

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

张煜,李海英,陈修平,卜旭强,韩俊

(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超深断控缝洞型油气藏目的层埋深大,储层非均质性强,上覆地层岩性复杂,多期断裂破碎带发育,钻井工程难度大,无现成经验可借鉴,勘探开发面临巨大挑战。通过搭建地质-工程、勘探-开发一体化协同管理平台,将地质研究、工程设计和组织实施纳入一体化协作体系。针对超深断控缝洞型油气藏的地质特点与工程难点,形成“钻井设计(储层建模与井型设计、储量估算与井网构建、井轨迹优化)、钻完井工程(风险预测与优快钻井、分段酸压与衬管完井、储层描述与分类改造)”一体化技术体系,钻井成井周期明显缩短,单井产能明显提升,新发现顺北4号、8号断裂带两个亿吨级规模增储区带,为顺北油气田勘探开发提供重要技术支撑,对国内外超深层油气勘探开发具有借鉴意义。

关键词:地质-工程一体化;断控缝洞型油气藏;奥陶系;顺北油气田;塔里木盆地

中图分类号:TE327

文献标识码:A

Practice and effect of geology-engineering integration in the development of ultra-deep fault-controlled fractured-vuggy oil/gas reservoirs, Shunbei area, Tarim Basin

Zhang Yu, Li Haiying, Chen Xiuping, Bu Xuqiang, Han Jun

(Northwest Oil Company, SINOPEC, Urumqi, Xinjiang 830011, China)

Abstract: The targeted ultra-deep fault-controlled fractured-vuggy oil and gas reservoirs in the Shunbei area, Tarim Basin is highly heterogenous with great burial depth and lithological complex overlying strata as well as multi-phase faulted fracture zones, all posing drilling and completion challenges with no ready-made experience to draw on. To deal with the problem, an geology-engineering integrated management platform based on exploration-development collaboration, integrating geological research, engineering design and implementation, is established to address the geological characteristics and engineering difficulties in developing the reservoirs. An integrated technical system featuring “high-yield well design” (including reservoir modeling and well type selection, reserve assessment and well pattern construction, well trajectory optimization) and “drilling and completion engineering” (including risk forecast and optimal fast drilling, staged acid fracturing and support completion, reservoir description and tailer-made stimulation) have been set up to shorten well completion cycle and enhance productivity. As a result, two hundred-million-ton-reserve zones (No. 4 and No. 8 faulted zones) have been discovered, verifying the technical strength of the system for the exploration and development of the Shunbei oil and gas field. References can also be gained from the implementation of the system for the development of other ultra-deep oil and gas reservoirs.

Key words: geology-engineering integration, fault-controlled fracture-vuggy oil/gas reservoir, Ordovician, Shunbei oil/gas field, Tarim Basin

引用格式: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. DOI:10.11743/ogg20220615.

Zhang Yu, Li Haiying, Chen 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. DOI:10.11743/ogg20220615.

收稿日期:2022-05-12;修订日期:2022-09-27。

第一作者简介:张煜(1963—),男,博士、教授级高级工程师,油气勘探开发与综合管理。E-mail: zhangy3990.xbsj@sinopec.com。

基金项目:国家自然科学基金企业创新发展联合基金项目(U21B2063);中国石化科技部项目(P21033-1)。

地质-工程一体化是以增加规模可动用储量、提高单井产量为中心,通过地质、物探、工程、油藏、经济等多专业、多学科融合,一体化集成攻关,解决复杂地质条件下工程难题,达到提高钻井成功率、缩短作业周期、提高单井产能、降低油气单位成本的目的,实现复杂油气藏高效勘探与效益开发。借鉴北美页岩气地质-工程一体化技术应用的成功经验和模式,形成了具有中国特色的地质-工程一体化技术体系,并成功应用于超深层海相碳酸盐岩油气藏、隐蔽油气藏、页岩油气、致密气的勘探开发^[1-3]。坚持地质-工程一体化发展思路,建立一体化协同运行机制,加强地质研究与工程技术协同攻关,加强全周期一体化管理,成为推进各油气田降本增效的重要手段。

塔里木盆地超深层海相碳酸盐岩油气资源丰富,油气探明率低,勘探潜力巨大。自2016年发现顺北超深断控缝洞型油气藏以来,相继落实18条断裂带,总长度890 km,估算资源量达 17×10^8 t油气当量^[4-6]。但是,由于目的层中、下奥陶统一间房组-鹰山组埋深大(>7 200 m),上覆地层地质条件复杂,虽然油气成藏富集宏观上主要受走滑断裂带的控制,但是断裂带(宽度0.4~2.0 km)内部储集体非均质性极强,油气藏分布复杂,同一断裂体系不同断裂带、同一断裂带不同分段、同一分段不同部位的油气性质、产能、油-气-水分

布均存在差异^[4]。作为一种新类型的油气藏,钻井工程成本高、难度大,缺少现成的经验可供借鉴,效益勘探开发面临巨大挑战。

近两年来,中国石化西北油田分公司按照地质-工程一体化的理念,通过不断探索和实践,针对顺北地区井位优选、井轨迹优化、钻井安全与提速、漏失井储层保护和完井改造等系列难题,搭建地质-工程一体化协同工作平台,将地质研究、工程设计和组织实施纳入一体化协作体系,形成这种特殊油气藏的地质-工程一体化技术体系,为顺北油气田勘探开发提供技术支撑,对国内外超深层油气藏勘探开发具有借鉴意义。

1 研究背景

1.1 顺北油气田地质背景

顺北油气田位于新疆塔里木盆地塔克拉玛干沙漠腹地,构造位置属于塔北、塔中两大隆起及阿瓦提、满加尔两大坳陷之间的“马鞍形”构造带——顺托果勒低隆起^[5-6](图1)。顺托果勒低隆起经历早古生代海相、晚古生代早期海-陆过渡相、晚古生代晚期和中新生代陆相沉积演化过程,除整体缺失侏罗系外,自上而下发育新生界第四系、新近系、古近系、中生界白

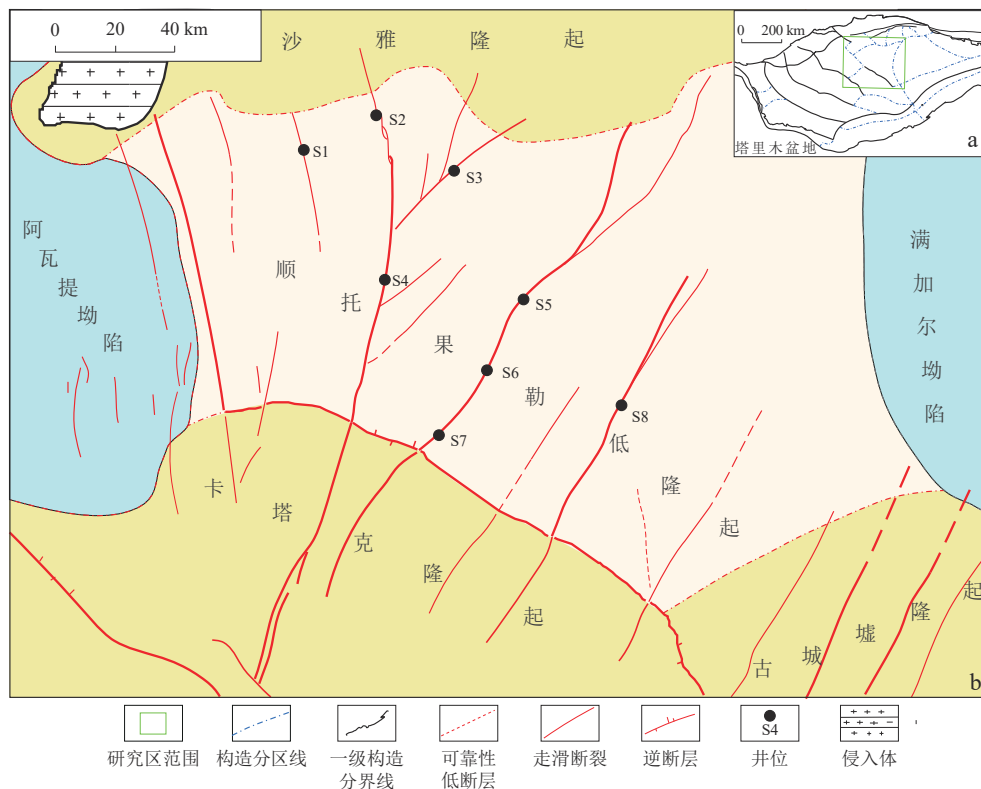


图1 塔里木盆地顺北地区构造位置(a)与走滑断裂带展布(b)

Fig. 1 Structural location (a) and distribution of strike slip fault zones (b) in the Shunbei area, Tarim Basin

泥系、三叠系、古生界二叠系、石炭系、泥盆系、志留系、奥陶系、寒武系等多套地层,各时代地层仅部分组段不同程度缺失,地层发育相对齐全^[7-8]。顺托果勒低隆起纵向地层岩性复杂(图2),下古生界碳酸盐岩厚度达1 800~3 000 m,其间发育含膏盐岩、膏盐岩、石灰岩、白云岩、灰质云岩、云质灰岩等多种岩性类型;目的层之上发育碎屑岩为主的巨厚上覆地层(厚度7 000~8 000 m),其中二叠系发育多套火成岩(英安岩、玄武岩、凝灰岩),志留系及上奥陶统发育多套辉绿岩侵入体^[9]。

