

深部咸水层 CO₂ 地质封存研究现状

刘 阳,王 媛

(河海大学土木与交通学院,江苏 南京 210098)

摘要 :从超临界 CO₂ 的物理性质出发,总结国内外深部咸水层封存 CO₂ 的机理研究、数值模拟、试验研究和工程应用方面所取得的主要成果。指出以往的研究主要集中于单一尺度研究均质地层封存 CO₂,较少考虑多尺度非均质性对咸水层封存 CO₂ 的影响。认为 CO₂ 在多尺度非均质深部咸水层中的运移与俘获特征将是碳捕捉封存技术的研究重点。

关键词 :深部咸水层;超临界 CO₂;封存机理;碳捕捉封存技术;CO₂ 地质封存

中图分类号 :TE122 **文献标识码** :A **文章编号** :1006-7647(2011)06-0074-06

State-of-the-art researches on CO₂ geologic storage in deep saline aquifer//LIU Yang, WANG Yuan(College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract :Based on the physical properties of supercritical CO₂, the main achievements in the worldwide researches on CO₂ trapping in deep saline aquifer were summarized from the aspects of mechanism, numerical modeling, tests and project applications. The results show that the majority of the current researches focus on single-scale researches on CO₂ trapping in homogenous formation, and few researches refer to the effects of multi-scale heterogeneity on CO₂ trapping. The future researches on carbon storage technology should highlight the migration and trapping features of CO₂ in multi-scale heterogenous deep saline aquifer.

Key words :deep saline aquifer; supercritical CO₂; storage mechanism; carbon storage technology; CO₂ geologic storage

全球气候变暖影响了人类及整个地球环境系统,其主要原因是 CO₂ 及其他温室气体的排放。2007 年我国 CO₂ 排放量为 59.6 亿 t,预计 2030 年碳排放量将达到 100 亿 t。CO₂ 排放量的快速增长不容忽视,中国已备受气候变化引起的负面影响。实现碳减排有以下 3 种途径:一是改变能源结构,发展新能源,尤其是可再生能源;二是提高能源利用率;三是回收排放的 CO₂ 并加以封存隔离^[1]。由于可再生能源在能源结构中比重过低,短期内难以实现根本替代化石能源的目标,而提高能源利用率发展缓慢,由煤燃烧产生的 CO₂ 对人类活动和地球环境产生了较大影响,且煤在我国发电能源中的比重大于 70%,在未来几十年里煤仍将占据中国能源结构的主导地位。因此,既要满足长期对煤的使用需求,又要实现碳减排的目的,结合碳捕捉封存技术(CCS)来减少煤燃烧产生 CO₂ 的排放是当前有效的途径,应作为重要的发展方向。CCS 就是将集中排放源的废气进行分离得到 CO₂,再压缩到超临界状态通过

输送管道送到具有封存条件的场地,将其注入地下深处永久封存^[2]。

近年来,CO₂ 地质封存作为 CCS 技术的一部分,已被认为是缓解气候变化的有效方法,可将 CO₂ 封存于废弃的油气田、枯竭的煤层、深部咸水层系统中^[3]。根据对 CO₂ 地质封存容量的评估^[4],以及对我国 CO₂ 地质封存条件的调查^[5],认为深部咸水层系统具有巨大的封存潜力。笔者主要介绍深部咸水层 CO₂ 地质封存研究进展,分别对其封存机理、数值模拟、试验研究和工程应用方面展开阐述。

1 超临界 CO₂ 的物理性质

在深部咸水层 CO₂ 地质封存中 CO₂ 以超临界状态存在。超临界 CO₂ 是指温度和压力均在其临界点(31.1℃,7.38MPa)之上的 CO₂ 流体^[6],见图 1。图中 OT 表示气固平衡的升华曲线,LT 表示液固平衡的熔融曲线,ST 表示气液平衡的饱和曲线,点 T 为三相共存的三相点,点 S 为临界点。当温度、压力超过其临

