

塔河油田超深超稠油油藏人工举升技术

彭振华¹, 张园¹, 丁雯¹, 任向海¹, 李晓君¹, 熊伟²

(1. 中国石化西北油田分公司石油工程技术研究院,新疆乌鲁木齐 830011;2. 中国石油吉林油田分公司油气工程研究院,吉林松原 138000)

摘要: 塔河油田超深超稠油油藏具有“两超五高”的特点,人工举升困难,目前存在深抽能力不足、杆断严重、井筒掺稀降黏成本高和井下抽油泵故障率高等难题。为解决这些问题,攻关研究了大型皮带抽油机、大排量抽稠泵、减载深抽和高温抗稠油电动潜油泵等技术,形成了掺稀气举举升、稠油复合举升和稠油螺杆泵举升等工艺,并针对油藏开发的技术难点提出了相应的技术对策和建议,为塔河油田超深超稠油油藏高效、经济开发指明了攻关方向。

关键词: 缝洞型油藏;碳酸盐岩;超稠油;超深井;举升工艺;塔河油田

中图分类号: TE355 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-0890(2018)04-0084-07

Artificial Lifting Technology Applied in Ultra-Deep & Super-Heavy Oil Reservoirs of the Tahe Oilfield

PENG Zhenhua¹, ZHANG Yuan¹, DING Wen¹, REN Xianghai¹, LI Xiaojun¹, XIONG Wei²

(1. Research Institute of Petroleum Engineering, Sinopec Northwest Oilfield Company, Urumqi, Xinjiang, 830011, China; 2. Oil and Gas Engineering Institute of PetroChina Jilin Oilfield Company, Songyuan, Jilin, 138000, China)

Abstract: The ultra-deep and ultra-heavy oil reservoirs of the Tahe Oilfield often experience problems with artificial lift. Specifically, they face insufficient deep sucking, frequent string fractures, high costs in heavy oil diluting and thinning in wellbore, and a high failure rate with the down-hole pump. These problems are complicated by the nature of the reservoirs, referred to as “two ultras and five highs”. In order to overcome the problems, relevant techniques were developed. They included a large belt driving pumping unit, large displacement pump, load reducing and deep pumping technology and a high-temperature and heavy-oil tolerant electrical pump, forming technologies like light oil mixing gas lifting, heavy oil composite lifting, and heavy oil screw pump lifting. In addition, we proposed corresponding measures to overcome the main challenges encountered in reservoir development. In the end, we used our findings to improve efficiency to contribute to the successful for efficient and economic development of reservoirs in the Tahe Oilfield.

Key words: fractured-vuggy reservoir; carbonate; super heavy oil; ultra-deep well; lifting technology; Tahe Oilfield

奥陶系储层是塔河油田主力产层,油藏类型以缝洞型碳酸盐岩油藏为主,近年来稠油区块年产油能力近 400×10^4 t,是油田快速上产的重要阵地。塔河油田超深超稠油油藏属于有底水的碳酸盐岩缝洞型油藏^[1],平面上一般表现为叠合连片含油、不均匀富集的特征,纵向上基质渗透率低,裂缝、溶洞发育,地层流体流动特性复杂。塔河油田超

收稿日期:2018-01-30;改回日期:2018-05-18。

作者简介: 彭振华(1979—),男,新疆博乐人,2003年毕业于西南石油学院机械设计专业,2011年获中国石油大学(北京)油气田开发工程专业硕士学位,工程师,主要从事机械采油研究与推广工作。E-mail:2468695@qq.com。

基金项目: 国家科技重大专项课题“碳酸盐岩缝洞型油藏采油技术完善与应用”(编号:2011ZX05049-003-003)资助。

稠油油藏具有“两超五高”的特点^[2],“两超五高”即超深(油藏埋深 5 500~6 800 m)、超稠(50 °C 地面原油黏度 1 500~1 800 000 mPa·s)和高温(油层温度 125~150 °C)、高压(油层压力 60~70 MPa)、高密度(地表原油密度 0.92~1.10 g/cm³)、高矿化度((17~24) × 10⁴ mg/L)、高硫(H₂S 浓度最高 133 990 mg/m³, 平均 10 273 mg/m³)。

塔河油田超稠油油藏的特殊性决定了塔河油田人工举升难度大, 主要存在抽油杆失效比例高、系统效率低和掺稀比高等问题。通过分析塔河油田工艺技术现状, 提出了技术策略, 以满足新时期、新环境下的超稠油开发要求。

