

◀专家视点▶

doi:10.11911/syztjs.2020041

我国地下储气库钻井完井技术现状与发展建议

袁光杰¹, 张 弘^{1,2}, 金根泰¹, 夏 焱¹

(1. 中国石油集团工程技术研究院有限公司, 北京 102206; 2. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083)

摘 要: 地下储气库是目前世界上最主要的天然气储存方式和调峰手段, 具有存储量大、储气成本低、安全系数大等优点, 而钻井完井工程是地下储气库建设中耗资最大、历时最长的环节, 且井筒完整性直接影响地下储气库长期运营的安全性和可靠性。目前, 我国已建成枯竭气藏储气库和盐穴储气库共 32 座, 初步形成了我国储气库特色钻井完井技术体系, 包括枯竭气藏储气库的井型优化设计、超低压地层防漏堵漏与储层保护、韧性水泥浆固井、大流量注采完井和老井评价及再利用, 盐穴储气库钻井完井、建腔及腔体形态控制、老腔改造利用技术和注采井筒完整性等特色技术, 但与国外相比, 在井眼尺寸、井型设计、工艺技术水平等方面均存在较大的差距, 需要开展枯竭气藏储气库大井眼水平井钻井完井、盐穴储气库丛式定向井钻井、含水层储气库钻井完井和注采井筒完整性等技术攻关, 形成完善的地下储气库钻井完井技术体系, 以满足我国储气库高质量发展及国家能源战略的需求。

关键词: 地下储气库; 钻井完井; 枯竭气藏; 盐穴; 技术现状; 发展建议

中图分类号: TE34

文献标志码: A

文章编号: 1001-0890(2020)03-0001-07

Current Status and Development Suggestions in Drilling and Completion Technology of Underground Gas Storage in China

YUAN Guangjie¹, ZHANG Hong^{1,2}, JIN Gentai¹, XIA Yan¹

(1. CNPC Petroleum Engineering Technology Research Institute Co., Ltd., Beijing, 102206, China; 2. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing, 100083, China)

Abstract: As one of the most important facilities in natural gas storage and peak regulation in the world, underground gas storage (UGS) shows the advantages of large storage capacity, low cost and high safety factor. Because wellbore integrity directly affects the safety and reliability of the long-term operation of UGS, drilling and completion are the most expensive and time consuming process in the construction of UGS. Up to now, China has built 32 depleted gas reservoir and salt-cavern UGSs in total and has preliminarily formed characteristic technical systems in UGS drilling and completion, including well type optimization design for depleted gas reservoir UGS, prevention and control of circulation loss and reservoir protection in ultra-low pressure formation, toughness slurry cementing, large flow rate injection and production completion, existing well evaluation and reuse. For salt-cavern UGS, those technical systems include drilling and completion, cavity construction and cavity shape control, existing cavern modification and utilization, injection and production wellbore integrity, etc. However, there still exist large gaps comparing with foreign counterparts in terms of hole size, well type design and technological level. Researches on horizontal well with large hole size in depleted gas reservoir UGS, directional cluster well drilling technology in salt-cavern UGS, drilling and completion of aquifer UGS, and injection and production wellbore integrity technology are required to form a complete UGS drilling and completion technical system, and to meet the needs of realizing high-quality development of UGS and the national energy strategy of China.

Key words: underground gas storage (UGS); drilling and completion; depleted gas reservoir; salt-cavern; technical status; development suggestions

地下储气库是把从天然气田采出的天然气重新注入地下可存储气体的空间而形成的一种人工气田或气藏, 具有存储量大、储气成本低、安全系数大等优点, 主要建设在城市附近, 以保障天然气用户的稳定供气与调峰需求。根据存储空间的不同, 地下储气库主要有枯竭气藏储气库、盐穴储气库、含水层储气库及废弃矿坑储气库等 4 种类型, 工作

收稿日期: 2020-03-15。

作者简介: 袁光杰 (1974—), 男, 河北邢台人, 1998 年毕业于西南石油学院机械设计专业, 2001 年获西南石油学院油气井工程专业硕士学位, 2004 年获上海交通大学机械设计及及其自动化专业博士学位, 教授级高级工程师, 主要从事地下储库建库工程、煤层气钻井完井技术等方面的研究工作。E-mail: ygjdr@cnpcc.com.cn。

