某抽水蓄能电站引水下斜井排水廊道通风系统设计方案探讨

张旭佳[1] 张佳伟[2] 石雅珊[3]
1.中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司；
2.广东优力普物联科技有限公司；3.浙江水晶光电科技股份有限公司

【摘 要】抽水蓄能电站调压室周边地下排水廊道多为狭长独头通道，存在气流不畅、水力涌浪扰动、洞内高湿强腐蚀等通风难题，自然通风无法满足运维安全标准。以某在运抽水蓄能电站引水下斜井排水廊道为研究对象，结合现场复杂边界工况，确定采用压入式正压机械通风方案，设计两套风道组合通风布置方案。通过多维度技术对比得出：土建耦合复合风道方案抗扰动、耐腐蚀性能更优，适配本项目无人值守高湿工况；全成品悬吊风管通行性好，适用于无明显水力扰动洞室。该研究可为同类水工地下廊道通风系统设计提供参考。

【关键词】抽水蓄能电站；排水廊道；正压送风；高湿防腐

Discussion on the Ventilation System Design Scheme for the Drainage Corridor of the Inlet Downward Sloping Shaft in a Pumped Storage Power Station

Zhang Xujia[1] Zhang Jiawei[2] Shi Yashan[3]
1.PowerChina Corporation, East China Survey and Design Institute Co., Ltd.;
2.Guangdong Youlipu IoT Technology Co., Ltd.; 3.Zhejiang Crystal Optoelectronics Technology Co., Ltd.

【Abstract】The underground drainage corridors surrounding the pressure regulation chamber of pumped-storage power stations are typically narrow, single-cavity passages, which present ventilation challenges such as poor airflow, hydraulic surge disturbances, and high humidity with strong corrosion within the tunnel; consequently, natural ventilation cannot meet the operational and maintenance safety standards. This study takes the drainage corridor of an operating pumped-storage power station's intake inclined shaft as a case study, considering the complex boundary conditions at the site, and determines that a positive-pressure mechanical ventilation scheme utilizing pressurization is the optimal solution, proposing two different combined duct ventilation configurations. Through multi-dimensional technical comparisons, it was concluded that the civil-engineering coupled composite duct scheme exhibits superior disturbance resistance and corrosion resistance, making it well-suited for the unattended, high-humidity operating conditions of this project; meanwhile, the fully prefabricated suspended duct configuration offers excellent passability and is ideal for tunnels without significant hydraulic disturbances. This research provides valuable references for the design of ventilation systems for similar hydraulic underground corridors.

【Key words】Pumped-storage power station; drainage corridor; positive-pressure air supply; high-humidity corrosion protection

引言

抽水蓄能电站地下洞室群结构复杂，除主厂房、副厂房、主变洞、进场交通洞等核心运行洞室外，还配套布置施工支洞、勘探探洞、多层排水廊道等辅助地下构筑物。从运维通风设计角度划分，此类地下辅助洞室可分为三类：第一类为施工专用支洞与勘探探洞，工程永久运行阶段人员巡检频次极低，仅需配备便携式个人防护装备，无需设置固定式机械通风系统；第二类为与主厂房洞室贯通的上、中、下层主干排水廊道，人员常态化巡检作业，必须配套标准化机械通风系统；第三类为边缘区域独立排水廊道，该类洞室多为独头通道、仅单端连通外界空间，洞内常年积水、环境高湿，机电设备腐蚀风险极高，行业内通常不设置永久固定通风系统。

引水下斜井附属排水廊道属于典型第三类地下辅助洞室，洞内空气流通性差、有害气体易积聚、作业环境恶劣，随着抽水蓄能电站运维标准化要求提升，小众廊道定点机械通风需求逐步凸显。本文以国内某在运抽水蓄能电站引水下斜井排水廊道工程为研究对象，结合现场既有洞室结构、涌浪、高湿等边界条件，设计两套差异化正压机械通风布置方案，通过技术经济性对比优选适配方案，为同类抽蓄工程地下狭长独头排水廊道通风系统设计提供工程参考。

