

引用格式:游利军,孟森,康毅力,等.气藏型储气库储层损害机理与保护技术对策[J].油气藏评价与开发,2021,11(3):395-403.

YOU Lijun, MENG Sen, KANG Yili, et al. Formation damage mechanism and protection measures for gas field storage[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2021, 11(3):395-403.

DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2021.03.015

气藏型储气库储层损害机理与保护技术对策

游利军,孟森,康毅力,陈明君,邵佳新

(西南石油大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室,四川成都610500)

摘要:储气库工程地质条件复杂,具有储层低压、交变载荷、高强度注采等特点,钻完井和多周期注采过程容易诱发储层损害,严重制约储气库高效建库和注采效率,给储气库平稳安全供气带来了极大挑战。通过分析气藏型储气库工程地质特征,结合实际储层损害控制案例,揭示了气藏型储气库钻完井及注采过程储层损害机理,提出了储气库储层保护技术对策。气藏型储气库钻完井液漏失,易诱发固相侵入、流体敏感、应力敏感等损害,多周期强注强采易诱发应力敏感、微粒运移和出砂等损害。储气库储层保护需要提前战略规划,强化系统工程观、升级完善全生命周期储层保护及其配套技术,储层损害预测、诊断、控制与解除技术既要考虑储气库建设运行阶段,又要考虑气田开发阶段,尽快研发以钻完井和多周期注采过程储层保护为基础的储气库地质工程一体化技术。

关键词:储气库;井漏;多周期运行;系统工程;储层保护;地质工程一体化

中图分类号:TE822

文献标识码:A

Formation damage mechanism and protection measures for gas field storage

YOU Lijun, MENG Sen, KANG Yili, CHEN Mingjun, SHAO Jiaxin

(State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China)

Abstract: The gas storage, with complex engineering geological conditions, has the characteristics of low formation pressure, alternating load and high intensity injection-recovery. The process of drilling, completion and injection-recovery can easily induce the formation damage, which seriously restricts the high efficient construction and injection-recovery efficiency of gas storage, and brings great challenges to the stable and safe gas supply of gas storage. Based on the analysis of the engineering geological characteristics of the gas storage, and combined with the actual formation damage control cases, the formation damage mechanism of the gas storage in the process of drilling, completion and injection-recovery has been revealed, and the technical countermeasures for the formation damage control of the gas storage has been put forward. The loss of drilling and completion fluid in gas formation is easy to induce solid invasion, fluid sensitivity, stress sensitivity and other damages, and the multi cycle strong injection-recovery is easy to induce stress sensitivity, particle migration, sand production and other damages. Formation damage control of gas storage requires strategic planning in advance, strengthening the concept of system engineering, upgrading and improving the whole life cycle reservoir protection and its supporting technology. Not only the construction and operation stage of gas storage, but also the development stage of gas field should be considered in the formation damage prediction, diagnosis, control and relief technology. Gas storage geology-engineering integration technology based on drilling and completion and multi cycle injection-recovery process should be researched and developed as soon as possible.

Key words: gas storage, loss of fluid, multi cycle operation, systems engineering, formation damage control, geology-engineering integration

收稿日期:2021-01-04。

第一作者简介:游利军(1976—),男,博士,教授,博士生导师,从事储集层保护、非常规油气、岩石物理等方面的教学与科研工作。地址:四川省成都市新都区新都大道8号,邮政编码:610500。E-mail: youlj0379@126.com

基金项目:四川省科技厅项目“非常规油气层保护四川省青年科技创新研究团队”(2021JDTD0017)。

地下储气库在协调供求关系、实施战略储备、提供应急服务等方面发挥着重要作用^[1]。据国际天然气联盟统计,截至2018年,世界上在建和运行的储气库达700余座,总工作气量达 $3\ 930\times 10^8\text{ m}^3$ ^[2-3]。近年来,随着我国西气东输、海气登陆、川气东送等各大管道相继建设,天然气管网已初具规模。完善天然气供给端设施,保障储气库平稳、高效、安全供气,对国家安全、企业发展和人民生活至关重要。历经20年的发展我国已建储气库27座,其中包括1座盐穴储气库、26座气藏型储气库(5座碳酸盐岩储气库和21座砂岩储气库),分布在东北、环渤海、长三角、西南、西北等7大区域,调峰能力超过 $100\times 10^8\text{ m}^3$,大大缓解了我国冬季天然气供需的紧张局面^[4]。

与常规气藏相比,气藏型储气库储层工程地质特征更为复杂,在钻完井和多周期注采过程更容易诱发储层损害。据统计仅仅北美地区超过300座储气库,储层损害造成的储气库平均每年产能下降大约5%,经济损失达数千万元^[5-6]。依据储气库工况地质特征,可将储气库储层损害概括为两个阶段,钻完井过程工作液漏失诱发的储层损害和多周期高强度注采过程引起的储层损害。气藏型储气库以枯竭气藏为基础进行建库,气藏经过多年开采,储层存在构造破碎、压力系数低、油管老化等问题,在建库钻井过程存在恶性井漏风险,一旦发生井漏将会严重影响储气库建库进度和注采效率^[7-8]。储气库运行具有强注强采、长年多周期循环以及储层有效应力周期性变化的特点,注采气过程可能会诱发微粒运移、应力敏感等一系列储层损害。

我国气藏型储气库经过20多年的发展,创建了复杂地质体动态密封理论、创新了复杂地质条件下储气库工程建设关键技术、库容动用理论及优化设计方法等,形成了地质—井筒—地面三位一体的风险管控体系,建库技术取得重大突破^[4,9]。储气库工况地质条件复杂,储层保护工作困难,气藏型储气库

