



DOI: 10.11885/j.issn.1674-5086.2024.06.19.02

文章编号: 1674-5086(2024)04-0169-09

中图分类号: TE257

文献标志码: A

关于超深油气井完井工程与油气藏采收率的思考

任今明^{1,2,3,4*}, 潘昭才^{1,2,3}, 黄 锬^{1,2,3}, 冯少波^{1,2,3}, 张 宝^{1,2,3}

1. 中国石油天然气集团有限公司超深层复杂油气藏勘探开发技术研发中心, 新疆 库尔勒 841000;

2. 新疆维吾尔自治区超深层复杂油气藏勘探开发工程研究中心, 新疆 库尔勒 841000; 3. 新疆超深油气重点实验室, 新疆 库尔勒 841000;

4. 中国石油塔里木油田油气工艺研究院, 新疆 库尔勒 841000

摘要: 超深油气藏的不断开发采收率与油气井的完井设计紧密相关。然而, 由于钻井装备的限制、高压盐水层的存在、地层易垮塌和易漏失等开发特性以及经济评价因素的考量, 超深油气井的完井方式多样(如裸眼完井、不超过 $\phi 127$ mm小尺寸油层套管完井等); 生产管柱穿越射孔顶界乃至射孔底界的设计; 多选用永久型封隔器等, 这些都可能增加生产作业的难度、延长作业时间和提高作业成本, 并影响开井率和最终采收率。选取两个已投入开发的超深油气藏区块作为案例, 分析发现砂或泥砂埋积是导致开井率低下的主要原因, 进而对采收率产生不利影响。研究提出超深井完井的研究与设计应预设出砂或泥砂埋积的情景, 旨在延长砂或泥砂埋积的时间, 以便为后续作业创造有利条件, 最终目标是提高采收率。为此, 研究从完井方式、油层套管尺寸、完井管柱配置、封隔器类型选择以及沉砂口袋设计等5个关键方面进行了深入的科学研究与优化设计。在此基础上, 进一步对钻完井投资、钻完井周期及经济评价指标进行了综合测算。若经济评价指标未达预期, 则通过提升单井产量来解决建井质量提升与经济评价之间的潜在矛盾。

关键词: 超深井; 完井; 采收率; 完井管柱; 经济评价

Reflections on Completion Engineering and Recovery of Ultra-deep Oil and Gas Wells

REN Jinming^{1,2,3,4*}, PAN Zhaocai^{1,2,3}, HUANG Kun^{1,2,3}, FENG Shaobo^{1,2,3}, ZHANG Bao^{1,2,3}

1. R & D Center for Ultra-deep Complex Reservoir Exploration and Development, CNPC, Korla, Xinjiang 841000, China; 2. Engineering Research Center for Ultra-deep Complex Reservoir Exploration and Development, Xinjiang Uygur Autonomous Region, Korla, Xinjiang 841000, China;

3. Xinjiang Key Laboratory of Ultra-deep Oil and Gas, Korla, Xinjiang 841000, China; 4. Oil & Gas Technology Research Institute, Tarim Oilfield Company, PetroChina, Korla, Xinjiang 841000, China

Abstract: The continuous development of ultra-deep oil and gas reservoirs is closely related to the completion design of oil and gas wells. However, due to limitations in drilling equipment, the presence of high-pressure saline layers, geological characteristics such as prone-to-collapse and prone-to-leakage formations, as well as economic evaluation considerations, the completion methods for ultra-deep oil and gas wells exhibit significant diversity (open-hole completions, completions using small-sized reservoir casings not exceeding $\phi 127$ mm, and so on). Designs featuring production strings traversing the perforation top boundary and even the perforation bottom boundary are also common, and permanent packers are often preferred. These factors can potentially increase operational difficulties, prolong operation times, elevate costs, and impact well productivity and ultimate recovery rates. By analyzing two already developed ultra-deep oil and gas reservoir blocks as case studies, it was discovered that the accumulation of sand or silt is a crucial factor contributing to low well productivity, subsequently adversely affecting recovery rates. In response, the study proposes that the research and design of ultra-deep well completions should anticipate scenarios of sand or silt accumulation. The objective is to prolong the duration of sand or silt accumulation, thereby creating favorable conditions for subsequent operations and ultimately enhancing recovery rates. To achieve this, the study conducted thorough scientific research and optimization on five key aspects: completion methods, reservoir casing sizes, completion string configurations, packer type selection, and sand pocket designs. Building upon these optimizations, comprehensive calculations were further performed for drilling and completion investments, drilling and completion cycles, and economic evaluation indicators. In cases where economic evaluation indicators fail to meet expectations, increasing single-well production is suggested as a means to resolve potential conflicts between enhancing well construction quality and meeting economic evaluations.

Keywords: ultra-deep wells; completion; recovery rate; completion string; economic evaluation

网络出版地址: <http://link.cnki.net/urlid/51.1718.TE.20240709.1633.006>

任今明, 潘昭才, 黄 锬, 等. 关于超深油气井完井工程与油气藏采收率的思考[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2024, 46(4): 169-177.

REN Jinming, PAN Zhaocai, HUANG Kun, et al. Reflections on Completion Engineering and Recovery of Ultra-deep Oil and Gas Wells[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2024, 46(4): 169-177.

