

致密砂岩气藏低产低效井治理对策及展望

张金发^{1,2}, 李亭^{1,2}, 管英柱^{1,2}, 郝智娟³, 王小玮⁴

(1. 长江大学石油工程学院, 湖北武汉 430100; 2. 油气钻采工程湖北省重点实验室, 湖北武汉 430100; 3. 河南财经政法大学资源与环境学院, 河南郑州 450046; 4. 中国石油新疆油田分公司, 新疆克拉玛依 834000)

摘要: 针对致密砂岩气田开发至中后期, 单井产量、压力下降快, 产水严重, 低产低效井数量逐年增加问题, 基于致密砂岩气藏地质特征, 分析了低产低效井成因并进行归类, 总结了各类低产低效井的治理对策, 提出了低产低效井治理建议。研究认为, 致密砂岩气藏普遍物性差, 连片性差, 气井易见水; 致密砂岩气藏低产低效井按成因可进一步归类为排水措施井和老井挖潜井; 排水采气是治理见水型低产低效井的主体工艺, 查层补孔、侧钻水平井、重复压裂等老井挖潜工艺是实现低产低效井提质增效的主要途径; 致密砂岩气藏低产低效井治理应集中于完善与升级排水采气工艺; 结合数字化管理与自动化设备开展主动性排水采气; 完善出水气井治理方式, 加强控水根治出水问题; 攻关形成更有效的低成本老井挖潜工艺; 利用数字化气田开展多维矩阵式气井管理。

关键词: 致密砂岩气藏; 低产低效井; 排水采气; 老井挖潜工艺

中图分类号: TE377 文献标志码: A 文章编号: 1003-0506(2022)10-0115-10

Countermeasures and prospects of low production and low efficiency wells in tight sandstone gas reservoir

Zhang Jinfa^{1,2}, Li Ting^{1,2}, Guan Yingzhu^{1,2}, Hao Zhijuan³, Wang Xiaowei⁴

(1. College of Petroleum Engineering, Yangtze University, Wuhan 430100, China;

2. Key Laboratory of Drilling and Production Engineering for Oil and Gas, Wuhan 430100, China;

3. College of Resource and Environments, Henan University of Economics and Law, Zhengzhou 450046, China;

4. PetroChina Xinjiang Oilfield Company, Karamay 834000, China)

Abstract: In the middle and late stage of tight sandstone gas field development, single well production and pressure decline rapidly, water production is serious, and the number of low production and low efficiency wells increases year by year. Based on the geological characteristics of tight sandstone gas reservoirs, this paper analyzes the causes and classification of low-production and low-efficiency wells, summarizes various treatment measures for low-production and low-efficiency wells, and puts forward treatment suggestions for low-production and low-efficiency wells. The conclusion are as follows: firstly, the tight sandstone gas reservoir has poor physical property, poor contiguity and easy to see water in gas wells. Secondly, low production and low efficiency wells in tight sandstone gas reservoirs can be further classified into water-penetrating wells and old wells according to their genesis. Thirdly, drainage gas recovery is the main technology for treating low production and low efficiency wells with water penetration. Exploring potential of old wells such as layer checking, hole filling, lateral drilling of horizontal wells and repeated fracturing is the main way to improve quality and efficiency of low production and low efficiency wells. Fourthly, the treatment of low production and low efficiency wells in tight sandstone gas reservoirs should focus on improving and upgrading drainage gas recovery technology. Combined with digital management and automatic equipment to carry out proactive drainage gas recovery. Improve the treatment way of outlet gas well, strengthen water control to eradicate the problem of outlet gas. Tackle key problems to form a more effective low-cost old well tapping technology. Multi-dimensional matrix gas well management using digital gas field.

收稿日期: 2022-07-01; 责任编辑: 郭海霞 DOI: 10.19389/j.cnki.1003-0506.2022.10.019

基金项目: 油气资源与探测国家重点实验室开放课题 (PRP/open-1901)

作者简介: 张金发 (1996—), 男, 河北唐山人, 硕士研究生, 研究方向为非常规油气藏增产技术。

通讯作者: 李亭 (1978—), 男, 山东曹县人, 副教授, 博士, 2014年毕业于成都理工大学, 现从事油气储层增产改造技术研究。

引用格式: 张金发, 李亭, 管英柱, 等. 致密砂岩气藏低产低效井治理对策及展望[J]. 能源与环保, 2022, 44(10): 115-124.

Zhang Jinfa, Li Ting, Guan Yingzhu, et al. Countermeasures and prospects of low production and low efficiency wells in tight sandstone gas reservoir[J]. China Energy and Environmental Protection, 2022, 44(10): 115-124.

Keywords: tight sandstone gas reservoir; low production and low efficiency wells; drainage gas recovery; old well tapping technology

在“碳达峰、碳中和”目标下,能源转型已成大趋势。天然气碳排放量约占化石能源的7%,在传统能源转向清洁能源过程中起着桥梁作用,致密气是天然气产量的重要增长点。加强中国致密气勘探开发力度,将有效推动中国能源结构转型,此外,对于缩小中国天然气对外依存度不断上涨的不利局面、保障国家能源安全具有重要意义。

中国是世界上仅次于美国、加拿大的致密砂岩气藏开采国家。据全国第四次油气资源评价,中国致密气资源量为 $21.9 \times 10^{12} \text{ m}^3$,技术可采资源量为 $11.3 \times 10^{12} \text{ m}^3$,致密气藏作为中国单个气藏类型产量最高的气藏,其产量于2020年占中国石油天然气产量的1/4以上^[1]。致密气勘探开发潜力巨大但高效开发仍面临严峻挑战。据统计,中国约 $1.5 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 致密气探明储量处于高含水区和低丰度区,目前储量难以有效动用,开采经济效益较低。由于储层低渗、低压、低丰度、高含水、强非均质性的特征^[2],致密砂岩气田开发至中后期往往单井产量低,压力降低迅速,产水严重,会形成大量低产低效井,严重限制气田有效开发。例如中国现阶段规模最大的致密砂岩气田——苏里格气田,其投产气井在 1.6×10^4 口以上^[3],其中低产井占52%,但产量却仅占11%,现急需开展低产低效井治理,让低产井焕发活力,从而实现气田稳产增产。

致密砂岩气藏低产低效井治理是让未参与产能贡献的层位或过去有过产能贡献,但由于地层能量补给不足、储层污染、气井出水等原因导致气井生产能力大幅度降低或基本无产能贡献的气井,通过采取相应工艺使得气层具备产能贡献或提升贡献率。为挖掘老层生产潜力和发挥新层产量,笔者基于致密砂岩气藏地质特征,分析致密砂岩气藏低产低效井成因并进行分类,总结各类型低产低效井的治理措施,针对工艺措施现状及不足之处,提出了致密砂岩气藏低产低效井治理的建议。

1 致密砂岩气藏概况

2011年,国家能源局正式发布《致密砂岩气地质评价方法》,规定致密砂岩气是覆压基质渗透率小于等于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的砂岩气层,单井一般无自然产能或自然产能低于工业气流下限,但在一定经济条件和技术措施下可获得工业天然气产量^[4]。

