◀专题论文▶

川渝地区超9 000 m水平井钻井关键技术措施*

贺明敏 宋东东 王 坚 吕斯端 陈友生 李自杰 涂建平
（中国石油集团川庆钻探工程有限公司）

贺明敏，宋东东，王坚，等. 川渝地区超9 000 m水平井钻井关键技术措施[J]. 石油机械，2025，53（10）：25-30.

He Mingmin，Song Dongdong，Wang Jian，et al. Key technologies measures for drilling ultra-deep（>9 000 m）horizontal wells in sichuan-chongqing region[J]. China Petroleum Machinery，2025，53（10）：25-30.

摘要：为了给深井超深井钻探技术提供经验并促进技术发展，以川西北部双鱼石构造上布局的SY001-H6井为例，分析了其所在地层的特点及钻进中存在的问题，即钻头机械钻速慢、小钻具疲劳、井控风险高、井底温度高和长水平段定向难等问题；就这些问题从钻头优选、钻井液密度调整、配套工具选择等方面提出了解决措施；同时对钻井设备进行了合理配套。经现场钻井验证，这些技术措施提速效果显著，可为深井超深井钻探提供安全保证。

关键词：川渝地区；超深井；水平井钻井；设备配套；钻头优选；机械钻速
中图分类号：TE242 **文献标识码：**A DOI：10. 12473/CPM. 202503051

Key Technologies Measures for Drilling Ultra-Deep（>9 000 m）Horizontal Wells in Sichuan-Chongqing Region

He Mingmin Song Dongdong Wang Jian Lü Siduan Chen Yousheng Li Zijie Tu Jianping
（*CNPC Chuanqing Drilling Engineering Company Limited*）

Abstract: To provide experience and promote the development of deep and ultra-deep well drilling technology, taking Well SY001-H6 on the Shuangyushi structure in northwestern Sichuan Basin as an example, the characteristics of the formation and the problems encountered during drilling such as slow rate of penetration (ROP), fatigue of small drilling tools, high risk of well control, high bottom hole temperature and difficult orientation of long horizontal sections were analyzed. Then, solutions were proposed from the aspects of bit optimization, drilling fluid density adjustment and selection of supporting tools. Meanwhile, rational equipment configuration was carried out. Field application results show that these technical measures have achieved remarkable ROP enhancement and provided safety guarantee for deep and ultra-deep well drilling.

Keywords: Sichuan-Chongqing region; ultra-deep well; horizontal drilling; equipment configuration; bit optimization; ROP

0 引 言

川渝地区油气资源丰富，埋深在4 500 m以深的资源量占盆地天然气资源总量½以上[1-5]。2025年及以后天然气仍是能源行业的战略重点[6-11]。钻井技术的不断发展，使得川渝地区的钻探技术不断得到提高[11-14]，有效支撑了超深层油气资源勘探

* 基金项目：中国石油天然气集团有限公司项目“万米级超深井钻柱振动监控和憋卡防治技术与装备研发”（2024ZG39）；中国石油天然气集团有限公司重大应用攻关型专项“万米超深层钻探关键工程技术与装备研制”（2023ZZ20）；中国石油天然气集团有限公司科学研究与技术开发项目“万米超深层油气资源钻完井关键技术与装备研究”（2022ZG06）；中国石油集团川庆钻探工程有限公司项目“万米特深井钻井安全配套工具研制与试验”（CQ2024B-1-Z4-3）。

