

页岩油水平井立体开发井组设计探索

窦玉玲

(中石化胜利石油工程有限公司钻井工艺研究院, 山东 东营 257000)

摘要:当前国内页岩油立体开发仍处于探索阶段,为构建钻井、压裂、投产一体化高效建产模式,需开展井组轨道设计与作业时序的协同优化。本文以济阳坳陷民丰洼陷某实际井台为研究载体,针对“纵向横推 Tank”与“横向纵推 Tank”2种运行模式,采用最近距离法结合 Landmark 软件,系统分析造斜点位置、造斜点相对深浅、入靶前造斜率对碰撞风险的影响,并提出针对性防撞措施。研究表明,“纵向横推”模式通过轨道平面错开设计,整体碰撞风险较低,适应性更强;而“横向纵推”模式因轨道交叉较多,防撞设计更为复杂,需依靠造斜点双重错开优化以降低风险。研究成果为页岩油立体开发井组设计提供了可行的技术支撑,为后续不同建产模式下的井组优化提供了经验借鉴。

关键词:页岩油;大平台开发;立体井网;井组设计;Tank模式;轨道设计;防撞分析;民丰洼陷

中图分类号:TE243⁺.1 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2026)02-0108-07

Exploration on well group design for three-dimensional development of shale oil horizontal wells

DOU Yuling

(Drilling Technology Research Institute, Sinopec Shengli Petroleum Engineering Co., Ltd., Dongying Shandong 257000, China)

Abstract: Currently, the three-dimensional development of shale oil in China is still in the exploration stage. To construct an integrated and efficient production model of drilling, fracturing, and commissioning, it is necessary to carry out collaborative optimization of well group trajectory design and operation sequence. Taking an actual well pad in Minfeng Sag of Jiyang Depression as the research carrier, this paper focuses on two operating modes, namely "Vertical-Horizontal Push Tank" and "Horizontal-Vertical Push Tank". The closest approach method combined with Landmark software is adopted to systematically analyze the impacts of the position of kickoff points, the relative depth of kickoff points, and the build rate before target entry on collision risk, and targeted anti-collision measures are proposed. The research shows that the "Vertical-Horizontal Push" mode has lower overall collision risk and stronger adaptability through the design of trajectory plane staggering; while the "Horizontal-Vertical Push" mode has more complex anti-collision design and higher risk due to multiple trajectory crossings, and it is necessary to rely on the dual staggering optimization of kickoff points to reduce risks. The research results provide feasible technical support for the well group design of shale oil three-dimensional development and provide a reference for the well group optimization under different production models in the future.

Key words: shale oil; large-platform development; three-dimensional well pattern; well group design; Tank mode; trajectory design; anti-collision analysis; Minfeng Sag

收稿日期:2025-10-15; 修回日期:2025-11-13 DOI:10.12143/j.ztgc.2026.02.012

基金项目:国家科技重大专项“渤海湾盆地济阳坳陷古近系陆相页岩油勘探开发与集成示范”课题六“陆相断陷盆地页岩油勘探开发与集成示范”(编号:2024ZD1405106)

作者简介:窦玉玲,女,汉族,1981年生,高级工程师,油气井工程专业,硕士,从事钻井工程设计方面的研究工作,山东省东营市北一路827号, douyl5.oss@inopec.com。

引用格式:窦玉玲.页岩油水平井立体开发井组设计探索[J].钻探工程,2026,53(2):108-114.

DOU Yuling. Exploration on well group design for three-dimensional development of shale oil horizontal wells [J]. Drilling Engineering, 2026, 53(2): 108-114.