储层保护技术理论发展相对滞后。目前还未见系统分析储气库储层损害理论技术的相关报道,亟须开发与储气库相匹配的储层保护技术,预防储层损害。明确气藏型储气库在钻完井和注采过程损害机理,提出储层保护措施,对缩短储气库建库周期,提高储气库注采效率,保障储气库平稳安全高效运行具有重要意义。

1 气藏型储气库储层工程地质特征

我国储气库以气藏型储气库为主,储层岩性以砂岩为主,埋深跨度大(1 000~5 500 m)。储层物性较好,孔隙度平均值分布为2.29%~26.40%,渗透率平均值分布为 $(1.15\sim 346.50)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$,储层整体呈现为中孔、中渗,主要特征见表1。

1) 储气库储层地质特征

我国气藏地质条件复杂,可作为储气库库址的气藏十分有限,主要表现为以下几点:①储层非均质性强、构造破碎、井壁稳定性低,钻完井作业风险较大;②目的层位埋藏深;③气藏采出程度高,现有地层压力低,工作液漏失频率高;④边底水侵入,储层含水饱和度升高。储气库地质条件的复杂性导致在钻完井过程容易发生工作液漏失,诱发储层损害。

2) 储气库工程特征

储气库储层地质条件与运行特征都与常规气藏有明显的差异(表2)。储气库与常规气藏相比具有注采强度大、多周期循环和运行周期长等特点,在长期剧烈工况条件下容易导致微粒运移、应力敏感等储层损害。

2 气藏型储气库储层损害机理

2.1 储气库钻完井过程储层机理

储气库一般由枯竭油气藏改建而成,经过多年

表1 中国部分已建地下储气库主要特征^[10-18]

Table 1 Main characteristics of some underground gas storage in China

储气库分类	储气库类型	储层层位	岩石类型	储层段埋深(m)	平均孔隙度(%)	平均渗透率($10^{-3}\mu\text{m}^2$)	设计库容量(10^8 m^3)	设计工作气量(10^8 m^3)
板桥储气库群	气藏型	古近系沙一下亚段	砂岩	2 200~3 200	22.00	67.00~346.50	68.98	30.3
双6储气库	气藏型	第四系沙一二段	砂岩	2 500~3 000	17.30	224	33.00	16.0
相国寺储气库	气藏型	石炭系黄龙组	碳酸盐岩	2 000~2 600	7.47	83.50~571.90	42.60	22.8
文96储气库	气藏型	古近系沙河街组	砂岩	2 330~2 660	22.30	59.34	5.88	2.95

开发改造,储层地质条件复杂,大部分具有非均质性强、储层压力系数低、构造破碎等特点,钻完井过程易诱发工作液漏失,储层保护工作较为困难。工作液漏失给储气库钻完井带来极大的挑战,钻完井过程发生工作液漏失会严重影响钻井进度、诱发储层损害,甚至引起井塌等复杂事故,严重制约储气库注采效率和经济效益^[19-21]。

钻井过程储层损害:在钻遇裂缝发育储层时,在正压差的作用下,钻井液发生漏失,引起固相堵塞和液相圈闭等储层损害;在完井过程,完井液漏失会进一步加剧储层损害程度和范围。工作液进入储层会打破储层原有的物理化学平衡,造成颗粒堵塞、水相圈闭、流体敏感性以及应力敏感等储层损害(表3)^[22-24]。

1) 固相侵入是工作液漏失造成储层损害的主要因素之一。对于碳酸盐岩储气库储层而言,储层压力低、裂缝发育更容易诱发工作液漏失,且侵入较深。固相侵入深度和储层损害程度呈正相关,深度越深越难以解除,甚至完全堵塞渗流通道。相国寺碳酸盐岩石炭系储层裂缝系统发育、压力低,工作液漏失频繁、漏失量大,固相侵入损害深度可达5 m,严重影响储气库建库进度和注采效率^[25]。

2) 流体损害。储气库储层低压的特点,导致工作液漏失具有侵入深度深、难以返排的特点,引起流

体敏感性损害和相圈闭损害较为严重。在高速气流和侵入流体的共同作用下诱发流体敏感性损害,造成黏土矿物膨胀、分散,在孔喉处发生堵塞(图1)。同时当储层未达到束缚水饱和度时,流体侵入会导致液相饱和度升高,水相占据更多的孔隙空间,气相渗透率降低。

3) 微粒运移、有机垢/无机垢损害,在钻完井过程引起储层损害较小,在多周期注采过程引起的储层损害更为常见。

2.2 多周期注采过程储层损害机理

地下储气库工作机制与一般气藏单向采气不同,储气库运行具有强注强采、周期性注采和运行时间更长等特点。储气库注气过程中需要使用高负荷气体压缩机组进行注气,从而使得大量压缩机油和润滑油蒸汽被气体“带入”储层。国内外学者通过井下取样、试井、井下录像、室内实验等方法^[26-28],发现地下储气库储层存在以下几种损害:

1) 细菌损害。细菌存在于各种水基流体和有机液之中,随着注入流体进入储层。细菌损害机制:①自身代谢产生多糖聚合物,造成孔喉堵塞;②硫酸盐还原菌会与井下金属设施发生还原反应,腐蚀井下设备;③硫酸还原菌通过与硫酸盐矿物反应产生

表2 气藏开发与气藏型储气库运行差异性分析^[6]

Table 2 Analysis on difference between gas reservoir development and gas field storage operation

