

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20221628

利用退出煤矿修建抽水蓄能电站的地下厂房及复杂巷道群三维渗流规律研究

毛中华¹, 宋立军², 王惠民³, 张沛顶¹, 徐亮², 韩云², 罗玉龙³, 盛金昌³, 詹美礼³, 何淑媛³

(1. 上海大屯能源股份有限公司, 上海 200120; 2. 中电联电力发展研究院有限公司, 北京 100761;
3. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 针对退出煤矿修建抽水蓄能电站地下厂房及复杂巷道群的三维渗流分析与控制关系着地下空间长期渗控安全性, 是目前利用退出煤矿修建抽水蓄能电站所面临的关键技术问题之一, 考虑下水库(巷道群)不同围岩的加固方案, 结合上水库、主厂房及煤矿采空区的空间位置, 建立龙东煤矿复杂地下空间的三维渗流分析精细化有限元模型; 开展了施工期及运行期各典型工况的三维渗流场分析, 得到不同工况下地下巷道群的外水压力、地下厂房区外水压力、渗流量等重要设计参数; 精细模拟抽水蓄能电站中的众多排水孔幕, 开展各种可能不利情况下的渗流场计算, 优化确定最优的排水孔幕间距。研究结果对退出煤矿建设抽水蓄能电站的渗流分析及渗控优化设计具有重要的指导意义。

关键词: 退出煤矿; 抽水蓄能电站; 三维渗流分析; 外水压力; 排水孔幕

中图分类号: TV223.1; TV554 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7709(2023)08-0147-04

1 引言

退出煤矿再开发、废弃资源再利用为煤矿延寿和企业提升综合效益创造了条件, 同时符合国家能源转型及当地大力发展光伏的需要, 使矿区从工业耗水耗电大户转变为新能源电源输出地。谢和平等^[1]初步预测利用我国废弃煤矿地下空间蓄能发电的能力, 可能达到我国2014年全年发电总量的1.5倍, 这对促进煤炭企业转型发展、助力“双碳”目标实现具有重要创新和示范意义; 卞正富等^[2]认为利用废弃矿井建设抽水蓄能电站有两个问题亟待解决, 一是抽蓄水循环过程中地下水文地质、水化学特征; 二是运行期下巷道围岩的有效密封性。第二个问题从渗流的安全性到岩体结构的稳定性, 是下水库构建的关键控制因素; 张庆贺等^[3]以淮南矿区潘一煤矿为例, 探究了以煤矿塌陷区一地下硐室群为下水库的建设可行性。受限于废弃煤矿地下硐室群的可利用空间, 抽水蓄

能电站装机规模较小。目前, 地下厂房及复杂巷道群的三维渗流分析与控制关系着地下空间长期渗控安全性, 是利用退出煤矿修建抽水蓄能电站面临的关键技术问题之一^[4,5]。因此, 本文建立龙东煤矿复杂地下空间的三维渗流分析精细化有限元模型, 分析了下水库巷道群及厂房区在蓄水影响下的渗流场变化规律, 讨论了外水压力的变化范围; 从渗透稳定角度分析局部存在的最大渗透坡降, 建议增加出口保护措施; 并针对排渗孔间距开展优化计算, 从而确定渗透安全下的最合理间距。研究结果为退出煤矿建设抽水蓄能电站提供了初步的参考依据。

2 渗流控制方程及有限元分析格式

将各地层渗透介质按各向异性多孔介质进行处理^[6], 在多孔介质中水流运动为层流状态, 服从线性达西定律, 则有:

$$v_i = -k_{ij}J_j = -k_{ij}h_{,j} \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (1)$$

收稿日期: 2022-08-08, **修回日期:** 2022-10-13

基金项目: 中国科学院青海盐湖研究所基础研究青年创新交叉团队项目(IJCTD-2022-2); 湖南省水利科技项目(XSKJ2021000-35); 河海大学大型仪器设备共享基金(B220370201); 湖南省水利科技项目(XSKJ2019081-04)