0 引言

在全球能源结构转型与国内油气资源需求持续增长的双重驱动下,页岩油作为重要的非常规油气资源,其高效开发已成为保障国家能源安全的关键领域。济阳坳陷东营凹陷民丰洼陷区域内发育沙四统上、纯下2套优质页岩油储层,厚度区间为230~310 m。从国内外页岩油开发实践来看,对于此类厚层页岩油储层,长水平段立体井网已成为主流开发方式。北美地区的鹰滩、二叠、巴肯等区块,以及国内大庆古龙、鄂尔多斯庆城等区块的开发经验^[1-4]均表明,平面上采用平行井网布局、纵向上实施多层部署,并结合地面大平台运行模式,可显著提升开发效率与经济效益。大平台立体开发井组设计是一项复杂的系统工程,需综合考量地面布局合理性、运行模式适配性、轨道设计科学性、钻井防碰安全性以及批量施工高效性等多方面因素^[5-10],任何环节的疏漏都可能导致开发成本上升、施工周期延长甚至发生安全事故。目前,国内页岩油立体开发的合理建产模式仍处于探索阶段,尚未形成成熟的技术体系。北美页岩油开发中广泛应用的“Tank Development”(坦克开发)^[11]模式,通过科学规划钻井、压裂、投产的时序与空间关系,可有效避免多井间的钻-压-投干扰,实现连续稳定建产,同时显著提升压裂改造效果,为国内开发提供了重要借鉴。

基于此,充分吸收国外“Tank”运行模式的先进理念,结合民丰洼陷特有的井网形式与地质条件,创新性地提出了“纵向横推 Tank”与“横向纵推 Tank”2种运行模式^[12]。这2种模式的核心目标在于实现钻井与压裂作业的高效衔接,最大限度减少作业干扰,提升整体开发效率。但当前相关研究中,针对2种模式的整体井组设计细节及其对应的钻井碰撞风险分析较为匮乏,难以满足现场实际应用需求。因此,本文以民丰洼陷某实际井台为研究载体,对2种模式下的井组设计进行全面优化,深入分析钻井碰撞风险,并提出切实可行的降低风险措施,旨在为国内页岩油立体开发提供技术支撑。

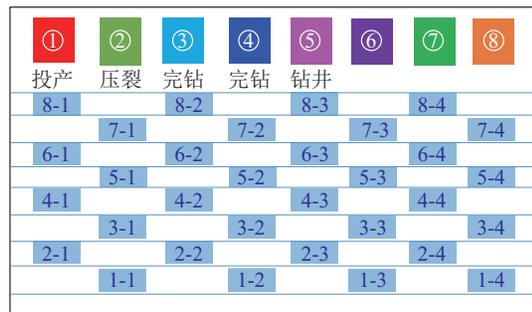
1 “纵向横推”模式井组设计

“纵向横推”模式作为针对民丰洼陷厚层页岩油储层特点提出的重要开发模式^[13],其核心思路是通过纵向分层、横向按列推进的方式,实现钻井与

压裂作业的有序衔接,在保障作业安全的前提下,最大限度提升开发效率。

1.1 井口和靶点匹配

为有效控制井间干扰,确保开发效果,页岩油水平井立体井网一般采用“W”型井网。如图1所示,本文以纵向8层、每层4口井、平面井间距400 m、纵向层间距50 m的“W”型井网为例,详细说明该模式的运行机制与井口靶点匹配原则。从运行时序来看,“纵向横推”模式遵循“完钻-压裂-钻井-投产”的有序推进流程:首先完成第①、②、③列井的钻井作业;然后,第①列井的压裂和第④列井的钻井同步运行,此后按照“压裂第②列、钻井第⑤列、投产第①列”的节奏循环推进,始终保持钻井与压裂作业之间间隔2列井,通过空间上的合理隔离,有效减少钻井与压裂作业的相互干扰,保障作业安全与施工质量。



注:2-1表示自下而上第2层、自左向右第1列对应的靶点。

图1 “纵向横推”立体井网靶点相对位置关系
Fig.1 Schematic diagram of three-dimensional well pattern

在井场布局设计中,需同时兼顾防碰安全、批钻效率与压裂时效。一方面,合理的布局需降低井间碰撞风险,避免钻井过程中出现井眼碰撞事故;另一方面,需为批量钻井创造条件,通过优化井口排列与作业流程,缩短整体钻井周期;此外,还应满足拉链式压裂的作业要求,提升压裂施工效率,实现开发效益最大化。基于以上综合考量,“纵向横推”模式的地面布局及井口与靶点匹配关系如图2所示。为进一步缩短建产周期,提升开发节奏,该模式采用“大平台小井组”的实施策略,即将整个大平台划分为8个独立的小井组,一列靶点对应一个小井组,按照“逐个小井组推进、各小井组有序衔