致密砂岩气藏以孔隙游离气渗流为主,存在少量吸附气,具备多种压力系统共存,储集砂体连续,但气藏间断并呈多藏散布的特点^[5]。致密砂岩储层横纵向分布规律差异大、连片性差,致使供气范围小,可采储量及单井控制储量小,导致产量低同时递减快。因此,致密砂岩气藏的勘探开发通常不采用稀井网而是利用密井网。

储层致密、物性差是致密砂岩气藏的最根本特点,致密砂岩气藏其致密化程度主要受成岩作用的影响,主要有压实作用、胶结作用、溶蚀作用、交代作用及黏土矿物转化作用等,其中以压实作用和胶结作用影响最大^[6]。据统计^[7],北美区域致密砂岩气藏与中国苏里格气田的储层渗透率分别为 $0.001 \times 10^{-3} \sim 1.000 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 、小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,其孔隙度分别为3%~15%、4%~10%。致密砂岩气藏含水饱和度高,气水关系复杂,气井产能会随着气井见水而迅速降低,进而缩短气井生产生命周期。储层致密、产水是制约致密气井产能和气田采出程度的关键,通常情况下,采用压裂、水平井、多分支井及治水措施等释放致密砂岩气藏产能和提高气田采出程度。

2 致密砂岩气藏低产低效井成因

致密砂岩气藏开采至中后期,面临最大的问题就是低产低效井增多,结合致密砂岩气藏地质概况、采集气工艺等剖析造成低产低效井的原因,认为致密砂岩气藏低产低效井主要成因有地质因素、工艺措施、气井出水、气田管理4个方面。

2.1 地质因素

部分致密砂岩气田由于气藏物性差,非均质性强,有效含气面积小,有效储层识别困难等影响^[8-9],生产至中后期储层供气能力差,自身产量递减较快,导致气井低产低效。开发前储层评价或气井生产过程中动态预测和静态预测的累积产气量基本相同,可判断因储层物性差导致气井低产低效。

2.2 工艺措施

气田开发过程中,部分气井由于前期开发漏选未选、储量动用不充分、初次改造失效等原因造成气井低产低效。具体表现为:多层系发育的致密气储层前期通常开采优质层位,致使部分仍具开采潜力的层位漏选未选;受开发井网、钻井方式的限制,使

单井控制储量低且剩余储量碎片化严重;支撑剂过早失效,压裂液伤害地层,井筒出砂、结垢、微粒运移等堵塞人造裂缝和孔隙,压裂设备受限等,导致初次压裂效果不理想。开发前多种潜力评价方法预测产能表明气井物性好,但生产过程中早期日产气量与气井预测最终累积产气量均较低,可判断因气井工艺效果差造成气井低产低效^[10]。

2.3 气井出水

生产动态表明,致密砂岩气井生产周期普遍具有三段式特点^[11]。气井在开发早期通常为快速降产期,经历高产量和压力下降快的阶段后,气井进入低压生产期,此时展示出显著压力和产量急剧波动的大量积液特点,即转为排水采气生产期,此时井筒内积液严重阻碍气井的长期稳产。致密气藏普遍产水,据统计,在中国已投产的气田中,高于80%的气田均不同程度地含有底水、边水、层间水等地层水水体^[12],气井投产一段时间后,大部分气井均会暴露井筒积液问题,导致气井油套压差扩大,产气量快速降低,造成气井低产低效。该成因在生产过程中可通过动态监测资料判断是否产水。

2.4 气田管理

随着勘探开发的不断深入,早期投入开发的区块进入递减期后,低压低产井数量将成比例逐年增加。以低渗致密气为例,气井前3年平均递减率为22.7%,5~6年后便转为低产低效井^[1]。不同成因的低产低效井治理对策、开采程度等均不同,且井数多,导致低压低产气井管理难度大;同时,气田还有部分新投入开发气井、连续生产井、间歇井,气井类型多且差异大,导致气田整体管理难度大,给稳产带来严峻挑战。

低产低效井成因不同,主要形成储层物性差型、工艺不理想型、出水型及管理欠缺型低产低效井。其中,出水型低压低产井需结合井况,采取对应的排水采气工艺,恢复气井生产潜力;储层物性差型和工艺不理想型低产低效井均可采取合适的老井挖潜工艺,恢复气井生产潜力,故将两者统一规划为老井挖潜井;气田管理应落实气井全生命周期管理,无需单独归类。因此,低产低效井可分为排水措施井和老井挖潜井。

3 致密砂岩气藏低产低效井治理对策

3.1 排水采气工艺

致密砂岩气藏开采过程中,随着气井压力递减

且气藏普遍含水,地层水(边水、底水、层间水等)、人工侵入水(钻井、压裂、压井等工艺措施的工作液)及凝析水侵入到气井近井地带并随同气体流入至井筒,使得气井逐步进入低压低产阶段。气井见水初期,地层压力及气井产量高,气体流速快,可将井筒内的液体携带至地面;但气田开发至中后期,由于地层压力及单井产量大幅降低,气井的携液能力也随之下降,当气井的产量低于该井连续携带液体的最小临界气量时,井筒内的液体将无法携带至地面,造成井底和井筒内严重积液。井底积液现象将降低气井产能和采收率,同时,井筒内由于水的存在,还将腐蚀井筒及生产管柱,提高气田开发的成本和施工风险。此时,若井筒积液无法有效排出,低压低产井将快速增加且产能无法稳定释放,严重制约致密气井的正常生产,最终导致气井水淹关井。

为了延长产水气井的生产期、提高致密气采收率,就必须清除井底积液。排水采气是治理气井积液的有效方式,也是挖掘低压低产含水气井生产潜力的的主体工艺。目前,排水采气工艺包括泡沫排水采气^[13-15]、优选管柱^[16]、连续油管^[17]、柱塞气举^[18-19]、机械排水^[20-24]、气举^[25-30]、超声波排水采气^[31]、涡流工具^[32]、同心毛细管技术^[20]、球塞气举^[33]、套管引流排液^[34]、井下气液分离同井回注^[35]等工艺,其中应用最广泛的有泡沫排水采气、柱塞、速度管柱、气举工艺。排水采气工艺丰富多样,但各类工艺具备不同技术特点及适用性。上述各类排水采气工艺的原理及适用性见表1。

3.2 老井挖潜工艺

气田开发至中后期,排水采气工艺对于见水型低产低效井具有较好效果,但是低产低效井大幅增加,从本质上来说仍在于气层的低孔、低渗。为进一步挖掘气井产能,延长气井寿命和实现气田稳产,通过不断深化地质认识和工艺技术升级,可开展查层补孔、侧钻水平井、重复压裂等老井产能挖潜改造工艺。

3.2.1 查层补孔

多层系发育的致密砂岩气田储层,若前期开发下层位,开采至后期,由于产量降低、经济效益较差等因素导致下层位生产情况差。为充分挖潜该井各储层产能,可优选前期开发井漏选、未选的上层位作为补孔层位,再次高效开发。完整的查层补孔体系一般包括前期测井二次解释、储层评估、气藏三维地质建模与数值模拟、选取补孔气井及产能预测、补孔措施实施与效果评价^[36]。

