



不同首次充气模式下压缩空气储能洞室的温度演化规律

刘小刚¹, 徐栋焯^{2,3}, 袁自力⁴, 夏才初^{2,3*}, 金声尧^{2,3}, 韩 赞¹

(¹中铁第一勘察设计院集团有限公司, 陕西 西安 710043; ²宁波大学岩石力学研究所, 浙江 宁波 315211; ³宁波市能源地下结构重点实验室, 浙江 宁波 315211; ⁴苏尼特左旗元储科技有限公司, 内蒙古 锡林郭勒盟 011300)

摘要: 为准确掌握不同充气模式下压缩空气储能 (CAES) 洞室的温度演化规律, 并实现洞室升温的有效调控, 本文基于 Peng-Robinson 真实气体状态方程, 建立了考虑空气重力效应的热-流耦合数值模型, 系统揭示了空气重力对 CAES 洞室温度场的作用机制。在此基础上, 分析了不同充气模式下洞室的升温特性, 并提出相应的升温调控策略。结果表明, 立罐式 CAES 洞室温度响应的数值计算中不可忽略空气重力效应。温差导致的空气密度差异在重力作用下显著强化了洞室内的空气流动, 使竖向壁面附近的流速达到 7~8 m/s, 约为忽略重力时 (0.5 m/s) 的 14~16 倍; 洞室内空气平均温度峰值由 128.3℃ 降至 80.4℃, 降幅为 37.3%; 空气温度空间分布更加均匀, 局部高温区温度与空气平均温度之间的差异显著减小。延长首次充气时长以及采用低压阶段慢充的阶梯式充气模式, 均可有效降低 CAES 洞室空气温度峰值及升温速率。当首次充气时长由 24 h 增至 72 h 时, 空气平均温度峰值降幅约为 21%; 当 0.1~0.3 MPa 低压阶段的充气时长由 1 h 延长至 2.6 h 时, 空气温度峰值降低约 14.0℃。据此, 提出“延长首次充气时长、降低低压阶段充气速率”的 CAES 洞室升温调控策略。

关键词: 压缩空气储能; 立罐式 CAES 洞室; 空气重力; 首次充气; 升温特性

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2026.0706

中图分类号: TK 02

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (XXXX) XX-1-12

Temperature evolution of compressed air energy storage caverns under different initial charging modes

LIU Xiaogang¹, XU Dongye^{2,3}, HAN Yun⁴, XIA Caichu^{2,3*}, JIN Shengyao^{2,3}, YUAN Zili¹

(¹China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd, Xi'an 710043, Shaanxi, China; ²Institute of Rock Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, Zhejiang, China; ³Ningbo Key Laboratory of Energy Underground Structure, Ningbo University, Ningbo 315211, Zhejiang, China; ⁴Sonid Left Banner Yuanchu Technology Co., Ltd, Xilin Gol League, Inner Mongolia 011300, China.)

Abstract: To accurately characterize the temperature evolution in compressed air energy storage (CAES) caverns under different charging modes and achieve effective control of cavern temperature rise, a coupled thermo-fluid numerical model accounting for the gravitational effect on air was developed based on the Peng-Robinson real-gas equation of state. The model was used to systematically elucidate the mechanism by which gravity affects

收稿日期: 2026-08-12; 修改稿日期: 2026-09-06。

基金项目: 国家重点研发计划政府间重点专项 (2024YFE0105800); 国家自然科学基金企业创新发展联合基金重点项目 (U23B20145); 国家自然科学基金面上项目 (52278402); 中国铁建核心攻关项目 (CR1405-YSKQCN-【2025】-JS00001)。

第一作者: 刘小刚 (1974—), 男, 学士, 正高级工程师, 从事隧道与压缩空气储能人工洞室等方面的研究工作, E-mail: 397287371@qq.com; 通信作者: 夏才初, 教授, 主要从事气态地下洞室的研究, E-mail: tjxiacbb@126.com。

引用本文: 刘小刚, 徐栋焯, 袁自力, 等. 不同首次充气模式下压缩空气储能洞室的温度演化规律[J]. 储能科学与技术, XXXX, XX(XX): 1-12.

Citation: LIU Xiaogang, XU Dongye, HAN Yun, et al. Temperature evolution of compressed air energy storage caverns under different initial charging modes[J]. Energy Storage Science and Technology, XXXX, XX(XX): 1-12.

the temperature field in a CAES cavern. The temperature-rise characteristics under different charging modes were then investigated, and corresponding thermal regulation strategies were proposed. The results show that the gravitational effect on air cannot be neglected when numerically simulating the thermal response of a vertical-tank CAES cavern. Air density differences induced by temperature gradients, together with gravity, substantially enhance air circulation within the cavern, increasing the air velocity near the vertical walls to 7-8 m/s, approximately 14-16 times the value obtained when gravity is neglected (0.5 m/s). Consequently, the peak volume-averaged air temperature decreases from 128.3°C to 80.4°C, representing a reduction of 37.3%. The spatial distribution of air temperature also becomes more uniform, and the difference between the temperature in local high-temperature regions and the volume-averaged air temperature is significantly reduced. Extending the initial charging duration and adopting a staged charging mode with a lower charging rate at the low-pressure stage both effectively reduce the peak air temperature and the temperature-rise rate. When the initial charging duration increases from 24 h to 72 h, the peak volume-averaged air temperature decreases by approximately 21%. When the charging duration in the low-pressure range of 0.1-0.3 MPa is extended from 1.0 h to 2.6 h, the peak air temperature decreases by approximately 14.0°C. Accordingly, a temperature-rise regulation strategy combining an extended initial charging duration with a reduced charging rate at the low-pressure stage is proposed for CAES caverns.

Keywords: compressed air energy storage; vertical-tank CAES cavern; gravitational effect on air; initial charging; temperature-rise characteristics

随着风能、太阳能等可再生能源装机规模持续增长,电力系统对长时、大容量储能技术的需求日益迫切。压缩空气储能(compressed air energy storage, CAES)具有储能容量大、运行寿命长和环境适应性强等优势,是支撑可再生能源消纳和电网调峰的重要技术途径^[1-2]。地下储气洞室储气容量大、工程适用性强,是实现压气储能规模化应用的重要载体^[3-7]。在首次充气过程中,洞内压力由初始状态升至设计压力,压缩产生的热量容易在短时间内累积。对于竖向尺度较大的立罐式洞室,洞内空气流动和换热过程更加复杂,可能会出现明显的温度空间差异和局部高温。因此,准确掌握立罐式CAES洞室内温度场的演化特征是开展热状态预测和高温风险评估的重要基础。

针对压气储能洞室充放气过程中的温度和压力响应,国内外学者已开展了大量理论和数值研究。Huntorf 压气储能电站的运行作为地下储气系统温压响应研究提供了重要工程基础^[8]。Kim等^[9]针对浅埋内衬岩洞开展了气密性和能量平衡模拟,验证了内衬洞室作为压气储能储气空间的可行性。Kushnir

