

文章编号: 1671-6612 (2026) 04-556-09

地下水电站管廊热压通风特性分析及优化研究

时二强

(中国水利水电第五工程局有限公司 成都 610213)

【摘要】 地下管廊在水电站中承担着重要的管线集中敷设、维护及安全保障作用, 良好的空气环境可保障管廊安全高效运行。当前广泛应用的通风方式为机械通风, 对热压自然通风的研究较少。自然通风作为一种低碳节能的通风方式, 能否保障管廊热环境满足规范要求是研究重点。基于某地下水电站管廊工程相关参数, 进行模型建立及 CFD 模拟计算, 研究了进排风口高度差 (2m、4m、6m) 和电缆散热量 (18.2W/m、25.6W/m、32.0W/m、40.1W/m) 对自然通风效果的影响。结果表明: 当进排风口高差由 2m 增至 6m 时, 管廊内最大风速由 0.32m/s 提升至 0.47m/s, 排风温度降低约 2.5~4.0℃; 当电缆散热量由 18.2W/m 增至 40.1W/m 时, 自然通风量由约 5108m³/h 提升至约 6168m³/h, 但排风温度上升约 6~8℃; 余热排除效率整体分布在 1.5~3.7 之间, 且随高差增大而提高, 随散热量增大而下降。在满足水电站建设及初期投资要求的前提下, 建议将自然排风口与机械风口并联布置, 并尽可能增大排风口高度, 以经济、绿色的通风方式满足管廊通风规范要求。

【关键词】 综合管廊; 自然通风; 通风评价; 优化研究

中图分类号 TV735 文献标志码 A

Analysis and Optimization of Thermal Stack Natural Ventilation Characteristics in an Underground Hydropower Station Utility Tunnel

Shi Erqiang

(SINOHYDRO BUREAU 5 Co., Ltd, Chengdu, 610213)

【Abstract】 Underground utility tunnels play an important role in centralized pipeline laying, maintenance, and safety assurance in hydropower stations. A good air environment ensures the safe and efficient operation of the tunnels. Currently, mechanical ventilation is widely used, while research on thermal stack natural ventilation remains limited. As a low-carbon and energy-saving ventilation method, whether natural ventilation can ensure that the thermal environment of the tunnel meets the requirements of relevant specifications is the focus of this study. Based on the parameters of a utility tunnel project in an underground hydropower station, a numerical model was established and CFD simulations were performed to investigate the effects of the height difference between air inlet and outlet (2m, 4m, 6m) and cable heat dissipation rates (18.2W/m, 25.6W/m, 32.0W/m, 40.1W/m) on natural ventilation performance. The results show that when the height difference increases from 2m to 6m, the maximum airflow velocity in the tunnel increases from 0.32m/s to 0.47m/s, and the exhaust air temperature decreases by approximately 2.5~4.0℃. When the cable heat dissipation rate increases from 18.2W/m to 40.1W/m, the natural ventilation rate increases from approximately 5108m³/h to 6168m³/h, while the exhaust air temperature rises by about 6~8℃. The heat removal efficiency ranges from 1.5 to 3.7, increasing with a larger height difference and decreasing with higher heat dissipation. Under the premise of meeting the construction and initial investment requirements of the hydropower station, it is recommended to arrange natural exhaust outlets in parallel with

基金项目: 地下洞室群高效通风散废降温技术研究 (ZSWJ-天台项目-研发-[2024]-01 号)

作者 (通讯作者) 简介: 时二强 (1982-), 男, 本科, 高级工程师, 主要从事项目管理及工程技术, E-mail: 912387014@qq.com

收稿日期: 2026-04-29

mechanical ventilation outlets and to increase the height of exhaust outlets as much as possible, thereby achieving economical and green ventilation that complies with the specification requirements for utility tunnels.

【Keywords】 Comprehensive utility tunnel; Natural ventilation; Ventilation evaluation; Optimization research

0 引言

水电站厂房结构复杂、管线繁多,通常设有完善的综合管廊,以容纳电力、通信、给水等各类管线,避免管线分散布置在厂房内对设备运行、人员通行造成干扰,同时方便巡检、维修和更换^[1-4]。管廊内空气流动性较差,且敷设的电力电缆、热力管道等会在运营时散发大量热量,工作人员的日常检修和微生物的活动也会造成管廊内氧气含量的降低。因此,综合管廊需要设置通风系统以有效排出管廊内的余热,并为工作人员在检修时提供适量的新鲜空气^[5]。