界值时 CO₂ 即为超临界流体。超临界 CO₂ 在临界点附近的一个重要特征是,温度和压力的任何微小变化都会引起其他物理性质的剧烈变化。

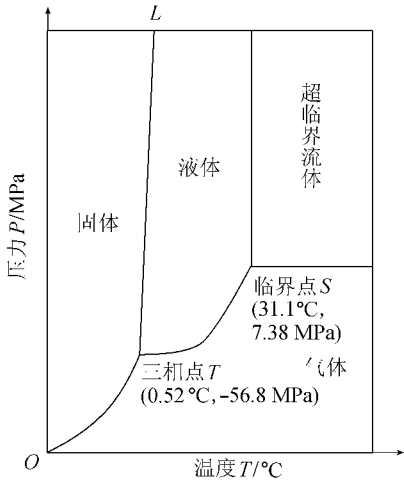


图1 CO₂ 的相态示意曲线

从物理性质上看,超临界 CO₂ 流体兼有气体和液体的双重特性^[6],即密度接近液体,是气体的几百倍;黏度接近气体,远小于液体;扩散系数介于气体和液体之间,约为气体的 1%,比液体大几百倍,因而具有较大的溶解能力(表 1)。

表 1 超临界流体与常规流体特性比较

CO ₂ 相态	密度/ (kg·m ⁻³)	黏度/ (Pa·s)	扩散系数/ (m ² ·s ⁻¹)
气体	1.977	1.38×10 ⁻⁵	3×10 ⁻⁵
液体	1100	1×10 ⁻⁴	1.77×10 ⁻⁹
超临界流体	600~800	2.04×10 ⁻⁵	5×10 ⁻⁷

2 封存机理

CO₂ 在水中具有一定的溶解度,会与盐水、围岩中的矿物发生缓慢反应生成碳酸盐,因此深部咸水层封存 CO₂ 的机理比较复杂,它还涉及不同的时间尺度问题。主要封存机理包括构造地层封存机理、水动力封存机理、束缚气封存机理、溶解封存机理和矿化封存机理。

2.1 构造地层封存机理与水动力封存机理

在深部咸水层中,CO₂ 处于超临界状态,其密度小于水,因此产生驱动 CO₂ 向上的浮力,而隔水层的隔挡使其无法进行横向和侧向的运移而滞留在隔水层下方,就形成了构造地层封存。发生此类封存的地质构造包括背斜、断块、地层尖灭等(图 2)。

当地下水的流动压力(流压)与 CO₂ 运移的浮力方向相反、大小大致相等时,可阻挡和聚集 CO₂,形成水动力封存,见图 3。

假设深部咸水层的 1%(体积分数)为构造地层,且仅有 2%的构造地层封存可用作 CO₂ 的封存,

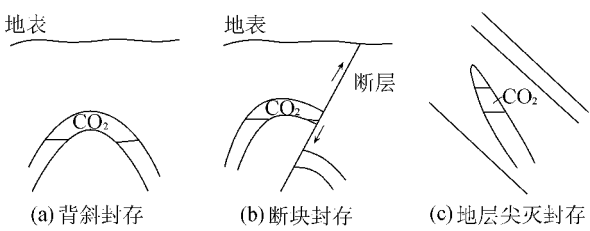


图 2 构造地层封存机理示意图

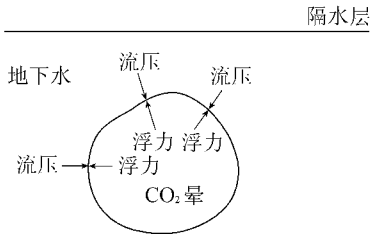


图 3 水动力封存机理示意图

可用式(1)进行理论封存量计算^[7]:

$$M_{CO_2} = \rho_{CO_2} A H \phi \times 1\% \times 2\% / 10^6 \quad (1)$$

式中: M_{CO_2} 为理论封存量,10⁶ t; ρ_{CO_2} 为地面 CO₂ 的密度,1.977 kg/m³;A 为深部含水层所在盆地的面积,km²;H 为深部含水层的平均厚度,km; ϕ 为深部含水层岩石的平均孔隙度,%。

CO₂ 在深部咸水层的封存受到储层非均质性、CO₂ 浮力及弥散等的影响,应将理论封存量与有效封存系数相乘得到有效封存量,以此评估构造地层封存的 CO₂ 量。有效封存系数有很大的不确定性,还有待深入研究。目前可根据具体的实际情况来定,也可通过数值模拟或实际工作经验确定。