1 工程洞室概况

1.1 廊道功能与布局

抽水蓄能电站引水下斜井排水廊道，常规布置于斜井下平洞及压力支管上方 35.0~37.0m 高程区间，平面采用网格型或闭合口字型拓扑布局。该廊道为电站核心防渗排水构筑物，核心功能为：隔离钢衬压力管道外部地下水、降低管道外水荷载；全域收集地下洞室围岩渗漏水；布设岩土安全监测传感器；配合多层立体排水幕系统，提升整个地下洞室群围岩防渗稳定性，保障电站地下结构长期运行安全。

1.2 连通边界工况

研究对象廊道起始于 2#尾水调压室上室端部，前期利用工程施工勘探探洞扩挖成型，廊道末端接入 2#尾调通气

支洞，后与 1#、3#尾调通气支洞三路汇流，依托既有探洞扩挖形成尾调专用通气洞直通地表大气。该通气洞净宽 7.0m，是本段排水廊道唯一对外气流通道。

现场核心不利通风边界条件如下：该排水廊道为典型狭长独头通风廊道，仅单通道连通地表通气洞，无其他自然补风通道；尾调通气洞受调压室水力扰动影响，存在周期性水体涌浪，洞内气流风压剧烈波动，极易造成通风气流紊乱，新风倒灌；全域洞室围岩渗水严重，洞内相对湿度长期接近 100%，属于高湿腐蚀工况。除此之外，地下密闭围岩会缓慢析出微量有害气体，长期密闭淤积会超出《工业建筑供暖通风与空气调节设计规范》[1]作业限值，威胁巡检人员人身安全和洞内岩土监测设备稳定运行。

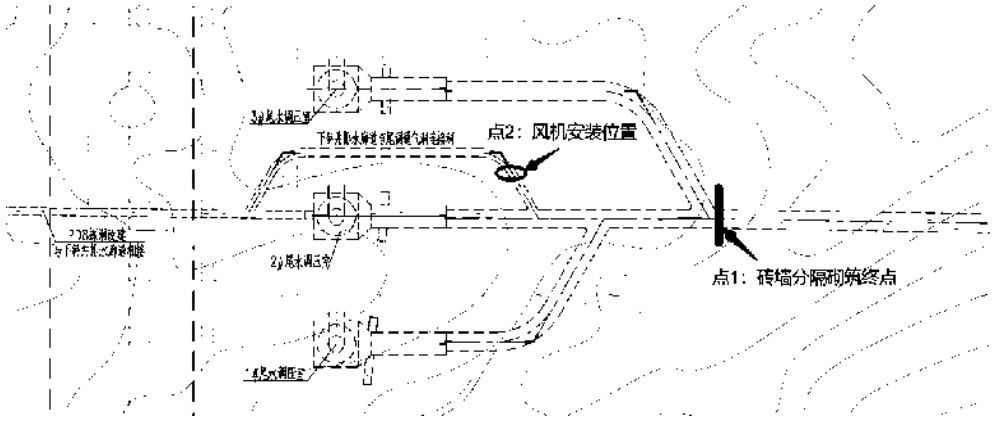


图 1　引水下斜井排水廊道至尾调通气洞示意图

2 通风系统总体设计思路

结合现场洞室连通关系、水力扰动及环境工况，本项目排除自然通风方案（自然通风风压不足、涌浪气流会造成气流倒灌），确定采用压入式正压机械通风设计方案。

总体工作原理：在廊道外接支洞布设轴流送风机，将地表新鲜空气定向压入下斜井排水廊道；利用廊道内部正压场稀释围岩析出有害气体、淤积污浊空气；依托廊道压力差，将高浓度污浊气体沿尾调通气洞定向推送至室外大气，完成全域通风换气。整体气流流向：地表新风→尾调通气洞→轴流风机→分段送风管道→下斜井排水廊道→尾调通气洞→室外大气排放。

