

文章编号: 1671-6612 (2025) 03-360-07

废弃矿井抽水蓄能电站空气-水流动特性模拟

鲍玲玲¹ 张小雅¹ 陈鹏云¹ 张永欢¹ 王景刚²

(1. 河北工程大学能源与环境工程学院 石家庄 050091;

2. 河北工程技术学院 石家庄 050091)

【摘要】 为构建以新能源为主体的新型电力系统, 抽水蓄能电站是保障电力系统安全、稳定运行的有效途径。废弃矿井建设抽水蓄能电站重新利用了大量地下资源, 不仅减少了土地占用, 且为抽水蓄能电站提供了良好的势能条件。与传统抽水蓄能电站相比, 废弃矿井抽水蓄能电站运行过程水-气的空间变化导致空气压力是可变的, 且运行过程中系统内部是较复杂的多场耦合作用。通过建立水-空气两相流 VOF 模型, 在水与空气分别视为可压缩液体和理想气体条件下, 对水泵工况下的瞬态过程进行模拟, 监测不同尺寸调压室下的水位振荡、压力以及空气温度变化, 研究了调压室尺寸对水体流动过程和调压室内的热力学行为的影响。结果表明, 调压室直径从 5m-3m 变化时, 水位高度、压力、温度的极大值逐渐减小, 极小值逐渐增加, 波动衰减时间延长, 调压室直径对电站的水力性能和优化运行至关重要。

【关键词】 废弃矿井抽水蓄能; 调压室; 水泵工况; 水-空气两相流; 瞬态模拟

中图分类号 TV743/TM616 文献标志码 A

Simulation of Air-water Flow Characteristics of an Abandoned Mine Pumped Storage Power Station

Bao Lingling¹ Zhang Xiaoya¹ Chen Pengyun¹ Zhang Yonghuan¹ Wang Jinggang²

(1.School of Energy and Environmental Engineering, Hebei University of Engineering, Shijiazhuang, 050091;

2.Hebei Institute of Engineering and Technology, Shijiazhuang, 050091)

【Abstract】 To build a new power system with new energy as the main body, pumped storage power station is an effective way to ensure the safe and stable operation of the power system. The construction of pumped storage power stations in abandoned mines reuses many underground resources, which not only reduces land occupation, but also provides good potential energy conditions for pumped storage power stations. Compared with the traditional pumped storage power station, the air pressure is variable due to the spatial change of water and gas during the operation of the abandoned mine pumped storage power station, and the system is more complex in the operation process of multi-field coupling. By establishing a water-air two-phase flow VOF model, the transient process of the pump was simulated under the condition that water and air were regarded as compressible liquids and ideal gases respectively, and the water level oscillation, pressure and air temperature changes under different sizes of pressure regulating chambers were monitored, and the influence of the size of the pressure regulating chamber on the flow process of water and the thermodynamic behavior of the pressure regulating chamber was studied. The results show that when the diameter of the regulator chamber changes from 5m to 3m, the maximum values of water level height, pressure and temperature gradually decrease, the minimum value gradually increases, and the fluctuation attenuation time is prolonged, and the diameter of the regulator chamber is very important for the hydraulic performance and optimal operation of the power station.

基金项目: 中深层热储温度衰减机制及可再生能源耦合系统研究 (E2023402072)

作者 (通讯作者) 简介: 鲍玲玲 (1982-), 女, 教授, 博士, 研究方向: 中深层地热资源利用, E-mail: lingling5934@163.com

收稿日期: 2024-12-26

【Keywords】 Pumped storage of abandoned mines; Pressure regulating chamber; Water pump working conditions; Water-air two-phase flow; Transient simulation

0 引言

加快推进以清洁能源为主的发展方向, 构建新能源电力系统, 实现绿色、低碳、循环的高质量协同发展是实现我国碳达峰、碳中和的有效途径^[1]。为保证电力系统的稳定性, 建立抽水蓄能电站是维持安全且经济灵活的电力系统的可靠方法。废弃的矿井日益增多, 据预测, 2030 年关闭矿井将达到 1.5 万处, 对应可利用地下空间约 72 亿立方米, 矿井中的空间以及天然高差为建设抽水蓄能电站提供了极有利条件^[2]。