1 塔河油田超深超稠油油藏开发难点

塔河油田为碳酸盐岩油藏, 主要利用地层能量进行开发, 能量下降极快, 随着开发时间的延长, 泵挂深度需要不断加深, 且流体黏度高、进泵困难, 常规人工举升工艺无法满足举升要求。另外, 虽然原油地层黏度低, 但是随着举升过程中温度降低, 黏度增大, 至地下 2 000~3 000 m 处无法流动, 需采取井筒降黏措施。目前, 塔河油田人工举升的主要存在以下 4 个方面的问题:

地层供液能力不足, 人工举升能力不能满足生产需求

油井产层供液能力太小严重影响人工举升的效果, 由于塔河油田地层能量无补给, 随着生产不断进行, 人工举升能力不再满足生产需求, 引发了一系列问题:1)抽油井深抽举升能力不足, 泵挂深、液面深、杆柱应力超载, 地面设备负载能力不足, 需要大负载设备、高强度杆以满足持续加深的泵挂要求;2)部分使用螺杆泵的油井间歇抽油或发生运行事故;3)受液面低、原油黏度高、黏温拐点深、稀稠油混配效果差、成本高和电动潜油泵稠油适应性差等因素影响, 塔河油田部分井抗稠油电动潜油泵平均运行寿命仅 170 d, 造成生产成本居高不下。

杆柱失效比例高 抽油井维护作业分析表明, 杆柱失效占比由 2011 年的 19.7% 上升至 27.4%, 成为目前塔河油田维护作业的首要原因, 杆柱失效形式主要有断裂(占 52.1%)、偏磨(占 32.4%)和脱扣(占 15.5%)。研究发现, 杆柱断裂井(简称杆断井)含水率高, 含水率大于 50% 的杆断井占比 87.6%;杆断井普遍泵挂深, 平均泵挂 2 798.00 m 的深抽井占 82.0%;71.7% 的断点深度集中在杆柱

中下部;71.0% 的断裂部位位于端部镦粗扳手附近。杆柱下行时, 受到摩擦阻力的作用, 发生失稳弯曲, 与油管发生接触磨损, 造成杆柱偏磨。脱扣主要是由于井筒内的流体黏度高, 杆柱下行与流体作用产生反扭矩造成的。

抽油泵故障率高 目前, 抽油泵故障是维护作业的另一个主要原因, 占总维护作业比例的 20.3%。抽油泵故障主要原因:1)沉没度高, 阀球开启压差大, 开启受到的冲击力大;2)井深、原油黏度大、H₂S 腐蚀等因素易导致阀座刺漏、柱塞阀罩断裂等。

系统效率低 通过统计分析可知, 目前塔河油田抽油井平均沉没度 1 315.00 m, 平均系统效率仅为 19.8%, 需要开展系统优化, 提高举升效率, 实现节能降耗。

2 超深超稠油井人工举升技术现状

“十二五”期间, 塔河油田攻关研发了大型皮带抽油机、大排量抽稠泵和减载深抽等技术, 检泵周期由 2011 年的 533 d 延长至 2015 年的 629 d, 平均泵效由 61.2% 提高至 64.3%, 有杆泵最深泵挂达 4 027.00 m, 抗稠油电动潜油泵最深泵挂达 5 030.00 m, 基本解决了超稠油举升问题, 居于国内外领先水平。通过 5 年的发展, 主要形成了以下特色技术。

2.1 超稠油有杆泵举升工艺

针对产液黏度大引起载荷大, 导致抽油机电流高烧损电机、杆柱缓下等问题, 通过研究大负荷能力的大型皮带机、具有下行液力反馈作用的抽稠泵技术和减载深抽技术^[2~6], 形成了塔河油田超稠油有杆泵举升工艺, 解决了抽油井停机、光杆缓下等问题, 保障了生产可靠运行。

2.1.1 大型皮带抽油机技术

抽油井因原油密度大、下泵深, 造成抽油机载荷大, 易因杆柱疲劳发生杆断或因电流高烧毁电机, 为满足塔河油田深抽或大泵提液的需要, 研发了长冲程、慢冲次的 900 型和 1000 型大型皮带抽油机, 以解决大载荷的问题。

该抽油机具有参数调整范围大(冲程 2.00~8.00 m, 冲次 1~4 min⁻¹)、相对冲程损失小、恒速运动时间长、抽油杆运行寿命长的特点。

截至目前, 地面配套的大型皮带抽油机共 19

台,其中 900 型皮带抽油机 12 台、1000 型皮带抽油机 7 台。通过应用地面大型抽油设备,实现了长冲程、慢冲次的工作制度,保证了油井正常生产,减轻了对杆柱的疲劳伤害,为超稠油深抽工艺提供了设备保障。

