

DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20230224002

文章编号: 1672-9331(2024)02-0032-10

引用格式: 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(2): 32-41.

Citation: JIANG Zhongming, LIAO Junhui, Xiao Zhezhen, et al. Study on improved model for the thermodynamics of compressed air energy storage underground cavern[J]. J Changsha Univ Sci Tech (Nat Sci), 2024, 21(2): 32-41.

压缩空气储能地下储气库热力学改进模型研究

蒋中明^{1,2}, 廖峻慧¹, 肖喆臻¹, 杨江寅¹, 黄湘宜¹

(1. 长沙理工大学 水利与环境工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410114)

摘要:【目的】明晰地下储气库的热力学过程是压缩空气储能(compressed air energy storage, CAES)电站安全设计与运行调度的重要基础。【方法】现有地下储气库热力学模型在计算热量交换时, 存在高压储气阶段热损失偏大和低压储气库阶段补热过多的不足。本文在全面分析地下储气库热力学模型理论基础合理性的前提下, 先分析储气库热量计算偏差的形成根源; 再提出改进模型。【结果】研究表明: 现有的热力学计算解析模型忽略了 CAES 地下储气库在运行过程中温度分布的不均匀性, 这种温度分布的不均匀导致储气室洞壁与压缩空气之间的对流换热模型失真, 导致温度计算结果偏差大。考虑混合对流换热的改进模型二可以较好地解决储气阶段温度计算结果与真实结果之间偏差过大的问题。算例分析证明了改进模型二的合理性。【结论】本文的改进模型二可为 CAES 地下储气库容积优化设计与效率分析提供计算依据。

关键词: 压缩空气储能; 地下储气库; 热力学改进模型; 自然对流换热; 强迫对流换热; 混合对流换热

中图分类号: TK82

文献标志码: A

Study on improved model for the thermodynamics of compressed air energy storage underground cavern

JIANG Zhongming^{1,2}, LIAO Junhui¹, XIAO Zhezhen¹, YANG Jiangyin¹, HUANG Xiangyi¹

(1. School of Hydraulic and Environmental Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2. Key Laboratory of Water-Sediment Sciences and Water Disaster Prevention of Hunan Province, Changsha 410114, China)

Abstract: [Purposes] The clarity of the thermodynamic process of underground cavern is an important basis for the safety design and operation scheduling of compressed air energy storage (CAES) plants. [Methods] In view of the existing thermodynamic model of underground cavern has the shortcomings in calculating heat exchange, which has large heat loss in the high-pressure storage stage and excessive heat replenishment in the low-pressure storage stage. On the premise of a comprehensive analysis of the rationality of the theoretical basis of the thermodynamic model for underground cavern, the root causes of the deviations in the heat calculation are analyzed, the

收稿日期: 2023-02-24; 修回日期: 2023-03-09; 接受日期: 2023-03-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(52178381)

通信作者: 蒋中明(1969—)(ORCID: 0000-0003-4021-1227)男, 教授, 主要从事岩土工程和能源地下存储与开发工作。E-mail: zzmjiang@163.com

投稿网址: <http://csjgxbzk.csust.edu.cn/cslgdxzbzk/home>

improvement methods are proposed and the rationality of the improved models are verified through 3 cases. **[Findings]** The results show that the existing analytical model of thermodynamic calculation ignores the uneven temperature distribution of CAES underground gas storage during operation, causing distortion of the convective heat transfer model between the cavern wall and the compressed air, which is the root cause of the temperature calculation error. The problem of excessive temperature calculation deviation in the air storage stage can be better solved by the mixed convective heat transfer model. **[Conclusions]** The results of several analytical cases prove the rationality of the improved model proposed in this paper, which can provide a calculation basis for the volume optimization design and efficiency analysis of CAES underground gas storage.

Key words: compressed air energy storage; underground cavern; thermodynamic improved model; natural convective heat transfer; forced convective heat transfer; mixed convective heat transfer

Foundation item: Project (52178381) supported by the National Natural Science Foundation of China

Corresponding author: JIANG Zhongming (1969—) (ORCID: 0000-0003-4021-1227), male, professor, research interest: geotechnical Engineering and underground storage of energy. E-mail: zzmjjiang@163.com

0 引言

随着能源结构优化转型需求日益迫切,世界多国都在积极推进压缩空气储能(compressed air energy storage, CAES)技术的发展^[1-2]。中国一直非常重视CAES技术的发展与示范项目的建设^[3],已有多个CAES项目相继签约并逐步建设。在CAES电站运行过程中,地下储气库的结构安全稳定问题越来越受到重视。储气库整体结构受洞室内部空气压力与温度变化的影响明显^[4],而空气温度与压力的变化十分复杂,对储气库内压缩空气热力学变化过程的准确把握是电站建设与运行安全的关键。

储气库内压缩空气温度和压力变化是影响电站整体性能的重要因素^[5]。一方面,温度与压力变化决定了储气库实际运行区间及衬砌、密封层结构的受力情况;另一方面,洞室内部压缩空气的温度变化与热量损失直接影响储气库储能效率^[6],最终影响电站运行效率。因此,有必要深入研究储气库内压缩空气的热力学变化过程,合理规划CAES电站的结构设计与运行调度,保证CAES电站的顺利运行。

储气库内压缩空气热力学过程的计算分析,主要有理论解析法和数值计算法两种。KUSHINIR等^[7-8]推导了储气库洞壁在绝热与传热两种不同条件下的空气温度和压力的解析解。

