

李琦,宋然然,匡冬琴,等. 二氧化碳地质封存与利用工程废弃井技术的现状与进展[J]. 地球科学进展, 2016, 31(3): 225-235. doi: 10.11867/j.issn.1001-8166.2016.03.0225. [Li Qi, Song Ranran, Kuang Dongqin, et al. Status and advances of abandoned process of wells for CO₂ geological storage[J]. Advances in Earth Science, 2016, 31(3): 225-235. doi: 10.11867/j.issn.1001-8166.2016.03.0225.]

二氧化碳地质封存与利用工程废弃井技术的现状与进展*

李琦,宋然然,匡冬琴,卢绪涛,李小春

(中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室,湖北 武汉 430071)

摘要: 随着二氧化碳(CO₂)地质封存(CCS)与利用(CCUS)相关工程的快速进展,CO₂封存场地的废弃井能否有效地封堵残余的CO₂成为一项亟待解决的课题。目前,国内外在油气领域的废弃井作业已经有具体成熟的技术和丰富的经验,但是在CCS/CCUS领域,针对CO₂作业井(包括CO₂注入井和CO₂监测井)的废弃作业国际上仅有少量公开实例,国内尚为空白。首先,总结国外发达国家(荷兰、美国和加拿大等)关于CO₂作业井废弃所需的要求、材料以及实例经验中的监测要求;其次,归纳国内油气行业废弃井作业的技术现状;最后,总结CO₂作业井废弃作业与常规废弃井作业的不同之处,并提出未来CO₂作业井废弃作业建议。该研究对即将封井的神华CCS示范项目的废弃作业具有重要意义。

关键词: CO₂地质封存与利用;废弃井;注入井;水泥塞;CO₂泄漏风险

中图分类号 P618.13

文献标志码: A

文章编号: 1001-8166(2016)03-0225-11

1 引言

废弃井处理是每口井生命周期中非常重要的一个阶段。基于监测、环保、安全等因素考虑^[1~3],废弃井技术的研究是极为必要的。目前,油气领域废弃井作业技术已相对成熟,但是二氧化碳(CO₂)作业环境下废弃井作业技术还在探索中。为了二氧化碳地质封存(Carbon Capture and Storage, CCS)或二氧化碳地质利用(CO₂ Capture, Utilization and Storage, CCUS)(例如,CO₂提高石油采收率(CO₂-EOR))工程中废弃井作业有规可循,有章可鉴,本文通过将其与传统油气领域废弃井作业不同之处对比,提出CO₂作业井(包括CO₂注入井和CO₂监测井)废弃作业建议。众所周知,CO₂封存场地,尤其是CO₂-EOR场地,一般存在已知的和潜在未知的废

弃井筒,这些历史上的废弃井能否有效地封堵封存CO₂是一项亟待解决的世界难题。本文不考虑这些废弃井的潜在风险,但会提及已存在废弃井的管理要求,将重点放在CO₂作业井废弃的技术现状和作业建议上,提出我国CO₂作业井废弃作业的相关流程与建议。目前,神华CCS示范项目已经完成30万t的注入量,正在进行封井作业评估,也急需相关的作业规范和技术参考。

2 国外 CCS 工程废弃井作业现状与进展

国外常规废弃井作业流程是清除井底设备、清洗井筒、堵塞技术选择、水泥堵塞评估、测试、监控和书面报告提交等。其中堵塞技术主要是平衡注水

* 收稿日期: 2016-02-03; 修回日期: 2016-03-01.

* 基金项目: 国家自然科学基金面上项目“酸气—咸水作用下岩石特异性破坏机理研究”(编号: 41274111); 环境保护部环境规划院科研计划专题任务“CCUS 示范项目封存环境风险评估试点研究”(编号: 2015A111)资助。

作者简介: 李琦(1972-),男,山东青州人,研究员,主要从事酸气回注、CO₂地质利用与封存方面的研究。E-mail: qli@whrsm.ac.cn

泥塞(图 1a)、挤注水泥法、倾筒法(图 1b)和双塞注水泥法(图 2)。迄今为止,美国、欧洲、加拿大、荷兰、澳大利亚等国家都开展了 CCS 工程或相关 CO₂-EOR 工程。本节主要是总结已公开的关于 CO₂ 注入井或酸气注入井的废弃作业过程中存在的问题和解决方案,目的是将其用到以后的相关工程中,防止出现类似的工程问题。

在 2011 年 1 月 10 日,美国《二氧化碳地质封存井的地下灌注控制计划的联邦要求:最终条例》正式生效,规定 CO₂ 地质封存井为 VI 类井。其中对于注入井堵塞提出相关要求:①在井堵塞之前,业主和运营商必须测定井底储层压力,进行外部机械完整性测试。② VI 类井的业主和运营商必须制定、维护和遵守一个行政主管可接受的计划,即井堵塞技术;井堵塞计划必须与许可证申请一起提交,并且必须至少包括以下信息: i) 用于决定井下储层压力的适

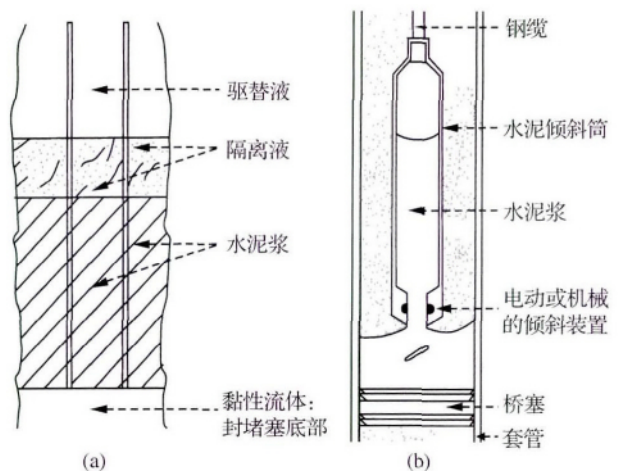


图 1 平衡塞法 (a) 和倾筒法 (b) [4]

Fig. 1 Balanced plug method (a) and dump bailer method (b) [4]

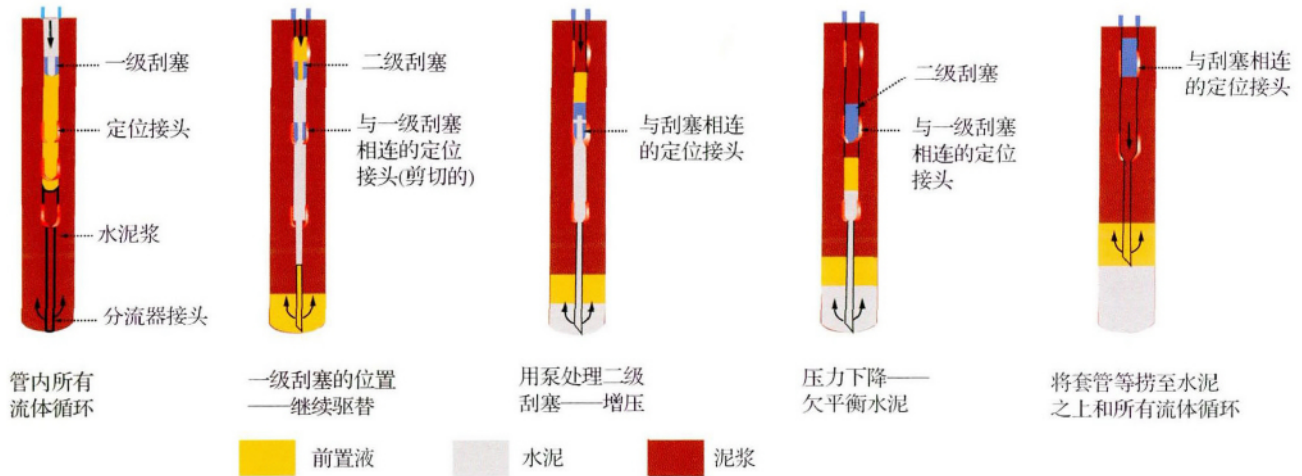


图 2 双塞注水泥法 [4]

