

刘国超. 极寒条件下地下洞室通风供暖形式及节能措施研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(S1): 314-321.

LIU Guochao. Study on ventilation and heating forms of underground cavern and energy saving measures under extremely cold conditions[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(S1): 314-321.

极寒条件下地下洞室通风供暖形式及节能措施研究

刘国超

(中国安能集团第一工程局有限公司, 广西南宁 530000)

摘要: 某大型地下洞室工程地处严寒地区, 冬期时长 208 d, 平均温度 -19.7°C , 最低温度 -45.4°C 。该洞室的分布错综复杂, 主洞室施工周期漫长, 施工巷道、水幕巷道线路长交叉口多。随着施工的推进, 洞室之间的联通方式、通风通道、通风距离、通风回路都在不断变化, 地下洞室气流组织复杂, 施工保温供暖难度大。针对以上在施工中存在的困难, 采用计算流体力学(CFD)理论模型对水封洞库不同施工时段的风流场和温度场进行模拟, 通过现场采集数据对模拟成果进行修正, 力求通过计算模拟指导施工。利用计算模拟的成果对施工期冬季施工通风及供暖布置进行了优化调整, 使极端寒冷条件下洞内环境温度始终保持在 5°C 以上, 同时充分利用洞内排出气体的余热解决了交通洞路面结冰的难题, 为工程建设的推进起到了很好的保障效果。

关键词: 极寒条件; 地下洞室; 通风; 供暖; 节能; 结冰; 计算流体力学

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.S1.049

中图分类号: TV521

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2025)S1-0314-08

Study on ventilation and heating forms of underground cavern and energy saving measures under extremely cold conditions

LIU Guochao

(China Anneng Group First Engineering Bureau Co., Ltd., Nanning 530000, Guangxi, China)

Abstract: A large underground cavern project is located in a severely cold area, with a winter period of 208 days, an average temperature of -19.7°C , and a minimum temperature of -45.4°C . The distribution of this cavern is complex and intricate, with a long construction period for the main cavern and multiple intersections of construction tunnels and water curtain tunnels. With the progress of construction, the connection mode, ventilation channels, ventilation distance, and ventilation circuit between tunnels are constantly changing. In response to the difficulties encountered during the construction process mentioned above, we adopted the Computational Fluid Dynamics (CFD) theoretical model to simulate the airflow and temperature fields of the water sealed cavern during different construction periods. We corrected the simulation result through on-site data collection, striving to guide the construction through computational simulation. We have utilized the result of computational simulation to optimize and adjust the ventilation and heating layout during winter construction, ensuring that the ambient temperature inside the tunnel remains above 5°C under extreme cold conditions. At the same time, we have fully utilized the residual heat of the gas discharged from the tunnel to solve the problem of road icing in the traffic tunnel, providing a good guarantee for the advancement

收稿日期: 2024-03-02

作者简介: 刘国超(1987—), 男, 工程师, 项目总工程师, 学士, 主要从事大型地下洞室工程施工技术研究。E-mail: 1061298410@qq.com

of engineering construction.

Keywords: cold conditions; underground cavity; improve air circulation; heating; energy saving; freezing; CFD

0 引言

随着隧道事业的发展,国内外对隧道通风进行了大量的系统的研究,主要包括隧道内风流流场规律、隧道内污染物流动规律、通风系统风量计算等方面的研究。从目前的研究可以看出,对于隧道通风系统、隧道内流场及污染物浓度分布等方面已经做了大量的、翔实的研究,但研究对象基本为独头掘进隧道且缺少相应的关于空气加热装置的布置;针对水电站地下洞室群通风系统虽有不少研究,但研究内容主要集中在单独洞室通风效果或通风系统风量计算方面。基于地下洞室工程在施工的不同阶段通风系统的布置,以及严寒条件下地下洞室群施工供暖的系统探索还未见相关研究报告。

国内王海桥等^[1]采用数值模拟的方法对采用压入式通风的独头掘进隧道风流流场进行了详细研究。施工通风系统研究包括风机布置对主厂房通风效果的影响、通风系统风量动态模拟等方面,如:何坤等^[2]以向家坝水电站为研究对象,运用数值模拟的方法研究增加串联风机、串联风机位置对主厂房内风速的影响以及通风竖井对主厂房内通风效果的改善作用;申明亮^[3]根据风量公式确定通风风量、风压,然后建立溪洛渡工程施工通风仿真计算体系,依据仿真结果对通风系统的选择及通风方案的布置提出相应的优化建议。

费万堂等^[4]以河北丰宁抽水蓄能电站为研究对象,通过空气加热系统加热及保暖风门隔热的方式保证地下洞室冬季施工期间的温度;袁志新等^[5]以呼和浩特抽水蓄能电站引水系统冬季施工为研究对象,通过对贯通竖井进行封堵减少洞内自然空气流通并结合机械通风的方式来保证洞内施工温度。

本文以在寒冷地区建设的大型地下洞室工程的通风供暖技术为研究对象,利用计算流体力学(CFD)对施工期洞库通风供暖情况进行了模拟,通过现场试验对通风模型进行修正,根据通风换热模拟结果进行了针对性的通风供暖布置,很好地解决了施工期主洞室温度过低和巷道结冰的问题。

