

DOI:10.3880/j.issn.1006-7647.2019.06.006

平江浅埋地下储气实验库力学响应数值分析

蒋中明^{1,2}, 黄毓成^{1,3}, 刘澜婷¹, 赵海斌⁴, 梅松华⁴, 李 鹏⁴

(1. 长沙理工大学水利工程学院, 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;
3. 洞庭湖水环境治理与生态修复湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410114;
4. 中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司, 湖南 长沙 410014)

摘要:根据压气储能电站地下储气库内压缩空气压力和温度的变化特点,采用热-力耦合理论研究了平江浅埋地下储气实验库充放气循环作用下实验库各结构层的温度、应力和变形的空间分布和变化过程,探讨了密封层材料特性对实验库受力特性的影响。结果表明:压缩空气与密封层之间的热交换作用将引起密封层和混凝土内衬温度产生较大变化,而围岩温度变化相对较小;充放气过程中,实验库各结构层应力和位移呈现显著性的周期性变化;密封层材料性能差异对密封层、混凝土衬砌和围岩的受力特性有显著影响,推荐平江浅埋地下储气实验库密封层材料采用玻璃钢。

关键词:压气储能;储气库;热-力耦合;力学响应;密封材料;平江抽水蓄能电站

中图分类号:TK02;TM619 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2019)06-0037-07

Numerical analysis of mechanical response of Pingjiang shallow underground pilot cavern for compressed air storage//JIANG Zhongming^{1,2}, HUANG Yucheng^{1,3}, LIU Lanting¹, ZHAO Haibin⁴, MEI Songhua⁴, LI Peng⁴(1. School of Hydraulic 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; 3. Key Laboratory of Dongting Lake Aquatic Eco-Environmental Control and Restoration of Hunan Province, Changsha 410114, China; 4. Power China Zhongnan Engineering Co., Ltd., Changsha 410014, China)

Abstract: According to the variation features of the compressed air pressure and temperature in the underground cavern of a compressed air energy storage plants, pilot cavern located in Pingjiang was investigated to explore the spatial distribution and variation process of temperature, stress and deformation in each structural component during charging and discharging process using thermo-mechanical coupling theory. The influence of the sealing material performance on the mechanical response of the underground cavern was also discussed. The results show that the temperature field in the sealing layer and concrete inner liner varies significantly due to the heat exchange between the compressed air and the cavern wall during charging and discharging process, while the temperature field in the surrounding rock changes slightly. The stress and displacement of the structural layers fluctuate significantly during charging and discharging process. The difference of the sealing material performance can significantly influence the mechanical response of sealing layer, concrete inner layer and surrounding rock. Fiber reinforced plastics was suggested to be the sealing material for Pingjiang shallow pilot cavern.

Key words: compressed air energy storage; pilot cavern for compressed air storage; thermo-mechanical coupling; mechanical response; sealing material; Pingjiang Pumped Storage Power Station

压气储能(compressed air energy storage, CAES)是一种可大规模储存电力能源的技术,其规模仅次于抽水蓄能。压气储能技术应用前景广阔,具有容量大、储存周期长、经济性能好、安全可靠等优点,近年来在国内外备受关注^[1-2]。该技术的原理为:在用电低谷时,用电网中多余的电能驱动空气压缩机压缩空气并储存在储气装置内,以备高峰负荷时用于发电^[3]。

地下储气库是大规模压气储能电站储气装置的最佳选择。地下储气库可以利用已开采完的贮气和贮油的地质构造、自然形成的含水岩层、已开采或专门开凿的盐岩溶腔、硬岩中人工开挖的地下洞室^[4]等建造储气装置。前3种形式的储气装置都依赖于特殊的地质构造,限制了压气储能电站的选址。对于有建设需求却没有合适地质条件的地区,在硬质

岩石中开挖地下洞室作为地下储气库为建设压气储能电站提供了可能。夏才初等^[5]研究了不同埋深(200 m、300 m、500 m)条件下的压气储能洞室围岩的受力和变形特征,得到了Ⅱ级围岩埋深为300 m的储气洞室在10 MPa的内压作用下稳定性较好的结论。Kim等^[6-7]研究了石灰岩地层中浅埋(埋深100 m)地下储气实验库受力特性,论证了硬岩地层(石灰岩)中建设地下储气库的可行性。

本文针对我国拟建的平江浅埋地下储能实验库(以下简称“实验库”)的受力特性问题,基于热-力耦合理论,采用热-力耦合数值仿真分析方法,探索实验库在电站运行工况下的围岩、衬砌及密封层结构应力及变形空间分布以及变化过程,分析密封层材料变化(热力学特性不同)对实验库力学特性的影响,可为平江实验库设计及试验方案选定提供参考。

