

基于矿坑开发的抽水蓄能电站下水库围岩稳定性分析

赵 倩¹, 孙清钟², 王丽娟², 骆祖江¹

(1. 河海大学 地球科学与工程学院, 江苏 南京 211100; 2. 江苏省地质调查研究院, 江苏 南京 210049)

摘 要:在矿井改建抽水蓄能电站中,下水库开挖后引起地下渗流场改变,将导致应力场重新调整,易引起围岩的失稳和变形,因此围岩稳定性成为石矸山铜矿地下空间改建的关键。基于此建立考虑流-固耦合的地下水渗流和地应力数学模型,利用 COMSOL Multiphysics 软件和有限元方法构建数值模型,采用三维地质模型与二维剖面模型相结合的方式,开展石矸山拟建抽水蓄能电站中下水库围岩稳定性分析。结果表明:在下水库开挖后地下渗流场发生变化,渗流方向改变,水位呈漏斗状;下水库附近及顶部的孔隙水压力减小,高孔隙压力区分布在下水库两侧模型底部。对比不考虑流-固耦合作用情况下,考虑流-固耦合后围岩应力、位移及塑性区发生变化,最大等效应力减小了 0.9 MPa,最小等效应力增加了 0.3 MPa,洞室两侧等效应力均呈减小趋势,边界洞室受孔隙水压力影响更大;整体洞室围岩的变形减小,边界洞室变形大于内部洞室;流-固耦合作用一定程度上减小了塑性区的分布。进一步基于流-固耦合数值模型,设计下水库在充/放水条件下围岩应力分布状态和稳定性,结果表明所设计的 3 种工况对围岩施加的静水压力、水位变化引起的孔隙水压力变化和软化效应引起的稳定性变化较小;软化效应在一定程度上减弱围岩稳定性,在下水库支护时需重视对洞室的衬砌,在设计工况下水库围岩稳定性仍可以得到保证。综上在矿井改建抽水蓄能电站中运用数值模拟评价下水库的围岩稳定性,以提供数据支撑和保障工程的安全性。

关键词:抽水蓄能电站;下水库;流-固耦合作用;围岩稳定性;数值模拟

中图分类号:TV743;TV223.1 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-9993(2025)05-2423-14

Stability analysis of surrounding rock of underground reservoir of pumped-storage hydropower based on mine pit development

ZHAO Qian¹, SUN Qingzhong², WANG Lijuan², LUO Zujiang¹

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;

2. Geological Survey of Jiangsu Province, Nanjing 210049, China)

Abstract: In the reconstruction of pumped-storage hydropower in the mine, the change of seepage field caused by the excavation of the underground reservoir leads to the readjustment of the stress field, which will easily cause the instability and deformation of the surrounding rock. Therefore, the stability of surrounding rock has become the key to the reconstruction of the underground space in Shidangshan Copper Mine. Based on this, a mathematical model of groundwater seepage and geostress that takes into account the fluid-soil coupling is established, and a numerical model is constructed

收稿日期: 2024-06-20 策划编辑: 王晓珍 责任编辑: 陈思成 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2024.0703

基金项目: 江苏省自然资源保护利用专项资金(矿地融合试点)资助项目(2021-45-4)

作者简介: 赵倩(1996—),女,山东临沂人,博士研究生。E-mail: zq5566cc@126.com

通讯作者: 骆祖江(1964—),男,江苏吴江人,教授,博士。E-mail: luozujiang@sina.com

引用格式: 赵倩,孙清钟,王丽娟,等.基于矿坑开发的抽水蓄能电站下水库围岩稳定性分析[J].煤炭学报,2025,50(5): 2423-2436.

ZHAO Qian, SUN Qingzhong, WANG Lijuan, et al. Stability analysis of surrounding rock of underground reservoir of pumped-storage hydropower based on mine pit development[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(5): 2423-2436.



移动阅读

by using the COMSOL Multiphysics software and finite-element method, and the three-dimensional geological model and two-dimensional sectional model are combined to carry out the stability analysis of the surrounding rocks in underground reservoir of the proposed pumped-storage hydropower in Shidangshan. The results show that the underground seepage field changes after the excavation of the underground reservoir, the direction of groundwater seepage changes, and the water level is funnel-shaped. The pore water pressure near and on top of the underground reservoir decreases, and the high pore pressure area is distributed at the bottom of the model on both sides of the underground reservoir. Compared with the case without considering the fluid-solid coupling, the stress, displacement and plastic zone of the surrounding rock are changed after considering the fluid-solid coupling, the maximum equivalent force decreased by 0.9 MPa, and the minimum equivalent force is increased by 0.3 MPa. The equivalent stress on both sides of the cavern shows a decreasing trend, and the boundary cavern is more affected by pore water pressure. The deformation of the surrounding rock of the whole cavern is decreased, and the deformation of the boundary cavern is larger than that of the inner cavern. The fluid-solid coupling reduce the distribution of the plastic zone to a certain extent. Further based on the numerical model of fluid-solid coupling, the stress distribution state and stability of the surrounding rock under filling and releasing water conditions of the underground reservoir are designed. Simulation results show that the designed three conditions of hydrostatic pressure exerted on the surrounding rock, pore water pressure changes caused by water level changes and the stability of the softening effect caused by the change is small, the softening effect to a certain extent weaken the stability of the surrounding rock, in the underground reservoir support need to pay attention to the lining of the cave, the stability of the surrounding rock under the designed conditions of the lower reservoir can still be guaranteed. In summary, numerical simulation is used to evaluate the stability of the surrounding rocks of the underground reservoir in the mine reconstruction pumped-storage hydropower to provide data support and ensure the safety of the project.

Key words: pumped storage hydropower; underground reservoir; fluid-solid coupling; surrounding rock stability; numerical simulation

0 引 言

过度使用传统能源带来了严重的环境危害,发展清洁能源及构建新能源(风、光、水等)为主体的电力系统,推动能源系统从高碳向低碳发展,成为实现“双碳”目标的重要途径与推动力。目前受到地形条件和生态环境保护等因素限制与影响,常规抽水蓄能电站选址与建设愈发困难^[1-2]。在此背景下,新型电力系统的提出促进了地下抽水蓄能电站的建设与发展^[3-5]。1917年 REGINALD 首次提出将地下空间用作抽水蓄能的概念设想^[4];1978年美国学者率先提出利用废弃矿井改造地下抽水蓄能电站的构想^[6]。随后奥地利^[7]、德国^[8]、比利时^[9]以及南非^[10]等国家和地区等相继进行了对于废弃矿井改建地下抽水蓄能电站的规划和可行性研究。废弃矿井改建可充分地利用地下空间及水资源并延长矿区的经济寿命,降低对环境与经济的负面影响^[11-15],为抽水蓄能电站的规划发展提供新途径^[16-17]。

在矿井(坑)再开发过程中需要充分考虑矿区自身地质条件、上下水库的高程差以及下水库蓄水时围岩稳定性等问题^[18-20]。抽水蓄能电站由上水库、下水库、高压引水系统、低压尾水系统和厂房等组成^[21],

其下水库在开挖后,地下渗流场的改变导致地应力场的重新调整,常引起围岩变形或者失稳,对围岩稳定性产生重要影响^[22],实际围岩受力特性不再仅仅是应力与渗流直接叠加,两者相互作用,趋于平衡状态;另外巷道的空间分布、地下水的运动对废弃矿井巷道而言是一个多相、多场相互交叉作用的过程,频繁地充/放水也会对下水库围岩-支护体的稳定性产生破坏,因此围岩的安全稳定性是废弃矿井地下空间改造抽水蓄能水库的前提和决定性因素,必须充分考虑地下水渗流场和应力场的耦合问题。国内外学者对不同研究对象耦合模型的相关理论、解析解、试验及数值模拟等进行研究并应用于地下工程^[23-24]。纪佑军等^[25]建立流-固耦合作用下隧道开挖数学模型并模拟了开挖过程中围岩应力场和渗流场的变化规律。徐建国等^[26]研究了不同围岩等级、埋深条件下,考虑流-固耦合效应时,隧道开挖后围岩渗流场、应力场、位移场及塑性区的分布特征,探讨了流-固耦合效应对围岩稳定性的影响。白丽伟等^[27]建立了煤矿下水库坝体应力-渗流数学模型,分析煤矿下水库坝体的渗透高度和安全系数随储水深度的演变规律。综上在利用矿井改建抽水蓄能电站中,下水库围岩的流-固耦合行为以及复杂环境下洞室围岩稳定性和安全性评价分

析至关重要。

江苏省地形平坦, 水力资源匮乏, 煤炭在能源消费结构中占据主导地位, 生态环境压力大。句容市石矸山铜钼矿区地表与地下坑道高差大, 地下空间资源满足抽水蓄能电站建设的需求, 改建条件良好。因此本文构建下水库流-固耦合数值模型, 研究下水库围岩稳定性特征和不同加/卸载条件下下水库围岩体应力分布状态和稳定性。

1 研究概况

1.1 研究区位置概况

石矸山铜矿抽水蓄能电站位于江苏省句容市 (119°7'16.1"—119°9'22.1"E, 32°8'41.4"—32°9'47.2"N), 面积约为 6.6 km²(图 1)。研究区属低山丘陵区, 地形整体呈南高北低, 最高点位于南面的铜山 (267.2 m), 东侧为洪山 (172.8 m), 其余地势相对较低, 地形切割不深, 沟谷较为发育, 以冲洪积地貌和剥蚀地貌为主。石矸山抽水蓄能电站枢纽工程主要建筑物包括上水

