

DOI: 10.16285/j.rsm.2020.1385

基于非稳态渗流过程的压气储能 洞室空气渗漏率计算

夏才初¹, 徐英俊¹, 王辰霖¹, 赵海鸥², 薛小代³

(1. 同济大学 土木工程学院地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 大同启迪未来能源科技集团有限公司, 山西 大同 037000;
3. 清华大学 电机系 电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室, 北京 100084)

摘 要: 为评估压缩空气储能洞室的密封性, 基于多孔介质渗流力学理论推导了一种能考虑洞室空气渗漏过程和混凝土衬砌孔隙影响的压气储能洞室空气非稳态渗流方程, 给出了计算洞室衬砌内空气压强分布的近似解析解。为精确求解此类非线性抛物型方程, 通过有限差分法构造了一个无条件稳定的隐式差分格式, 该格式具有二阶精度。进一步, 对算例与现有计算结果进行对比, 结果表明: 与传统基于稳态径向渗流理论得到的空气渗漏估算公式相比, 考虑空气非稳态渗流过程后计算得到空气渗漏量略微偏小; 当混凝土衬砌渗透率小于 $6 \times 10^{-20} \text{ m}^2$ 时, 衬砌厚度为 0.5 m 的洞室在一个压缩空气储能循环下空气渗漏百分比小于 1%, 普通的抗渗混凝土均不能满足空气渗漏控制要求, 需要采取特殊的密封措施; 压气储能洞室的空气渗漏百分比与衬砌渗透率、储气压强、衬砌厚度等因素有关, 渗透率越低、初始压强越大、衬砌厚度越大, 空气渗漏百分比越小, 衬砌厚度对空气渗漏的控制效果随着衬砌厚度的增大而减弱。

关 键 词: 压气储能; 非稳态渗流; 有限差分法; 空气渗漏

中图分类号: U 453

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2021) 07-1765-10

Calculation of air leakage rate in lined cavern for compressed air energy storage based on unsteady seepage process

XIA Cai-chu¹, XU Ying-jun¹, WANG Chen-lin¹, ZHAO Hai-ou², XUE Xiao-dai³

(1. Department of Geotechnical Engineering, College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Datong Qidi Future Energy Technology Group Co. Ltd, Datong, Shanxi 037000, China; 3. State Key Laboratory of Control and Simulation of Power System and Generation Equipments, Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: To evaluate the air tightness of lined cavern for compressed air energy storage, a kind of unsteady seepage equation considering the influence of air leakage and porosity of concrete lining in the cavern is derived based on seepage flow theory of porous media, and an approximate analytical solution for approximate calculation of air pressure in the cavern is given. To solve this kind of nonlinear parabolic equation accurately, an unconditional stable implicit difference scheme with second order accuracy is constructed by using finite difference method. The results show that, compared with the traditional air leakage estimation formula based on the steady seepage theory, the air leakage calculated considering unsteady flow process of air is slightly smaller. When the permeability of concrete lining with a thickness of 0.5 m is less than $6 \times 10^{-20} \text{ m}^2$, the percentage of air leakage within 24 hours in a compressed air energy storage cycle is less than 1%, ordinary impermeable concrete cannot meet the requirements of air leakage control, and special sealing measures are thus needed. The air leakage percentage of compressed air energy storage cavern is related to lining permeability, air storage pressure, lining thickness. The lower the permeability is, the larger the gas storage pressure is, the larger the lining thickness is, the smaller the air leakage percentage is, and the control effect of lining thickness on gas leakage decreases with the increase of lining thickness.

Keywords: compressed air energy storage; unsteady seepage; finite difference method; air leakage

收稿日期: 2020-09-16

修回日期: 2021-03-29

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (No. 51778475); 山西省科技厅重大专项 (No. 20201101019)。

This work was supported by the General Program of National Natural Science Foundation of China (51778475) and the Major Special Project of Department of Science and Technology of Shanxi Province (20201101019).

第一作者简介: 夏才初, 男, 1963 年生, 博士, 教授, 主要从事岩石力学和地下结构方面的研究工作。E-mail: tjxiacbb@126.com

通讯作者: 徐英俊, 男, 1997 年生, 博士研究生, 主要从事压缩空气储能地下洞室方面的研究工作。E-mail: 1507571665@qq.com

1 引言

随着国家能源消费结构的调整,以风能、太阳能为代表的可再生能源占比持续增长,但这类能源通常具有间歇性和波动性,其大规模并网会带来一定的安全隐患,发展储能技术是平衡电网供给需求的有效方法。压缩空气储能(compressed air energy storage, CAES)是一种大规模能源存储技术,由于其容量大、能量转化效率高、可以长时间运行等特点,近年来受到广泛关注^[1-3]。

压缩空气储能电站需要较大规模的储气空间,通常方法有地面钢罐存储、利用人工开挖或天然形成的地下洞室存储。地下洞室建造成本低,安全性高,具有良好的应用价值^[4-5]。然而,地下储气洞室需要承受内部几兆帕甚至十几兆帕的高压气体反复作用,如何保证其密封性并将空气泄漏百分比控制在较低水平是决定压缩空气储能系统能量转换效率和洞室运营安全的关键问题^[6-8]。

Kim 等^[9-10]用数值模拟研究了洞室埋深为 100 m,储气压力在 5~8 MPa 波动时压缩空气储能内衬洞室的空气泄漏问题,结果表明:当混凝土衬砌渗透率小于 $1 \times 10^{-18} \text{ m}^2$ 时,洞室 24 h 的泄漏百分比能够达到 1% 的控制要求。钟巍等^[11-12]推导了一种内含空腔的围岩气体渗流方程,根据 Darcy 定律计算了围岩中气体泄漏量。叶斌等^[13]在此基础上,将内含空腔的围岩气体泄漏量公式用于压缩空气储能洞室中,并且分析了混凝土衬砌渗透率、衬砌厚度、洞室形状等对气体泄漏的影响。程子睿^[14]、Ye 等^[15]基于 Darcy 定律和流体力学公式推导计算了压气储能洞室气体泄漏的理论公式,计算结果表明当衬砌的渗透率低于 $6.36 \times 10^{-18} \text{ m}^2$ 时,仅有混凝土衬砌就能满足密封要求。周瑜等^[16]利用稳态径向渗流方程,给出了压缩空气储能洞室气体泄漏量的迭代估算方法,并给出了适用范围,但是其没有考虑空气在衬砌中的非稳态渗流过程。Zhou 等^[17]推导了压气储能洞室热力学响应的解析解,给出了洞室压力和温度的变化规律,但其并没有考虑洞室内空气的泄漏过程;周瑜等^[18]提出了用高分子材料丁基橡胶作为压气储能内衬洞室的密封材料,通过试验获得了不同条件下的高分子材料的渗透系数。