Fig. 2 Two-plug method [4]

当测试或者措施, ii) 确保外部机械完整性的适当测试方法, iii) 将要采用井塞的布置方式、材料类型、等级和数量。③要求业主和运营商必须依照规定,在井封堵之前至少 60 天书面通知行政主管,即井堵塞意向通知。如果原来井堵塞计划发生任何变更,业主和运营商需要提交修改后的井堵塞计划。这一申请可允许行政主管有一个较短的通知期限,且注入井堵塞计划的任何修改必须得到行政主管批准,必须纳入到许可证中。④在井堵塞后 60 天,业主和运营商必须根据规定,向行政主管提交一份井堵塞报告 [5]。

CO₂CARE [6] 归纳了 CO₂ 封存工程中的“活井”废弃的规范框架,为了有效隔离地下储层中的废弃

物,规范大致如下:①防止任何流体从井到地表的泄漏;②防止所有潜在的物理伤害;③防止地层之间的任何污染物运移;④防止在原始被隔离的水系统之间可能的水文连通。假如以下 7 点正常地实施,那么 CCS 示范工程和 CO₂-EOR 工业上应用的经验,可以指导 CO₂ 封存场地井废弃作业安全地进行:①一份封存场地和封存复杂性的特征研究;②一份精确的井完整评估;③根据最好的行业经验,尤其是合适的水泥位置和井操作,确定操作过程;④一份综合性工程风险评估,且随着整个封存工程的进展而不断地更新;⑤一份基于监控的设计计划;⑥一份基于修补的设计计划;⑦如有需求,也可执行减轻的措施。报告同时指出,基于已经完成的 CO₂ 封存工程

方面的公开出版物,目前全球 CO₂ 封存井的废弃经验非常稀缺,只有 30 多年的 CO₂-EOR 工程方面的经验可供借鉴^[7]。Hovorka 等^[8]总结了 38 年来 CO₂-EOR 相关的 CCS 经验,大多数关于储层管理评估、CO₂ 封存的监测和风险评估;另外,涉及到井完整性评估时,提到废弃作业方面的主要目的是为了层间隔离,从而确保无窜层泄漏。Syed 等^[9]总结 CO₂ 注入井相关的井完整性技术和规范的注意事项,其中将废弃井与安全风险放在一起讨论,提出现在 CO₂ 封堵和废弃阶段的技术是基于油田经验之上的,缺乏长期观察数据,尤其是由 CO₂ 引起的水酸化方面的数据,因此建议 CO₂ 封存要考虑井特殊性、长期机械老化以及井相关的不确定性,如增加套管厚度、改进水泥环质量和减少环空带压泄漏不确定性等^[10]。

本节重点关注 Parker 等^[11]提出的 CO₂-EOR 工程中 CO₂ 注入井的改进设计和操作方法,如:①表层套管、金属组成件和特殊的涂层,选择使用耐腐蚀性材料和合金;②对管鞋封塞器和封闭圈,使用抗 CO₂ 弹性体、高四氟乙烯和尼龙等材料;③使用新型的管状的涂层或塑料、环氧树脂、纤维玻璃/树脂材料制成衬管;④特殊的水泥和添加剂的使用;⑤自动化控制和真实时间监控系统的应用。IEAGHG^[12]发表了 1 份报告,列出 CO₂ 注入和封存以及 CO₂-EOR 操作时所用的材料。报告还总结了废弃油气井的泄漏记录,指出泄漏的原因主要有 3 个,即水泥中微孔道、水泥作业质量差和井口密封性差(表 1)。

表 1 研究的 6 个泄漏案例中的泄漏发生率^[13]

Table 1 Occurrence of well leakage reported in six case studies^[13]

| 案例样品 | 发生率详情 |
|------|---|
| 大样研究 | 在美国,约 7 000 口无人照应井中的 6.1% 泄漏率: 6.1% 的井 < 35 t/a, 90% 的井 < 200 t/a |
| | 在墨西哥湾,约 30 000 口井中的 11.6% 通过套管柱发生泄漏 |
| | 在加拿大阿尔伯塔省实验区,约 20 000 口井中的 9.8%; 6.3% 的井泄漏的气体是通过土壤运移的,与套管泄漏的比例差不多是 1:1 |
| 小样研究 | 250 口井中的 15% 套管柱失效 |
| | 在墨西哥湾,26 口井中的 85% 在美国加州 Santa Fe Springs 油田,50 口井中的 75% |

2.1 CO₂ 封存方面的要求

2.1.1 已存在废弃井的管理要求

对于已存在的废弃井,首先要从 CO₂ 封存的角度

完成长期安全性和完整性评估;其次,完成其风险性评估。其中风险性评估包含井筒材料的现状评估,如果评估达不到安全要求,需采取修井等措施。

2.1.2 CO₂ 注入井的要求

(1) 材料要求

传统油气井废弃作业与 CO₂ 注入井废弃作业的目标是一致的,即隔离所有渗透区域。在 CO₂ 作业井的废弃过程中,由于腐蚀性流体可能会产生一个高压区域,注入 CO₂ 会引起井筒材料之间的化学反应,比如管件被腐蚀、水泥和其他密封环老化,造成密封完整性遭到破坏。因此欧盟 CO₂ 封存指令要求在储层复杂区中,需要重新安装每口射孔井,以确保盖层的密封完整性。在酸气回注和 CO₂-EOR 环境下的废弃作业中,由于残余或超临界 CO₂ 的腐蚀性^[14],因此要求井组件/材料部分能保证长期完整性,主要包括:套管、下井仪器中月检的金属部分和特殊涂料;封塞器和封隔器的塑料、聚四氟乙烯和尼龙;管件、筛管;特殊水泥和附件;自动化控制和实时监测系统。材料要遵循 API 和 IEAGHG 的相关规定^[12](表 2)。总之,CO₂ 注入井材料需要防腐耐高压,稳定性好,且保证密封完整性。

(2) 设计要求

由于钻井和完井要为废弃作业提供合理的边界条件,因此应该考虑井的原始设计。①套管和油管的设计。与传统油气井相比,CO₂ 注入井还需要考虑压力、材料的抗腐蚀性和生产注入率。为了能安全地注入 CO₂,管柱结构至少由 2 个套管柱组成(图 3),穿过油气层的套管固井设计一定要选择轻量化

