

气垫式调压室热力学特性及其对围岩应力变形的影响

蒋中明^{1,2}, 邓自源¹, 唐 栋^{1,3}, 万 发¹, 欧阳钰榕¹

(1. 长沙理工大学水利工程学院, 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;
3. 长沙理工大学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)

摘要: 为了解气垫式调压室气室内压缩气体温度和压力变化规律及其对调压室围岩的应力变形特性的影响, 基于水位波动方程和能量守恒方程, 提出了考虑传热影响的调压室压缩空气热力学过程的计算模型, 并进行合理性分析。采用裂隙岩体单向热力耦合数值方法, 将调压室内空气的压力和温度作为瞬时变化边界条件, 对调压室围岩的应力变形特性进行了深入分析。结果表明: 在调压运行工况条件下, 调压室内的空气压力和温度将发生大幅度波动变化, 进而会导致围岩温度也出现相应的改变, 且围岩温度呈现出显著的不均匀分布特点; 节理裂隙处的岩石温度变化相对较大, 且出现了较大的拉应力。

关键词: 气垫式调压室; 压缩空气; 热力学过程; 节理裂隙; 受力特性

中图分类号: TV732.5⁺6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7647(2021)06-0058-07

Study on thermodynamic characteristics of an air cushion surge chamber and its influence on stress and deformation of surrounding rock//JIANG Zhongming^{1,2}, DENG Ziyuan¹, TANG Dong^{1,3}, WAN Fa¹, OUYANG Yurong¹ (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 University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: To understand the variation process of air temperature and pressure in an air cushion surge chamber and its influence on the stress and deformation characteristics of the surrounding rock, based on the water level fluctuation equation and the energy conservation equation, a thermodynamic model for the compressed air in the surge tank considering the effect of heat transfer between air and surrounding rock was proposed, and the rationality of the model was validated. With the thermo-mechanical coupling numerical method of fractured rock mass, the pressure and temperature of the air in the surge chamber were taken as the instantaneous change boundary conditions for numerical simulation, and the stress and deformation characteristics of the surrounding rock of the surge chamber were analyzed. The results show that under the operating conditions of the surge tank, the air pressure and temperature in the surge chamber can fluctuate considerably, resulting in the surrounding rock temperature change accordingly. The temperature distribution of the rock behaves significantly uneven characteristics. The temperature at the joints and fissures has relatively large variation, and larger tensile stress occurs.

Key words: air cushion surge chamber; compressed air; thermodynamic process; joints and fissures; mechanical characteristics

气垫式调压室作为一种性能优越的水锤和涌浪控制设施,相较于常规调压室,在交通、环境以及投资等方面更具有优势^[1-2]。电站在变负荷工况下会发生水锤现象,调压室水面上下波动,气室气体因此不断膨胀、收缩,压缩空气温度和压力发生循环升降变化^[2-3]。调压室内压缩空气压力和温度的变化不

但影响到调压室的水力特性^[4],同时也会改变围岩的应力变形状态,进而影响围岩的稳定性。

目前国内外关于气垫式调压室的研究重点主要集中在调压室的水位变化规律和压力变化过程等水力过渡过程特性方面^[5-7],对水位波动过程中调压室内压缩空气的温度变化较少关注。实际上空气的温

度也随着压力的改变而变化,并将影响到围岩和密封层等结构的受力和变形状态^[8-11]。为分析压缩空气热力学过程对调压室围岩应力和变形的影响,需要准确获得调压室水位变化条件下压缩空气的压力及温度的动态变化过程,为此,笔者以考虑传热条件下的热力学控制方程为基础,根据气垫式调压室水位波动变化特点,建立适用于气垫式调压室的压缩空气热力学分析模型,并利用所建立的模型计算调压室内的空气压力和温度变化过程,进而将空气压力和温度作为调压室围岩应力变形分析的边界条件,对气垫式调压室围岩在瞬态热传导和压力变化工况条件下的受力特性进行研究。