2.1.2 大排量抽稠泵技术

针对光杆缓下、滞后的问题,研究了大排量抽稠泵技术^[3](其结构如图 1 所示),主要研制形成了 CCYB56/38、70/32、70/44、83/44 等 4 种规格的大排量抽稠泵(相关参数见表 1)。

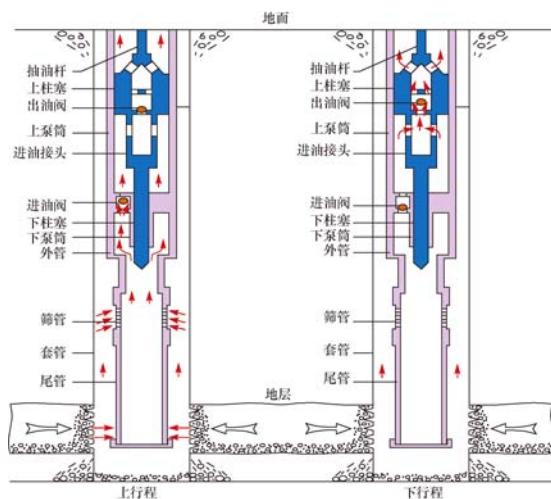


图 1 大排量抽稠泵示意

Fig. 1 Schematic diagram of large displacement heavy oil pump

表 1 大排量抽稠泵规格参数

Table 1 Specifications of large displacement heavy oil pump

规格型号	最大外径/mm	工作压力/MPa	泵常数/ $m^3 \cdot d^{-1}$	间隙代号	上下连接螺纹
CCYB56/38	97.0	30	1.91	2,3	27/8,27/8TBG
CCYB70/32	107.0	25	4.38	2,3	3,27/8TBG
CCYB70/44	107.0	25	3.35	2,3	3,27/8TBG
CCYB83/44	114.0	25	5.58	2,3	31/2,27/8TBG

大排量抽稠泵的主要技术特点为:

- 1) 采用上大下小两级串联柱塞,抽油杆带动柱塞运动引起环形腔容积变化而分别形成低、高压腔,使阀打开或关闭,从而完成进液和排液。
- 2) 下行程时,泵出油阀的液柱压强和泵进油阀液柱压强的差值作用在下柱塞上,产生下行动力,与常规泵相比更有助于抽油杆柱下行。
- 3) 通过改变进油阀位置,将进油阀设置在下泵

筒下部偏心阀罩中,使进油口直径由 23.0 mm 增加为 42.0 mm,进泵阻力降低 67%,提高了泵充满程度。

4) 适用于原油黏度小于 4 000 mPa · s,气油比小于 200,含蜡量小于 25%,胶质、沥青质含量小于 20%,含砂量小于 0.3% 的油井。

截至目前,大排量抽稠泵技术现场应用 171 口井,满足泵挂深度 4 027.00 m,排量不大于 180 m³/d 的举升需求。其中 CCYB70/32 型泵推广应用 103 井次,CCYB83/44 型泵应用 2 井次,累计增油 8×10^4 t。CCYB83/44 型泵的研制为替代小排量电动潜油泵奠定了基础,提高了塔河油田超稠油抽油机有杆泵举升能力。

2.1.3 减载深抽技术

塔河油田油藏埋藏深,下泵深度受抽油机悬点载荷和抽油杆强度的制约,无法实现深抽,影响油田开发效果。为此研发了长冲程抽油机减载器,可以解决超稠油井深抽与排量的矛盾^[7-9]。

抽油机减载器主要由减载柱塞、柱塞管、过液孔、呼吸孔和密封管组成,如图 2 所示。由于该减载器所下位置油管内液柱压力要远大于套管内的压力,所形成的压力差作用于减载柱塞的下端面,使其产生一个向上的举升力,起到减小杆柱受力的作用。

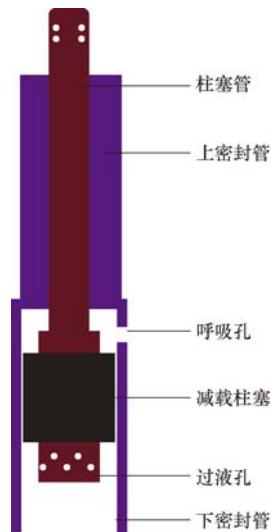


图 2 抽油机减载器示意

Fig. 2 Structural diagram of load reducing device of pumping unit

减载技术可在不改变地面抽油机设备条件下,有效加深抽油泵的深度,提高泵的充满程度。截至目前,塔河油田现场应用抽油机减载器 4 井次,其中自喷转抽作业 1 井次。其中,TH10104 井和 TK7209 井泵挂深度、动液面基本未变,悬点载荷减

