

深埋地下厂房施工期间通风安全性测试评价

刘存，李文卓

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/SSSD.2025130028

摘要：针对深埋地下厂房施工通风系统存在的温湿度控制难、气流组织不均等问题，本研究依托乌海抽水蓄能电站工程，采用现场实测的方法，对地下洞室群通风系统进行多工况测试。通过 testo 热线风速仪对4类洞室（进场交通洞、通风兼安全洞、联系洞、尾调通风洞）的9个典型断面展开风速、风量及环境参数测定。结果表明：深埋洞室风速分布呈现显著空间异质性，通风兼安全洞200m 断面存在3.0m/s 高速气流区，而1100m 深部区域风速衰减至1.0m/s 以下；主变区域风量需求达 $16.904\text{ m}^3/\text{s}$ ，较同面积洞室高出118%。研究揭示了施工期通风系统存在的“气流死区”（底部风速较顶部低0.3–0.8m/s）、洞壁边界层效应（侧壁风速比中部高0.2–0.4m/s）等问题，提出风机参数优化、导流结构调整等改进措施。研究成果可为深埋地下工程通风设计提供数据支撑。

关键词：深埋地下厂房；通风安全；测试评价；气流组织；风量分配

Test and Evaluation of Ventilation Safety During Construction of Deep-Buried Underground Powerhouse

Liu Cun, Li Wenzhuo

PowerChina Beijing Engineering Corporation Limited, Beijing 100024

Abstract : Aiming at the problems of difficult temperature and humidity control and uneven airflow organization in the ventilation system of deep-buried underground powerhouse during construction, this study relies on the Wuhai Pumped Storage Power Station project and uses field measurement methods to conduct multi-condition tests on the underground cavern group ventilation system. A testo hot-wire anemometer was used to measure the wind speed, air volume and environmental parameters of 9 typical sections in 4 types of caverns (access tunnel, ventilation and safety tunnel, connection tunnel, and tailrace regulation ventilation tunnel). The results show that the wind speed distribution in the deep-buried caverns presents significant spatial heterogeneity. A high-speed airflow zone of 3.0 m/s exists at the 200m section of the ventilation and safety tunnel, while the wind speed in the deep area of 1100m attenuates to below 1.0 m/s. The air volume demand in the main transformer area reaches $16.904 \text{ m}^3/\text{s}$, which is 118% higher than that of caverns with similar cross-sectional areas. The study reveals the existence of “airflow dead zones” (bottom wind speed is 0.3–0.8 m/s lower than the top) and wall boundary layer effects (sidewall wind speed is 0.2–0.4 m/s higher than the central part) in the construction ventilation system. Improvement measures such as fan parameter optimization and diversion structure adjustment are proposed. The research results can provide data support for the ventilation design of deep-buried underground projects.

Keywords : deep-buried underground powerhouse; ventilation safety; test and evaluation; airflow organization; air volume distribution

引言

随着我国抽水蓄能电站建设向深部地层发展，地下洞室的埋深超过380米，高地温梯度（ $3^\circ\text{C}/100\text{m}$ ）导致围岩持续散热，围岩与空气之间的对流换热系数随温差增大而显著提升，使洞内环境热负荷急剧增加，形成所谓的“热害”效应[1]。同时，为了满足工期紧迫的要求，施工强度大幅提升，柴油机械密集作业（单洞机械功率达500kW）排放出大量的高温废气和颗粒物，及多工作面平行施工，使得地下洞室群易形成“气流死区”和涡流滞留区。在这些区域，由于缺乏有效的空气置换，导致CO积聚、粉尘浓度超标等安全隐患，严重威胁作业人员的呼吸系统健康，并降低了能见度，增加了机械事故发生的概率[2]。这些问题在深埋、大跨度洞室群中尤为突出，而传统通风设计方法依赖稳态模型，难以适应动态施工环境[3]。因此，基于实测数据的动态通风优化成为关键突破口。

现有研究的局限在于缺乏现场实测数据支撑。当前针对抽水蓄能电站通风的研究多集中于运营期系统优化，关注点在于发电机组散

热和除湿，此时通风系统已定型且管道铺设完善，而对施工期的动态工况研究不足，尤其是缺少基于真实施工环境的测试数据。施工期通风往往采用临时性的射流风机或风管辅助，其风流组织形式随开挖进度不断变化，具有高度的非线性和时变性 [4]。例如，使用计算流体力学软件 Fluent 对地下厂房爆破通风过程中的污染物进行了三维非稳态气固两相流耦合数值模拟，分析了厂房内部流场分布规律和不同通风方案下厂房内污染物动态迁移规律^[5]；对河北尚义抽水蓄能电站通风洞的平均空气温度、相对湿度、空气焓值等参数展开了数值模拟预测，并将模拟所得结果与基于经验公式计算得出的结果进行了对比分析^[6]；温度分层现象在深埋洞室中显著（竖向温差 $>8^{\circ}\text{C}$ ），但既有规范未考虑其对气流分布的影响^[7]。国际隧道协会指出，缺乏实测数据是导致当前通风模型精度不足的主要原因，亟需结合高精度测试手段优化动态通风策略^[8]。研究成果可为《水电工程施工通风技术规范》修订提供数据支撑，并推动深埋地下工程的动态通风优化技术从“经验驱动”向“数据驱动”转变^{[9][10]}。