类别	库址选择	钻井过程	完井方式	固井技术	运行过程			储层保护措施
					设计原则	注采强度	运行周期	
气藏	开发后具有显著的经济效益	根据储层的岩性、流体等条件选择合适的钻井液及钻井方法	根据实际情况选择不同的完井方式	根据地质条件,选择合适的固井技术	稳产为前提,提高最终采收率	低速、单向采气	10~20年,直至废弃	相对容易控制
气藏型储气库	储、渗条件好,能满足“调峰”需求	储层压力低,防止钻井液漏失选择,低密度钻井液或气体钻井技术	一般选用裸眼完井和防砂筛管完井等	地质条件复杂,固井难度大	吞吐气量大,满足高峰用气注采强度大	注采强度大,气体压力正反向交替变化	30~50年,一年一个注采周期	地质条件复杂,难以控制,损害较为严重

表3 工作液漏失可导致的损害类型

Table 3 Different types of damage caused by leakage of working fluid

损害类型	损害过程	损害程度
固相侵入	钻完井、试气、修井	5级
水相圈闭	钻完井、试气、修井	5级
流体敏感性损害	钻完井、试气、修井	4级
微粒运移	钻完井、试气	2级
润湿反转	钻完井	1级
有机垢/无机垢损害	钻完井	1级

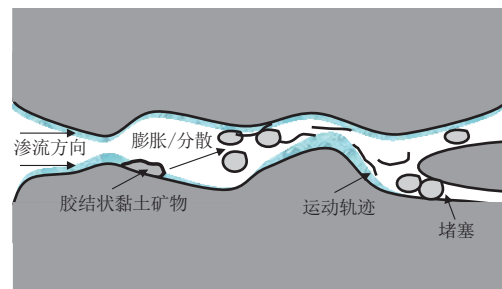


图1 流体敏感性损害

Fig. 1 Fluid sensitivity damage

硫化氢有毒气体。YEAGER对美国某油气田12口储气库井进行取样,其中7个发现了硫酸盐还原菌,产生了大量的硫铁化合物,严重影响了储气库产能^[5]。

2) 有机垢沉淀。储气库井注气过程中需要使用气体压缩机组,高负荷工作会使得大量的压缩机油和润滑油蒸汽伴随着气体进入储层。压缩机油在储层高温高压作用下发生分解生成碳氢化合物沉淀,还可以经过井筒残留的化学品与金属发生反应,对管柱造成损害^[29]。

3) 微粒堵塞。储层中的微粒来源可分为地质因素和工程因素。地质因素:储层中本身就含有细小微粒(小于37 μm),包括黏土微粒和其他矿物组分碎屑微粒。工程因素:工作液中的固相颗粒侵入。微粒运移主要与储层中矿物组分、胶结程度和流体流动速率等相关。储气库单井工作气量大、气体流速高,可能会引起速敏,导致储层微粒发生运移,诱发储层损害。储气库多周期注采过程微粒运移损害机理如下(图2):在采气过程中,储层中的微粒在高速气流的冲刷下发生运移,可能会堵塞孔喉或伴随流体排出储层;在注气过程,未发生运移的微粒在更高的气流冲刷下发生运移并堵塞孔喉,同时在注气过程已发生运移的微粒会发生二次运移,可能诱发二次损害;在下个采气周期,此前堵塞渗流通道的微粒可产生不同程度的运移,伴随气体排出储层,导致渗透率一定程度有所恢复。

4) 出砂。储气库井为满足调峰要求,具有强注强采、气体高速渗流的特点。储层孔道中胶结程度较弱的砂粒在高速气流的冲刷下,发生运移造成堵塞。当注采压力达到一定值,导致岩体发生剪切破坏,出现更多的微粒运移,严重时引起井筒出砂。

5) 管柱冲蚀与腐蚀产物堵塞。气体流速高于临界冲蚀流速,在流体的冲刷下储层或井筒中的微粒会对管柱产生冲蚀作用。储气库井多周期、高速注采和长时间的冲刷管柱会导致管柱失效。储层和井底残留的酸液、CO₂、H₂S等会腐蚀管柱,产生硫化

亚铁等沉淀,在注气过程的冲刷下进入储层。长期的冲蚀和腐蚀产物会在注气过程进入储层,堵塞孔喉,甚至影响储气库井安全生产。

6) 应力敏感性。储气库多周期注采,在注气过程孔隙压力增加,孔隙上覆岩石有效应力减小,采气过程孔隙压力降低,孔隙上覆岩石有效应力增加,孔隙有效应力随着注采发生周期性变化,诱发储层应力敏感性,造成孔隙度及渗透率下降。储气库储层气体高速渗流,有效应力大小呈现周期性快速变化,会进一步加剧储层应力敏感性,降低储气库储气能力和注采能力^[30]。

3 气藏型储气库储层损害控制技术

3.1 储层欠平衡钻井技术

储层保护防是首要,治是关键^[31]。欠平衡钻井通过保持井筒较小的压力,降低或消除井底与地层之间的正压差,预防或降低钻井液漏失造成的储层损害。欠平衡钻井技术在预防钻井液漏失、维持井壁稳定性、加快钻井和保障采收率等方面发挥了重要作用。针对储气库储层低压特点,欠平衡钻井技术的应用,有效避免了工作液漏失诱发的储层损害,缩短了钻完井周期,对储气库储层保护发挥了重要作用。

相国寺储气库是典型的枯竭型气藏储气库。相国寺气田经过多年衰竭式开采,多个产层压力系数低于1,石炭系地层压力系数仅为0.1,老井及新钻井漏失严重(表4)。为解决相国寺储气库钻井过程严重的井漏问题,试验了气体钻井技术。相储X1井、相储X2井、相储X3井和相储X4井,对4口井采用气体钻井和常规钻井效果进行对比。相储X1井采用气体钻井的钻速是聚磺钻井液钻速的1.5倍,聚磺钻井液井漏次数是气体钻井的4倍。相储X2井使用气体钻井,井漏次数为1次,平均机械钻速达5.92 m/h。相储X3井使用无固相钻井液进行钻井,井漏次数高达10次,平均机械钻速为1.93 m/h;使用气体钻井技术,