载比例分别达 33.8% 和 18.7%。TK7-639 井和 TK7209 井抽油机型号降低一个级别, 达到了节能降耗的目的。TK7-639 井泵挂深度由 2 604.00 m

加深至 3 522.00 m, 泵径缩小、冲次提高, 动液面基本未变, 该井泵效由 43.8% 提高至 98.1%。抽油机减载器的具体应用效果见表 2。

表 2 抽油机减载器应用效果对比

Table 2 Application comparison of load reducing device of pumping unit

井号	泵径/mm	泵挂深度/m	工作制度/ (m·min ⁻¹)	最大悬点 载荷/kN	上行 电流/A	下行 电流/A	日产液/t	泵效, %
TK7-639	使用前	44.0	4.20×3.0	105.8	30	31	8.1	43.8
	使用后	32.0	4.20×4.0	85.9	36	30	13.5	98.1
TH10104	使用前	70.0/44.0	5.00×3.0	91.3	48	4	34.3	68.2
	使用后	70.0/44.0	5.00×3.0	60.4	52	61	41.0	81.5
TK7209	使用前	38.0	7.30×1.7	147.7	48	30	2.1	10.3
	使用后	38.0	5.00×3.0	120.1	46	35	11.2	45.7

2.2 抗稠油电动潜油泵配套举升工艺

针对塔河油田超稠油井 H₂S 含量高、原油黏度大、井深的特点, 应用常规电动潜油泵存在叶轮扭矩大、电机烧毁、电缆击穿等问题, 通过优化改进流体力学特性, 使电动潜油泵性能得到了大幅度提升^[10-21]。

2.2.1 抗稠油电动潜油泵技术

1) 优化叶轮结构降低举升阻力。叶轮是电动潜油泵的核心机构, 是将机械能转化成生产流体压能的关键部件, 液体通过叶轮时, 液体的压能和动能都得到增加, 合理的叶片结构是超稠油深井举升的关键。通过改进叶片结构(见图 3), 使轴向过流面积比原来增加了约 200%; 通过应用特殊表面处理工艺, 提高叶片表面耐磨损性、降低粗糙度, 数值模拟表明固液间的摩擦阻力可降低 57% 以上。

2) 提高保护器胶囊的性能。通过改性橡胶材料, 使保护器胶囊具有耐温 140 ℃、抗 H₂S 和高抗拉强度的特性, 解决其密封失效问题。

3) 电缆优化改进。通过应用具有优异绝缘特性的聚酰亚胺-氟 46 和三元乙丙橡胶, 将耐温由 120 ℃ 提升至 150 ℃, 短时峰值耐温 180 ℃, 耐压由 30 MPa 提升至 35 MPa, 提高了安全性, 延长了使用寿命, 使下泵深度增加了 1 500.00 m, 大大扩展了电动潜油泵的应用深度。

通过技术攻关形成了排量为 50~400 m³/d、耐温达到 150 ℃、扬程达到 5 000 m 的多种规格抗稠油电动潜油泵, 扩展了电动潜油泵适用范围, 为高温、高

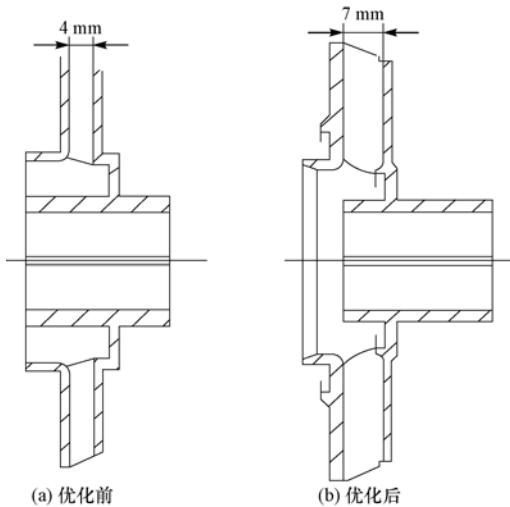


图 3 优化前后的叶轮

Fig. 3 Schematic diagram of impeller before and after optimization

黏的超深超稠油井大排量人工举升提供了技术保障。截至目前, 塔河油田共推广应用抗稠油电动潜油泵 128 井次, 平均泵挂深度 3 239.00 m, 最大下深 5 030.00 m, 累计增油 16.33×10⁴ t。

