

地质封存工程中 CO₂ 沿井筒渗漏影响因素分析*

唐 丹 王万福 熊焕喜 陈昌照

(中国石油安全环保技术研究院)

摘 要 CO₂ 地质封存作为现阶段温室气体减排的有效技术之一,在石油行业中具有许多优势,CO₂ 沿井筒渗漏是地质封存过程中所面临的重要风险之一。为降低 CO₂ 渗漏对封存区域生态、环境和人员健康方面的不利影响,文章通过研究 CO₂ 地质封存背景和封存于地下的超临界 CO₂ 的性质,分析 CO₂ 沿井筒区域系统渗漏的潜在通道,并以此为基础开展 CO₂ 沿井筒区域系统渗漏主要影响因素的研究。

关键词 地质封存; CO₂; 井筒; 渗漏; 影响因素

文章编号: 1005-3158(2014)03-0001-04

0 引 言

气候变化是 21 世纪人类共同面临的重大挑战和威胁,已成为社会和经济发展的主要制约因素之一。为应对气候变化,中国政府提出了“到 2020 年中国单位国内生产总值 CO₂ 排放比 2005 年下降 40%~50%”的 CO₂ 减排承诺和一系列 CO₂ 减排措施。经过多年的发展,将地面捕集的 CO₂ 注入到深部地层中的地质封存已被国际社会认为是目前最经济可靠的减排技术^[1-3]。

进行 CO₂ 地质封存可以把 CO₂ 有效地封隔在地球深部。但研究结果显示,由于受到地球内部温度、压力的变化及构造活动所引发的突发事件(如地震、火山活动等)和人为因素(采矿、钻井等)的影响,封存在地下的 CO₂ 极有可能产生泄漏和逃逸^[4]。CO₂ 一旦发生泄漏和逃逸,将对泄漏点附近的人体健康、生态系统、土壤、地下水等产生不良影响,尤其是 CO₂ 在低洼地区聚集时会对该区域造成更大破坏;此外,泄漏和逃逸还增加了大气中 CO₂ 的浓度,对全球气候变化也会产生深远影响^[5-6]。本文从封存 CO₂ 沿井筒渗漏风险分析入手,探讨 CO₂ 沿井筒区域系统渗漏的影响因素,并对其进行分析。

1 二氧化碳沿井筒渗漏风险

CO₂ 的注入需要钻井,石油行业中数量巨大的钻井是开展 CO₂ 地质封存的有利基础条件,但研究结果却表明:钻井是 CO₂ 渗漏的主要途径,即地质封存 CO₂ 的最大风险来自于封存地区钻井井筒的渗漏。在美国,目前

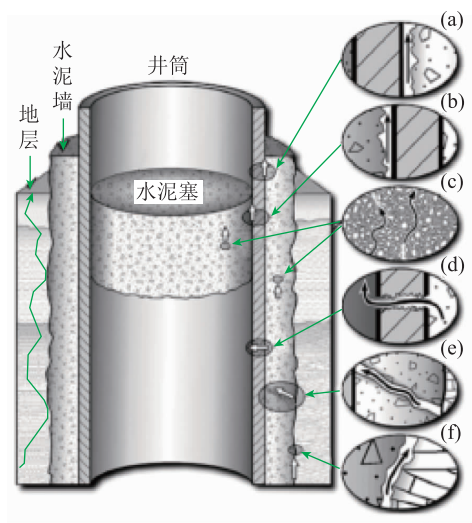
有超过 400 个地下储气库,储集了约 160 万 t 气体。然而,监测发现有 9 处发生泄漏事件,其中 5 处直接与井筒的完整性有关,有 3 处由于上覆盖层封闭不严密,还有 1 处与早期错误选址有关^[7]。发生在 Kansas 地区的钻井严重渗漏事件,直接导致 3 000 t 的 CO₂ 泄漏到大气中^[8],事发后经调查,该地区至少有 470 个钻井设施服役年龄超过 25 a,这些钻井设施的老化、破损及超负荷、超年限使用是导致泄漏事件发生的主要原因^[9]。