顺托果勒低隆起主要经历加里东中、晚期—海西早期(奥陶纪—泥盆纪末)、海西晚期(晚二叠世末)、印支期—燕山期(三叠纪—白垩纪末)、喜马拉雅期(中新世以来)4期构造运动^[10-11],其中,中奥陶世强烈挤压作用形成隆起雏形,之后南部挤压隆升逐渐向北倾没,后期持续演化形成现今构造形态。顺托果勒低隆起长期处于构造较低部位,目的层为致密碳酸盐岩地层,岩性致密,其顶面不整合相关的岩溶作用与岩溶缝洞型储集体欠发育。但是,顺托果勒低隆起发育了不同体系、不同级别、不同期次叠加的克拉通内中、小尺度走滑断

裂带,具有“上正下逆”的特征,下部为压扭走滑花状断层,上部发育一系列雁列式排列的张性断裂^[12-14],形成了主要受走滑断裂带控制的断控缝洞型储集体及油气藏^[15-17]。截止目前顺北1号、5号、7号、4号、8号等多条断裂带相继获得油气突破^[18]。

1.2 超深断控缝洞型油气藏特征

顺北油气田走滑断裂带空间结构样式具有“纵向分层变形、主滑移带平面分段、垂向多期叠加”的特征^[14-16]。走滑断裂多期活动产生的多期构造破裂为主,叠加后期流体微弱改造为辅,形成断控缝洞型储集体,被致密碳酸盐岩侧封和上覆巨厚泥岩盖层顶封遮挡,形成断控缝洞型圈闭^[19-21]。同时走滑断裂垂向向下断至震旦系,沟通下寒武统玉尔吐斯组烃源岩,油气向上运移至断控缝洞型圈闭内聚集成藏,形成超深断控缝洞型油气藏^[5-7](图2)。断控缝洞型油气藏平面分布差异大,整体具有“西油东气,断裂带富集”的资源格局,其中顺北1号断裂带及其以西地区主要为轻质油藏,顺北1号断裂带以东至顺北8号断裂带为凝析气藏,顺北8号带东为干气藏^[18]。

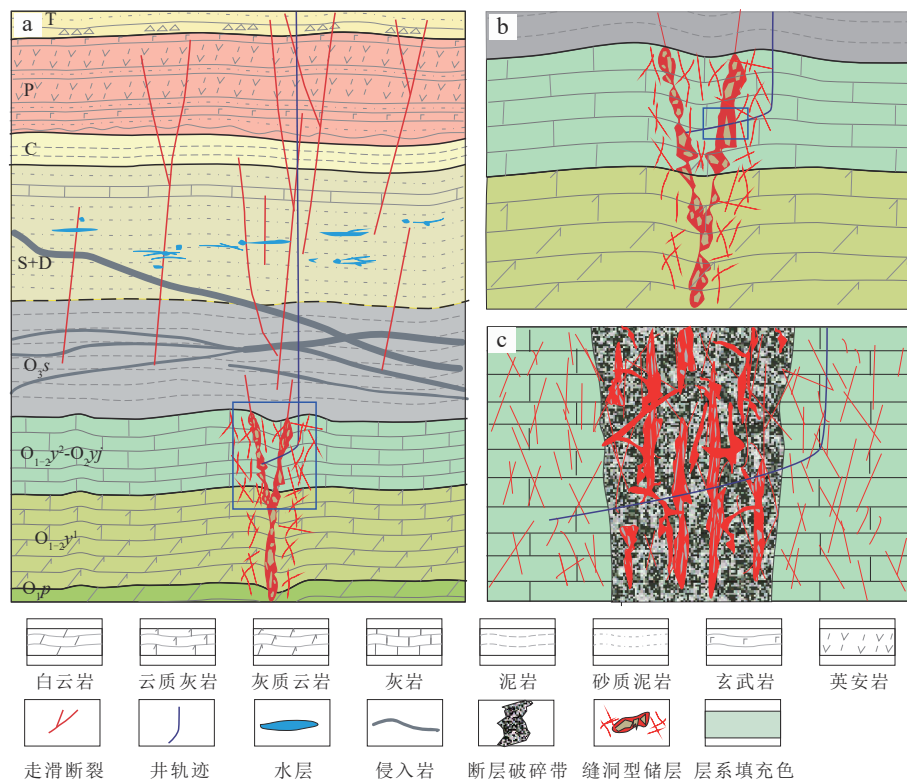


图2 顺北地区断控缝洞型油气藏模式

Fig. 2 Diagram showing the fault-controlled fractured-vuggy reservoir model in the Shunbei area

a. 顺北超深断控缝洞型油气藏主要目的层位奥陶系一间房组—鹰山组,上覆地层发育雁列断层及多套侵入岩;b. 为a图框图的放大,纵向上油气沿断裂带富集,断裂带内部的多条断裂控制储集体的发育与油气藏分布;c. 为b图框图的放大,断裂带内部单条断裂内部储集体结构复杂,呈现为复杂“栅状”储集结构的特征

1.3 面临的难题与挑战

目前有关走滑断裂带的研究,主要集中于断层导性与封闭性^[22]、断裂控缝作用^[23]等方面,鲜有将断裂及其破碎带作为缝洞型储集体加以研究的案例,对断裂带内部油气藏的分布与富集规律的研究更少,顺北超深断控缝洞型油气藏尚无成熟的勘探开发经验可供借鉴。因此,包括走滑断裂带储集体内部结构与地质建模、油气藏精细描述、井轨迹优化设计、开发井网构建、安全高效钻井、储层高效改造等方面需要自主探索。顺北超深断控缝洞型油气藏勘探开发与钻完井工程技术面临如下挑战:

1)地质方面,储集体埋藏超深,且受走滑断裂带多期活动影响,断裂带内部结构复杂,储集体非均质性极强。目前钻井揭示断裂带内部的单条断裂储集体横向宽度一般不超过10 m(侧钻井单层放空长度)^[18,21],规模储集体精细描述、靶点优选与井轨迹设计难度大。

2)工程方面,目的层具有超深(7 200~9 000 m)、超高压(89~129 MPa)、高温(160~209 ℃)的特点,非目的层纵向发育多期断裂、多套火成岩、多套压力系统,对钻井液及工具性能要求高,井身结构优化及优快成井难度大^[24-25];断控缝洞体具有较强非均质性,现有压缩式和扩张式裸眼分割器性能不能完全满足高温、高压条件下的分段需求,部分区域裸眼完井井壁易破碎、掉块,碳钢井壁衬管完井方式后期侧钻难度大,井筒压力控制、储层保护及针对性改造工艺优化难^[26]。

3)效益勘探开发难度大。开展地质-工程一体化实践之前,平均钻井周期长达280 d,其中复杂时效占比达10%以上,单井投资超过2亿元,特别复杂钻井投资高达3亿元,单井平均累产需超 5×10^4 t原油或 3×10^8 m³天然气才具有商业价值^[24],对单井产能提升与工程成本控制的要求高。

面对上述难题,开展地质-工程一体化协同攻关,建立相适应的地质-工程一体化关键技术体系,提升高产井成功率,降低单井投资,是实现高效勘探、效益开发的必由之路^[27]。

2 地质-工程一体化管理模式

2.1 地质-工程一体化工作思路

围绕提高单井产量和增加规模可动用储量,以“提速、提质、提产、提效、降本”为目标,以“多部门、多学科”融合为手段,打破原有“技术条块分割、管理接力进

行”模式,搭建地质-工程一体化、勘探-开发一体化协同工作平台,将地质研究、工程设计和组织实施纳入一体化协作体系,按照“概念方案一体化融合设计、设计实施一体化动态优化、学习提升一体化标准集成”工作模式,整合资源优势,多专业协同,一体化组织实施。

2.2 地质-工程一体化运行模式

采用地质-工程一体化的技术思路,在井位部署、方案论证、设计编写、随钻跟踪、完井改造和试油评价等各个环节,通过地质、地球物理、测井、地质力学、钻井工程、完井测试等多学科的融合,形成针对超深碳酸盐岩断控储集体的地质-工程一体化运行模式,实施过程分为以下6个步骤(图3)。

2.2.1 井位一体化部署

地质上从整个区块认识出发,对钻探目标类型、储集体结构、靶点位置、井型方式和复杂层段进行论证,工程上根据地质任务要求和地质预测的各种风险,开展工程可行性论证。

2.2.2 方案一体化论证

地质上重点对部署依据、地质任务、资料录取、预期产能、存在风险等进行论证,工程围绕实现地质目的、提高单井产量及钻完井、储层改造一体化方案进行论证,针对存在的难题和风险共同提出解决的办法和措施。

2.2.3 设计一体化编写

地质、工程设计人员充分交流结合,依据地质-工程一体化论证会议要求,协同编制钻井地质设计和钻井工程设计。地质设计重点加强上覆地层可能钻遇的复杂层段(二叠系火成岩段、志留系裂缝发育段、桑塔木侵入岩段等)、全井段地层压力、应力场分布进行预测。工程上根据地质风险提示综合考虑,优化井身结构,选择合理的泥浆窗口,建立最优的轨迹穿行方式,从设计源头降低工程风险。

2.2.4 随钻一体化跟踪

随钻一体化跟踪包括地质跟踪、钻井跟踪和地震跟踪,地质、地球物理人员根据随钻录井、测井和钻遇异常情况,实时修正参数和模型,持续迭代风险预测结果。同时在钻开目的层之前,对重点探井开展VSP测井,及时修正目标靶点,工程人员根据最新预测结果,及时调整井轨迹、钻井液参数和井身结构,制定风险应对措施,从过程中降低工程风险,确保准确命中目标。

