

◀专家视点▶

doi:10.11911/syztjs.2022092

引用格式: 何立成, 唐波. 准噶尔盆地超深井钻井技术现状与发展建议 [J]. 石油钻探技术, 2022, 50(5): 1-8.

HE Licheng, TANG Bo. The up to date technologies of ultra-deep well drilling in Junggar basin and suggestions for further improvements [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2022, 50(5): 1-8.

准噶尔盆地超深井钻井技术现状与发展建议

何立成^{1,3}, 唐 波^{2,3}

(1. 中石化胜利石油工程有限公司, 山东东营 257000; 2. 中石化胜利石油工程有限公司钻井工艺研究院, 山东东营 257017; 3. 中国石化超深井钻井工程重点实验室, 山东东营 257017)

摘 要: 准噶尔盆地深层超深层已成为油气资源勘探开发的重要接替阵地, 随着钻探深度增加, 地质条件越来越复杂, 钻井技术难度越来越大。结合准噶尔盆地超深井钻井技术进展, 根据该盆地地质构造特点、压力体系分布和地层岩性特征, 剖析了造成井漏、溢流、井壁坍塌、机械钻速低的主要原因, 梳理了近年来在井身结构优化、控压钻井、井壁稳定和钻井提速等方面取得的技术进步, 分析了准噶尔盆地 39 口超深井的钻井情况和存在的不足, 提出了提升钻井地质环境描述能力、丰富井筒强化手段和深化高效破岩技术等发展建议, 以期对准噶尔盆地超深井钻井技术发展起到推动作用。

关键词: 超深井; 控压钻井; 井身结构; 井壁稳定; 准噶尔盆地

中图分类号: TE245

文献标志码: A

文章编号: 1001-0890(2022)05-0001-08

The up to Date Technologies of Ultra-Deep Well Drilling in Junggar Basin and Suggestions for Further Improvements

HE Licheng^{1,3}, TANG Bo^{2,3}

(1. Sinopec Shengli Oilfield Service Corporation, Dongying, Shandong, 257000, China; 2. Drilling Technology Research Institute of Sinopec Shengli Oilfield Service Corporation, Dongying, Shandong, 257017, China; 3. Sinopec Key Laboratory of Ultra-Deep Well Drilling Engineering, Dongying, Shandong, 257017, China)

Abstract: Deep and ultra-deep oil and gas resources have become a new critical area of the exploration and development of oil and gas resources in Junggar Basin. With the increase of drilling depth, the geological conditions of the formation become more and more complex. As a result, the challenges of drilling safely and efficiently are growing. Based on the progress of deep and ultra-deep well drilling technologies in Junggar Basin, the main causes of lost circulation, kick, borehole collapse, and low rate of penetration (ROP) were analyzed, considering the characteristics of the basin geological structure, pressure system distribution, and formation lithology. Furthermore, the technical advances in casing program optimization, managed pressure drilling, wellbore stability, ROP enhancement and other aspects in recent years were summarized. Meanwhile, the drilling situation of 39 ultra-deep wells in Junggar Basin and the existing technical shortcomings were analyzed. Based on the above analysis results, some suggestions to enhance the ability to describe drilling geological environment, enrich wellbore strengthening technologies, and deepen efficient rock breaking technologies were put forward. The research results could promote the development of ultra-deep well drilling technologies in Junggar Basin.

Key words: ultra-deep well; managed pressure drilling; casing program; wellbore stability; Junggar Basin

我国超深层油气资源勘探开发进程加快, 如塔里木盆地、四川盆地的钻探深度已达 8 500~9 000 m, 并实现了超深油气藏的有效开发^[1-2]。其中, 准噶尔盆地超深层油气资源仍处于勘探开发初期, 其主要

收稿日期: 2022-03-22; 改回日期: 2022-08-25。

作者简介: 何立成 (1972—), 男, 云南大理人, 1996 年毕业于石油大学 (华东) 钻井工程专业, 高级工程师, 主要从事石油工程技术研究与相关管理工作。E-mail: helicheng.oss@sinocor.com。

基金项目: 中国石化科技攻关项目“准噶尔盆地钻井提速提效关键技术研究” (编号: P21076-6)、“准中起深层高效钻井关键技术研究” (编号: P22130) 资助。

原因在于,受海西、印支、燕山、喜马拉雅运动对盆地构造的改造,深部地层具有压力体系复杂、地应力复杂和岩性复杂等特点,钻井过程中存在“漏、溢、塌、卡、慢”等问题,导致钻井周期长、成本高。随着第一口日产千吨油井(GT1井)诞生和莫南凸起的初步动用,近年来加大了准噶尔盆地超深层油气资源的勘探开发力度,使超深井钻井技术取得了长足进步,但井下复杂情况时有发生、深部地层机械钻速仍然较低,仍是制约其超深层油气资源高效开发的主要因素。针对该问题,笔者分析了准噶尔盆地39口超深井(井深超6 000 m)的钻探情况,剖析了钻井存在的主要技术难点及原因,总结了钻井的成功经验及存在的不足,提出了准噶尔盆地超深井钻井技术发展建议。

1 超深井钻井主要技术难点

准噶尔盆地面积 $13\times 10^4\text{ km}^2$,油气资源量超过 $100\times 10^8\text{ t}^{[3-4]}$ 。该盆地自上而下依次钻遇第四系(西域组)、新近系(独山子组、塔西河组、沙湾组)、古近系(安集海河组、紫泥泉组)、白垩系(东沟组、连木沁组、胜金口组、呼图壁组、清水河组)、侏罗系(齐古组、头屯河组、西山窑组、三工河组、八道湾组)、三叠系(白碱滩组、克拉玛依组、百口泉组)、二叠系(上乌尔禾组、下乌尔禾组、夏子街组、风城组、佳木河组)、石炭系。受盆地构造变化大、超深层油气物源差异大等因素的影响,超深井钻井井下复杂和机械钻速低的原因也不尽相同。

