

doi:10.11911/syztjs.2024037

引用格式: 张锦宏, 张波, 曹明, 等. 中国石化“深地工程”油气测试关键技术及展望[J]. 石油钻探技术, 2024, 52(2): 48-57.

ZHANG Jinhong, ZHANG Bo, CAO Ming, et al. key technologies and prospects for oil and gas testing in Sinopec's "Deep Underground Engineering" [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2024, 52(2): 48-57.

中国石化“深地工程”油气测试关键技术及展望

张锦宏¹, 张波¹, 曹明¹, 孙晨祥², 刘涛³, 廖碧朝⁴, 牟小清⁵

(1. 中石化石油工程技术服务有限公司, 北京 100020; 2. 中石化江汉石油工程有限公司, 湖北武汉 430206; 3. 中石化胜利石油工程有限公司, 山东东营 257001; 4. 中石化中原石油工程有限公司, 河南濮阳 457001; 5. 中石化西南石油工程有限公司, 四川成都 610041)

摘要: 针对“深地工程”构造和储层介质复杂、埋藏深、地层压力高和温度高等复杂工况, 中国石化围绕深层超深层油气测试、超高温高压井下工具、地面测试、窄安全窗口油气井测试工程设计和完井测试液等技术进行攻关研究, 完成 100 余口 8 000 m 以深油气井的测试施工, 初步形成了“深地工程”油气测试关键技术及配套装备, 有力支撑了塔里木盆地、四川盆地和准噶尔盆地等深层超深层油气资源的勘探开发。梳理总结了中石化“深地工程”油气测试关键技术, 分析了中石化“深地工程”向 9 000 m 乃至 10 000 m 以深迈进情况下油气测试技术面临的主要挑战, 展望了特深层高温高压油气测试工程设计、特深层高温高压油气测试完井工艺、地面自动化测试和高性能油气测试工具等技术在未来的发展。该技术总结与展望对构建更加成熟、专业、安全、高效的油气测试技术体系, 助力深层超深储层油气勘探开发取得更大突破有一定借鉴意义。

关键词: 深地工程; 超深储层; 油气测试; 完井投产; 地质工程一体化; 中国石化

中图分类号: TE272 文献标志码: A 文章编号: 1001-0890(2024)02-0048-10

Key Technologies and Prospects for Oil and Gas Testing in Sinopec's "Deep Underground Engineering"

ZHANG Jinhong¹, ZHANG Bo¹, CAO Ming¹, SUN Chenxiang², LIU Tao³, LIAO Bichao⁴, MOU Xiaoqing⁵

(1. Sinopec Oilfield Service Corporation, Beijing, 100020, China; 2. Sinopec Jiangnan Oilfield Service Corporation, Wuhan, Hubei, 430206, China; 3. Sinopec Shengli Oilfield Service Corporation, Dongying, Shandong, 257001, China; 4. Sinopec Zhongyuan Oilfield Service Corporation, Puyang, Henan, 457001, China; 5. Sinopec Xinan Oilfield Service Corporation, Chengdu, Sichuan, 610041, China)

Abstract: In view of complex structures and reservoir media in "Deep Underground Engineering", which includes deep burial, high formation pressure and temperature, and other complicated conditions, Sinopec has carried out key research on technologies such as deep and ultra-deep oil and gas testing, ultra-high temperature and high-pressure bottom hole assembly (BHA), surface testing, oil and gas well testing engineering design of narrow safety window, and well completion testing fluid, etc. Sinopec successfully completed the testing construction of more than 100 oil and gas wells with depth more than 8 000 m, and initially formed the initial key technologies and supporting equipment for oil and gas testing in "Deep Underground Engineering", which strongly supported the exploration and production of deep and ultra-deep oil and gas resources in the Tarim Basin, Sichuan Basin, and Junggar Basin. The key technologies of oil and gas testing in Sinopec's "Deep Underground Engineering" were summarized, and the challenges in oil and gas testing technologies faced by Sinopec's "Deep Underground Engineering" during exploration from 9 000 m to deeper than 10 000 m were analyzed. Technical prospects were put forward for the design of extra-deep high-temperature and high-pressure oil and gas testing engineering, extra-deep high-temperature and high-pressure oil and gas testing completion technology, ground automation testing, and high-performance oil and gas testing tools, etc. The overview and prospect of these technologies are of reference significance for the construction of a more mature,

收稿日期: 2024-02-07; 改回日期: 2024-03-08。

作者简介: 张锦宏 (1963—), 男, 江苏泰州人, 1983 年毕业于华东石油学院钻井工程专业, 2004 年获石油大学 (北京) 管理学硕士学位, 正高级经济师, 中国石化集团公司首席专家 (石油工程领域高效钻井方向), 主要从事石油工程技术研究及相关管理工作。系本刊编委。E-mail: zhangjh.os@sinopec.com。

基金项目: 中国石化科技攻关项目“元坝超深‘三高’气井 APR 三联作安全测试技术” (编号: P23182) 和“超高压酸性气井试气关键技术研究” (编号: P22048) 联合资助。

professional, safe, and efficient oil and gas testing technology system, in order to help achieve greater breakthroughs in the exploration and development of deep and ultra-deep oil and gas reservoirs.

Key words: Deep Underground Engineering; ultra-deep reservoirs; oil and gas testing; well completion and production; geology and engineering integration; Sinopec

我国深层超深层油气资源量达 671×10^8 t 油当量, 占我国油气资源总量的 34%, 主要分布在塔里木盆地、四川盆地和准噶尔盆地等地, 深层超深层油气资源潜力巨大^[1]。深层超深层构造复杂、储层埋藏深、地层压力高、温度高, 对储层油气测试、井下工具、地面测试及完井测试工作液等油气测试工程技术的要求越发苛刻。近年来, 中国石化通过“深地工程”建设, 攻关形成了深层超深层油气测试技术、窄安全窗口油气井测试工程设计技术、地面测试技术和超高温高压井下工具等一系列“深地工程”油气测试关键工艺技术和装备^[2], 安全高效完成 100 余口 8 000 m 以深油气井的测试施工, 创造了多项高指标和施工纪录, 有力支撑了塔里木盆地、四川盆地和准噶尔盆地等地深层超深层油气资源的勘探开发。笔者梳理了中国石化前期取得的技术成果, 总结了“深地工程”油气测试关键技术, 分析了 9 000 m 乃至 10 000 m 以深油气测试领域面临的主要技术挑战, 展望了特深层油气测试技术在未来的发展, 以为深层超深层油气勘探开发取得更大突破提供有力支撑^[3-4]。