表1 各类排水采气工艺特点及适用性

Tab. 1 Characteristics and applicability of various drainage gas recovery processes

排水采气类型	工艺原理	适应范围	
泡沫排水采气	向井底注入起泡剂,起泡剂结合井内积液形成大量泡沫,以降低液体密度及表面张力	具备一定自喷能力的小产水气井;可作为自然间喷井、间歇生产井及积液停产井的助排举措	
同心毛细管技术	底部装有单向阀的毛细管管柱下至射开层段,经单向阀连续向井底注入化学发泡剂,使积液泡沫化	油管、套管不连通的积液气井	
优选管柱	通过重新更换不同尺寸的生产管柱来满足产水气井的正常开发	气井生产中、后期,具备一定自喷能力的小产水气井	
连续油管	原生产管柱内套入管径更小的连续油管作为生产管柱,以提高气体流速	具备一定产能贡献的小产水气井,不能自喷的气井需辅以其他诱喷举措复产;油管、套管不连通气井	
机械排水	机抽	抽油机带动深井泵柱塞,在泵筒中作上下往返抽汲运动,将油管内存液抽汲排出	不含硫或含硫少、低压的水淹气井;无法良好作用于定向井、深井
	电潜泵	利用多级离心泵设备,将井筒内存液从油管中快速抽出,液柱高度下降,以提高生产压差	剩余储量大、地层压力低、产水量多的水淹井;不适合定向井、出砂、结垢井
	螺杆泵	抽油杆转动运行螺杆泵,利用螺杆的旋转来吸排液体	要求小排量、低扬程、浅泵挂的井况;高含砂、高黏度井液的气井
	射流泵	喷嘴射出高压动力液,附近流体在压差下被吸入,扩散管内动力液动能传送至井下积液,使得压力提高	定向井的低压气井排水及水淹井复产;不适合高含砂量的气井
	涡轮泵	地面设备供给的动力液驱使涡轮工作,涡轮带动泵旋转,提供动力将积液排至地面	斜井、含腐蚀介质、高温、产砂的气井
气举	压缩机或邻井高压气源注入井筒以补充气井能量,注入气结合井内存液使得液体密度下降,生产压差提高	斜井、定向井、液体中有腐蚀介质的气井,可用于弱喷、间歇自喷及水淹气井	
柱塞气举	柱塞充当气液间的机械密封界面,凭借气井本身能量带动柱塞在油管内存液上下往返运动,完成周期性举液	有一定产能、带液能力较弱的自喷气井;不适合井斜大、出砂、结蜡严重的气井	
球塞气举	利用U型双管柱,气举球投入注入管柱端充当气液间的固体界面,达成稳定的段塞流,降低液体滑脱	斜井、含砂液、高气液比等复杂流体的气井;常规连续气举无法适应的气井	
涡轮工具	井筒内下入涡流工具,流体的运动方式由原来的两相紊流流态转变为两相分层流态	高气液比、井底流速高的产水气井;不适合产量较小,气体携液能力低的气井	
超声波排水采气	利用井下人工超声波场将井底积液局部形成高温高压且迅速雾化	低压、小底水的深井;可结合其他排水采气,形成早期主动防水工艺	
套管引流排液	先将套管打开,使近井地带和油管内的液体流入油套环空中,油管内存液柱高度下降,再通过油管开井生产	有产能、积液不严重的气井,要求油管完好畅通且与套管相互连通	
井下气液分离同井回注	利用气液分离装置,将地层产生的气、水分离,分离气产出至地面,分离水在井下回注至含水层或废弃地层	高含水的气井,对储层和井况的要求相对高	
组合式排水采气	基于2种或2种以上工艺各自的优缺点,结合为一种复合工艺,达到强排和增产的目的	有一定剩余储量,复产潜力大,单独排水举措不能复产的严重积液水淹气井	

选取补孔气井的原则包括测井解释为气层且具有一定的储量、有效厚度及地层系数;下层位开发状况差或已停产;上层位的邻井开发状况好;井身结构满足射孔及改造作业条件^[37]。致密砂岩气田开展查层补孔,大部分井改造后,往往由于地质因素、工程因素及层间窜流的影响,存在原生产层压井漏失液体严重、返排效果较差的难题^[38]。

针对此问题,可优化完井方式以减小层间干扰,如采取暂堵工艺保护有生产潜力的原生产层位,或采取水泥、桥塞等永久式封堵贡献不足的原生产层位;可优化压裂参数以提升返排效果,如采取液氮尾追伴注方式提高井筒返排能量,或采取纤维辅助携砂方式提高携砂能力^[39]。现阶段,查层补孔不仅可进行封下压上作业,还可进行封上压下作业^[40]。利用完善的某一层位发井网对另一层位进行查层补孔作业,可降低改造成本,提高储层纵向动用程度,实现致密气田的高效和可持续开发。例如,苏里格气

田累计完成109口井的查层补孔作业,其中增产效果明显的井数占总作业井数的78%,气井平均产量为 $0.74 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ^[41]。

3.2.2 侧钻水平井

致密砂岩气田经过多年开发后,大部分区块基本已完成井位部署作业,考虑到井间干扰的影响,再次部署新井位相对复杂,目前部分气田面临单井控制储量小、储量动用程度差异大、剩余气散布复杂等问题,影响气田稳产^[42]。为减缓区块产能递减,急需开展侧钻水平井改造老井,以恢复老井的产能。老井侧钻水平井是利用低产井、停产井或套变井的部分井身和地面管网^[43],在原井筒内开窗向井间剩余气富集的气层进行侧向钻进、定向造斜来实现的小尺寸井眼的水平井。侧钻水平井工艺流程一般包括储层精细描述、井位筛选、参数优化设计(水平段的方位和长度、水平井在气层内纵向上的位置及合理的产能)、实施及效果评价。井位筛选原则包括

井间剩余气富集且井网未完全加密的区域;开窗点上端固井质量合格;邻近直井生产状况较稳定;气层具有一定有效厚度且气层内泥岩夹层厚度不大;利用井可为目前关井或间开的低产低效井、工程事故井或问题井。

老井侧钻水平井具有降低开发成本、风险小、见效快、提高储量动用程度等优势^[44],但存在如下难点:由于钻遇地质层系多、环空尺寸小、小井眼固井难度大,导致钻井施工难度大^[45];剩余气富集区评价优选难度大,主要表现为对储层地质特征的精细描述、筛选井井况提出了更高的要求;部署受基础井网限制等。目前侧钻水平井工艺既可以实现各种曲率半径下的侧向钻进水平井,还可以在一个主井筒内侧向钻进多分支式水平井^[46]。老井侧钻水平井有效地挖掘了井间的剩余气,提升了储层平面上的动用程度,达到了降本增效、“死井复活”的目的,是老气田开发至中后期稳产增产的有效途径之一。例如,苏里格气田累计完成6口井的侧钻水平井作业,其中增产效果明显的井数占总作业井数的50%,改造前后日增加气量为 $3.6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}^{[41]}$ 。