1.1 易发生井漏和溢流

在准噶尔盆地超深井钻探过程中,受地层、压力、断层等不确定性因素的影响,易发生井漏和溢流。例如,MS1井钻至百口泉组以后,发生20次井漏,共漏失钻井液 $1\,711.10\text{ m}^3$,主要漏失层位为上乌尔禾组、下乌尔禾组及石炭系;Z10井钻至百口泉组后发生2次溢流,压井后逐步提高钻井液密度,导致发生井漏,共漏失钻井液 $1\,084.77\text{ m}^3$ 。

含油气盆地泥页岩形成异常高压,主要有不平衡压实、流体膨胀、超压传递、构造挤压和成岩作用等5种原因^[5-7]。渗透性砂岩超压流体的形成机制极为复杂,包括自源超压、邻源超压和他源超压^[8]。准噶尔盆地油藏类型多,这些形成异常高压的机制均有可能,但不同区块形成异常高压的表现不尽相同。该盆地腹部白垩系中部以浅地层为正常压力系数地层,此后压力系数开始升高,进入侏罗系后压

力系数迅速升高,三叠系的地层压力系数达到最高,从二叠系开始地层压力系数逐渐降低,石炭系地层压力系数进一步降低。例如,沙湾凹陷Z10井侏罗系三工河组下部和八道湾组为压力过渡带,压力系数由1.35升至1.78,三叠系白碱滩组和百口泉组压力系数达到2.00~2.08,二叠系乌尔禾组压力系数为1.61~1.82。准噶尔盆地南缘新近系为常压地层,压力系数主要集中在1.15~1.35,古近系压力系数为1.60~1.80,白垩系底部和侏罗系地层压力系数为1.80~2.30^[9-10]。

1.2 井眼失稳问题突出

钻井过程中发生井眼失稳,表现为掉块、遇阻、卡钻、电测卡阻等现象,根据统计,此类复杂情况占到井下复杂情况的近70%。引起井眼失稳的主要原因有3种:泥页岩水化膨胀、应力坍塌和破碎性地层掉块。通常钻遇多种因素共同作用的地层,保持井壁稳定更加困难。

1.2.1 泥页岩水化膨胀

白垩系清水河组黏土矿物含量在10%左右,其中,伊利石含量30%~40%,伊/蒙混层含量30%左右。侏罗系头屯河组黏土矿物总含量在25%左右,黏土矿物中,高岭石和绿泥石含量低,伊利石含量在20%左右,伊/蒙混层含量高(达到60%~70%),蒙脱石以间层黏土矿物伴生形式存在。由于伊/蒙混层是伊利石与蒙脱石叠置而成,伊利石和蒙脱石的水化膨胀特征、膨胀压力不同,层间受力不均,致剥落坍塌^[11-13]。如D3井清水河组和头屯河组井段的井径扩大率达20%左右,全井共发生井下复杂情况25次,与井眼失稳相关的复杂情况17次。

1.2.2 应力型坍塌

由于准噶尔盆地普遍存在异常高压地层,而且盆地构造复杂,构造应力大,两者相互作用,造成地层应力大、且主应力差异大,成井以后井周剪切应力增大,易发生应力型坍塌。准噶尔盆地的演化分为碰撞-成盆阶段、压陷-挠曲阶段、挠曲-拗陷阶段、拗陷-沉降阶段和再生前陆盆地等5个阶段,其中压陷-挠曲作用为盆地演化提供了重要动力^[14],断层发育、构造应力复杂。盆地腹部压扭断层“双重复杂”发育特征,呈多个组系、多种组合样式展布。燕山期压扭应力场强度及基底岩层抗剪切强度联合控制了侏罗系断裂体系发育状况,导致在强压扭变形过程中压扭断裂带的贯穿方式不同,盆地从南向北及盆地腹部发生了明显左旋,最大主应力方向为北北东向^[15]。准噶尔盆地南缘在东西方向分

段,包括东段(阜康断裂带)、中段(山前冲断带)与西段(四棵树凹陷);在南北方向分排,包括第一排(齐古断褶带)、第二排(霍玛吐背斜带)和第三排(呼图壁—安集河—西湖背斜带);整体上以挤压变形为主,发育典型的与断层相关的褶皱构造,包括断冲褶皱、断展褶皱、滑脱褶皱、断弯褶皱和断束褶皱^[16]。这些褶皱造成构造应力大,如侏罗系齐古组喜马拉雅晚期,南缘中段最大主应力自东向西依次为60~150, 90~180和180~240 MPa,明显逐步增大,南缘西部四棵树凹陷的最大主应力基本在120~240 MPa^[17]。

1.2.3 破碎性地层掉块

准噶尔盆地南缘冲积扇第四系西域组、新近系独山子组、塔西河组存在疏松砂砾岩,地层胶结性不强,大块砾石易掉落。例如,T1井第四系的厚度为676 m,全为砾岩夹含砾粗砂岩,新近系独山子组的厚度为1 963 m,其中砂、砾岩层最大厚度38 m,一般为2~5 m,累计厚度690 m,占地层总厚度的35.2%;GQ6井第四系的厚度达到2 824 m,岩性为含砾泥质细砂岩、含砾细砂岩、砾岩、砂砾岩。同时,受多期构造运动的影响,准噶尔盆地形成了近10个不整合间断面^[18],钻进时易出现坍塌掉块,例如,2010年以前莫南凸起钻探了7口井,白垩系清水河组底部不整合面发生处卡钻、划眼15次,占井下复杂情况的50%;MS1井钻遇二叠系与石炭系不整合面后,地层裂缝较为发育,缝宽主要在1~2 mm,裂缝密度10~20条/10cm,钻井过程中发生了井漏、掉块卡钻等井下复杂情况,处理复杂情况用时485 h。