1 “深地工程”油气测试技术

为满足“深地工程”高温高压油气藏测试需求, 根据各工区储层地质特点, 开展了深层超深层油气测试、超高温高压井下工具、地面测试、窄安全窗口油气井测试工程设计、完井测试液和全过程质量控制等技术攻关及应用, 形成了“深地工程”油气测试关键技术序列。

1.1 顺北“深地一号”油气测试关键技术

顺北油气田为中国石化“深地一号”工程基地, 是我国第一个以“深地工程”命名的油气项目。该油气田为奥陶系碳酸盐岩裂缝性-洞穴型油气藏, 储集层为断控缝洞和相控孔隙, 主要以油藏、挥发性油藏及气藏为主。针对埋藏深(7 500 m)、储层温度高(180 ℃ 以上)、压力高(160 MPa 以上)、储层缝洞尺寸大、储集体缝-洞间非均质性强的地质特点^[5-6], 以及因漏失严重、套管固井困难导致油气井完整性不足等工程问题, 通过持续开展油气测

试技术攻关, 不断完善提升测试工程管理水平, 形成了满足顺北“深地一号”工程需求的超深层油气测试系列关键技术, 顺利完成了大量高难度测试任务, 累计发现 26 口日产千吨级高产井, 为顺北油气田完成百万吨建产提供了高效、安全、有力的技术支撑。

1) 超深层油气井测试技术。针对顺北油气储层埋藏深、温度和压力高, 硫化氢和二氧化碳极易造成测试管柱、工具失效, 储层非均质性强, 易喷、易漏、易坍塌导致测试安全风险高等难题, 研制了以“加强型 RDS 阀+加强型 RD 阀+E 型阀+高温高压机械封隔器+电子压力计托筒”为主的完井测试工具, 攻关形成了适用于 9 000 m、压力 160 MPa、温度 180 ℃ 以上特深层的超深超高温高压井测试技术, 可用于侦察性测试、负压验窜测试及加强型“五阀一封”测试(见图 1)^[7]。

该技术解决了超深储层地质特征导致的测试工具可靠性降低及井下管柱失效风险、地面井控安全风险等难题, 保障了 SHB1-1H 井、SHB4 井、SHS1X 井、SHZ1X 井等多口高风险探井的勘探开发取得突破, 其中 SHN7 井储层实测温度 198 ℃, 创当时测试最高井温纪录^[8-9]。

2) 超深层油气井测试-改造-完井一体化技术。针对顺北油气田缝洞型碳酸盐岩储层压力窗口窄、易喷易漏、井控风险大、裸眼段测试管柱下入难和储层非均质性强导致定点改造难等问题, 通过完善油气测试管柱井下模型受力分析, 深化高性能测试完井工具研选评价, 形成了以“下部管柱防喷、支撑+上部管柱高效完井”为主要特征的超深层油气井测试-改造-完井一体化技术, 结合顺北油田不同储层需求, 开发了多套油气测试-改造-完井一体化管柱(见图 2)。

该一体化技术在顺北油气田 20 余口超深油气井进行了应用, 施工一次成功率 100%。其中, SHB4-5H 井测试折算油气当量 1 358 t/d, 实现了一口井连通 3 个储集体的地质目的^[10-11]。

3) 超深层海相碳酸盐岩大型酸化压裂技术。针对顺北油气田储层埋藏深、温度压力高、改造摩阻高、地面施工压力大、残渣含量高及液体成本高等问题, 从提高压裂液耐高温性、强化交联稳定性、

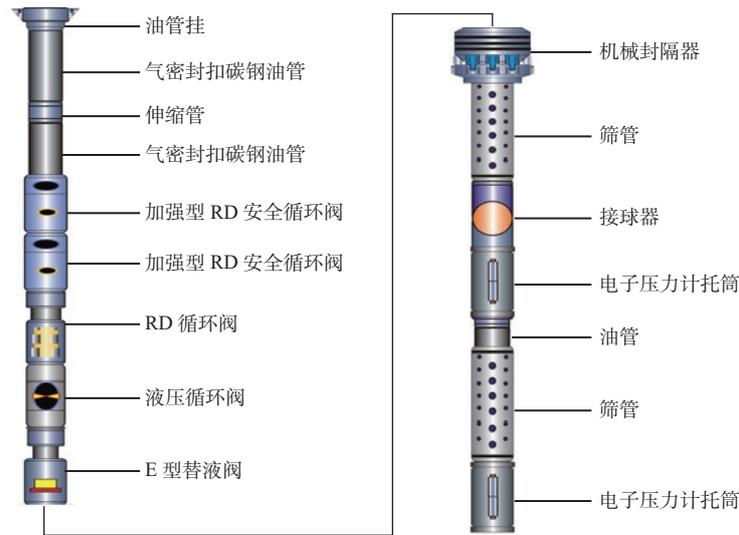


图 1 超深层油气井加强型“五阀一封”测试管柱示意

Fig.1 Enhanced “five valve and one packer” test string for ultra-deep oil and gas wells

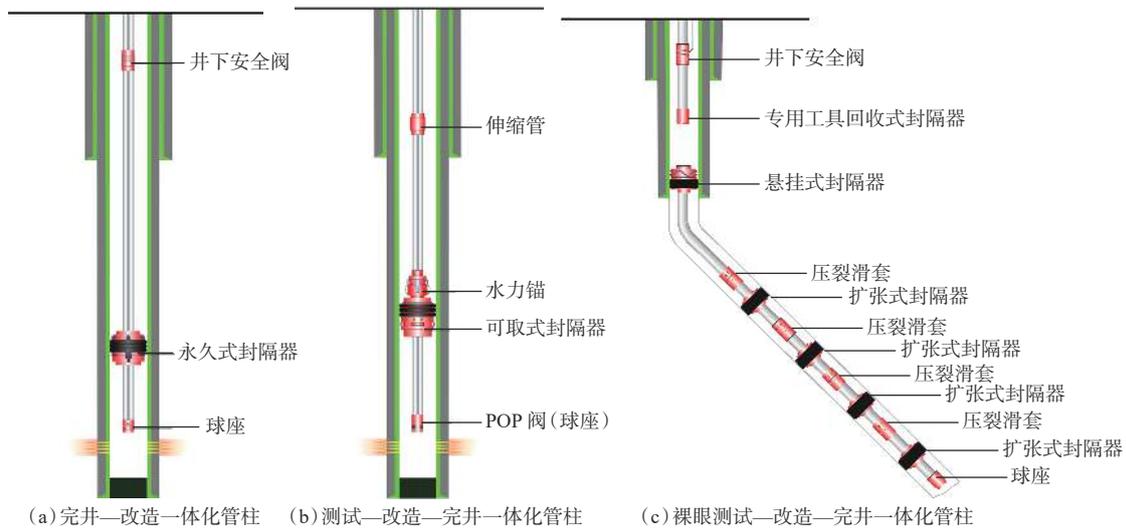


图 2 超深层油气井测试-改造-完井一体化管柱示意

Fig.2 Integrated string for testing, stimulation and completion of ultra-deep oil and gas wells