1 工程概况

某地下洞室工程地处严寒地区,冬季施工期 208 d,平均温度 $-19.7\text{ }^{\circ}\text{C}$,最低温度 $-45.4\text{ }^{\circ}\text{C}$,10月2

日一次年4月27日为冬季施工时间。通过钻孔的地温测试成果分析,洞库区地温整体为 $2.0\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 6.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。该地下洞室由4组洞罐组成,每组洞罐设置2个工艺竖井,1个通风竖井;主洞室上方由5条水幕巷道和2条水幕连接巷道构成水幕系统;整个工程由3条施工巷道贯通连接和14条主洞室组成。由于地理位置特殊,冬季极寒条件对工程施工有着重要影响,考虑到地下洞室布置复杂,不同施工阶段通风排烟、供暖需求差异巨大,本文将分成3个阶段分别对施工期的通风供暖系统布置及节能措施进行研究和探索。

2 冬季极寒条件下通风供暖面临的困难

2.1 难点一

受地域特性影响,该地区施工具有冬季时间长、温度低的特点。在施工过程中由于出渣量大,洞内外温差大(洞内外最大温差达 $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上),洞外冷空气密度大于洞内空气温度,无论工艺(通风)竖井是否贯通,对于下坡施工的主施工巷道而言,巷道外冷空气都将沿着巷道下部进入洞内,致使巷道路面结冰。如图1所示,当洞外空气温度为 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$,竖井未贯通时,主施工巷道冻结长度约为500 m,竖井贯通后,主施工巷道冻结长度为1 000 m。直接影响施工安全和水幕系统的运行安全,因此如何解决冬季施工期间巷道结冰问题是我们面临的难点。



图1 极端温度下巷道结冰情况

2.2 难点二

整个地下空间通过施工巷道、水幕巷道相互连通,施工期间地下洞室自然风流、机械通风气体流动路线复杂,涡流段落增多,尤其在极寒条件下,常规

通风供暖布置无法有效地排出有害气体来保障洞内温度, 如何合理地进行通风、采暖布置以实现最优的通风效果是我们研究的重点。

2.3 难点三

主洞室施工期间, 地下空间巨大, 如何提高施工通风的空气加热效率和充分利用地热节约能源消耗是我们研究的重点。

3 极端环境下地下温度场模拟分析

现有的地下洞室施工通风计算理论主要借助于大量的通风模型实验, 大多局限于通风时间的经验确定、通风机的选择等方面, 对复杂洞室通风的风流动力学特性的研究相对较少。目前, 计算流体力学(CFD)在水利工程、土木工程、环境工程等领域发挥了巨大的作用, 流体流动和组分输运等问题几乎都可以利用 CFD 进行数值计算。随着 CFD 和计算技术的飞速发展, 利用 CFD 仿真技术来对地下工程施工期通风进行数值模拟, 研究地下洞室群中风流组织和有害气体变化规律, 以解决施工过程中的通风问题, 优化通风方案, 对于指导复杂地下洞室群施工通风具有较大的理论意义和实用价值。

在此对巷道口、竖井在不同工况下进行 CFD 数值计算, 通过模拟计算成果来指导极寒条件下通风供暖系统的布置。

3.1 最不利工况计算

最不利工况为, 在极寒条件下通风竖井、工艺竖井、施工巷道全部贯通且打开的情况下进行主洞室施工。需考虑自然风场及机械通风风场多场耦合条件下, 主施工巷道冷空气影响范围、冻结长度及洞室内温度场变化, 并观测通风竖井内冷空气贯入对洞室温度场影响, 为设计合理的通风网络, 改善洞内施工环境, 保证冬季安全高效施工提供重要理论支撑。

3.2 模型建立及边界条件划分

洞室群规模庞大, 结构复杂, 包含多个巷道交叉口(见图2), 使用 SCDM 软件建立洞室模型。如图3所示, 利用 Fluent meshing 进行网格划分, 整体网格歪斜率控制在 0.65 以下。