等^[10]以及Raju和Khaitan^[11]分别基于质量守恒和能量守恒建立了洞室温压动态模型,指出洞壁换热是影响储气库温度和压力波动的重要因素。Xia等^[12]进一步提出了考虑洞壁换热的压气储能洞室温度和压力统一解析解。国内学者也围绕地下储气库压缩空气热力学过程、湿空气效应和改进热力学模型开展了相关研究^[13-15],并分析了内压与温度耦合作用下地下内衬洞室的结构响应^[16]。这些研究为洞室整体温压响应预测奠定了基础,但多数采用集总参数模型或以平均温度为主要评价指标,难以反映大尺度洞室内部的空气流动、温度空间差异以及局部高温。

近年来,压缩空气储能洞室内温度场的空间非均匀性及首次充气阶段的高温问题逐渐受到关注。计算流体力学(CFD)模型通过求解洞内可压缩气体的质量、动量和能量守恒方程,能够表征空气速度场、温度场和密度场的时空演化^[17]。现有CFD研究已被用于分析多种CAES地下储气库在循环充放气过程中的温度场空间分布及其影响因素,但对重力作用下浮力流动及其对洞内温度空间分布影响

的定量研究仍较为有限^[18-21]。在充气过程中，持续注气、气体压缩和洞壁换热的共同作用可能使洞内温度和密度呈现明显的空间非均匀性；在重力作用下，由密度差引起的浮力流动可能进一步改变洞内空气流动和热量传递过程。因此，CFD模拟中若忽略重力效应，可能对温度场空间非均匀性、峰值温度及高温区域位置的预测产生偏差，其影响程度有必要通过考虑与忽略重力条件下的对比模拟进行定量评估。

针对上述问题，本文以立罐式压缩空气储能洞室为研究对象，基于Peng-Robinson (Twu) 真实气体状态方程，建立考虑空气重力的热-流耦合数值模型。首先，通过对比忽略与考虑重力两种条件下洞内流场和温度场的演化特征，揭示空气重力对气体流动及温度空间分布的影响机制。随后，针对温升最明显的首次充气阶段，研究不同充气时长下恒定式充气的温升规律，并进一步分析阶梯式充气对温度峰值及其出现时间的调控效果，为立罐式CAES洞室首次充气温控及运行参数设计提供参考。

1 工程概况与数值模型

1.1 工程概况

某拟建压缩空气储能工程采用地下内衬储气洞室储存高压空气。选取其中一座立罐式储气洞室作为研究对象，其主要几何尺寸和运行参数见表1。该洞室总高度为80 m，其中圆柱段高度为55 m，洞室直径为40 m，顶部设置直径为1 m的充气口。洞室由内向外依次设置厚度为10 mm的钢衬、厚度为0.5 m的混凝土衬砌和围岩。为模拟洞内空气与周围结构之间的换热过程，参考孙冠华等^[20]对CAES地下洞室首次充气温度的处理，并考虑本文关注首次充气及短期运行阶段、热影响主要集中在衬砌及近壁区域，在混凝土衬砌外侧选取0.5 m厚的围岩作为传热计算域。首次充气过程中，洞内压力由0.1 MPa升至14 MPa。随后洞室进入稳定循环运行阶段，以24 h为一个运行周期，其中包括充气7 h、高压储气10 h、放气6 h和低压储气1 h，循环过程中洞内压力在8.5~14 MPa范围内变化。

1.2 基本假设

1) 首次充气前，洞室内空气与各结构层处于

表1 立罐式压气储能洞室几何尺寸与运行参数

Table 1 Geometrical and operating parameters of the vertical CAES cavern

参数	数值
充气口直径/m	1
密封层厚度/mm	10
衬砌厚度/mm	500
围岩厚度/m	0.5
洞室直径/m	40
洞室圆柱体部分高度/m	55
洞室总高度/m	80
初始洞内压力/MPa	0.1
洞室初始温度/℃	20
注入空气温度/℃	25
首次充气阶段质量流率/(kg·s ⁻¹)	12.5
循环充气阶段质量流率/(kg·s ⁻¹)	4.91
充气/h	7
高压储气/h	10
放气/h	6
低压储气/h	1

热平衡状态，初始温度均设为20℃。

2) 钢衬、混凝土衬砌及围岩均视为均质、各向同性的连续介质，其密度、比热容、导热系数等热物性参数保持不变。

3) 洞内气体视为干燥空气，其摩尔分数由0.8的N₂和0.2的O₂组成，其热力学状态采用P-R (Twu) 真实气体状态方程描述。

1.3 控制方程

本文基于COMSOL求解洞内可压缩流动与共轭传热过程。洞室内空气流动满足连续性方程和动量方程，其形式分别为：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

式中： ρ 为空气密度，kg/m³； t 为时间，s； $\mathbf{u}$ 为空气的速度矢量，m/s。

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \nabla \cdot \{ \rho \mathbf{l} + (\mu + \mu_T) \cdot [\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T] - \frac{2}{3} (\mu + \mu_T) (\nabla \cdot \mathbf{u}) \mathbf{l} - \frac{2}{3} \rho \mathbf{k} \mathbf{l} \} + \rho \mathbf{g} \quad (2)$$

式中： p 为洞室内空气压力，Pa； μ 和 μ_T 分别为空气的动力黏度和湍流黏度，Pa·s； $\mathbf{l}$ 为单位张量； $\mathbf{g}$ 为重力加速度，m/s²。当考虑空气重力时，动量方程中保留重力项。

采用k-ε湍流模型描述洞内气体湍流，湍流动能k方程如下：

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)k = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho \varepsilon \quad (3)$$

湍流耗散率 ε 方程如下:

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)\varepsilon = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

式中: P_k 为湍流动能生成项; ε 为湍流耗散率; σ_k 、 σ_ε 分别为湍流动能 k 与湍流耗散率 ε 方程的普朗特数, 分别取 1.0、1.3; $C_{\varepsilon 1}$ 、 $C_{\varepsilon 2}$ 均为经验系数, 分别取 1.44、1.92。

考虑空气与钢衬、衬砌及围岩之间的共轭传热, 洞内空气能量守恒方程为:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p (\mathbf{u} \cdot \nabla)T + \nabla \cdot \mathbf{q} + \frac{T}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} \right) \left[\frac{\partial \rho}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla)\rho \right] = 0 \quad (5)$$

式中: C_p 为气体定压比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; T 为绝对温度, K ; $\mathbf{q}$ 为传导热通量, W/m^2 。

传导热通量 $\mathbf{q}$ 可由下式计算可得:

$$\mathbf{q} = -\lambda \nabla T \quad (6)$$

式中: λ 为导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; ΔT 为空气与洞壁之间的温度差, K 。