开发技术[15-17]。深井超深井地质条件复杂，井控及井下风险大、周期长，加上地层差异及局部特殊岩性的存在，川渝地区超深井钻井依然面临巨大挑战[18-20]。针对国家“碳达峰、碳中和”的能源战略，四川省提出的建设中国“天然气大庆”的目标对川渝地区天然气的开发具有重要意义[21]。川西北部双鱼石构造栖霞组气藏面临多压力系统、安全密度窗口窄、地层可钻性差等诸多难点，而SY001-H6井是双鱼石构造田坝里构造上二叠统底界构造北倾的一口滚动评价井，存在储层埋藏深、构造发育复杂、储层横向发育不稳定等地质难题。该井不仅创造了多项超深井、超深气井纪录，而且获得 106.66×10^5 m^3/d、日无阻流量 209.17×10^5 m^{3}的高产工业气流。这里主要介绍了该井钻进中存在的难点，并就难点提出了可行的解决措施，以期为深井超深井钻探技术提供经验。

1　地质特征及钻井难点

双鱼石含气构造带位于川渝地区川西北部龙门山断褶带与川北古中拗陷低缓带的过渡区。构造带中三叠统以上地层构造相对简单，整体表现为北西高陡、南东低缓的单斜构造，断裂不发育；中三叠统以下地层断裂发育，目的层下二叠统顶面构造由南向北呈逐级抬升趋势，多为潜伏构造或封闭于断层的潜伏断块、断鼻，长轴展布方向呈北东南西向延展。其沉积和构造演化分可分为3个阶段，即中三叠世之前的碳酸盐台地发展阶段、晚三叠世的前陆盆地发展阶段和侏罗纪至第四纪的陆相盆地发展阶段。双鱼石区块自上而下地层压力系数如表1所示。

表1　双鱼石区块地层压力系数

Table 1　Formation pressure coefficient of Shuangyushi block

层　位	垂深/m	压力系数	孔隙压力/MPa
剑门关组-蓬莱镇组-遂宁组	0～2 185	1.00	21.43
沙溪庙组	2 185～3 265	1.10	35.23
自流井组~须家河组	3 265～4 910	1.50	72.25
雷口坡组	4 910～5 440	1.60	85.39
嘉陵江组~飞仙关组	5 440～6 775	1.70	112.99
长兴组-吴字坪组-茅口组	6 775～7 595	1.80	134.11
栖霞组	7 595～7 662	1.30	97.71

双鱼石构造地质条件复杂，地层压力异常，井控风险高。根据邻井资料，最终确定SY001-H6井采用五开井身结构。

1.1　钻头机械钻速低

SY001-H6井部分地层可钻性差，自流井组中部和底部为灰白色块状砾岩，砾石成分以石英砾为主。须家河组砂页岩互层，粉砂岩含石英，研磨性强，地层硬度高，偶见砾岩和燧石；须一、须三段结构较细，为砂岩和页岩组合；须二、须四段为结构较粗的砾岩、砂岩及页岩，偶见燧石。邻井ST7井地层吴家坪组含黄铁矿、燧石结核，研磨性强，局部硅质含量较高，具有较强的研磨性，地层可钻性差，钻经该套地层时钻井速度较慢。

1.2　小钻具疲劳

预计五开 ø101.60 mm（4 in）钻杆长达5 400 m，无疑增加了作业的复杂性。特别是在裸眼段长的情况下，小钻具将面临更大的挑战。井下的复杂地质条件和难钻地层，加上井底的高温作用，使得钻井周期延长，钻具承受的载荷增大。这些因素都增加了小钻具疲劳破坏的风险，对井底长段钻具的安全构成了挑战。

1.3　井控风险高

同井场邻井ST7井采用密度1.40~1.47 g/cm^{3}的钻井液钻至沙溪庙组时发生了井漏，采用密度1.65 g/cm^{3}的钻井液钻至自流井组3 559 m井深时发生井漏。嘉陵江组（井深5 962 m）、飞仙关组（6 512 m）断层发育，井漏风险大，可能钻遇异常高压。茅口组压力敏感，漏溢频繁，井筒容积大，溢流堵漏所需钻井液量大。四开油层悬挂套管至茅口组底部，距离栖霞组还有6 m，茅口组与栖霞组的地层压力系数差距较大，选择的钻井液密度不合适可能导致下漏上吐。五开为目的油气储层，井较深，栖霞组钻进发生气侵、井漏，井漏后可能发生溢流，井控风险大。