* 收稿日期: 2024-06-19 网络出版时间: 2024-07-13

通信作者: 任今明, E-mail: renjm-tlm@petrochina.com.cn

引言

超深井通常是指完钻井深超过 6 000 m 以上的井,国内外陆续有超深油气藏投入开发,如塔里木盆地的哈拉哈塘、富满、顺北和博孜等油气田,顺北西部地区垂深已达 8 000~8 800 m,四川盆地九龙山区块垂深 6 000~6 800 m、双鱼石区块目的层垂深 7 000~8 000 m。中国陆上深井超深井地质条件复杂,钻井安全风险大、周期长。尤其是塔里木盆地和四川盆地超高温超高压、多压力体系、地层坚硬及可钻性差、富含酸性流体等问题共存,面临一系列世界级深井超深井钻完井技术难题,安全优质高效钻井最具挑战性^[1-3]。塔里木盆地 2023 年钻成井深 9 026 m 的亚洲最深井,目前已基本形成陆上 8 000 m 油气井的钻完井技术体系,万米深井钻完井技术体系也基本构建完成,有力支撑了深层超深层油气勘探开发。

目前,超深井的完井方式主要有裸眼完井^[4]、套管射孔完井,井眼尺寸一般为 101.6、114.3、127.0、139.7 和 177.8 mm^[5-8],超深井由于考虑替重浆、完井工艺有一次完井或二次完井^[9],一次完井是将射孔、改造及完井采用一趟管柱完成的完井工艺,包括丢枪、不丢枪和全通径射孔 3 种工艺。二次完井工艺是先采用钻杆传输射孔,后下入完井、改造一体化的完井工艺,常用的管柱配置有常规完井管柱和分层压裂完井管柱,分层压裂完井管柱在常规完井管柱基础上,增加了分层压裂阀和封隔器。为用清洁完井液替换出原井重泥浆,油管鞋下过射孔顶界或下至射孔中下部,对应射孔段的管柱采用填塞可溶孔塞的筛管^[10-11]。

裸眼完井、小尺寸(不超过 $\phi 127$ mm)油层套管以及生产管柱深入射孔区域等完井相关技术,在实

际应用中可能面临油气井出砂的问题。出砂现象可能导致油气井产量迅速下降,严重时甚至影响正常生产,这一连串的效应最终会对开井率和采收率产生不利影响。因此,在选择和应用这些完井技术时,必须充分考虑到出砂风险,并采取相应的预防措施,以确保油气井的长期稳定生产和高的采收率。

1 超深碳酸盐岩油藏 X 区块影响采收率的完井工程因素剖析

1.1 油藏地质特征

X 区块碳酸盐岩油藏平均埋深 7 239 m,目的层为一间房组,岩性为泥晶、亮晶颗粒灰岩,主要为亮晶生屑藻砂屑灰岩、亮晶藻团块生屑灰岩、亮晶藻砂屑灰岩、亮一泥晶生屑灰岩、泥晶棘屑藻砂屑灰岩和生屑泥晶灰岩。在钻遇储层中,54.17% 为多洞型,27.08% 为单洞型,18.75% 为裂缝-孔洞型。

1.2 完井概况

X 区块投产井 57 口,采用裸眼完井或筛管完井方式,其中,裸眼完井 46 口,占 80.7%,筛管完井 11 口,占 19.3%;小井眼 9 口(裸眼 5 口、筛管 4 口),其中,裸眼完井井眼尺寸 111.1 和 114.3 mm 各 1 口,114.3 mm 筛管 1 口,93.2 mm 油管筛管 3 口。

1.3 开发特征

X 区块的标定采收率 21.08%,在投产第 7 年,自然递减率 27.95%,综合含水 7.08%,地质储量采出程度 12.53%,在含水率不高时,递减率高,产液量下降快,油井表现主要体现在油压下降快、产量下降快特征,如图 1 所示。X 区块投产后,开井率在 60.0% 左右,最近开井率仅为 43.8%,区块综合含水不高,开井率低是影响采收率的一个重要原因。

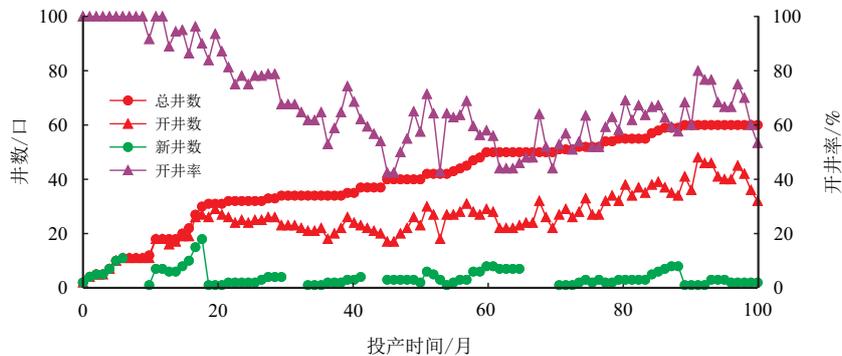


图 1 X 区块开井曲线

Fig. 1 Well opening curve in X Block

1.4 产量递减原因分析

该区块有13口作业井有探泥砂面工序,其中,12口井为裸眼完井,平均裸眼段长78.30 m,一间房组厚度40.40 m,平均泥砂埋63.57 m,最高592.00 m,最低4.95 m,裸眼段平均被埋79.8%,一间房组平均被埋超过90.00%的占66.7%。投产初期最高油压51.0 MPa,最低13.3 MPa,日产油40~152 t,平均自喷期464 d,自喷期累计产油 1.38×10^4 t,最高自喷期累计产油 5.47×10^4 t,最低923 t,自喷期累计产量低。

对油气井实施的作业主要是转机采或储层改造,在作业过程中部分井有以下特点:1)作业前放压时间长。在两口井转抽作业中,一口井节流放油压(只放油压)9 d,累计放油814.2 m³,日产量最高123.1 m³,最低74.1 m³;另一口井节流放压,放出原油1563 m³,日产量最高202 m³,由于放压时间长,最后都没有转抽。2)冲捞砂过程中有起压、返油特征。如B1井进行转抽作业,泥砂埋78.2 m,产层全部被埋,正循环冲砂,进尺1.5 m,产层未露出,环空节流控制放压,出口返油15.4 m³,出气口点火焰高2~3 m不熄,压井就漏,不压井就喷,工程上难以继续冲捞砂作业,最后进行侧钻,侧钻后生产情况不理想。B2井进行转抽作业,泥砂埋88.18 m,目的层28 m,捞砂至井底后关井油压升至7.5 MPa,下完抽油泵完井管柱和抽油杆杆柱后关井油压升至18 MPa,当天节流放压,放出原油106.6 m³。