库、下水库、输水系统、地下厂房和开关站等, 上水库位于大深坑沟。水库主要由 3 条冲沟组成, 库长约 700 m, 高程为 90~130 m, 常年有水, 岸坡自然稳定性好, 上水库正常蓄水位为 77 m, 死水位为 57 m。下水库为石矸山铜矿开采区拟改建地下洞室群形成的储水洞库, 现有巷道围岩为石英闪长岩, 岩质坚硬; 不足库容部分通过开挖与已有的巷道组合形成下水库, 该部分隧洞围岩包括大理岩、石英闪长岩, 围岩呈微风化-新鲜岩体, 以微透水为主。矿区断层不发育, 成洞条件好, 局部岩体较破碎段以及构造节理发育处透水性相对较强, 需防渗处理。下水库储水洞库由 8 条平行洞室组成, 洞室总长度为 20 460 m, 断面采用马蹄形, 洞底高程为-300.0~-298.5 m, 正常蓄水位为-277 m, 死水位为-297 m, 调节库容为 701 万 m³, 死库容为 53 万 m³。上、下水库最大高差可达 430 m。库进/出水口采用井式结构, 布置于下水库洞群中部位置, 进/出水口处洞室垂直相交, 交汇区洞室断面亦为马蹄形。

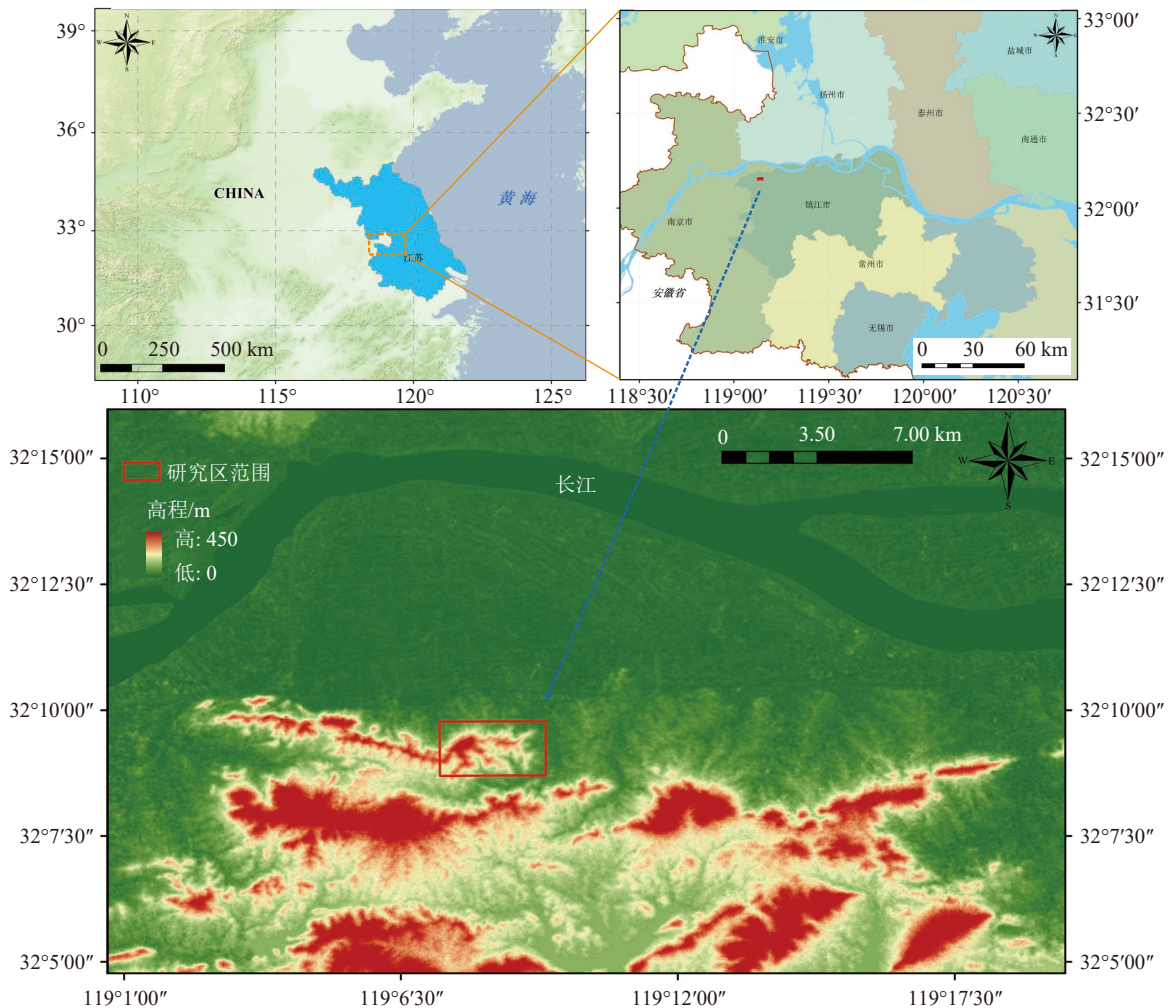


图 1 研究区位置

Fig.1 Location of study area

1.2 地质与水文地质条件

下水库区为本次研究的重点区域,该区揭露地层有志留系-三叠系沉积岩和燕山晚期侵入的岩浆岩,在-300 m 高程处各地层分布如图 2 所示。研究区内地下水含水岩层主要分为第四系孔隙潜水含水层、石炭系-三叠系灰岩(大理岩)裂隙水含水层和志留系-石炭系砂、页岩裂隙水含水层。研究区地下水以大气降水入渗补给为主,尾矿湖的垂向渗漏补给为辅;深部含水层地下水主要为自南向北流动。研究区地势整体起伏较大,水力梯度相对较大,地下水可沿断层或裂隙运移,径流条件相对较好,地下水更新速度快。该区域地下水水位年内变幅与降水强度有关,丰水期地下水水位上升明显,枯水期水位下降较大。地下水主要以渗水的形式流入采空区,因此巷道对地下水水位变化影响可以忽略。

2 模型建立

2.1 三维地质模型及开挖后力学模型构建

2.1.1 模拟区边界及地层划分

本次研究中考虑到地形对应力场的影响,将下水库附近地势相对较高的铜山和洪山划入模拟区。在水平方向上,综合研究区和探矿权范围确定模型边界,拟定区边界长 3 073 m,宽 1 210 m,总面积约为 3.72 km²。在垂直方向,以下水库以下 100 m(-400 m

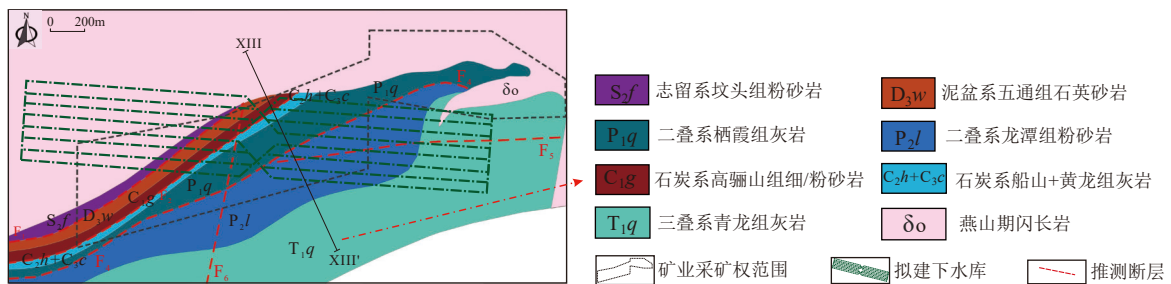
水平面)作为底部边界,以地表作为模拟的顶部边界(图 3a)。依据下水库-300 m 地质平切及穿过下水库的地质剖面,对三维地质体进行地层划分(图 3b)。下水库开挖后形态及断面基本参数如图 3c 所示,断面为马蹄形,主洞室宽 18 m,高 29 m,单个主洞室长 1 140 m,连接洞室宽 20 m,高度与主洞室一致。根据下水库的设计参数,在 COMSOL 中绘制下水库洞室的三维几何体,其在模拟区的位置、几何体及典型横截面如图 3d 所示。

2.1.2 参数选取于边界条件

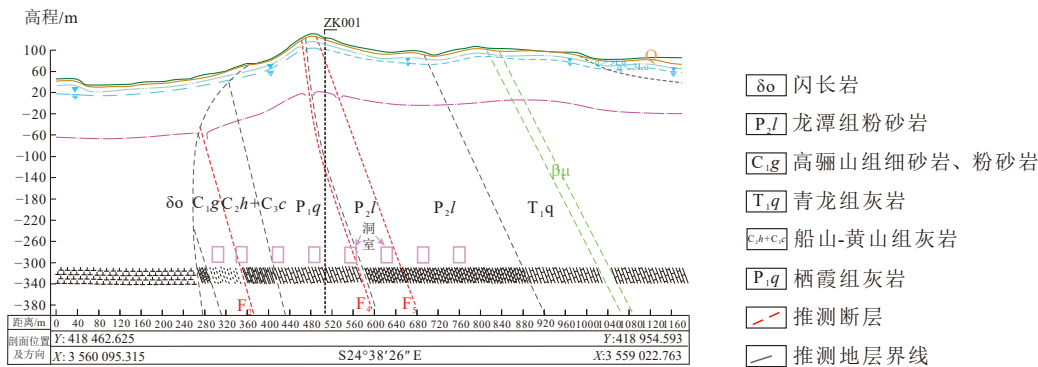
1) 参数取值。进行三维地质结构建模中高程数据选用 ALOS 的全球 12.5 m 经度 DEM;依据 56 组岩样的力学试验测试资料,得到研究区各组岩层岩石力学参数,研究中所用结果为各组岩性参数的均值,具体参数值见表 1。下水库开挖后力学模型参数取值不变。