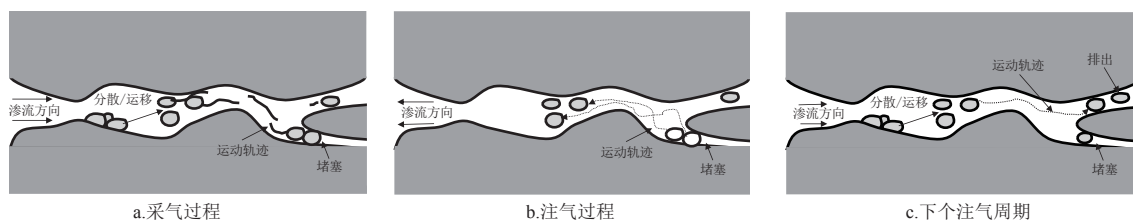


图2 注采过程微粒运移损害机理

Fig. 2 Particle migration damage mechanism in injection production process

表4 相国寺储气库老井及新钻井漏失情况统计
Table 4 Loss statistics of old wells and new wells in Xiangguosi gas storage

井号	井深(m)	层位	漏失情况
相储1	2 491.40	石炭系	钻井液密度 1.39 g/cm ³ , 漏速 24 m ³ /h
相6	0~785	须家河—嘉二段	漏失清水 10 112.6 m ³ , 漏失钻井液 551 m ³
相18	430~1 000	须家河—嘉一段	漏失清水 35 079 m ³
相30	31.39~850	须家河—嘉陵江	漏失清水 10 298 m ³

井漏次数为3次,平均机械钻速为3.35 m/h;使用聚合物钻井液钻井,井漏次数高达12次,平均机械钻速为2.13 m/h。相储X4井采用无固相钻井液进行钻井,井漏次数高达12次,平均机械钻速为2.57 m/h。通过气体钻井和常规钻井液钻井对比可知,采用气体钻井技术解决了相国寺储气库钻井过程中的井漏问题,极大地提高了钻井效率,缩短了储气库钻完井周期^[13,18]。

3.2 钻完井过程防漏堵漏技术

1) 物理颗粒暂堵技术

针对储气库储层低压易漏失的问题,物理颗粒暂堵技术可以有效进行堵漏。物理颗粒暂堵技术通过在钻井液中加入不同尺寸的颗粒材料,在近井带快速形成封堵层结构,防止工作液进入储层,后期通过酸化、射孔等手段解除由固相颗粒形成的封堵层,恢复裂缝通道导流能力。关于物理颗粒暂堵技术之前进行了大量研究,形成了裂缝性屏暂堵技术、裂缝—孔隙型暂堵技术、光谱型暂堵技术等,经过多年发展已形成适应致密储层、高渗储层以及高低压储层的屏蔽暂堵技术^[32-33]。

长庆气区储气库储层地质条件复杂,在钻完井过程存在以下技术难题:①储层压力极低(压力系数0.4~0.6)是诱发恶性井漏的主要原因;②水平井段长,井眼净化和降摩减阻难;③构造破碎,钻井过程井壁失稳风险高。为解决长庆气区储气库钻井过程的恶性井漏、钻进效率低、井壁稳定低等难题,陈在君等研发了具有良好的抑制性、润滑性和低固相复合盐暂堵性的工作液。通过井下取样测试,岩心平均渗透率损害率为12.78%,平均恢复率为87.22%,岩心损害率较小,恢复性良好,有效控制了工作液漏失,储层保护效果显著,实现了储层的高效钻完井,大大缩短了钻完井周期^[34]。

2) 绒囊液体堵漏技术

绒囊液体指利用表面活性剂之间的复配作用,在高黏度液体环境中形成特殊结构的囊泡。这种绒囊具有稳定时间长、良好的膨胀性和伸缩性,液体中不同尺度的囊泡,在压差的作用下进入储层漏失通道,通过堆积、变形封堵漏失通道,利用囊泡和岩石表面的摩擦力进一步强化绒囊的封堵能力。绒囊液体具有优良的性能,在储气库钻井和修井过程应用取得了很好的效果。

某衰竭气藏储气库,地层压力系数低于0.1,采用绒囊型修井液对S2X井和G2Y井进行修井作业。向S2X井和G2Y井分别注入绒囊修井液105 m³和200 m³,平均漏速较低,压井效果良好,修井结束后气举1 d,S2X井和G2Y井液体返排率分别为96%和95%,作业后产气能力恢复良好^[35]。

3.3 泡沫酸酸化技术

泡沫酸由酸、气体和起泡剂配成的特种酸,通过气泡贾敏效应的叠加,使酸液均匀地进入储层。泡沫酸具有以下优点:①气泡是主要成分,含液量少,在一定程度上减少了对储层的损害;②助排能力强;③作用范围大,泡沫酸黏度高、滤失量少与储层岩石反应速度慢。

美国中北部宾夕法尼亚Oriskany储气库井,经过多年注采存在多种储层损害,严重影响注采能力^[29]。储层损害主要有2个原因:①修井过程工作液大量漏失,造成储层损害;②注气过程,气体压缩机高负荷运行造成压缩机油以及润滑油进入储层,在多次注气过程中,会有大量的油类蒸汽进入储层,经过一系列物理化学作用,形成有机物沉淀。WH-75井和WH-72井在修井过程有大量的修井液漏失,储气库产能下降了约75%。WH-78井在多周期注气过程中,进入了大量压缩机油和润滑油,造成表皮系数损害,产能严重下降。对这3口井使用了泡沫酸进行酸化,取得了显著效果,其中WH-75井产能提高了206%,WH-72井产能提高了245%,WH-78井产能提高了148%(图3)^[29]。

