳索取心工艺,达到长寿命、高效取心效果,加强不提钻换钻头研究,促进一趟钻技术形成。

钻井液被俗称为钻井的“血液”,其性能直接影响着钻井效率和安全(赵洪波等,2021)。下扬子安徽南部页岩气勘探区域大隆组岩心黏土矿物含量较高,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,龙

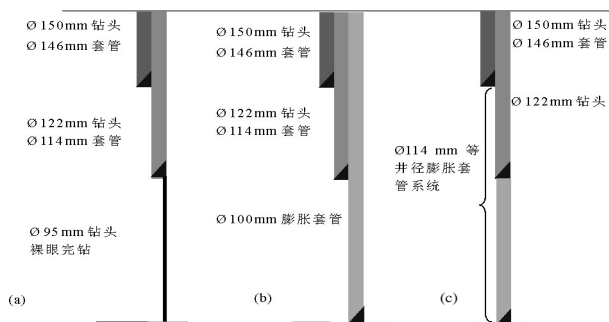


图9 三种井身结构设计对比——以某小口径页岩气基础地质调查井为例

a—常规井身结构; b—膨胀套管井身结构; c—等井径膨胀套管结构
Fig.9 Comparison of three well structure—Taking a small-diameter shale gas basic geological survey well as an example
a—Conventional wellbore structure; b—Expansion casing wellbore structure; c—Equal well diameter expansion casing structure

潭组地层复杂易掉块,导致后期起下钻扩划眼困难,易发生井内工具安全事故。进一步优化水基钻井液的流变性、抑制性、封堵性指标(高德利,2021),形成适用于南方页岩气的高性能水基钻井液体系,解决钻井井壁失稳、防漏防塌等问题。

4.4 加强地质调查井综合研究与管理

地质调查井是页岩气发现的重要一环,也是最直接的一环。新区新层系地质条件复杂,调查难度大。中国大部分页岩气勘探区域地质构造复杂,盆地叠加改造强烈、沉积岩性岩相复杂多变,页岩气分布规律复杂,地质调查井作为页岩气发现重要手段,须加强地质调查井综合研究和管理,提高油气发现成功率。

从部署上,针对制约南方复杂构造区页岩气调查发现的关键基础地质问题,优先部署调查井,获取岩心资料,进而为下一步部署探井(参数井)提供依据,提升解决关键基础地质问题的能力,形成区域油气调查地质工程成果。

从管理上,推动地质调查井管理的标准化、制度化。将地质调查井“生命”划分为论证阶段、实施阶段及评价阶段三个阶段;通过地质调查井全生命周期数据动态管理,实现目标管理和决策流程的信息化;探索形成适合基础地质调查特点和不同调查阶段特征的管理模式。建立以地质、钻井双目标为导向的管理模式,提升地质调查成果水平(赵远刚等,2021)。

践行地质工程生态管理一体化勘探开发理念,

快速推进地质工程生态管理一体化实践,充分发挥地质力学在井位部署、井眼轨道优化、钻井完井风险评估的作用。拓宽页岩气调查井应用,探索建立二氧化碳地质封存钻探技术,将地质调查井作为二氧化碳地质封存的重要通道,实现“一井多用”。

5 结 论

(1)中国地质调查局2013—2020年累计部署实施了173口页岩气勘查井,完成31万余米进尺,重点开展长江经济带页岩气调查科技攻坚战,取得了下古生界震旦系、寒武系和志留系页岩气调查的重大突破和上古生界二叠系页岩气调查重要发现,开辟了页岩气勘查的新区、新层系、新类型和新认识。

(2)通过钻井工程部署、技术攻关与现场试验,初步形成了公益性页岩气地质调查井钻井技术体系,包括在地质岩心钻探装备升级改造的系列钻机,绿色钻井液固控循环系统,配套绳索取心工艺,新型PDC及金刚石高效取心钻头,环保型水基钻井液体系等。相比取心较少、成本较高的常规石油探井(参数井),地质调查井作为获取全井岩心的唯一手段,可直接查明勘探区域地层、构造以及沉积等地质条件,得到油气显示实物资料。在支撑后续钻探工程部署、压裂试油试气助力页岩气取得发现或突破具有重要意义,构建了“调查井找方向,参数井抓重点”的油气调查钻探工程部署实施模式。

(3)下一步针对南方页岩气勘探复杂地质特征和不同页岩气储层类型,以“降本保质增效”为目标,从“安全提速”入手,研制适用于小口径固完井工具等井口装备,优化小口径固井工艺;研发高效率、长寿命钻头及工具,实现优快钻进;强化配套井控装备升级和钻井液固控系统应用推广;开展裂缝性地层钻井液技术、井壁稳定性等关键共性技术攻关;强化地质调查井综合研究与管理,向更快、更经济、更安全的方向发展;进一步拓宽页岩气调查井应用,助力二氧化碳地质封存,实现“一井多用”,以期为中国页岩气勘探发现与“双碳”目标实现提供支撑。