2) 边界条件及初始条件。进行初始应力场计算时,模型顶部即地表为自由边界;模型的四周为辊支撑边界;模拟底部为固定约束边界。下水库开挖后模拟区域为不包括下水库的模拟区岩体,下水库与岩体之间的交界面定义为自由边界,其余边界不变。

模拟中仅考虑自重应力场,在 COMSOL 中添加固体力学模块定义为 solid 1,实现对初始应力的计算。下水开挖后力学模型是在三维地质模型基础上添加



(a) 下水库-300 m 高程地层分布示意



(b) 典型剖面

图 2 下水库-300 m 高程地层分布及典型剖面

Fig.2 Distribution of stratigraphy at -300 m elevation and typical profile of the underground reservoir

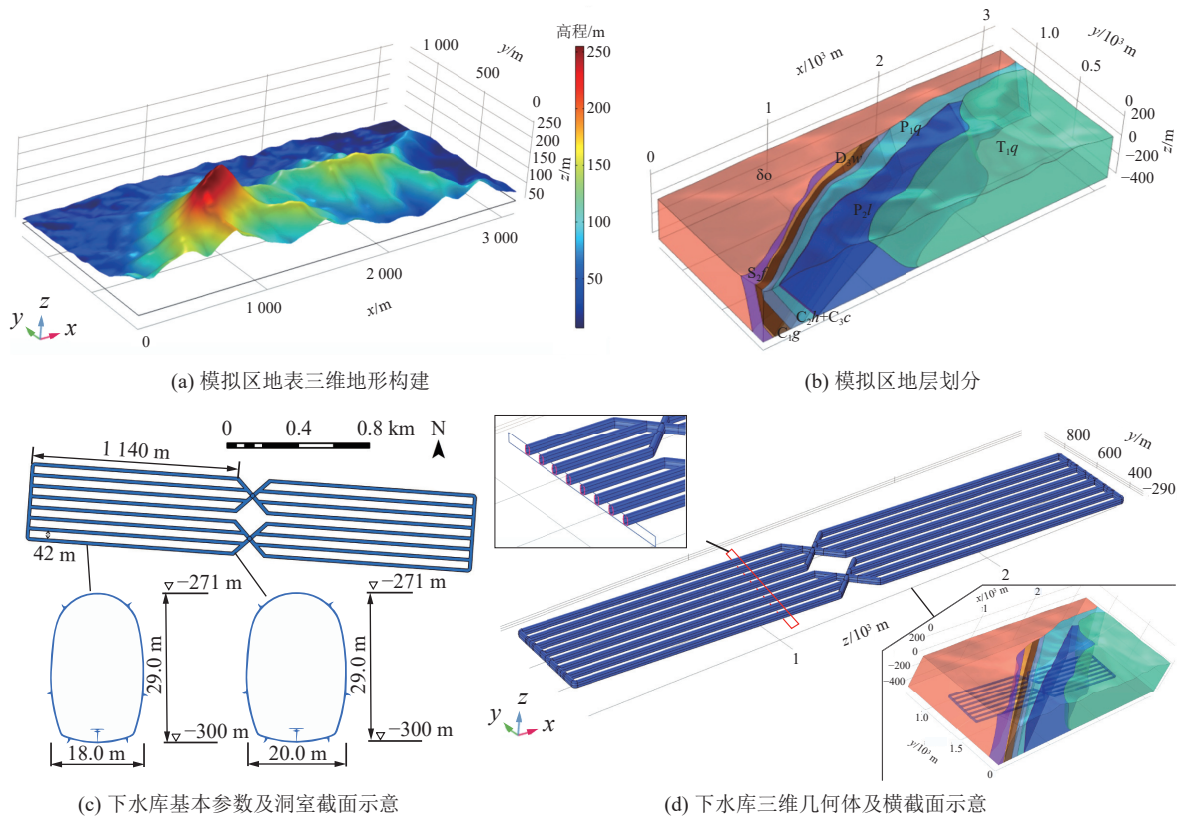


图 3 研究区模型概化示意

Fig.3 Model generalization of study area

表 1 模拟区岩石物理力学参数

Table 1 Rock physico-mechanical parameters in the simulation area

岩层	岩性	弹性模量/ 10^4 MPa	泊松比	密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	内摩擦角/ $(^\circ)$	黏聚力/MPa
坟头组(S_2f)	角岩化粉砂岩	6.16	0.26	2 780	61.2	9.73
五通组(D_3w)	角岩化石英砂岩	8.16	0.06	2 630	65.9	12.5
高骊山组(C_1g)	粉砂岩、石英细砂岩	8.29	0.19	2 770	59.0	5.66
船山-黄龙组(C_2h+C_3c)	大理岩化灰岩	8.55	0.29	2 690	49.3	2.82
栖霞组(P_1q)	大理岩化灰岩	7.35	0.08	2 690	48.4	5.91
孤峰组(P_1g)	硅质角岩	7.27	0.25	2 700	60.0	11.1
龙潭组(P_2l)	角岩化粉砂岩	7.27	0.25	2 700	60.0	11.1
青龙组(T_1q)	大理岩化灰岩	8.24	0.14	2 830	62.4	5.99
燕山期侵入岩(δ_0)	闪长岩	8.87	0.14	2 750	62.0	8.77

第 2 个固体力学模块, 定义为 soil2, 以初始地应力结果作为初始条件。岩石的屈从准则选择 Drucker-Prager 屈从准则。

2.2 流固耦合模型构建

建立考虑流-固耦合的地下水渗流及应力数学模型, 利用 COMSOL 和有限元方法给出模型数值解。为了简化其中关系, 在本次研究中做出以下基本假定: 岩体为非均质各向同性, 在弹性阶段不可压缩, 在塑性阶段可压缩; 多孔介质主要组成为固体和流体, 地下渗流考虑为单相饱和流动; 地下水渗流在宏观上遵

循达西定律, 不考虑流体的可压缩性和密度变化; 岩土孔隙压力和地应力遵循修正的太沙基有效应力原理; 饱和多孔介质固体骨架体积变形等于孔隙的变形。综上基本假设认定岩体在弹性阶段不可压缩, 因此不考虑岩体变形引起的渗流场变化, 仅考虑渗流场的孔隙压力对整个应力场的影响, 选择单向流-固耦合的方式对下水库开挖后围岩稳定性进行模拟。

2.2.1 数学模型及模型求解

1) 流-固耦合渗流场控制方程。模型考虑源汇相的影响, 在不考虑流体的可压缩性和密度变化时, 得

到考虑介质变形的单相流体渗流数学模型:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\rho k}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\rho k}{\mu} \frac{\partial p}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\rho k}{\mu} \frac{\partial p}{\partial z} \right) + \rho \frac{1 - \varphi_0}{(1 + \varepsilon_v)^2} \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} + q = 0 \quad (1)$$

式中: k 为多孔介质渗透率, μm^2 ; μ 为流体动力黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; ρ 为流体密度, g/cm^3 ; p 为孔隙压力, kPa ; t 为时间, s ; ε_v 为体积应变; φ_0 为孔隙度; q 为质量源汇项, $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ 。

2) 流-固耦合应力-变形场控制方程。将岩土体变形视为弹塑性变形, 考虑流-固耦合作用的岩土平衡方程为

$$\sigma_{ij,j} - (\alpha \delta_{ij} p)_j + f_i = 0 \quad (2)$$

式中: σ_{ij} 为应力张量; δ_{ij} 为 Kronecker 函数; α 为 Biot 系数; f_i 为土的体积力张量。

根据变形协调性得几何方程为

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} (\mathbf{u}_{i,j} + \mathbf{u}_{j,i}) \quad (3)$$

式中: ε_{ij} 为应变张量; \mathbf{u} 为位移张量。

变形场本构关系采用弹塑性本构方程, 岩石的屈服准则选择修正的 Mohr-Coulomb 准则。

3) COMSOL 中单向流-固耦合模型求解。采用伽辽金有限元方程将渗流场方程离散化求解得到节点孔隙压力。选用空间 8 节点等参数单元对应应力场方程进行离散。采用初应力法进行弹塑性处理。对于屈从单元, 首先计算初应力, 然后转化为等效附加荷载, 对荷载增量及迭代次数进行循环。本次研究计算基于 COMSOL 软件, 同时调用渗流场和应力场模块, 即 Darcy 流模块和固体力学模块, 均考虑重力效应。其中固体力学模块中线弹性材料添加一项代表孔压的影响, 孔压项当做体荷载输入 COMSOL。

2.2.2 参数选取与边界条件

1) 参数选取。考虑流-固耦合时需要输入各岩层的孔隙度与渗透率, 数据依据岩石力学参数测试试验结果, 见表 2。经过测试发现, 孔隙度和渗透系数的值, 对孔隙压力影响较小, 且各岩层的孔隙度与渗透率变化相对较小。

表 2 各岩层孔隙度及渗透系数取值

Table 2 Porosity and permeability coefficient of each stratum

岩层参数	坟头组	五通组	高骊山组	船山-黄龙组	栖霞组	孤峰组	龙潭组	青龙组	闪长岩
孔隙度/%	0.20	0.50	0.15	1.15	0.60	0.20	0.20	0.30	0.50
渗透率/ 10^{-15}m^2	0.001 00	0.001 30	0.001 50	4.710 00	0.007 10	0.008 00	0.008 00	0.002 26	0.001 00

2) 边界条件。三维模型中对于固体力学模块, 其边界条件设置同 2.1.2 节, 四周为辊支撑边界, 底部为固定约束边界, 顶部为自由边界。模型内初始应力按岩体的自重应力计算, 下水库开挖后应力场叠加初始应力。对于 Darcy 流模块, 蓄水前模型四周为定水头边界, 根据钻孔所揭示的水位埋深数据, 定义为 $z=20$; 模型底部和顶部为无流动边界; 蓄水后洞室临空面定义为压力水头边界, 由于通风孔的存在, 临空面的压力水头为 0。下水库开挖前土体内初始孔隙水压力等于岩层内的静水压力。二维模型中边界条件设置与三维模型基本一致, Darcy 流模块顶部与底部为无流动边界, 两侧为水头边界, 埋深为 20 m。

