寒冷地区某抽水蓄能电站冬季施工期间空气质量在线监测实验研究

胥娟，谭盛凛，赵林直
中国电建集团北京勘测设计研究院有限公司，北京 100024
DOI: 10.61369/TACS.2026080051

摘　　要： 本文通过对寒冷地区抽水蓄能电站冬季施工的实地监测，揭示了其地下环境特征。研究发现：洞内温度显著下降，湿度升高并伴有结露；风速分布不均，局部通风不足；颗粒物在深处累积效应显著，PM10浓度严重超标。此研究可为该类工程冬季的通风与空气质量控制提供科学依据。

关 键 词： 抽水蓄能电站；空气质量；冬季施工；通风环境；颗粒物浓度

Experimental study on online monitoring of air quality during winter construction of a pumped storage power station in a cold region

Xu Juan, Tan Shenglin, Zhao Linzhi
POWERCHINA Beijing Engineering Corporation Limited, Beijing 100024

Abstract: This article, through on-site monitoring of the winter construction of pumped storage power stations in cold regions, reveals the characteristics of their underground environment. The research found that the temperature inside the cave dropped significantly, the humidity increased and condensation occurred. Uneven wind speed distribution and insufficient local ventilation; The accumulation effect of particulate matter at deep levels is significant, and the concentration of PM10 seriously exceeds the standard. This research can provide a scientific basis for the ventilation and air quality control of such projects in winter.

Keywords: pumped storage power station; winter construction; air quality; particulate matter concentration; ventilation environment

引言

抽水蓄能电站是清洁能源体系中的重要发电设施，其地下厂房的空气环境质量直接关系到工程安全和人员健康[1-3]。已有研究表明，地下空间的空气动力学特征会受到季节变化影响[4-6]，但针对冬季施工环境开展的研究相对较少[7-9]。

国内外学者已从多个方面研究地下工程的环境控制问题。王晓东等采用 CFD 方法对地下厂房通风系统进行了优化[10]；张伟等分析了寒冷地区地下工程的空气动力学特征[11]；Li 等建立了建设期空气质量评价体系[12]；Chen 等通过数值模拟研究了粉尘扩散规律[13]；刘洋等提出了相应的粉尘控制措施[14]。现有研究主要集中于常温或夏季工况，对冬季低温条件下颗粒物分布、沉降过程及季节差异的研究仍不充分[15]。

本研究通过现场监测获取冬季施工环境数据，重点分析低温条件下洞室气流和颗粒物浓度的变化特征，以识别通风薄弱区域，并为寒冷地区抽水蓄能电站冬季通风和粉尘控制提供依据。

一、研究方法

研究地点为内蒙古某规划装机容量1200 MW 的大型抽水蓄能电站，其地下洞室系统结构较为复杂，主要承担电网调峰等任务。工程所在地属于典型的大陆性气候区，年平均气温为9.7 ℃，历史极端最高气温为41.1 ℃，极端最低气温为 -32.6 ℃；年平均

Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

降水量为154 mm，年平均蒸发量为3115.2 mm，最大冻土深度为1.78 m。

结合冬季施工特点，本研究在交通洞、通风兼安全洞和主厂房等关键区域开展连续环境监测。监测参数包括系统风量、壁面温度、空气流速、温湿度以及 PM_1、$PM_{2.5}$和 PM_{10}浓度，并重点监测典型施工点的粉尘变化。壁面温度和空气流速分别采用AR320+ 红外测温仪和 testo 405i 热线风速仪测量，颗粒物浓度采用 TSI 8533型气溶胶监测仪记录。

为全面掌握冬季施工扬尘在低流速地下的运移规律，测点设置严格遵循《地下工程通风技术规程》与职业卫生采样规范。在主厂房上导洞、母线洞开挖面、尾调室以及各主要通风断面共布设固定监测工位8处、移动巡检测点14处。TSI8533气溶胶监测仪流量校准为3.0 L/min，并在每日开机前完成零点自校准。监测期间同步记录施工循环工序（包含钻爆、出渣、喷射混凝土及机械空载怠速等阶段），通过连续时间轴对齐分析各工序与 PM1、PM2.5、PM10浓度突变峰值之间的响应延迟关系。洞内壁面温度采用红外测温仪在每一监测断面取拱顶、左右两帮及底板4个特征位置进行取样平均，以排除局部围岩裂隙渗水对壁温判读的干扰。

