杨凯博,史云吏,钟子墨,等.南宁抽蓄沥青混凝土心墙施工配合比优化设计与试验研究[J].人民珠江,2026,47(10):81-87.

南宁抽蓄沥青混凝土心墙施工配合比优化设计与试验研究

杨凯博[1],史云吏[1],钟子墨[2],郑越洋[1],田 喆[3],冯 姗[3*]
(1.南方电网调峰调频发电有限公司工程建设管理分公司,广东 广州 510000;2.华南农业大学,广东 广州 510642;3.西安理工大学,陕西 西安 710048)

摘 要:碾压式沥青混凝土心墙具有良好的柔韧性和防水能力,而沥青混凝土配合比设计是确保坝体防渗效果的核心要素之一。为满足沥青混凝土心墙各项性能要求,采用单因素分析方法,以级配指数、填料含量和油石比为主要影响因素设计10种施工配合比,以孔隙率、间接拉伸强度及间接拉伸应变为评价指标,筛选出最优施工配合比,并通过渗透试验、力学性能试验和静三轴试验对其进行验证。以广西南宁某抽水蓄能电站为例进行分析,结果表明:南宁抽水蓄能电站下水库沥青混凝土心墙推荐施工配合比为级配指数0.40、填料含量12%、油石比6.7%,推荐施工配合比沥青混凝土的各项物理与力学指标均满足规范要求,可为碾压式沥青混凝土心墙施工配合比设计提供参考。

关键词:沥青混凝土心墙;施工配合比设计;最优施工配合比;试验验证;南宁市
中图分类号:TV52 **文献标识码**:A **文章编号**:1001-9235(2026)10-0081-07

在“双碳”战略指引下,中国能源结构正加速转向绿色低碳模式,抽水蓄能电站规模正快速增长。作为经济性优越、技术成熟、且适合大规模开发的储能工程形式,抽水蓄能电站在中国能源清洁低碳转型进程中发挥着重要支撑作用[1-2]。碾压式沥青混凝土心墙在防渗能力与变形适应方面表现出明显优势,目前已在水工建筑领域得到较多应用,成为重要的防渗形式之一[3-4]。沥青混凝土心墙施工配合比设计是土石坝心墙防渗结构的关键因素,其级配组成、沥青用量及填料含量直接决定了混合料的整体性能[5-7],影响沥青混凝土孔隙率的各因素重要性由大到小依次排序为级配指数、油石比、填料含量。级配指数对孔隙率的影响最为突出,油石比次之,而填料含量的影响相对有限[8-9]。在此背景下,有必要系统开展沥青混凝土心墙施工配合比优化设计与试验研究。

国内外学者针对沥青混凝土心墙施工配合比设计开展了较为系统的研究,例如,杨志豪等[10]利用投影寻踪回归与熵权TOPSIS综合评价相结合的方法优化沥青混凝土配合比,结果表明所得最优配合比满足规范要求。何建进等[11]采用Box-Behnken响应面法对花岗岩骨料水工沥青混凝土配合比进行优化,分析砂率、填料含量和油石比对性能指标的影响,并确定最优配合比方案。余梁蜀等[12]基于动三轴试验,探讨了油石比对心墙沥青混凝土动力特性的影响规律。研究结果表明,适当提高油石比有利于增强沥青混凝土的抗动荷载能力。Xiong等[13]和Li等[14]通过响应面法建立配合比参数与力

基金项目:国家自然科学基金项目(52509181);南方电网南宁蓄能发电有限公司科技项目
收稿日期:2026-02-21 **修回日期**:2026-03-31 **网络首发日期**:2026-05-14
作者简介:杨凯博(1998—),男,硕士,主要从事施工管理等工作。
通信作者:冯姗(1987—),女,博士,主要从事水工沥青混凝土防渗技术等工作。

