

◀特深层油气工程技术专题▶

doi:10.11911/syztjs.2022077

引用格式: 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.

塔河油田缝洞型油藏“一井多控”高效开发关键技术

何成江¹, 姜应兵¹, 文欢¹, 李翔²

(1. 中国石化西北油田分公司勘探开发研究院, 新疆乌鲁木齐 830011; 2. 中国石化西北油田分公司工程技术管理部, 新疆乌鲁木齐 830011)

摘 要: 塔河油田碳酸盐岩缝洞型油藏主要储油空间是溶洞, 多轮次开发过程中溶洞的储量品质与规模不断下降, 单井动用单洞的开发方式效益风险逐年增大。为此, 基于地质工程一体化, 研发了同时动用多套缝洞体的“一井多控”高效开发关键技术。该技术主要基于缝洞分级刻画描述技术, 分级标定复杂缝洞体内部基岩与有效缝洞体的边界; 针对缝洞型油藏缝洞空间展布存在的差异性, 推进地质工程一体化, 设计多种“串联”井眼轨道, 尽可能贴近有效缝洞边界; 研发适合缝洞型储层的分段改造一次动用完井技术, 实现一个井眼沟通动用多个缝洞体的目标, 进一步提高单井产能和单井开发效益。“一井多控”高效开发关键技术在塔河油田进行了现场试验, 试验过程中对缝洞刻画、井眼轨道设计及完井技术不断迭代优化提升, 支撑了“一井多控”评价井储量动用规模与产能的不断提升, 储量动用规模达到直井动用储量规模的 1.5 倍以上, 油井日产量能力提高 10% 以上。“一井多控”高效开发关键技术在塔河油田碳酸盐岩缝洞型油藏提供了一种新的开发方式。

关键词: 缝洞型油藏; 单井动用单洞; 地质工程一体化; 缝洞分级刻画; 一井多控; 塔河油田

中图分类号: TE344 文献标志码: A 文章编号: 1001-0890(2022)04-0037-08

Key Technologies for High-Efficiency One-Well Multi-Control Development of Fractured-Vuggy Reservoirs in Tahe Oilfield

HE Chengjiang¹, JIANG Yingbing¹, WEN Huan¹, LI Xiang²

(1. Exploration and Development Research Institute, Sinopec Northwest Oilfield Company, Urumqi, Xinjiang, 830011, China; 2. Engineering Technology Management Division, Sinopec Northwest Oilfield Company, Urumqi, Xinjiang, 830011, China)

Abstract: The karst caves are the main oil storage space in the fractured-vuggy carbonate reservoirs in Tahe Oilfield. During multiple rounds of development, the reserve quality and scale of the karst caves keep declining, the benefit risk of the development method of single well producing single cave intensifies with each passing year. For this reason, high-efficiency development technologies of one-well multi-control that can simultaneously exploit multiple fracture-cave bodies were developed on the basis of geology-engineering integration. Specifically, the hierarchical characterization and description technology for fractures and caves was employed to hierarchically demarcate the boundaries between the internal bedrock and the effective fracture-cave bodies in the complex fracture-cave bodies. Due to the differences in the spatial distribution of the fractures and caves in fractured-vuggy reservoirs, a variety of “series” wellbore trajectories as close to the boundaries of the effective fractures and caves as possible were designed to advance geology-engineering integration. Furthermore, a completion technology featuring staged reconstruction and one-time production for fractured-vuggy reservoirs was developed so that one wellbore could connect and exploit production from multiple fracture-cave bodies to further improve the capacity and development benefit of single-well. Field tests of the one-well multi-control technologies were carried out in Tahe Oilfield. During the tests, fracture and cave characterization, trajectory design, and the completion technology were iteratively optimized, which supported the continuous improvement of the reserve production scale and productivity of the one-well multi-control evaluation wells. As a result, the reserve production scale of these wells reached more than 1.5 times that of the vertical wells, and

收稿日期: 2022-03-12; 改回日期: 2022-07-12。

作者简介: 何成江 (1981—), 男, 新疆乌鲁木齐人, 2005 年毕业于中国地质大学 (武汉) 地质工程专业, 2018 年获西南石油大学石油与天然气工程专业硕士学位, 高级工程师, 主要从事油气藏开发及地质工程一体化研究。E-mail: hechengjiang.xbsj@sinopec.com。

基金项目: 中国石化科技攻关重点项目“塔河碳酸盐岩缝洞型油藏未动用储量评价及高效动用技术研究” (编号: P21063) 资助。

the daily oil production capacity of the oil wells increased by over 10%. The proposed one-well multi-control technologies provide a new developing mode for the fractured-vuggy carbonate reservoirs in Tahe Oilfield.

Key words: fractured-vuggy reservoir; single well producing single cave; geology-engineering integration; hierarchical characterization of fractures and caves; one-well multi-control; Tahe Oilfield

塔里木盆地碳酸盐岩缝洞型油藏是目前国内发现的储量规模最大的海相碳酸盐岩油气藏,资源勘探开发潜力大,主要储层中-下奥陶统碳酸盐岩岩溶缝洞型储层在加里东晚期-海西早期长期暴露,并遭受风化剥蚀和淋滤溶蚀作用,形成了复杂的岩溶地貌和岩溶缝洞系统。根据岩溶成因及主控因素差异,可划分为浅层风化壳岩溶缝洞、古暗河岩溶缝洞和断控岩溶缝洞等3种类型,主要发育裂缝、孔洞和溶洞等储集体,缝洞尺度差异大,空间叠置分布复杂,探明储量占西北油田总储量的90%,是塔河油田主要的上产阵地^[1]。