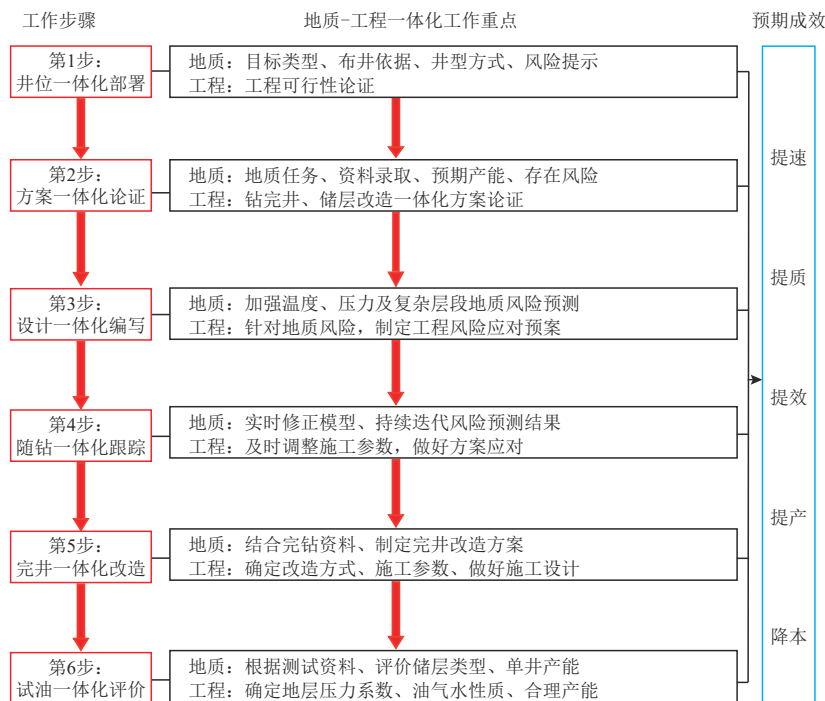


图3 顺北油气田地质-工程一体化运行模式

Fig. 3 Workflow of geological-engineering integration in the Shunbei oil/gas field

2.2.5 完井一体化改造

钻井完钻后根据实钻油气成果、测录井、取心、声波远探测等资料,结合应力场分布和近井筒储层三维预测结果,地质-工程协同,分类制定储层改造方案,确定改造方式、改造层段、分段分级和施工参数。

2.2.6 试油一体化评价

根据现场测试压力、温度、产能、气油比和流体性质等变化情况,进行试油综合评价,明确单井产能、地层压力系数,制定合理的试采工作制度,协同开展单井后评估。

3 地质-工程一体化关键技术与成效

按照“协调高效,少井高产”的原则,形成“部好井、钻好井、完好井”地质-工程一体化关键技术体系(图4)。形成“储层建模与井型设计、储量估算与井网构建、目的层轨迹优化设计”技术,实现目的层靶点精准定位与轨迹设计最优,达到“部好井”的地质目的;形成“风险预测与优快钻井”技术,地质上对工程风险精准预测,工程上根据地质预测提前制定应对措施,同时加强目的层储层保护,减少储层污染,实现“钻好井”的工程目标;形成“分段酸压与衬管完井、储层分类改造”

技术,实现近井储集体针对性改造与井周储量最大程度动用,达到“少井高产”的效益目标。

3.1 储层建模与井型设计技术

前期勘探实践表明,走滑断裂带内部结构复杂,储集体非均质性极强,构建储集体空间结构模型,建立不同分段规模储集体发育模式,形成差异化井型设计技术,是实现“部好井”的基础地质工作。

3.1.1 主要储集空间类型识别

断控缝洞型储集体结构复杂,需要采用多类型资料融合表征其储集空间类型。融合野外露头、岩心、钻井特征、酸化压裂曲线、压恢曲线等多类型资料,断控

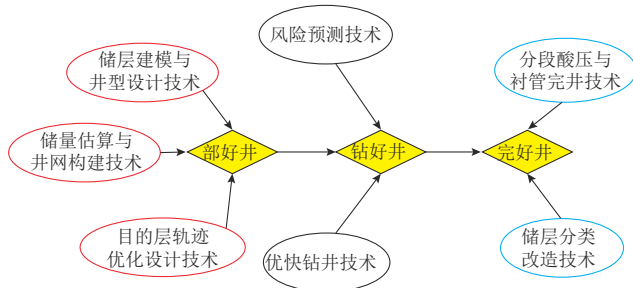


图4 顺北油气田地质-工程一体化关键技术系列示意图

Fig. 4 Schematic diagram showing key technologies for geological engineering integration in the Shunbei oil/gas field

缝洞型储集体主要发育洞穴、孔洞、裂缝等3种主要储集空间类型^[28-29]。在地震剖面上,规模储集体常见“串珠状”异常体,其内部是由洞穴、孔洞、裂缝系统和致密基岩交互组合形成的“栅状”储集结构(图5);在钻井上,主要表现为在断层附近普遍钻遇放空、漏失,漏失规模较大、漏速快、漏失泥浆密度普遍较低($1.18 \sim 1.3 \text{ g/cm}^3$),为正常压力系统;岩心常发育破碎角砾岩带典型特征,常见半充填-未充填高角度裂缝发育^[28];测井曲线上洞穴型储层电阻率明显呈箱形降低,裂缝型储层电阻率尖峰状降低^[29];酸压曲线显示注酸期间泵压明显降低,排量与泵压呈现“剪刀差”,停泵压力普遍偏低,测压降阶段无明显压降或压力升高,表现为酸压易沟通、近井地层渗透性好、地层能量充足的特征;压恢曲线上,呈“W-箱型”形态,表明内部由裂缝-多洞穴型储集系统构成,近井多套储集体连通规模大。

3.1.2 不同断裂样式储层建模

基于不同断裂体系演化差异与储集体储、渗性能关系分析、现今地应力和断裂走向夹角与裂缝开启程度分析^[18],将顺北地区已发现的18条主干断裂带划分为北东向单剪走滑体系、北西向单剪走滑体系、北东-北西向转换断裂体系及北东向压脊走滑体系^[18]。基于走滑断裂构造破裂成储机理^[28],断裂变形强度越

大、走滑位移越大,断控储集体规模越大,同一断裂体系具有相近的控储、控藏特征。北东向单剪走滑体系走向与现今区域主应力方向一致,且断裂活动强度大,储集体规模大^[28]。同一断裂带,基于断裂走向与叠接方式,分为拉分段、挤压段和平移段等3种典型样式^[18,28]。基于分段样式,构建以走滑拉分“脱空”和挤压“核带”两种主要储集体端元类型^[28],不同应力性质走滑断裂的脱空结构和核带结构占比不同,其中北东向断裂体系以拉分脱空结构为主,洞穴型储集体发育;北西断裂体系以挤压核带结构为主,裂缝型储集体发育^[28]。同一分段样式下,基于野外露头观察、物理模型及地震异常响应特征,分段内部同一条断裂可细分为叠接段和桥接段,其中叠接段以走滑、倾移为主,是叠接分段的主断层,地震剖面上“串珠”异常体较发育,钻揭洞穴型储集体发育,油气更为富集;桥接段以倾移为主,多是派生分支断裂,地震剖面上“串珠”异常体欠发育,钻揭主要发育裂缝型储集体,规模较小,油气富集程度相对较低。

走滑断裂带在平面和纵向上是由一系列不连续的断裂首尾侧接而成的,储集体非均质性强,实钻已证实断裂带内部发育多套成组系、受断裂带控制的缝洞系统,断控洞穴、裂缝系统和致密基岩互层组合形成“栅

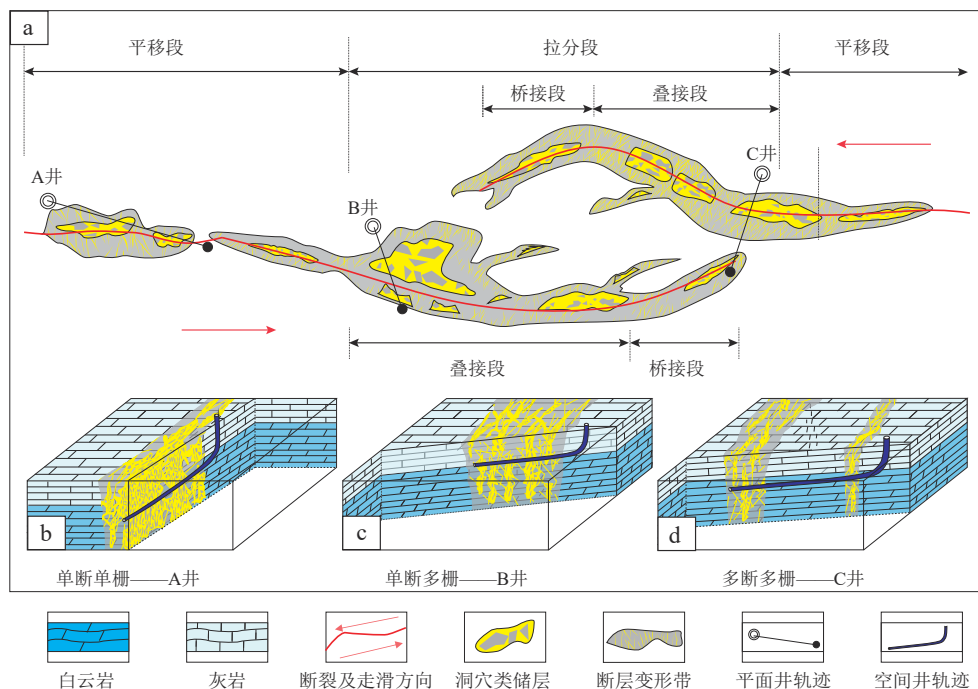


图5 顺北地区断控缝洞型储层模型与井型设计示意图

Fig. 5 Schematic diagram showing fault-controlled fractured-vuggy reservoir models and well design in the Shunbei area

a. 走滑断裂带左行左接样式,叠接拉分段; b. 单断单栅结构,一条断裂带控制一个栅状储集体,井轨迹与断裂带小角度相交,沿断层多穿储集体; c. 一条断裂带控制多个栅状储集体,井轨迹垂直断裂带,穿多个栅状储集体; d. 多条断裂带控制多个栅状储集体,井轨迹斜穿断裂带多个栅状储集体