1 气垫式调压室压缩空气热力学模型

1.1 气垫式调压室水位波动方程

水电机组突然甩负荷工况下,其流量由 Q_0 突减至 0,以调压室初始水位为基准水位,建立气垫式调压室压力变化分析的运动方程、连续性方程、气体状态方程^[3]分别如下:

$$p_0 = p + \alpha v |v| + \beta \left(\frac{F}{f} \right)^2 \left| \frac{dz}{dt} \right| \left(\frac{dz}{dt} \right) + \frac{L}{g} \frac{dv}{dt} + z \tag{1}$$

$$fv + F \frac{dz}{dt} = 0 \tag{2}$$

$$p_0 l_0^n = p (l_0 - z)^n \tag{3}$$

式中: L 、 f 、 v 分别为引水隧洞的长度、断面面积和断面流速; F 为调压室水平断面面积; p_0 、 l_0 分别为机组在额定工况下,初始时刻 $t=0$ s 时气垫式调压室内气体初始压力和气室初始高度; p 为任意时刻气垫式调压室内气体压力; α 、 β 分别为引水隧洞水头损失系数和阻抗孔水头损失系数; n 为气体多方指数; t 为时间; z 为水位; g 为重力加速度。

气垫式调压室水位波动^[12] 建议方程如下:

$$z = A \cos \varphi \tag{4}$$

$$A = \frac{A_0}{1 + \frac{4w}{3\pi}(1 + \eta) \frac{gf}{LF} h_{w0} \left(\frac{F}{fv_0} \right)^2 A_0 t} \tag{5}$$

$$\varphi = wt + \varphi_0 \tag{6}$$

$$A_0 = \sqrt{\left(\frac{h_{w0}}{\sigma_0} \right)^2 + \left(\frac{fv_0}{Fw} \right)^2} \tag{7}$$

$$\varphi_0 = \arccos \left(\frac{h_{w0}}{A_0 \sigma_0} \right) + \pi \tag{8}$$

其中

$$w = \sqrt{\sigma_0 \frac{gf}{LF}}$$

$$\sigma_0 = 1 + \frac{np_0}{\rho g l_0} \quad \eta = \beta / \alpha \quad h_{w0} = \alpha v_0^2$$

式中: ρ 为水的密度; v_0 为初始时刻引水隧洞中的初始流速; A 、 φ 分别为水位偏差值和相位; A_0 、 φ_0 分别为初始时刻水位偏差值和相位。

1.2 气垫式调压室空气压力及温度计算方程

利用式(1)至式(4)得到调压室内空气压力时,没有考虑空气压缩引起的温度变化对压力的影响。研究表明调压室内的空气温度和压强的变化过程具有高度复杂的相关性^[13-16]。为获得调压室内水位变化条件下空气压力和温度计算的新方法,参考压气储能地下储气库内压缩空气热力学过程的分析方法^[14],建立考虑空气与围岩和水体间的热量相互传递影响的气垫式调压室的压缩空气温度和压力计算模型。根据热力学第一定律,调压室内部空气的能量守恒方程为

$$\frac{d(mu)}{dt} = \dot{Q}_{aw} + \dot{Q}_{as} + \dot{W}_{cv} \tag{9}$$

式中: m 为空气质量; u 为单位质量空气的内能; $\dot{Q}_{aw}$ 为空气与洞壁间的对流换热速率; $\dot{Q}_{as}$ 为空气与水体间的对流换热速率; $\dot{W}_{cv}$ 为气垫式调压室体积做功速率。

单位质量空气内能可用下式表示:

$$u = h - p\bar{v} \tag{10}$$

其中

$$dh = c_p dT \quad \bar{v} = V/m$$

式中: h 为单位质量空气的焓; c_p 为气体的定压比热容; T 为气体的温度; $\bar{v}$ 为调压室气体的比体积; V 为气室体积; p 为气体压力。

将式(10)两边乘以 m ,然后对时间 t 求导,可得

$$\frac{d(mu)}{dt} = \frac{d(mh)}{dt} - \frac{d(pV)}{dt} = \frac{d(mh)}{dt} - p \frac{dV}{dt} - V \frac{dp}{dt} \tag{11}$$

利用体积做功关系式 $dW = -pdV$ 和式(11),可将调压室内空气能量守恒方程(9)改写为

$$\frac{d(mh)}{dt} = \dot{Q}_{aw} + \dot{Q}_{as} + V \frac{dp}{dt} \tag{12}$$

空气与接触界面(壁面和水面)之间的对流换热速率计算表达式为

$$\dot{Q} = h_c A_c (T_s - T) \tag{13}$$

式中: $\dot{Q}$ 为空气和围岩或水体之间的热交换率; h_c 为空气与围岩或水体的热交换系数; A_c 为接触面面积; T_s 为围岩或水体温度。利用式(12)(13)及 $dh = c_p dT$,可得调压室内压缩空气的温度对时间的导数表达式为