1 热-力耦合分析理论

研究^[8-9]表明,压缩空气被压入地下储气库后会出现温度大幅度上升的情况,因此,地下储气库围岩及衬砌密封层应力与变形分析需要考虑温度应力和储气库内压共同作用的影响。为了全面认识平江实验库密封层、混凝土衬砌及围岩在高压压缩空气和温度场共同作用下的力学响应特性,采用热-力耦合分析理论对实验库各结构层应力和变形进行分析。热-力耦合分析理论^[10-12]的能量平衡方程、热传导方程和热应力方程分别为

$$q_{i,i} + q_v = \rho c_v \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

$$q_i = -k T_i \quad (2)$$

$$\Delta \sigma_{ij,th} = 3K \alpha_i \Delta T \delta_{ij} \quad (3)$$

式中: $q_{i,i}$ 为热流量向量梯度; q_v 为体积热源强度; q_i 为热流量 q 在 i 方向的导数; ρ 为连续介质干密度; c_v 为比定容热容; T 为介质温度; T_i 为 T 在 i 方向的导数; t 为时间; k 为热导率; $\Delta \sigma_{ij,th}$ 为热应力增量; K 为介质体积模; α_i 为线性热膨胀系数; δ_{ij} 为Kronecker函数。

考虑热应力影响的固体介质热-力耦合应力方程为

$$\Delta \sigma_{ij} = \Delta \sigma_{ij,M} + \Delta \sigma_{ij,th} \quad (4)$$

式中: $\Delta \sigma_{ij}$ 为总应力增量; $\Delta \sigma_{ij,M}$ 为非温度荷载引起的应力增量。

2 储气库压力及温度变化过程分析

储气库内压缩空气的热力学变化过程直接影响着储气库结构力学及热传导边界变化情况。Kushnir等^[8]提出的储气库压缩空气温度及压力随

充放气过程变化的计算公式如下:

$$V \frac{dp}{dt} = \dot{m}_{in}(t) + \dot{m}_{out}(t) \quad (5)$$

$$V \rho c_v \frac{dT}{dt} = \dot{m}_{in}(t) \left(h_i - h + ZRT - \rho \left. \frac{\partial u}{\partial \rho} \right|_T \right) + \dot{m}_{out}(t) \left(ZRT - \rho \left. \frac{\partial u}{\partial \rho} \right|_T \right) + \dot{Q} \quad (6)$$

$$p = Z \rho R T \quad (7)$$

$$\dot{Q} = \lambda_c A_c (T_{rw} - T) \quad (8)$$

式中: V 为洞室体积; ρ 为洞室内压缩空气密度; $\dot{m}_{in}(t)$ 、 $\dot{m}_{out}(t)$ 分别为充气速率函数和放气速率函数; T 为洞室内压缩空气温度; p 为洞室气体压力; Z 为空气压缩因子; R 为空气气体常数; h 为洞室气体焓; h_i 为注入气体焓; u 为洞室气体内能; $\dot{Q}$ 为对流换热速率; λ_c 为洞室中空气与围岩热交换系数; A_c 为洞室表面积; T_{rw} 为围岩温度; t 为计算时间。

由于式(5)~(8)均为时间差分的函数,本文采用与文献[13]相同的方法利用FLAC3D软件平台提供的FISH语言进行编程并求解压缩空气温度与压力变化过程。

3 数值模型及计算过程

平江实验库位于湖南省平江抽水蓄能电站地下厂房勘探平硐(PD4)内。洞室围岩主要由花岗岩、花岗片麻岩组成。通过对勘探平硐围岩工程地质类别的统计分析,围岩以Ⅱ、Ⅲ类为主;平硐内局部地段(洞深532~633 m处)围岩由无蚀变、完整的微风化~新鲜岩体及坚硬岩、结构面不发育的岩石组成,可归属Ⅰ类围岩。实验库埋深110 m,位于勘探平硐内洞深0+600 m处。经对比研究后确定的实验库开挖洞径为4.0 m,长度5.0 m,混凝土衬砌厚度0.5 m,堵头长度4.0 m。

3.1 计算网格

数值模型坐标原点选择在实验库底部(水平方向)中心点上,模型 x 方向长120 m, y 方向宽60 m, z 方向高度120 m。网格离散时对原岩(未扰动区)、围岩扰动区、堵头、混凝土衬砌和密封层进行分区建模。数值模型计算网格(图1)数量为198 584,节点数

