

某水电站复杂岩层天然渗流场渗透系数反演分析

高 强¹, 杨雪敏², 纳小平¹, 孙超伟², 袁克阔²

(1. 中国水利水电第五工程局有限公司, 四川 成都 610200;

2. 西京学院 土木工程学院, 陕西 西安 710123)

摘要: 渗透系数是水利工程建设的核心参数, 直接影响工程设计与运行安全。为准确获取某水电站复杂地质条件下岩层的渗透特性, 基于天然渗流场理论与达西渗流定律, 构建了大型三维有限元模型, 通过反问题正算法结合最小二乘法拟合实测数据, 成功反演出不同风化程度岩层及断层的渗透系数, 并经现场实测水位验证了反演结果的准确性。所得渗透参数与实际情况相符, 可为该水电站后续设计与施工提供可靠依据。

关键词: 复杂岩层; 天然渗流场; 渗透系数; 反演分析

中图分类号: TV139.14

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2026)02-0152-06

Inverse Analysis of Permeability Coefficient of Natural Seepage Field in Complex Rock Strata of a Hydropower Station

GAO Qiang¹, YANG Xuemin², NA Xiaoping¹, SUN Chaowei², YUAN Keku²

(1. Sinohydro Engineering Bureau 5 Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610200, China;

2. School of Civil Engineering, Xijing University, Xi'an, Shaanxi 710123, China)

Abstract: The permeability coefficient is a core parameter in water conservancy project construction, which directly affects the safety of engineering design and operation. To accurately obtain the seepage characteristics of rock strata under the complex geological conditions of a hydropower station, a large-scale three-dimensional finite element model was established based on the theory of natural seepage field and Darcy's law. By adopting the direct method for inverse problems and combining the least square method to fit the measured data, the permeability coefficients of rock strata with different weathering degrees and faults were successfully inverted, and the accuracy of the inversion results was verified by the on-site measured water levels. The obtained seepage parameters are consistent with the actual situation, which can provide a reliable basis for the subsequent design and construction of the hydropower station.

Keywords: complex rock strata; natural seepage field; permeability coefficient; inversion analysis

渗透系数是表征岩土体透水能力的核心物理参数, 也是水利水电工程渗流安全分析、防渗排水设计、坝基稳定评价的关键计算指标, 其取值合理性直接关系到工程结构安全、运行耐久性与投资经济性^[1-3]。在复杂地质条件下, 岩体受风化、构造、断层及裂隙发育等多重因素影响, 呈现显著的非均质性与各向异性, 仅依靠室内试验、现场压水试验等传统方法获取的渗透参数, 往往难以反映工程区真实

的整体渗流特性, 易造成渗流计算结果偏于保守或存在安全隐患^[4-5]。在实际的水文地质和岩土工程领域, 渗透系数反演能综合考虑地层的非均质性和各向异性等因素^[6-8], 与传统基于经验公式或试验等方法相比, 反演方法可以利用现场实际监测数据, 更加真实地反映地层在实际工况下的渗透性^[9-11]。因此, 渗透系数反演在水利工程、隧道工程、基坑工程等领域得到广泛应用^[12-13]。

收稿日期: 2025-11-01

修稿日期: 2026-01-28

基金项目: 西京学院高层次人才专项基金(XJ25B05, XJ24B12); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2020JQ-920)

作者简介: 高 强(1986—), 男, 高级工程师, 主要从事公路及水利水电工程土建施工管理工作。E-mail: 87129105@qq.com

通讯作者: 杨雪敏(1990—), 女, 博士, 副教授, 主要从事土石坝渗流稳定分析等方面的研究工作。E-mail: yangxueminxijing@163.com