在 0.1~14 MPa 的压力范围内, 空气的压缩特性和热物性参数会明显偏离理想气体假设。因此, 采用 P-R (Twu) 真实气体状态方程描述空气密度及相关热物性随压力和温度的变化。该方程的具体形式为^[22-23]:

$$\rho = \frac{RT}{v-b} = \frac{\alpha(T)}{v(v+b) + b(v-b)} \quad (7)$$

式中: $v=M/\rho$ 为摩尔体积, m^3/mol ; R 为通用气体常数, $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; M 是摩尔质量, kg/mol ; b 为分子间的排斥体积; $\alpha(T)$ 为表征分子间吸引作用的温度函数^[24]。

图 1 展示了不同压力下空气密度和导热系数随温度的变化。压力相同时, 空气密度随温度升高而降低, 而导热系数随温度升高而增大; 温度相同时, 空气密度则随压力升高而明显增大。空气热物性的变化会进一步影响洞内空气流动、温度分布和换热过程。因此, 后续数值计算中空气的热物性参数根据实际温度和压力进行动态修正。各结构层的热物性参数见表 2, 其中围岩密度、比热容和导热系数取自工程地质勘察资料。

1.4 网格划分与网格无关性验证

立罐式压气储能洞室的计算模型及网格划分如图 2 所示。计算域包括洞内空气、钢衬、衬砌和围

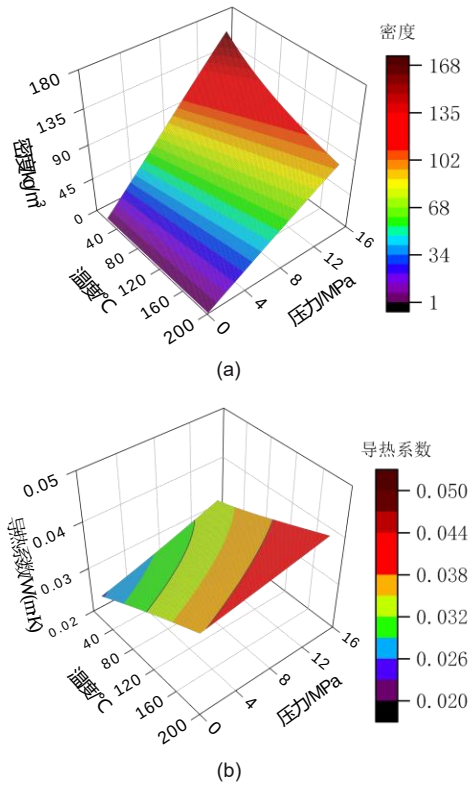


图 1 不同压力下空气密度和导热系数随温度的变化:
(a) 密度; (b) 导热系数

Fig. 1 Variations in air density and thermal conductivity with temperature at different pressures: (a) density; (b) thermal conductivity.

表 2 结构层的热物性参数

Table 2 Thermophysical parameters of the structural layers

材料	密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	比热/ $(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	导热系数/ $(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$
钢衬	7800	500	45.0
衬砌	2500	837	1.40
围岩	2650	1000	2.30

岩。由于钢衬厚度远小于洞室整体尺寸, 若按实际厚度划分网格, 将显著增加网格数量和计算成本。因此采用等效薄层方法处理钢衬。考虑到充气口及其邻近区域可能出现较大的速度和温度梯度, 对该区域进行局部网格加密。空气与壁面之间采用无滑移边界条件, 气-固界面满足温度连续和法向热流连续条件, 围岩外边界设为恒温边界, 其温度与围岩初始温度保持一致。

为评估网格数量对温度场计算结果的影响, 分别建立了包含 10576、41262、63680 和 84621 个网格的四种计算模型, 并开展网格无关性分析。不

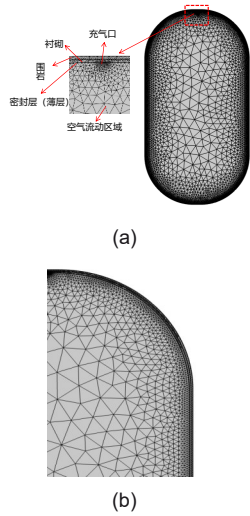


图2 立罐式压气储能洞室计算模型与网格划分：(a) 计算模型；(b) 纵剖面图

Fig. 2 Computational model and mesh generation for the vertical-tank-type compressed air energy storage cavern: (a) computational model; (b) longitudinal section.

同网格数量下洞内空气平均温度的变化如图3所示。随着网格数量增加，空气平均温度曲线逐步趋于一致。当网格数量由63680增加至84621时，计算结果仅发生较小变化。综合计算精度与效率，后续计算采用包含63680个网格的计算模型，其平均网格质量为0.91。

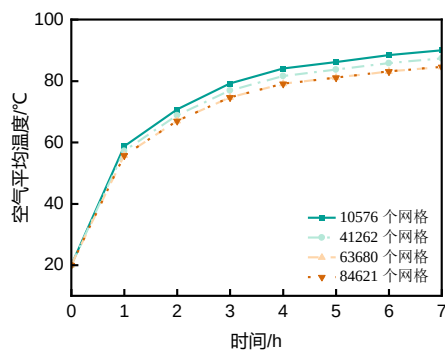


图3 不同网格数量下洞内空气平均温度变化

Fig. 3 Variation in volume-averaged air temperature under different mesh numbers

2 考虑空气重力时压气储能洞室温度场的演化规律

2.1 首次充气阶段洞内空气流动特性

为揭示空气重力对立罐式压气储能洞室温度场

的影响机制，设置忽略空气重力和考虑空气重力两组计算条件进行对比，即除动量方程(2)中是否保留重力项外，其它条件参数均保持一致。如图4所示，洞内压力由0.1 MPa升至14 MPa为首次充气过程。首次充气结束后，洞室进入循环充放气运行阶段，压力在14~8.5 MPa范围内周期性变化，共模拟了7个运行周期。