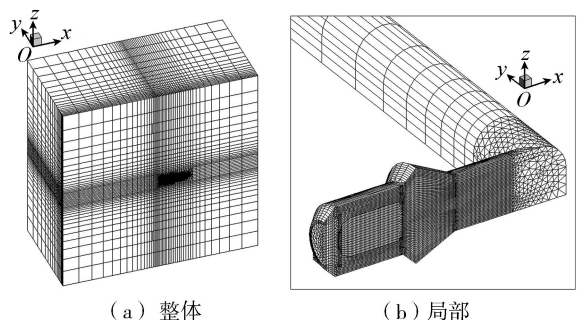


图1 实验库三维计算网格

量为131559。数值模型分析监测点位置如图2所示,其中C1为洞壁表面测点,C2为密封层中间测点,C4为混凝土衬砌测点(距离洞壁0.28 m),C7和C10是围岩中的测点,至洞壁距离分别为3.0 m和20.0 m。

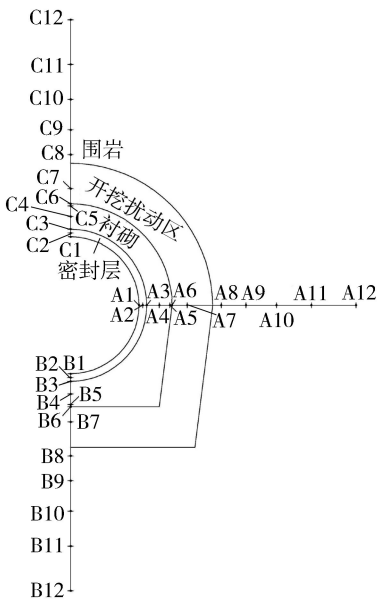


图2 测点位置示意图

3.2 本构模型及边界条件

实验库热-力耦合计算采用FLAC3D软件,该软件具有良好的二次开发工具和热-力耦合计算分析能力。

力学本构模型采用摩尔-库伦弹塑性本构模型,热传导分析模型采用各向同性热传导模型。

力学边界:模型铅直外边界及底部为位移约束边界,顶部外边界为已知压力边界,压力值按顶部边界埋深50 m计算,其值为1.2 MPa。实验库内表面为动态面力边界。

热传导分析边界:模型四周为绝热边界,实验库内表面为动态对流换热边界。

实验库运行周期按1 d考虑。一个循环内充、放气及储气持续时间:0:00—8:00为充气阶段、8:00—12:00为高压储气阶段、12:00—16:00为放气阶段、16:00—24:00为低压储气阶段^[14]。实验库内压力和温度边界条件采用文献[15]提出的方法进行处理。针对式(5)~(8),采用文献[13,15]提出的压缩空气热力学差分计算方法得到的平江实验库温度和压力变化过程线如图3所示。

3.3 初始条件及计算参数与计算步骤

a. 初始条件:初始应力场按自重应力计算;试验区岩体初始温度为15℃。

b. 力学计算参数采用地质报告推荐的力学参数,见表1;热传导分析参数见表2。

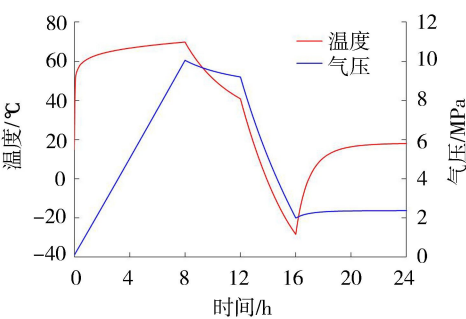


图3 实验库1次充放气温度及压力过程线

表1 力学参数

材 料	密度/ (kg·m ⁻³)	变形 模量/ GPa	泊松比	黏聚力/ MPa	内摩 擦角/ (°)	抗拉 强度/ MPa
未扰动岩体	26	18	0.2	1.5	50	2
扰动岩体	25.5	12.6	0.3	0.8	38	1.5
C30 混凝土	25	30	0.167	3.08	55	2.01
C35 混凝土	25	35	0.2	3.56	56	2.21
玻璃钢	20	2.9	0.22	1.5	30	130
橡 胶	9.2	0.008	0.45			18
钢 板	78.3	200	0.26			375

表2 热传导分析参数

材 料	热导率/ (W·(m·K) ⁻¹)	比热容/ (J·(kg·K) ⁻¹)	线膨胀系数/ 10 ⁻⁵ K ⁻¹	传热系数/ (W·(m ² ·K) ⁻¹)
未扰动岩体	3	920	1.20	
扰动岩体	3	920	1.20	
C30 混凝土	1.74	800	1.00	6
C35 混凝土	3	920	1.00	6
玻璃钢	0.4	920	0.54	5
橡 胶	0.09	1940	48.00	17.5
钢 板	45	460	1.70	50

c. 计算步骤:①初始自重应力场计算,模型顶部施加1.2 MPa压力,反映上覆岩层对自重应力的影响;②勘探平洞及实验库开挖施工模拟,计算开挖卸荷效应引起的应力重分布;③衬砌、密封层及堵头施工模拟;④实验库充、放气过程模拟,充、放气过程模拟100个循环,即100 d,热-力耦合计算。

