

引用格式:张进,田洪波,胡宇新. 深层油藏大斜度井深抽技术对策[J]. 油气藏评价与开发, 2023, 13(2): 247-253.

ZHANG Jin, TIAN Hongbo, HU Yuxin. Technical countermeasures for deep pumping of highly deviated wells in deep reservoir[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2023, 13(2): 247-253.

DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2023.02.014

深层油藏大斜度井深抽技术对策

张进,田洪波,胡宇新

(中国石油冀东油田公司南堡油田作业区,河北唐山 063200)

摘要:南堡油田地处滩海,油井位置局限,整体开发以大斜度定向井为主,受油藏形成特性影响,断块发育破碎,横向面积小,纵向含油层系多,低能量区存在大量供液不足的油井,泵的常规下入深度难以满足连续生产的供排需求,导致单井效益过低,同时泵筒充不满加剧了井下杆柱应力的复杂性和偏磨程度。在对抽油机井杆管泵进行综合分析的基础上,提出了深抽工艺的技术对策,并由油藏压力和生产参数预测了深抽放大压差的增产潜力,从多级杆柱加深后应力计算及延长生产周期等配套工艺技术研究入手,通过软件模拟深抽后杆柱应力变化,对深抽后不同深度杆柱进行应力测试与理论计算对比,并对相关配套工艺进行优化设计,确保深抽后杆柱应力的安全性。实现了深抽后油井动液面下降,产能增加,沉没度的增加,并提高了泵筒充满系数,泵挂深度平均加深 800 m、最大泵挂深度达到 3 300 m,生产压差平均放大 6 MPa,泵效平均提高 10 个百分点,单井增油平均提高 300 t,同时针对不同油层物性、不同供液能力的油井进行效果分析和经验总结,形成了不同油井深抽的可行性评价方法。

关键词:深层油藏;大斜度井;杆柱应力;产能预测;深抽技术;防偏磨工艺

中图分类号:TE143

文献标识码:A

Technical countermeasures for deep pumping of highly deviated wells in deep reservoir

ZHANG Jin, TIAN Hongbo, HU Yuxin

(Nanpu Oilfield Operating Area of PetroChina Jidong Oilfield Company, Tangshan, Hebei 063200, China)

Abstract: Nanpu Oilfield is located in the tidal sea with limited oil well spacing, and the overall development is dominated by highly oblique directional wells. Due to the characteristics of reservoir formation, the fault blocks are developed and broken, and the transverse area is small, the longitudinal layer distribution is large, and there are many oil wells with insufficient liquid supply in the low energy area. The conventional pump running depth is difficult to meet the supply and drainage requirements of continuous production, resulting in low efficiency of a single well. At the same time, the dissatisfaction of the pump barrel aggravates the complexity and eccentric wear degree of the down-hole rod stress. Based on the comprehensive evaluation of the rod, pipe and pump of the pumping unit system, the technical countermeasures of deep pumping are put forward. And the stimulation potential of deep pumping amplified pressure difference is predicted by the reservoir pressure and production parameters. The stress calculation after multi-stage rod deepening and the extension of production cycle are studied. After the simulation of the stress change of the rod column after deep pumping by the software, the stress test and theoretical calculation of the rod column at different depths after deep pumping are compared, and the related supporting technology is optimized to ensure the stress safety of the rod column after deep pumping. After deep pumping, the oil well dynamic fluid level decreased and the productivity increased. The increase of subduction reduced the filling dissatisfaction of the pump barrel. The setting depth of the pump is deepened averagely by 800 meters and can reach a depth of 3 300 meters. The production pressure difference, the pump efficiency, and the single well oil increment increase by 6 MPa, ten percentage points and 300 tons respectively on average. At the same time, the effect analysis and experience summary are carried out for oil wells with different reservoir properties and different liquid supply capacity, and the feasibility evaluation method of deep pumping in different oil wells is formed.