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{mc_p} \left[h_{cw} A_{cw} (T_{sw} - T) + h_{cr} A_{cr} (T_{sr} - T) + V \frac{dp}{dt} \right] \tag{14}$$

式中: h_{cw} 、 h_{cr} 分别为空气与围岩和水体间的热交换系数; A_{cw} 、 A_{cr} 分别为气体与围岩、水间的接触面积;

T_{sw} 、 T_{sr} 分别为围岩和水的温度。

调压室中的气体状态方程为

$$pV = ZmRT \tag{15}$$

式中: Z 为空气压缩因子,假定调压室气体为理想气体,取压缩因子 $Z=1$; R 为气体常数。将式(15)左右两边分别对 t 求导,有

$$p \frac{dV}{dt} + V \frac{dp}{dt} = mR \frac{dT}{dt} \tag{16}$$

由(14)和式(16)得压力对时间的导数表达式为

$$\frac{dp}{dt} = \frac{1}{(1 - \frac{R}{c_p})V} \left(\frac{R}{c_p} h_{cw} A_{cw} (T_{sw} - T) + \frac{R}{c_p} h_{cr} A_{cr} (T_{sr} - T) - p \frac{dV}{dt} \right) \tag{17}$$

式(14)和式(17)即为调压室内压缩空气的压力和温度动态变化方程。由此可知,调压室内空气压力变化与调压室内空气占据的体积空间 V (可由水位 z 和调压室截面积计算求得)和温度密切相关。计算体积 V 所需的 z 值可以由式(4)得到。利用式(4)计算水位 z 时所需的压力由初始条件和式(17)提供,而不是利用式(3)计算气室内的气体压力。

在对调压室围岩应力及变形特性进行分析时,需将式(14)和式(17)计算得到的压力和温度值分别作为压力边界和对流换热边界条件直接施加到调压室的洞壁上作为计算边界,从而可实现对围岩的单向热力耦合变形与受力特性分析。

2 模型合理性分析

为验证式(14)和式(17)的合理性,假定气垫式调压室不发生气体渗漏,即 m 为常数的条件下,以小天都气垫式调压室为研究对象,以蒋中明等^[17] 建议的差分法对式(14)(17)进行求解及合理性分析。表 1 为小天都水电站气垫式调压室的运行参数^[18],热学计算参数取值如表 2 所示。

表 1 气垫式调压室计算参数

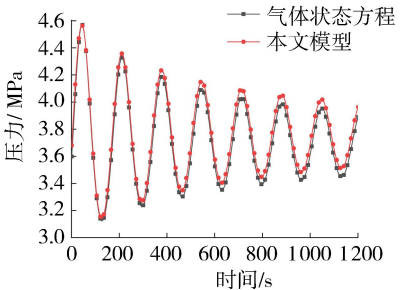
计算参数	量符号	单位	参数值
压力引水隧洞长度	L	m	6030.077
压力引水隧洞横截面积	f	m ²	19.635
调压室横截面积	F	m ²	1176
电站额定流量	Q	m ³ /s	66.48
调压室初始压强	p_0	MPa	3.68
气室初始折算高度	l_0	m	11.3
气室气体初始温度	T_0	℃	15
气体多方指数	n		1.2
引水隧洞水头损失系数	α		0.66
阻抗孔水头损失系数	β		0.15

图 1(a)为利用式(17)与式(3)得到的调压室内气体压力变化过程对比,在同一水位波动条件下,

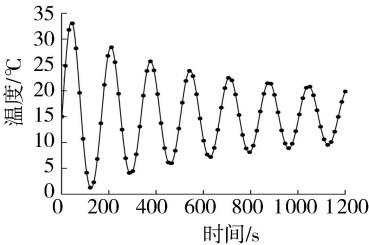
表 2 热学计算参数

计算参数	量符号	单位	参数值
气体与围岩的接触面积	A_{cw}	m ²	3345.6
气体与水的接触面积	A_{cr}	m ²	1176
调压室围岩温度	T_{sw}	℃	15
调压室水体温度	T_{sr}	℃	15
气体与围岩间的对流换热系数	h_{cw}	W/(m ² · K)	30
气体与水体间的对流换热系数	h_{cr}	W/(m ² · K)	1531
气体常数	R	J/(kg · K)	286.7
气体等压比热容	c_p	J/(kg · K)	1004