4 实验库结构受力特性分析

如图3所示,实验库在一定的充气速率下,经过8 h充气后压缩空气的压力值可达到控制设计压力值10 MPa;与该压力对应的压缩空气温度最大值约为69℃。在连续4 h抽气发电工况下,如果对实验库不进行热量补偿,压力下降将导致压缩空气进入低温状态,温度将降低至-28℃左右。对硬岩储气库,低温工况也是可行工况^[11]。

4.1 结构温度空间分布及变化过程

压缩空气压力和温度作用是实验库围岩、衬砌及密封层等结构产生附加应力和变形的驱动因素。图4和图5分别为充放气1次和100次条件下温度等值线分布范围。由图4可知,充气结束时,压缩空

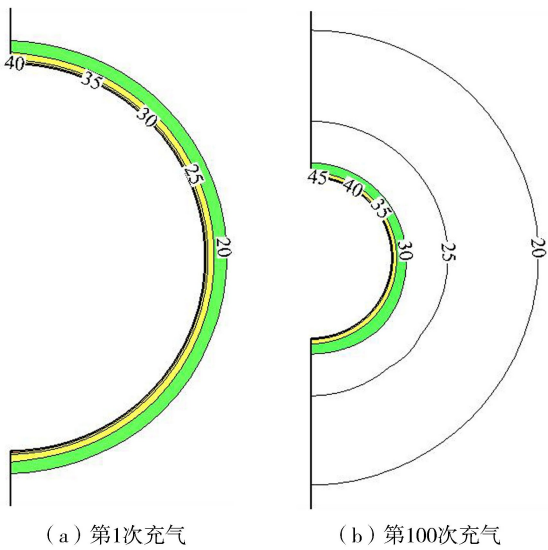


图4 充气结束时温度等值线(单位:℃)

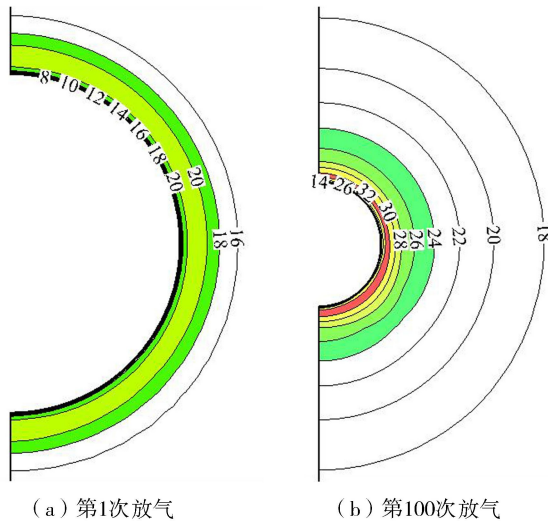


图5 放气结束时温度等值线(单位:℃)

气与密封层之间的对流换热导致密封层表面温度升高至43℃左右。由于玻璃钢密封层、衬砌及围岩的热传导性能相对较弱,1次充放气条件下,衬砌和围岩中的温度上升幅度不大,热传导影响范围也有限。随着充放气循环次数的增加,围岩及结构层中各点的温度呈上升趋势,经过100个充放气循环后,密封层最高温度可达到50℃左右。图5表明第1次放气结束时,密封层表面的温度最低降至4.3℃,低于初始温度(15℃)。尽管放气结束时压缩空气温度下降至-28℃左右,但由于密封层及围岩结构蓄热及反向补热作用,密封层表面的温度并未降低到0℃以下。经过100次充放气作用后密封层表面的温度约为13.2℃,较第1次放气结束时的温度有较大幅度的升高,其原因是密封层在充气阶段存储的热量随着充放气次数的增加而增加,从而导致温度越来越高。第一次充放气循环后密封层承受的温差幅度达到了38.7℃,100次循环后,密封层承受的温

差约为36.8℃。这种大幅度的温差重复作用,对密封层材料的长期力学性能及密封性能都是不利的,工程实践中应予以重视。

图6为充放气5次和100次过程中洞顶测点温度变化过程线。图6(a)表明,洞壁和密封层测点(C1和C2)温度变化过程与压缩空气温度变化过程基本一致。混凝土衬砌测点(C4)和围岩测点(C7和C10)温度变化呈现出不同程度的滞后性。远离洞壁的测点(C7和C10)温度呈现缓慢上升趋势,周期性变化特性不明显。图6(b)表明,随着充放气次数的增加,测点温度总体上呈现逐渐升高的趋势;经过约80次循环后,各测点温度的上升趋势趋于平缓,表明压缩空气与洞壁密封层之间的热交换和围岩向远场热传导之间基本达到热平衡状态。

