

引用格式:唐磊,王建峰,曹敬华,等.塔里木盆地顺北地区超深断溶体油藏地质工程一体化模式探索[J].油气藏评价与开发,2021,11(3):329-339.

TANG Lei, WANG Jianfeng, CAO Jinghua, et al. Geology-engineering integration mode of ultra-deep fault-karst reservoir in Shunbei area, Tarim Basin[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2021, 11(3):329-339.

DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2021.03.007

塔里木盆地顺北地区超深断溶体油藏地质工程一体化模式探索

唐磊¹,王建峰²,曹敬华²,杨敏²,李双贵²

(1.中国石化油田勘探开发事业部,北京 100728;2.中国石化西北油田分公司,新疆乌鲁木齐830011)

摘要:塔里木盆地顺北地区勘探开发实践表明,该区油气资源丰富,但油藏埋藏深,油气富集程度差异大,油藏类型复杂,上覆多套地层存在易漏失、易垮塌等工程难题,给该地区高效开发带来了极大挑战。为扩大该区油气规模,实现高效开发,重点在组织管理、工作模式等方面开展了探索,初步形成了管理模式及井位论证、井型设计、安全钻井及高效完井等关键环节的主要做法和相应技术。探索成果对该区及类似超深断溶体油藏高效开发具有指导和借鉴意义。

关键词:超深;探索;断溶体;地质工程一体化;顺北地区;塔里木盆地

中图分类号:TE344

文献标识码:A

Geology-engineering integration mode of ultra-deep fault-karst reservoir in Shunbei area, Tarim Basin

TANG Lei¹, WANG Jianfeng², CAO Jinghua², YANG Min², LI Shuanggui²

(1.Sinopec Oilfield Exploration and Production Department, Beijing 100728, China;

2.Sinopec Northwest Oilfield Company, Urumqi, Xinjiang 830011, China)

Abstract: The exploration and development practice in Shunbei area of Tarim Basin shows that oil and gas resource there is rich. However, the reservoir is deeply buried, the degree of oil and gas enrichment varies greatly, the reservoir type is very complex, and the overlying strata has the engineering problems such as easy leakage and collapse. All these problems above bring great challenges to the efficient development in this region. In order to expand the scale of oil and gas and realize the efficient development, the exploration in organizational management and work model has been carried out. The main practices and corresponding technologies of key links such as management mode, well position demonstration, well type design, safe drilling and effective well completion have been initially formed. The research will give reference for development of the ultra-deep fault-karst reservoirs in this area and similar reservoirs.

Key words: ultra-deep, exploration, fault-karst, geology-engineering integration, Shunbei area, Tarim Basin

随着中国经济的快速发展,国内对石油需求快速增长,石油对外依存度逐年升高,2019年石油对外依存度已突破70%国际警戒线,而这一趋势短期不会改变,国家能源安全面临极大挑战。近年来,随着国内新发现油气资源品质的劣质化和老油田开发进入中后期,勘探开发面临巨大挑战,亟须破解这一难

题的新理念、新方法、新技术。随着北美地区页岩油大规模开发^[1],推动了多学科融合、多技术集成的地质工程一体化模式。这一模式也给国内复杂油气藏开发带来了启示,国内借鉴这一模式在特殊类型油藏、复杂油气藏、非常规油气藏相继开展攻关、试验、推广。在南海海相页岩气、塔里木盆地致密气、深层

收稿日期:2021-02-02。

第一作者简介:唐磊(1972—),男,本科,高级工程师,主要从事油气田开发研究与管理。地址:北京市朝阳区中国石化油田勘探开发事业部油气田开发室,邮政编码:100728。E-mail:tanglei@sinopec.com

基金项目:“十三五”国家科技重大专项“塔里木盆地碳酸盐岩油气田提高采收率关键技术示范工程”(2016ZX05053)。

复杂气田、冀中拗陷古潜山油藏、准噶尔盆地页岩油、鄂尔多斯盆地致密砂岩气藏、长宁页岩气国家示范区、昭通页岩气国家示范区、威远页岩气田、大港油田等多盆地多油气田相继实现效益勘探开发^[2-13]。

2015年西北油田在创新的塔河“断溶体”理论指导下,部署在顺北地区1号断裂带上的顺北AH井在奥陶系一间房组发生失返性漏失,完井试油获得高产工业油气流,实现了顺北油田重大突破。此后相继部署的6口评价井在2016年先后钻遇漏失或放空,完井试油全部获得高产工业油气流,由此发现了顺北油气田,初步估算该地区油气资源量 17×10^8 t油当量^[14]。但该区目的层埋藏深,上覆地层条件复杂,给储集体识别、安全钻井、高效完井均构成极大风险。要高效开发该特殊类型、复杂、超深断溶体油气田,就需要打破常规,创新适合于该类型油藏的特殊工作模式。中国石化西北油田面对该特殊开发对象,率先开展了地质工程一体化探索,初步形成一套与油藏类型相适应的工作模式和技术方法。

1 区域地质特征

顺北地区地处塔克拉玛干沙漠腹地,构造上位

于顺托果勒低隆起,其东南延伸至古城墟隆起的顺南斜坡,处于南北两隆(沙雅隆起、卡塔克隆起)、东西两拗(阿瓦提拗陷、满加尔拗陷)之间的似“马鞍形”低隆起上(图1)。相比南北两大隆起区,顺北地区长期位于构造低部位,奥陶系目的层埋深在7 200 m以深^[5],属于超深油气藏。

该区受控于塔里木盆地的整体演化,主要经历4次主要构造运动:①奥陶纪至泥盆纪末的加里东中晚期—海西早期运动;②晚二叠世末的海西晚期运动;③三叠纪至白垩纪末的印支—燕山运动;④中新世以来的喜马拉雅运动。在多期构造运动中发育不同级别、组系、期次叠加的断裂,目前识别出18个有利断裂带。多期构造运动在不同时期,对该区地层产生了不同程度的改造。根据钻井揭示,顺北地区上覆地层不同程度缺失,但目的层奥陶系整体相对完整,奥陶系可细为上统桑塔木组(O_{3s})、良里塔格组(O_{3l})及恰尔巴克组(O_{3q}),中统一间房组(O_{2yj}),中一下统鹰山组(O_{1-2y})(表1)。多期构造活动形成的断裂为储层发育、油气运移和富集奠定了基础。

