

低渗透油田采油工艺技术优化措施研究

徐想东

(中国海洋石油国际有限公司, 北京 100028)

摘 要 低渗透油田在我国石油工业发展中占据着重要地位, 储层存在物理性质不佳、非均质性强等地质特征及非达西渗流等渗流特征, 导致当前低渗透油田开发普遍存在采收率低、采油速度慢、注水困难等问题。本文针对当下低渗透油田套管射孔完井、酸化压裂、注水采油等工艺技术, 提出优化布井、强化储层改造、改进注水工艺及提升设备效率等优化措施, 以期提升低渗透油田开发效益、提高开采效率提供参考。

关键词 低渗透油田; 采油工艺技术; 套管射孔完井技术; 酸化压裂技术; 注水工艺技术

中图分类号: TE3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.28.023

0 引言

石油作为一种重要的战略能源, 在全球能源结构中占据着举足轻重的地位。然而经过长期的勘探和开发, 优质的常规油田储量日益减少, 低渗透油田逐渐成为石油工业发展的重要接替资源。低渗透油田在我国石油工业中具有重要地位。据统计, 近年来我国新勘探发现的油气田中, 超半数均为低渗透油田, 其产能建设规模在总量中占比超 70%, 已成为油气开发的重点。而低渗透油田储层物理性质欠佳, 孔隙数量少且空间狭小, 渗透能力弱, 孔喉纤细; 溶蚀孔洞分布广泛, 储层在空间分布上的不均一性突出; 油层初始含水比例高, 且对外界干扰的敏感性强。这使其开采难度较大, 自然产能低, 需要进行储层改造才能获得经济产量^[1]。因此, 研究低渗透油田采油工艺技术具有重要的现实意义。

1 低渗透油田的特征与开发现状

1.1 低渗透油田特征

低渗透油田是指油层储层渗透率低、丰度低、单井产能低的油田。

在地质特征方面, 低渗透油田储层物性差, 以砂岩为主, 孔隙结构复杂且细小曲折、表面粗糙, 导致石油流动阻力大, 大分子物质易堵塞通道; 高含水饱和度和因储层与地下水接触多, 占据储油空间并改变渗流特性, 引发产量下降; 岩石胶结物含量高, 使孔隙度和渗透率进一步降低, 增加压裂等储层改造难度; 储层非均质性强, 渗透率、孔隙度、油层厚度及含油饱和度等参数区域差异大, 导致产量分布不均、注水开发时水驱效果差, 易出现水窜现象。

在渗流特征方面, 低渗透油田呈现显著的非达西渗流特征, 低速流动段流速与压力梯度呈非线性关系,

受贾敏效应、表面分子力等影响; 高速流动段虽近似达西定律, 但渗流直线段延长线不通过原点, 存在启动压力梯度, 且渗透率越低该梯度越大, 需更大压力才能使原油流动。同时, 油水两相渗流复杂, 受岩石润湿性、油水粘度比及孔隙结构影响, 易出现水窜和水淹; 渗流速度低, 导致开采周期延长、注水驱替效率低, 进一步增加开采成本与难度^[2]。这些特征共同决定了低渗透油田开采需针对性采用储层改造、精细注水等技术手段。

1.2 低渗透油田开发现状

特低渗透油田若仅凭借天然能量进行开采, 采收率往往不足 10%; 即便运用注水开发的方式, 采收率也只有 20% ~ 25%; 对于普通的低渗透油田, 采用注水开发时, 采收率则能达到 30% 左右。造成采收率低的原因主要包括储层物性差、渗流阻力大、天然能量不足等。储层的低渗透率使得原油难以流动, 大量原油被困在油层中无法采出; 渗流阻力大则消耗了大量的能量, 使得驱油效率降低; 天然能量不足导致地层压力下降快, 无法为原油的开采提供足够的动力。

低渗透油田的采油速率低, 特低渗透油田借助天然能量开采时, 采油速率不足 1%; 采用注水开发后, 采油速率勉强维持在 1% 左右; 普通低渗透油田进行注水开发, 短期内采油速率能超过 2%。但随着开发的进行, 采油速度会逐渐下降。采油速度低不仅影响了油田的经济效益, 还增加了开发成本和时间。这主要是由于低渗透油田的地层能量普遍较低, 渗透率低导致导压系数小, 压力传递慢, 油井供液不足, 产量递减快, 从而限制了采油速度的提高^[3]。

大多数低渗透油田都不同程度地存在注水困难的情况, 吸水能力差, 难以达到配注要求, 甚至有的层

位根本不吸水。这是因为低渗透储层的孔喉细小，渗流阻力大，注水时需要克服较大的压力。低渗透油田还存在启动压力，随着注水压力逐渐升高，注水量逐渐减小。注水困难导致地层能量难以得到有效补充，影响了油井的产量和采收率。