RAJU等^[9]建立了CAES洞室动态传热模型,并以Huntorf电站为例,验证了其解析模型的合理性。ZHOU等^[10]在KUSHINIR的研究基础上,提出了有衬洞穴在长期循环下空气温度、压力与围岩应力应变的解析解。XIA等^[5]推导了考虑热交换条件下的温度和压力计的简化解析解。蒋中明等^[11-12]则基于KUSHINIR的研究,提出了压缩空气热力学过程分析的差分计算方法,进一步考虑了空气压缩因子的影响。在数值计算方面,KIM等^[13]对围岩边界热力学过程与力学特性进行了数值模拟研究。王国华等^[14]、DE PRADO等^[15]、高建强等^[16]将计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)与传热理论相结合,研究了废弃矿井、盐穴、钢罐作为储气库时的压缩空气的热力学特性。

目前,有研究表明储气库洞壁的不同传热计算条件将导致压缩空气热力学过程计算结果出现较大区别。DE A BARROS等^[17]通过研究算例发现,考虑对流换热条件的压缩空气温度计算结果较绝热条件下的压缩空气温度计算结果降低了80 K。DE PRADO等^[15]发现,密封层材料传热特性的不同会导致流经壁面热通量不同,计算的低压储气阶段的温度升幅也不相同。现有研究成果表明,在相同计算条件下,解析解与数值解之间的计算结果同样存在较大的差异,例如:基于文献[4]的算例条件,周瑜等^[18]采用解析解计算得到的压缩空气温度的回升幅度达到了132%,而文献[4]采用数值模拟方法得到的相同条件下的压缩

空气温度的回升幅度仅为74%。解析模型与数值模型的结果之间出现差异的主要原因是热量传递分析采用的假设不同。影响压缩空气与洞壁之间传热量大小的主要因素是对流换热系数的大小,以及围岩与洞壁附近空气之间的温差。在现有的解析计算模型中,对流换热系数一般取为常数^[5,7,10-13],温差为壁面温度与洞室内部压缩空气平均温度之差。这种平均温差的计算方法忽视了温度在空间上分布的不均匀性。其结果是高温区域的热量会快速、均匀地传导至整个储气库空间内,放大了空气的热传导效应。在CFD数值计算方法中,由于可以考虑温度在空间上分布的不均匀性,洞壁附近空气与围岩壁之间的温差较小,空气与外界之间的换热量较小,故CFD得到的压缩空气平均温度变化幅度的数值解显著低于同等条件下的解析解。

尽管CFD数值解计算结果更准确,但对工程技术人员来说计算难度较大,这阻碍了数值计算方法在工程中的广泛应用。热力学解析模型因使用方便,被广泛用于储气库规划设计中。然而,由于现有解析模型在进行温度分析时,存在空气与外界之间的换热计算误差偏大的问题,导致对储气库温度与能量的预测出现较大偏差,进而影响储气库温控措施的选择与储气库设计容积计算的准确性。因此,为准确合理地评估储气库内压缩空气热力学变化过程,本文拟对现有的地下储气库内压缩空气热力学分析模型进行改进,并通过算例验证该改进模型的准确性。

1 地下储气库热力学分析改进解析模型

在等容地下储气洞室中,当不考虑密封层渗漏时,KUSHNIR等^[7]提出的热力学控制方程如下:

$$V \frac{d\rho}{dt} = \dot{m}_{in}(t) + \dot{m}_{out}(t) \quad (1)$$

$$V\rho c_v \frac{dT}{dt} = \dot{m}_{in}(t) \left(h_i - h + ZRT - \rho \frac{\partial u}{\partial \rho} \Big|_T \right) + \dot{m}_{out}(t) \left(ZRT - \rho \frac{\partial u}{\partial \rho} \Big|_T \right) + \dot{Q} \quad (2)$$

$$p = Z\rho RT \quad (3)$$

$$\dot{Q} = h_c A_c (T_{rw} - T) \quad (4)$$

式中: $\dot{m}_{in}(t)$ 、 $\dot{m}_{out}(t)$ 分别为充气和放气速率函数,kg/s; V 为洞室体积,m³; T 为洞室内气体温度,K; ρ 为压缩空气密度,kg/m³; c_v 为气体等容比热,J/(kg·K); R 为空气气体常数,J/(kg·K); Z 为空气压缩因子; \dot{Q} 为对流换热速率,J/s; h_c 为空气与围岩的对流换热系数,W/(m²·K); A_c 为洞室表面积,m²; T_{rw} 为围岩温度,K; t 为计算时间,s; h_i 为注入气体焓,J; h 为洞室气体焓,J; u 为洞室气体热力学能,J; p 为洞室气体压力,Pa。

洞室气体焓和热力学能还可以表示为

$$h_i - h = c_p (T_i - T) \quad (5)$$

$$\frac{\partial u}{\partial \rho} \Big|_T = - \frac{RT^2 \frac{\partial Z}{\partial T}}{\rho_0} \quad (6)$$

式中: c_p 为空气等压比热,J/(kg·K); T_i 为注入空气温度,K; ρ_0 为空气初始密度,kg/m³。

式(2)反映的是储气库内热能变化机制。由式(2)可知,储气库内热能变化主要由三部分组成,即充入和释放压缩空气蕴含的热能变化量,以及空气与储气库洞壁间因温差引起的热能变化量。根据式(2),在计算储气库内的气体温度时, \dot{Q} 的变化将引起对储气库内的所有空气的温度同时发生改变。

由此可见,确定对流换热过程中的换热量是准确预测储气库内温度变化的关键。储气库围岩与空气间的换热过程与矿井巷道围岩与气流之间的换热过程类似。在巷道开挖初期,矿井巷道内壁围岩存在温度不均的“变温圈”,其高温壁面以对流形式将热量传递给气流,该换热过程随时间动态变化^[19]。类似地,当储气库运行时,其内壁围岩附近存在温度分布不均匀的区域,该区域的范围大小、温度梯度和空气导热系数等均随时间而变化。这种变化是一个非稳态过程,该过程控制了空气与外界间的对流换热程度。在通风条件下,矿井巷道内部温度往往采用不稳定换热系数或修正对流换热系数进行计算,以提高预测的准确性。在文献[20-21]中,研究者将对流换热系数表示为随温度、风速等变化的函数,以此反映通风巷道内的非稳态换热过程。因此,本文提出通过修正对流换热系数来弱化空气在高温区到低温区间的热传导效应,使模型中储气库内部空气与壁面围岩间的换热过程更符合实际。结合现有关于