Keywords: deep reservoir; highly deviated well; pole stress; capacity prediction; deep pumping technology; anti-biasing process

收稿日期:2022-11-01。

第一作者简介:张进(1986—),男,本科,工程师,主要从事油气田开发采油工程和井下作业。地址:河北省唐山市曹妃甸区汇丰路47号南堡油田作业区,邮政编码:063200。E-mail:npqzhangjin@petrochina.com.cn

油井深抽工艺在国内大多数油田已开展多年^[1-2],调研国内各大油田的常规举升工艺,油层垂深平均为2 000 m,以直井和小井斜油井为主,泵挂深度平均约为1 000 m,通过加深泵挂放大生产压差,使油井增产效果更佳,深抽是挖掘低产低效、供液不足井潜力的一项有效技术手段^[3-5]。南堡油田地处滩海,地理位置局限,油井地面分布密集,主要以大斜度定向井为主,造斜段平均在500~1 100 m,井斜超过40°油井占比达60%,井身全角变化率在5°/25 m以上。油藏平均埋层垂深3 500 m,泵挂平均深度在2 000 m,井斜达到41°,储层发育破碎,横向面积小,纵向发育层系多,造成注水开发难度大,后期供液不足的井数占开采井总数的40%,泵筒充不满、液击现象明显,造成油井产能低、效益低,井下杆管的偏磨程度加剧。南堡油田采用的长冲程智能抽油机和特种抽油泵,具有长冲程慢、冲次减缓偏磨和强启闭球座适应大井斜的优势^[6],但实施深抽工艺后,存在杆管偏磨严重、泵效低、卡泵等问题。分析原因,从深抽井的产能预测现场方法、组合式内衬油管防偏磨设计、深抽井侧向力现场测试试验、提高泵效、防卡等方面,制定相应的深抽配套工艺对策以延长深抽井生产周期,提高泵效。

1 深抽工艺技术研究

1.1 深抽原理

深抽工艺的基本原理是通过加深泵挂来放大生产压差,便于井液流入井筒,依据油井状况和设备能力,选择最佳泵挂深度和抽吸系数,使泵的充满系数尽可能接近1,以获得更高的排液量^[7]。深抽油井由于泵挂较深,载荷增大,因此,采用H级或EH级超高强度抽油杆的多级杆柱组合应力分析至关重要,充分利用杆柱载荷和抽油机扭矩,同时设计管柱锚定来提高系统效率。

1.2 产能预测

针对小泵深抽油井产能预测,主要采取了2种方法:①择机做好地层实测压力的测定,再根据动液面深度、井口套压、井筒液折算密度计算井底流压,在地质液量的需求条件下,计算单井采液指数,得出需要放大的生产压差,南堡的合理沉没度在200 m左右,并根据井斜大小选择泵挂深度;②若地层压力无

法实时测定时,可进行调参计算出前后实测示功图下的动液面值,并根据不同液面下的产量变化来计算单井采液指数,得出需放大压差值,最终计算出满足生产需求的泵挂深度^[8]。

受南堡油田破碎砂体油藏影响,油藏压力下降较快,多层系合采层间矛盾突出,利用实测地层压力进行单井计算,由于产能基础数据较少或不准确,所以这类油井通常不采取第1种方法进行计算。深抽油井在编制方案前,根据据实测示功图的变化情况,通过调小参数得到调参前后的动液面和对应的液量变化情况,可以算出液面每升高一百米的液量减少量,然后结合当前泵挂深度与油层间距离求得可增加的泵挂深度,计算出单井深抽后的产能,做好深抽经济效益可行性评价。

1.3 选井原则

结合南堡油田油井特点,深抽井主要是针对能量差、物性差造成的低产、低效井挖掘潜力的工艺手段,具体原则:①地层压力低,油井供液不足井,动液面平均低于1 800 m,泵效平均在20%左右,实测示功图明显呈现供液不足形态;②油藏埋层相对较深的井,平均泵挂深度与油层顶界垂直距离需超过500 m,有加深泵挂余地,才能放大生产压差;③低渗油藏平均渗透率不到 $10^{-3} \mu\text{m}^2$,启动压力高,采液指数低,深抽后在近井地带受效,但压力向油藏边界扩散速度缓慢,波及面积小,需根据注水受效情况分析深抽潜力再选择合适的井深抽;④低含水率井,可实现增油效果明显,主要是含水率低于60%的井,若含水率较高,深抽后的增液量不足以实现增油效益平衡投入成本,故需提前做好经济效益评价;⑤南堡油田油藏性质特殊,需选用14-18型的抽油机才能确保承载井下杆柱,并使用高强度或超高强度的H级、EH级杆柱可提高安全系数,抽油泵需采用适应南堡油田大斜度井的强启闭球座和提高泵效的多级柱塞结构。