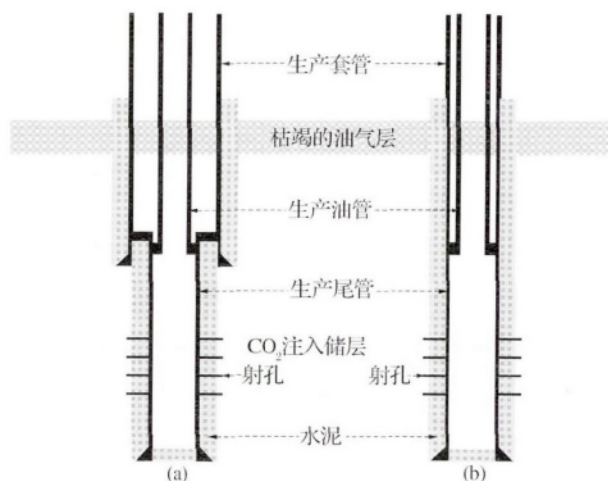


图 3 CO₂ 注入井的设计

Fig. 3 Design of CO₂ injection well

(a) 2 个套管柱; (b) 单一套管柱

(a) Two casing string option; (b) One casing string option

级的水泥(与 CO₂ 注入区的水泥可能不同)。穿越 CO₂ 注入储层的套管应该用抗腐蚀合金材料(Corrosion Resistant Alloy material, CRA)。在 CRA 材料之上,以及 2 个套管柱之间需要安装尾管。对于单一管柱设计时,也需要如此复杂的管柱,如在顶部用标准的套管材料和在油管封隔器密封口的下面采用 CRA 材料。②套管环的首次水泥注入。环空水泥的化学变化和机械失效是 CO₂ 封存井长期完整性的最主要威胁。其要求水泥材料必须能提供长期的密封性,钻孔直径要统一,优先于固井操作拆除钻井

液和任何滤饼。

(3) 水泥塞要求

基于现有技术和测试方式,水泥塞的合适厚度是 50~100 m,碳酸盐水泥适合 CO₂ 作业井。水泥塞必须通过测试,以确保完整性,同时也必须检测水泥胶结和水泥的机械完整性。Carlsen 等^[16]提出饼状塞(pancake plug)(图 4),即饼状塞安置在盖层水平面处和注入层的顶部。聚合物被注入到储层以此堵塞近井区域,防止 CO₂ 进入而接触到井筒材料,此时井内充满非腐蚀完井液。

表 2 API 推荐的 CO₂ 注入井设计和施工所需的材料^[15]

Table 2 Materials recommended by API for design and construction of CO₂ injection well^[15]

| 组件 | 材料 |
|-------------|---|
| 采油树(下井仪月检) | 316SS, 无电镀镍, 蒙乃尔合金 |
| 阀门充填物和封隔器 | 聚四氟乙烯塑料, 尼龙 |
| 井头(下井仪月检) | 316SS, 无电镀镍, 蒙乃尔合金 |
| 油管 | 玻璃制加强环氧基树脂—有衬板的黑金钢石钢, 内部有塑料涂层的黑金钢石钢, 抗腐蚀性合金 |
| 油管接缝密封 | 密封环, 有涂层的丝扣和垫圈 |
| 开/关工具, 侧面短节 | 镀镍的水下的零件, 316SS |
| 封隔器 | 内部有淬硬的橡胶等。镀镍的水下的零件; 在老井, 为了改进密封已磨损的套管, 部分采用抗腐蚀性合金 |
| 水泥和水泥添加物 | API 水泥和/或抗酸性水泥 |

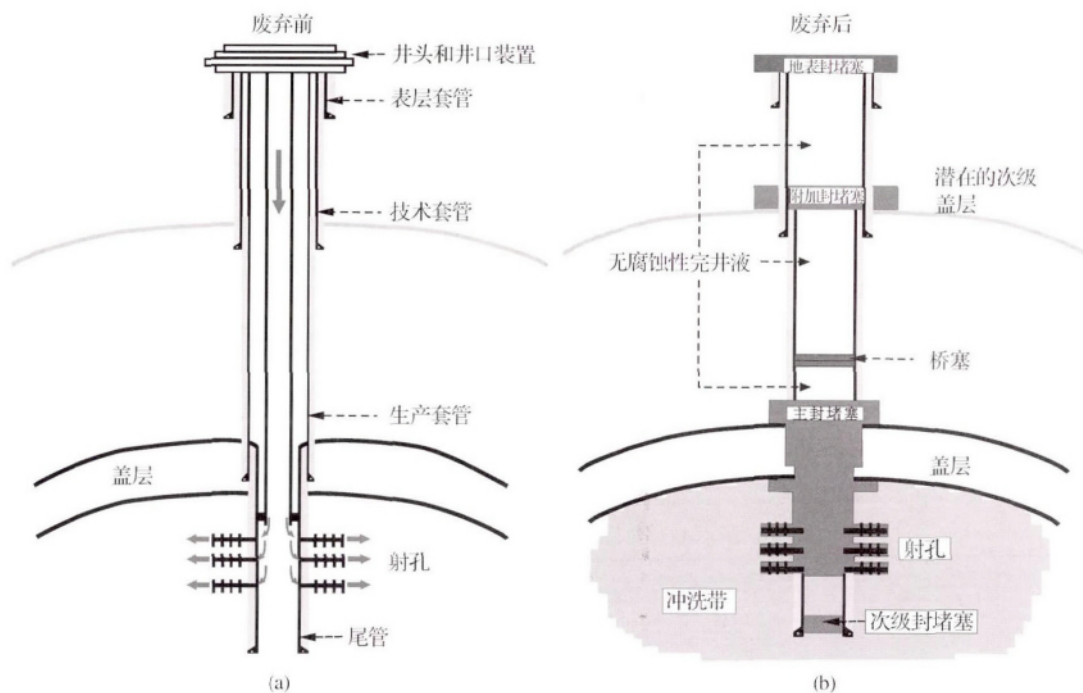


图 4 在用饼状封堵塞之前(a)和之后(b)的 CO₂ 地质封存的注入井^[13, 17]

Fig. 4 CO₂ injection well before (a) and after abandonment (b) using a pancake-type plug^[13, 17]

2.2 国外 CO₂ 作业井废弃作业实例

2.2.1 荷兰 De Lier 区域 CCS 场地的井筒废弃情况

荷兰在 De Lier 区域废弃气藏中注入和封存 CO₂ 废弃井的现状是,已有的 52 口井中的 51 口井被废弃。参考荷兰矿业法规,将井分为 3 类,第一类(34 口井一次性成功)和第二类(6 口井重新废弃成功)已经成功地被堵塞和封闭,它们遵守荷兰矿业法规^[18]中对腐蚀性液体处理的相关法规(图 5 和图 6);第三类井(11 口井)遵循矿业法规,但没有遵守腐蚀性液体相关要求,结果是井筒失效。