空气与洞壁间对流换热的研究成果,本文提出两种改进模型,分别命名为改进模型一与改进模型二。

1.1 改进模型一:分别考虑强迫对流与自然对流

储气库内压缩空气与围岩间的对流换热形式有两种:一种是由外界驱动力引起的强迫对流换热,另一种则是由流体密度空间分布不均所产生的浮力导致的自然对流换热^[22]。在充、放气阶段,压缩空气与围岩间的对流换热以强迫对流为主;在高、低压储气阶段,压缩空气与围岩间的对流换热则以自然对流交换为主。

目前,计算管内强迫对流换热使用最广泛的公式为 Dittus-Boelter 公式^[22],即:

$$Nu = 0.023Re^{0.8}Pr^n \quad (7)$$

$$Re = \rho v L / \mu \quad (8)$$

$$Pr = c_p \mu / \lambda \quad (9)$$

式中: Nu 为努塞尔数,无量纲; Re 为雷诺数,无量纲; Pr 为普朗特数,无量纲; n 为 Pr 的指数,当流体加热时,其值取为0.4,当流体冷却时,其值取为0.3; v 为流体速度,m/s; L 为流体特征长度,m; μ 为流体动力黏度, $N \cdot s / m^2$; λ 为流体导热系数, $W / (m \cdot K)$ 。

目前,在实际工程中,广泛应用的大空间自然对流换热公式^[22]为

$$Nu = C(Gr \cdot Pr)^m = C Ra^m \quad (10)$$

$$Gr = g\beta(T_a - T_{rw})L^3 / \nu_f^2 \quad (11)$$

$$Ra = Pr \cdot Gr = \frac{c_p \cdot \mu}{\lambda} \cdot \frac{g\beta(T_a - T_{rw})L^3}{\nu_f^2} \quad (12)$$

$$\nu_f = \mu / \rho \quad (13)$$

式中: C 取为0.125; m 取为1/3; Gr 为格拉晓夫数,无量纲; Ra 为瑞利数,无量纲; g 为重力加速度, m^2/s ; β 为气体体积膨胀系数, $1/K$; T_a 为气体温度, K ; ν_f 为流体运动黏度, m^2/s 。

在式(7)~(13)中,流体为压缩空气,其密度 ρ 、等压比热 c_p 、动力黏度 μ 、导热系数 λ 等均与压力 p 及温度 T 相关,具体关系为

$$\rho = \frac{P}{RT} \quad (14)$$

$$c_p = 1047.63 - 0.37T + 9.45 \times 10^{-4}T^2 - 6.02 \times 10^{-7}T^3 + 1.29 \times 10^{-10}T^4 \quad (15)$$

$$\lambda = -2.28 \times 10^{-3} + 1.16 \times 10^{-4}T - 7.90 \times 10^{-8}T^2 + 4.12 \times 10^{-11}T^3 - 7.44 \times 10^{-15}T^4$$

$$(16)$$

$$\mu = -8.38 \times 10^{-7} + 8.36 \times 10^{-8}T - 7.69 \times 10^{-11}T^2 + 4.64 \times 10^{-14}T^3 - 1.07 \times 10^{-17}T^4$$

$$(17)$$

空气与储气库洞壁的对流换热系数计算为

$$h = Nu \cdot \lambda / L \quad (18)$$

由此可见,可对地下储气库热力学分析计算模型中的压缩空气与外界的对流换热速率 \dot{Q} 进行改进,其具体表达式分别为

1) 充气阶段:

$$\dot{Q} = 0.023\lambda A_c Re^{0.8} Pr^{0.4} (T_{rw} - T) / L \quad (19)$$

2) 高(低)储气阶段:

$$\dot{Q} = 0.125\lambda A_c Ra^{0.33} (T_{rw} - T) / L \quad (20)$$

3) 放气阶段:

$$\dot{Q} = 0.023\lambda A_c Re^{0.8} Pr^{0.3} (T_{rw} - T) / L \quad (21)$$

将式(19)~(21)代入式(2),并将其与式(1)~(6)组合,即可得到考虑压缩空气与围岩之间在强迫对流与自然对流情况下的热力学过程的改进模型,即改进模型一。

1.2 改进模型二:考虑混合对流

储气库内部压缩空气的对流换热过程并非单一形式。当压缩空气以强迫对流主导时,压缩空气(流体)内部逐渐出现温度分布不均匀的特点,并将引起自然对流。当压缩空气的自然对流效应较为明显时,储气库内的对流换热形式则转为以强制对流与自然对流两种对流形式并存的混合对流换热形式。WOODFIELD等^[23]研究了真空容器内的流体传热过程,提出考虑混合对流换热的 Nu 数经验公式,其表达式如下:

$$Nu = 0.56Re^{0.67} + 0.104Ra^{0.34} \quad (22)$$

$$Re = \frac{4\dot{m}}{\mu \pi d} \quad (23)$$

$$Ra = \frac{g\beta c_p (T_a - T_{rw}) \rho^2 L^3}{\mu \lambda} \quad (24)$$

式中: \dot{m} 为气体充入或放出质量流率,kg/s; d 为储气洞室直径,m; T_a 为空气温度,K。

考虑混合对流作用,在地下储气库空气的热力学过程中,空气与外界的对流换热速率计算式分别如下:

1) 充(放)气阶段:

$$\dot{Q} = \lambda A_c (0.56Re^{0.67} + 0.104Ra^{0.34}) (T_{rw} - T) / L \quad (25)$$

2) 高(低)储气阶段:

$$\dot{Q} = 0.104Ra^{0.34}\lambda A_c(T_{rw} - T)/L \quad (26)$$

将式(25)~(26)代入式(2),并将其与式(1)~(6)组合,即可得到考虑混合对流的热力学过程改进模型,即改进模型二。

此外,结合试验中获取的空气在不同对流形式下的对流换热系数范围^[24],对于这两种改进模型,在计算前,必须先对空气对流换热系数进行判断:在充、放气阶段,空气对流换热系数不得小于20 W/(m²·K);在储气阶段,对流换热系数不得高于25 W/(m²·K)。

2 改进模型验证与分析

2.1 算例一:德国Huntorf CAES电站

基于Huntorf CAES电站的实测数据,分别采用文献[11]提出的解析模型、数值模型与本文提出的两种改进解析模型,对该CAES电站储气库的热力学过程进行计算分析。该储气库的相关运行参数来自文献[7]和[25],见表1。

表1 Huntorf CAES电站储气库计算参数^[7,25]

Table 1 Parameters of Huntorf CAES plant^[7,25]

参数	数值
洞室半径/m	17.3
洞室体积/m ³	141 000
洞室表面积/m ²	18 179
围岩密度/(kg·m ⁻³)	2 100
围岩导热系数/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	4
围岩比定压热容/(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	840
对流换热系数/(W·m ⁻² ·K ⁻¹)	30
洞室初始温度/℃	40.00
洞室初始压力/MPa	5.90

改进模型的边界条件:进(出)气口处设质量流率条件,质量流率的变化情况如图1所示,其余壁面均为无流动边界。储气库洞壁为对流换热边界,进(出)气口处为固定温度边界,在进行三次充气时,进气温度分别为50.96、45.95、49.08℃,围岩外部边界为绝热边界条件。

图2为储气库内压缩空气平均压力计算值与实测值的对比图。从图2中可以看出,这4种计算模型对压力实测值的拟合效果均较好。其中,

CFD数值模型在充放气阶段的误差较小,文献[11]模型在储气阶段的拟合效果佳,但改进模型二比文献[11]模型的拟合程度更好,改进模型一的拟合程度则介于CFD数值模型的拟合程度与文献[11]模型的拟合程度之间。

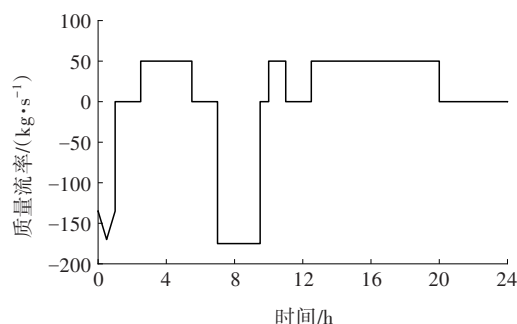


图1 Huntorf电站质量流率^[7]

Fig. 1 Mass flow rate of Huntorf plant^[7]

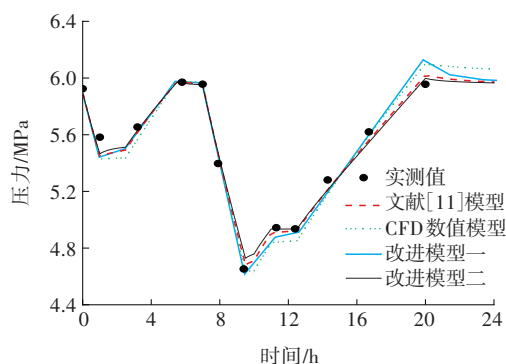


图2 压力计算值与实测值对比

Fig. 2 Comparison of the pressure calculation and the measured value

图3为储气库内压缩空气平均温度计算值与实测值的对比图。与储气库内压缩空气平均压力的计算结果相比,储气库内压缩空气的平均温度计算结果呈现了较大差异。从图3中可以看出,实测温度普遍高于文献[11]模型的计算温度,且在不同时段中,这4个模型的拟合效果存在差异。其中在7.0 h前,CFD数值模型的拟合效果较好;在1.0 h时,该模型计算的温度值与实测值仅相差0.85℃,其他3个模型计算的温度差值则在4.00℃以上;在7.0~9.3 h的放气阶段,改进模型二的拟合效果最好;放气结束时,实测温度降幅为12.89℃。改进模型二计算的温度降幅与实测温度降幅仅相差0.04℃,改进模型一计算的温度降幅与实测温度降幅差异最大,可达7.61℃;在随后的储气阶段,实测温度升高了0.13℃,改进模型二计算的温

度升高了 0.14°C , 而文献[11]模型计算的温度升高了 1.12°C ; 在 $12.0\sim 20.0\text{ h}$ 时段, CFD 数值模型计算的温度结果较为理想, 其在多个时间点计算的温度与实测温度最为接近, 两者最大差值不超过 2.80°C 。相比之下, 改进模型一在放气时计算的温度降幅与充气后计算的温度升幅都过高。在 9.3 h 时, 其计算的温度低于实测温度 7.77°C , 在 20.3 h 时, 其计算的温度为 49.59°C , 该值远高于其他模型计算的温度, 也比实测温度高 5.26°C 。