3) 网格剖分。模拟区网格剖分采用自由四面体网格剖分方法。为保证网格剖分均匀, 对网格单元进行人为设定: 网格最大单元大小为 70 m, 最小大单元大小为 40 m, 最大单元增长率为 1.45, 曲率因子为 0.5。

本次模拟仅考虑区域大尺度流场, 不考虑微地貌对地下水系统的影响, 采用三维模型作为研究的三维展示并结合二维剖面模型的结果分析围岩稳定性。

3 结果分析

3.1 初始应力及极限水头值

对下水库区进行了 2 组三维地应力测试, 测试位置分别为 -278 m 和 -125 m 高程处。其中 -278 m 高程处最大主应力值为 12.42 MPa, 方向为 N61°E, 最小主应力值为 6.64 MPa, 方向为 S73°W; -125 m 高程处最大主应力值为 12.40 MPa, 方向为 N72°E, 最小主应力为 5.74 MPa, 方向为 S82°W, -100 m 以下最大主应力范围 10~20 MPa。通过数值反演, 下水库围岩初始应力计算结果如图 4 所示, 图中应力以拉为正, 以压为负。结果显示模拟区第一主应力 σ_1 为 -7.15~0.86 MPa, 第二主应力 σ_2 为 -7.26~0.36 MPa, 第三主应力 σ_3 (最大主应力) 为 -17.9~0.16 MPa, 等效应力 σ_{vm} (Von Mises 应力) 为 0.08~14.2 MPa, 与测试结果相吻合。因此在计算下水库开挖后围岩长期稳定性时, 使用该计算结果的初始地应力作为初始条件, 模拟区初始正应力为 -17.8~0.84 MPa, 剪切应力为 0~5.42 MPa。总体上剪切应力相对主应力更集中, 尤

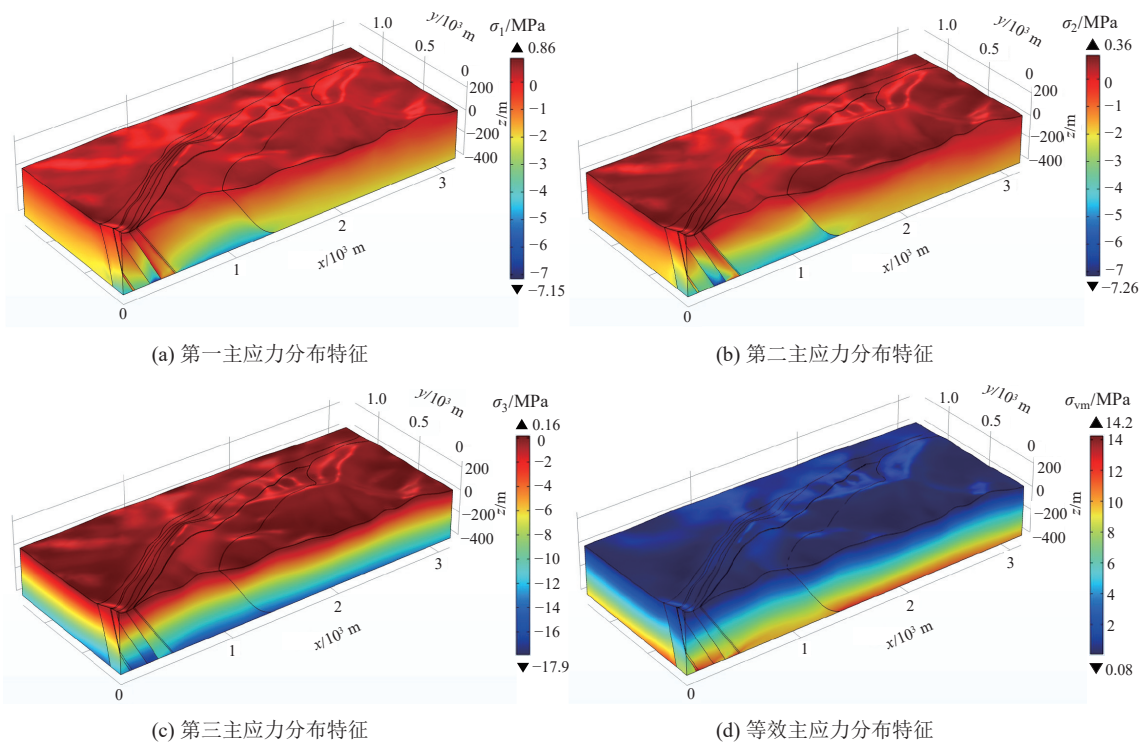


图 4 主应力及等效应力分布特征

Fig.4 Distribution characteristics of principal stress and equivalent stress

其是在不同岩层的交界面位置,剪切应力最大。

下水库开挖后依据其所能承载的极限水头值与启动压力梯度关系对下水库的极限水头值进行预测,结果显示下水库启动压力梯度为 5.98 MPa/m,对应的极限水头值为 598 m。拟建上水库正常蓄水位为 77 m,满蓄水状态下无法达到启动梯度。

3.2 开挖前、后渗流场变化特征

根据数值模拟结果显示,下水库开挖前、后地下水由自南向北流动变为由模拟区四周向下水库边界渗流(图 5),判断是由于在下水库两侧布置有排气孔,水库临空面为 0 压力边界,在压力驱动下导致地下水渗流方向改变。下水库开挖前、后最大孔隙压力值保持不变,均为 4.28 MPa,但下水库开挖前高孔隙压力

区分布在模型底部,开挖后高孔隙压力区分布在整个下水库两侧的模型底部,下水库上部及附近的孔隙压力整体减小,以下水库中部位置减小最为明显。另外,开挖后下水库四周边界,附近孔隙水压力梯度较大且水力坡降大(图 6)。下水库四周边界处的流速较下水库内部更大,将加剧下水库四周软弱围岩破坏。根据三维模型结果,当渗流稳定后仅在下水库最外围洞室存在渗流,内部渗流情况较微弱。二维模型模拟结果(图 7)与三维模型结果基本一致,开挖后下水库附近及顶部的孔隙水压力减小,水位呈漏斗状,由于发生向下水库的渗流,模拟区地下水水位整体下降。

3.3 开挖前后应力、位移及塑性区变化特征

由于作用在节理壁面上的流体压力发生变化,使

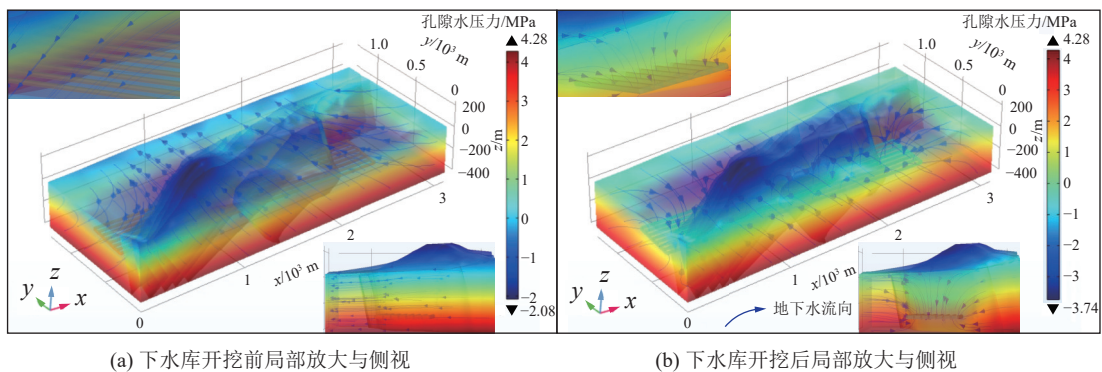


图 5 三维模型中下水库开挖前后渗流场变化

Fig.5 Change of seepage field before and after excavation of underground reservoir in 3D model