基金项目: 中国石油天然气集团公司课题“储气库优快钻井完井技术与装备研究” (编号: 2019B-3204) 资助。

气量占比分别为83%, 5%, 12%和0.03%。枯竭气藏储气库利用储层中砂岩颗粒之间的孔隙及多孔碳酸盐岩储存天然气, 具有储气量大、经济性好、气密性高的优点, 是应用最为广泛的一种储气库。1915年, 加拿大在安大略省 Welland 气田进行了首次储气试验, 建成了世界最早的枯竭气藏储气库; 1959年, 苏联建成世界第一座盐穴储气库; 1958年, 美国在芝加哥肯塔基建成世界上第一座含水层地下储气库。目前全球共建成储气库715座, 约230 000口储气库井, 其中美国储气库数量最多, 共418座, 工作气量 $1\,354\times 10^8\text{ m}^3$, 相当于美国年天然气消费总量的17.9%^[1]。

储气库井的井筒是连接地下储气设施和地面输气管道的唯一通道, 伴随储气库整个生命周期。为此, 建成一个寿命长、气密性高的高质量井筒, 对于减少储气库泄漏、提高储气库运营质量和使用效率至关重要, 这对储气库钻井完井技术提出了较高的要求。我国地下储气库建设起步晚, 但发展迅速, 经过20多年的努力, 目前储气库建设数量和规模已经位居世界前列, 初步形成了复杂地质条件下储气库选址及建库技术。其中, 储气库钻井完井技术取得了长足进步, 攻克了交变载荷下水泥环长期密封、大压差下防漏堵漏和储层保护、大流量注采完井等技术难题, 形成了较完整的储气库特色钻井完井技术体系, 但与美国、俄罗斯等发达国家

相比还存在一定差距^[2-3]。为此, 笔者总结了我国地下储气库钻井完井技术现状, 分析了面临的形势, 提出了储气库钻井完井技术的发展建议, 以期为推动我国储气库钻井完井工程发展、提高储气库建设水平提供借鉴。

1 国内储气库建设概况

我国从20世纪90年代开始建设地下储气库, 先后在大港、华北、金坛、刘庄、云应、平顶山、麻丘、王场、上法、安宁、新疆、辽河、川渝气区、长庆等地区开展了储气库建库技术研究与实践^[4-5]。截至2019年底, 我国已建成32座地下储气库, 包括枯竭气藏储气库和盐穴储气库2种类型, 其中枯竭气藏储气库24座, 设计库容量 $457.7\times 10^8\text{ m}^3$, 形成年调峰能力 $147.0\times 10^8\text{ m}^3$ 。目前, 中国石油、中国石化还有多座储气库正在建设或待建。

我国枯竭气藏储气库目的层为碳酸盐岩和砂岩, 储层埋藏深, 压力系数低, 老井多且井况复杂。目前我国枯竭气藏储气库已钻注采井289口(其中水平井43口), 老井利用56口, 正钻井10口, 总计355口井, 基本情况见表1。我国盐穴储气库目的层为层状盐层, 盐岩品位低, 夹层多且厚, 部分储气库目的层埋藏较深, 已钻盐穴注采井119口, 已有溶腔改造利用8口, 总计127口井, 基本情况见表2。

表1 我国枯竭气藏储气库钻井情况

Table 1 Drilling situation in depleted gas reservoir UGS in China

公司	储气库	垂深/m	完钻注采井/口		正钻井/口	老井利用/口	合计/口
			总数	水平井数			
中国石油	新疆呼图壁	3 600	39	10	2	0	41
	大港板南库群(3座)	3 000	8	1	0	1	9
	大港板桥库群(6座)	2 300~3 200	70	1	0	2	72
	华北京58库群(3座)	1 800~3 100	22	3	0	0	22
	华北苏桥库群(5座)	3 500~5 300	18	8	1	21	40
	西南相国寺	2 600	13	2	3	2	18
	辽河双六	2 500	22	12	4	2	28
	长庆	3 475	6	6	0	4	10
	江苏刘庄	1 300	11	0	0	0	11
中国石化	文96	2 700	14	0	0	18	32
	文23	2 975	66	0	0	6	72

2 我国储气库钻井完井技术现状

在储气库建设与运行实践中, 我国已初步形成

较为完整的储气库钻井完井技术体系, 包括枯竭气藏储气库的井型及井身结构优化设计、超低压地层防漏堵漏与储层保护、韧性水泥浆固井、大流量注采完井和老井评价及再利用等, 盐穴储气库的钻井

表 2 我国盐穴储气库钻井情况

Table 2 Drilling situation in salt-cavern UGS in China

公司	区块	垂深/m	已钻注采气井/口	老井利用/口	合计/口
中国石油	金坛	1 000	57	5	62
	云应	700	4	0	4
	淮安	1 400	3	0	3
	平顶山	2 000	4	0	4
	楚州	2 200	3	0	3
中国石化	金坛	1 000	34	0	34
	潜江	2000	4	0	4
盐化公司	金坛	1 000	10	3	13