国内外学者针对地下综合管廊空气环境和通风系统进行了相关研究。在管廊环境评估方面,Curiel-Esparza J^[6]分析了影响综合管廊空气质量的因素。Seong 和 Nam Chul 等人^[7]通过实地测试,对比通风工况与非通风工况下舱室壁面结露情况。T Matsui 等人^[8]以 GILs 等电缆隧道为研究对象,指出隧道内温度除受电缆发热量的影响外,埋深较浅的隧道受外界环境温度的影响较大。薛宏旺等人^[9]以自然通风条件下的地下综合管廊单元模块为研究对象,通过长期现场实测分析了管廊内外温湿度与进排风风速的变化规律,为自然通风在管廊中的实际应用效果提供了实测数据支撑。在通风系统设计方面,郇斌^[10]结合青岛高新区综合管廊工程,对管廊通风的设计进行探讨,提出自然通风和机械通风相结合的综合管廊通风口布置方式。刘珊珊^[11]通过实测和数值模拟研究了进风温湿度和通风量对舱室温湿度分布的影响,发现外界空气温度的影响沿管廊纵向逐渐减弱。孙立^[12]对通风分区长度设置情况进行分析,得出综合舱室、热力舱室以及电力电缆舱室通风区段可延长为 400m,提出加大管廊通风量以及选择合适的通风时间能有效减少结露。邱灏^[13]比较了不同通风口布置形式的排热效率,指出在高换气次数下一进一排形式效果最优。Zhao 等人^[14]利用小尺度实验与数值模拟相结合的方法,研究了热压和风压条件对地下廊道自然通风特性的影响,提出了无量纲流量率用于评价通风性

能和预测通风量,定量分析了驱动力之间的交互作用,为地下廊道自然通风的设计和通风量预测提供了理论依据。然而,当前管廊通风系统中研究较多的通风方式为机械通风,对热压自然通风的应用研究较少^[15,16]。

自然通风作为一种低碳、节能的通风方式,若能满足管廊热环境规范要求,将显著降低运行能耗。但现有研究尚缺乏对管廊热压自然通风系统性的效果评估,特别是进排风口高度差、电缆散热量等关键因素对排热能力的影响规律尚不明确,也缺少基于量化指标(如余热排除效率)的优化建议。

针对上述不足,本文以某地下水电站管廊实际工程为研究对象,采用 CFD 数值模拟方法,系统研究进排风口高度差(2m、4m、6m)和电缆散热量(18.2W/m、25.6W/m、32.0W/m、40.1W/m)对管廊内速度场、温度场及排热效果的影响,并利用余热排除效率对自然通风效果进行评价。本文创新点在于:揭示了热压自然通风在管廊应用中的排热潜力与参数敏感性,提出了自然通风与机械通风并联布置及增大排风口高度的优化策略,为管廊的节能设计和低碳运行提供定量参考依据。

1 综合管廊数值模型

1.1 物理模型建立及网格划分

本文模型建立基于某地下水电站管廊相关参数,如图 1 所示,管廊采用双舱形式,分别为综合舱(容纳电力、通信、给水管线)和燃气舱(容纳燃气管线)。综合管廊设计外轮廓宽度为 4.85m,外轮廓高度为 3m。综合舱净宽 2.35m,净高 2.4m。基于某地下水电站管廊综合舱实际尺寸参数建立数学模型,考虑到防火分区间距为 200m^[17],故建立综合舱模型尺寸为 200m×2.4m×2.4m(长×宽×高),其中进风口位于管廊综合舱一端($z=1\text{m}$)的顶端,排风口位于另一端($z=199\text{m}$)的顶端。进、排风口尺寸均为 1.0m×1.0m(长×宽),为改变进排风口高差,在排风口上方增设竖直排风竖井,竖井高度分别取 2m、4m、6m。如图 2 所示。

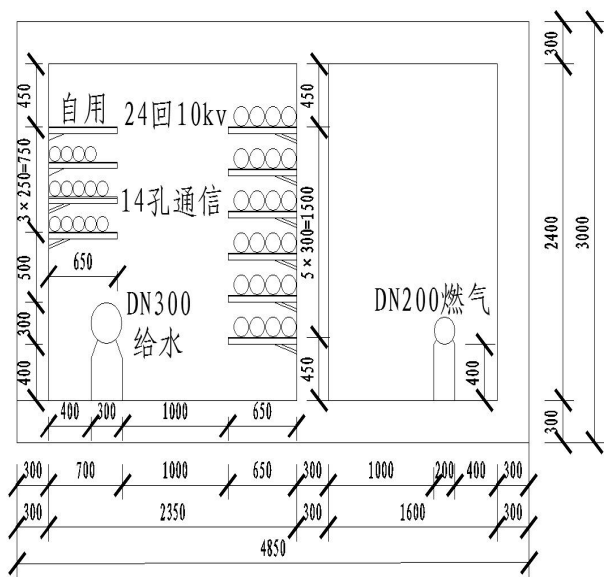


图1 管廊管线布置及尺寸(单位: mm)

Fig.1 Utility Tunnel pipeline arrangement and dimensions (Unit: mm)

本文采用 ICEM 软件对模型进行网格划分。为了减少网格数量以合理利用计算资源, 模型对电缆、管道和管廊四壁围护结构进行简化, 通过在边界面上给定相应边界条件达到与实际情况相近的效果。同时, 为了减小网格扭曲率以提升网格质量, 采用生成六面体结构化网格, 主体部分以网格尺寸为 $200\text{mm} \times 100\text{mm} \times 80\text{mm}$ 的网格进行划分, 在进排风口使用尺寸为 $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 100\text{mm}$ 的网格进行加密, 并且在电缆处使用 O 型剖分进行网格划分, 以准确捕捉散热, 划分完成后的网格如图 2 所示。