在地下洞室施工循环中, 气流温度场会受到很多因素的影响, 根据对施工环境的分析, 结合严寒条件

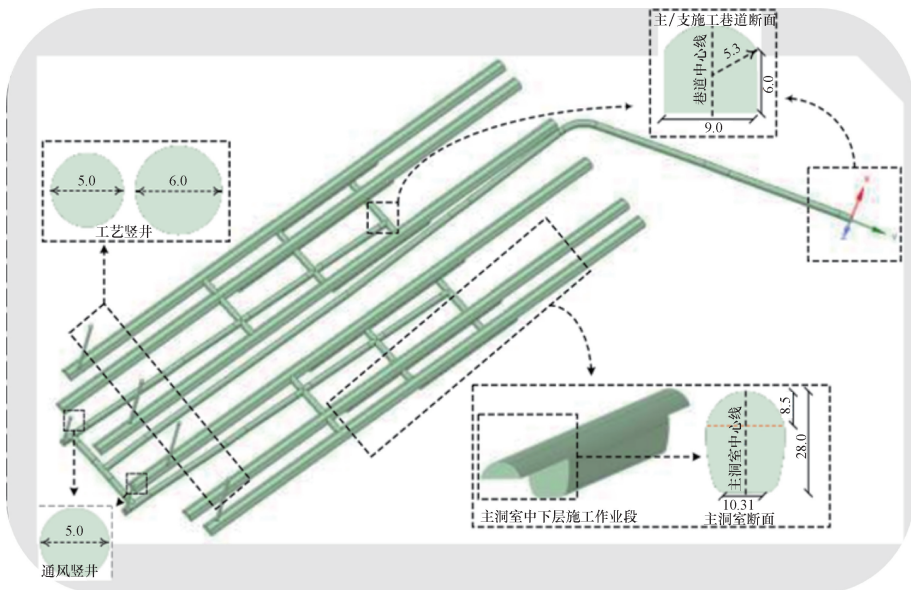


图2 巷道及部分地下洞室施工作业段全尺寸模型(单位: m)

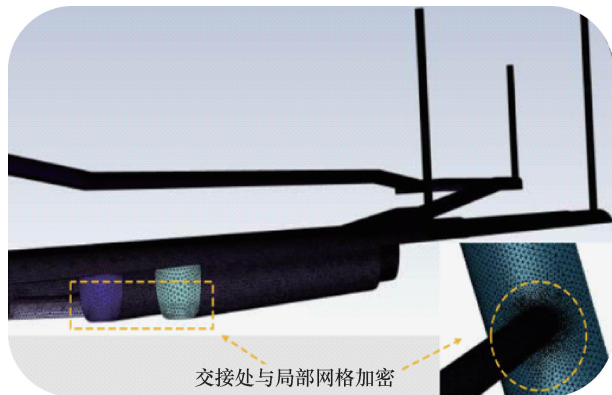


图3 网格结构化示意

下空气流动特性, 选择了压力基瞬态求解器, 采用 SIMPLE 算法求解压力耦合方程组。湍流模型选择 $k-\varepsilon$ 双方程模型。动量方程、能量方程、湍流动能方程和涡流耗散方程均选择二阶隐式算法。由于极端环境下洞室内外温度相差较大, 且空气密度差导致洞口自然对流现象明显, 使用 Boussinesq 模型进行模拟, 参考温度设置为 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, 参考空气密度为 1.29 kg/m^3 。

3.3 自然对流风场、温度场分析

设距施工巷道洞口 400 m 为监测断面 1, 距施工巷道口 1670 m、通风竖井 210 m 为监测断面 2, 断面监测点位布置如图 4 所示。通风 30 min 后风流场风速云图如图 5 所示, 通风 90 min 后, 监测断面平均风速如图 6 所示。在通风 30 min 后, 施工巷道及洞室内风速趋于稳定, 地下空间内平均风速为 0.61 m/s , 洞口处最大风速为 2.44 m/s 。现场实测地下空间平均风速为 0.66 m/s , 洞口处最大风速为 2.21 m/s , 模拟数据与现场实测数据基本相符。



图4 监测点布置示意

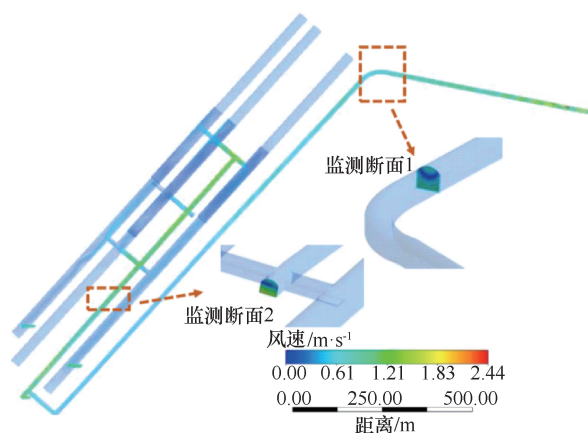


图5 通风30 min 地下空间风流场风速云图

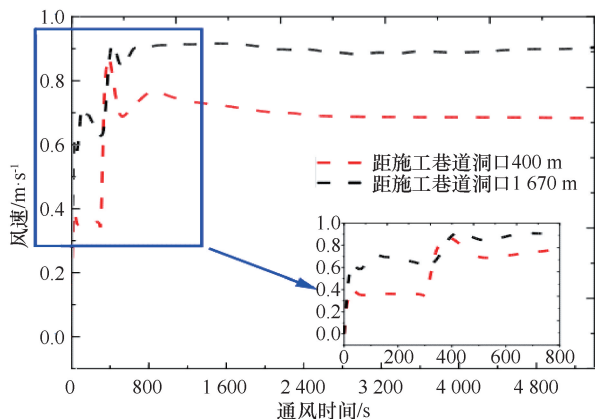


图6 通风90 min 断面平均风速变化曲线

如图7所示,自然通风90 min以后,模拟主施工巷道洞口冻结长度为900 m,由于风门未关闭,竖井自然进风对支巷道温度产生影响,支施工巷道模拟冻结范围为距竖井150 m。主洞室内平均温度为6.7℃,满足冬季作业施工要求。对施工巷道洞口风流温度耦合场进行分析,沿X-Z平面作温度切片云图,如图8所示。可以看出,洞口温度沿Z轴正方向自上而下逐渐降低,同时温度沿Y轴方向呈锥形