2.2 束缚气封存机理

CO₂ 在储层的运移过程中,部分 CO₂ 由于气液相界面张力的作用被长久地滞留在岩石颗粒的孔隙中,即束缚气封存(图 4)。CO₂ 通过多孔介质体时,通常以球滴状被隔离在岩石孔隙中,因此通过岩石的 CO₂ 量越多,束缚在岩石孔隙中的 CO₂ 就越多。但仅有 CO₂ 通过多孔介质岩石是不够的,还需要有地下水重新渗入被 CO₂ 占据的孔隙空间 CO₂ 才会被大量地束缚下来,最终将会溶解于地层流体中。

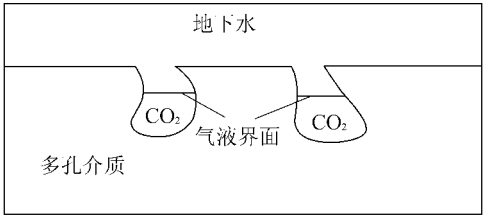


图 4 束缚气封存机理示意图

Sorensen 等^[8]通过束缚气封存机理研究了将 CO₂ 注入 North Dakota 州的一个饱和咸水层中,计算得出 CO₂ 封存量大于 10 亿 t。Zhang 等^[9]根据单井

开挖试验估算残余气体饱和度,并结合示踪剂试验预测 CO_2 逸出风险。碳封存领导人论坛^[10]指出,束缚气封存的封存量与 CO_2 气柱被水侵入的时间有关,因此封存量必须在某点被及时计算出来,并且只要注入的 CO_2 继续移动, CO_2 封存量就会随时间变化。如何实时准确地跟踪 CO_2 封存量目前还较难实现。

2.3 溶解封存机理

将 CO_2 注入储层后,部分 CO_2 在岩石孔隙中运移,与地层水接触并溶解其中,即发生溶解封存。时间及地层水中 CO_2 的饱和度决定了其溶解程度,而其在地层流体中的溶解量与溶解速度主要取决于地层水的化学成分和 CO_2 与未饱和地层水的接触率,接触率越高,其溶解速度越快。溶解封存主要发生在具有高渗透性的巨厚地层,尤其是具有高垂向渗透率的地层。

Kopp 等^[11]指出深部咸水层 CO_2 封存量的计算与咸水层的埋深、温度、溶解度和渗透性有关。李小春等^[12]利用溶解度法估算了我国主要沉积岩盆地的深部咸水层 CO_2 封存量。

2.4 矿化封存机理

矿化封存机理是一种地球化学俘获机理,是指 CO_2 与岩石及地层水发生化学反应从而产生碳酸盐沉淀。其主要影响因素为储层岩石的矿物成分、流体类型和化学反应过程。储层岩石的矿物成分不同,注入 CO_2 后的沉淀比例变化也非常大。

Xu 等^[13]在矿化封存方面做了较深入的研究,发现 CO_2 与矿物或有机质反应生成的沉淀使得 CO_2 晕的孔隙通道大幅度减少,矿化封存也因而衰退。Zhang 等^[14]采用较简单的二维模型对我国松辽盆地的 CO_2 深咸水层封存进行了较为详细的模拟。王宗华等^[15]也进行了矿物碳酸化的理论研究,并通过热力学分析确定了碳酸化的温度和压力区间。

根据构造地层封存机理和水动力封存机理,这2种封存都是在注入 CO_2 后立即开始作用,不同点在于 CO_2 流在水动力封存中受力平衡,伴随着地下水非常缓慢地运移,侧向没有受到阻挡。束缚气封存将与溶解封存结合,这是由于岩石孔隙中的 CO_2 最终会溶解在地层流体中。溶解封存比构造地层封存能实现更有效、更大封存量的封存,其封存主要发生在 100 ~ 1 000 a。由于矿化封存过程中产生的化学作用能固化 CO_2 ,在某种程度上可以说矿化封存是 CO_2 永久封存的最好方法,其时间尺度为 100 ~ 10 000 a。