在冲捞砂过程中起压返油不是个例,泥砂埋在井底产生附加压降,导致油压下降快,有探泥砂面工序的作业井,泥砂埋是100%,可以推断停喷没有作业、作业没有探泥砂面工序的井,泥砂埋可能性大,对于小井眼的井(井眼不超过114.3 mm),停喷以后无法作业,最终会处于关井状态,所以,泥砂埋及垮塌是X区块影响油气井产能发挥、产量递减的重要原因。考虑到裸眼井中冲捞砂难度大、风险大,为提高作业成功率和开井率,对X区块采用了5"(1"=2.54 cm)筛管完井代替裸眼完井的完井方案,近3年新井实施比例从0提高到43.3%。

2 Y区块影响采收率的完井工程因素

2.1 气藏地质特征

Y区块目的层白垩系巴什基奇克组第一段储层岩石类型以岩屑长石砂岩为主,石英(包括硅

质岩屑)含量一般为45%~60%,岩屑含量一般为15%~30%,主要为岩浆岩屑。储层填隙物中杂基成分主要为泥质,含量一般为0.5%~15.0%,黏土矿物组合为伊/蒙混层—伊利石—绿泥石组合,其中,以伊/蒙混层、伊利石为主,含少量高岭石和绿泥石。储集空间类型以粒间孔为主,占总量的60%~83%,其次为粒内溶孔和裂缝,占总量的5%~20%。

研究表明,各井段构造裂缝总体相对发育,以半充填高角度缝为主,其次为斜交缝以及网状缝。砂岩基质孔隙度主要分布在2.0%~6.0%,平均为4.2%,基质渗透率主要分布在0.010~0.500 mD,平均0.075 mD,总体属于特低孔、低渗—特低渗储层,气藏类型为异常高压块状底水干气气藏,局部具边水特征。

2.2 完井概况

Y区块投产的27口井,平均完井深度6841 m,水平井1口,直井26口,裸眼完井1口(井眼111.1 mm),套管射孔完井26口,其中,177.8 mm油层套管4口,139.7 mm套管18口,127 mm套管4口。完井管柱在射孔顶界6口,下过射孔底界12口,均采用永久式封隔器,分段改造1口。

2.3 开发特征

1) 产量递减特征

Y区块标定采收率60%,投产11 a后,地质储量采出程度16.24%,可采储量采出程度只有27.06%。根据年产量递减分析,指数递减特征明显(图2),初始递减率27.7%,没有稳产期,产量递减率大。

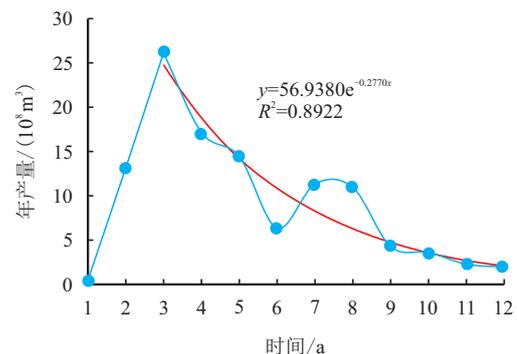


图2 Y区块气藏递减率曲线
Fig. 2 Gas reservoir decline rate in Y Block

2) 不同完井管柱下深生产特征

不同完井管柱下深生产特征出现明显差异,以两种极限下深分析,如图3、图4所示,一种是完井管柱下过射孔底界,另一种是完井管柱下在射孔顶界以上。对比可见,二者生产特征差异非常明显,

完井管柱下过射孔底界的井生产前期油压波动很大,下降明显,而完井管柱下在射孔顶界以上的井,

生产前期油压波动不大,产量呈线性下降,相对平缓得多,后期才出现水淹影响。

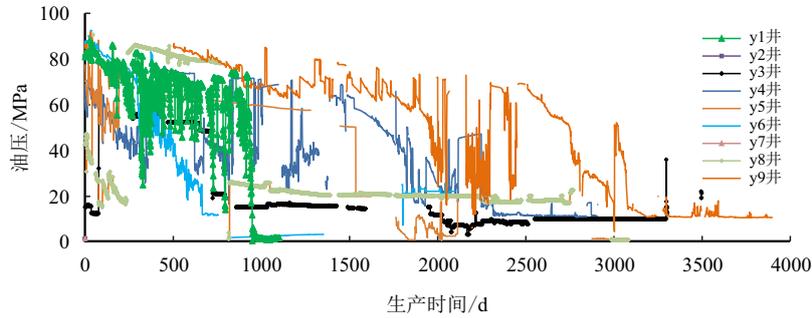


图 3 完井管柱下过射孔底界气井油压

Fig. 3 Oil pressure of gas well change below the perforation bottom boundary of the completion string

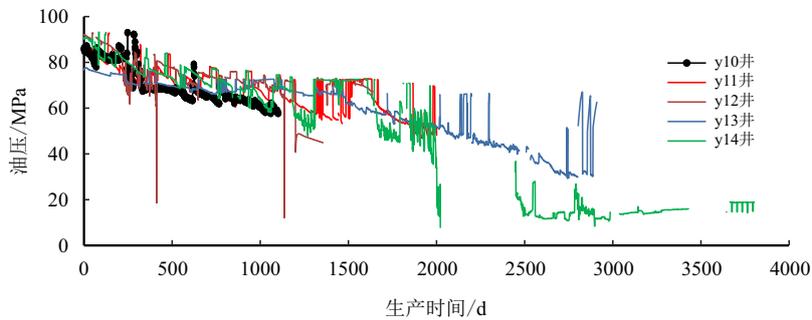


图 4 完井管柱在射孔顶界以上气井油压变化曲线

Fig. 4 Oil pressure of gas well above the perforation top boundary of the completion string

