

地下咸水层封存 CO₂ 的研究现状及展望

叶斌^{1,2} 叶为民^{1,2}

(1. 同济大学地下建筑与工程系; 2. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室 上海 200092)

摘要: CO₂ 捕获和封存技术是一项具有广泛应用前景的碳减排新技术, 而地下咸水层是封存 CO₂ 最适宜的场所之一。首先介绍了地下咸水层封存 CO₂ 的基本原理; 然后重点从三个方面论述了利用地下咸水层封存 CO₂ 的研究现状, 包括 CO₂ 在地下咸水层中的运移规律、地下咸水层的地质条件分析与评价, 以及 CO₂ 封存容量的估算三个方面; 最后建议我国要进一步研究超临界 CO₂ 在地下咸水层中的渗流机理, 并对具有封存潜力的地下咸水层逐步开展地质勘探与评价工作。

关键词: 温室效应 气候变化 二氧化碳封存 二氧化碳减排 地下咸水层

中图分类号: X141

文献标识码: A

文章编号: 1672-3791(2012)12(c)-0066-05

RESEARCH STATUS AND PROSPECT OF CO₂ SEQUESTRATION IN DEEP SALINE AQUIFER

YE Bin^{1,2} YE Weimin^{1,2}

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, P.R.China)

Abstract: CO₂ Capture and Storage is an efficient CO₂ emission reduction technology with wide application prospect. Deep saline aquifer is considered to be the most suitable site for CO₂ sequestration. Firstly, the basic principle of CO₂ sequestration in deep saline aquifer was introduced; secondly, research status and prospect of CO₂ sequestration in deep saline aquifer were discussed from three aspects, including transport and transformation mechanisms of CO₂ in deep saline aquifer, investigation and assessment of geological conditions of deep saline aquifer, and estimation of CO₂ sequestration capacity; finally, it was advised that the seepage mechanism of CO₂ after injected into deep saline aquifer should be further studied, and China should start the work of geological investigation for potential sites that are possible to be used for CO₂ sequestration.

Key Words: Greenhouse effect; Climate change; CO₂ sequestration; CO₂ emission reduction; Deep saline aquifer

CO₂ 因具有温室效应被普遍认为是导致全球气候变暖的重要原因之一。如何减少 CO₂ 排放, 已经成为全人类面临的共同难题。国际社会也一直在积极寻求 CO₂ 的减排对策。绝大多数的 CO₂ 排放都是由于燃烧化石燃料引起的。化石燃料(包括煤炭、石油、天然气等)是世界能源的主要组成部分, 在未来几十年内, 预计化石燃料的使用和消耗将进一步增加。国际社会对化石燃料的长期依赖性迫使各国亟需寻求新的减排方法。CO₂ 捕获和封存技术(CO₂ Capture & Storage, 以下简称 CCS)被认为是一项具有广泛应用前景的 CO₂ 减排新技术。

CCS 是一种将工业和能源等集中排放源产生的 CO₂ 进行收集、运输并安全封存到某处使其长期与大气隔离的技术。CCS 主要由捕获、运输和封存三个环节组成。其中, 关于 CO₂ 的捕获与运输环节, 已经有相对成熟的技术和工艺, 现阶段面临的主要是成本问题。而最后一个环节, CO₂ 的封存, 目前仍然存在着很大的不确定性, 面临着许多挑战。CO₂ 的封存方案主要包括地质封存和海洋封存两大类。由于海洋封存有可能对海洋生态环境带来灾难性的影响, 国

际社会目前推动的主要是 CO₂ 的地质封存。CO₂ 的地质封存场所主要包括: 开采后期(或枯竭的)油气层、不可开采的煤层, 以及深部地下咸水层。其中, 地下咸水层在世界范围内分布广泛, 并且拥有巨大的封存潜力, 被认为是封存 CO₂ 最适宜的场所之一。但是利用地下咸水层封存 CO₂ 涉及到 CO₂ 与深部地质环境的复杂相互作用, 现有的知识技术水平还无法确保 CO₂ 能够安全、稳定和长久(几百年甚至上千年)地封存于地下, 因此需要科学家们对此开展进一步深入的研究。