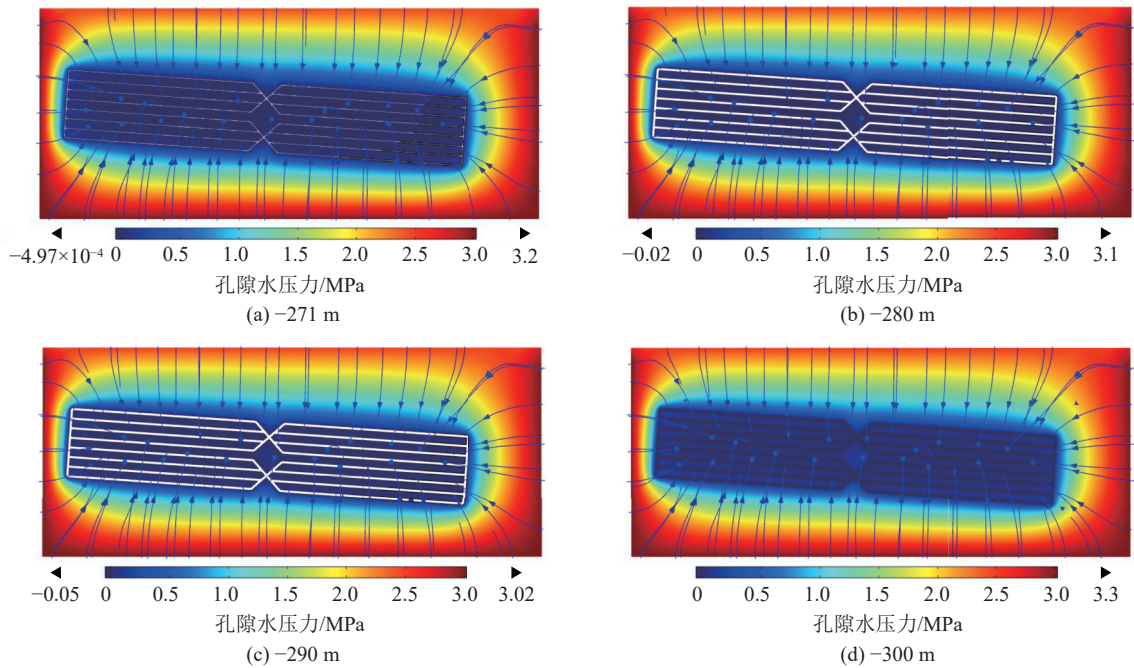


图 6 下水库开挖后不同深度渗流场平切

Fig.6 Seepage field at different depths after underground reservoir excavation

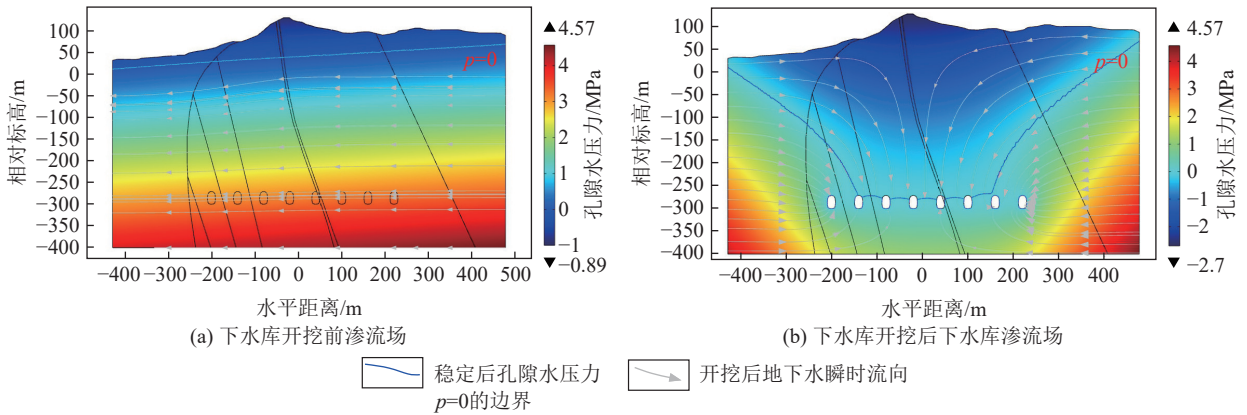


图 7 二维模型中下水库开挖前后渗流场变化

Fig.7 Change of seepage field before and after excavation of underground reservoir in two-dimensional model

岩体受力状态发生变化, 最终导致裂隙岩体发生变形^[28]。下水库开挖将引起围岩应力与孔隙水压力重新分布, 因此结合典型二维剖面模型对考虑流-固耦

合情况下的下水库开挖后应力、位移及塑性区变化进行分析, 并与不考虑流-固耦合的情况进行对比分析。

图 8 中为考虑和考虑流-固耦合的 2 种情况下

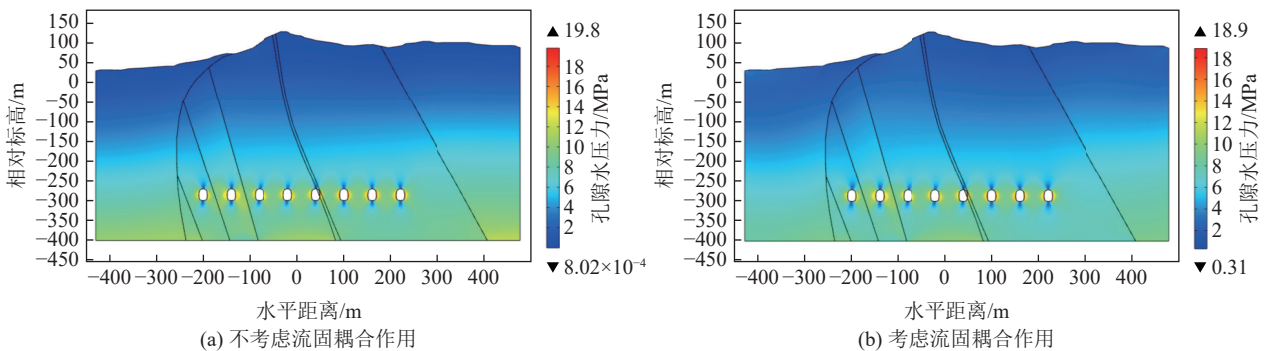


图 8 流-固耦合对下水库开挖后应力场的影响

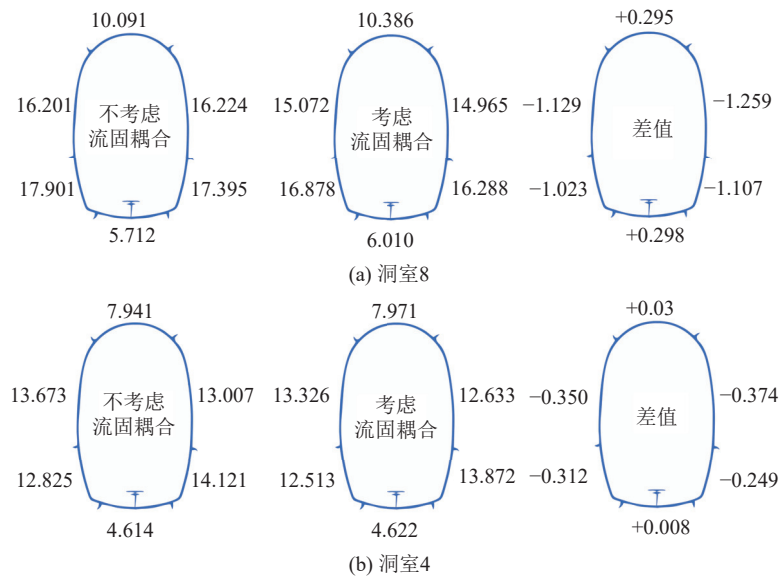
Fig.8 Effect of fluid-solid coupling on stress field after excavation of underground reservoir

下水库开挖后应力场分布 (等效应力), 整体应力的分布基本一致, 应力变化主要集中在开挖后的临空面附近。但是考虑流-固耦合作用下最大等效应力相对于不考虑情况下减小了 0.9 MPa, 减小 4.55%, 最小等效应力增加了 0.3 MPa。图 9 中进一步分析流-固耦合作用对下水库洞室临空面的影响, 自左侧计数, 计算洞室 4(典型内部洞室) 和洞室 8(典型边界洞室) 的平均等效应力, 结果显示 2 类洞室的顶部和底部等效应力均增加, 洞室两侧的等效应力均呈减小趋势, 边界洞室受孔隙水压力影响更大导致其应力变化更大。考虑流-固耦合作用后, 洞室 8 的侧壁等效应力减小了 1.0~1.3 MPa, 减小 5.71%~8.00%; 顶部和底部增加约 0.3 MPa, 变化 2.92%~5.22%。洞室 4 的侧壁等效应力减小了 0.25~0.38 MPa, 仅减小 1.76%~2.92%; 顶部和底部增加 0.01~0.03 MPa, 变化 0.17%~0.38%。另外边界洞室围岩的整体等效应力均大于内部洞室, 表明与内部的洞室相比, 边界洞室是应力集中分布与

变化区。

图 10 显示了流-固耦合作用对于位移场变化的影响。不考虑流-固耦合时, 模拟区位移主要发生于洞室周围, 尤其是洞室顶部, 其次为底部, 两侧位移较小, 另外洞室顶部至地表存在相当范围的变形 (图 10a)。考虑流-固耦合作用后, 在模拟区两侧的边界发生较大位移 (图 10b), 这可能是边界效应导致。这里重点关注下水库洞室附近的变形, 不难发现考虑流-固耦合作用后, 位移分布发生一定变化, 最大变形出现在洞室底部而非顶部。模型计算结果显示洞室附近最大变形发生于边界洞室, 最大值为 3.88 mm。而中部位置的洞室边界变形较小, 洞室 4 边界最大变形为 2.69 mm; 但与不考虑流-固耦合的情况相比, 整体洞室围岩的变形相对减小。

图 11 显示了流-固耦合作用对下水库开挖后塑性区分布的影响。结果显示影响塑性区分布的主要因素是岩石力学参数, 但流-固耦合作用一定程度上



注: 图中数值为不同边界的平均等效应力, 即 Von Mises 应力均值, MPa; 差值为等效应力的变化, MPa。

图 9 典型边界洞室与内部洞室在两种情况下等效应力分布

Fig.9 Equivalent stress distribution of typical boundary caverns and internal caverns in two cases