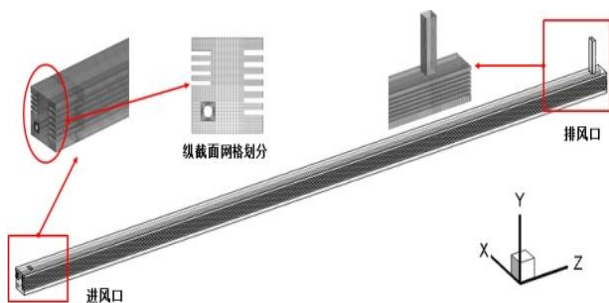


图2 综合管廊模型网格划分

Fig.2 Mesh generation of the utility tunnel model

1.2 边界及求解条件设置

以夏季工况作为标准, 室外通风计算温度为 30.6°C , 根据不同研究目标对应定义边界条件, 边

界条件的设置如下。

(1) 进风口设置为自然压力入口 (Pressure-inlet), 进风温度设置为 30.6°C (303.6K), 排风口设置为压力出口 (Pressure-outlet) [18]。

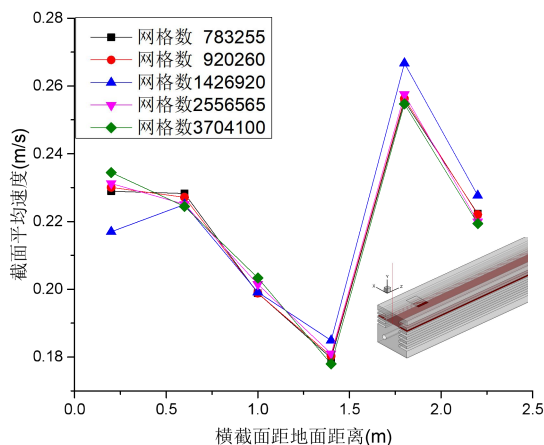
(2) 10kV 和 110kV 电缆材料设置为交联聚乙烯, 其边界条件设置为恒热流, 热流量依据相关文献进行设置 [19,20]。

(3) 通信电缆和壁面设置为绝热边界条件。

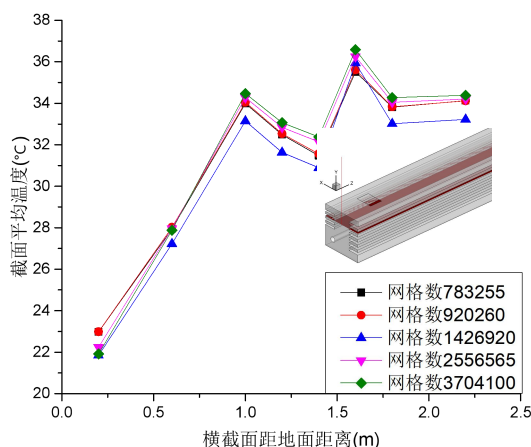
通过文献调研 [20,21-24], 求解条件设置本次模拟过程中电缆舱室内流动的空气, 可看作低速不可压缩流体。因此, 将 Fluent 中的求解器设置为压力基求解器。为了使流动模型有更高的可靠性和精确度, 湍流模型选择 k-epsilon 模型, 同时考虑发热电缆对舱室内空气有浮升力的影响, 需要选择 Full Buoyancy Effects 选项。本研究以舱室通风稳态过程为主, 在保证精确度的基础上, 同时期望模拟过程收敛较快, 选择 SIMPLEC 算法。压力离散格式选择 Standard, 其余参数离散格式均选择二阶迎风格式。收敛准则设置为湍流项残差值小于 10^{-4} , 能量项残差值小于 10^{-6} 。

1.3 网格无关性验证

模型网格大小对模拟计算结果的准确性有着直接的影响。理论上网格数量大, 结果较为精确, 但是随着网格数量的增加, 模拟时会对硬件的要求增高, 其次由于参与计算的单元数也较多, 计算时间也会变长。通过对网格进行无关性验证, 如图 3 所示, 比较不同网格数目情况下的结果, 需要寻求计算精度和计算时间的平衡点, 使网格数量尽量较少同时确保精确度还能缩短计算时间 [25]。



(a) 不同网格数目下横截面平均速度



(b) 不同网格数目下横截面平均温度

图 3 不同网格数目下横截面平均速度和温度对比情况

Fig.3 Comparison of average velocity and temperature on the cross-section under different mesh numbers

当网格大小达到某一值时,模拟结果不会随着网格数量的变化而产生较大的变化,可以认为模拟结果基本稳定。图 3 给出了 5 种不同数目网格距地面不同高度的截面的平均速度和平均温度,可以看出不同网格数目的平均速度和温度趋势相近。如表 1 所示,将网格 1~网格 4 分别与网格 5 进行对比,分别比较不同网格数目的平均速度、平均温度和排风温度偏差情况,结果发现,网格 3 结果偏差最大,其他网格偏差满足要求。综合偏差结果和计算时间,选取网格 2 (网格数为 920260) 作为模拟计算模型。

表 1 不同数目网格(网格 1~4)与网格 5 对比情况

Table 1 Comparison of grids 1~4 vs grid 5

网格名称	网格数目	平均速度 /%	平均温度 /%	排风温度 /%
1	783255	0.055	0.035	1.153
2	920260	0.0325	0.021	0.987
3	1426920	0.4765	0.316	4.468
4	2556565	0.155	0.019	0.754