碳酸盐岩缝洞型油藏,无论是开发方式,还是储层结构描述、渗流机理认识等都与传统的层状碎屑岩油藏、裂缝-孔隙型碳酸盐岩油藏完全不同,没有可以借鉴的开发经验和做法,通过多年探索、研究和实践,强化缝洞刻画识别和总结开发经验,塔河油田逐步形成了以空间单个缝洞体为主要目标,单井动用单洞、逐步外扩的开发动用方式,支撑了“十一五”和“十二五”期间塔河油田的快速上产,“十二五”期间最高年产油量在 $700 \times 10^4 \text{ t}$ 以上^[2]。但在多轮次筛选动用、滚动建产过程中,规模较大的缝洞体已基本动用,剩余未动用缝洞体的规模明显变小,未动用储量的品质不断下降,新投产井产油量逐年降低;通过缝洞刻画与油藏描述技术的进步,近年来新井单井日产油量基本稳定在 18 t 左右^[3]。

随着油井产能降低,单井动用单洞的方式存在控制储量少、可采储量偏低的问题,效益风险逐年增大,面对这一矛盾,通过改变思路、大力推进技术进步,提出了“一井多控、一井多洞”的开发方式,攻关研究了缝洞分级刻画、结构描述,水平井“串联”井眼轨道优化设计和配套的堵漏钻井、分段完井关键技术,初步形成了“一井多控”高效开发关键技术,改变了以往单井动用单洞的方式,实现了一井动用多套缝洞,提高了单井动用储量。现场试验结果表明,“一井多控”高效开发关键技术能够提高油井产能,降低开发效益风险,为塔河油田高效开发和可持续发展探索了一条新的技术途径^[4]。

1 “一井多控”开发概念及动用方式

1.1 缝洞型油藏储集体发育特征

缝洞型油藏发育特征不同于常见的砂岩油藏,具有极强的非均质性,主要表现为:储集体空间分布复杂,缝洞发育规模跨度极大,毫米级的裂缝到百米级的廊道、厅堂洞等缝洞类型共存;油藏埋藏深,溶洞体的定位成像与结构刻画描述难度大;流体流动方式以管流与空腔流为主,油水重力分异快、流动快,油井生产特征上表现为初期产能高但递减极快,递减率通常在 $30\% \sim 40\%$,油田稳产难,需要新储量、新井产能的持续快速接替;流体性质多样,轻质油、中质油、稠油和超稠油均有赋存,主力开发区块油品以稠油、超稠油为主^[5]。

基于以上储层发育特征,塔河油田的开发经历了早期评价、多轮次规模上产和目前的效益稳产3个阶段,形成了以溶洞为主要目标的“单井单洞”的井位部署方式,即纵向上采用直井一次控制和动用单套缝洞体,平面上采用直井+多次侧钻技术,对井周围缝洞整体控制、逐次动用,以实现缝洞体的最大体积控制和高效动用开发,单井可采储量与井控缝洞的储量规模呈正比。

1.2 “一井多控”开发动用方式

塔河油田多轮次开发过程中,开发对象逐步由大缝大洞转向中小尺度缝洞,初期平均单井日产油量也由早期的 30 t 以上逐步降低,“十三五”期间随着技术的不断进步和认识的不断深入,保障了油井产能趋稳,目前,单井产能基本稳定在 18 t/d 并逐年小幅下降,单井效益空间不断缩小,一口井仅动用一套缝洞体的开发方式已不能满足油田效益开发的需求,迫切需要通过提高单井控制储量和产能规模。因此,针对缝洞型油藏主要是溶洞储油的特点,创新提出了“一井多控”的概念,即针对不同方向、不同尺度和不同深度的复杂缝洞体,利用水平井、分支井等多种井型,设计差异化的井眼轨道,一口井尽可能沟通多个缝洞,同时控制,同时开采,从而提高单井控制储量规模和单井产能。

针对缝洞体空间分布存在的差异性,要实现“一井多控”的目的,井眼轨道设计和完井方式设计也要存在差异,为此研究了3种“一井多控”井眼轨道设计与分段动用方式,如图1所示。

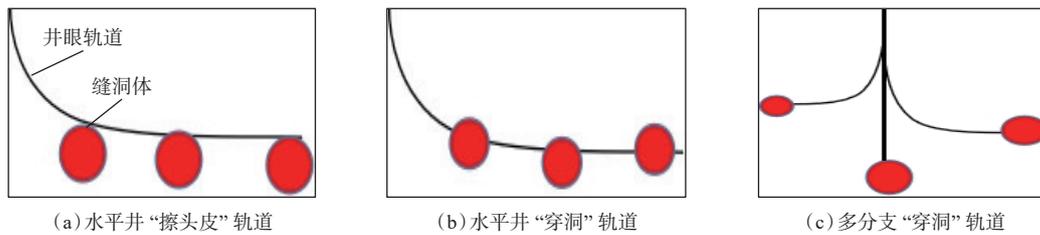


图 1 “一井多控”井眼轨道类型

Fig.1 One-well multi-control wellbore trajectory types

1) “擦头皮”模式串联缝洞,采用分段酸压完井一次动用的方式。针对目标缝洞体尺度较大、展布方向与纵向发育深度相对一致的情况,设计长水平井眼轨道,以“擦头皮”模式擦过多个缝洞体表层;采用分段酸压技术,逐个改造、横向沟通多个缝洞体,同时投产,实现“串联”多套缝洞的目标。其技术优点是,井眼轨道主要在基岩、小裂缝带中穿行,中途漏失的风险较低,成井的概率较高;技术难点是,对于缝洞体边界识别精度要求高,尤其是缝洞体表层与基岩“天花板”的精准识别,若纵向距离缝洞边界过远,则沟通缝洞的难度大,距离过近则存在提前漏失的风险;多套缝洞需要分段改造定向沟通,对分段酸压工艺的要求高;无法串联纵向发育深度差异较大、高低起伏的缝洞体。