3.2.3 重复压裂

致密砂岩气井投入开发前,多数井需要通过压裂措施对储层造缝,以产生高导流能力,提高开发效果。但初次压裂由于致密气储层物性差、裂缝控制区储量和施工作业等的限制等,使得部分井的压裂达不到设计要求,压裂有效期短,初次压裂改造效果并不理想。针对这种情况,可采用一套包括压前评价(储层评价及前次压裂评价)、候选井筛选、裂缝三维延伸模拟、压裂方案设计(支撑剂、压裂液及配套工艺设计)、压裂施工、裂缝监测与压后评估分析的重重复压裂工艺^[47]。提升气井复压成功率,关键在于优选气井^[48],候选井的选取原则包括具备足够的剩余可采储量及储层能量;因初始压裂设计或施工作业等工程因素造成致密砂岩气井初始产量低于预期产量,如压裂簇间距不合理、压裂液体系不完善、支撑剂有效支撑范围不够,或由于时间关系使现有支撑剂破碎、洗井或修井等作业对储层造成污染致,使气井产量大幅降低的致密砂岩气井;初次压裂后的产量明显低于同层位物性相似邻井的产量;井身结构满足重复压裂作业的要求等。

重复压裂分为压出新裂缝、延伸原裂缝、转向压裂3种类型^[49]。压出新裂缝、延伸原裂缝适用于改造规模不够和施工失败的井。暂堵转向重复压裂是

当前主流的重重复压裂方式,它是用高抗压强度的暂堵剂封堵原有裂缝,再压开原来难以开启的微裂缝,形成新的裂缝通道。在中高含水期,该方式既可以堵水,又能达到增产的目的^[50]。目前,重复压裂效果主要受地质、工程和开发因素的影响。选择有增产潜力的井进行重复压裂,可改善储层渗流状况、沟通储层未动用区域,以实现老井的增产稳产。例如,苏里格气田累计完成7口井的重复压裂作业,其中增产效果明显的井数占总作业井数的57%,气井平均产量为 $0.44 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}^{[41]}$ 。此外,进行加密井压裂作业时,邻井可实施保护性重复压裂^[51],减缓邻井与加密井的井间干扰^[52]。

查层补孔、侧钻水平井及重复压裂等老井挖潜工艺,是满足气田低产低效井提质增效的主要措施。开展查层补孔,挖掘初次改造的“忽略层”产能;开展侧钻水平井,提升储层平面动用程度;开展重复压裂,扩大裂缝改造体积。3种老井改造措施优缺点见表2。由表2可以看出,查层补孔整体实施效果最好;侧钻水平井增产效果虽好,但目前经济效益较差,有待升级工艺降低成本后大规模开展,以达到最优效果;重复压裂实施效果相对较差。

表2 老井挖潜工艺效果对比

Tab.2 Comparison of potential tapping technology effect of old wells

挖潜工艺	优点	缺点
查层补孔	工艺成熟,施工成本低,增产效果明显	选井选层难度较大,需开展测井二次解释
侧钻水平井	大幅度提高低产井产量	工艺复杂,施工成本高、周期长
重复压裂	工艺简单,施工成本低、周期短	因老井储层能量弱,返排困难,增产效果差

4 致密砂岩气藏低产低效井治理建议

4.1 完善与升级排水采气工艺

排水采气工艺为适应不同井况的积液井,现已发展多种类型工艺,但由于配套设备、井况和经济效益等问题,并没有全部得到广泛应用。现有排水采气存在的主要问题:①即便目前应用较多的泡沫排水、柱塞气举等工艺发挥较好的作用,但随着气田开发时间深入及认识程度提高,这些工艺的适应性及经济效益将逐步变差。②水平井开发是提高致密砂岩气藏单井产量的重要手段,其开发水平和开发效益均比直井开发优异,目前大多致密砂岩气藏以水平井开发为

主^[53],但水平井由于井筒结构特殊,一些常规排水采气往往无法适应水平井,效果较差。③深层边、底水气田由于储层、流体及井身结构较复杂^[54],往往出现暴性水淹,复产难度大的问题,现有排水采气一般不能满足现场需求。因此,需要进一步进行理论研究与现场实践,完善与升级排水采气工艺,形成经济效益好和适应性强的排水采气工艺。

4.2 结合数字化管理、自动化设备,及时开展主动性排水采气

致密气田普遍含水,低压低产井数量将随着投产气井的生产时间而大幅增多。现阶段,为解决因井筒积液而形成的低压低产井,已形成“泡排排水采气为主,速度管柱、柱塞气举和气举复产为辅”的排水采气工艺^[55]。但这些工艺逐渐不能适应积液气井数量陡增的现状,且工艺成本高、周期长、工作量大,导致低压低产井治理效率和经济效益差。

基于保证气田能够稳定、经济生产的思路,当气井产能贡献率减小至某种程度及产量低于最小携液流量时,可结合数字化管理和自动化设备及时进行主动性排水采气。建立“积液井排查—积液量计量—排水工艺优选—工艺效果分析—工艺制度优化—工艺总体评价”排水采气管理流程(图1),利用气田数字化建设成果,完善气田地质概况数据库,构建气田排水工艺措施库,采集气井生产的实时数据,摸排气井井筒积液现状,配备气井积液预警装置,结合气井静、动态生产资料,自动提出排水采气措施,实时追踪排水采气实施效果,实现气井排水采气远程自动控制。进一步优化自动间开、智能柱塞调参和泡沫排水采气自动化加注装置等。数字化管理、自动化设备的结合^[56],将真正实现气井排水采气管理精细化、智能化,可大幅度提高低压低产井治理效率和经济效益。