降低摩阻及增强悬砂性能等方面着手^[12-14],自主研发了温控交联剂、耐温增强剂、酸性调理剂、表面活性剂等多种核心处理剂,通过优化压裂液配方,结合现场应用效果评价,不断优化形成了6大液体体系及超深层海相碳酸盐岩大型酸化压裂技术,适用于180~260℃储层酸化压裂施工。

该技术在西北油田超高温超深井应用20余次。其中,SHB802X井测试折算油气当量1228 t/d,是中国石化在顺北8号断裂带区域发现的第3口“千吨井”。

1.2 四川盆地“深地工程”酸性储层油气测试系列技术

四川盆地天然气资源丰富,多数气藏属于深层

超深层海相碳酸盐岩储层,是“深地工程”试油测试的另一主战场。中国石化的普光、元坝、彭州等整装气田,纵向分布在三叠系到奥陶系,跨度超2000 m,普遍具有埋藏深(大于6000 m)、温度高(最高221℃)、地层压力高(最高159.9 MPa)、低孔(孔隙度1.8%~6.3%)、低渗(渗透率0.002~1.500 mD)、高含硫化氢等特征。近年来,针对四川盆地深层超深层海相碳酸盐岩勘探开发,中国石化着力攻关酸性储层油气测试系列技术,建成了年产40×10⁸ m³的元坝气田,落实了彭州区块资源超千亿立方米,为“元坝之下找元坝,彭州之上找彭州”提供了坚实的技术支撑。

1) 超深高酸性油气藏联作测试技术。基于

“APR 测试+射孔+改造技术”为主的三联作测试技术,充分汲取 YB701 井等井测试工程的经验教训,为避免西南工区三联作实用性不强引起的井下管柱受力复杂、井下工具选择余地小、封隔器失封、测试阀无法正常开启以及完井液和酸液选择困难等问题^[15-16],通过技术攻关研发了特深层试油气超深穿透射孔技术,研制了以“加强型 RDS 阀+加强型 RD 阀+电子压力计托筒+永久式液压封隔器”为主的超深高酸性油气藏联作测试工具,形成了以“先射孔,后酸压测试”为特征的超深超高温高压酸性

气井两联作测试技术,提高了四川盆地超深海相储层测试成功率,解决了四川盆地超深海相储层埋藏深、油气测试管柱受力复杂、完整测试资料获取难的问题,建立了适用于多种工况的测试联作管柱(见图 3)。

该技术在四川盆地应用 30 余井次,取得较好的应用效果。其中,YS1 井完钻井深 8 866 m,测试井深 8 806 m,创中国石化四川盆地油气测试工程新纪录;F1 井测试实测井温 221 ℃,创亚洲最高测试温度纪录。

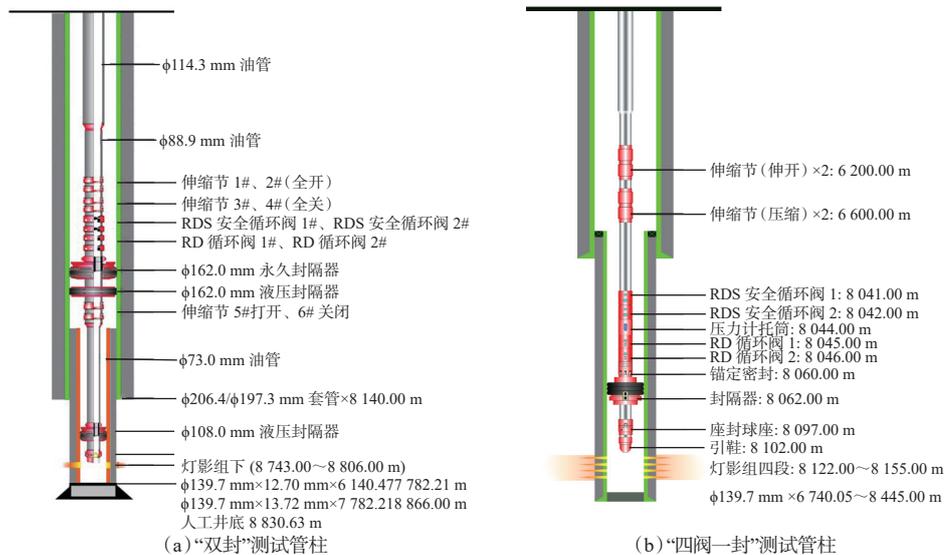


图 3 超深高酸性油气藏联作测试管柱

Fig.3 Joint testing string for ultra-deep and highly acidic oil and gas reservoirs

2)超深长水平段水平井滑套分流完井试气技术。针对彭州海相气田长水平段水平井(水平段长大于 1 000 m)小井眼完井管柱下入难、长井段储层精细分段布酸难等问题^[17-19],针对性开展了井筒处理、管柱力学、酸压方案优化、平台井酸压试气技术配套等方面的攻关研究,研制了以“大通径悬挂封隔器+多个无限级压裂滑套”为主的超深长水平段水平井滑套分流完井工具,形成了超深长水平段水平井滑套分流完井试气技术(试气管柱见图 4)。

PZ5-1D 井雷四段 6 144~8 200 m 井段采用该技术完井试气,测试无阻流量 $325 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,为川西气田建成 $20 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的年产能奠定了基础。

1.3 准噶尔盆地深层砾岩储层油气测试系列技术

准噶尔盆地是“深地工程”油气资源的重要接替区。其中,下组合的石炭系、二叠系、三叠系和上组合侏罗系是主力勘探开发层系,油气资源量占总量的 64.2%;储层以块状中砾岩、细砾岩及中—细砾

岩为主^[20],储层中大量发育的溶蚀型次生孔隙和裂缝,具有埋藏深(7 000~9 000 m)、温度高(大于 160 ℃)、压力高(140 MPa 以上)、低渗(渗透率 0.01~113.00 mD)等特征^[21-26]。针对上述储层特征,近年来中国石化在油气测试工具可靠性保障、测试制度优化、测试资料录取质量提升和测试资料精细解释评价等方面开展技术攻关,形成了以“精良工具+精心施工+精准资料+精细解释”为特征的准噶尔盆地深层砾岩储层油气测试系列技术。根据油气测试目的、深度、井况等不同因素,构建了 2 大类测试管柱(见图 5)。其中,HST 高温高压测试管柱适用于高压或压力系数较小的低渗透储层,APR 耐高温高压测试管柱适用于高压渗透率较好储层。