学性能的模型，并结合优化算法，在经济成本与碳排放双重约束条件下确定了最优方案。

普通大坝以长期稳定蓄水为主，而抽水蓄能电站在运行过程中存在日调节特征，库水位频繁升降，其受力条件更为苛刻，对材料的变形协调能力要求更高[15-16]。在此背景下，施工配合比设计成为影响沥青混凝土心墙整体性能的关键环节，本文以广西南宁抽水蓄能电站为工程案例，开展沥青混凝土心墙施工配合比设计，以渗透试验及力学性能试验验证推荐沥青混凝土心墙施工配合比的合理性，对沥青混凝土心墙施工配合比参数的确定具有指导意义。

1 材料与方法

南宁抽水蓄能电站下水库大坝采用碾压式沥青混凝土心墙堆石坝，坝顶高程为310.50 m，坝顶长度为380.70 m，坝顶宽度为10.00 m，最大坝高为68.50 m。

1.1 原材料检测

沥青混凝土原材料质量鉴定根据试验规程进行，粗骨料为粒径在19.00～2.36 mm间的灰岩破碎粗骨料，细骨料为粒径在2.360～0.075mm的人工砂，填料为灰岩矿粉，沥青为k70号沥青。经检测，本次试验所用原材料的各项性能参数均符合现行设计规范及技术标准。

1.2 试验设计及过程

参照规范中关于水工沥青混凝土配合比参数的相关规定，结合工程经验，合理确定施工配合比参数的取值范围。其中，级配指数取0.35～0.44。填料含量控制在8%～14%，油石比控制在6.38%～8.11%，在上述范围内开展配合比试验设计与优化分析。在单因素试验设计条件下，分别以油石比、级配指数和填料含量为控制变量，保持其余参数不变，构建多组水工沥青混凝土施工配合比方案。参照DL/T 5362—2018《水工沥青混凝土试验规程》，对各配合比方案开展孔隙率检测及间接劈裂试验，获取试件的孔隙率及间接拉伸应力、间接拉伸应变等指标，并在此基础上综合分析孔隙率与力学响应特征，筛选并确定各施工配合比参数。每种配合比均制作3份试件，并在相同条件下进行，以确保试验数据准确性和一致性，测试结果取其平均值作为该组试验指标。其中，劈裂试验采用位移控制加载方式，加载速率为1.0 mm/min，试验温度稳定控制在工程所在地的平均温度21.6℃。

1.2.1 级配指数变化对沥青混凝土性能的作用

在满足设计规范推荐施工配合比参数取值范围的前提下，确定矿料最大粒径为19 mm。在填料含量是12.0%、油石比是6.7%的条件下，以级配指数为变量，构建了4种不同级配特征的沥青混凝土施工配合比方案，见表1，其孔隙率检测结果和劈裂试验结果见图1。

表1 级配指数变化条件下沥青混凝土施工配合比

Tab. 1 Construction mix proportions of asphalt concrete under different gradation index conditions

施工配合比	级配指数	填料含量/%	油石比/%
1	0.34	12.0	6.7
2	0.37	12.0	6.7
3	0.40	12.0	6.7
4	0.43	12.0	6.7

当级配指数由0.34增加至0.43时，试件孔隙率均小于2%，满足相关设计规范和技术要求。劈裂试验结果表明，各级配条件下试件的最大间接拉伸强度整体变化幅度较小，表明在该级配指数范围内，级配变化对间接拉伸强度的影响不明显。相比之下，间接拉伸应变对级配指数变化较为敏感，其平均值随级配指数增加呈现先升高后降低的趋势。当级配指数为0.40时，试件的间接拉伸应变达到最大，表现出较好的变形能力。综合孔隙率控制要求及间接拉伸力学响应特征，确定级配指数取0.40作为后续试验的推荐取值。

