

压缩二氧化碳高压衬砌结构储罐设计研究

张 率 李富春 (西安理工大学土木建筑工程学院, 陕西 西安 710048)

汪冰夷^[通讯作者] (中联西北工程设计研究院有限公司, 陕西 西安 710077)

杨 蓉 邵 阳 (机械工业勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安 710021)

摘要: 在当前国家提出的“双碳”战略背景下, 降低碳排放是战略目标的核心。目前降碳措施主要有发展可再生能源发电技术和通过碳捕集与碳封存技术将 CO₂ 进行封存与回收利用。本研究在现有压缩空气储能技术的基础上, 尝试采用 CO₂ 代替空气作为储能系统循环工质加以利用, 并采用 COMSOL 软件对 R-SFC 衬砌结构进行数值模拟计算, 获得了不同参数对其损伤塑性的影响结果, 并提出了高压恒压地下储气罐结构设计, 为 CO₂ 消纳利用提供了新途径。

关键词: 压缩二氧化碳; 储能技术; 衬砌结构; 储罐设计

中图分类号: TU93 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2026) 001-0161-04

Design and Research on High-Pressure Lined Structure Tanks for Compressed Carbon Dioxide

Zhang Shuai, Li Fuchun (School of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology, Xi'an Shaanxi 710048, China)

Wang Bingyi^[Corresponding Author] (China United Northwest Institute for Engineering Design & Research Co., Ltd., Xi'an Shaanxi 710077, China)

Yang Rong, Shao Yang (China Jikan Research Institute of Engineering Investigations and Design Co., Ltd., Xi'an Shaanxi 710021, China)

Abstract: Against the backdrop of the national “Dual Carbon” strategy, reducing carbon emissions stands as a core strategic objective. Current carbon reduction measures primarily involve the development of renewable energy power generation technologies and the sequestration, recovery, and utilization of CO₂ through carbon capture and storage technologies. Building upon existing compressed air energy storage technology, this study explores the use of CO₂ as a substitute for air as the circulating working fluid in energy storage systems. Numerical simulations of the R-SFC lined structure were conducted using COMSOL software, yielding results on the influence of various parameters on its damage plasticity. Additionally, a structural design for high-pressure constant-pressure underground gas storage tanks is proposed, offering a new approach for the consumption and utilization of CO₂.

Keywords: Compressed Carbon Dioxide; Energy Storage Technology; Lined Structure; Tank Design

1 压缩二氧化碳储能技术概述

1.1 压缩二氧化碳高压存储技术

以二氧化碳 (CO₂) 为工质的储能技术是当前新型的大规模储能方案, 也是最具前景的 CO₂ 工质化利用方法之一^[1]。目前 CO₂ 存储方式主要分为地面高压容器和地下地质封存两种形式。地面高压容器不论是早期的钢制压力与低温低压容器, 还是当下的新型复合材料容器, 都仅适用于小规模工业运用。若计划将压缩 CO₂ 作为一种储能介质, 则需采用地下地质封存方法, 充分利用地下围岩的高围压实现百兆瓦时级储能。

由于长期满足存储压缩 CO₂ 条件的天然 (或人工) 岩穴十分有限, 因此, 有必要研究能够强化天然 (或人工) 岩穴结构强度的衬砌结构。

1.2 压缩二氧化碳气体模型

针对存储压缩 CO₂ 的模拟研究, 气体模型的选取需紧密贴合实际高压环境与多相态特性。当前研究通常基于理想气体模型或简单的状态方程, 但压缩 CO₂ 在超临界或近临界状态下表现出显著的体积效应、分子间作用力及相态变化, 理想化假设会引入较大误差^[2]。此外, 真实存储环境中 CO₂ 可能与地质介质、杂质气体发生复杂相互作用, 需考虑多组分混合效应及非均质性影响。因此, 开展地下压缩 CO₂ 储能研究的前提是选取能够真实反应 CO₂ 压缩、膨胀过程中热-力耦合性质的气体模型。

1.3 地下压缩二氧化碳储罐的内壁防腐和结构保温设计

由于超临界态 CO₂ 在地下高压环境中具有强渗透

性和化学活性,罐体内壁易受酸性介质腐蚀及应力腐蚀开裂威胁,缩短储罐使用寿命。同时,地层温度波动也可能引起CO₂相态变化。为此,必须专门对衬砌结构进行防腐、保温设计。常用防腐设计有:耐蚀合金镀层、动态阴极保护系统与多相绝热结构的复合防护体系。挪威Sleipner项目通过该设计实现21年CO₂零泄漏运行,封存效率稳定在95%以上^[3]。

