

二氧化碳在砂岩透镜体中充注封存的盖层岩石抗断裂性能分析*

崔振东^① 刘大安^① 曾荣树^① 周苗^②

(^①中国科学院地质与地球物理研究所,中国科学院工程地质力学重点实验室 北京 100029)

(^②中国矿业大学力学与建筑工程学院 北京 100083)

摘要 把 CO₂ 这一主要的温室气体注入到地下深处具有适当封闭条件的地层中进行封存和隔离,已被公认为是有效减少 CO₂ 排放量的一种比较安全的技术途径。砂岩透镜体油气藏具有良好的圈闭构造和储层物性,油气濒临枯竭的砂岩透镜体是较理想的 CO₂ 地质封存箱。基于币形裂纹模型和水力致裂原理,将纵向厚度和横向展布长度均远小于盖层岩石尺度的水平产状砂岩透镜体简化为盖层岩石中的 I 型币形裂纹,从岩石断裂力学角度分析封存箱盖层岩石的抗断裂性能。采用叠加原理给出了盖层岩石币形裂纹尖端(砂岩透镜体尖灭部位)应力强度因子的计算公式,在此基础上提出了断裂力学判别准则($K = K_{Ic}$)和临界有效压应力判别准则($P = P_c$),从岩石断裂力学角度为砂岩透镜体封存箱盖层岩石抗断裂性能分析和评价提供了一种新的研究思路。

关键词 二氧化碳 地质封存 砂岩透镜体 币形裂纹 抗断裂性能

中图分类号:P462 **文献标识码**:A

FRACTURE RESISTANCE ANALYSIS ON THE CAP ROCK OF THE SAND LENS RESERVOIR DUE TO CARBON DIOXIDE INJECTION AND STORAGE

CUI Zhendong^① LIU Da'an^① ZENG Rongshu^① ZHOU Miao^②

(^①Key Laboratory of Engineering Geomechanics, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

(^②China University of Mining and Technology, School of Mechanics and Civil Engineering, Beijing 100083)

Abstract Injecting the CO₂ into deep underground formations with the appropriate closure for isolated storage has been recognized as a possible effective technical approach in reducing CO₂ emissions. The sand lens reservoir trap has a good structure and reservoir properties for the storage. The sand lens reservoirs with depletion of oil and gas are better CO₂ geological storage boxes. Based on the penny-shaped crack model and the hydraulic fracturing principle, the sand lens reservoir of horizontal occurrence is simplified as a type-I penny-shaped crack of the cap rock. It is due to the fact that the thickness and horizontal distribution length of the reservoir are much smaller than the global cap rock scale. The cap rock fracture resistance of the storage box is analyzed from the view of rock fracture mechanics. The stress intensity factor of the penny-shaped crack tip (corresponding to the tip of sand lens reservoir) for the cap rock is calculated by the superposition principle. And then the fracture mechanics criteria

* 收稿日期:2009-04-16;收到修改稿日期:2009-05-16.

基金项目:国家 973 项目(2006CB705802),国家 863 高技术项目(2008AA062303),国家自然科学基金项目(40472145).

第一作者简介:崔振东,主要从事工程地质与岩石断裂力学理论及工程应用方面研究. Email: cuizhendong@mail.iggcas.ac.cn

($K = K_{IC}$) and the critical effective compressive stress criteria ($P = P_C$) are concluded as the basic principle to evaluate the fracture resistance of the cap rock of the sand lens reservoir. The findings in the paper can provide a new way for the evaluation of cap rock fracture resistance capability of sand lens reservoir.

Key words Carbon dioxide, Geological storage, Sand lens reservoir, Penny-shaped crack, Fracture resistance

1 引言

温室气体的排放是导致全球气候变暖并将最终引发灾难性后果的罪魁祸首,这已成为国际学术界及各国政府部门之间的共识。工业化时期以来,过分依赖化石燃料(煤、石油、天然气等)的人类活动使大气中的主要温室气体(如 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 和 O_3 等)的浓度达到了有记录以来的最高水平。可以预测,到 2100 年大气的 CO_2 浓度将达到 540 ~ 970ppm,1990 ~ 2100 年间全球平均地面气温将升高 $1.4^\circ\text{C} \sim 5.8^\circ\text{C}$,而中国 2100 年平均地面温度将升高 $3.9^\circ\text{C} \sim 6.0^\circ\text{C}$ ^[1]。尽管各国都在积极开发利用新的可再生清洁能源,但在可以预见的未来几十年内,以煤、石油、天然气为主的化石能源仍将在人类社会能源结构中占主体地位。因此,为避免全球气候的“温室效应”将给人类和整个地球环境系统带来的灾难性潜在威胁,减少 CO_2 向大气中的排放量成为防止或减缓气候继续变暖的最有效的途径。