2) “穿糖葫芦”模式串联缝洞,采用自然投产或酸化完井一次动用的方式。针对目标缝洞体尺度较小,展布方向和纵向发育深度相对一致的情况,设计长水平井眼轨道“穿洞”方式一次串通多个缝洞体,类似“穿糖葫芦”的模式;采用自然投产或分段酸化工艺实现“串联”多套缝洞的目标。其技术优点是,对于缝洞体边界识别精度要求相对较低,井眼轨迹控制难度低;完井无需定向改造,工艺要求较低。其技术难点是,穿洞过程中恶性漏失概率高,中途提前完钻风险大;无法串联纵向发育深度差异较大、高低起伏的缝洞体。

3) “八爪鱼”多分支模式并联缝洞,采用差异化完井一次动用的方式。针对目标缝洞体尺度差异大、展布方向与纵向发育深度不一致的情况,采用“八爪鱼”的模式,设计多分支井眼轨道,一个井口多个井眼的方式,不同方向逐次“穿洞”;并联动用,根据每个缝洞体钻遇储层情况,一洞一策设计独立的完井方式,一次投产,从而实现并联多个缝洞体并同时投产的目标。其技术优点是,可以实现纵向不同深度缝洞的同时动用;对于缝洞体边界识别精度要求相对较低,井眼轨迹控制难度低;完

井改造工艺要求较低。其技术难点是,陆上超深层多分支钻完井技术尚在攻关阶段,可借鉴经验少,技术不成熟,需要进一步探索。

对比这 3 种动用方式,鉴于目前塔河油田水平井钻井完井技术应用较广泛,根据先易后难、逐步推进的原则,在“一井多控”开发技术的攻关实践过程中,针对前 2 种模式重点开展了关键技术研究及现场试验。

2 “一井多控”开发关键技术

依托于地震、地质,以及工程钻井、完井等技术方向的一体化融合推进,“一井多控”开发技术主要包括利用地震资料刻画与描述缝洞边界的技术、利用地质资料描述缝洞结构的技术和“一井多控”井眼轨道设计与优化技术,以及配套的高效钻井、分段完井技术。

2.1 缝洞分级刻画描述技术

为了达到“一井多控”的目的,井眼轨道设计要避免非目标储集体,避免钻遇无效裂缝或者提前进洞导致恶性漏失提前完钻。需要尽可能降低钻井过程中的漏失风险,同时兼顾完井沟通储集体的需求,井眼轨道尽可能贴近多个目标缝洞体,因此对裂缝、溶洞等缝洞体的识别及缝洞体与基岩边界的识别极为重要。利用地震波阻抗属性标定,分级界定基岩-非核心缝洞体-核心缝洞体发育的边界,为井眼轨道设计多穿缝洞、完井改造多沟通缝洞的目标提供关键技术支撑,同时多属性综合刻画不同尺度裂缝分布,为井眼轨道优化设计、降低钻井风险提供必要的技术保障^[6]。

2.1.1 缝洞体边界分类刻画

实钻井的波阻抗统计分析表明,放空漏失区域波阻抗主要分布在 $11\ 000\sim 18\ 500\ (\text{g}/\text{cm}^3)\cdot(\text{m}/\text{s})$,波阻抗高于 $16\ 000\ (\text{g}/\text{cm}^3)\cdot(\text{m}/\text{s})$ 时,钻井统计的放空漏失率降至 40% 以下,对应缝洞体发育规模较

小,缝洞体类型更偏向于小缝洞或基岩类型,因此将 $16\,000\text{ (g/cm}^3\text{)}\cdot\text{(m/s)}$ 作为有效缝洞体的临界波阻抗。“一井多控”探索过程中将其作为井眼轨道“擦头皮”的界限时,存在实钻供液不足、酸压改造沟通不畅的现象,因此需要进一步标定缝洞体边界分级标准,确定最有利缝洞体分布的范围,区分核心缝洞体和非核心缝洞体。

统计分析表明,波阻抗低于 $12\,000\text{ (g/cm}^3\text{)}\cdot\text{(m/s)}$ 时,钻井放空漏失率高,钻遇漏失的井占比大于 60%,这一区间缝洞体最为发育,定义为核心缝洞;波阻抗为 $12\,000\sim 16\,000\text{ (g/cm}^3\text{)}\cdot\text{(m/s)}$ 时,钻井放空漏失率为 40%~60%,缝洞体发育规模一般,定义为非核心缝洞。设计井眼轨道穿行非核心缝洞发育区,在更贴近有利缝洞发育区、更利于沟通有效储集空间的同时,能够尽可能地降低中途恶性漏失的风险。

不同井区的缝洞发育控因及类型存在差异,对应的核心缝洞体、非核心缝洞体和基岩的临界波阻抗也存在一定差异,井眼轨道设计过程中,需要进行精细化的小井区缝洞临界波阻抗标定和缝洞刻画,通过立体雕刻核心缝洞体与非核心缝洞空间展布,为井眼轨道优化设计提供依据(见图 2)。