完井设计、建腔及腔体形态控制、已有溶腔改造利用和注采井筒完整性等特色技术。

2.1 枯竭气藏储气库钻井完井技术

我国枯竭气藏储气库储层平均埋深 3 120 m, 最深达 5 399 m, 在长期开采后地层压力系数较低(最低可达 0.1), 钻井过程中易发生井漏并导致储层污染; 在大流量注采工况下, 储气库注采井筒会承受大压差交变载荷, 极易导致固井水泥环破裂而出现天然气泄漏^[6-8], 且会出现管柱冲蚀、地层出砂等问题而影响注采效果。针对以上技术难点, 通过技术攻关与实践, 初步形成了枯竭气藏储气库钻井完井技术体系。

1)井型及井身结构优化技术。针对储气库井筒完整性要求高和大流量注采的工况条件, 在精细化地质描述和地层压力精确预测的基础上, 形成了以丛式定向井、大井眼、储层专打、长寿命为特点的井型及井身结构优化技术: 井型主要采用定向井、直井和丛式定向井, 井身结构以三开、四开为主, 如辽河油田双六和大港油田板南的储气库井均采用了三开井身结构^[9], 呼图壁储气库井多采用四开井身结构; 为满足大流量注采的要求, 储气库井的井眼尺寸比常规开发井大一级, 生产套管直径多为 177.8 mm、部分为 244.5 mm, 油管直径多为 114.3 mm、部分为 177.8 mm。表层套管封堵地表浅水层, 技术套管封堵孔隙压力不同的地层或易塌易漏等复杂地层, 储层采用专打的方式, 生产套管采用气密封扣, 对管柱材质要求高。发布了《地下储气库注采管柱选用与设计推荐做法》(SY/T7370—2017)和《枯竭型气藏储气库钻井技术规范》(SY/T7451—2019)等石油天然气行业标准, 形成了储气库钻井完井标准体系, 有力保障了 200 余口注采井的建井质量。

2)超低压地层防漏堵漏及储层保护技术。针对储气库地层压力系数低、钻井及固井过程中易漏失、储层保护难度大的难题, 形成以硅基防塌、双膜屏蔽、胺基、低密度聚磺及超细碳酸钙等钻井液为代表的钻井液技术, 气体钻井技术和承压堵漏技术。非储层段钻进中以防塌、防漏堵漏为主, 为提高井眼质量采用气体钻井技术钻进上部恶性井漏井段, 为提高固井质量应用了承压堵漏技术; 储层段以保护储层为主, 在钻井、固井和完井过程中均采取相应的储层保护措施^[10-13]。例如, 在苏桥储气库钻井中, 实现了井底压差高达 30 MPa 苛刻工况下的安全钻进; 新疆呼图壁储气库应用钾钙基双膜屏蔽钻井液、长庆陕 224 储气库应用可循环微泡钻井液均实现了低压地层的安全钻进及储层的有效保护。

3)井筒长效密封固井配套技术。针对交变载荷条件下常规固井水泥环脆性大、易破碎的问题, 形成了深井、大井眼、低压地层等条件下以韧性水泥浆体系为核心的井筒长效密封固井技术, 包括以承压堵漏为主的井眼综合准备技术、提高顶替效率技术、套管串优化设计技术^[14-16]、套管密封完整性检测技术、韧性水泥浆性能优化技术、常规 CBL+VDL 结合 IBC 固井质量评价技术等^[17-18]。研制了储气库井固井新材料和专用装备, 例如中低高温 DRE 韧性水泥浆体系^[19]、DRY 冲洗隔离液^[20]、油套管螺纹连接气密封检测装备等。韧性水泥石抗压强度超过 50 MPa, 弹性模量相比常规水泥石降低 30%~50%, 抗温 200 ℃、最大适应固井温差 100 ℃。该固井配套技术在苏桥、相国寺等储气库推广应用 27 口井, 与国外固井技术相比, 固井成本降低 80%, 特别是在苏桥储气库世界最深(井深 5 399 m)的储气库井进行了成功应用, 固井质量合格率达到 100%。

4)大流量注采完井技术。针对大流量注采条件下的管柱冲蚀、地层损伤导致出砂等问题, 进行了完井方式优化和注采管柱设计研究, 形成了大流量注采完井技术: 储气库生产压差和注采管柱优化设计, 出砂预测模型和不同材质管柱的临界冲蚀系数图版的修正, 充分发挥储层的供给能力和井的注采能力; 采用管柱分段试压的方法, 由储气库运行压力和管柱强度联合确定试压值; 针对储层特点, 采用套管射孔完井或筛管完井^[21-24], 基于储气库完整性的要求, 储层原则上不进行压裂改造, 同时, 油套环空注入保护液或部分氮气。该技术在呼图壁储气库生产压差调整中应用 42 井次, 未见异常出砂和出水, 单井日调峰能力平均增加 20% 以上。