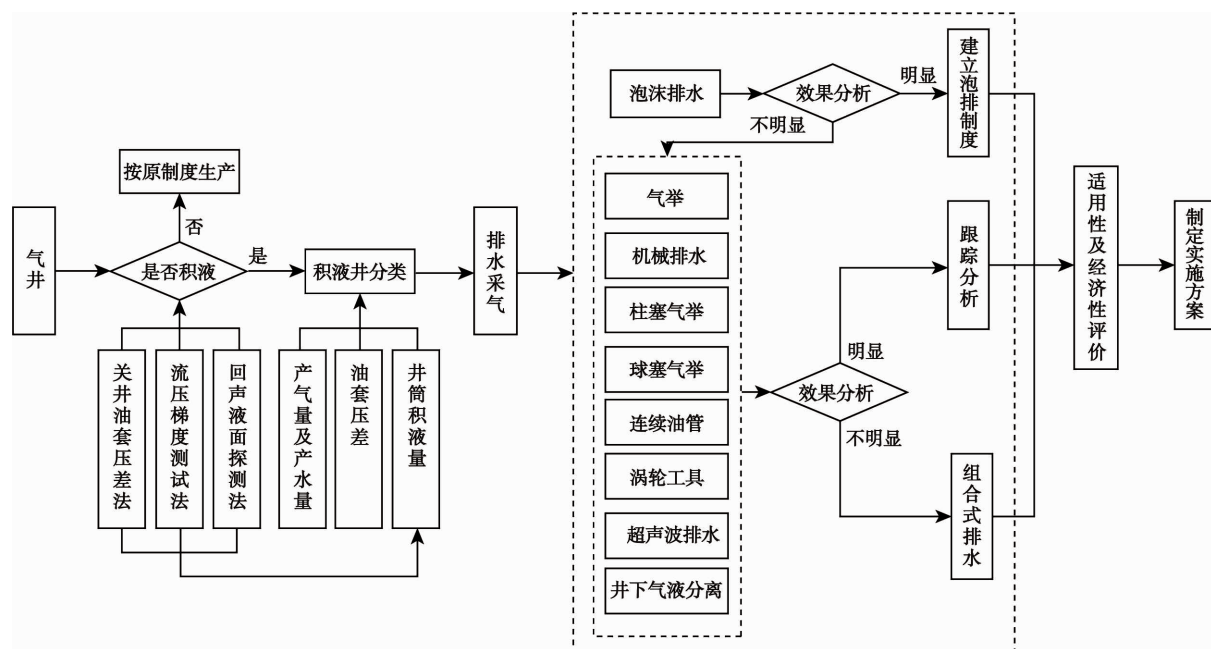


图1 数字化排水采气管理流程

Fig. 1 Digital drainage gas production management flow

4.3 完善出水气井治理,加强控水,根治出水问题

目前,对于出水气井的治理措施主要有控气、排水和控水(图2)。控气采气是通过限制气井产能释放量,以扩大井底回压、缩小水侵压差来延缓水侵。该措施成本低,易操作,但会降低采气速度及开采规模,常在见水初期未查明水侵原因时采用。排水采气是通过人工举升或借助排剂将积液排出井筒。控水采气是将符合致密砂岩气藏的功能控水剂注至

含水层位,构建阻水屏障,使水相渗透率大幅度下降,从而遏制地层水推进井筒。根据水层和气层的位置关系,控水可主要分为2类:①气、水不同层,气层和水层能明显隔离时,可加入非渗透性的永久阻挡物,如树脂、水泥浆、固体颗粒、高强度凝胶等;②气、水同层,气层和水层不易隔离时,可注入水溶性聚合物或其它相渗改善剂,如PAM聚合物、HPAM共聚物和VS/VA/AM三元共聚物^[57]。目前,纳米

流体因黏度低、无污染、能耗小、适应性强和微粒尺度小等特征,在控水方面受到青睐^[58]。

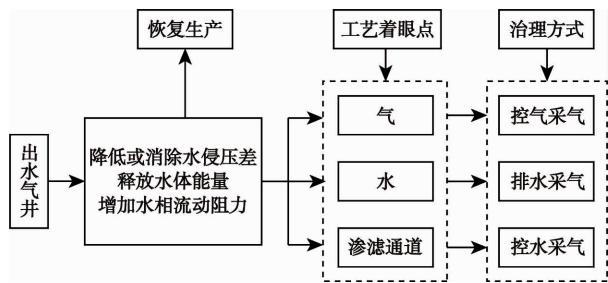


图2 出水气井治理措施

Fig. 2 Water gas well treatment measures

排水采气是治理出水型低压低产井应用最广的举措,虽然对缓解水侵、恢复气井正常生产等有明显效果,但它不是解决出水气井的根本方式,不能彻底控制水侵的进一步推进。同时,排水采气有损于气田整体开发且施工难度越来越大,对于现场施工成本较高或不具备排水采气施工要求的出水气井,更有必要实施控水采气。控水采气不仅可以降低治水成本,增加经济效益,而且还可避免排水采气大量产出水的处理。针对控水常常受技术条件限制,目前现场应用效果不理想,应改良聚合物控水体系,以增加对气水封堵的选择性;应研发功能纳米流体等价廉高效的控水体系,以减少储层伤害和控水采气成本。

4.4 形成更有效的低成本老井挖潜工艺

老井查层补孔工艺进行封下压上或封上压下作业时,层位封堵的好坏直接影响工艺的效果。建议优化管柱工具设计,解决管柱锚定困难、底部封隔器承受压力差大的问题;开展气体增能或干法加砂压裂等试验,彻底解决返排效果差的问题。

深化储层精细描述,掌握气井生产动态和剩余气分布,是部署设计高效优质侧钻水平井的保障。结合三维地质建模及数值模拟,进行参数优化设计,是侧钻水平井高效开发的基础。加快小尺寸加压设施、分段压裂配套设施等国产化研制,进一步提高钻井速度,缩小钻井和压裂成本。开展长水平段、阶梯水平井、大位移井等试验,进一步提高开发效果。

候选井筛选是重复压裂的关键,应采用地质—工程—经济一体化开展重复压裂改造潜力的研究,提高选井的科学性和有效性。重复改造气井的储层状况较复杂,对压裂所需材料的性能提出了更高的要求,应加强重复压裂关键材料的研发及优选,如高

效封堵材料^[59]、低伤害压裂液体系和适应性强的支撑剂^[60-62]。裂缝监测技术是获取压后裂缝形态、优化设计的导向,但目前监测设施复杂、投资较大,应开发使用便捷且成本低的裂缝监测仪。

4.5 数字化气田开展多维矩阵式气井管理

致密砂岩气藏储量难以效益开发,需要依靠工艺升级降低产建投资并提高单井产量,还需依靠管理创新进一步提质增效,提高内部收益率。只有管理创新与工艺创新“双轨”驱动,才能推动致密砂岩气藏的高效开发。

利用自动化控制设备和管理软件系统建设数字化气田,实时传输生产数据,智能分类气井类型,全面监测工艺措施,及时提出改进措施,精密监测输气管网,科学控制气井产能。通过数字化气田建设,提高采气工程的自动化程度,及时掌握气田生产动态和工艺效果,减少气田开发的安全风险,实现气田开发的高效管理。

全面建立气田分级分类,根据致密砂岩气井渗流规律及生产特征,可把气井细化为新投入开发井、间歇井^[63]、低产低效井和连续生产井,形成气井差异化管理,达到“一井一工艺一优化”的目标,实现气田合理开发。

数字化气田开展多维矩阵式气井管理如图3所示。建设数字化气田开展多维矩阵式气井全生命周期管理,减少劳动力和工艺措施工作量,缓解气田管理难度大的问题,是科学高效开发气田的重要保障。

5 结论

(1)致密砂岩气藏呈多藏分布,连片性差,储层致密,物性差,含水饱和度高,气井易见水导致气藏开采难度大。

(2)致密砂岩气藏低产低效井形成的主要原因有地质因素、工艺措施、气井出水、气田管理4个方面,即形成储层物性差型、工艺不理想型、出水型及管理欠缺型低产低效井。根据各种类型低产低效井治理工艺措施不同,可进一步将低产低效井分为排水措施井和老井挖潜井。

(3)排水采气消除井底积液恢复气井正常生产,是治理见水型低产低效井的主体工艺。采用查层补孔、侧钻水平井、重复压裂等老井挖潜工艺,提高储层纵向动用程度、平面动用程度、增加裂缝改造体积,是实现低产低效井提质增效的主要途径。