3 数值模拟

美国劳伦斯伯克利国家实验室的研究学者自主

研发的 TOUGH2 是一款关于多组分多相流与热交换的应用软件。近年来,他们不断将一些新的计算模块与主程序代码相结合,主要应用于地热工程、核废料隔离、环境评估与修复等。将 TOUGH2 与 FLAC3D 结合而成的 TOUGH-FLAC 程序代码用于研究 CO_2 深部咸水层封存的岩石力学性质。为了准确描述地质条件下 CO_2 、水、盐混合物的热物理性质,开发了 ECO2 模块和 ECO2N 模块。在 TOUGH2 中加入地球化学模块开发出了非等温地质化学反应传输模型 TOUGHREACT。在 TOUGH2 中加入反分析模型开发出了 iTOUGH2,用于裂隙介质和多孔介质中非等温、多组分、多相流的反分析。具体的研究成果有:Rutqvist 等^[16]采用 TOUGH-FLAC 程序代码分析了多相流、热传导和岩体变形;Birkholzer 等^[17]用多尺度理论分析了深部咸水层中 CO_2 流的运移规律;Xu 等^[13]将 TOUGHREACT 中的地质化学模块与 ECO2N 模块联合建立模型,研究了注入 CO_2 岩层的氧化还原作用、 CO_2 固化作用、母岩矿物与含水层中矿物的交换以及在温度、压力和盐度作用下 CO_2 的溶解情况;Zhang 等^[18]运用 TOUGH2 的 EOS7C 模块建立过程模型来描述场地特征、封存机理,并用 iTOUGH2 程序代码反演参数进行参数修正。

其他国家的学者也开展了一些相关的数值模拟研究,如法国的 Lagneau 等^[19]应用 Dogger 和 Bunter 的现场试验数据,模拟研究了 CO_2 流在气液两相和相态变化中的运移、溶解及矿化过程。但其使用的 TOUGHREACT 代码不能很好地描述含水层的性质,需要调整代码才能使用在不同的压力~温度条件下所得的参数。我国也有学者开始这方面的初步研究,如李小春等^[12]初步估计我国 16 个陆相沉积盆地和 9 个海相沉积盆地的咸水层可存储 22 880 亿 t CO_2 相当于中国当前集中排放源 CO_2 年排放量的 600 倍。但我国在 CO_2 地质封存方面的研究起步较晚,诸多方面的研究工作有待深入。

在当前对 CO_2 深部咸水层封存的研究中,数值模拟是一种非常重要的研究手段。由国内外的研究现状可以看出,研究对象不同,研究的着力点不同,使用的数值模拟方法不尽相同。Pruess 等^[20]对比各种模拟方法的结果发现,多数理论结果能达成统一,但由于流体物性不同一些结果仍存在差异。因此,根据试验结果的不同,应及时更新各程序的代码。未来对流体特性的敏感性分析及离散化方法有待进一步研究,采用更准确的参数研究多种封存机理同时作用的情况,才能更好地指导现场试验。

4 试验研究

为了预测和解读地球物理、地球化学和水动力

过程,在数值模拟中所需的物理和材料特性需要通过室内和现场试验获得。国际上已有许多机构开展了这方面的研究,美国劳伦斯伯克利国家实验室的研究学者实施了多种小尺度室内试验研究来确定岩石和混合流体的物理性质以及咸水层的变形、封存机理。通过现场尺寸、构造、渗透率、孔隙度及盖层完整性评估来确定封存场地,并对注入 CO_2 的温度、压力及饱和度等进行监测,从而评估 CO_2 的渗漏风险。Zhang等^[9]设计了单井注入试验并通过残余气体饱和度这一指标来评估束缚气封存量。结合水压试验、热测试和示踪剂试验,分析了束缚气机理产生的封存量。美国能源部在德州进行了Frio brine pilot场地试验,共注入了约2000t CO_2 ,这一著名的小尺度场地试验为美国和世界的科研工作者提供了宝贵的数据资料。Doughty等^[21]在深部咸水层中注入 CO_2 并进行水文、地球物理监测,准确评价了浮力流、非均匀质地层和多相流(考虑应力历史)的共同影响。封存场所的几何尺寸、蒸发效应等都可能引起 CO_2 的渗漏,Ahlers等^[22]在位于美国西部Nevada州的Yacca山进行了 CO_2 渗漏的现场试验,试验数据有利于指导今后的试验研究、数值模拟及风险评估。Grataloup等^[23]通过对巴黎沉积盆地的位置及地质资料的研究,指出在选择 CO_2 地质封存场地尤其是深部咸水层时,应采用综合场地限制准则,即分别从环境限制和降低风险性的角度对比场地的封存能力,然后确定最适合的场地。这种方法用于巴黎盆地的选址取得了较好的成果。