首先,对比 2 类井,当时不仅要考虑废弃油气开采井还是 CO₂ 封存井,还要考虑到废弃区域和井的未来应用。在 Greensand 废弃气藏(De Lier 气藏由几个储层组成,其中 Greensand 气藏属于 De Lier 气藏)中,许多井穿过目的生油层。这些井被废弃时需要考虑隔离生油层,但是这些井没有在 Greensand 气藏层射孔。LIR-47 井正是这样的情况。Greensand 气藏被隔离的顶部深度约为 1 440 m。在废气作业中,该地层不会被当做一个储层,且依据荷兰矿业规范在此阶段不用堵塞井。但是,鉴于被提议的封存应用,这种废弃建议应该被采纳。基于最差的

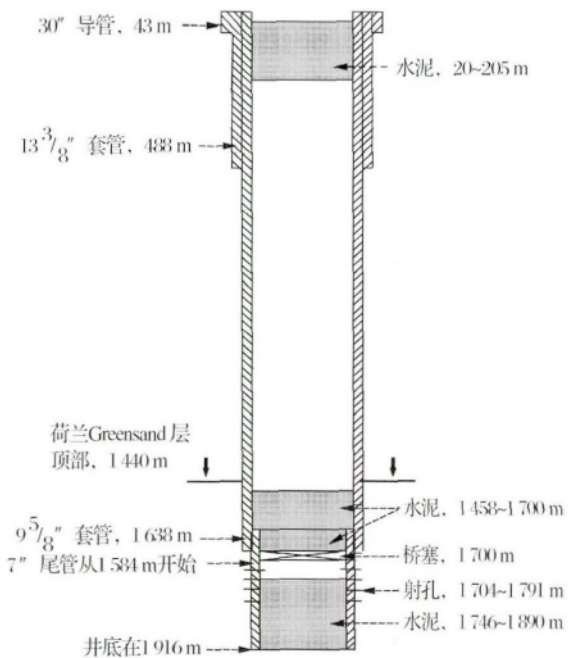


图 5 LIR-47 井废弃后的示意图

Fig. 5 Schematic diagram of well LIR-47 after abandonment

显示在 CO₂ 封存目标储层的盖层深度处缺乏一个废弃塞
Showing the absence of an abandonment plug at the depth of the caprock (Holland Greensand)

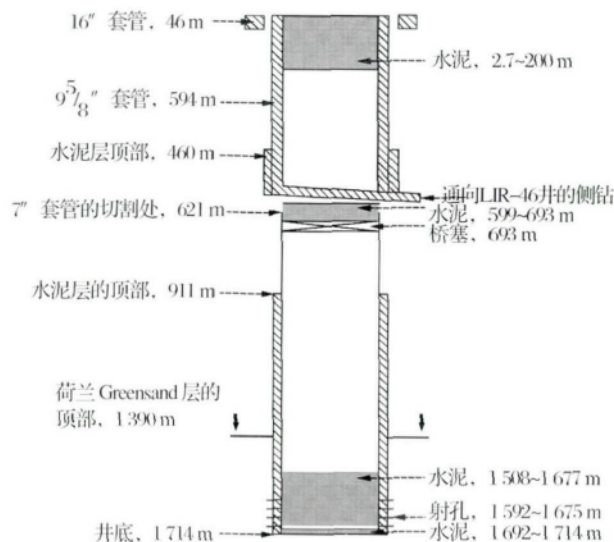


图 6 LIR-7 井废弃后的示意图

Fig. 6 Schematic diagram of well LIR-7 after abandonment

情况,即在足够长的时间里,在荷兰 Greensand 气藏注入 CO₂ 与原生油藏水,不放腐蚀水泥保护层和套管,CO₂ 进入井筒,且向上运移到第一个长度为 205 m 的水泥塞,结果可能是 CO₂ 累积在位于 CO₂ 泄漏处和地表之间的一个单一水泥塞深度段(如 205 m)内或沿井外运移到浅层渗透层。因此,鉴于最坏情况,要封堵此井穿过荷兰 Greensand 气藏层段。类似于 LIR-47 井,LIR-7 井在荷兰 Greensand 处的顶部没有安置水泥塞。万一 CO₂ 被封存在这个储层,水泥保护层和套管的腐蚀可能导致 CO₂ 泄漏从而进入到井里。随后,CO₂ 能通过井向上运移到 693 m 处的机械桥塞处,在套管和桥塞之间可能会有 CO₂ 累积或潜在地腐蚀危险。但是,不同于 LIR-47 井,LIR-7 井在 621~911 m 深度段没有固井。因此,少了一个阻止 CO₂ 在井里的“屏障”,在此阶段下套管将被腐蚀,CO₂ 达到未固井部分,并通过环空向上运移到更远处。尚不清楚的是,是否有潜在的途径使 CO₂ 运移至 599~693 m 处的桥塞或运移连接到 LIR-46 井的侧向处。因此,考虑到荷兰 Greensand 油藏的 CO₂ 封存情况,这样的井(如 LIR-7 井)需要由运营商来重新评估和重新废弃作业,以确保 CO₂ 能被安全和有效的封存。

再则,第三类井的经验值得借鉴。这 11 口井的废弃遵循了荷兰矿业规范^[18],但是没有遵守“存在或注入腐蚀性流体的相关要求”,结果导致井筒失稳。当考虑到长期 CO₂ 封存时,应该避免这种错误。对于荷兰 Greensand 和潜在 De Lier 生油层之

间的机械桥塞的顶部,万一有腐蚀性流体存在,需要水泥塞进行保护,而 LIR-10 和 LIR-16 并不存在至少 50 m 的水泥塞。在荷兰 Greensand 和潜在 De Lier 生油层之间, LIR-10 井也缺少水泥塞。虽然 LIR-16 井在荷兰 Greensand 和潜在 De Lier 生油层之间有一个 150 m 的水泥塞,但是在 De Lier 层和 Vlieland 层之间,没有足够长的水泥塞来保证有效的隔离。而且缺失的封堵塞的深度比 CO₂ 封存目标储层的深度更深,但是,这些问题不应该是造成失败的直接原因。在第一次废弃作业试验之后,从这几口井观测得知,气体泄漏来自 Texel 或荷兰 Greensand 层。第二次废弃作业为了达到有效封堵,在 LIR-4, LIR-18, LIR-19, LIR-41, LIR-48 和 LIR-49 井应用硅挤注法。尽管硅挤注法对封堵烃类是适合的,但是不确定该方法对于 CO₂ 和富含 CO₂ 水是否适用。LIR-3, LIR-14 和 LIR-15 井是在废弃规范执行之前被废弃的,因此它们没有依照现在的荷兰矿业规范来要求水泥塞的长度。然而,除了 LIR-14 和 LIR-15 井的表层塞子是 6 m 和 10 m 外,所有有效的废弃塞均超过由 API 推荐的长度。API 推荐在套管鞋的上面和下面的水泥塞的延长长度至少是 50 英尺(15.24 m)^[19]。