1.3 机械钻速低

准噶尔盆地腹部深部地层平均机械钻速仅2 m/h左右,南缘深部地层平均机械钻速仅约1 m/h,造成机械钻速低的主要原因是钻遇复杂岩性地层、高压地层和不稳定地层。

1.3.1 复杂岩性地层

准噶尔盆地复杂岩性地层主要有2种:1)钻遇岩石可钻性级值高(>8)的地层,钻头在这类地层的吃入能力受限,如西山窑组的灰色细砂岩、白碱滩组灰色砂质泥岩、乌尔禾组深灰色砂质泥岩、风城组深灰色白云质泥岩、佳木河组与石炭系的火成岩等;2)钻遇岩石研磨性较高的地层^[19],这类地层易使钻头、钻具先期磨损,如齐古组褐红色细砂岩、三工河组灰黄色细砂岩和石炭系火成岩等。

1.3.2 高压地层

当钻遇地层压力系数高的地层时,为平衡地层

压力,钻井液密度相应较高,钻进过程就是在高围压条件下破碎岩石。不同围压条件下的岩石可钻性测试结果表明:随着围压增大,可钻性级值增大。分析认为,这与围压条件下岩石抗压强度增大、塑性增强等因素相关,例如,齐古组含长石岩屑细砂岩样无围压条件下的可钻性级值为6.99,围压30 MPa条件下的可钻性级值为8.93,60 MPa条件下的可钻性级值达到9.65。

1.3.3 不稳定地层

准噶尔盆地会钻遇大段砾石层、裂缝发育地层和高应力地层,这些地层易坍塌掉块,钻进过程中扭矩变化大,蹩跳钻严重,易诱发钻具疲劳破坏和钻头先期损坏,常采用小钻压、低转速进行钻进,导致机械钻速低。钻遇倾角较大地层时,常采用轻压吊打、钟摆钻具组合、预弯曲钻具组合和单弯动力钻具组合进行防斜,但这些防斜方法都会对机械钻速产生一定影响。例如,四棵树凹陷高泉背斜第四系地层倾角为5°~20°,新近系地层倾角为15°~35°,古近系、白垩系地层倾角为5°~20°,侏罗系地层倾角10°~30°,钻井过程中井斜角明显增大,G101井和G102井的最大井斜角均大于10°,为了控制井斜有时需牺牲机械钻速。

2 超深井钻井技术发展现状

自2004年钻成J1井(井深7 000 m)以来,准噶尔盆地共钻成39口井深超过6 000 m的超深井。从完钻层位看,白垩系有2口井,侏罗系有28口井,二叠系有4口井,石炭系有5口井。受不同区块埋深差异大的影响,超深井钻探目的层从白垩系到石炭系均有。从分布位置看,准噶尔盆地腹部26口井,南缘12口井,北部1口井,西部多于东部,南部多于北部,这主要源自盆地油气埋深呈“西深东浅、南深北浅”的特征。因此,不同区块超深井钻井差异较大,通过井身结构优化、压力控制、井壁稳定、钻井提速等技术持续迭代与提升,准噶尔盆地超深井钻井效率得到了显著提升。

2.1 超深井钻井技术发展阶段

准噶尔盆地超深井钻井可分为超深层钻探初期、超深层钻探拓展阶段和超深层钻探快速发展阶段等3个阶段。

超深层钻探初期(2004—2010年),以钻探准噶尔盆地腹部超深层油气资源为主。钻井过程中井漏、井塌和卡阻等井下复杂情况频发,逐步认识到

超深层压力体系和地层岩性的复杂性,通过优化井身结构、钻井液封堵抑制性和采取技术措施,钻成了12口超深井,平均完钻井深6 459.25 m,平均钻井周期348.02 d,平均机械钻速2.25 m/h。

超深层钻探拓展阶段(2011—2019年),以钻探准噶尔盆地南缘超深层油气为主。通过探索应用高效钻头、提速辅助工具、垂直钻井、控压钻井和合成基钻井液等技术,有效提高了钻井效率,期间共钻7口井,平均完钻井深6 582.46 m,平均钻井周期242.20 d,平均机械钻速3.23 m/h。

超深层钻探快速发展阶段(2020年以后),在准噶尔盆地腹部和南缘均扩大了钻探范围。在前期钻井经验的基础上,通过井身结构、精细控压、井壁稳定及提速工具等技术迭代,钻井效率进一步提升,共钻成20口超深井,平均完钻井深6 690.95 m,平均钻井周期189.06 d,平均机械钻速3.56 m/h。

2.2 超深井钻井关键技术

2.2.1 井身结构优化

随着准噶尔盆地内超深井钻井越来越多,对地层地质特征、压力体系、断层认识程度逐步加深,也形成了不同区块、不同目的层的井身结构方案。

准噶尔盆地腹部,若以侏罗系为目的层,采用三开井身结构:导眼采用 $\phi 606.4$ mm钻头钻至井深50 m;一开采用 $\phi 444.5$ mm钻头钻至井深800 m;二开采用 $\phi 311.1$ mm钻头钻至井深4 700 m;三开采用 $\phi 215.9$ mm钻头钻至井深6 000 m左右。一开封隔新近系松散地层,二开封隔胜金口组并封隔上部承压能力低的地层,三开为高压地层井段,莫南凸起常采用该井身结构。若以二叠系为目的层,采用四开井身结构:一开采用 $\phi 606.4$ mm钻头钻至井深500 m;二开采用 $\phi 444.5$ mm钻头钻至井深3 650 m;三开采用 $\phi 311.1$ mm钻头钻至井深6 100 m;四开采用 $\phi 215.9$ mm钻头钻至井深7 800 m左右。一开封隔新近系上部松散地层,二开封隔侏罗系西山窑组以上承压能力较低的地层,三开封隔百口泉组,为钻进侏罗系八道湾组至三叠系异常高压地层提供保障,四开封至目的井深。为应对三叠系、二叠系的不可预测性,该井身结构预留了一层套管,东道海子凹陷常采用该井身井构。

