某抽水蓄能电站夏季施工期间空气温湿度在线监测试验研究

刘存，胥娟，孙晓玲
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.2026080052

摘　　要： 本文以某抽水蓄能电站为研究对象，对夏季施工期间交通洞和通风兼安全洞内的空气温湿度开展在线监测。通过在不同位置布置温湿度传感器，获得了洞室温湿度的沿程数据。监测结果显示，两类洞室的温湿度分布存在一定差异：交通洞温度随洞深增加总体呈下降趋势，相对湿度则先升高后降低；通风兼安全洞的温度变化受气流组织影响，含湿量在局部区段出现明显升高。根据监测结果，提出了针对不同洞室和异常区段的环境调控措施，可为类似地下工程的施工环境控制提供参考。

关 键 词： 抽水蓄能电站；夏季施工；空气温湿度；在线监测；洞室环境调控

Experimental study on online monitoring of air temperature and humidity during summer construction of a pumped storage power station

Liu Cun, Xu Juan, Sun Xiaoling
POWERCHINA Beijing Engineering Corporation Limited, Beijing 100024

Abstract: This study investigated a pumped-storage power station by continuously monitoring the air temperature and humidity in its access tunnel and ventilation-and-safety tunnel during summer construction. Temperature and humidity sensors were installed at different locations to obtain data along the tunnels. The results showed differences in the temperature and humidity distributions between the two tunnels. In the access tunnel, the air temperature generally decreased with increasing distance from the portal, while the relative humidity first increased and then decreased. In the ventilation-and-safety tunnel, temperature variations were influenced by airflow patterns, and the humidity ratio increased markedly in some sections. Based on these findings, environmental control measures were proposed for different tunnels and anomalous sections. The results may provide a reference for construction environment control in similar underground projects.

Keywords: pumped-storage power station; summer construction; air temperature and humidity; online monitoring; tunnel environment regulation

引言

抽水蓄能电站是电力系统调峰、调频和储能的重要设施[1]。洞室施工期间，空气温湿度会影响人员健康、设备运行和工程质量[2,3]。尤其在夏季，高温高湿环境可能增加施工安全风险，并加快设备损耗[4]，因此有必要采取相应的调控措施[5]。已有研究表明，通风系统对隧道内温湿度分布具有明显影响[6]，利用实时监测数据可以对通风策略进行调整[7]，相关试验也验证了不同通风方式的调控效果[8]。国外研究指出，地下工程的温湿度变化与外界气象条件、施工活动和通风方式等因素有关[9,10]。

目前，针对抽水蓄能电站夏季施工阶段开展的温湿度在线监测研究相对较少[11]。此类工程洞室结构较为复杂，部分区域通风条件受限，而现有成果主要以普通隧道为研究对象，难以直接反映抽水蓄能电站地下洞室的实际环境特征[12,13]。为此，本文对某抽水蓄能电站交通洞和通风兼安全洞的温湿度进行监测，分析不同位置温湿度的变化特征，并据此讨论相应的环境调控措施[14,15]。

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

一、研究方法

内蒙古某1200 MW 抽水蓄能电站主要承担电力系统调峰、填谷等功能。本研究在交通洞内布置13个监测点，并在1000 m 以后的区段加密布置；在通风兼安全洞内设置21个温湿度监测点，测点间距约为100 m。测点主要覆盖交通洞、通风兼安全洞以及与地下厂房等关键区域相连接的洞段。本次在线监测系统由高精度温湿度传感器网络、无线传输网关以及远程数据监控平台构成。温湿度测点传感器探头布设高度统一为距底板1.5 ~ 1.8 m 的呼吸带高度，避开洞壁直接淋水区域及局部机械排热直吹范围。传感器温度测量范围为 −20 ~ 60 ℃（测量精度 ±0.3 ℃），相对湿度测量范围为0% ~ 100% RH（测量精度 ±2% RH）。数据采样频率设定为每10 min 采集并上传一次，连续监测周期覆盖夏季施工典型高温高湿时段（7月中旬至8月下旬）。针对1000 m 以后的复杂作业区，结合交叉支洞与作业机械分布情况加密测点，以保障热湿环境突变边界捕捉的连续性与完整性。