致谢:非常感谢郝梓国研究员在文章多次修改过程中的交流和启发,感谢周红军教授级高级工程师在审稿中提出的宝贵意见。

References

- Bai Jing, Xu Xingyou, Chen Shan, Liu Weibin, Liu Chang, Zhang Changsheng. 2020. Sedimentary characteristics and paleo-environment restoration of the first member of Qingshankou Formation in Qian'an area, Changling sag, Songliao Basin: A case study of Jiyeyou 1 Well[J]. *Geology in China*, 47(1): 220–235 (in Chinese with English abstract).
- Cao Longlong, Zhang Hengchun, Wang Wenshi, Yan Jia, Hu Chen. 2021. CFD simulation of the two phase flow field in the sealed coring bit[J]. *Drilling Engineering*, 48(11): 35–41 (in Chinese with English abstract).
- Chen Xianglin, Yuan Kun, Lin Tuo, Jin Chunshuang, Kang Haixia. 2021. Discovery of shale gas within Upper Paleozoic marine facies by Qian Shuidi-1 well in the northwest of Yaziluo rift trough, Sichuan Province[J]. *Geology in China*, 48(2): 661–662 (in Chinese with English abstract).
- Chen Xiaohong, Wang Chuanshang, Liu An, Luo Shengyuan, Li Hai, Wei Kai. 2017. The discovery of the shale gas in the Cambrian Shuijingtu Formation of Yichang area, Hubei Province [J]. *Geology in China*, 44 (1): 188–189 (in Chinese with English abstract).
- Chen Xiaohong, Zhang Baomin, Zhang Guotao, Chen Lin, Zhang Miao, Li Peijun. 2018. High shale gas industry flow obtained from the Ordovician Wufeng Formation and the Silurian Longmaxi Formation of Yichang area, Hubei Province [J]. *Geology in China*, 45 (1): 199–200 (in Chinese with English abstract).
- Cheng Wan, Sun Jiaying, Yin Dezhan, Jiang Guosheng. 2021. Research status of the wellbore failure mechanism and predicting model in deep mudstone and shale[J]. *Drilling Engineering*, 48(10): 21–28 (in Chinese with English abstract).
- Chi Huanpeng, Hu Zhifang, Wang Shengjian, Li Dayong, Yuan Kun, Guo Jun. 2021. Drilling techniques for thief zones in surface formations in western Guizhou[J]. *Drilling Engineering*, 48(4): 66–72 (in Chinese with English abstract).
- Ding Tao. 2018. The Design of the Shale Gas Investigation Well Control System[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing): (in Chinese with English abstract).
- Fan Lasheng, Liu Wei, Zhang Tongde, Deng Wei, Lu Junze. 2021. Drilling of a large diameter geological survey well (Well Chuanmudi-2) in Muchuan county of Sichuan Province[J]. *Drilling Engineering*, 48(12): 43–53 (in Chinese with English abstract).
- Feng Meigui, Weng Wei, Liu Jiarong, Li Chao, Jiang Rui, Zhao Zhitao, Liu Wenwu, Ouyang Zhiyong, Xu Junjun, Guo Kun, He Yunchao. 2020. Drilling fluid solid control circulation system for drilling of geothermal exploration and production well D20 in Xiong'an New Area[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 47(10): 38–42, 60 (in Chinese with English abstract).
- Fu Cong, Ding Hu, Chen Wenmin. 2021. Research on exploration and development layout of shale gas with policy support in China's Yangtze River economic belt[J]. *Coal Quality Technology*, 36(6): 13–21 (in Chinese with English abstract).
- Fu Xiaodong, Chen Yana, Luo Bing, Li Wenzheng, Zhang Jianyong, Wang Xiaofang, Qiu Yuchao, Lü Xueju, Yao Qianying. 2021. Characteristics and petroleum geological significance of the high-quality source rocks in the Gufeng Member of the Middle Permian Maokou Formation in the northern Sichuan basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 95(6): 1903–1920 (in Chinese with English abstract).
- Gan Xin. 2021. Advances in vibration impactors for drilling acceleration[J]. *Drilling Engineering*, 48(2): 85–93 (in Chinese with English abstract).
- Gao Deli. 2021. Some research advances in well engineering technology for unconventional hydrocarbon[J]. *Natural Gas Industry*, 41(8): 153–162 (in Chinese with English abstract).
- Gao Peng, Li Zhao, Li Shizhen, Zhou Zhi, Wei Siyu, Zhang Hongda. 2021. High-quality source rocks of marine-continental transitional facies discovered by borehole WFD-1 in the Fuyang area of Anhui Province[J]. *Geology in China*, 48(5): 1659–1660 (in Chinese with English abstract).
- Gao Peng, Lin Tuo, Yuan Kun, Jin Chunshuang, Chen Xianglin, Wang Wenbin. 2022. Carboniferous shale gas obtained by well QND-1 in the northwest of Yadu-Ziyun-Luodian Aulacogen [J]. *Geology in China*, 49(4): 1348–1349 (in Chinese with English abstract).
- Guo Jun, Chen Xianglin, Zhao Xunlin, Wang Wenbin, Li Yan, Han Fei. 2021. Key drilling technologies for well Qianshuidi-1 in Guizhong-Nanpanjiang area[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 28 (3): 423–427 (in Chinese with English abstract).
- Guo Jun, Wang Chaoji, Li Yan, Yuan kun, Wang Wenbin. 2020. Application of simultaneous casing drilling to large bore shale gas well drilling in shallow complex formation: A case of conductor drilling for the Qianshuidi-1 well[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 47(5): 22–26 (in Chinese with English abstract).
- Hao Haiyang, Song Jiwei, Jiang Guosheng, Du Shengjiang, Li Yong, Ban Jinpeng, Huang Mingyong, Chang Limin. 2019. Drilling technology of well qianpudi-1 for basic geological survey of shale gas in Southern China[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 46(8): 23–29 (in Chinese with English abstract).
- Hou Ting, Ning Xuetao, Wang Bin, Wu Liugen. 2015. Application research of expandable casing technology in drilling and well completion engineering[J]. *Sino-Global Energy*, 20(6): 48–51 (in Chinese with English abstract).
- Hou Zixu, Jia Xiaobin, Li Shuanggui, Deng Wenliang, Zeng Dezhi. 2013. Research on the torsion impact generator for speeding up drilling in deep formation of Yubei area[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 35(5): 132–136 (in Chinese with English abstract).