2020 年以来,该系列技术在准噶尔盆地完成 64 井次测试,取得较好的应用效果。其中,DS1 井石炭系(8 077~8 093 m)地层压力 126 MPa,测试井温 190 ℃,获得的测试资料进一步揭示了准噶尔盆

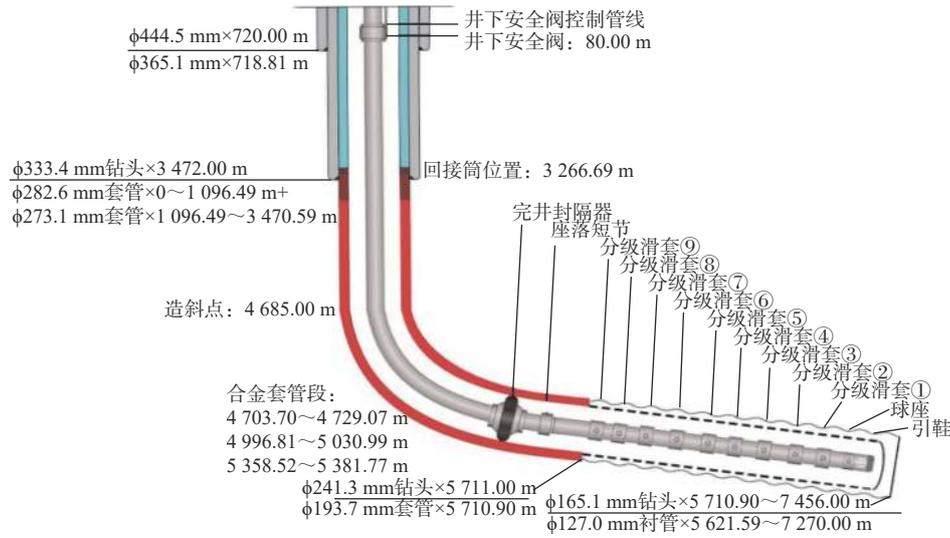


图4 超长水平段水平井滑套分流完井试气管柱

Fig.4 Gas testing string for sliding sleeve diversion completion in ultra-deep horizontal wells with long horizontal section

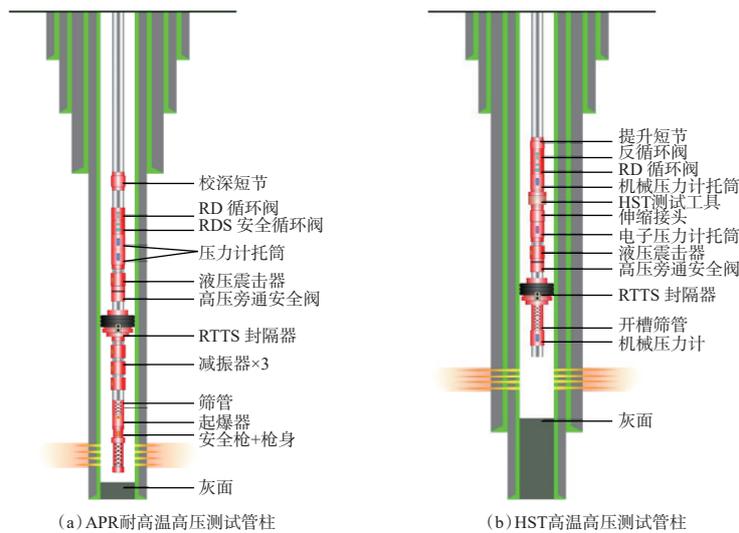


图5 准噶尔盆地深层砾岩储层油气测试技术管柱

Fig.5 Oil and gas testing string for a deep conglomerate reservoir in the Jungar Basin

地深层砾岩储层勘探开发潜能。HS5 井风城组压裂后测试获日产油量 95.8 m^3 、日产气量 $6\ 869 \text{ m}^3$ ，首次在准噶尔盆地山前逆掩带下取得重大突破。

1.4 超高温高压井下测试工具

超高温高压井下测试工具是“深地工程”实现油气测试安全高效的基础，其中封隔器又是安全测试施工的关键。近年来，随着“深地工程”的不断优化，井下测试工具已由“标准区”转至“定制区”，通过不断进行极端工况下的工具结构优化设计^[27]、深化极小空间条件下高精度有限元模拟和采用高性能新型弹性密封材料，形成了多系列、多规格的高温高压高性能封隔器(部分参数见表1)，获

授权各类专利 40 余件。

上述封隔器已在现场应用超过 500 余井次，实现了高端完井封隔器“中国造”，解决了塔里木盆地、四川盆地、准噶尔盆地等“深地工程”勘探开发的“卡脖子”难题。如 SSC-SHLR 液压完井封隔器用于 YJ3-3XC 井完井测试，SSC-JMR 机械封隔器用于 SHB21X 井测试，为高温高压超深井测试取得成功提供了支撑。

1.5 地面测试技术

“深地工程”油气储层地面测试面临着井口压力和产量高、地层产出砂、钻井液固相颗粒对设备冲蚀伤害大，以及硫化氢、二氧化碳等有毒有害气体

表 1 中国石化系列超高温高压油气测试封隔器参数 (部分)

Table 1 Parameters for Sinopec series ultra-high-temperature and high-pressure oil and gas testing packers (part)

工具名称	适用套管内径/mm	最大外径/mm	最小内径/mm	最大压差/MPa	最大耐温/℃	坐封方式	解封方式
SSC-JMR机械封隔器	108.6~112.0	103.0	38.5/45.0	105	204	机械	上提回收
	114.3	108.0	38.5/45.0	105	204	机械	上提回收
	147.1	137.9	28.0/52.5	105	204	机械	上提回收
	152.5~154.8	146.0	30.0/57.0	105	204	机械	上提回收
	171.5	162.0	28.0/57.0	105	204	机械	上提回收
SSC-SHLR/HLR 液压完井封隔器	114.3	108.0	57.4	105	204	液压	上提/专用工具回收
	147.1	139.0	75.5	105	204	液压	上提/专用工具回收
	152.5~154.8	148.0	76.2	105	204	液压	上提/专用工具回收
	171.5	160.0	82.6	105	204	液压	上提/专用工具回收
SSC-ESET 液压永久封隔器	114.3	108.0	57.4	105	204	液压	不可回收
	118.6~121.4	114.0	62.0	105	204	液压	不可回收
	152.5~154.8	148.0	76.2	105	204	液压	不可回收
K343裸眼 封隔器		140.0	70.0	70	177	液压	不可回收
		152.0	70.0	70	177	液压	不可回收
PHP-3封隔器	114.3	108.0	49.0	70	204	液压	上提回收
	152.5~154.8	148.0	76.2	70	204	液压	上提回收
大通径测试阀	≥152.5	105.0	50.0	210	232	液压	