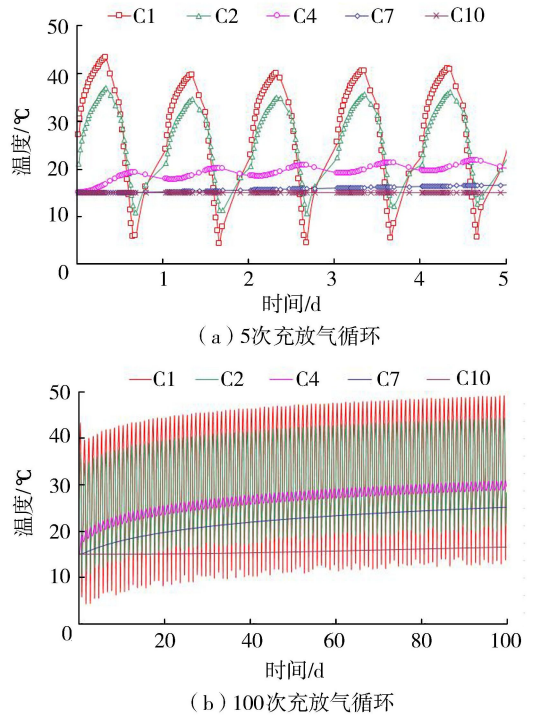


图6 洞顶测点温度变化过程

4.2 结构变形空间分布及变化过程

图7为实验库压力为10 MPa时的径向位移等值线,在第1次充气至10 MPa后,玻璃钢密封层表面处的最大变形量约为3.3 mm;经过100次充放气循环压力再次达到10 MPa时,玻璃钢密封层表面的最大变形量增加至3.4 mm,增幅很小。这表明充放气循环次数的增加对围岩变形空间分布总体影响不大。

图8为洞顶测点的位移变化过程线。由图8(a)可知,位于密封层、混凝土衬砌以及围岩中的测点在循环压力和变温作用下产生了周期性的变形。远离洞壁处(测点C10)的围岩变形也呈现出了显著周期性变化。鉴于测点C10处温度变化并不明显(图6),可以推断测点C10变形为围岩在压缩空气

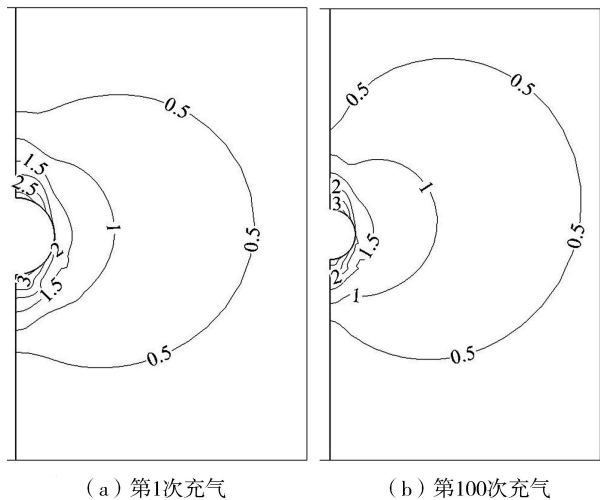


图 7 压力为 10 MPa 时径向位移等值线 (单位: mm)

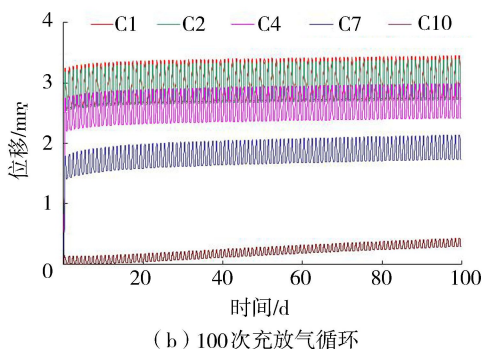
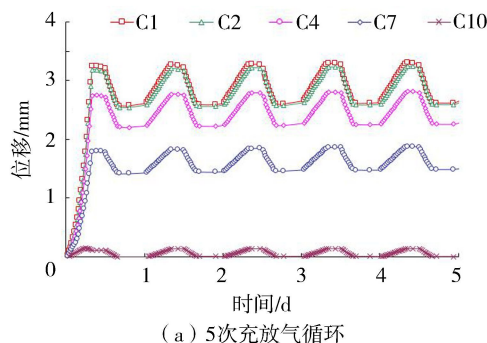


图 8 洞顶测点径向位移变化过程

压力作用下产生的变形,温度改变对该部位的变形影响相对较弱。图 8(b)揭示了随着充放气循环次数的增加,实验库密封层、衬砌和围岩变形在前期呈现逐渐增大的趋势,经过 40 次左右的循环后靠近洞壁的测点变形过程也趋近于稳定。