1.4 杆管组合设计

1.4.1 杆管偏磨位置分析

南堡油田受特殊的地理环境影响,以大斜度定向井、水平井居多,造斜段平均为500~1 100 m,抽油机在上下往复运动时,杆管的接触偏磨是同时进行的,尤其在下冲程时更严重。

受南堡油田大井斜、深泵挂的影响,下行过程中的杆管偏磨较为严重:①对于造斜段而言,南堡油田造斜点平均为500 m,造斜段杆柱应受约1 000 m的杆柱拉力,使其居中,但受大井斜的影响有近1 500 m的杆柱与油管接触时发生摩擦现象,尤其是造斜段末端处于该段井斜最大点,摩擦更为严重;②对于稳斜段而言,因井斜相对平稳,全角变化率不大,杆柱的轴向分力和侧向分力同比造斜段属于同向叠加,而不是时刻变化,故杆柱的弯曲程度不大,弯曲形态减缓;③中性点至泵口井段,杆柱因受力出现反向造成下行遇阻,出现螺旋弯曲状态,弯曲是为了进行应力分消,避免杆柱进一步弯曲增加与油管内壁的正向压力,但在有限的油管空间内,应力分消不足以避免杆管接触,故该井段杆管的磨损相对严重,在加重杆过轻或泵径过大时,则进一步加剧偏磨。抽油机上行过程中,受浅造斜大井斜的影响,造斜段处的杆柱仍处于复杂的弯曲状态,杆管接触摩擦明显,井斜越大,该处的摩擦越严重。由分析表明:造斜段的偏磨是发生在上下行阶段,稳斜段的偏磨很轻微,中性点及下部井段的杆柱偏磨主要是发生在下行过程^[9-10]。

1.4.2 偏磨规律研究

对南堡油田五年来因偏磨造成躺井检泵井90余口进行统计,分析得出:杆管偏磨严重的井段也主要出现在造斜段末端井斜较大的井段和中性点及下部井段(图1)。

进一步分析此类井可知,900 m以上井段因井斜相对较小,杆柱受到向下的拉伸应力较大,采用带扶正块的斜井杆减小杆管的接触面积,对抽油杆接箍及本体起到扶正作用后,杆管的偏磨程度不太严重,杆管作业磨损周期较长,不是造成杆管偏磨断脱管

漏的主要井段。在此基础上,为了进一步验证斜井杆扶正器防偏磨作用的贡献程度,开展了全井段设计带有扶正块的斜井杆,从理论上可有效地避免杆管的接触面积,通过评价5口井应用情况后发现,平均检泵周期在400 d左右并未延长,部分井甚至缩短了,分析其原因主要在于全井段采用斜井杆时虽避免杆柱发生螺旋弯曲,但是强制杆柱弯曲带来的应力分消使杆柱上有若干应力集中点,在整体杆柱的应力集中后增加了杆管正向压力,由此增大摩擦力和加重偏磨,偏磨的位置因液面、泵挂而存在不确定性。

1.4.3 深抽井侧向应力增幅分析

受大斜度井身结构影响,杆柱在多种复杂受力情况下产生交变载荷,发生不同程度的弯曲,而发生偏磨^[11],随泵挂深度的加深,井斜越大,杆柱侧向力增加就越大,通过软件模拟计算发现泵挂深度每加深500 m,侧向力平均增加50%,杆管接触摩擦力的增加,进一步加剧了杆管偏磨,从软件计算结果得出南堡X1井从深抽前到深抽后,泵挂加深了550 m,侧向力平均增幅为47.1%(图2)。

1.4.4 现场杆柱应力测试

为了进一步验证杆柱应力是否满足生产需求,在X2井中杆柱不同深度增加了轴向应力测试仪,该井的泵挂深度由2 200 m加深至3 000 m,泵挂上下平均井斜41°,在造斜段、中部井段和泵上井段安装了轴向载荷测试仪,通过现场测试不同深度的轴向应力判断杆柱的安全性,从实测数据可知,杆柱自上而下3个井段轴向力分别是100.8,68.1,41.1 kN,方案设计时理论计算值为113,78,54 kN,现场实际生产过程中的杆柱应力均在理论设计范围内,杆柱受力安全可行(图3、图4)。