2.2.2 管柱配套工艺

针对深层超稠油井在举升过程中稠油与稀油混配不均、影响降黏效果的问题, 研发了泵下加尾管工艺技术, 即在有杆泵管柱或电动潜油泵管柱下通过过桥管连接尾管。泵下加尾管技术可以加深掺稀点深度, 有效提高混配效果, 如图 4 所示。

其工艺原理为通过加深掺稀点深度, 充分利用地层热能, 提高稠油、稀油相容性。当掺稀点加深后, 掺稀点的温度升高, 此处地层稠油的黏度低、流

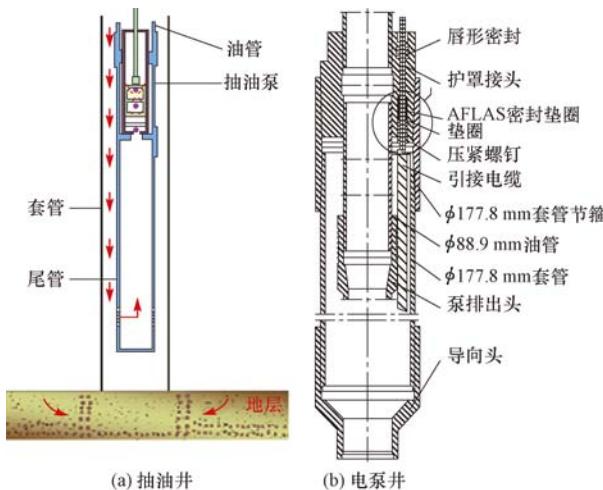


图 4 泵下加尾管工艺示意

Fig. 4 Technology of pump with tail pipe

动性强,同时稀油进一步加热活性也得到提高,因而更容易分散到稠油内。泵下加尾管技术可以使原油充分降黏,并可降低掺稀比。

截至目前,泵下加尾管工艺现场应用 28 井次,平均泵深 2 594.00 m,平均尾管下深 3 249.00 m,最大下深 3 638.00 m,平均稀油节约率达到 10.1%。

2.3 稠油举升新工艺

针对塔河油田生产掺稀比高、稀油资源少,地层能量低、动液面下降快,稠油乳化等问题,开展了开采新技术探索研究,形成掺稀气举举升工艺、稠油复合举升工艺及稠油螺杆泵举升工艺。

2.3.1 掺稀气举举升工艺

掺稀气举举升工艺是利用地面设备将氮气和稀油进行均相混合后,经过油套环空和压井滑套注入油管,然后循环到地面。

其工艺原理为注入的混合介质进入油管后,与油层产出流体混合,当混合流体向上运动时,井筒内压力下降,气体膨胀,混合流体密度下降,稀油与稠油相溶使黏度降低,流动阻力进一步降低,另外气体膨胀能产生连续向上运动的力,最终将稠油举升至地面。

截至目前,稠油掺稀气举举升工艺试验 1 口井,掺稀比降幅达到 64.5%,投入产出比为 1.0 : 2.6,获得很大成功,有效解决了超稠油掺稀比高的问题。

2.3.2 稠油复合举升工艺

稠油复合举升工艺是利用接替举升的方法对深

动液面的油井进行复合举升。复合举升系统的工作流程为油层流体沿射孔段流至井底,并在井底流压的作用下沿井筒向上流动,经由电动潜油泵举升至一定的高度,再由有杆泵接力举升至地面,从而实现超深层油藏的复合举升,电潜泵-有杆泵复合举升管柱如图 5 所示。

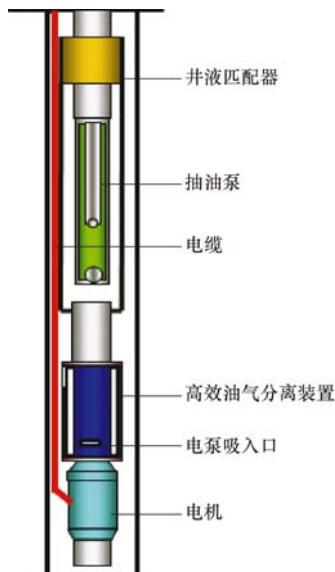


图 5 电动潜油泵-有杆泵复合举升管柱示意

Fig. 5 Schematic diagram of composite lifting of electrical submersible pump and rod pump