状”储集结构。不同断裂“时间-空间-结构”演化差异性导致储集体空间结构的差异性,平移段和叠接构造的桥接段发育“单断单栅”储集结构,叠接构造的叠接段发育“单断多栅”储集结构,两条或多条相邻断裂组合带可发育“多断多栅”储集结构(图5)。

3.1.3 不同断裂样式井型设计

通过对断控缝洞型储集体不同分段进行地质建模及储集体分布规律研究,构建“差异分段、一体多栅”储集体地质模型(图5a)。基于提高单井产量及储量动用规模、增大泄油面积、利于井筒稳定快速成井与储层改造等原则,应用缝洞立体雕刻、地应力模拟等技术,针对不同“栅状结构”模式,形成差异化井型设计技术。

针对桥接段等裂缝型储层占比相对更高的部位(图5b),小区域内储集体相对分散、单个破碎体储量小的多缝洞单元,平面上设计为轨迹与断裂中-小角度相交、长水平段多穿缝洞体,增大沟通泄油面积;纵向上设计浅井,与叠接段深井构建“缝注洞采、浅注深采”立体井网。

针对叠接部位等洞穴型储层发育部位(图5c,d),地震响应以“串珠”强反射为主、空间上储量分布集中的缝洞体,纵向上设计为大斜度深井或近水平深井横穿断裂带,实现钻揭规模洞穴型储集体,增大泄油面积;平面上设计为井轨迹与断裂大角度相交、尽可能小水平位移钻揭断裂带内多组断面,扩大酸压储层改造范围,提高储量动用率。

3.2 储量估算与井网构建技术

与常规的层状碎屑岩油气藏不同,断控缝洞型油气藏主要受高陡走滑断裂带的控制,不同断裂带分段储层发育情况亦不同,井网构建难度大。通过目标井区储量估算及连通性表征,进而构建空间井网,实现油气藏高效动用。

3.2.1 规模储集体地震响应特征

基于实钻井井-震标定和模型正演分析,明确断控缝洞型储层在一间房组的地震响应特征主要为地震反射轴的“错段、弱振幅、波谷振幅异常”,在鹰山组内幕的地震响应特征主要为“串珠反射、杂乱反射、线性弱反射”。规模储层主要对应鹰山组内幕的地震异常反射特征,其中洞穴和孔洞型储层主要为“串珠反射”和“杂乱反射”的地震响应特征,裂缝型储层主要为“线性弱反射”的地震响应特征^[30-32]。

3.2.2 储集体空间雕刻与储量估算

利用瞬时能量属性、频谱不连续性属性、AFE属性分别描述“串珠反射”、“杂乱反射”和“线性弱反射”地震相,在已钻井放空漏失和储层测井解释标定的基础上,分别确定上述3种地震相刻画属性的门槛值,分类描述断控缝洞体中的洞穴、孔洞和裂缝型储层,将代表3类储层的地震属性融合形成断控缝洞型储层的空间雕刻体。以空间雕刻体为约束,通过填充不同类型储层的初始波阻抗值建立相控反演的初始波阻抗体,开展井-震结合的稀疏脉冲反演得到纵波阻抗体,通过测井解释成果建立断控缝洞型储层的波阻抗-孔隙度量版,将波阻抗体转化成孔隙度体,在孔隙度体基础上计算储集体体积,结合含油饱和度、气油比等油藏参数进行储量估算^[33-34]。

3.2.3 缝洞体连通表征与单元划分

通过断裂物性值网格化处理,定量计算连通概率值,采用断裂面孔隙度矩阵自动追踪算法求取断裂面最优连通路径,实现井间连通路径的自动识别(图6),连通路径从“定性描述”转变为“定量识别”。在连通路径识别基础上,根据缝洞与连通面的关联关系,划分缝洞单元。

3.2.4 探-评-建一体化井网构建

勘探-开发一体化实现整体部署,第一阶段针对不同断裂段、断裂性质、地质条件、地震反射特征的目标体,部署探井实现分段控制;第二阶段一体化优化布局,对断裂带缝洞单元体实现整体控制,同步考虑单元注采和提高采收率,构建各单元深浅不同开发井组。通过储集体体积雕刻、储量估算与一体化井网构建,落实不同断裂带油气藏规模和展布特征,设计探-评-建一体化井网,实现对不同断裂带断控缝洞型油气藏优化部署,分阶段搭建产能阵地,提高地质储量动用程度。

3.3 目的层轨迹优化设计技术

断控缝洞型油气藏埋深大,地震资料信噪比低,目标靶点准确定位难度大,导致钻进过程中储层钻遇率低,成井周期长、单井钻井成本高^[35]。通过靶点优选、储量动用与产能预测,实现目的层井轨迹的系统优化。

3.3.1 靶点优选定位与动态调整

面向顺北大沙漠覆盖、大埋深、火山岩复杂等勘探难点,强化采集、处理、解释一体化技术攻关。通过

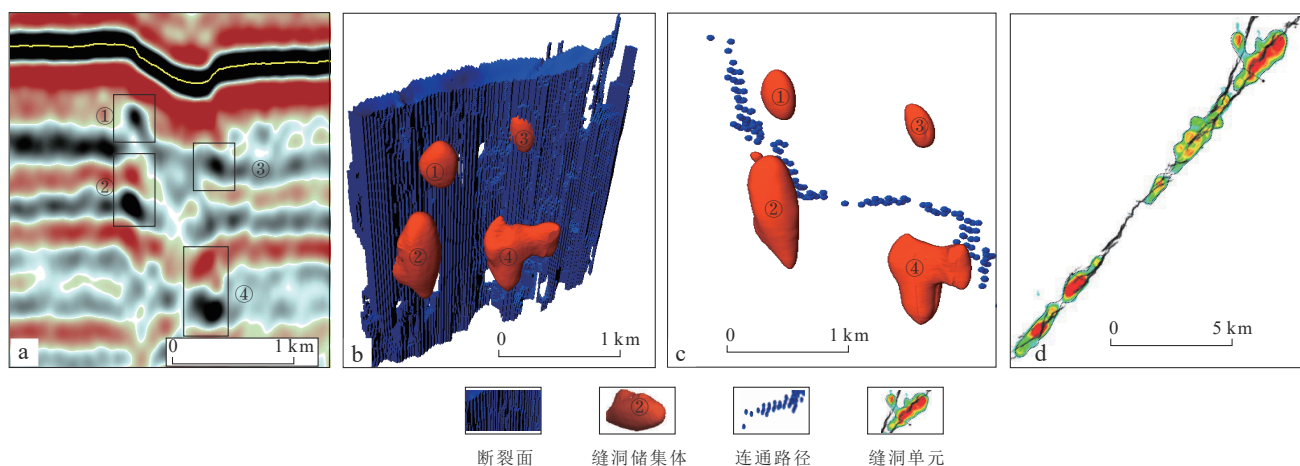


图6 顺北地区断控缝洞型储集体连通性表征与单元划分

Fig. 6 Connectivity characterization and unit division of fault-controlled fractured-vuggy reservoirs in the Shunbei area

a. 原始地震剖面; b. 雕刻体单个断裂和缝洞储集体立体显示; c. 断层面连通路径和缝洞储集体; d. 连通单元划分

优化采集系统,确定适用观测系统与激发接受参数,获得反映深层断控储集体的高品质地震资料;通过优选处理方案,确定最优处理参数,优选精细速度建模与成像方法,提升断裂带内幕及较小尺度缝洞体成像精度。

靶点优选定位方面,通过实钻井标定和正演分析,明确“串珠波谷”对应断控储集体的规模储层,在空间上规模储层顶面一般位于波谷中-下部。利用断控缝洞体空间雕刻结果,预测洞穴类储层发育位置及其与孔洞、裂缝储层之间的关系,确定洞穴类储层发育位置中心为钻井靶点。通过洞穴、孔洞和裂缝不同类型储层雕刻体,可以直观立体显示洞穴内部能量差异,相比仅靠二维剖面和平属性定位更加精准。

为确定钻井地质目标的空间位置,实施VSP随钻地震地质导向资料采集、处理与解释,利用VSP速度对叠前深度偏移的速度模型进行优化校正,在原始深度速度场基础上,通过VSP匹配与地质约束,快速更新速度场,使速度更为准确,从而预测目的层深度更为精准。利用VSP测井速度修正地面地震速度场,对现有三维地震资料进行叠前深度偏移重新处理,进一步确定缝洞的空间位置,明确靶点,动态调整钻井轨迹,保证靶点最优化。

3.3.2 井控储量估算与动用方式

通过立体雕刻,把雕刻出的每一个地震异常体进行标号与体积计算,再结合孔隙度、饱和度等参数逐个计算地震异常体储量,通过缝洞与连通路径的关系,综合判断井控范围内的异常体,并累加计算井控储量。融合储集体刻画、储量估算、连通性表征等成果,形成

断裂连通和轨迹连通两种动用方式,并估算单井可能动用的储量大小。

3.3.3 目的层井轨迹优化设计

在储集体分类建模、储量估算及连通性分析基础上,根据预探、评价、产能建设等不同阶段,形成不同断裂带“栅状”储集体结构的井轨迹设计技术(图5),提高一次储层钻遇率、单井储量动用率及单井产量。

1) 单断多栅“一井一控”井轨迹设计技术

针对以强反射为主、空间上储量分布集中的“单断多栅”储集体(图5c),纵向上设计为深井,大斜度(井斜角 $45^{\circ} \sim 90^{\circ}$)揭穿强能量异常,保证钻揭规模洞穴型储集体,增大泄油面积;平面上设计为轨迹与断裂大角度($60^{\circ} \sim 90^{\circ}$)相交、小水平位移钻揭断裂带内多组段面,扩大酸压储层改造范围,提高储量动用率。