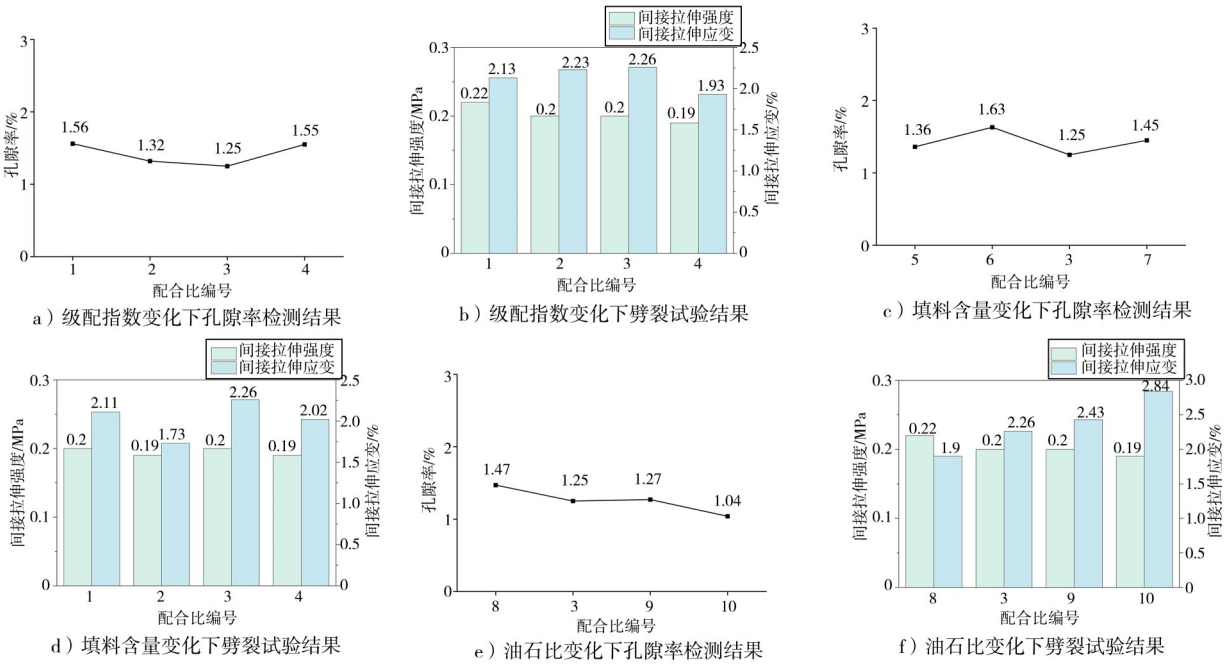


图 1　孔隙率检测和劈裂试验结果

Fig. 1 Results of porosity and splitting tensile tests

1. 2. 2　填料含量变化对沥青混凝土性能的作用

在级配指数为 0. 40、油石比为 6. 7% 的条件下，通过调整填料含量构建 4 种沥青混凝土施工配合比方案，以分析填料含量变化对混合料体积指标及力学响应特征的影响，其具体施工配合比组成见表 2，孔隙率检测结果及劈裂试验结果见图 1。

表 2　填料含量变化条件下沥青混凝土施工配合比

Tab. 2 Construction mix proportions of asphalt concrete with different filler contents

施工配合比	级配指数	填料含量/%	油石比/%
5	0.40	8.0	6.7
6	0.40	10.0	6.7
3	0.40	12.0	6.7
7	0.40	14.0	6.7

当填料含量由 8% 增加至 14% 时，试件孔隙率均小于 2%，表明各施工配合比方案下的孔隙率均满足设计规范及相关技术要求，且填料含量为 12. 0% 时，试件孔隙率达到最小，混合料结构相对更为致密。从劈裂试验结果来看，各填料含量条件下试件的平均最大间接拉伸强度整体差异较小，但不同填料含量对试件的变形能力有一定影响，其平均间接拉伸应变在填料含量为 12. 0% 时达到最大值，因此，确定填料含量取 12. 0% 作为后续试验研究的推荐取值。

1. 2. 3　油石比变化对沥青混凝土性能的作用

在级配指数为 0. 40、填料含量为 12. 0% 的基础上，将油石比作为唯一变化因素，设置 6. 4%、6. 7%、7. 0% 和 7. 3% 四个水平，形成 4 组沥青混凝土施工配合比方案，用以考察油石比对混合料体积特性及间接拉伸力学响应的影响。沥青混凝土心墙施工配合比方案见表 3，相应的孔隙率与劈裂试验结果见图 1。