3.4 注采过程高低压交变载荷储层保护技术

1) 库容参数优化设计技术

库容参数设计是指以储气库地质条件为基础,以库容量设计为核心,兼顾调峰配产需求确定储气库的运行参数,具体设计参数包括有效库容量、上下

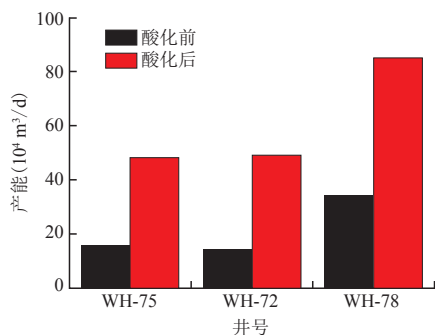


图3 Oriskany储气库井酸化前后产能变化

Fig. 3 Productivity change of Oriskany gas storage wells before and after acidizing

限运行压力、工作气量井网密度等^[9],合理的库容参数设计可以提高其注采能力、预防储层损害、延长使用寿命。胥洪成提出了复杂地质条件储气库库容参数的设计方法,以储气库地质条件为基础,综合考虑了储层物性、水侵、应力敏感性等,建立了预测库容量的数学模型,有效降低了建库风险,库容参数设计更趋于合理,高低压交变注采过程有利于储气库储层保护^[36]。

2) 控压注采方法

储气库运行过程具有强注强采、气体高速渗流的特点,在黏土矿物、石英等微粒含量较高的储层中,容易诱发微粒运移堵塞孔喉,导致储层损害。高新平等通过开展模拟储气库多周期运行过程的注采实验,确定发生明显储层损害的注采压差,以此为依据控制储气库井的注采气量和注采压差^[37]。相国寺储气库在多周期注采过程存在微粒运移诱发的储层损害,对相国寺储气库采用控压注气,将井口压力与地层压力差控制在2.7~3.9 MPa,注气过程平稳(图4),表明注气过程“顺畅”,无储层损害发生。X2井在使用控压采气前,将采气压差从2.7 MPa增加到5.5 MPa,但采气量却无增加,表明储层发生了一定的“堵塞”。采取控压采气后,将采气压差控制在4~8 MPa,对注采压差进行小幅度变化时,井口压力与地层压力表现出同升同降(图5),表明储层天然气可以顺利采出,提高了储气库的采气量和采气效率。

3.5 地质—工程一体化技术

储气库地质条件复杂、运行过程工况剧烈,存在建库周期长、钻井作业易漏失、工况剧烈注采风险大等难题,容易诱发储层损害。由于各个作业环节的储层损害具有累加性,施工过程储层保护措施不到

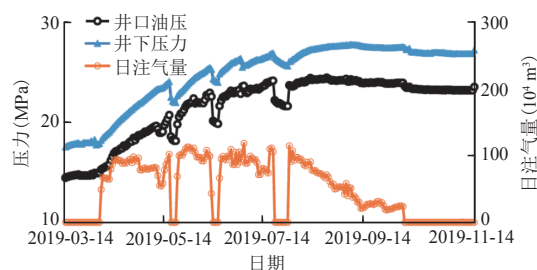
图4 相国寺储气库X1井控压注气曲线^[37]

Fig. 4 Pressure controlled gas injection curve of Well-X1 in Xiangguosi gas storage

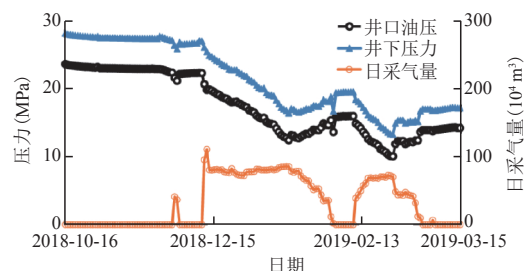
图5 相国寺储气库X2井控压采气曲线^[37]

Fig. 5 Pressure controlled gas withdrawal curve of Well-X2 in Xiangguosi gas storage

位会引起严重的储层损害,严重削弱储气库的注采效率和经济效益。通过构建地质工程一体化平台,以地质—储层综合研究为基础,以储层保护为核心,指导老井封堵、钻井作业方案设计、设计库容参数、优化注采工作制度,各个施工作业环节有机结合,最大限度降低储层损害,实现多部门、多学科有机结合,保障储气库高效快速建库、安全平稳运行^[38]。

4 气藏型储气库储层保护技术对策

储气库建设是关系国计民生的战略需求,具有生命周期长、运行高效安全的基本要求,储气库建设与运行是涉及多部门、多专业的天然气产业链关键工作。储层保护技术是关乎储库安全高效建设与运行的重要工作,在储库建设与运行过程中要以长期高效安全运行为目标,以全生命周期储层保护为重要抓手,贯彻储层保护理念,明确储层保护技术对象,强化储库工程作业系统工程观,研发储气库建设与运行阶段各作业环节储层保护技术及其配套措施。

4.1 超前战略规划储气库建设,优选储气库效益最大化的地质条件与工程技术

从管理层面提前布局,战略规划,协调气藏开发

工程与储气库选址建设的关系,减少气田开发后期使储层地质条件复杂化的工程作业,促使从开发后期气田向储气库建设平稳过渡,为储气库储层保护技术提供有利的地质对象,使储层保护技术更具针对性,也有利于实现储气库建设经济效益与社会效益的最大化。