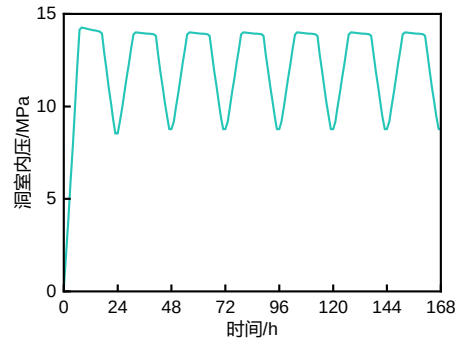


图4 洞室内压变化曲线

Fig. 4 Variation of internal pressure in the cavern

为直观展示充气过程中洞内气流的演化特征，分别选取0.5 h和7 h两个时刻的流场分布云图进行对比分析，如图5所示。首次充气0.5 h时，两种计算条件下的高速区主要分布于充气口附近，但洞内流场分布存在显著差异。忽略空气重力时，空气流动主要由入口射流驱动，最大流速为3.9 m/s。气流离开充气口后迅速向周围扩散，流速随之降低，竖向壁面附近的流速仅为0.5 m/s。考虑空气重力后，最大流速仍出现在充气口附近，其值增大至10.9 m/s，约为忽略重力时的2.8倍；此时，洞室竖向壁面附近形成了连续且较强的气流，流速达到7~8 m/s，约为忽略重力时的14~16倍。充气延续至7 h时，两种计算条件下的流速均较充气初期有所降低，但流场差异仍然存在。忽略空气重力时，竖向壁面附近的流速已接近于0，洞内流动主要表现为相对封闭的局部回流；考虑重力后，沿竖向壁面的流速仍可达到2.3 m/s，表明充气后期近壁区域仍保持较明显的竖向流动。需要说明的是，考虑空气重力后，充气过程中气体压缩产生的温差导致空气密度出现空间差异，由此形成明显的竖向循环流动，使充气口邻近区域的局部速度梯度增大。随着充气继续进行，这种由温差和密度差驱动的自然对流逐渐增强，并使竖向壁面附近形成持续的高速循环流动。此外，高速循环区偏向左侧竖向

壁面并不意味着流动具有固定的左偏性。本工况下充气射流处于高雷诺数湍流状态, 对称流场可能发生对称破缺, 数值迭代中的微小扰动可使流场随机

收敛至左右镜像等价的非对称状态, 因此高速循环区可偏向任一侧壁。

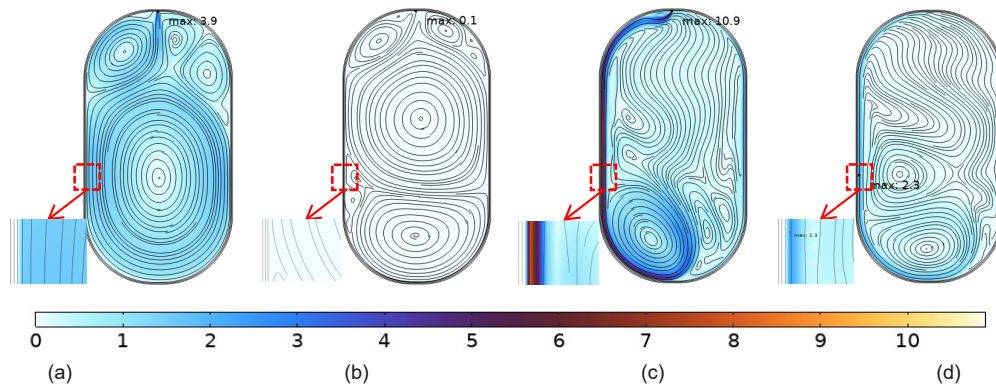


图5 忽略与考虑空气重力条件下洞内流场分布: (a)~(b) 忽略重力, 充气0.5 h和7 h; (c)~(d)考虑重力, 充气0.5 h和7 h
Fig. 5 Flow field distributions inside the cavern with and without considering the gravitational effect of air: (a)~(b) gravity neglected, at 0.5 h and 7 h of charging; (c)~(d) gravity considered, at 0.5 h and 7 h of charging

为进一步解释图5中流场形成差异的原因, 图6给出了首次充气0.5 h内空气平均温度和最高温度的变化。充气初期, 两组温度曲线基本重合。此时洞内各区域温差较小, 由温差引起的密度差尚不明显, 空气流动主要受入口射流控制。随着充气进行, 压缩热不断积累, 洞内温度分布逐渐不均, 导致空气密度差随之增大, 两组温度曲线开始分离。考虑重力时, 高温低密度空气上升, 低温高密度空气下沉, 逐渐形成持续的竖向循环。该循环显著加强了洞内的空气流动和不同温度空气之间的混合, 使局部聚集的热量向洞室其他区域扩散, 从而削弱局部高温和温度梯度, 使洞内温度场分布逐渐趋于均匀。而忽略重力时, 洞内流动主要依靠入口射流, 近壁区域的流动较弱, 使得两种条件下空气温度的差异持续扩大。由此可见, 空气重力对流场的影响随着洞内温差的形成而逐渐增强, 使洞内空气流动由入口射流主导逐步转变为入口射流与竖向循环共同控制。

2.2 洞室内空气温度的空间分布特征及演化规律

如图7(a)和图7(c)所示, 首次充气阶段是洞内空气升温最明显的阶段。首次充气结束时, 忽略空气重力条件下的空气平均温度和最高温度分别为128.3℃和192℃; 考虑空气重力后, 两者分别降至80.4℃和81.9℃, 相应降低47.9℃和110.1℃, 降幅分别为37.3%和57.3%。其中, 最高温度的降幅明显大于平均温度, 说明空气重力对局部温度峰

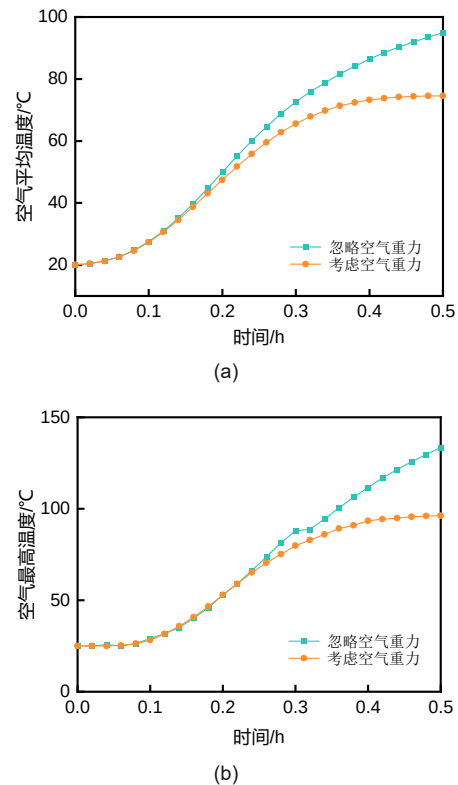


图6 首次充气0~0.5 h内忽略与考虑重力条件下空气温度变化: (a) 平均温度; (b) 最高温度

Fig. 6 Air temperature variations during the first 0~0.5 h of inflation with and without considering gravity: (a) average temperature; (b) maximum temperature.