1 地下咸水层封存 CO₂ 的基本原理

地下咸水层是指地底深处具有封闭构造的含地下水盐溶液的岩层。地下咸水层封存 CO₂ 的基本原理, 就是将加压后高密度的 CO₂ 通过注射并注入地下岩层的孔隙空间中以替代原有位置的地下咸水。在此过程中, CO₂ 会部分溶解于地下咸水中, 或者与地下咸水中的矿物成分或构成岩石骨架的矿石颗粒发生化学反应, 从而达到长期封存 CO₂ 的目的。

CO₂ 注入地下咸水层后主要存在三种

状态: (1) 溶解状态: 一部分 CO₂ 将溶解在地下水中。(2) 超临界状态: CO₂ 一般封存于深度大于 800m 的地下咸水层中, 此时地下温度和压力均在 CO₂ 的临界点以上, CO₂ 将处于一种被称作超临界的状态, 其特点是既具有近似液体的较大密度, 又具有近似气体的良好的流动性。(3) 矿物状态: 在咸水层里, 部分 CO₂ 还能够与地下水及岩层中的矿物或有机质发生化学反应生成碳酸盐矿物, 形成最为稳定和持久的存在形式。在这三种形式中, 由于 CO₂ 在地下水中的溶解能力较小, 溶解封存只占 4% ~ 6%, 而矿物封存进程缓慢, 需要上千年甚至更长的时间才能达到一定的封存量。因此, 在科学家们所关注的时间跨度内(几十年至几百年), 注入地下咸水层中的 CO₂ 主要以第二种形式, 即超临界状态存在。

2 地下咸水层封存 CO₂ 的研究现状

2.1 CO₂ 在地下咸水层中的运移规律

前已述及, CO₂ 在注入地下咸水层后主要以超临界状态存在。而超临界状态 CO₂ 在地下咸水层中的运动是一个非常复杂的多相态流动过程: 一方面, 超临界状态 CO₂ 注

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)课题(2011AA050604)资助。

作者简介: 叶斌(1977, —), 男, 江西人, 讲师。主要从事地质工程岩土工程方面的研究工作。

入地下咸水层后将在压力梯度和浓度梯度的作用下随地下水一起扩散;另一方面,由于超临界状态 CO_2 的密度往往小于地下流体,因此会在浮力的作用下向上方运动。此外,当 CO_2 移动通过岩层孔隙时,毛细作用会阻碍 CO_2 的运动,有一些 CO_2 因毛细作用力而滞留在孔隙空间中。这三种运动往往同时进行,构成了非常复杂的渗流行为。同时, CO_2 的渗流过程还有可能受到许多环境因素的影响,如地层中的温度和压力会直接影响 CO_2 的粘滞性,进而影响其在岩石介质中的渗透性能; CO_2 -地下水-岩石三相系统中的矿物化学反应尽管进程缓慢,但是即使生成少量的碳酸盐矿物也可能使岩石介质中的孔隙率发生变化,从而对 CO_2 的渗透性能产生影响。

伴随着CCS技术的发展,科学家们首先利用现场试验和监测数据开始研究 CO_2 封存于地下咸水层后的运移规律。1996年,挪威的Statoil石油公司在北海的Sleipner天然气田上开始了人类历史上第一次把 CO_2 封存于地下咸水层的工业实践。该公司每年向位于海底下1000 m深的高渗透性Utsira砂岩地层中注入100万吨左右的 CO_2 ^[1]。以此为契机,国际能源署(IEA)于1996年至1999年实施了Sleipner Aquifer CO_2 Storage (SACS)国际合作研究计划^[2],采用地震波法跟踪监测注入地下后的 CO_2 的迁移状态。监测结果显示大部分超临界状态 CO_2 在浮力作用下先逐渐上浮,达到上覆不透水岩层的底部后沿着上覆岩层的底部轮廓向四周逐步扩散。这说明浮力在超临界状态 CO_2 的运动中起到非常显著的驱动作用。2004年,美国能源局在德克萨斯州北部的Frio地层中开展了 CO_2 咸水层封存的先导性试验计划^[3]。该计划利用一口注射井向Frio地层中以每天160吨左右的速率注入 CO_2 ,并利用另一口观测井进行 CO_2 注入前、注入过程中以及注入后的水文监测、地球化学监测和地球物理监测。日本在 CO_2 地下封存研究方面也进行了探索性的试验项目。2000年至2007年,日本RITE研究所在长冈将大约1万吨的 CO_2 注入地下1200 m深的咸水层中,并采用地震波法、直接钻孔勘查法、孔间弹性波层析法等多种手段监测 CO_2 在地下咸水层中的迁移状况^[4]。监测结果表明,超临界状态 CO_2 在地下咸水层中渗透速度缓慢,处于非常稳定的封存状态。在阿尔及利亚的In Salah地区,石油公司自2004年开始也将从天然气中分离出来的 CO_2 重新注入到地下咸水层中,并观测 CO_2 的运移过程。除了使用地震波法和钻孔观测等常规方法以外,还首次利用卫星影像技术观测注射井