作者简介: 毛中华(1966-), 男, 硕士、高级经济师, 研究方向为煤炭开采、通风、地测防治水、信息化技术, E-mail: maozhonghua@dtcec.com

通讯作者: 王惠民(1993-), 男, 博士、讲师、硕导, 研究方向为裂隙岩体渗流, E-mail: huimin.wang@hhu.edu.cn

式中, v_i 为流速分量; k_{ij} 为介质的渗透张量; J 为水力坡降; h 为水头。

将式(1)代入渗流连续性方程 $v_{i,i} = 0$, 可得稳定渗流基本控制微分方程:

$$(k_{ij}h_{,j})_{,i} = \omega \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (2)$$

式中, ω 为恒定降雨入渗或蒸发量。

取八节点等参单元离散渗流场, 则单元内的水头 $H(x, y, z)$ 分布为:

$$H(x, y, z) = \sum_{i=1}^8 N_i H_i \quad (3)$$

式中, x, y, z 分别为三维空间 x, y, z 轴方向; N_i 为空间八节点等参单元的形函数; H_i 为水头。

应用 Galerkin 方法对微分方程(式(3))进行离散, 推导整理, 再利用变分原理可得三维渗流有限元计算的基本格式为:

$$M^e p^e = F^e \quad (4)$$

式中, M^e 为单元渗透矩阵; p^e 为节点水压力值; F^e 为单元渗流量矩阵。

最后, 由单元渗透矩阵形成整体渗透矩阵 F :

$$Mp = F \quad (5)$$

3 三维渗流分析精细化有限元模型

龙东煤矿位于江苏省徐州市北偏西约 86 km 处, 南距沛县 25 km。项目利用卞庄龙东矿采煤沉陷区区域进行建设, 采用渔光互补模式, 总占地面积约 3.90 km²。本区在太古界的结晶基底上沉积了震旦系、寒武系、中下奥陶统地层。由于加里东运动影响, 上奥陶统至下石炭统地层缺失, 在中奥陶统的侵蚀面上, 广泛沉积了中上石炭统、二叠系、侏罗白垩系(地层不全)、第三系、第四系等。矿区所处的水文地质单元, 北起皂山断层, 南至丰沛断层, 东至峰山断层, 西至嘉祥断层, 区域水文地质见图 1。

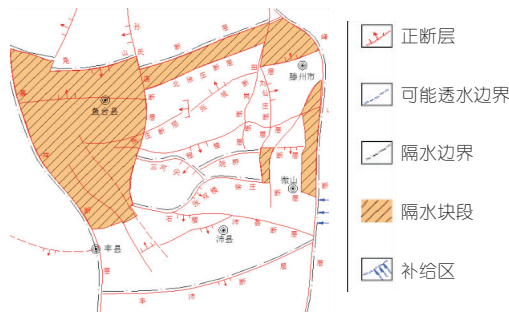


图 1 区域水文地质图

Fig. 1 Diagram of the regional hydrogeology

3.1 龙东煤矿地下厂房及巷道群概况

经初步统计, 可利用巷道长度约 22 km, 现有可利用巷道空间约 $25.6 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。上水库主要利

用塌陷区形成的水域, 水量可以满足需求。厂房系统主要由引水阀廊道、主厂房洞、尾水阀廊道、排水廊道等建筑物组成。环绕主厂房洞周边设有三层排水廊道, 上层排水廊道布置倾向主厂房洞顶拱的“人”字形排水孔幕, 排水孔长 $L = 28 \text{ m}$, 孔径 $\Phi = 100 \text{ mm}$, 间距 3 m, 可减少地下水向地下厂房顶拱渗漏。上层与中层及中层与下层廊道周圈向下布置竖向排水孔幕 ($\Phi = 100 \text{ mm}$, 间距 3 m), 可截流和排泄围岩内的入渗水体。