赵仁保等^[24]通过室内试验研究了 CO_2 水溶液通过合成岩心、自然岩心以及微管时的流动特性以及与之作用后对渗透率影响的规律。该试验有助于了解 CO_2 封存于咸水层时的物理化学过程,但由于试验压力不超过1.5 MPa的限制,应用于解决大尺度问题时将带来较大的偏差。

地质条件的复杂性,造成现场试验参数选取的不确定性。而室内小尺度试验虽然能模拟封存过程,但与实际工程尺度相差甚远,模拟结果的可靠性欠佳。可见,单一尺度研究 CO_2 咸水层封存问题具有一定的局限性,应考虑尺度效应对参数的敏感性影响,找出不同尺度之间的关联,运用多尺度理论才能更好地为工程应用提供有效的理论依据。

5 工程应用

数值模拟和试验研究的最终目的都是为工程应用服务。目前,国外深部咸水层封存 CO_2 的示范工程已相继开展,1996年开工的挪威北海的Sleipner工程为首个示范工程,2004年美国开工建设了Frio

示范工程,此外澳大利亚西北海岸的Gorgon工程和挪威巴伦支海的Snøhvit工程正在规划和建设中。

Sleipner项目是挪威与IEA合作的国际示范项目的一部分。从1996年开始将从Sleipner气田分离出来的 CO_2 以100万t/a的速度注入北海海底800m深处的Utsira沙性咸水层中,规划封存量2000万t。通过对工程微地震监测的研究得知:由于垂向地层水动力的连续性,该项目局部压缩应力和由于 CO_2 注入引起的轻微超压被加到静水压力中,不会引发天然或由于裂缝产生的地震。利用四维地震监测技术至今尚未探测出 CO_2 聚集的信号,即没有发生渗漏。通过 CO_2 注入后长期的全区模拟,结果显示在停注后的短时间内,大部分 CO_2 聚集在盖层下方,后受地势影响发生横向运移,此后的300a CO_2 在咸水中的溶解将达到最大值,溶解封存机理占主导。Sleipner项目不仅取得了良好的经济效益,而且封存了大量的 CO_2 ,是一个较为成功的示范工程。

我国“973”项目“温室气体的地下埋存及在提高油气采收率中的资源化利用”和“863”项目“二氧化碳的封存技术”分别于2006年和2008年获得资助。2010年6月中国神华集团CCS项目^[25]2495m的地下深井动工开钻,该项目是第一套也是亚洲最大规模的深部咸水层封存 CO_2 的示范工程。目前,将提纯后的 CO_2 液化已获得成功,为即将把液态 CO_2 注入地下岩层进行永久封存创造了条件。李小春等^[26]发明了一种基于混合流体自分离的封存方法,可用于将 CO_2 封存于深部咸水层,尤其是倾斜地层和穹顶构造的深部咸水层。

需要指出的是,深部咸水层封存 CO_2 的工程项目存在一定的风险^[27]: CO_2 大量逃逸进入大气会对近地表生物造成危害,进入浅层地下水会对水环境产生污染, CO_2 聚集产生的压力可能诱发地震或地面抬升、沉降。因此,工程应用中 CO_2 封存安全监测^[28]尤为重要,监测技术包括压力监测、地球化学监测、运移监测、环境监测等。当前我国在利用 CO_2 注入煤层置换天然气方面略有建树,而将 CO_2 封存到深部咸水层的技术等还有待借鉴国外的研究经验。