国内外学者提出利用废弃矿井建设抽水蓄能电站的构思, 顾大钊院士团队^[3]对煤矿地下水库提出了完整的理论框架和技术体系, 谢和平院士^[4]提出了利用废弃矿井建设抽水蓄能电站的巨大优势。W P Nel^[5]等讨论了将废弃矿山改造为抽水蓄能电站的可能性, 设计了利用废弃空间建设全地下、半地下式的抽水蓄能电站。美国提出建设半地下式 Mount Hope 抽水蓄能电站项目^[6], 在地面人工开挖水池作为上水库, 下水库则是利用地下约 760m 深处废弃的矿井空间, 但该项目并未成功, 但随着理论与技术的不断完善, 废弃矿井抽水蓄能电站正逐步走向实践。张保生、陈宁^[7]等针对能适用于废弃矿井抽水蓄能电站的水泵水轮机进行研究, 提出了发展废弃矿井抽水蓄能电站水泵水轮机, 需要在水力模型优化设计、工况过渡过程稳定运行、蚀害协同控制方面突破的关键技术。姚西龙、葛帅帅^[8]等结合废弃矿井抽水蓄能的研究现状指出了巷道库容、采空区涌水量、电能储备量三个系统重要参数。Javier Menéndez^[9]基于 FLUENT、MATLAB 建立仿真模型监测地下水库中两相流的流速与压力, 模拟证明了利用地下空间建立抽水蓄能电站下水库的可行性。Javier Menéndez^[10]利用 MATLAB 编程实现水泵工况运行、FLUENT 模拟得出当通风井尺寸到达某值时对电站效率将无明显影响。Pummer^[11]等分析了下水库的反射现象, 优化导叶关闭方案是减弱反射波的关键方法, 且反射造成的压力对下水库稳定性以及水能利用率都有一定影响。Vasileios Kitsikoudis^[12]等利用将井下空间作为抽水蓄能电站下水库, 利用数值模拟对抽蓄两种工况进行模

拟, 通过监测储水量及内壁面水位变化、空气压力等, 连接通道截面和内部通风对地下水库水位变化的影响。

使用废弃矿井建设抽水蓄能电站与传统抽水蓄能电站相比, 内部水与空气的相互作用会更复杂, 处于封闭环境下空气压力会有较大变化, 气压对系统的整体效率存在影响^[13]。在设备定型后, 系统的几何尺寸设计对系统的整体效率、水力性能优化和流体流动行为都有影响。本文建立了下水库及尾水道的仿真模型, 对抽水工况下内部水体流动行为进行分析, 主要关注不同尺寸的调压室在水-气两相流作用下水振荡行为和压力变化情况, 研究了封闭调压室内部热力学行为, 分析了热力场与水-空气两项流场的相互作用情况。

1 运行原理与电站设计

1.1 电站运行原理

废弃矿井抽水蓄能电站与传统抽水蓄能电站都属于水力发电的一种储能模式。二者均由存在地势差的上水库与下水库组成, 通过电能与势能的相互转化来维护电网系统的稳定性。废弃矿井抽水蓄能电站可以分为全地下式、半地下式和全地上式。图 1 为抽水蓄能电站运行的基本原理, 水泵工况下, 利用电网中剩余电力运行水泵, 将下水库中水体抽至上水库, 能源形式由电能转化为水体势能; 水轮机工况下, 上水库内水排放到下水库带动水轮机转动, 与水轮机相连的发电机产生电能送入电网, 能源形式由水体势能转化为电能。