2) 单断单栅“一井多控”井轨迹设计技术

针对小区域内储集体相对分散,单个破碎体储量小的“单断单栅”储集体(图5b),平面上设计为轨迹与断裂小角度相交($0^{\circ} \sim 30^{\circ}$)、长水平段钻揭前、后端多个缝洞体,增大沟通泄油面积;纵向上设计为浅井,初步与叠接段深井构建“缝注洞采、浅注深采”立体注采井网。

3) 多断多栅“一井多靶”井轨迹设计技术

针对两条或多条相邻断裂组合带,多个储集体空间距离较近的“多断多栅”储集体(图5d),平面上设计为轨迹与断裂中小角度相交($40^{\circ} \sim 60^{\circ}$)、长水平段钻揭多个储集体,增大沟通泄油面积;纵向上设计为深井或浅井,与邻井构建“缝注洞采、浅注深采”立体注采井网。

3.4 风险预测与优快钻井技术

顺北地区上覆地层和奥陶系目的层地质条件复杂,复杂火成岩、侵入岩、异常高压、断裂破碎带导致钻井面临漏失、溢流和井壁垮塌等风险,断控缝洞型储集体和地应力分布复杂,给钻井部署和施工带来一系列挑战,开展地质风险预测,支撑实现优快钻井意义重大。

3.4.1 风险预测与井口甄选技术

1) 二叠系火成岩预测技术

通过对已钻井二叠系漏失位置精细标定,发现凝灰岩和英安岩漏失风险大,地震反射特征为杂乱反射,玄武岩漏失风险小,地震反射特征为板状连续强反射。利用地震波形特征差异,采用“波形分类”的技术手段预测火成岩横向分布,分析漏失风险。同时根据英安岩、凝灰岩和玄武岩波阻抗差异,开展叠后波阻抗反演,提高二叠系火成岩不同岩性厚度预测精度。

2) 志留系断裂、裂缝带预测技术

志留系易发生井漏,漏失主要与断裂、裂缝发育相关。对原始地震数据开展断裂增强处理,针对断裂增强处理后的地震数据体开展多尺度断裂检测属性分析,提高小尺度断裂识别能力。形成以“断裂增强处理+多尺度断裂、裂缝预测”为主的志留系漏失风险预测技术。

3) 辉绿岩侵入体预测技术

顺北地区发育侵入岩,钻井钻遇侵入岩易发生井壁垮塌,当钻遇地层倾角陡的侵入岩时会发生偏斜风险,造成钻井周期及成本增加。侵入岩在地震剖面上表现为较明显的穿层板状强反射特征,首先在地震资料上追踪侵入岩发育范围,其次在精细速度建模的基础上进行时深转换,提取侵入岩的地层倾角属性,最后通过叠后波阻抗反演,预测侵入岩的厚度,提高侵入岩深度、厚度和倾角预测精度。

4) 异常高压预测技术

通过对顺北地区碎屑岩段溢流段的标定、地球物理和测井曲线分析,溢流段具有地层速度变小和孔隙度增大的特征,同时溢流主要发育在砂、泥互层段,符合欠压实作用的特征,认为异常高压成因主要为欠压实作用。通过对顺北地区钻、录、测井资料钻后评估分析,进行了分岩性和分层段岩石物理模拟,构建了地层压力预测模型,建立了以高精度速度反演为基础的地层压力预测方法。

目的层碳酸盐岩溢流段主要集中在一间房组,构

造的相对高部位,且测井资料显示发育缝洞型储层,认为异常高压的成因主要为构造挤压和生烃作用。传统Eaton法不适合碳酸盐岩地层压力预测,预测难度大,在碳酸盐岩目的层段形成以“ T_0 趋势差、 T_1^* 去强轴和应力分析”为主的定性预测技术,指导确定泥浆密度窗口,尽可能保护油气层。

5) 井口甄选技术

在上覆地层钻井风险和储层预测的基础上,通过三维空间雕刻及“甜点”空间定位技术精选靶点,在靶点周边约1 km半径范围内,结合断裂解析和钻井地质风险预测结果,形成“紧贴目的层断裂带,避非目的层断层,避高陡火成岩,避易漏易溢层”的井口甄选技术(图7)。

3.4.2 优快钻井技术

基于钻前高精度地震层速度反演结果,建立地层四压力预测模型,构建钻前四压力剖面,明确必封点,确定全井段安全泥浆窗口,形成顺标系列井身结构^[36-37];基于古生界岩性特征、岩石力学参数及抗钻特性研究,优选高效钻头及辅助破岩工具,优化防斜钻具组合和钻井参数,形成古生界分层提速技术系列,主要包括:二叠系以浅“穿夹层PDC+大扭矩螺杆”提速技术,二叠系火成岩“异型齿PDC+扭冲/大扭矩螺杆”高效破岩技术,石炭系-志留系强参数破岩技术,桑塔木组“PDC+垂钻+大扭矩螺杆”防斜打快技术,奥陶系储层“混合钻头+抗高温大扭矩螺杆”高效定向技术,机械钻速提升50%以上^[38-40]。

基于地质风险预测结果,明确二叠系火成岩、志留系漏失风险,侵入体和破碎地层坍塌风险,构建井筒强化技术系列。包括二叠系缝缝即堵堵漏技术^[41],志留系低密度高效穿漏技术,微纳米随钻封堵提承压技术,“物理支撑+随钻封堵+精细施工”侵入体防塌技术^[42],破碎性地层微纳米强封堵防塌技术等。二叠系-志留系漏失率从前期70%降至20%,单井堵漏周期从57.3 d降至10.8 d,奥陶系井壁失稳处理复杂周期从196.2 d降至7.9 d。

基于地质相控阻抗反演及分类雕刻量化研究结果,开展近井储集体精细描述,为定向工艺优化提供支撑。井眼轨道优化设计方面,针对储层特征,优化井眼曲率半径,钻井轨道由单增剖面优化为双增剖面;定向工艺方面,研选定向用混合钻头,提高定向钻进时工具面的稳定性,以提高定向效率^[43-44],单趟钻纯钻时间由35 h提高至50 h以上;优选5头7级抗高温定向弯螺杆,单趟纯钻时间由70 h提高到100 h,机械钻速由

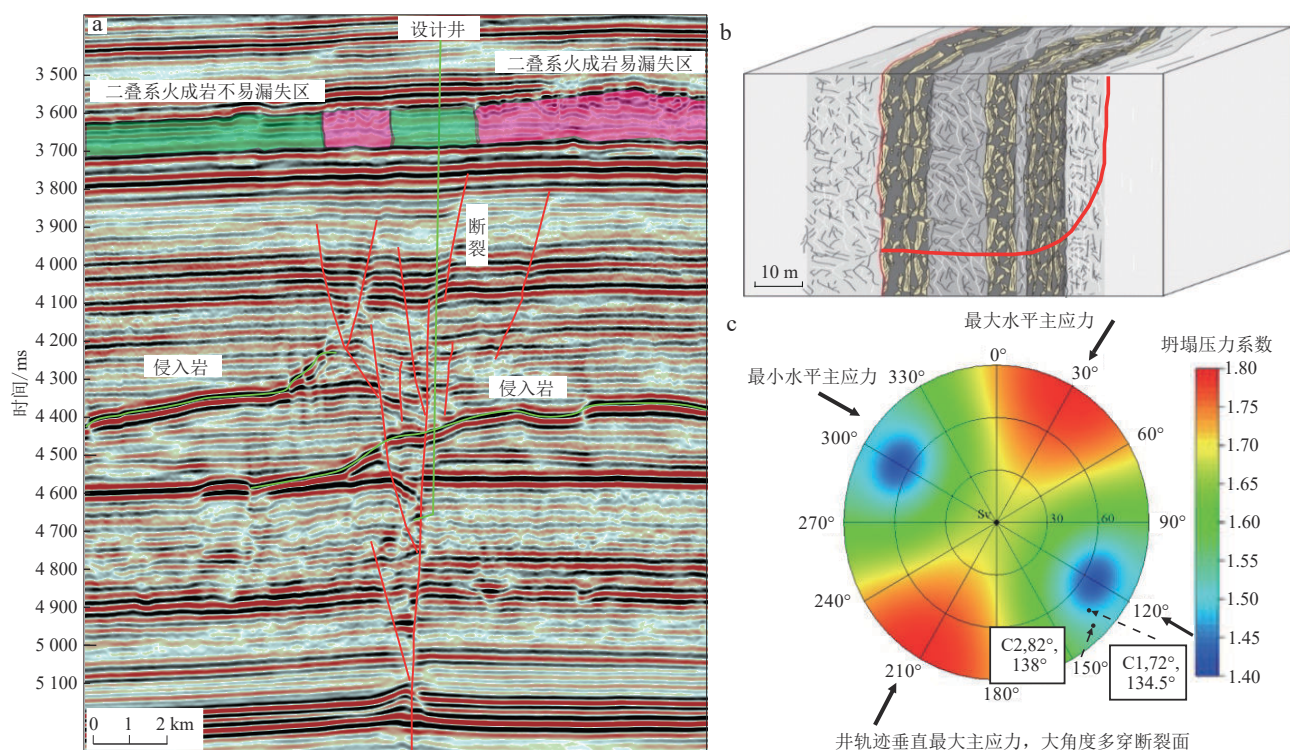


图7 顺北地区断控缝洞型储层井口与井轨迹设计示意图

Fig. 7 Schematic diagram showing the wellhead and well trajectory of fault-controlled fractured-vuggy reservoirs in the Shunbei area
a. 钻井井口优选示意图,井口紧贴目的层断裂带,避开覆地层风险; b. 目的层轨迹示意图; c. 不同井轨迹坍塌压力预测云图(C1,72°,134.5°分别表示井轨迹C1,目的层井斜角72°,钻井方位134.5°)