2.4 产量递减原因分析

Y 区块有 5 口井进行过动管柱作业,单井作业费用数千万元,均出现管柱断脱打捞,长度在 566.91~6 416.75 m,除 1 口井生产套管为 177.8 mm 外,其他井生产套管为 139.7 mm。

5 口井中,y3 井作业 69 d 后因剩余 2 180.32 m 管柱无法处理,管柱有泥砂垢堵,弃置封井,其

他 4 口井作业时间 126~286 d,y5 井累计排砂 133.40 kg,y7 井返出地层砂 166.28 kg、返出铁屑及砂 2 346.30 kg;2 口井(y1 井、y15 井)处理管柱后探砂面,分别砂埋 116.3 和 105.16 m,如图 5 所示,这两口井油压、产量波动大,下降快,认为出砂是影响油压波动和快速下降的重要原因,y1 井管柱下过射孔段、y15 井距离射孔底界 5 m。

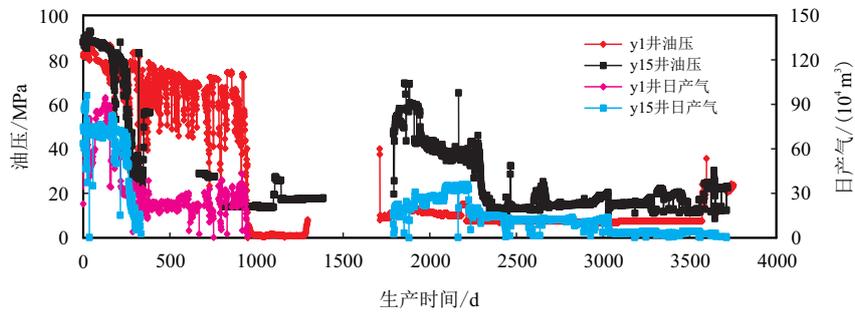


图 5 Y 区块两口出砂井生产曲线

Fig. 5 Production curve of two sand-producing wells in Y Block

出砂是影响油压波动及下降的重要原因,完井管柱下在射孔顶界以上有利于排砂,油压平缓下降是在生产套管内砂或泥砂逐步堆积及地层压力下降的综合反映,油管下过射孔段,特别是下过射孔段

底部,在油管外壁和生产套管之间地层砂易产生堆积或架桥,不易排出,严重影响生产。

目前,对气井产量递减因素的研究主要集中在储层渗透率、气井控制半径、配产、增产措施、工作

制度调整和井底积液等^[12-13],没有提到井筒问题,特别是砂或泥砂在井筒内堆积对产量递减的影响。

Y区块投产12a,年底开井率55.6%,日产气只有 $36.97 \times 10^4 \text{ m}^3$,难以达到预期的采收率目标。

Y区块开井曲线如图6所示,从开井数历史分析,开井率不高,结合作业发现的出砂问题与气井

生产特征、井身结构及管柱图综合分析,出砂或泥砂在油管柱和产层之间被埋是油压、产量下降的重要因素。由于超深井作业难度大、时间长、风险高、费用高,同时,由于作业污染等原因,导致产量恢复效果不理想,所以部分井砂埋了没后续作业,部分井后期才出现水淹特征。

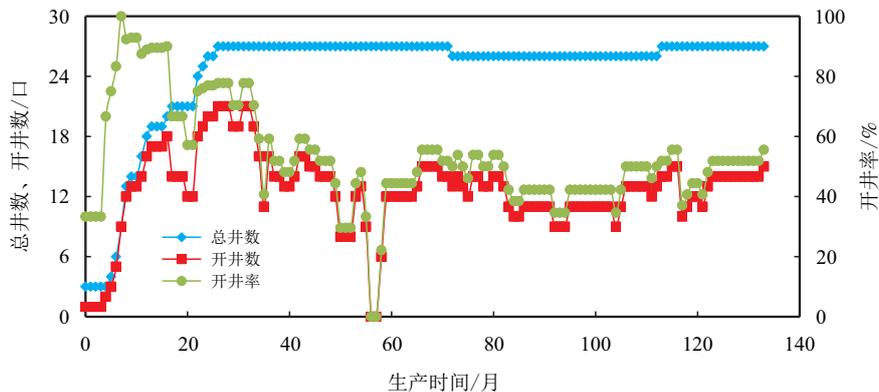


图6 Y区块开井曲线

Fig. 6 Well opening curve of Y Block

3 超深油气井完井设计两个制约因素

3.1 钻完井投资及周期

针对超深井钻完井,由于其地层复杂性、技术难度高以及投资成本大的特点,优化钻完井周期并控制投资成本成为降低成本的关键策略。然而,对于超深井而言,提升建井质量不仅有利于油气井的生产,还能提高油气藏的采收率,但这可能相应地导致钻完井周期的延长和投资成本的增加。反之,在实际操作过程中,由于钻完井投资预算和周期的限制,往往可能忽视完井设计对后期生产以及油气藏采收率的潜在影响。

3.2 经济评价

油气藏开发前通常都会进行经济评价,但针对超深油气藏的开发,存在以下几个核心问题:

1) 经济评价指标的设计未能充分考量超深油气藏钻井难度大、投资成本高的特点。

2) 经济评价中采用的油、气价格普遍低于实际市场价格,因此无法准确反映实际的经济效益。

3) 即便采用了科学的技术方案,测算出的经济指标可能较低,但这种方案可能更有利于稳定产量和提高采收率,这一点在经济指标的测算中并未得到体现。另外,有些技术方案虽然在经济指标上得到了通过,但他们可能给后期带来额外的作业