3.2 模型计算参数及边界条件

龙东煤矿用于抽水蓄能的地下空间整体三维有限元网格模型共计 113 408 个节点, 119 684 个单元。所建立的三维有限元网格模型既对东大巷、东西翼大巷衔接段、西大巷所组成的下水库巷道群、上水库、煤矿采空区进行了大范围的模拟, 又对巷道注浆加固层、混凝土衬砌层、厂房、排水廊道、排水孔等进行了精细化刻画。

在渗流控制计算分析中, 计算模型的边界条件主要有已知水头边界和可能出渗边界, 龙东煤矿抽水蓄能渗流计算模型的计算工况见表 1。表 2 给出了三维渗流计算分析的各地层、不同类型巷道围岩及注浆加固层、混凝土砌碇的渗透系数建议值。

表 1 三维渗流工况

| 渗流工况 | 上水库/m | 下水库/m | 四周边界 |
|-----------|-------|-------|-------|
| 施工期 | 30 | -281 | 不透水边界 |
| 运行期(抽水工况) | 30 | -281 | 不透水边界 |
| 运行期(发电工况) | 30 | -241 | 不透水边界 |

表 2 三维渗流分析的计算参数

| | | | cm/s | | |
|--------|--------------------|--------------------|---------|--------------------|--------------------|
| 材料名称 | 水平渗透系数 | 垂直渗透系数 | 材料名称 | 水平渗透系数 | 垂直渗透系数 |
| 土层 | 1×10^{-4} | 1×10^{-4} | A类巷道注浆层 | 2×10^{-6} | 2×10^{-6} |
| A类巷道围岩 | 1×10^{-5} | 1×10^{-5} | B类巷道注浆层 | 6×10^{-6} | 6×10^{-6} |
| B类巷道围岩 | 3×10^{-5} | 3×10^{-5} | 混凝土砌碇 | 1×10^{-7} | 1×10^{-7} |

4 三维渗流计算结果分析

通过设置典型剖面, 切取三维计算结果, 从而给出典型剖面的渗流场分布图。根据不同段巷道围岩性质和支护方式的差异, 初步拟定 23 个典型剖面, 其平面位置见图 2。

4.1 地下厂房及复杂巷道群渗流场分布规律

以东西翼大巷衔接段剖面 1 为例, 分析抽水蓄能电站不同工况下地下厂房及复杂巷道群的渗流场分布规律。图 3 为东西大巷衔接段巷道群及厂房区在施工期的渗流场等势线分布图。由图 3 可看出, 经过采空区后, 浸润线埋深在 -250 m 左

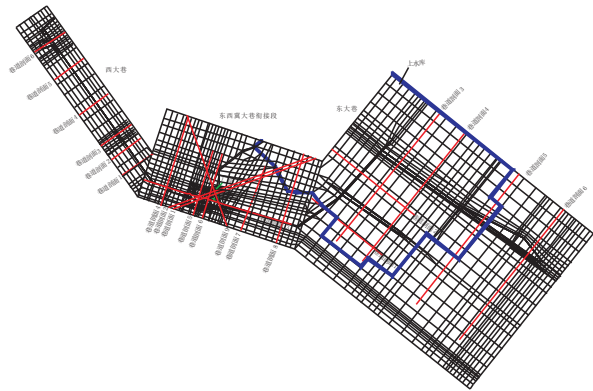


图 2 典型剖面平面位置

Fig. 2 The location of typical profiles

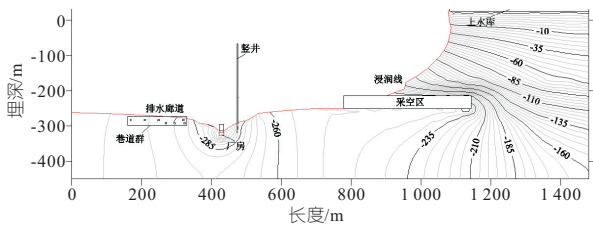


图 3 东西翼大巷衔接段施工期剖面 1 等势线

Fig. 3 Isopotential diagram of profile 1 in the East-west joint section during construction stage