2 综合管廊 CFD 模拟结果分析

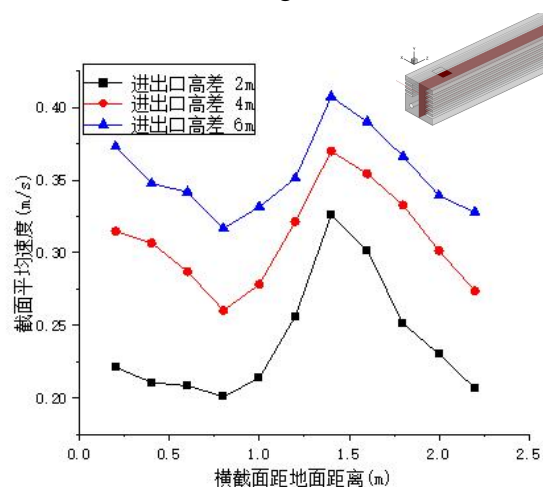
为分析地下管廊综合舱自然通风方式下的气流分布和影响因素,分别改变进排风口高度差(2m、4m 和 6m)、电缆散热量(18.2W/m、25.6W/m、32.0W/m 及 40.1W/m),对管廊的自然通风特性进行分析,研究自然通风系统在综合管廊的应用效果。

2.1 不同进、排风口高度差

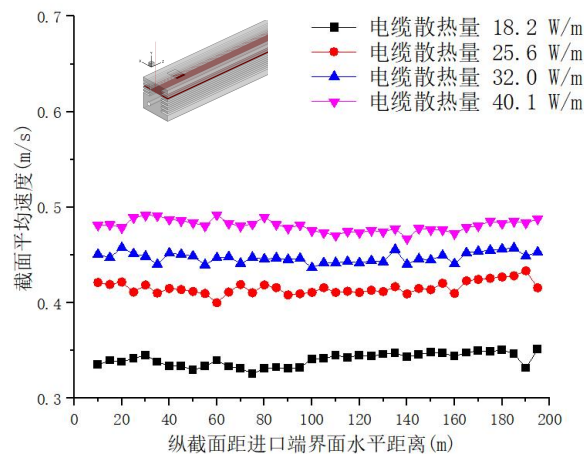
通过文献调研和研究分析,改变进排风口高度差 h ,改变管廊热压大小,研究自然通风在综合管廊的应用效果。

$$\Delta P = gh(\rho_w - \rho_n) \quad (1)$$

式中: ΔP 为热压, Pa; g 为重力加速度, m/s^2 ; h 为室内进出气流中心的高度差, m; ρ_n 、 ρ_w 为室内、外空气密度, kg/m^3 。



(a) 不同高度横截面平均速度



(b) 不同距离纵截面平均速度

图 4 不同进排风口高度下载面平均速度对比情况

Fig. 4 Comparison of average velocity on the cross-section under different height differences between the air inlet and outlet

为分析管廊不同区域的速度分布,分别截取距地面不同高度横截面和沿长度方向纵截面,如图 4 所示。靠近进风口区域,风速大小由地面沿高度方向逐渐增大;靠近排风口区域,风速大小分布形式

与进风口区域相反。通过比较不同位置截面的平均速度大小,可看出进出口高差不同,管廊内部热压随之变化。其中随进排风口高度增加,不同截面平均风速增加。进排风口的高差为 6m 时,纵截面风速最大约为 0.47m/s,满足规范中对风速大小的要求。其中不同高差模式下的速度分布在 0.2~0.4m/s,其中进出口高差为 6m 工况的速度较大,这是由于通风量与进出口高差成正比,相同位置截面的平均速度相较于进出口高差为 2m 和 4m 工况,分别增大了约 17%和 53%。实际工程应用中可考虑通过增加进风口高差提升通风效果。

通过观察不同进排风口高差下的温度分布可以看出(见图 5),不同进排风口高度的温度分层现象相似,温度大小沿高度方向由低到高逐渐上升。从具体位置来看,距进口端边界 100m~190m 范围内上部区域均出现温度较高的现象。进排风口高差为 2m 时,在管廊顶部区域存在 40℃区域,可能会影响管廊内的安全运行。