趋势逐渐降低。分析洞口风流场可得,洞外冷空气贯入后,由于密度较大,先流向洞口底部围岩,而后经由短暂的换热升温,部分冷空气上升,进而产生涡流区,涡流区内风速为零,冷空气聚集回流,易造成洞口冻害严重,模拟结果与实际情况基本相符。

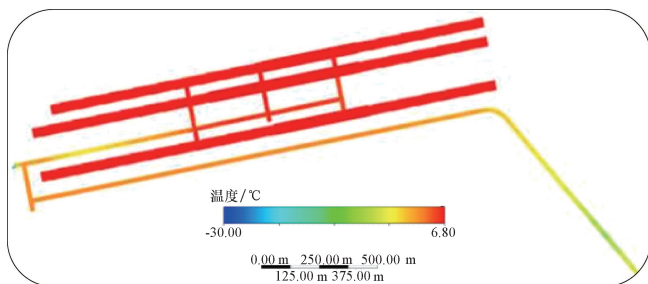


图7 通风90 min 地下空间温度场模拟云图

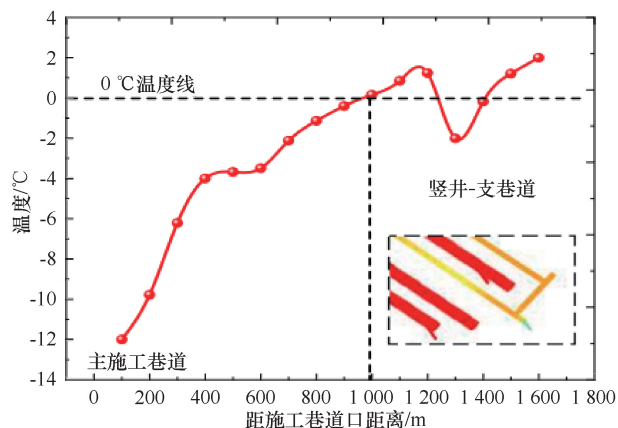


图8 巷道温度变化模拟曲线

3.4 主洞室作业段机械通风风流场、温度场分析

不同机械通风时间下风流场云图如图9所示,模拟通风45 min以后,上层主洞室平均风速为0.16 m/s,施工作业段平均风速均大于0.15 m/s,满足《地下水封石洞油库施工及验收规范》(GB 50996—2014)^[6]要求。然而通过对机械通风风流场分析,可以看出掌子面两端易产生涡流,形成较长距离的回流区,这是造成污风排污效应较低的主要原因。

在工艺竖井关闭状态下对主洞室温度进行模拟分析,分析结果如图10所示,加入机械通风后,主洞室初始温度场为3℃,机械送风温度保持为5℃,此时,竖井因热位差所贯入的冷空气对施工作业段无影响,施工作业段(主洞室中下层)平均温度为4.12℃,上层主洞室温度在通风25 min以后,均大于3℃。