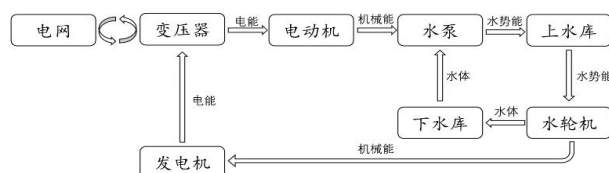


图 1 抽水蓄能电站原理图

Fig.1 Schematic diagram of pumped storage power station

1.2 电站设计

废弃矿井抽水蓄能电站的组成与传统抽水蓄能电站相似, 如图 2 所示主要由上水库、输水系统、

地下厂房、调压室、下水库和通风井构成。对于半地下式抽水蓄能电站，上水库可以选择地面塌陷区或附近河流，下水库可以选择结构稳定的巷道群形成的储水空间。其中设置调压室是至关重要的，不仅能够限制水击波的传播减小引水道的压力，增加机组的运行安全性，还能保障水泵水轮机组在各工况下的稳定运行^[14]。

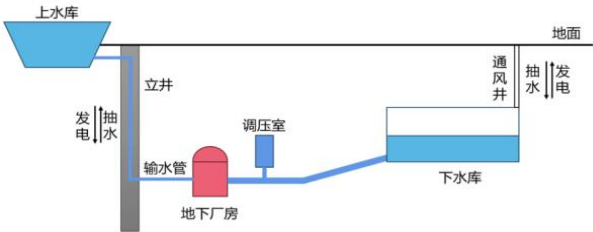


图 2 半地下式抽水蓄能电站布置示意图

Fig.2 Schematic diagram of the layout of the semi-underground pumped storage power station

基于某废弃矿井设计抽水蓄能电站模型，该地年降水量在 275.1~728.7mm 之间，利用该废弃矿井的地面塌陷区建造上水库，塌陷区储水深度为 30m。利用地下巷道简单、支护结构较好且稳定的区域作为储水空间建造下水库，调压室建立在靠近地下厂房的压力水道上，据统计该煤矿开采水平为 -132.52 米至 -450 米，包括回风井、仰俯巷道、开拓巷道和准备巷道。

基于抽水蓄能电站设计方法设计废弃矿井抽水蓄能电站，具体设计参数如表 1 所示。

表 1 废弃矿井抽水蓄能电站设计参数

Table 1 Design parameters of abandoned mine pumped storage power station

水库设计		设计参数
水位/m	上水库死水位	27
	上水库储水深度	30
	下水库死水位	-315
	下水库储水深度	15
	上、下水库自然高差	300
	平均水头	321
库容/m ³	上水库设计库容	塌陷区总水量
	下水库设计库容	12000

2 模型建立与数值计算方法

2.1 下水库模型建立

利用 FLUENT 软件建立仿真模型如图 3 所示，

模型包括调压室、尾水道（尾水道水平段和倾斜段）、下水库、通风井。泵送模式下满载运行流量为 28.85m³/s，通风井处气流运行方向与运行模式有关，水泵工况下气流方向向下，水轮机工况下气流方向向上。下水库模型以及具体几何参数如表 2、图 3 所示。

表 2 废弃矿井抽水蓄能电站下水库模型设计尺寸

Table 2 Lower reservoir model design dimensions of

UPSH+

水库设计	设计参数
下水库体积/m ³	12000
储层高度/m	15
断面面积/m ²	26.28
通风井截面/m ²	1.54
调压室高度/m	50
调压室直径/m	3~5
尾水道水平段长/m	50
尾水道倾斜段长/m	50
尾水道倾斜角度/°	30

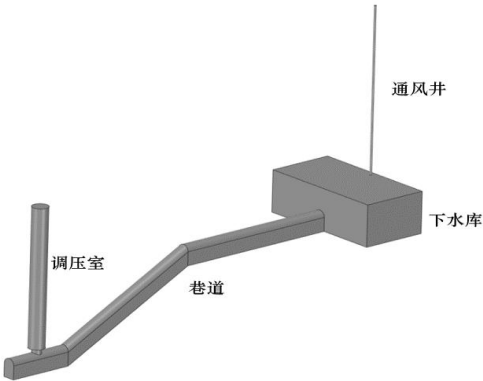


图 3 废弃矿井抽水蓄能电站下水库模型

Fig.3 Model of the reservoir under the abandoned mine pumped storage power station