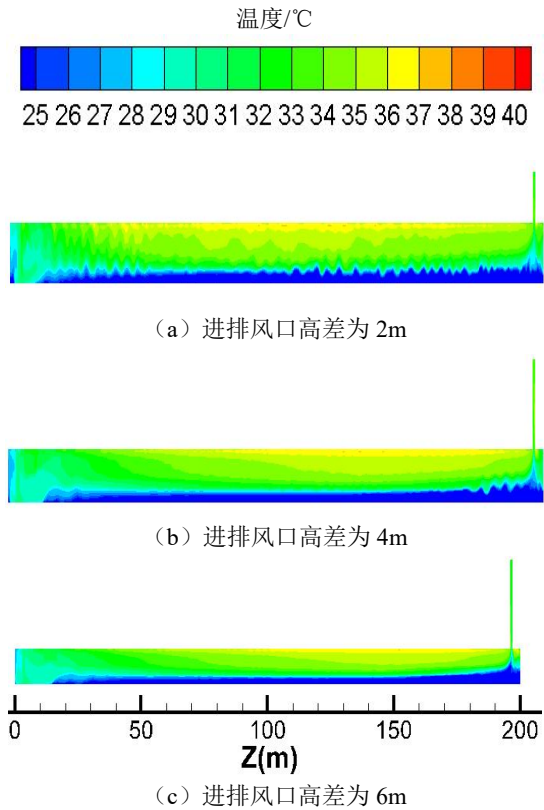


图 5 不同进、排风口高差下的温度分布 ($x=0$ 截面)
(18.2W/m、25.6W/m、32.0W/m 及 40.1W/m)
Fig.5 Temperature distribution on the $x=0$ plane under different height differences between the air inlet and outlet (at heat fluxes of 18.2, 25.6, 32.0, and 40.1W/m)

2.2 不同电缆散热量

电缆散热量是管廊内部引起温度变化的重要因素^[18],为探究自然通风在综合管廊中的应用效果,通过选取典型电缆型号相应的热源强度参数(见表 2^[18]),观察进排风口高度差为 4m 时,自然通风下管廊内部速度和温度分布情况。

表 2 电缆型号及管廊内电缆总散热量

Table 2 Cable types and total heat dissipation in the utility tunnel		
电缆型号	电缆单位长度散热/(W/m)	电缆总发热量/W
10kV-629A	18.2	87360
110kV-999A	25.6	122880
110kV-926A	32	153600
110kV-658A	40.1	192480

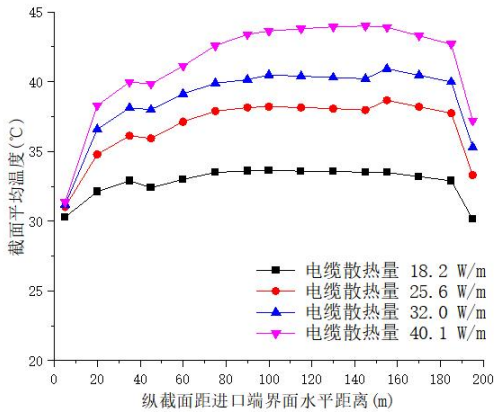
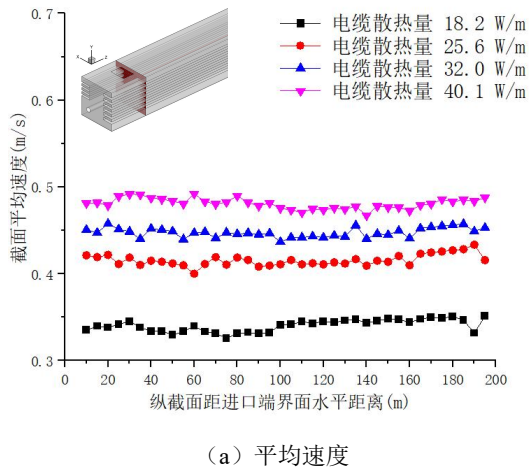


图 6 不同电缆散热量下纵截面平均速度和温度
Fig.6 Average velocity and temperature on the longitudinal section under different cable heat dissipation rates

图6表现了不同电缆散热量下沿长度方向的速度和温度分布。

通过观察温度分布,可以看出,剖面温度沿管廊的进深方向逐渐增大,管廊末端近排风口区域温度有所下降。这是由于室外空气从进口进入,与管廊内电缆进行换热后温度上升,热空气在热浮升力和排风口自然通风产生的惯性力的综合作用下不断向斜上方运动,直至运动到管廊顶部壁面,最终一直贴附于顶部壁面向排风口方向运动。在靠近排风口区域,受排风口“搅动”效应,靠近排风口区域的热空气被大量排出,导致剖面平均温度有所降低。该现象与地下廊道相关测试结果相似^[1]。

图7表现了不同电缆散热量及进、排风口高度差下的排风温度对比情况。在利用自然通风方式对综合管廊进行通风时,减小电缆散热量,增大进、排风口高差有利于降低管廊内部温度,提升排热效率。

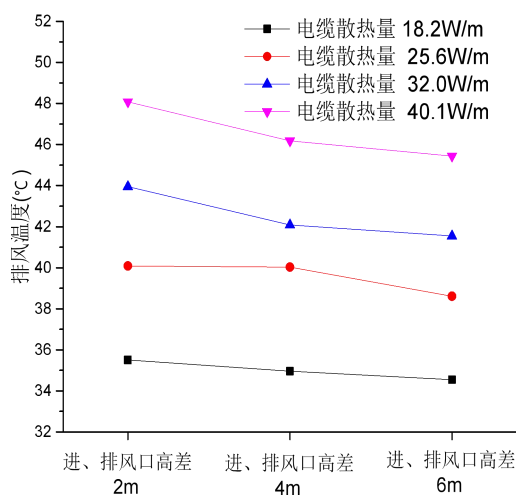


图7 不同电缆散热量及进排风口高度差下
截面排风温度对比

Fig.7 Comparison of exhaust air temperature on the cross-section under different cable heat dissipation rates and inlet-outlet height differences