已有的研究资料表明^[2~6], CO_2 地质封存是长期、安全、高效地减少大气中 CO_2 排放量的主要技术手段。 CO_2 地质封存就是将 CO_2 注入并存放在地下具有适当封闭条件的地层中的自然孔隙中。 CO_2 地质埋存的场所包括油藏储层和废弃的油气层、煤层(包括煤层气和未开采的煤层)中大的空洞、开采过的大洞穴、盐丘、深部咸水含水层等^[7~8]。在濒临枯竭的油气藏中封存 CO_2 是目前较为经济、有效的一种方案,在技术层面(地质资料积累和油气开发技术、设备等)也比其他方案较为成熟^[9]。砂岩透镜体油气藏是隐蔽油气藏中的一种重要类型,世界上已查明了许多油气藏为透镜状^[10],这在砂岩透镜体中充注和封存 CO_2 提供了潜在的封存箱。因此,砂岩透镜体油气藏可以作为封存 CO_2 的目标封存箱。

在 CO_2 地质封存技术方面,发达国家已有十几年的研究历史,很多国家如美国、欧洲、澳大利亚、和日本等都开展了相关的可行性研究甚至现场封存试验、监测工作,东南亚国家及印度洋岛国等 CO_2 排放量较多的区域仍少见 CO_2 封存方面的研究报

道^[11~14]。而我国作为发展中国家在 CO_2 地质封存技术方面的研究工作才刚刚起步,尚未进入专门的 CO_2 地质封存的工程实践阶段,虽然在油气资源开发中积累了一些回收和注入的技术经验,但是跟发达国家还有一定的差距^[15]。 CO_2 地质封存技术中的关键问题就是要保证目标封存储层——封存箱的长期安全性和稳定性,防止注入地下深部的超临界 CO_2 流体泄露到大气中或渗入淡水含水层中。 CO_2 存储封存箱的稳定性研究需要解决的基础科学问题很多,包括盖层岩石的力学性质与整体完整性、储层的孔隙结构和渗透力学特性、断裂系统分布、性质及对存储——封盖系统的影响等。目前关于 CO_2 地质封存的这些基础科学问题尚局限于先导性和实验性研究阶段,在 CO_2 长期地质封存安全性和稳定性评价的理论和技术方面认识还很不完善。而在与之密切相关的对高压 CO_2 流体注入过程中储层和盖层岩石地质力学响应和评价方面,国外一些学者进行了初步探索,取得了一些重要的研究成果,特别是初步建立了一些相关的地质力学模型和存储模式^[16~19]。但是已有的地质力学模型都不够具体,特别是运用岩石断裂力学的理论和实验方法进行 CO_2 封存箱安全性和稳定性评价的相关研究还很欠缺,有待于更多的岩石力学专家进行深入的探索性研究。

本文结合岩石断裂力学理论和方法,采用 I 型币形裂纹简化模型,在砂岩透镜体封存箱盖层岩石抗断裂性能分析和评价方面做了一点初步的尝试性探索工作:将以水平产状展布于盖层中的砂岩透镜体封存箱简化为盖层岩石中的 I 型币形裂纹,分析评价封存箱盖层岩石在远场地应力和裂纹内表面流体压应力共同作用时的抗断裂性能。采用叠加原理推导出了盖层岩石币形裂纹尖端(砂岩透镜体尖灭部位)应力强度因子计算公式,并初步提出了断裂力学判别准则和临界有效压应力判别准则。