基于荷兰 De Lier 区域废弃气藏的废弃井作业经验,在废弃作业时候,要考虑到最差的情况,制定最完善的方案,最严苛的工程施工要求。

2.2.2 美国德克萨斯州 CCS 场地的井筒废弃情况

本节主要介绍美国德克萨斯州的墨西哥湾区项目和 SACROC 项目中的井筒废弃情况。美国德克萨斯州 CO₂ 封存项目历史时间长,对 CO₂ 封存实践起到很大的指导作用。在 1992 年为了油气开发和生产而钻了约 320 万个钻孔,其中 60 万口井依旧在生产中,但是 260 万口井成了干井、死井或废弃井^[19]。自从 1950 年,为了处理油藏咸水一些油气井被转为注入井。在 1930 年之前,被钻和被废弃的浅井没有用水泥封堵,也没有运营商管制,这类井被称为孤立井。同时 1986 年石油危机后,许多深井由于运营商破产而没有封堵。这类井受当地政府监管,但是由于当地政府认为已被封堵的井能维持封闭性,不对废弃井进行泄漏情况的监测是很常见的。Hovorka 等^[20-21]根据 Frio 试验,对 19 口 CO₂ 注入井进行了评价,只有 3 口废弃井的固井堵塞在最低饮水层以下。因此,德克萨斯州有许多孤立井,如没有有效封堵这些井,并且也不进行有效的控制,泄漏风险严峻。虽然封堵孤立井的资金(每口井大约需要

4 500 美元)来自油气生产的税收,但是在 1965—2005 年,超过 20 000 口井利用铁路委员会的废弃井封堵基金进行封堵处理。

墨西哥湾是美国最具潜力的 CCS 区域。墨西哥湾岸区是有大量深井的德克萨斯州的区域之一,多数井深度在 1 500~3 000 m,约有 10% 的井深度超过 3 000 m。德克萨斯州铁路委员会^[22]管理了 30% 废弃井的电子堵塞记录,其余运营商管理的资料,仅有微胶卷或纸质堵塞文件或根本没有记录。因此该区域相关数据缺失严重,比如在 1930 年之前,已经开钻或者废弃的井有成百上千口,但是只有 78 口 1934 年之前的井有数据。大量废弃井的记录、泄漏井和泄漏比率等资料的缺失,导致分析这些井存在很大的困难。尽管此区域拥有大量的咸水层,但是已存在的大量射孔成了长期封存 CO₂ 的一个瓶颈问题。德克萨斯州的相关法令也有所发展,如 2007 年 Texas Administrative Code 是封堵和废弃井的规范^[22]。

SACROC 项目在 1972 年利用 CO₂ + H₂S 驱替获得了很高的短期效益,油产量超过 20 万桶/每天。自从 1972 年,有大量 CO₂ 被注入到此区域,这为研究在储层条件下 CO₂ 对油气井、注入井等的影响等提供了很好的平台,为此, Carey 等^[23]收集了套管、主要水泥、盖层等样品,从样品的横剖面可以发现只有小量的腐蚀。同时,一口 CO₂ 生产井和腐蚀测井都显示最小厚壁损失,所有 20K-55 碳钢套管样品只存在有限的腐蚀。Carey 等^[23]推断,在 CO₂ 影响下 20 年后, SACROC49-6 井的水泥保持下来,且维持它结构的完整性。尽管相对于原始的硅酸盐水泥,其渗透率在一定程度上有所升高,但在被研究的井中,该型水泥能提供充足的阻力来阻止 CO₂ 运移。

在德克萨斯州,尽管 CO₂ 驱时间已超过 40 年,备案通过了超过 11 000 口 CO₂-EOR 井,但是在 CO₂CARE 等国家机构里没有找到关于 CO₂ 泄漏事件的记录。井泄漏事件和 CO₂ 井失效方面的记录的缺失可能是由于当时运营商大量投资在井预备时期,而 CO₂ 驱开发时期和泄漏修井时期只占一小部分。最大的问题是在几十年的 CO₂-EOR 工程中,对陈旧井不正确封堵甚至没有封堵。这包含着许多非技术因素,如规范操作、实施力度、经济和社会因素等,都会对这类井的失效和泄漏风险产生重大影响。为了使井失效和潜在井风险的最小化,基于德克萨斯州的 CO₂-EOR 井的经验,建议在每个流体注入和气封存井中,实施完成机械完整性测试,具体实施时期,

如①在注入操作状态前;②至少每 5 年,如果被运行需要,可提高频率;③在油管、封隔器和套管或在套管上的任何修补工作之间,任何干扰密封的修井工作之后;④当申请暂停或重新激活注入或废弃允许的时候。一般而言,劣质的钻井、完井工具的应用,以及一段时间很多废弃井未被适当的废弃处理(通常是因为花费)是导致井废弃问题的主要因素^[5]。

鉴于此项目情况,分析废弃作业不受重视和困难的原因,且过往工程数据保存的重要性,这都有助于促进现今废弃作业的成功实施。

2.2.3 加拿大阿尔伯塔省 CCS 场地的井筒废弃情况

加拿大阿尔伯塔省有丰富的油气资源。尽管具有良好的 CO₂ 封存潜能和完善的基础设施,但是已存在的废弃井对于 CO₂ 长期封存而言,是重要的潜在危险。从井类别、井废弃情况和基础设施等而言,井密度可能会影响 CO₂ 封存,特别是注入井的位置。区域内大约有 50% 的废弃井没有用生产套管进行处理^[24]。从经济方面考虑,CO₂ 封存的业主更希望利用现有基础设施,而在高密度井区域内现有

基础设施最完善,从风险的角度看,CO₂ 注入井定位在井低密度区更好。

根据阿尔伯塔省的大量失败案例,本文总结井失效的原因。Bachu 等^[25]指出减少井失效事故的重要因素包括执行合理的井监控技术和操作流程。由于完善了标准^[26],1994 年之后大约有一半的 CO₂ 注入井和大多数酸气回注井成功地完成了钻井作业,降低了井的失效率。Bachu 等^[25]总结了失效案例中 CO₂-EOR 相关的井有 31 口,酸气处置井有 48 口。评价井大多数用常规材料(G 级无杂质的或膨润土的水泥, J55 或 K55 等级套管),其中有 19 口井使用抗硫套管材料(如 L80 或 N80)(图 7)。不同类型井事故的原因是多样化的,井失效原因主要有油管或套管故障、封隔器故障、层位封隔失故障、表层套管有流体排出运移(SCVF)、气体运移(GM)、套管失效(CF)、曾经地层隔离事故留下的泄漏通道和腐蚀作用。而且转化为 CO₂ 或酸气回注的这类井更容易产生井事故。由于酸性回注相关的法规更为严格,所以造成酸气注入井的失效比 CO₂ 注入井比率小些,因此需要提高 CO₂ 注入井废弃作业的标准。