为了在深部地层中注入最大量的 CO₂,工程中通常选择将 CO₂ 注入到温度和压力超过临界点(31.1℃,7.38 MPa)的地层,在该类地层中 CO₂ 主要以超临界状态存在。超临界 CO₂ 流体是一种高密度气流,具有气体和液体的双重性质,即密度高于通常气体,接近液体,因而有常规液态溶剂的强度;黏度与气体相似,比液体小很多;扩散系数接近于气体,为液体的几十倍,具有较好的流动性。一旦井筒区域系统完整性产生缺陷,超临界 CO₂ 流体易膨胀、易流动的特性使其极易发生渗漏,且渗漏带来的任何临界点附近物理性质的微小变化都会造成 CO₂ 其他物理性质的剧烈变化,进一步影响井筒区域系统完整性。

理论上完整的井筒区域系统可以封隔井下的 CO₂ 流体,但是在实际工程运行过程中,由于各种机理和原因,造成包括井筒本身及附近岩层和岩层中流体在内的井筒区域系统的不完整,形成包括套管、水泥塞或水泥墙、岩层内部及相互作用面之间很多潜在的 CO₂ 渗漏通道^[10]。井筒区域系统中的潜在渗漏通道示意图 1。

* 中国石油低碳关键技术研究所课题-温室气体捕集与利用关键技术研究(课题编号:2011E-2409)。

唐丹,2009 年毕业于西南石油大学矿产普查与勘探专业,硕士,现在中国石油安全环保技术研究院环保技术研究所从事石油行业二氧化碳封存技术研究。通信地址:北京市昌平区沙河镇西沙屯桥西中国石油创新基地 A 座 621 室,102206



a—油井套管与水泥墙之间的通道；
b—油井套管与灌注水泥之间的通道；
c—通过油井内所灌注水泥的通道；d—通过油井套管内的通道；
e—通过水泥墙内的通道；f—水泥墙与岩石之间的通道。

图1 井筒区域系统中的潜在渗漏通道

2 二氧化碳沿井筒渗漏影响因素

CO₂ 地质封存工程是一项工程系统和自然系统紧密结合的产物。分析 CO₂ 沿井筒渗漏的影响因素可从这两方面入手。自然系统包含地质条件、社会条件、自然条件等因素，工程系统包含设备、材料、施工与组织等因素。

CO₂ 沿井筒渗漏影响因素见表 1。

表 1 CO₂ 沿井筒渗漏影响因素

系统	条件	内容
自然系统	地质条件	地形地貌
		地质构造
		地层岩性
		水文地质条件
		岩土体物理力学性质
工程系统	社会条件	社会需求、政治环境、经济环境、社会环境
	自然条件	生态环境、气候条件、人文地理环境
	设备因素	施工机械、设备的井的年龄、井的类型、井喷、套管完整性
	材料因素	工程材质、水泥浆性能
	施工与组织	施工工艺与技术
		施工工序

表 1 中各影响因素对井筒系统完整性的影响机理不同，作用时间与概率也不同，其影响因素具体分析如下。

2.1 自然系统

◆ 地形、地貌 冲沟、河谷等低洼地区由于上覆岩层压力减小和静水压力下降，渗漏的 CO₂ 趋于向该区聚集，因此通常为高渗漏风险区。

◆ 钻井密度 钻井密度对井筒渗漏的影响特别大。钻井越多，对地层完整性的破坏越大。钻井密度高的地区极易产生井间流体窜流现象，这会造成 CO₂ 多井大面积连片渗漏。

◆ 地震 地震会使地层的形状发生改变，造成井身严重破坏变形。且由于地震的发生，还可能在区域内形成新的断层或改变早期断层的产状，断层的变化不仅对井筒系统完整性有不利影响，还对 CO₂ 地质封存工程整体的安全性产生重大影响。