后期将机械通风温度提高到8~10℃,作业面及主洞室上上层模拟温度均能达到5℃以上,满足冬季施工要求(见图11)。

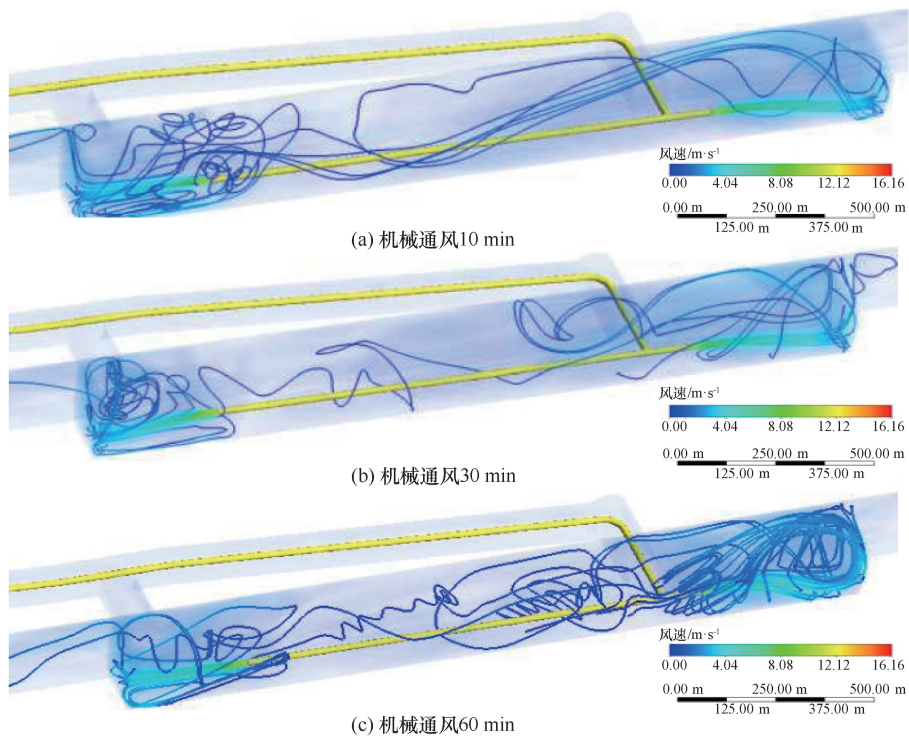


图9 不同机械通风时间下风场云图

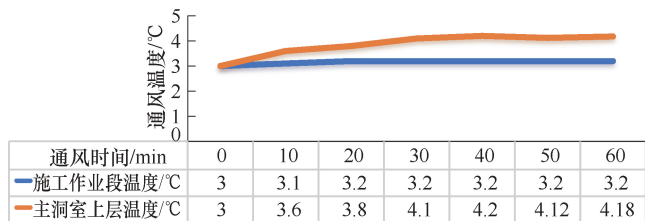


图10 施工作业段与上层主洞室温度变化曲线

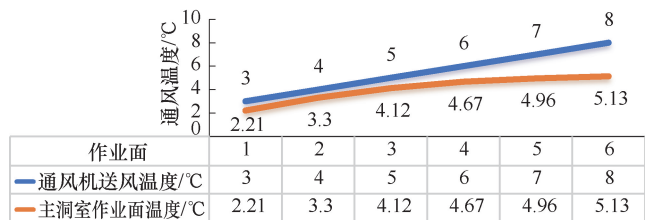


图11 主洞室作业面与通风温度关系曲线

在工艺竖井开启的情况下进行温度场模拟，主施工巷道距洞口900 m范围内空气温度为0℃以下(见图12)，此时关闭工艺竖井进行模拟，改由施工巷道口出风，将主洞室内热空气往洞口输送，距洞口600 m以后空气温度均上升至0℃，距洞口仍有600 m范围内空气温度位于0℃以下(见图13)。

3.5 模拟情况总结

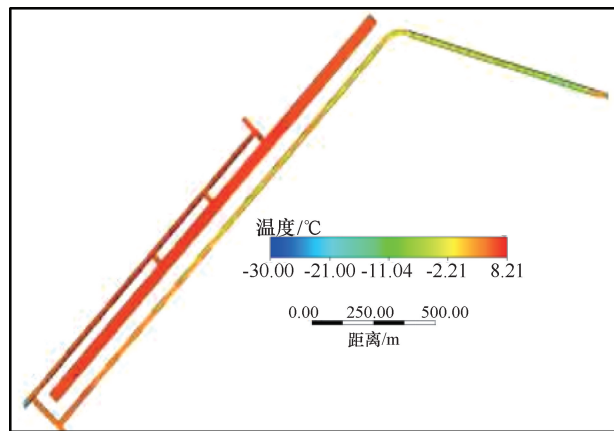
通过建立模型对不同工况下的风流场、温度场、巷道内温度变化曲线的模拟，可初步明确以下内容：(1)工艺竖井贯通后如不进行封闭，受“烟囱效应”

的影响，主施工巷道、支施工巷道会结冰，进而影响水幕系统的运行和施工交通安全；(2)工艺竖井贯通后进行封闭，在正常通风供暖情况下能够保证主洞室施工温度，同时可在一定程度上提高巷道内温度，缩短巷道结冰长度，此时污浊空气全部通过巷道排出，需要考虑增加辅助排风手段和巷道口辅助加热手段；(3)机械通风温度在8~10℃可基本保证主洞室内作业的最低温度(5℃)的要求，但需要现场进行验证。