低渗透油田难免会有不少低产井，当前多数油田依旧使用杆式抽油泵，存在地层供液欠缺、供采失衡、泵效不高、抽油系统机械效率偏低等显著问题。这源于低渗透油田独特的地质状况与渗流特点，传统的采油工艺技术难以满足高效开采的要求，需要研发更加先进、适应性更强的采油工艺技术。

2 低渗透油田采油工艺技术

2.1 套管射孔完井技术

套管射孔完井技术在低渗透油田中应用广泛，其利用火药或水力等能量射穿套管、水泥环和井壁附近地层，建立地层和井筒之间流体流动通道，在多层系和层间差异大的油气层完井中，套管射孔完井技术能够防止层段之间窜通，最大限度沟通油气生产通道、提高产能，从而进行有效的生产控制和检测。套管射孔完井技术射孔参数对开采效果有着较大影响，其中孔深是作用于产能的关键因素，当存在钻井损害但无射孔损害时，唯有孔深超出损害带特定范围，油气井产能才不会下降，且会随孔深加大而提升，不过当孔深增至某一数值后，即便继续加深，产能也不会有明显增长。较高的孔密能带来更大产能，但孔密不能无限提高，因为孔密过大易导致套管受损、射孔成本上升，还会使后续作业更复杂，所以需依据油气井状况及其他射孔参数，选定适合该井的最优孔密。孔径对油井产能也有影响，当孔径小于 10 mm 时，增大孔径能让产能大幅提升；而孔径大于 10 mm 时，即便再加大孔径，产能提升也不明显^[4]。相位指的是相邻射孔孔眼间的角位移，不同相位角会对油气流动路径和产能产生影响。

2.2 酸化压裂技术

酸化解堵技术是油井增产、水井增注的重要措施，其目的是恢复和改善地层近井地带的渗透性，提高地层的导流能力，达到增产增注的目的。常见的酸化解堵技术包括常规土酸酸化、油 / 酸乳状液酸化、氟硼酸深部酸化等。常规土酸酸化由盐酸加入氢氟酸和水配制而成，对泥质硅质溶解能力较强，是解除近井地层损害，实现油井增产增注的常用方法，适用于碳酸盐含量较低、泥质含量较高的砂岩地层。在华北油田、大港油田、中原油田中，该技术已施工 1 768 井次，用酸量 26 872.9 方，成功率 97%，有效率达到 91.5%。

2.3 注水工艺技术

常规注水技术是低渗透油田开发中常用的方法，低渗透储层的孔喉细小，渗流阻力大，导致注水压力高，需要较大的能量来推动水注入地层。低渗透油田存在启动压力，随着注水压力逐渐升高，注水量逐渐减小，使得吸水能力差，难以达到配注要求，甚至有的层位根本不吸水。注水水质问题也会影响注水效果，水中的固体悬浮物、含油量超标以及与地层水配伍性差等，都可能导致地层堵塞，降低渗透率。据此，加强注水水质处理，净化剂处理、活性炭吸附、过滤网过滤等物理方式去除注入水质中的固体悬浮物与残留油量，确保注水水质达标，减少对地层的损害。采用高压注水泵、精细过滤器等设备，提高注水压力和水质过滤精度；合理设计注水井的布局和井距，确保注水的均匀性和有效性。还可以通过酸化、压裂等储层改造措施，提高地层的渗透率，降低注水压力，改善吸水能力^[5]。

2.4 采油工艺技术

有杆泵采油技术具有设备简单、成本较低等优点，但低渗透油田地层供液不足，供采不平衡，导致泵效低。由于储层渗透率低，原油流动阻力大，油井的产量较低，使得泵的充满程度不足，影响泵效。另外，常规油杆的强度与抽油机自身负荷存在局限，使得下泵深度受到一定限制，对于埋藏较深、液面较低的低渗透油田而言，其开采工作无法有效开展。

无杆泵采油技术包括螺杆泵、电动潜油泵等，在低渗透油田也有一定的应用。螺杆泵采油技术具有结构简单、占地面积小、适应高粘度原油开采等优点。在低渗透油田中，对于一些原油粘度较高的油井，螺杆泵能够有效地将原油举升至地面。螺杆泵也存在一些缺点，如对油井的含砂量较为敏感，容易造成螺杆和衬套的磨损；在高气油比的油井中，运行效率会受到影响。

电动潜油泵采油技术则具有排量大、扬程高、适应性强等特点，适用于高产、深井和高含水油井的开采。在低渗透油田中，对于一些地层能量较高、产量较大的油井，电动潜油泵能够充分发挥其优势，提高采油效率。电动潜油泵的投资成本较高，维护和管理难度较大，且对电力供应要求较高。