4.3 结构主应力空间分布及变化过程

图 9 为储气库充气至 10 MPa 时的第一主应力等值线。由图 9(a)可知,在 10 MPa 内压作用下,实验库各结构层第一主应力由内向外逐渐减小。由于实验库容积较小(约 40 m^3),围岩受到压缩空气内压作用力的影响范围相对较小。图 9(b)揭示了经过 100 次充放气循环,内压再次上升至 10 MPa 后,围岩中产生的应力增量范围有所增大。应力影响范围的扩大主要与温度影响范围的逐步扩大有关(温

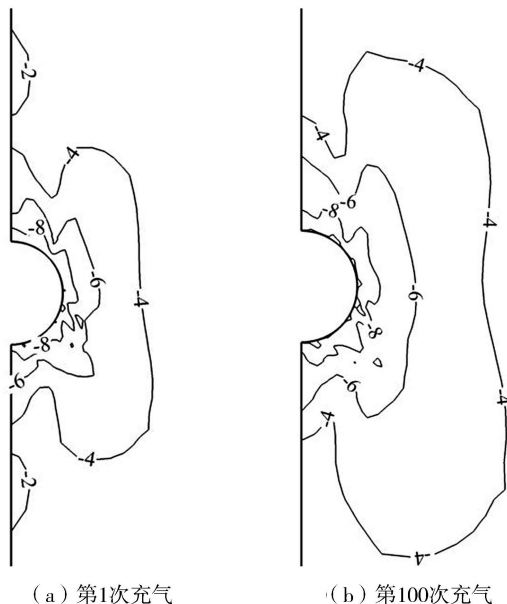


图 9 充气至 10 MPa 时第一主应力等值线 (单位: MPa)
度应力增量)。

图 10 为洞顶测点第一主应力变化过程线。由图 10(a)可知,密封层、混凝土衬砌及围岩中测点第一主应力都呈现出周期性的变化过程,并与实验库的压缩空气压力变化过程保持基本一致。密封层中测点(C2)第一主应力与压缩空气压力基本相同(密封层表面测点 C1)。图 10(b)表明,各测点第一主应力随着充放气循环次数的增加呈现出轻微程度的增大趋势,在后期基本达到稳定变化状态。

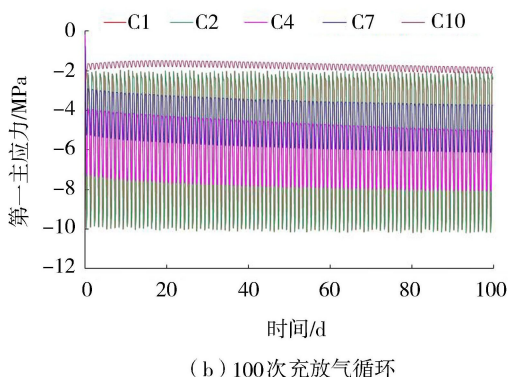
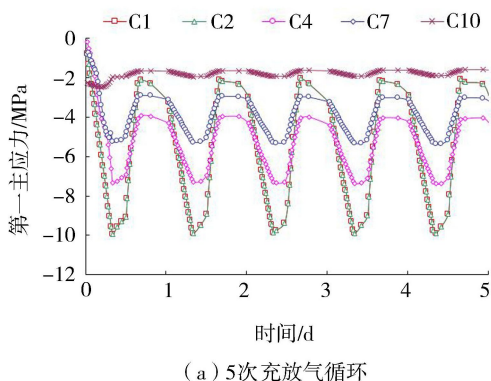


图 10 洞顶测点第一主应力变化过程

4.4 密封层材料类型对实验库力学响应的影响

目前国外对硬岩地层中的岩穴型储气库密封材料大多采用钢板^[6]。采用钢板作为密封层材料存在施工难度大、造价高,且在湿空气作用下容易腐蚀等不足,优点是钢板材料本身几乎不透气,密封性能好。玻璃钢和橡胶板同样具有密封性好的优点,但其施工难度相对较小,造价也较为低廉。为了解密封层材料类型变化对实验库结构受力特性的影响,对密封层材料分别采用玻璃钢、橡胶及钢板进行传热及受力计算分析。3 种类型密封层材料热力学及力学性能参数对比见表 1 和表 2。表 3 为经历 100 次充放气循环后,压力再次上升至 10 MPa 时测点温度、位移和应力。

表 3 100 次充放气循环后测点温度、位移和应力

测点	温度/℃			位移/mm		
	玻璃钢	橡胶	钢板	玻璃钢	橡胶	钢板
C1	46.00	64.92	39.57	2.01	10.68	1.19
C2	41.80	48.33	39.55	2.01	6.47	1.19
C4	29.40	26.89	29.72	1.74	1.77	1.09
C7	25.09	23.45	25.02	1.47	1.47	0.91
C10	16.48	16.24	16.48	0.90	0.87	0.58