随着油石比增加，试件孔隙率整体呈减小趋势，间接拉伸强度略有下降，表明油石比增大会使混合料结构趋于致密，同时对抗拉强度产生一定不利影响，同时，间接拉伸应变值呈明显提高的趋势，反映出沥青用量增加有利于增强混合料的变形能力。当油石比为 6. 7% 时，试件在孔隙率、间接拉伸强度和间接拉伸应变之间表现出较好协调性，故确定其作为后续试验研究的推荐油石比。

表3 油石比变化条件下沥青混凝土施工配合比

Tab. 3 Construction mix proportions of asphalt concrete with different asphalt-aggregate ratios

施工配合比	级配指数	填料含量/%	油石比/%
8	0.40	12.0	6.4
3	0.40	12.0	6.7
9	0.40	12.0	7.0
10	0.40	12.0	7.3

1.2.4 推荐沥青混凝土心墙施工配合比

由以上结果，考虑现场施工油石比及填料含量的误差，推荐级配指数取0.40、填料含量取12%、油石比为6.7%的3号配合比作为广西南宁抽水蓄能电站下水库沥青混凝土心墙施工配合比。矿料级配选择采用丁朴荣公式计算，推荐沥青混凝土心墙施工配合比矿料级配和级配曲线见表4和图2。

$$P_i = P_{0.075} + (100 - P_{0.075})\frac{d_i^r - 0.075^r}{D_{max}^r - 0.075^r} \quad (1)$$

式中：P_i为筛孔尺寸d_i时的累计通过率，%；$P_{0.075}$为粒径小于0.075 mm的填料含量，%；d_i为某一指定筛孔的孔径尺寸，mm；r为用于描述级配曲线形态的级配指数；D_{max}为矿料的最大粒径，mm。

表4 推荐沥青混凝土心墙施工配合比的矿料级配

Tab. 4 Recommended aggregate gradation for construction mix proportions of asphalt concrete core

筛孔尺寸/mm	理论级配/%	合成级配/%
19.00	100	100
16.00	93.4	93.4
13.20	86.6	86.6
9.50	76.1	76.6
4.75	57.9	58.9
2.36	44.1	45.6
1.18	33.7	35.7
0.60	26.0	25.6
0.30	20.0	19.6
0.15	15.4	15.7
小于0.075	12.0	12.1

由图2可知，在推荐配合比条件下，矿料实测级配与理论设计级配基本相符，各筛孔通过率偏差较小，表明施工配合比与设计级配基本一致，矿料级配整体控制良好。

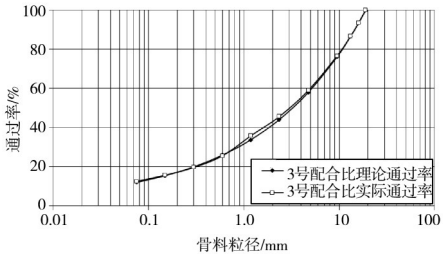


图2 沥青混凝土骨料粒径与累计通过率分布

Fig. 2 Distribution of particle size and cumulative passing rate of asphalt concrete aggregates

2 沥青混凝土心墙施工配合比验证试验

为系统评估推荐沥青混凝土施工配合比在防渗结构中的综合性能，针对其在实际服役过程中可能承受的水力及静力作用条件，开展了多类型室内验证试验。试验内容包括渗透试验及力学性能试验，分别从防渗性能、弯拉与拉伸性能、压缩变形特性、耐水损伤能力以及静力学响应等方面对材料性能进行系统表征。

2.1 渗透试验

沥青混凝土渗透性能采用常水头渗透试验进行测试，试件通过马歇尔击实法成型，试验在规定温度和水头条件下进行。3号配合比沥青混凝土试件在50 m水头作用下经历3 d无渗漏，渗透系数小于10^{-8} cm/s，满足设计规范对沥青混凝土防渗性能的要求。

2.2 力学性能试验

为满足沥青混凝土心墙对强度及变形的综合要求，对推荐施工配合比试件开展了系统的力学性能验证试验。试验内容涵盖梁弯曲、拉伸、压缩及水稳定性等方面，以模拟沥青混凝土在坝体服役过程中可能承受的弯拉、拉伸、压缩及水环境作用条件，试验结果见图3。