准噶尔盆地南缘西段采用四开井身结构:一开采用 $\phi 606.4$ mm钻头钻至井深450 m;二开采用 $\phi 444.5$ mm钻头钻至井深3 650 m;三开采用 $\phi 311.1$ mm钻头钻至井深6 200 m;四开采用 $\phi 215.9$ mm钻头钻至井深6 800 m左右。一开封隔新近系上部松散地

层,二开封隔存在巨厚砾石层的塔西河组,三开封隔古近系紫泥泉组和低压地层,四开封至目的井深(高压井段),四棵树凹陷高泉背斜常采用该井身结构。南缘中段压力体系更加复杂,采用非常规井身结构:导眼采用 $\phi 762.0$ mm钻头钻至井深200 m;一开采用 $\phi 571.5$ mm钻头钻至井深2 600 m;二开采用 $\phi 431.8$ mm钻头钻至井深4 000 m;三开采用 $\phi 333.4$ mm钻头钻至井深5 600 m;四开采用 $\phi 241.3$ mm(扩眼至 $\phi 260.0$ mm)钻头钻至井深7 200 m;五开采用 $\phi 190.5$ mm钻头钻至井深8 100 m左右。一开封隔地表松散地层,二开封隔独山子组和沙湾组低压地层,三开封隔古近系和东沟组中上部高压地层,四开封隔东沟组低承压地层,以及连木沁组和胜金口组断层,五开封隔白垩系高压地层,为六开安全钻进侏罗系提供保障,霍玛吐构造常采用该井身结构。

但随着钻井深度进一步加大,钻遇地层的构造、压力体系等更加复杂,需进一步考虑钻井的安全性、高效性和经济性优化井身结构。

2.2.2 控压钻井技术

控压钻井是一种在整个井眼内精确控制环空压力剖面的自适应钻井过程,目前国内控压技术已较为成熟,可以实现对套压、立压和流量的自动控制,压力控制精度可达 ± 0.20 MPa,溢流、漏失量的控制精度可达 ± 0.50 m³[20]。控压钻井技术在准噶尔盆地超深井钻井中得到了较为广泛的应用,提高了复杂压力井段的钻井效率,同时也在一定程度上降低了钻井液密度,为发现和保护油气层提供了有效的技术手段。

GQ6井是部署在准噶尔盆地南缘四棵树凹陷高泉背斜的一口预探井,钻探目的层为白垩系清水河组和侏罗系头屯河组,一开采用 $\phi 660.4$ mm钻头钻至井深461 m,二开采用 $\phi 444.5$ mm钻头钻至井深3 657 m,三开采用 $\phi 311.1$ mm钻头钻至井深6 180 m,四开采用 $\phi 215.9$ mm钻头钻至设计井深。四开使用密度2.22 kg/L的钻井液钻至井深6 533 m(清水河组)时,循环排量超过20 L/s即发生渗漏,控压起钻关井,关井时的套压3.72 MPa,安全密度窗口窄,采用精细控压装备,实施自动控压条件下的加重、循环、堵漏、起下钻,及时控制好井底压力平衡,没有发生严重漏失和溢流,相比邻井GQ5井(未采用控压钻井,处理井漏和溢流损失钻井时间737 h),钻井效率明显提高。

但是,控压钻井过程中井筒内压力实时测量与

自动控制仍不完善, 还需进一步探索新工艺, 以提高井筒压力控制能力。

2.2.3 井壁稳定技术

目前, 准噶尔盆地超深井钻井时采用的井壁稳定技术主要包括裂缝性地层井壁稳定评价技术、合成基钻井液技术、氯化钾-有机盐封堵防塌钻井液技术等。

裂缝性地层井壁稳定评价技术。不同地质环境下, 井壁稳定性评价方法也不尽相同^[21-23], 根据准噶尔盆地压力系数高、地应力大和微裂缝发育的特点, 可采用裂缝性地层井壁稳定评价方法。该方法以岩石力学和统一强度理论为基础^[24], 建立了井壁稳定性综合评价指标——井壁稳定系数 ζ ^[25], 该指标包含张拉破坏稳定系数 ζ_t 和剪破坏稳定系数 ζ_v , 能够明确发生井壁破坏的类型。在此基础上, 利用声波、岩石密度和电阻率等测井资料, 分析地层裂纹存在的概率 K_V ^[26], 并依据考虑裂缝的井壁坍塌压力模型计算坍塌压力^[27]。利用该井壁稳定分析技术, 可以分析微裂系地层、破碎带地层的坍塌压力, 为保持井壁稳定提供理论支撑。

合成基钻井液技术。合成基钻井液具有抑制性强、润滑性好、抗污染能力强、热稳定性好、生物毒性小和低温流变性变化小等特点^[28-29], 能有效保持泥页岩地层井壁稳定。其典型配方为合成基液+2.5%~3.5%有机土+2.0%乳化剂+1.0%辅乳化剂+0~2.0%润湿剂+0.5%~1.0%流性调节剂+3.0%~6.0%降滤失剂+0~5.0%氯化钙水溶液+1.0%~3.0%超细碳酸钙+3.0%~5.0%封堵材料, 主要性能: 高温稳定性>200℃, API滤失量≤2 mL, 高温高压滤失量≤5 mL, $EC_{50/96h}>7.0\times 10^4$ mg/L, 破乳电压>600 V, 页岩回收率达到98.2%, 渗透率恢复率>90%, 摩擦系数>0.05。目前, 准噶尔盆地腹部的23口井钻进白垩系底部、侏罗系、三叠系和二叠系时使用了合成基钻井液, 这些层位井段的平均井径扩大率3%~7%, 遇阻、划眼较前期减少50%以上, 有效保障了井壁稳定。