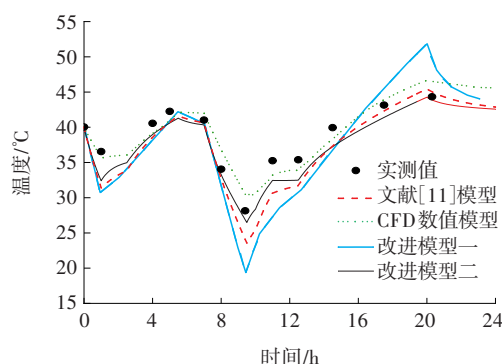


图3 温度计算值与实测值对比

Fig. 3 Comparison of the temperature calculation and the measured value

在不同计算方法下, 空气平均压力与平均温度计算值和实测值间的误差见表2。由表2可知, 各类方法计算得到的平均压力值的误差均不大。计算最为精确的为改进模型二, 其平均绝对误差最小, 均方根误差值比文献[11]模型的稍大。文献[11]模型对压力的预测效果十分理想, 其均方根误差仅为 0.068 MPa 。各计算模型对平均温度的计算精度明显比平均压力的低, 但总体误差均在合理范围内。对于平均温度而言, CFD 数值模型的计算最为准确, 其两误差指标均为最低; 其次为改进模型二, 其平均绝对误差与均方根误差分别比 CFD 数值模型的高 0.210 、 0.341°C 。改进模型一的各误差指标均为最差, 均方根误差高达 4.553°C 。

结合误差分析, 不同计算模型对平均压力的预测都较为精准, 而对平均温度的计算则各有差异。其中, CFD 数值模型的计算精度最高, 在解析模型中, 改进模型二的计算结果更接近数值模型, 对 Huntorf CAES 储气库热力学过程的预测结果也更符合实际情况。

表2 计算值与实测值误差分析

Table 2 Error analysis between calculated data and measured data

误差指标		文献[11] 模型	CFD 数 值模型	改进 模型一	改进 模型二
平均压 力/MPa	平均绝对误差	0.053	0.074	0.067	0.050
	均方根误差	0.068	0.088	0.084	0.071
平均温 度/ $^{\circ}\text{C}$	平均绝对误差	2.195	1.494	3.642	1.706
	均方根误差	2.734	1.695	4.553	2.036

2.2 算例二: 日本 Kamioka CAES 试验

NAKATA 等^[26]在日本 Kamioka 矿山巷道中建立了 CAES 试验洞室。在其试验过程中, 充气时长为 2.2 h , 达到最大储存压力后, 保持压力 3.1 h , 此后, 停止注入空气。 5.0 h 后, 洞室压力降至与大气压一致。试验相关运行参数来自文献[26], 见表3。在该试验过程中, 该试验洞室存在明显的空气泄露现象, 其空气泄露速率如图4所示。为进一步验证本文提出的改进模型, 分别采用不同解析模型, 对试验洞室热力学过程进行对比, 并将计算结果、实测值及 NAKATA 等的计算值进行对比分析。

表3 Kamioka CAES 试验计算参数^[26]

Table 3 Parameters of Kamioka CAES test^[26]

参数	数值
洞室半径/m	2.81(等效)
洞室体积/ m^3	222.75
洞室表面积/ m^2	211.5
围岩密度/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	2 500
围岩导热系数/ $(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	3
围岩比定压热容/ $(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	1 000
对流换热系数/ $(\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1})$	30
洞室初始温度/ $^{\circ}\text{C}$	19
洞室初始压力/MPa	0.100
注入空气温度/ $^{\circ}\text{C}$	31.00
进气质量流量/ $(\text{kg}\cdot\text{min}^{-1})$	18.38
储气维持质量流量/ $(\text{kg}\cdot\text{min}^{-1})$	13.90

试验洞室内压缩空气平均压力的计算值与实测值的对比如图5所示。从图5可以看出, 各种计算方法得到的试验洞室压缩空气平均压力的发展趋势基本一致。其中, 在充气阶段, 这些方法计算值均与实测值较相符合; 在储气阶段, 试验洞室运行实测压力约为 0.604 MPa , 文献[11]模型与改进模型二的计算值较实测值降低了约 0.020 MPa , 而改进模型一计算的压力值比实测值低 0.050 MPa ; 在放气

阶段,文献[11]的模型与改进模型二的拟合效果较好,然而在放气末段,文献[11]的模型的拟合效果则不如改进模型一的拟合效果。

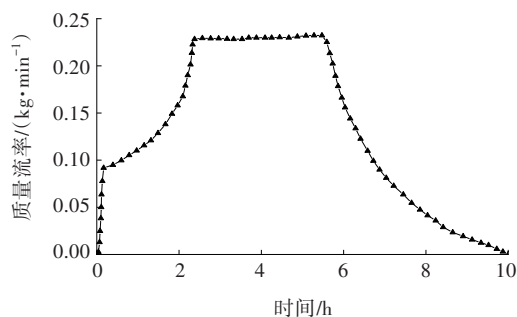


图4 储气库泄漏质量流率变化过程^[26]

Fig. 4 Leakage mass flow rate of CAES cavern^[26]

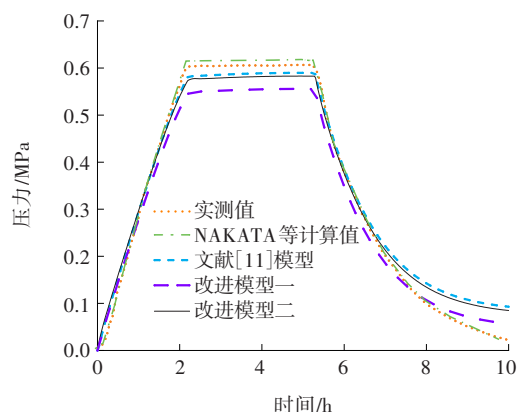


图5 压力计算值与实测值对比

Fig. 5 Comparison of the pressure calculation values and the measured value

试验洞室内平均温度在不同计算方法下得到的计算值与实测值的对比结果如图6所示。从图6可以看出,在空气泄漏的影响下,实测温度在充气1.0 h后达到最高,随后逐渐降低。NAKATA等的计算值在充气阶段明显高于实测值,其最大值比实测最大值高11.65℃,其他解析模型在该阶段的温度计算值均低于实测值。在充气阶段实测温度升高了7.61℃,改进模型的升幅均在4.8℃左右,而NAKATA等计算的升幅为19.26℃。在储气阶段实测温度约降低了5.04℃,文献[11]模型与改进模型二降幅较小,约为2.20℃,但3.0 h后这两个模型的计算值与实测值更为符合。在放气时段内,改进模型二计算的温度变化趋势最符合实际情况。实测平均温度的最低值为16.47℃,NAKATA等的计算值仅为8.54℃,文献[11]模型与改进模型二计算的平均温度的最低值分别为16.84、15.90℃。放气完毕后,实测温度升高了约