体逸散控制等难题,通过开展高压区域控制自动化、多级节流降压、复合除冰堵、全程防刺蚀、数据采集自动化、在线除硫、残酸中和处理等方面的技术攻关,配置了以“140 MPa+105 MPa+105 MPa”为主的地面测试装备,形成了塔里木盆地、准噶尔盆地和四川盆地典型的地面测试技术(3大盆地的地面测试流程有相同之处,准噶尔盆地和四川盆地的流程基本一致;塔里木盆地和四川盆地的地面测试流程见图6),有效降低了作业人员安全风险,现场应用200余井次,实现了零事故、零伤害,保障了ZH1井、YB13井、RT1井、SHB4-12H井、YJ3-3XC井、DS1井等高压高产高含硫重点勘探井地面测试的安全。

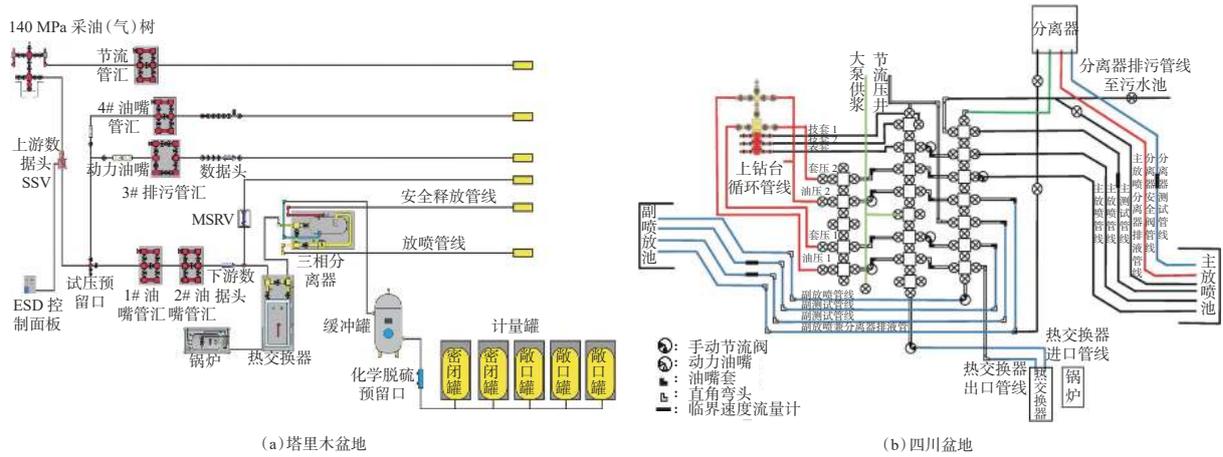
1.6 窄安全窗口油气井测试工程设计技术

“深地工程”针对的是构造复杂、埋藏深、压力安全窗口窄的储层,井下恶劣工况使油气测试管柱在井下的受力十分复杂,较长的钻井周期使技术套管磨损偏大,油气测试施工安全和质量风险明显增大。通过开展套管磨损预测、油气测试管柱三轴

应力校核、固井水泥环评价及井筒附件完整性评估方法^[28-29]等方面的研究,以油气井完整性整体保障的理念,综合优化管柱结构、封隔器坐封位置、环空操作压力这3个关键节点,计算测试管柱和套管柱在各种工况下的安全系数,明确整个油气测试过程中各作业工况下的“强度短板”,提出应对措施,形成窄安全窗口油气井测试工程设计技术,如图7所示。准确详尽的工程设计是确保测试过程安全、高效的起点,截至目前,“深地工程”油气测试完井施工一次成功率已经由81%提高至90%。

1.7 完井测试液技术

针对超深井地质不确定因素多、完井液稳定性差、固相含量高、高温流变性难调控及酸性气污染等技术难点,进行了抗高温两性离子降滤失剂、高温高密度降黏剂、纳米疏水抑制剂及颗粒有效堆积配比等方面的研究,结合现场应用效果评价,初步形成了满足8000 m以深油气井的完井液,可满足温度170~200℃、压力系数1.30~2.40的超深储层完井测试施工。截至目前,该技术现场应用60余

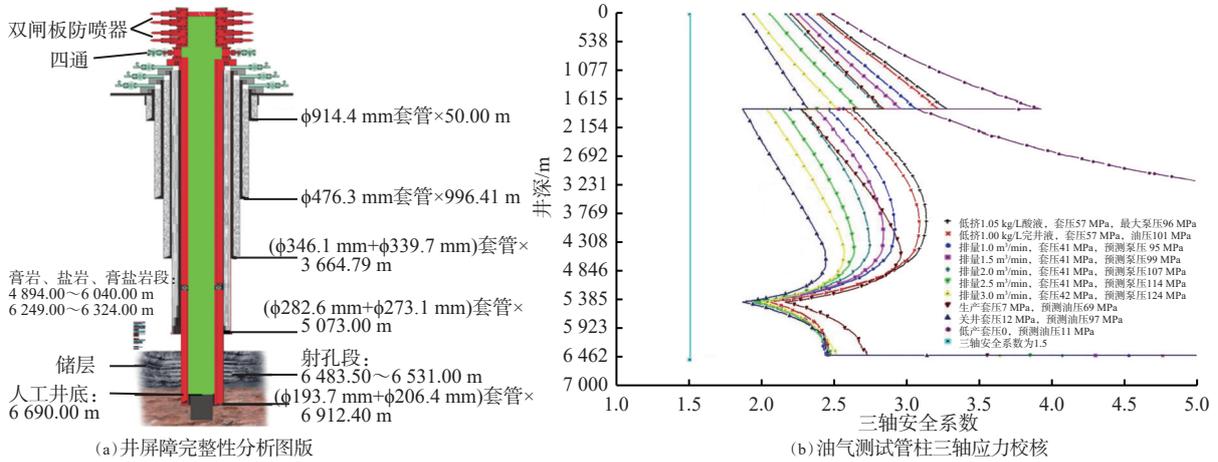


(a)塔里木盆地

(b)四川盆地

图6 中国石化“深地工程”地面测试流程示意

Fig.6 Ground testing process for Sinopec's "Deep Underground Engineering"