右, 厂房处浸润线埋深进一步降低, 在 -295 m 。剖面 1 是穿过厂房区的剖面, 渗流场等势线在厂房周围较为密集, 这也体现了厂房周围布置排水措施的必要性。

图 4 给出了东西翼大巷衔接段及厂房区在运行期 (-281 m) 工况和运行期 (-241 m) 工况剖面 1 渗流场等势线分布。由图 4 可看出, 运行期 -281 、 -241 m 工况渗流场等势线与施工期基本相同, 受蓄水影响, 其浸润线略有上升。

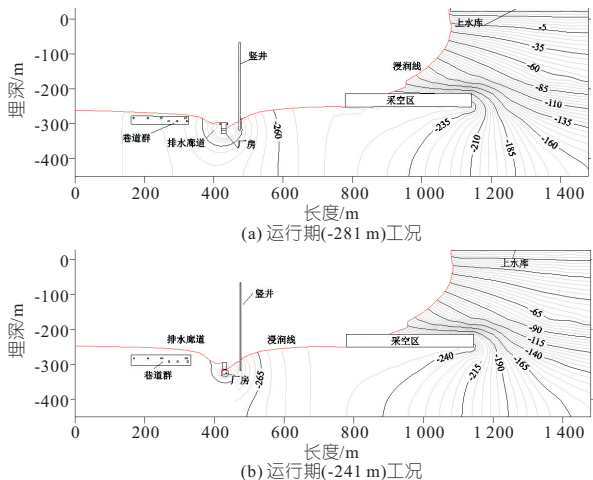


图 4 东西翼大巷衔接段 -281 、 -241 m 工况剖面 1 等势线
Fig. 4 Isopotential diagram of profile 1 in the East-west joint section at the -281 m and -241 m working condition

4.2 地下厂房及复杂巷道群外水压力分析

表 3~5 分别给出了施工期和运行期工况下西大巷、东西翼大巷衔接段、东大巷各剖面外水压力

表 3 施工期和运行期西大巷各典型剖面外水压力
Tab. 3 External water pressure in each typical profile of the West alley during construction and operation

| 外水 压力/m | A 类围岩巷道 | | | | | |
|-------------------------|---------|------|------|------|------|------|
| | 剖面 1 | 剖面 2 | 剖面 3 | 剖面 4 | 剖面 5 | 剖面 6 |
| 施工期 | 40 | 20 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| 运行期 (-281 m) | 40 | 20 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| 运行期 (-241 m) | 60 | 50 | 40 | 40 | 40 | 40 |

注: 西大巷各典型剖面支护方案均为注浆加固。

表 4 施工期和运行期东西翼大巷衔接段各典型剖面外水压力

Tab. 4 External water pressure in each typical profile of the East-west joint section during construction and operation

| 外水 压力/m | 厂房 | | | B 类围岩巷道 | | | | |
|-------------------------|------|------|------|---------|------|------|------|------|
| | 剖面 1 | 剖面 2 | 剖面 9 | 剖面 4 | 剖面 5 | 剖面 6 | 剖面 7 | 剖面 8 |
| 施工期 | 10 | 10 | 10 | 25 | 10 | 30 | 40 | 40 |
| 运行期 (-281 m) | 10 | 10 | 10 | 26 | 13 | 12 | 30 | 40 |
| 运行期 (-241 m) | 10 | 10 | 10 | 40 | 30 | 30 | 39 | 41 |