3 综合管廊自然通风排除余热效果对比评价

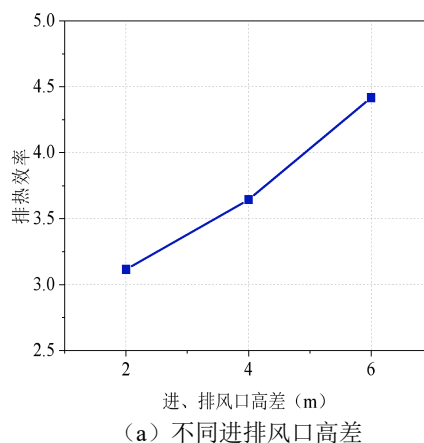
管廊内部存在热源,且规范^[17]要求舱室内空气温度不应高于40℃,应尽量避免高温(40℃)区域出现在舱室中,影响人员检修和设备的正常运行。因此,排除余热能力是评价管廊内通风形式的重要指标之一。

对于排除余热能力方面,研究者多采用余热排除效率指标^[13,26-28]。余热排除效率是反映通风系统中送风排除室内热量能力的指标,其计算公式为:

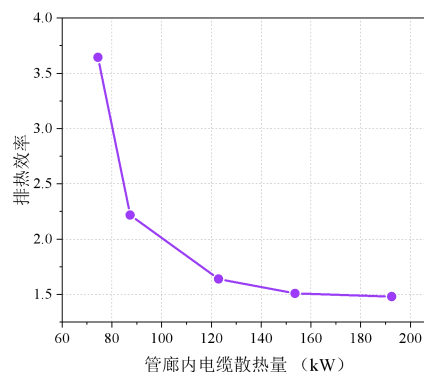
$$\eta_t = \frac{t_e - t_0}{t_n - t_0} \quad (2)$$

式中: t_e 为排风温度,℃; t_0 为送风温度,℃; t_n 为管廊内工作区平均温度,℃。本文 t_n 选取距地面1.8m高度处的截面平均温度作为工作区平均温度。

余热排除效率多用于评价气流组织形式能量利用的有效性。不同的气流组织形式,其余热排除效率大小不同。一般余热排除效率大于1.0,证明该种通风方式的能量利用效率较高。如图8所示,通过观察管廊内不同工况下自然通风的余热排除效率情况可知,自然通风的余热排除效率随进排风口高度差的增大而增加;管廊内部电缆散热量变化时,余热排除效率随散热量增大而下降,整体分布在1.5~3.7。



(a) 不同进排风口高差



(b) 不同电缆散热量

图8 管廊自然通风排热效率

Fig.8 Heat exhaust efficiency of natural ventilation in the utility tunnel

4 综合管廊自然通风优化利用建议

对于综合管廊自然通风系统,当排风口的绝对高差和排风口的面积达到一定阈值时,完全可以利用自然通风的形式,将管廊内的热量排走^[29]。这种方式降低了设备的投资,节省了运行费用。鉴于本研究成果需要为管廊的节能设计、低碳运行提供参考,在现有的研究成果的基础上,对自然排风口和进排风口高差的设计和运行调度方面提出下列优化利用建议。

4.1 自然排风口

现考虑在已有的机械排风口旁并联设置自然排风口,根据室外空气温度,提出自然排风口开启的控制建议。通过图 9 可以看出,综合舱的进排风口高差不变时,室外空气温度增大,管廊排风温度随之上升。进排风口温度差减小,根据热压计算公式 $\Delta P = gh(\rho_w - \rho_n)$ 可知,热压随进风温度升高而降低。

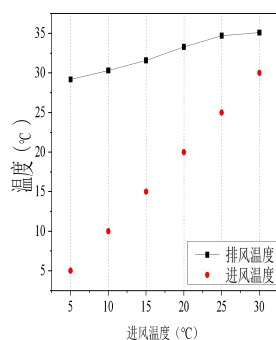


图 9 进排风口高差为 4m 时不同室外空气温度下排风温度 (舱室内散热量为 87.36kW)

Fig.9 Exhaust air temperature under different outdoor air temperatures with a 4m height difference between air inlet and outlet (cabin heat dissipation: 87.36kW)

图 10 和图 11 分别给出了进排风口高差为 4m 时,不同室外空气温度下排风速度和通风量。管廊排风口风速随进风温度增大而减小,当进排风口高度差为 4m 时,室外环境温度在 5℃~30℃时,排风速度在 1.4m/s~1.9m/s,通风量在 5108m³/h~6168m³/h 范围内,其对应的排气次数为 5.93 次/h~7.85 次/h,舱室内平均温度范围为 24.38℃~32.56℃,满足规范要求。因此,根据室外空气温度情况,尤其是进风温度较低时,可以开启自然通风风口,关闭机械通风风机,完全利用自然通风对管廊进行通风排热。

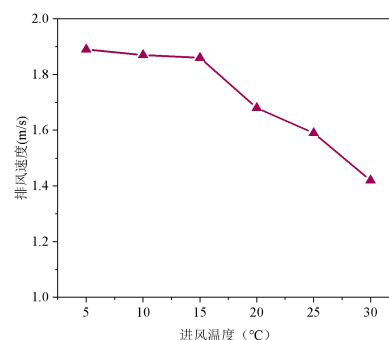


图 10 进排风口高差为 4m 时不同室外空气温度下排风速度 (舱室内散热量为 87.36kW)