(a)井屏障完整性分析图版

(b)油气测试管柱三轴应力校核

图7 窄安全窗口油气井测试工程设计技术

Fig.7 Design technology for oil and gas well testing engineering of narrow safety window

井次,有效提高了中国石化“深地工程”完井测试成功率,为超深层油气勘探提供了有力的技术支撑。

1.8 全过程质量控制体系

质量控制体系包括高温高压井下工具维保检验、入井工具多级清单检查、气密封检测和工具连接用液压管钳扭矩检测标定等环节。其中,通过井下工具冲蚀、信封曲线验证、极限高—低温度循环、极限压力反转及压力-拉力复合受力等室内评价,验证了井下工具在各类极端工况下的稳定性。

2018年,中国石化在新疆轮台开始建设高温高压井下工具实验室,满足封隔器、桥塞等5大类井下工具的检测需求。该实验室全面采用API SPEC 11D1、API SPEC 19AC和API SPEC 19TT等国际标准,结合“深地工程”油气测试需求,形成了高温高压井下工具检测技术。目前,该实验室能实现温度260℃、液压210MPa、气压140MPa、载荷3500kN

和φ244.5mm内规格工具的室内模拟试验,可满足井下封隔器API V6-V0级密封性检测要求。截至目前,累计完成439样次高温高压井下工具检测,发现不合格项237项。经过检测合格的测试完井工具现场应用一次成功率由74%提高至94%,为“深地工程”油气测试提供了一道强力的质量屏障。

2 面临的技术挑战

随着“深地工程”不断向9000m乃至10000m以深迈进,亟需开展一系列地质和工程难题攻关研究,也需不断迭代升级现有油气测试技术,以实现有效发现和保护油气藏、识别和评价油气藏、提高单井产量和储层动用的目的,保障中国石化“深地工程”油气资源的高效开发。目前,主要面临以下几个方面的技术挑战:

1) 深层储层地质条件苛刻。目前,对深层特深层油气资源储层地质复杂程度认识仍存在不足,深层特深层构造复杂、储层温度高、压力高、非均质性极强且难以连通,对储层打开前后的认识手段有限。高温、高压、超深及各类腐蚀性介质会对井下工具、管柱、井口设备造成不同程度的损害,需要继续完善目前的损害评估方法。2020年,由于对YB701井复杂储层和井筒条件认识不足,完成射孔后酸压阶段出现油管断脱的井下故障,后期通过长逾400 d的打捞、套铣等处理作业,成功完成侧钻施工。

2) 工艺技术配套有待加强。深层特深层地质条件复杂,尤其是边缘区域预探井和邻井参考资料不足,实际钻遇地层与地质设计差异大,现有地震、钻井和测录井资料无法为完井测试方案和设计提供有效参考^[30]。选择相应工艺进行油气测试时还存在不配套的情况,如超深复杂酸性油气藏测试压井材料不配套,存在固相沉淀埋卡封隔器、射孔枪等风险;追求深穿透射孔时,过大的爆轰能量易造成管柱断脱;致密储层酸压改造压力高,多次振荡挤注会导致管柱疲劳断脱;万米特深层油气测试的井完整性评价技术不完善等^[31-32]。

3) 地面装备配套有待升级。“深地工程”油气井最高关井压力已达131.79 MPa,地层最高破裂压力达260 MPa、井口施工压力达135.2 MPa,现有140 MPa地面控制系统存在压力级别低、自动化程度不高等问题,施工风险高,有待升级配套^[33-34]。

4) 完井测试工具体性能仍需攻关。井下工具抗高温、高压、酸性气体和化学腐蚀能力不足;还缺乏适用于 $\phi 139.7$ mm以下套管高性能油气测试封隔器的配套工具,封隔器、测试阀、电子压力计等测试工具的性能难以满足储层温度高于230 °C、地层破裂压力高于260 MPa等极限指标。

5) 完井测试工作液适用性有待增强。目前在用的高温酸液体系单一,不能完全满足缓速、缓蚀的需要,加重酸液摩阻大,亟需开展耐温180 °C以上具有缓蚀、缓速、低摩阻性能的酸液体系的研究。温度190 °C条件下,超高温测试工作液地面试验10 d时性能即发生变化,不能满足井内长时间(20 d)静置不沉淀要求;甲酸盐类无固相压井液在高温高压下管柱腐蚀机理不明,地面无法真实模拟井下状况。

3 技术展望

在初步形成中国石化“深地工程”油气测试关

键技术体系的基础上,针对地层温度200 °C以上、地层压力180 MPa以上特深层油气复杂地质条件下的挑战及油气测试技术提升需求,今后将围绕“下得去、封得严、测得准、打得开、关得上、起得出”的目标,进一步开展测试工程设计技术、油气测试工艺技术、超高温高压井下工具及地面流程自动化升级等攻关,助力“深地工程”高质量勘探效益开发。

1) 特深层高温高压油气测试工程设计技术。针对特深层油气测试井下管柱受力复杂性大幅增加、井筒完整性更难保全,导致测试工程设计安全窗口急速收窄的问题,需开展“深地工程”井完整性评价与恢复技术、管柱振动和交变载荷力学响应预测技术、射孔爆轰管柱振动评价技术、井口抬升风险预测技术等关键技术攻关,形成适用于特深层的超深超高温高压油气井测试技术,夯实“深地工程”油气测试的技术基础。

2) 特深层高温高压油气测试完井技术。针对特深层温度和压力更高、酸性高的复杂测试环境,需开展万米特深层油气测试技术、超深层油气测试联作技术及超深层碳酸盐岩储层裸眼分段完井技术等关键技术攻关,提高油气测试完井施工的安全性和准确性。

3) 地面自动化测试技术。在多功能一体高压远程控制超高压地面测试流程基础上,需开展整体式自动化高压、超高压地面测试技术、“一键式”全流程自动化集群控制技术、175 MPa地面测试配套设备研制等技术攻关,实现高压区管汇无人化控制、自动计量、实时在线监测流体性质并自动记录、自动控制油气分离器及热交换器,推进地面测试技术向自动化、智能化方向发展。

4) 高性能油气完井测试工具。针对特深层储层特征,攻关232 °C/105~140 MPa V0等级液压封隔器、140 MPa井下安全阀、260 °C/260 MPa测试阀等高性能工具研发,形成多规格、多系列超高温高压油气测试工具。按照220 °C/100 h的技术要求,开展超高温超高压射孔枪、射孔弹、起爆及传爆配套火工系统试验评价及攻关,为特深层射孔提供技术保障,配套升级相关工具检测试验装置设施,进一步完善工具检测技术,为“深地工程”勘探开发提供攻坚利器。