测点	第一主应力/MPa			第三主应力		
	玻璃钢	橡胶	钢板	玻璃钢	橡胶	钢板
C1	-10.09	-10.21	-34.49	1.82	-0.84	104.80
C2	-10.04	-10.19	-35.21	-1.75	-0.83	100.60
C4	-7.87	-7.86	-5.74	-3.12	-0.28	-3.06
C7	-6.84	-6.74	-5.40	-4.45	-0.41	-3.99
C10	-2.63	-2.56	-2.47	-1.29	-0.12	-1.20

由表 3 可知,经过 100 次充放气循环后压力达到 10 MPa 时,密封层材料为玻璃钢、橡胶、钢板时密封层内表面上测点 C1 温度分别为 46.0℃、64.92℃ 和 39.57℃,混凝土衬砌中的测点 C4 温度分别为 29.4℃、26.89℃ 和 29.72℃,围岩中的测点 C10 温度分别为 16.48℃、16.24℃ 和 16.48℃。密封层材料的传热系数及热导率不同导致密封层表面温度出现了较大差异。在热传导性能差异性的综合影响下,混凝土衬砌和围岩测点温度差异相对较小。由此可见,密封层材料不同对混凝土衬砌及围岩温度场的影响相对较小。

经过 100 次充放气循环后,密封层材料为橡胶时,实验库内表面(测点 C1)径向位移最大(10.68 mm);密封层材料为玻璃钢和钢板时,密封层测点径向位移较小,分别为 2.01 mm 和 1.19 mm。密封层材料为玻璃钢和橡胶时,混凝土衬砌(测点 C4)变形基本相同,分别为 1.74 mm 和 1.77 mm;密封层材料为钢板时,由于钢板弹性模量比混凝土和围岩弹性模量大了 1 个数量级,钢板分担了较大比例的内压,因此混凝土衬砌变形量相对较小,约为

1.09 mm。密封层材料为玻璃钢和橡胶时,围岩测点 C10 变形量较为接近,分别为 0.90 mm 和 0.87 mm;同样,由于钢板分担了更多的内压,测点 C10 围岩变形量也相对更小,为 0.58 mm。

经过 100 次充放气循环后,3 种密封层材料各测点的第一主应力值比较接近,而密封层测点的第三主应力值差异性较大。密封层材料为橡胶时,密封层测点第三主应力最小,为-0.84 MPa,为压应力;这种应力分布特点与橡胶良好的变形能力相适应。密封层材料为钢板时,密封层测点第三主应力最大,为 104.8 MPa,为拉应力。钢板密封层第三主应力较第一主应力大幅增加的原因与温度应力有关。根据材料热胀冷缩原理,环向应变增量主要与温度变化量相关,尽管密封层材料为钢板时密封层表面测点的最高温度只有 39.57℃,温升值约为 24.57℃,但由于钢板密封层的弹性模量很大(约 200 GPa),故钢板中的环向应力较大。密封层材料为玻璃钢时,密封层测点第三主应力 1.82 MPa,为拉应力。由表 1 可知,玻璃钢的抗拉强度达到了 130 MPa,因此玻璃钢不会被拉坏。混凝土衬砌和围岩第一和第三主应力均为压应力。

在压气储能电站运营过程中,不断变化的洞室温度和内压对密封层的耐久性能也是一种考验。

5 结 论

a. 压缩空气与实验库密封层之间的热交换效应引起密封层温度大幅度升高,混凝土及围岩温度上升幅度相对较小。在抽气发电工况下,密封层温度将急剧降低至初始温度之下,围岩依然保持温升状态。

b. 在循环压力及温变作用下,实验库衬砌及围岩结构的位移及应力呈现显著的周期性变化特点;3 m 范围内围岩(测点 C7)温度上升幅度相对较大,因此围岩应力和变形是温度应力和压缩空气内压共同作用的结果,3 m 以外围岩温度变化小,围岩位移和应力几乎不受温度变化的影响。

c. 密封层材料不同对密封层、混凝土衬砌和围岩的温度、应力和位移均有较大程度的影响,因此,在压气储能电站运营过程中需要考虑密封层材料特性的影响。综合各密封层材料的优缺点及受力特性,推荐平江实验库密封层材料采用玻璃钢。

参考文献:

[1] 余耀,孙华,许俊斌,等. 压缩空气储能技术综述[J]. 装备制造机械, 2013 (1): 68-74. (YU Yao, SUN Hua, XU Junbin, et al. Technical review of compressed air energy

storage(CAES)[J]. Equipment Machinery,2013(1):68-74. (in Chinese))

[2] SUCCAR S, WILLIAMS R H. Compressed air energy storage: theory, resources, and applications for wind power[R]. Princeton:Princeton Environmental Institute, 2008:81.