附近的地表运动情况^[5]。此外,加拿大、德国、英国等国也先后开展了 CO_2 在地下咸水层中封存的试验项目研究^[6]。在国内,神华集团结合煤化工项目在内蒙古鄂尔多斯盆地,中科院地质与地球物理研究所庞忠和领导的研究小组结合地热资源的利用在渤海湾盆地都开展了 CO_2 地下咸水层封存的试验项目。目前,相关研究正在进行之中。这两个项目的实施将对我国今后的 CO_2 地下咸水层封存实践起到重要的指导作用。

CO_2 在岩层中的渗透过程受到多种因素的影响,由于现场试验无法对各种影响因素进行有效的控制,因此,可控条件下的室内渗透试验成为研究 CO_2 渗透机理的重要基础手段。Xue等人^[7-8]开展了一系列研究 CO_2 在岩石介质中的渗透过程的室内试验。他们分别将气态、液态和超临界状态的 CO_2 注入砂岩试样中,并用弹性波检测不同相态的 CO_2 在岩石中的运动情况,发现超临界状态 CO_2 在岩石中的渗透速度要远大于气态和液态的 CO_2 ,并且渗透性能与岩石的孔隙结构特征紧密相关。然而囿于试验设备和测试手段,目前 CO_2 渗透的室内试验成果还相对较少。

溶解于地下水中的 CO_2 与地下水盐溶液及岩石矿物成分发生的化学反应也有可能影响 CO_2 在岩层中的渗透性能。一些学者通过室内试验研究了 CO_2 -地下水-岩石系统中所发生的化学反应^[9-10]。溶解在地下水中的 CO_2 生成的碳酸根离子能与地下水中的金属阳离子或是岩石中的硅酸盐矿物发生化学反应,生成碳酸盐矿物。尽管这是矿物封存 CO_2 的一种稳定方式,但是生成的碳酸盐矿物有可能聚集在岩石孔隙中,降低岩石的孔隙率,从而降低 CO_2 在岩层中的渗透性^[11]。Xiao等人^[12]对 CO_2 注入地下咸水层后的化学反应过程进行了数值模拟,发现在注射井附近的区域由于岩层中硅酸盐矿物的溶解会导致岩石孔隙率增大,而在远离注射井的区域由于碳酸盐矿物的形成,岩石的孔隙率会降低。

此外,数值建模和分析也是研究 CO_2 在地下咸水层中运移规律的重要手段。有不少学者在这方面进行了相关的工作。例如,Weir等人^[13],Pruess等人^[14]对 CO_2 注入均质地层后的径向扩散流动过程进行了数值模拟分析;Lindeberg^[15]在 CO_2 流动模拟过程中考虑了断层的影响;White等人^[16],Zhang等人^[17]则通过数值模拟分析了地层的不均匀性对 CO_2 流动过程的影响;Sasaki等人^[18]对 CO_2 的注入过程进行了数值模拟研究,主要分析了地下岩层的压力和温度对 CO_2 渗透过程的影响。Yamamoto等人^[19]对 CO_2 封存于东

京湾地下咸水层后的迁移状态进行了数值模拟,发现 CO_2 的渗透会引起浅层地下水孔隙水压的上升并对地下水的渗流产生影响。在国内,郑艳等人^[20]对江汉盆地江陵凹陷区 CO_2 流动过程进行了数值模拟,分析了注入 CO_2 的运移分布和溶解扩散情况。刘永忠等人^[21]通过数值模拟研究了超临界 CO_2 注入的过程参数和咸水层特性对 CO_2 注入特性和咸水层中饱和度分布的影响。然而,目前的数值模拟研究采用的主要是传统的多相流体在多孔介质中的渗透理论和控制方程,而尚未考虑超临界状态 CO_2 流动所具有的特殊性质,如在压力和温度作用下 CO_2 在超临界状态-溶解态之间的相态转化因素等。