注: 东西翼大巷衔接段 B 类围岩巷道支护方案均为注浆+砌碇。

表 5 施工期和运行期东大巷各典型剖面外水压力

Tab. 5 External water pressure in each typical profile of the East alley during construction and operation

| 外水 压力/m | B 类围岩巷道 | | A 类围岩巷道 | | | |
|-------------------------|---------|------|---------|------|------|------|
| | 剖面 1 | 剖面 2 | 剖面 3 | 剖面 4 | 剖面 5 | 剖面 6 |
| 施工期 | 45 | 40 | 38 | 32 | 27 | 8 |
| 运行期 (-281 m) | 45 | 40 | 38 | 32 | 28 | 10 |
| 运行期 (-241 m) | 50 | 45 | 40 | 38 | 30 | 30 |

注: 东大巷 A、B 类围岩巷道支护方案分别为注浆加固、注浆+混凝土砌碇。

力。对于西大巷, 巷道围岩为 A 类, 巷道支护方案为注浆支护, 在施工期和运行期, 其外水压力介于 $10\sim 60\text{ m}$, 靠近衔接段的典型断面的外水压力更大。

对于东西大巷衔接段, 巷道围岩为 B 类, 巷道支护方案为注浆支护和混凝土砌碇, 在施工期和运行期, 其外水压力介于 $10\sim 41\text{ m}$, 衔接段外水压力相对较小的原因是该区域巷道顶部存在采空区。

对于东大巷, 巷道围岩分为 A、B 类, A 类围岩采用注浆支护方案, 在施工期和运行期, 其外水压力介于 $8\sim 40\text{ m}$; B 类围岩采用注浆支护和混凝土砌碇支护, 在施工期和运行期, 其外水压力介于 $40\sim 50\text{ m}$, 东大巷外水压力相对较小的原因也是该区域巷道顶部存在采空区。

此外, 表 6 对比了施工期和运行期竖井外水压力。由表 6 可知, -290.5 m 高程以上, 竖井外

表 6 竖井不同工况条件下的外水压力变化

Tab. 6 Variation of external water pressure in shafts under different working conditions

| 高程 | 竖井外水压力/m | | |
|----------------------|----------|-------------------------|-------------------------|
| | 施工期 | 运行期 (-281 m) | 运行期 (-241 m) |
| -290.5 m 以上 | 0 | 0 | 0 |
| -300 m | 10 | 10 | 10 |
| -308 m | 18 | 20 | 20 |
| -318 m | 28 | 29.5 | 30 |

水压力始终保持为 0;至-300 m 高程时,竖井的外水压力均为 10 m,3 种工况之间没有差异;但至-308 m 高程时,竖井的外水压力在施工期时增加到 18 m,而运行期两种工况下的外水压力均增加到 20 m;-318 m 高程时,蓄水对竖井产生一定影响,运行期(-241 m)工况的外水压力比运行期(-281 m)工况高 0.5 m。

4.3 下水库和排水廊道渗流量分析

表 7 总结了施工期和运行期工况下巷道渗流量。从总体趋势看,施工期各巷道渗流量最大,运行期(-241 m)工况各巷道渗流量最小。在运行期(-281 m)工况,西大巷主巷道渗流量为 32.22 m³/d,东西翼大巷衔接段主巷道渗流量为 5.10 m³/d,东大巷主巷道渗流量为 31.6 m³/d。在运行期(-241 m)工况,西大巷主巷道渗流量计算值为 15.69 m³/d,东西翼大巷衔接段主巷道渗流量为 3.50 m³/d,东大巷主巷道渗流量为 8.69 m³/d。但总体上,对于长地下巷道群而言,总体渗流量均不大。

表 7 各工况下西大巷、东西翼大巷衔接段、东大巷主巷道渗流量统计

Tab.7 Seepage of the main alley in the West alley, the East-west joint section and East alley under various working conditions

| 工况 | 主巷道渗流量/(m ³ ·d ⁻¹) | | |
|-------------|---|----------|-------|
| | 西大巷 | 东西翼大巷衔接段 | 东大巷 |
| 施工期 | 32.22 | 5.29 | 32.99 |
| 运行期(-281 m) | 32.22 | 5.10 | 31.61 |
| 运行期(-241 m) | 15.69 | 3.50 | 8.68 |