5)老井封堵及再利用技术。对于枯竭气藏中存在的已运行或报废多年的老井,若能加以改造成为生产井或监测井,不但解决了其成为储气库气体泄漏潜在通道和影响储气库完整性等问题,还将大大节约建库成本,提高建库效率。通过油管、套管柱完整性和水泥环完整性检测与评价技术攻关研究,已初步形成了以反向试压和井筒完整性评价为特点的老井评价、封堵及再利用技术和标准流程,并在30口老井再利用、160口老井封堵作业中得到成功应用。

2.2 盐穴储气库钻井完井技术

我国盐穴储气库井,主要采用 $\phi 339.7$ mm技术套管+ $\phi 244.5$ mm生产套管+ $\phi 177.8$ mm注采管柱的井身结构,与国外相比井眼直径普遍较小,盐穴储气库的建造速度和应急能力受到一定限制^[4]。但经过较长时间的技术攻关与实践,目前已初步形成了包括钻井完井设计、盐穴造腔及腔体形态控制、井筒及腔体气密封评价等特色技术的盐穴储气库钻井完井技术体系。

1)钻井完井设计方法。针对盐穴储气库井需同时满足水溶造腔和大排量注采的需求,形成了自下而上的井身结构设计方法,既可满足水溶造腔作业时安全起下内外管柱、管柱环空满足大排量造腔的要求,也能保证注采管柱及附件的安全入井及安装;针对储气库长期安全运行和长寿命(30~50年)的需求,提出了套管材质选用和强度安全系数的设计原则;针对复杂地面和地质条件下盐岩资源利用率低的难题,初步形成了“直—增—稳—降—直”的定向井井眼轨道设计方案,并发布了盐穴型储气库钻井完井技术规范。

2)固井工程技术。针对低温条件下盐水水泥浆固井质量差的难题,研发了DRB-3S+JSS低温抗盐水泥浆体系^[25],并制定了复杂井眼提高顶替效率的技术措施^[26]、上部地层综合防漏措施,形成了大尺寸复杂井眼条件下盐穴储气库井水泥浆体系优选及固井配套技术;针对井底与大溶腔连通的采卤井,全井套铣后生产套管固井难度大的问题,通过向井筒中投入铅球在盐腔瓶颈处制造人工井底的方法,形成了已有采卤井无井底固井技术。

3)盐穴造腔及腔体形态控制技术。针对国内层状盐层薄且夹层多、溶腔形状控制难的问题,采用正反循环造腔技术,采取循环参数设计及控制、管柱调整、油垫控制、顶板保护等措施,形成了盐穴单井造腔及腔体形态控制配套技术,并研制了井下工具、编制了设计软件^[27-28]。在造腔和投产后,应用

声纳测腔手段对溶腔的形状与体积进行检测与评价。在溶腔过程中采取避免水击、压力激动和盐岩蠕变的措施以保持腔体的稳定。

4)溶腔评价及改造技术。针对国内盐岩行业存在大量已有溶腔资源未得到有效利用的问题,在满足地质力学稳定性要求的基础上,通过评价已有溶腔的腔体形态、盐顶剩余厚度、腔体底板、腔群间距和运行稳定性,形成了已有溶腔筛选评价方法和标准,并遵循“弃井用腔”的原则^[29],形成了全井套铣和封老井钻新井两种已有溶腔井筒改造技术^[30-31]。

5)井筒及腔体气密封性评价技术。生产套管固井结束后,在造腔前期实施全井筒气密试验,注气排卤之前,在造腔结束后进行腔体气密试验。针对储气库投产前密封性评价的要求,以空气或氮气为介质,结合界面测井技术,提出了综合考虑井筒气水界面深度变化和气体泄漏率随时间的变化趋势为一体的密封性评价标准,形成了盐穴储气库井筒及腔体密封性检测工艺和配套技术,发布了盐穴储气库井筒及腔体密封性检测评价技术规范。

6)注采完井及排卤技术。针对注采完井和注气排卤时间跨度长(3~4个月)、风险高的问题,形成了盐穴注采完井及排卤技术^[32],包括注采完井和排卤管柱结构优化设计、排卤工艺、排卤管柱结晶结垢预防、不压井起出排卤管柱等技术。注采和注气排卤管柱主要由气密封套管、井下安全阀、流动短节、密封锚、封隔器和坐落接头及引鞋组成。排卤管柱主要由气密封油管和坐落接头组成,当注气排卤结束后,用钢丝下入堵塞器封堵排卤管,应用欠平衡作业不压井起出排卤管柱。

3 储气库钻井完井面临的形势

据国际天然气联盟(IGU)统计,全球地下储气库工作气量占天然气年消费量的12%,截至2018年底,我国储气库工作气量为 120×10^8 m³,占天然气年消费量的4.3%,根据国家能源规划,我国将在2023年形成不低于当年消费量10%的储气能力。因此,我国将迎来新一轮的大规模储气库建设,储气库钻井完井技术的发展面临难得的机遇,也面临着诸多技术挑战。