1.4.5 组合式内衬管柱设计

针对深抽井严重的杆管偏磨情况,全井使用 $\phi 73$ mm耐磨内衬管,杆管的摩擦系数可减小80%,但存在单井深抽费用高的问题,单井内衬油管使用平均长2 200 m,仅内衬油管成本投入就高达25万元。经过多年的现场分析、经验总结和技术攻关,在普通油管和 $\phi 73$ mm内衬管连接过渡处采用小直径防磨接箍扶正,内衬油管从中性点起用,平均可节约内衬管1 200 m,但应用中存在造斜段和小直径接箍处

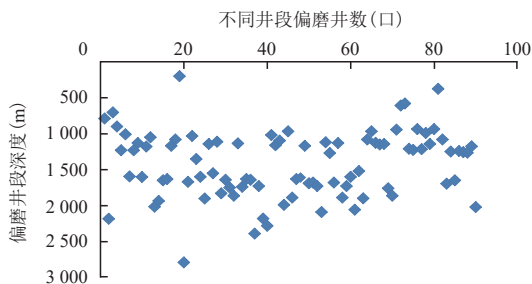


图1 偏磨井段散点分布
Fig. 1 Scattered point distribution of eccentric wear well section

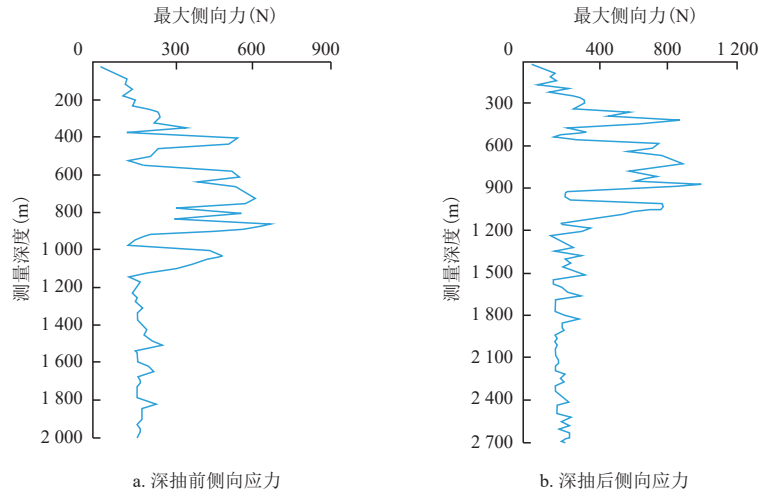


图2 南堡X1井深抽前后侧向应力对比

Fig. 2 Comparison of lateral stress before and after deep pumping of Well-Nanpu-X1

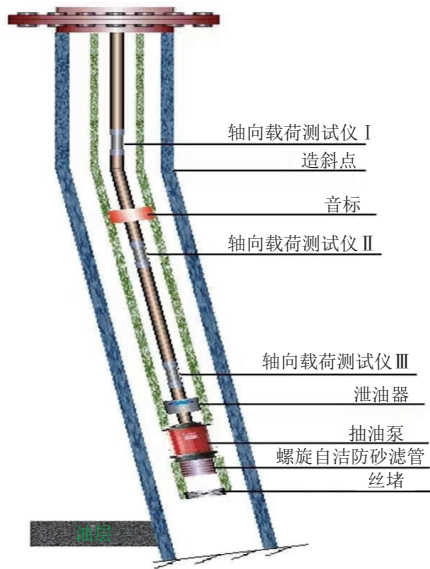


图3 南堡X2井轴向载荷测试仪分布

Fig. 3 Distribution of axial load tester for Well-Nanpu-X2

磨损严重的问题,技术人员为此做了进一步的优化,创新性地设计出组合式内衬油管的防偏磨方法,采用自上而下 $\phi 73$ mm普通油管+ $\phi 89$ mm耐磨内衬油管(100 m)+ $\phi 73$ mm耐磨内衬油管的组合方法,从造斜点末端100 m处开始使用 $\phi 89$ mm内衬油管,可以有效解决 $\phi 25$ mm杆接箍或斜井杆扶正块与 $\phi 73$ mm内衬油管尺寸不匹配卡杆的问题,节约了成本,同时延长了杆管偏磨周期。造斜段末端以上至井口井段,虽处于造斜井段全角变化率较大,但位置靠上承受下部杆柱的拉力而处于拉伸装置,采用斜井式抽油杆扶正器间距在2.4 m,可有效减缓该井段的偏磨程度^[12]。