◆ 背斜或高陡构造 国内油气田的勘探开发主要围绕构造圈闭进行，钻井多位于构造高点上，如背斜或高陡构造。从油气成藏理论和勘探实际情况来看，这类构造是油气易于聚集的区域。但钻井过程中，由于地层自然井斜规律性很强，钻进难度大，井身结构难以把握，一旦实际施工的井身结构与设计不一致，容易造成钻井完整性缺陷。若 CO₂ 封存区域内存在这类钻井，就增加了 CO₂ 沿井筒区域系统渗漏的通道。

◆ 地层岩性 地层岩性对井筒完整性的影响主要表现在岩石的软硬程度及塑性流变性对井筒壁产生大小不同的压力。一般软性地层和塑性流变性大的地层更容易挤压套管，使套管变形。在钻进过程中钻遇泥岩地层，可能会发生缩径现象，挤压井壁，钻遇盐岩类塑性流变性很强的地层，盐岩的蠕变变形挤压井筒也会影响其完整性。

◆ 地表水溶蚀 封存区域内，若存在目的层位或目的层位上覆地层的露头，则地表水对这些地层的露头进行溶蚀，溶蚀产生的影响从地表极有可能延伸到地下。钻井经过这些溶蚀地层，由于井筒附近岩层结构不稳定，岩层易坍塌挤压套管；已完成的钻井井筒被地下水侵蚀会产生溶蚀孔、缝、洞等 CO₂ 逃逸通道。

◆ 盖层性质 盖层性质是影响 CO₂ 在井筒区域系统内渗流的一个重要因素。越致密的地层，孔隙度和渗透率都很低，越能有效地封堵 CO₂ 流体，但越致密的岩层也越脆，在钻井和注入气体的过程中，若压力控制不够好，在盖层中易产生微裂缝，会大大增加潜在渗漏通道。

◆ 地层压力 CO₂ 的地质封存很大一部分是用于油

气田开发后期的驱油以提高采收率。油气田开发后期产层中地层压力系数普遍低于1.0,属异常低压地层。在异常低压地层中可能会出现井漏和垮塌并存的复杂情况,垮塌会挤压井筒,井漏造成地层大漏,污染储层。

社会条件和自然条件对CO₂沿井筒渗漏的影响具有间接性,主要是通过对施工人员、设备、工艺等因素的影响,间接控制CO₂沿井筒渗漏风险。

2.2 工程系统

◆ 井的年龄 井的年龄对井筒区域系统的完整性存在一定影响,主要体现在钻井工艺上。针对不同钻井情况有不同分析,一般井的年龄越老,井筒区域系统完整性缺失的风险也越大。

◆ 井的类型 在油气田勘探开发过程中有探井、生产井、注水(气)井、基准井、参数井、剖面井、构造井、资料井、调整井、检查井、观察井等多种井。各种井由于井内管柱、井口装置、固井质量和使用频率等的差异,对井筒区域完整性的影响不同,一般较为规范的井,如油气生产井、注水(气)井,监测井等对渗漏发生的影响较小。

◆ 井喷 井喷具有不可预知性。超临界CO₂的井喷会导致套管内温度和压力的急剧变化,尤其对套管的机械完整性和水泥的固井质量产生很大影响。

◆ 套管完整性 套管完整性是井筒区域系统完整性较为核心的部分。一般从两方面来评价套管的完整性,一是由于套管磨损造成强度降低的风险,二是由于套管制造或者材料缺陷造成强度降低的风险。不管是磨损、材料缺陷、制造等原因,强度降低均会增加套管破损的可能性,增大渗漏风险。

◆ 水泥浆性能 水泥浆主要由油井水泥、配浆水和外加剂根据设计以一定比例配置而成。这些材料中,每一种均能通过化学作用和物理作用对水泥浆性能及固结后的水泥环特性产生影响。由于不同水泥类型对应力变化和化学腐蚀的抵抗力并不相同,不合适的水泥在固井和封井过程中会产生裂缝,形成CO₂渗漏通道。

◆ 表层套管深度 随着表层套管深度的增加,渗漏可能性也随之增加。但在某些地形条件下,由于地层高差大,表层套管必须下入地下一定深度才能确保安全钻井和减少地表松散岩石对钻井的影响。