Fig.10 Exhaust air velocity under different outdoor air temperatures with a 4m height difference between air inlet and outlet (cabin heat dissipation: 87.36kW)

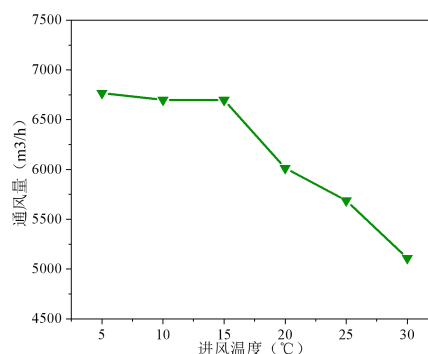


图 11 进排风口高差为 4m 时不同室外空气温度下通风量 (舱室内散热量为 87.36kW)

Fig.11 Ventilation Rate under Different Outdoor Air Temperatures with a 4 m Height Difference between Air Inlet and Outlet (Cabin Heat Dissipation: 87.36kW)

4.2 进、排风口高差

根据模拟情况可以看出,电缆发热强度对管廊内部温度分布影响较大。相同进排风口高度差下,电缆发热强度越大,管廊排风温度越高。图 12 表现了不同电缆散热量及进、排风口高度差下的排风温度对比情况,因此在利用自然通风方式对综合管廊进行通风时,增大进、排风口高差有利于增大热压效应,降低管廊内部温度。通过观察图 12 和图 13 可知,管廊自然通风下的排风速度与进排风口高度成正相关;排风速度与管廊内部热源强度成正相关,热源较大,则造成温度差增大,热压增大。对于进、排风口高度,《城市综合管廊工程技术规范 GB 50838-2015》规定:“5.4.2 综合管廊的人员出入口、逃生口、吊装口、进风口、排风口等露出

地面的构筑物应满足城市防洪要求, 并应采取防止地面水倒灌及小动物进入的措施。”

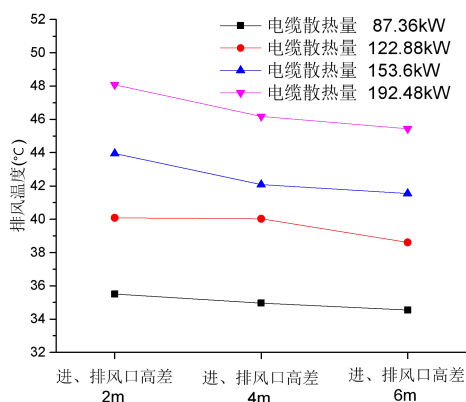


图 12 不同电缆散热量及进排风口高度差下截面
排风温度对比

Fig.12 Exhaust air temperature on the cross-section for various cable heat dissipation rates and inlet-outlet height difference

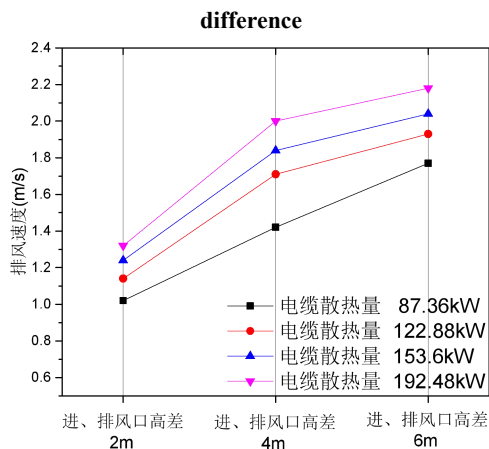


图 13 不同电缆散热量及进排风口高度差下截面
排风速度对比

Fig.13 Exhaust air velocity on the cross-section for various cable heat dissipation rates and inlet-outlet height differences

增大进排风口高度和通风口面积可以增强通风排热效果, 增大通风量。可是它的缺点也显而易见, 排风井的高度和通风口面积过大会增大土建投资, 影响道路美观, 增加施工和布置难度。并且单一使用自然通风模式不能满足综合管廊内的事故后排风的要求。因此, 可以通过自然通风与机械通风风口并联布置的方式, 当环境温度与排风温度差较大时, 适当关闭机械通风风机, 利用自然通风对管廊进行排热; 当舱室内外温度差较小或者人员检修时可开启机械通风风机进行通风换气。同时, 为

了增强自然通风排热效果, 可以根据实际施工设计情况, 增大进排风口高差和风口面积, 达到节能效果的同时满足管廊安全要求。

5 总结

(1) 改变进排风口高度差, 截面平均温度和排风温度随进排风口高度差的增大而下降; 舱室内散热量上升, 自然通风量增大, 同时排风温度及管廊平均温度随之上升; 室外环境温度下降, 管廊自然通风热压增大, 通风量随之上升。