6 结语与展望

深部咸水层封存 CO_2 成为地质封存技术中封存量最大、最有前景的途径。国外众多研究机构开展了数值模拟、现场试验和示范工程的研究。研究过程中,对 CO_2 流体的热动力学性质、运移规律、俘获机理,以及渗漏的风险性都有了较清楚的认识。但由于水文地质参数的敏感性^[17],应根据试验数据对

各程序的代码更新调整。针对水文地质参数的随机性^[29],可建立相应的随机模型进行数值模拟。对大型示范工程的安全防护措施也应加强。相对而言,我国在 CCS 技术方面的研究才刚起步,我国作为发展中大国,CO₂ 排放量又居世界前列,深入研究 CO₂ 封存技术的形势非常严峻,应加强国际交流与合作,选择典型场所开展地质封存 CO₂ 示范研究工作。

目前国际上研究较多的是均质条件下 CO₂ 的封存技术,但由于岩体沉积过程的非连续性,使深部咸水层在自然条件下具有多尺度非均质性^[30],多尺度非均质性对注入的 CO₂ 在储存层中的弥散有极深的影响,对孔隙中剩余 CO₂ 的封存(即束缚气封存)和溶解的 CO₂ 永久封存(即溶解封存)也有较大的影响。一般的模型是基于构造是均质的这一假定,会导致封存有效性和安全性产生偏差。因此,描述多尺度非均质性的场地水文地质特征(包括渗透性、孔隙率、毛细压力)非常重要。常规试验从单一尺度研究 CO₂ 咸水层封存问题具有一定的局限性,应考虑尺度效应对参数的敏感性影响,找出不同尺度之间的关联,运用多尺度理论研究 CO₂ 流体的运移与俘获规律。中国华北平原大部、四川盆地大部、准噶尔盆地东南部及苏北盆地为大规模沉积盆地,封存容量大,对这些地区的场地评价及储层响应监测应作为工程应用的重点研究方向。因此,研究注入的 CO₂ 在多尺度非均质深部咸水层中的运移与俘获特征将是碳封存技术的研究重点,不仅具有理论创新意义,而且对提高 CO₂ 地下封存的有效性和安全性及实现碳减排具有十分重要的指导价值^[31]。

参考文献：

[1] 赵杰,李昌建,袁向华.浅谈我国二氧化碳减排途径及对策[J].环境科学导刊,2010,29(S1):1-4.

[2] GALE J, DAVISON J. Transmission of CO₂-safety and economic considerations[J]. Energy, 2004, 29(9/10):1319-1328.

[3] 张丽华,潘保芝.工业废气二氧化碳的地下储藏研究[J].世界地质,2005,24(1):72-76.

[4] 江怀友,沈平平,卢颖,等.世界油气储层二氧化碳埋存量计算研究[J].地球科学进展,2009,24(10):1122-1129.

[5] 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.

[6] 许志刚,陈代钊,曾荣树.CO₂ 的地质埋存与资源化利用进展[J].地球科学进展,2007,22(7):698-707.

[7] 沈平平,廖新维.二氧化碳地质埋存与提高石油采收率技术[M].北京:石油工业出版社,2009:52-56.

[8] SORENSEN J A, BAILEY T P, SMITH S A, et al. CO₂ storage capacity estimates for stacked brine-saturated formations in the north Dakota portion of the Williston Basin[J]. Energy

Procedia, 2009, 1(1):2833-2840.

[9] ZHANG Ying-qi, FREIFELD B, FINSTERLE S, et al. Single-well experimental design for studying residual trapping of supercritical carbon dioxide[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2011, 5(1):88-98.

[10] Secretariat of Carbon Sequestration Leadership Forum(CSLF). Discussion paper from the task force for reviewing and identifying standards with regards to CO₂ storage capacity measurement: CSLF-T-2005-09[EB/OL]. [2005-09-28]. <http://www.cslforum.org>.

[11] KOPP A, CLASS H, HELMIG R. Investigations on CO₂ storage capacity in saline aquifers: dimensional analysis of flow processes and reservoir characteristics[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2009, 3(3):263-276.

[12] 李小春,刘延峰,白冰,等.中国深部咸水层 CO₂ 储存优先区域选择[J].岩石力学与工程学报,2006,25(5):963-968.