数值计算是目前渗透系数反演应用最为广泛的方法^[14-16]。在大坝工程领域,渗流-应力耦合、非饱和和渗流、多场耦合等理论不断融入反演分析,有效提升了基岩、心墙、防渗墙等关键结构渗透参数的识别精度^[17-18]。童广勤等^[19]基于三峡大坝 14 年运行期的监测数据,利用渗流-应力耦合方法,反演了三峡大坝基岩的渗透系数。王静等^[20]采用数值计算方法对济南地区粉质黏土层的竖向渗透系数进行了反演。金洪杰等^[21]建立某大型船闸三维有限元分析模型,反演确定了船闸主要分区材料的渗透系数。尹川等^[22]基于 ABAQUS 软件对土质心墙坝非饱和和渗流参数进行了反演分析。然而,对于水电站工程而言,坝址区往往位于地质构造复杂、岩体风化差异显著的河段,断层、裂隙、层理等结构面直接控制地下水渗流路径与渗流量大小^[23-24]。现有研究多针对均质或简单分层地层开展,而对于高山峡谷地区、构造发育、多风化分区并存的复杂岩体,其渗透系数空间变异性强、渗流场分布规律复杂,相关反演方法仍需进一步完善与验证^[25-26]。因此,对复杂地质条件下的天然渗流场进行准确评估是水利工程安全建设和运行的前提条件^[28-29]。

本文以某水电站地下洞室为背景,根据实际地质水文勘测资料,选择合适的模型范围及边界,建立大型三维有限元模型,开展工程区复杂岩层天然渗流场反演分析,确定工程区地下水初始渗流场分布及不同岩层的渗透系数,并根据现场实测水位验证反演渗透系数的准确性,该研究可为工程建设的前期规划、防渗措施设计等提供重要依据。

1 工程概况

工程所在江段河道呈平缓弧形走向,水流流向由 SE95° 逐步偏转至 NE65°;枯水期时江面水位高程为 3 169.2 m,水面宽度在 100~150 m 之间,河道范围内河漫滩与河心滩发育程度较低。电站坝址位于雅鲁藏布江结合带内靠近北界断裂处,单斜构造,岩层产状主要为 NW280~295°SW ∠50~70°,层理面呈闭合状态,无充填,面平直光滑,挤压紧密。受区域地质作用影响,坝址两岸呈现不对称的地貌格局:右岸以基岩边坡为主,属于某山梁的右翼部分,坡体以斜向坡为主要形态,常规坡度 30~60°,局部发育陡壁,地表分布多条冲沟;左岸则仅发育 III、IV 级阶地, I、II 级阶地缺失,其中 III 级阶地地面高程 3 202~3 226 m,相对河床的拔河高度 34~58 m,阶地形态保存完好,横向展布范围较广,宽度约 880

m;IV 级阶地地面高程 3 248~3 283 m,同样保持完整的地貌形态,分布跨度更大,宽度可达 1 000~1 200 m。

电站地层较为复杂,岩性以石英千枚岩为主,少量的千枚岩及白云石片岩。其中,石英千枚岩含量约占 90%,千枚岩及白云石片岩约占 10%,夹层中以千枚岩为主,含量约占 8%~10%,白云石片岩约占 1%~2%。夹层厚度一般 <10 m,局部仅 10~50 cm。各岩层自地表向下包括强风化层、弱风化层和新鲜岩层。

2 有限元渗流计算方法

根据要求,本文主要分析地下岩层初始渗流场分布,因此反演过程中采用稳定的达西渗流定律进行渗流分析,裂隙采用等效连续介质的处理方式,岩体裂隙模型对应的有限元基本计算如下。

2.1 渗流控制方程

由水流连续性原理,可推导得稳定渗流状态下的渗流控制微分方程:

$$\frac{\partial}{\partial x}(k_x \frac{\partial H}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(k_y \frac{\partial H}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(k_z \frac{\partial H}{\partial z}) + \omega = 0 \quad (1)$$