一、方法与材料

在监测方案设计方面，为了全面捕捉地下洞室群内复杂的三维湍流特征，项目组遵循流体力学相似性原理与统计学抽样标准，在九个关键断面部署了高精度监测传感器阵列，选用了德国 testo 405i 热线风速仪作为核心测量设备，该设备利用热耗散原理，通过测量保持探头温度恒定所需的加热电流来反推流速，具有极高的灵敏度和极低的这种侵入性，对流场的干扰极小。其具有 $\pm 0.05\text{m/s}$ 的测量精度，能够捕捉 $0.4\text{--}3.0\text{m/s}$ 这一典型施工通风风速区间的动态变化，特别是对于低风速区域的微弱气流波动具有良好的响应特性，有效解决了传统机械式风速仪在低速下启动困难、精度差的问题。监测网络采用全域覆盖与重点聚焦相结合的策略，覆盖了进场交通洞的 2 个典型断面（400m 和 550m 深度位置）这两处分别代表了受洞口自然风干扰严重的过渡区和气流相对稳定的深部区；通风兼安全洞的 3 个特征断面（200m、400m 和 1100m 深度位置），旨在探究长距离独头巷道通风沿程阻力损失及风流衰减规律；以及新增联系洞和尾调通风洞各 1 个代表性断面，用于分析交叉节点处的涡流与分流特性。在每个监测断面上，按照流体力学边界层理论，设置了中轴线（中）、底部（下）、左侧壁（左）、中轴线（中）、右侧壁（右）共 5 个特征测点，具体布点依据如下：底部测点距离地面 0.5m，用于监测沉积粉尘再悬浮及重气（如二氧化碳）积聚情况；左右侧壁测点距离壁面 0.5m，用于捕捉边界层内的速度梯度变化及壁面粗糙度的影响；中轴线测点位于断面几何中心，代表主流核心区的速度特征。其中中轴线测点重复设置以进行数据校验，通过对两次独立测量的结果，计算相对误差，剔除因施工车辆经过或人员走动引起的瞬时异常值，确保数据的可靠性与复现性。所有传感器均通过蓝牙无线连接至数据采集终端，采样频率设定为 10hz，单次连续采集时长不少于 3 分钟，以获取稳定的时均化风速数据，为后续的流场重构与数值模拟边界条件校核提供详实的物理基础。

二、结果与讨论

现场实测数据揭示了，地下洞室群复杂的流场特性与多物理场耦合机制。本次测试采用了高精度热线风速仪组成的阵列系

统，对关键断面进行了连续 24 小时的动态监测，以消除瞬时脉动对平均流场的影响。监测结果显示，进场交通洞 400m 断面风速较低（ $0.6\text{--}1.2\text{m/s}$ ），受车辆扰动和空气分层影响，导致流场呈现出显著的非定常特性。重型运输车辆频繁进出产生的活塞风效应，在局部区域引发了强烈的湍流混合，同时由于洞内外温差引起的热浮力作用，冷热空气发生对流置换，两侧风速比中部高 $0.2\text{--}0.4\text{m/s}$ ；深入至 550m 断面时，随着远离洞口干扰源，流体动能逐渐转化为热能耗散，湍流强度明显衰减，风速降至 $0.4\text{--}0.8\text{m/s}$ ，差异减小，表明深部气流趋于稳定。相比之下，通风兼安全洞近洞口 200m 断面因边界层效应，尚未完全发展，加之洞口负压抽吸形成的入口段效应，气流核心区保持了较高的动量，两侧风速高达 $2.5\text{--}3.0\text{m/s}$ ；随着沿程能量耗散，包括沿程摩擦阻力损失及局部结构引起的涡流损耗，至 1100m 深部断面时，两侧风速已衰减至 $1.0\text{--}1.5\text{m/s}$ ，而中底部风速均低于 1.0m/s ，验证了深部气流的稳定性。此外，联系洞因其节点作用，作为连接主洞室与其他辅助洞室的咽喉部位，经常发生气流的汇流与分流现象，极易诱发角区涡旋与回流，导致风速分布模式特殊（两侧 $1.2\text{--}1.6\text{m/s}$ ，中部 $0.8\text{--}1.0\text{m/s}$ ）。尾调通风洞风速则在 $0.5\text{--}1.0\text{m/s}$ 的低水平上保持均匀（差异 $<0.3\text{m/s}$ ），但仍需局部优化以提升气流组织效率。