3 低渗透油田采油工艺技术优化措施

3.1 优化布井与井网调整

在低渗透油田开发中，传统均质布井方式往往难以满足油藏的复杂需求。网格状布井方式能够将整个油田按照等距离排列布置井网，从而实现对油藏的较为均

匀开发,有效利用储层资源,提高油田的开采率,也便于油田的管理和监控,实时把握油田的动态变化情况。

合理井网密度和井距能够提高油藏的采收率,对于低渗透砂岩油藏,由于其水驱特征较弱,油水分布复杂,采用密集井网进行注水开发;而对于中、高渗透砂岩油藏,水驱特征较强,油水分布比较均匀,采用稀疏井网进行注水开发。此外,井的产能也是重要的参考因素,油井的产能越大,井网井距就可以相应调大,以降低开采成本;对于产能较低的油井,井网井距则要相应调小,避免产生油藏废弃区。油井的排水半径也是判断井网井距的重要依据,油井的排水半径越小,井网井距就需要相应调小,以保证注水井和生产井之间的良好联系。

3.2 强化储层改造技术

根据储层的岩石性质和堵塞类型进行优化酸液。碳酸盐含量较低、泥质含量较高的砂岩地层,选择常规土酸酸化。但土酸酸化与砂岩油气层反应时,开始时渗透率降低,随着反应进行,堵塞物溶解,渗透率会上升。据此使用油/酸乳状液酸化,具有缓速、深部酸化的特点,能够延缓酸岩反应速度,增加酸液的有效作用距离;氟硼酸深部酸化,能够对地层深部的硅质矿物进行溶解,从而改善地层深部的渗透率。

为了提高压裂效果,应用前置酸压裂技术,达到破裂压力情况下将酸液泵入地层,一部分酸液会处于裂缝最前端,另一部分则滤失到裂缝壁面两侧,接着挤入适量隔离液,把酸液与压裂液隔离开来,避免压裂液遇酸后水化破胶引发压裂失败,之后继续泵入携砂液与顶替液,完成压裂作业,以此改善地层与裂缝间的渗流状况,实现单井产量提升。

3.3 改进注水工艺

针对常规注水技术存在的问题,特殊注水技术应运而生,包括周期注水、细分注水、高压注水等。周期注水是采用周期性地改变注水量和采油量,来提高注水效果和采收率的技术。其原理是利用油水在岩石孔隙中的渗流差异,在注水阶段,水驱替原油向生产井流动;在停注阶段,原油在毛管力和弹性力的作用下重新分布,使原来未被水驱到的原油得到动用。周期性注水方式扩大水驱波及体积,提高原油采收率。在一些低渗透油田的应用中,周期注水取得了较好的效果,能够有效提高油井的产量和油田的采收率。细分注水是根据油层的物性、渗透率、含油饱和度等差异,将油层细分为多个小层,对每个小层进行单独注水的技术。这种技术能够实现分层注水,提高注水的针对性和有效性,避免层间干扰,使每个小层都能得到合

理的注水开发。细分注水提高水驱控制程度,改善油层的动用状况,从而提高采收率。在一些多层系的低渗透油田,细分注水技术得到了广泛应用,有效提高了油田的开发效果。高压注水是在高于地层破裂压力的情况下进行注水的技术。当注水压力达到地层破裂压力时,地层会产生微裂缝,这些微裂缝可以增加地层的渗透性,提高注水量。但高压注水可能导致地层破裂、水窜等问题,因此需要严格控制注水压力和注水量。在一些低渗透油田,高压注水技术在经过充分的论证和试验后,被应用于提高注水效果和采收率,取得了一定的成效。

3.4 提升采油设备与工艺效率

优化抽油设备,选择合适的抽油机型号和参数,提高抽油机的效率和适应性;采用高强度抽油杆,增加下泵深度,提高油井的产量。优化抽汲参数,使泵的工作状态与油井的供液能力相匹配,提高泵的充满程度和泵效。还可以采用智能控制技术,安装传感器、智能控制系统等设备,实现对采油过程的实时监测和自动控制。利用传感器采集油井的压力、温度、流量等数据,智能控制系统对这些数据进行处理,根据分析结果自动调整采油设备的运行参数,实现采油过程的优化。智能化采油设备还可以实现远程监控和管理,提高生产管理的效率和水平,降低人工成本和劳动强度。

4 结束语

低渗透油田因储层物性差、非均质性强及非达西渗流等特征,开发面临采收率低、采油速度慢、注水困难等问题。本研究据此针对当前低渗透油田套管射孔完井、酸化压裂、注水及有杆/无杆泵采油等工艺,提出优化布井、强化储层改造、改进注水工艺及提升设备效率等措施,为低渗透油田高效开发提供有力支撑,助力提升开发效益与开采效率。

参考文献:

- [1] 左琴,瞿春,田化池,等.低渗透油田采油工艺技术探讨[J].石化技术,2024,31(08):381-383.
- [2] 王小娥,魏延琴.低渗透油田采油工艺技术适应性探讨[J].石化技术,2024,31(05):111-113.
- [3] 郝晓练,杨博,贺洋.适应低渗透油田的采油工艺技术措施分析[J].石化技术,2024,31(03):140-142.
- [4] 姜茗洲.适应低渗透油田的采油工艺技术措施分析[J].全面腐蚀控制,2022,36(06):77-78,81.
- [5] 尚文涛.低渗透油田的采油工艺[J].化学工程与装备,2021(07):125,130.