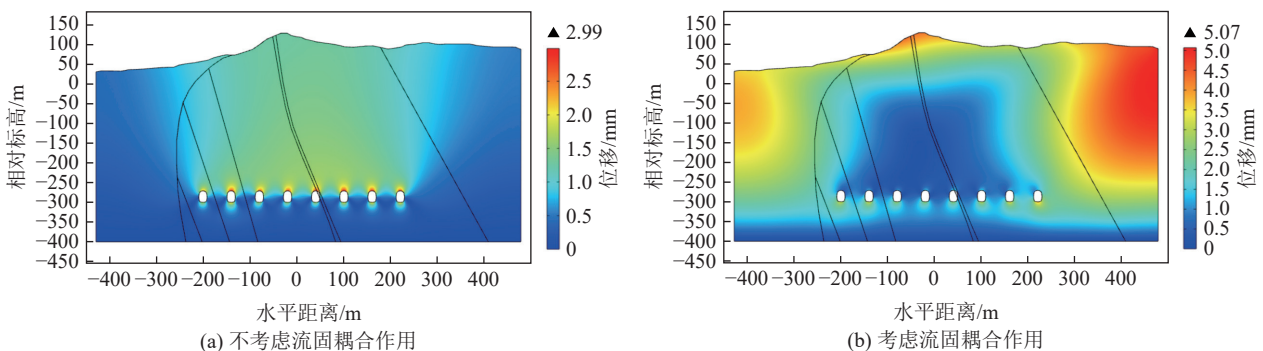
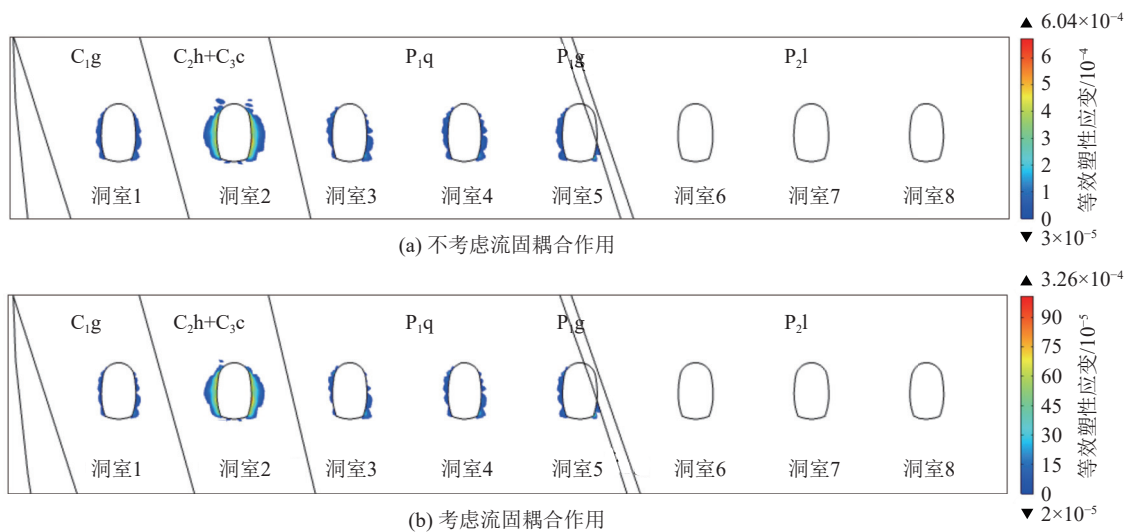


图 10 流-固耦合作用对下水库开挖后位移场的影响

Fig.10 Influence of fluid-solid coupling on displacement field after excavation of underground reservoir



注：塑性区范围值为无量纲值，仅显示有效塑性应变 > 0 的区域。

图 11 流-固耦合对下水库开挖后塑性区分布的影响

Fig.11 Influence of fluid-solid coupling on the distribution of plastic zone after excavation

减小了塑性区的分布。高骊山组洞室 1 的塑性区最大范围从 2.5 m 减小至 1.9 m, 减少 24%, 船山-黄龙组的洞室 2 塑性区最大范围从 4.01 m 减小至 3.45 m, 减少 13.97%。渗流引起等效应力变化为主要影响因素。

综上, 考虑流-固耦合作用后, 无论是位移还是塑性区分布均产生一定变化, 但变化相对较小, 并没有引起实质性变化, 因此下水库开挖后围岩整体仍然具有稳定性。

4 加/卸载条件下下水库围岩稳定性特征

4.1 加/卸载条件下模型概化

在充/放水过程中, 下水库中水位的变化将对围岩施加一个随着水位而变化的压力, 引起围岩中孔隙水压力的变化及围岩水位变化; 频繁充/放水可能引起局部应力场改变, 从而导致周围岩土变形破坏, 对围岩一支护体的稳定性产生破坏。基于上节考虑围岩孔隙水压力的流-固耦合模型, 进一步研究充/放水条件下下水库围岩应力分布状态和稳定。以下水库水位作为自变量, 假设抽注水流量相对稳定, 下水库水位波动升降, 水位波动符合正弦波函数。考虑到下水库衬砌与否, 共设计 3 种模拟研究计划。在不对下水库进

行衬砌的条件下, 设计 2 种工况: 工况 1 为常规运行情景, 即按照正常设计水位进行抽蓄水; 工况 2 为满抽满蓄运行情景, 即极端充-放水情景下的运行工况。工况 3 为考虑下水库进行衬砌和围岩软化效应, 具体见表 3。

不同运行工况下, 下水库水位不断变化, 对于 Darcy 流模块, 需将下水库边界设置为变压力水头边界, 压力水头值与下水库位置与时间有关。高程为 y 的点在时间 t 时刻的压力水头 H_{p0} 为

$$H_{p0} = 0, g(t) - y < 0; H_{p0} = g(t) - y, g(t) - y \geq 0 \quad (4)$$

式中: $g(t)$ 为水位变化正弦波函数的绝对值, m。

对于固体力学模块, 需将下水库边界设置为边界载荷, 载荷类型设置为压力。边界某一单的压力值 p 与该点的压力水头 H_{p0} 有关 (1 m 水柱换算为 0.01 MPa), 压力载荷 p 为

$$p = H_{p0} = 0.01 \text{ MPa/m} \quad (5)$$

若不考虑下水库衬砌则下水库边界为变压力水头边界, 不同衬砌条件下边界条件设定, 按照式 (5) 中的设定值即可。当下水库衬砌时, 下水库边界在 Darcy 流模块中可定义为无流动边界。衬砌后, 围岩地下水位回升至天然状态, 考虑到地下水位回升对岩体产生

表 3 运行工况设计对照

Table 3 Operating condition design comparison

工况	条件	最低水位/m	最高水位/m	调节高度/m	
工况1	不衬砌	常规情景	-297	-277	20
工况2		满抽满蓄	-300	-271	29
工况3	衬砌	软化效应	-297	-277	20

浸泡作用, 岩体软化造成抗压强度减小, 岩石抗压强度与弹性模量存在相关关系^[29-30], 且相关试验显示岩体浸泡后含水率增加引起弹性模量减小^[31-34]。因此

在岩土力学模块依据实测岩石软化系数结果(表 4), 在流-固耦合模型中模拟软化效应对围岩力学行为的影响。

表 4 不同岩层软化系数试验结果

Table 4 Test results of softening coefficient of different stratum

岩性	坟头组	五通组	高骊山组	船山-黄龙组	栖霞山组	龙潭组	青龙组	闪长岩	闪长玢岩
软化系数	0.87	0.90	0.87	0.86	0.70	0.90	0.99	0.92	0.94

4.2 不同运行工况下围岩力学行为特征

4.2.1 不衬砌条件下

如图 12 所示, 通过数值模拟, 下水库在充/放水条件下其附近渗流场随下水库水位波动而变化。工况 1(常规情景)条件下, 下水库充水过程中地下水水位上升, 在 $t=0.5$ d 时, 下水库水位达到最高值 -277 m, 地下水水位抬升主要分布在洞室两侧的上部, 洞室顶部水

位上升不明显(图 12a)。随后下水库水位降低, 地下水水位逐渐降低至初始 $t=0$ 时的水位。工况 2 条件下(满抽满蓄)条件下在 $t=0.5$ d 时, 下水库水位达到最高值 -271 m, 下水库充水使区域地下水水位抬升并覆盖下水库, 高出 $10\sim 50$ m, 两侧水位上升大于中间(图 12b)。

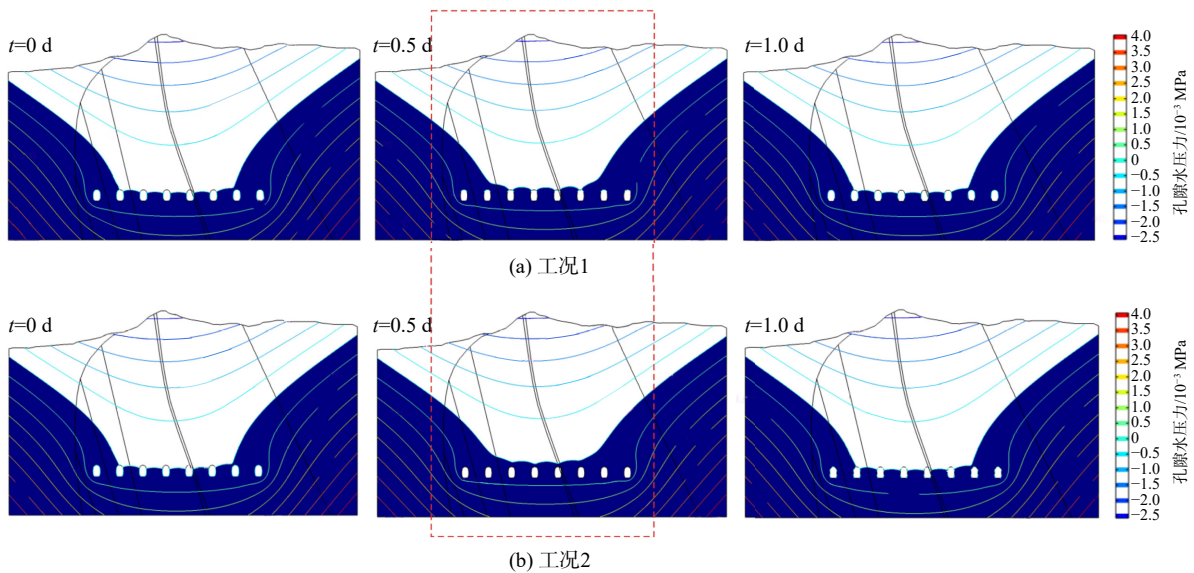


图 12 二维流场水位及孔隙水压力

Fig.12 Two-dimensional flow field water level and pore water pressure

由于下水库进水口设置为底部进水, 当下水库充水时, 仅考虑下水库水体对围岩的静水压力。如图 13 所示, 工况 1 条件下, 地下水水位在 $-297\sim -277$ m 波动, 围岩点所受静水压力介于 $0\sim 0.2$ MPa, 围岩受到的平均静水压的变化在 $0.005\sim 0.1$ MPa, 平均值为 0.058 MPa; 工况 2 条件下, 水库水位在 $-300\sim -271$ m 波动, 围岩点所受静水压力介于 $0\sim 0.29$ MPa, 围岩受到的平均静水压在 $0\sim 0.15$ MPa 波动变化(下水库水抽干时为 0), 平均值为 0.079 MPa, 比工况 1 高出 0.021 MPa。