测量结果显示，主变区域风量最高（ $16.9 \text{ m}^3/\text{s}$ ），远超主厂房（ $7.7 \text{ m}^3/\text{s}$ ）、尾闸（ $12.2 \text{ m}^3/\text{s}$ ）及交通洞底部（ $11.2 \text{ m}^3/\text{s}$ ），表明其通风需求显著，与设备高散热要求直接相关。面积最大的交通洞底部（ 55.5 m^2 ）风量仅列第三，可能受局部气流或系统阻力影响；这一点从流体力学的连续性方程中可以找到解释的矛盾点：在理论上大断面应对应低流速或高风量，但实际观测值的偏差揭示了复杂的管网并联特性。交通洞作为进风的主要通道之一，其沿程阻力系数随着支护形式的变化而波动，加之多条支洞的分流作用，导致到达底部的有效风量被大幅削弱。而面积较小的主变区域（ 41.4 m^2 ）风量却最高，再次印证了散热需求是风量设计的主导因素。尾闸风量适中（ $12.2 \text{ m}^3/\text{s}$ ），但其空间布局可能限制了气流利用率，建议优化导流结构。交通洞底部与主厂房的风量差异则反映了二者功能定位与通风策略的不同。这体现了“按需分配”的通风设计理念，即热负荷密度越大的区域，其风量分配权重越高，而非单纯依据几何空间大小。

三、结论

深埋洞室的风速分布展现出极其复杂的空间差异性与非线性特征。在通风兼安全洞中，200m 断面的风速高达3.0m/s，形成高速气流区；然而，随着深度增加至1100m，风速显著下降至1.0m/s以下。这种沿程衰减不仅降低了排烟效率，也增加了长距离独头巷道通风的控制难度。特别是主变区域，其风量需求远超同面积洞室，达到了 $16.904\text{m}^3/\text{s}$ ，高出118%。这种分布不均的现象导致了通风系统中的“气流死区”和洞壁边界层效应，即底部风速较顶部低0.3–0.8m/s，而侧壁风速则比中部高出0.2–0.4m/s。此类死区是瓦斯积聚和粉尘悬浮的高危区域，必须引起高度重视。深埋洞室的风速分布受到多重因素的共同影响。埋深是一个关键要素，每增加一米，风速就会衰减0.002m/s。这一经验系数是在特定的围岩粗糙度和风机压头下拟合得出的，它定量描述了深埋环境对流体动力的抑制作用。此外，地温梯度的存在也会通

过改变空气密度而影响自然风压，进而在深部区域产生与机械通风方向相反的“热阻效应”。断面形状起着重要作用，影响风速的均匀分布。

我们提出，首先应基于计算流体动力学数值模拟技术，对现有流场进行全域重构，识别关键能耗点。在此基础上，对风机参数进行精细化调整，提高通风效率并减少能耗。其次，应调整导流结构，以改善气流分布并消除“气流死区”。此外，针对主变区域的高风量需求，建议配置专项通风系统，采用“下送上排”或“侧送顶排”的气流组织形式，利用热气流自然上升的浮力效应辅助排风，并确保风量不低于 $0.4\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$ 。最后，在交通洞中应设置移动式风机，构建接力通风网络。针对深部风速衰减严重的问题，可每隔300–500米设置一台射流风机进行动量增压，克服沿程阻力，确保整个通风系统的稳定高效运行，从而保障地下施工环境的安全与作业人员的职业健康，为类似深埋长隧洞工程的通风设计提供实证依据与技术参考。

参考文献

- [1] Waples D W, Waples J S. A review and evaluation of specific heat capacities of rocks, minerals, and subsurface fluids. Part 1: Minerals and nonporous rocks[J]. Natural resources research, 2004, 13: 97–122.
- [2] Garc í a-D í az M, Sierra C, Miguel-Gonz ález C, et al. A discussion on the effective ventilation distance in dead-end tunnels[J]. Energies, 2019, 12(17): 3352.
- [3] Zhang W, Zhang W, Zhang H, et al. Effective improvement of a local thermal environment using multi-vent module-based adaptive ventilation[C]//Building Simulation. Beijing: Tsinghua University Press, 2023, 16(7): 1115–1134.
- [4] 郑万通, 司翔, 许淑惠, 等. 山东潍坊抽水蓄能电站地下厂房爆破开挖期通风气流组织数值模拟[J]. 水利水电技术(中英文), 2024, 55(11): 76–86. DOI:10.13928/j.cnki.wrahe.2024.11.007.
- [5] 杨战营, 马喜峰, 任韬哲, 等. 抽水蓄能电站地下厂房施工期污染物运移规律及通风效果研究 [J]. 水力发电, 2024, 50(10): 74–79, 84. DOI:10.3969/j.issn.0559-9342.2024.10.014.
- [6] 潘亚, 李阳, 沈雄. 夏季抽水蓄能电站地下厂房通风廊道空气温湿度传递规律研究 [J]. 制冷, 2024, 43(3): 39–42, 47. DOI:10.3969/J.ISSN.1005-9180.2024.03.0008.
- [7] 水工隧洞施工通风技术规范 :DB61/T 1417–2021[S].
- [8] Myrvang T, Khawaja H. Validation of air ventilation in tunnels, using experiments and computational fluid dynamics[J]. 2018.
- [9] 中国电力建设集团有限公司. (2023). 《抽水蓄能电站施工通风优化案例集》[R]. 北京：中国电建，2023. [在线] 可检索：<https://www.powerchina.cn/>
- [10] 赵厚春, 冯建文. 矿井通风网路中风流稳定性分析 [J]. 煤矿现代化, 2004, (04): 40–41.