2 压缩二氧化碳气体热力学模型

2.1 绝热压缩二氧化碳热力学耦合模型

储气过程中,CO₂被压缩的同时会不可避免的释放热量,反之CO₂膨胀会吸收热量。所以储气岩穴衬砌不仅需要承担压缩CO₂带来的气压,还要承受气体压缩、膨胀过程中的温度改变,而热胀冷缩是导致混凝土结构开裂的常见因素之一,所以过于剧烈的温度变化对于需要控制裂缝开展的衬砌结构需要尽量避免。为了探究储气岩穴衬砌内壁在储能释能过程中所受的内压力与温度,需要对气体热力学行为进行研究。

本文选用绝热CO₂热力学模型^[4]构建压缩CO₂气态模型计算储罐内壁温度与压力并作为边界条件施加于地下储气库内边界。

充电阶段能量平衡方程:

$$E_{storage}(i+1) = E_{storage}(i) + m_{char}(i) \cdot h_{liquid}(i) \cdot dt \quad (1)$$

式中: E_{storage}(i)——i时刻储罐中CO₂的能量, J; m_{char}(i)——充电过程中CO₂的质量流量, kg/s; h_{liquid}(i)——i时刻CO₂的比焓, J/kg; dt——时间步长, s。

放电阶段能量平衡方程:

$$E_{storage}(i+1) = E_{storage}(i) - m_{dis}(i) \cdot h_{liquid}(i) \cdot dt \quad (2)$$

式中: m_{dis}(i)——放电过程中CO₂的质量流量, kg/s。

储罐内总能量表达式:

$$E_{storage}(i) = M_{vapor}(i) \cdot u_{vapor}(i) + M_{liquid}(i) \cdot u_{liquid}(i) \quad (3)$$

式中: M_{vapor}(i), M_{liquid}(i)——i时刻CO₂的质量, kg; u_{vapor}(i), u_{liquid}(i)——i时刻CO₂的比内能, J/kg。

CO₂的焓变改变气体温度和压力:

$$\int_{t_{clastard}}^{t_{clared}} m_{char}(h_{in} - h_{out}) dt = \int_{t_{disstart}}^{t_{disastard}} m_{dis} \cdot (h_{out} - h_{in}) dt \quad (4)$$

式中: h_{in}, h_{out}——储罐进出口CO₂的比焓。

上述公式基于MATLAB软件平台通过调用REFPROP软件得出CO₂瞬时温度与压力,即可迭代计算出储能循环周期中压缩CO₂气体的温度与压力曲线。

2.2 确定衬砌结构及土体本构方程

2.2.1 SFRC本构

因SFRC中的钢纤维在二维模型中无法具体体现,所以本文采用整体式建模方法建模。衬砌层的SFRC采用Grassl等^[5]提出的CDMP2损伤塑性模型作为模型计算本构,模型引入两个互不独立的塑性和损伤参

数来描述混凝土在多轴荷载作用下破坏特征,适用于拉伸和压缩破坏的结构分析。

CDPM2本构基于以下应力-应变关系式建立:

$$\sigma = (1 - \omega_t) \bar{\sigma}_t + (1 - \omega_c) \bar{\sigma}_c \quad (5)$$

式中: $\bar{\sigma}_t$ ——有效拉应力张量, Pa; $\bar{\sigma}_c$ ——有效压应力张量, Pa; ω_t 与 ω_c ——拉伸与压缩标量损伤变量,其取值范围从0(未损伤)到1(完全损伤),该参数是衡量衬砌拉伸损伤的关键参数。

2.2.2 土体的本构模型

土体本构模型是反应土体应力-应变关系的数学模型,按照土体特性的差异,可分为线弹性模型、弹塑性模型和多孔介质模型。本研究数值模拟中结构选用线弹性模型与弹塑性模型中的摩尔-库伦模型和德鲁克-普拉格模型如下:

线弹性模型。材料弹性本构模型是一种描述材料在发生小变形情况下在弹性阶段应力-应变关系的数学模型。该模型服从广义胡克定律,方程涉及的材料参数仅为弹性模量E和泊松比,见式(6)。本研究用于描述衬砌结构中的FRP纤维密封层和衬砌内钢筋变形行为。

$$\sigma = E \delta \quad (6)$$

式中: σ ——应力, Pa; E——弹性模量, Pa; δ ——应变, 无量纲。

摩尔-库伦模型。摩尔-库伦(Mohr-Coulomb)模型常被用于描述土体特性的理想弹塑性的本构模型。其基于摩尔应力圆,通过结合材料的粘聚力和内摩擦特性,建立剪切强度与法向应力之间的关系,应用于岩土工程中的稳定性分析和材料强度评估,见公式(7)。

$$\tau = c + \sigma_n \tan \varphi \quad (7)$$

式中: τ ——剪切应力, Pa; c——粘聚力, Pa; σ_n ——正应力, Pa; φ ——土体的内摩擦角, °。

鉴于本研究将构建二维数值模型进行计算分析,需要将Mohr-Coulomb模型进行扩展,以适用于二维空间中的平面应力问题与平面应变问题,如下:

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} = c \cos \varphi + \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \sin \varphi \quad (8)$$

式中: σ_1 ——最大主应力, Pa; σ_2 ——最小主应力, Pa。

德鲁克-普拉格模型。德鲁克-普拉格(Drucker-Prager)模型数值计算稳定,适用于有限元分析等数值模拟。且通过引入平均压力项,可更好地描述材料在高压条件下的强度特性,常用于广泛的应力状态。在二维空间中其屈服函数可表示为:

$$f(I_1, J_2) = \sqrt{J_2} + \alpha I_1 - k = 0 \quad (9)$$

式中： I_1 ——第一应力不变量，即平均压力项，见式（10）； J_2 ——第二偏应力不变量，即剪应力，见式（11）； β ， k ——材料参数。

$$I_1 = \sigma_{11} + \sigma_{22} \quad (10)$$

$$J_2 = \frac{1}{2}(s_{11}^2 + s_{22}^2) + s_{12}^2 \quad (11)$$

式中： s_{ij} ——偏应力张量。

2.2.3 固体传热模型

固体传热指热量在固体材料内部和固体材料之间的传递过程，主要以热传导形式体现，对流和辐射传热方式这里可忽略不计。二维固体瞬态传热方程是在热传导原理的基础上，集合傅里叶定律式和能量守恒定律，在直角坐标系中得出瞬态传热方程：

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q \quad (12)$$

式中： c_p ——恒压比热， $J/(kg \cdot K)$ ； k ——导热系数， W/mK ； ∇T ——温度梯度， K/m ； Q ——内热源， W/m^3 ； $\nabla \cdot (k \nabla T)$ ——热传导项。

2.2.4 热膨胀理论

受温度变化的影响，材料会发生尺寸和体积变化，产生热膨胀。在本研究中，储气洞室内的温度变化会通过热传导传递到衬砌结构，衬砌材料发生热膨胀的造成的应变-应变分布按照公式（13）与（14）描述计算。

$$\varepsilon^{th} = \alpha(T - T_{ref}) \quad (13)$$

$$\sigma = D(\varepsilon - \varepsilon^{th}) \quad (14)$$

式中： ε^{th} ——热膨胀应变； α ——热膨胀的割线系数， $1/K$ ； D ——由材料的杨氏模量和泊松比决定的弹性矩阵； ε ——总应变。

3 压缩二氧化碳气体储罐数值模拟分析与设计

3.1 衬砌结构数值模拟

为探究钢筋纤维混凝土（R-SFC）衬砌结构在复杂荷载条件下的力学响应与长期稳定性表现。采用COMSOL软件构建地下衬砌储气岩穴的二维模型，进行平面应变分析，计算不同工况下R-SFC衬砌的受力状态和变形情况，并对其力学性能进行评估。为避免尺寸效应，模型主体设为220m边长的正方形，储气衬砌岩穴设置在模型中心位置。

3.2 R-SFC衬砌损伤塑性分析

为识别R-SFC衬砌力学性能和损伤塑性的影响参数，本文基于壁厚和储气洞室内直径进行模型扩展分析。结构尺寸见表1。

表1 结构变参尺寸表

类型	衬砌厚 (mm)	钢纤维体积率 (%)	洞室直 (mm)	钢筋直径 (mm)	EDZ 半径 (mm)
TK-1~TK-3	300-600	1.5	3000	双圈 18	4000
DJ-1~DJ-4	500	1.5	2000~6000	双圈 18	3500~5500

图1与图2分别描述了衬砌结构损伤与衬砌厚度及洞室直径的关系。可以看出，R-SFC衬砌厚度增厚，最大拉伸损伤减少。且衬砌拉伸损伤随厚度增加呈现先快后慢的递减趋势。针对R-SFC衬砌拉伸损伤的控制，衬砌厚度相比损伤断裂影响更显著。此外，随着洞厚比（洞室直径与衬砌厚度的比值）的增大，衬砌对内压应力的承担作用随之减小。过大的洞厚比会降低衬砌强度，增加衬砌内部的拉伸损伤，围岩需要承担的应力也随之增加，从而需要提升对围岩强度的要求。因此，结构设计时需要结合围岩强度与衬砌自身性能，选取适宜的衬砌厚度与结构洞厚比，以满足结构安全性与经济性需求。