◆ 套管居中情况 如果套管不居中,环形空间中比较狭窄的一侧会形成连续的泥浆通道,水泥浆顶替效率较低,尤其在斜度大的井段,套管不易处于居中位置,较长的泥浆通道会产生较多裂缝。

◆ 固井质量 固井的主要目的是形成足够的剪切胶结力,支撑套管;形成足够的水力胶结力,封隔油、气、水层。可用水泥浆顶替效率、水泥浆胶结效率等描述固井质量。固井质量不好,易在水泥环内、水泥环与套管间产生微裂缝,必要时可以采用管外封隔器固井,做到层层封隔,确保全井筒环空的密封效果;采用正反注水泥工艺确保水泥浆返至地面。而固井质量的好坏可以用声波幅度测井(CBL)、声波密度测井(VDL)、超声成像测井(USD)等测井仪器进行检测评价。

◆ 井斜 钻井的造斜段和稳斜段由于井身结构比直井段复杂,钻进方式比直井段慢且复杂。所以一般斜井的渗漏风险比直井大,且随着斜度增大,风险也增大。

◆ 完井层段 一般来说,完井层段越深,井筒区域完整性越强。因为绝大多数井的深井层段比浅井层段有更好的固井质量,浅井层段通常固井质量较差或固井水泥完整性破坏严重。

◆ 完井类型 套管在地层环境下长期和矿化度较高的地层水接触,被强烈腐蚀。由于这类腐蚀严重,选用套管完井的钻井比非套管完井的钻井具有更大的井筒完整性缺失风险。研究表明,套管完井的钻井造成的渗漏风险占所有渗漏风险井的九成以上。

◆ 泥浆漏失 泥浆漏失会形成泥饼,泥饼收缩形成微裂缝是CO₂沿井筒渗漏的潜在通道。

◆ 增产增注 在油田开发的中后期,由于产量下降,经常采取一些增产增注的方式来提高油、气产量,增产增注产生的油层破坏和水泥环破坏会形成CO₂运移的通道。

◆ 开采 随着油、气的开采,储层压力下降导致岩石的有效应力增大,这会增加盖层、水泥和套管的压力,随着这类压力增加,有可能会发生其破裂。

◆ 注气 注入CO₂流体的过程会导致井身压力和温度的重新分布和改变,尤其是温度骤降会引起套管收缩,让水泥环受到向内侧拉的力,进而使套管与水泥环或水泥环与岩石之间产生微环隙或微裂缝。

◆ 封井 封井过程中有一系列的切割套管、注入水泥基测试等工艺,这些工艺会引起井身完整性的变化。

◆ 腐蚀 CO₂注入地下后,与地层水接触,部分溶于地层水形成酸性液体。研究表明,这些酸性液体的pH值最低可降至3,如此低pH值的溶液对井筒区域系统中的套管和水泥腐蚀性很强(易腐蚀套管中强度减弱和材质缺陷部位),腐蚀的套管和水泥会产生孔、缝、洞等,对井的完整性危害较大。

3 结束语

地质封存工程中发生 CO₂ 沿井筒区域系统渗漏的风险很大,究其原因主要是封存区域内钻井数量大,且井筒区域系统完整性受多种因素影响,某些因素产生的影响无法避免(如地震、封井、注采等)。地质封存工程中影响 CO₂ 沿井筒渗漏的各种因素均能影响井筒区域系统的完整性,但由于其引发风险的机理不同,产生风险的大小也不同。因此,应将各种影响因素进行分类研究后,开展分级、分主次控制。现阶段采用一定的方式方法可以对套管完整性、腐蚀、水泥类型和固井质量等因素开展定量研究,分析其风险大小,其余不能进行定量分析的因素带来的影响只能根据具体情况开展定性分析。