值的影响更加明显。进入循环运行阶段后, 空气温度随充放气过程呈周期性升降, 各循环的温度峰值

逐步降低，且下降幅度不断减小。

为进一步表征循环过程中的温度差异，图7(b)和图7(d)给出了各循环空气平均温度和最高温度的峰值与谷值。随着循环次数增加，两组计算结果之间的差异持续减小。至第7个循环时，两

者的差值分别减小至16.0℃和22.4℃，较首次充气阶段分别减小66.6%和79.7%。此外，第5个循环以后，相邻循环的温度峰值变化已不足1.2℃，温度谷值也基本保持稳定，表明洞内空气温度已逐渐进入稳定的周期变化状态。

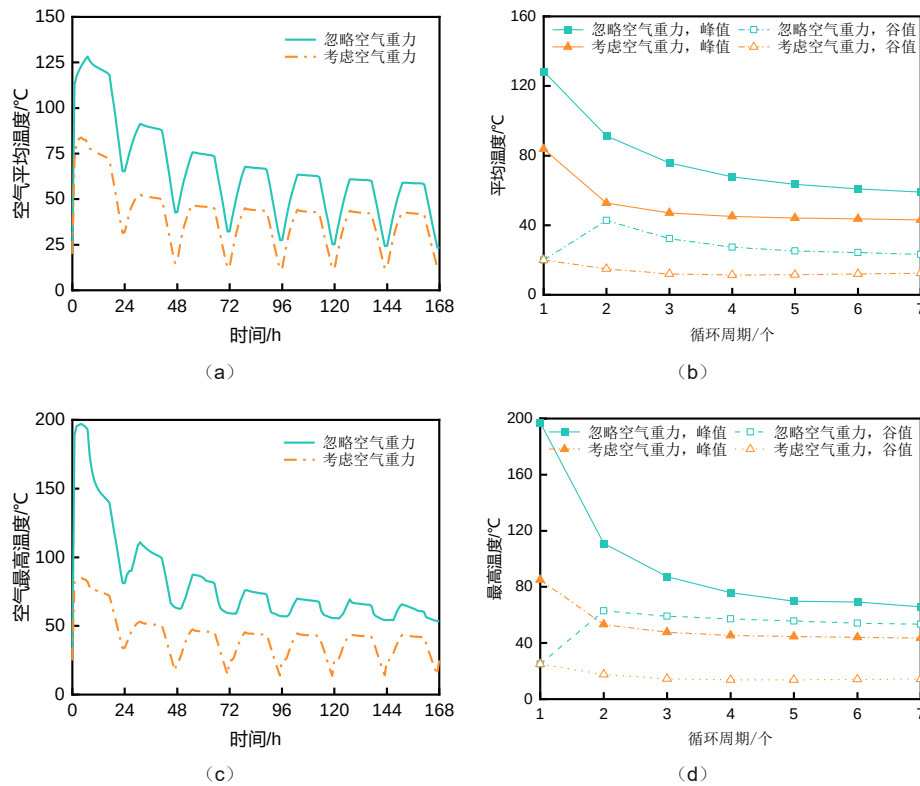


图7 忽略与考虑空气重力条件下洞内空气温度变化与峰谷值：(a)~(b) 平均温度与峰谷值；(c)~(d) 最高温度与峰谷值
Fig. 7 Variations and peak and trough values of the air temperature inside the cavern with and without considering the gravitational effect on air: (a)—(b) average temperature and temperature extremes; (c)—(d) maximum temperature and temperature extremes

图8和图9分别给出了忽略和考虑空气重力条件下，首次充气0.5 h、首次充气结束以及第7次充气结束时的温度场空间分布。如图8所示，忽略空气重力时，洞内温度场呈明显的局部非均匀性。首次充气0.5 h时，高温区主要集中在洞室中下部，最高温度为133.5℃，高温区与周围区域之间形成较大的温度梯度。首次充气结束时，洞室中部形成范围较为集中的高温区，底部存在次高温区，说明充气过程中产生的热量主要聚集在洞室内部，向其他区域的传递相对有限。至第7次充气结束时，最高温度降至66.2℃，但洞室内部温度仍高于近壁区域，温度空间分布不均匀的现象依然存在。

如图9所示，考虑空气重力后，洞内温度的空

间分布发生了明显变化。首次充气0.5 h时，高温区不再集中于洞室内部，而是呈现上部温度较高、下部温度较低的竖向分层特征，最高温度约为95.9℃，较忽略空气重力时降低36.1℃，降幅约为27.3%。首次充气结束时，洞内大部分区域的温度较为接近，局部高温特征明显减弱。至第7次充气结束时，洞内温度分布进一步趋于均匀，最高温度约为44.0℃，较忽略空气重力时低22.2℃。首次充气结束时，洞内大部分区域温度较为接近，局部高温特征明显减弱。此时温度趋于均匀并不意味着重力作用减弱：由图5可知，忽略重力时竖向壁面附近流速已接近于0，而考虑重力时仍可达到约2.3 m/s，说明重力的影响仍持续存在，并通过增强空

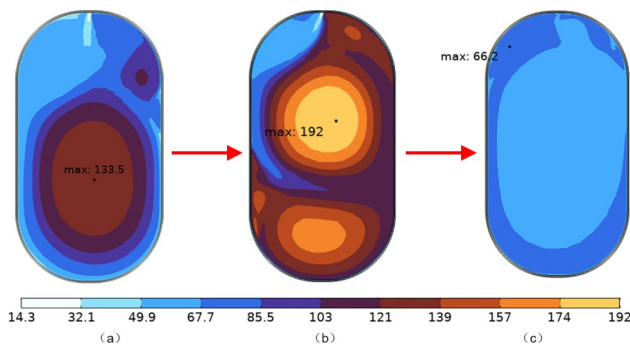


图8 忽略空气重力条件下洞内温度场演化过程: (a)首次充气 0.5 h; (b)首次充气 7 h; (c)第7次循环充气结束
Fig. 8 Evolution of the temperature field inside the cavern with the gravitational effect of air neglected: (a) 0.5 h into the initial charging process; (b) 7 h into the initial charging process; (c) at the end of the seventh charging cycle

气混合和壁面换热削弱局部温差。只是其表现形式由空间分层转变为降低整体温度并提高温度均匀性。综上所述,在计算立罐式CAES洞室的温度响应时,空气重力不可忽略。

3 不同充气模式下洞室温度的演化规律

前述结果表明,首次充气阶段是洞内空气温升最显著、温度控制最为关键的阶段。为有效控制洞室内的空气温升,本节基于恒定式和阶梯式两种不

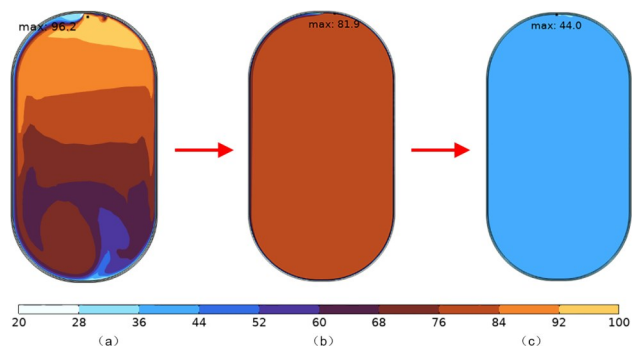


图9 考虑空气重力条件下洞内温度场演化过程: (a)首次充气 0.5h; (b)首次充气 7h; (c)第7次循环充气结束
Fig. 9 Evolution of the temperature field inside the cavern with the gravitational effect of air taken into account: (a) 0.5 h into the initial charging process; (b) 7 h into the initial charging process; (c) at the end of the seventh charging cycle