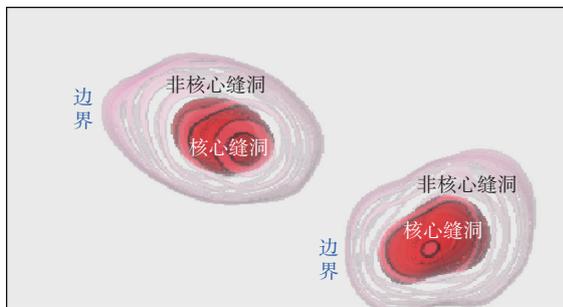


图 2 核心/非核心缝洞雕刻示意

Fig.2 Carving of core and non-core fractures and caves

2.1.2 不同尺度裂缝刻画技术

碳酸盐岩裂缝的识别方法多种多样,包括相干、张量、曲率和蚂蚁体等多种属性,不同属性对裂缝的识别效果存在差异,为不同级别、不同尺度的裂缝型储层的综合识别奠定了基础。不同尺度的裂缝型储集体对油气的贡献各不相同,因此如何准确地对裂缝进行尺度分级、刻画不同尺度裂缝的发育情况,寻找最有利的裂缝发育带,并综合利用各种地球物理方法,以增强不同尺度裂缝预测的可靠性,是裂缝预测的重要发展方向^[7]。

对不同发育规模和不同延伸尺度的断裂-裂缝

类型及成因进行划分并总结,分析其不同的地震响应特征及地质形态,形成了不同尺度裂缝的地球物理特征识别方法。

1)大尺度断裂或裂缝。其由区域构造运动或沉积成岩作用形成,沿断层带分布,延伸距离为几百米到几十千米不等,或错断距离为几十米至几百米,破碎带长。地震响应特征为同相轴错断或较大变形,具有异常强振幅,通过构造解释的断层、相干体、曲率体和张量体等地震属性识别。

2)中尺度裂缝。其由区域构造运动或褶皱、断层作用形成,沿裂缝带分布,沿某一主方向延伸很远,延伸距离为几十米至上百米。地震响应特征为明显褶曲,杂乱反射,偶见“串珠”状强反射,通过蚂蚁体、分频曲率体、分频相干体和叠前各向异性分析等地震属性识别。

3)小尺度裂缝。其由褶皱、断层作用或者沉积、成岩作用形成,呈网状或定向排列分布,具有一定的方位性,延伸距离为几米至十几米;地震响应特征为杂乱反射,局部呈小“串珠”反射,高频特征明显,通过测井、岩石物理和孔隙结构反演识别。

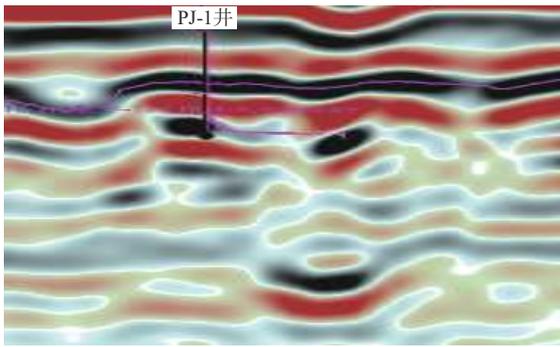
2.2 缝洞发育典型结构模式

受加里东中期-海西期多期岩溶作用,塔河油田的古岩溶储层具有极强的空间分布非均质性,中北部上奥陶统剥蚀区以表生岩溶作用下的大型岩溶管道为主,多表现为落水洞、厅堂洞、主干洞、支流洞和末梢洞等;中部上奥陶统尖灭线附近多发育承压岩溶作用下的深部短洞道类型溶洞体;中南部上奥陶统覆盖区为埋藏型岩溶区,以加里东中期岩溶作用下的 NNW 和 NNE 向走滑断裂控制的不连续性岩溶洞穴为主^[8-10]。

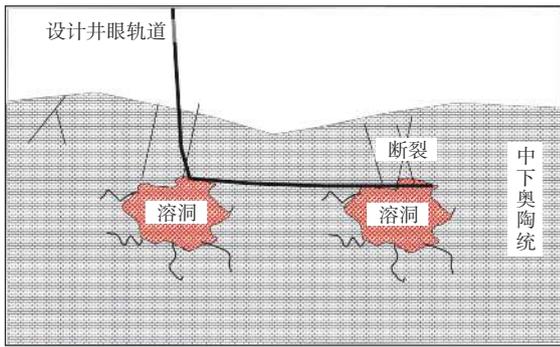
不同的缝洞发育结构模式决定了“一井多控”的井眼轨道设计方案,总结不同岩溶背景下缝洞结构发育特征的差异,划分为“洞-洞”模式、“洞+裂缝带”模式和“断裂带内小缝洞”模式等 3 种比较常见的典型缝洞结构模式。

1)“洞-洞”模式。塔河主体区岩溶作用强烈,区内发育的缝洞体以大型迷宫状岩溶管道和分散的孤立状洞穴为主,加里东中期 III 幕古岩溶洞穴分布在不整合面以下 40~100 m,且以未充填洞为主,洞穴间的空间距离较近,仅 200~900 m。针对这类迷宫状岩溶管道与孤立状洞穴的组合模式,建立了“洞-洞”的“一井多控”缝洞组合模式,钻井空间上动用 2 个或 2 个以上的洞穴(见图 3)。