式中: k_x 为 x 方向上的渗透系数; k_y 为 y 方向上的渗透系数; k_z 为 z 方向上的渗透系数; H 为总水头; ω 为水流源汇项。

对于稳态渗流问题,上述控制方程的定解条件仅需考虑渗流区域的边界条件,无初始条件约束。

2.2 渗流有限元求解基本方程

当计算坐标系的坐标轴与岩体渗透主轴方向相重合时,三维稳态渗流的定解问题可转化为求解对应能量泛函的极值问题,其表达式为:

$$I(H) = \iiint_{\Omega} \frac{1}{2} [k_x (\frac{\partial H}{\partial x})^2 + k_y (\frac{\partial H}{\partial y})^2 + k_z (\frac{\partial H}{\partial z})^2] dx dy dz - \iint_{S_2} q H ds \Rightarrow \min \quad (2)$$

对整体渗流计算区域进行离散化剖分,表达式为:

$$\Omega = \sum_{i=1}^m \Omega_i \quad (3)$$

离散后任意计算单元内的水头值可通过插值函数表示,其形式为:

$$h(x, y, z) = \sum_{i=1}^8 N_i(\xi, \eta, \zeta) H_i \quad (4)$$

式中: $N_i(\xi, \eta, \zeta)$ 为单元的形函数; H_i 为单元节点处的渗流水头值; ξ, η, ζ 为计算单元的局部坐标。

对式(2) 求取变分并令变分结果为0,将所有离散单元的计算结果进行整体叠加,即可推导出渗流场有限元求解的基本格式:

$$[\mathbf{K}]\{\mathbf{H}\} = \{\mathbf{F}\} \quad (5)$$

式中:[\mathbf{K}]为渗流场整体渗透矩阵;{ \mathbf{H} }为节点水头列向量;{ \mathbf{F} }为等效流量向量。

当岩体渗透主轴与计算坐标系坐标轴方向不一致时,需进行坐标转换修正。设坐标系 X 轴与正北方向的夹角为 θ , x, y, z 方向上的渗透系数 k_x, k_y, k_z 对应的方位角为 α_i , 倾角为 β_i , 则各主渗透系数方位角在整体坐标系中与 X 轴的夹角为 $\alpha_i - \theta$ 。

基于上述角度关系,可建立渗流主方向的局部坐标系 (u, v, w) 与整体坐标系 (x, y, z) 的转换关系,表达式为:

$$(x, y, z)^T = [\mathbf{R}]\{u, v, w\}^T \quad (6)$$

其中,坐标转换矩阵为:

$$[\mathbf{R}] = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial u} & \frac{\partial y}{\partial u} & \frac{\partial z}{\partial u} \\ \frac{\partial x}{\partial v} & \frac{\partial y}{\partial v} & \frac{\partial z}{\partial v} \\ \frac{\partial x}{\partial w} & \frac{\partial y}{\partial w} & \frac{\partial z}{\partial w} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha_1 - \theta)\cos\beta_1 & \cos(\alpha_2 - \theta)\cos\beta_2 & \cos(\alpha_3 - \theta)\cos\beta_3 \\ \sin(\alpha_1 - \theta)\cos\beta_1 & \sin(\alpha_2 - \theta)\cos\beta_2 & \sin(\alpha_3 - \theta)\cos\beta_3 \\ \sin\beta_1 & \sin\beta_2 & \sin\beta_3 \end{bmatrix} \quad (7)$$

根据复合函数求导法则,可推导出局部坐标系下有限单元的几何矩阵:

$$[\mathbf{B}'] = [\mathbf{R}][\mathbf{B}] \quad (8)$$

基于局部坐标系的几何矩阵,对单元渗透矩阵进行修正,修正后的单元渗透矩阵元素 k_{ij}^e 表达式为:

$$\begin{aligned} k_{ij}^e &= \iiint_{\Omega_i} [\mathbf{B}_i']^T [\mathbf{M}] [\mathbf{B}_j] dx dy dz \\ &= \iiint_{\Omega_i} [\mathbf{B}_i']^T [\mathbf{R}]^T [\mathbf{M}] [\mathbf{R}] [\mathbf{B}_j] dx dy dz \quad (9) \end{aligned}$$

$$[\mathbf{M}] = \begin{bmatrix} k_x & 0 & 0 \\ 0 & k_y & 0 \\ 0 & 0 & k_z \end{bmatrix}$$