研究区发育良好生储盖组合。本地发育玉尔吐斯组烃源岩,生成的高成熟轻质油气沿着深大断裂向上垂向运移,在奥陶系碳酸盐岩地层,遇受多期构

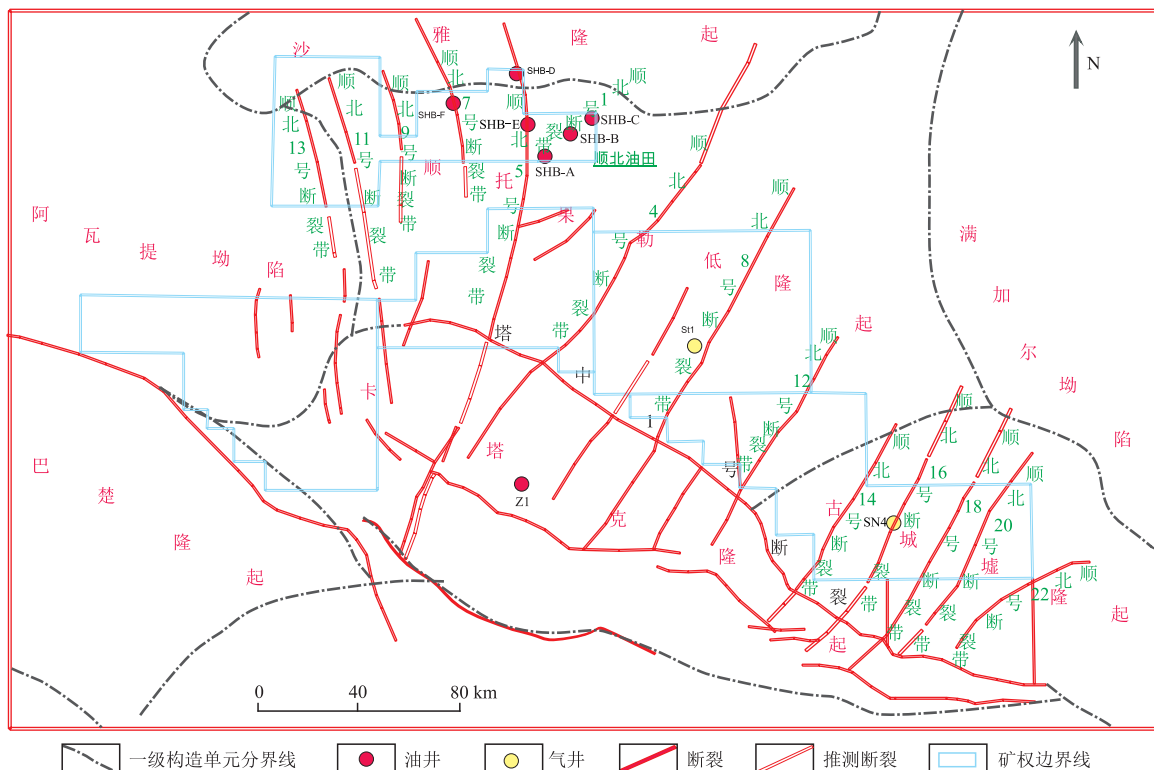


图1 顺北地区构造位置及主要断裂分布

Fig. 1 Structure location and distribution of main faults in Shunbei area

造运动及岩溶作用影响发育多期洞穴、裂缝及溶蚀孔洞等储集空间而聚集。奥陶系顶部石炭系下统巴楚组泥质岩、奥陶系上统致密灰岩、灰质泥岩以及其周围致密基质灰岩形成良好的顶封和侧向封挡,形成良好盖层^[15-16]。本区良好的生储盖组合为在该区形成大型油气藏提供了可能。

2 油藏特征

顺北油田油藏类型为“断溶体油藏”,受多期构造破裂作用控制,发育在厚层碳酸盐岩内部,叠加后期埋藏流体的改造作用形成。

表1 顺北油田钻井揭示地层
Table 1 Stratigraphic characteristics revealed by drilling in Shunbei Oilfield

地层系统				代号	岩性特征
界	系	统	组群		
新生界	第四系			Q	灰黄色粗砂,夹浅灰黄色粉砂质黏土、杂色砾岩
	新近系	上新统	库车组	N _k	厚层状灰黄色、黄褐色细粒砂岩、粉砂岩,夹薄层褐灰色泥岩
			康村组	N _k	灰、褐灰色泥质粉砂岩与黄灰、红褐、褐灰色色泥岩呈不等厚互层
	渐—古新统	中新统	吉迪克组	N _j	上部为蓝灰色泥岩与棕色粉砂岩、细砂岩略等厚互层,下部以棕色泥岩、膏质泥岩、粉砂质泥岩为主,夹棕色粉砂岩、细粒砂岩
			苏维依组	E _{ss}	棕色泥岩与浅棕色细粒砂岩、泥质粉砂岩略等厚互层
古近系		库木格列姆群	E _{1-2km}	棕红色细粒砂岩夹浅棕色泥岩、粉砂质泥岩	
中生界	白垩系	下统	巴什基奇克组	K _{1bs}	上部为浅灰色、棕色细粒砂岩、泥质粉砂岩夹棕褐色泥岩,中部为浅灰色、棕色细粒砂岩、泥质粉砂岩与棕褐色泥岩等厚互层,下部为浅灰色、棕色细粒砂岩、泥质粉砂岩夹棕褐色泥岩
			卡普沙良群	K _{1kp}	上部棕红色细粒砂岩、泥质粉砂岩夹棕色泥岩,中部为浅棕色细粒砂岩夹棕色泥岩,下部为浅棕色细粒砂岩
	侏罗系	下统		J ₁	剥蚀缺失
			哈拉哈塘组	T _{1h}	上部深灰色泥岩、砂质泥岩夹浅灰色粉细砂岩,下部浅灰色中—细砂岩、粉砂岩与深灰色泥岩不等厚互层
	三叠系	中统	阿克库勒组	T _{2a}	上部深灰色泥岩、灰色粉砂质泥岩夹浅灰色粉砂岩、浅灰色细粒砂岩,下部浅灰色细粒砂岩、含砾砂岩、细砾岩与灰色泥岩略等厚互层
柯吐尔组			T _{1k}	深灰色泥岩、灰色粉砂质泥岩夹灰色泥质粉砂岩,底部为浅灰色砾质中粒长石岩屑砂岩、杂色砂砾岩	
古生界	二叠系	中统		P ₂	上部为灰绿、深灰色英安岩,下部为黑色、灰绿色凝灰岩
			卡拉沙依组	C _{1kl}	上段为棕褐色、灰色泥岩、粉砂质泥岩与浅灰色细粒砂岩、粉砂岩、泥质粉砂岩略等厚互层,即砂泥岩段。下段为棕褐色泥岩、粉砂质泥岩夹浅灰色质粉砂岩,即上泥岩段
	石炭系	下统	巴楚组	C _{1b}	上段黄灰色泥晶灰岩夹灰色泥岩,即“双峰灰岩”段;中段为棕褐色泥岩、粉砂质泥岩,即“下泥岩段”;下段为棕褐色泥岩与浅灰色细粒砂岩、粉砂岩略等厚互层,即“砂泥岩互层段”
古生界	泥盆系	上统	东河塘组	D _{3d}	灰白色细粒石英砂岩、粉砂岩夹棕褐色泥岩
			塔塔埃尔塔格组	S _t	浅灰色细粒砂岩、粉砂岩、泥质粉砂岩与棕褐色泥岩、粉砂质泥岩不等厚互层
	志留系	下统	柯坪塔格组	S _{1k}	自上而下分为3段:①S _{1k} ³ :浅灰色细粒砂岩夹棕褐色、灰色泥岩,即沥青砂岩段;②S _{1k} ² :深灰色、绿灰色泥岩、粉砂质泥岩,即暗色泥岩段;③S _{1k} ¹ :绿灰、棕褐、灰色泥岩、粉砂质泥岩与灰色泥质粉砂岩、细粒砂岩呈等厚—略等厚互层
			桑塔木组	O _{3s}	上部为灰色泥岩、灰质泥岩与灰色、黄灰色泥灰岩呈略等厚—不等厚互层,下部灰色泥岩夹灰质泥岩,浅灰色凝灰岩、灰绿色辉绿岩
			良里塔格组	O _{3l}	黄灰色泥晶灰岩
奥陶系	上统	恰尔巴克组	O _{3q}	上部为棕褐色泥质灰岩夹灰质泥岩,下部为棕褐色含泥泥晶灰岩	
		一间房组	O _{2yj}	黄灰色泥晶灰岩、砂屑泥晶灰岩、泥晶砂屑灰岩	
		中—下统	鹰山组	O _{1-2y}	浅黄灰色泥晶灰岩、含砂屑泥晶灰岩、砂屑泥晶灰岩