工况 1 模拟结果得出下水库水位变化对围岩最大等效力由 23.1 MPa 减小为 22.7 MPa, 仅减小 1.73% 。工况 2 运行条件下, 下水库水位变化对围岩

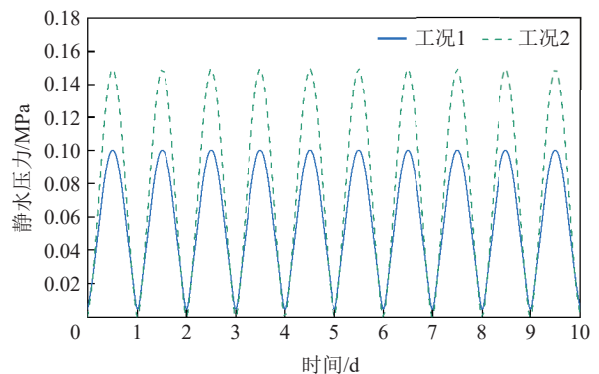


图 13 工况 1 和工况 2 下水库平均静水压变化

Fig.13 Average hydrostatic pressure variation diagram under condition 1 and condition 2

最大等效应力由 23.1 MPa 减小为 22.6 MPa, 仅减小 2.16%, 可见下水库水位变化对于围岩等效应力的大小和分布影响均相对较小。工况 1 模拟结果显示围岩最大位移由 3.88 mm 减少至 3.80 mm, 减少了 2.06%; 工况 2 条件下围岩最大位移由 3.88 mm 减少至 3.82 mm, 减少了 1.54%, 因此在下水库充、放水条件下, 变化均不显著。

4.2.2 衬砌和软化效应

在考虑岩石软化效应时, 假设岩石软化并非典型的时变过程, 对岩石在长期浸泡过程中力学参数发生了变化情况进行模拟。图 14 显示了考虑流-固耦合作用和岩石软化效应模拟区等效应力的分布情况。与不考虑这 2 种情况相比, 该条件下整体应力的空间分布一致, 即应力集中在洞室临空面的两侧, 最大等效应力由 19.8 MPa 减小至 18.8 MPa, 减小了 5.05%, 最小等效应力增加了 0.43 MPa, 其中流-固耦合作用和岩石软化分别使最大等效应力减小了 0.9 和 0.1 MPa, 分别使最小等效应力增加了 0.31 和 0.12 MPa, 表明流-固耦合和软化效应在一定程度上改变了岩体的等效应力, 但软化效应对等效应力变化的影响较小。

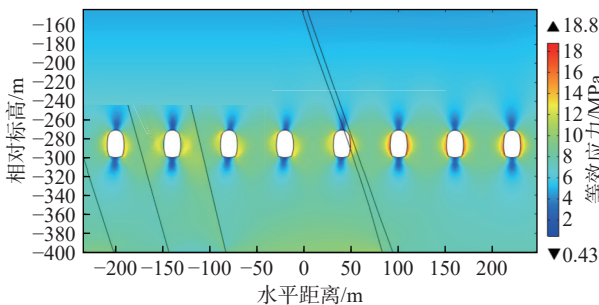


图 14 工况 3 下水库等效应力分布 (流-固耦合/软化效应)
Fig.14 Equivalent stress distribution of condition 3 (fluid-solid coupling/softening effect)

在工况 3 条件下, 下水库围岩位移和体积应变分布如图 15 所示。与初始情况相比, 最大位移量由 2.99 mm 增加至 5.11 mm, 增加了 70.9%, 且位移主要集中在下水库洞室底部, 其次为顶部, 两侧位移较小。软化效应下最大体积应变由 0.03% 增加至 0.08%, 多数洞室的体积应变集中在顶部和底部, 而船山-黄龙组地层主要集中在洞室两侧, 推断是由于该组地层黏聚力和内摩擦角较小, 稳定性较差, 所以洞室与该组地层交界处需强化防参与支护。模拟区塑性区的分布结果如图 16 所示, 与不考虑 2 种条件和仅考虑流-固耦合的模拟结果进行对比可以发现, 软化作用下高骊山组 1 号洞室的塑性区最大范围从 1.9 m 增加至 2.3 m, 增加了 21.05%; 船山-黄龙组的洞室 2 塑性区最大范围从 3.45 m 增加至 4.25 m, 增加了 18.82%。

结果表明流-固耦合作用一定程度上减小了塑性区的分布, 但是软化作用扩大了塑性区的范围, 岩性参数成为影响塑性区分布的主要因素。综上, 软化效应对等效应力影响不大, 但可以增加围岩的位移量和体积应变, 也可扩大塑性区的范围, 在一定程度上可以减弱围岩稳定性。因此在下水库支护时, 需重视对洞室的衬砌。

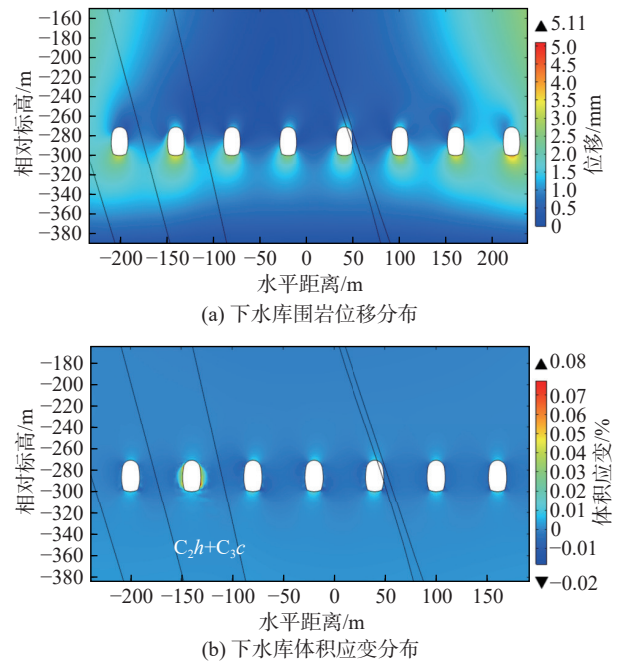


图 15 工况 3 下水库变形情况分布 (流-固耦合/软化效应)
Fig.15 Distribution of reservoir deformation under working condition 3 (fluid-solid coupling / softening effect)

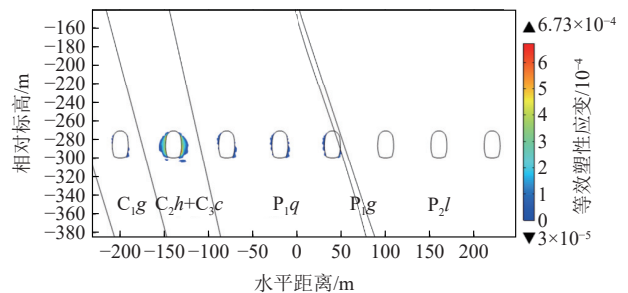


图 16 工况 3 下水库塑性区分布情况 (流-固耦合/软化效应)
Fig.16 Distribution of reservoir plastic zone under working condition 3 (fluid-solid coupling / softening effect)

5 结 论

- 1) 依据单向流-固耦合的方式模拟下水库开挖后围岩稳定性特征。下水库开挖后地下水渗流方向变为由模拟区四周向下水库边界渗流, 水位呈漏斗状, 模拟区地下水水位整体下降; 下水库附近及顶部的孔隙水压力整体减小。
- 2) 考虑流-固耦合情况下, 下水库围岩应力变化

主要集中在开挖后的临空面,最大等效应力相对于不考虑情况下减小了 0.9 MPa,最小等效应力增加了 0.3 MPa;相对于内部洞室,边界洞室是应力集中分布与变化区;整体洞室围岩变形减少,边界洞室变形(3.88 mm)大于内部洞室(2.69 mm),塑性区分布减小。下水库开挖后围岩整体仍然具有稳定性。

3) 模拟研究了下水库充/放水条件下下水库围岩应力分布状态和稳定性,根据 3 种工况运行结果显示:下水库运行期间区域地下水水位将有一定程度恢复;不考虑衬砌时,满抽满蓄条件下水位上升高度大于常规情况;下水库运行期间,工况 1 和工况 2 下水体对围岩的平均静水压力分别为 0.058 和 0.079 MPa,工况 2 比工况 1 高 21.58%;2 种工况下围岩最大等效应力分别减小 1.76% 和 1.69%;下水库运行期间加载和卸载对围岩位移的影响较小。工况 3 中流-固耦合作用一定程度上减小了塑性区的分布,但是软化效应增加围岩的位移量和体积应变,也可扩大塑性区的范围,在一定程度上可以减弱围岩稳定性,因此在下水库支护时,需重视对洞室的衬砌。

参考文献(References):