3 反演分析模型

3.1 模型建立

为了充分利用工程区钻孔勘探资料和地下水位预测结果并突出主要问题,工程区天然渗流参数反

演分析模型以某水电站工程区工程布置图为依据。为增加模型分析精度,模型两侧边界皆取至相应的分水岭处,且同时考虑天然地层中的主要断层,具体模型范围如图1所示。

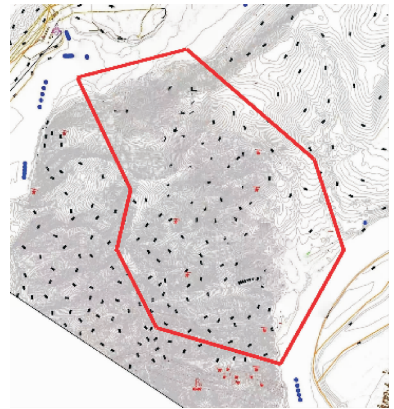


图1 某水电站天然地层反演模型范围图

模型范围内主要包含三种不同的岩体,1#岩体主要包含石英千枚岩夹千枚岩及白云石片,2#岩体主要包含千枚岩夹石英千枚岩,3#岩体主要包含石英和长石。每个断面从上至下分别包含强风化层、弱风化层和新鲜岩层。

模型整体采用4 结点等参单元进行划分,共剖分 309 518 个单元,54 553 个节点。模型及其岩体分区如图2、图3所示。

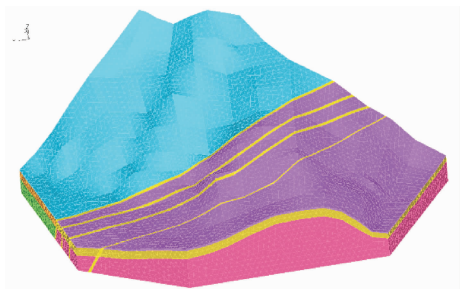


图2 天然渗流场反演分析整体模型及网格剖分

3.2 模型计算原理及边界条件

本次渗透系数反演采用反问题正演解法,通过拟定多组渗流参数开展正演试算,以最小二乘法为拟合准则,将实测浸润面与计算浸润面偏差最小对应的参数组,确定为渗流参数的最优反演结果。

模型依据厂房、坝址区钻孔资料,初步判断地下水走势与地形走势相符,并结合反演结果进一步判断边界的准确性。模型边界条件如下:①模型上、下游河道部位施加定水头边界,其值为现有河道水位;②模型左岸及右岸非分水岭部位施加定水头边界,

其值为推测地下水位(根据地质勘探与钻孔数据,结合空间插值法推测);③右岸分水岭部位为隔水

边界;④模型底部为隔水边界。



图 3 模型岩体分区图

考虑到数值模型采用的渗流参数与现场试验实测的渗透系数存在差异,本次水电站工程区渗流参数反演拟合所拟定的模型透水性参数建议值详见表 1。

表 1 渗流参数反演拟合模型渗透系数取值区间

材料	计算岩层产状	$k/(m \cdot s^{-1})$
1#岩体、2#岩体新鲜岩层	各向同性	$5 \times 10^{-7} \sim 1 \times 10^{-6}$
1#岩体、2#岩体弱风化层	各向同性	$1 \times 10^{-6} \sim 5 \times 10^{-6}$
1#岩体、2#岩体强风化层	各向同性	$8 \times 10^{-5} \sim 5 \times 10^{-4}$
3#岩体断层	NW295°SW∠60°	$1 \sim 5 \times 10^{-5}$