- Huang Shenghui, Kui Zhong, Wu Jinsheng, Zhao Yuangang, Fang Xin. 2019. Drilling and incident treatment for well Xiangyongdi-1[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 46(2): 23-29 (in Chinese with English abstract).
- Li Haohan, Du Jiang, Chen Ke, Li Fei, Song Teng, Wang Peng. 2020. The discovery of Permian shale gas in Wufeng area, Hubei Province[J]. Geology in China, 47(6): 1932-1933(in Chinese with English abstract).
- Li Juan, Wang Yufang, Zhai Gangyi, Zhang Jiazheng. 2021. First drilling of shale gas within the Niutitang Formation in the Nanzheng area, Shaanxi Province[J]. Geology in China, 48(1): 337-338 (in Chinese with English abstract).
- Li Shizhen, Zhou Zhi, Nie Haikuan, Zhang Leifu, Song Teng, Liu Weibin, Li Haohan, Xu Qiuchen, Wei Siyu, Tao Shu. 2022. Distribution characteristics, exploration and development, geological theories research progress and exploration directions of shale gas in China[J]. China Geology, 5(1): 110-135.
- Li Xiaoyang, Li Kuan, Zhang Yongqin, Liang Jian, Wu Jixiu, Wang Zhigang. 2019. Experiment on a new turbine torsional impactor[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 46(12): 40-43, 49 (in Chinese with English abstract).
- Li Yan, Guo Jun, Wang Wenbin. 2021. Drilling difficulties and solutions for well Yunxuandi-1 for shale gas survey in eastern Yunnan[J]. Drilling Engineering, 48(8): 12-18 (in Chinese with English abstract).
- Liao Shengbing, Shi Gang, Li Jianqing, Zheng Hongjun, Zhou Daorong, Wang Cunzhi, Huang Ning. 2021. Shale gas drilled by well WWD1 in the Wangjiang area of Anhui Province[J]. Geology in China, 48(5): 1657-1658 (in Chinese with English abstract).
- Liu Bing, Zhu Hengyin, Cai Zhengshui, Wang Qiang, Lu Wencheng. 2020. Key drilling technology for complex working conditions in Ningguo Depression[J]. Science Technology and Engineering, 20(22): 8943-8947 (in Chinese with English abstract).
- Liu Xiaobao, Zou Deyong, Chen Xiuping. 2017. Optimum design experiment of rock-breaking mechanism of polycrystalline diamond compact-diamond impregnated matrix bit for drilling hard and strong abrasive formation[J]. Science Technology and Engineering, 17(29): 220-226 (in Chinese with English abstract).
- Liu Xielu, Ruan Hailong, Zhao Yi, Cai Jiapin, Chen Yunlong, Liang Tao, Li Chun, Liu Hailong, Deng Dudu. 2021. Progress in research and application of the pressure-temperature core sampler for marine natural gas hydrate[J]. Drilling Engineering, 48(7): 33-39 (in Chinese with English abstract).
- Liu Zhi. 2017. Application Analysis on small diameter core drilling technology in shale gas geological exploration well[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 44(9): 32-37 (in Chinese with English abstract).
- Ma Tianshou, Chen Yingjie, Duan Mubai. 2018. Chemo-poroelastic coupling method for wellbore stability analysis in shale gas formation with weakness planes[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 36(3): 1817-1831.
- Pang Fei, Zhang Zuoheng, Zhang Junfeng, Chen Ke, Shi Dishu, Bao Shujing, Li Shizhen, Guo Tianxu. 2020. Progress and prospect on exploration and development of shale gas in the Yangtze River economic belt [J]. Earth Science, 45(6): 2152-2159 (in Chinese with English abstract).
- Peng Cancan, Li Fenqiang, Wu Cong, Wei Youlin. 2013. Shale gas parameter well slim hole drilling technology—A case study of Changye No.1 Well[J]. Coal Geology of China, 25(11): 55-58 (in Chinese with English abstract).
- Peng Fenfei, Wang Jialiang, Wan Buyan, Huang Xiaojun, Tang Yonghui, Peng Deping. 2021. Design of the pressure-coring tool for underwater drilling rig[J]. Drilling Engineering, 48(4): 97-103 (in Chinese with English abstract).
- Qi Liefeng. 2016. The Design of New Type of Hydraulic Torsion Impactor and its Dynamic Simulation[D]. Jinzhou: Yangtze University (in Chinese with English abstract).
- Qin Yinglun, Zhang Jiazheng, Wang Yufang, Kang Haixia, Li Juan, Zhang Ziya, Xue Zong'an, Zhang Yunxiao. 2020. Discovery of shale gas by Guirongye-1 well within Carboniferous Luzhai Formation in Guizhong depression, Guangxi[J]. Geology in China, 48(2): 667-668(in Chinese with English abstract).
- Shan Wenjun, Duan Xiaoqing, Ren Fujian, Zhang Weihua, Yue Weimin, Li Yanning. 2016a. Application of low solid film-forming system in well "Wuye-1" in Wuwei Basin of Gansu [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 43(7): 111-115 (in Chinese with English abstract).
- Shan Wenjun, Jiang Rui, Tao Shixian, Yue Weimin, Li Yanning. 2016b. Research and application of the flushing fluid system for shale gas drilling[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 43(10): 176-181 (in Chinese with English abstract).
- Shi Gang, Li Jianqing, Liao Shengbing, Wu Tong, Huang Ning, Fang Chaogang, Huang Zhengqing, Shao Wei, Ye Jun, Cai Xiaohu, Zhang Qiang. 2021. Discovery of Permian shale gas in the Wanyoudi-1 well of Xuancheng, Anhui Province[J]. Geology in China, 48(2): 669-670.
- Song Teng, Chen Ke, Bao Shujing, Guo Tianxu, Lei Yuxue, Wang Yi, Meng Fanyang, Wang Peng. 2018. The discovery of shale gas in Wufeng-Longmaxi Formation at Hongdi-1 Well on the northern limb of Shennongjia anticline in northwestern Hubei Province[J]. Geology in China, 45(1): 195-196 (in Chinese with English abstract).
- Su Zhou, Zhang Shaohe, Wang Wenbin, Cao Han, Liu Leilei, Xiao Jincheng, He Hongsheng, Guo Jun. 2021. Technical difficulties in drilling of well Qianshuidi-1 and their solutions[J]. Drilling Engineering, 48(5): 54-59(in Chinese with English abstract).
- Teng Long, Fang Chaogang, Zheng Hongjun, Zhai Gangyi, Li Jianqing, Huang Zhengqing, Wang Jingdong, Zhang Hao, Lü Xing.