1.5 提高泵效设计

南堡油田虽采用强启闭特种抽油泵和配套防气砂分离器来提高泵效^[13-14],但随着泵挂深度的加深,冲程损失增大,泵效仍会降低,针对深抽井提高泵效

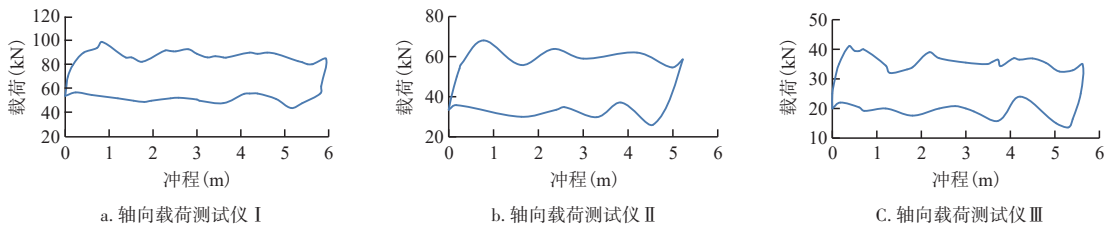


图4 南堡X2井轴向载荷测试曲线

Fig. 4 Axial load test curves of Well-Nanpu-X2

的方法主要有3种:①使用长冲程智能抽油机,可实现长冲程生产,增加柱塞的有效行程,提高柱塞排量;②使用油管锚定工具,可有效地阻止油管蠕动,降低因油管变形造成的冲程损失影响,提高泵效^[15];③使用液力反馈泵,其特殊柱塞结构增加了液力反馈力,使生产过程中上下冲程杆柱始终处于拉伸状态,大幅度降低了抽油杆反复变形造成的冲程损失,实现了光杆和柱塞基本同步运行,是深抽井提高效率的一项重要技术手段。

1.6 防卡工艺设计

深抽井由于泵挂深,细粉砂携带行程高,在停井或生产中容易出现出砂卡泵现象,防砂卡工艺技术主要有2种:①防止泵下地层砂进入泵筒造成卡泵;②防止井筒的回落物进入泵筒造成卡泵。

在生产压差的放大过程中,部分易出砂油层受压差影响出砂量大,造成卡泵,另深抽油井的泵挂较深,产液量低,停机或间开生产时,井筒内细粉砂等异物回落后易造成卡泵。现有的泵下防,泵上护主要采用不锈钢精密滤砂管挂滤防砂和泵上保护装置防回落物。不锈钢精密滤砂管可以防止0.12 mm以上粒径的地层砂进入管柱内^[16-17],泵上保护装置可沉

积管柱未携带出井口的细粉砂等小直径砂体,以免流入泵筒中^[18],采用上下防护的工艺设计方案从而避免了卡泵。

2 应用情况

2.1 现场实施

南堡油田近五年来实施深抽油井76口,泵挂平均加深754.2 m,动液面平均下降640.5 m,单井累计增油297.3 t,总累计增油约 1.3×10^4 t,取得了较好的开发效果(表1)。

2.2 效果分析

针对南堡各区块深抽井进行参数对比和效果分析后(表2),总结出以下经验。

1) 中孔、中渗透油藏深抽后主要存在3种情况

分别为:①注水开发受效油井,南堡油田的油水井井网分布主要以五点法或反五点法为主,井网完善的区块油井受效明显,地层压力维持较稳,深抽后放大压差增油效果明显且持续。南堡B区块和南堡D区块平均渗透率约为 $180 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,油层平均厚度为35 m,横向面积相对较大,层间连通性好,注水受