2.2 m/h 提高到 3.5 m/h。配套测量仪器方面,优选满足高温高压需求随钻测量仪器,井斜测量精度 $\pm 0.1^\circ$,仪器故障率由 21 % 降低至 12 %。

3.4.3 储层保护技术

顺北断控缝洞型储层非均质性强,多尺度裂缝油气渗流通道发育,基质渗透性差,储层污染对单井产能影响较大。室内研究表明,碳酸盐岩储层岩石存在中偏强的碱敏、弱速敏、水敏、盐敏、无酸敏性,固相侵入是储层损害的主控因素^[44]。根据储层压力预测结果,合理选择钻井液密度,配套可酸溶暂堵钻井液体系,减少高密度钻井液污染储层^[45]。根据理想充填以及 SAN-2 工程分布理论,优选多粒级刚性颗粒、变形材料,构建随钻暂堵体系和不同裂缝宽度的高效桥接堵漏体系。

使用“控压+降密度”钻井工艺,配合旋转控制头、节流管汇、节控箱(液动)、压井管汇、液气分离器等主要控压设备,通过调节节流管汇液动节流阀阀位开度,以立套压、液面为依据,进行控压(套压 < 5 MPa)钻井,实现微过平衡(控制漏速小于 $2 \text{ m}^3/\text{h}$)钻进,实现减少漏失量、多穿有效储层的目的。推广应用后储层穿漏进尺最长 635 m,钻井液密度最低降至 $1.05 \text{ g}/\text{cm}^3$,钻

井液漏失量降低 44 %。

通过建立风险预测与优快钻井关键技术,较准确预警、预报钻井地质风险,在钻井设计阶段尽可能避开风险,在钻进过程中提前准备风险应对措施,解决钻井工程难题,提速、提质、提效实现快速安全钻井,同时提高井筒稳定性,为后期完井提供支撑。

3.5 分段酸压与衬管完井技术

3.5.1 裸眼分段酸压完井技术

栅状储集结构一井多靶井型特点决定了,笼统酸化不能充分改造多个储集体,综合动用效果差,因而完井工艺需采用分段改造方式扩大动用,提升单井产能。奥陶系储层段破碎、天然裂缝发育,裸眼井径不规则、漏失严重,套管固井难度大,因此需优选裸眼分段完井方式。常用的压缩式裸眼分段工具对井眼条件要求高,需满足井眼曲率 $\leq 8^\circ$ (每 30 m)、井径扩大率 $\leq 5\%$,而顺北 90 % 以上的油气井不满足要求;井眼适应性更强的扩张式裸眼封隔器耐温(150°C)、耐压(50 MPa),满足不了顺北应用需求。

结合地质-工程一体化需求,优选扩张式裸眼封

隔器裸眼分段方案,攻关提升完井工具性能。一方面通过橡胶、骨架支撑结构优化,实现扩张式胶筒耐温、耐压性能提升,另一方面创新设计永久关闭式胶筒进液结构,封隔器坐封后,胶筒内液量不因环境温度、压力变化而改变,实现了改造-投产过程中 100~180℃ 大温差条件下的长效密封。

通过上述改进,攻关形成一种耐高温、耐高压的 K343 扩张式裸眼封隔器,相对常规裸眼封隔器,耐温由 150℃ 提升至 180℃,耐压由 50 MPa 提升至 70 MPa,胶筒长度由 0.2 m 提升至 1.2 m,适用裸眼曲率由 8° (每 30 m) 提升至 20° (每 30 m),扩径率由 5% 提升至 10%,封隔器整体性能提升了 40% 以上,适应性也显著提升,充分发挥了扩张式裸眼封隔器的优势:胶筒长,天然裂缝封隔能力强;刚度低,轨迹适应能力强;扩张率大,井径适应能力强;性能提升,满足顺北温度压力需求。同时配套顶部悬挂封隔器、分段滑套、耐酸可溶球等工具,形成了一种适用于顺北超深储层的扩张式裸眼分段酸压完井技术。

3.5.2 井壁支撑衬管完井技术

顺北断控缝洞型储层受地质构造和断裂带影响,易破碎、坍塌风险高^[43],油气井常采用裸眼完井方式,前期已发现 5 口井因井壁坍塌而停产,累计损失产量 256 t/d。井深在 8 000 m 以上的油气井面临修井周期长、修井成本高、恢复生产困难等难题。

基于地质多靶点“一井多控”布井思路,完井工艺需满足裸眼井壁支撑、后期易侧钻的双重需求。针对“单断单栅”储集结构,提出铝合金易钻衬管井壁支撑完井思路。通过易钻金属材质、耐酸涂层优选,易钻衬管尺寸优化,研发形成一种耐温 180℃、耐压 70 MPa、内径 100 mm 的耐酸铝合金油管,并配套耐酸 F-3 涂层,具有“易钻磨、能酸压、能修井”三大技术优势^[46-47]。

通过管柱结构优化、关键工具配套等,攻关形成“可回收顶部悬挂封隔器+易钻管+碳钢盲管/筛管”和“易钻丢手器+易钻管+机械反扣丢手+碳钢盲管/筛管”两种井壁支撑完井管柱(图 8),管柱尺寸的选择结合裸眼尺寸、狗腿度等,遵循“优先保证下入、再保证通径”的原则。为了降低完井作业成本,采用易钻、碳钢复合衬管管柱设计,易钻管顶部位置设计为生产套管管鞋以上 50 m 以内,底部位置设计为造斜点(或侧钻点)以下 50 m 以内。结合测井解释成果和地质认识,筛管位置正对优势储层段,保证储集体得到针对性的改造和充分的产能释放。

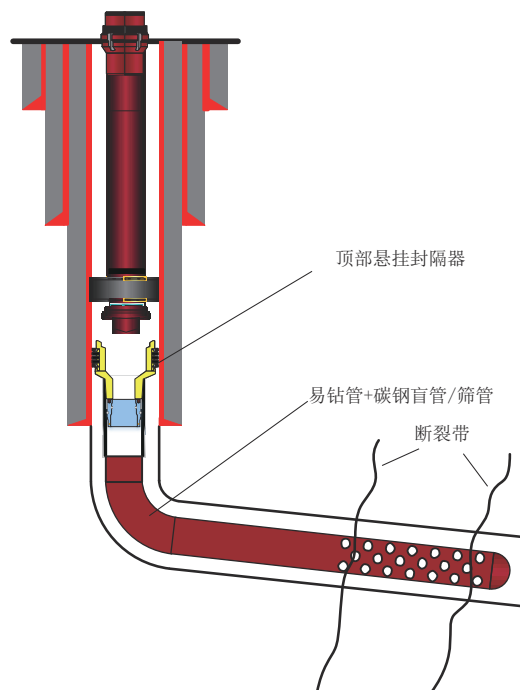


图 8 破碎带储层衬管完井管柱结构示意图

Fig. 8 Schematic diagram of liner completion string structure in reservoirs in fractured zones

3.6 储层分类改造技术

针对井区“栅状结构”模型,通过近井不同类型储集体精细描述,实施针对性高效改造完井工艺,形成超深碳酸盐岩断控缝洞型油气藏高效改造技术系列。开展不同储层类型及井储关系研究,攻关复合深度酸化疏通、复杂缝改造、纵、横向深穿透沟通、暂堵+工具分段酸压改造技术,形成断控缝洞型油气藏高效改造技术系列(表 1),解决超深断控缝洞型油气藏“易漏失、弱连通、强封隔”开采难题。

3.6.1 复合酸深部疏通技术

顺北钻井漏失量大,水平井钻井岩屑难返出,井周污染严重,疏通难度大;闭合压力高,缝宽小,导流能力

表 1 顺北地区断控缝洞型油气藏高效改造工艺选型

Table 1 Selection of high-efficiency reconstruction technology for fault-controlled fractured-vuggy reservoirs in the Shunbei area

地质目标特点		改造工艺
洞穴型	钻遇洞穴	复合酸深部疏通技术
	未钻遇洞穴	纵、横向深穿透沟通技术
裂缝型	单一储集体	复杂缝改造技术
	双储集体	暂堵分段酸压工艺
	多储集体	工具分段、工具+暂堵复合分段酸压工艺

下降快。针对上述问题,基于酸蚀蚓孔扩展研究,提出了土酸+胶凝酸溶蚀近井污染、反应速度慢的自生酸+穿透距离远的交联酸进行复合酸化提高远井导流能力的复合酸深部疏通技术,疏通范围30~60 m,有效解决漏失污染井的复产、增产问题。

3.6.2 复杂缝改造技术

针对破碎带内天然裂缝发育,但连通性差的问题,基于缝网形成数值模拟与物模实验研究^[48],攻关形成复杂缝改造技术,先注入高粘压裂液形成高导流深穿透主缝,沟通断裂体;再注入低粘度的“酸性滑溜水”,刻蚀、激活、连通天然裂缝,大幅增加断裂体内部改造范围(体积),实现由“点线沟通”向“面体沟通”转变。

3.6.3 纵、横向深穿透沟通技术

针对井眼距离储集体远、常规酸压难以沟通的问题,基于裂缝扩展理论^[48],攻关形成深穿透沟通技术,采用大排量($9\text{ m}^3/\text{min}$ 以上)、大规模($2\,000\text{ m}^3$ 以上)和高粘压裂液($200\text{ mPa}\cdot\text{s}$ 以上),提高净压力,促使裂缝纵、横向快速延伸,实现纵、横向未钻达储集体的有效沟通。同时采用4.5 in油管、140 MPa井口及加重压裂液,提高施工能力。