该区主要发育两大断裂体系,北部主要为“X”型剪切体系,南部为单支走滑体系,断裂既是油气运移通道又是储层,规模储层和油气成藏受走滑断裂控制。

储层主要沿断裂带呈线性分布,但又不整体连片,由多个单独断溶体油气藏组成的“断溶体油气藏群”组成;具有平面规模大、宽度小、纵向油气柱高度大等特点^[15-21],储集空间以断控裂缝—洞穴型储层为主(图2),这些特征为井位选择,轨迹设计和控制提出了很高要求。

地面流体性质表现为低密度、低凝固点、低黏度、低硫、含蜡、轻质、挥发性原油(表2)。

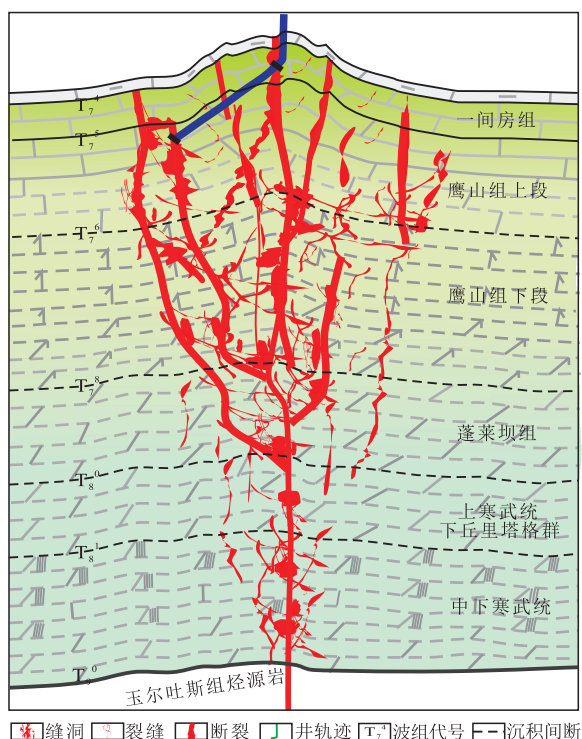


图2 顺北地区断溶体油藏发育模式

Fig. 2 Development model of fault-karst reservoir in Shunbei area

总体来看,顺北断溶体油藏为奥陶系碳酸盐岩裂缝—洞穴型、晚期充注形成的常温、常压、挥发性、未饱和油藏,具有超深(大于7 300 m)、油气柱高度大(500 m)、低凝固点、低黏度、低硫、含蜡、中气油比特征^[19]。

3 区域地质工程难点

顺北地区油藏埋藏超深(大于7 300 m),受断裂控制,流体充注复杂,富集程度差异大。上覆地层存在二叠系易漏失、志留系承压能力低、侵入体易垮塌的问题,目的层古生界存在可钻性差、地层压力系统及岩石特性不明确等问题,这给该地区效益开发带来了极大挑战^[22]。

4 地质工程一体化模式探索

面对顺北地区油藏地质及工程难题,油田技术人员围绕效益开发这一目标不断探索,初步形成了一套适合于该区超深断溶体油藏效益开发的地质工程一体化模式。

4.1 一体化组织机构

地质工程一体化在技术上涉及多个学科,管理上涉及多个部门,因此,组织好地质工程一体化,不仅是一个技术领域的话题,更是一个管理领域的课题,管理对于成败所起的作用可能更具有决定性^[1]。

为做好一体化决策、管理、组织和实施的高效互动,搭建协同作战的一体化管理架构,打破原有“技术条块分割、管理接力进行”模式,做实一体化研究、一体化作业、一体化管理。

构建组织架构:成立地质工程一体化领导小组,

表2 顺北油田1区油气藏特征统计

Table 2 Statistic of oil and gas reservoir characteristics of Block-1 in Shunbei Oilfield

井区	油层深度 (m)	油层静温 (°C)	油层静压 (MPa)	压力 系数	地面原油密度 (g/cm ³)	黏度 (mPa·s)	凝固点 (°C)	含硫量 (%)	含蜡量 (%)	气油比 (m ³ /m ³)	类型
顺北A	7 683	157.34	83.04	1.103	0.8	2.06	-18.0	0.109	6.59	280	挥发油
顺北B	7 640	151.80	85.87	1.146	0.829 0	4.97	-29.6	0.211	3.32	50	轻质油
顺北C	7 405	155.36	81.75	1.120	0.831 0	21.59	-8.5	0.080	3.41	388	轻质油
顺北D	7 557	157.10	87.08	1.176	0.791 6	2.40	-18.0	0.105	2.80	398	挥发油
顺北E	7 768.16	163.29	82.60	1.085	0.799 2	2.68	-17.0	0.118	2.55	517	挥发油
顺北F	7 725.07				0.789 9	2.65	< -34.0	0.107	4.22	354	挥发油

下设办公室、专家组、项目实施组等日常协调、决策、运行机构。领导小组由油田公司主要领导牵头,制定重大决策,掌控全局。办公室由油田公司总经理、分管副总经理任办公室主任、副主任,统筹运作,全面推进。专家组由油田公司技术首席牵头,组织科研院所专家及施工方技术专家共同制定技术方案。项目实施组由勘探、开发、工程技术管理部门负责人共同组织,方案设计方与施工方技术人员融合、甲乙双方互动,共同实施。

制定管理模式:按照“概念方案一体化设计、开发方案一体化优化、方案实施一体化动态优化、学习提升与一体化标准集成”工作模式,整合资源优势,一体化组织实施,多专业协同(图3)。

注重考核监督:办公室根据项目进度,适时对专家组和项目实施组进行考核。对专家组重点考核地质方案、工程方案符合率及对复杂情况制定处理、建议方案反应时间。对项目实施组重点考核方案执行符合率、信息反馈率、关键地层卡取误差及HSE管理情况等,强调在提高质量和效率的同时坚决杜绝井喷失控、人身伤害、环保等事故。