1.4　井底温度高

双鱼石区块地层温度高，作业难度大，根据邻井资料预测SY001-H6井水平段温度为155~160 ℃，其中邻井ST7井栖霞组井深7 645 m处温度为163 ℃。高温对定向仪器的稳定性影响显著，可能导致仪器性能减弱，精度降低，从而影响钻井轨迹的精确控制。此外，高温环境对钻杆螺纹脂挑战大，螺纹脂在高温下容易板结，导致钻具连接处的黏扣问题。这不仅增加了卸扣的难度，还可能因为螺纹的损坏而引发钻具的损坏，增加卡钻和钻具失效的风险。高温还可能导致钻井液性能减弱，影响其携岩能力和润滑性，进一步加剧钻头的磨损，缩短钻头的使用寿命，并影响机械钻速。

1.5　长水平段定向难

SY001-H6井水平段长1 338 m，井深轨迹控制难，定向作业需要反复调整方位。由于水平段长，钻遇的岩性复杂多变，钻井液与钻具和地层的接触时间较长。长水平段的存在使得井眼轨迹的平滑度难以保证，容易造成井眼曲率过大，增大附加刚性正压力，导致摩擦力增大。定向过程中频繁托压，卡钻风险高。频繁的托压现象会导致钻头和螺杆钻具容易受损，影响定向钻井效率；且在解除托压时，钻头受到的钻压和扭矩会突然增大，引起工具面波动或改变，进一步增加了卡钻的风险。

2　关键技术措施

2.1　解决钻头机械钻速低的问题

二开ø455.0 mm井眼剑门关组钻遇砾石较多，区块整体机械钻速低，所用的牙轮钻头与PDC钻头进行ø455.0 mm大井眼钻进效果均不太理想。综合优选，选择ø279.4 mm（11 in）螺杆+江钻KPM1633DST复合钻头在剑门关组提速，排量80 L/s以上，提速效果显著，机械钻速达到10.04 m/h。出井钻头如图1所示。



图1　二开出井钻头

Fig. 1　Ascent bit after second spud-in

三开ø333.4 mm井眼蓬莱镇组-遂宁组为软硬交错地层，钻头易崩齿；沙溪庙组为粉砂泥岩，钻头易磨损。结合邻井（SY001-X3井）资料，优选惠灵丰HS5164B PDC钻头+螺杆钻进，效果更好。针对自流井组含砾，须家河组以粉砂岩为主，须四段含砾石、研磨性强，地层整体可钻性较差，常规PDC钻头适应性不足、牙轮钻头机械钻速低等难题，优选宝鸡石油机械有限责任公司SH533-LS复合钻头+螺杆钻进，在自流井组效果更好。出井钻头如图2所示。

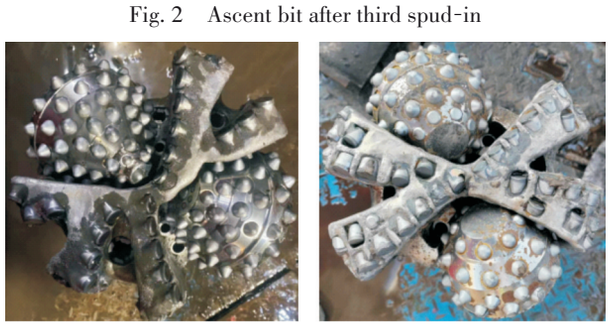
四开ø241.3 mm井眼吴家坪组燧石结核灰岩，研磨性强，岩石可钻性差，严重缩短钻头使用寿命；同时邻井（SY001-X3井）钻进困难，钻头优选难度大。为兼顾钻头寿命及机械钻速，SY001-H6井使用贝克休斯KMX525钻头，机械钻速达到2.70 m/h，但是钻头使用效果不佳，纯钻16.67 h进尺仅45 m。最终优选中石化江钻公司KPM1642DRT复合钻头+螺杆钻进，进尺108.99 m，适应性较好。出井钻头如图3所示。