2019. The discovery of 'three natural gases' in the Upper Permian Leping Formation in Ganfengdi- 1 well of middle Pingle depression [J]. *Geology in China*, 46 (1): 203- 204 (in Chinese with English abstract).
- Wang Bin, Li Jun, Zou Deyong, Yang Hongwei, Huang Tao. 2018a. Mechanisms and distribution pattern of abrasions on PDC bits for highly-abrasive hard-rock[J]. *Special Oil and Gas Reservoir*, 25 (4): 149-153(in Chinese with English abstract).
- Wang Bin, Li Jun, Zou Deyong, Yang Hongwei, Wang Kai. 2018b. Design and application of a PDC hybrid drill bit with impregnated diamond insert for the hard formation with strong abrasivity[J]. *Special Oil and Gas Reservoir*, 25(1): 169- 174 (in Chinese with English abstract).
- Wang Hongxi. 2018. Structural Design and Parameters Optimization Research of Rotary Torsional Impact Generator[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China) (in Chinese with English abstract).
- Wang Jie. 2015. Design and Flow Simulation of Double Torsion Impactor for Drilling[D]. Beijing: China University of Geosciences (in Chinese with English abstract).
- Wu Liugen, Ning Xuetao, Tang Ming. 2013. Emergency application of monohole expandable casing technology[J]. *Drilling & Production Technology*, 36(6): 1-4 (in Chinese with English abstract).
- Wu Xiaolong, Zhu Zhitong, Dong Xiangyu, Li Wenxiu. 2019. Problems and field cases of small-diameter oil and gas geological survey wells[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 46(9): 27-32 (in Chinese with English abstract).
- Xiong Hulin, Zhang Fei, Gan Huimin, Xu Longsheng. 2019. Coring technique for shale gas survey Quanca well- 1[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 46(6): 19- 25 (in Chinese with English abstract).
- Xu Yunlong, Wang Rui, Wang Wenfei, Liu Jiangang. 2014. High quality and high speed drilling technology for ultra-deep five-section sidetracking horizontal well TP131HCH[J]. *Drilling Engineering*, 41(10): 22-25.
- Yang Shunhui, Wu Haojie, Niu Chengcheng, Hou Xutian, Jin Junbin. 2014. Manufacture and application of PDC bit enhanced by special Diamond-impregnated segment[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 42(6): 111-114 (in Chinese with English abstract).
- Yang Xianyu, Cai Jihua, Jiang Guosheng, Shi Yanping, Chen Shuya, Wei Zhaohui, Xie Zhangjian. 2021. Physical plugging simulation and chemical inhibition experiment for wellbore stability in shale[J]. *Drilling Engineering*, 48(4): 37- 46 (in Chinese with English abstract).
- Yu Jinpin, Zou Deyong, Liu Xiaobao. 2020. Design and application of novel hybrid drill bit for hard formation with strong abrasivity[J]. *Diamond & Abrasives Engineering*, 40(3): 67-71 (in Chinese with English abstract).
- Yuan Kun, Wang Chao, Qin Yinglun, Yu Shufang, Chen Rong, Shi Dishu, Bao Shujing, Lin Tuo, Zhou Zhi. 2017. The discovery of Carboniferous shale gas in Qianziye- 1 well of Qianan (southern Guizhou) depression [J]. *Geology in China*, 44(6): 1253- 1254(in Chinese with English abstract).
- Zhai Gangyi, Bao Shujing, Pang Fei, Ren Shoumai, Chen Ke, Wang Yufang, Zhou Zhi, Wang Shengjian. 2017. Reservoir-forming pattern of "four-storey" hydrocarbon accumulation in Anchang syncline of northern Guizhou Province[J]. *Geology in China*, 44 (1): 1-12(in Chinese with English abstract).
- Zhai Gangyi, Wang Yufang, Zhou Zhi, Yu Shufang, Chen Xianglin, Zhang Yunxiao. 2018. Exploration and research progress of shale gas in China[J]. *China Geology*, 1: 257-272.
- Zhang Baomin, Cai Quansheng, Chen Xiaohong, Wang Chuanshang, Zhang Guotao, Chen Lin, Li Peijun, Li Yangui. 2021. Reservoir characteristics and gas-bearing capacity of the Wufeng-Longmaxi Formation in the Well Eyy2, east Huangling Uplift, western Hubei Province[J]. *Geology in China*, 48(5): 1485-1498(in Chinese with English abstract).
- Zhang Delong, Weng Wei, Jia Jun, Huang Yuwen, Feng Meigui. 2015. Well control techniques in hot dry rock drilling[J]. *Science & Technology Review*, 33(19): 45- 48(in Chinese with English abstract).
- Zhang Fu, Huang Yi, Lan Baofeng, Li Long, Liu Ting, Liu Rui, Jiang Dingchuan. 2021. Characteristics and controlling factors of shale reservoir in Wufeng Formation- Longmaxi Formation of the Zheng'an area[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 40(1): 49-56(in Chinese with English abstract).
- Zhang Hengchun, Wang Wenshi, Li Kuan, Wang Yuewei, Yan Jia, Cao Longlong, Hu Chen. 2021. Application of the KT178 core tool in Gonghe hot dry rock exploratory wells[J]. *Drilling Engineering*, 48 (2): 29-34(in Chinese with English abstract).
- Zhang Junfeng, Zhai Gangyi, Wang Daming, Bao Shujing, Chen Ke, Li Haohan, Songteng, Wang Peng, Zhou Zhi. 2020. Tectonic evolution of the Huangling dome and its control effect on shale gas preservation in the north margin of the Yangtze Block, South China[J]. *China Geology*, 3: 28-37.
- Zhang Wenhao, Gao Yongjin, Zhou Xingui, Zhai Gangyi, Xu Xingyou, Bai Zhongkai, Zhou Zhi, Bi Caiqin, Shan Yansheng, Han Miao, Sun Xiangcan, Zhang Yuanyin, Liu Weibin. 2021. The new prospecting and direction of nonprofit petroleum basic geological survey in China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 95(5): 1630- 1643 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Ziya, Zhang Cong, Shi Dishu, Qin Yinglun, Chen Rong, Kang Haixia. 2019. Important discovery of Devonian natural gas in Yunningdi 1 Well of Ninglang-Yanyuan area[J]. *Geology in China*, 46(2): 432-433 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Hongbo, Shan Wenjun, Zhu Disi, Yue Weimin, He Yuanxin. 2021. Advance of fractured formation lost circulation mechanism and lost circulation materials in oil and gas wells: A review [J].