2.2 网格划分

建立三维 CFD 数值模型，利用 Workbench 平台下 mesh 模块划分下水库、尾水道、调压室、通风井的网格，将整个几何模型划分为不同单元进行计算，对于着重监测的调压室、通风井进行网格细化。

2.3 网格无关性验证和模拟验证

该模拟为瞬态模拟，需要对模型进行网格无关性验证，以巷道水平段某竖直截面流体速度作为指标，从 t=0s 到 t=5s 对模型进行网格无关性验证。

在该竖直截面选取距离巷道底部分别为4m、3m、2m的三点,比较其速度值,选取点坐标为(20,4,2), (20,3,2)和(20,2,2)。如图4所示,在网格数为36万-120万时,流体速度基本保持不变,应此选择网格数为36万时可满足精度要求且减少了计算时间。

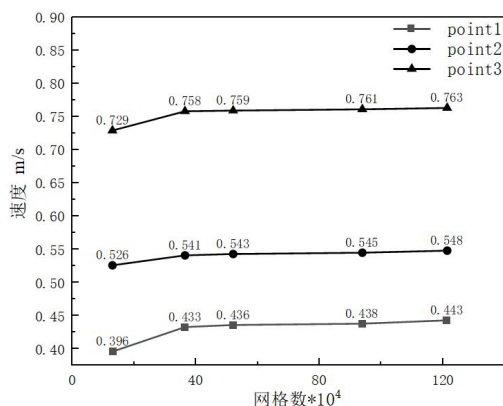


图4 网格无关性分析

Fig.4 Grid-independent analysis

为验证数值模拟方法的可靠性,通过文献[13]中的实际数据确定模型参数,采用上述模型单元格划分和数值计算方法,模型尺寸、边界条件与数值处理方法与文献中保持一致,将文献[13]中 $t_c=10s$ 时的水位、静压及温度数值结果与模拟数据进行对比,结果如表3所示。

表3 模型验证 ($t_c=10s$)

Table 3 Model validation ($t_c=10s$)

	最高水位/m	最大静压/kPa	最高温度/K
模拟结果	5.2	96.4	333
验证结果	5	92.1	324
误差	4%	4.65%	2.70%

结果满足误差在10%以内,说明上述数值模拟方法可行。

2.4 数值计算方法和边界条件

本文使用CFD软件Ansys Fluent V16.0进行了数值模拟,采用基于压力的分离求解器瞬态格式的k-ε RNG湍流模型,使用VOF进行两相建模,对于离散格式,扩散项采用中心差分格式,对流项采用二阶迎风离散,时间项采用一阶格式,收敛残差设置为 1×10^{-3} 。

下水库巷道内流体主要包括水和空气两相,流动控制方程、动量守恒方程、质量守恒(连续性)方程如下。

动量守恒方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) =$$

$$-\nabla p + \nabla \cdot [\mu (\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T)] + \rho \vec{g} + \vec{F}$$

连续性方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0$$

VOF模型应用与两种或多种不相溶的流体,为描述每个流体的运动以及追踪水-空气界面,其中流体之间的界面位置很重要^[15]。如果追踪第二相的体积分数,则每个单元中的密度由式(3)给出:

$$\rho = f_2 \rho_2 + (1 - f_2) \rho_1$$

标量 f (体积分数)的演变由简单的平流方程控制:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \frac{\partial v_i f}{\partial x_i} = 0$$

式中: ρ 为两相流的平均密度,kg/m³; t 为时间,s; $\vec{v}$ 为速度矢量,m/s; μ 为流体动力粘度,Pa·s; p 为微元上的压力,Pa; $\vec{F}$ 为微元上的质量力,N; f_2 为第二相体积分数; ρ_1 、 ρ_2 为第一相和第二相密度,kg/m³;