2 砂岩透镜体与币形裂纹模型

砂岩透镜体具有较大的孔隙率和渗透性,多被非渗透性或低渗透性泥岩、页岩层所覆盖,一般具有良好的圈闭合储层条件。砂岩透镜体在地壳应力场

和地下流体渗透压力共同作用下,达到一种动态平衡的力学状态,为地下流体有效赋存提供了必要条件。砂岩透镜体油气藏为岩性油气藏中的一种重要类型,它是由透镜体或其他不规则储集层被周围非渗透性或低渗透性地层所围限而形成的油气藏,是沉积环境的直接产物,多分布在源岩中或者邻近源岩的泥质岩层内^[20]。在濒临枯竭或开采难度较大的砂岩透镜体油气藏中注入 CO_2 流体,既能增大驱油动力以提高采收率,又能把大量 CO_2 长期封存于砂岩透镜体储层中。

币形裂纹是固体材料断裂力学中的一种概念模型,后来被岩石力学专家借鉴用来进行水力致裂方面的研究,成为岩石断裂力学中的一种重要的理论模型。币形裂纹模型的理论计算和相关分析通常建立在如下假设基础之上^[21-23]:裂纹断裂形态呈椭圆形币形;注入流体速度缓慢适中且均匀地分布在币形裂纹前缘;水力致裂过程呈 I 型裂纹模式扩展;注入流体的钻孔半径远小于裂纹尺寸等。基于以上假设和基本的岩石力学参数测试结果(断裂韧度、弹性模量、泊松比等),可以定量计算出币形裂纹前缘的

I 型应力强度因子、币形裂纹扩展半径和张开位移等,并可以根据注入流体体积估计币形裂纹最终饱水区域的范围。另外,该模型还综合考虑了内力(渗透压力、孔隙压力)与外力(地壳远场应力和上覆岩层的自重应力)的综合作用下裂纹扩展与止裂条件等。由图 1 可知,天然地质成因的砂岩透镜体与用于水力致裂研究的币形裂纹理论模型之间存在诸多相似之处:(1)平面形态与立体形态均相似;(2)砂岩透镜体边缘尖灭区与币形裂纹模型的前缘都存在应力集中现象及裂纹开启与闭合的问题;(3)二者还都要解决远场应力与内部充注的高压流体产生的渗透压力共同作用下对目标地层中应力、应变及流体分布产生的影响等。这些相似之处表明:可以将砂岩透镜体地质储层简化为盖层岩石中的币形裂纹,透镜体尖灭部位(盖层泥岩与砂岩透镜体岩性分异处)简化为币形裂纹尖端。进而运用已有的研究水力致裂机理的币形裂纹模型理论与计算方法,研究砂岩透镜体封存箱盖层岩石在高压流体注入时的力学响应机制和抗断裂性能。

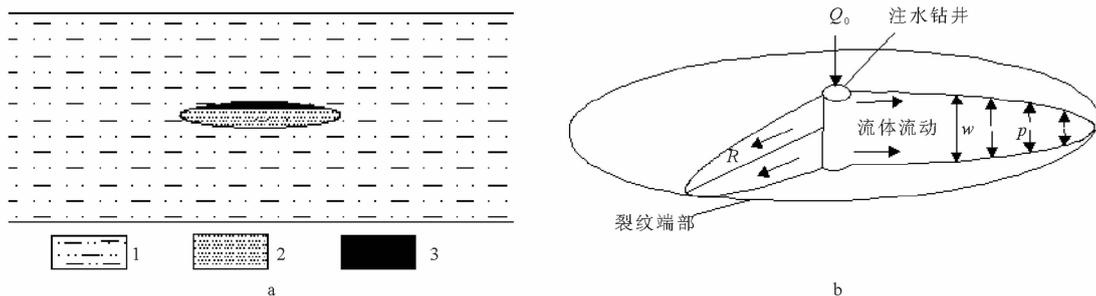


图 1 砂岩透镜体油藏剖面与币形裂纹水力致裂模型对比图

Fig. 1 Schematic comparison between sand lens oil reservoir and penny-shaped model for hydraulic fracturing

a. 典型砂岩透镜体油藏剖面图; b. 币形裂纹水力致裂模型^[24]; 1. 泥岩; 2. 砂岩; 3. 石油

3 盖层岩石抗断裂性能分析

在砂岩透镜体中长期安全封存 CO_2 需要解决诸多技术难题,其中,建立描述超临界 CO_2 流体注入过程中封存箱的力学响应及注入后流体运移赋存情况的地质力学模型是一个关键技术难题。由于砂岩透镜体储层在其纵向厚度和横向展布长度方面都远小于盖层岩石尺度,因此可以把水平产状的砂岩透镜体看作是盖层岩石中的一个水平展布的 I 型币形裂纹。假如把砂岩透镜体内部流体场(孔隙压力和渗透压力)和透镜体岩石应力场相互作用过程看