- Oilfield Chemistry, 38(4): 740–746 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Hongbo, Zhu Disi, Huang Zheng, Wang Shengjian, He Yuanxin. 2020. Shale gas drilling technology in southern north China basin Bozhou—Fuyang[J]. Oil Drilling & Production Technology, 42(6): 679–683 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Liping, Wang Qian, Guo Zheng, Fang Chao, Cao Hu. 2020. Stability evaluation for wellbore in layered shale formation based on limited collapse width[J]. Science & Technology Review, 38(11): 122–130 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Wenzhi, Jia Ailin, Wei Yunsheng, Wang Junlei, Zhu Hanqing. 2020. Progress in shale gas exploration in China and prospects for future development[J]. China Petroleum Exploration, 25(1): 31–44 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Yuangang, Wu Lin, Shi Shaoyun, Qian Feng, Huang Shenghui, Huang Xiaolin. 2021. Innovation research and practice on the management mode for separate budget drilling projects in geological survey[J]. Drilling Engineering, 48(4): 54–59 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Hongjun, Zhou Daorong, Yin Qichun, Xiong Qiangqing, Wang Zhongpeng, Fang Chaogang, Teng Long, Shao Wei, Wang Yuanjun. 2020. New progress and breakthrough difficulties on shale gas geological survey in the lower Yangtze area[J]. Journal of Geomechanics, 26(6): 852–871 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Zhi, Bao Shujing, Chen Ke, Xu Qiufeng, Zhang Shousong, Wang Chao, Wang Peng. 2018. An important discovery of shale gas in Permian formation of Jianshi area, Hubei Province[J]. Geology in China, 45(6): 1304–1305 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Zhi, Li Shizhen, Chen Ke, Li Haohan, Li Fei, Xu Guihong. 2020. The discovery of shale gas in Silurian strata in Zigui, Hubei Province[J]. Geology in China, 47(3): 881–882 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Disi, Yue Weimin, Shan Wenjun, Zhao Hongbo, Weng Wei. 2020. Drilling technology for well Zhetongdi-1 for shale gas geological survey[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 47(9): 15–20 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Hengyin, Wang Qiang, Tian Bo, Wang Jiuquan. 2016a. Research and application of a combined large-diameter wireline drilling tool with a heavier pipe[J]. Geology and Exploration, 52(6): 1159–1166 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Hengyin, Wang Qiang, Zhang Zheng, Cai Zhengshui. 2016b. Application research on large diameter weighted combined wireline coring technology for shale gas exploration[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 43(10): 160–164 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Hengyin, Wang Qiang. 2013. A summary of exploration and development techniques of shale gas[J]. Geology of Anhui, 23(1): 21–25 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Yongyi, Wang Wenshi, Zhang Hengchun, Yan Jia, Cao Longlong, Xu Jie, Meng Qinghong, Tan Xiaoli. 2018. Implementation overview of Chinese Continental Scientific Drilling(CSCD) project and technical systems of core boring[J]. Acta Geologica Sinica, 92(10): 1971–1984 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Zhitong, Wu Xiaolong, Dong Xiangyu, Cao Longlong, He Guolei, Zhang Dejun. 2019. Large diameter coring technology for shale oil exploration in Songliao Basin[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 46(1): 45–50 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 白静, 徐兴友, 陈珊, 刘卫彬, 刘畅, 张昌盛. 2020. 松辽盆地长岭凹陷乾安地区青山口组一段沉积相特征与古环境恢复——以吉页油1井为例[J]. 中国地质, 47(1): 220–235.
- 曹龙, 张恒春, 王稳石, 闫家, 胡晨. 2021. 密闭取心钻头两相流流场CFD模拟研究[J]. 钻探工程, 48(11): 35–41.
- 陈相霖, 苑坤, 林拓, 金春爽, 康海霞. 2021. 四川岷紫罗裂陷槽西北缘(黔水地1井)发现上古生界海相页岩气[J]. 中国地质, 48(2): 661–662.
- 陈孝红, 王传尚, 刘安, 罗胜元, 李海, 危凯. 2017. 湖北宜昌地区寒武系水井沱组探获页岩气[J]. 中国地质, 44(1): 188–189.
- 陈孝红, 张保民, 张国涛, 陈林, 张森, 李培军. 2018. 湖北宜昌地区奥陶系五峰组—志留系龙马溪组页岩气高产工业气流[J]. 中国地质, 45(1): 199–200.
- 程万, 孙家应, 尹德战, 蒋国盛. 2021. 深层泥页岩井壁失稳机理与预测模型研究进展[J]. 钻探工程, 48(10): 21–28.
- 迟焕鹏, 胡志方, 王胜建, 李大勇, 苑坤, 郭军. 2021. 黔西地区表层易漏地层钻井工程技术[J]. 钻探工程, 48(4): 66–72.
- 丁涛. 2018. 页岩气调查井井控系统设计[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 樊腊生, 刘伟, 张统得, 邓伟, 陆俊泽. 2021. 四川沐川大口径地质调查井(川沐地2井)钻探施工技术[J]. 钻探工程, 48(12): 43–53.
- 冯美贵, 翁炜, 刘家荣, 李超, 蒋睿, 赵志涛, 刘文武, 欧阳志勇, 徐军军, 郭坤, 贺云超. 2020. 雄安新区地热D20井钻井液固控循环系统应用分析[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 47(4): 38–42, 60.
- 付小东, 陈娅娜, 罗冰, 李文正, 张建勇, 王小芳, 邱玉超, 吕学菊, 姚倩颖. 2021. 四川盆地北部中二叠统茅口组孤峰段优质烃源岩特征及其油气地质意义[J]. 地质学报, 95(6): 1903–1920.
- 傅丛, 丁华, 陈文敏. 2021. 我国长江经济带页岩气勘探开发布局与政策探析[J]. 煤质技术, 36(6): 13–21.
- 甘心. 2021. 钻井提速用振动冲击工具研究进展[J]. 钻探工程, 48(2): 85–93.
- 高德利. 2021. 非常规油气井工程技术若干研究进展[J]. 天然气工业, 41(8): 153–162.
- 高棚, 李昭, 李世臻, 周志, 魏思宇, 张宏达. 2021. 安徽阜阳地区皖阜地1井钻获海陆过渡相高品质烃源岩[J]. 中国地质, 48(5): 1659–1660.
- 高棚, 林拓, 苑坤, 金春爽, 陈相霖, 王文彬. 2022. 岷紫罗裂陷槽西北缘黔宁地1井钻获石炭系页岩气[J]. 中国地质, 49(4): 1348–