1)枯竭气藏储气库钻井完井工程急需降本增效。目前,我国储气库井以直井、丛式定向井为主,满足储气库大流量注采需求的大井眼水平井和多分支井面临钻井风险大、成本高等问题;注采井寿命

要求高,井身结构复杂,钻井过程中存在井眼坍塌、卡钻及漏失严重等问题;储气库储层埋深普遍超过2 500 m,经过长时间的开发后,储层压力系数很低,且纵向存在多套压力体系,储层保护难度很大,例如相国寺储气库在钻进长兴组、茅口组地层时出现井漏与垮塌并存的问题^[33];另外,监测井存在井身结构针对性不强、成本较高的问题。

2)亟需形成枯竭气藏储气库老井评价再利用规范。枯竭气藏储气库库址普遍存在老井,井况复杂,部分已封堵老井出现井口带压现象,个别老井封堵难度大,且井身质量检测和评价等没有相应的行业标准,直接影响到储气库的建设规划与质量。因此,亟需形成一套评价、封堵或再利用工艺技术 & 标准规范来指导现场作业。

3)盐穴储气库建库时间长,腔体形态难以控制。盐穴储气库造腔过程中均通过水溶盐层的方式形成洞穴,溶蚀过程缓慢、成本高。排卤造腔过程中,高矿化度的卤水由井筒从地下上返至地表时,由于温度压力的变化,溶解在水中的盐析出并附着在造腔管壁上,易形成结晶而堵塞管柱,从而严重影响造腔进度。另外,由于地下盐层岩性复杂,水溶造腔过程中难以控制地下不同方位盐岩的溶解速度,使得腔体形态难以预测和控制,为造腔带来很多困难。

4)已有老腔改造利用技术难度大。已有老腔改建储气库具有建库速度快、成本低、需求量大的特点,但采卤老腔存在套管变形及腐蚀严重、固井质量差、井筒及井口密封性不良、井筒管柱内径小等问题。现有采卤井不具备直接转为注采气井的条件,在改建过程中,老井封堵难以保证密封质量,而钻新井易造成“一腔多眼”的问题,不利于腔体后期稳定,老腔改造面临的挑战巨大。

5)井筒完整性检测、评价和处理亟需完善。注采井的井筒完整性贯穿设计、施工、运行和废弃整个过程,国外已形成了电磁、声波、光学和声纳测腔等系列检测技术及配套检测装备,并开展了大量储气库井筒完整性的检测评价工作,检测手段和评价技术相对成熟。我国已初步建立了储气库完整性管理体系框架,但缺乏完整的管理体系、技术支撑 & 具有自主知识产权的系列检测工具。

4 储气库钻井完井技术发展建议

目前,国外枯竭气藏储气库井逐渐推广应用丛

式井、水平井、多分支井,普遍采用大直径井眼,通常采用气密封套管、焊接套管、韧性水泥、低密度水泥、IBC 测井等先进材料和技术^[34-37];盐穴储气库井已推广应用定向井和丛式井,井眼直径普遍较大(采用 $\phi 339.7$ mm 生产套管),单井吞吐能力强(采用 $\phi 244.5$ mm 注采管柱),已开始应用盐穴双井建库技术和薄盐层巷道式建库技术。我国储气库钻井完井技术与之相比,在井眼直径、井型、材料、工艺技术水平等方面均有较大差距,还需要进行一系列技术攻关,以尽快形成完整的储气库钻井完井技术体系。

1)枯竭气藏储气库大井眼水平井、多分支井钻井完井技术研究。按照注采井大流量注采的储气库建库理念,坚持打高产井、少打井的思路,为增大储层接触面积,进一步提高建库效率,需开展大井眼水平井、分支井等复杂结构井钻井完井技术攻关研究,对于储层物性好的区块,宜采用大井眼水平井,对于储层物性较差的区块,宜采用大井眼多分支井来提高单井的注采能力。

2)枯竭气藏储气库优快钻井完井技术和装备研发。对于衰竭严重的储层,可以采用先注气再钻井的建库理念,不用储层专打,简化井身结构,优选防漏、防塌和堵漏钻井完井液体系,研制相关新材料,减少井下复杂情况的发生,强化储层保护措施;采用气体钻井、控压钻井等先进配套技术来提高钻井速度,降低钻井成本。

3)盐穴储气库丛式定向井和双井建库技术研究。我国盐岩资源有限,盐穴储气库的目的层(盐层)趋于更深,亟需进行盐岩丛式定向井建库技术、深盐层双井建库技术、双井水平溶腔技术、已有老腔双井溶腔改造利用技术等攻关研究,以期最大限度地提高盐岩资源利用率,加快溶腔速度,降低盐穴储气库建库成本。