氯化钾-有机盐封堵防塌钻井液技术。氯化钾-有机盐封堵防塌钻井液体系是一种低活度封堵防塌钻井液体系, 具有良好的抑制性、固壁性、屏蔽封堵性, 能保证微裂缝泥页岩地层井壁稳定^[30]。根据准噶尔盆地腹地深层的特点, 确定了氯化钾-有机盐封堵防塌钻井液的配方: 4.0%~6.0%膨润土+0.3%~0.5%聚丙烯酸钾+3.0%~5.0%氯化钾+6.0%~8.0%甲酸钾+0.5%~1.0%胺基聚醇+2.0%~

3.0%低荧光沥青粉+3.0%~4.0%井壁稳定剂+2.0%~3.0%超细碳酸钙-1+2.0%~3.0%超细碳酸钙-2+2.0%~3.0%抗高温抗盐防塌降滤失剂+3.0%~4.0%磺甲基酚醛树脂 SMP-2+0.5%~1.0%有机硅稳定剂+1.0%聚合醇, 主要性能为: 高温稳定性>180℃, 活度能0.85~0.90, 页岩回收率90.56%, 线性膨胀率≤11.8%, 高温高压滤失量≤10 mL。C6井和S15井钻进三叠系、二叠系时使用了该钻井液体系, 未出现井眼失稳问题。

该钻井液体系的不足是, 随着钻井深度增加, 井筒温度升高, 其在高温条件下的稳定性、封堵性和抑制性均有所下降, 这有待进一步研究、提高。

2.2.4 钻井提速技术

准噶尔盆地超深井钻井提速, 有赖于高效钻头、垂直钻井技术和等壁厚螺杆钻具等^[31-32]。

2.2.4.1 高效钻头

准噶尔盆地第四系和新近系普遍存在巨厚砾石层, PDC钻头切削齿易受冲击损坏, 造成快速磨损; 牙轮钻头可以承受较大的冲击, 但使用寿命受限; 混合钻头具备PDC钻头的切削作用, 也具备牙轮钻头冲击破碎地层的作用, 能提高钻速、延长钻头使用寿命。该盆地南缘的GQ6井应用了4只混合钻头, 创造了该区域独山子组、塔西河组巨厚砾石层单趟进尺最大纪录(509 m)和机械钻速最高纪录(5.23 m/h)。

古近系—白垩系顶部地层以棕红色、紫褐色、灰绿色条带泥岩, 砂质泥岩, 与灰绿色砂岩、粉砂岩互层为主。其中, 褐色泥岩压实度高, 钻头切削齿难以吃入地层。设计PDC钻头时, 采用高性能平齿与屋脊齿, 中低密度混合布齿(16.0或19.0 mm), 以增加钻头的攻击性。该类钻头在莫南凸起古近系—白垩系顶部应用后, 单趟钻进尺最大可达3 602 m, 单趟钻机械钻速最高达到24.83 m/h。

白垩系底部—侏罗系地层以红色泥岩、细砂岩、深灰色泥岩与浅灰色粉砂岩互为主, 地层研磨性较强, 钻头磨损严重甚至报废, 且局部含砾较高, 易崩齿失效。因此, 设计PDC钻头时, 应兼顾钻头的攻击性和耐磨性能, 肩部前排采用高性能平齿、尖齿和屋脊齿, 以中低密度混合布齿(16.0 mm), 后排布2颗平齿, 以提高钻头的抗研磨性。应用该类钻头钻进莫南凸起白垩系底部—侏罗系地层时, 单趟钻进尺最大达788 m, 单趟钻机械钻速最高达到5.17 m/h。

三叠系以泥岩、砂质泥岩、含砾细砂岩、含砾泥

质细砂岩为主,设计PDC钻头时,采用单排平齿与4DXC尖圆齿混合布齿(13.0 mm),以提高钻头的攻击性。Z10井应用该类钻头,单只钻头最大进尺546 m,最高机械钻速3.40 m/h。

二叠系乌尔禾组以泥岩、砂质泥岩、粉砂岩、砂砾岩为主,研磨性明显增强,在设计PDC钻头时,应重点考虑提高钻头的抗研磨性。因此,采用了六刀翼,单排口平齿与A3四面齿混合布齿(13.0 mm);砂砾岩井段选用抗冲击性好的三棱齿。S15井应用了该类钻头,单只钻头最大进尺340 m,最高机械钻速2.17 m/h。

2.2.4.2 垂直钻井技术

准噶尔盆地南缘山前冲断带易发生井斜,采用塔式钻具组合、钟摆钻具组合和预弯曲钻具组合控斜效果不理想,采用螺杆钻具组合纠斜效率低。实践表明,垂直钻井技术是防斜打快最有效的技术之一。该盆地GQ5井采用垂直钻井系统钻进第四系—古近系,井斜角控制在 4.0° 以内;KT1井采用了国产垂直钻井系统,井斜角控制在 1.0° 以内,并有效释放了钻压,机械钻速达到4.24 m/h,创造了该盆地南缘山前冲断带第四系—古近系(共计6 590 m)平均机械钻速最高纪录,同时降低了垂直钻井应用成本。