该模拟为下水库向上水库抽水阶段,模型入口使用速度入口边界条件,通过UDF控制入口水流速度变化,通风井出口设置为压力出口边界条件,假定出口处为稳定的标准大气压(101.3kPa)。壁面使用无滑移壁面,水和空气分别考虑为可压缩液体和理想气体。水与空气间的表面张力系数为0.073N/m,初始温度设置为300K。

3 模拟分析

3.1 导叶关闭方案

导叶关闭方案是指在抽水蓄能电站中,针对导叶在两种工况下的关闭规律、关闭速度、关闭时间进行控制和优化的方案。

导叶关闭方案在抽水蓄能电站运行中起着至关重要的作用,不仅能保证抽水蓄能电站的安全稳定运行、稳定水力过渡过程,合理的导叶关闭方案还可以提高电站运行效率。常见的导叶关闭方案包括:直线关闭方案、折线关闭方案、延时直线关闭方案、分段关闭方案。

对本文抽水蓄能电站的可逆式机组选取延时

直线导叶关闭方案^[16],即先保持原有开度一段时间,再根据某给定斜率直线关闭。本文在该工况下使用延时导叶关闭方案,设计导叶由 100%开度保持 5s 后,一段 10s 直线关闭。

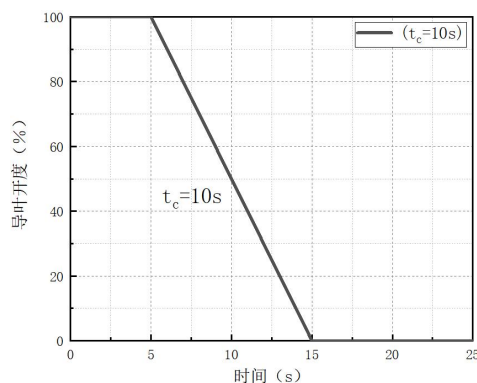


图 5 延时导叶线性关闭方案开度图

Fig.5 Opening diagram of the linear closing scheme of the time-delay guide vane

图 5 为延时导叶关闭方案下导叶开度变化情况,由 100%开度起 5 秒后一段直线关闭。

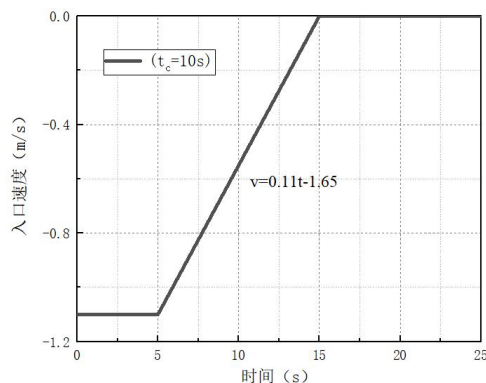


图 6 延时导叶关闭方案速度入口变化

Fig.6 Variation of the speed inlet of the delayed guide vane closure scheme

图 6 为延时导叶关闭方案下速度入口的变化,水泵工况下入口速度为-1.1m/s。

3.2 模拟分析

为模拟分析调压室尺寸对水体流动情况和调压室热力行为的影响,监测了不同调压室直径下的水位变化、压力变化、空气温度变化情况以及下水库水体剩余量。通过监测水位、压力变化来分析在不同调压室直径下对水位波动是否有影响、对机组稳定性是否有影响,以及判断调压室设计容积是否满足水位波动幅度。通过监测空气温度变化来分析

调压室尺寸变化对调压室内温度变化是否有影响。通过监测不同直径下的剩余水量来分析调压室直径对系统整体效率的影响。

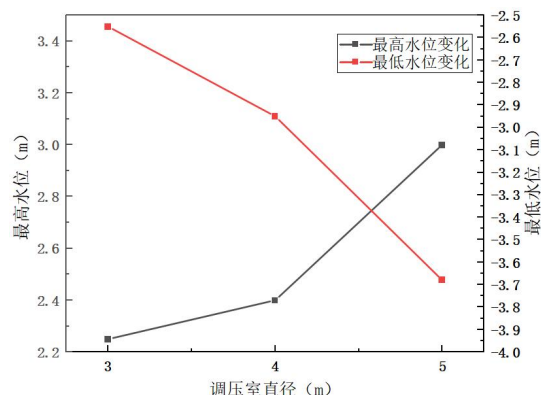


图 7 不同直径最高(低)水位差值

Fig.7 Difference between the highest (lowest) water levels of different diameters