4.2 一体化工作模式

紧紧抓住产建项目从设计到结束各个关键点,围绕一体化目标,不断优化关键工序,初步形成一套工作流程。产建项目关键节点主要包括定井位、选井型、安全钻井、高效完井。

4.2.1 定井位

物探—地质—油藏一体化研究,寻找目标“甜点”。物探—地质一体化选择有利区,油藏—物探一体化确定洞顶、溶洞中心、溶洞边界。在顺北地区,

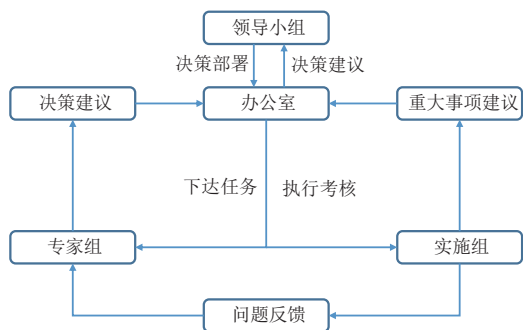


图3 塔里木盆地顺北地区地质工程一体化工作流程
Fig. 3 Work flow of geology-engineering integration in Shunbei area, Tarim Basin

通过大量实钻井资料及正演模型反复论证推演,集成创新了以逆时偏移定中心、分频能量定边界及波阻抗反演定洞顶的单溶洞位置的“三定”技术(图4),提高缝洞一次钻遇率,缩短钻井周期,节约钻井费用。逐步形成了“七步流程八项内容”的布井模式。

布井七步流程:井位排查—优选论证—研讨审核—风险评价—汇报审查—多次深化论证—井位优化调整。

论证8项内容:岩溶地质特征—岩溶单元划分与开发特征—井洞配置缝洞关系—油气富集特征—储量精细复算与分类评估—连通动用状况分析与井网构建—方案设计—风险评估。

4.2.2 选井型

油藏—工程—地面一体化论证,优选最佳井型。

1) 油藏—地面一体化,选择合适的地面钻井场所。重点是油藏与工程确定“甜点”后,依据已有地面系统现状图及卫星遥感图结合地面井口踏勘,避免空中电线,地面树木农田环保区、地下管线等影响因素,结果及时反馈,减少因地面条件不具备产生的现场踏勘工作,加快井位论证速度。踏勘过程从“循环模式”向“交互模式”转变,提高运行时效(图5)。

2) 油藏—钻井工程一体化,选择合适的井型和井身轨迹。根据油藏需要、结合地面条件兼顾工程安全设计井型。对于油藏目标体为单洞体且储量规模支撑效益开发的井点,如果地面满足施工条件,则

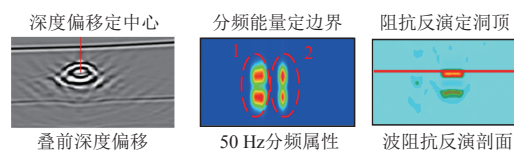


图4 顺北地区“三定”技术识别储集体
Fig. 4 Three identification techniques of reservoir recognition in Shunbei area

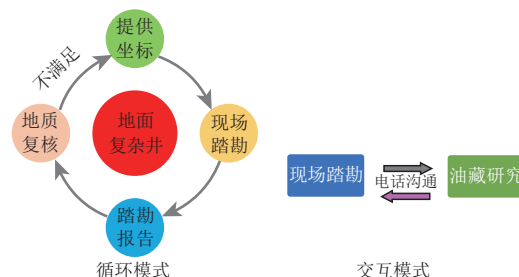


图5 现场踏勘模式
Fig. 5 Field reconnaissance mode

无需移位;如果地质预测无复杂钻遇地层,满足安全钻井要求的设计为直井。当油藏目标体为多洞体或小缝洞集合体,单个体储量规模不满足效益要求的井点,井轨迹要求一次兼顾多个体,或者地面条件复杂,不满足施工条件,则井口需要优化移位;如果地质预测上覆地层可能存在垮、漏频发的复杂钻遇地层时,则需要优化为绕障轨迹,这类井需优化为斜井或水平井。在上述工作基础上,还要考虑后期储层改造的需求,这就需要考虑地层应力方向,综合考虑井口设定、轨迹走向等。

例如SHB-X井(图6),油藏地质人员设计该井目标储集体有2个,分2次动用,油藏技术人员初步设计井口在两个目标储集体右侧,第一目标体钻井轨迹走向为从东向西,与断裂大夹角(图6a)。通过地质工程一体化论证,考虑到该井后期可能实施储层改造,根据该区地应力方向,调整井口位置为两个目标储集体西侧,轨迹走向为从西向东南,与断裂小夹角(图6b)。

4.2.3 安全钻井

1) 地质—油藏—工程一体化融合,设计安全钻井方案。地质设计人员及时将方案部署井分布、部署目的、预期达到的效果、关键设计参数、主要风险预测通报工程设计人员。工程设计人员根据油藏要求和油藏地质情况,提前做好井身结构优化、井眼轨道的设计、选择合适的钻井液体系及相应技术措施,双方及时对接沟通^[22-33]。由传统的“串联”模式向高

效“并联”模式转变,密切结合,数据统一,加快节奏。设计周期可从“串联式”的75 d下降到“并联式”的50 d左右(图7)。

2) 设计—施工一体化,做好现场跟踪、调整。设计思路现场交底,特殊工艺井全程跟踪,施工方参加设计审核。油藏地质及工程人员密切关注现场进展,当实钻与预测存在较大偏差时,根据第一手资料及时修编构造图等图件,及时调整靶点,确保钻达目标体。

4.2.4 高效完井

根据地质和钻井资料,地质工程技术人员共同制定最优完井方案,实现储集体高效沟通动用。规范资料需求,提高油藏工程沟通效率;表单化管理,明确改造地质目标需求,确保工程方案顺利实施,达到油藏要求。在前期资料基础上,归纳、总结,建立