(4)致密砂岩气藏低产低效井治理,下一步发

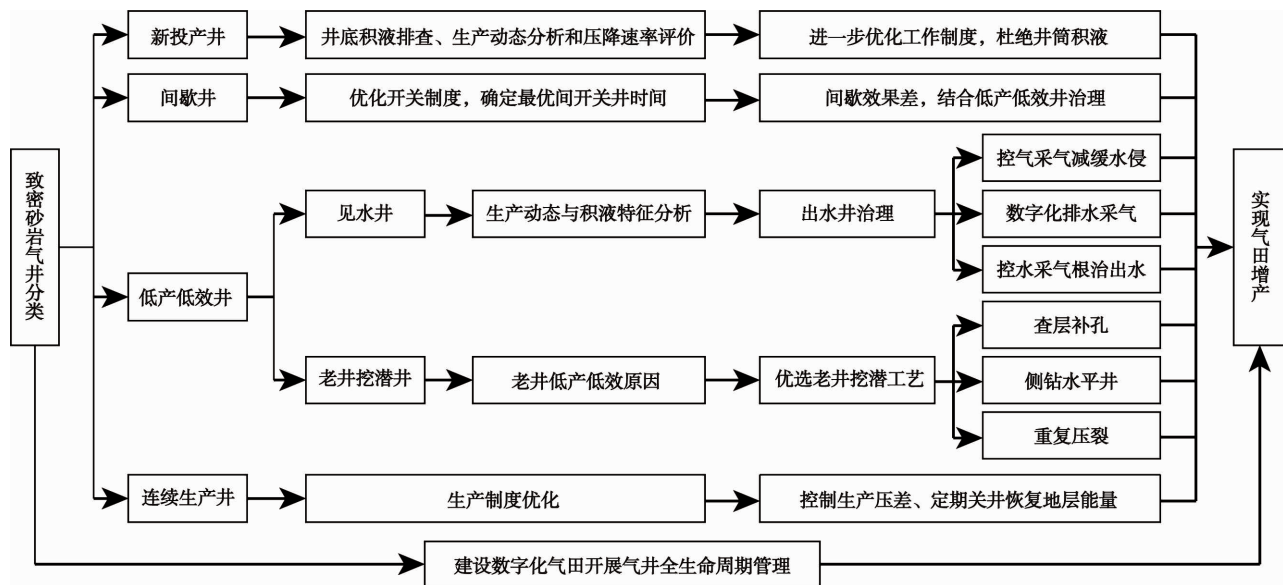


图3 数字化气田开展多维矩阵式气井管理

Fig.3 Multidimensional matrix gas well management of digital gas field

展方向应集中于完善与升级排水采气工艺;结合数字化管理、自动化设备,及时开展主动性排水采气;完善出水气井治理方式,加强控水根治出水问题;攻关形成更有效的低成本老井挖潜工艺;利用数字化气田开展多维矩阵式气井管理。

参考文献 (References):

- [1] 徐佳,薛涛.致密气开发扬帆再启航[N].中国石油报,2021-07-30(4).
- [2] 李波,贾爱林,何东博,等.苏里格气田强非均质性致密气藏水平井产能评价[J].天然气地球科学,2015,26(3):539-549.
Li Bo, Jia Ailin, He Dongbo, et al. Productivity evaluation of horizontal wells in highly heterogeneous tight gas reservoirs in Sulige Gas Field[J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(3): 539-549.
- [3] 栗倩玮,马晓楠.长庆全生命周期技术让致密气井长寿又长效[N].中国石油报,2021-08-10(2).
- [4] 石油地质勘探专业标准化技术委员会.致密砂岩气地质评价方法:SY/T 6832—2011[S].北京:中国标准出版社,2008.
- [5] 魏新善,胡爱平,赵会涛,等.致密砂岩气地质认识新进展[J].岩性油气藏,2017,29(1):11-20.
Wei Xinshan, Hu Aiping, Zhao Huitao, et al. New progress in understanding tight sandstone gas geology[J]. Lithologic Reservoirs, 2017, 29(1): 11-20.
- [6] 张翔,田景春,杜本强,等.蜀南观音场地区须家河组砂岩致密化与成藏匹配关系[J].石油与天然气地质,2014,35(2):231-237.
Zhang Xiang, Tian Jingchun, Du Benqiang, et al. Matching relationship between sandstone densification and reservoir formation of Xujiahe Formation in Guanyinchang area, South Sichuan[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(2): 231-237.
- [7] 李建忠,郭彬程,郑民,等.中国致密砂岩气主要类型、地质特征与资源潜力[J].天然气地球科学,2012,23(4):607-615.
Li Jianzhong, Guo Bincheng, Zheng Min, et al. Main types, geological characteristics and resource potential of tight sandstone gas in China[J]. Natural Gas Geoscience, 2012, 23(4): 607-615.
- [8] 王永辉,卢拥军,李永平,等.非常规储层压裂改造技术进展及应用[J].石油学报,2012,33(S1):149-158.
Wang Yonghui, Lu Yongjun, Li Yongping, et al. Progress and application of unconventional reservoir fracturing technology[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(S1): 149-158.
- [9] Jiang Zhenxue, Li Zhuo, Li Feng, et al. Tight sandstone gas accumulation mechanism and development models[J]. Petroleum Science, 2015, 12(4): 587-605.
- [10] 杨映洲,冯强汉,彭雪花,等.苏里格气田中区致密砂岩低产低效井潜力评价及挖潜对策研究[C]//2018年全国天然气学术年会论文集(3非常规气藏).北京:中国石油学会天然气专业委员会,2018.
- [11] 卢涛,刘艳侠,武力超,等.鄂尔多斯盆地苏里格气田致密砂岩气藏稳产难点与对策[J].天然气工业,2015,35(6):43-52.
Lu Tao, Liu Yanxia, Wu Lichao, et al. Difficulties and countermeasures for stable production of tight sandstone gas reservoirs in Sulige Gas Field, Ordos Basin[J]. Natural Gas Industry, 2015, 35(6): 43-52.
- [12] 曹光强,姜晓华,李楠,等.产水气田排水采气技术的国内外研究现状及发展方向[J].石油钻采工艺,2019,41(5):614-623.
Cao Guangqiang, Jiang Xiaohua, Li Nan, et al. Research status and development direction of drainage gas recovery technology at home and abroad[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2019, 41(5): 614-623.
- [13] 张书平,白晓弘,樊莲莲,等.低压低产气井排水采气工艺技术[J].天然气工业,2005(4):106-109,17-18.
Zhang Shuping, Bai Xiaohong, Fan Lianlian, et al. Drainage gas recovery technology in low pressure and low production gas Wells[J]. Natural Gas Industry 2005(4): 106-109, 17-18.