表1 各区块深抽油井效果统计

Table 1 Statistics of the effect of deep pumping wells in each block

实施区块	实施井数 (口)	深抽前				深抽后				单井累计 增油(t)	总累计 增油(t)
		平均泵深 (m)	平均动液面 (m)	日产液 (t)	日产油 (t)	平均 泵深(m)	平均动液面 (m)	日产液 (t)	日产油 (t)		
NPA区	17	2 043.0	1 952	51.0	27.5	2 750	2 631.4	108.8	55.9	262.50	4 562
NPB区	9	2 114.0	1 997	37.8	14.8	2 764	2 541.9	81.9	32.8	442.30	3 991
NPC区	26	1 975.0	1 883	108.0	45.9	2 780	2 501.9	194.0	75.3	304.30	5 885
NPD区	5	2 050.0	2 002	36.5	25.0	2 850	2 541.0	63.5	40.5	431.60	2 408
NPE区	19	2 102.0	1 980	67.1	44.0	2 911	2 802.0	134.5	65.7	47.50	1 039

表2 深抽区块油藏特点对比

Table 2 Comparison of reservoir characteristics in deep pumping block

区块	平均渗透率($10^{-3} \mu\text{m}^2$)	平均气液比(m^3/m^3)	平均合采层数(个)	饱和压力(MPa)	采液指数 $[\text{t}/(\text{d} \cdot \text{MPa})]$
NPA区	130	100	5	15	1.25
NPB区	202	30	2	10	2.04
NPC区	85	50	12	13	1.15
NPD区	165	100	3	12	1.43
NPE区	8	200	6	20	0.48

效明显,通过放大压差后增产效果好,平均单井增油量在400 t以上;②注水未受效或受效差的中高渗区块油井,该区块油藏受良好物性的影响采液指数相对较高,深抽效果明显,但因物性好、油藏面积小,深抽后地层压力快速波及油藏边界,造成地层压力进一步降低后,地层流体脱气现象比较严重,孔道中气相饱和度进一步增大,气体渗透率增大,导致气液比明显上升,随着脱气现象加剧,油相渗透率降低,增油效果逐渐下降。南堡A区块平均渗透率为 $130 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,该区块零星油藏分布较多,油藏压力下降较快,部分井深抽初期气液比为 $50 \text{ m}^3/\text{m}^3$,随压力的下降气液比上升至 $300 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 以上,产量逐渐下降;③针对多层合采油井,受南堡油田纵向层系发育较多的影响,层间矛盾较为突出,需明确各单层地质状况以确保深抽后增油量上升,避免低压水层造成深抽后含水升高导致深抽无效。南堡C区块渗透率平均为 $85 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,纵向层系分布多,可同时合采12个层,层间压力分布不均,矛盾突出,注水难度大,受效不均匀,深抽后单井平均累计增油量约为300 t,实施26口井中,含水变化不统一,主要还受层间矛盾的制约。

2) 低渗透油藏深抽分析

南堡油田低渗油藏主要表现为油藏物性差,平均渗透率不到 $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,区块采液指数低,深抽增液量低,效果差等特点。低渗油藏原油与岩石之间产生吸附作用或在黏土矿物表面形成水化膜,渗流存在启动压力,流量与压差的直线关系被打破,放大压差后低渗油藏压力波及面积小,深抽效果持续时间短^[19-20]。南堡NPE区属于高压、低渗油藏,平均渗透率 $8 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,部分油层渗透率仅 $0.8 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,该区块实施深抽19口井,平均单井累计增油47.5 t,深抽效果较差。

3 结论

1) 南堡油田多层系合采油井较多、层间矛盾突出,目前地层压力准确性较差,通过调参验证不同动液面下的单井产能差异,可引导深抽将压差放大后单井的增产潜力发挥出来,从而保证经济效益。

2) 通过软件模拟和现场应力测试可知,深抽后杆管侧向力增加虽加剧杆管偏磨程度,但在理论设计安全范围内,使用组合式内衬油管可大幅度降低

杆管摩擦系数,延缓偏磨程度,同时控制深抽成本。

3) 使用强启闭抽油泵配合管柱锚定可提高泵效,液力反馈泵的应用大幅度降低杆柱变形造成的冲程损失且泵效更高;抽油泵上保护装置可有效防止细粉砂回落造成的卡泵。

4) 中高渗透油藏采液指数大,多层低压合采井,合理放大生产压差深抽效果较好,但地层压力若无补充,当地层压力逐步下降更低水平后,油层脱气严重加剧,气液比上升,深抽效果减弱。

