

文章编号:1672-9331(2021)03-0079-08

压气储能遂昌地下储气库结构应力 变形特性数值研究

蒋中明^{1,2}, 李小刚¹, 万发¹, 欧阳钰榕¹

(1. 长沙理工大学 水利与环境工程学院, 湖南 长沙 410114;

2. 长沙理工大学 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: 为了解压气储能地下储气库结构应力变形特性,以浙江遂昌拟建压气储能电站地下储气库为研究对象,采用热力耦合理论对运行条件下储气库的密封层、衬砌、围岩的应力变形特性及其变化过程进行了研究。研究表明:在循环充放气条件下,因储气库内压缩空气与密封层之间的热交换致使密封层温度出现较大幅度上升,而混凝土衬砌和围岩温度上升幅度较小。在距洞壁较近处,各结构层在高压作用下产生了较大的应力和位移,但随着与洞壁表面距离的增加,应力和位移逐渐减小。各结构层应力和变形均在允许范围内,储气库围岩稳定性良好。在循环压力的作用下,各结构层温度、位移及应力均呈现周期性的变化特征,且距洞壁越近,其变化幅度越大,而远离洞壁的围岩的温度及力学响应明显滞后。

关键词: 压气储能;压缩空气;地下储气库;受力特性;结构变形

中图分类号: TK02

文献标志码: A

Numerical study on stress and deformation characteristics of structure of underground gas storage for CAES in Suichang

JIANG Zhong-ming^{1,2}, LI Xiao-gang¹, WAN Fa¹, OUYANG Yu-rong¹

(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 University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: In order to understand the stress and deformation characteristics of the structure of underground gas storage for compressed air energy storage(CAES), taking the underground gas storage of a planned CAES plant in Suichang, Zhejiang Province, as the research object, the stress and deformation characteristics and their variation process of sealing layer, lining and surrounding rock of gas storage under operating conditions were studied based on the thermodynamic coupling theory. The results show that the heat exchange between the compressed air in the gas storage and the sealing layer causes the temperature of the sealing layer to rise greatly, while the temperature of the concrete lining and surrounding rock rises slightly under the condition of circulating inflation and deflation. Where the structure is close to the tunnel wall, the stress and displacement of the structure under high

收稿日期:2021-03-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51778070);长沙理工大学实践创新与创业能力提升计划项目(SJCX201936)

通讯作者:蒋中明(1969—),男,教授,主要从事能源地下储气库及岩土工程稳定性理论方面的研究。

E-mail: zzmjiang@163.com

pressure is larger, but the stress and displacement decreases gradually with the increase of the distance from the tunnel wall surface. The stress and deformation of each structural layer are in the allowable range and the stability of the surrounding rock of the gas storage is good. The temperature, displacement and stress of each structural layer all show the periodic changing characteristics under the action of circulating pressure, and the closer the distance to the tunnel wall, the greater the changing amplitude. While the temperature and mechanical response of the surrounding rock far away from the tunnel wall show obvious hysteresis.

Key words: CAES; compressed air; underground gas storage; mechanical characteristic; structural deformation

压缩空气储能(compressed air energy storage, CAES)是一种新型的大型能源存储方式,可较好地解决清洁能源发电的间歇性和不稳定性问题^[1]。其工作原理为:在用电低谷期,用电网中多余的电能通过压缩机将空气压缩并储存在储气设备内,等到用电高峰期将高压空气释放,推动电机发电,以此来调节电力系统的峰谷负荷^[2]。它具有储能容量大、响应速度快、使用成本低、运行方式灵活、使用寿命长等优点^[3]。

CAES 电站储气库洞室作为能源存储装置,多采用地下储气库。大规模地下储气库的类型主要有 4 种:一是已开采完的贮油和贮气地质构造;二是地下含水层;三是已开采或者专门开凿的盐岩溶腔;四是硬岩中人工开挖的地下洞室^[4]。与前三种地下储气库相比,人工开挖的地下洞室不受特殊地质构造的限制,选址更灵活,可选择性更强,因此在硬岩中开挖地下洞室作为地下储气库受到越来越多学者的关注^[5]。1990 年,日本有研究者在一座已开采完的煤矿内做了原位储气测试,这是最早针对压气储能内衬洞室的研究^[6]。XIA 等^[7]在花岗岩地层中研究储气库的相关特性和可行性。蒋中明等^[8]的研究表明盐岩溶腔和硬岩洞穴是大规模 CAES 储气库的优选类型。