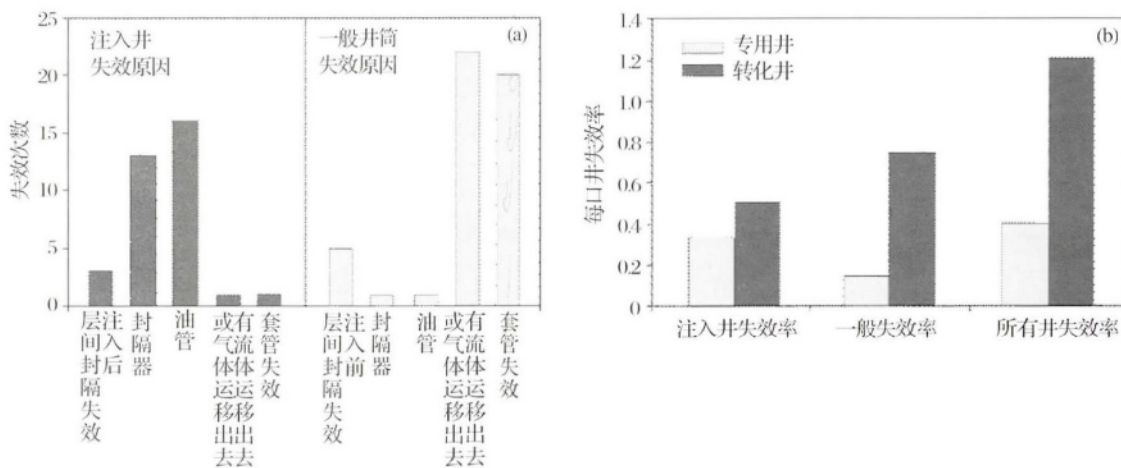


图 7 酸气回注井和 CO₂ 注入井的失效对比

Fig. 7 Comparison of failure in acid gas injection wells and CO₂ injection wells

(a) 失效模式统计; (b) 根据注入井类型统计的失效率

(a) Number of failure according to different types of failure; (b) Failure per well according to different types of injection wells, i. e. the well from built on purpose or converted

通过 ERCB 收集的约 316 000 口油井、气井和注入井的泄漏数据分析,可知在阿尔伯塔省影响井泄漏的主要因素有:①井斜,泄漏更多地发生在大斜度井中;②井类型,有套管的废弃井比没有套管的废弃井的泄漏可能性更大;③废弃方法,用桥塞废弃法的井比其他废弃法的井更容易发生井泄漏,其他废

弃法有用平衡塞法,在完井井段放置水泥塞,在射孔段放置水泥定位器和挤注水泥法;④油价的变化,在泄漏事件和油价之间存在一个显著的正相关关系;⑤水泥作业,水泥顶部的最低位是泄漏易发生部位,大多数套管失效发现是由于在注入井段/生产井段顶部以上的环空里面采用了质量差的水泥或者没有

水泥^[5]。

2.3 CO₂ 环境下废弃井的监测要求

中国《废弃井及长停井处置指南》^[27]中指出,监控程序是确定一口长停井是否存在对淡水层、地表土壤及地表水具有污染隐患的一种评价手段。表 3 是用于监控淡水层的建议方案,但如果存在高压高渗地层或有腐蚀性水层等特殊情况,则需执行更严格的要求。

表 3 淡水层监控建议方案一览表
Table 3 Recommended monitoring scheme for freshwater formations

| 流体运移能力 | 监控参数 | 监控要求 | |
|--------|-----------|-------------|------|
| | | 初始时期 | 监控时期 |
| 最小 | 液面或压力变化 | 3 个月 | 5 年 |
| | 监控开采方式的改变 | 需要时 | |
| 小 | 压力变化 | 3 个月 | 1 年 |
| | 套管试压 | 3 个月 | 5 年 |
| 中等 | 压力变化 | 3 个月 | 1 月 |
| | 套管试压 | 3 个月 | 1 年 |
| 强 | | 实时监控,立即评估处理 | |

荷兰矿业规范^[18]中指出,在封堵过程中的监测包括:①至少 100 kN(10 250 kg)的承压测试;②压力测试,即在 15 min 内操作一次至少 50 倍的 100 kPa 的压力测试;③井里负压差监控。根据加拿大指令,在废弃作业时需要完成以下测试:①原始压力测试,在废弃操作之前,油管或套管的一个原始压力测试环空压降最低达 7 000 kPa,且保持 15 min;②监控程序,为了确保井筒和地层完整性,监控程序的要求是,每年进行封隔器封隔性能测试,即在 15 min 内,最低地表压力达到 1 400 kPa;③井口压力,井口压力有最小的限制,如地层破裂压力的 90% 或液隔离测井所得的压力^[28]。

CO₂CARE 指出在井筒废弃作业之前,推荐至少实施一种井筒的历史应力和岩石力学/地球化学长期稳定性的评估方法;并且推荐使用日本长冈 CCS 示范工程中采用的井完整性测井方法,即固井测井和超声测井。

根据上述资料可知,CO₂ 井筒封堵过程中,所需监测是承压测试和压力测试(包括原始压力和井口压力);在整个 CCS 过程中,所需监测是井筒和地层完整性监测。

3 国内油气行业废弃井现状

井筒废弃的原因主要有以下几点:①探井失败,

没找到油,不得不采取报废措施的占较大比例。②在开发过程,由于材料问题(如套管损坏)影响作业时;或者如果到了不再有任何利用价值的情况下,则采取报废措施,如在 2006 年 6 月统计得出,新疆油田公司有 1 944 口套管外漏井,必须封井和修复。③有部分井是为了满足当地生态环保的要求而被废弃的^[29-31]。在 CCS/CCUS 项目中,注入 CO₂ 会引起更多的难题,如腐蚀性和高压。匡冬琴等^[28]提出与常规油气层废弃作业相比,CCS/CCUS 项目中废弃作业要求更加严苛,常规废弃作业无法满足此类项目的要求。

在国内,随着油气勘探开发的进展,越来越多的废弃井事故引起了社会和相关工作人员的关注。2007 年 1 月 21 日 20 时左右,由于封井不规范,重庆市双桥区发生了地下气体溢出事故(http://news.xinhuanet.com/life/2007-01/22/content_5638245.htm);2008 年 8 月 27 日凌晨,中石油位于江苏省淮安市湖县陈桥乡新港村的一口废弃油井发生天然气井喷事故(http://safety.gasshow.com/News_200808/195128.html);2011 年 6 月初,可能由于通过注水和岩屑回注,增加了平台附近的地层压力,导致地层连通,蓬莱 19-3 油田发生溢油事故,C 平台附近先后共发现多达 16 个渗漏点。(<http://www.chinanews.com/gn/2012/06-21/3980404.shtml>);2012 年 7 月 8 日 17 时 07 分,中石化位于四川阆中市河西正五村境内的石龙六井(废弃气井)突发爆发井喷起火事故,火焰高达 5 m,事后调查原因乃为雷击所致;2012 年 11 月 15 日,中石化胜利油田滨南采油厂位于山东滨州市梁才办事处小马村的一口废弃井因盗油引发井喷事故(http://news.xinhuanet.com/fortune/2012-12/04/c_124044275.htm)。这些事故会危及人员的安全,甚至造成未来几十年的环境问题。由此可见,废弃作业是非常重要的一个环节,其技术有待进一步的发展。国家对此应加大废弃井的管理,建立严格的监督制度。

我国油气行业一直致力于废弃井的管理,尤其近几年提出的有效利用废弃井,维护环境和变废为宝,成为中国油气工业思考的重点。为此,提出通过实施老井复查^[32,33],利用废弃油井开发地层水^[34,35]、废弃井发电^[36]和废弃井开发地热^[37]等措施,且取得了一些成果,如长庆盘古梁油田的 6 口废弃井建成 60 万 t 油田。从可持续发展角度考虑,无论是二次利用还是永久或暂时废弃作业,研究井筒废弃作业和安全处理流程都是非常必要的。