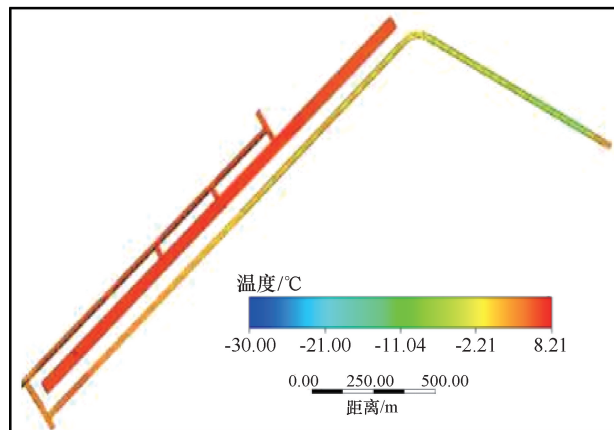
4 极寒条件下通风供暖系统规划

针对以上存在的问题及模型模拟计算的结果，在地下洞室群整体通风供暖上主要从分阶段通风供暖、分部位隔离和保障路面

不结冰三个方面进行设计和规划。



(a) 通风45 min



(b) 通风60 min

图12 竖井开启情况下温度场模拟云图

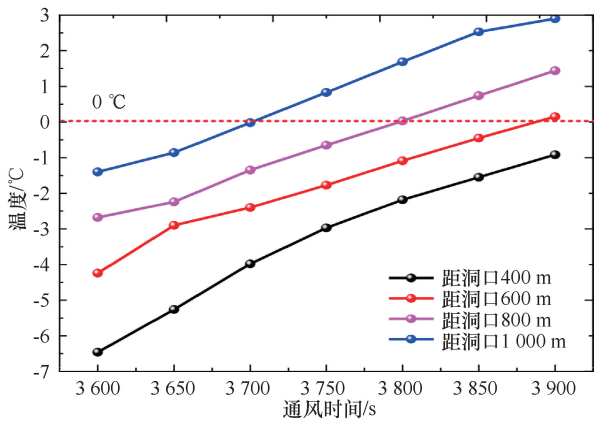


图 13 竖井开启 60 min 后关闭, 巷道内温度上升曲线

4.1 通风供暖设计原则

4.1.1 极寒条件下洞内连通部位隔离

地下工程共由 4 组洞罐组成, 洞罐之间通过巷道相互连通, 此处研究地下模型为避免风流组织混乱, 与其他部位施工巷道连通部位通过保温门进行隔断(见图 14), 上方水幕巷道相互连通部位通过米石堆渣, 上部沙袋砌筑的方式封闭, 以阻断空气流动(见图 15)。隔断后对于通风供暖的布置可以只考虑单组洞罐, 其他洞罐可参照进行布置。

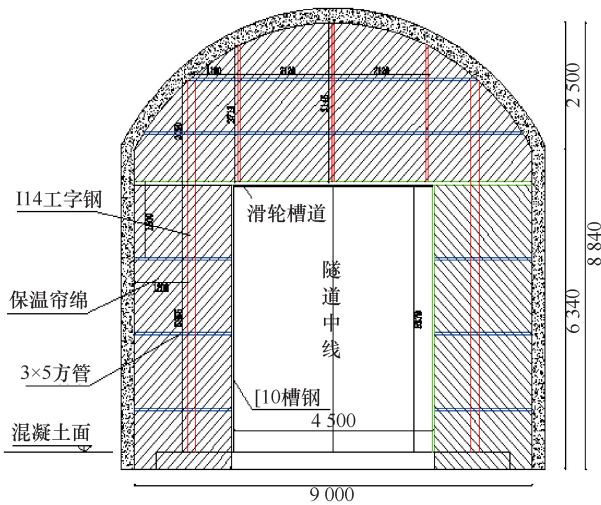


图 14 巷道连通部位保温隔离门示意(单位: mm)

4.1.2 分阶段设计原则

由于不同施工时段面临的情况具有显著差异, 在进行通风供暖设计时应根据总体的施工安排结合地下空间自然风流规律进行针对性通风设计, 本项目分巷道施工阶段、通风竖井贯通阶段、工艺竖井贯通阶段 3 个阶段进行针对性通风设计, 避免资源的浪费。

4.1.3 保暖、加热并行的原则

针对巷道口结冰的情况, 在充分利用地下空气热量的同时, 仍然需要对通过巷道口流入洞内的冷空气

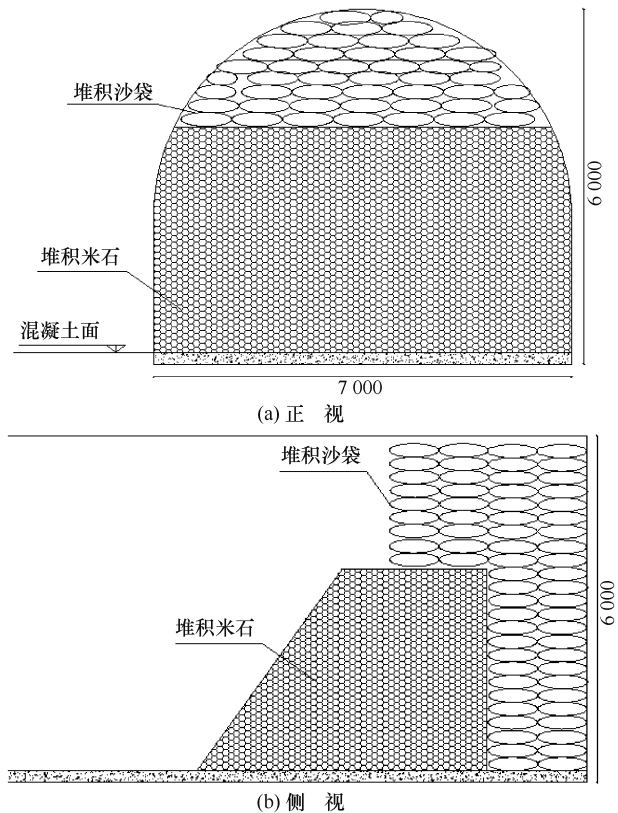


图 15 水幕巷道连通部位封堵示意(单位: mm)

进行加热来避免巷道口部位结冰。本文是在巷道口处两侧设置热风幕对冷空气加热。

工艺竖井贯通后, 在极端温度条件下井口应进行封闭处理, 防止冷空气倒灌和热量损失。井口预留活动式小型风门, 风门外接轴流风机, 这样在洞内空气质量不好时可作为辅助通风手段, 如图 16、图 17 所示。