图 7 为监测不同直径下调压室设定初始水位为 25m 时水位面的水位变化图,为确定适合该模型的调压室初始水位,最开始先进行了一段时间的蓄水工况,使调压室内水位达到一个相对稳定状态后再开始抽水工况,此时初始水位为 33m。由图 7 可知,调压室直径变化影响调压室内水位波动,随着直径增大最高水位会逐渐升高,最低水位逐渐降低。直径为 5m 时最大振幅为 3m,设计容积满足水位观察第一次出现的波动,调压室直径为 5m 与直径为 3m 最高水位波动差值为 0.75m,调压室直径为 5m 与直径为 3m 时最低水位差值为 1.13m。

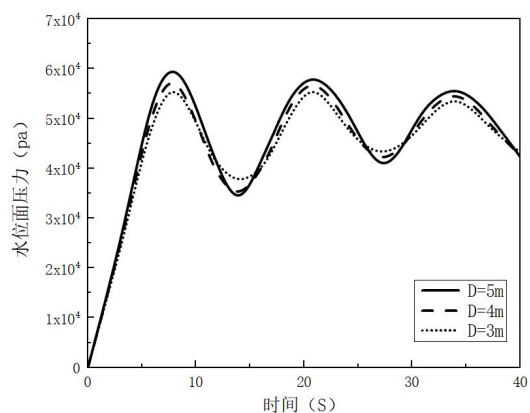


图 8 不同直径水位面压力

Fig.8 Water level pressures of different diameters

图 8 为调压室不同直径下调压室水位面上压力的变化情况。由图可知,压力变化均呈现相似趋势,由一开始迅速上升到相对稳定状态后呈现出周

期性波动, 随着时间推移水位波动幅度逐渐衰减。调压室直径不同使调压室内压力变化略有差异, 直径变化对最大、最小压力出现时间有一定的影响, 调压室直径由 5m-3m 变化时, 最高压力以及最低压力出现时间略微提前, 直径为 5m 时最大压力出现最晚, 直径为 3m 时最大压力出现最早。直径变化对波动段最大最小压力幅值有一定的影响, 随着直径增大最大压力逐渐增大, 最小压力逐渐减小, 且随着直径增大, 压力波动的衰减加快, 振幅也在逐渐减小。

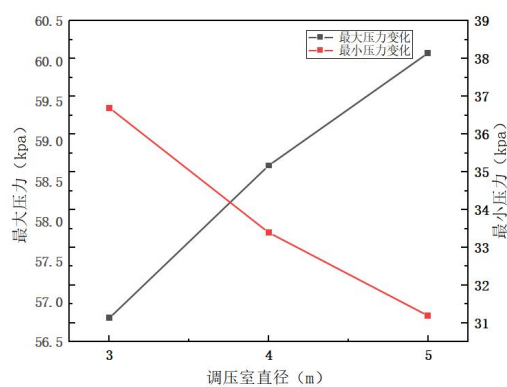


图 9 不同直径水面最大(小)压力值

Fig.9 Maximum (small) pressure values for water levels of different diameters

由图 9 可知, 直径为 5m 时最大压力为 60.1kPa, 最小压力为 31.2kPa, 直径为 4m 时最大压力为 58.7kPa, 最小压力为 33.4kPa, 直径为 3m 时最大压力为 56.8kPa, 最小压力为 36.7kPa。三种不同直径下最大压力最多相差 4kPa, 最小压力最多相差 4.8kPa。