地下储气库在温度和压力作用下的受力稳定性直接影响电站运行的安全性和可靠性。针对韩国 CAES 地下试验库的稳定性问题, KIM 等^[9]采用数值分析方法研究了开挖扰动区的压气储能岩石内衬洞室的应力变形特性,评价了衬砌力学性能变化对渗透性的影响。周瑜等^[10]分析了空气泄漏引起的洞室压力和温度改变导致的围岩力学响应变化特性。蒋中明等^[11]结合我国建造的第一个硬岩浅埋衬砌地下储气库的试验成果,分析了储

气库内压缩空气的热力学变化过程、围岩及衬砌的变形特性,评价了储气库的密封效果和洞室结构的安全性。王其宽等^[12]采用正交设计数值模拟试验方法研究了洞室埋深、间距及内径对围岩变形和稳定性的影响规律,获得了洞室群的最优布置方案。

综上所述,随着 CAES 技术的发展,利用硬岩内衬洞室作为 CAES 电站地下储气库来储存压缩空气将成为未来的趋势。目前,对地下储气库受力稳定性研究的报道较多,且多为理论计算研究、小型试验研究、平面模型热力耦合研究及只考虑最大运行压力作用的数值模拟研究,而针对大型地下储气库这种特殊的工程,对 CAES 电站硬岩地下储气库在多个循环运行状态下考虑压力、温度的应力变形特性的研究较少。因此,本研究结合浙江遂昌拟建压气储能电站的实际地质条件,建立三维数值模型,对储气库密封层、衬砌、围岩在多个循环运行状态下的应力变形特性及变化过程进行研究,并评价其安全稳定性。

1 热力耦合基本理论

压气储能遂昌地下储气库在运行过程中,压缩空气的温度和压力频繁变化,并相互影响,因此对地下储气库围岩、衬砌及密封层应力和变形等受力特性进行分析时需要考虑热力耦合效应。现将连续介质热力耦合计算理论做如下简要介绍:

能量平衡方程:

$$\frac{\partial q_i}{\partial x_i} + q_v = \rho c_v \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

式中: q_i 为热流量向量, W/m^2 ; q_v 为体热源强度, W/m^3 ; ρ 为介质密度, kg/m^3 ; c_v 为定容比热

容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$; T 为介质温度, $^\circ\text{C}$; t 为时间, s 。

热传导方程:

$$q_i = -kT_i \quad (2)$$

式中: k 为导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$, 其余符号同前。

热力耦合方程:

$$\Delta\epsilon_{ij} = 3K\alpha_i\Delta T\delta_{ij} \quad (3)$$

式中: ϵ_{ij} 为热应变张量; K 为介质体积模量; α_i 为热膨胀系数; δ_{ij} 为 Kronecker 函数。

2 三维数值模型的建立

为研究热力耦合作用下压缩空气储能储气库结构的受力变形特性, 本研究以浙江遂昌拟建压气储能电站为工程背景, 采用 FLAC 3D 建立三维数值分析模型, 如图 1 所示。分别对围岩、衬砌层、密封层、堵头等关键部位进行建模, 整个模型 x 方向长 200 m, y 方向宽 106 m, z 方向高 200 m, 其中储气库半径为 7.5 m, 衬砌层厚度为 0.5 m, 密封层厚度 15 mm, 储气库长度为 300 m, 为简化计算, 此处截取一段进行建模分析。共有计算网格单元 285 520 个, 节点 295 764 个。为便于分析计算结果, 设置若干个监测点监测储气库在循环充放气过程中围岩和衬砌等结构层的温度、应力和变形的变化过程, 监测点的布置如图 2 所示。其中, A_1 为洞壁表面测点; A_2 为密封层中的测点; A_3 为衬砌中间测点; A_5, A_9 和 A_{12} 为围岩中的测点, 到洞壁的距离分别为 1.1, 7.0, 25.0 m (B 组和 C 组围岩中的测点到洞壁的距离与 A 组相同)。

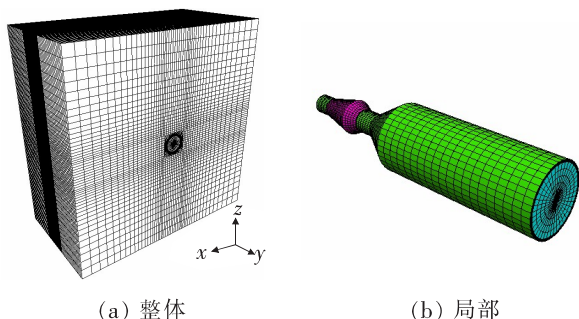


图 1 储气库三维数值模型

Fig. 1 3D simulation model of gas storage

模型计算过程包含 30 个充放气循环, 每个充放气循环时间为 1 d, 分为充气 (8 h) — 高压储气 (4 h) — 放气 (4 h) — 低压储气 (8 h) 4 个阶段, 充气速率为 165.33 kg/s, 放气速率为 74.99 kg/s。采