[13] XU Tian-fu, APPS J A, PRUESS K. Numerical simulation of CO₂ disposal by mineral trapping in deep aquifers[J]. Applied Geochemistry, 2004, 19(6):917-936.

[14] ZHANG Wei, LI Yi-tian, XU Tian-fu, et al. Long-term variations of CO₂ trapped in different mechanisms in deep saline formations: a case study of the Songliao Basin[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2009, 3(2):161-180.

[15] 王宗华,张军营,徐俊,等.CO₂ 矿物碳化隔离的理论研究[J].工程热物理学报,2008,28(6):1063-1068.

[16] RUTQVIST J, TSANG C F. A study of caprock hydromechanical changes associated with CO₂ injection into a brine aquifer[J]. Environmental Geology, 2002, 42(2/3):296-305.

[17] BIRKHOLZER J T, ZHOU Quan-lin, TSANG C F. Large-scale impact of CO₂ storage in deep saline aquifers: a sensitivity study on pressure response in stratified systems[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2009, 3(2):181-194.

[18] ZHANG Ying-qi, OLDENBURG C M, FINSTERLE S, et al. System-level modeling for economic evaluation of geological CO₂ storage in gas reservoirs[J]. Energy Conservation and Management, 2007, 48(6):1827-1833.

[19] LAGNEAU V, PIPART A, CATALETTE H. Reactive transport modelling of CO₂ sequestration in deep saline aquifers[J]. Oil & Gas Science and Technology, 2005, 60(2):231-247.

[20] PRUESS K, GARCI J, KOVSCEK T, et al. Code intercomparison builds confidence in numerical simulation models for geologic disposal of CO₂[J]. Energy, 2004, 29(9/10):1431-1444.

[21] DOUGHTY C, FREIFELD B M, TRAUTZ R C. Site characterization for CO₂ geologic storage and vice versa: the Frio brine pilot, Texas, USA as a case study[J]. Environmental Geology, 2008, 54(8):1635-1656.

[22] AHLERS C F, TRAUTZ R C, COOK P J, et al. Testing and modeling of seepage into underground openings in a heterogeneous fracture system at Yucca Mountain, Nevada[EB/OL]. [2002-03-25]. <http://repositories.cdlib.org/>

lbnl/LBNL-48911.

[23] GRATALOUP S , BONIJOLY D , BROSE E , et al . A site selection methodology for CO₂ underground storage in deep saline aquifers : case of the Paris Basin [J] . Energy Procedia , 2009 , 1(1) : 2929-2936 .

[24] 赵仁保 , 岳湘安 , 吴亚红 , 等 . 二氧化碳气体的流动及反应特性研究 : 从微管到多孔介质 [J] . 科学通报 , 2008 , 53 (12) : 1456-1462 .

[25] 能源观察网 . 神华 CCS 示范项目产出高纯度二氧化碳液体 [EB/OL] . [2011-01-05] . <http://www.chinaero.com.cn/yjgc/mtjhly/01/84210.shtml> .

[26] 李小春 , 魏宁 . 基于混合流体自分离的二氧化碳地质封存方法 : 中国 , 10119074 [P] . 2008-06-04 .

[27] 王政 , 傅荣华 , 罗小兰 , 等 . 浅析地质封存技术在温室气体减排中的应用 [C] / 王驹 . 第三届废物地下处置学术

研讨会论文集 . 北京 : 中国岩石力学与工程学会 , 2010 : 535-542 .

[28] 庞忠和 , 杨峰田 , 段忠丰 . 二氧化碳地质封存技术发展现状与展望 [C] / 王驹 . 第二届废物地下处置学术研讨会论文集 . 北京 : 中国岩石力学与工程学会 , 2008 : 479-492 .

[29] 刘猛 , 束龙仓 , 刘波 . 地下水数值模拟中的参数随机模拟 [J] . 水利水电科技进展 , 2005 , 25(6) : 25-27 .

[30] FLETT M , GURTON R , WEIR G . Heterogeneous saline formations for carbon dioxide disposal : impact of varying heterogeneity on containment and trapping [J] . Petroleum Science & Engineering , 2007 , 57 : 106-118 .