采用两种方法得到的气体压力变化规律基本相同,压力最大值分别为 4.57 MPa、4.55 MPa,最小值分别为 3.14 MPa、3.11 MPa。虽然两者在数值上存在一定的差异,但偏差较小,均方差仅为 0.059 1,且均与杜鹏侠等^[18-19] 监测得到的压力变化范围 3.28 ~ 4.44 MPa 较为接近,表明笔者提出的调压室内压缩空气压力的计算方法是合理的。造成压力值偏差的原因是在利用式(3)进行求解计算时仅依据气体多方指数的取值来反映压力的变化规律,没有完全考虑气体温度变化对压力的变化的影响;而实际运行过程中压力与温度之间是相互影响的。正是由于笔者提出的压缩空气压力计算模型考虑了温度变化对压力的影响,从而使得两种方法得到的计算结果之间存在一定偏差。



(a) 调压室内气体压力变化过程对比



(b) 调压室内气体温度变化过程

图 1 气体状态演化过程计算结果分析

图 1(b)为根据式(14)计算得到的空气温度变化过程图,调压室内气体的温度变化趋势与压力变化趋势基本相同,其中空气温度的最高、最低值分别为 33.3℃、1.2℃。由图 1(a)可知,调压室内空气的峰值压力在初始值 3.68 MPa 基础上增加了约 0.89 MPa,空气的峰值温度在初始值 15℃ 基础上增

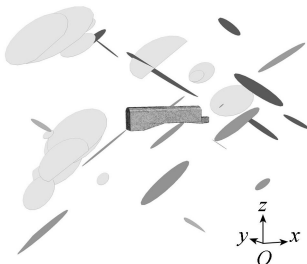
加了约 18.3℃,与 Lux^[19]对地下洞室压缩空气的温度变化研究结果(即气体压力每增加 1MPa 气体温度即升高约 13℃)基本一致,表明笔者提出的调压室内压缩空气压力和温度变化分析的热力学方程是合理的。图 1(b)还表明,在运行过程中气垫式调压室的气体温度变化幅度达到了 30℃ 以上,同时最低温度接近于 0℃,存在温度较低的现象,因此在评价调压室结构性能与安全时,不可忽略温度变化对结构应力的不利影响。

3 热力耦合作用下调压室围岩受力特性分析

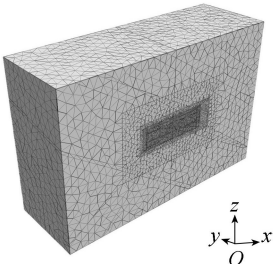
为分析气垫式调压室围岩在调压过程中的受力及变形演化特性,基于 3DEC 软件平台,编写调压室内气体压力和温度计算的 FISH 程序,采用热力耦合数值分析方法对小天都气垫式调压室围岩受力和变形特性进行数值计算。

3.1 数值模型及计算条件

小天都气垫式调压室为圆拱直墙形,尺寸为 80m×16m×16.5m,围岩以 II~III 类为主。在模型建立时,考虑部分主要裂隙的影响,其空间分布如图 2(a)所示,裂隙总数为 35 条,呈椭圆盘状;数值计算模型尺寸为 300m×200m×200m,网格计算单元数量为 670970 个,如图 2(b)所示。为便于分析,在调压室周围设置若干监测点,位置如图 3 所示。



(a) 调压室与裂隙的三维空间分布



(b) 三维数值网格

图 2 三维数值模型

计算参数采用小天都电站相关地质勘测资料推荐参数^[19-21];热力学计算参数参考 Zhou 等^[22-23]论文数据,具体取值见表 3、表 4。围岩的力学本构模型采用摩尔库伦弹塑性本构模型,热力学本构模型采用各向同性热传导模型。模型顶部为压力边界,