同的充气模式开展研究。其中,恒定式充气是指在整个首次充气过程中,质量流率始终保持不变,从初始气压 0.1 MPa 压缩空气至 14 MPa; 阶梯式充气则是根据洞内压力将充气过程划分为若干阶段,并在不同压力阶段采用不同的质量流率,使质量流率随充气过程呈阶梯式变化。

3.1 恒定式充气模式下不同充气时长的温升规律

在恒定式充气模式下,保持最终压力为 14 MPa 不变,设置 24、48 和 72 h 三种首次充气时长,各工况从 0.1 MPa-14 MPa 对应的质量流率如表 3 所示。

表3 不同首次充气时长下恒定式充气模式

Table 3 Constant-rate charging mode under different initial charging durations

压力区间/MPa	充气 24 h 对应的质量流率/(kg·s ⁻¹)	充气 48 h 对应的质量流率/(kg·s ⁻¹)	充气 72 h 对应的质量流率/(kg·s ⁻¹)
0.1-14	3.64	1.82	0.91

由图 10(a)和图 10(b)可知,在恒定式充气模式下,不同首次充气时长对应的空气平均温度和最高温度均表现为先升高后降低的变化趋势。随着首次充气时间由 24 h 延长至 48 h 和 72 h,空气平均温度和最高温度的峰值由 66~67℃ 依次降至 61~62℃ 和 52~53℃,峰值出现时间也由 10 h 推迟至 15~20 h。与 24 h 工况相比,72 h 工况的温度峰值降低 14℃,降幅约为 21%。达到峰值后,各工况下的空气温度有所下降,且充气时长越长,峰值后的降温幅度越大。24 h 工况下,空气温度在峰值后仅下降 3℃,充气结束时平均温度和最高温度分别为 63℃ 和 64℃; 72 h 工况下,峰值后的降温幅

度增大至 9℃,充气结束时两者分别降至 43℃ 和 44℃。

此外,首次充气过程中峰值后的降温是正常现象。充气刚开始时,洞内原有空气很少,持续注入压缩空气后,洞内空气很快升温。随着充气继续进行,洞内空气越来越多,同样的进气量对整个洞内空气温度的影响逐渐减小;同时,此时洞内空气温度已经明显高于进气温度,持续进入的较低温空气会与洞内高温空气混合,并且洞内空气随着充气时间的增长,会持续向密封层及近壁结构累积传热。因此,到了充气中后期,升温作用逐渐减弱,而低温进气混合和洞壁换热的降温作用逐渐增强,当后

者超过前者时，空气温度就会达到峰值后逐渐下降。需要说明的是，首次充气过程中热量均主要在洞内空气及近壁结构之间传递，尚未传递至围岩，即围岩厚度不是导致降温的主要因素。

综合上述分析可知，延长首次充气时间可有效降低立灌式压气储能洞室的最高温度。空气温度的演化与洞室内压力的升高不呈现同步变化，空气重力的作用使首次充气末端的温度有所降低，最高温度峰值出现的时间出现明显的滞后，且随着首次充气时间的增大而滞后越多。

3.2 阶梯式充气模式下不同充气时长的温升规律

为进一步分析阶梯式充气模式下不同时长的温升特性，本节分别将 24h、48h 和 72h 不同首次充气时间划分为 5 个阶段，每个阶段对应压力区间为 0.1~0.3、0.3~1.0、1.0~3.0、3.0~6.0 和 6.0~14.0 MPa，对应 24 h 工况的具体参数见表 4。表中阶段时长以 24 h 恒定式充气工况为基准，通过参数化试算确定。在储气洞室容积以及初始温度等不变的条件下，逐步增加低压阶段的充气时间，并相应缩短中、高压阶段的充气时间，形成三组具有代表性的方案 A、B 和 C。阶段时长确定后，同一压力区间内各方案保持注气量一致，质量流率按充气时长反比例计算，并通过数值计算校正阶段末压力。对于 48 h 和 72 h 工况沿用相同的压力分段，阶段

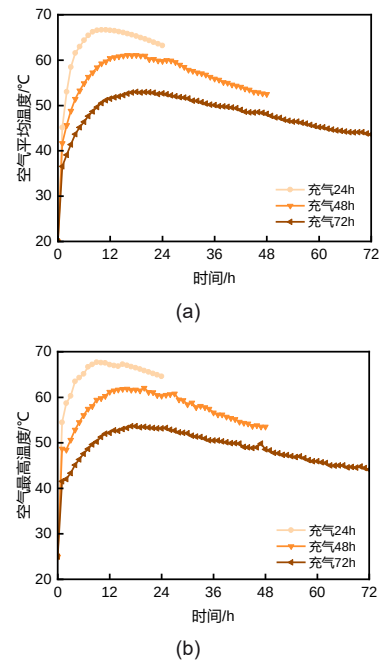


图 10 考虑空气重力条件下不同首次充气时长的空气温度变化：(a) 平均温度；(b) 最高温度

Fig. 10 Variations in the air temperature under different initial charging durations with the gravitational effect of air taken into account: (a) average temperature; (b) maximum temperature.

时长分别为 24 h 工况的 2 倍和 3 倍，质量流率相应调整为 1/2 和 1/3。

表 4 24 h 充气时长下阶梯式充气模式的阶段时间与质量流率分配

Table 4 Stage durations and mass flow rate allocation for the stepwise charging mode over a 24 h charging period

压力区间/MPa	方案 A 充气时长/h	方案 A 质量流率/(kg·s ⁻¹)	方案 B 充气时长/h	方案 B 质量流率/(kg·s ⁻¹)	方案 C 充气时长/h	方案 C 质量流率/(kg·s ⁻¹)
0.1-0.3	1	1.42	1.8	0.79	2.6	0.55
0.3-1.0	2.5	2.04	3.4	1.50	4.3	1.18
1.0-3.0	5	2.89	5	2.89	5	2.89
3.0-6.0	6	3.71	5.3	4.21	4.6	4.85
6.0-14.0	9.5	4.63	8.5	5.18	7.5	5.87

图 11 给出了不同充气时长下恒定式与阶梯式充气方案的空气温度变化。与恒定式充气相比，阶梯式充气在低压阶段采用较小质量流率，减缓了充气初期的温升；进入中、高压阶段后，随着质量流率逐级提高，温度曲线斜率增大，并在流率变化处出现转折。随着低压阶段充气时间延长、质量流率降低，温度曲线整体向右下方移动，表现为温度峰值降低、峰值出现时间推迟。其中，低压阶段充气

时间最长、质量流率最低的工况温控效果最佳：与相同充气时长下的恒定式充气相比，24、48 和 72 h 工况的空气平均温度峰值分别降低 6.5、9.2 和 14.0℃，最高温度峰值分别降低 3.4、7.3 和 12.1℃，峰值出现时间分别推迟至 16、30 和 54 h。随着总充气时长由 24 h 增加至 72 h，平均温度和最高温度峰值的削减幅度分别由 6.5℃和 3.4℃增至 14.0℃和 12.1℃，表明延长充气时长可进一步增强