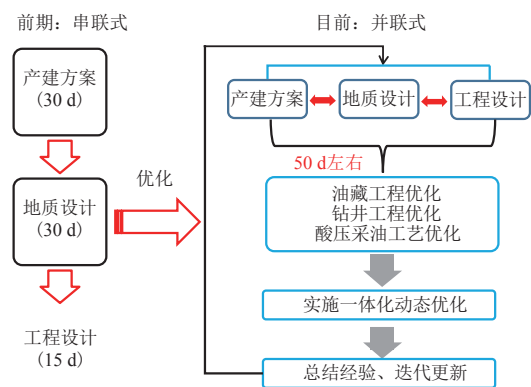


图7 方案设计运行模式对比

Fig. 7 Comparison of program design and operation mode

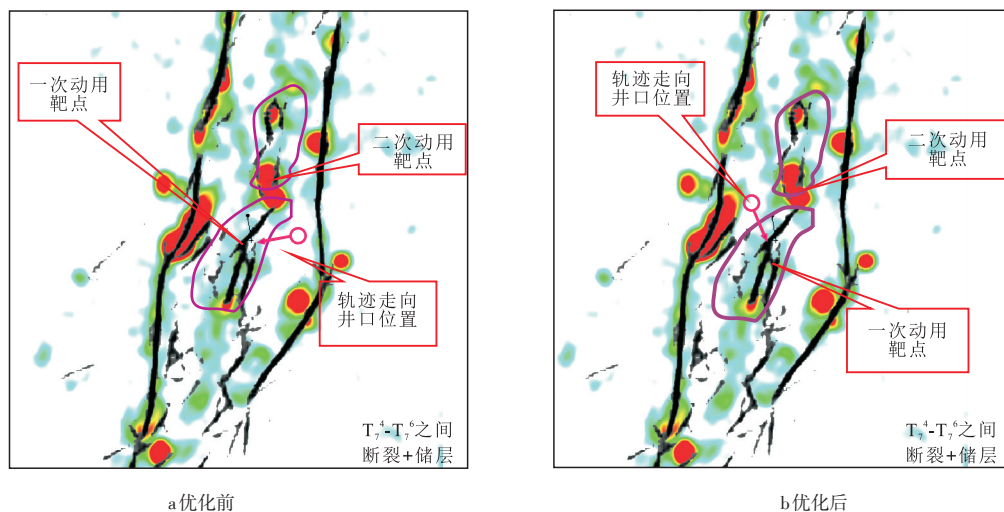


图6 SHB-X井井口位置及轨迹走向优化前后对比

Fig. 6 Comparison before and after optimization of wellhead position and trajectory of Well-SHB-X

统一设计图版,实现量化设计(图8)。

对于SHB5-CH井储层改造,通过优化酸液体系,提升管柱、井口参数,实现储层改造从笼统酸压向定向长距离酸压转变,实现了“一井多动”目的,初期日产油能力达到170 t,得到大幅提升(图9)。

油藏—采油一体化,预判井区能量、优化完井管柱,缩短作业周期。对井区能量可能不足,完井管柱直接设计为自喷—机轴一体化管柱,井均可节省作业时间5 d。

对于即将投产井,提前对比分析邻区、邻井资料,提前预判地层能量和含水状况,针对性制定合理工作制度和相应对策。对于地层能量强,底水不活跃井,采用较大工作制度生产,注意水跟踪、预警;对于地层能量弱,底水欠发育井,采用机抽+大泵提液,同时注水补充能量;对于地层能量强,底水活跃井,采用较小工作制度,同时密切监测含水变化^[34-35]。

4.3 建立项目后评价制度

在项目完成后需及时开展后评价,对地震、地质、钻井、采油、地面、投资、产出等开展全面评估,对比设计与实施情况,分析方案符合情况及差别原

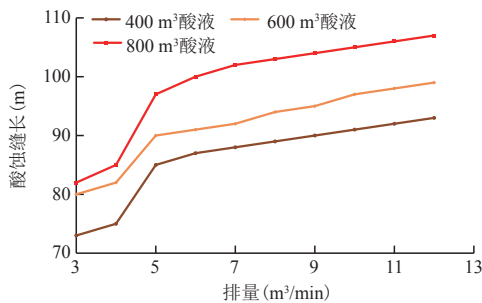
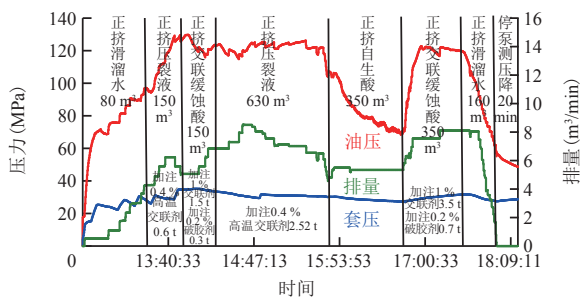


图8 酸蚀缝长与压裂液排量关系

Fig. 8 Relation between acid etching length and fracturing fluid displacement



注: 施工层位: O₂y₁+O₁₋₂y 施工井段: 7 950.57~8 421.44 m、8 422.49~8 525.4 m

a.SHB5-CH井酸压施工曲线(第一段)

因。对方案中未考虑的问题及时进行补充,对新出现的问题和矛盾及时进行分析,提出技术改进和提高经济效益的对策和措施。

通过贯穿产能建设全过程的多轮次分析—改进—固化—推广—提升,建立学习曲线标准流程,形成可复制推广的技术体系。

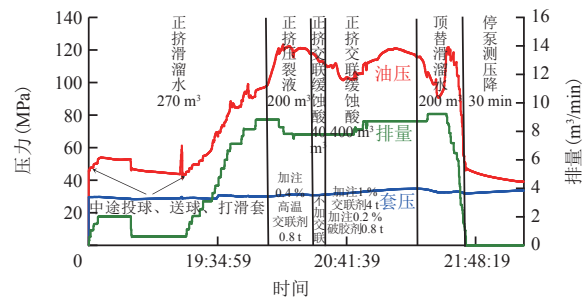
4.4 实例

顺北ZH井是部署在顺北4号带南部的一口评价井,目的层古生界奥陶系鹰山组,目的是评价杂乱弱反射储层的含油气性,进山深度230 m。大斜度井,位移651 m,井深8 022 m。

从井位论证开始,即开展工程与地质深入结合,共同研究地质设计、共同分析地层剖面,共同查看邻井资料,一起识别风险与难点的关键地层特征,针对性设计、集成最优钻完井工艺。

根据地质预测,本井在二叠系地层发育38 m厚的玄武岩,该井段存在井壁失稳风险,为确保火成岩段井壁稳定,优化钻井液密度、强化随钻封堵及防塌,设计钾胺基聚磺钻井液体系:密度控制在1.25~1.28 g/cm³, K⁺>20 000 mg/L,聚胺0.5%~1%强化抑制;用2%~3%超细碳酸钙(500~800目)+1%~3%竹纤维+3%高软化点沥青随钻封堵;优化钻井液流变性,控制动塑比0.3以上以强化携岩性能;起钻前用黏度大于100 s稠浆段塞洗井。

根据地震资料,本井志留系钻遇地层无大断裂,裂缝欠发育,重点考虑防漏:钻井液密度比重控制在1.30~1.32;控制滤失HTHP瞬时失水小于等于1 mL;微纳米+柔性封堵防塌;钻井液90℃动塑比0.4保障携岩能力;合理采用重稠浆清扫液洗井;小角度单弯,适当扩径。



b.SHB5-CH井酸压施工曲线(第二段)

图9 SHB5-CH井酸压施工曲线

Fig. 9 Acid-fracturing construction curves of Well-SHB5-CH

地质人员预测本井在奥陶系桑塔木组可能钻遇2套辉绿岩侵入体,第一套顶深6 294 m,厚度30 m;第二套疑似顶深6 930 m,厚度15 m。地质与工程人员研究后认为该地层应力未释放,井壁易坍塌,故设计防塌措施:钻井液比重1.50~1.60;瞬时失水小于等于1 mL;复合沥青+刚性的强封堵性;泥浆动塑比0.4;稠浆或纤维清扫;10%堵漏浆携带;螺杆钻具防碰撞。

在奥陶系储层段,为实现地质目的,对储层轨迹进行优化。将大井身全角变化率水平井优化为小井身全角变化率斜井,优化轨迹在断裂特征明显的位置进入储层。储层段呈弱挤压特征,偏移最大主应力方向,井壁稳定、酸压易造缝。设计造斜点进山15 m,满足后期侧钻;设计井身全角变化率 $15^\circ/30$ m,满足分段酸压条件。