用文献[13]提出的压缩空气温度和压力计算方法得到循环充放气过程中温度和压力的变化过程, 如图 3 所示。模型初始压力为 0.1 MPa, 初始温度为 20 $^\circ\text{C}$ 。在储气库内表面施加随压缩空气状态变化的压力边界和温度边界。模型外表面热力学边界为 20 $^\circ\text{C}$ 的常温边界。力学边界设置如下: 模型顶部边界为压力边界, 按上覆岩层厚度施加均布荷载, 为 2.9 MPa, 铅直外边界为水平位移约束边界, 底部边界为垂直位移约束边界。模型计算采用的力学本构模型为摩尔—库伦弹塑性本构模型, 热传导分析模型为各向同性热传导模型。模型计算参数如表 1~2 所示。

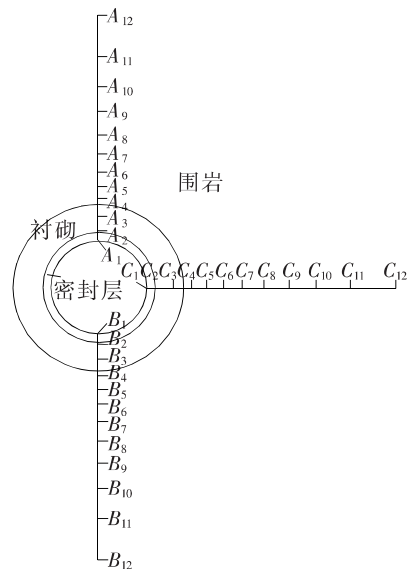


图 2 监测点布置图

Fig. 2 Layout of monitoring points

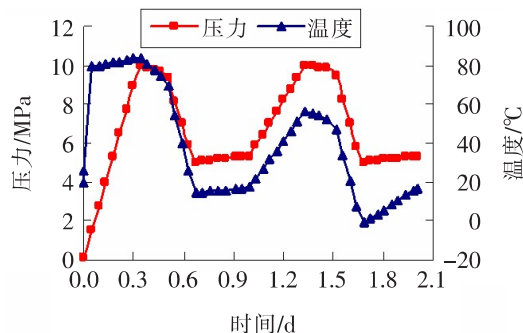


图 3 温度和压力边界的变化过程

Fig. 3 Variation process of temperature and pressure boundary

模型计算过程如下: ① 在模型顶部施加 2.9 MPa 压力模拟上覆岩层自重, 计算初始自重应力场; ② 模拟储气库工作区、堵头及储气库的逐步开挖; ③ 模拟衬砌、密封层及堵头的施工; ④ 模拟 30 个循环充放气过程, 并进行热力耦合计算。

表1 结构的物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of the structure

结构	变形模量/ GPa	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	黏聚力/ MPa	内摩擦角/ ($^{\circ}$)	泊松比	抗拉强度/ MPa
围岩	71.6	2.90	2.50	57.0	0.240	4.20
C30 混凝土	30.0	2.50	3.08	55.9	0.167	2.01
玻璃钢	2.9	2.00	1.50	30.0	0.220	130.00

表2 结构的热力学参数

Table 2 Thermodynamic parameters of the structure

结构	导热系数/ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	比热容/ ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	线膨胀系数/ ($\times 10^{-6} \text{K}^{-1}$)	换热系数/ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$)
围岩	3.00	771	10.0	—
C30 混凝土	1.74	800	10.0	6
玻璃钢	0.40	384	5.4	5

3 储气库结构受力特性分析

由图3可知,在初始充气循环过程中,由于要在8 h内使压缩气体压力达到10 MPa,初始充气速率较大,因此压缩过程显著,在短时间内会产生大量压缩热,导致压缩空气温度逐渐升高,在充气段结束时,空气温度达到了85 $^{\circ}\text{C}$ 。在随后的运行循环中,充气速率有所放缓,充气段结束时的温度也随之降低,为58 $^{\circ}\text{C}$ 。进入高压储气阶段后,由于储气库内空气的温度高于储气库内表面结构层的温度,压缩空气与储气库内表面之间存在对流换热以及围岩的热传导现象,所以在高压储气过程中储气库内压缩空气的温度出现了大幅下降,在初次充气循环的高压储气阶段结束时,温度下降至72 $^{\circ}\text{C}$;在正常运行过程中,储气阶段结束时空气的温度下降至52 $^{\circ}\text{C}$ 左右。在放气过程中,放气速率高,时间短,在压力迅速降低的同时,温度也迅速降低。