3.6.4 分段酸压技术

针对水平井周围有多套储集体,笼统酸压难以高效动用的难题,攻关形成工具+暂堵分段技术,实现了多套储集体同时动用。针对无放空/小漏失井,暂堵分段酸压可满足二级改造,最大暂堵压力可达15 MPa;针对洞穴-裂缝型储集体井多个断面/破碎体改造,且扩径 $<5\%$ 、井眼曲率 $\leq 15^\circ$ (每30 m)的裸眼采用工具硬分段酸压工艺精确动用;鉴于工具分段对井筒条件要求高,暂堵分段适用于无放空/小漏失井,对于多套有利储集体目标,可采用工具+暂堵复合分段酸压,提高分段能力、动用多个分隔断面/破碎体。

3.7 地质-工程一体化成效

针对顺北超深断控缝洞型油气藏,聚焦地质与工程技术关键难题,通过多学科、产学研联合攻关,大力实施地质-工程一体化,取得明显成效:①地质风险预警综合吻合率由55%提高到95%,提高40%,单井复杂故障时效由12.58%降至5.03%,降低60%,平均钻井周期大幅缩短,由280 d降至170 d(最低128 d),平均单井周期缩短量超过100 d;②实现高效勘探与效益开发,发现顺北4号、8号断裂带两个油气当量超亿吨

的凝析气藏增储区带,21口完钻井全部获得高产,其中初产油气当量超千吨的油气井多达16口。

4 发展趋势与攻关方向

随着顺北勘探开发向主干断裂带之外次级断裂带、深层新领域拓展,油气勘探开发全面展开,勘探目标埋深更大、温度更高、气油比更高,且油气资源劣质化和油气勘探开发对象复杂化日益明显,对地质目标评价、效益勘探开发与工程技术的挑战更加突出,地质-工程一体化地位和作用更加凸显。

地震地质研究方面,完善、迭代提升断控缝洞型油气藏全生命周期地质-工程一体化技术标准,贯穿井位部署、方案制定、设计优化、钻井完井、试油试采、油气藏评价的全过程。重点要加强走滑断裂带地震波场特征研究,提升超深走滑断控缝洞体成像与描述精度;强化断裂带内部结构精细解析,深化断控缝洞型储集体“栅状结构”形成、演化与分布规律认识;完善超深断控缝洞型油气藏成藏理论,持续攻关不同类型勘探目标评价技术。

工程技术保障方面,加快构建与之适应和配套的工程关键技术体系。重点要加强抗高温工具、仪器、材料的研发;开展特深井井身结构设计技术、油套管轻量化技术、防气侵钻井液技术、特深高温小井眼高效定向技术、高压裂缝性气层井控技术等研究;开展真实地层条件下室内物理模拟实验及造缝理论研究,180~200℃超高温缓速酸液研发;探索研究智能钻头技术、大数据提速技术等。

信息化建设方面,目前还存在一定的信息孤岛问题,需要进一步完善地质-工程一体化数据平台,深度挖掘数据时效性,同时加大探索人工智能等新技术应用,提高多学科数据使用效率,实现多学科数据的深度融合,保障复杂油气藏的高效勘探开发。

5 结论

1) 地质-工程一体化能够最大限度地解决复杂地质条件导致的一系列工程难题。针对顺北超深断控缝洞型油气藏这种新类型的油气藏,坚持“少井高产”理念,将地质研究、工程设计和组织实施纳入一体化协作体系,近两年相继打出16口“千吨油气当量”高产井,实现提速、提质、提产、提效、降本。

2) 高效地质-工程一体化协同运行平台,是实现地质-工程一体化的重要前提。通过搭建地质-工程一

体化、勘探-开发一体化协同工作平台,打破原有“技术分割、管理接力”运行模式,实现非目的层风险精准预测、全面预报钻探风险,目的层保护储层、发现油气,协调、统一地质甜点与工程甜点关系,实现优快钻井。

3) 持续深化地质认识、持续迭代关键技术是实现地质-工程一体化的重要保障。针对走滑断裂带“栅状结构”储集体模型,实行“一井一体、一井多控、一井多靶”差异化设计,形成储层建模与井型设计、储量估算与井网构建、井轨迹优化设计、风险预测与优快钻井、分段酸压与衬管完井、储层描述与分类改造等全生命周期关键技术体系,成井周期大幅缩短,高产井成功率明显提升。

4) 打破学科界限与专业壁垒,多学科深度融合,是实现地质-工程一体化的重要途径。顺北油气田充分发挥多学科优势,推动地质认识、工程技术、油藏开发技术等迭代提升,支撑顺北油气田高效勘探与效益开发,发现顺北4号、8号断裂带两个油气当量超亿吨级凝析气藏增储区带。

参 考 文 献

- [1] 孙焕泉,周德华,赵培荣,等. 中国石化地质工程一体化发展方向[J]. 油气藏评价与开发, 2021, 11(3): 269-280.
Sun Huanquan, Zhou Dehua, Zhao Peirong, et al. Geology-engineering integration development direction of Sinopec [J]. Reservoir Evaluation and Development, 2021, 11(3): 269-280.
- [2] 王光付,李凤霞,王海波,等. 四川盆地非常规气藏地质-工程一体化压裂实践与认识[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(5): 1221-1237.
Guangfu Wang, Fengxia Li, Haibo Wang, et al. Application of an integrated geology-reservoir engineering approach to fracturing in unconventional gas reservoirs, Sichuan Basin and some insights [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(5): 1221-1237.
- [3] 刘成林,刘新菊,张洪军,等. 鄂尔多斯盆地安塞地区页岩油地质-工程一体化技术实践[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(5): 1238-1248.
Chenglin Liu, Xinju Liu, Hongjun Zhang, et al. Application of an integrated geology-reservoir engineering approach to shale oil development in Ansai area, Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(5): 1238-1248.
- [4] 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.
- [5] 漆立新. 塔里木盆地顺北果勒隆起奥陶系碳酸盐岩超深层油气突破及其意义[J]. 中国石油勘探, 2016, 21(3): 38-51.
Qi Lixin. Oil and gas breakthrough in ultra-deep Ordovician carbonate formations in Shuntuoguole uplift, Tarim Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2016, 21(3): 38-51.
- [6] 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.
- [7] 赵锐,赵腾,李慧莉,等. 塔里木盆地顺北果勒地区中下奥陶统鹰山组与一间房组沉积相与旋回地层[J]. 东北石油大学学报, 2019, 43(4): 1-16+139.
Zhao Rui, Zhao Teng, Li Huili, et al. Sedimentary facies and cyclic stratigraphy of Yingshan and Yijianfang Formations of Lower-Middle Ordovician in Shuntuoguole area, Tarim Basin [J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2019, 43(4): 1-16+139.
- [8] 彭军,夏梦,曹飞,等. 塔里木盆地顺北一区奥陶系鹰山组与一间房组沉积特征[J]. 岩性油气藏, 2022, 34(2): 17-30.
Peng Jun, Xiameng, Cao Fei, et al. Sedimentary characteristics of Ordovician Yingshan Formation and Yijianfang Formation in Shunbei-1 area, Tarim Basin [J]. Lithologic Reservoirs, 2022, 34(2): 17-30.
- [9] 刘雨晴,邓尚,张荣,等. 深层火成岩侵入体和相关构造发育特征及其石油地质意义——以塔里木盆地顺北地区为例[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(1): 105-117.
Liu Yuqing, Deng Shang, Zhang Rong, et al. Characterization and petroleum geological significance of deep igneous intrusions and related structures in the Shunbei area, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(1): 105-117.
- [10] 田方磊,何登发,陈赓俊,等. 塔里木盆地顺北果勒低隆及邻区加里东中期运动面的构造性质[J]. 地质科学, 2020, 55(3): 813-828.
Tian Fanglei, He Dengfa, Chen Jiajun, et al. Structural properties of the mid-caledonian movement surfaces in the Shuntuoguole lower uplift and adjacent area, Tarim Basin [J]. Chinese Journal of Geology, 2020, 55(3): 813-828.
- [11] 黄诚. 叠合盆地内部小尺度走滑断裂幕式活动特征及期次判别——以塔里木盆地顺北地区为例[J]. 石油实验地质, 2019, 41(3): 379-389.
Huang Cheng. Multi-stage activity characteristics of small-scale strike-slip faults in superimposed basin and its identification method: A case study of Shunbei area, Tarim Basin [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2019, 41(3): 379-389.
- [12] 林波,云露,李海英,等. 塔里木盆地顺北5号走滑断层空间结构及其油气关系[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(6): 1344-1353+1400.
Lin Bo, Lu Yun, Haiying Li, et al. Spatial structure of Shunbei No. 5 strike-slip fault and its relationship with oil and gas reservoirs in the Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(6): 1344-1353, 1400.
- [13] 邓尚,刘雨晴,刘军,等. 克拉通盆地内部走滑断裂发育、演化特征及其石油地质意义:以塔里木盆地顺北地区为例[J]. 大地