接”的方式开展作业。

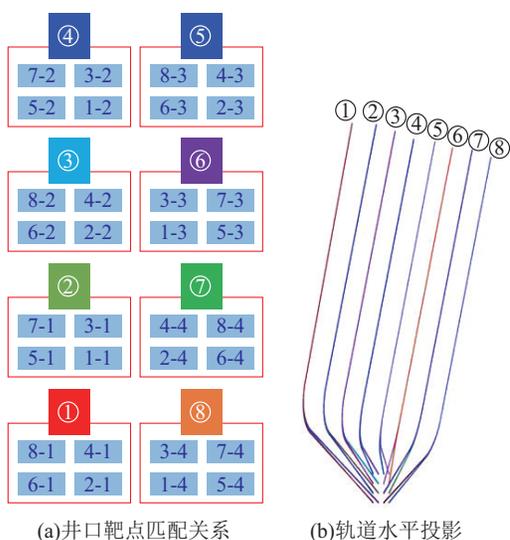


图2 “纵向横推”地面布局与井口靶点匹配关系

Fig.2 Diagram of matching relationship between surface layout and wellhead target points

对于整个平台,左侧的小井组井口对应左侧的靶点,右侧的小井组井口对应右侧的靶点。在每个小井组内部,井口与靶点的匹配宜遵循以下原则,以实现碰撞风险最低、钻井进尺最优的目标:

(1)针对井口左侧的靶点:左排井口主要负责钻进浅层靶点,右排井口主要负责钻进深层靶点;同时,前排井口以浅层靶点为主,后排井口以深层靶点为主。通过这种匹配方式,实现井眼轨道在空间上的合理分布,降低碰撞风险。

(2)针对井口右侧的靶点:左排井口主要负责钻进深层靶点,右排井口主要负责钻进浅层靶点;前排井口仍以浅层靶点为主,后排井口以深层靶点为主。这种差异化的匹配策略,是基于井眼轨道的空间相对位置制定的,可在保障防撞安全的同时,优化钻井进尺,减少无效作业。

1.2 防撞分析及对策

钻井防撞是大平台立体开发中的关键问题,直接关系到施工安全。通过对“纵向横推”模式下井组轨道的整体优化分析(图2b),发现该模式具有独特的防撞优势:通过合理调整初始定向方位,实现井组轨道在平面上的有效错开,从空间布局上降低碰撞风险,因此整体碰撞风险相对较低。

然而,优化后的井组轨道仍存在一定防撞隐患,主要集中在靶点在同一列的井眼轨道对应的稳

斜段。由于稳斜段井眼轨道相对固定,且不同井的稳斜段距离较近,若设计不当,易引发碰撞事故。针对这一问题,本文用Landmark软件进行大量模拟计算,从造斜点位置、造斜点相对深浅、入靶前造斜率3个关键参数入手,提出以下针对性对策,进一步降低碰撞风险。目前常用防撞扫描方法有最近距离法、切向扫描法、平面扫描法。其中切向扫描法无法体现空间最近距离,平面扫描法不适用于水平井,因此采用最近距离法进行防撞分析。

1.2.1 优化造斜点位置

研究表明,适当下移造斜点有利于增大同列井中间稳斜段的防撞距离,如图3所示。当造斜点位置在2000 m左右时,平行井段的长度约1000 m,井间距离约28 m,这种近距离平行井段越长碰撞风险越高;而当下压造斜点至约2600 m后,平行井段的长度缩短至约500 m,同时井间距离增大(>30 m),有效减少了井眼碰撞的风险。