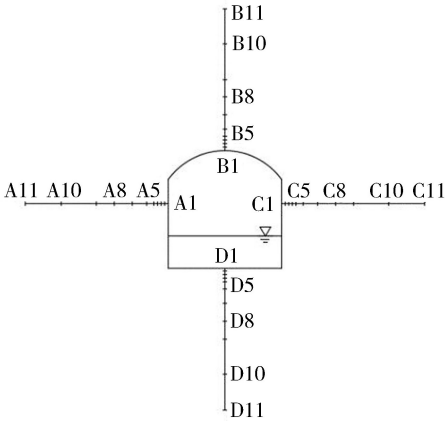


图 3 洞室围岩测点分布

其余边界均设置位移约束;调压室水位以上部分内表面压力边界和对流换热边界。按自重应力计算初始应力场,按 15℃ 计算初始温度场。

表 3 物理力学参数

结构	容重 ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	变形 模量 /GPa	泊松比	黏聚力 /MPa	内摩擦角 /($^{\circ}$)	抗拉 强度 /MPa
围岩	26.1	40	0.170	1.5	50	2.00
C30 混凝土	25.0	30	0.167	3.0	50	2.01

表 4 热学计算参数

结构	比热容/ ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	导热系数/ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	线膨胀系数/ K^{-1}
围岩	1004	3.00	12×10^{-6}
C30 混凝土	800	1.74	10×10^{-6}

工程实践表明:当水电站突然完全甩负荷时,水流涌向调压室,一般按水库最高设计水位计算调压室水位最高涌波水位;当水电站突然增加全负荷时,计算调压室的最低涌波水位。因此,计算工况采用完全甩负荷工况,此时调压室内的水位最高,空气压力和温度最高,对结构影响最为不利。

3.2 调压室围岩温度时空分布特性

图 4 为洞壁处测点的温度变化过程,其中 D 组测点位于水下,不受调压室内温度的影响。由图 4 可知,随着调压室内水位波动变化,围岩温度也随着气体温度的变化而变化;尽管洞壁测点所处的位置不同,但其温度变化规律却基本相同;不同部位测点的温度数值存在一定的差异,其中左侧洞壁 A1 点的温度相对于其他测点的温度更高,极大值达到 16.4℃。其原因是距 A1 点不远处存在节理裂隙交汇点,而温度在裂隙中传播速度比在壁面中的传播速度更快^[24],故靠近裂隙的 A1 点呈现出较高的温度。此外,B1 和 C1 测点的温度在工况发生变化后的第 5min 达到极大值 15.95℃ 左右,且将在该温度状态维持一定的时间。

图 5 为调压 5 min 末期时调压室横剖面围岩的

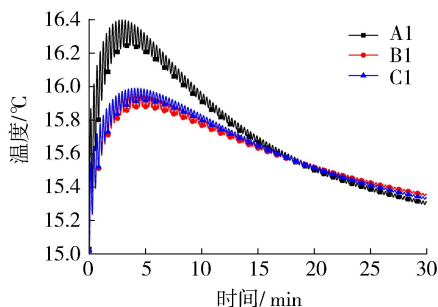


图4 30 min 内调压室各组测点洞壁处温度变化过程

温度分布。随着气体温度的升高,调压室内壁直接与气体进行热交换,导致围岩内壁的温度升高至16.0℃左右。由于节理裂隙的影响,围岩温度分布并不均匀,局部区域特别是节理裂隙交汇点处的最高温度升高到16.64℃,见图中N'、N处。同时,在距洞壁一定范围0.5 m 内围岩的温度变化梯度较小,与内壁温度基本保持一致,但超过0.5 m 后,热能向围岩深处传递的阻力越来越大,围岩的温度变化梯度先增大后减小,温度逐渐降低至与远处围岩温度一致。由于水的存在,调压室底部围岩没有与气体接触进行热交换,故其温度受到气体温度变化的影响较弱。