3.1 储气库结构温度时空分布特性

在热力耦合作用下,储气库结构(如围岩、衬砌和密封层)的应力和位移主要受压缩空气压力和高温压缩空气热传导引起的温度载荷的驱动。因此,在进行热力耦合作用下储气库结构应力变形特性分析之前,先进行储气库温度分布特性的分析。

图4所示为第30次充气至空气压力为10 MPa时储气库密封层、衬砌及围岩的温度分布。由图4可知,当充气至空气压力为10 MPa时,由

于储气库内壁直接与气体接触,并且由于热传导作用,密封层内侧的温度上升至34.50 $^{\circ}\text{C}$ 左右,局部最高温度达到35.22 $^{\circ}\text{C}$ 。由于玻璃钢密封层具有良好的绝热性能,故其外侧温度上升的幅度比内侧要小,基本维持在30.00 $^{\circ}\text{C}$ 左右,玻璃钢密封层与混凝土衬砌接触面处的温度与密封层内侧的温度基本一致。由于混凝土衬砌的厚度较大(500 mm),热量在混凝土衬砌内的传递过程中迅速衰减,导致混凝土衬砌内外侧温度从30.00 $^{\circ}\text{C}$ 左右逐渐下降到24.30 $^{\circ}\text{C}$ 左右。储气库围岩温度受压缩空气温度变化的影响相对较小,围岩内表面的温度基本维持在24.30 $^{\circ}\text{C}$ 左右;距围岩内表面较远的围岩内部的温度基本维持在20 $^{\circ}\text{C}$ 不变。储气库充放气循环使密封层、混凝土衬砌及围岩的温度逐渐升高,在密封层外围形成了一个调热圈,而且随着充放气循环次数的不断增加,调热圈的范围也在不断地扩大,在30个充放气循环后,调热圈的厚度约为3.1 m。

图5所示为30个充放气循环后储气库测点温度与其到洞壁距离的关系曲线。由图5可知,结构层各测点温度监测数值的变化规律与温度分布云图中温度的分布规律一致。距储气库洞壁表面越近,结构层温度变化越明显,随着距储气库洞壁表面距离的增加,温度变化的幅度逐渐减小,在距洞壁表面一定范围内(0~3 m),围岩温度快速下降至21 $^{\circ}\text{C}$ 左右。在距洞壁表面7 m及更远的区域,由于围岩热传导性能较差,围岩温度变化不大,接近原岩温度,说明此处围岩温度受压缩空气影响较小,可以忽略。

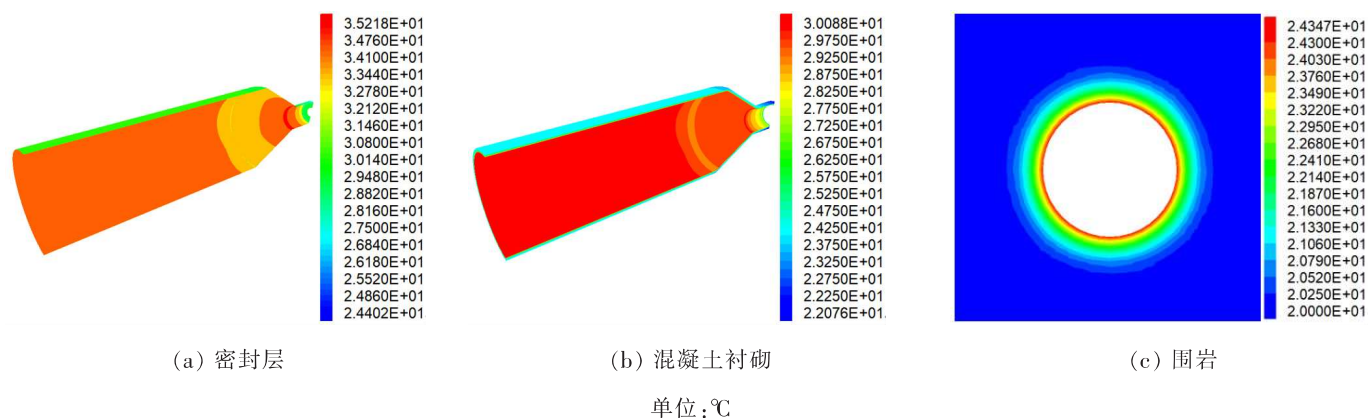


图 4 第 30 次充气至空气压力为 10 MPa 时的温度分布

Fig. 4 Temperature distribution when the air pressure is 10 MPa for the 30th inflation