作是“黑箱”系统,把“黑箱”中产生的差异应力定义为作用于盖层岩石裂纹内表面(盖层与砂岩透镜体储层边界接触部位)的有效压应力,此时砂岩透镜体尖灭部位就等效于盖层岩石裂纹端部。于是可以利用基于币形裂纹的水力致裂模型计算有效压应力及盖层岩石裂纹端部应力强度因子,并在此基础上建立注入高压 CO_2 流体时盖层岩石抗断裂性能的评价准则。

3.1 砂岩透镜体盖层岩石应力强度因子

应力强度因子是表征裂纹尖端应力场的基本物理量,盖层岩石裂纹应力强度因子表示盖层岩石裂

纹尖端(相当于透镜体尖灭边缘部位)的应力集中程度。盖层岩石和砂岩透镜体,严格来说都是处于三维空间受力状态,但由于其问题的特殊性,可以近似的按平面问题(平面应力或平面应变)来处理。本文把盖层岩石裂纹(砂岩透镜体)简化为平面裂纹问题来求解应力强度因子,基本假设如下:(1)在地质历史演化相对稳定的阶段,砂岩透镜体与盖层岩石在原位应力场中处于静力学平衡状态;(2)注入CO₂流体时砂岩透镜体“黑箱”系统内部产生的差异应力可以简化为直接作用在盖层岩石裂纹弧形内表面(盖层与砂岩透镜体储层边界接触部位)的有效压应力。(3)盖层与砂岩透镜体在某种程度上可以看作是轴对称问题,其纵剖面可以近似简化为理想的椭圆币形裂纹(图2)。

由于盖层岩石裂纹尖端(透镜体尖灭部位)可以看作是处于线弹性应力场中,则其应力强度因子可以由叠加原理求得(图3),其表达式为:

$$K_I = K_A = K_B + K_C \quad (1)$$

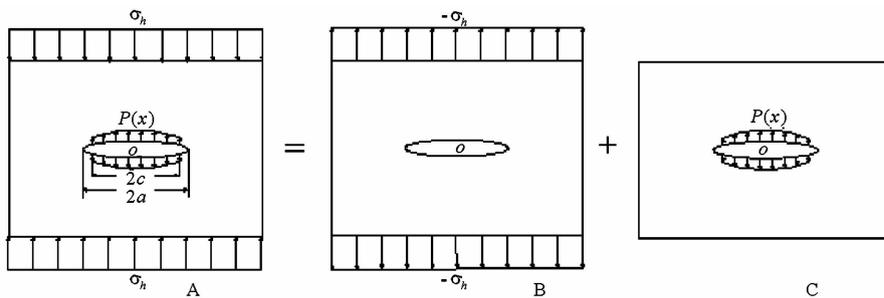


图3 计算币形裂纹模型应力强度因子的叠加原理

Fig. 3 Illustration of superposition for calculating stress intensity factor of penny-shaped model

$$K_B = -\sigma_h \sqrt{\pi a} \quad (2)$$

$$K_C = \int_{-c}^c \sqrt{\frac{a}{\pi(a^2 - x^2)}} P(x) dx \quad (3)$$

将公式(2)和(3)代入公式(1),则可以计算出盖层岩石币形裂纹尖端(透镜体尖灭部位)的I型应力强度因子:

$$K_I = \int_{-c}^c \sqrt{\frac{a}{\pi(a^2 - x^2)}} P(x) dx - \sigma_h \sqrt{\pi a} \quad (4)$$

