

水电站地下洞室施工期湿环境机械通风除湿数值模拟研究

张丽丽¹, 王海², 徐龙³, 刘飞¹

(1.四川农业大学建筑与城乡规划学院, 四川 都江堰 611830; 2.成都基准方中建筑设计有限公司, 四川 成都 610021;

3.四川省建筑科学研究院建筑节能研究所, 四川 成都 610081)

摘要: 大型水电站地下隧道由于结构复杂、埋深大、通风不畅以及施工期长等问题, 导致施工期隧道内空气相对湿度过高, 严重影响人员健康和设备安全. 通过对某大型水电站地下隧道高热湿环境实测调研分析得出: 施工期内隧道湿环境相当恶劣, 有的区域甚至接近饱和状态, 而高湿环境主要是由施工过程中隧道壁面散湿、敞开水源蒸发、施工洒水、人体散湿、外部空气带湿等造成的. 针对此问题, 重点研究了不同机械通风除湿对其高湿热环境的改善效果. 研究结果表明: 采用无室外新风的机械通风除湿方式无法改善隧道内的高湿环境, 而有室外新风能有效改善隧道内的高湿环境, 且室外空气含湿量越小, 送风量越大, 掌头区除湿效果越好. 采用有室外新风的机械通风除湿方式, 对一般夏季室外空气温度为 24℃~30℃时, 建议室外空气相对湿度不超过 60%. 同时, 给出了室外空气温度 $t=26$ ℃时, 不同相对湿度下最佳的机械通风量计算公式, 为实际工程中风机变频提供了参考.

关键词: 水电站地下洞室; 施工期; 机械通风除湿; 数值模拟

中图分类号: TU96+5

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2016)02-0282-07

Study on mechanical ventilation dehumidification for construction period moisture environment of hydropower station underground caverns

ZHANG Lili¹, WANG Hai², XU Long³, LIU Fei¹

(1.College of Architectural and Urban-Rural planning, Sichuan Agricultural University, Dujiangyan 611830, China;

2. JZFZ Architecture Design Portfolio, Chengdu 610021, China;

3. Institute of Building Energy efficiency, Sichuan Academy of Architecture, Chengdu 610081, China)

Abstract: During large-scale construction of hydropower stations, the tunnel air relative humidity is too high, seriously affecting the health and safety of personnel equipment due to complex structure, depth large, poor ventilation and long construction period and other issues. Through measuring, researching and analyzing heat and humidity environment of a large underground tunnel hydropower, we can draw the conclusion: The wet environment is bad and some even close to the saturated state during the construction of tunnel, and high humidity environment is mainly caused by the construction process of the tunnel wall, water evaporation, the construction of water, the human body, the external air caused by wet and so on. Aiming at this problem, this paper focuses on the effect of different mechanical ventilation and dehumidification in hot and humid environment. The results of the study show that: The mechanical ventilation and dehumidification method without outdoor fresh air do not serve to improve the environment of high humidity inside the tunnel, while the outdoor fresh air can effectively improve the tunnel in high humidity environment, and the air moisture content is smaller, the volume of air is the greater, the metacarpal head dehumidification effects better. Using mechanical ventilation and dehumidification mode allows in outdoor fresh air, when the general outdoor air temperature is 24℃~30℃, and the outdoor air relative humidity is suggested to be more than 60%. At the same time, the calculation formula of the optimal amount of mechanical ventilation with different relative humidity is given with the outdoor air temperature at 26℃, It will provide a reference for practical engineering of fan frequency conversion.