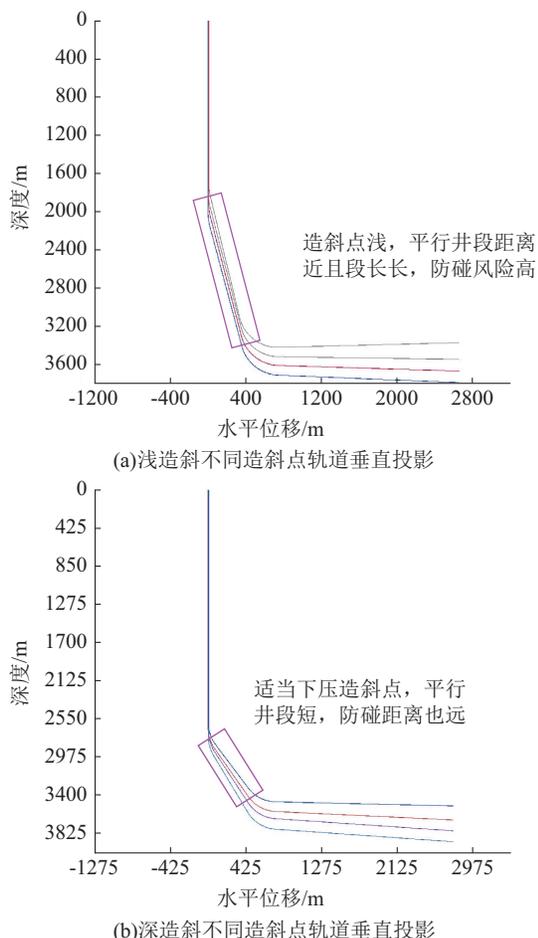


图3 “纵向横推”造斜点对碰撞风险的影响

Fig.3 Influence of kickoff point on collision prevention risk

在实际设计中,需结合储层深度、地质构造以及相邻井的轨道参数,计算造斜点的合理下压幅度,避免过度下压导致钻井难度增加或钻井成本增加。通过建立造斜点位置与防撞距离的量化关系模型,可实现造斜点位置的优化设计,为现场施工提供科学依据。

1.2.2 合理设计造斜点相对深浅

除了造斜点的绝对位置,同列井中造斜点的相对深浅也是影响碰撞风险的重要因素(图3)。对于井网中的同列井,采用“自深而浅4口井造斜点依次变浅”的设计原则,可为井眼轨道在空间上的错开奠定基础,进一步降低碰撞风险。具体而言,深层靶点对应的井采用较深的造斜点,浅层靶点对应的井采用较浅的造斜点,基于这种理念设计,使不同井的井眼轨道在垂直方向上形成明显的分层,避免在同一垂直平面内出现轨迹重叠。

在实际应用中,需根据靶点的深度差异、井间间距要求以及地质条件,确定造斜点相对深浅的合理差距,确保各井轨道在空间上有序分布,同时满足储层钻遇率要求。

1.2.3 优化入靶前造斜率

造斜率是描述井眼轨道弯曲程度的关键参数,直接影响轨道弧度,进而对碰撞风险产生重要影响,如图4所示。研究发现,入靶前造斜率的设计需结合靶点深度与相邻井轨道参数进行差异化调整,其中浅层井的造斜率设计尤为关键。

对于同列中的浅层井,若造斜率过低,井眼轨道的弯曲程度较小,易导致其稳斜段与相邻深层井的稳斜段距离过近,增加碰撞风险,如图4(a)所示;而适当提高浅层井的入靶前造斜率,可增大井眼轨道的弯曲幅度,使浅层井的稳斜段与深层井的稳斜段在空间上进一步错开,有效降低碰撞风险,如图4(b)所示。例如8-3井和6-3井,若都采用 $15^\circ/100\text{ m}$ 的造斜率,中间稳斜段防撞距离小于50 m的井段长度为660 m;若位于浅层的8-3井采用 $15^\circ/100\text{ m}$ 的造斜率,位于深层的6-3井采用 $12^\circ/100\text{ m}$ 的造斜率,中间稳斜段防撞距离小于50 m的井段长度可缩短至330 m。

需要注意的是,造斜率的调整需在工程定向能力与压裂允许的范围内进行,避免因造斜率过高导致现场无法造斜或者压裂套损等情况。统筹考虑造斜率与防撞距离、工程可行性的相互约束,可实