- 1349.
- 郭军, 陈相霖, 赵训林, 王文彬, 李岩, 韩菲. 2021. 桂中-南盘江地区黔水地1井钻井关键技术[J]. 断块油气田, 28(3): 423-427.
- 郭军, 王超技, 李岩, 苑坤, 王文彬. 2020. 跟管钻进在大口径页岩气井浅部复杂地层中的应用——以黔水地1井导管段为例[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 47(5): 22-26.
- 郝海洋, 宋继伟, 蒋国盛, 杜胜江, 李勇, 班金彭, 黄明勇, 畅利民. 2019. 南方页岩气基础地质调查黔普地1井钻井施工技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 46(8): 23-29.
- 侯婷, 宁学涛, 王斌, 吴柳根. 2015. 膨胀套管技术在钻井完井工程中的应用研究[J]. 中外能源, 20(6): 48-51.
- 侯子旭, 贾晓斌, 李双贵, 邓文良, 曾德智. 2013. 玉北地区深部地层扭力冲击器提速工艺[J]. 石油钻采工艺, 35(5): 132-136.
- 黄晟辉, 奎中, 吴金生, 赵元刚, 房昕. 2019. 湘永地1井钻进施工及事故处理技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 46(2): 23-29.
- 李浩涵, 杜江, 陈科, 李飞, 宋腾, 王鹏. 2020. 湖北五峰地区发现二叠系页岩气[J]. 中国地质, 47(6): 1932-1933.
- 李娟, 王玉芳, 翟刚毅, 张家政. 2021. 陕西南郑地区第一口参数井钻获牛蹄塘组页岩气[J]. 中国地质, 48(1): 337-338.
- 李小洋, 李宽, 张永勤, 梁健, 吴纪修, 王志刚. 2019. 新型涡轮扭力冲击器的试验研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 46(12): 40-43, 49.
- 李岩, 郭军, 王文彬. 2021. 滇东地区页岩气调查云宣地1井钻探施工难点及对策[J]. 钻探工程, 48(8): 12-18.
- 廖圣兵, 石刚, 李建青, 郑红军, 周道容, 王存智, 黄宁. 2021. 安徽望江地区WWD1井钻遇二叠系孤峰组页岩气[J]. 中国地质, 48(5): 1657-1658.
- 刘兵, 朱恒银, 蔡正水, 王强, 芦文成. 2020. 宁国凹陷复杂工况关键钻井工艺[J]. 科学技术与工程, 20(22): 8943-8947.
- 刘笑傲, 邹德永, 陈修平. 2017. 强研磨性硬地层聚晶金刚石复合片孕镶块混合钻头优化设计试验[J]. 科学技术与工程, 17(29): 220-226.
- 刘协鲁, 阮海龙, 赵义, 蔡家品, 陈云龙, 梁涛, 李春, 刘海龙, 邓都都. 2021. 海域天然气水合物保温保压取样钻具研究与应用进展[J]. 钻探工程, 48(7): 33-39.
- 刘治. 2017. 小口径岩心钻探技术在页岩气地质调查井中的应用分析[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 44(9): 32-37.
- 庞飞, 张作衡, 张君峰, 陈科, 石砥石, 包书景, 李世臻, 郭天旭. 2020. 长江经济带页岩气勘探开发进展及建议[J]. 地球科学, 45(6): 2152-2159.
- 彭黎璨, 李奋强, 吴聪, 韦又林. 2013. 页岩气参数井小井眼钻井技术——以常页1井为例[J]. 中国煤炭地质, 25(11): 55-58.
- 彭奋飞, 王佳亮, 万步炎, 黄筱军, 唐永辉, 彭德平. 2021. 适用于海底钻机的保压绳索取心钻具设计[J]. 钻探工程, 48(4): 97-103.
- 齐列锋. 2016. 新型液压式扭力冲击器设计与动力仿真[D]. 荆州: 长江大学.
- 覃英伦, 张家政, 王玉芳, 康海霞, 李娟, 张子亚, 薛宗安, 张云泉. 2021. 广西桂中拗陷(桂融页1井)石炭系鹿寨组页岩气重要发现[J]. 中国地质, 48(2): 667-668.
- 单文军, 段晓青, 任福建, 张伟华, 岳伟民, 李艳宁. 2016a. 甘肃武威盆地页岩气“武页1井”成膜低固相冲洗液的应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 43(7): 111-115.