4)含水层储气库钻井完井配套技术研究。目前我国尚未进行含水层储气库建设,需开展含水层储气库钻井完井配套技术研究,包括井型和井身结构优化设计技术、优快钻井配套技术、固井工艺及水泥浆体系优化技术、完井工艺及管柱优化设计技术、监测井及排水井井身结构优化技术等。

5)盐穴压缩空气/氢气储能库钻井完井技术研究。盐穴压缩空气/氢气储能技术是解决我国新能源发电不稳定和峰谷差较大问题的有效途径之一,我国研究起步晚,工程技术薄弱,目前尚未进行现场应用。随着绿色可再生能源的兴起,以地下储气腔体为储能媒介的压缩空气/氢气储能技术将引起

更广泛的关注。

6) 储气库井筒完整性技术体系研究。为满足提高储气库井筒完整性的要求, 需针对我国枯竭气藏和盐岩地层特性, 开发具有自主知识产权的井筒完整性检测工具, 形成涵盖全生命周期的储气库井筒完整性设计、施工、检测、监测、评价、管理的配套方法以及工具和标准。

5 结束语

经过 20 多年的地下储气库研究和建设实践, 我国已具备了百亿立方米天然气的调峰能力, 形成了一套适合国内复杂地质条件的地下储气库钻井完井技术体系, 并在深层气藏储气库建设、已有盐穴溶腔改造利用等方面取得了突破。目前, 储气库的快速发展时期已经来临, 但对库址资源和建设质量要求的提高给储气库钻井完井技术带来了新的挑战, 枯竭气藏储气库大井眼水平井技术、盐穴丛式定向井建库技术、含水层储气库钻井完井技术和注采井筒完整性技术成为今后的主要研究对象和发展方向。我国必须更好地依靠科技进步, 加强交叉学科的融合, 尽快建立完善的储气库钻井完井技术体系, 以满足我国储气库高质量发展及顺利实现国家能源战略的需求。