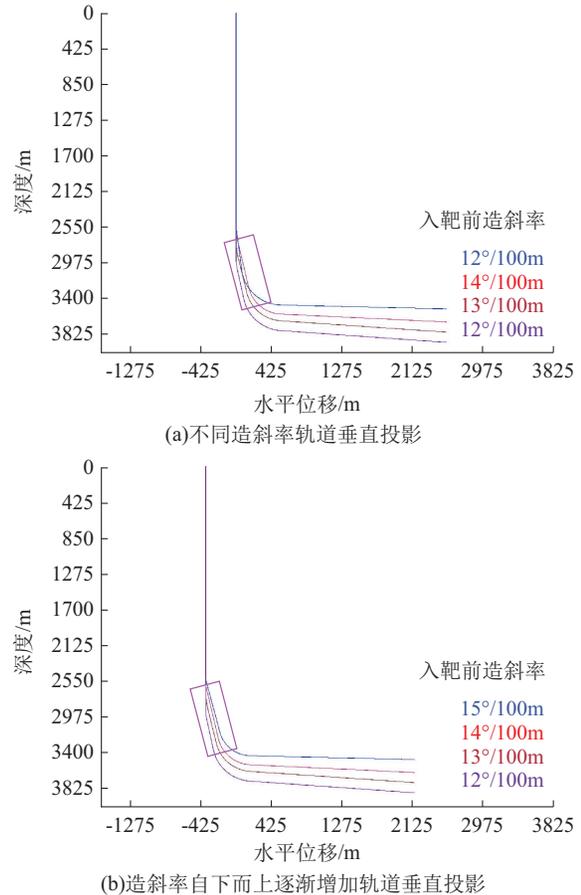


图4 “纵向横推”造斜率对碰撞风险的影响

Fig.4 Influence of build rate on collision prevention risk

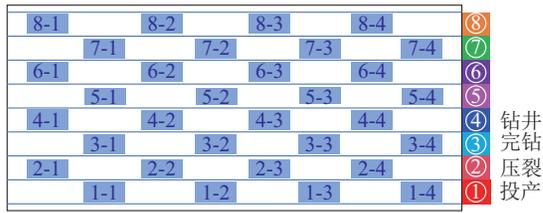
现入靶前造斜率的合理优化,在保障施工安全的前提下,最大程度降低碰撞风险。

2 “横向纵推”模式井组设计

与“纵向横推”模式不同,“横向纵推”模式以纵向分层、自下而上逐层推进为核心,通过优化井口靶点匹配与轨道设计,实现钻井与压裂作业的高效衔接。该模式下,一个小井组打一层井。

2.1 井口和靶点匹配

“横向纵推”模式同样基于纵向8层、每层4口井的“W”型井网布局,如图5所示,但其运行时序与“纵向横推”模式存在显著差异。该模式纵向推进流程:首先完成第①、②层井的钻井作业;然后在第①层井压裂过程中,同步开展第③层井的钻井作业;此后按照“压裂第②层、钻井第④层、投产第①层”的节奏循环,始终保持钻井与压裂作业之间间隔一层井,通过纵向空间上的隔离,规避压力干扰,保障作业连续性。



注:2-1表示自下而上第2层、自左向右第1列对应的靶点。

图5 “横向纵推”立体井网靶点相对位置关系
Fig.5 Schematic diagram of three-dimensional well pattern

在“横向纵推”模式下,井场布局、井口与靶点的匹配设计同样需围绕防碰安全、批钻效率与拉链式压裂三方面展开。为实现同层井的拉链式压裂,提升压裂作业的规模化与高效性,该模式采用“同层井同一小井组”的实施策略,即同一目的层位的所有井归入一个小井组,集中开展钻井作业。

“横向纵推”模式的地面布局及井口与靶点匹配关系如图6所示。该模式每个小井组里井口靶点的匹配原则与“纵向横推”模式相同,均为左侧打左侧、右侧打右侧、前排打浅层、后排打深层;不同的是“横向纵推”模式小井组是从后排向前排逐渐推进的,这主要是基于碰撞风险考虑确定的。