2)“洞+裂缝带”模式。上奥陶统尖灭线附近



(a) 典型地震剖面



(b) 井眼轨道

图 3 “洞-洞”模式典型地震剖面及井眼轨道

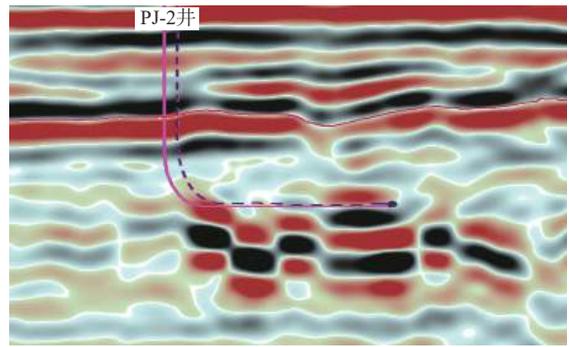
Fig.3 Typical seismic profile and wellbore trajectory of “cave-cave” mode

区域岩溶储集体以单一暗河岩溶管道、树枝状岩溶管道和断控岩溶为主,岩溶水一部分通过暗河管道进入地表河排泄,另一部分随着断裂进行深部岩溶潜流循环。受河流排泄基准面的控制,洞穴表现为穿残丘的单一暗河或树枝状暗河管道;断控岩溶表现为沿断裂破碎带的线状溶蚀条带。针对这类单一暗河岩溶管道和断控岩溶的复合组合模式,建立了“洞+裂缝带”的“一井多控”缝洞组合模式,在空间上动用单个洞穴和单条断裂溶蚀带(见图4)。

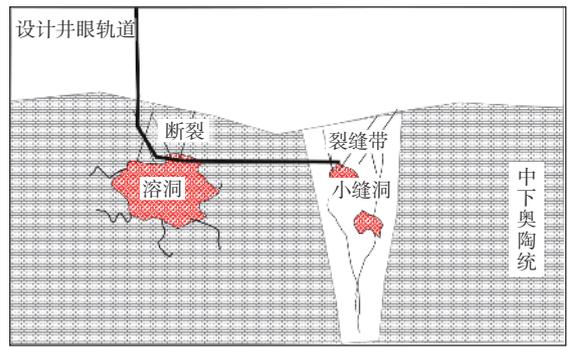
3) “断裂带内小缝洞”模式。上奥陶统覆盖区主要发育层控承压岩溶洞穴,北部剥蚀区为承压岩溶水的补给区,受上奥陶统及中下奥陶统灰质白云岩 2 套不可溶地层的围限,形成侧向流动的承压岩溶洞穴及上升泉洞穴。这类侧向溶蚀成因的承压岩溶洞穴在地震上多表现为深层横向延伸的较连续洞道。针对这类断裂带内部的线性小缝洞体,建立了“断裂带内小缝洞”的“一井多控”缝洞组合模式,在空间上沿着断裂带方向动用多个承压岩溶洞穴(见图5)^[11]。

2.3 “一井多控”井眼轨道设计与优化

部署井缝洞发育类型和组合模式不同,在缝洞体分级刻画预测漏失风险概率的基础上进行井眼轨



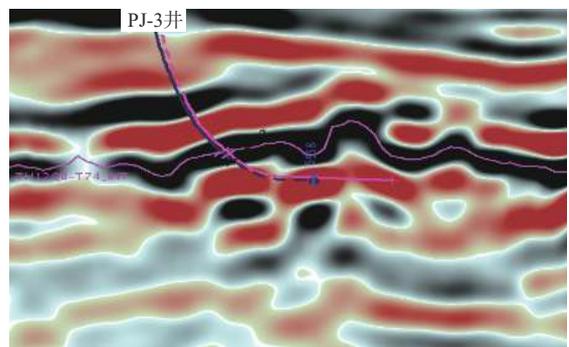
(a) 典型地震剖面



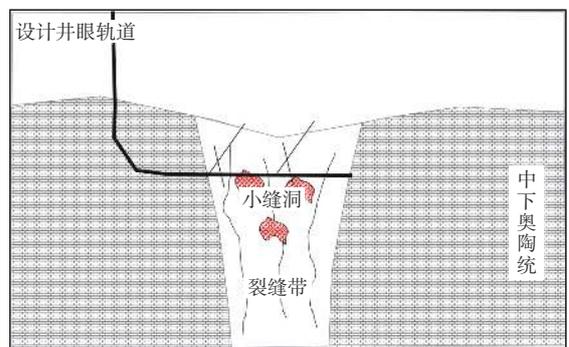
(b) 井眼轨道

图 4 “洞+裂缝带”模式典型地震剖面及井眼轨道

Fig.4 Typical seismic profile and wellbore trajectory of “cave + fracture zone” mode



(a) 典型地震剖面



(b) 井眼轨道

图 5 “裂缝带内小缝洞”模式典型地震剖面及井眼轨道

Fig.5 Typical seismic profile and wellbore trajectory of “small fractures and caves in fracture zone” mode

道设计。井眼轨道设计的目标是钻井能成井、改造能沟通缝洞和生产能持续。针对多套缝洞不同的组合模式,按照简化地质模型设计井眼轨道。

1)“洞-洞”组合模式。设计井眼轨道时以中小尺度缝洞为主要目标,主要考虑岩溶缝洞结构与井眼轨道的最合理接触,力求最贴近核心缝洞体,降低沟通风险,并统筹考虑缝洞边部提前漏失的风险,差异化设计缝洞与井眼轨道的接触关系,包括井口的最优选择、井眼轨道与洞接触关系的设计。井口通常选择在较浅的溶洞体外测,尽量选择构造高部位和合适的水平位移,降低钻井井斜,满足钻井完井工具下入和工艺实施的需求。根据目标靶体的空间位置统筹设计井眼轨道与靶体的接触关系:目标靶体为2个时,设计井眼轨道擦第1个靶体“核心体”的边界,进入第2个靶体“核心体”内;目标靶体为3个时,设计井眼轨道进第1个靶体“非核心体”的边界,擦第2个靶体“核心体”边界,进入第3个靶体“核心体”内。