二、研究结果

监测数据显示，交通洞与通风兼安全洞的温湿度分布存在一定差异。交通洞温度沿洞深呈梯度变化：0 ~ 200 m 洞口段受外界环境影响较大，温度波动范围为 -3 ~ 3 ℃；随着洞深增加，空气温度逐渐下降，超过1000 m 后基本稳定在16.5 ~ 17.5 ℃。这一变化可能与围岩热惯性及洞内通风条件有关。

在夏季监测期间，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。其中，600 ~ 700 m 区段的相对湿度达到62% ~ 63%。结合现场情况，该区段的湿度升高可能与围岩渗水和局部通风不足有关。进入深部区域后，相对湿度有所下降，可能是由于通风条件发生变化或渗水量减少。

通风兼安全洞的温度分布受洞内气流组织影响。洞口至300 m 区段的温度由23.5 ℃逐渐升至25.0 ℃，可能与该区段空气流动较弱、热量不易排出有关。进入300 m 以后的深部区域，温度下降并稳定在23.0 ~ 23.5 ℃，说明该区段的散热条件相对较好。通风兼安全洞的含湿量也存在明显的局部变化：洞口段为14.5 ~ 15.5 g/kg，至1100 m 处升高到24 g/kg。该测点的含湿量突增，可能与附近渗水、支洞来风或局部通风条件变化有关。

在交通洞中，焓值的分布呈现出一定的规律性与特殊性。1700m、1600m 等位置的焓值出现了显著升高的现象，以1700m 处为例，其焓值高达32.68 kJ/kga。焓值升高极有可能是由于该区域存在机械设备或电力设施在持续运行过程中产生了大量的热量。主变交通洞1950m 处的焓值为23.9 kJ/kga，尾闸运输洞1850m 处的焓值为25.47 kJ/kga，两个位置的较高焓值对应着关键设备集中区域的热影响叠加，热量积聚明显，进而导致焓值处于较高水平。

对于通风洞兼安全洞而言，其焓值分布有着不同的特点。主厂房入口处的焓值为16.06 kJ/kga，主变入口处的焓值为17.93 kJ/kga，这两个位置的焓值相对较高。原因可能与人员活动或设备散热密切相关。主厂房和主变区域是人员往来频繁、设备集中运行的地方。人员活动散热和设备散热共同作用使得入口温度升高，焓值也随之增大。

监测结果表明，通风兼安全洞的焓值沿洞深总体呈下降趋势，其中800 ~ 900 m 区段的变化较为明显，焓值从13.1 kJ/kga 降到 −4.49 kJ/kga。该区段的焓值下降可能与附近通风口、局部气流速度及洞室结构变化有关。通风口附近空气流动相对较快，可能加强空气与围岩之间的热湿交换，从而使局部焓值降低。

交通洞700 m 处也出现了焓值局部下降的现象，焓值下降至27.53kJ/kg。该变化可能受到通风条件、洞口来风以及局部结构等因素影响。狭窄通道和临时隔断可能改变原有气流路径，使800 ~ 900 m 区段形成局部焓值波动。由于焓值同时受空气温度和含湿量影响，尚不能仅根据焓值下降判断通风效率，具体原因还需结合相邻测点的温湿度、风速及现场通风状态进一步分析。

综合监测数据可知，夏季地下洞室热湿负荷呈现多元耦合特征。洞口浅埋段（0 ~ 300 m）受外界高温空气直接倒灌与洞口边坡日照辐射影响显著，空气焓值波动幅度大；随着轴向进深加大，围岩与空气的对流换热逐渐占据主导，围岩的“冷阱”效应使气温自发下降；但在1600 ~ 1950 m 机电交叉洞室群，施工运输车辆尾气排放、动力电缆运行及变压器空载发热构成了持续的局部点热源，导致焓值出现逆向陡增。此外，裂隙渗水蒸发与混凝土喷锚湿法作业是含湿量在局部区段（如通风洞1100 m 处）突增的根本原因。针对上述热湿聚集特点，提出以下工程级温湿度调控方案：分段式压入 − 抽出混合通风：在主变及尾闸运输洞热源密集区增设变频轴流风机，风速维持在0.8 ~ 1.2 m/s 以上，有效切断热量滞留形成的“热垫层”；洞室局部除湿与引排水阻断：对600 ~ 700 m 渗水活跃带实行盲沟集中引排与喷涂快速封堵，严禁渗水在洞底滞留蒸发；在主变入口等高焓值关键工位配置大功率移动式工业除湿机，将局部空气含湿量控制在12 g/kg 以下；智能通风联动调度：结合在线监测系统的实时温湿度与焓值数据，设定环境阈值自动调节主通风机叶片安装角与风量，实现夏季施工地下空间按需通风与节能运行。