前人针对压气储能内衬洞室的空气泄漏问题做了一些有益的研究,但还存在一些不足,主要问题有:①关于空气泄漏量的计算公式精确度不够,以前的研究通常近似认为气体的渗流是稳态过程,然而,压气储能洞室需要长时间的储气,随着气体

的渗漏,其洞室内部压强是逐渐变化的,因此,从整个过程来分析,气体的向外渗流是个非稳态过程;②关于气体泄漏面的确定不够准确,有研究认为,气体的泄漏表面在衬砌外部^[14],而实际上,当气体离开洞室内表面时,这部分气体也就失去作用,因此,空气的泄漏表面应当以衬砌内表面为准。本文在前人的研究基础上,考虑压气储能洞室热力学过程,以 Darcy 定律和气体渗流力学理论为基础,推导了压气储能洞室空气泄漏的近似解析公式,并利用有限差分方法构造了相应的差分格式,较准确地计算了压气储能洞室的空气泄漏量,分析了不同因素对空气泄漏百分比的影响。与前人的工作相比,本文具体研究了混凝土衬砌渗透率、衬砌厚度、储气压强等多种因素对洞室空气泄漏率的影响,且考虑了洞室空气泄漏影响的空气非稳态渗流过程,更加符合实际压气储能洞室空气泄漏过程,在压气储能洞室长期运营背景下精确度更高。

2 压气储能内衬洞室空气泄漏计算

2.1 压气储能洞室热力学控制方程

压气储能洞室在一个循环内要经历充气-储气-抽气-储气的过程,洞室内空气满足质量守恒和能量守恒方程:

$$\left. \begin{aligned} V \frac{d\rho}{dt} &= (F_i + F_e) m_c \\ V \rho c_{v0} \frac{dT}{dt} &= F_i m_c \left(c_{p0} (T_i - T) + Z_0 R T + \rho \frac{RT_0^2 Z_{T_0}}{\rho_0} \right) \\ &\quad F_e m_c \left(Z_0 R T + \rho \frac{RT_0^2 Z_{T_0}}{\rho_0} \right) + Q \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: V 为洞室总体积 (m^3); ρ 和 ρ_0 分别为洞室任意时刻空气密度和初始时刻空气密度 (kg/m^3); m_c 为向洞室内充放气速率 (kg/s); c_{v0} 和 c_{p0} 分别为空气的定容比热和定压比热 ($\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$); Z_0 为初始状态下空气的压缩因子; Z_{T_0} 为空气压缩函数对时间求导后在温度 T_0 处的取值; T 和 T_i 分别为洞室空气的温度和注入空气的温度 (K); T_0 为洞室内各层介质的初始温度 (K); R 为气体常数 ($\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$); Q 为洞室内空气与衬砌的热交换速率 (W); F_i 和 F_e 分别为压气储能洞室注气和抽气状态函数,如图 1 所示。

由图 1 可看出,在 $0 \sim t_1$ 时间段内,压缩空气储能系统以恒定速率向洞室内充气; $t_1 \sim t_2$ 时间段内,系统停止运行,进入储气阶段; $t_2 \sim t_3$ 时间段内,系

统以恒定速率从洞室向外抽气，抽气与充气速率的比值为 CD ； $t_3 \sim t_4$ 为第 2 次储气阶段。

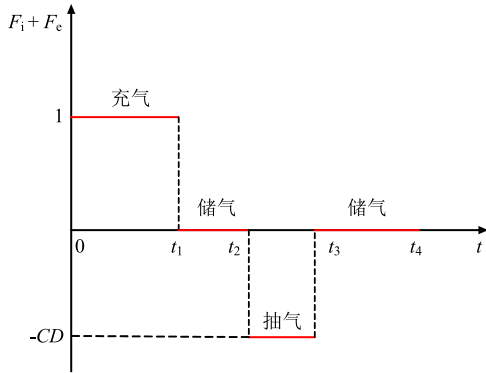


图 1 一个典型压缩空气储能循环^[3]

Fig.1 A typical cycle of compressed air energy storage^[3]

洞室内空气压强 p_0 可根据气体状态方程求得

$$p_0 = Z \rho R T \quad (2)$$

式中： Z 为空气压缩因子， Z 由下式给出^[19]：

$$Z = 1 - \frac{9p_0}{128p_c} \frac{T_c}{T} \left(\frac{6T_c^2}{T^2} - 1 \right) \quad (3)$$

式中： p_c 为洞室内空气的临界压强； T_c 为洞室内空气的临界温度。

本文研究的压缩空气储能地下洞室，其设计的最大空气压力通常在 10 MPa 左右，洞室内空气温度在常温附近波动，根据式 (3) 可近似得到空气压缩因子为 1。为求解洞室空气的温度和压力，周瑜等^[16]对式 (1) 进行了简化，在假设洞壁温度为恒温的基础上，提出了压气储能洞室空气与密度变化的简化解：

$$T = (T_0 + \alpha) e^{\beta(t-t_0)} - \alpha \quad (4)$$

式中： e 为自然对数； α 和 β 由下式给出：

$$\alpha = \begin{cases} \frac{m_e c_{p0} T_i + h_c A_c T_{RW}}{m_e (R - c_{p0}) - h_c A_c} & t_0 \leq t \leq t_1 \text{ (充气时间)} \\ -T_{RW} & t_1 \leq t \leq t_2 \text{ (储气时间)} \\ \frac{h_c A_c T_{RW}}{m_e R - h_c A_c} & t_2 \leq t \leq t_3 \text{ (放气时间)} \\ -T_{RW} & t_3 \leq t \leq t_4 \text{ (储气时间)} \end{cases} \quad (5)$$