复合举升工艺可以解决电动潜油泵的连续出油与有杆泵的半程出油矛盾,在保持有杆泵有一定沉没度的情况下,由电动潜油泵将井液举升到有杆泵的正常抽汲深度,再由有杆泵系统举升到地面。

电潜泵-有杆泵复合举升工艺在塔河油田 TH636 井进行了现场试验。该井是艾协克 2 号构造西翼布置的一口开发井,完钻井深 5 520.00 m,原油运动黏度 35.90 mm²/s,初期设计电动潜油泵泵挂深度 1 502.59 m,抽油泵泵挂深度 1 490.64 m,生产一个月供液不足;通过更改设计,加深电动潜油泵泵挂至井深 3 940.96 m,管式泵泵挂深度 2 002.11 m,抽油机工作制度 56.0 mm×5.00 m×3 min⁻¹,电动潜油泵频率 40 Hz。该井应用电潜泵-有杆泵复合举升工艺后检泵周期长达 500 d,单井累计增油达 3 941 t,为同类低产深抽井开辟了新的技术方向。

2.3.3 稠油螺杆泵举升工艺

针对塔河油田部分超稠油井掺稀降黏发生乳化导致举升效果差的问题,研究了稠油螺杆泵举升工艺,并取得了较好的稠油举升效果。

螺杆泵具有如下特点:1)适合于开采黏度高、含固相的流体;2)不易发生气锁;3)节能降耗,与有杆泵相比节能 30%~40%;4)地面占用空间小,井口无泄漏,日常管理简单。

塔河油田地面驱动螺杆泵推广应用 3 井次,目前持续有效,解决了塔河油田原油乳化严重、抽油机无法举升的问题。3 口井平均泵深 1 604.70 m,平均单井日产液 22.9 t,日产油 11.4 t,含水率 52%,平均泵效 55.6%,掺稀量由 5.1 t/d 降至 3.4 t/d,累计增油 2 016.2 t。

3 开发技术对策及建议

针对塔河油田存在的技术难点,需要开展系统、全面、深层次的技术研究,找出问题根源,进行有针对性的研究,以达到提高采收率、降低油田开发成本的目的。

3.1 油藏渗流规律再认识

通过分析塔河油田存在的问题,其主要矛盾点的根源在于油藏认识不清、渗流规律不明,导致地层产能预测偏差大,从而带来工艺选择不适合等问题。缝洞型储集体强烈的非均质性导致储量丰度差别悬殊,相邻生产井产能差异巨大,需要建立试井产能识别技术,反向构建渗流模型,并针对超稠油油藏油井生产特点,开展生产系统节点分析,查找节能点,优化敏感性参数,并对计算公式进行合理化修正,建立合理的模型指导举升工艺的选择与应用。

3.2 储层改造技术

油层的产液能力是决定油井举升工艺的根本因素,通过研究低成本高效的储层改造技术,提高产液指数,可以间接提高动液面,降低举升难度。建议开展高压酸压技术,暂堵转向多级压裂技术,水力喷射钻孔、解堵技术和负压解堵技术等,提升油层的产液能力。

3.3 产液介质降黏改性

原油超稠、高 H₂S 的特性导致其举升困难,另外原油黏度高导致井底出砂及井壁坍塌加剧,部分井甚至因出砂需要检管、检泵,因此降黏是目前举升工作的重点。井筒降黏工艺仍需研发高效技术:1)稠油降黏技术,如超深井蒸汽吞吐降黏技术、CO₂吞吐地层降黏技术、复合型表面活性剂吞吐增效技

术等;2)掺稀降黏技术,对于浅井可应用过泵加药降黏,深井应用管柱外绑钢管掺稀降黏,并在泵下进行旋流混合,将分散的稠油团与降黏剂(稀油)充分搅拌,最终降低加入药剂用量,降低吨油成本,提高油井开发效益;3)井下催化裂化技术^[22-23],高分子链的稠油裂解为低分子链,成为高流动性的介质,从而解决流动性差、负载大的问题。

3.4 机采杆柱优化

针对塔河油田深抽井杆柱载荷大、杆断严重的难题,建议研究抽油杆腐蚀断裂规律,攻关碳纤维连续抽油杆减载深抽技术,杆柱采用新型碳纤维复合材料,其具有重量轻、强度高和抗腐蚀的特点,可以有效降低整体杆柱载荷,延长采油井检泵周期。