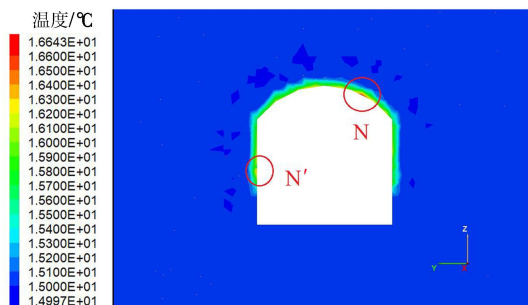


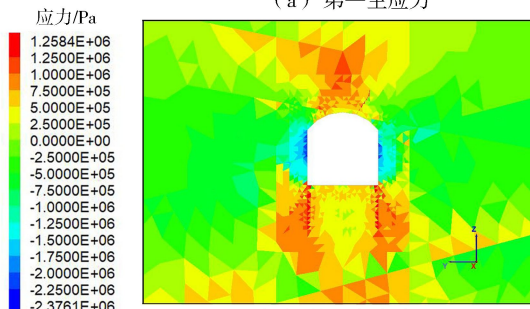
图5 围岩的温度分布

3.3 围岩应力变形特性

图6给出了调压室工况改变后第5 min 横剖面上的第一主应力和第三主应力分布。由图6(a)可知,调压室内壁附近区域的第一主应力基本维持在-6~-4 MPa,且在调压室顶部左侧节理附近及底部拐角区域出现了点状区域的应力集中的情况,局部甚至达到-10 MPa,但其分布范围较小。洞室顶部右侧节理处出现了高达1.26 MPa 的拉应力。调压室边墙处的第三主应力均表现为压应力,其压应力最大值为-2.38 MPa。由于上部围岩及底部围岩受开挖卸荷作用的影响,调压室顶拱和底板附近的围岩均出现了一定程度的拉应力,且在洞室顶部节理处存在拉应力集中的情况,其最大值达到1.26 MPa。结果表明洞室围岩的节理裂隙对围岩的应力状态有较大的影响,在进行地下洞室设计时应考虑节理裂隙对洞室稳定性的影响。



(a) 第一主应力



(b) 第三主应力

图6 围岩应力分布

图7给出了气垫式调压室工况改变后5min 时各组测点的位移与距洞壁距离的关系。调压室围岩的位移变化的总体规律为:距离洞壁越远,位移越小;其中底部围岩(D组)位移相较于其他部位的位移值更大,而顶部围岩(B组)的位移值则较小;两侧洞身围岩的位移值大小基本一致。

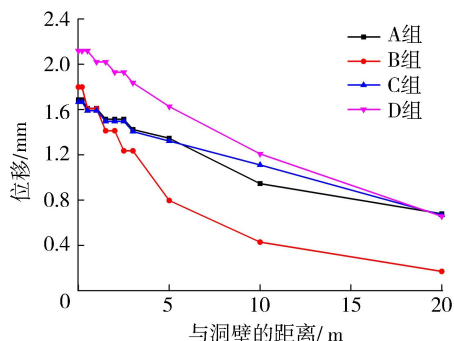


图7 测点位移与洞壁距离的关系

3.4 测点温度、应力及变形的变化过程

图8为B组测点中的部分测点温度变化过程。随着调压室内压缩空气温度和压力的循环波动变化,围岩的温度也呈现出相应的波动变化特征。调压室洞壁附近区域(0.5 m 范围内)的温度受到调压室空气温度的影响较为显著,如B1、B3点;距离洞壁较远区域的温度受到的影响较小,温度上升较为缓慢;当距离达到5 m 后,由于距离远、热阻大等原因导致围岩温度基本不受空气温度的影响,如B9点。总体上看,调压室内压缩空气温度的显著变化对洞周围岩的温度绝对升温幅度影响较小。