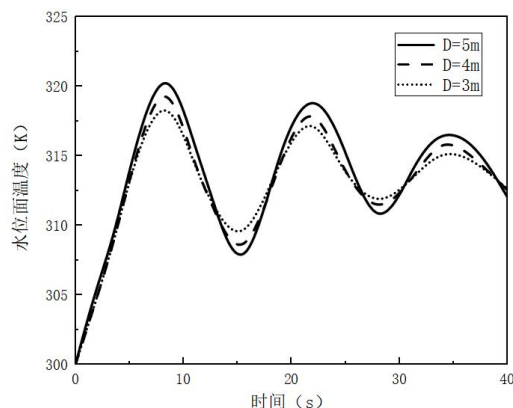


图 10 不同直径水面温度

Fig.10 Water level temperature with different diameters

图 10 为调压室高度 50m 时, 调压室不同直径下调压室水面空气温度变化情况。由图可知, 调

压室直径不同使空气温度变化有略微差异。调压室直径逐渐增大, 空气温度的极值出现的时间稍微滞后, 调压室直径为 5m 时温度极值出现时间最晚, 调压室直径为 3m 时温度极值出现最早。直径变化对温度极值的大小也有一定影响, 直径为 5m 时, 最高温度为 322K, 最低温度为 305K, 直径为 3m 时, 最高温度为 320K, 最低温度为 308K, 随着直径增大, 最高温度逐渐增大, 最低温度逐渐减小。

图 11 为封闭调压室水相与空气相的在最初与 8.2s 时的温度云图, 由图可知水在该工况下温度保持恒定, 空气温度随着静压增大有明显上升, 最高温度达到了 342K。水的热传递可忽略不计, 封闭式调压室内热力学行为取决于空气压力变化。封闭式调压室完全处于地下, 调压室热量将传递给岩体。

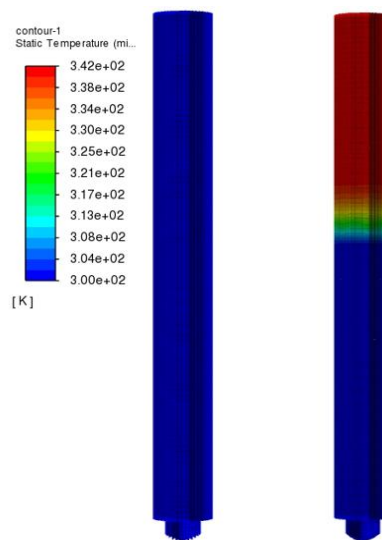


图 11 封闭调压室温度云图

Fig.11 Contour of the temperature of the closed regulator chamber

图 12 为调压室不同直径下, 水泵工况运行 40s 时下水库剩余水量变化情况以及相应的水能利用率。由图 (a) 可知, 当调压室直径在 5m-3m 变化时, 下水库剩余水量逐渐增加。直径为 5m 时, 下水库剩余水量为 11056m³; 直径为 4m 时, 下水库剩余水量为 11181m³; 直径为 3m 时, 下水库剩余水量为 11380m³。由图 (b) 可知, 将不同直径下的剩余水量与理论剩余水量作对比, 得到调压室不同直径下的系统水能利用率情况。直径为 5m 时水能利用率为 98.1%; 直径为 4m 时, 水能利用率为 97%; 直径为 3m 时水能利用率为 95.2%。