5) 低渗透油藏,由于物性差、采液指数低、注水受效差,渗流存在启动压力,放大压差后增油效果相对较差,需针对注水受效显著的油井进行深抽,放大压差引效,才能取得良好的增产效果。

参考文献

- [1] 杜坤,王鹏,李杨,等.塔河油田典型深抽工艺研究[J]. 辽宁石油化工大学学报, 2019, 39(5): 45-52.
DU Kun, WANG Peng, LI Yang, et al. Study on typical deep pumping Processes in Tahe Oilfield[J]. Journal of Liaoning Shihua University, 2019, 39(5): 45-52.
- [2] 尉亚民,张立会,张启汉,等.青海油田低渗透油藏深层举升工艺技术研究与应[J]. 钻采工艺, 2011, 34(2): 29-32.
WEI Yamin, ZHANG Lihui, ZHANG Qihan, et al. Research and application of artificial-life technology for deep tight reservoir in Qinghai Oilfield [J]. Drilling & Production Technology, 2011, 34(2): 29-32.
- [3] 郑小雄. 小泵深抽技术在高气液比低产液井上的研究与应用[J]. 石化技术, 2016, 23(7): 164.
ZHENG Xiaoxiong. Applied study of depth-pumping with small diameter pump in high gas fluid ratio and low production wells [J]. Petrochemical Industry Technology, 2016, 23(7): 164.
- [4] 杨小辉. 深抽杆式泵的研制与应用[J]. 石油机械, 2016, 44(12): 93-95.
YANG Xiaohui. Development and application of rod pump for deep well pumping[J]. China Petroleum Machinery, 2016, 44(12): 93-95.
- [5] 董泽昌,陈军,李海涛,等.鄯善油田液力反馈泵深抽设计与应用[J]. 钻采工艺, 2019, 42(3): 76-79.
DONG Zechang, CHEN Jun, LI Haitao, et al. Deep pumping design of hydraulic feedback pump for Shanshan oilfield and application[J]. Drilling & Production Technology, 2019, 42(3): 76-79.
- [6] 曹刚,吴晓东,朱秀峰,等.水平井有杆泵深抽工艺的设计与评价[J]. 石油钻采工艺, 2006, 34(5): 52-54.
CAO Gang, WU Xiaodong, ZHU Xiufeng, et al. Design and appraisal of horizontal wells deep well lifting technology[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2006, 34(5): 52-54.
- [7] 唐庆,马翠岩,韩启清,等.优化深抽配套技术在大港油田的应用[J]. 石油钻采工艺, 2022, 24(S1): 60-63.
TANG Qing, MA Cuiyan, HAN Qiqing, et al. Optimal application of matched deep pumping technology[J]. Oil