$$\beta = \begin{cases} \frac{m_i (R - c_{p0}) - h_c A_c}{V \rho_{av} c_v} & t_0 \leq t \leq t_1 \text{ (充气时间)} \\ \frac{-h_c A_c}{V \rho_{av} c_{v0}} & t_1 \leq t \leq t_2 \text{ (储气时间)} \\ \frac{m_e R - h_c A_c}{V \rho_{av} c_{v0}} & t_2 \leq t \leq t_3 \text{ (放气时间)} \\ \frac{-h_c A_c}{V \rho_{av} c_{v0}} & t_3 \leq t \leq t_4 \text{ (储气时间)} \end{cases} \quad (6)$$

式中： h_c 为空气与混凝土衬砌的换热系数 ($W/(m^2 \cdot K)$)； T_{RW} 为洞壁温度 (K)； A_c 为洞室内壁表面积 (m^2)； m_i 为压气储能洞室的充气速率 (kg/s)； m_e 为压气储能洞室的抽气速率 (kg/s)； c_v 为空气等容比热 ($J/(kg \cdot K)$)； ρ_{av} 为一个周期内洞室空气的平均密度 (kg/m^3)。

压缩空气储能洞室在运营过程中空气密度的计算公式为

$$\rho = \rho_0 + \frac{1}{V} \int_{t_0}^t (m_i + m_e - m_l) dt \quad (7)$$

式中： m_l 为洞室在 t 时刻的泄漏速率； t 为洞室运行过程中的任意时刻。

2.2 压气储能洞室空气渗漏模型

如图 2 所示，压缩空气储能地下储气洞室采用混凝土衬砌加固并密封，洞室内充入一定量的高压空气，初始空气压强为 p_0 ，外部压强为 p_1 ；洞室内半径为 r_0 ，外半径为 r_1 ，空气从洞室内沿半径向外渗透。在公式推导和计算中引入以下假设：

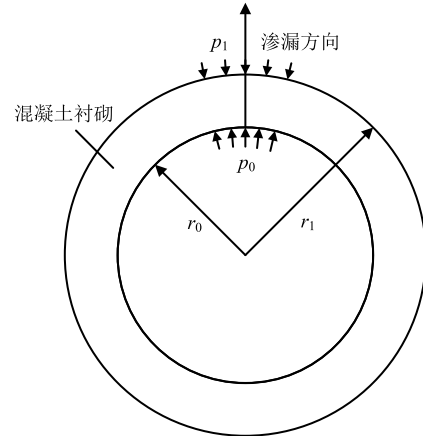


图 2 渗漏模型示意图

Fig.2 Schematic diagram of air leakage model

- (1) 混凝土衬砌被视作各向同性且均质的多孔介质；
- (2) 空气在混凝土内部的渗流符合 Darcy 定律；
- (3) 混凝土衬砌的渗透率和孔隙率在整个渗流过程中保持不变；
- (4) 洞室内部高压空气遵循理想气体状态方程；
- (5) 空气在衬砌中为等温渗流过程，整个渗流过程不考虑水和重力的影响。

空气在渗流过程满足质量守恒定律，即气体连续性方程^[18]：

$$\nabla(\rho_{gas} v) + \frac{\partial(\phi \rho_{gas})}{\partial t} = 0 \quad (8)$$

式中： v 为空气的渗流速度矢量 (m/s)； ρ_{gas} 为空气的密度 (kg/m^3)； ϕ 为混凝土衬砌的孔隙率。

空气的渗流过程遵循 Darcy 定律^[20]

$$v = -\frac{k}{u} \frac{\partial p}{\partial r} \quad (9)$$

式中: k 为混凝土衬砌的渗透率 (m^2); u 为空气的动力黏度 ($\text{Pa} \cdot \text{s}$); p 为衬砌内空气压力 (MPa); r 为衬砌中一点至洞室中心距离 (m)。

将式 (2)、(9) 代入式 (8), 可求得空气在混凝土衬砌中的渗漏方程^[18]:

$$\nabla(p \nabla p) = \frac{\phi u}{k} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (10)$$

以往的计算通常忽略上式的右端项, 认为空气渗漏过程是压强不随时间变化的稳态过程, 而实际上空气是可以被压缩的, 洞室内气体在渗漏过程中压强是逐渐减小的, 因此有必要全面地考虑时间这项因素。

2.3 渗漏方程的解析解

式 (10) 为多孔介质中空气渗漏的一般方程, 在数学上被称为一类非线性抛物型方程或拟线性扩散方程, 现针对这类方程做简要推导。

式 (10) 可化为

$$\nabla(\nabla p^2) = \frac{\phi u}{k p} \frac{\partial p^2}{\partial t} \quad (11)$$

根据哈密尔顿算子的性质, 式 (11) 和式 (10) 在数学上是等价的。考虑气体沿洞室径向渗流, 在极坐标系下, 方程 (11) 可写为

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial p^2}{\partial r} \right) = \frac{\phi u c}{k p} \frac{\partial p^2}{\partial t} \quad (12)$$

式中: c 为空气的等温压缩常数, $c=1/p$ 。令 $F=p^2$, $\eta = \frac{k}{\phi u c}$, 则式 (12) 可写为

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial F}{\partial r} \right) = \frac{1}{\eta} \frac{\partial F}{\partial t} \quad (13)$$

再令 $N=F-F(r,0)$, $F(r,0)$ 为方程 (11) 的稳态解, 则将方程 (13) 两边做 Laplace 变换, 可以写为

$$\frac{\eta}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \tilde{N}}{\partial r} \right) = s \tilde{N} \quad (14)$$

式中: s 为像空间下的自变量。

则式 (14) 的解为

$$\tilde{N} = A I_0 \left(\sqrt{\frac{s}{\eta}} r \right) + B K_0 \left(\sqrt{\frac{s}{\eta}} r \right) \quad (15)$$