2)“洞-缝”组合模式。设计井眼轨道时以溶洞和裂缝带为目标,通常溶洞的边界预测优于裂缝带的边界预测,设计井眼轨道时通常优先考虑溶洞为第1个靶体,裂缝带为第2个靶体。井口选择在溶洞体外测,尽量选择构造高部位。同时,水平位移设计重点满足第1个靶体的沟通需求,兼顾裂缝带。井眼轨道与靶体的接触关系方面,设计井眼轨道擦“核心体”的边界,进入裂缝带杂乱体最核心位置。

3)“断裂带内小缝洞”模式。设计井眼轨道时以裂缝带为目标,通常选择顺裂缝带长轴方向,设计井眼轨道多穿核心部位,并与地应力走向保持一定夹角,保证井眼轨道与储集体多沟通。

2.4 配套钻井完井技术

考虑地震刻画与地质描述技术在不同井区存在的认识偏差,钻井过程中需要根据实际揭示地层的情况进行随钻控制调整。对于地层层位解释偏差的影响,需要对井眼轨道、目的层深度进行调整;对于断裂裂缝解释偏差造成的中途漏失,需要对井眼轨道及完井方式进行调整;对于地震层速度偏差造成的缝洞偏移现象,需要对井眼轨道及完井方式进行调整^[12-15]。

根据地质“一井多靶”需要长距离钻进钻成井、中途精确控制井眼轨迹需要多控制缝洞、完井分段改造增大储层改造体积^[16-18]和多沟通缝洞的需求,研究完善了配套的一井多靶水平井钻井完井

技术,主要是常规导向钻井和旋转导向钻井的井眼轨迹优化控制技术,实现了多段式水平井眼轨迹控制、精确中靶的要求;发展了不同漏速下的可酸溶防漏、堵漏钻进技术,提高了成井率;研究了投球滑套+可溶球的多封隔器工艺和配套的高性能水溶性暂堵、转向、控缝高的分段改造技术,满足了多缝洞体同时沟通、同时动用的要求^[19-24]。

3 现场试验

通过技术攻关研究,初步建立了“一井多控”地质选靶、优化井眼轨道、分段酸压、多体同采的技术系列和探索-评价-实践-迭代的研究思路。前期探索阶段着重评价“擦头皮”串联缝洞边部+分段酸压沟通缝洞组合方法的适用性,部署了4口评价井,缝洞沟通效果差,试验效果欠佳;后期通过缝洞分级刻画技术进步,优化井眼轨道设计和钻井完井配套工艺,通过试验验证“穿洞”串联核心缝洞体边部+分段酸化组合方法的可行性,部署了14口井,单井控制多套缝洞的成功率由探索阶段的25.0%提高至57.1%,单井动用储量提高到 $50 \times 10^4 \text{t}$ 以上,较单井动用单洞的方式,单井动用储量规模增加了1.5倍以上,同时单井日产量也提高至20 t,较单井动用单洞的方式提高了10个百分点。

3.1 探索阶段

优选“洞-洞”组合模式,按照“擦头皮”模式,利用缝洞体轮廓刻画技术确定缝洞异常体可能的轮廓边界,井眼轨道贴近多个缝洞异常体的“轮廓”边部并在基岩内穿行,井眼与缝洞异常体中心位置的距离为30~50 m,主要采用封隔器分段酸压的完井方式,力求通过人工造缝在纵向上沟通多套目标缝洞体。

这一阶段共投产4口井,其中3口井按照设计完钻井深完钻,并进行了分段酸压,成井率75.0%;另外1口井因提前漏失完钻,未钻达目标靶点,常规测试供液不足关井。从投产效果来看,酸压没有实现增产目标,3口分段酸压井中的2口井未见明显沟通显示,测试供液不足,日产量低于5.0 t,仅1口井酸压过程中显示沟通1套缝洞,获得了15 t/d的稳定产油能力。

3.2 试验阶段

通过总结探索阶段的得失,进一步优化了“一井多控”技术思路,由追求高成井率的“擦头皮+分段酸压”技术组合转变为注重提高缝洞沟通

效率的“穿洞+分段酸化、酸压”技术组合,评价对象也由单纯“洞+洞”组合转向综合评价溶洞、断裂裂缝带和小缝洞等多种类型组合,为提高缝洞有效沟通率,缝洞雕刻由单一的“轮廓”刻画逐步发展为“基岩-非核心缝洞-核心缝洞”分类标定刻画,为井眼轨道贴近最有利缝洞体的优化设计提供了有力支撑,研究了降密度防漏、堵漏及暂堵酸压等配套钻完井技术,保障了油井的成井率和井身质量。

此阶段共部署投产14口井,其中6口按照设计完钻井深完钻,中途漏失提前完钻8口,成井率42.9%,与探索阶段相比成井率有所降低,但通过应用降密度强钻技术及防漏、堵漏技术,中途漏失的8口井中,有4口在漏失严重的情况下也成功钻至第2个靶点,实现了一井多控,并采用分段酸化、自然投产的方式实现了高产。14口井中能够兼顾2个以上目标体的井达到8口,占比57.1%,基本实现了“一井多控”的目标。