4.2 贯彻全生命周期注采井储层保护理念,优化地质工程一体化钻完井技术

储气库工程地质条件复杂,注采井建井条件与工程要求也区别常规采气井,注采井建设要保证在多周期、强注强采、高应力扰动等苛刻的条件下长寿命高效安全运行,必须将地质条件和工程条件充分结合,开展气藏型储气库地质工程一体化研究、设计和施工,形成以地质工程一体化为核心的钻完井和多周期注采技术,实现安全快速建库,确保储气库安全高效运行。

4.3 强化储库工程作业系统工程观,研发储气库储层保护配套技术

一项好的工程技术需要考虑工程作业系统工程观:必须将本环节作业高质量、安全、经济地完成好,不能把上一个环节作业已取得的功效削弱、甚至彻底消除,尽可能为下一个环节作业创造良好的施工(井眼及井周地层)条件,至少不设置明显障碍,导致后续作业难度增加。常规油气藏储层保护理论与技术研究已有近百年的历史,储层保护理论技术已经逐步成熟,但储气库储层保护技术的研究重视程度不够,储层保护配套技术不到位。应该从以下5个方面加快研究,实现储气库储层保护,为安全快速建库、平稳高效注采提供技术支撑。

1) 储气库钻完井和多周期注采过程储层损害预测技术。充分分析研究储气库建设前储层工程地质特征,明确钻完井、固井、修井、注采等各个环节潜在储层损害因素,当前储气库储层保护技术与理论还不够完善,需要进一步研究,形成系统化的理论技术体系。

2) 低密度易解除钻完井液与修井液技术。储气库建库前储层压力衰竭,在钻完井和修井过程作业压差大,造成严重的储层损害。鉴于储气库储层地质条件比较清楚,推荐应用气体欠平衡钻井技术,但要研究与气体钻井相配套的完井技术,尤其是完

井液。目前国内外形成了针对储气库低压特点的气体欠平衡、凝胶型修井液技术等,但种类单一针对性强,不具有普适性。要研发快速封堵储层孔缝的低固相低密度可解除或自解除的屏蔽暂堵钻完井液与修井液,并形成适合多种复杂地质条件的低压、超低压钻完井和修井过程工作液设计方法。

3) 低固相高强度防漏堵漏钻完井液技术。储气库储层具有低压超低压的特点,钻完井液漏失难以控制。现有防漏堵漏技术很难适应大尺寸井眼、压力严重衰竭的储层段,大尺寸井眼增加防漏堵漏成本。如常用的桥接堵漏技术的堵漏浆需要高含固相,如果要保证高强度,就必须要有有一定侵入深度,这导致完井后侵入的固相解除较为困难。完井后未解除的固相在注采阶段也有可能侵入更深,也有可能在大压差强采条件下随着高速气流出,为井口及地面管网带来严重安全隐患。

4) 储气库安全高效注采的储层保护技术。储气库运行具有工况剧烈、多周期循环注采和运行周期长的特点,在剧烈交变载荷及热效应双重作用下,微粒运移、应力敏感、出砂等储层损害问题突出,严重的将造成地质构造失稳、井完整性失效,导致天然气泄漏、燃烧、爆炸等事故。应根据储气库地质、井况条件和调峰需求,优化库容参数设计和确定合适的注采工作制度,确保储气库平稳高效运行。

5) 储气库储层损害诊断与解除技术。储气库储层经历了气田开发阶段一系列作业环节,而且又经历储气库建设与运行阶段的各个作业环节,储层损害具有累计性和叠加性,储气库储层损害更具复杂性。因此,储气库储层损害预测与诊断不仅要考虑储气库建设与运行过程,还要追溯到气田开发阶段,同样储层损害解除技术也要考虑气田开发阶段与储气库建设运行阶段的储层损害。

5 结论

1) 气藏型储气库储层压力低,钻完井过程工作液漏失,引起固相侵入、流体敏感、应力敏感等损害,采用低密度、易解除钻完井液,并提高封堵承压能力,实现安全高效钻完井。

2) 储气库运行具有多周期、强注强采、交变载荷的特点易诱发应力敏感、微粒运移和出砂等储层损害,通过注采参数与库容参数优化设计,实现储气

库安全平稳运行。

3) 构建储气库地质工程一体化平台,提高储气库储层损害预测和诊断技术、升级完善枯竭储层钻完井与修井技术、发展基于储层保护的储气库运行制度,形成地质工程一体化储层保护技术是今后储气库储层保护发展的重要方向。

4) 储气库储层保护需要提前战略规划、强化系统工程观、升级完善全生命周期储层保护及其配套技术,储层损害预测、诊断、控制与解除技术既要考虑储气库建设运行阶段,又要考虑气田开发阶段。