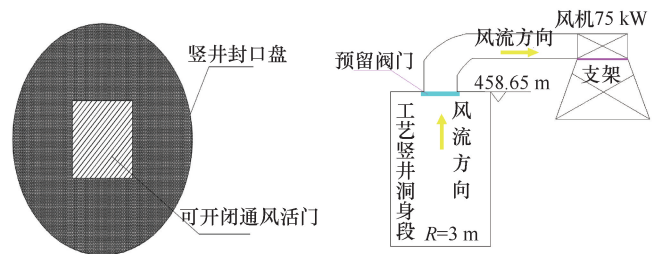


图 16 工艺竖井井口布置示意

5 通风、供暖方案

5.1 通风供暖计算

根据相关水工隧洞施工通风技术规范、热功计算原理及类似施工经验, 进行计算后可知, 每组洞罐 3 条主洞室施工期间最大供风量为 $3\ 300\ \text{m}^3/\text{min}$, 对应配置 200 kW 变频轴流风机可满足需求。在室外平均温度为 $-30\ ^\circ\text{C}$ 的情况下, 主洞室施工所需风量加热功

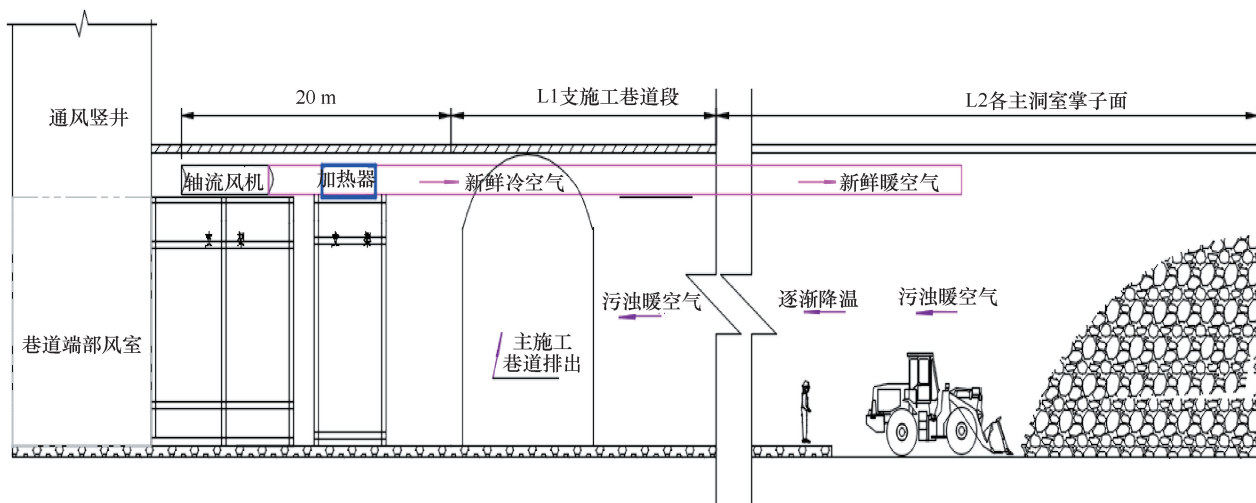


图 17 竖井下方通风管道加热示意

率为 1760 kW，配置 3 台 600 kW 变频红外线暖风炉能够满足要求，供暖设备开启功率应根据室内外温度差进行调整。

5.2 分阶段通风供暖方案

根据地下工程的总体施工进度情况进行分阶段的通风供暖设计。共分为 3 个阶段组织施工通风供暖。

5.2.1 施工巷道、水幕巷道施工阶段(第一阶段)

本阶段巷道独头掘进，采用混合式通风布置，巷道口增设感应式自动门，巷道掘进 400 m 以上时可根据需要在巷道内部增设防寒棉门帘，掌子面附近区域及巷道口附近区域采用 25 kW 移动式电暖风机进行加热保温。

5.2.2 通风竖井贯通、工艺竖井未贯通阶段(第二阶段)

本阶段主要为主洞室上层施工期间，通风竖井贯通后将风机布置在竖井下方巷道处，风机两侧通过隔离门进行隔断以避免污浊气体通过风机再次吹入掌子面。通风竖井作为进风井使用主要是为了防止冬季施工期间冷空气通过竖井直接吹入主洞室掌子面造成掌子面结冰，风机布置在竖井下方减少了通风管道的转弯点，有效降低了风损。如遇到巷道内污浊空气流速缓慢或不流动的现象，可以考虑在巷道内增加射流风机进行引流，参考其他类似项目的经验，射流风机宜选择低耗大功率，在 30~75 kW 为宜。射流风机宜按照“进风段少布置，排污段多布置，小断面多布置，大断面少布置，风向变向处要布置，竖井内要布置”的原则进行风机布置，通常风机间距 200~400 m。射流风机可安装在隧道(洞)的顶部或设置在离隧道(洞)底板一定高度的隧道(洞)边墙一侧。为维修方便和不影响洞内其余工序施工，通常设置在离底板