式中: I_0 和 K_0 分别为第 1 类 0 阶修正贝塞尔函数和第 2 类 0 阶修正贝塞尔函数; A 、 B 为待定常数, 由边界条件确定。

方程 (14) 的边界条件为

$$\left. \begin{aligned} N &= p_0^2(t) - F(r,0), r=r_0 \\ N &= p_1^2(t) - F(r,0), r=r_1 \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

将边界条件式 (16) 做 Laplace 变换后代入式 (15), 即可求解系数 A 、 B , 然后对式 (15) 采用 Stehfest 进行 Laplace 反演可得

$$p(r,t) = \sqrt{\frac{\ln 2}{t} \sum_{i=1}^{n_{\text{cal}}} V_i \tilde{N} \left(\frac{\ln 2}{t} i \right) + F(r,0)} \quad (17)$$

式中: n_{cal} 为偶数。 n_{cal} 的计算取值建议在 14~32 之间, 此时误差可控制在 $10^{-3} \sim 10^{-5}$ 之间, 本文在后续计算中统一取为 18^[16], 而 V_i 按如下式计算:

$$V_i = (-1)^{(n_{\text{cal}}/2+i)} \sum_{w_0}^m \frac{w^{(n_{\text{cal}}/2+1)} (2w)!}{(n_{\text{cal}}/2-w)!(w!)^2 (i-w)!(2w-i)!} \quad (18)$$

式中: V_i 、 w 、 w_0 均为常数; $w = \text{int}[(i+1)/2]$; $m = \min(i, n_{\text{cal}}/2)$ 。

假设在任意时刻 t , 混凝土衬砌内的空气压力分布函数为 p , 则在 t 时刻洞室内空气的泄漏速率为

$$m_1(t) = \rho A_c \frac{w}{u} \frac{\partial p}{\partial r} \bigg|_{r=r_0} \quad (19)$$

2.4 渗漏方程的数值解

事实上, 式 (11) 是一类非线性抛物型方程, 其严格的解析解难以直接给出, 式 (17) 其实是在假设气体等温压缩系数为常数时才成立的。有限差分法是解偏微分方程、非线性偏微分方程的有效方法, 下面给出压缩空气储能洞室气体渗漏方程 (11) 的数值解。

2.4.1 网格与节点剖分

如图 3 所示, 该方程的计算区域记为 D , 其左右边界记为 ∂D , D 为矩形区域:

$$D = \{(r,t) | r_0 < r < r_1, 0 < t < H\} \quad (20)$$

式中: H 为计算时间。

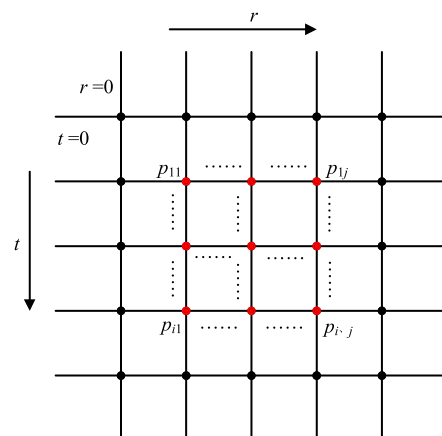


图 3 有限差分网格

Fig.3 Grid diagram in finite difference method

左右边界区域为

$$\partial D = \{(r, t) | r = r_0, r_1, 0 \leq t \leq H\} \quad (21)$$

2.4.2 差分格式建立

对于上述的非线性扩散方程(11), 构造一个隐式的差分格式:

$$\frac{\phi u}{w} \frac{p_j^{n+1} - p_j^n}{\tau} = \frac{1}{r_j} \frac{1}{h} \left[a_{j+1/2} (p_j^n) \frac{r_j + r_{j+1}}{2} \frac{p_{j+1}^{n+1} - p_j^{n+1}}{h} - a_{j-1/2} (p_j^n) \frac{r_{j-1} + r_j}{2} \frac{p_j^{n+1} - p_{j-1}^{n+1}}{h} \right] \quad (22)$$

式中: p_j^{n+1} 、 p_j^n 分别为 $n+1$ 、 n 时刻的空气内压; τ 为网格的时间步长; r_j 、 r_{j-1} 分别为平面网格点的半径; h 为网格的空间步长。

其中:

$$a_{j+1/2} = \frac{p_j^n + p_{j+1}^n}{2} \quad (23)$$

$$a_{j-1/2} = \frac{p_{j-1}^n + p_j^n}{2} \quad (24)$$

2.4.3 求解过程

压缩空气储能内衬洞室空气泄漏的初边值问题为

$$\left. \begin{aligned} \nabla(\nabla p^2) &= \frac{\phi u}{wp} \frac{\partial p^2}{\partial t}, \quad r_0 \leq r \leq r_1, t \geq 0 \\ p(r, 0) &= p(r), \quad r_0 \leq r \leq r_1 \\ p(r_0, t) &= p_0, \quad t \geq 0 \\ p(r_1, t) &= p_1, \quad t \geq 0 \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

$t=0$ 时的初始条件由下式给出, 初始时刻气体压力沿衬砌半径按对数分布^[14]:

$$p^2(r) = p_0^2 - \frac{p_0^2 - p_1^2}{\ln(r_0/r_1)} \ln \frac{r_0}{r} \quad (26)$$