2.2 地下咸水层的地质条件分析与评价

考虑到 CO_2 地下封存的安全性和空间封存效率,适合于封存 CO_2 的地下咸水层必须满足如下四个方面的标准^[6]:(1)深度大于800 m,此时地层的温度和压力均在 CO_2 的临界点以上,能保证 CO_2 处于超临界状态,具有较大的密度和较好的流动性。(2)具有容纳和封存 CO_2 的能力,即地下咸水层必须具有较大的体积规模,较大的孔隙率和较高的渗透性。(3)具有良好的封闭构造,保证注入的 CO_2 不会逃逸返回至大气层。(4)处于稳定的地质环境中,发生地质构造运动的概率小。这四个方面的要求都与 CO_2 储层和盖层的地质条件紧密相关,因此在选择封存场所时必须对地下咸水层储层和盖层的地质特征做综合的评价。孙枢^[22]总结了 CO_2 地下封存选址时需要考虑的地质因素,指出 CO_2 封存场所应优先选择岩层完整性较好的沉积盆地,并进一步考虑其封存介质的特征,包括它们的几何形态、内部架构、岩石学-矿物学特征、孔隙度-渗透率、非均质性、岩石力学性质、破裂程度和整体完整性等。现场(原地)条件特征,包括应力条件、压力、温度、流体流动方向、地下水盐度等。要综合考虑这些因素必须掌握足够的地质勘探信息。然而对于大多数的地下咸水层,科学家们目前掌握的信息并不充分,因此在很多情况下只能从宏观尺度上粗略地判断某个地下岩层用于封存 CO_2 的可行性。

为了克服认知上的不足,不少国家已经开展了针对具有 CO_2 封存前景的地下岩层的地质勘探与评价工作。如Chadwick等人^[23]结合挪威北海的Sleipner项目,分析了用于封存 CO_2 的Utsira砂岩层及其上覆岩层的地质特征。Bradshaw等人^[24]对澳大利亚有可能用于封存 CO_2 的100个沉积盆地进行了调查和分析,着重考虑它们的地质构造

特点及用于封存CO₂的可行性。日本也对具有封存潜力的地下岩层的地质特征进行了调查和分析,发现满足封存条件的地下咸水层主要分布在近海大陆架区域^[25]。在国内,张洪涛等人^[26]从我国主要的沉积盆地的地质成因出发,分析了中国适宜CO₂埋存的地质条件和潜在的埋存区域,指出受新构造运动的影响,我国主要大型盆地均沉积了多层组合的沉积体系,形成了较好的封存条件。如在松辽平原、黄淮海平原、长江三角洲、西北内陆盆地、四川盆地,都有可能分布有满足CO₂封存要求的地下咸水层。但是,国内目前关于CO₂地下封存的地质条件的调查与评价方面的具体工作尚未全面开展。

2.3 CO₂封存容量的估算

在CO₂地下封存实施之前,除了要对CO₂封存的稳定性进行评价以外,还必须对它的封存容量进行估算。正确可靠的估算对于封存选址以及封存方案的制定等都具有重大的意义。不少科研机构 and 科学家已经对全球或某个区域等不同尺度的CO₂地下咸水层封存容量进行了评估。例如,欧洲多个研究机构于2006年共同发起了EU-GeoCapacity项目,专门致力于评价欧洲范围内不同地区的CO₂地质封存潜力^[27-32]。Shafeen等人^[33]对加拿大Ontario地区的两个地下咸水层的封存容量进行了计算。Ogawa等人^[34]评估了日本的地下咸水层的封存潜力。国内的相关工作也已经逐步开展。李小春等^[35]利用溶解度法估算了中国24个主要沉积盆地1000~3000m深度范围内的CO₂封存容量。任相坤等人^[36]对鄂尔多斯盆地的CO₂地质封存潜力进行了分析,初步预测CO₂的封存容量大约为数百亿吨。张亮等人^[37]对我国南海西部的5个地下咸水层的封存潜力进行了测算。周蒂等人^[38]对广东珠江口盆地的CO₂封存潜力进行了估算,预测其封存容量可达308Gt,能够容纳广东省上百年的工业CO₂排放量。