参 考 文 献

References

- [1] 袁光杰, 夏焱, 金根泰, 等. 国内外地下储库现状及工程技术发展趋势[J]. 石油钻探技术, 2017, 45(4): 8-14.
YUAN Guangjie, XIA Yan, JIN Gentai, et al. Present state of underground storage and development trends in engineering technologies at home and abroad[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2017, 45(4): 8-14.
- [2] 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.
- [3] 鲁洪江, 杨洪志, AMRO M M, 等. 地下储气库注采循环过程中储层干化问题研究[J]. 石油钻探技术, 2018, 46(4): 1-8.
LU Hongjiang, YANG Hongzhi, AMRO M M, et al. Drying process in underground gas storage reservoir[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2018, 46(4): 1-8.
- [4] 袁光杰, 杨长来, 王斌, 等. 国内地下储气库钻井完井技术现状分析[J]. 天然气工业, 2013, 33(2): 61-64.
YUAN Guangjie, YANG Changlai, WANG Bin, et al. Drilling and completion technologies for the underground gas storage (UGS) in China: a state-of-the-art appraisal[J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(2): 61-64.
- [5] 马小明, 余贝贝, 马东博, 等. 砂岩枯竭型气藏改建地下储气库方案设计配套技术[J]. 天然气工业, 2010, 30(8): 67-71.
MA Xiaoming, YU Beibei, MA Dongbo, et al. Project design and matching technologies for underground gas storage based on a depleted sandstone gas reservoir[J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(8): 67-71.
- [6] 王秀玲, 任文亮, 周战云, 等. 储气库固井用油井水泥增韧材料的优选与应用[J]. 钻井液与完井液, 2017, 34(3): 89-93.
WANG Xiuling, REN Wenliang, ZHOU Zhanyun, et al. Selection and application of toughening agent used in cementing gas storage well[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2017, 34(3): 89-93.
- [7] 张弘, 申瑞臣, 袁光杰, 等. 地下储气库井筒水泥环的弹塑性分析[J]. 油气储运, 2018, 37(2): 150-156.
ZHANG Hong, SHEN Ruichen, YUAN Guangjie, et al. Analysis on the elastoplastic of cement sheath in underground gas storage wellbore[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2018, 37(2): 150-156.
- [8] 万浩东, 杨远光. 储气库井弹性自愈合水泥浆体系及其性能评价[J]. 石油钻采工艺, 2018, 40(6): 730-735.
WAN Haodong, YANG Yuanguang. Elastic self-healing slurry system used for gas storage wells and its property evaluation[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2018, 40(6): 730-735.
- [9] 王禹, 黄达全, 解文, 等. 板南储气库井承压堵漏技术[J]. 钻井液与完井液, 2013(3): 47-49.
WANG Yu, HUANG Daquan, XIE Wen, et al. Technology of mud loss control under pressure in Bannan gas storage wells[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2013(3): 47-49.
- [10] 逮玺. 储气库堵漏技术研究与应用[J]. 化工管理, 2014(17): 128.
LU Xi. Research and application of gas leakage technology[J]. Chemical Enterprise Management, 2014(17): 128.
- [11] 杨再葆, 张香云, 王建国, 等. 苏桥潜山地下储气库完井工艺配套技术研究[J]. 油气井测试, 2012, 21(6): 57-59.
YANG Zaibao, ZHANG Xiangyun, WANG Jianguo, et al. Research on supporting technology of well completion in buried hill underground gas storage of Suqiao[J]. Well Testing, 2012, 21(6): 57-59.
- [12] 李朝霞, 何爱国. 砂岩储气库注采井完井工艺技术[J]. 石油钻探技术, 2008, 36(1): 16-19.
LI Zhaoxia, HE Aiguo. Injecting-producing well completion technique in gas-storing sandy reservoirs[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2008, 36(1): 16-19.
- [13] 郝惠军, 田野, 张健庚, 等. 苏 20K-P1 储气库井超低压砂岩地层随钻堵漏技术[J]. 钻井液与完井液, 2012, 29(3): 38-39.
HAO Huijun, TIAN Ye, ZHANG Jiangeng, et al. Technology of mud loss control while drilling in ultra-low pressure sandstone formation of gas storage well Su20K-P1[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2012, 29(3): 38-39.
- [14] 范伟华, 冯彬, 刘世彬, 等. 相国寺储气库固井井筒密封完整性技术[J]. 断块油气田, 2014, 21(1): 104-106.
FAN Weihua, FENG Bin, LIU Shibin, et al. Wellbore seal integrity cementing technology of underground gas storage in Xiangguosi[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2014, 21(1): 104-106.
- [15] 范伟华, 符自明, 曹权, 等. 相国寺储气库低压易漏失井固井技术[J]. 断块油气田, 2014, 21(5): 675-677.
FAN Weihua, FU Ziming, CAO Quan, et al. Cementing technology of low pressure and easy leaking well in Xiangguosi underground gas storage[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2014, 21(5): 675-677.
- [16] 王建军, 付太森, 薛承文, 等. 地下储气库套管和油管腐蚀选材分析[J]. 石油机械, 2017, 45(1): 110-113.
WANG Jianjun, FU Taisen, XUE Chengwen, et al. Corrosion-resistant materials selection of the casing and tubing for underground gas storage[J]. China Petroleum Machinery, 2017, 45(1): 110-113.