4 天然渗流场参数反演结果

经渗流参数反演分析与拟合计算后,水电站地下洞室工程区天然渗流场各观测钻孔的水位拟合误差统计结果见表 2,各岩层最优拟合渗流参数见表 3。其中表 2 中的绝对误差,为反演计算水头值与实测水头平均值的差值,实测水头平均值取现场实测水头最大值与最小值的算术平均值。

由表 2 可见,各观测孔的计算水位与实测水位间的水头差值,最大值达 3.06 m,最大相对误差为

12.42%。根据相关工程及文献^[30-33],结合天然三维渗流场的复杂特性,且模型边界条件由钻孔勘探的离散点位推演所得,据此可判定反演得到的各地质层渗透参数具备合理性。在此基础上,各岩层最佳拟合渗透系数值见表 3。

表 2 各观测孔水位拟合偏差

钻孔编号	钻孔位置	实测水位均值/m	拟合水位/m	绝对误差/m	相对误差/%
ZK601	坝址	3169.20	3169.90	0.70	4.21
ZK613	坝址	3169.90	3169.90	0.00	0.00
ZK618	坝址	3169.80	3169.90	0.10	0.70
ZK634	坝址	3169.40	3169.90	0.50	3.23
ZK611	厂房	3146.94	3150.00	3.06	12.42
ZK612	厂房	3147.74	3150.00	2.26	9.64
ZK803	厂房	3151.30	3150.00	-1.30	-5.27
ZK804	厂房	3151.23	3150.00	-1.23	-5.05
ZK806	厂房	3148.02	3150.00	1.98	7.84
ZK807	调压井	3222.69	3223.22	0.53	2.00
ZK801	调压井	3255.97	3255.18	-0.79	-3.05

表 3 各岩层最佳拟合渗流参数(拟合值)

岩层	计算岩层产状	$k/(m \cdot s^{-1})$
1#岩体强风化层	各向同性	3.85×10^{-5}
2#岩体强风化层	各向同性	4.79×10^{-5}
1#岩体弱风化层	各向同性	3.08×10^{-6}
2#岩体弱风化层	各向同性	4.12×10^{-6}
1#岩体新鲜岩层	各向同性	6.53×10^{-7}
2#岩体新鲜岩层	各向同性	8.46×10^{-7}
3#岩体	NW295°SW ∠60°	1.78×10^{-5}

根据上述渗透特性参数和渗透边界的设定,模拟出某水电站地下洞室区未开挖、未建排水、未蓄水的初始渗流场,最佳拟合总水头分布如图 4 所示。

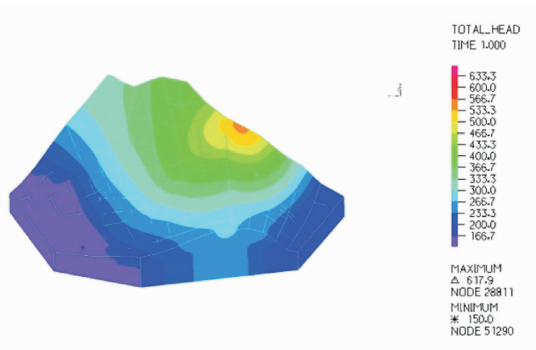


图 4 总水头分布云图(单位:m)

由图 4 可以看出,水头值从上游至下游逐渐降低,渗流场分布整体比较均匀,与河道水位边界条件

一致,表明渗流场受地形和边界条件主导。整个渗流场未发现有局部水头集中或分散等异常分布现象。在不同的岩体区域,其内部的水头变化都与周边岩体协调一致。各岩体的强风化层、弱风化层和新鲜岩层中,水头分布都遵循从上游到下游降低的趋势,且各层之间的水头梯度也较为合理,表现出良好的一致性和连续性。因此,该含有复杂岩层的水电站天然渗流场反演分析结果较为准确合理。

5 结 论

本文对某水电站工程区进行渗流计算分析,研究了天然渗流场分布及模型参数,得到了工程区各岩层渗透系数和天然渗流场分布,经计算分析,主要得出以下结论:

(1) 基于三维有限元模型与渗流参数反演方法,成功获取了复杂岩层(包括强风化层、弱风化层、新鲜岩层及断层)的渗透系数,反演结果与实际情况较为相符。

(2) 通过对比实测水位与反演计算水位,模型在坝址区、厂房区及调压井区域的拟合误差均较低,且渗流场分布符合地质规律,表明反演参数对地下水位预测较为准确,具有一定的工程应用价值。

参考文献:

- [1] 陈志恒,荣冠,谭尧升,等.白鹤滩大坝三维渗流场仿真与渗控效果评价[J].清华大学学报(自然科学版),2021,61(7):705-713.
- [2] 刘文超,张德军,宋丽.基于渗流-固体相互作用的三维水文地质参数估计研究[J].西部资源,2024(4):41-45.
- [3] 徐世濠,赵银超,吴都督,等.土石围堰防渗墙快速施工时泥浆渗透特性及渗透系数反演方法研究[J].中国农村水利水电,2024(7):177-182.
- [4] 李娅姝,李泽发,刘毅,等.考虑面板开裂的某面板堆石坝渗透系数反演分析[J].水利规划与设计,2025(2):123-126.
- [5] 徐丽,沈振中.基于 ELM-GA 的复杂土石坝渗透系数反演模型及其应用[J].水电能源科学,2021,39(9):86-90.
- [6] 康凯,王正中,董鹏,等.高地下水复杂地层盾构隧洞围岩渗透系数及外水荷载的反演分析[J].水利与建筑工程学报,2022,20(5):35-41.
- [7] 杨建贵,蔡敏,马双星,等.基于 Kriging 代理模型与 PSO 的引水隧洞围岩三维渗流场反演[J/OL].中国农村水利水电,1-12.[2026-04-01].https://link.cnki.net/urlid/42.1419.TV.20250918.1117.004.
- [8] 贾万波,徐景田.基于神经网络的面板堆石坝渗透系数反演与渗流计算[J].安全与环境工程,2025,32