- 单文军, 蒋睿, 陶士先, 岳伟民, 李艳宁. 2016b. 页岩气钻探冲洗液体系的研究与应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 43(10): 176-181.
- 石刚, 李建青, 廖圣兵, 吴通, 黄宁, 方朝刚, 黄正清, 邵威, 叶隼, 蔡小虎, 张强. 2021. 安徽宣城地区皖油地1井钻获二叠系页岩气[J]. 中国地质, 48(2): 669-670.
- 宋腾, 陈科, 包书景, 郭天旭, 雷玉雪, 王亿, 孟凡洋, 王鹏. 2018. 鄂西北神农架背斜北翼(鄂红地1井)五峰-龙马溪组钻获页岩气显示[J]. 中国地质, 45(1): 195-196.
- 苏舟, 张绍和, 王文彬, 曹函, 刘磊磊, 肖金成, 何红生, 郭军. 2021. 黔水地1井钻探施工技术难点及对策[J]. 钻探工程, 48(5): 54-59.
- 滕龙, 方朝刚, 郑红军, 翟刚毅, 李建青, 黄正清, 王敬东, 张号, 吕星. 2019. 萍乐拗陷中部(赣丰地1井)二叠系乐平组获“三气”发现[J]. 中国地质, 46(1): 203-204.
- 王滨, 李军, 邹德永, 杨宏伟, 黄涛. 2018a. 强研磨性硬岩PDC钻头磨损机理及磨损分布规律研究[J]. 特种油气藏, 25(4): 149-153.
- 王滨, 李军, 邹德永, 杨宏伟, 王凯. 2018b. 适合强研磨性硬地层PDC-金刚石孕镶块混合钻头设计与应用[J]. 特种油气藏, 25(1): 169-174.
- 王红希. 2018. 旋冲式扭力冲击器结构设计及参数优化研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东).
- 王杰. 2015. 钻井用双作用扭力冲击器设计计算与仿真[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 吴柳根, 宁学涛, 唐明. 2013. 等井径膨胀套管技术应急应用研究[J]. 钻采工艺, 36(6): 1-4.
- 伍晓龙, 朱芝同, 董向宇, 李文秀. 2019. 小口径油气地质调查井的问题与工程实践[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 46(11): 27-32.
- 熊虎林, 张飞, 甘辉敏, 徐龙生. 2019. 页岩气调查泉参1井大口径同径取心钻进工艺[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 46(6): 19-25.
- 徐云龙, 王锐, 王文斐, 刘建刚. 2014. TP131HCH超深五段制侧钻水平井优快钻井技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 41(10): 22-25.
- 杨顺辉, 武好杰, 牛成成, 侯绪田, 金军斌. 2014. 特种孕镶块加强PDC钻头的研制与实验[J]. 石油钻探技术, 42(6): 111-114.
- 杨现禹, 蔡记华, 蒋国盛, 石彦平, 陈书雅, 魏朝晖, 谢章建. 2021. 维持页岩井壁稳定的物理封堵模拟和化学抑制实验研究[J]. 钻探工程, 48(4): 37-46.
- 于金平, 邹德永, 刘笑傲. 2020. 适合强研磨性硬地层的新型混合钻头设计及现场应用[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 40(3): 67-71.
- 苑坤, 王超, 覃英伦, 于抒放, 陈榕, 石砥石, 包书景, 林拓, 周志. 2017. 黔南地区(黔紫页1井)发现上古生界海相页岩气[J]. 中国地质, 44(6): 1253-1254.
- 翟刚毅, 包书景, 庞飞, 任收麦, 陈科, 王玉芳, 周志, 王胜建. 2017. 贵州遵义地区安场向斜“四层楼”页岩油气成藏模式研究[J]. 中国地质, 44(1): 1-12.
- 张保民, 蔡全升, 陈孝红, 王传尚, 张国涛, 陈林, 李培军, 李炎桂. 2021. 鄂西黄陵隆起东缘鄂宜页2井五峰组-龙马溪组页岩气储层特征与含气性[J]. 中国地质, 48(5): 1485-1498.
- 张德龙, 翁炜, 贾军, 黄玉文, 冯美贵. 2015. 干热岩钻探井控技术研究