当 $r=r_1$, $t>0$ 时, p_1 为衬砌外空气压力值。

因此, 对于差分网格来说, 其初始条件和右边界能够容易确定。而对于左边界, 由于考虑洞室内空气泄漏的影响, 需要做些特殊处理。记任意时刻洞室内边界处的空气压强为

$$p = p_0^n \quad (27)$$

则 $t+\tau$ 时刻的空气压强为

$$p_0^{n+1} = \rho(t+\tau)RT(t+\tau) \quad (28)$$

其中, 密度 ρ 和温度 T 分别由式(7)和式(4)给出。

由于孔隙气压力主要在衬砌内积聚, 而经衬砌渗入围岩中的气体则会通过排水系统很快向外界大气消散, 因此认为洞室外的空气压强保持恒定不变^[15], 即

$$p_{j+1}^n = p_1 \quad (29)$$

洞室内部的空气压强会随时间的推进而动态更新。渗流方程利用差分格式(22)来近似时, 初始条件使用式(26), 而边界条件的使用式(27)~(29)来离散, 令:

$$\mathbf{p}^n = (p_1^n, p_2^n, \dots, p_j^n)^T \quad (30)$$

则按照差分格式(22)~(24)式, 有

$$\mathbf{A} \mathbf{p}^n = \frac{\phi u}{k} \mathbf{p}^{n-1} \quad (31)$$

其中:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{A} &= \begin{bmatrix} a & b & & \\ c & a & b & \\ & \ddots & \ddots & \ddots \\ & & c & a & b \\ & & & c & a \end{bmatrix} \\ a &= \left(a_{j+1/2} \frac{r_{j+1} + r_j}{2r_j} + a_{j-1/2} \frac{r_j + r_{j-1}}{2r_j} \right) \lambda + \frac{\phi u}{k} \\ b &= -a_{j-1/2} \frac{r_j + r_{j-1}}{2r_j} \lambda; \quad c = -a_{j+1/2} \frac{r_{j+1} + r_j}{2r_j} \lambda \end{aligned} \right\} \quad (32)$$

压气储能洞室在运行周期内容积保持不变, 则洞室的空气泄漏率可以写为

$$\frac{\Delta m}{m_0} = \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} \quad (33)$$

式中: Δm 和 m 分别表示洞室空气的损失质量和初始时刻的总质量。

2.4.4 网格无关性检验

上文构造出的隐式差分格式的截断误差为 $O(\tau + h^2)$, 表明在时间步长上具有一阶精度, 在空间上具有二阶精度, 而且该格式具有无条件稳定的性质。网格比的大小时决定差分格式稳定的重要因素, 差分格式的网格比 λ 定义为

$$\lambda = \frac{\tau}{h^2} \quad (34)$$

本文计算的网格时间步长 $\tau=0.0001$ h, 空间步长 $h=0.05$ m, 其计算网格比为 $\lambda=0.04$, 总网格数量为 240 万。现通过改变时间步长来改变计算网格比大小, 从而验证该格式的稳定性。

图 4 给出了当网格比等于 0.04、0.08、0.16、0.32

时,洞室空气压强在一个压气储能循环的变化规律,从图中可以看出,网格比对结果的影响很小,说明了本文提出的差分格式是稳定可靠的。

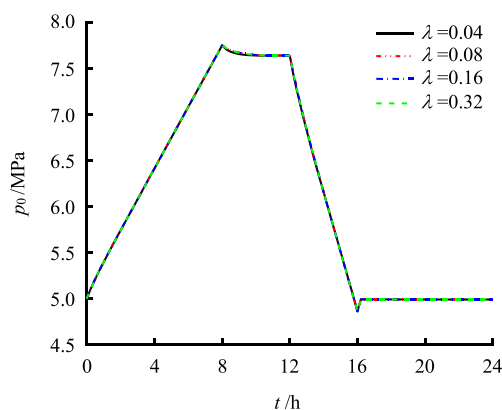


图4 网格比对结果的影响

Fig.4 Effect of mesh grid ratio on calculation result

3 算例验证

为了更好地验证本文的理论结果和数值结果,将基于本文提出的计算方法与既有的研究成果进行对比。理论结果则按解析公式给出,利用数值方法计算的具体求解流程图如图5所示。

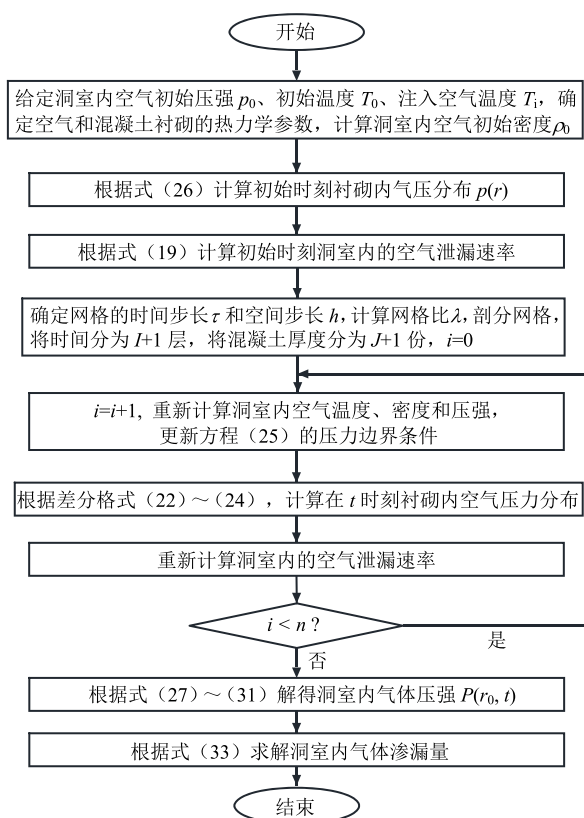


图5 求解流程图

Fig.5 Flow chart for the sequence of calculations

Rutqvist 等^[2]针对韩国的压气储能试验洞进行了数值模拟研究,该地下洞室内直径为 5 m, 外直径为 6 m, 混凝土衬砌厚度为 0.5 m, 洞室埋深约为 200 m, 储气容积约为 19.635 m³, 地下储气洞室运行气压大约在 5~8 MPa。压缩空气储能系统正常运行工况是:晚上利用低谷电压压缩空气 8 h, 注入地下储气洞室, 空气注入速率为 0.022 kg/s, 随后压缩机停止工作, 高压空气在洞室内储存 4 h, 白天高压空气驱动膨胀机连续工作 4 h 发电, 空气释放速率也为 0.044 kg/s, 随后停止工作, 再储气 8 h, 直到进入下一个循环。计算参数如下: 空气动力黏度 $\mu=1.76\times 10^{-5}$ Pa·s, 气体常数 $R=286.7$ J/(kg·K), 空气定容比热容 $c_v=717.86$ J/(kg·K), 定压比热容 $c_p=1\ 005$ J/(kg·K), 对流换热系数 $h_c=30$ W/(m²·K), 注入空气温度 $T_i=294.65$ K, 围岩和洞壁温度 $T_{RW}=286.15$ K, 洞室内空气初始温度 $T_0=286.15$ K, $p_0=5.0$ MPa, $p_1=0.1$ MPa, $r_0=2.5$ m, $r_1=3.0$ m。混凝土渗透率 $k=1\times 10^{-20}$ m², 孔隙率 $\phi=1\%$ 。