4 结束语

塔河油田超深超稠油油藏“两超五高”的特点导致人工举升难度大,虽然目前已形成了一些有效的举升工艺和特色技术,但还存在举升能力不足、杆柱失效比例高和系统效率低等问题。建议通过分析塔河油田人工举升大型皮带抽油机、大排量抽稠泵和减载深抽等的技术现状,制定有针对性的技术措施,从油藏流动特性、介质降黏改性和杆柱应力等方面开展新方法、新材料、新工艺、新技术的研究应用工作,提高采油举升技术水平,缩小差距。

参 考 文 献

References

- [1] 张希明,朱建国,李宗宇,等. 塔河油田碳酸盐岩缝洞型油气藏的特征及缝洞单元划分[J]. 海相油气地质,2007,12(1):21-24.
ZHANG Ximing, ZHU Jianguo, LI Zongyu, et al. Ordovician carbonate fractured-vuggy reservoir in Tahe Oilfield, Tarim Basin: characteristics and subdivision of fracture-vug units[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2007, 12(1): 21-24.
- [2] 万仁溥. 采油工程手册[M]. 北京:石油工业出版社,2000:112-115.
WAN Renpu. Production engineering handbook[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2000: 112-115.
- [3] 刘玉国,杜林辉,梁志艳,等. 83/44 侧向进油大排量抽稠泵的研制与应用[J]. 中外能源,2014,19(9):61-63.
LIU Yuguo, DU Linhui, LIANG Zhiyan, et al. Development and application of 83/44 lateral inlet heavy oil pump with large displacement[J]. Sino-Global Energy, 2014, 19(9): 61-63.
- [4] 杜林辉,梁志艳,蒋磊,等. 稠油机采井泵深与掺稀混配点分离设计及应用[J]. 特种油气藏,2014,21(3):145-147.
DU Linhui, LIANG Zhiyan, JIANG Lei, et al. Separate design