部分学者也提出了一些通用化的估算方法^[39-42]。这些方法主要是通过地下咸水层的储层体积来估算CO₂的封存容量。首先根据储层的几何尺寸估算其体积大小,然后测算单位体积的储层所能容纳CO₂的数量,进而估算整个咸水层的CO₂封存容量。然而,由于在评估过程中所做的基本假定,所采用的估算手段,以及所使用的基础数据的不同,即使对同一个封存区域,不同的科学家所得到的估算结果也往往大不相同。Bradshaw等人^[43]总结了43个由不同科学家或研究机构对世界及区域范围内CO₂地下封存容量所做的估算结果,发现不同学

者对同一区域的估算结果可能存在数量级上的差异。为了克服这一困难,碳封存领导人论坛(Carbon Sequestration Leadership Forum, CSLF)已经着手制定标准化的统一的评估方法来消除分歧^[44]。然而,评估结果的可靠性依然取决于输入信息的准确度,因此,通过地质勘探和现场试验研究获取更加完整和准确的储盖层信息资料对于CO₂封存容量的评估具有重要的意义。

3 结论与展望

作为发展中国家,我国在目前阶段尚未承担强制性的减排任务,但是我国CO₂排放量已位居世界第一,面临着巨大的减排压力。研究开发具有我国自主知识产权的、经济高效的CO₂地下咸水层封存技术,推动CO₂减排,对于实现我国社会经济可持续发展和营造良好的国际环境具有重要意义。但是,利用地下咸水层封存CO₂还面临着许多困难和挑战,有许多问题需要开展进一步的研究。

(1)CO₂注入地下咸水层以后,将主要以超临界状态的方式存在。因此,研究超临界状态CO₂在地下咸水层中的运动与变化机理对于CO₂封存的安全性和稳定性评估具有重要的意义。目前,科学家们主要是通过CO₂封存的现场试验和监测数据研究CO₂封存于地下咸水层后的运动与变化规律。也有部分学者通过室内试验以及数值模拟分析的方法进行研究。

(2)适合于封存CO₂的地下咸水层必须满足一定的标准,这些标准涉及到地下咸水层的地质条件的各个方面。要想全面获得这些信息,需要进行大量和艰巨的地质勘探和现场试验工作。现阶段,对于大多数的地下咸水层,科学家们对相关信息的掌握得还不充分,因此在很多情况下只能从宏观尺度上粗略地判断某个地下岩层用于封存CO₂的可行性。

(3)关于CO₂地下咸水层封存容量的评估,不同学者得到的估算结果存在巨大的差异,这是由于学者们所做的基本假定,所采用的估算方法,以及所使用的基础数据的不同而造成的。为此,碳封存领导人论坛(CSLF)提出了统一的CO₂封存能力评估的标准化方法,但是估算结果的可靠性依然取决于输入信息的准确度。因此,通过地质勘探和现场试验等研究手段获取更加完整和准确的地下咸水层的地质信息对于CO₂封存容量的评估具有重要的意义。

与先进国家相比,我国关于地下咸水层封存CO₂方面的研究工作起步相对较晚,但是从总体上来说,国际上研究的历史也

并不算太长,世界各国整体均多处在试验阶段。因此,我国仍然具有赶超国际先进水平的机会。综合本文的分析结果,笔者认为我国现阶段应当加强超临界CO₂在地下咸水层中的渗流机理方面的研究工作,并在全国范围内对具有封存潜力的地下咸水层逐步开展地质勘探与评价工作。