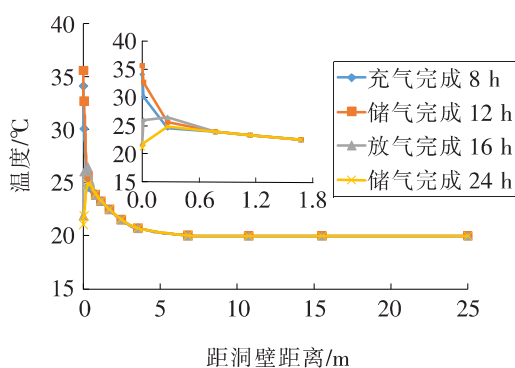


图 5 30 个充放气循环后测点温度与其到洞壁距离的关系曲线

Fig. 5 Relation curves between temperature of monitoring point and distance from tunnel wall after 30 inflation and deflation cycles

3.2 储气库结构应力变形特性

图 6 为第 30 次充气至空气压力为 10 MPa 时储气库衬砌及围岩的第一主应力和第三主应力分布图,图中压应力为负,拉应力为正。由图 6(a)~6(b)可知,当充气至空气压力为 10 MPa 时,储气库混凝土衬砌第一主应力均表现为压应力且数值较大,其内侧的压应力基本保持在 -10.08 MPa 左右,外侧保持在 -9.36 MPa 左右。但在储气库与堵头连接洞前端的左右两侧以及连接洞前端拐角处附近的局部区域出现了应力集中的现象,其第一主应力最大值达到 -11.97 MPa,但仍在混凝土衬砌的抗压极限强度(20.1 MPa)范围之内,所以混凝土衬砌不会发生受压破坏。混凝土衬砌内侧第三主应力表现为压应力,基本保持在 -0.55 MPa 左右;外侧左右两端表现为压应力,上下两端以及与堵头连接的部位存在拉应力区,拉应力基本保持在 0.55 MPa 左右,但在连接洞局部区域拉应力比较大,最大值达到 2.13 MPa,超出了混凝土

土衬砌的抗拉极限强度(2.01 MPa),该区域存在混凝土衬砌拉裂破坏的可能,但受拉范围很小,只集中在连接洞顶底部的外侧部位,所以衬砌结构整体处于安全状态。

由图 6(c)~6(d)可知,当充气至空气压力为 10 MPa 时,储气库围岩的第一主应力均表现为压应力,储气库附近区域围岩的第一主应力较大,基本保持在一 9.24 MPa 左右。储气库洞壁附近两侧围岩的第三主应力均表现为压应力,储气库围岩两侧存在小范围的应力集中区,最大值为 -7.38 MPa;储气库附近上部和底部围岩的第三主应力表现为拉应力,在距顶部和底部大约 2 m 处的围岩出现了应力集中的现象,最大值达到 3.04 MPa,受拉应力小于围岩的极限抗拉强度(4.2 MPa),所以储气库围岩整体能够保持安全稳定。

图 7 所示为 30 个充放气循环后储气库测点位移与其距洞壁距离的关系曲线。图 7 中 A、B 组测点记录的为竖直方向上的位移,C 组测点记录的为水平方向上的位移,图中数据均为位移的大小,不包含方向。由图 7 可知,不论是充气到空气压力为 10 MPa 还是放气到空气压力为 5 MPa,各结构层位移的总体变化规律为:在距储气库内表面较远处,位移较大,随着距离的增加,位移逐渐减小;在距储气库较近处,位移减小得较快。各组测点充气结束时的位移比放气结束时的位移要大,但这两个位移的差值随着距离的增加逐渐减小。由于围岩顶部仅设置了压力边界,未设置位移约束边界,而围岩底部和左右两侧设置了位移约束边界,导致顶部(A 组)位移较底部(B 组)和两侧(C 组)的大。