结合现场既有土建结构、施工难度、设备防腐及运维通行约束，本文制定两套分段式风管组合通风施工方案。

3 两套通风系统布置方案

3.1 方案一：土建风道+不锈钢金属风管+纤维织物复合风管方案

本方案采用分段风道耦合设计，按气流通道位置划分三级通风结构：

第一级：地表洞口土建分隔风道。在尾调通气洞室外洞口至 1#尾调通气支洞交叉口区间（图 1 中点 1 位置），采用实心承重砖墙对 7.0m 宽通气洞进行水平分区；右侧通道净宽 1.5m，作为专用进风土建风道；左侧通道净宽 5.5m，保留原有通气功能，兼作污浊气体排风道。砖墙墙体砌筑至洞室拱脚位置，封闭墙体缝隙，杜绝进出风串流。

第二级：洞室中段不锈钢金属风管。受尾调洞涌浪风压扰动影响，交叉口至排水廊道交叉口区段，风道易受气流冲击变形，本段采用顶部吊装 304 不锈钢金属硬质风管，规避涌浪直接破坏通风通道，提升风道结构稳定性与防腐性能。

第三级：廊道内部纤维织物送风风管。将主通风轴流风机安装在廊道连接专用支洞内部（图 1 中点 2 位置）；风机出口对接顶部吊装的柔性纤维织物送风风管，风管沿支洞敷设至排水廊道分叉口；管路分叉分为左右两路分支风管，分别敷设至廊道末端，完成全域均匀送风。

本方案分区兼顾土建结构稳定性与送风均匀性，施工不破坏原有洞室通行体系，保留全部竖向通行净空，满足电站小型检修车辆、人员巡检通行需求。纤维织物多孔送风风管局部风阻小、断面送风均匀无死角，能够有效解决超长狭长廊道末端新风补给不足、废气淤积的行业设计痛点；土建砖砌刚性风道无需后期除锈、防腐运维。该方案唯一短板为小幅压缩通气洞侧向通行宽度，本段廊道无重型机电设备转运、大型检修作业需求，该缺陷对电站日常运维工作无实质影响。

3.2 方案二：全管路金属风管+纤维织物风管组合方案

本方案取消土建砖砌分隔风道，全程采用成品风管吊装成型：

第一级：通气洞顶部吊装金属风管。从尾调通气洞室外地表洞口开始，在洞室拱顶吊装固定 304 不锈钢金属送风主管，全程贯通敷设至支洞风机安装位置（图 1 中点位 2 位置），风管占用洞室上部闲置空间，不占用廊道下部通行断面。

第二级：廊道柔性送风管路。风机出口管路配置与方案一完全一致，风管沿支洞敷设至排水廊道分叉口；管路分叉分为左右两路分支风管，分别敷设至廊道末端，完成全域均匀送风。

该方案无需土建砌筑施工，全部采用工业标准化成品风管现场模块化吊装拼装，施工工序简洁、现场施工扬尘少，对原有洞室围岩及土建结构无破坏性改造；经工期测算，该

方案现场安装工期较方案一缩短 15%，前期现场施工效率更高。但该方案核心工程短板集中在工程全生命周期运维阶段：洞内高湿水雾、围岩腐蚀性气体环境下，金属风管、高空锚固锚杆极易发生电化学腐蚀；悬吊式管路长期受风机振动、调压室周期性涌浪气流冲击，易出现锚固支架松动、风管偏移脱落等安全隐患，后期需要高频开展现场巡检、除锈加固、部件更换作业。

4 方案技术对比与适用性分析

结合抽水蓄能电站永久工程全生命周期管理理念，从结构稳定性、现场施工难度、设备长期耐久性、洞室通行条件、抗水力扰动、全生命周期造价六大通风工程核心指标，对两套设计方案开展横向综合对比分析，兼顾施工造价和后期运维成本，筛选最优实施方案，结果如表 1 所示。