2.2 碰撞风险及对策

通过对“横向纵推”模式下井组轨道(图6b)的分析发现,与“纵向横推”模式相比,该模式的井组

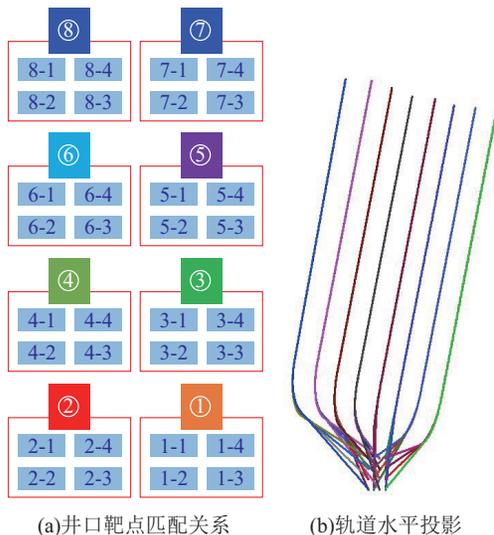
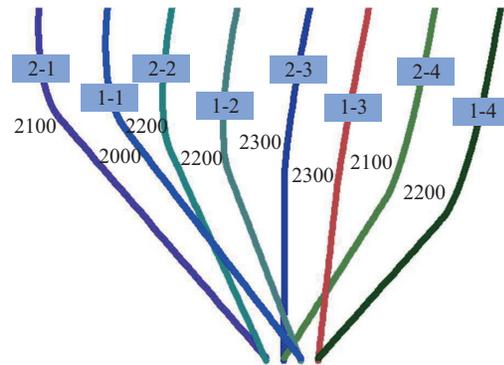


图6 “横向纵推”地面布局与井口靶点匹配关系
Fig.6 Diagram of matching relationship between surface layout and wellhead target points

轨道存在显著差异:由于采用纵向分层推进的运行方式,不同层井的轨道在方位上无法避免地出现交错现象,导致井间碰撞风险大幅升高。“纵向横推”模式下,碰撞风险高的井主要集中在同列井上,即1口井对应3口高碰撞风险井;但“横向纵推”模式下,因为存在交叉,同样1口井考虑防碰的井增加到7口以上。因此,“横向纵推”模式下的防碰设计核心在于通过造斜点的合理规划,实现井眼轨道在空间上的有效错开,从而降低碰撞风险。

本节以第①、②层井的设计为例,详细阐述造斜点的优化策略,如图7所示。在“横向纵推”模式下,造斜点的错开除需考虑同一小井组内4口井的轨道错开外,还需重点关注相邻小井组交叉轨道造斜点的错开,通过双重错开设计,保障全方位的防碰安全。



注:数字表示造斜点深度,m。

图7 “横向纵推”造斜点优化
Fig.7 Optimization diagram of kickoff points

具体的造斜点优化原则如下:

(1)同一小井组内造斜点优化:对于同一小井组(即同一层)的4口井,采用“前排井造斜点浅、后排井造斜点深”的设计策略。前排井口对应浅层靶点,采用较浅的造斜点可缩短钻井进尺,降低成本;后排井口对应深层靶点,采用较深的造斜点可确保井眼轨道能够与浅层轨道保持一定防碰距离,降低碰撞风险。

(2)相邻小井组交叉轨道造斜点优化:针对相邻小井组(即相邻层)的交叉轨道,采用“交叉轨道偏移距大的井造斜点浅”的设计原则。偏移距是指靶点在水平面上相对于井口的水平距离^[14],偏移距大的井,其轨道在平面上的延伸范围更广,采用较

浅的造斜点可使轨道在垂直方向上更早开始弯曲,从而与相邻层偏移距小的井的轨道在空间上错开,避免交叉碰撞。

通过上述造斜点优化设计,可有效降低“横向纵推”模式下轨道方位交错导致的碰撞风险。在实际应用中,需结合具体的地质条件、靶点参数以及工程约束条件,通过模拟计算,确定造斜点的深度与位置,实现碰撞风险的最小化。同时,在施工过程中需加强实时监测^[15-16],根据实际轨迹数据及时预测碰撞风险并实时调整轨迹,确保防碰措施的有效性。