参考文献

- [1] Korbol R, Kaddour A. Sleipner vest CO₂ disposal-injection of removed CO₂ into the Utsira formation [J]. Energy Conversion and Management, 1995, 36(6-9): 509-512.
- [2] Tore A, John G. Demonstrating storage of CO₂ in geological reservoirs: The Sleipner and SACS projects [J]. Energy, 2004, 29(9-10): 1361-1369.
- [3] Hovorka S D, Benson S M, Doughty C, et al. Measuring permanence of CO₂ storage in saline formations: the Frio Experiment [J]. Environmental Geosciences, 2006, 13(2): 105-121.
- [4] 地球环境产业技术研究机构. 平成19年度二酸化炭素地中貯留技术研究开发成果报告书[R]. 2008. Research Institute of Innovative Technology for the Earth (RITE). Report of CO₂ geological sequestration project [R]. 2008.
- [5] Riddiford F, Wright I, Bishop C, et al. Monitoring geological storage: the In Salah Gas CO₂ storage project [C]// Proceedings of the 7th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, Vancouver, Canada, 2004: 1353-1359.
- [6] Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC special report on carbon dioxide capture and storage [R]. 2005. http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srccs/srccs_wholereport.pdf
- [7] Xue Z Q, Ohsumi T. Seismic wave monitoring of CO₂ migration in water-saturated porous sandstone [J]. Exploration Geophysics, 2004, 35(1): 25-32.
- [8] Xue Z Q, Lei X L. Laboratory study of CO₂ migration in water-saturated anisotropic sandstone based on P-wave velocity imaging [J]. Geophysical Exploration, 2006, 59(1): 10-18.
- [9] Kaszuba J P, Janecky D R, Snow M G. Carbon dioxide reaction processes