2.2.4.3 等壁厚螺杆钻具

螺杆钻具配合高效PDC钻头的复合钻进方式已成为钻井提速的有效方法之一,采用等壁厚螺杆钻具能有效提高工作扭矩、延长钻头使用寿命,进一步强化钻井参数,实现钻井提速。莫南凸起推广应用等壁厚螺杆后,钻井参数获得很大提高:二开钻压由前期最大80 kN增加到140 kN,排量由前期最大40 L/s增加到60 L/s;三开钻压由前期最大120 kN增加到140 kN,排量由前期最大28 L/s增加到32 L/s。

上述钻井提速技术在一定程度上提高了超深井钻井速度,但是在钻遇复杂岩性地层时机械钻速仍然较低,如钻遇二叠系—石炭系的白云质、火成岩时,机械钻速仍然低于1.00 m/h。因此,有待进一步研究提高破岩效率。

3 超深井钻井技术发展建议

近年来,准噶尔盆地侏罗系、三叠系、二叠系、石炭系都有较大的油气发现,超深层油气资源勘探开发进程加快、钻井深度加大,最大井深已达8 166 m(TW1井)。但是,超深层油气资源总体上仍

处于勘探阶段,受勘探程度影响,对超深层的地质构造、地层压力、地层岩性等的认识仍然不足,钻井过程中常面临预料之外的“遭遇战”,如正在施工的CT2井白垩系、KT1井侏罗系发生严重井壁坍塌,D17井二叠系发生恶性漏失,HS5井二叠系地层机械钻速极低等,造成钻井周期长、成本高,影响了该盆地超深层油气资源勘探开发的进程。为此,针对超深井地层差异性大、压力体系复杂和岩性变化大的特点,应在进一步优化现有技术的基础上,以地质工程一体化为基础、以安全高效钻进为目的,探索新技术、新工艺,促进准噶尔盆地超深井钻井技术发展。

1)提高钻井地质环境描述能力。准噶尔盆地深部地层压力体系、地应力、岩性特征的不确定性仍然较高,为降低钻遇未预测异常情况风险,亟待提高钻井地质环境描述能力。一方面,利用地震、测井、录井、钻井资料进行地质反演,建立区域的孔隙压力、地应力、岩石力学特性剖面,进一步提高钻井地质环境描述能力,为井身结构优化、施工方案制订、钻井工具优选提供可靠依据;另一方面,开展随钻地震、井震数据融合等技术的研究与应用,进行正钻井超前探测,预测未钻地层的钻井地质因素,钻井过程中可根据地质环境变化及时调整钻井工艺和技术对策。

2)丰富井筒强化手段。为提高易漏、易涌、易塌地层的钻井效率,需要进一步丰富井筒强化手段。一方面,加快随钻超声波井径测量、随钻成像测井、井下工程参数测量等技术的完善与应用,实时评价裂缝发育情况、确定漏失与坍塌位置等,为井筒强化提供准确的依据;另一方面,完善多级配强抑制强封堵、化学固结堵漏、化学固壁等钻井液技术,探索连续循环、膨胀管封堵等工艺和技术的适用性,提高井筒承压和井壁支撑能力,增强处理井下故障的能力。

3)深化高效破岩技术攻关。为提高深部地层钻井的机械钻速,需深化高效破岩技术攻关。一方面,深化岩石矿物特性对岩石力学特性影响、围压对岩石破碎效率影响、岩石破碎对钻井参数的敏感性等岩石破碎机理研究,为钻井方式、钻头与工具、钻井参数等优化提供理论依据;另一方面,针对复杂岩性、高围压环境,在提高现有钻头与提速工具性能的基础上,研发旋转齿PDC钻头、高效冲击类工具、长寿命全金属螺杆、保持钻头稳定切削的新

型钻头等, 提高破岩效率。

4 结束语

进入21世纪, 准噶尔盆地进行了超深层油气资源钻探, 针对钻井过程中易发生“漏、溢、塌、卡、慢”等问题, 通过井身结构优化、井筒压力控制、井壁稳定和钻井提速等技术迭代与提升, 超深井钻井技术得到了长足发展。近年来, 随着准噶尔盆地腹部和南缘超深层油气新发现, 该盆地超深层油气资源勘探开发进程进一步加快, 但钻井过程中井下复杂情况仍时有发生, 深部地层机械钻速仍然较低, 钻井效率仍满足不了高效勘探开发需求。为此, 需要针对准噶尔盆地地质构造复杂、地层差异性大的特点, 攻关、优化适合不同区块的超深井钻井技术, 特别是要提高钻井地质环境描述能力, 变“遭遇战”为“攻坚战”, 丰富井筒强化手段, 降低钻井风险, 深化高效破岩技术攻关, 提高钻井速度。