3 认识和建议

(1)大平台立体开发模式通过对井组设计的整体规划,在降低碰撞风险、缩短钻井进尺、提升施工效率等方面具有显著优势。从碰撞风险角度来看,整体规划可实现井眼轨道的系统性优化,通过合理布局井口与靶点、科学设计造斜点与造斜率,使各井轨道在空间上有序分布,大幅降低碰撞风险;在钻井进尺方面,整体规划可避免重复钻井与无效进尺,通过优化轨道路径,最大限度缩短钻井进尺,降低开发成本;在施工效率方面,整体规划为批钻、拉链式压裂等批量施工模式提供了条件,可实现多井同步作业与有序衔接。

(2)“纵向横推”与“横向纵推”2种模式在防碰适应性方面存在明显差异,需根据开发阶段与实际条件合理选择。在页岩油立体开发的早期评价与试验阶段,往往需要开展各小层产能评价、井距层距试验、压裂规模试验、钻压同步时机试验等多方面的评价试验。在此过程中,立体井网中的部分井需要优先实施,以获取关键地质与开发参数,导致无法严格遵循文中所述的最优设计方案,此时模式的适应性显得尤为重要。从防碰角度分析,“纵向横推”模式通过调整初始定向方位可实现轨道平面上的错开,整体碰撞风险较低,即使在部分井优先实施的情况下,仍能通过局部调整造斜点与造斜率等参数,维持较低的碰撞风险,因此适应性更强。而“横向纵推”模式由于轨道方位易出现交错,碰撞风险本身较高,在部分井优先实施的情况下,轨道调整空间有限,碰撞风险难以有效控制,适应性相对较弱。

(3)目前,页岩油水平井一次动用立体井网部

署几层相对合理,尚未形成统一标准,仍需进一步的理论与工程实践验证。从理论层面来看,立体井网部署层数需基于渗流机理与裂缝扩展机理深入研究;从工程实践层面来看,需通过大量现场试验,结合不同部署层数的开发效果与经济效益,确定最优部署方案。因此,需要加强渗流机理、裂缝扩展机理等深层理论研究,同时开展多组不同部署层数的现场试验,通过理论与实践的结合,确定不同地质条件下页岩油立体井网的合理部署层数,为页岩油的高效开发提供科学指导。

参考文献(References):

- [1] Nandlal K, Weijermars R. Shale well factory model reviewed: Eagle Ford case study[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, 212: 110158.
- [2] 叶海超,光新军,王敏生,等.北美页岩油气低成本钻完井技术及建议[J].*石油钻采工艺*, 2017, 39(5): 552-558.
YE Haichao, GUANG Xinjun, WANG Minsheng, et al. Low-cost shale oil and gas drilling and completion technologies used in the North America and the suggestions[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2017, 39(5): 552-558.
- [3] 杨智光,潘荣山,苑晓静,等.古龙页岩油开发试验钻井设计优化与实践[J].*大庆石油地质与开发*, 2024, 43(4): 181-190.
YANG Zhiguang, PAN Rongshan, YUAN Xiaojing, et al. Optimization and practice of drilling design for Gulong shale oil development test[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2024, 43(4): 181-190.
- [4] 屈雪峰,何右安,尤源,等.鄂尔多斯盆地庆城油田页岩油开发技术探索与实践[J].*大庆石油地质与开发*, 2024, 43(4): 170-180.
QU Xuefeng, HE Youan, YOU Yuan, et al. Research and practice of shale oil development technology in Qingcheng Oilfield of Ordos Basin[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2024, 43(4): 170-180.
- [5] 袁建强.济阳拗陷页岩油多层立体开发关键工程技术[J].*石油钻探技术*, 2023, 51(1): 1-8.
YUAN Jianqiang. Key engineering technologies for three-dimensional development of multiple formations of shale oil in Jiyang Depression[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2023, 51(1): 1-8.
- [6] 田启忠,戴荣东,王继强,等.胜利油田页岩油丛式井提速提效钻井技术[J].*石油钻采工艺*, 2023, 45(4): 404-409.
TIAN Qizhong, DAI Rongdong, WANG Jiqiang, et al. An efficient and fast shale oil cluster well drilling technology for Shengli Oilfield[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2023, 45(4): 404-409.
- [7] 迟建功.大庆古龙页岩油水平井钻井技术[J].*石油钻探技术*, 2023, 51(6): 12-17.
CHI Jianguo. Drilling technologies for horizontal wells of Gulong shale oil in Daqing[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2023, 51(6): 12-17.