3.1 恒定气压储气过程洞室内空气压力变化

本小节重点讨论压气储能地下洞室在恒定气压储气过程中空气渗透量规律。

图6给出了当混凝土衬砌厚度为 0.5 m, 渗透率 $k=2.38\times 10^{-18}$ m² 时的压缩空气储能地下储气洞室 8 h 内空气压强的变化规律。初始时, 洞室内空气压强是 6.25 MPa, 为压缩空气储能洞室运行的平均气压, 随着储气时间的推进, 洞室内部空气开始向外渗漏, 大约在 8 h 后, 洞室内部压强降低至约 6.11 MPa, 数值解得到的 8 h 后空气渗透率约为 2.15%, 而理论解得到的 8 h 后空气渗透率为 2.24%。从图中可以看出本文提出的理论解、数值解与文献[14]的结果相差不大, 但 8 h 储气结束后, 本文的理论解和数值解计算得到的洞室内空气压强要比要略高, 原因是本文计算过程中洞室内空气压强是动态减小的, 因此空气的渗透速度要比稳态解略低, 但压缩空气储能洞室需要长时间的储气, 因此需要动态考虑洞室内部气压下降的影响, 这是文献[14]忽略的因素。

3.2 压气储能地下洞室运营过程空气压力变化

图7所示为一个压气储能循环下, 采用本文计算方法得到的洞室空气压力变化规律与 Rutqvist^[2]、周瑜^[16]等的对比结果。

从图中可以看出, 洞室内空气压强的变化规律与现有的结果较为吻合, 洞室空气压强在充气阶段近似直线上升, 最大值约为 7.75 MPa; 在储气阶段, 由于空气泄漏和温度下降, 洞室空气压强略有下降;

而在抽气阶段, 洞室空气压强迅速下降, 充气过程结束后, 洞室内空气压强不足 5 MPa; 在最后 8 h 的储气阶段, 空气压强大约恢复至初始水平。

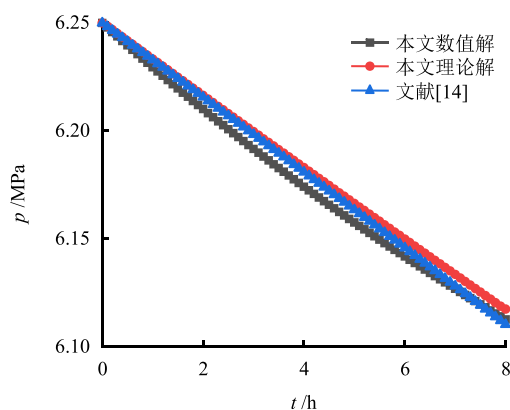


图6 储气洞室 8 h 内空气压强变化
Fig.6 Air pressure change within 8 hours in cavern

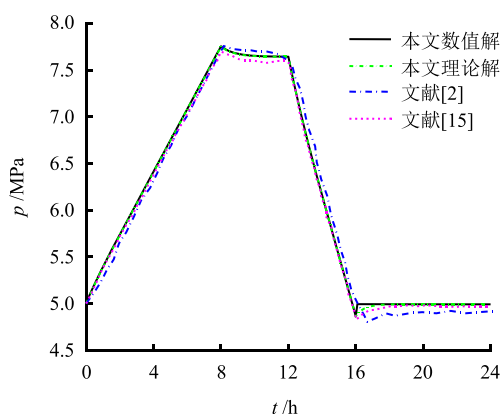


图7 一个压气储能循环下洞室空气压力变化
Fig.7 Air pressure change in one cycle of compressed air energy storage

与文献[2]对比, 本文考虑了空气在混凝土衬砌中的动态渗流过程, 因此在第 1 次储气阶段洞室内空气压强要略小于文献[2]中的结果。文献[16]中虽然考虑空气的渗漏过程, 但其是基于稳态渗流计算公式得到的, 在第 1 次储气阶段计算的空气泄漏量较大, 因此在这一阶段的空气压强要略低。

4 参数敏感性分析及讨论

4.1 混凝土衬砌渗透率对空气泄漏的影响

采用不同抗渗等级的混凝土对压缩空气储能地下储气洞室的密封性影响较大。P8 级别的混凝土衬砌渗透率为 $2.38 \times 10^{-18} \text{ m}^2$, P10 级别的混凝土衬砌渗透率为 $1.614 \times 10^{-18} \text{ m}^2$, P12 级别的混凝土衬砌渗透率为 $1.176 \times 10^{-18} \text{ m}^2$ 。图 8 为这 3 种抗渗混凝土作用下洞室内部空气压强随时间的变化关系。从图

中可以看出, 随着混凝土抗渗等级的提高, 压缩空气储能地下储气洞室的空气压强下降值越小。图 9 为不同级别抗渗混凝土作用下洞室内空气泄漏速率变化曲线, 从图中可以看出随着混凝土抗渗等级的提高, 空气的泄漏速率明显减小, 这是因为在抽气阶段洞室内空气压强下降过快, 导致混凝土衬砌内压强大于洞室空气压强, 从而出现空气泄漏速率为负值的现象。