图9~11分别给出了调压室B组部分测点在考虑和不考虑温度荷载条件下的位移、应力变化过程

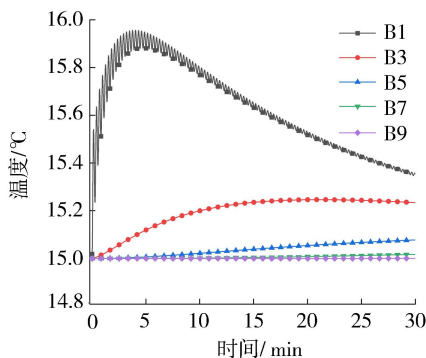


图8 围岩测点的温度变化过程

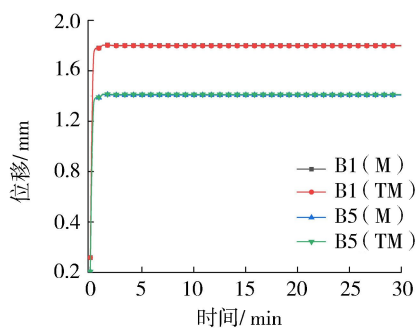


图9 典型测点位移变化过程对比

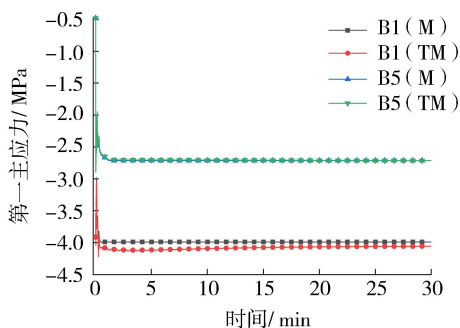


图10 典型测点第一主应力变化过程对比

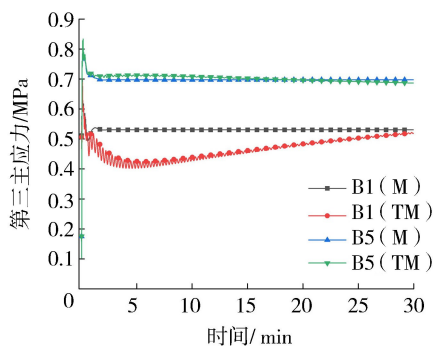


图11 典型测点第三主应力变化过程对比

的对比,图中符号 M 表示仅考虑力学荷载的计算成果, TM 表示考虑温度荷载和力学荷载共同作用的计算成果。由图 9 可知,两种情况下测点处围岩的位移值基本一致,考虑温度影响条件下的围岩位移仅比不考虑温度时的略大 0.01 mm,表明压缩空气温度对围岩的位移值影响不大。图 10 和图 11 表明靠近洞壁附近的围岩应力受温度荷载影响比较显

著。在考虑温度荷载条件下,围岩内壁附近第一主应力较不考虑温度荷载时增加了 -0.14 MPa ,为压应力。相较于不考虑温度荷载的情况,考虑温度荷载条件下的洞壁附近围岩第三主应力在调压过程中先降后增的变化趋势,其第三主应力最大差值较不考虑温度荷载时的应力值减少约 0.14 MPa ,为拉应力。第三主应力在 4.5 min 时达到极小值后又呈现出波动起伏且上升的变化趋势,在 30 min 后达到相对稳定,并接近于不考虑温度荷载下的应力值。

4 结 论

a. 气垫式调压室运行工况发生改变时,气体温度可能出现大幅度的变化现象;温度的大幅度变化将对调压室结构的应力应变状态产生不利影响,故分析调压室密封性能和围岩稳定性时应考虑包含气体温度和压力的热力耦合效应影响。

b. 气体温度的变化是引起围岩温度变化的直接原因,围岩各区域温度分布呈现出显著的不均匀性,节理裂隙处的温度相对其他区域更高;围岩温度影响范围一般在距内壁 0.5 m 范围内。

c. 相较于不考虑温度荷载的影响工况,温度荷载对围岩的位移值影响不大,但对围岩应力(特别是第三主应力)有较大的影响。

参考文献:

- [1] 李明桥,刘君,刘国峰. 水电站气垫式调压室调节保证设计仿真计算[J]. 大电机技术,2017(1):75-80. (LI Mingqiao, LIU Jun, LIU Guofeng, et al. Adjust the guarantee design research of air cushion surge chamber in hydropower station [J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine,2017(1):75-80. (in Chinese))
- [2] 郇国荣. 气垫式调压室及其在大干沟水电站的应用[J]. 水利水电科技进展,2002,22(3):38-40. (LI Guorong. Air cushion surge chamber and its application in Dagangou Hydropower Station [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2002,22(3):38-40. (in Chinese))
- [3] 梁圣辰,张健,贺蔚,等. 长距离输水系统串联多阻抗调压室的水锤防护效果[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(2):170-175. (LIANG Shengchen,ZHANG Jian,HE Wei, et al. Water hammer protection effect of series throttled surge chambers in long distance water conveyance system [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(2):170-175. (in Chinese))
- [4] 刘德有,张健,索丽生. 气垫调压室研究进展[J]. 水电能源科学,2000(4):1-5. (LIU Deyou,ZHANG Jian, SUO Lisheng. Advances in research on air-cushioned surge