成本和产量损失,这部分也未能在经济指标中得以体现。

4) 出于对产能完成率、新井成功率、产能到位率等油藏地质方案指标的考量,单井的配产可能低于油气井的实际产能。在这种情况下,为了达到经济评价指标的要求,可能会降低钻完井的投资,这样的决策可能不利于后期的生产,并可能导致最终的采收率较低。

4 对策

根据油气田开发实践表明,出砂或泥砂影响油气井生产重要因素。对浅井或一般的深井,由于作业难度不大、费用不高,所以不会影响开井率和最终采收率。对超深井而言,由于作业难度大、风险大、费用高,油气井被砂或泥砂埋了,可能无法恢复产能,甚至不会作业,开井率就比较低,就会影响上产稳产和最终采收率。泥砂的来源主要有两个: 1) 加砂压裂中的外来砂,这可以通过工艺优化设计避免; 2) 地层砂或泥砂,根据开发实践,无论是碳酸盐岩还是碎屑岩都存在出砂或泥砂问题,对碎屑岩地层生产压差高于临界生产压差,一般会出砂,由于上产等要求,油气井生产压差不会完全控制在临界生产压差以下,对于碳酸盐岩由于裂缝和孔洞充

填的砂或泥砂,会随着流体进入井筒。

此外,超深井一般压力高、产量高,砂或泥砂大部分会随生产流体带出地面,进入地面系统,但还有一部分会沉在井筒下部。

4.1 完井设计原则

超深井由于井筒温度高、压力高,井下管柱屈曲风险高,易造成管柱失效或冲蚀加剧等问题^[14],对超深、高温、高压以及高产等复杂工况的气井可能导致油管柱处于永久性的屈曲状态,需要采取适当降低产量等延长管柱寿命的措施建议^[15],作业过程中管柱的屈曲既影响了管柱本身的受力与变形,又加大了井下作业的难度^[16],结合实际作业的情况,对超深油气井更是如此。对出砂井打捞作业,影响管柱受力的因素很多,包括管柱结构、井眼环境及作业施工方式等,管柱的几何尺寸,以及井眼的尺寸、管柱与井壁的摩擦状态等,对一般的浅井或深井,一次套铣超过 20~30 m 长的落鱼管柱,可以保证井下作业的安全^[17],而对超深井,实际套铣长度远大于这个长度,使作业难度和风险更大。

对超深井完井设计原则应重点考虑两个方面:

1) 有利于排砂或延长砂(泥砂)埋的时间; 2) 有利于后期作业,减少后期作业的难度和风险。

4.2 完井的关键环节

4.2.1 完井方式

超深碳酸盐储层存在当应力超出岩石强度后,诱发井壁围岩破裂产生宏观失稳,产生岩块、岩屑及泥砂,沉积在井筒底部,同时也包括在综合应力作用下,储集层沿裂缝面产生滑移,引起裂缝充填物破碎,形成细砂微粒的微观失稳模式^[18]。碎屑岩由于裸眼作业也会导致岩块脱离,带来复杂作业,虽然裸眼完井初期日产量可能很高,但不一定累计产量高,提高单井累计产量是超深油气藏开发的目标,所以,超深井完井方式不宜采用裸眼完井,可以通过深入研究,明确地层是否出砂或泥砂,以及出砂或泥砂的条件,能否防和如何防。

4.2.2 油层套管尺寸

一般油层套管尺寸设计思路是根据配产选择油管配置,再根据油管跟套管的匹配选择油层套管,对超深井还需要考虑作业,研究思路是根据作业的工况,如循环、钻磨和封隔器解封等作业工况,对不同的井深通过不同套管尺寸的对比优选油层套管尺寸,在这个基础上再进行井身结构图设计,研究的

手段主要有软件模拟、物理模拟和理论研究(管柱力学等)。定性分析,对于超深井,井越深,油层套管尺寸应该越大,一是有利于作业;二是沉砂量大,自喷期累计产量高,如表 1 所示。7" 套管截面积分别比 5 $\frac{1}{2}$ "、5"、4 $\frac{1}{2}$ " 增加 74.3%、99.4% 和 125.3%,在同样因砂或泥砂埋停喷时,同等砂埋高度条件下,采用 7" 油层套管,自喷期的累计产量分别比 5 $\frac{1}{2}$ "、5"、4 $\frac{1}{2}$ " 油层套管增加 74.3%、99.4% 和 125.3%,单从增加的产量上看,采用大的油层套管,经济效益就非常可观的。

表 1 油气田常用油层套管技术参数
Tab. 1 Technical parameters of commonly used oil casing in oil and gas fields

套管尺寸	壁厚/mm	内径/mm	内截面积/mm ²	抗内压/MPa	抗外挤/MPa
7"	12.65	152.50	18 256.16	114.0	120.0
5 $\frac{1}{2}$ "	12.09	115.52	10 475.72	139.0	152.9
5"	9.50	108.00	9 156.24	110.0	120.0
4 $\frac{1}{2}$ "	6.35	101.60	8 103.21	73.7	52.2

4.2.3 完井管柱

完井管柱主要包括管柱组合和管柱下深两个方面,对超深井,一般考虑到替重浆,以及缩短钻完井周期,采用试油完井一体化管柱,储层改造施工为降低井口泵压,管柱组合一般 4 $\frac{1}{2}$ " + 3 $\frac{1}{2}$ ", 4 $\frac{1}{2}$ " 油管有的用到 4 000 m,管柱下得比较深,存在以下问题: 1) 上部大管柱,流速降低,不利于携砂和携液,停喷早,费用高; 2) 管柱下得深,不利于产出剖面等的测试,如果出砂,管柱容易被埋。实际上,完井管柱和试油管柱目的有所不同,如完井管柱要满足配产和测试的需要,一般可以采用一种管柱配置就可以满足要求,测试一般要求管柱下在射孔顶界 50 m 以上;测试管柱要满足射孔、改造(包括分层改造),一般下得比较深,管柱尺寸要大,变径多,如采用试油完井一体化管柱在生产过程中,容易发生砂埋、蜡堵等问题,有的也提出了下部带全可溶筛管的解决办法,但溶解后产生的物质是否会污染储层,需要进行研究。