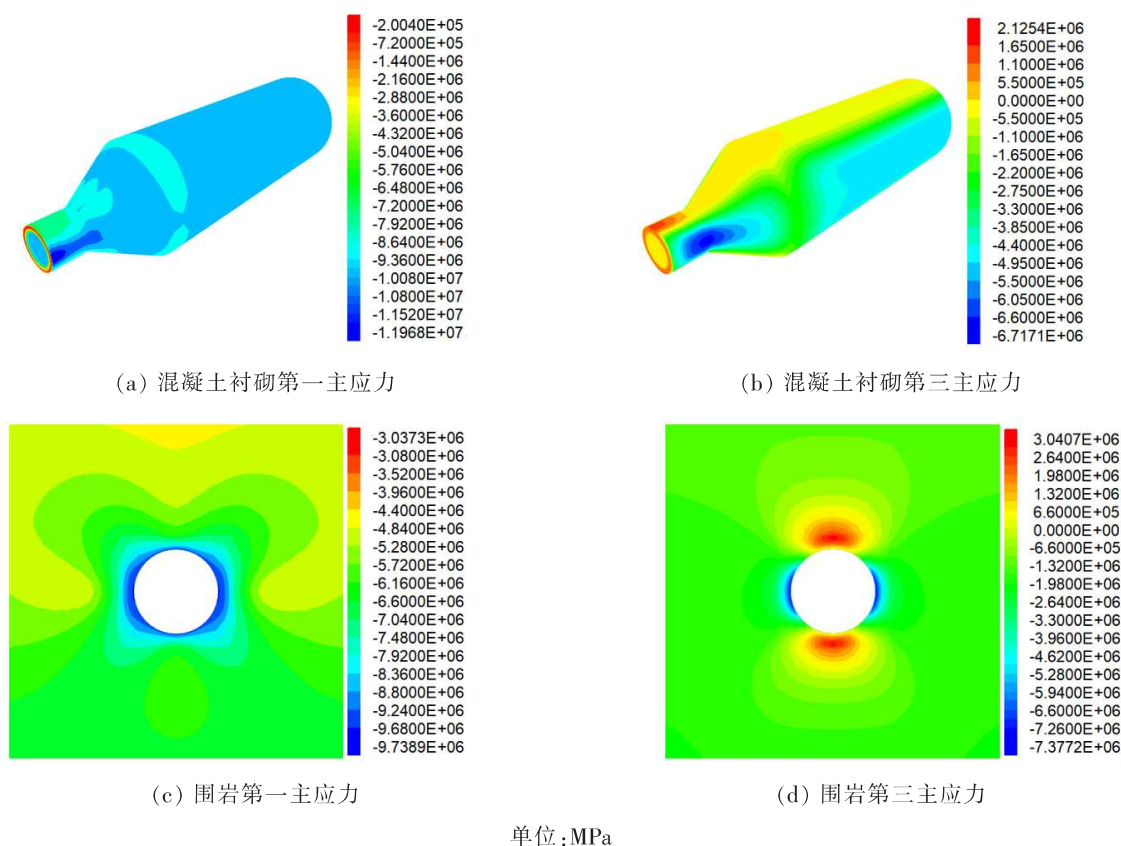


图6 第30次充气至空气压力为10 MPa时各结构的主应力分布

Fig. 6 Distribution of principal stress of each structure when the air pressure is 10 MPa for the 30th inflation

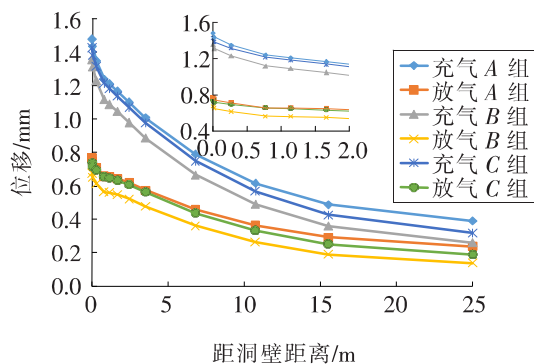


图7 30个充放气循环后测点位移与其到洞壁距离的关系曲线

Fig. 7 Relation curves between displacement of monitoring point and distance from tunnel wall after 30 inflation and deflation cycles

3.3 测点温度、应力及变形的变化过程

图8所示为30个充放气循环中储气库洞顶测点温度的变化过程。由图8可知,在储气库循环充放气过程中,随着压缩空气温度和压力的循环波动,洞壁测点(A_1)和密封层测点(A_2)的温度也呈现出相应的循环波动,其变化规律与压缩空气的变化规律基本一致。由于压缩空气与密封层直接进行对流换热,所以密封层温度受压缩空气温度的影响最显著。距洞壁越近的结构层,其温度变化越明显。混凝土衬砌中的测点(A_3)和围岩

中的测点(A_5)的温度变化存在滞后现象。距洞壁越远,传热阻力越大,围岩温度受到的影响越小,周期性越不明显,温度上升越缓慢。当距洞壁超过7 m后,围岩温度的变化过程线趋于平缓,围岩温度基本不受压缩空气的影响。随着充放气循环次数的增加,距储气库壁面不同距离处测点的温度呈缓慢上升趋势。这是因为在长期充放气循环条件下,由于围岩的热传导作用,压缩空气从储气库洞壁向围岩中传递,每次循环各结构层的热量都有所累积,从而导致各测点温度越来越高。但结构层的温度不可能无限制地升高,所以在循环后期各测点温度的上升趋势趋于平缓,并逐渐达到稳定状态。