HS5164B PDC钻头　　SH533-LS复合钻头

图2　三开出井钻头

Fig. 2　Ascent bit after third spud-in



KMX525钻头　　KPM1642DRT复合钻头

图3　四开出井钻头

Fig. 3　Ascent bit after fourth spud-in

五开ø149.2 mm井眼栖霞组异常高温，提速重点在于抗高温仪器、抗高温螺杆的使用。结合地质复杂性，最终优选TS613钻头+5LZ120×7.0-4VIIISF抗200 ℃高温螺杆，结合工程地质一体化，既满足地质需要，也考虑工程实际，提速效果明显。出井钻头如图4所示。



图4　五开出井钻头

Fig. 4　Ascent bit after fifth spud-in

与区块平均机械钻速及邻井机械钻速相比，各开次提速效果明显（见图5）。较区块平均机械钻速及邻井（SY001-X3井）机械钻速相比，一开机械钻速分别提高98.8%、106.2%，二开机械钻

速分别提高121.8%、137.7%，三开机械钻速分别提高17.7%、3.8%，四开机械钻速分别提高13.9%、50.3%，五开机械钻速分别提高13.4%、80.0%。

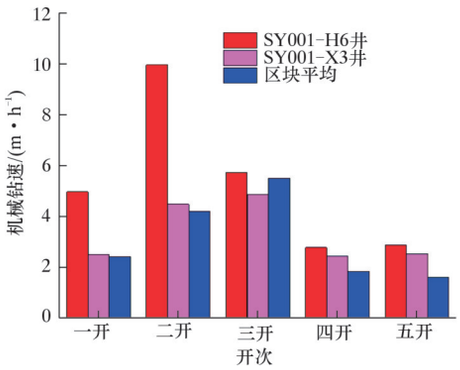


图5　各开次机械钻速

Fig. 5　ROP of each spud operation

2.2　小钻具疲劳问题解决措施

预计五开ø101.6 mm钻杆长达5 400 m，该段裸眼段长，加上井下复杂难钻及井底高温作用，钻井周期长、载荷大，小钻具容易发生疲劳破坏，对井底长段钻具安全具有很大的挑战和风险。对钻具强度、扭矩、排量及转速进行敏感性分析，找到与地层的匹配性，加强钻具、配合接头等所有入井钻具的探伤检查，坚持大狗腿段钻具上下倒换使用及错扣起钻，释放应力，消除钻具疲劳，发现异常情况及时更换。长期使用钻具定时倒换并进行检测，严格控制钻具静止时间，必要时采取转盘转动钻具，采用铜基丝螺纹铅油等措施，确保高温井下钻具安全性。

以五开钻进至9 000 m井深，钻压80 kN、排量15 L/s为基准计算，参考同井型SY001-X3井8 600 m时各项参数，正常钻进时悬重约为1 920 kN，起钻悬重为2 320 kN，提离井底悬重2 000 kN。通过钻具强度校核分析，抗拉薄弱环节在ø101.6 mm钻杆上，抗拉余量为664 kN，故每次起钻进行ø101.6 mm钻具上下倒换，错扣起钻、释放应力。

2.3　井控风险高解决措施

采用精细控压技术钻进，结合地质工程一体化，尝试放压后降密度钻进，根据实钻调整密度，自动节流管汇控压值在4.5 MPa以内。由于油基钻井液静止后切力增大，开泵时缓慢开泵；裸眼段严格控制起、下钻速度，中停时必须上下大幅度活动钻具，接立柱充分循环带砂；水平段每200 m短起下1次，积极破坏岩屑床。钻进至井深7 672.0 m（四开中完），井下油气显示活跃，不满足起钻条件，调整钻井液密度（由2.00 g/cm³调整到2.03 g/cm³）进行短程起下，钻井液验证安全后起钻。邻井ST7井开钻时钻井液密度1.60 g/cm³，至密度1.63 g/cm³完钻，7 722~7 726 m地层破碎，有掉块。SY001-H6井使用1.45 g/cm³油基钻井液开钻，根据钻进中的显示情况调整钻井液密度。