采用完井管柱单独下在射孔段以上,完井周期和费用要增加一点,有利于油气井生产,这需要开展无固相压井液等相关配套技术研究^[19]。

4.2.4 封隔器类型

在高温高压井测试作业中,使用常规的 RTTS 及 XHP 封隔器由于泥浆重晶石沉淀,封隔器无法正常解封的问题,在高温高压井中采用永久式封隔

器^[20],有的气藏高酸性气体,对入井材质防腐性能以及丝扣密封性能提出了更高的要求,必须采用性能良好的永久式封隔器以保护套管^[21],但在开发实践中,由于环空带压、砂埋等原因要进行作业,要进行管柱打捞,永久式封隔器处理难度大^[22-24]。从作业角度,可取式封隔器有独特的优势,需要在材质、结构等方面开展攻关,研究适合超深井的可取式封隔器,同时需要完井工艺配套,避免重浆在封隔器上沉积。

4.2.5 沉砂口袋

沉砂口袋是指从人工井底到所射油层一段套管内容积^[25],一般长度为15~25 m,留口袋是为后续施工或生产时产生的废弃物有存放的地方,不至于造成产层被埋,同时也为满足后续施工作业的需要,合理沉砂口袋的确定主要考虑地层出砂情况、后续施工的需要、经济效益^[26]。沉砂口袋容积由油层套管尺寸、井底到射孔底界的长度决定,太小会影响油气井的正常生产,甚至寿命,太大要增加钻井投资,油管下过射孔段顶界(由于砂也有一定的渗透能力,射孔底界以上也有口袋的作用),减少了口袋容积,同时由于砂对油管外壁的冲击作用,以及产层与油管外壁形成的环空狭窄,使得砂不容易排出。油层套管尺寸确定后,对超深井,应综合技术、经济确定合理的沉砂口袋深度。

5 结 论

1) 地下发现油气藏以后,尽可能上产稳产和提高采收率应是油气藏开发的最终目标,开井率对上产稳产和提高采收率有直接的关系,油气田投入开发后保持高的开井率,才能达到上产稳产、提高采收率以及全生命周期经济效益的目标,除去地层没有储量外,出砂或泥砂是影响开井率的重要原因,对超深油气藏完井研究和设计要充分考虑砂或泥砂的影响。

2) 超深油气藏完井工程要以提高采收率为目标,假设在出砂或泥砂条件下,以有利于延长砂(泥砂)埋时间、有利于后期作业为出发点,开展完井方式、油层套管尺寸、完井管柱、封隔器类型及合理沉砂口袋5个关键环节的研究,同时开展配套技术或装备研究,再进行钻完井投资、钻完井周期等测算,在此基础上设置考核指标。

3) 在合理钻完井设计的基础上,测算经济评价指标,如果内部收益率等指标达不到要求,可以通过提高单井产量的措施重新测算,体现科学的钻完井设计有利于提高单井产量,特别是累计产量,在开发到一定阶段后再进行钻完井技术的后评估,以及经济指标核算,也可为其他超深油气藏的开发提供经验。

4) 将超深油气藏开发作为一个系统工程,地质、钻井、完井、试油、修井与生产等涉及的各个专业和环节作为一个统一的整体,以提高采收率为共同的目标,在开发之初就要进行相关研究,确定科学的方案,对生产过程中油气井出现的问题,要进行各专业和环节共同参与的綜合研究,找准问题,制定科学的措施对策。

参考文献

- [1] 苏义脑,路宝平,刘岩生,等.中国陆上深井超深井钻完井技术现状及攻关建议[J].石油钻采工艺,2020,42(5):527-542. doi: 10.13639/j.odpt.2020.05.001
SU Yinao, LU Baoping, LIU Yansheng, et al. Status and research suggestions on the drilling and completion technologies for onshore deep and ultra deep wells in China[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2020, 42(5): 527-542. doi: 10.13639/j.odpt.2020.05.001
- [2] 祝效华,李瑞,刘伟吉,等.深层页岩气水平井高效破岩提速技术发展现状[J].西南石油大学学报(自然科学版),2023,45(4):1-18. doi: 10.11885/j.issn.1674-5086.2021.04.05.01
ZHU Xiaohua, LI Rui, LIU Weiji, et al. Development status of high-efficiency rock-breaking and speed-increasing technologies for deep shale gas horizontal wells[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2023, 45(4): 1-18. doi: 10.11885/j.issn.1674-5086.2021.04.05.01
- [3] 贾承造.含油气盆地深层—超深层油气勘探开发的科学技术问题[J].中国石油大学学报(自然科学版),2023,47(5):1-12. doi: 10.3969/j.issn.1673-5005.2023-05.001
JIA Chengzao. Key scientific and technological problems of petroleum exploration and development in deep and ultra-deep formation[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2023, 47(5): 1-12. doi: 10.3969/j.issn.1673-5005.2023.05.001
- [4] 高嫫,陈波,徐爱舫.塔河油田超深井裸眼分段试油技术应用[J].油气井测试,2007,16(2):36-38. doi: 10.3969/j.issn.1004-4388.2007.02.011
GAO Ping, CHEN Bo, XU Aifang. Application of bore hole separated layer testing in deep well of Tahe Oil-