(2) 自然通风的余热排除效率随进排风口高度差的增大而增加; 管廊内部电缆散热量变化时, 余热排除效率随散热量增大而下降, 整体数值大于 1.0。

(3) 管廊排风口风速随进风温度增大而减小, 当进排风口高度差为 4 m 时, 室外环境温度在 5℃~30℃时, 通风量在 5108m³/h~6168m³/h 范围内, 其对应的排气次数为 5.93 次/h~7.85 次/h, 满足规范要求。可根据室外空气温度情况, 开启自然通风风口, 关闭机械通风风机, 完全利用自然通风对管廊进行通风排热。

(4) 通过对管廊自然通风系统进行评价对比, 建议在机械通风口并联布置自然通风口, 在满足水电站建设及初期投资要求的前提下, 采取增大进排风口高差, 增大自然通风系统的通风量, 以经济、绿色的通风方式满足管廊通风规范要求。

参考文献:

- [1] 张智泉, 张朝亮, 孔雪同. 大型水电站 500kV 电缆终端安装制作工艺研究[J]. 电气技术与经济, 2023, (3): 22-26.
- [2] Canohurtado J, Cantoperello J. Sustainable development of urban underground space for utilities[J]. Tunnelling & Underground Space Technology, 1999, 14(3): 335-340.
- [3] Canto-Perello J, Curriel-Esparza J. An analysis of utility tunnel viability in urban areas[J]. Civil Engineering and Environmental Systems, 2006, 23(1): 11-19.
- [4] 张元栋, 冯胜, 黄家志, 等. 水电站廊道分布式光纤温度传感器自诊断方法[J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版), 2025, 47(2): 252-260.
- [5] 陈虹. 共同沟的通风设计[J]. 发电与空调, 2003, 22(3): 11-12.

- [6] Curiel-Esparza J, Canto-Perello J. Understanding the major drivers for implementation of municipal sustainable policies in underground space[J]. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 2012,19(6):506-514.
- [7] Seong, Nam Chul, et al. A study on determining dew condensation at the underground utility tunnel using simulation[J]. *International Society of Indoor Air Quality and Climate*, 2014,34:770-776.
- [8] T Matsui, N Morimoto, H Suzuki, et al. The temperature rising characteristics of 275 kV cables and GILs in tunnels[J]. *Power Engineering Society Winter Meeting*, 2002,2:1354-1359.
- [9] 薛宏旺,李琼,郑诗霖,等.地下综合管廊自然通风下温湿度实测研究[J].*科学技术与工程*,2023,23(34):14776-14782.
- [10] 郝斌,李福宝,胡帅.城市综合管廊通风系统设计的探讨[J].*中国市政工程*,2016,(6):32-34.
- [11] 刘珊珊.我国城市地下综合管廊建设技术体系策略简析及地下管廊环境通风测试分析[D].西安:西安建筑科技大学,2018.
- [12] 孙立,余斌,杨恒声.城市地下综合管廊通风设计探讨[J].*暖通空调*,2018,34(8):100-102.
- [13] 邱灏,邓志辉,袁艳平,等.通风形式对综合管廊内空气温度影响的研究[J].*制冷与空调*,2018,32(6):668-672.
- [14] Zhao X, Wu Y, Yang H, et al. Prediction of airflow rate and analysis of driving forces for natural ventilation in underground corridors[J].*Energy and Buildings*, 2024,313(000):12.
- [15] 隋学敏,官燕玲,李安桂,等.内部热源高度对热压自然通风流场的影响[J].*煤气与热力*,2008,28(2):14-17.
- [16] 朱颖心.建筑环境学.第二版[M].北京:中国建筑工业出版社,2005.
- [17] GB 50838-2015,城市综合管廊工程技术规范[S].北京:中国计划出版社,2015.
- [18] 李佳兴,曾思景,方子梁,等.地下管廊综合舱热压自然通风效果分析[J].*暖通空调*,2022,52(3):120-125.
- [19] 马国栋.电线电缆载流量(第2版)[M].北京:中国电力出版社,2013.
- [20] 邱灏.城市地下综合管廊通风量研究[D].成都:西南交通大学,2018.
- [21] 周游,周伟国.综合管廊电缆舱通风数值模拟研究[J].*建筑热能通风空调*,2016(11):29-33.
- [22] 董骥,胡秦镗,郑奕.综合管廊的通风效果模拟及风亭的优化[J].*建筑热能通风空调*,2018,(5):62-65.
- [23] 王雪梅,谭羽非,于克成.综合管廊热力舱在机械通风模式下温度场的模拟分析[J].*区域供热*,2018,196(05):38-45.
- [24] 李海新,张琪.综合管廊通风系统设计探讨[J].*山西建筑*,2015(34):137-138.
- [25] 王福军.计算流体动力学分析-CFD 软件原理与应用[M].北京:清华大学出版社,2004.
- [26] 邱国志.办公建筑空气环境状况实测及通风空调控制策略研究[D].西安:西安建筑科技大学,2012.
- [27] 赵立红,刘仙萍,胡加刚.空气热湿处理过程有效性分析[J].*建筑热能通风空调*,2011,30(6):68-71.
- [28] 李宁.通讯基站相变空调房间内气流组织数值模拟[D].长沙:湖南大学,2011.
- [29] 窦荣舟,刘明超,王彦祥.谈地下城市综合管廊的通风设计[J].*山西建筑*,2013,39(15):126-128.