图9所示为30个充放气循环中储气库洞顶典型测点竖向位移的变化过程。由图9可知,在储气库循环充放气过程中,密封层、混凝土衬砌和围岩的位移变化过程与储气库内压缩空气的压力和温度的变化过程基本一致,呈现出周期性变化的特点。在充气过程中,储气库内的压力和温度升高,密封层、混凝土衬砌及围岩的位移随之增加;在储气过程中,压力和温度略微下降,位移出现小幅减小;在放气过程中,压力和温度下降,位

移也随之减小。距洞壁较远处围岩中测点(如 A_{12})的位移都呈现出周期性的变化过程,表明密封层、混凝土衬砌和围岩的位移受压缩空气压力变化的影响较大,即距洞壁较远处围岩的位移变化基本上是由空气压力的变化导致的,因为较远处围岩的温度基本上没有变化。随着充放气循环次数的增加,结构层各测点的位移总体上呈现缓慢增加的趋势,在循环后期各测点位移的增加趋势趋于平缓,并逐渐达到稳定状态。

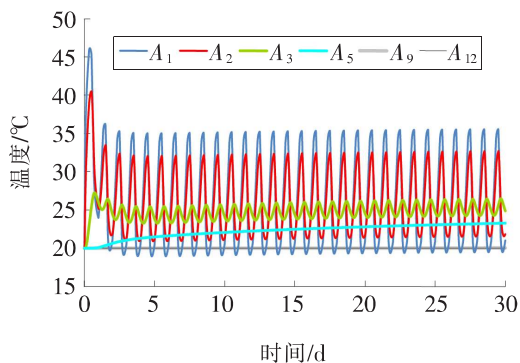


图 8 30 个充放气循环中洞顶典型测点温度的变化过程

Fig. 8 Temperature variation process of typical measuring points on the roof during 30 inflation and deflation cycles

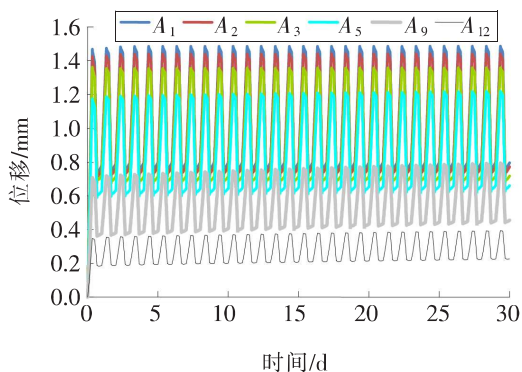


图 9 30 个充放气循环中洞顶典型测点竖向位移的变化过程

Fig. 9 Vertical displacement variation process of typical measuring points on the roof during 30 inflation and deflation cycles

中,压力和温度略微下降,第一主应力也略微减小;在放气过程中,压力和温度下降,第一主应力也随之减小。当充气至空气压力为 10 MPa 时,储气库各结构层第一主应力从内向外逐渐减小。密封层表面测点(A_1)和密封层中测点(A_2)的第一主应力与压缩空气的压力基本相等。距储气库洞壁 7 m 以内结构层第一主应力的周期性变化特性较明显,且第一主应力的绝对值较大,说明储气库内温度和压力的变化主要影响距储气库洞壁 7 m 以内结构层的第一主应力,对距洞壁较远处结构层第一主应力的影响较小。随着充放气循环次数的增加,距储气库壁面不同距离处测点的第一主应力均呈现缓慢增大的趋势,在充放气循环次数增加的后期,其变化达到稳定状态。

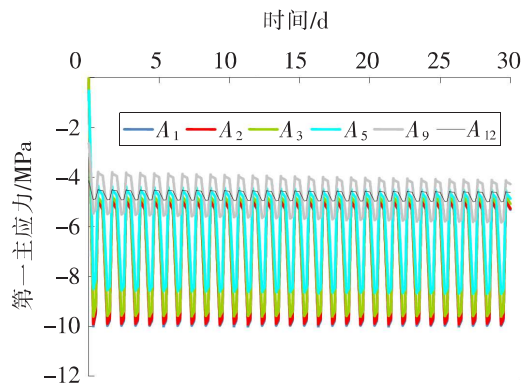


图 10 第 30 个充放气循环时洞顶典型测点第一主应力变化过程

Fig. 10 Change process of the first principal stress at the typical measuring points on the roof at the 30th inflation and deflation cycle