由于获取任意非均匀有效压应力分布函数 $P(x)$ 存在较大难度,可以采用取平均值的方法,即在裂纹表面(盖层与砂岩透镜体边界)选取 n 个测试点,分别测试样本点处所承受的有效压应力值 $P_1, P_2, P_3, \dots, P_n$, 计算有效压应力的平均值 P_{ave} :

$$P_{ave} = \frac{1}{n} \sum_{1}^n P_b \quad (5)$$

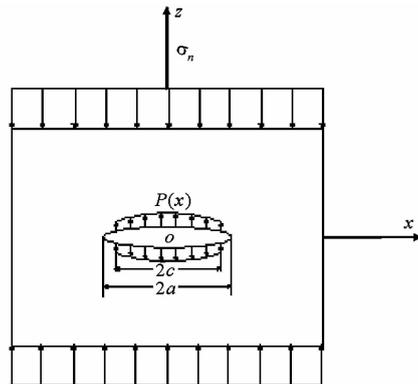


图2 CO₂封存于砂岩透镜体中的币形裂纹计算模型

Fig. 2 Penny-shaped fluid-driven fracture model for injecting CO₂ into the sand lens oil reservoir

其中, K_A, K_B, K_C 分别表示图3中A、B、C 3种情况下的I型应力强度因子。而 K_B, K_C 可以由权函数法求出解析解^[25]:

此时公式(4)的应力强度因子可以近似表达式为:

$$\begin{aligned} K_I &= \int_{-c}^c \sqrt{\frac{a}{\pi(a^2 - x^2)}} P_{ave} x dx - \sigma_h \sqrt{\pi a} \\ &= 2P_{ave} \sqrt{\frac{a}{\pi}} \sin^{-1}\left(\frac{c}{a}\right) - \sigma_h \sqrt{\pi a} \end{aligned} \quad (6)$$

针对以下特殊情况,可以分别由公式(7)和(8)求得应力强度因子:

(1)若作用于币形裂纹内表面(盖层与砂岩透镜体边界)的有效压应力均匀分布且为常数,即 $P(x) = P$, $-a \leq -c \leq X \leq c \leq a$, 则有:

$$\begin{aligned} K_I &= \int_{-c}^c \sqrt{\frac{a}{\pi(a^2 - x^2)}} P dx - \sigma_h \sqrt{\pi a} \\ &= 2P \sqrt{\frac{a}{\pi}} \sin^{-1}\left(\frac{c}{a}\right) - \sigma_h \sqrt{\pi a} \end{aligned} \quad (7)$$

(2)若注入高压流体有效压应力均匀分布且全部作用于币形裂纹内表面时,即 $P(x) = P, c = a$, 则公式(7)可变为:

$$K_I = 2P \sqrt{\frac{a}{\pi}} \sin^{-1}(1) - \sigma_h \sqrt{\pi a} \\ = (P - \sigma_h) \sqrt{\pi a} \quad (8)$$

式中, K_I 表示币形裂纹模型在 CO_2 高压流体注入时对裂纹尖端(砂岩透镜体尖灭部位)产生的 I 型应力强度因子; $2a$ 表示椭圆币形裂纹长轴的长度(砂岩透镜体横向展布); $P(x)$ 表示作用于椭圆币形裂纹内表面(盖层与砂岩透镜体储层边界接触部位)一定范围内($-c \leq x \leq c$)的有效压应力分布函数; $2c$ 表示有效压应力作用于盖层岩石币形裂纹内表面的范围($-a \leq c \leq a$); σ_h 是指盖层岩石币形裂纹(砂岩透镜体)所处地层深度为 h 时上覆岩层的自重应力,即垂直于裂纹面的正应力。

3.2 盖层岩石抗断裂性能判别准则

3.2.1 岩石断裂力学判别准则

岩石断裂力学关于含裂纹岩石材料抗断裂能力的判别准则又称断裂判据,是岩石断裂力学的核心问题。目前,用于岩石抗断裂性能判别准则的脆性断裂理论主要有^[26]:基于 Griffith 裂纹模型的 K 判据;基于应力场特征参数的最大周向应力理论和应变能密度理论;基于能量观点的最大能量释放率理论等。本文采用 Griffith 裂纹模型中的 K 判据进行判别,即将岩石断裂韧度 K_{Ic} 作为岩石抗脆断能力的指标。其判别公式如下:

$$K_I = K_{Ic} \quad (9)$$

其中, K_I 为岩石 I 形裂纹应力强度因子,可以由公式(1)~(8)近似求得,其计算结果准确程度取决于简化后的币形裂纹模型与实际砂岩透镜体油气藏的相似程度及作用于内表面的有效压应力 P 和上覆岩层的自重应力 σ_h 计算的准确度。 K_{Ic} 是岩石 I 型断裂韧度,可以通过试验获取,目前比较流行的是采用国际岩石力学学会(ISRM)建议的测试方法测得岩石 I 型断裂韧度^[27~28]。