通过对顺北地区多口井钻后情况分析,51%裂缝分布在0.1~0.5 mm,39.2%分布在0.5~5 mm,裂缝占比54.8%,溶洞占比45.2%,容易发生漏失。漏失造成储层渗透率降低,堵塞物难以解堵。为减少储层伤害,设计人员决定引入无固相钻井液保护储层。

因顺北ZH井奥陶系桑塔木组可能发育两套45 m火成岩侵入体,通过地质工程一体深入结合,在充分认识地层特性的基础上,将井身结构从常规五级井身结构优化为四级(图10)。设计钻井周期206 d,比邻井实钻周期349 d少143 d。

顺北ZH井2020年12月开钻,已按钻井工程设计顺利钻穿上覆多套复杂地层,目前井深7 398 m,层位古生界奥陶系一间房组。目前正按设计顺利钻进,按目前钻进情况,预计钻井周期可能少于设计的206 d,表明地质工程一体化可有效避免工程事故,节约钻井周期,预计产能也将一定程度提高。

5 一体化探索效果

塔里木盆地顺北油田自2016年发现以来,通过不断探索,初步形成了井位论证、井型设计、安全钻井及高效完井等四大关键环节的地质工程一体化工作模式。随着勘探开发不断深入,钻井井深不断加大,近3 a平均单井井深从7 834 m不断加深至8 111 m,但钻井异常情况明显减少,钻井周期大幅下降,井平均钻井周期从2018年的291 d降至2020年的209 d,降幅28.2%,单井控制储量由 50×10^4 t左右升至 108×10^4 t左右,百万吨产能建设投资控制在52.7 $\times 10^8$ 元左右,开发成本控制在19美元/桶以下。至2020年末,顺北地区已建成 100×10^4 t原油生产能力阵地,成为中国石化增储上产的主战场。

6 结论

1) 地质与工程一体化可打破原有“技术条块分

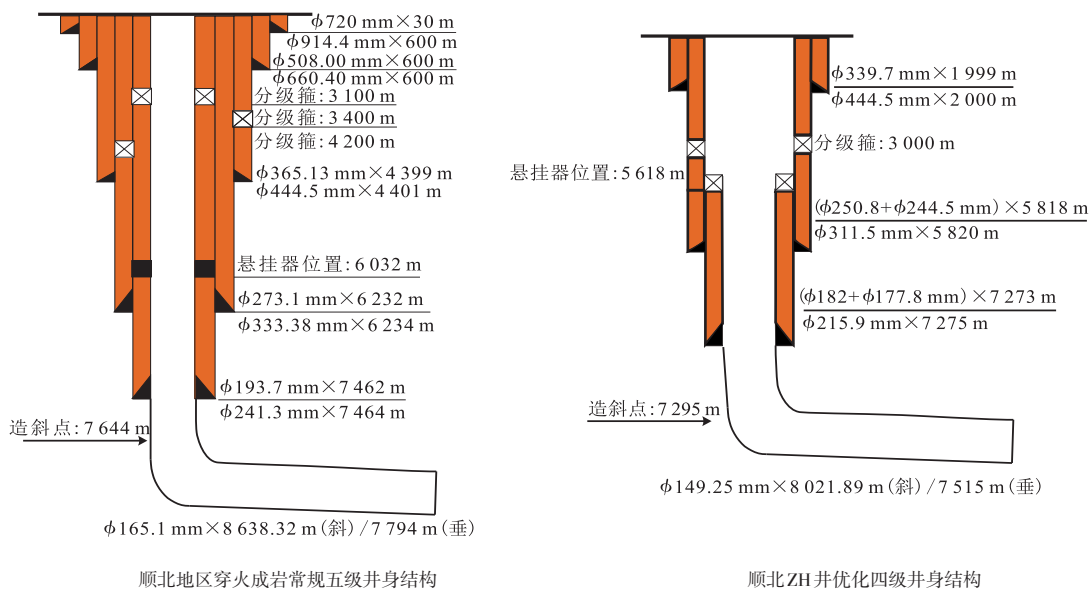


图10 顺北地区穿火成岩区域钻井井身结构优化对比

Fig. 10 Comparison of optimization of drilling well structure of igneous rock area in Shunbei area

割、管理接力进行”的传统管理模式,助推油田高效勘探开发。

地质工程一体化工作模式要求管理上各部门密切协作,技术上多专业深度融合。科学的管理架构、合理的考核制度、高效的数据平台,是确保地质工程一体化高效运行^[36]的必要条件。

2) 顺北地区超深断溶体油藏的特殊性和其上覆地层的复杂性,迫使在该区该类型油藏打破常规,探索地质工程一体化工作新模式。

通过探索,在顺北地区建立了管理架构,制定了考核体系,初步形成了定井位、选井型、安全钻井和高效完井四大关键模块的一体化工作模式和相应技术方法。近两年的探索实践初步证明其适合于该类超深复杂断溶体油藏。

3) 目前该区超深特殊油藏类型的地质工程一体化模式还在不断探索,需要建设高效实用的一体化数据平台,突破学科和组织界限,同时避免出现“异化”现象^[36],为该类超深、特殊类型断溶体油藏的效益开发提供地质工程一体化模式借鉴。

参考文献

[1] 林森虎,邹才能,袁选俊,等.美国致密油开发现状及启示[J].岩性油气藏,2011,23(4):25-30.
LIN Senhu, ZOU Caineng, YUAN Xuanjun, et al. Status quo of tight oil exploitation in the United States and its implication[J]. Lithologic Reservoirs, 2011, 23(4): 25-30.

[2] 田军,刘洪涛,滕学清,等.塔里木盆地克拉苏构造带超深复杂气田全生命周期地质工程一体化实践[J].中国石油勘探,2019,24(2):165-173.
TIAN Jun, LIU Hongtao, TENG Xueqing, et al. Geology-engineering integration practices throughout well lifecycle in ultra-deep complex gas reservoirs of Kelasu tectonic belt, Tarim Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(2): 165-173.

[3] 张杨,杨向同,滕起,等.塔里木油田超深高温高压致密气藏地质工程一体化提产实践与认识[J].中国石油勘探,2018,23(2):43-50.
ZHANG Yang, YANG Xiangtong, TENG Qi, et al. Practice and cognition of geology-engineering integration for the production increasing of HTHP ultra-deep tight gas reservoir in Tarim oilfield[J]. China Petroleum Exploration, 2018, 23(2): 43-50.

[4] 张以明,才博,何春明,等.超高温超深非均质碳酸盐岩储层地质工程一体化体积改造技术[J].石油学报,2018,39(1):92-100.
ZHANG Yiming, CAI Bo, HE Chunming, et al. Volume fracturing technology based on geo-engineering integration for ultra-high temperature and ultra-deep heterogeneous carbonate reservoir[J]. Acta Petrolei Sinica, 2018, 39(1): 92-100.

[5] 吴奇,梁兴,鲜成钢,等.地质-工程一体化高效开发中国南海相页岩气[J].中国石油勘探,2015,20(4):1-21.