1.5~2.0 m 的高度位置。

为保证本阶段施工区域供暖需求，在轴流风机口加装 600 kW 红外线暖风炉对冷空气进行加热，暖风炉开启功率根据室内外温度差进行适当调整。

5.2.3 工艺竖井贯通后主洞室施工阶段(第三阶段)

本阶段主要进行主洞室中下层施工，是整个项目的施工高峰期，单日爆破方量大、车流量大，爆破烟尘及车辆尾气明显增大，综合考虑洞内空气质量和温度的情况，分两个工况进行通风组织。

工况 1：室内外温度差不明显，竖井井口打开对主洞室及巷道口温度影响不大，可将工艺竖井作为排风口使用，如排风效果不明显应在竖井内部增加射流风机进行引流，此时新鲜空气从巷道口流入，污浊空气从竖井口排出，整个地下空间形成良好的气体循环。

工况 2：室外温度极低，在工况 1 的通风供暖布置下已经产生巷道口结冰或主洞室内工作温度无法满足施工要求的现象。此时按 4.1.3 节所示将工艺竖井井口进行封闭，预留可开启的活动风门，外接轴流风机，竖井井口轴流风机在工作面爆破后开启，增加烟尘的排出速度，排烟后关闭，防止巷道口冷空气贯入。此时洞内风流组织与第二阶段相同。为增加污浊空气流动速度，仍然可以考虑在巷道内增加射流风机进行引流，巷道口需设置热风幕对冷空气升温。

5.3 污染物浓度监测和节能措施

现场分别对三个通风阶段的有害气体进行了监测，不同施工阶段的检测结果如下：第一阶段巷道施工，通风 15 min 后工作面空气质量符合规范要求；第一阶段水幕施工，通风 30 min 后工作面空气质量符合规范要求；第二阶段主洞室上层施工，通风 25~

30 min 后工作面空气质量符合规范要求;第三阶段主洞室中下层施工,通风 30 min 后工作面空气质量符合规范要求,巷道内空气质量下降,粉尘含量增大,增加射流风机后预计可有效降低巷道内粉尘含量。

节能措施如下:(1)在风带转弯和三通部位采用硬质弯头和三通,通过减少风阻提高通风效率;(2)为适应不同通风阶段对轴流风机功率的要求,采用变频轴流风机,根据工作面需求实时调整风机频率,最大限度地利用通风设备;(3)适当延长排风路径,充分利用温度高的污浊空气,减缓或避免巷道结冰。

6 结 论

本文以某大型地下洞室项目极寒条件下通风供暖为研究对象,为解决冬季极寒条件下巷道结冰、地下洞室群气流组织复杂、工作面温度过低影响施工安全和施工质量的问题进行了专项研究。通过计算流体力学(CFD)和建立三维模型分析了不同工况下主体工程施工期间的气体流动规律和温度场分布规律,并结合理论分析结果进行了不同施工阶段的通风供暖布置,在项目施工期取得了良好效果,结论如下:

(1)在极寒条件下,地下洞室群相互连通的施工通道会导致空气流动的不可预测性增加,对施工通风、供暖布置十分不利。隔断连通部位,使地下空气按照规划的方向流动对整体施工组织十分有利。

(2)主体工程施工期间如处于极寒条件下,工艺竖井应进行封闭,污浊空气通过巷道排出能够有效缓解巷道口结冰,同时,为增加污浊空气流动速度,可在重点部位安装射流风机辅助通风。此外,在巷道口

两侧安装大功率热风幕能有效缓解洞口结冰。

(3)工艺竖井封闭后预留可开启的活动风门,外接抽出式轴流风机,在爆破后开启风机进行辅助排烟,能快速排出有害气体。

在此需要明确的是,每个阶段的通风供暖布置都是针对冬季施工或极寒条件,在暖季施工的情况下,结论(1)并不适用,而是应打通隔离部位同时工艺竖井也应打开以增加空气流通通道和流通速度。

由于地下洞室群的复杂性,各洞室贯通后, airflow 不断发生变化,在工程建设过程中应基于各阶段和工况动态调整通风方案,以适应施工需要。

参考文献:

- [1] 王海桥,施式亮,刘荣华,等.独头巷道射流通风流场 CFD 模拟研究[J].中国安全科学学报,2003,13(1):68-71.
- [2] 何坤,叶敏敏,李艳玲,等.基于三维数值模拟的长大隧洞施工通风影响因素研究[J].中国农村水利水电,2012(2):106-109.
- [3] 申明亮.溪洛渡地下洞室群施工通风方案仿真与优化[J].长江科学院院报,2008,25(4):36-39.
- [4] 费万堂,马雨峰,王兰普,等.高寒地区抽水蓄能电站地下厂房施工期通风、保暖、散烟系统研究[J].水利水电技术,2017,48(4):90-98.
- [5] 袁志新,谭淑芳,屈刚.呼蓄电站引水系统冬季施工方法探讨[J].中国三峡,2013(12):65-67.
- [6] 住房和城乡建设部,国家质量监督检验检疫总局.地下水封石洞油库施工及验收规范:GB50996—2014[S].北京:中国计划出版社,2014.

(责任编辑 王 璐)