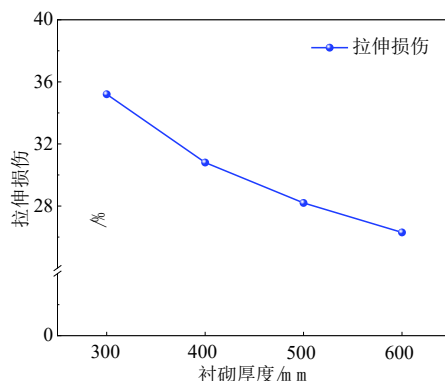


图1 衬砌厚度对衬砌拉伸损伤的影响

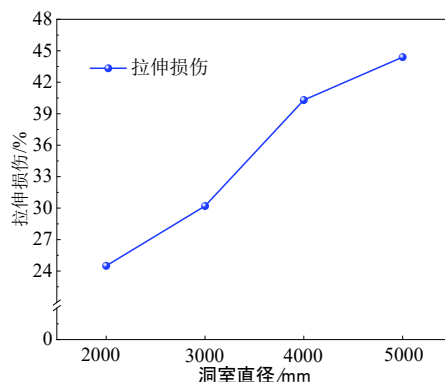


图2 洞室直径对衬砌拉伸损伤的影响

3.3 高压恒压地下储气罐结构设计

针对压缩CO₂储能系统设计，设定高压储罐在存储压缩气体过程中工况为40℃，15MPa内压力，且温度与内压力趋于稳定。以此为内边界条件带入R-SFC与围岩数值模型（衬砌厚度500mm，洞室直径3000mm，内圈钢筋25mm，外圈钢筋28mm）中进行数值分析，获得R-SFC衬砌的最大拉伸损伤分布，见图3。

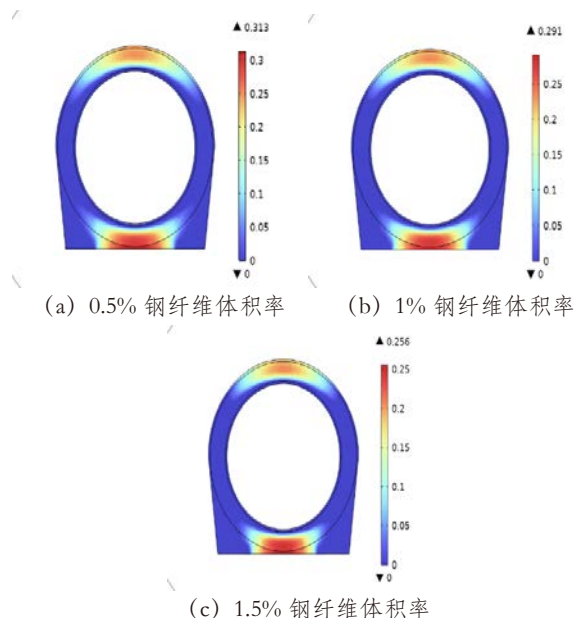


图3 恒压 R-SFC 衬砌储罐拉伸损伤分布

可以看出，采用恒压储气储能方案可有效减少 R-SFC 衬砌的强度衰减，且随着充放电循环次数增加，强度衰减会逐渐趋近于零。

综上所述，选取合适的地下储气衬砌结构设计参数时，应以围岩参数与储能需求为前提，在保证衬砌损伤控制在较小范围内的基础上，采取优化措施：减

小钢筋直径，增大洞室直径，削减衬砌厚度，降低钢筋纤维体积率。

参考文献：

- [1] LI Y, YU H, TANG D, et al. A comparison of compressed carbon dioxide energy storage and compressed air energy storage in aquifers using numerical methods[J]. Renewable Energy, 2022(187):1130-1153.
- [2] 张家俊, 李晓琼, 张振涛, 等. 压缩二氧化碳储能系统研究进展 [J]. 储能科学与技术, 2023,12(06):1928-1945.
- [3] PCC. Carbon Dioxide Capture and Storage [M/OL]. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2005.
- [4] Hanchen L, Ruochen D, Wen S, et al. A comprehensive performance comparison between compressed air energy storage and compressed carbon dioxide energy storage[J]. Energy Conversion and Management, 2024(319):1189.
- [5] Grassl P, Xenos D, Nyström U, et al. CDPM2: A damage-plasticity approach to modelling the failure of concrete[J]. International Journal of Solids and Structures, 2013(50):3805-3816.

基金项目：

西安市科技计划项目 (2024JH-ZCLGG-0031)。