- field[J]. *Well Testing*, 2007, 16(2): 36–38. doi: 10.3969/j.issn.1004-4388.2007.02.011
- [5] 韩烈祥. 川渝地区超深井钻完井技术新进展[J]. *石油钻采工艺*, 2019, 41(5): 555–561. doi: 10.13639/j.odpt.-2019.05.001
HAN Liexiang. New progress of drilling and completion technologies for ultra-deep wells in the Sichuan-Chongqing Area[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2019, 41(5): 555–561. doi: 10.13639/j.odpt.2019.-05.001
- [6] 邓虎, 贾利春. 四川盆地深井超深井钻井关键技术与展望[J]. *天然气工业*, 2022, 42(12): 82–94. doi: 10.3787/j.issn.1000-0976.2022.12.009
DENG Hu, JIA Lichun. Key technologies for drilling deep and ultra-deep wells in the Sichuan Basin: Current status, challenges and prospects[J]. *Natural Gas Industry*, 2022, 42(12): 82–94. doi: 10.3787/j.issn.1000-0976.-2022.12.009
- [7] 徐鹏海, 张浩, 张莎, 等. 库车山前大斜度小井眼试油完井工艺技术[J]. *钻采工艺*, 2019, 43(1): 45–48. doi: 10.3969/J.ISSN.1006-768X.2020.01.14
XU Penghai, ZHANG Hao, ZHANG Sha, et al. Technology of well testing and completion for high-deviated slim hole in Kuqa's piedmont[J]. *Drilling & Production Technology*, 2019, 43(1): 45–48. doi: 10.3969/J.ISSN.1006-768X.2020.01.14
- [8] 戴强, 张本健, 张晋海. 双鱼石构造超深超高压含硫气井完井管柱完整性设计探讨[J]. *钻采工艺*, 2019, 42(6): 44–46. doi: 10.3969/J.ISSN.1006-768X.2019.06.13
DAI Qiang, ZHANG Benjian, ZHANG Jinhai. To probe on completion string integrity design for ultradeep ultrahigh-pressure sulfur-contained gas wells at Shuangyushi Structure[J]. *Drilling & Production Technology*, 2019, 42(6): 44–46. doi: 10.3969/J.ISSN.1006-768X.2019.06.-13
- [9] 张洪宝, 匡韶华, 张宝, 等. 克深 13 区块完井工艺评价与优化[J]. *石油钻采工艺*, 2020, 42(1): 40–44. doi: 10.13639/j.odpt.2020.01.007
ZHANG Hongbao, KUANG Shaohua, ZHANG Bao, et al. Evaluation and optimization of the well completion processes in the Keshen 13 Block[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2020, 42(1): 40–44. doi: 10.13639/j.odpt.2020.01.007
- [10] 向文刚, 何银达, 吴云才, 等. 清洁完井工艺在超深高温高压气井的应用及认识[J]. *天然气技术与经济*, 2021, 15(3): 49–53. doi: 10.3969/j.issn.2095-1132.-2021.03.008
XIANG Wengang, HE Yinda, WU Yuncai, et al. Clean completion and its application to ultra-deep, high-temperature, and high-pressure gas wells[J]. *Natural Gas Technology and Economy*, 2021, 15(3): 49–53. doi: 10.3969/j.issn.2095-1132.2021.03.008
- [11] 魏军会, 景宏涛, 谢英, 等. 可溶筛管在塔里木油田高温高压气井中的应用[J]. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 2023, 45(6): 125–134. doi: 10.11885/j.issn.1674-5086.2021.10.21.32
WEI Junhui, JING Hongtao, XIE Ying, et al. Application of dissolvable screen pipe in HTHP gas well in Tarim Oilfield[J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 2023, 45(6): 125–134. doi: 10.11885/j.issn.1674-5086.2021.10.21.32
- [12] 张波, 薛媛, 吴优, 等. 致密气藏产量递减影响因素分析[J]. *石油化工与应用*, 2019, 38(12): 20–25. doi: 10.3969/j.issn.1673-5285.2019.12.006
ZHANG Bo, XUE Yuan, WU You, et al. Analysis of influencing factors on the production decline of tight gas reservoir[J]. *Petrochemical Industry Application*, 2019, 38(12): 20–25. doi: 10.3969/j.issn.1673-5285.2019.12.006
- [13] 李小雪, 黄小亮, 陈海涌, 等. 致密砂岩气藏产量分段递减规律特征[J]. *天然气勘探与开发*, 2019, 42(2): 89–94. doi: 10.12055/gaskk.issn.1673-3177.2019.02.011
LI Xiaoxue, HUANG Xiaoliang, CHEN Haiyong, et al. Laws of staged production decline for tight gas reservoirs, *Natural Gas Exploration and Development*, 2019, 42(2): 89–94. doi: 10.12055/gaskk.issn.1673-3177.2019.02.011
- [14] 刘祥康, 丁亮亮, 李玉飞, 等. 超深气井完井管柱屈曲行为研究[J]. *石油机械*, 2020, 48(2): 29–33. doi: 10.16082/j.cnki.issn.1001-4578.2020.02.005
LIU Xiangkang, DING Liangliang, LI Yufei, et al. Study of the buckling behavior of completion strings for ultra-deep gas wells[J]. *China Petroleum Machinery*, 2020, 48(2): 29–33. doi: 10.16082/j.cnki.issn.1001-4578.2020.-02.005
- [15] 练章华, 牟易升, 刘洋, 等. 高温高压超深气井油管柱屈曲行为研究[J]. *天然气工业*, 2018, 38(1): 89–94. doi: 10.3787/j.issn.1000-0976.2018.01.011
LIAN Zhanghua, MU Yisheng, LIU Yang, et al. Buckling behaviors of tubing strings in HTHP ultra-deep wells[J]. *Natural Gas Industry*, 2018, 38(1): 89–94. doi: 10.3787/j.-issn.1000-0976.2018.01.011
- [16] 冷继先. 井下管柱屈曲行为的理论与实验研究[D]. 成都: 西南石油学院, 2003.
LENG Jixian. Theoretical and experimental study on buckling behavior of downhole string[D]. Chengdu: Southwest Petroleum Institute, 2003.
- [17] 杨进, 杨立平, 苏杰, 等. 出砂井打捞管柱力学分析研究及其应用[J]. *石油钻采工艺*, 2004, 26(2): 25–27. doi: 10.3969/j.issn.1000-7393.2004.02.007
YANG Jin, YANG Liping, SU Jie, et al. Study on fishing string dynamics in sand producing well and its application[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2004, 26(2): 25–27. doi: 10.3969/j.issn.1000-7393.2004.02.007
- [18] 白晓飞, 周博, 董长银, 等. 哈拉哈塘油田奥陶系碳酸盐岩油藏储集层泥砂产出机理[J]. *新疆石油地质*, 2022, 43(4): 456–462. doi: 10.7657/XJPG20220411