阶梯式充气的削峰和峰值延迟作用。上述现象表明,延长首次充气时长以及优化充气初期的流量分配,均可有效降低洞室空气温度峰值和温升速率。其中,充气初期是洞室温升调控的关键阶段,通过降低低压阶段的空气质量流率、适当延长低压阶段充气时间,可显著抑制初期快速温升。因此,在工程运行中可采用“延长首次充气时间与低压阶段慢充相结合”的调控策略,在满足储气压力要求的同

时降低洞室温度峰值。

需要说明的是,阶梯式充气策略主要针对储气洞室投运前的首次充气,而非正常日循环运行。首次充气频次低且充气时长具有一定调节空间,适合通过降低低压阶段质量流率控制初始热负荷。工程应用中,各阶段质量流率应受压缩机性能曲线、稳定运行边界及高效运行区间约束,可结合机组组合或调节措施实现,避免压缩机偏离设计工况。

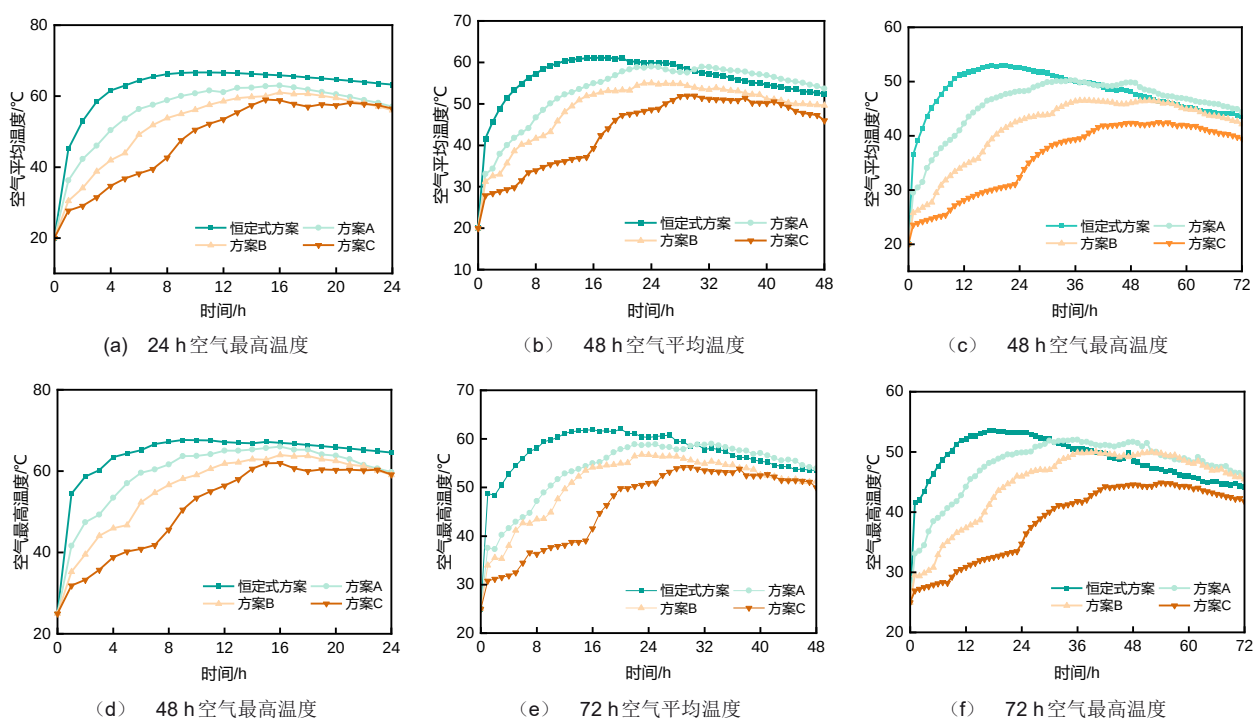


图 11 阶梯式充气模式下洞内空气温度变化: (a)~(c)空气平均温度, 充气 24/48/72 h; (d)~(f)空气最高温度, 充气 24/48/72 h

Fig. 11 Variations in the air temperature inside the cavern under the stepwise charging mode: (a)~(c) average air temperature at 24/48/72 h of charging; (d)~(f) maximum air temperature at 24/48/72 h of charging

4 结 论

本文以立罐式 CAES 洞室为研究对象,建立了围岩-衬砌-钢衬-空气多介质的热流耦合 CFD 数值模型,对比分析了空气重力效应对空气流场与温度场演化的作用机制,并揭示了恒定式充气 and 阶梯式充气对首次充气温升特性的影响。主要结论如下:

(1) 空气重力显著增强了立罐式 CAES 洞室内的空气流动,有效降低了洞内空气温度峰值。洞内温差引起的空气密度差异在重力作用下增强了洞内的空气流动和不同温度空气之间的混合,竖向壁面附近的空气流速可达 7~8 m/s,约为忽略空气重力

时的 14~16 倍;空气平均温度峰值由 128.3℃ 降至 80.4℃,降幅为 37.3%。因此,立罐式 CAES 洞室的数值计算中不能忽略空气重力。

(2) 立罐式 CAES 洞室的温度空间分布较为均匀。首次充气结束时洞室内空气的平均温度和最高温度分别为 80.4℃ 和 81.9℃,平均温度与局部高温之间的差异较小;在循环充放气过程中,平均温度与局部高温之间的差异基本稳定在 1.2℃ 的。

(3) 延长首次充气时长可有效降低洞室内的空气温度水平。首次充气时长由 24 h 延长至 72 h 时,空气平均温度和最高温度峰值由 66~67℃ 降至

52~53℃，降幅约为21%；充气结束时，两者由63~64℃降至43~44℃，降幅约31.7%。

(4) 阶梯式充气能够有效抑制洞室内空气的温升速率，降低空气温度峰值。相同首次充气时长下，延长阶梯式充气模式低压阶段充气时间或降低其充气质量流率，24、48和72 h下空气平均温度峰值相对恒定式充气分别降低6.5、9.2和14.0℃，最高温度峰值分别降低3.4、7.3和12.1℃。

(5) 首次充气初期是洞室温升调控的关键阶段，通过降低低压阶段的空气质量流率、适当延长低压阶段充气时间，可显著抑制初期快速温升。因此，对于储气洞室投运前的首次充气，可采用“延长首次充气时间与低压阶段慢充相结合”的调控策略，在满足储气压力要求的同时降低洞室温度峰值。在工程实施时应结合压缩机性能曲线和高效运行区间确定各阶段质量流率，避免以压缩机低效运行为代价进行温控。