- between pump setting depth and mixing point for diluent oil blending in heavy oil mechanical producers and its application [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2014, 21(3): 145–147.
- [5] 张荣军, 李海军, 任月玲. 塔河油田深层稠油掺稀降黏技术[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2009, 24(3): 84–87.
- ZHANG Rongjun, LI Haijun, REN Yueling. Viscosity reducing recovery technology of the deep heavy oil of Tahe Oilfield by mixing light oil[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2009, 24(3): 84–87.
- [6] 杨顺辉, 娄新春, 张素红. 塔河油田超深井稠油采油工艺评价与优选[J]. 石油地质与工程, 2006, 20(5): 65–67.
- YANG Shunhui, LOU Xinchun, ZHANG Suhong. Evaluation and well selection of over-deep well heavy oil production technology in Tahe Oilfield[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2006, 20(5): 65–67.
- [7] 陈灿, 陈凤, 张耀, 等. 抽油机减载器在塔河油田的应用及改进[J]. 油气藏评价与开发, 2013, 3(3): 54–57.
- CHEN Can, CHEN Feng, ZHANG Yao, et al. Application and improvement of load shedding devices in Tahe Oilfield[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2013, 3(3): 54–57.
- [8] 赵海洋, 王金东, 于振东. 加装减载器的抽油系统杆柱设计及节能分析[J]. 科学技术与工程, 2009, 9(14): 4143–4145.
- ZHAO Haiyang, WANG Jindong, YU Zhendong. Sucker rod design and energy conservation analysis of pumping system with load reducer[J]. Science Technology and Engineering, 2009, 9(14): 4143–4145.
- [9] 邱军, 宫恒心, 王玉, 等. 有杆泵深抽减载技术在 TZ4-7-52 井的应用[J]. 油气井测试, 2002, 11(3): 49–50.
- QIU Jun, GONG Hengxin, WANG Yu, et al. Application of de-loader system at deep sucker rod pump in Well TZ4-7-52[J]. Well Testing, 2002, 11(3): 49–50.
- [10] 吴频, 周海, 刘洋, 等. 深井稠油潜油电泵[J]. 石油科技论坛, 2012, 31(4): 70–72.
- WU Pin, ZHOU Hai, LIU Yang, et al. Submersible electric pump for deep and heavy oil well[J]. Oil Forum, 2012, 31(4): 70–72.
- [11] 杜林辉, 刘玉国, 刘瑞, 等. 超稠油潜油电泵尾管装置的研制与应用[J]. 石油钻采工艺, 2013, 35(4): 103–105.
- DU Linhui, LIU Yuguo, LIU Rui, et al. Development and application of the tail pipe device for ultra-heavy oil submersible pump[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2013, 35(4): 103–105.
- [12] 杨亚东, 杨兆中, 甘振维, 等. 掺稀采油在塔河油田的应用研究[J]. 西南石油学院学报, 2006, 28(6): 53–55, 66.
- YANG Yadong, YANG Zhaozhong, GAN Zhenwei, et al. Study and application of blending light oil recovery technique in Tahe Oil-Field[J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 2006, 28(6): 53–55, 66.
- [13] 明亮, 敬加强, 代科敏, 等. 塔河稠油掺稀粘度预测模型[J]. 油气储运, 2013, 32(3): 263–266, 269.
- MING Liang, JING Jiaqiang, DAI Kemin, et al. Prediction model for viscosity of Tahe Heavy Oil mixed with light oil [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2013, 32(3): 263–266, 269.
- [14] 李京瑞, 颜廷俊, 张白茹. 叶轮开孔对高效气液混合器性能的影响[J]. 石油机械, 2017, 45(8): 76–81.
- LI Jingrui, YAN Tingjun, ZHANG Bairu. Effect of impeller opening on the performance of high efficiency gas-liquid mixer [J]. China Petroleum Machinery, 2017, 45(8): 76–81.
- [15] 刘延鑫, 王旱祥, 汪润涛, 等. 电动潜油离心泵叶轮冲蚀磨损研究[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2017, 41(4): 155–159.
- LIU Yanxin, WANG Hanxiang, WANG Runtao, et al. Study on erosive wear of electric submersible pump's impeller[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2017, 41(4): 155–159.
- [16] 林日亿, 李兆敏, 王景瑞, 等. 塔河油田超深井井筒掺稀降粘技术研究[J]. 石油学报, 2006, 27(3): 115–119.
- LIN Riyi, LI Zhaomin, WANG Jingrui, et al. Technology of blending diluting oil in ultra-deep wellbore of Tahe Oilfield [J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(3): 115–119.
- [17] 赵海洋, 王世杰, 李柏林. 塔河油田井筒降粘技术分析与评价[J]. 石油钻探技术, 2007, 35(3): 82–84.
- ZHAO Haiyang, WANG Shijie, LI Bolin. Analysis and evaluation of viscosity reducing techniques for wellbore in Tahe Oilfield[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2007, 35(3): 82–84.
- [18] 陈德春, 李昂, 高莉, 等. 潜油电泵井油套环空泵上掺稀油井筒流体温度模型[J]. 新疆石油地质, 2013, 34(5): 591–594.
- CHEN Dechun, LI Ang, GAO Li, et al. Wellbore fluid temperature model for blending light hydrocarbon above pump in tubing-casing annular space in ESP wells[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2013, 34(5): 591–594.
- [19] 魏秦文, 张茂, 郭咏梅. 潜油电机驱动采油技术的发展[J]. 石油矿场机械, 2007, 36(7): 1–7.
- WEI Qinwen, ZHANG Mao, GUO Yongmei. The development of electric submersible motor actuation oil recovery technology[J]. Oil Field Equipment, 2007, 36(7): 1–7.
- [20] 张文生, 郑晓志, 杨顺辉. 塔河油田 6 区特稠油举升方式适应性分析及配套工艺[J]. 石油钻探技术, 2003, 31(4): 62–63.
- ZHANG Wensheng, ZHENG Xiaozhi, YANG Shunhui. The analysis of adaptability and supporting techniques of artificial lift for thickened oil of No. 6 Block in Tahe Oilfield[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2003, 31(4): 62–63.
- [21] 邹国君. 塔河油田超深超稠油藏采油新技术研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2008, 30(4): 130–134.
- ZOU Guojun. New recovery technology of super-deep and super-heavy oil reservoir development of Tahe Oilfield[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2008, 30(4): 130–134.
- [22] 陈艳玲, 王元庆, 逯江毅. 稠油水热裂解催化降黏研究的进展[J]. 地质科技情报, 2008, 27(6): 53–57.
- CHEN Yanling, WANG Yuanqing, LU Jiangyi. Advance on the catalytic aquathermolysis of heavy oil[J]. Geological Science and Technology Information, 2008, 27(6): 53–57.
- [23] 范洪富, 刘永建, 赵晓非, 等. 金属盐对辽河超稠油水热裂解反应影响研究[J]. 燃料化学学报, 2001, 29(5): 430–433.
- FAN Hongfu, LIU Yongjian, ZHAO Xiaofei, et al. Studies on effect of metal ions on aquathermolysis reaction of Liaohe heavy oils under steam treatment[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2001, 29(5): 430–433.