参 考 文 献

References

- [1] 何登发, 马永生, 刘波, 等. 中国含油气盆地深层勘探的主要进展与科学问题[J]. *地质前缘*, 2019, 26(1): 1-12.
HE Dengfa, MA Yongsheng, LIU Bo, et al. Main advances and key issues for deep-seated exploration in petroliferous basins in China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2019, 26(1): 1-12.
- [2] 苏义脑, 路保平, 刘岩生, 等. 中国陆上深井超深井钻完井技术现状及攻关建议[J]. *石油钻采工艺*, 2020, 42(5): 527-542.
SU Yinao, LU Baoping, LIU Yansheng, et al. Status and research suggestions on the drilling and completion technologies for onshore deep and ultra deep wells in China[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2020, 42(5): 527-542.
- [3] 杨海波, 王屿涛, 郭建辰, 等. 准噶尔盆地天然气地质条件、资源潜力及勘探方向[J]. *天然气地球科学*, 2018, 29(10): 1518-1530.
YANG Haibo, WANG Yutao, GUO Jianchen, et al. Geological conditions, resource potential and exploration direction of natural gas in Junggar Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2018, 29(10): 1518-1530.
- [4] 陈建平, 王绪龙, 邓春萍, 等. 准噶尔盆地油气源、油气分布与油气系统[J]. *地质学报*, 2016, 90(3): 421-450.
CHEN Jianping, WANG Xulong, DENG Chunping, et al. Oil and gas source, occurrence and petroleum system in the Junggar Basin, northwest China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2016, 90(3): 421-450.
- [5] 吴海生, 郑孟林, 何文军, 等. 准噶尔盆地腹部地层压力异常特征与控制因素[J]. *石油与天然气地质*, 2017, 38(6): 1135-1146.
WU Haisheng, ZHENG Menglin, HE Wenjun, et al. Formation pressure anomalies and controlling factors in central Juggar Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2017, 38(6): 1135-1146.
- [6] 张凤奇, 鲁雪松, 卓勤功, 等. 准噶尔盆地南缘下组合储层异常高压成因机制及演化特征[J]. *石油与天然气地质*, 2020, 41(5): 1004-1016.
ZHANG Fengqi, LU Xuesong, ZHUO Qingong, et al. Genetic mechanism and evolution characteristics of overpressure in the lower play at the southern margin of the Junggar Basin, Northwestern China[J]. *Oil & Gas Geology*, 2020, 41(5): 1004-1016.
- [7] 周双君, 朱立鑫, 杨森, 等. 吉木萨尔页岩油区块防漏堵漏技术[J]. *石油钻探技术*, 2021, 49(4): 66-70.
ZHOU Shuangjun, ZHU Lixin, YANG Sen, et al. Technology for preventing and controlling circulation loss in the Jimusar shale oil block[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2021, 49(4): 66-70.
- [8] 罗晓容, 杨计海, 王振峰. 盆地内渗透性地层超压形成机制及钻前压力预测[J]. *地质论评*, 2000, 46(1): 22-31.
LUO Xiaorong, YANG Jihai, WANG Zhenfeng. The overpressuring mechanisms in aquifers and pressure prediction in basins[J]. *Geological Review*, 2000, 46(1): 22-31.
- [9] 杨虎, 周鹏高, 孙维国, 等. 利用地震资料预测准噶尔盆地南缘山前构造地层压力[J]. *新疆石油地质*, 2017, 38(3): 347-351.
YANG Hu, ZHOU Penggao, SUN Weiguo, et al. Using seismic data to predict formation pressure in piedmont structures at the southern margin of Junggar Basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2017, 38(3): 347-351.
- [10] 靳军, 刘明, 刘雨晨, 等. 准噶尔盆地南缘下组合现今温压场特征及其控制因素[J]. *地质科学*, 2021, 56(1): 28-43.
JIN Jun, LIU Ming, LIU Yuchen, et al. Present-day temperature-pressure field and its controlling factors of the lower composite reservoir in the southern margin of Junggar Basin[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2021, 56(1): 28-43.
- [11] 邱春阳, 秦涛, 王宝田, 等. 准噶尔盆地中部4区块侏罗系井壁稳定钻井液技术[J]. *钻采工艺*, 2015, 38(5): 77-80.
QIU Chunyang, QIN Tao, WANG Baotian, et al. Drilling fluid technology on borehole stability in Junggar Jurassic Formation[J]. *Drilling & Production Technology*, 2015, 38(5): 77-80.
- [12] 刘向君, 丁乙, 罗平亚, 等. 钻井卸载对泥页岩地层井壁稳定性的影响[J]. *石油钻探技术*, 2018, 46(1): 10-16.
LIU Xiangjun, DING Yi, LUO Pingya, et al. The impact of drilling unloading on wellbore stability of shale formations[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2018, 46(1): 10-16.
- [13] 周顺林, 尹帅, 王凤琴, 等. 应力对泥页岩储层脆性影响的试验分析及应用[J]. *石油钻探技术*, 2017, 45(3): 113-120.
ZHOU Shunlin, YIN Shuai, WANG Fengqin, et al. Experimental analysis of the effect of stress on shale reservoir brittleness and its application[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2017, 45(3): 113-120.
- [14] 吴孔友, 查明, 王绪龙, 等. 准噶尔盆地构造演化与动力学背景再认识[J]. *地球学报*, 2005, 26(3): 217-222.
WU Kongyou, ZHA Ming, WANG Xulong, et al. Further researches on the tectonic evolution and dynamic setting of the Junggar Basin[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2005, 26(3): 217-222.
- [15] 林会喜, 王建伟, 曹建军, 等. 准噶尔盆地中部地区侏罗系压扭断裂体系样式及其控藏作用研究[J]. *地质学报*, 2019, 93(12): 3259-3268.
LIN Huixi, WANG Jianwei, CAO Jianjun, et al. Jurassic compression-torsion fault patterns of the central Junggar Basin and their controlling role on reservoir[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2019, 93(12): 3259-3268.
- [16] 陈书平, 漆家福, 于福生, 等. 准噶尔盆地南缘构造变形特征及其