参考文献

- [1] 罗东晓,赵勤.地下储气库技术的应用与展望[J].煤气与热力,2008,28(7):54-56.
LUO Dongxiao, ZHAO Qin. Application and prospect of underground gas storage reservoir technology[J]. Gas & Heat, 2008, 28(7): 54-56.
- [2] 孙军昌,胥洪成,王皆明,等.气藏型地下储气库建库注采机理与评价关键技术[J].天然气工业,2018,38(4):138-144.
SUN Junchang, XU Hongcheng, WANG Jieming, et al. Injection-production mechanisms and key evaluation technologies for underground gas storages rebuilt from gas reservoirs[J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(4): 138-144.
- [3] 马新华,丁国生,何刚,等.中国天然气地下储气库[M].北京:石油工业出版社,2018.
MA Xinhua, DING Guosheng, HE Gang, et al. Underground natural gas storage in China[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2018.
- [4] 丁国生,魏欢.中国地下储气库建设20年回顾与展望[J].油气储运,2020,39(1):25-31.
DING Guosheng, WEI Huan. Review on 20 years' UGS construction in China and the prospect[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2020, 39(1): 25-31.
- [5] YEAGER V J, SHUCHART C E. Acidizing gas storage wells [C]// Paper SPE-39225-MS presented at the SPE eastern regional meeting, October 22-24, 1997, Lexington, Kentucky.
- [6] BARKER K M, GERMER J W. Formation damage in gas storage wells[C]// Paper SPE-127696-MS presented at the SPE international symposium and exhibition on formation damage control, February 10-12, 2010, Lafayette, Louisiana, USA.
- [7] 马新华,郑得文,申瑞臣,等.中国复杂地质条件气藏型储气库建库关键技术与实践[J].石油勘探与开发,2018,45(3):489-499.
MA Xinhua, ZHENG Dewen, SHEN Ruichen, et al. Key technologies and practice for gas field storage facility construction of complex geological conditions in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(3): 489-499.
- [8] 吴建发,钟兵,冯曦,等.相国寺石炭系气藏改建地下储气库运行参数设计[J].天然气工业,2012,32(2):91-94.
WU Jianfa, ZHONG Bing, FENG Xi, et al. Operation parameter design of the Xiangguosi underground gas storage based on the carboniferous gas reservoir[J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(2): 91-94.
- [9] 郑得文,胥洪成,王皆明,等.气藏型储气库建库评价关键技术[J].石油勘探与开发,2017,44(5):794-801.
ZHENG Dewen, XU Hongcheng, WANG Jieming, et al. Key evaluation techniques in the process of gas reservoir being converted into underground gas storage[J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(5): 794-801.
- [10] 王秀玲.中原油田文96储气库固井技术[J].钻井液与完井液,2013,30(4):56-58.
WANG Xiuling. Cementing technology of Wen96 gas storage wells in Zhongyuan oilfield[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2013, 30(4): 56-58.
- [11] 曹洪昌,王野,田惠,等.苏桥储气库群老井封堵浆及封堵工艺研究与应用[J].钻井液与完井液,2014,31(2):55-58.
CAO Hongchang, WANG Ye, TIAN Hui, et al. Plugging of old wells for building UGS in Suqiao[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2014, 31(2): 55-58.
- [12] 陈显学,温海波.辽河油田双6储气库单井采气能力评价[J].新疆石油地质,2017,38(6):715-718.
CHEN Xianxue, WEN Haibo. Evaluation of single gas well production capacity of Shuang-6 gas storage in Liaohe oilfield [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2017, 38(6): 715-718.
- [13] 谭茂波,何世明,范兴亮,等.相国寺地下储气库低压裂缝性地层钻井防漏堵漏技术[J].天然气工业,2014,34(1):97-101.
TAN Maobo, HE Shiming, FAN Xingliang, et al. Lost circulation prevention and plugging technology for test wells at low pressure fractured formation of the Xiangguosi underground gas storage[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(1): 97-101.
- [14] 李一峰,李永会,高奇,等.呼图壁储气库紫泥泉子组紫二砂层组储集层新认识[J].新疆石油地质,2014,35(2):182-186.
LI Yifeng, LI Yonghui, GAO Qi, et al. New understanding of reservoir of Z2 sand layer of Ziniquanzi formation in Hutubi gas storage[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2014, 35(2): 182-186.
- [15] 何顺利,门成全,周家胜,等.大张坨储气库储层注采渗流特征研究[J].天然气工业,2006,26(5):90-92.
HE Shunli, MEN Chengquan, ZHOU Jiasheng, et al. Study on percolation characteristics of reservoirs' injection-production in Dazhangtuo[J]. Natural Gas Industry, 2006, 26(5): 90-92.
- [16] 钟福海,李合龙,韩俊杰.大张坨地下储气库注采井固井实践[J].石油钻采工艺,2000,22(6):11-13.
ZHONG Fuhai, LI Helong, HAN Junjie. Cementing of the injection and production wells of underground gas storage in Dazhangtuo[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2000, 22(6): 11-13.
- [17] 孟凡彬,王峰.板桥凝析气田地下储气库建造技术[J].石油规划设计,2006,17(2):20-23.
MENG Fanbin, WANG Feng. Construction technology for underground storage park in Banqiao condensate gas reservoir [J]. Petroleum Planning & Engineering, 2006, 17(2):20-23.
- [18] 孙海芳.相国寺地下储气库钻井难点及技术对策[J].钻采工艺,2011,34(5):1-6.
SUN Haifang. Drilling challenges and technical solution for Xiangguosi underground gas storeroom[J]. Drilling &