- in a model brine aquifer at 200 and 200 bars: Implications for geologic sequestration of carbon[J]. *Applied Geochemistry*, 2003, 18(7): 1065-1080.
- [10] Liu L, Suto Y, Greg B, et al. CO₂ injection to granite and sandstone in experimental rock/hot water systems [J]. *Energy Conversion and Management*, 2003, 44(9): 1399-1410.
- [11] Lin H, Fujii T, Takisawa R, et al. Experimental evaluation of interactions in supercritical CO₂/water/rock minerals system under geologic CO₂ sequestration conditions [J]. *Journal of Materials Science*, 2008, 43(7): 2307-2315.
- [12] Xiao Y T, Xu T F, Pruess K. The effects of gas-fluid-rock interactions on CO₂ injection and storage: insights from reactive transport modeling [J]. *Energy Procedia*, 2009, 1: 1783-1790.
- [13] Weir G J, White S P, Kissling W M. Reservoir storage and containment of greenhouse gases [J]. *Energy Conversion and Management*, 1995, 36(6-9): 531-534.
- [14] Pruess K, Garcia J. Multiphase flow dynamics during CO₂ disposal into saline aquifers [J]. *Environmental Geology*, 2002, 42(2-3): 282-295.
- [15] Lindeberg E. Escape of CO₂ from aquifers [J]. *Energy Conversion and Management*, 1997, 38(s1): 235-240.
- [16] White S P, Allis R G, Moore J, et al. Simulation of reactive transport of injected CO₂ on the Colorado Plateau, Utah, USA [J]. *Chemical Geology*, 2005, 217(3-4): 387-405.
- [17] Zhang Y, Oldenburg C M, Finsterle S, et al. System-level modeling for economic evaluation of geological CO₂ storage in gas reservoirs [J]. *Energy Conversion and Management*, 2007, 48(6): 1827-1833.
- [18] Sasaki K, Fujii T, Niibori Y, et al. Numerical simulation of supercritical CO₂ injection into subsurface rock masses [J]. *Energy Conversion and Management*, 2008, 49(1): 54-61.
- [19] Yamamoto H, Zhang K, Karasaki K, et al. Large-scale numerical simulation of CO₂ geologic storage and its impact on regional groundwater flow: A hypothetical case study at Tokyo Bay, Japan [J]. *Energy Procedia*, 2009, 1: 1871-1878.
- [20] 郑艳, 陈胜礼, 张炜, 等. 江汉盆地江陵凹陷二氧化碳地质封存数值模拟 [J]. *地质科技情报*, 2009, 28(4): 75-82.
- Zheng Yan, Chen Shengli, Zhang Wei, et al. Numerical Simulation on Geological Storage of Carbon Dioxide in Jiangling Depression, Jiangnan Basin, China [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2009, 28(4): 75-82.
- [21] 刘永忠, 黄必武, 王乐. 非均质多孔盐水中超临界CO₂的注入压力与饱和度分布特性 [J]. *化工学报*, 2010, 61(1): 32-42.
- Liu Yongzhong, Huang Biwu, Wang Le. Characteristics of injection pressure and saturation distributions of supercritical CO₂ injection into heterogeneous saline aquifers [J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)*, 2010, 61(1): 32-42.
- [22] 孙枢. CO₂地下封存的地质学问题及其对减缓气候变化的意义 [J]. *中国基础科学*, 2006, 8(3): 17-22.
- Sun Shu. Geological problems of CO₂ underground storage and its significance on mitigating climate change [J]. *China Basic Science*, 2006, 8(3): 17-22.
- [23] Chadwick R A, Zweigel P, Gregersen U, et al. Geological reservoir characterization of a CO₂ storage site: The Utsira Sand, Sleipner, northern North Sea [J]. *Energy*, 2004, 29(9-10): 1371-1381.
- [24] Bradshaw J, Allinson G, Bradshaw B E, et al. Australia's CO₂ geological storage potential and matching of emission sources to potential sinks [J]. *Energy*, 2004, 29(9-10): 1623-1631.
- [25] Ogawa T, Shidahara T, Nakanishi S, et al. Storage capacity assessment in Japan: comparative evaluation of CO₂ aquifer storage capacities across regions [J]. *Energy Procedia*, 2009, 1: 2685-2692.
- [26] 张洪涛, 文冬光, 李义连, 等. 中国CO₂地质埋存条件分析及有关建议 [J]. *地质通报*, 2005, 24(12): 1107-1110.
- Zhang Hongtao, Wen Dongguang, Li Yilian, et al. Conditions for CO₂ geological sequestration in China and some suggestions. *Geological Bulletin of China*, 2005, 24(2): 1107-1110.
- [27] Thomas V P, Karen L A, Nikki S, et al. Assessing European capacity for geological storage of carbon dioxide - the EU GeoCapacity project [J]. *Energy Procedia*, 2009, 1: 2663-2670.
- [28] Holler S, Viebahn P. Assessment of CO₂ storage capacity in geological formations of Germany and Northern Europe [J]. *Energy Procedia*, 2011, 4: 4897-4904.
- [29] Hatziyannis G, Falus G, Georgiev G, et al. Assessing capacity for geological storage of carbon dioxide in central-east group of countries (EU GeoCapacity project) [J]. *Energy Procedia*, 2009, 1: 3691-3697.
- [30] Mart í nez R, Suarez I, Zapatero M A, et al. The EU Geocapacity Project-Saline aquifers storage capacity in Group South countries [J]. *Energy Procedia*, 2009, 1: 2733-2740.
- [31] Radoslaw T, Barbara U M, Adam W. CO₂ storage capacity of deep aquifers and hydrocarbon fields in Poland - EU GeoCapacity Project results [J]. *Energy Procedia*, 2009, 1: 2671-2677.
- [32] Shogenova A, Shogenov K, Vaher R, et al. CO₂ geological storage capacity analysis in Estonia and neighbouring regions [J]. *Energy Procedia*, 2011, 4: 2785-2792.
- [33] Shafeen A, Croiset E, Douglas P L, et al. CO₂ sequestration in Ontario, Canada. Part I: storage evaluation of potential reservoirs [J]. *Energy Conversion and Management*, 2004, 45(17): 2645-2659.
- [34] Ogawa T, Nakanishi S, Shidahara T, et al. Saline-aquifer CO₂ sequestration in Japan-methodology of storage capacity assessment [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2011, 5(2): 318-326.
- [35] 李小春, 刘延锋, 白冰, 等. 中国深部咸水含水层CO₂储存优先区域选择 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(5): 963-968.
- Li Xiaochun, Liu Yanfeng, Bai Bing, et al. Ranking and screening of CO₂ saline aquifer storage zones in China [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(5): 963-968.

(下转 71 页)



图4 手动运行组态界面



图5 自动运行组态界面

表1所示,气动元件输入、输出端子如图1所示。利用梯形图编写该实验平台的PLC程序,货运站与机械手复位及调用高速计数器子程序的PLC程序如图2所示。

2 基于组态软件MCGS的监控系统开发

THWGD-1光机电一体化实验平台的监控系统,由平台本体、PLC及MCGS构成,见图3所示。系统利用PLC指令来控制步进电机、伺服电机、变频器、机械手和电磁阀等功能部件,利用MCGS进行仿真并监控该实验平台的运行。