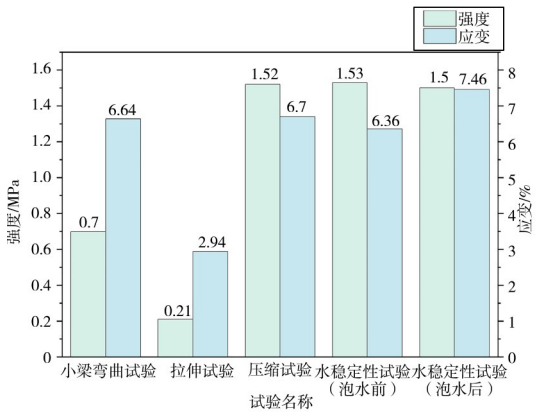


图3　试验结果

Fig. 3 Results of tests

小梁弯曲试验结果显示，3号配合比沥青混凝土弯曲性能指标均符合规范要求，其抗弯强度不小于400 kPa，弯拉应变大于1%，表现出良好的抗弯承载能力与变形协调性。拉伸试验中，试件抗拉强度平均值为0.21 MPa，对应拉应变平均值为2.94%，表明材料具有较好的延性，能够适应心墙结构运行过程中的变形需求。压缩试验结果显示，试件平均压缩强度为1.52 MPa，压缩应变为6.70%，抗压变形模量为38.03 MPa，反映出材料在受压条件下具有较强的变形适应能力。水稳定性试验计算得到水稳定系数为0.98（≥0.90），说明该配合比在水环境作用下性能稳定。综上，各项指标均满足设计规范要求，表明该配合比可作为工程推荐施工配合比。

依据坝高确定试验围压水平，选取0.3、0.5、0.7和0.9 MPa四个围压等级，在相应条件下进行静三轴力学试验。为提高室内试验结果的工程代表性，结合工程所在地多年气象统计资料，试验温度确定为年平均气温21.6 ℃，静三轴试验结果见表5。

基于试验数据构建不同围压条件下的莫尔圆，通过拟合各应力圆的包络线，进而获得沥青混凝土的剪切强度参数C和φ值。沥青混凝土莫尔圆和剪切破坏强度线见图4，其静三轴试验所得非线性E-μ模型参数和E-B模型参数见表6。

表5　静三轴试验结果

Tab. 5 Static triaxial test results

围压/MPa	最大偏应力/MPa	最大偏应力时的轴向应变/%	最大压缩体应变/%	最大压缩体应变时的偏应力/MPa
0.3	1.62	13.91	−0.14	0.67
0.5	2.24	18.75	−0.18	1.02
0.7	2.65	24.64	−0.22	1.34
0.9	3.28	25.68	−0.23	1.77

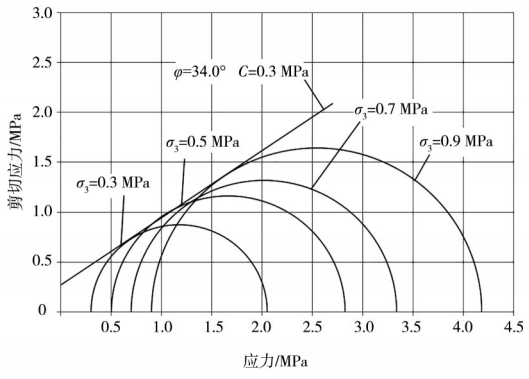


图4　莫尔圆和剪切破坏强度线

Fig. 4 Mohr's circle and shear strength envelope

表6　E-B和E-μ模型参数

Tab. 6 Parameters of E-B and E-μ models

模型	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)	模量数	模量指数	破坏比	泊松比	体变模量参数		体积模量
							模量数	m	
E-B	0.3	34	120.2	0.19	0.47	0.49	1 647.1	0.65	—
E-μ	0.3	34	120.2	0.19	0.47	—	—	—	0.49