公式(9)的涵义为:当 I 型裂纹尖端应力强度因子达到或超过岩石 I 型断裂韧度值时,裂纹起裂并扩展。对砂岩透镜体中注入封存 CO_2 高压流体,可以理解为:在向砂岩透镜体储层注入 CO_2 高压流体时,在孔隙压力、渗透压力及自重应力的综合作用下,透镜体尖灭部位必然产生应力集中,其应力强度因子(应力集中程度)由透镜体内表面产生的有效

压应力和及其上覆岩层自重应力共同决定。当盖层岩石币形裂纹尖端(砂岩透镜体尖灭部位)的应力强度因子达到或超过其岩石断裂韧度值时,透镜体尖灭部位裂纹出现张开扩展,为流体流入盖层岩石提供通道。

3.2.2 临界有效压应力判别准则

假设当盖层岩石币形裂纹尖端(砂岩透镜体尖灭部位)应力强度因子达到临界值——断裂韧度值时,砂岩透镜体盖层岩石达到所能承受的最大有效压应力——临界有效压应力。此时将公式(6)、(7)和(8)分别代入公式(9),则可以求得不同情况下的临界有效压应力。这里仅就公式(8)的情况为例进行推导,其他情况与此相近。将公式(8)代入公式(9),则有:

$$K_I = (P - \sigma_h) \sqrt{\pi a} = K_{Ic} \quad (10)$$

于是,由式(10)可以求出临界有效压应力 P_c :

$$P_c = \sigma_h + \frac{K_{Ic}}{\sqrt{\pi a}} \quad (11)$$

由公式(11)可知:临界有效压应力 P_c 取决于上覆岩层自重应力(埋深)、岩石 I 型断裂韧度值及裂纹长度(砂岩透镜体横向展布范围)。即:盖层岩石裂纹内表面所能承受的最大有效压应力随着地层埋深增大而增大,随着岩石断裂韧度值的增大而增大,随着透镜体横向展布长度增加而减小。于是,可得出临界有效压应力判别公式:

$$P = P_c \quad (12)$$

公式(12)的涵义为:在向砂岩透镜体油气藏中充注 CO_2 高压流体过程中, CO_2 流体与透镜体中存有的其他流体(水、石油、天然气等)共同产生的孔隙压力和渗流压力使砂岩透镜体封存箱地层压力不断积累,进而使作用于盖层岩石裂纹内表面的有效压应力 P 逐渐增大。当有效压应力 P 增大至盖层岩石所能承受的临界有效压应力 P_c 时,盖层岩石裂纹尖端(砂岩透镜体尖灭部位)便会发生裂纹起裂和扩展,致使盖层破裂,为透镜体封存箱中流体向盖层岩石渗流排放提供优势运移通道,这意味着注入的 CO_2 流体存在着泄露的风险。因此,需要研究和优化 CO_2 充注过程方案,有效控制 CO_2 向砂岩透镜体封存箱的注入速度、注入压力、注入体积等,确保注入 CO_2 过程中和注入后对盖层岩石内表面产生的有效压应力不超过临界值。

在本文的假设条件下,公式(9)与公式(12)在本质上是等效的,即岩石断裂力学判别准则和临界有效压应力判别准则是等效的,因为二者本质上都

要归结于用盖层岩石的 I 型断裂韧度值 (K_{Ic}) 作为判别标准。因此,准确获取盖层岩石 I 型断裂韧度值显得尤为重要。然而,室内试验测得的岩石断裂韧度值一般难以准确反映地应力作用下的盖层岩石的实际断裂韧度值^[25],笔者认为较为准确的盖层岩石原位断裂韧度值需要结合地应力测量和现场压裂试验及室内三轴断裂韧度测试结果综合取值,具体试验和计算方法有待于进一步研究。