1.43℃,改进模型二计算的温度升幅约为1.60℃,与实测值最为接近。

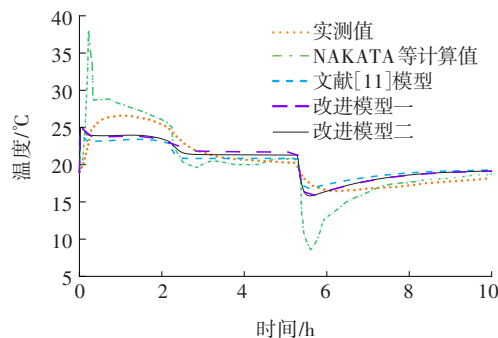


图6 温度计算值与实测值对比

Fig. 6 Comparison of the temperature calculation values and the measured value

表4 计算值与实测值误差分析

Table 4 Error analysis between calculated and measured data

误差指标		文献[11]模型	NAKATA等计算值	改进模型一	改进模型二
平均压力/MPa	平均绝对误差	0.025	0.003	0.032	0.025
	均方根误差	0.031	0.006	0.037	0.030
平均温度/℃	平均绝对误差	1.430	2.510	1.324	1.255
	均方根误差	1.703	1.500	1.528	1.467

空气平均压力及平均温度的计算值和实测值间的误差见表4。由表4可知,在各计算方法下,平均压力的平均绝对误差最大为0.032 MPa,均方根误差不超过0.037 MPa,不同计算模型对压力的预测精度均较高。对于平均温度而言,NAKATA等的计算值误差最大,文献[11]模型的次之,改进模型二计算值的各误差指标均为最低。综上所述,在各解析模型中,改进模型二对 Kamioka CAES 试验洞室平均压力和温度的计算值与实测值最为接近。

2.3 算例三:Rutqvist的CAES数值算例

针对文献[4]中的地下浅埋内衬岩石洞室热力学过程的算例,分别采用不同热力学模型进行计算与对比。该算例以24.0 h为一个运行周期。其中,充气8.0 h,高压储气4.0 h,放气4.0 h,低压储气8.0 h。计算参数参考文献[4]与文献[18],见表5。

压缩空气平均压力计算结果对比如图7所示。从图7可以看出,在此算例中,采用各方法得到的

平均压力变化规律高度一致,RUTQVIST等^[4]模拟的压力较其他解偏低,但压力最大差异不超过0.10 MPa。温度计算值与模拟值对比如图8所示。从图8可以看出,不同计算模型下的储气库温度变化过程出现了显著差异。当充气结束时,RUTQVIST等^[4]模拟的温度值为22.74 °C,与改

表5 Rutqvist数值算例计算参数^[4,18]

Table 5 Parameters of Rutqvist's modeling simulation case^[4,18]

参数	值
洞室半径/m	2.5
洞室体积/m ³	19.685
洞室表面积/m ²	15.708
围岩密度/(kg·m ⁻³)	2 700
围岩导热系数/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	3
围岩比定压热容/(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	900
对流换热系数/(W·m ⁻² ·K ⁻¹)	30
洞室初始温度/°C	13.00
洞室初始压力/MPa	5.00
注入空气温度/°C	21.50
进气质量流率/(kg·s ⁻¹)	0.022
放气质量流率/(kg·s ⁻¹)	-0.044

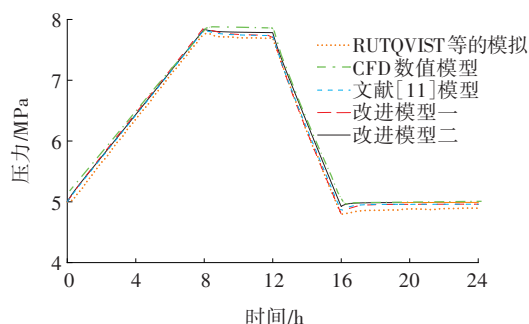


图7 压力计算值与模拟值对比

Fig. 7 Comparison of the pressure calculation and the measured value

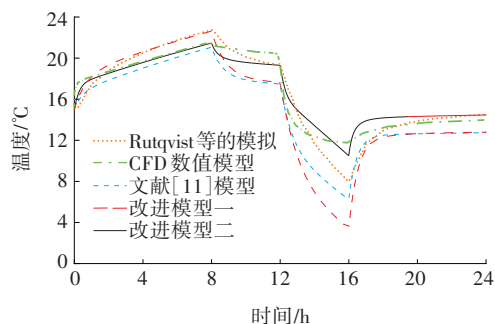


图8 温度计算值与模拟值对比

Fig. 8 Comparison of the temperature calculation and the measured value

进模型一计算得到的温度几乎相同;改进模型二计算的温度为21.45 °C,该数值与CFD数值模型的计算结果最为接近。在低压储气阶段,CFD数值模型温度回升不高,仅为2.36 °C,改进模型二的温度回升值为3.93 °C,但RUTQVIST等^[4]模拟得到的温度回升值与文献[11]模型计算的温度回升值均在6.00 °C以上。该算例在整个运行阶段内,实际温度变化在15.00 °C左右,而除CFD数值模型与改进模型二外,其他模型在低压储气阶段的温度变幅可超过整体变化的40%。由此可见,改进模型二可以更好地反映空气与洞壁间的真实对流换热作用。