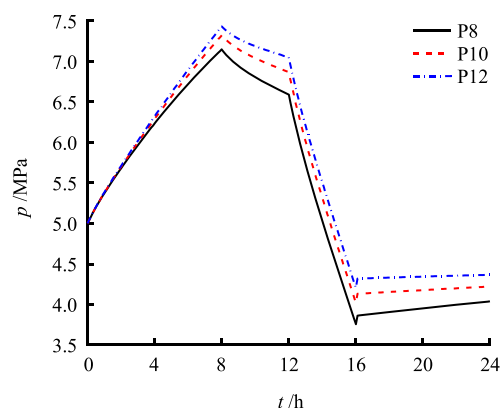


图8 混凝土衬砌不同抗渗等级下洞室内空气压强变化
Fig.8 Air pressure change of concrete lining with different impermeability grade

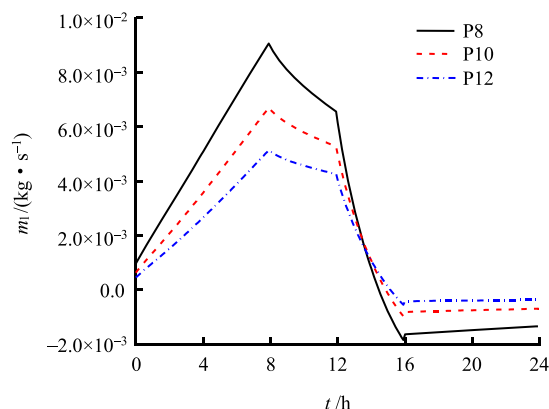


图9 混凝土衬砌不同抗渗等级下洞室内空气泄漏速率
Fig.9 Air leakage rate of cavern with different impermeability grade of concrete lining

为保证洞室的密封性, 需要进一步降低混凝土衬砌的渗透率。图 10 为不同混凝土渗透率下的洞室 24 h 空气泄漏率。从图中可以看出, 随着混凝土渗透率的下降, 洞室 24 h 空气泄漏率迅速下降, 当混凝土衬砌的渗透率低于 $6 \times 10^{-20} \text{ m}^2$ 后, 洞室 24 h 空气泄漏率才低于 1%。因此, 如果压缩空气储能洞室只用混凝土衬砌而无其它密封层, 需要保证衬砌的渗透率小于 $6 \times 10^{-20} \text{ m}^2$ 。按照现行的《混凝土质量控制标准》(GB50164—2011) [21], 混凝土抗渗等

级被划分为 P4、P6、P8、P10、P12 等 5 个等级, 其中 P12 抗渗等级的混凝土渗透率为 $1.176 \times 10^{-18} \text{ m}^2$, 仍旧远远大于 $6 \times 10^{-20} \text{ m}^2$, 因此, 常规抗渗等级的混凝土难以满足要求, 需要施作特殊抗渗等级的混凝土或其他密封层。

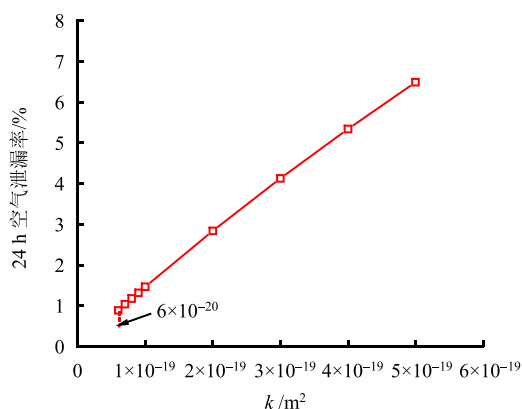


图 10 不同衬砌渗透率下洞室 24 h 空气压强变化
Fig.10 Changes in pressure of cavern with different permeability of concrete lining within 24 hours

4.2 储气压强与衬砌厚度对空气泄漏的影响

前文提到的压缩空气储能地下储气洞室的初始储气压强为 5 MPa。实际上, 作为初始条件, 不同的储气压强对洞室内的空气渗透率也有影响。图 11 为当混凝土渗透率 $k=6 \times 10^{-20} \text{ m}^2$, 衬砌厚度为 0.5 m, 洞室内储气压强分别为 4.0、4.5、5.0、5.5、6.0 MPa 时的空气在一个压缩空气储能循环下渗漏百分比。从图中可以看出, 随着储气压强的增大, 洞室内部的空气渗透率也在增大, 说明洞室初始压强对渗漏率的影响较为显著。

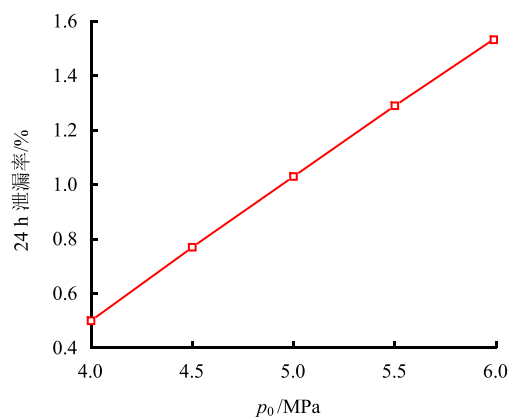


图 11 不同储气压强下洞室 24 h 空气渗透率
Fig.11 Air leakage rate under different gas storage pressures within 24 hours

图 12 给出了当初始空气压强为 5 MPa, 混凝土

渗透率 $k=6 \times 10^{-20} \text{ m}^2$ 时, 压气储能洞室在 24 h 内的空气泄漏率随衬砌厚度的变化规律。从图中可以看出, 当衬砌厚度增大时, 洞室内的空气泄漏百分比逐渐下降, 但并非线性关系, 衬砌厚度越大, 衬砌厚度对洞室空气泄漏百分比影响越小。因此, 在实际工程中, 压缩空气储能洞室的衬砌厚度并不是越厚密封性越好, 当衬砌厚度超过一定量值后, 其效果将会明显降低。

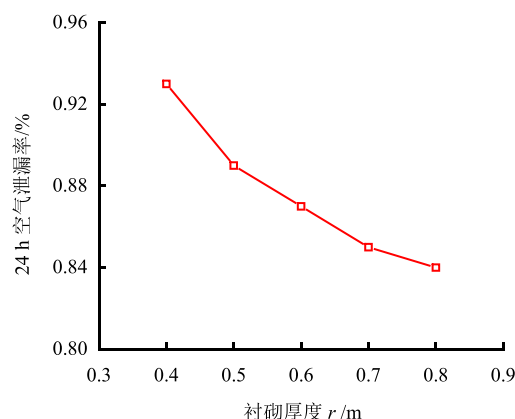


图 12 不同衬砌厚度下洞室 24 h 空气渗透率
Fig.12 Air leakage rate of cavern with different lining thicknesses within 24 hours