4 结 论

在砂岩透镜体油气藏中充注封存 CO_2 具有较大潜力和可行性。对砂岩透镜体封存箱的安全性研究,特别是对盖层岩石抗断裂性能分析和评价方法研究是目前的前沿课题。本文结合岩石断裂力学理论和方法,采用 I 型币形裂纹简化模型,在砂岩透镜体封存箱盖层岩石抗断裂性能分析和评价方面做了一点初步的尝试性探索工作,主要获得以下几点认识:

(1) 对于以水平产状展布于盖层中的砂岩透镜体封存箱,其纵向厚度和横向展布长度远小于盖层岩石,因此可以将其简化为盖层岩石中的 I 型币形裂纹,进而从岩石断裂力学角度分析封存箱盖层岩石在远场地应力和裂纹内表面流体压应力共同作用时的抗断裂性能。

(2) 由岩石断裂力学 K 判据可知:当盖层岩石币形裂纹尖端(砂岩透镜体尖灭部位)的应力强度因子达到或超过其岩石断裂韧度值 ($K_I = K_{Ic}$) 时,透镜体尖灭部位盖层岩石发生破裂, CO_2 等混相流体开始向盖层岩石裂纹中运移。

(3) 把砂岩透镜体内部流体力学作用过程看作“黑箱”,便可以将其等价于作用于盖层岩石内表面的有效压应力。当有效压应力达到或超过临界有效压应力 ($P = P_c$) 时,盖层岩石裂纹尖端(砂岩透镜体尖灭部位)便会发生裂纹起裂和扩展。就增加了 CO_2 流体向盖层渗流、泄露的风险,需要控制 CO_2 注入速度、注入压力、注入体积等,减少盖层岩石破裂的风险,具体理论和措施有待于进一步研究。

致 谢 本文工作得到了中科院地质与地球物理研究所工程地质力学重点实验室李志清博士的帮助和启发,并得到河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室基金 (GH200802) 的支持,在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] 孙枢. CO_2 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, (3): 17 ~ 22.
Sun Shu. Geological problems of CO_2 underground storage and its significance on mitigating climate change. China Basic Science, 2006, (3): 17 ~ 22.
- [2] 李小春, 小出仁, 大隅多加志. 二氧化碳地中隔离技术及其岩石力学问题 [J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(6): 989 ~ 994.
Li Xiaochun, Koide Hitoshi, Ohsumi Takashi. CO_2 aquifer storage and the related rock mechanics issues. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(6): 989 ~ 994.
- [3] 段振豪, 孙枢, 张驰, 等. 减少温室气体向大气层的排放—— CO_2 地下储藏研究 [J]. 地质论评, 2004, 50(5): 514 ~ 519.
Duan Zhenhao, Sun Shu, Zhang Chi, et al. Reducing the release of CO_2 into atmosphere: CO_2 sequestration. Geological Review, 2004, 50(5): 514 ~ 519.
- [4] 曾荣树, 孙枢, 陈代钊, 等. 减少二氧化碳向大气层的排放——二氧化碳地下储存研究 [J]. 中国科学基金, 2004, 18(4): 196 ~ 200.
Zeng Rongshu, Sun Shu, Chen Daizhao, et al. Decrease carbon dioxide emission into the atmosphere——underground disposal of carbon dioxide. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2004, 18(4): 196 ~ 200.
- [5] IPCC. Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage [R], 2005.
- [6] S. Holloway. Underground sequestration of carbon dioxide—a viable greenhouse gas mitigation option [J]. Energy, 2005, (30): 2318 ~ 2333.
- [7] 张洪涛, 文冬光, 李义连, 等. 中国 CO_2 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 CO_2 geological sequestration in China and some suggestions. Geological Bulletin of China, 24(12): 1107 ~ 1110.
- [8] 李小春, 刘延锋, 白冰, 等. 中国深部咸水含水层 CO_2 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 CO_2 saline aquifer storage zones in china. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(5): 963 ~ 968.
- [9] Semere Solomon, Michael Carpenter, Todd Allyn Flach. Intermediate storage of carbon dioxide in geological formations: A technical perspective [J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2008, (2): 502 ~ 510.
- [10] 陈冬霞, 庞雄奇, 邱楠生, 等. 砂岩透镜体成藏机理 [J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2004, 29(4): 483 ~ 488.
Chen Dongxia, Pang Xiongqi, Qiu Nansheng, et al. Accumulation and filling mechanism of lenticular sandbody reservoirs. Earth Science - Journal of China University of Geosciences, 2004, 29(4): 483 ~ 488.