4 结论

针对温度及压力联合循环作用下地下储气库结构层的受力变形问题,本研究结合遂昌地下储气库结构及地质条件,建立储气库三维数值模型,采用热力耦合数值分析方法,研究了储气库在循环充放气条件下各结构层的温度、受力变形特性及变化过程,主要结论有:

1) 充气时,储气库内压缩空气与密封层直接进行热交换,密封层温度上升幅度较大,混凝土衬砌和围岩温度上升幅度较小;放气时,随着气压的逐渐降低,密封层和混凝土衬砌的温度出现不同程度的下降,但储气库附近围岩的温度依然在升高。距储气库洞壁越近,结构层温度变化越明显。

2) 不论是充气还是放气,各结构层位移的总

图 10 所示为 30 个充放气循环中储气库洞顶典型测点第一主应力的变化过程。由图 10 可知,在储气库充放气循环过程中,密封层、混凝土衬砌和围岩第一主应力的变化过程与储气库内压缩空气的压力和温度的变化过程基本一致,呈现出周期性变化的特点。在充气过程中,储气库内的压力和温度升高,第一主应力随之增大;在储气过程

体变化规律为:在距储气库内表面较近处,位移较大,随着距离的增加,位移逐渐减小,且在距储气库内表面较近处,位移减小得较快。储气库各结构层的应力和变形均在允许范围内,储气库围岩稳定性良好。

3) 在充放气循环过程中,靠近洞壁各结构层的温度、位移和应力均呈现周期性的变化特征,且距洞壁越近,变化幅度越大,远离洞壁处围岩温度及力学响应的变化过程明显滞后。随着充放气循环次数的增加,各结构层温度、位移和应力均有轻微增大趋势,但循环后期增大趋势逐渐变缓。

〔参考文献〕

- [1] 万发,蒋中明,唐栋. CAES 储气库设计参数对其热力学特性影响[J]. 储能科学与技术,2021,10(1):370-378.
WANG Fa,JIANG Zhong-ming,TANG Dong,et al. The influence of CAES reservoir design parameters on thermodynamic properties [J]. Energy Storage Science and Technology,2021,10(1):370-378.
- [2] GEISSBÜHLER L,BECATTINI V,ZANGANEH G, et al. Pilot-scale demonstration of advanced adiabatic compressed air energy storage, part 1: plant description and tests with sensible thermal-energy storage[J]. Journal of Energy Storage,2018,17(6):129-139.
- [3] 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.
WANG Guo-hua,ZHANG Xue-lin,LI Zhi, et al. Thermodynamics analysis of salt cavern for compressed air energy storage system[J]. Renewable Energy Resources,2019,37(4):618-624.
- [4] 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.
- [5] 蒋中明,黄毓成,刘澜婷,等. 平江浅埋地下储气实验库力学响应数值分析[J]. 水利水电科技进展,2019,39(6):37-43.
JIANG Zhong-ming,HUANG Yu-cheng,LIU Lan-ting,et al. Numerical analysis of mechanical response of Pingjiang shallow underground pilot cavern for compressed air storage[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2019,39(6):37-43.
- [6] 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(5):250-268.
- [7] 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(2):718-726.
- [8] 蒋中明,唐栋,李鹏,等. 压气储能地下储气库选型选址研究[J]. 南方能源建设,2019,6(3):6-16.
JIANG Zhong-ming,TANG Dong,LI Peng,et al. Research on selection method for the types and sites of underground repository for compressed air storage [J]. Southern Energy Construction,2019,6(3):6-16.
- [9] KIM H M,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.
- [10] 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.
ZHOU Yu,XIA Cai-chu,ZHAO Hai-bin, 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.
- [11] 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.
JIANG Zhong-ming,LI Peng,ZHAO Hai-bin,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.
- [12] 王其宽,张彬,王汉勋,等. 内衬式高压储气库群布局参数优化及稳定性分析[J]. 工程地质学报,2020,28(5):1123-1131.
WANG Qi-kuan,ZHANG Bin,WANG Han-xun,et al. Optimization and stability analysis of layout parameters of lined high-pressure gas storage caverns [J]. Journal of Engineering Geology,2020,28(5):1123-1131.
- [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(2):232-239.
LIU Li-yuan,JIANG Zhong-ming,WANG Jiang-ying,et al. Thermodynamic analysis of compressed air energy storage in a underground rock cavern[J]. Energy Storage Science and Technology,2018,7(2):232-239.