从投产效果来看,14口井中获得中高产能井11口,占比达78.6%,平均单井日产油量提高至20 t。整体分析认为,虽然“穿体”井眼轨道设计增加了中途漏失的风险,降低了成井率,但同时提高了沟通有效缝洞的能力,基本实现了“一井多控”提高新井产能的目标。

4 结论与建议

1) 根据缝洞型碳酸盐岩油藏的缝洞体空间叠置、非均匀分布的特点,改进缝洞分级刻画技术,实现了基岩与核心、非核心缝洞的半定量识别,针对不同缝洞结构模式,设计差异化的“擦头皮”、“穿洞”等串联井眼轨道,实现了一个井眼控制多套缝洞的目标,研究了配套防漏、堵漏高效钻井和分段改造完井技术,形成了适合塔河油田缝洞型碳酸盐岩油藏的“一井多控”高效开发关键技术。

2) 现场试验表明,对于塔河油田复杂的缝洞型油气藏,可以采用“一井多控”同时动用多套缝洞体的方式,进一步提高油井产能。缝洞体有效空间的精准识别和井眼轨道优化设计非常重要,在准确标定有效缝洞体边界的基础上,井眼轨道尽量贴近缝洞体边部进行串联,以降低中途漏失风险;根据钻遇的缝洞体类型采用差异化的储层改造工艺,能够提高不同类型缝洞体的沟通效果,达到“一井多控”提高单井产能的目的。

3) 目前塔河油田缝洞型碳酸盐岩油气藏还存在

成井率相对较低的问题,需要从以下方面继续完善研究:一是需要提高更小规模缝洞的识别精度和裂缝带分级刻画技术,支撑中途漏失风险的判断和井洞接触关系研究;二是需要提升防漏、堵漏的高效钻井技术和体积压裂等储层改造技术,提高成井率的同时,进一步扩大远端缝洞的沟通能力。

参 考 文 献

References

- [1] 李阳. 塔河油田碳酸盐岩缝洞型油藏开发理论及方法 [J]. 石油学报, 2013, 34(1): 115-121.
LI Yang. The theory and method for development of carbonate fractured-cavity reservoirs in Tahe Oilfield[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(1): 115-121.
- [2] 焦方正, 翟晓先. 海相碳酸盐岩非常规大油气田: 塔河油田勘探研究与实践 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2008: 130-135.
JIAO Fangzheng, ZHAI Xiaoxian. A unconventional large oil and gasfield of marine carbonate rock: exploration research and practice of Tahe Oilfield[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008: 130-135.
- [3] 焦方正. 塔里木盆地深层碳酸盐岩缝洞型油藏体积开发实践与认识 [J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(3): 552-558.
JIAO Fangzheng. Practice and knowledge of volumetric development of deep fractured-vuggy carbonate reservoirs in Tarim Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(3): 552-558.
- [4] 李阳, 金强, 钟建华, 等. 塔河油田奥陶系岩溶分带及缝洞结构特征 [J]. 石油学报, 2016, 37(3): 289-298.
LI Yang, JIN Qiang, ZHONG Jianhua, et al. Karst zonings and fracture-cave structure characteristics of Ordovician reservoirs in Tahe Oilfield, Tarim Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(3): 289-298.
- [5] 胡文革. 塔河碳酸盐岩缝洞型油藏开发技术及攻关方向 [J]. 油气藏评价与开发, 2020, 10(2): 1-10.
HU Wenge. Development technology and research direction of fractured-vuggy carbonate reservoirs in Tahe Oilfield[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2020, 10(2): 1-10.
- [6] 李宗杰, 王勤聪. 塔北超深层碳酸盐岩储层预测方法和技术 [J]. 石油与天然气地质, 2002, 23(1): 35-40.
LI Zongjie, WANG Qincong. Method and technique for prediction of super-deep carbonate reservoirs in North Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2002, 23(1): 35-40.
- [7] 王震, 文欢, 胡文革. 塔河油田碳酸盐岩缝洞空间位置预测方法研究 [J]. 工程地球物理学报, 2019, 16(4): 433-438.
WANG Zhen, WEN Huan, HU Wenge. Study on spatial location prediction method of fractured-vuggy carbonate reservoir in Tahe Oilfield[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2019, 16(4): 433-438.
- [8] 黄文松, 徐芳, 刘成彬, 等. 深水盐下湖相碳酸盐岩缝洞地震预测: 以巴西桑托斯盆地 F 油田为例 [J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(2): 445-455.
HUANG Wensong, XU Fang, LIU Chengbin, et al. Seismic predic-