5 结 论

(1) 考虑混凝土衬砌孔隙率和洞室内压强随时间动态变化影响的空气非稳态渗流过程后, 计算得到的压缩空气储能洞室的空气渗透率要比用稳态渗流方法算的结果小, 因此, 本文方法在评估压缩空气储能地下储气洞室的密封性上更为准确合理。

(2) 压缩空气储能洞室的空气渗透率大小与衬砌渗透率、储气压力、衬砌厚度等因素有关。其中衬砌渗透率越小, 渗透率越小, 当衬砌厚度为 0.5 m 时, 采用 P8 抗渗等级的混凝土 ($k=2.38 \times 10^{-18} \text{ m}^2$), 洞室 24 h 的空气渗透率达 18.03%; 采用 P10 抗渗等级混凝土 ($k=1.614 \times 10^{-18} \text{ m}^2$), 洞室 24 h 的空气渗透率达 14.62%; 采用 P12 抗渗等级的混凝土 ($k=1.176 \times 10^{-18} \text{ m}^2$), 洞室 24 h 空气渗透率为 11.89%。压缩空气储能系统的初始储气初始压强对渗透率也有影响, 初始储气压强越大, 渗透率越大, 而衬砌厚度对压气储能洞室渗透率的影响规律是衬砌厚度越大, 洞室渗透率越小, 但随着衬砌厚度的增大, 这种控制效果会减弱。

(3) 混凝土衬砌的渗透率对压缩空气储能地下储气洞室的空气泄漏量影响最为显著, 当运营压力在 5~8 MPa 和 0.5 m 混凝土衬砌厚度下, 传统的抗

渗混凝土, 如 P8、P10、P12 等, 在一个储气循环内其空气泄漏率均大于 1%, 不能满足压缩空气储能洞室对泄漏率的控制要求。通过计算发现, 当运营压力保持在 5~8 MPa, 固定混凝土衬砌厚度为 0.5 m, 当衬砌渗透率小于 $6 \times 10^{-20} \text{ m}^2$ 时, 才能够满足洞室泄漏率的要求, 然而目前常规混凝土不能达到此渗透率的要求, 因此, 仅靠混凝土衬砌作为密封层是不够的, 需要采取进一步的密封措施, 如高分子材料密封或特殊抗渗混凝土等。

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(15): 250-268.
- [2] RUTQVIST J, KIM H, RYU D, et al. Modeling of coupled thermodynamic and geomechanical performance of underground compressed air energy storage in lined rock caverns[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2012, 52(3): 71-81.
- [3] 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): 5615-5630.
- [4] PARK D, KIM H, RYU D, et al. Probability-based structural design of lined rock caverns to resist high internal gas pressure[J]. **Engineering Geology**, 2013, 153: 144-151.
- [5] KIM H, RUTQVIST J, JEONG J, et al. Characterizing excavation damaged zone and stability of pressurized lined rock caverns for underground compressed air energy storage[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2013, 45(5): 1113-1124.
- [6] 蒋中明, 李鹏, 赵海斌, 等. 压气储能浅埋地下储气库性能试验研究[J]. **岩土力学**, 2020, 41(1): 235-241+252. JIANG Zhong-ming, LI Peng, ZHAO Hai-bin, et al. Experimental study on the performance of the shallow rock cavern for compressed air energy storage[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2020, 41(01): 235-241+252.
- [7] JIANG Z, LI P, TANG D, et al. Experimental and numerical investigations of small-scale lined rock cavern at shallow depth for compressed air energy storage[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2020, 53(6): 2671-2683.
- [8] 陈祥胜, 李银平, 施锡林, 等. 地下盐穴储气库泄漏原因及防治措施研究[J]. **岩土力学**, 2019, 40(增刊 1): 367-373, 389. CHEN Xiang-sheng, LI Ying-ping, SHI Xi-Lin, et al. Analysis of leakage risks and prevention measures of underground salt cavern gas storage[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(Suppl. 1): 367-373, 389.
- [9] KIM H, RUTQVIST J, RYU D, 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] KIM H, RUTQVIST J, KIM H, et al. Failure monitoring and leakage detection for underground storage of compressed air energy in lined rock caverns[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2016, 49(2): 573-584.
- [11] 钟巍, 田宙, 王铁良, 等. 内含空腔围岩中气体渗流动力学问题的解析计算与试验研究[J]. **岩土工程学报**, 2014, 36(2): 339-345. ZHONG Wei, TIAN Zhou, WANG Tie-liang, et al. Analytic calculation and experimental study on gas seepage dynamics problem of surrounding rock with an internal cavity[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2014, 36(2): 339-345.
- [12] 钟巍, 田宙, 王铁良, 等. 围岩气体渗流解析计算中重要假设的数学证明[J]. **地下空间与工程学报**, 2020, 16(1): 35-42. ZHONG Wei, TIAN Zhou, WANG Tie-liang, et al. Mathematical proofs of some important assumptions in analytic calculation on gas seepage problem of surrounding rock[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2020, 16(1): 35-42.
- [13] 叶斌, 程子睿, 彭益成. 压气储能洞室气密性影响因素分析[J]. **同济大学学报 (自然科学版)**, 2016, 44(10): 1526-1532. YE Bin, CHENG Zi-rui, PENG Yi-cheng. Analysis of influence factors on air tightness of underground cavern for compressed air energy storage[J]. **Journal of Tongji University (Natural Science)**, 2016, 44(10): 1526-1532.
- [14] 程子睿. 压气储能洞室运营条件下水泥砂浆气体渗流特性研究[D]. 上海: 同济大学, 2019. CHENG Zi-rui. Gas transport properties of mortar under compressed air energy storage operate conditions[D]. Shanghai: Tongji University, 2019.