- [14] 刘楠楠,鞠斌山,陈常红,等. 新型抗温 LN-1 泡排棒的研制及应用评价[J]. 中国科技论文,2016,11(3):341-345.
Liu Nannan, Ju Binshan, Chen Changhong, et al. Development and application evaluation of a new temperature resistant LN-1 bubble rod[J]. Chinese Science and Technology Paper, 2016, 11(3): 341-345.
- [15] 瞿超超,刘正中,殷鸿尧,等. 新型排水采气用抗凝析油泡排剂[J]. 石油学报,2020,41(7):865-874.
Qu Chaocao, Liu Zhengzhong, Yin Hongyao, et al. New anti-condensate foaming agent for drainage gas recovery[J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(7): 865-874.
- [16] 徐悦新. 致密气生产井排水采气方式综合评价与生产优化[D]. 青岛:中国石油大学(华东),2018.
- [17] 钟晓瑜,颜光宗,黄艳,等. 连续油管深井排水采气技术[J]. 天然气工业,2005(1):111-113,217.
Zhong Xiaoyu, Yan Guangzong, Huang Yan, et al. Deep well drainage gas recovery technology of coiled tubing[J]. Natural Gas Industry, 2005(1): 111-113, 217.
- [18] 冯笑雅. 柱塞气举工艺设计及举升能力分析[D]. 武汉:长江大学,2020.
- [19] Urns M. Plunger-assisted gas lift and gas-assisted plunger lift [C]//SPE Artificial Lift Conference and Exhibition-Americas. The Woodlands; Society of Petroleum Engineers, 2018.
- [20] 石磊. 普光主体高含硫气井排水采气工艺研究[D]. 重庆:重庆科技学院,2016.
- [21] 廖毅,段方华,李川东,等. 变频电潜泵在排水采气工艺中的应用[J]. 钻采工艺,2003(S1):110-116,16.
Liao Yi, Duan Fanghua, Li Chuandong, et al. Application of frequency conversion electric submersible Pump in drainage gas recovery Process[J]. Drilling & Production Technology, 2003(S1): 110-116, 16.
- [22] 康琳洁. 螺杆泵排水采气工艺设计研究[D]. 成都:西南石油大学,2015.
- [23] 郭燕楠. 苏里格气田射流涡流排水采气工具的研制[D]. 西安:西安石油大学,2018.
- [24] 周际永,伊向艺,卢渊. 国内外排水采气工艺综述[J]. 太原理工大学学报,2005(S1):47-48,54.
Zhou Jiyong, Yi Xiangyi, Lu Yuan. Review of drainage gas recovery technology at home and abroad[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2005(S1): 47-48, 54.
- [25] Polasek D, Frost C. Extending the range of gas lift to long perforations [C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition. San Antonio; Society of Petroleum Engineers, 2012.
- [26] 余淑明,田建峰. 苏里格气田排水采气工艺技术研究与应用[J]. 钻采工艺,2012,35(3):40-43,9.
Yu Shuming, Tian Jianfeng. Research and application of drainage gas recovery technology in Sulige Gas field[J]. Drilling and Production Technology, 2012, 35(3): 40-43, 9.
- [27] 程旭明,顿昊龙. 气举排水采气技术在苏里格南区块水淹井的应用及效果评价[J]. 石油工业技术监督,2021,37(2):7-11,20.
Cheng Xuming, Dun Haolong. Application and effect evaluation of gas-lift drainage gas recovery technology in water-flooded Wells in Suliginan block[J]. Technology Supervision in Petroleum Industry, 2021, 37(2): 7-11, 20.
- [28] 王心敏,贾浩民,宁梅,等. 靖边气田同站高压井气举排水采气工艺流程改造效果分析[J]. 天然气工业,2013,33(2):37-42.
Wang Xinmin, Jia Haomin, Ning Mei, et al. Analysis on the improvement effect of gas-lift drainage gas recovery process in the same high pressure well in Jingbian Gas Field[J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(2): 37-42.
- [29] 易劲,顾友义,潘云兵,等. 油管穿孔气举排水采气技术[J]. 石油钻采工艺,2014,36(3):103-105.
Yi Jin, Gu Youyi, Pan Yunbing, et al. Tubing perforation gas lift drainage gas recovery technology [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2014, 36(3): 103-105.
- [30] Pohler S A, Holmes W D, Cox S A. Annular Velocity Enhancement with Gas Lift as a Deliquification Method for Tight Gas Wells with Long Completion Intervals [C]//SPE Unconventional Gas Conference. Pittsburgh; Society of Petroleum Engineers, 2010.
- [31] 李虎. 井下用喷嘴雾化排水采气的工艺研究[D]. 青岛:中国石油大学(华东),2010.
- [32] 朱远鹏. 排水采气涡流工具优化设计与仿真[D]. 武汉:长江大学,2016.
- [33] 李小蓉,呼玉川,谢飞,等. 球塞气举排水采气工艺技术研究[J]. 天然气工业,2006(8):110-112,172.
Li Xiaorong, Hu Yuchuan, Xie Fei, et al. Research on gas recovery technology of ball plug gas Lift drainage [J]. Natural Gas Industry, 2006(8): 110-112, 172.
- [34] 叶小黄. 靖边气田排水采气配套工艺技术研究[D]. 西安:西安石油大学,2014.
- [35] Patel H, Shah D. Effective down hole gas-liquid separation to eliminate liquid loading problem in gas wells [C]//SPE Kuwait Oil and Gas Show and Conference. Kuwait; Society of Petroleum Engineers, 2013.
- [36] 巨美歆,张紫阳,任晓建,等. 苏里格气田东区查层补孔气井优选思路研究[C]//第十六届宁夏青年科学家论坛石化专题论坛论文集. 宁夏:《石油化工应用》杂志社,2020.
- [37] 张歧,王军杰,王旭,等. 靖边气田上古生界储层查层补孔技术研究[J]. 石油化工应用,2012,31(8):74-76.
Zhang Qi, Wang Junjie, Wang Xu, et al. Research on reservoir checking and hole filling technology of Upper Paleozoic in Jingbian Gas Field [J]. Petrochemical Industry Application, 2012, 31(8): 74-76.
- [38] 黄永章,蒋成银,王思凡,等. 老井查层补孔改造返排效果原因分析与应对措施[J]. 石油化工应用,2020,39(8):68-72.
Huang Yongzhang, Jiang Chengyin, Wang Sifan, et al. Analysis of reasons and countermeasures for poor backflow effect of hole filling reconstruction in old well [J]. Petrochemical Industry Application, 2020, 39(8): 68-72.
- [39] 王均,何兴贵,张朝举,等. 纤维加砂新技术在川西气井压裂中的应用[J]. 钻采工艺,2009,32(3):65-67,74.
Wang Jun, He Xingui, Zhang Chaoju, et al. Application of fiber sand addition technology in fracturing of western Sichuan gas well [J]. Drilling & Production Technology, 2009, 32(3): 65-67, 74.
- [40] 张超伟,李发全,任生军. 低产井查层补孔难点及对策研究[J]. 中国石油和化工标准与质量,2017,37(3):104-106,108.
Zhang Chaowei, Li Faquan, Ren Shengjun. Research on the difficulties and countermeasures of layer checking and hole filling in low production Wells [J]. China Petroleum and Chemical Standards and Quality, 2017, 37(3): 104-106, 108.