WU Qi, LIANG Xing, XI Chenggang, et al. Geoscience-to-Production integration ensures effective and efficient South China marine shale gas development[J]. China Petroleum Exploration, 2015, 20(4): 1-21.

[6] 谢军,鲜成钢,吴建发,等.长宁国家级页岩气示范区地质工程一体化最优化关键要素实践与认识[J].中国石油勘探,2019,24(2):174-185.
XIE Jun, XIAN Chenggang, WU Jianfa, et al. Optimal key elements of geoengineering intergration in Changning national shale gas demonstration zone[J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(2): 174-185.

[7] 梁兴,王高成,张介辉,等.昭通国家级示范区页岩气一体化高效开发模式及实践启示[J].中国石油勘探,2017,22(1):29-37.
LIANG Xing, WANG Gaocheng, ZHANG Jiehui, et al. High-efficiency integrated shale gas development model of Zhaotong national demonstration zone and its practical enlightenment [J]. China Petroleum Exploration, 2017, 22(1): 29-37.

[8] 胡文瑞.地质工程一体化是实现复杂油气藏效益勘探开发的必由之路[J].中国石油勘探,2017,22(1):1-5.
HU Wenrui. Geology-engineering integration a necessary way to realize profitable exploration and development of complex reservoirs[J]. China Petroleum Exploration, 2017, 22(1): 1-5.

[9] 刘乃震,何凯,叶成林.地质工程一体化在苏里格致密气藏开发中的应用[J].中国石油勘探,2017,22(1):53-60.
LIU Naizhen, HE Kai, YE Chenglin. Application of geology-engineering integration in the development of tight gas reservoir in Sulige Gasfield[J]. China Petroleum Exploration, 2017, 22(1): 53-60.

[10] 姚泾利,刘晓鹏,赵会涛,等.鄂尔多斯盆地盒8段致密砂岩气藏储层特征及地质工程一体化对策[J].中国石油勘探,2019,24(2):186-195.
YAO Jingli, LIU Xiaopeng, ZHAO Huitao, et al. Characteristics of He 8th member tight sandstone gas reservoir and solution based on geology-engineering integration in Ordos Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(2): 186-195.

[11] 吴宝成,李建民,邬元月,等.准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组页岩油上“甜点”地质工程一体化开发实践[J].中国石油勘探,2019(5):679-690.
WU Baocheng, LI Jianmin, WU Yuanyue, et al. Development practices of geology-engineering integration on upper sweet[J]. China Petroleum Exploration, 2019(5): 679-690.

[12] 刘乃震,王国勇,熊小林.地质工程一体化技术在威远页岩气高效开发中的实践与展望[J].中国石油勘探,2018,23(2):59-68.
LIU Naizhen, WANG Guoyong, XIONG Xiaolin. Practice and prospect of geology-engineering integration technology in the efficient development of shale gas in Weiyuan block[J]. China Petroleum Exploration, 2018, 23(2): 59-68.

[13] 赵贤正,赵平起,李东平,等.地质工程一体化在大港油田勘探开发中探索与实践[J].中国石油勘探,2018,23(2):6-14.
ZHAO Xianzheng, ZHAO Pingqi, LI Dongping, et al. Research and practice of geology-engineering integration in the exploration and development of Dagang oilfield[J]. China

- Petroleum Exploration, 2018, 23(2): 6-14.
- [14] 焦方正.塔里木盆地顺北特深碳酸盐岩断溶体油气藏发现意义与前景[J].石油与天然气地质,2018,39(2):207-216.
JIAO Fangzheng. Significance and prospect of ultra-deep carbonate fault-karst reservoirs in Shunbei area, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(2): 207-216.
- [15] 漆立新.塔里木盆地顺北超深断溶体油藏特征与启示[J].中国石油勘探,2020,25(1):102-111.
QI Lixin. Characteristics and inspiration of ultra-deep fault-karst reservoir in the Shunbei area of the Tarim Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(1): 102-111.
- [16] 黄太柱,蒋华山,马庆佑.塔里木盆地地下古生界碳酸盐岩油气成藏特征[J].石油与天然气地质,2014,35(6):780-787.
HUANG Taizhu, JIANG Huashan, MA Qingyou. Hydrocarbon accumulation characteristics in the Lower Paleozoic carbonate reservoirs of Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(6): 780-787.
- [17] 邓尚,李慧莉,张仲培,等.塔里木盆地顺北及邻区主干走滑断裂带差异活动特征及其与油气富集的关系[J].石油与天然气地质,2018,39(5):878-888.
DENG Shang, LI Huili, ZHANG Zhongpei, et al. Characteristics of differential activities in major strike-slip fault zones and their control on hydrocarbon enrichment in Shunbei area and its surroundings, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(5): 878-888.
- [18] 伍齐乔,李景瑞,曹飞,等.顺北1井区奥陶系断溶体油藏岩溶发育特征[J].中国岩溶,2019,38(3):444-449.
WU Qiqiao, LI Jingrui, CAO Fei, et al. Characteristics of fault-karst carbonate reservoirs in the Shunbei No. 1 Well Block, Tarim Basin[J]. Carsologica Sinica, 2019, 38(3): 444-449.
- [19] 曹自成,路清华,顾忆,等.塔里木盆地顺北油气田1号和5号断裂带奥陶系油气藏特征[J].石油与天然气地质,2020,41(5):975-984.
CAO Zicheng, LU Qinghua, GU Yi, et al. Characteristics of Ordovician reservoirs in Shunbei 1 and 5 fault zones, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(5): 975-984.
- [20] 鲁新便,蔡忠贤.缝洞型碳酸盐岩油藏古溶洞系统与油气开发[J].石油与天然气地质,2010,31(1):22-27.
LU Xinbian, CAI Zhongxian. A study of the paleo-cavern system in fractured vuggy carbonate reservoirs and oil/gas development: taking the reservoirs in Tahe oilfield as an example [J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(1): 22-27.
- [21] 鲁新便,胡文革,汪彦,等.塔里木地区碳酸盐岩断溶体油藏特征与开发实践[J].石油与天然气地质,2015,36(3):347-355.
LU Xinbian, HU Wenge, WANG Yan, et al. Characteristics and development practice of fault-karst carbonate reservoirs in Tahe area, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(3): 347-355.
- [22] 李双贵,于洋,樊艳芳,等.顺北油气田超深井井身结构优化设计[J].石油钻探技术,2020,48(2):6-11.
LI Shuanggui, YU Yang, FAN Yanfang, et al. Optimal design of casing programs for ultra-deep wells in the Shunbei oil and gas field[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2020, 48(2): 6-11.
- [23] 刘彪,潘丽娟,易浩,等.顺北含辉绿岩超深井井身结构优化设计[J].石油钻采工艺,2016,38(3):296-301.
LIU Biao, PAN Lijuan, YI Hao, et al. Casing program optimization of ultra-deep well with diabase reservoir in Shunbei Block[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2016, 38(3): 296-301.
- [24] 赵志国,白彬珍,何世明,等.顺北油田超深井优快钻井技术[J].石油钻探技术,2017,45(6):8-13.
ZHAO Zhiguo, BAI Binzhen, HE Shiming, et al. Optimization of fast drilling technology for ultra-deep wells in the Shunbei Oilfield[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2017, 45(6): 8-13.
- [25] 林永学,王伟吉,金军斌.顺北油气田鹰1井超深井段钻井液关键技术[J].石油钻探技术,2019,47(3):113-120.
LIN Yongxue, WANG Weiji, JIN Junbin. Key drilling fluid technology in the ultra deep section of Well Ying-1 in the Shunbei Oil and Gas Field[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2019, 47(3): 113-120.
- [26] Ottesen S. Wellbore stability in fractured rock[C]// Paper SPE-128728-MS presented at the IADC/SPE Drilling Conference and Exhibition, New Orleans, Louisiana, USA, February 2010.
- [27] ABASS H H, HABBTAR A H, SHEBATALHAMD A. Sand control during drilling, perforation, completion and production [C]// Paper SPE-81492-MS presented at the Middle East Oil Show, Bahrain, June 2003.
- [28] WIPRUT D J, ZOBACK M D. High horizontal stress in the Visund Field, Norwegian North Sea: consequences for borehole stability and sand production[C]// Paper SPE-47244-MS presented at the SPE/ISRM Rock Mechanics in Petroleum Engineering, Trondheim, Norway, July 1998.
- [29] WILLSON S M, LAST N C, ZOBACK M D, et al. Drilling in South America: a wellbore stability approach for complex geologic conditions[C]// Paper SPE-53940-MS presented at the Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference, Caracas, Venezuela, April 1999.
- [30] 刘向君.井壁力学稳定性原理及影响因素分析[J].西南石油学院学报,1995,17(4):51-57.
LIU Xiangjun. The principle of well face mechanical stability and its influence factors[J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 1995, 17(4): 51-57.
- [31] 张荣,韩丰欣,苗海龙,等.BZ13-1油田防塌钻井液的研制及应用[J].中国海上油气,2010,22(2):119-121,124.
ZHANG Rong, HAN Fengxin, MIAO Hailong, et al. Development and application of anti-collapsing drilling fluid for BZ13-1 oilfield[J]. China Offshore Oil and Gas, 2010, 22(2): 119-121, 124.
- [32] 林永学,王伟吉,金军斌.顺北油气田鹰1井超深井段钻井液关键技术[J].石油钻探技术,2019,47(3):113-120.
LIN Yongxue, WANG Weiji, JIN Junbin. Key drilling fluid technology in the ultra deep section of Well Ying-1 in the Shunbei Oil and Gas Field[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2019, 47(3): 113-120.
- [33] 侯士立,刘光艳,黄达全,等.高滤失承压堵漏技术[J].钻井液与完井液,2018,35(1):53-56.
HOU Shili, LIU Guangyan, HUANG Daquan, et al. Lost circulation control with high filtration lost circulation materials