我国研究人员从事和研究封井技术多年,且已制定油气井废弃作业标准。近年来,在废弃井封井处理方面已初见成效。如2010年吐哈油田研制出新式抽油杆防喷器,解决井架不正、杆柱摆动、特殊情况无法强制封井等难题,使封井成功率达到100%;新疆油田公司历经3年努力,成功攻克老井废弃封井和修复再利用的技术难题,在2013年,圆满完成6口老井的封井工作等,为呼图壁储气库的顺利投产注气奠定了基础^[38]。

由上可见,尽管油气常规废弃作业已经取得了巨大的进步,但仍然面临诸多问题。鉴于CCS/CCUS项目中废弃作业更为苛刻,以及眼下CO₂-EOR项目逐渐增多的发展形势,CCS与利用工程废弃井技术的研究非常迫切。

4 建议及结论

与传统油气井废弃作业相比,由于CO₂的腐蚀性、水酸化等因素,CO₂作业井的废弃作业更要注重材料的选取、完整性监测和机械老化防止,如增加套管厚度、选择碳酸盐水泥、改进水泥环质量和每年做井完整性评估等。

鉴于油气行业废弃井作业的既有经验,CO₂作业井废弃作业要防止井筒泄漏、做好机械完整性测试、减少各部分材料(如封隔器、抗硫套管等)的事故率,进而防患于未然。

目前国内开展的CO₂-EOR项目区域,已知和未知的废弃井在产油阶段,可能已经和注入井之间形成了通道,这样改造的注入井改注CO₂后,可能易于在封堵井处形成高压,存在泄漏等安全隐患问题。加之国内早期封井的水泥是否可以耐碳酸等腐蚀,废弃井能否确保其他井筒注入CO₂过程中不发生泄漏,相比于常规的油气井废弃作业,急需国家相关部门制定可能要求更高的法律法规,以确保CCS/CCUS工程的安全实施。

随着我国CCS/CCUS示范工程项目的推进,国家相关主管部门应尽快制定CO₂地质封存与利用工程废弃井作业方面的法律与法规,以便更好地指导CCS/CCUS工程的开展。

参考文献(References):

[1] Li Qi, Liu Guizhen, Zhang Jian, et al. Status and suggestion of environmental monitoring for CO₂ geological storage [J]. *Advances in Earth Science* 2013, 28(6): 718-727. [李琦, 刘桂臻, 张建, 等. 二氧化碳地质封存环境监测现状及建议[J]. 地球科学进

展, 2013, 28(6): 718-727.]

- [2] Yang Yang, Ma Jinfeng, Li Lin. Research progress of 4D multi-component seismic monitoring technique in carbon capture and storage [J]. *Advances in Earth Science*, 2015, 30(10): 1119-1126. [杨扬, 马劲风, 李琳. CO₂地质封存四维多分量地震监测技术进展[J]. 地球科学进展, 2015, 30(10): 1119-1126.]
- [3] Wei Xiaochen, Li Qi, Xing Huilin, et al. Mechanism of underground fluid injection induced seismicity and its implications for CCS projects [J]. *Advances in Earth Science*, 2014, 29(11): 1226-1241. [魏晓琛, 李琦, 邢会林, 等. 地下流体注入诱发地震机理及其对CO₂地质封存工程的启示[J]. 地球科学进展, 2014, 29(11): 1226-1241.]
- [4] Nelson E B, Guillot D. Well Cementing, Second Edition [M]. Texas: Schlumberger, 2006.
- [5] Liu Lancui, Li Qi. USA regulation on injection well of CO₂ geological sequestration [J]. *Low Carbon World*, 2013, (1): 42-52. [刘翠琴, 李琦. 美国关于二氧化碳地质封存井的要求[J]. 低碳世界, 2013, (1): 42-52.]
- [6] CO₂CARE Consortium. CO₂ Site Closure Assessment Research (CO₂CARE): Deliverable D5.4 Best Practice Guidelines [R]. CO₂CARE Report. Edinburg, UK: British Geological Survey, 2013.
- [7] National Energy Technology Laboratory (NETL). Carbon Dioxide Enhanced Oil Recovery: Untapped Domestic Energy Supply and Long Term Carbon Storage Solution [R]. Pittsburgh, PA: NETL, 2010.
- [8] Hovorka S D, Tinker S W. EOR as sequestration: Geoscience perspective [C] // The Symposium on the Role of Enhanced Oil Recovery in Accelerating the Deployment of Carbon Capture and Storage. GCCC Digital Publication Series 2010, 23: 10-12.
- [9] Syed T, Cutler T. Well integrity technical and regulatory considerations for CO₂ injection wells [C] // SPE International Conference on Health, Safety and Environment in Oil and Gas Exploration and Production. Rio de Janeiro, Brazil, 2010. doi: 10.2118/125839-MS.
- [10] Guen Y L, Poupard O, Loizzo M. Optimization of plugging design for well abandonment—Risk management of long-term well integrity [J]. *Energy Procedia* 2009, 1: 3587-3594.
- [11] Parker M E, Meyer J P, Meadows S P. Carbon dioxide enhanced oil recovery injection operations technologies [J]. *Energy Procedia* 2009, 1: 3141-3148, doi: 10.1016/j.egypro.2009.02.096.
- [12] IEA Greenhouse Gas R&D Programme (IEAGHG). Corrosion and Materials Selection in CCS Systems [R]. IEAGHG Report 2010/03. Cheltenham, UK: IEAGHG 2010.
- [13] Loizzo M, Akemu O A P, Jammes L, et al. Quantifying the risk of CO₂ leakage through wellbores [J]. *SPE Drilling & Completion* 2011, 26(3): 324-331.
- [14] Shang Wanning, Qiao Yulong, Yan Zhao, et al. Corrosion law of oil tubings and prevention countermeasures in gas wells of the Jingbian gas field, Ordos Basin [J]. *Natural Gas Industry* 2013,