3　结论

本研究以广西南宁抽水蓄能电站下水库碾压式沥青混凝土心墙为背景，采用单因素分析优化施工配合比，并通过渗透、力学性能和静三轴试验评估综合性能。

a）最优施工配合比参数为级配指数0.40、填料含量12%、油石比6.7%。

b）推荐施工配合比沥青混凝土通过渗透试验及力学性能试验进行验证。试验结果表明，室内成型试件及现场摊铺试验取芯样品的各项物理力学

参数均满足规范对沥青混凝土的要求，表明该施工配合比在西南地区工程条件下具有较好稳定性，可为同类工程心墙沥青混凝土施工配合比设计及现场摊铺试验与施工取芯样品力学性能评价提供参考。

参考文献：

[1] 段敬东，凌世河，肖玲娟，等．“双碳”目标下我国大型水电可持续发展经济性研究[J]．水利水电技术(中英文)，2023，54(S2)：344-348.
Duan Jingdong，Ling Shihe，Xiao Lingjuan，et al. Based on the “double carbon” target economic research of large hydropower for sustainable high-quality development [J]. Water Resources and Hydropower Engineering，2023，54(S2)：344-348.（in Chinese）

[2] 高学平，朱洪涛，刘殷竹，等．抽水蓄能电站侧式进/出水口水力学研究进展及展望[J]．天津大学学报(自然科学与工程技术版)，2025，58(8)：775-789.
Gao Xueping，Zhu Hongtao，Liu Yinzhu，et al. Progress and prospect of research on hydraulics in side inlet/outlet of pumped storage power stations [J]. Journal of Tianjin University(Science and Technology)，2025，58(8)：775-789.（in Chinese）

[3] 郝巨涛，刘增宏，汪正兴．我国沥青混凝土防渗工程技术的发展与展望[J]．水利学报，2018，49(9)：1137-1147.
Hao Jutao，Liu Zenghong，Wang Zhengxing. Development and prospect of hydropower project with asphalt concrete impervious elements in China [J]. Journal of Hydraulic Engineering，2018，49(9)：1137-1147.（in Chinese）

[4] 李江，柳莹，何建新．新疆碾压式沥青混凝土心墙坝筑坝技术进展[J]．水利水电科技进展，2019，39(1)：82-89.
Li Jiang，Liu Ying，He Jianxin. Advances in construction technologies of roller compacted asphalt concrete core wall dams in Xinjiang [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources，2019，39(1)：82-89.（in Chinese）

[5] 李文祥，张维．卡洛特水电站沥青混凝土心墙碾压试验研究[J]．人民长江，2020，51(S2)：189-192.
Li Wenxiang，Zhang Wei. Study onrolling test of asphalt concrete core wall in Karot Hydropower Station [J]. Yangtze River，2020，51(S2)：189-192.（in Chinese）

[6] 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.
Zhu Yue，Zhang Youcai，Huang Changsheng，et al. Thermal properties test and influencing factors of hydraulic asphalt mastic [J]. Journal of Hydroelectric Engineering，2025，44(4)：12-20.（in Chinese）

[7] 涂晓霞，范穗兴．纳达水库沥青混凝土心墙混合土石坝设计[J]．人民珠江，2023，44(S1)：69-73，83.
Tu Xiaoxia，Fan Suixing. Design of mixed earth-rock dam with asphalt concrete core wall of Nada Reservoir [J]. Pearl River，2023，44(S1)：69-73，83.（in Chinese）

[8] 余华英，韩守都．配合比参数对水工沥青混凝土防渗性能影响的试验研究[J]．水资源与水工程学报，2010，21(5)：145-148，151.
Yu Huaying，Han Shoudu. Experiment on the influence of parameters of mix proportion on the anti-seepage of hydraulic asphaltic concrete [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering，2010，21(5)：145-148，151.（in Chinese）

[9] 罗兆涛．阳江抽水蓄能电站沥青混凝土心墙石渣坝室内配合比试验研究[J]．人民珠江，2023，44(S2)：456-461.
Luo Zhaotao. Indoor proportion tests of slag dam with asphalt concrete core wall at Yangjiang Pumped Storage Power Station [J]. Pearl River，2023，44(S2)：456- 461.（in Chinese）