二、结果与讨论

本研究在交通洞内布置13个温湿度监测点，在通风兼安全洞内布置21个温湿度监测点，用于分析洞内温湿度的沿程变化。交通洞温度随洞深增加总体呈下降趋势。0 ~ 200 m 洞口段受外界环境影响，温度波动较大；1000 m 以后的深部区域则基本稳定在16.5 ~ 17.5 ℃。交通洞洞口段的相对湿度为40% ~ 65%，沿洞深总体呈先升后降的变化趋势，600 ~ 700 m 区段为62% ~ 63%，随后有所下降。结合现场情况，该区段的湿度变化可能与围岩渗水和局部通风条件有关。

通风兼安全洞0 ~ 300 m 区段的温度由23.5 ℃升至25.0 ℃，进入深部后下降并稳定在23.0 ~ 23.5 ℃。洞口段的含湿量为14.5 ~ 15.5 g/kg，1100 m 处升高至24 g/kg，表明该位置存在局部含湿量异常。该变化可能与附近渗水、支洞来风或局部通风条件变化有关。根据监测结果，建议加强交通洞600至700 m 区段的排水和局部通风，并重点检查通风兼安全洞1100 m 附近的水汽来源及气流路径。

采用 testo 热线风速仪对各洞室断面进行的测量，揭示了复杂的空气动力学特征。交通洞100米断面平均风速为0.2至0.5米 / 秒，且两侧风速较中部高0.3至0.5米 / 秒。得益于强制通风，通风兼安全洞入口断面风速高达0.8至1.1米 / 秒，且两侧风速差异小于0.2米 / 秒。尾调通风洞与其连接段的风速为0.2至0.5米 / 秒，显示出结构连接对气流的优化作用。作为气流枢纽的联系洞，其风速分布最为复杂，左右两侧、中部及底部分别录得0.3至0.7米 / 秒、0.2至0.4米 / 秒 和0.05至0.48米 / 秒。 排风竖井则因静压梯度影响，其垂直断面风速呈现分层现象，上、中、底部分别为0.15至0.46米 / 秒、0.29至0.45米 / 秒及0.33至0.47米 / 秒。

为精确评估粉尘污染，本研究采用 TSI 8533型激光尘埃粒子计数器对尾调末端等关键施工点进行24小时连续监测，发现冬季颗粒物污染状况极其严重。下午17:00左右，PM2.5与 PM10浓度分别达到1100微克 / 立方米和1300微克 / 立方米的惊人峰值，远超国家 PM2.5日均限值（75微克 / 立方米）。由于通风效率低下，施工停止3小时后 PM2.5浓度仍维持在300微克 / 立方米左右。数据分析表明，施工扬尘阶段（15:00 - 17:00），PM2.5以约25微克 / 立方米 / 分钟的速率快速累积，而其沉降半衰期长达1.5小时，远高于理想条件下的30分钟。这与施工时段局部风速仅为0.2至0.4米 / 秒，远低于抑尘所需最低风速（$\geqslant$0.8米 / 秒）直接相关。因此，必须采取动态风量调节、优化气流组织及辅助降尘等综合治理措施，以改善作业环境。