- [J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2018, 35(1): 53-56.
- [34] 张雄, 王晓之, 郭天魁, 等. 顺北油田缝内转向压裂暂堵剂评价实验[J]. *岩性油气藏*, 2020, 32(5): 170-176.
ZHANG Xiong, WANG Xiaozhi, GUO Tiankui, et al. Experiment on evaluation of temporary plugging agent for infraction steering fracturing in Shunbei Oilfield[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2020, 32(5): 170-176.
- [35] 李冬梅, 柳志翔, 李林涛, 等. 顺北超深断溶体油气藏完井技术[J]. *石油钻采工艺*, 2020, 42(5): 600-605.
LI Dongmei, LIU Zhixiang, LI Lintao, et al. Well completion technologies for the ultra-deep fault-dissolved oil and gas reservoir in Shunbei Oil and Gas Field[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2020, 42(5): 600-605.
- [36] 吴奇, 胡文瑞, 李岫. 地质工程一体化在复杂油气藏效益勘探开发中存在的“异化”现象及思考建议[J]. *中国石油勘探*, 2018, 23(2): 1-5.
WU Qi, HU Wenrui, LI Xun. The phenomenon of “alienation” of geology-engineering integration in exploration and development of complicated oil and gas reservoirs, and related thoughts and suggestions[J]. *China Petroleum Exploration*, 2018, 23(2): 1-5.

(编辑 徐佩)

(上接第304页)

- [8] 蒋廷学, 卞晓冰, 苏媛, 等. 页岩可压性指数评价新方法及应用[J]. *石油钻探技术*, 2014, 42(5): 16-20.
JIANG Tingxue, BIAN Xiaobing, SU Yuan, et al. A new method for evaluation shale fracability index and its application[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2014, 42(5): 16-20.
- [9] 蒋廷学, 李斐. 阿南油田储层有效渗透率模糊设计研究[J]. *石油钻采工艺*, 1997, 19(6): 73-76.
JIANG Tingxue, LI Fei. Fuzzy design study on formation permeability for A-NAN oil field[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 1997, 19(6): 73-76.
- [10] 蒋廷学, 汪永利, 丁云宏, 等. 由地面压裂施工压力资料反求储层岩石力学参数[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(14): 2424-2429.
JIANG Tingxue, WANG Yongli, DING Yunhong, et al. Determination of rock mechanics parameters by pressure of surface fracturing treatment[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(14): 2424-2429.
- [11] 屈亚光, 巩旭, 石康立, 等. 页岩储层压裂液渗吸及返排机理研究进展[J]. *当代化工*, 2020, 49(11): 2532-2535.
QU Yaguang, GONG Xu, SHI Kangli, et al. Research progress of imbibition and backflow mechanism of fracturing fluids in shale reservoir[J]. *Contemporary Chemical Industry*, 2020, 49(11): 2532-2535.
- [12] 申颖浩, 葛洪魁, 宿帅, 等. 页岩气储层的渗吸动力学特性与水锁解除潜力[J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2017, 47(11): 88-98.
SHEN Yinghao, GE Hongkui, SU Shuai, et al. Imbibition characteristic of shale gas formation and water-block removal capability[J]. *Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica)*, 2017, 47(11): 88-98.
- [13] 杨发荣, 左罗, 胡志明, 等. 页岩储层渗吸特性的实验研究[J]. *科学技术与工程*, 2016, 16(25): 63-66.
YANG Farong, ZUO Luo, HU Zhiming, et al. Researching the water imbibition characteristic of shale by experiment[J]. *Science Technology and Engineering*, 2016(25): 63-66.
- [14] 卞晓冰, 蒋廷学, 贾长贵, 等. 基于施工曲线的页岩气井压后评估新方法[J]. *天然气工业*, 2016, 36(2): 60-65.
BIAN Xiaobing, JIANG Tingxue, JIA Changgui, et al. A new post-fracturing evaluation method for shale gas wells based on fracturing curves[J]. *Natural Gas Industry*, 2016, 36(2): 60-65.
- [15] 蒋廷学, 卞晓冰, 王海涛, 等. 深层页岩气水平井体积压裂技术[J]. *天然气工业*, 2017, 37(1): 90-96.
JIANG Tingxue, BIAN Xiaobing, WANG Haitao, et al. Volume fracturing of deep shale gas horizontal wells[J]. *Natural Gas Industry*, 2017, 37(1): 90-96.

(编辑 余聪)