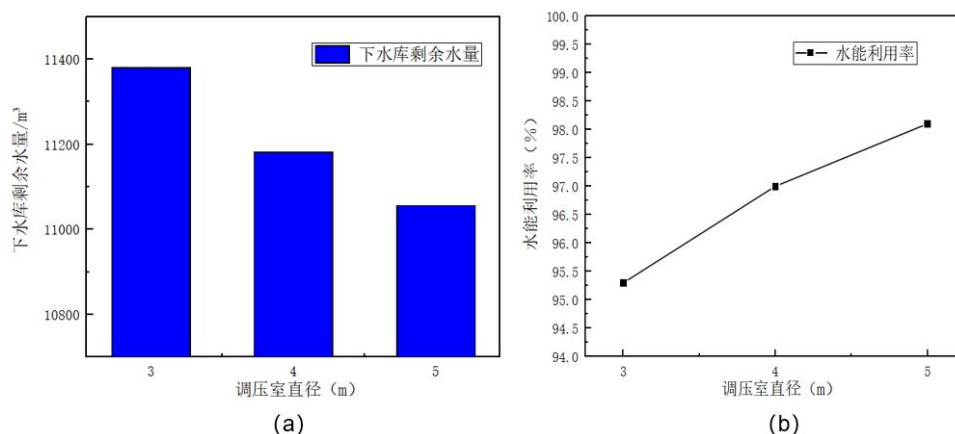


图 12 不同直径下水库剩余水量及水能利用率

Fig.12 Remaining water volume and water energy utilization rate of reservoirs with different diameters

4 结论

使用 FLUENT 对废弃矿井抽水蓄能电站下水库的水泵工况进行模拟,在改变调压室直径的情况下对调压室内水位变化、压力变化、温度变化以及通过下水库剩余水量计算水能利用率进行分析,得到以下结论:

(1) 调压室直径的变化会影响调压室内水位、压力、温度以及系统的效率。随着直径增大:最高水位逐渐升高,最低水位逐渐下降;最大压力逐渐增大,最小压力逐渐减小,压力波动的衰减加快,振幅也在逐渐减小;最高温度逐渐增大,最低温度逐渐减小,且温度极值出现时间稍微滞后;下水库剩余水量逐渐减小,水能利用率逐渐增大。

(2) 随着系统的运行,调压室内水位波动逐渐衰减。波动衰减是因为调压室与引水道间水体流动会逐渐达到一种相对稳定的平衡过程。而调压室尺寸减小造成水位波动的减小会延长瞬态过程的持续时间,是因为波动减小会造成压力的降低导致水流的速度变慢,流动速度减小会延长波动的衰减时间,调压室内的不平衡状态时间会增加。根据模拟结果显示,这种不平衡状态时间的增加会使相同时间内水泵工况抽取的水量有所不同,下水库剩余水量会随着直径的减小而增加,降低了水泵工况下的水能利用率,系统运行效率有所下降。

(3) 调压室尺寸对空气压力以及封闭调压室内热传递行为具有显著影响。调压室尺寸减小则工况开始前调压室内的空气体积自然减小,从而引起水位与压力的降低。且水位的波动和气压的变化会进一步影响调压室内热传递行为。模拟结果显示,

当空气的静压降低时,温度也随之减小,从而改变了调压室内空气热力学行为。

使用废弃矿井建设抽水蓄能电站,考虑电站内基础设施的尺寸是至关重要的。一方面由于废弃矿井的地质复杂性,会涉及到围岩结构变形等问题,另外封闭式调压室内空气压力的变化对系统运行有一定的影响,因此在设计系统时不仅要满足水力学性能要求,更要确保系统运行的安全性。调压室的设计不仅影响内部空气压力和热传递行为,还对整个系统的运行效率和机组稳定性有着重要影响。通过合理的设置调压室尺寸,优化调压室的设计参数,在设计时考虑瞬态过程中水的振荡周期、波动持续时间等问题可以有效减少系统运行时的不平衡状态时间,从而提高系统的整体运行效率和安全性。

参考文献:

- [1] 本刊编辑部.国家能源局组织发布《新型电力系统发展蓝皮书》[J].农村电气化,2023,(7):3.
- [2] 袁亮,姜耀东,王凯,等.我国关闭/废弃矿井资源精准开发利用的科学思考[J].煤炭学报,2018,43(1):14-20.
- [3] 顾大钊.煤矿地下水库理论框架和技术体系[J].煤炭学报,2015,40(2):239-246.
- [4] 谢和平,侯正猛,高峰,等.煤矿井下抽水蓄能发电新技术:原理、现状及展望[J].煤炭学报,2015,40(5):965-972.
- [5] Nel W P. The power of the worked-out mine: Conceptual designs for mine-based pumped-storage hydroelectricity[C]. 23rd International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection (MPES 2015): Smart Innovation in Mining. 2015. (下转第 396 页)