表 1　两种方案对比分析表

对比方案	核心优势	工程短板
方案一（土建+金属+织物复合风道）	1.抗扰动性能优异：土建砖砌风道结构刚度大，可完全抵御尾调通气洞周期性涌浪冲击，风道结构、风机管路系统运行稳定性、长期耐久性最优； 2.施工运维友好：砖砌风道施工工艺成熟、现场作业工程量低；风道沿水平断面分区，不压缩洞室竖向通行净空，满足设备检修、场内运输通行要求； 3.防腐性能优良：主体风道为土建结构，无金属构件腐蚀失效风险。	1.占用廊道水平断面：砖墙分隔通道占用尾调通气洞水平空间，小幅压缩洞内应急通行宽度； 2.气流耦合干扰：分区风道会轻微扰动通气洞原生涌浪气流流场。
方案二（金属+织物成品风管组合）	1.洞室流场影响小：风管拱顶吊装布置，仅占用洞室上部冗余空间，不干扰下部通气流场，完全满足尾调洞涌浪风速设计限值； 2.通行性能最优：不占用廊道水平通行断面，对洞内车辆、人员通行无任何影响； 3.模块化施工：无土建砌筑工序，成品风管模块化拼装，施工场地整洁。	1.施工造价与难度高：整条通气洞拱顶风管需要大量加长锚固锚杆，高空吊装作业量大，施工工序复杂、工程造价更高； 2.耐久性短板突出：风管及锚固构件长期暴露在涌浪水雾、高湿围岩空气中，金属构件电化学腐蚀风险高； 3.抗冲击能力弱：悬吊式金属风管易受极端涌浪气流冲击，出现管路松动、位移风险。

结合本工程现场复杂边界工况、无人值守运维管理模式和全生命周期成本测算结果，针对本项目尾调洞涌浪显著、洞内高湿强腐蚀、长期无人值守、低频次人工巡检的核心运行特征，优先推荐方案一作为本工程施工图设计实施方案。该方案运行稳定性高、后期免维护，适配抽水蓄能地下永久附属洞室长效运行需求；对于无明显水力涌浪、洞室通行等级要求高、常态化有人驻场巡检的同类抽蓄廊道工程，可优先落地实施方案二。

5 结论与工程设计建议

（1）抽水蓄能电站下斜井与尾调连通型排水廊道存在风压波动、高湿、独头通道三大通风难点，自然通风无法满足运维规范要求，压入式正压机械通风是此类地下狭长廊道最优通风形式。

（2）土建风道耦合成品风管复合通风系统，抗水力扰动、抗腐蚀、运行稳定性优势显著，适配尾水调压室周边扰动型地下洞室通风场景，适合长期无人值守、低频次巡检排水廊道。

（3）地下抽水蓄能洞室通风设计，不能仅核算通风换气量，必须耦合周边水工建筑物水力运行工况，将涌浪、围岩渗水、结构腐蚀纳入通风系统边界设计条件。

（4）后续同类工程设计建议：高湿水工地下洞室通风管路优先选用 304 不锈钢防腐管材，严禁使用普通碳钢风管，从源头降低金属构件腐蚀失效风险；调压室周边气流扰动区域，优先采用土建刚性风道替代悬吊成品风管，提升通风系统抗冲击能力；狭长独头地下通道采用分叉式柔性织物风管，降低管路局部沿程风阻，提升巷道全断面送风均匀性。

（5）工程经济性补充建议：水工地下永久通风工程选型，不能仅对比前期施工造价。方案一前期土建施工造价高于方案二，但可降低后期运维检修、设备更换成本；针对抽水蓄能这类超长服役年限工程，应当以全生命周期综合经济效益作为方案选型核心依据。同时建议此类地下廊道通风系统配套加装变频控制模块，联动洞内湿度、气体传感器智能调节风机转速，实现地下洞室节能低碳通风运行。

参考文献

[1]中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50019–2015 工业建筑供暖通风与空气调节设计规范[S]. 北京:中国计划出版社,2015.