- 主控因素[J]. *地质学报*, 2007, 81(2): 151–157.
- CHEN Shuping, QI Jiafu, YU Fusheng, et al. Deformation characteristics in the southern margin of the Junggar Basin and their controlling factors[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2007, 81(2): 151–157.
- [17] 张凤奇, 刘伟, 鲁雪松, 等. 喜马拉雅晚期构造应力场及其与油气分布的关系: 以准噶尔盆地南缘为例[J]. *断块油气田*, 2021, 28(4): 433–439.
- ZHANG Fengqi, LIU Wei, LU Xuesong, et al. Late Himalayan tectonic stress field and its relationship with hydrocarbon distribution: a case study of southern margin of Junggar Basin[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2021, 28(4): 433–439.
- [18] 吴孔友, 查明, 洪梅. 准噶尔盆地不整合结构模式及半风化石的再成岩作用[J]. *大地构造与成矿学*, 2003, 27(3): 270–276.
- WU Kongyou, ZHA Ming, HONG Mei. Structural models of unconformity and recurrent diagenesis of semi-weathering rock in Junggar Basin[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2003, 27(3): 270–276.
- [19] 邹德永, 王高明, 邢晨. 火成岩研磨性试验研究[J]. *石油钻探技术*, 2020, 48(3): 41–46.
- ZOU Deyong, WANG Gaoming, XING Chen. Experimental study on igneous rock abrasiveness[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2020, 48(3): 41–46.
- [20] 刘伟, 周英操, 石希天, 等. 塔里木油田库车山前超高压盐层精细控压钻井技术[J]. *石油钻探技术*, 2020, 48(2): 23–28.
- LIU Wei, ZHOU Yingcao, SHI Xitian, et al. Precise managed pressure drilling technology for ultra-high pressure brine layer in the Kuqa piedmont of the Tarim Oilfield[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2020, 48(2): 23–28.
- [21] 胡清富, 刘春来, 牟少敏, 等. 伊拉克东巴油田 Tanuma 组泥页岩高效防塌钻井液技术[J]. *石油钻探技术*, 2022, 50(4): 76–82.
- HU Qingfu, LIU Chunlai, MU Shaomin, et al. High-efficiency anti-sloughing drilling fluid technology for Tanuma shale of East Baghdad Oilfield in Iraq[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2022, 50(4): 76–82.
- [22] 于得水, 徐泓, 吴振振, 等. 满深 1 井奥陶系桑塔木组高性能防塌水基钻井液技术[J]. *石油钻探技术*, 2020, 48(5): 49–54.
- YU Deshui, XU Hong, WU Xiuzhen, et al. High performance anti-sloughing water based drilling fluid technology for Well Manshen 1 in the Ordovician Sangtamu Formation[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2020, 48(5): 49–54.
- [23] 刘厚彬, 韩旭, 张俊, 等. 川西低渗透气藏气体钻井井壁稳定性评价方法[J]. *石油钻探技术*, 2019, 47(1): 25–31.
- LIU Houbin, HAN Xu, ZHANG Jun, et al. Wellbore stability evaluation during gas drilling through low permeability gas reservoirs in western Sichuan[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2019, 47(1): 25–31.
- [24] 俞茂宏, 彭一江. 强度理论百年总结[J]. *力学进展*, 2004, 34(4): 529–560.
- YU Maohong, PENG Yijiang. Advances in strength theories for materials under complex stress state in the 20th century[J]. *Advances in Mechanics*, 2004, 34(4): 529–560.
- [25] 谢翔. 基于统一强度理论的钻孔孔壁稳定性分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2013: 7–11.
- XIE Xiang. Borehole stability analysis based on the unified strength theory[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013: 7–11.
- [26] 马永乾, 唐波, 张晓明, 等. 基于横波速度差异的裂缝分布识别方法: 以准噶尔盆地火山岩地层为应用实例[J]. *天然气工业*, 2016, 36(6): 36–39.
- MA Yongqian, TANG Bo, ZHANG Xiaoming, et al. A fracture identification method based on S-wave velocity difference: a case study from the volcanic strata in the Junggar Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2016, 36(6): 36–39.
- [27] 姚如钢, 何世明, 龙平, 等. 破碎性地层坍塌压力计算模型[J]. *钻采工艺*, 2012, 35(1): 21–23.
- YAO Rugang, HE Shiming, LONG Ping, et al. A mathematical model of calculating collapse pressure for fracture formation[J]. *Drilling & Production Technology*, 2012, 35(1): 21–23.
- [28] 万绪新, 张海青, 沈丽, 等. 合成基钻井液技术研究与应[J]. *钻井液与完井液*, 2014, 31(4): 26–29.
- WAN Xuxin, ZHANG Haiqing, SHEN Li, et al. Study and application of synthetic base drilling fluid technology[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2014, 31(4): 26–29.
- [29] 孙荣华. 全油合成基钻井液在永 3-侧平×井的应用[J]. *钻采工艺*, 2019, 42(4): 97–99.
- SUN Ronghua. Application of all-oil synthetic drilling fluid in Well Yong 3-Ceping[J]. *Drilling & Production Technology*, 2019, 42(4): 97–99.
- [30] 周代生, 李茜, 苏强. KCl-有机盐聚合物钻井液在川西双鱼石区块的应用[J]. *钻井液与完井液*, 2018, 35(1): 57–60.
- ZHOU Daisheng, LI Qian, SU Qiang. Application of KCl organic salt polymer drilling fluid in upper section of wells drilled in Block Shuangyushi, west Sichuan[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2018, 35(1): 57–60.
- [31] 张俊成, 蒋贵智, 国林帅, 等. 准噶尔盆地 P 区块火成岩油藏高效钻井技术[J]. *石油钻采工艺*, 2021, 43(5): 586–592.
- ZHANG Juncheng, JIANG Guizhi, GUO Linshuai, et al. Efficient drilling technologies for the igneous reservoir in Block P of the Junggar Basin[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2021, 43(5): 586–592.
- [32] 王敬朋, 李渊, 葛晓波, 等. 准噶尔盆地南缘冲断带: 呼探 1 井超深井钻井方案优化[J]. *新疆石油天然气*, 2020, 16(2): 19–23.
- WANG Jingpeng, LI Yuan, GE Xiaobo, et al. Study on ultra deep well drilling technology in the thrust belt of the Southern Margin of Junggar Basin: Well Hu Tan 1[J]. *Xinjiang Oil & Gas*, 2020, 16(2): 19–23.

[编辑 令文学]