- [8] 韩来聚,杨春旭. 济阳拗陷页岩油水平井钻井完井关键技术[J]. 石油钻探技术, 2021, 49(4): 22-28.
HAN Laiju, YANG Chunxu. Key technologies for drilling and completion of horizontal shale oil wells in the Jiyang Depression [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2021, 49(4): 22-28.
- [9] 吴继伟,袁丹丹,席传明,等. 吉木萨尔页岩油水平井钻井技术实践[J]. 钻采工艺, 2021, 44(3): 24-27.
WU Jiwei, YUAN Dandan, XI Chuanming, et al. Drilling technologies for shale horizontal wells in jimsar [J]. Drilling & Production Technology, 2021, 44(3): 24-27.
- [10] 肖新磊,席境阳,杜旭,等. 胜利油田页岩油大井眼高效钻进技术研究与应用[J]. 钻探工程, 2023, 50(6): 122-128.
XIAO Xinlei, XI Jingyang, DU Xu, et al. Research and application of high efficiency drilling technology for shale oil large boreholes in Shengli Oilfield [J]. Drilling Engineering, 2023, 50(6): 122-128.
- [11] Thompson J, Franciose N, Schutt M, et al. Tank development in the Midland Basin, Texas: a case study of super-charging a reservoir to optimize production and increase horizontal well densities [C]//SPE/AAPG/SEG Unconventional Resources Technology Conference. Houston: Unconventional Resources Technology Conference, 2018: URTEC-2902895-MS.
- [12] 杜玉山,蒋龙,程紫燕,等. 胜利济阳页岩油开发进展与攻关方向[J]. 油气地质与采收率, 2024, 31(5): 77-98.
DU Yushan, JIANG Long, CHENG Ziyan, et al. Progress and research direction of shale oil development in Jiyang Depression, Shengli Oilfield [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2024, 31(5): 77-98.
- [13] 杨勇,张世明,吕琦,等. 中国东部陆相断陷盆地页岩油开发理论认识与技术实践——以济阳页岩油为例[J]. 油气地质与采收率, 2024, 31(5): 1-15.
YANG Yong, ZHANG Shiming, LV Qi, et al. Theoretical understanding and technical practice of shale oil development in continental faulted basins in eastern China: A case study of Jiyang shale oil [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2024, 31(5): 1-15.
- [14] 田逢军,王运功,唐斌,等. 长庆油田陇东地区页岩油大偏移距三维水平井钻井技术[J]. 石油钻探技术, 2021, 49(4): 34-38.
TIAN Fengjun, WANG Yungong, TANG Bin, et al. Drilling technology for long-offset 3D horizontal shale oil wells in the Longdong Area of the Changqing Oilfield [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2021, 49(4): 34-38.
- [15] 刘永辉,李然,朱宽亮. 密集丛式井磁干扰情况下防碰判断与控制方法[J]. 钻采工艺, 2021, 44(1): 43-47.
LIU Yonghui, LI Ran, ZHU Kuanliang. Anti-collision judgment and control method under magnetic interference of dense cluster wells [J]. Drilling & Production Technology, 2021, 44(1): 43-47.
- [16] 刘刚,王刚,王锴,等. 密集丛式井防碰技术研究现状及发展趋势[J]. 中国海上油气, 2023, 35(2): 146-154.
LIU Gang, WANG Gang, WANG Kai, et al. Research status and development trend of dense cluster well anti-collision technology [J]. China Offshore Oil and Gas, 2023, 35(2): 146-154.

(编辑 王跃伟)