2.4　井底高温解决措施

SY001-H6井栖霞组井深7 692 m处温度为153 ℃，钻进至井深8 469 m、垂深7 640 m时循环温度约为168 ℃。五开钻进过程中，已造成5次因高温导致仪器无信号及2次螺杆故障（井深7 750.52 m达最终温度176 ℃），采用5LZ120×7.0-4VIIISF抗200 ℃高温螺杆及impulse抗200 ℃高温仪器来确保螺杆及定向仪器的性能稳定。SY001-H6井在下钻过程中井底静止温度在165 ℃左右，下钻时采用分段循环降温，钻具组合中采用大水眼无磁承压钻杆。针对常用钻具螺纹脂工作温度最高为160 ℃，故SY001-H6井五开采用铜基钻具螺纹脂，可完全满足井底抗高温要求。

2.5　长水平段定向难问题解决措施

采用在井底钻具组合安装水力振荡器，开泵情况下通过水力振荡器自身产生的纵向振动来增强钻进过程中钻压传递的有效性和减小底部钻具与井眼之间的摩阻，进而减小钻具发生黏卡的可能性。同时在定向钻具组合中，利用加重钻杆代替钻铤，只保留无磁钻铤，减小钻具与井壁接触面积。对不同型号螺杆使用情况分析，采用1.25°弯螺杆在满足增斜率的同时增强工具面稳定性，进而减缓托压现象。使用油基钻井液，在保证充分的润滑性及高温稳定性的同时，定期加入玻璃微珠防止托压。在定向过程施工时，每柱钻杆滑动分段施工，减小局部狗腿。

3　钻井关键设备

现场配置3台F2200HL钻井泵，所用缸套、活塞直径可满足最大52 MPa工作压力要求。配置2台额定功率1 100 kW、转速2 200 r/min交流变频电机，功率大，变频调速范围宽，最大提升载荷达6 500 kN。绞车为2挡无级变速，通过气缸实现自动换挡，可以根据工况需要选择电机和挡位。绞车输入转速在0~2 200 r/min范围内可无级调速。固控设备采用2台负压振动筛、2台双轨迹振动筛、1台除砂除泥一体机、1台中速离心机、1台超高速离心机的设备配套，以满足现场作业需求。

4　结　论

（1）双鱼石构造地质条件复杂，地层压力异常，井控风险高；所钻井SY001-H6井在钻进中面临钻头机械钻速低、钻具易疲劳、井底温度高及长水平段定向难等问题，就这些问题提出了可行的解决措施。

（2）优选复合钻头配备高效螺杆钻井技术适合在剑门关组含砾石等地层钻进。针对蓬莱镇组-遂宁组地层软硬交错，沙溪庙组粉砂泥岩钻头易磨损等问题，优选出PDC钻头并配备螺杆，提速效果显著。须家河组地层研磨性强并含砾岩，优选出复合钻头配备螺杆效果更佳。复合钻头钻进吴家坪组燧石结核灰岩等研磨性强、岩石可钻性差等地层提速效果明显。

（3）针对超深井井底高温、钻具疲劳等问题，采用大水眼无磁承压钻杆、下钻分段降温、钻具定期探伤、错扣起钻、释放应力、消除钻具疲劳等技术，通过钻具强度校核、钻进扭矩、转速分析研究等，优选钻头并配备耐高温螺杆与仪器，提速效果明显，钻具安全性能更高，为深井超深井钻井提供了安全技术保障。

（4）采用精细空压钻井技术，通过优选钻头及相应工具仪器，优化定向组合及井底防卡技术，结合地质工程一体化，既满足地质需要，也考虑工程实际，提速效果明显，加速了川渝地区油气资源的勘探开发，推动了深井超深井钻井技术的进步。

参　考　文　献

[1] 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 Y N，LU B P，LIU Y S，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.