[31] 王媛 . 二氧化碳地质处置的研究进展 [R] . 郑州 : 中国力学大会环境力学分会 , 2009 .

(收稿日期 2011-03-14 编辑 骆超)

(上接第 61 页) 因导梁有足够的强度和刚度 , 一般不易损坏 , 为确保导梁有效、准确地定位防渗墙轴线和稳定防渗墙槽口 , 操作施工机械时应尽量避免机械臂及抓斗冲撞导梁 , 一般槽口宽度比防渗墙成槽宽度大约 5 cm , 在成槽过程中起吊和降落臂板时注意控制臂板起吊和降落的速度 ; 发生机械臂碰撞导梁而使导梁移位、槽口变形时及时纠正导梁位置 , 夯实导梁后填土即可。

入岩深度判别工法应用过程中 , 首先需结合地勘资料建立防渗墙墙身穿过的土层 (岩层) 和液压抓斗上压力表所显示的抓斗抓力大小的一一对应关系。先进行多个槽段施工检验 , 证明其结果与地质资料和设计图纸所反映情况相吻合再进行该工法的应用。根据压力表显示数值和土层 (岩层) 对应关系 , 当显示达到设计要求伸入的岩层时记录初始深度 , 由此往下再伸入设计要求的深度 , 即满足防渗墙墙底伸入岩层的深度。

(上接第 68 页)

参考文献 :

[1] 黄汉禹 , 刘海洋 . 韩江下游及三角洲河段河床变化分析 [J] . 中山大学学报 , 2001(54) : 10-13 .

[2] JTJ 214—2000 内河航道与港口水文规范 [S] .

[3] GBJ 50139—2004 内河通航标准 [S] .

[4] JTJ 213—1998 海港水文规范 [S] .

[5] JTJ 311—1997 通航海轮桥梁通航标准 [S] .

[6] GBJ 139—1990 内河通航标准 [S] .

[7] 唐银安 . 不稳定流航道水文分析 [J] 水运工程 . 1997(8) : 23-27 .

6 结 语

在水利工程防渗墙施工过程中应用钢结构导梁和入岩深度判别新工法 , 能提高防渗墙施工质量且节能环保 , 具有良好的经济效益 , 同时还可节约工期 , 加快施工进度。这 2 项工法值得进一步推广。

参考文献 :

[1] DL/T5199—2004 水利水电混凝土防渗墙施工规范 [S] .

[2] 上海勘测设计研究院 . 永新县丰源水库除险加固工程初步设计报告 [R] . 上海 : 上海勘察设计院 , 2009 .

[3] 上海勘测设计研究院 . 永新县丰源水库除险加固工程施工图阶段工程地质勘察报告 [R] . 上海 : 上海勘察设计院 , 2009 .

[4] GB50017—2003 钢结构设计规范 [S] .

[5] SL191—2008 水工混凝土结构设计规范 [S] .

[6] 德国宝峨公司 . 宝峨 GB 液压抓斗详细资料 [EB/OL] . [2009-11-26] . http://www.bauerchina.net/C_Products_HydraulicGrab.htm . (收稿日期 2011-05-09 编辑 骆超)

[8] 周作付 , 何建华 , 邓年生 , 等 . 受人工采砂影响明显河道设计最低通航水位探讨 [J] . 水运工程 . 2003(8) : 33-36 .

[9] 罗春 . 赣江下游设计最低通航水位计算方法 [J] . 水利水电工程学报 , 2003(4) : 54-56 .

[10] 吴玲莉 , 张玮 , 高龙琨 , 等 . 长江下游感潮河段设计通航水位计算方法比较 [J] . 水利水电科技进展 , 2005 , 25 (4) : 36-38 .

[11] 张幸农 , 陈长英 , 吴建树 , 等 . 感潮河段设计通航水位确定方法及标准初探 [J] . 水道港口 , 2006(4) : 243-248 .

[12] 周焕 , 张真奇 , 傅联森 , 等 . 浙江北部航道设计通航水位的探讨 [J] . 中国水运 , 2009(3) : 17-19 .

(收稿日期 2010-12-27 编辑 方宇彤)