通过监控系统可实现对该实验平台的实时监控,监控系统的工作过程为:实验平台系统上电之后,打开MCGS组态环境,进入手动运行界面如图4所示,手动运行用于实验平台微调,此时可以点动操作。点击自动运行时,系统处于按照预先设定的程序自动运行,进入自动运行界面如图5所示。通过指示灯和组态界面,可以直观的监控实验平台的运行,在监控过程中还可方便地对PLC程序数据进行设定。

3 监控系统通信协议设计

在实际工程中,通信连接应用较多的为西门子的PPI、PROFIBUS及以太网三种网络^[4-5]。本文开发的监控系统采用的通信协议为PPI通信方式。首先,利用PPI电缆将PC机串口联结到S7-200的通讯口,并打开PLC编程软件STEP7-Micro/WIN,设置PG/PC接口,选择PC/PPI cable(PPI),设置PPI的通信地址、通信速率、通信时间及通信端口。然后,打开组态软件MCGS,添加通用TCP/IP和西门子S7-200PPI到设备窗口、打开西门子S7-200PPI而进入设备属性设置界面,连接对应的数据对象,在连接完成后选择设备调试:若0通道的数据为0,则表示通信连接成功;若数据为2时,则表示通信尚未连接成功,需要检查上述操作。

4 结论

本文针对目前PLC监控方法的不足,基于组态软件MCGS开发了光机电一体化实验平台的监控系统,较好实现PLC工作状态监控的功能。应用实践表明:该系统简单便利,可直观地观察到实验平台控制的全过程,教学效果良好。

参考文献

- [1] 姜海,田春艳.MCGS组态软件在PLC工作状态监控中的应用[J].装备制造技术,2008(2):56-59.
- [2] 徐春艳,华钢,刘晓东.基于MCGS组态软件的煤矿监控系统的研究[J].工矿自动化,2005(5):28-30.
- [3] 浙江天煌科技实业有限公司. THWGD-1型光机电气一体化控制实验系统指导书[M].2010.
- [4] 任丰兰.基于组态王和PLC的虚拟仿真教学实验系统的开发[J].机电工程技术,2012(1):43-47.
- [5] 李万军.基于西门子PLC一体化实验平台的开发与设计[J].工业控制计算机,2011(3):84-85.

(上接69页)

963-968.

- [36] 任相坤,崔永君,步学朋,等.鄂尔多斯盆地CO₂地质封存潜力分析[J].中国能源,2010,32(1):29-32. Ren Xiangkun, Cui Yongjun, Bu Xuepeng, et al. Analysis on CO₂ storage potentiality in Ordos basin [J]. Energy of China, 2010,32(1):29-32.
- [37] 张亮,任韶然,王瑞和,等.南海西部盐层CO₂埋存潜力评估[J].岩土力学,2010,31(4):1238-1242. Zhang Liang, Ren Shaoran, Wang Ruihe, et al. Estimation of CO₂ storage capacity in saline aquifers in west of South China Sea[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(4): 1238-1242.
- [38] Zhou D, Zhao Z X, Liao J, et al. A preliminary assessment on CO₂ storage capacity in the Pearl River Mouth Basin offshore Guangdong, China [J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2011,5(2):308-317.

- [39] Bachu S, Bonijoly D, Bradshaw J, et al. CO₂ storage capacity estimation: methodology and gaps [J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2007,1(4):430-443.
- [40] Zhou Q L, Birkholzer J T, Tsang C F, et al. A method for quick assessment of CO₂ storage capacity in closed and semi-closed saline formations [J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2008,2(4):626-639.
- [41] Szulczewski M, Juanes R. A simple but rigorous model for calculating CO₂ storage capacity in deep saline aquifers at the basin scale [J]. Energy Procedia, 2009,1:3307-3314.
- [42] Mart í n C F, Plaza M G, Pis J J, 0 et al. On the limits of CO₂ capture capacity of carbons [J]. Separation and Purification Technology, 74(2): 225-229.
- [43] Bradshaw J, Bachu S, Bonijoly D, et al. CO₂ storage capacity estimation:

Issues and development of standards [J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2007,1(1):62-68.

- [44] CSLF (Carbon Sequestration Leadership Forum). A taskforce for review and development of standards with regards to storage capacity measurement [R], 2005, http://www.cslforum.org/documents/Task_force_Storage_Capacity_Estimation_Version_2.pdf.