3 讨论

综合以上三个算例的验证分析结果,可知地下储气库热力学分析模型在预测压力变化过程时精度都较高,但由于采用的对流换热方法不同,不同的计算模型得到的压缩空气平均温度出现了较大差异。由于CFD数值模型可反映储气库内气体流动等复杂热力学现象,因此其计算结果与实际情况最为接近。除Huntorf电站外,其他两个算例的洞室尺度较小,温度波动不大,但各模型温度计算结果仍在低压储气阶段呈较大偏差。如果电站规模较大,这种偏差将导致对电站效率与储气库容积的错误预估。本文提出的改进模型二在一定程度上考虑了混合对流的影响,得到的计算结果与CFD数值模拟结果接近,故该改进模型是科学、合理的。

Huntorf电站与Kamioka CAES试验均对井口与洞室内部进行了压力与温度测量。Huntorf电站的测量结果显示,其井口和洞穴的压力与温度曲线基本平行,但两者之间始终存在差值。Kamioka CAES试验的监测数据表明,其洞室内部各测点压力基本一致,但温度存在差异,故温度的实测数据为洞室内部测点温度的平均值。不同位置测点温度的差异表明洞室内存在温度分布不均的现象。在蒋中明等^[27]开展的湖南省平江CAES地下储气洞室模型试验中,温度场分布也呈现显著的不均匀性。这种温度在空间上的不均匀分布会影响空气与围岩之间的换热,这与本文分析的计算方法存在误差的原因相符。本文从对流换热角度出发提出的改进模型,对地下储气洞室的热力学过程

计算进行了改进,后续还可深入研究压缩空气温度在储气洞室内的空间分布规律,将其与解析模型结合,获得考虑温度空间分布的热力学分析模型,进一步提高预测的准确性。

4 结论

针对现有压缩空气热力学计算模型存在的不足,在分析储气库能量方程基础上,提出了地下储气库热力学过程分析的改进模型。结合三个算例,对改进模型进行验证分析,得到如下主要结论:

1) 空气与储气库洞壁间对流换热引起的传热量变化对储气库内压缩空气温度计算结果影响显著,不合理的对流换热计算方法可导致压缩空气温度计算结果出现很大的误差。在 Huntorf 电站的算例中,解析模型在二次放气阶段计算的温度降幅偏大,其计算结果与实测温度降幅最大差值为 7.61 °C,而改进模型二的温度计算降幅与实测温度降幅仅相差 0.04 °C。在 Kamioka CAES 试验中,解析模型计算的平均温度最大值与实测值相差 11.65 °C;改进模型二计算的平均温度最大值与实测值仅相差 2.67 °C。

2) 本文提出的改进模型一在充放气阶段考虑的热交换以强迫对流为主。在实际中,该模型可能存在升温过高而降温过低的不足。改进模型二考虑了混合对流换热作用,可以较好地改善储气库低压储气阶段计算的温度上升幅度过大的问题,更符合实际工程情况。

[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. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.02.108.
- [2] KING M, JAIN A, BHAKAR R, et al. Overview of current compressed air energy storage projects and analysis of the potential underground storage capacity in India and the UK [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 139: 110705. DOI: 10.1016/j.rser.2021.110705.
- [3] 林昊.我国“十四五”能源规划的六大重点[J].*能源研究与利用*, 2019(4): 6–7. DOI: 10.16404/j.cnki.issn1001-5523.2019.04.003.
LIN Hao. Six key points of China's energy planning in "the 14th Five-Year Plan" [J]. *Energy Research & Utilization*, 2019(4): 6–7. DOI: 10.16404/j.cnki.issn1001-5523.2019.04.003.
- [4] RUTQVIST J, KIM H M, RYU D W, 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: 71–81. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2012.02.010.
- [5] 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. DOI: 10.1016/j.renene.2014.08.058.
- [6] HE W, LUO X, EVANS D, et al. Exergy storage of compressed air in cavern and cavern volume estimation of the large-scale compressed air energy storage system [J]. *Applied Energy*, 2017, 208: 745–757. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.09.074.
- [7] 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. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.05.055.
- [8] KUSHNIR R, ULLMANN A, DAYAN A. Thermodynamic models for the temperature and pressure variations within adiabatic caverns of compressed air energy storage plants [J]. *Journal of Energy Resources Technology*, 2012, 134 (2): 1. DOI: 10.1115/1.4005659.
- [9] RAJU M, KUMAR KHAITAN S. Modeling and simulation of compressed air storage in Caverns: a case study of the Huntorf plant [J]. *Applied Energy*, 2012, 89 (1): 474–481. DOI: 10.1016/j.apenergy.2011.08.019.
- [10] ZHOU S W, XIA C C, DU S G, et al. An analytical solution for mechanical responses induced by temperature and air pressure in a lined rock cavern for underground compressed air energy storage [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2015, 48 (2): 749–770. DOI: 10.1007/s00603-014-0570-4.
- [11] 蒋中明,刘澧源,胡炜,等.考虑空气压缩因子变化影响的地下储气库热力学过程分析[J].*储能科学与技术*, 2018, 7(5): 902–907. DOI: 10.12028/j.issn.2095-4239.2018.0041.
JIANG Zhongming, LIU Liyuan, HU Wei, et al. Thermodynamic analysis of compressed air storage in a underground rock cavern considering the influence of compression factor [J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2018, 7 (5): 902–907. DOI: 10.12028/j.issn.2095-4239.2018.0041.
- [12] 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(2): 232–239. DOI: 10.12028/j.issn.2095-4239.2017.0149.