- (4):138-145.
- [9] 李皓璇,沈振中,张文兵.基于 PSO-GRNN 的混凝土面板堆石坝渗透系数反演方法及应用[J].水电能源科学,2023,41(5):67-70.
- [10] 俞扬峰,于家傲,叶 伟,等.多断层影响下某水库三维渗流数值模拟分析[J].水电能源科学,2023,41(10):86-90.
- [11] 杨 墨,董东林,陈宇祺,等.基于自适应差分混合蝴蝶粒子优化算法的渗透系数反演[J].水文地质工程地质,2025,52(4):134-144.
- [12] 盖皓茜,陈 群,杜 辉,等.基于监测和探测资料的某堆石坝及坝基渗流场数值反演分析[J].人民黄河,2025,47(5):134-141.
- [13] 童广勤,张海龙,余成学,等.基于敏感性分析的沥青心墙堆石坝渗流观测布置及其改进分析[J].水利与建筑工程学报,2023,21(5):99-104.
- [14] 罗德河,蒋海涵,王 宁.基于参数反演的土石坝渗流安全实时预警[J].人民珠江,2021,42(S2):25-28.
- [15] 雷 艳,温立峰,赵明仓,等.基于 RF-GWO 的水利工程地质渗透系数智能反演分析[J].水资源与水工程学报,2024,35(2):139-148.
- [16] 钱武文,柴军瑞,曾传越,等.基于降阶投影的非稳态渗流渗透系数反演方法[J].长江科学院院报,2025:1-11.
- [17] 徐中华,宗露丹,王卫东,等.基于群井抽水试验的承压含水层水文参数反演分析[J].地下空间与工程学报,2024,20(S1):180-187.
- [18] 高 航,江思珉,夏学敏,等.基于多源数据同化的非均质河床含水层渗透系数场识别[J].安全与环境工程,2025,32(2):242-254.
- [19] 童广勤,张海龙,何 军,等.三峡大坝抗滑稳定渗流-应力耦合反演分析[J].水电能源科学,2025,43(1):132-136.
- [20] 王 静,牛 磊,潘 虎,等.济南地区粉质黏土层竖向渗透系数反演分析[J].天津建设科技,2024,34(5):60-63.
- [21] 金洪杰,甘 磊,沈振中,等.某船闸枢纽主要分区渗透参数敏感性反演分析[J].水资源与水工程学报,2022,33(3):149-155.
- [22] 尹 川,吴震宇,王 媛,等.土质心墙堆石坝非饱和渗流参数反演[J].水利规划与设计,2021(8):130-136.
- [23] 罗人昆,王 杰.超深圆形基坑群井分层抽水试验及渗透系数反演分析[J/OL].中外公路,1-10. [2026-04-01]. <https://link.cnki.net/urlid/43.1363.U.20251105.1825.021>.
- [24] 舒 伟,蒋建国,吴吉春.基于硬约束物理信息神经网络的含水层渗透系数场反演[J].地学前缘,2026,33(1):500-510.
- [25] 田文睿,陈 阳,孙蓉琳,等.抽水组数和位置对估算非均质含水层渗透系数的影响[J].安全与环境工程,2025,32(6):261-271.
- [26] 李甜甜,哈 达,王石磊.非稳定流越流承压层完整井水文参数识别[J].地下空间与工程学报,2025,21(6):1899-1906.
- [27] 孙超伟,柴军瑞,许增光,等.金川水电站地下厂房裂隙围岩渗控效应数值模拟与评价[J].岩土工程学报,2016,38(5):786-797.
- [28] 许增光,曹 成,李康宏,等.某抽水蓄能电站上水库局部防渗控分析[J].应用力学学报,2018,35(2):417-422.
- [29] 余红玲,王晓玲,王 成,等.贝叶斯框架下大坝渗流参数反演组合代理模型研究[J].水利学报,2022,53(3):306-315.
- [30] 王锦国,韩智颖,程 伟,等.基于双重介质渗流-应力耦合模型的高压压水试验渗透系数反演[J].长江科学院院报,2024,41(8):113-119.

(上接第 151 页)

- [26] 谭诗亮.沥青玛蹄脂混合料高温性能研究[D].广州:华南理工大学,2012:65-76.
- [27] 朱 悦,张有财,黄常盛,等.水工沥青玛蹄脂热物性试验及影响因素研究[J].水力发电学报,2025,44(4):12-20.
- [28] 雷海波,罗运军,李晓萌,等.有机硅改性聚氨酯的合成及微观结构与性能研究[J].北京理工大学学报,2011,31(10):1242-1246.
- [29] 卢永贵,赵 可.沥青玛蹄脂性能试验研究[J].中国公路学报,2001(4):10-14.
- [30] 王 旗.基于分子动力学模拟的沥青老化动态变化机理研究[D].太原:太原理工大学,2023:61-74.
- [31] 胡 涛.水工混凝土表面氟碳纳米复合涂层的制备及防护耐久性研究[D].武汉:长江科学院,2017:45-54.
- [32] 席 晗,孔令云,何 臻,等.紫外老化沥青分子组成试验及其宏观作用机理[J].科学技术与工程,2025,25(1):374-382.
- [33] 魏 晓.基于动态共价键的自修复聚合物体系的研究[D].南昌:江西科技师范大学,2022:34-64.
- [34] Guo Meng, Tan Qiuyi, Zhang Lei. Effect of filler on glass transition of asphalt mastics[J]. Advanced Engineering Forum, 2012,1946(5-5):376-381.
- [35] 肖承京,陈 亮,张 达,等.西藏地区水工混凝土表面防护应用技术研究[J].中国建筑防水,2016(10):21-25.
- [36] 王 俊. Er/Fe 掺杂钇铝石榴石热障涂层材料的微观结构与热物理性能研究[D].包头:内蒙古科技大学,2025:34-65.