- 33(2): 115-120. [尚万宁, 乔玉龙, 闫昭, 等. 鄂尔多斯盆地靖边气田气井油管腐蚀规律与防腐对策[J]. 天然气工业, 2013, 33(2): 115-120.]
- [15] Meyer J P. Summary of Carbon Dioxide Enhanced Oil Recovery (CO₂EOR) injection well technology [R] // Contek Solutions Prepared Background Report for the American Petroleum Institute (API). Plano, Texas: Contek Solutions 2007.
- [16] Carlsen I M, Abdollahi J. Permanent Abandonment of CO₂ Storage Wells[R]. Oslo: SINTEF Report 54523300 2007.
- [17] Randhol P, Valencia A K, Taghipour A, et al. Ensuring Well Integrity in Connection with CO₂ Injection [R]. Oslo: SINTEF Report 31.6920.00/02/07 2007.
- [18] Den Dulk J L. Mining Regulation of the Netherlands 2003 [S]. 2011.
- [19] IEA Greenhouse Gas R&D Programme (IEAGHG). Long Term Integrity of CO₂ Storage-well Abandonment [R]. Cheltenham, UK: IEAGHG 2009.
- [20] Hovorka S D, Dovorka C, Knox P R, et al. Capacity assessment of the Frio formation, Texas [R] // The GEO-SEQ Project Results 2004: 66-77.
- [21] Hovorka S D, Dovorka C, Holtz M H. Testing Efficiency of Storage in the Subsurface: Frio Brine Pilot Experiment, 2004 [C] // Greenhouse Gas Control Technologies 7. Vancouver, Canada: IEAGHG 2004.
- [22] Texas Secretary of State. Texas Administrative Code, Title 16: Economic Regulation, Part 1: Railroad Commission of Texas, Chapter 3: Oil and Gas, Rule 3.14 Plugging [S]. 2007.
- [23] Carey J W, Wigand M, Chipera S J, et al. Analysis and performance of oil well cement with 30 years of CO₂ exposure from the SACROC unit, West Texas, USA [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 2007, 1(1): 75-85.
- [24] Bachu S, Watson T L. Possible indicators for CO₂ leakage along wells [C] // Greenhouse Gas Control Technologies 8. Trondheim, Norway 2006.
- [25] Bachu S, Watson T L. Review of failures for wells used for CO₂ and acid gas injection in Alberta, Canada [J]. *Energy Procedia*, 2009, 1(1): 3 531-3 537.
- [26] Energy Resources Conservation Board. Directive 020: Well abandonment guide [S]. Calgary, Alberta, Canada. 2010.
- [27] National Development and Reform Commission. Well Abandonment and Inactive Well Practices SY/T-6646-2006 [S]. 2006. [国家发展和改革委员会. 废弃井及长停井处置指南 SY/T-6646-2006 [S]. 2006.]
- [28] Kuang Dongqin, Li Qi, Chen Zheng'ao, et al. Global status of well abandonment regulations related to CCUS projects and its implications to China [J]. *Natural Gas and Oil* 2015, 33(4): 37-42. [匡冬琴, 李琦, 陈征澳, 等. 全球 CCUS 废弃井法规现状及其对中国的启示 [J]. 天然气与石油, 2015, 33(4): 37-42.]
- [29] Feng Yuewei. Strategic thinking about abandoned wells [J]. *China Petrochem* 2011, (16): 28-29. [冯跃威. 战略思考废弃井 [J]. 中国石油石化, 2011 (16): 28-29.]
- [30] Zhang Qihua. Why is wells abandoned [J]. *China Petrochem*, 2011 (16): 20-22. [张起花. 废弃井因何而废 [J]. 中国石油石化, 2011 (16): 20-22.]
- [31] Zhang Qihua. Abandonment wells have samsara [J]. *China Petrochem* 2011, 16: 26-27. [张起花. 废弃井也有轮回 [J]. 中国石油石化, 2011, 16: 26-27.]
- [32] Xu Jincheng, Liu Xingwan, Chen Mingsheng, et al. Study and application for evaluating technology of old well reexamination in Zhaoao oilfield [J]. *Mud Logging Engineering* 2004, 15(4): 34-39. [徐进成, 刘行万, 陈明胜, 等. 老井复查评价技术在赵凹油田的研究与应用 [J]. 录井工程, 2004, 15(4): 34-39.]
- [33] Zhang Mingjun, Liu Xingwan, Chen Mingsheng. The method and applied result of the old well reexamination in He'nan oilfield [J]. *Mud Logging Engineering* 2011, 22(1): 38-41. [张明俊, 刘行万, 陈明胜. 河南油田老井复查评价方法及应用效果 [J]. 录井工程, 2011, 22(1): 38-41.]
- [34] Duan Zhonghui. Technical approach of using the abandoned oil well for exploitation of groundwater in Shanbei oilfield [J]. *Coal Geology of China* 2000, 12(1): 42-43. [段中会. 陕北油田利用废弃油井开采地下水的技术思路 [J]. 中国煤田地质, 2000, 12(1): 42-43.]
- [35] Bai Baoguo. Technical measures of exploitation of groundwater by abandoned oil well in the northern Shaanxi [J]. *Shaanxi Coal*, 2008 (4): 46-47. [白保国. 利用废弃油井开采陕北地下水的技术措施 [J]. 陕西煤炭, 2008 (4): 46-47.]
- [36] Wang Zhaobin. Controversy on abandoned wells to produce electricity [J]. *Energy* 2013, (12): 68-69. [王赵宾. 争议废弃井发电 [J]. 能源, 2013 (12): 68-69.]
- [37] Kan Changbin, Qi Faqing, Yu Xiaocong, et al. Exploring geothermal energy from the abandoned well [J]. *Renewable Energy Resources* 2008, 26(1): 90-92. [阚长宾, 亓发庆, 于晓聪, 等. 利用废弃油井开发地热能 [J]. 可再生能源, 2008, 26(1): 90-92.]
- [38] Wang Zhiqiang. The battle of "abandoned wells" in Xinjiang [J]. *China Entrepreneur* 2005, 15: 33-35. [王志强. 新疆“废弃井”争夺战 [J]. 中国企业家, 2005, 15: 33-35.]

Status and Advances of Abandoned Process of Wells for CO₂ Geological Storage*

Li Qi , Song Ranran , Kuang Dongqin , Lu Xutao , Li Xiaochun

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering , Institute of Rock and Soil Mechanics , Chinese Academy of Sciences , Wuhan 430071 , China)

Abstract: With the rapid development of CO₂ geological storage and utilization (CCS/CCUS) , the abandoned well in the sites of CCS/CCUS projects is becoming an important subject to be solved to check whether it can effectively block the residual CO₂ or not. Up to now , the abandoned process of wells in the field of oil and gas in China and abroad have gained mature operation technology and rich experience. However , in the field of CCS/CCUS , there is only a small number of global public instances about the abandoned process of operational wells of CO₂ including CO₂ injection wells and CO₂ monitoring wells , and the domestic instance is still blank. In this paper , we firstly summarized the required demands , materials , cases of operational experiences , and monitoring requirements of the abandoned process of operational wells of CO₂ in the developed countries , e. g. the Netherlands , the United States and Canada. Then , we figured out the status of the abandoned process of domestic wells in oil and gas industry. Finally , we concluded the differences of the abandoned process between operational wells of CO₂ and traditional wells of oil and gas , and proposed some recommendations for the abandoned process of operational wells of CO₂ in the current and future CCS/CCUS projects in China. This study has important implications for the upcoming abandoned process of all the operational wells at Shenhua CCS demonstration site in 2016.

Key words: CO₂ geological storage and utilization; Abandoned well; Injection well; Cement plug; CO₂ leakage risk.

* **Foundation item:** Project supported by the National Natural Science Foundation of China “Failure mechanism of rock under acid gas and saline water interaction” (No. 41274111) ; The Chinese Academy for Environmental Planning , Ministry of Environmental Protection of the People’s Republic of China “Environmental risk assessment of CCUS demonstration project: A pilot study”(No. 2015A111) .

First author: Li Qi (1972-) , male , Qingzhou City , Shandong Province , Professor. Research areas include carbon dioxide geological utilization and storage (CCUS) and acid gas injection (AGI) . **E-mail:** qli@whrsm.ac.cn