[2] 谭宾. 相国寺储气库安全快速钻完井技术集成应用[J]. 钻采工艺，2022，45（1）：11-20.
TAN B. Integrated application of safe and rapid drilling and completion technology in Xiangguosi gas storage[J]. Drilling & Production Technology，2022，45（1）：11-20.

[3] 杨雨，文龙，谢继容，等. 四川盆地海相碳酸盐岩天然气勘探进展与方向[J]. 中国石油勘探，2020，25（3）：44-55.
YANG Y，WEN L，XIE J R，et al. Progress and directionof marine carbonate gas exploration in Sichuan and Chongqing region[J]. China Petroleum Exploration，2020，25（3）：44-55.

[4] 何润民，赵莉，黄星，等. 川渝地区天然气产业与氢工业融合发展路径[J]. 天然气工业，2023，43（9）：162-173.
HE R M，ZHAO L，HUANG X，et al. Path for integrated development of natural gas and hydrogen in the Sichuan - Chongqing region[J]. Natural Gas Industry，2023，43（9）：162-173.

[5] 郭旭升，胡东风，黄仁春，等. 四川盆地深层-超深层天然气勘探进展与展望[J]. 天然气工业，2020，40（5）：1-14.
GUO X S，HU D F，HUANG R C，et al. Deep and ultra-deep natural gas exploration in the Sichuan Basin：progress and prospect[J]. Natural Gas Industry，2020，40（5）：1-14.

[6] 宋东东，罗鑫，贺明敏. 万米特深井ø812.8 mm PDC钻头研制及现场应用[J]. 石油机械，2025，53（2）：31-36.
SONG D D，LUO X，HE M M. Development and application of ø812.8 mm PDC bit for myriameter ultradeep wells[J]. China Petroleum Machinery，2025，53（2）：31-36.

[7] 邹才能，赵群，陈建军，等. 中国天然气发展态势及战略预判[J]. 天然气工业，2018，38（4）：1-11.
ZOU C N，ZHAO Q，CHEN J J，et al. Natural gas in China：development trend and strategic forecast[J]. Natural Gas Industry，2018，38（4）：1-11.

[8] 何骁，陈更生，吴建发，等. 四川盆地南部地区深层页岩气勘探开发新进展与挑战[J]. 天然气工业，2022，42（8）：24-34.
HE X，CHEN G S，WU J F，et al. Deep shale gas exploration and development in the Southern Sichuan basin：new progress and challenges[J]. Natural Gas Industry，2022，42（8）：24-34.

[9] 李剑，佘源琦，高阳，等. 中国天然气产业发展形势与前景[J]. 天然气工业，2020，40（4）：133-142.
LI J，SHE Y Q，GAO Y，et al. Natural gas industry in China：development situation and prospect[J]. Natural Gas Industry，2020，40（4）：133-142.

[10] 戴金星，倪云燕，董大忠，等. “十四五”是中国天然气工业大发展期：对中国“十四五”天然气勘探开发的一些建议[J]. 天然气地球科学，2021，32（1）：1-16.
DAI J X，NI Y Y，DONG D Z，et al. 2021—2025 is

a period of great development of China's natural gas industry: suggestions on the exploration and development of natural gas during the 14th five-year plan in China[J]. Natural Gas Geoscience, 2021, 32(1): 1-16.

[11] 贾爱林，何东博，位云生，等. 未来十五年中国天然气发展趋势预测[J]. 天然气地球科学，2021，32(1)：17-27.
JIA A L, HE D B, WEI Y S, et al. Predictions on natural gas development trend in China for the next fifteen years[J]. Natural Gas Geoscience, 2021, 32(1): 17-27.