[3] CHEN Laijun, ZHENG Tianwen, MEI Shengwei, et al. Review and prospect of compressed air energy storage system[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy,2016,4(4):529-541.

[4] GUO Chaobin, PAN Lehua, ZHANG Keni, et al. Comparison of compressed air energy storage process in aquifers and caverns based on the Huntorf CAES plant [J]. Applied Energy,2016,181:342-356.

[5] 夏才初,张平阳,周舒威,等. 大规模压气储能洞室稳定性和洞周应变分析[J]. 岩土力学,2014(5):391-1398. (XIA Caichu, ZHANG Pingyang, ZHOU Shuwei, et al. Stability and tangential strain analysis of large-scale compressed air energy storage cavern[J]. Rock and Soil Mechanics,2014(5):391-1398. (in Chinese))

[6] 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]. Apply Energy,2012,92: 653-667.

[7] 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(3):71-81.

[8] 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.

[9] 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.

[10] 徐国宾,练继建. 流体最小能耗率原理的热力学基础 [J]. 水利水电科技进展,2008,28(5):16-20. (XU Guobin, LIAN Jijian. Principle of the minimum rate of energy dissipation for fluid based on the theory of thermodynamics[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2008,28(5):16-20. (in Chinese))

[11] 蒋中明,李双龙,冯树荣,等. 向家坝水电站左岸近坝边坡抬升变形数值模拟[J]. 水利水电科技进展,2018,38(4):64-69. (JIANG Zhongming, LI Shuanglong, FENG Shurong, et al. Numerical simulation of uplift deformation of left bank slope near dam of Xiangjiaba Hydropower Station[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2018,38(4):64-69. (in Chinese))

[12] 蒋中明,王庆,秦卫星. 孔隙介质渗透力的细观数值解析 [J]. 水利水电科技进展,2015,35(4):35-38. (JIANG Zhongming, WANG Qing, QIN Weixing. Numerical interpretation of seepage force in porous media based on micromechanics[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2015,35(4):35-38. (in Chinese))

[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 Liyuan, JIANG Zhongming, WANG Jiangying, et al. Thermodynamic process of compressed air in underground rock cavern of compressed air energy storage plant[J]. Energy Storage Science and Technology,2018,7(2):232-239. (in Chinese))

[14] 蒋中明,刘澧源,李双龙,等. 压气储能平江试验库受力特性数值研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版),2017,14(4):62-68. (JIANG Zhongming, LIU Liyuan, LI Shuanglong, et al. Numerical study on mechanical characteristics of the pingjiang pilot cavern for compressed air energy storage[J]. Journal of Changsha University of Science and Technology (Natural Science), 2017, 14(4):62-68. (in Chinese))

[15] 蒋中明,刘澧源,赵海斌,等. 地下储气库热力耦合数值分析动态边界条件研究[J]. 岩土力学,2019,40(3):1-9. (JIANG Zhongming, LIU Liyuan, ZHAO Haibin, et al. Study on dynamic boundary conditions for thermo-mechanical coupling analysis of underground gas storage cavern[J]. Rock and Soil Mechanics,2019,40(3):1-9. (in Chinese))

(收稿日期:2018-11-13 编辑:熊水斌)

+++++

(上接第 16 页)

[26] 丁晶,邓育仁. 随机水文学[M]. 成都:成都科技大学出版社. 1988.

[27] 鲍振鑫,刘九夫,张建云. 年最大洪峰流量的 P-Ⅲ型分布拟蒙特卡罗随机模拟研究[J]. 水文,2009,29(6):33-36. (BAO Zhenxin, LIU Jiufu, ZHANG Jianyun. Study on stochastic simulation annual maximum peak discharge of P-Ⅲ distribution based on the Quasi-Monte Carlo Method [J]. Journal of China Hydrology, 2009, 29(6):33-36. (in Chinese))

[28] 邹全,王国亚,贺斌,等. 1957—2010 年天山玛纳斯河流域夏季径流及洪水过程对极端气候事件的响应 [J]. 冰川冻土,2013,35(3):733-740. (ZOU Quan, WANG Guoya, HE Bin, et al. Responding of summer runoff and flood processes to extreme climate events in Manas River Basin, Tianshan Mountains during 1057-2010[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(3):733-740. (in Chinese))

[29] 高波,王银堂,胡四一. 水库汛限水位调整与运用 [J]. 水科学进展,2005,16(3):326-333. (GAO Bo, WANG Yintang, HU Siyi. Adjustment and application of the limited level of reservoirs during the flood seacon[J]. Advances in Water Science, 2005, 16(3):326-333. (in Chinese))

(收稿日期:2018-06-17 编辑:郑孝宇)

+++++

水利水电科技进展,2019,39(6) Tel:025-83786335 E-mail:jz@hhu.edu.cn http://jour.hhu.edu.cn

• 43 •