- chamber [J]. International Journal Hydroelectric Energy, 2000(04):1-5. (in Chinese))
- [5] 黄静之,周建旭,刘跃飞,等.底部设置隔壁式岔管的调压室水力特性三维数值分析[J].河海大学学报(自然科学版),2021,49(2):176-181. (HUANG Jingzhi, ZHOU Jianxu, LIU Yuefei, et al. 3D numerical analysis of hydraulic characteristics for surge chamber with partition type bifurcated pipe in bottom [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(2):176-181. (in Chinese))
- [6] GU Zhaoqi, LI Xingxing, GUO Jun. Experiences in norwegian hydropower [M]. Norway: Tapir Publisher, 1985.
- [7] 欧传奇,刘德有,周领.基于KBM法的气垫式调压室涌波显式解析解研究[J].水力发电学报,2020,39(8):19-27. (OU Chuanqi, LIU Deyou, ZHOU Ling. Study on explicit analytical solution of surge waves in air cushion surge chamber based on KBM method [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2020, 39(8):19-27. (in Chinese))
- [8] 鞠铖,宋文武,陈云良,等.球形气垫式调压室水位和压力波动计算方法[J].水电能源科学,2015,33(11):91-94. (JU Cheng, SONG Wenwu, CHEN Yunliang, et al. Calculation method of water-level and pressure fluctuation in spherical air cushion surge tank [J]. Water Resources and Power, 2015, 33(11):91-94. (in Chinese))
- [9] 张晓宏.气垫式调压室过渡过程的计算研究[D].西安:西安理工大学,2007.
- [10] 刘德有,张罗彬,陈五一,等.圆管型与廊道型气垫式调压室水力性能比较[J].河海大学学报(自然科学版),2012,40(5):534-538. (LIU Deyou, ZHANG Luobin, CHEN Wuyi, et al. Comparison of hydraulic performance of round pipe-shaped and corridor-shaped air-cushioned surge tank [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2012, 40(5):534-538. (in Chinese))
- [11] 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):79-89. (ZHOU Shuwei, XIA Caichu, ZHANG Pingyang, et al. Analytical approach for stress induced by internal pressure and temperature of underground compressed air energy storage in a circular lined rock cavern [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(11):79-89. (in Chinese))
- [12] 张洋.气垫式调压室水电站大波动过渡过程水力特性研究[D].武汉:武汉大学,2017.
- [13] GRAZE H R. A rational approach to the thermodynamic behaviour of air chambers[D]. Melbourne: The University of Melbourne, 1967.
- [14] 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):5616-5630.
- [15] XIA C, ZHOU Y, ZHOU S, 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.
- [16] 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.
- [17] 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. (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. (in Chinese))
- [18] 杜鹏侠.气垫式调压室在我国的应用研究[D].成都:四川大学,2005.
- [19] LUX K H. Design of salt caverns for the storage of natural gas, crude oil and compressed air: geomechanical aspects of construction, operation and abandonment [J]. Geological Society, 2009, 313(1):93-128.
- [20] 冷鸿斌.小天都水电站气垫式调压室工程地质条件研究[J].水力发电,2005(1):22-23, 52. (LENG Hongbin. Study on engineering geological conditions for air cushion surge chamber at Xiaotiandu Hydropower Station in Sichuan [J]. Water Power, 2005(1):22-23, 52. (in Chinese))
- [21] 蔡仁龙,冷鸿斌.小天都水电站气垫式调压室工程地质勘察研究[J].中国水能及电气化,2015(11):32, 66-70. (CAI Renlong, LENG Hongbin. Research on air cushion surge chamber engineering geological prospecting of Xiaotiandu Hydropower Station [J]. China Water Power & Electrification, 2015(11):32, 66-70. (in Chinese))
- [22] ZHOU Y, XIA C, ZHANG P, et al. Air leakage from an underground lined rock cavern for compressed air energy storage through a rubber seal [C] // ISRM Congress 2015 Proceedings Symposium on Rock Mechanics. Montreal: [s. n.], 2015:392-396.
- [23] 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, 52:71-81.
- [24] 徐彬.大型低温液化天然气(LNG)地下储气库裂隙围岩的热力耦合断裂损伤分析研究[D].西安:西安理工大学,2008.

(收稿日期:2020-11-19 编辑:骆超)