三、结论与建议

本研究对某抽水蓄能电站夏季施工环境的监测分析表明，交通洞与通风兼安全洞呈现出显著不同的温湿度特征。交通洞温度随深度梯度下降，深部趋于稳定（16.5−17.5℃），湿度呈先升后降趋势，600−700m 处峰值达62−63%；通风洞300m 后温度稳定在23−23.5℃，1100m 处湿度突增至24g/kg。焓值分析显示，交通洞1700m 处达32.68kJ/kg（由于设备散热），通风洞入口区16.06−17.93kJ/kg（由于人员活动）。

基于研究发现，建议采取以下优化措施：1）在交通洞深部增

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

设局部通风设备，改善湿度累积问题；2）优化通风洞气流组织设计，提升湿度分布均匀性。这些措施将有效改善施工环境，保障工程质量和作业安全。研究结果为类似地下工程的温湿度调控提供了重要参考。

参考文献

[1] 向旭，伍岳璇 . 抽水蓄能电站概述 [J]. 广东水电科技，1984(1):22-26.

[2] 徐迁 . 隧道施工职业卫生现状综合评价与治理对策研究 [D]. 西南交通大学 ,2015.

[3]Chen X，Zhou X，Xu L B .Study on ambient temperature and humidity in the construction tunnel under the influence of ventilation and hot water gushing[J].Tunnelling and underground space technology，2024，143(Jan.):105501.1-105501.18.

[4] 陈孜虎 . 隧道施工过程高温环境机械降温技术研究 [J]. 矿山机械，2021.

[5] 李永生，杨立新，荀红松 . 隧道施工环境舒适性研究 [J]. 隧道建设，2012，32(6):806-810.

[6]Kim M J，Sankararao B，Kang O Y，et al. Monitoring and prediction of indoor air quality (IAQ) in subway or metro systems using season dependent models[J]. Energy and Buildings，2012，46(Mar.): 48-55.

[7] 李梅，王延妮 . 钻爆法隧道施工环境变化规律现场试验研究 [J]. 交通节能与环保，2025(2).

[8] 胡纯良 . 纵向隧道通风方式的优化研究 [D]. 南京师范大学，2013.

[9]Li J M，Li Y，Cheng C H，et al. A study on the effects of the slope on the critical velocity for longitudinal ventilation in tilted tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology，2019.

[10]Leng Z，Cao X，Yuan Y. Thermal and humidity control in high-geothermal tunnel by natural ventilation during operational transition period: A case study[J]. Case Studies in Thermal Engineering，2025，65.

[11] 黄勇，吴国荣，吴秋芳，等 . 惠州抽水蓄能电站地下厂房洞室群布置方案研究 [J]. 水力发电，2010，36(9):4..

[12] 刘芳明，朱育宏，王琪 . 清远抽水蓄能电站地下厂房及洞室群通风施工技术 [J]. 云南水力发电，2016(4):86-87.

[13]An R，Lin P，Li Z，et al. Intelligent ventilation-on-demand control system for the construction of underground tunnel complex[J]. Journal of Intelligent Construction，2024，2(2).

[14] 王召胜，孙黎黎 . 浅谈水利工程施工安全管理 [J]. 城市建设理论研究（电子版），2016，000(012):1307-1307.

[15]Wang H B，Zhang Z J. Grounding Resistance Monitoring Device for Improved Construction Electricity Safety in Pumped Storage Power Station Construction[J]. IOP Publishing Ltd，2024.

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