对比施工期和运行期工况下排水廊道总渗流量。结果表明,三排排水廊道在施工期时的总渗流量为 349.6 m³/d;运行期(-281 m)工况时,部分下水库巷道有水,排水廊道的总渗流量小幅度增加,达到 368.76 m³/d;运行期(-241 m)工况时,受下水库蓄水影响,排水廊道的总渗流量增加到 412.02 m³/d。

4.4 厂区排渗方案优化分析

由三维渗流分析结果可知,初步设计的厂房区排渗方案具有较好的排水效果,厂房区整体外水压力不高,大概在 10 m 水头,因此设计的厂房区排渗方案仍有优化空间,进而可进一步降低工程投资。因此,在初步设计基础上,针对排水孔幕间距开展优化研究,设计排水孔幕间距为 3 m,并与排水孔间距 6 m 时对比分析厂房区附近的排渗效果,从而确定排水孔幕的最合理间距。各项异性介质排水孔的模拟参考文献[7]。

表 8 对比了排水孔间距增加到 6 m 时厂房区有关典型剖面外水压力计算值。从整体上看,外水压力的增幅不大,在 1~5 m 之间。变化最为明显的 9 号剖面,其外水压力从 10 m 增加到 15 m。根据设计单位核算,外水压力在 20 m 以内,仍在安全设计范围内,满足厂房区安全运行要求。

表 8 不同排水孔间距优化方案下的外水压力对比

Tab.8 Comparison of external water pressure with different drainage hole spacing schemes

| 排水孔间距 | 工况 | 外水压力/m | | |
|-----------|-------------|--------|------|------|
| | | 剖面 1 | 剖面 2 | 剖面 9 |
| 3 m(设计初拟) | 施工期 | 10 | 10 | 10 |
| | 运行期(-281 m) | 10 | 10 | 10 |
| | 运行期(-241 m) | 10 | 10 | 10 |
| 6 m(优化) | 施工期 | 12 | 11 | 13 |
| | 运行期(-281 m) | 12 | 14 | 14 |
| | 运行期(-241 m) | 12 | 14 | 15 |

5 结论

a. 巷道及厂房周围渗流场等势线最为密集,说明以注浆加固层为主承担水头差。施工期及运行期各巷道最大外水压力约为 0.6 MPa,巷道最大渗流量出现在施工期,达 32.99 m³/d,下水库整体渗控效果良好。

b. 与设计初拟的排水孔幕间距 3 m 相比,间距 6 m 时,厂房最大外水压力由 0.1 MPa 增加到 0.15 MPa。此时厂房围岩仍满足结构稳定,因此建议将排水孔幕间距增大到 6 m,以显著降低工程投资。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 张庆贺,杨科,汪胜和,等.基于关闭煤矿沉陷区—地下硐室群的抽水蓄能电站构建与利用[J].水电能源科学,2021,39(3):91-94.
- [4] 谢和平,高明忠,高峰,等.关停矿井转型升级战略构想与关键技术[J].煤炭学报,2017,42(6):1355-1365.
- [5] 王丽,李宗泽,陈结,等.废弃煤矿采空区抽水蓄能水库初步可行性研究[J].重庆大学学报,2020,43(4):47-54.
- [6] 周斌,杨茂盛,娄天翔.抽水蓄能电站三维渗流场有限元建模优化技术[J].水电能源科学,2017,35(12):58-61.
- [7] 詹美礼,速宝玉,刘俊勇.渗流控制分析中密集排水孔模拟的新方法[J].水力发电,2000,4(3):23-25.