- LIU Liyuan, JIANG Zhongming, WANG Jiangying, et al. Thermodynamic analyses of compressed air energy storage in a underground rock cavern [J]. Energy Storage Science and Technology, 2018, 7(2): 232-239. DOI: 10.12028/j.issn.2095-4239.2017.0149.
- [13] 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.
- [14] 王国华, 张学林, 李智, 等. 压缩空气储能盐穴储气库注采全过程热力学特性分析 [J]. 可再生能源, 2019, 37(4): 618-624. DOI: 10.13941/j.cnki.21-1469/tk.2019.04.023.
- WANG Guohua, ZHANG Xuelin, LI Zhi, et al. Thermodynamics analysis of salt cavern for compressed air energy storage system [J]. Renewable Energy Resources, 2019, 37(4): 618-624. DOI: 10.13941/j.cnki.21-1469/tk.2019.04.023.
- [15] DE PRADO L Á, MENÉNDEZ J, BERNARDO-SÁNCHEZ A, et al. Thermodynamic analysis of compressed air energy storage (CAES) reservoirs in abandoned mines using different sealing layers [J]. Applied Sciences, 2021, 11(6): 2573. DOI: 10.3390/app11062573.
- [16] 高建强, 庄绪增, 敬赛. CAES 电站储气室热力学特性的数值模拟研究 [J]. 电力科学与工程, 2018, 34(12): 72-77. DOI: 10.3969/j.issn.1672-0792.2018.12.011.
- GAO Jianqiang, ZHUANG Xuzeng, JING Sai. Numerical simulation study on thermodynamic characteristics of gas storage chamber of CAES power station [J]. Electric Power Science and Engineering, 2018, 34(12): 72-77. DOI: 10.3969/j.issn.1672-0792.2018.12.011.
- [17] DE A BARROS M B, RODRÍGUEZ D, HENRÍQUEZ R. Thermodynamic analysis of a compressed air energy storage system with constant volume storage considering different operating conditions for reservoir walls [J]. Journal of Energy Storage, 2020, 32: 101728. DOI: 10.1016/j.est.2020.101728.
- [18] 周瑜, 夏才初, 赵海斌, 等. 压气储能内衬洞室的空气泄漏率及围岩力学响应估算方法 [J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(2): 297-309. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2016.0318.
- ZHOU Yu, XIA Caichu, ZHAO Haibin, et al. A method for estimating air leakage through inner seals and mechanical responses of the surrounding rock of lined rock Caverns for compressed air energy storage [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(2): 297-309. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2016.0318.
- [19] 段玉龙, 周心权, 王海燕, 等. 矿井瓦斯爆炸下巷道内的对流换热系数的探讨分析 [J]. 煤矿安全, 2010, 41(4): 105-108. DOI: 10.13347/j.cnki.mkaq.2010.04.042.
- DUAN Yulong, ZHOU Xinquan, WANG Haiyan, et al. Discussion and analysis of convective heat transfer coefficient in roadway under mine gas explosion [J]. Safety in Coal Mines, 2010, 41(4): 105-108. DOI: 10.13347/j.cnki.mkaq.2010.04.042.
- [20] 杨威, 刘何清, 何昌富, 等. 巷道围岩不稳定换热系数变化规律分析 [J]. 矿业工程研究, 2013, 28(4): 8-13. DOI: 10.3969/j.issn.1674-5876.2013.04.003.
- YANG Wei, LIU Heqing, HE Changfu, et al. Analysis on variation of unsteady heat transfer coefficient of rock surrounding [J]. Mineral Engineering Research, 2013, 28(4): 8-13. DOI: 10.3969/j.issn.1674-5876.2013.04.003.
- [21] 高佳南, 吴奉亮. 巷壁与风流间对流换热系数计算及敏感性分析 [J]. 煤矿安全, 2021, 52(9): 211-217. DOI: 10.13347/j.cnki.mkaq.2021.09.034.
- GAO Jia'nan, WU Fengliang. Calculation and sensitivity analysis of convective heat transfer coefficient between roadway wall and airflow [J]. Safety in Coal Mines, 2021, 52(9): 211-217. DOI: 10.13347/j.cnki.mkaq.2021.09.034.
- [22] 杨世铭, 陶文铨. 传热学 [M]. 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- YANG Shiming, TAO Wenquan. Heat transfer [M]. 4th ed. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [23] WOODFIELD P L, MONDE M, MITSUTAKE Y. Measurement of averaged heat transfer coefficients in high-pressure vessel during charging with hydrogen, nitrogen or argon gas [J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2007, 2(2): 180-191. DOI: 10.1299/jtst.2.180.
- [24] 冯霄, 何潮洪. 化工原理-下册 [M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2007.
- FENG Xiao, HE Chaohong. Principles of chemical engineering-volume II [M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2007.
- [25] CROTOGINO F, MOHMEYER K-U, SCHARF R. Huntorf CAES: More than 20 years of successful operation. April 15-18, 2001 [C]. Orlando, Florida: Springer, 2003.
- [26] NAKATA M, YAMACHI H, NAKAYAMA A, et al. Thermo-dynamical approach to compressed air energy storage system [J]. Doboku Gakkai Ronbunshu, 1998, 1998(610): 31-42. DOI: 10.2208/jscej.1998.610_31.
- [27] 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. DOI: 10.16285/j.rsm.2018.2175.
- JIANG Zhongming, LI Peng, ZHAO Haibin, et al. Experimental study on performance of shallow rock cavern for compressed air energy storage [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(1): 235-241, 252. DOI: 10.16285/j.rsm.2018.2175.

(责任编辑:李脉;校对:赵冰 刘平;英文编辑:栗淼)