- 究[J]. 科技导报, 33(19): 45-48.
- 张福, 黄艺, 蓝宝峰, 李龙, 刘婷, 刘睿, 江定川. 2021. 正安地区五峰组—龙马溪组页岩储层特征及控制因素[J]. 地质科技通报, 40(1): 49-56.
- 张恒春, 王稳石, 李宽, 王跃伟, 闫家, 曹龙龙, 胡晨. 2021. KT178型取心钻具在共和干热岩钻井中的应用[J]. 钻探工程, 48(2): 29-34.
- 张文浩, 高永进, 周新桂, 翟刚毅, 徐兴友, 白忠凯, 周志, 毕彩芹, 单衍胜, 韩森, 孙相灿, 张远银, 刘卫彬. 2021. 公益性油气基础地质调查的进展与发展方向[J]. 地质学报, 95(5): 1630-1643.
- 张子亚, 张聪, 石砥石, 覃英伦, 陈榕, 康海霞. 2019. 宁蒗—盐源地区(云宁地1井)泥盆系获天然气重大发现[J]. 中国地质, 46(2): 432-433.
- 赵洪波, 单文军, 朱迪斯, 岳伟民, 何远信. 2021. 裂缝性地层漏失机理及堵漏材料新进展[J]. 油田化学, 38(4): 740-746.
- 赵洪波, 朱迪斯, 黄正, 王胜建, 何远信. 2020. 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, 42(6): 679-683.
- 赵莉萍, 王倩, 郭正, 房超, 曹虎. 2020. 基于有限坍塌宽度的层理性泥页岩地层井壁稳定性评价[J]. 科技导报, 38(11): 122-130.
- 赵文智, 贾爱林, 位云生, 王军磊, 朱汉卿. 2020. 中国页岩气勘探开发进展及发展展望[J]. 中国石油勘探, 25(1): 31-44.
- 赵远刚, 吴琳, 石绍云, 钱锋, 黄晟辉, 黄晓林. 2021. 地质调查预算分列钻探项目管理模式创新研究与实践[J]. 钻探工程, 48(4): 54-59.
- 郑红军, 周道容, 殷启春, 熊强青, 王中鹏, 方朝刚, 滕龙, 邵威, 王元俊. 2020. 下扬子页岩气地质调查新进展及突破难点思考[J]. 地质力学学报, 26(6): 852-871.
- 周志, 包书景, 陈科, 徐秋枫, 张守松, 王超, 王鹏. 2018. 湖北建始地区二叠系鄂建业1井钻获页岩气[J]. 中国地质, 45(6): 1304-1305.
- 周志, 李世臻, 陈科, 李浩涵, 李飞, 徐桂红. 2020. 湖北秭归地区发现志留系页岩气[J]. 中国地质, 47(3): 881-882.
- 朱迪斯, 岳伟民, 单文军, 赵洪波, 翁炜. 2020. 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), 47(9): 15-20.
- 朱恒银, 王强, 田波, 王久全. 2016a. 大直径加重管组合绳索取心钻具研究与应用[J]. 地质与勘探, 52(6): 1159-1166.
- 朱恒银, 王强, 张正, 蔡正水. 2016b. 大直径加重管绳索取心技术在页岩气勘探中的应用研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 43(10): 160-164.
- 朱恒银, 王强. 2013. 页岩气勘探开发技术综述[J]. 安徽地质, 23(1): 21-25.
- 朱永宜, 王稳石, 张恒春, 闫家, 曹龙龙, 许洁, 孟庆鸿, 谈晓丽. 2018. 我国大陆科学钻探工程实施概况及其取心钻进技术体系[J]. 地质学报, 92(10): 1971-1984.
- 朱芝同, 伍晓龙, 董向宇, 曹龙龙, 和国磊, 张德军. 2019. 松辽盆地页岩油勘探大口径取心技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 46(1): 45-50.