参考文献

- [1] BUDT M, WOLF D, SPAN R, et al. A review on compressed air energy storage: Basic principles, past milestones and recent developments[J]. *Applied Energy*, 2016, 170: 250-268.
- [2] BAZDAR E, SAMETI M, NASIRI F, et al. Compressed air energy storage in integrated energy systems: A review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, 167: 112701.
- [3] 杨春和, 王同涛. 我国深地储能机遇、挑战与发展建议[J]. *科学通报*, 2023, 68(36):4887-4894.
YANG C H, WANG T T. Opportunities, Challenges and Development Suggestions for Deep Earth Energy Storage in China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2023, 68(36): 4887-4894.
- [4] YANG C, WANG T T, CHEN H. Theoretical and technological challenges of deep underground energy storage in China[J]. *Engineering*, 2023, 25: 168-181.
- [5] 孙冠华, 朱开源, 纪文栋, 等. 压缩空气储能电站地下洞库的基本概念、设计理念与方法[J]. *隧道与地下工程灾害防治*, 2024, 6(01): 14-23.
SUN G H, ZHU K Y, JI W D, et al. Basic Concepts, Design Principles, and Methods for Underground Caverns in Compressed Air Energy Storage Power Plants [J]. *Disaster Prevention and Control in Tunnels and Underground Engineering*, 2024, 6(01): 14 - 23.
- [6] 孙冠华, 王娇, 于显杨, 等. 压缩空气储能电站地下内衬洞库基本原理与分析方法研究进展[J]. *岩土力学*, 2025, 46(01): 1-25.
SUN G, WANG J, YU X Y, et al. Research Progress on the Basic Principles and Analysis Methods of Underground Lined Caverns for Compressed Air Energy Storage Power Plants [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2025, 46(01): 1 - 25.
- [7] 夏开宗, 向欣, 缪秀秀, 等. 硬岩内衬地下洞室大规模压缩空气储能关键问题与技术[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2025, 53(08): 106-125.
XIA K Z, XIANG X, MIAO X X, et al. Key Issues and Technologies for Large-Scale Compressed Air Energy Storage in Underground Cavities Lined with Hard Rock [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2025, 53(08): 106 - 125.
- [8] CROTOGINO F, MOHMEYER K U, SCHARF R. Huntorf CAES: More than 20 years of successful operation[C]//SMRI Spring Meeting. Orlando, USA, 2001.
- [9] KIM H M, RUTQVIST J, RYU D W, et al. Exploring the concept of compressed air energy storage (CAES) in lined rock caverns at shallow depth: A modeling study of air tightness and energy balance[J]. *Applied Energy*, 2012, 92: 653-667.
- [10] KUSHNIR R, DAYAN A, ULLMANN A. Temperature and pressure variations within compressed air energy storage caverns[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2012, 55(21/22): 5616-5630.
- [11] RAJU M, KHAITAN S K. Modeling and simulation of compressed air storage in caverns: A case study of the Huntorf plant[J]. *Applied Energy*, 2012, 89(1): 474-481.
- [12] XIA C C, ZHOU Y, ZHOU S W, et al. A simplified and unified analytical solution for temperature and pressure variations in compressed air energy storage caverns[J]. *Renewable Energy*, 2015, 74: 718-726.
- [13] 刘澧源, 蒋中明, 王江营, 等. 压气储能电站地下储气库之压缩空气热力学过程分析[J]. *储能科学与技术*, 2018, 7(02):232-239.
LIU L Y, JIANG Z M, WANG J Y, et al. Analysis of Thermodynamic Processes in Underground Compressed Air Storage Facilities for Compressed Air Energy Storage Power Plants [J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2018, 7(02): 232 - 239.
- [14] 蒋中明, 郭菁, 唐栋. 压气储能地下储气库压缩空气热力学模型[J]. *储能科学与技术*, 2021, 10(02): 638-646.
JIANG Z M, GUO J, TANG D. Compressed air energy storage underground gas storage compressed wet air thermodynamic model [J]. *Energy storage science and technology*, 2021, 10 (02): 638-646.
- [15] 蒋中明, 廖峻慧, 肖喆臻, 等. 压缩空气储能地下储气库热力学改进模型研究[J]. *长沙理工大学学报(自然科学版)*, 2024, 21(02): 32-41.
JIANG Z M, LIAO J H, XIAO Z Z, et al. Underground gas storage of compressed air energy storage thermodynamics improved model study [J]. *Journal of changsha university of science and technology (natural science edition)*, 2024, 21 (02): 32-41.
- [16] 周舒威, 夏才初, 张平阳, 等. 地下压气储能圆形内衬洞室内压和温度引起应力计算[J]. *岩土工程学报*, 2014, 36(11): 2025-2035.
ZHOU S W, XIA C C, ZHANG P Y, et al. Stress calculation caused by pressure and temperature in underground compressed gas energy storage circular liner chambers [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, 36(11): 2025-2035.

- [17] VERSTEEG H K, MALALASEKERA W. An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method[M]. 2nd ed. Harlow: Pearson Education, 2007.
- [18] GENG X, SUN G H, WU K, et al. Thermodynamic analysis of lined rock caverns for initial inflation and cyclic operational conditions in compressed air energy storage[J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 99: 113253.
- [19] 蒋中明, 欧阳钰榕, 韩克武, 等. 地下储气库压缩空气温度时空分布与温控方法[J]. *工程热物理学报*, 2023, 44(12): 3433-3444.
- JIANG Z M, OU YANG Y R, HAN K W, et al. Spatio-temporal distribution and Temperature control method of Compressed Air in Underground gas storage [J]. *Chinese Journal of Engineering Thermophysics*, 2023, 44(12): 3433-3444.
- [20] 孙冠华, 耿璇, 于显杨, 等. 压缩空气储能电站地下洞室首次充气的温度响应与局部高温控制方法[J]. *热力发电*, 2024, 53(09): 29-38.
- SUN G H, GENG X, YU X Y, et al. Temperature Response and Local high-temperature Control Method for the First Inflation of Underground Cavern in Compressed Air Energy Storage Power Station [J]. *Thermal Power Generation*, 2024, 53(09): 29-38.
- [21] LIAO J H, JIANG Z M, OU YANG Y R, et al. Numerical investigation on thermodynamic features and exergy efficiency of man-made caverns for CAES[J]. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2025, 68: 104305.
- [22] 陈国栋. 地下盐穴储气库注采运行热力工况及稳定性分析[D]. 中国石油大学(北京), 2023.
- CHEN G D. Analysis of Thermal Conditions and Stability During Injection and Production Operations in Underground Salt Cavity Gas Storage Facilities [D]. China University of Petroleum (Beijing), 2023.
- [23] Peng D Y, Robinson D B. A new two-constant equation of state [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, 1976, 15 (1): 59 - 64.
- [24] Bell I H, Satyro M, Lemmon E W. Consistent Two parameters for more than 2500 pure fluids from critically evaluated experimental data[J]. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 2018, 63(7): 2402 - 2409.