5) 抗高温完井测试工作液。针对现有测试工作液耐温性能低、高温悬浮稳定性差及无固相压井液高温腐蚀管材等问题,需攻关240 °C、密度1.40~2.60 kg/L、20 d不沉淀的测试工作液及240 °C、密度

1.10~1.80 kg/L的抗分解低腐蚀无固相压井液等2项技术,为深层超深层油气测试提供良好作业环境,降低储层污染,保障“深地工程”油气测试成功率。

4 结束语

深层超深层乃至特深层油气资源已成为国家能源增储上产的重要阵地。经过多年技术攻关,中国石化井下测试技术、超高温高压井下完井测试工具技术、地面测试技术、窄安全密度窗口油气井测试工程设计技术和全过程质量控制技术等关键技术不断迭代升级,有力支撑了中国石化“深地工程”建产。下一步,要以塔里木盆地、四川盆地和准噶尔盆地等地为对象深入推进地质工程一体化,加强安全、环保、自动化和智能化的完井测试设备、材料和工具研发应用,探索形成适合于不同区块、不同储层特征的特深层油气测试技术,提升深地工程的勘探开发效率和效益。

参 考 文 献

References

- [1] 陆晓如. 破解深地油气关键地质问题: 专访中国科学院院士贾承造[J]. 中国石油石化, 2023, (17): 14-17.
LU Xiaoru. To solve the key geological problems of deep oil and gas: interview with Jia Chengzao, academician of Chinese Academy of Sciences[J]. China Petrochem, 2023, (17): 14-17.
- [2] 张锦宏, 周爱照, 成海, 等. 中国石化石油工程技术新进展与展望[J]. 石油钻探技术, 2023, 51(4): 149-158.
ZHANG Jinhong, ZHOU Aizhao, CHENG Hai, et al. New progress and prospects for Sinopec's petroleum engineering technologies[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2023, 51(4): 149-158.
- [3] 李阳, 薛兆杰, 程喆, 等. 中国深层油气勘探开发进展与发展方向[J]. 中国石油勘探, 2020, 25(1): 45-57.
LI Yang, XUE Zhaojie, CHENG Zhe, et al. Progress and development directions of deep oil and gas exploration and development in China[J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(1): 45-57.
- [4] 贾承造. 含油气盆地深层—超深层油气勘探开发的科学技术问题[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2023, 47(5): 1-12.
JIA Chengzao. Key scientific and technological problems of petroleum exploration and development in deep and ultra-deep formation[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2023, 47(5): 1-12.
- [5] 马永生, 蔡勋育, 云露, 等. 塔里木盆地顺北超深层碳酸盐岩油气田勘探开发实践与理论技术进展[J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(1): 1-17.
MA Yongsheng, CAI Xunyu, YUN Lu, et al. Practice and theoretical and technical progress in exploration and development of Shunbei ultra-deep carbonate oil and gas field, Tarim Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49(1): 1-17.
- [6] 张煜, 李海英, 陈修平, 等. 塔里木盆地顺北地区超深断控缝洞型油气藏地质-工程一体化实践与成效[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(6): 1466-1480.
ZHANG Yu, LI Haiying, CHENG Xiuping, et al. Practice and effect of geology-engineering integration in the development of ultra-deep fault-controlled fractured-vuggy oil/gas reservoirs, Shunbei Area, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(6): 1466-1480.
- [7] ZHANG Bo, YUAN Fayong, SU Hao, et al. Progress and development direction of “three-high” oil and gas well testing technology[J]. Journal of Power and Energy Engineering, 2022, 10(6): 1-13.
- [8] 张科, 苏劲, 陈永权, 等. 塔里木盆地寒武系—奥陶系生源岩油源特征与超深层油气来源[J]. 地质学报, 2023, 97(6): 2026-2041.
ZHANG Ke, SU Jin, CHEN Yongquan, et al. The biogeochemical features of the Cambrian-Ordovician source rocks and origin of ultra-deep hydrocarbons in the Tarim Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2023, 97(6): 2026-2041.
- [9] 陈宗琦, 刘湘华, 白彬珍, 等. 顺北油气田特深井钻井完井技术发展与发展思考[J]. 石油钻探技术, 2022, 50(4): 1-10.
CHEN Zongqi, LIU Xianghua, BAI Binzhen, et al. Technical progress and development consideration of drilling and completion engineering for ultra-deep wells in the Shunbei Oil & Gas Field[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2022, 50(4): 1-10.
- [10] 白彬珍, 曾义金, 葛洪魁. 顺北56X特深水平井钻井关键技术[J]. 石油钻探技术, 2022, 50(6): 49-55.
BAI Binzhen, ZENG Yijin, GE Hongkui. Key technologies for the drilling of ultra-deep horizontal Well Shunbei 56X[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2022, 50(6): 49-55.
- [11] 何成江, 姜应兵, 文欢, 等. 塔河油田缝洞型油藏“一井多控”高效开发关键技术[J]. 石油钻探技术, 2022, 50(4): 37-44.
HE Chengjiang, JIANG Yingbing, WEN Huan, et al. Key technologies for high-efficiency one-well multi-control development of fractured-vuggy reservoirs in Tahe Oilfield[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2022, 50(4): 37-44.
- [12] 耿宇迪, 蒋廷学, 刘志远, 等. 深层缝洞型碳酸盐岩储层水力裂缝扩展机理研究[J]. 石油钻探技术, 2023, 51(2): 81-89.
GENG Yudi, JIANG Tingxue, LIU Zhiyuan, et al. Mechanism of hydraulic fracture propagation in deep fracture-cavity carbonate reservoirs[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2023, 51(2): 81-89.
- [13] 刘洪涛, 刘举, 刘会锋, 等. 塔里木盆地超深层油气藏试油与储层改造技术进展及发展方向[J]. 天然气工业, 2020, 40(11): 76-88.
LIU Hongtao, LIU Ju, LIU Hui Feng, et al. Progress and development direction of production test and reservoir stimulation technologies for ultra-deep oil and gas reservoirs in Tarim Basin[J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(11): 76-88.
- [14] 王清华, 杨海军, 汪如军, 等. 塔里木盆地超深层走滑断裂控大油气田的勘探发现与技术创新[J]. 中国石油勘探, 2021, 26(4): 58-71.
WANG Qinghua, YANG Haijun, WANG Rujun, et al. Discovery and exploration technology of fault-controlled large oil and gas fields of ultra-deep formation in strike slip fault zone in Tarim Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(4): 58-71.
- [15] 邱金平, 张明友, 才博, 等. 超深高温高压含硫化氢气藏高效试油技术新进展[J]. 钻采工艺, 2018, 41(2): 49-50.