参考文献

- [1] 张洪涛,文冬光,李义连,等.中国二氧化碳地质埋存条件分析及有关建议[J].地质通报,2005,24(12):1101-1110.
- [2] Bruant R G, Guswa A J, Celia M A, et al. Safe Storage of CO₂ Deep Aquifer[J]. Environment Science and Technology, 2002, 36(11): 240-245.
- [3] Benson S M, Hepple R, Apps J, et al. Lesson Learned from Natural and Industrial Analogues for Storage of Carbon Dioxide in Deep Geological Formations, Earth Sciences Division[M]. Berkeley: E. O. Lawrence Berkeley National Laboratory, 2002.
- [4] 许志刚,陈代钊,曾荣树. CO₂ 地质埋存渗漏风险及补救对策[J].地质评论,2008,54(3):373-386.
- [5] 曾荣树,孙枢,陈代钊,等.减少二氧化碳向大气层的排放[J].中国科学基金,2004,18(4):196-200.
- [6] 于贵瑞.全球变化与陆地生态系统碳循环和碳蓄积[M].北京:气象出版社,2003.
- [7] Perry K F. Natural Gas Storage Industry Experience and Technology: Potential Application to CO₂ Geological Storage[C]. // Benson S M. CO₂ Capture for Storage in Deep Geologic Formations Results from the CO₂ Capture Project, Vol. 2: Geologic Storage of CO₂ with Monitoring and Verification. London: Elsevier, 2005: 815-826.
- [8] Bert M, Ogunlade D, Manuela L. IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage[M]. New York: Cambridge University Press, 2005.
- [9] Lee A M. The Hutchinson Gas Explosions: Unravelling a Geologic Mystery, Kansas Bar Association[C]. 26th Annual KBA/KIOGA Oil and Gas Law Conference, 2003: 3-29.
- [10] Celia M A, Bachu S, Nordbotten J M, et al. Quantitative Estimation of CO₂ Leakage from Geological Storage: Analytical Models, Numerical Models, and Data Needs[C]. Proc. GHGT-7 Meeting, Vancouver, September 2004.

(收稿日期 2013-10-08)

(编辑 王薇)

2014 年世界环境日中国主题“向污染宣战”

环境保护部有关负责人向媒体公布,2014 年“六·五”世界环境日中国主题为“向污染宣战”,旨在体现我们党和国家对治理污染紧迫性和艰巨性的清醒认识,彰显以人为本、执政为民的宗旨情怀和强烈的责任担当精神,倡导全社会共同行动,打一场治理污染的攻坚战,努力改善环境质量,保卫我们赖以生存的共同家园。

这位负责人指出,生态文明建设关系人民生活,关乎民族未来。向污染宣战是破解我国生态环境难题的必然选择,是推进生态文明建设的迫切需要。向污染宣战的主攻方向,是深化大气污染防治,强化水污染防治,抓好土壤污染治理,加大重金属、化学品和危险废物污染防治力度,深化工业污染防治。通过采取稳、准、狠的举措,逐步改善环境质量,让人民群众看到政府的决心,看到解决环境问题的希望。

这位负责人说,当前,中国环境保护既处于任务繁重、压力空前的艰难时期,也处于有所作为、解决新老问题的关键时期。确定“向污染宣战”作为今年世界环境日主题,主要出于以下几个方面的考虑:一是突出当前党和政府对环境问题的高度重视;二是积极回应人民群众对雾霾等焦点环境问题的关切和期待;三是展示中国政府铁腕铁规治污的坚定决心和应对雾霾等突出环境问题的积极行动;四是倡导包括政府、企业、公民在内的全体社会成员一起努力,共同建设天蓝地绿水净的美好家园。

据了解,联合国环境规划署确定今年世界环境日主题为“提高你的呼声 而不是海平面”,旨在呼吁国际社会采取紧急行动,帮助小岛屿发展中国家应对不断增长的风险,尤其是气候变化。

“六·五”期间,环境保护部将按惯例举办一系列宣传纪念活动,向社会推出围绕中国主题及大气污染防治行动的宣传片和宣传挂图,举办世界环境日主题纪念活动等。各地也将围绕中国主题,结合实际开展丰富多彩的宣传纪念活动,汇聚全社会的力量,不断改善环境质量,为建设美丽中国做出更大的贡献。

(摘编自 中国新闻网 2014-05-26)