实测表明，冬季洞内气流与颗粒物弥散呈现显著的非稳态热浮升与空气动力学滞后性。冬季洞外环境温度极低（极端达 −32.6 ℃），冷空气灌入洞内后与相对温热的深部围岩发生热湿交换，导致洞口至洞深纵向温差产生反向热阻；加之多岔洞结构阻力叠加，局部风速普遍衰减至0.2 ~ 0.4 m/s，无法达到使可吸入颗粒物悬浮运移的临界动力风速。同时，高湿低温空气易使细微粉尘吸湿凝并，重力沉降加剧并积聚在设备与地面表层；而一旦大型运输车辆通行，车轮碾压与气流扰动造成严重的二次扬尘，致使出渣停工后 PM2.5浓度长达3小时仍超标3倍以上。结合寒区工程特征，提出以下综合治理措施：主副风流协同增风：在尾调末端增设防爆局部通风机与大直径抗静电阻燃风筒，实行长压短抽式通风，将作业面有效风速提升至0.8 m/s 以上，杜绝涡流滞尘；尘源就地高压喷雾抑尘：在钻孔及出渣落料点加装高压微雾降尘装置，雾滴粒径控制在10 ~ 30 μm，与空气中 PM10形成高效吸附结合，从源头切断粉尘扩散；防冻型门帘隔断与动车限速降尘：在洞口增设快速启闭的工业保暖风帘，减缓洞内热流失与冷风倒灌引起的剧烈温差扰动；同时严格限制洞内施工机械运行车速（严禁超过10 km/h），并在主通道定期使用环保防冻抑尘剂喷洒路面，从根本上压降二次扬尘。

三、结论与建议

通过对寒冷地区某抽水蓄能电站地下厂房的冬季实测研究，本研究明确了其独特的环境挑战。结论显示，冬季洞内温度随深度递减且远低于夏季，而不均衡的风速分布及局部通风不足，易导致湿度累积和结露风险。同时，颗粒物在洞室深处有显著的累积效应，致使 PM10浓度严重超标，且低温环境似乎加速了颗粒物的沉降。

 Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

基于以上发现，为保障施工与运行安全，优化冬季通风与除尘策略至关重要。建议重点加强尾调末端等关键区域的局部排风与高效除尘，并根据季节变化动态调整通风参数，以营造安全、健康的地下作业环境。

参考文献

[1]Agency I E .Renewable Energy RD&D Priorities: Insights from IEA Technology Programme (Complete Edition - ISBN 9264109552)[J].SourceOECD Energy, 2006, volume 2005:i-224(224).

[2]Yan L , Waynert J A , Sunderman C .Measurements and Modeling of Through-the-Earth Communications for Coal Mines[J].IEEE Transactions on Industry Applications, 2013, 49(5):1979-1983.DOI:10.1109/TIA.2013.2260116.

[3]Lei C , Xu D , Feng S ,et al.Optimization of Ventilation System for a Main Power Plant in an Underground Pumped Storage Power Station[J].E3S Web of Conferences, 2022, 356(000):4.

[4]Wacław Dziurzyński, Krach A ,Teresa Pałka.Airflow Sensitivity Assessment Based on Underground Mine Ventilation Systems Modeling[J].Energies, 2017, 10(10):1451.

[5]Evelyn T N , Simone H , Ton S ,et al.Dust Control Measures in the Construction Industry[J].Annals of Occupational Hygiene, 2003(3):211-218.

[6]Li, H., et al. Air quality monitoring in hydropower projects[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2020, 192(1): 1-15.

[7]National Energy Administration. Technical guidelines for underground engineering ventilation[S]. 2019.

[8]Zhao, P., et al. Winter construction challenges in cold regions[J]. Cold Regions Science and Technology, 2021, 181: 103198.

[9]ASHRAE. Handbook-HVAC Applications[M]. Chapter 25: Mine and Tunnel Ventilation, 2019.

[10]Wang, X.D., et al. CFD-based ventilation design optimization[J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 164: 114456.

[11]Zhang, W., et al. Aerodynamic characteristics in cold regions[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2021, 31(2): 267-275.

[12]Li, J., et al. Air quality assessment system[J]. Building and Environment, 2019, 148: 541-550.

[13]Chen, Y., et al. Numerical simulation of dust diffusion[J]. Powder Technology, 2020, 361: 662-671.

[14]Liu, Y., et al. Advanced dust suppression methods[J]. Construction and Building Materials, 2021, 269: 121234.

[15]ISO 28802:2012. Ergonomics of the physical environment – Assessment of environments by means of an environmental survey involving physical measurements of the environment and subjective responses of people[S].

Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.