- Drilling & Production Technology, 2022, 24(S1): 60-63.
- [8] 何更生. 油层物理[M]. 北京:石油工业出版社, 2006.
HE Gengsheng. Petrophysics[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2006.
- [9] 罗英俊, 万仁溥. 采油技术手册[M]. 北京:石油工业出版社, 2005.
LUO Yingjun, WAN Renpu. Handbook of oil production technology[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2005.
- [10] 李颖川. 采油工程[M]. 北京:石油工业出版社, 2011.
LI Yingchuan. Oil production engineering[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2011.
- [11] 姜民政, 李葳, 徐书凡, 等. 抽油机井杆柱系统防偏磨装置设计与优化[J]. 石油机械, 2019, 47(8): 112-118.
JIANG Minzheng, LI Wei, XU Shufan, et al. Design and optimization of anti-eccentric device for rod string system in pumping wells[J]. China Petroleum Machinery, 2019, 47(8): 112-118.
- [12] 孔令维. 水平井深抽配套工艺技术[J]. 大庆石油地质与开发, 2011, 30(3): 135-138.
KONG Lingwei. The matching engineering technology of deep pumping for horizontal wells[J]. Daqing Petroleum Geology and Development, 2011, 30(3): 135-138.
- [13] 郑小雄. 小泵深抽技术在高气液比低产液井上的研究与应用[J]. 石化技术, 2016, 23(7): 164.
ZHENG Xiaoxiong. Applied study of depth-pumping with small diameter pump in high gas fluid ratio and low production wells [J]. Petrochemical Industry Technology, 2016, 23(7): 164.
- [14] 余铁静, 侯双亮, 李鹏, 等. 稠油强启闭抽油泵的研制与应用[J]. 石油机械, 2014, 42(7): 89-91.
YU Tiejing, HOU Shuangliang, LI Peng, et al. Development and application of forced-open/close pump for heavy oil[J]. China Petroleum Machinery, 2014, 42(7): 89-91.
- [15] 李枝梅. 低渗油藏有杆泵深抽采油配套技术[J]. 特种油气藏, 2005, 12(4): 76-78.
LI Zhimei. Deep pumping by sucker of rod in low permeability reservoir[J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2005, 12(4): 76-78.
- [16] 方达科, 董长银, 黄亮, 等. 多层滤网机械防砂完井筛管动态腐蚀试验研究[J]. 石油机械, 2020, 48(1): 12-19.
FANG Dake, DONG Changyin, HUANG Liang, et al. Dynamic corrosion experiment of multi-layer metal mesh screen for sand control completion[J]. China Petroleum Machinery, 2020, 48(1): 12-19.
- [17] 李学良. 化学防砂和机械防砂综合应用[J]. 石化技术, 2015, 22(8): 143.
LI Xueliang. Integration of chemical and mechanical sand control[J]. Petrochemical Technology, 2015, 22(8): 143.
- [18] 张正禄, 刘运荣, 李红, 等. 金属隔膜防砂抽油泵的研制与应用[J]. 石油机械, 2013, 41(12): 121-123.
ZHANG Zhenglu, LIU Yunrong, LI Hong, et al. Development and application of metal diaphragm sand control subsurface pump[J]. China Petroleum Machinery, 2013, 41(12): 121-123.
- [19] 李书应, 顾文忠. 小泵深抽技术在低渗油藏中的应用研究[J]. 特种油气藏, 2006, 13(6): 70-73.
LI Shuying, GU Wenzhong. Applied study of depth-pumping with small diameter pump in low-permeability reservoir[J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2006, 13(6): 70-73.
- [20] 吴克柳, 李相方, 樊兆琪, 等. 低渗特低渗油藏非稳态油水相对渗透率计算模型[J]. 中国石油大学学报, 2013, 37(6): 76-81.
WU Keliu, LI Xiangfang, FAN Zhaoqi, et al. Unsteady-state model for calculating oil-water relative permeability for reservoirs with low and ultra-low permeability[J]. Journal of China University of Petroleum, 2013, 37(6): 76-81.

(编辑 郭群)

(上接第172页)

- CHEN Yanhu, CHEN Jia. The application of seismic meme inversion to thin sand distribution prediction under coal shield [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2019, 43(6): 1254-1261.
- [19] 高君, 毕建军, 赵海山, 等. 地震波形指示反演薄储层预测技术及其应用[J]. 地球物理学进展, 2017, 32(1): 142-145.
GAO Jun, BI Jianjun, ZHAO Haishan, et al. Seismic waveform inversion technology and application of Thinner reservoir prediction[J]. Progress in Geophysics, 2017, 32(1): 142-145.
- [20] 孟美辰. 漆潼凹陷西斜坡构造-岩性圈闭识别技术及应用效果[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2021, 48(1): 46-52.
MENG Meichen. Identification technology of structural-lithologic traps and its application effect in the western slope of Qintong Sag, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2021, 48(1): 46-52.
- [21] 付蕾, 张本健, 曹正林, 等. 四川盆地川中地区侏罗系沙溪庙组不同类型砂体地质特征及地震精细雕刻[J]. 石油实验地质, 2022, 44(1): 85-93.
FU Lei, ZHANG Benjian, CAO Zhenglin, et al. Geological characteristics and seismic fine description of different types of sand bodies in Jurassic Shaximiao Formation in central Sichuan Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2022, 44(1): 85-93.
- [22] 常少英, 刘玲利, 崔钰瑶, 等. 浅水三角洲薄砂层地震沉积表征技术: 以准噶尔盆地芳草湖地区清水河组为例[J]. 岩性油气藏, 2022, 34(1): 139-147.
CHANG Shaoying, LIU Lingli, CUI Yuyao, et al. Seismic sedimentary characterization of thin sand layers of shallow water deltas: A case study of Qingshuihe Formation in Fangcaohu area, Junggar Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2022, 34(1): 139-147.

(编辑 柳超超)