[10] 杨志豪，何建新，李志华，等．基于PPR-TOPSIS分析法的沥青混凝土配合比方案优选[J]．水利水电科技进展，2023，43(2)：82-88.
Yang Zhihao，He Jianxin，Li Zhihua，et al. Scheme optimization of mix proportion for asphalt concrete based on PPR-TOPSIS analysis [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources，2023，43(2)：82-88.（in Chinese）

[11] 何建进，游允越，俞钦，等．基于响应面法的花岗岩骨料水工沥青混凝土配合比优化设计[J]．长江科学院院报，2026，43(2)：174-180.
He Jianjin，You Yunyue，Yu Qin，et al. Optimization design of the mix proportion of granite aggregate hydraulic asphalt concrete based on response surface methodology [J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute，2026，43(2)：174-180.（in Chinese）

[12] 余梁蜀，晋晓海，丁治平．心墙沥青混凝土动力特性影响因素的试验研究[J]．水力发电学报，2013，32(3)：194-197.
Yu Liangshu，Jin Xiaohai，Ding Zhiping. Experimental study on factors of dynamic properties of core wall asphalt concrete [J]. Journal of Hydroelectric Engineering，2013，32(3)：194-197.（in Chinese）

[13] Xiong Hanye，Shen Zhehzhong，Sun Yiqing，et al. Multi-objective intelligent optimization design method for mix proportions of hydraulic asphalt concrete facings[J]. Ain Shams Engineering Journal，2025，16(12). DOI：10.1016/j. asej. 2025. 103781.

[14] Li Yong, Li Yanlong, Liu Jihan, et al. Optimization of some properties of hydraulic asphalt concrete mix using RSM and NSGA-II[J]. Construction and Building Materials, 2024(438): 137317.

[15] 靳亚东. 抽水蓄能发展研究综述[J]. 水利发展研究,2026,26(1):43-49,58.
Jin Yadong. A review of research on pumped storage development [J]. Water Resources Development Research, 2026, 26(1): 43-49,58. (in Chinese)

[16] 高昂,吴时强. 抽水蓄能电站侧式进出水口体型及水力特性研究进展[J]. 南水北调与水利科技,2018,16(2):132-139.
Gao Ang, Wu Shiqiang. Progress of research on structure and flow characteristics of lateral inlet/outlet of pumped storage power station [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(2): 132- 139. (in Chinese)

Optimization Design and Experimental Study on the Construction Mix Ratio of Asphalt Concrete Core for the Nanning Pumped Storage Project

YANG Kaibo[1], *SHI Yunli*[1], *ZHONG Zimo*[2], *ZHENG Yueyang*[1], *TIAN Zhe*[3], *FENG Shan*[3*]

(1. Engineering Construction Management Branch of Southern Power Grid Peak Shaving Frequency Modulation Power Generation Co., Ltd, Guangzhou 510000, China; 2. South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 3. Xi′an University of Technology, Xi′an 710048, China)

Abstract: The rolled asphalt concrete core wall exhibits excellent flexibility and waterproofing capabilities, with the asphalt concrete mix design being one of the core elements ensuring the impermeability of the dam body. To meet the performance requirements of the asphalt concrete core wall, a single-factor analysis method was employed. Ten construction mixes were designed, considering gradation index, filler content, and asphalt-aggregate ratio as the primary influencing factors. The optimal construction mix was selected based on evaluation criteria such as porosity, indirect tensile strength, and indirect tensile strain. These mixes were then verified through permeability tests, mechanical property tests, and static triaxial tests. Taking a pumped storage power station in Nanning, Guangxi as an example, the analysis revealed that the recommended construction mix for the asphalt concrete core wall of the lower reservoir of the Nanning pumped storage power station is a gradation index of 0.40, a filler content of 12%, and an asphalt-aggregate ratio of 6.7%. The physical and mechanical indicators of the asphalt concrete in the recommended construction mix meet the specification requirements, providing a reference for the design of construction mixes for rolled asphalt concrete core walls.

Keywords: Asphalt concrete core; Construction mix design; Optimal construction mix ratio; experimental verification; Nanning City

（责任编辑：李燕珊）