- [41] 杨顺智,刘秋兰,杨富,等. 苏里格气田低产气井进攻性措施增产技术研究及应用[J]. 内蒙古石油化工,2018,44(12):101-102.
Yang Shunzhi, Liu Qiulan, Yang Fu, et al. Research and application of offensive stimulation technology for low-production gas Wells in Sulige Gas Field[J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2018, 44(12):101-102.
- [42] 代金友,任茜莹,穆中奇. 井网控制程度对气藏采收率影响——以靖边气田A井区为例[J]. 科学技术与工程,2018,18(30):70-74.
Dai Jinyou, Ren Qianying, Mu Zhongqi. Effect of well pattern control degree on gas recovery: a case study of Well A area of Jingbian Gas Field[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(30):70-74.
- [43] 王洋. 徐深气田侧钻水平井挖潜技术研究[D]. 大庆:东北石油大学,2018.
- [44] 张金武,王国勇,何凯,等. 苏里格气田老井侧钻水平井开发技术实践与认识[J]. 石油勘探与开发,2019,46(2):370-377.
Zhang Jinwu, Wang Guoyong, He Kai, et al. Practice and understanding of lateral drilling horizontal well development technology in Sulige Gas Field[J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(2):370-377.
- [45] 韦孝忠. 浅谈苏里格气田老井开窗侧钻水平井技术[J]. 钻采工艺,2016,39(1):23-25,7.
Wei Xiaozhong. Discussion on the technology of sidetracking horizontal wells in old Wells of Sulige Gas Field[J]. Drilling & Production Technology, 2016, 39(1):23-25,7.
- [46] 白慧,李浮萍,王龙. 老井侧钻水平井开发技术在苏里格气田的应用[J]. 石油化工应用,2014,33(9):13-17.
Bai Hui, Li Fuping, Wang Long. Application of lateral drilling horizontal well development technology in Sulige Gas Field[J]. Petrochemical Industry Application, 2014, 33(9):13-17.
- [47] Sharma M M. Improved reservoir access through refracture treatments in tight gas sands and gas shales[J]. Research Partnership to Secure Energy for America, 2013.
- [48] Yadali Jamaloei B. Identifying well treatment candidates and strategies for enhancing hydraulic fractures system complexity [C]//SPE Oklahoma City Oil and Gas Symposium. Oklahoma; Society of Petroleum Engineers, 2019.
- [49] 张金发,管英柱,陈菊,等. 页岩气压裂技术进展及发展建议[J]. 能源与环保,2021,43(10):102-109.
Zhang Jinfa, Guan Yingzhu, Chen Ju, et al. Progress and development suggestion of shale gas fracturing technology[J]. China Energy and Environmental Protection, 2021, 43(10):102-109.
- [50] 何涛. 新场气田沙溪庙组暂堵转向重复压裂技术研究[D]. 成都:西南石油大学,2019.
- [51] 肖博,李双明,蒋廷学,等. 页岩气井暂堵重复压裂技术研究进展[J]. 科学技术与工程,2020,20(24):9707-9715.
Xiao Bo, Li Shuangming, Jiang Tingxue, et al. Research progress of temporary plugging and refracturing technology in shale gas Wells[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(24):9707-9715.
- [52] Courtier J, Gray D, Smith M, et al. Legacy well protection refracture mitigates offset well completion communications in joint industry project[C]//SPE Liquids-Rich Basins Conference-North America. Midland; Society of Petroleum Engineers, 2016.
- [53] 卢涛,张吉,李跃刚,等. 苏里格气田致密砂岩气藏水平井开发技术及展望[J]. 天然气工业,2013,33(8):38-43.
Lu Tao, Zhang Ji, Li Yuegang, et al. Development technology and prospect of horizontal Wells in tight sandstone gas reservoirs of Sulige Gas Field[J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(8):38-43.
- [54] 江同文,孙雄伟. 中国深层天然气开发现状及技术发展趋势[J]. 石油钻采工艺,2020,42(5):610-621.
Jiang Tongwen, Sun Xiongwei. Development status and technology development trend of deep natural gas in China[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2020, 42(5):610-621.
- [55] 王瑞,张宁生,刘晓娟,等. 苏里格气田泡沫和井下工具类排水采气工艺研究现状[J]. 石油科学通报,2016,1(2):241-256.
Wang Rui, Zhang Ningsheng, Liu Xiaojuan, et al. Research status of foam and drainage gas recovery technology for downhole Tools in Sulige Gas field[J]. Petroleum Science Bulletin, 2016, 1(2):241-256.
- [56] Oyewole P O, Scull M, Downey M, et al. Successful application of Integrated digital automation system for production optimization in north San Juan Basin [C]//Digital Energy Conference and Exhibition. Houston; Society of Petroleum Engineers, 2007.
- [57] 黄艳,余朝毅,钟晓瑜,等. 国外排水采气工艺技术现状及发展趋势[J]. 钻采工艺,2005(4):57-60,18.
Huang Yan, She Chaoyi, Zhong Xiaoyu, et al. Current situation and Development trend of drainage gas recovery technology abroad[J]. Drilling & Production Technology, 2005(4):57-60,18.
- [58] Sun Y, Yang D, Shi L, et al. Properties of nanofluids and their applications in enhanced oil recovery: a comprehensive review[J]. Energy & Fuels, 2020, 34(2):1202-1218.
- [59] 路智勇. 转向压裂用暂堵剂研究进展与展望[J]. 科学技术与工程,2020,20(31):12691-12701.
Lu Zhiyong. Research progress and prospect of diversion diversion plugging agent for fracturing[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(31):12691-12701.
- [60] 付金华,范立勇,刘新社,等. 苏里格气田成藏条件及勘探开发关键技术[J]. 石油学报,2019,40(2):240-256.
Fu Jinhua, Fan Liyong, Liu Xinshe, et al. Reservoir forming conditions and key technologies of exploration and development in Sulige gas field[J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(2):240-256.
- [61] 彭欢,马辉运,彭钧亮,等. 新型超低密度支撑剂实验评价与可行性研究[J]. 钻采工艺,2021,44(3):56-59.
Peng Huan, Ma Huiyun, Peng Junliang, et al. Experimental evaluation and Feasibility study of new ultra-low density proppant[J]. Drilling & Production Technology, 2021, 44(3):56-59.
- [62] 郑新权,王欣,张福祥,等. 国内石英砂支撑剂评价及砂源本地化研究进展与前景展望[J]. 中国石油勘探,2021,26(1):131-137.
Zheng Xinquan, Wang Xin, Zhang Fuxiang, et al. Research progress and prospect of domestic quartz sand proppant evaluation and sand source localization [J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(1):131-137.
- [63] 张丰峰,李军亮,姜毅,等. 低产低效井合理间开制度研究[J]. 中国科技论文,2020,15(9):1071-1076.
Zhang Fengfeng, Li Junliang, Jiang Yi, et al. Research on reasonable interval system of low production and low efficiency wells[J]. China Science and Technology Paper, 2020, 15(9):1071-1076.