- QIU Jinping, ZHANG Mingyou, CAI Bo, et al. New advancements in ultra-deep HPHT sour gas well testing[J]. *Drilling & Production Technology*, 2018, 41(2): 49–50.
- [16] 戴强, 张本健, 张晋海. 双鱼石构造超超高压含硫气井完井管柱完整性设计探讨[J]. *钻采工艺*, 2019, 42(6): 44–46.
DAI Qiang, ZHANG Benjian, ZHANG Jinhai. To probe on completion string integrity design for ultra-deep ultrahigh-pressure sulfur-contained gas wells at Shuangyushi structure[J]. *Drilling & Production Technology*, 2019, 42(6): 44–46.
- [17] 袁建强. 中国石化页岩气超长水平段水平井钻井技术新进展与发展建议[J]. *石油钻探技术*, 2023, 51(4): 81–87.
YUAN Jianqiang. New progress and development proposals of Sinopec's drilling technologies for ultra-long horizontal shale gas wells[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2023, 51(4): 81–87.
- [18] 李涛, 苏强, 杨哲, 等. 川西地区超深井钻井完井技术现状及攻关方向[J]. *石油钻探技术*, 2023, 51(2): 7–15.
LI Tao, SU Qiang, YANG Zhe, et al. Current practices and research directions for drilling and completion technologies for ultra-deep wells in Western Sichuan[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2023, 51(2): 7–15.
- [19] 刘志英, 王芝尧, 董拥军, 等. 一趟管柱分层射孔试油联作技术[J]. *石油钻探技术*, 2014, 42(2): 97–101.
LIU Zhiying, WANG Zhiyao, DONG Yongjun, et al. The technology of integrated layered perforation and formation testing in one trip[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2014, 42(2): 97–101.
- [20] 赵永强, 宋振响, 王斌, 等. 准噶尔盆地油气资源潜力与中国石化常规-非常规油气一体化勘探策略[J]. *石油实验地质*, 2023, 45(5): 872–881.
ZHAO Yongqiang, SONG Zhenxiang, WANG Bin, et al. Resource potential in Junggar Basin and Sinopec's integrated exploration strategy for conventional and unconventional petroleum[J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2023, 45(5): 872–881.
- [21] 李继, 卫然, 蒋炎. 勘探试油测试新技术在胜利油田的应用[J]. *石油天然气学报*, 2008, 30(2): 502–504.
LI Ji, WEI Ran, JIANG Yan. Application of new exploration and testing technologies in Shengli Oilfield[J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2008, 30(2): 502–504.
- [22] 阿布力米提·依明. 准噶尔盆地中央坳陷西部深层油气成因与成藏机理[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2021.
ABULIMITI Yiming. Generation and accumulation of deep-seated oil and gas in the western central depression of Junggar Basin[D]. Qingdao: China University of Petroleum(East China), 2021.
- [23] 孙靖, 齐洪岩, 薛晶晶, 等. 准噶尔盆地深层—超深层致密砾岩储层特征及控制因素[J]. *天然气工业*, 2023, 43(8): 26–37.
SUN Jing, QI Hongyan, XUE Jingjing, et al. Characteristics and controlling factors of deep and ultra deep tight conglomerate reservoirs in the Junggar Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2023, 43(8): 26–37.
- [24] 史建南. 准噶尔盆地腹部油气成藏机理研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2007.
SHI Jiannan. Study on hydrocarbon accumulation mechanism in the hinterland of the Junggar Basin[D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2007.
- [25] 汪孝敬, 白保军, 芦慧, 等. 深层—超深层高温极强超压砂砾岩储层特征及主控因素: 以准噶尔盆地南缘四棵树凹陷高泉地区白垩系清水河组为例[J]. *东北石油大学学报*, 2022, 46(3): 54–65.
WANG Xiaojing, BAI Baojun, LU Hui, et al. Characteristics and main controlling factors of deep and ultra-deep glutenite reservoirs with high temperature and very strong overpressure: a case study from the Cretaceous Qingshuihe Formation in Gaoquan Area, Sike-shu Sag, southern margin of Junggar Basin[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2022, 46(3): 54–65.
- [26] 吴志均, 段德祥, 王文广, 等. 明格布拉克构造“五高”深井试油测试技术[J]. *油气井测试*, 2020, 29(2): 13–20.
WU Zhijun, DUAN Dexiang, WANG Wenguang, et al. The oil test technology for “five high” deep well in Mingbulak Structure[J]. *Well Testing*, 2020, 29(2): 13–20.
- [27] 毛军, 郭肖, 庞伟. 高温高压气密封测试封隔器研发及现场试验[J]. *石油钻探技术*, 2023, 51(6): 71–76.
MAO Jun, GUO Xiao, PANG Wei. Development and application of HTHP gas seal test packer[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2023, 51(6): 71–76.
- [28] 丁士东, 陆沛青, 郭印同, 等. 复杂环境下水泥环全生命周期密封完整性研究进展与展望[J]. *石油钻探技术*, 2023, 51(4): 104–113.
DING Shidong, LU Peiqing, GUO Yintong, et al. Progress and prospect on the study of full life cycle sealing integrity of cement sheath in complex environments[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2023, 51(4): 104–113.
- [29] 姚展华, 王玉忠, 左俊香, 等. 浅谈试油设计的优化[J]. *油气井测试*, 2014, 23(1): 46–48.
YAO Zhanhua, WANG Yuzhong, ZUO Junxiang, et al. Brief discuss on the optimization of oil test design[J]. *Well Testing*, 2014, 23(1): 46–48.
- [30] 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 Xiao, CHEN Gengsheng, WU Jianfa, 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.
- [31] WOOD P, SIMPSON A, HOLLAND B, et al. Monitoring flow and completion integrity of a North Sea subsea HPHT appraisal well during an extended well test using permanently installed fiber-optic temperature sensors[R]. SPE 137120, 2010.
- [32] FUH G F, NOZAKI M. Completion design using sand management approach based on sanding prediction analysis for HPHT gas wells[R]. SPE 170954, 2014.
- [33] OAKES N E. HPHT, development of the subsea option[R]. OTC 8741, 1998.
- [34] BURGER R, GRIGSBY T, ROSS C, et al. Single-trip multiple-zone completion technology has come of age and meets the challenging completion needs of the gulf of Mexico's deepwater lower tertiary play[R]. SPE 128323, 2010.