- Production Technology, 2011, 34(5): 1-6.
- [19] YAN X P, XU C Y, KANG Y L, et al. Mesoscopic structure characterization of plugging zone for lost circulation control in fractured reservoirs based on photoelastic experiment[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2020, 79: 1-14.
- [20] LIN C, KANG Y L, XU C Y, et al. An engineered formation-damage-control drill-in fluid technology for deep-fractured tight-sandstone oil reservoir in northern Tarim Basin[J]. SPE Drilling & Completion, 2020, 35(1): 26-37.
- [21] 王业众,康毅力,游利军,等.裂缝性储层漏失机理及控制技术进展[J].钻井液与完井液,2007,24(4):74-77.
WANG Yezhong, KANG Yili, YOU Lijun, et al. Progresses in mechanism study and control: mud losses to fractured reservoirs [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2007, 24(4): 74-77.
- [22] 范翔宇,夏宏泉,陈平,等.钻井液固相侵入深度的计算方法研究[J].天然气工业,2006,26(3):75-77.
FAN Xiangyu, XIA Hongquan, CHEN Ping, et al. Study on calculating method of invasion depth of mud phase[J]. Natural Gas Industry, 2006, 26(3): 75-77.
- [23] YOU L J, KANG Y L, CHEN Z X, et al. Wellbore instability in shale gas wells drilled by oil-based fluids[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2014, 72: 294-299.
- [24] KANG Y L, XU C Y, YOU L J, et al. Comprehensive evaluation of formation damage induced by working fluid loss in fractured tight gas reservoir[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2014, 18: 353-359.
- [25] 张振华,周志世,邹盛礼.裂缝性碳酸盐岩油气藏保护方法[J].钻井液与完井液,1999,16(5):33-37.
ZHANG Zhenhua, ZHOU Zhishi, ZOU Shengli. Technologies of formation damage prevention in fractured carbonate reservoirs [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 1999, 16(5): 33-37.
- [26] YEAGER V J, BLAUCH M E, BEHENNA F R, et al. Damage mechanisms in gas-storage wells[C]// Paper SPE-38863-MS presented at the SPE annual technical conference and exhibition, October 5-8, 1997, San Antonio, Texas.
- [27] GUOYNES J, AZARI M, SQUIRE K, et al. Damage-specific stimulation techniques provide maximum deliverability improvement in four gas-storage reservoirs: A case study[C]// Paper SPE-54726-MS presented at the SPE European international formation damage conference, May 31-June 1, 1999, Hague, Netherlands.
- [28] 游利军,孟森,高新平,等.碳酸盐岩储气库储层微粒运移对酸化的响应[J].断块油气田,2020,27(5):676-680.
YOU Lijun, MENG Sen, GAO Xinpings, et al. Response of fines migration to acidizing in carbonate underground gas storage[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2020, 27(5): 676-680.
- [29] FONTAINE J S, ROUZE S G. Deliverability enhancement of high-volume Oriskany gas storage wells using foamed acid as a damage removal medium[C]// Paper SPE-51037-MS presented at the SPE Eastern Regional Meeting, November 9-11, 1998, Pittsburgh, Pennsylvania, USA.
- [30] 周道勇,郭平,杜建芬,等.地下储气库应力敏感性实验研究[J].天然气工业,2006,26(4):122-124.
ZHOU Daoyong, GUO Ping, DU Jianfen, et al. Laboratory researches on stress sensibility of underground gas storage[J]. Natural Gas Industry, 2006, 26(4): 122-124.
- [31] 罗平亚,康毅力,孟英峰.我国储层保护技术实现跨越式发展[J].天然气工业,2006,26(1):84-87.
LUO Pingya, KANG Yili, MENG Yingfeng. China's reservoir protection technologies develop in leaps[J]. Natural Gas Industry, 2006, 26(1): 84-87.
- [32] YAN X P, KANG Y L, XU C Y, et al. Fracture plugging zone for lost circulation control in fractured reservoirs: multi-scale structure and structure characterization methods[J]. Powder Technology, 2020, 370: 159-175.
- [33] 徐同台,陈永浩,冯京海,等.广谱型屏蔽暂堵保护油气层技术的探讨[J].钻井液与完井液,2003,20(2):39-41.
XU Tongtai, CHEN Yonghao, FENG Jinghai, et al. Discussion on the general-purpose temporary shield plugging technology in protecting hydrocarbon reservoir[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2003, 20(2): 39-41.
- [34] 陈在君,陈恩让,崔贵涛,等.长庆气区储气库超低压储层水平井钻井液完井液技术[J].天然气工业,2012,32(6):57-59.
CHEN Zaijun, CHEN Enrang, CUI Guitao, et al. Drilling and completion fluid technology in the horizontal well drilling of the Changqing ultra-low-pressure gas storage reservoirs[J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(6): 57-59.
- [35] 沈云波,于晓明,刘锋,等.衰竭气藏储气库绒囊修井液暂堵技术评价与应用[J].钻采工艺,2020,43(4):112-114.
SHEN Yunbo, YU Xiaoming, LIU Feng, et al. Application of dynamic temporary plugging technology for fuzzy-ball workover fluid in injection-production wells of depleted gas reservoirs[J]. Drilling & Production Technology, 2020, 43(4): 112-114.
- [36] 胥洪成,王皆明,屈平,等.复杂地质条件气藏储气库库容参数的预测方法[J].天然气工业,2015,35(1):103-108.
XU Hongcheng, WANG Jieming, QU Ping, et al. A prediction model of storage capacity parameters of a geologically-complicated reservoir-type underground gas storage (UGS)[J]. Natural Gas Industry, 2015, 35(1): 103-108.
- [37] 高新平,彭钧亮,韩慧芬,等.相国寺储气库储层微粒运移伤害实验研究及应用[J].钻采工艺,2020,43(3):46-49.
GAO Xinpings, PENG Junliang, HAN Huifen, et al. Experimental research on the damage caused by particle migration in Xiangguosi gas storage[J]. Drilling & Production Technology, 2020, 43(3): 46-49.
- [38] 胡文瑞.地质工程一体化是实现复杂油气藏效益勘探开发的必由之路[J].中国石油勘探,2017,22(1):1-5.
HU Wenrui. Geology-engineering integration: a necessary way to realize profitable exploration and development of complex reservoirs[J]. China Petroleum Exploration, 2017, 22(1): 1-5.

(编辑 黄颖)