- [17] 靳建洲, 解文, 张华, 等. 大港板南储气库白6库1井尾管固井技术[J]. *钻井液与完井液*, 2014, 31(6): 58–61.
JIN Jianzhou, XIE Wen, ZHANG Hua, et al. Technology for liner cementing in Well 1 of Storage Bai-6, Bannan, Dagang[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2014, 31(6): 58–61.
- [18] 林勇, 张书成, 罗长斌, 等. 长庆储气库长水平段注采井钻井完井实践[J]. *石油化工应用*, 2014, 33(11): 32–35.
LIN Yong, ZHANG Shucheng, LUO Changbin, et al. Changqing gas storage long horizontal well drilling and completion[J]. *Petrochemical Industry Application*, 2014, 33(11): 32–35.
- [19] 郭海敏, 张新雨. 储气库固井质量评价方法研究及应用[J]. 国外测井技术, 2015(5): 7–10.
GUO Haimin, ZHANG Xinyu. Study and application on the method of gas storage cementing quality evaluation[J]. *World Well Logging Technology*, 2015(5): 7–10.
- [20] 李治, 罗长斌, 胡富源, 等. DY 高效冲洗隔离液在长庆储气库固井中的应用[J]. 长江大学学报(自科版), 2015, 12(23): 51–56.
LI Zhi, LUO Changbin, HU Fuyuan, et al. Research and application of DY efficient flushing and spacer fluids in gas storage well cementing of Changqing Oilfield[J]. *Journal of Yangtze University (Natural Science Edition)*, 2015, 12(23): 51–56.
- [21] 赵金洲. 文23地下储气库关键工程技术[J]. *石油钻探技术*, 2019, 47(3): 18–24.
ZHAO Jinzhou. The key engineering techniques of the Wen 23 underground gas storage[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2019, 47(3): 18–24.
- [22] 付太森, 腰世哲, 纪成学, 等. 文96地下储气库注采井完井技术[J]. *石油钻采工艺*, 2013, 35(6): 44–47.
FU Taisen, YAO Shizhe, JI Xuecheng, et al. Injecting-producing well completion technique in Wen 96 underground gas storage[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2013, 35(6): 44–47.
- [23] 王志战. 枯竭砂岩气藏型储气库录井关键技术研究: 以文23储气库为例[J]. *石油钻探技术*, 2019, 47(3): 156–162.
WANG Zhizhan. Key mud logging technologies for depleted sandstone gas storage: case study of the Wen 23 gas storage[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2019, 47(3): 156–162.
- [24] 李建中, 徐定宇, 李春. 利用枯竭油气藏建设地下储气库工程的配套技术[J]. *天然气工业*, 2009, 29(9): 97–99.
LI Jianzhong, XU Dingyu, LI Chun. The matching technologies of rebuilding underground gas storages on the depleted oil and gas reservoirs[J]. *Natural Gas Industry*, 2009, 29(9): 97–99.
- [25] 朱海金, 邹建龙, 谭文礼, 等. JSS 低温抗盐水泥浆体系的研究及应用[J]. *钻井液与完井液*, 2006, 23(4): 1–3.
ZHU Haijin, ZOU Jianlong, TAN Wenli, et al. A low temperature salt resisting cement slurry[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2006, 23(4): 1–3.
- [26] 尹学源, 张子桥. 金坛盐穴地下储气库固井技术[J]. *石油钻探技术*, 2006, 34(2): 45–47.
YIN Xueyuan, ZHANG Ziqiao. Cementing techniques for wells with salt caverns used for gas storage in Jintan[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2006, 34(2): 45–47.
- [27] 丁国生. 金坛盐穴地下储气库建库关键技术综述[J]. *天然气工业*, 2007, 27(3): 111–113.
DING Guosheng. General introduction on key technologies of the construction of Jintan underground salt cavern gas storage[J]. *Natural Gas Industry*, 2007, 27(3): 111–113.
- [28] 丁国生. 盐穴地下储气库建库技术[J]. *天然气工业*, 2003, 23(2): 106–108.
DING Guosheng. Underground gas storage in salt caverns[J]. *Natural Gas Industry*, 2003, 23(2): 106–108.
- [29] 田中兰, 夏柏如, 申瑞臣, 等. 采卤盐矿老溶腔改建为地下储气库工程技术研究[J]. *石油学报*, 2007, 28(5): 142–145.
TIAN Zhonglan, XIA Bairu, SHEN Ruichen, et al. Reconstruction technology of existing salt-caverns into underground gas storage[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2007, 28(5): 142–145.
- [30] 吴玉禄, 王震宇. 套铣打捞新技术的研究及应用[J]. *石油钻探技术*, 2002, 30(5): 33–34.
WU Yulu, WANG Zhenyu. Research and application of new milling & drilling techniques[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2002, 30(5): 33–34.
- [31] 丁建林. 利用现有采卤溶腔改建地下储气库技术[J]. *油气储运*, 2008, 27(12): 42–46.
DING Jianlin. Reconstruction of existing salt-caverns into underground gas storage[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2008, 27(12): 42–46.
- [32] 班凡生. 深层盐穴储气库造腔及注采技术分析[J]. *重庆科技学院学报(自然科学版)*, 2016, 18(2): 62–64.
BAN Fansheng. Solution mining and injection-production technology of gas storage in deep salt bed[J]. *Journal of Chongqing University of Science and Technology(Natural Sciences Edition)*, 2016, 18(2): 62–64.
- [33] 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): 1–5.
SUN Haifang. Drilling challenges and technical solutions for Xiangguosi underground gas storeroom[J]. *Drilling & Production Technology*, 2011, 34(5): 1–5.
- [34] 中国石油集团钻井工程技术研究院. 赴欧洲地下储气库考察报告[R]. 北京: 中国石油集团钻井工程技术研究院, 2011.
CNPC Drilling Research Institute. Report on the investigation of underground gas storage in Europe[R]. Beijing: CNPC Drilling Research Institute, 2011.
- [35] 杨明清, 吴俊翰, 卞玮, 等. 俄罗斯地下储气库现状及未来发展[J]. *石油钻采工艺*, 2018, 40(5): 671–676.
YANG Mingqing, WU Jiaohan, BIAN Wei, et al. Present situation and future development of underground gas storage reservoirs in Russia[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2018, 40(5): 671–676.
- [36] 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.
- [37] 薛雨, 齐奉忠, 王元刚, 等. 中俄东线楚州盐穴储气库固井难点及对策[J]. *石油机械*, 2019, 47(1): 32–36.
XUE Yu, QI Fengzhong, WANG Yuangang, et al. Cementing difficulties and solutions for Chuzhou salt cavern gas storage for Sino-Russian eastern route gas pipeline[J]. *China Petroleum Machinery*, 2019, 47(1): 32–36.