- 构造与成矿学, 2021, 45(6): 1111-1126.
- Deng Shang, Liu Yuqing, Liu Jun, et al. Structural styles and evolution models of intracratonic strike-slip faults and the implications for reservoir exploration and Appraisal: A case study of the Shunbei Area, Tarim Basin[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2020, 44(6): 1111-1126.
- [14] 况安鹏, 余一欣, 朱秀香, 等. 塔里木盆地顺北地区11号走滑断裂带变形及其活动特征[J]. *现代地质*, 2021, 35(6): 1809-1817.
- Kuang Anpeng, Yu Yixin, Zhu Xiuxiang, et al. Deformation and activity characteristics of the No. 11 strike-slip fault zone in the Shunbei Area, Tarim Basin[J]. *Geoscience*, 2021, 35(6): 1809-1817.
- [15] 刘雨晴, 邓尚. 板内中小滑移距走滑断裂发育演化特征精细解析——以塔里木盆地顺北4号走滑断裂为例[J]. *中国矿业大学学报*, 2022, 51(1): 124-136.
- Liu Yuqing, Deng Shang. Structural analysis of intraplate strike-slip faults with small to medium displacement: A case study of the Shunbei 4 fault, Tarim Basin[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2022, 51(1): 124-136.
- [16] 林波, 云露, 张旭, 等. 一种板内小尺度走滑断层平面分段研究方法——以塔里木盆地顺北5号断层中北段为例[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2021, 51(4): 1006-1018.
- Lin Bo, Yun Lu, Zhang Xu, et al. A method for plane segmentation of small-scale intraplate strike-slip faults: A case of the Middle-North segment of Shunbei No. 5 Fault in Tarim Basin[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2021, 51(4): 1006-1018.
- [17] 林波, 张旭, 况安鹏, 等. 塔里木盆地走滑断裂构造变形特征及油气意义——以顺北地区1号和5号断裂为例[J]. *石油学报*, 2021, 42(7): 906-923.
- Lin Bo, Zhang Xu, Kuang Anpeng, et al. Structural deformation characteristics of strike-slip faults in Tarim Basin and its hydrocarbon significance: A case of Shunbei No. 1 fault and No. 5 fault[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2021, 42(7): 906-923.
- [18] 云露. 顺北东部北东向走滑断裂体系控储控藏作用与突破意义[J]. *中国石油勘探*, 2021, 26(3): 41-52.
- Yun Lu. Controlling effect of NE strike-slip fault system on reservoir development and hydrocarbon accumulation in the eastern Shunbei area and its geological significance, Tarim Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2021, 26(3): 41-52.
- [19] 韩俊, 况安鹏, 能源, 等. 顺北5号走滑断裂带纵向分层结构及其油气地质意义[J]. *新疆石油地质*, 2021, 42(2): 152-160.
- Han Jun, Kuang Anpeng, Neng Yuan, et al. Vertical layered structure of Shunbei No. 5 strike-slip fault zone and its significance on hydrocarbon accumulation[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2021, 42(2): 152-160.
- [20] 云露, 朱秀香. 一种新型圈闭: 断控缝洞型圈闭[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(1): 34-42.
- Yun Lu, Zhu Xiuxiang. A new trap type: Fault-controlled fracture-vuggy trap[J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(1): 34-42.
- [21] 马永生, 何治亮, 赵培荣, 等. 深层-超深层碳酸盐岩储层形成机理新进展[J]. *石油学报*, 2019, 40(12): 1415-1425.
- Ma Yongsheng, He Zhiliang, Zhao Peirong, et al. A new progress in formation mechanism of deep and ultra-deep carbonate reservoir[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2019, 40(12): 1415-1425.
- [22] 付晓飞, 吕丁友, 黄江波, 等. 断裂-盖层耦合封闭机理及断层圈闭油气聚集模式[J]. *天然气工业*, 2022, 42(3): 21-28.
- Fu Xiaofei, Lyu Dingyou, Huang Jiangbo, et al. Fault-caprock coupling sealing mechanism and fault trap hydrocarbon accumulation model[J]. *Natural Gas Industry*, 2022, 42(3): 21-28.
- [23] 焦方正, 杨雨, 冉崎, 等. 四川盆地中部地区走滑断层的分布与天然气勘探[J]. *天然气工业*, 2021, 41(8): 92-101.
- Jiao Fangzheng, Yang Yu, Ran Qi, et al. Distribution and gas exploration of the strike-slip faults in the central Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2021, 41(8): 92-101.
- [24] 丁士东, 赵向阳. 中国石化重点探区钻井完井技术新进展与发展建议[J]. *石油钻探技术*, 2020, 48(4): 11-20.
- Ding Shidong, Zhao Xiangyang. New progress and development suggestions for drilling and completion technologies in Sinopec key exploration areas[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2020, 48(4): 11-20.
- [25] 张亚云, 李大奇, 高书阳, 等. 顺北油气田奥陶系破碎性地层井壁失稳影响因素分析[J]. *断块油气田*, 2022, 29(2): 256-260.
- Zhang Yayun, Li Daqi, Gao Shuyang, et al. Analysis on influencing factors wellbore instability of Ordovician fractured formation in Shunbei Oil and Gas Field[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2022, 29(2): 256-260.
- [26] 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.
- [27] 唐磊, 王建峰, 曹敬华, 等. 塔里木盆地顺北地区超深断溶体油气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.
- [28] 吕海涛, 韩俊, 张继标, 等. 塔里木盆地顺北地区超深碳酸盐岩断溶体发育特征与形成机制[J]. *石油实验地质*, 2021, 43(1): 14-22.
- Lyu Haitao, Han Jun, Zhang Jibiao, et al. Development characteristics and formation mechanism of ultra-deep carbonate fault-dissolution body in Shunbei area, Tarim Basin[J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2021, 43(1): 14-22.
- [29] 邹榕, 徐中祥, 张晓明, 等. 顺北和托甫台区块奥陶系断裂结构单元测井响应特征初探[J]. *油气藏评价与开发*, 2020, 10(2): 18-23.
- Zou Rong, Xu Zhongxiang, Zhang Xiaoming, et al. Log response characteristics of Ordovician fracture unit in Shunbei and Tuofutai block[J]. *Reservoir Evaluation and Development*, 2020, 10(2): 18-23.

- 18-23.
- [30] 刘军,李伟,龚伟,等. 顺北地区超深断控储集体地震识别与描述[J]. 新疆石油地质,2021,42(2):238-245.
Liu Jun, Li Wei, Gong Wei, et al. Seismic identification and description of ultra-deep fault-controlled reservoirs in Shunbei area [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2021, 42(2): 238-245.
- [31] 杨威,周刚,李海英,等. 碳酸盐岩深层走滑断裂成像技术[J]. 新疆石油地质,2021,42(2):246-252.
Yang Wei, Zhou Gang, Li Haiying, et al. Seismic imaging technology for deep strike-slip faults in carbonate reservoirs [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2021, 42(2): 246-252.
- [32] 廖茂辉,刘军,龚伟,等. 顺北地区断控缝洞型储层反射特征与预测技术探讨[J]. 工程地球物理学报,2020,17(6):703-710.
Liao Maohui, Liu Jun, Gong Wei, et al. Discussion on reflection characteristics and prediction technology of fault-controlling fractured-vuggy reservoir in Shunbei area [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2020, 17(6): 703-710.
- [33] 李宗杰,杨子川,李海英,等. 顺北沙漠区超深断溶体油气藏三维地震勘探关键技术[J]. 石油物探,2020,59(2):283-294.
Li Zongjie, Yang Zichuan, Li Haiying, et al. Three-dimensional seismic exploration method for ultra-deep fault-related dissolution reservoirs in the Shunbei desert area [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2020, 59(2): 283-294.
- [34] 刘宝增,漆立新,李宗杰,等. 顺北地区超深层断溶体储层空间雕刻及量化描述技术[J]. 石油学报,2020,41(4):412-420.
Liu Baozeng, Qi Lixin, Li Zongjie, et al. Spatial characterization and quantitative description technology for ultra-deep fault-karst reservoirs in the Shunbei area [J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(4): 412-420.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] 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 Yi'nao, 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.
- [38] Chen X, Li S, Zhang J, et al. 3D geomechanical modelling for an extra deep fractured carbonate reservoir, Northwest China [C]// SPE. SPE Asia Pacific Oil & Gas Conference and Exhibition. Perth, Australia: SPE, 2020.
- [39] Liu B, Zhu Z X, Zhang J, et al. Fatigue failure analysis of drilling tools for ultra-deep wells in shunbei Block [C]// IOP Conference Series Materials Science and Engineering. London: IOP Publishing, 2018.
- [40] 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.
- [41] 潘军,李大奇. 顺北油田二叠系火成岩防漏堵漏技术[J]. 钻井液与完井液,2018, 35(3):42-47.
Pan Jun, Li Daqi. Technology of preventing and controlling mud losses into the permian igneous rocks in Shunbei Oil field [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2018, 35(3): 42-47.
- [42] 翟科军,于洋,刘景涛,等. 顺北油气田火成岩侵入体覆盖区超深井优快钻井技术[J]. 石油钻探技术,2020,48(2):1-5.
Zhai Kejun, Yu Yang, Liu Jingtao, et al. Ultra-deep well drilling technology in the igneous invasion coverage area of the Shunbei oil and gas field [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2020, 48(2): 1-5.
- [43] 孙明光. 顺北油田超深小井眼水平井定向钻井技术[J]. 钻采工艺,2020,43(2):19-22.
Sun Mingguang. Directional drilling technology for ultra-deep horizontal slimhole wells in Shunbei Oilfield [J]. Drilling & Production Technology, 2020, 43(2): 19-22.
- [44] Lee H, Ong S H, Azeemuddin M, et al. A wellbore stability model for formations with anisotropic rock strengths [J]. Journal of Petroleum Science & Engineering, 2012, 96-97: 109-119.
- [45] 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 in-fracture steering fracturing in Shunbei oilfield [J]. Lithologic Reservoirs, 2020, 32(5): 170-176.
- [46] Peng S. Expired drug theophylline as potential corrosion inhibitor for 7075 Aluminium Alloy in 1M NaOH Solution [J]. International Journal of Electrochemical Science, 2020: 1412-1425.
- [47] Olson J E, Laubach S E, Lander R H. Natural fracture characterization in tight gas sandstones: Integrating mechanics and diagenesis [J]. AAPG Bulletin, 2009, 93(11): 1535-1549.
- [48] 胡文庭,何晓波,李楠,等. 塔河油田外围超深碳酸盐岩储层深度酸压改造技术研究与应用[J]. 石油地质与工程, 2015, 29(1): 115-117.
Hu Wenting, He Xiaobo, Li Nan, et al. Study and application of deep acid fracturing technology for ultra-deep carbonate reservoir in the periphery of Tahe oilfield [J]. Petroleum Geology and Engineering, 2015, 29(1): 115-117.

(编辑 张亚雄)