- [11] Holloway S. The underground disposal of carbon dioxide. Final Report of JOULE II [R]. British Geological Survey, United Kingdom, 1996.
- [12] Christensen N P. European potential for geological storage of CO₂ from fossil fuel combustion[M]. [S. l.]: Euro Geo, Survey, 1999.
- [13] 张丽君. 减少温室气体排放的重要手段——二氧化碳的地质储存[J]. 国土资源情报, 2001, (12): 6~14.
Zhang Lijun. An important way for reducing the greenhouse gas—geological storage of carbon dioxide. Land and Resources Information, 2001, (12): 6~14.
- [14] John Gale. Geological storage of CO₂: What do we know, where are the gaps and what more needs to be done[J]. Energy, 2004, (29): 1329~1338.
- [15] 李小春, 方志明. 中国 CO₂ 地质埋存关联技术的现状[J]. 岩土力学, 2007, 28(10): 2229~2233.
Li Xiaochun, Fang Zhiming. Status quo of connection technologies of CO₂ geological storage in China. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(10): 2229~2233.
- [16] Streit, J. E., et al. Building Geomechanical Models for the Safe Underground Storage of Carbon Dioxide in Porous Rock, in Greenhouse Gas Control Technologies – 6th International Conference. Pergamon: Oxford, 2003, 495~500.
- [17] Treit, J. E. and R. R. Hillis, Estimating fault stability and sustainable fluid pressures for underground storage of CO₂ in porous rock. Energy, 2004, 29(9~10): 1445~1456.
- [18] Barry Hooper, Luke Murray and Catherine Gibson-Poole. Latrobe Valley CO₂ Storage Assessment, Final Report (2005). Cooperative Research Centre for Greenhouse Gas Technologies, Australia, Report No: RPT05-0108.
- [19] Rutqvist, J., J. T. Birkholzer, and C.-F. Tsang, Coupled reservoir-geomechanical analysis of the potential for tensile and shear failure associated with CO₂ injection in multilayered reservoir-caprock systems. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2008, 45(2): 132~143.
- [20] 孙卫国, 杨成顺. 砂岩透镜体储油机理新认识[J]. 油气地球物理, 2005, 3(2): 57~62.
Sun Weiguo, Yang Chengshun. An new understanding of the oil storage mechanism in sand lens. Petroleum Geophysics, 2005, 3(2): 57~62.
- [21] Sih. G. C., Liebowitz, H. Mathematical theories of brittle fracture [J]. Fracture, An Advanced Treatise, Vol. II, Academic Press.
- [22] Ab, H., L. M. Keer, T. Mura. Theoretical study of hydraulic fractured penny-shaped cracks in hot, dry rocks, Int J Numer. Anal. Meth. Geomech., 1979, 3(1): 79~96.
- [23] Danesh, A. A. Propagation of hydraulic fracture and its conductivity in layered media [J]. Proc. 1st Japan-USA Symp. on Fracture mechanics Approach, Hydraulic Fracture and Geothermal Energy, Sendai, Japan, 1982, 159~171.
- [24] A. A. Savitski, E. Detournay. Propagation of a penny-shaped fluid-driven fracture in an impermeable rock: asymptotic solutions [J]. International Journal of Solids and Structures, 2002, (39): 6311~6337.
- [25] Whittaker B. N., Singh R. N., Sun G. Rock fracture mechanics—principles, design and applications. London: Elsevier, 1992, 132~135.
- [26] 李世愚, 尹祥础. 岩石断裂力学[M]. 中国科学院研究生院讲义(内部资料). 2006.
Li Shiyu, Yin Xiangchu. Rock fracture mechanics. Teaching Notes of Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2006.
- [27] ISRM Testing Commission, Suggested methods for determining the fracture toughness of rock [J], International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1988, (2)5: 71~96.
- [28] ISRM Testing Commission, Suggested method for determining mode I fracture toughness using cracked chevron notched Brazilian disc (CCNBD) specimens [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1995, (32): 57~64.