- 仪在杭州湾海底管线检测中的应用[J]. 海洋测绘, 2007(4): 64-67.
- [4] POWERS J, BREWER S K, LONG J M, et al. Evaluating the use of side-scan sonar for detecting freshwater mussel beds in turbid river environments [J]. *Hydrobiologia*, 2015, 743(1): 127-137.
- [5] 阳凡林, 暴景阳, 胡兴树. 水下地形测量[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2017.
- [6] 中华人民共和国水利部. 水工混凝土结构设计规范: SL191-2008[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.
- [7] 中华人民共和国交通运输部. 侧扫声呐测量技术要
- 求: JT/T 1362-2020[S]. 北京: 人民交通出版社, 2020.
- [8] CHEN W, HE C, JI C, et al. An improved K-means algorithm for underwater image background segmentation [J]. *Multimedia tools and applications*, 2021, 80(14): 21059-21083.
- [9] 章毓晋. 图像工程(中册)[M]. 4版. 北京: 清华大学出版社, 2018.
- [10] 黄梦涛, 连一鑫. 基于改进 Canny 算子的锂电池极片表面缺陷检测[J]. *仪器仪表学报*, 2021, 42(10): 199-209.

Detection and Quantitative Analysis of Defects of Underwater Concrete Structure Based on Side Scan Sonar

JIANG Wen-hao¹, LU Jun^{1,2}, MING Pan¹, LIU Miao-yan¹

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to ensure the service performance of underwater concrete structures, it is urgent to carry out the detections and quantitative analyses of underwater concrete structure defects. Aiming at the common failure forms of underwater concrete structures such as collapse and indentation in practical projects, model plates with different shapes and sizes of indentations were designed and made. Using the side scan sonar carried by the unmanned ship, the defect model plates were scanned at a constant speed in a test pool. The acoustic characteristics of the defect areas were summarized by extracting the echo intensity waveforms of different shaped defects along the transverse sections. Image segmentation, mathematical morphology processing, and edge feature extraction were carried out on the original sonar image of different sizes of defects to obtain clear and complete contours of the defect areas. Through the interpretation of the longitudinal length of the defect areas, the quantitative analyses of underwater concrete defects were realized, and the identification error ratios were within 10%. It provides a new method for detecting the defects of underwater concrete structures.

Key words: underwater concrete structure; side scan sonar; defect detection; image processing; quantitative analysis

(上接第 150 页)

Study on Three-dimensional Seepage Mechanism of Underground Powerhouse and Complex Roadways of Pumped Storage Power Station Constructed by Abandoned Coal Mine

MAO Zhong-hua¹, SONG Li-jun², WANG Hui-min³, ZHANG Pei-ding¹, XU Liang²,
HAN Yun², LUO Yu-long³, SHENG Jin-chang³, ZHAN Mei-li³, HE Shu-yuan³

(1. Shanghai Datun Energy Co., Ltd., Shanghai 200120, China; 2. China Electric Power Development Research Institute Co., Ltd., Beijing 100761, China; 3. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The three-dimensional seepage analysis and control of underground plants and complex tunnels are related to the long-term seepage safety of underground spaces, which is one of the key technical issues facing the construction of pumped storage power stations by abandoned coal mines. Considering the reinforcement schemes for different surrounding rocks of the lower reservoir, the spatial location of the upper reservoir, the main powerhouse and the coal mine extraction area, a refined three-dimensional finite element model for seepage analysis of complex underground space in Longdong coal mine was established. Three-dimensional seepage field analysis was carried out for typical working conditions during the construction and operation periods. Important design parameters such as external water pressure and seepage volume of the underground tunnels during the construction and operation periods were obtained. Refined simulation of the numerous drainage holes in pumped storage power stations was implemented. By calculations of the seepage field under various unfavourable conditions, the optimal spacing of the drainage holes was determined. The research results are of great significance in the evaluation of seepage safety and the design of underground roadway protection schemes for the construction of pumped storage power stations by abandoned coal mines.

Key words: abandoned coal mine; pumped storage power station; three-dimensional seepage analysis; external hydraulic pressure; drainage holes