- BAI Xiaofei, ZHOU Bo, DONG Changyin, et al. Production mechanism of mud and sand in Ordovician carbonate reservoirs in Halahatang Oilfield, Tarim Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2022, 43(4): 456-462. doi: 10.7657-XJPG20220411
- [19] 戴彩丽, 黄永平, 刘长龙, 等. 深层/超深层冻胶压裂液体体系研究进展及展望[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2023, 47(4): 77-92. doi: 10.3969/j.issn.1673-5005.2023.04.008
- DAI Caili, HUANG Yongping, LIU Changlong, et al. Progress and prospect of fracturing fluid system for deep/ultra-deep reservoir reconstruction[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2023, 47(4): 77-92. doi: 10.3969/j.issn.1673-5005.2023.04.008
- [20] 马磊, 魏安超, 陆茂伟, 等. 永久封隔器在高温高压井测试中应用[J]. 广东化工, 2017, 44(9): 237-238. doi: 10.3969/j.issn.1007-1865.2017.09.104
- MA Lei, WEI Anchao, LU Maowei, et al. Application of permanent packer in the Ht-hp well test[J]. Guangdong Chemical Industry, 2017, 44(9): 237-238. doi: 10.3969/j.issn.1007-1865.2017.09.104
- [21] 刘杰, 何冶, 乐宏, 等. 川渝地区高酸性气井完井投产技术及实践[J]. 天然气工业, 2006, 26(1): 72-75. doi: 10.3321/j.issn:1000-0976.2006.01.022
- LIU Jie, HE Ye, YUE Hong, et al. Technology and practice of well completion and putting into production for gas wells with high sulfur content in Sichuan and Chongqing areas[J]. Natural Gas Industry, 2006, 26(1): 72-75. doi: 10.3321/j.issn:1000-0976.2006.01.022
- [22] 马群, 张宏强, 徐鹏海, 等. “三超”气井永久式封隔器完井管柱处理工艺技术研究及实践[J]. 天然气与石油, 2023, 41(3): 87-90. doi: 10.3969/j.issn.1006-5539.2023.03.013
- MA Qun, ZHANG Hongqiang, XU Penghai, et al. Research and practice of completion string treatment technology with permanent packer in “three super” gas well[J]. Natural Gas and Oil, 2023, 41(3): 87-90. doi: 10.3969/j.issn.1006-5539.2023.03.013
- [23] 刘建军, 华建. 高含硫气田永久式封隔器套磨铣技术的应用实践[J]. 中国石油和化工, 2016, 41(s1): 169-171.
- LIU Jianjun, HUA Jian. Application practice of permanent packer sleeve grinding and milling technology in high sulfur gas fields[J]. China Petroleum and Chemical Industry, 2016, 41(s1): 169-171.
- [24] 陈东波, 扬鸿, 周琴. SAB-3 永久式封隔器套铣打捞工艺[J]. 新疆石油天然气, 2016, 12(3): 83-85.
- CHEN Dongbo, YANG Hong, ZHOU Qin. Milling & fishing technique of SAB-3 permanent packer[J]. Xinjiang Oil & Gas, 2016, 12(3): 83-85.
- [25] 刘璞. 采油技术问答[M]. 北京: 石油工业出版社, 2009.
- LIU Pu. Q & A on oil extraction technology[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2009.
- [26] 余海棠, 俞忠宝, 王迪东, 等. 延长油田合理完钻原则初探[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2013, 33(14): 70. doi: 10.3969/j.issn.1673-4076.2013.14.062
- YU Haitang, YU Zhongbao, WANG Didong, et al. Preliminary study on reasonable drilling completion principle in Yanchang Oilfield[J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2013, 33(14): 70. doi: 10.3969/j.issn.1673-4076.2013.14.062

作者简介



任今明, 1969年生, 男, 汉族, 四川南充人, 高级工程师, 硕士, 主要从事提高采收率和采油工程等方面的研究工作。E-mail: renjmtlm@petrochina.com.cn



潘昭才, 1972年生, 男, 汉族, 四川资中人, 高级工程师, 主要从事油气田开发研究工作。E-mail: panzc-tlm@petrochina.com.cn



黄 锐, 1973年生, 男, 汉族, 四川自贡人, 高级工程师, 主要从事采油工程、采气工程等方面的研究工作。E-mail: huangk-tlm@petrochina.com.cn



冯少波, 1978年生, 男, 汉族, 湖南祁阳人, 高级工程师, 主要从事钻井工程方面的研究工作。E-mail: CD678@126.com



张 宝, 1977年生, 男, 汉族, 陕西咸阳人, 高级工程师, 主要从事采气等方面的研究工作。E-mail: zhangbao-tlm@petrochina.com.cn

编辑: 王旭东

编辑部网址: <http://zk.swpuxb.com>