- [1] LI S R, HU Y T, ZHANG L H. Coupling coordination relationship of pumped storage power station and eco-environment system[J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 52: 105029.
- [2] 强海洋, 郭冬艳. 中国矿业绿色发展的标准体系建设研究[J]. *绿色矿山*, 2024, 2(1): 94-102.
QIANG Haiyang, GUO Dongyan. Research on the construction of standard system for green development of China's Mining Industry[J]. *Journal of Green Mine*, 2024, 2(1): 94-102.
- [3] 张建云, 周天涛, 金君良. 实现中国“双碳”目标 水利行业可以做什么[J]. *水利水电工程学报*, 2022(1): 1-8.
ZHANG Jianyun, ZHOU Tiantao, JIN Junliang. What can the water sector do to achieve China's dual carbon target[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2022(1): 1-8.
- [4] 聂子攀, 肖立业, 邱清泉, 等. 地下抽水蓄能发展综述[J]. *储能科学与技术*, 2024, 13(5): 1606-1619.
NIE Zipan, XIAO Liye, QIU Qingquan, et al. Overview of the development of underground pumped hydro storage[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2024, 13(5): 1606-1619.
- [5] 张智刚, 康重庆. 碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(8): 2806-2819.
ZHANG Zhigang, KANG Chongqing. Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a carbon neutrality future[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(8): 2806-2819.
- [6] TAM S W, BLOMQUIST C A, KARTSOUNES G T. Underground pumped hydro storage: An overview[J]. *Energy Sources*, 1979, 4(4): 329-351.
- [7] SEIWALD S. Erweiterung kraftwerk Naßfeld-erhöhung bockhartseedamm[J]. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 2007, 59(7): 91-97.
- [8] BECK H P, SCHMIDT M. Windenergiespeicherung durch Nachnutzung stillgelegter Bergwerke[R]. Clausthal-Zellerfeld: Clausthal University of Technology, 2011.
- [9] PUJADES E, WILLEMS T, BODEUX S, et al. Underground pumped storage hydroelectricity using abandoned works (deep mines or open pits) and the impact on groundwater flow[J]. *Hydrogeology Journal*, 2016, 24(6): 1531-1546.
- [10] WINDE F, KAISER F, ERASMUS E. Exploring the use of deep level gold mines in South Africa for underground pumped hydroelectric energy storage schemes[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 78: 668-682.
- [11] 王志杰, 姜鹏飞, 宋振骥, 等. 关闭/废弃矿井抽水蓄能开发利用现状与进展[J]. *煤炭学报*, 2024, 49(3): 1358-1374.
WEN Zhijie, JIANG Pengfei, SONG Zhenqi, et al. Development status and progress of pumped storage in underground space of closed/abandoned mines[J]. *Journal of China Coal Society*, 2024, 49(3): 1358-1374.
- [12] 卞正富, 周跃进, 曾春林, 等. 废弃矿井抽水蓄能地下水库构建的基础问题探索[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(10): 3308-3318.
BIAN Zhengfu, ZHOU Yuejin, ZENG Chunlin, et al. Discussion of the basic problems for the construction of underground pumped storage reservoir in abandoned coal mines[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(10): 3308-3318.
- [13] COLAS E, KLOPRIES E M, TIAN D Y, et al. Overview of converting abandoned coal mines to underground pumped storage systems: Focus on the underground reservoir[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 73: 109153.
- [14] LU P, ZHOU L, CHENG S, et al. Main challenges of closed/abandoned coal mine resource utilization in China[J]. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 2020, 42(22): 2822-2830.
- [15] 康红普, 李全生, 张玉军, 等. 我国煤矿绿色开采与生态修复技术发展现状及展望[J]. *绿色矿山*, 2023, 1(1): 1-24.
KANG Hongpu, LI Quansheng, ZHANG Yujun, et al. Development status and prospect of greenmining and ecological restoration technology of coal mines in China[J]. *Journal of Green Mine*, 2023, 1(1): 1-24.
- [16] 高学平, 袁泽雨. 抽水蓄能电站地下水库建设进展及关键水力学问题[J]. *水利学报*, 2023, 54(9): 1058-1069.
GAO Xueping, YUAN Zeyu. Development of the underground reservoirs of pumped-storage hydropower and key hydraulics issues[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2023, 54(9): 1058-1069.
- [17] 王锋, 李皓浩, 吴建雄. 中国经济绿色发展的政策演变、评价方法和实现路径[J]. *绿色矿山*, 2024, 2(2): 136-149.
WANG Feng, LI Haohao, WU Jianxiong. Policyevolution, evaluation methods and realization paths of economic green development in China[J]. *Journal of Green Mine*, 2024, 2(2): 136-149.
- [18] 王婷婷, 曹飞, 唐修波, 等. 利用矿洞建设抽水蓄能电站的技术可行性分析[J]. *储能科学与技术*, 2019, 8(1): 195-200.
WANG Tingting, CAO Fei, TANG Xiubo, et al. Technical feasibility analysis of utilizing mine to construct pumped storage plant[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2019, 8(1): 195-200.

- [19] TONG L Y, LIU L, QIU Y, et al. Tunneling in abandoned coal mine areas: Problems, impacts and protection measures[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2013, 38: 409–422.
- [20] CERFONTAINE B, RONCHI B, ARCHAMBEAU P, et al. Guidelines related to the use of an existing cavity (mine/quarry) as reservoir of a pumped storage hydroelectric facility[R]. Mons, Belgium: University of Mons, 2018.
- [21] 赵伟. 基于废弃矿井的光伏—抽水蓄能发电系统设计[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2019.
ZHAO Wei. Design of photovoltaic-pumped storage power generation system based on abandoned mine[D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2019.
- [22] 靳晓光, 李晓红, 张燕琼. 越江隧道施工过程的渗流-应力耦合分析[J]. 水文地质工程地质, 2010, 37(1): 62–67.
JIN Xiaoguang, LI Xiaohong, ZHANG Yanqiong. Seepage-stress coupling analysis of river-crossing tunnel excavating[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2010, 37(1): 62–67.
- [23] ZHANG Y J, XU T, XU Q, et al. Hydro-mechanical coupled analysis of the stability of surrounding rock mass of underground water-sealed oil storage[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 405–408: 402–405.
- [24] 蔚立元, 李术才, 徐帮树, 等. 水下隧道流固耦合模型试验与数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(7): 1467–1474.
WEI Liyuan, LI Shucui, XU Shubang, et al. Study of solid-fluid coupling model test and numerical analysis of underwater tunnels[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(7): 1467–1474.
- [25] 纪佑军, 刘建军, 程林松. 考虑流-固耦合的隧道开挖数值模拟[J]. 岩土力学, 2011, 32(4): 1229–1233.
JI Youjun, LIU Jianjun, CHENG Linsong. Numerical simulation of tunnel excavation considering fluid solid coupling[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(4): 1229–1233.
- [26] 徐建国, 于松聆, 王刚, 等. 基于流固耦合理论的隧道围岩稳定性分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2018, 16(4): 62–67.
XU Jianguo, YU Songling, WANG Gang, et al. Stability analysis of tunnel surrounding rock based on fluid-solid coupling theory[J]. *Journal of Water Resources and Architectural Engineering*, 2018, 16(4): 62–67.
- [27] 白丽伟, 吴迪, 唐志新, 等. 应力-渗流耦合效应下煤矿地下水库坝体稳定性研究[J]. 中国矿山工程, 2021, 50(5): 1–6.
BAI Liwei, WU Di, TANG Zhixin, et al. Study on the stability of coal mine underground reservoir dam under the coupling action of stress and seepage[J]. *China Mine Engineering*, 2021, 50(5): 1–6.
- [28] 李术才, 平洋, 王者超, 等. 基于离散介质流固耦合理论的地下石油洞库水封性和稳定性评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(11): 2161–2170.
LI Shucui, PING Yang, WANG Zhechao, et al. Assessments of containment and stability of underground crude oil storage caverns based on fluid-soild coupling the theory for discrete medium[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(11): 2161–2170.
- [29] 林斌, 徐冬. 不同岩性岩石的单轴抗压强度与弹性模量关系[J]. 煤矿安全, 2017, 48(3): 160–162, 166.
LIN Bin, XU Dong. Relationship between uniaxial compressive strength and elastic modulus of rocks based on different lithological characters[J]. *Safety in Coal Mines*, 2017, 48(3): 160–162, 166.
- [30] 何鹏, 刘长武, 王琛, 等. 沉积岩单轴抗压强度与弹性模量关系研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2011, 43(4): 7–12.
HE Peng, LIU Changwu, WANG Chen, et al. Correlation analysis of uniaxial compressive strength and elastic modulus of sedimentary rocks[J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2011, 43(4): 7–12.
- [31] 李波波, 王忠晖, 任崇鸿, 等. 水-力耦合下煤岩力学特性及损伤本构模型研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(2): 315–323, 332.
LI Bobo, WANG Zhonghui, REN Chonghong, et al. Mechanical properties and damage constitutive model of coal under the coupled hydro-mechanical effect[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(2): 315–323, 332.
- [32] 朱珍德, 邢福东, 王思敬, 等. 地下水对泥板岩强度软化的损伤力学分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(S2): 4739–4743.
ZHU Zhende, XING Fudong, WANG Sijing, et al. Analysis on strength softening of argillite under groundwater by damage mechanics[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(S2): 4739–4743.
- [33] 岑朝正, 蒋永芳, 蒋朝军. 不同含水率下煤岩弹性模量变化实验分析[J]. 价值工程, 2015, 34(24): 154–155.
CEN Chaozheng, JIANG Yongfang, JIANG Chaojun. Experiment and analysis about the change of elasticity modulus of coal with different water contained[J]. *Value Engineering*, 2015, 34(24): 154–155.
- [34] 于超云. 水对岩石力学性质影响的试验及数值模拟研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
YU Chaoyun. Experimental study and numerical simulation on the effect of water on rock mechanical properties[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019.