[12] 孙永兴，杨博仲，乔李华. 川西北地区复杂深井超深井井身结构优化设计[C]//2017年全国天然气学术年会论文集. 杭州：中国石油学会天然气专业委员会，2017：2576-2581.
SUN Y X, YANG B Z, QIAO L H. Optimization design of complex deep and ultra deep well bore structure in Northwest Sichuan[C]//Proceedings of 2017 National Natural Gas Academic Annual Conference. Hangzhou: Natural Gas Professional Committee of China Petroleum Society, 2017: 2576-2581.

[13] 叶金龙，沈建文，吴玉君，等. 川深1井超深井钻井提速关键技术[J]. 石油钻探技术，2019，47(3)：121-126.
YE J L, SHEN J W, WU Y J, et al. Key techniques of drilling penetration rate improvement in ultra-deep well Chuanshen-1[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2019, 47(3): 121-126.

[14] 谭宾. 四川盆地南部地区深层页岩气工程关键技术与展望[J]. 天然气工业，2022，42(8)：212-219.
TAN B. Key technologies and prospects of deep shale gas engineering in the Southern Sichuan basin[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(8): 212-219.

[15] 赵路子，汪泽成，杨雨，等. 四川盆地蓬探1井灯影组灯二段油气勘探重大发现及意义[J]. 中国石油勘探，2020，25(3)：1-12.
ZHAO L Z, WANG Z C, YANG Y, et al. Important discovery in the second member of Dengying formation in well Pengtan1 and its significance, Sichuan basin[J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(3): 1-12.

[16] 王军，范翔宇. 四川盆地九龙山地区超深井优快钻井配套技术[J]. 天然气勘探与开发，2020，43(1)：28-35.
WANG J, FAN X Y. Supporting schemes to optimize fast drilling of ultra-deep wells, Jiulongshan area, Sichuan basin[J]. Natural Gas Exploration and Development, 2020, 43(1): 28-35.

[17] 胡大梁，欧彪，张道平，等. 川深1超深井钻井优化设计[J]. 钻采工艺，2020，43(2)：34-37.
HU D L, OU B, ZHANG D P, et al. Drilling optimization design of ultradeep well CS1 in Sichuan and Chongqing region[J]. Drilling & Production Technology, 2020, 43(2): 34-37.

[18] 周代生，杨欢，胡锡辉，等. 川西双鱼石构造超深井大尺寸井眼钻井提速技术研究[J]. 钻采工艺，2019，42(6)：25-27，36.
ZHOU D S, YANG H, HU X H, et al. Study on ROP improvement technology for large-size ultradeep wellsat Shuangyushi structure in western Sichuan[J]. Drilling & Production Technology, 2019, 42(6): 25-27, 36.

[19] 苏强，何世明，胡锡辉，等. 川西双鱼石构造难钻地层岩石可钻性及钻头选型研究与应用[J]. 钻采工艺，2019，42(2)：124-127.
SU Q, HE S M, HU X H, et al. Research and application on rock drillability and bitselection of difficult drilling formations in Shuangyushi structure of western Sichuan and Chongqing region[J]. Drilling & Production Technology, 2019, 42(2): 124-127.

[20] SONG D D, REN Z P, YANG Y X, et al. Research on cutter surface shapes and rock breaking efficiency under high well temperature[J]. Geoenergy Science and Engineering, 2023, 222: 211422.

[21] 张道伟. 四川盆地未来十年天然气工业发展展望[J]. 天然气工业，2021，41(8)：34-45.
ZHANG D W. Prospects for the development of natural gas industry in the Sichuan and Chongqing region in the next decade[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(8): 34-45.

第一作者简介：贺明敏，高级工程师，生于1985年，2011年毕业于西南石油大学油气井工程专业，获硕士学位，现从事钻完井工程技术研究及管理工作。地址：(610000) 四川省成都市。email：hemmin_sc@cnpc.com.cn。

收稿日期：2025-03-13　　**修改稿收到日期：**2025-05-10

（本文编辑　王刚庆）