- tion of fractures and vugs in deep-water sub-salt lacustrine carbonates: taking F oilfield in Santos Basin, Brazil as an example[J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(2): 445–455.
- [9] 李源, 鲁新便, 蔡忠贤, 等. 塔里木盆地塔河油田岩溶峡谷区海西早期洞穴系统发育模式 [J]. *古地理学报*, 2017, 19(2): 364–372.
LI Yuan, LU Xinbian, CAI Zhongxian, et al. Development model of Hercynian cave system in karst canyon area of Tahe Oilfield, Tarim Basin[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2017, 19(2): 364–372.
- [10] 吕心瑞, 孙建芳, 邬兴威, 等. 缝洞型碳酸盐岩油藏储层结构表征方法: 以塔里木盆地塔河 S67 单元奥陶系油藏为例 [J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(3): 728–737.
LYU Xinrui, SUN Jianfang, WU Xingwei, et al. Internal architecture characterization of fractured-vuggy carbonate reservoirs: a case study on the Ordovician reservoirs, Tahe Unit S67, Tarim Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(3): 728–737.
- [11] 鲁新便, 何成江, 邓光校, 等. 塔河油田奥陶系油藏喀斯特古河道发育特征描述 [J]. *石油实验地质*, 2014, 36(3): 268–274.
LU Xinbian, HE Chengjiang, DENG Guangxiao, et al. Development features of karst ancient river system in Ordovician reservoirs, Tahe Oil Field[J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2014, 36(3): 268–274.
- [12] 周文, 李秀华, 金文辉, 等. 塔河奥陶系油藏断裂对古岩溶的控制作用 [J]. *岩石学报*, 2011, 27(8): 2339–2348.
ZHOU Wen, LI Xiuhua, JIN Wenhui, et al. The control action of fault to paleokarst in view of Ordovician reservoir in Tahe Area[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(8): 2339–2348.
- [13] 姜应兵, 李兴娟. 塔里木盆地塔河油田 TH12402 井区中下奥陶统古岩溶洞穴发育模式 [J]. *古地理学报*, 2021, 23(4): 824–836.
JIANG Yingbing, LI Xingjuan. Development model of paleokarst caves in the Middle-Lower Ordovician of TH12402 well area in Tahe Oilfield, Tarim Basin[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2021, 23(4): 824–836.
- [14] 孟庆梅, 张哲. 塔河油田碳酸盐岩地层钻井问题及对策 [J]. *石油钻探技术*, 1999, 27(4): 19–20.
MENG Qingmei, ZHANG Zhe. Carbonate formation drilling problems and measures in Tahe Oilfield[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 1999, 27(4): 19–20.
- [15] 何伟国, 唐明, 吴柳根. 塔河油田深层侧钻水平井膨胀套管钻井完井技术 [J]. *石油钻探技术*, 2013, 41(5): 62–66.
HE Weiguo, TANG Ming, WU Liugen. Expandable casing drilling and completion technology in deep sidetracked horizontal wells of Tahe Oilfield[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2013, 41(5): 62–66.
- [16] 韩忠艳, 耿宇迪, 赵文娜. 塔河油田缝洞型碳酸盐岩油藏水平井酸压技术 [J]. *石油钻探技术*, 2009, 37(6): 94–97.
HAN Zhongyan, GENG Yudi, ZHAO Wenna. Fractured-vuggy carbonate reservoirs in Tahe Oilfield[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2009, 37(6): 94–97.
- [17] 房好青, 赵兵, 汪文智, 等. 塔河油田靶向压裂预制缝转向技术模拟研究 [J]. *石油钻探技术*, 2019, 47(5): 97–103.
FANG Haoqing, ZHAO Bing, WANG Wenzhi, et al. Simulation study on the range of diversion in targeted fracturing of prefabricated fractures in the Tahe Oilfield[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2019, 47(5): 97–103.
- [18] 周丹, 熊旭东, 何军榜, 等. 低渗透储层多级转向压裂技术 [J]. *石油钻探技术*, 2020, 48(1): 85–89.
ZHOU Dan, XIONG Xudong, HE Junbang, et al. Multi-stage deflective fracturing technology for low permeability reservoir[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2020, 48(1): 85–89.
- [19] 李春月, 房好青, 牟建业, 等. 碳酸盐岩储层缝内暂堵转向压裂实验研究 [J]. *石油钻探技术*, 2020, 48(2): 88–92.
LI Chunyue, FANG Haoqing, MOU Jianye, et al. Experimental study on temporary fracture plugging and diverting fracturing of carbonate reservoirs[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2020, 48(2): 88–92.
- [20] 张永春. 涇河油田致密低渗油藏水平井重复压裂技术 [J]. *断块油气田*, 2021, 28(5): 711–715.
ZHANG Yongchun. Horizontal well re-fracturing technology in tight and low permeability reservoir of Jinghe Oilfield[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2021, 28(5): 711–715.
- [21] 滕卫卫, 李想. 底水火山岩油藏水平井优化设计 [J]. *特种油气藏*, 2021, 28(5): 120–125.
TENG Weiwei, LI Xiang. Optimal design of horizontal wells in volcanic hydrocarbon reservoir with bottom water[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2021, 28(5): 120–125.
- [22] 虞绍永. 基于早期返排历史数据的水平井分段压裂效果评价方法 [J]. *石油钻探技术*, 2021, 49(6): 1–7.
YU Shaoyong. Post-frac evaluation of multi-stage fracturing on horizontal wells based on early flowback history[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2021, 49(6): 1–7.
- [23] 贺甲元, 程洪, 向红, 等. 塔河油田碳酸盐岩储层暂堵转向压裂排量优化 [J]. *石油钻采工艺*, 2021, 43(2): 233–238.
HE Jiayuan, CHENG Hong, XIANG Hong, et al. Optimizing the displacement of temporary plugging and diversion fracturing of the carbonate reservoirs in Tahe Oilfield[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2021, 43(2): 233–238.
- [24] 赵海洋, 刘志远, 唐旭海, 等. 缝洞型碳酸盐岩储层循缝找洞压裂技术 [J]. *石油钻采工艺*, 2021, 43(1): 89–96.
ZHAO Haiyang, LIU Zhiyuan, TANG Xuhai, et al. Fracturing technology of searching for vugs along fractures in fractured-vuggy carbonate reservoirs[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2021, 43(1): 89–96.

[编辑 滕春鸣]