Key words: hydropower station underground caverns; construction period; mechanical ventilation; dehumidification; numerical simulation

隧道施工过程中由于壁面散湿、敞开水源蒸发、施工洒水、人体散湿、外部空气带湿等因素会形成高湿环境. 如果人员长期在高湿环境下工作, 空气中水蒸气分压力大于人体皮肤表面水蒸气分压力, 将使人体排汗十分困难并产生中暑现象; 同时湿度过高, 还会降低材料的机械强度, 使材料产生破坏性变形而降低材料的质量并腐蚀金属器具,

严重影响人的工作效率^[1-2]. 特别是对于大型地下水电站, 施工期长, 地下洞室结构复杂. 由于各隧道之间纵横交错、相互贯通, 同时隧道埋深较大, 则形成了进风通道少、排风系统相互影响的特点, 从而导致施工期水电站地下洞室群的湿环境非常糟糕. 目前, 国内外对地下工程热湿环境的研究主要集中在三个方面: 散湿源研究, 除湿方法研究, 热

湿环境研究^[3-17]. 对地下工程热湿环境的研究主要集中在铁路隧道施工期、运营期的热湿环境研究,而对于水电站地下洞室群施工期形成的高湿环境及除湿方法研究较少. 本文结合水电站地下洞室施工期高湿环境的问题通过实验测试和数值模拟的方法重点研究了机械通风除湿方式对其湿环境的改善效果,为实际工程中改善施工期水电站地下洞室群高湿环境提供了重要的技术支撑.

1 隧道热湿环境实测及分析

本文选择四川省正处于施工期的某大型水电站进行测试,测点均布置在隧道中心轴线上,距地高度为 1.5 m,测点间距为 5 m,每处测试地点共 9 个测点,见图 1 施工期洞室掌头区域^[1](掌子面就是已开挖和未开挖的岩层的分界面,掌头区域就是掌子面扩大到的空间区域)测点布置图. 测试数据主要为隧道内的温湿度,见图 2 某水电站地下洞室施工期洞室内的热湿环境实测图. 温湿度测试采用便携式 Testo435-3 温湿度仪,温度量程为 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 150\text{ }^{\circ}\text{C}$,精度为 $\pm 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$;湿度量程为 $0\sim 100\%\text{ RH}$,精度为 $\pm 2\%\text{ RH}$.

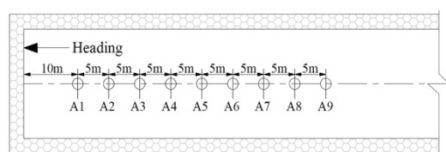


图 1 施工期洞室掌头区域测点布置图

Fig.1 Measuring points layout of cavern metacarpal head region during the construction period

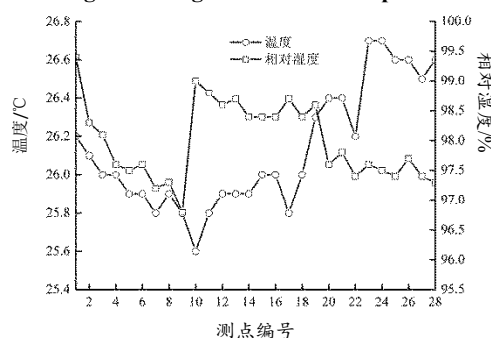


图 2 施工期洞室掌头区域温、湿度实测曲线

Fig.2 Temperature humidity measured curve of cavern metacarpal head region during the construction period

水电站地下隧道施工期内的温度最高为 $27.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,能够满足设计不超过 $28\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的要求. 洞室内的空气相对湿度基本都在 96% 以上,最高值为 99.4%,最低值为 96.8%. 说明该类隧道为无热害的高湿环境隧道,有效改善隧道内湿环境,不仅能在水电站洞室群施工期间为隧道内工作人员创造良

好的工作空间,还能保证水电站地下洞室群施工安全及缩短施工工期.

深埋水电站地下洞室群施工期湿环境机械通风除湿方式,不仅操作简便,而且能在这错综复杂的洞室群隧道中有目的的进行气流组织,避免气流在各洞室之间相互乱窜,造成各种不必要的除湿负担. 但采用机械通风方式所需的通风量巨大,在施工期的隧道中进行除湿设计时,主要以掌头区的除湿设计为主.

2 湿边界确定

通过实验测试与数值模拟对比的方法,验证水电站地下洞室群热湿环境模拟计算的边界条件,即对数值模拟湿源计算的可靠性及正确性进行验证.

2.1 实验系统

实验平台建立在大型实验室内,一个壁面密封、保温较好,长宽高基本尺寸为 $4.8\text{ m}\times 2.9\text{ m}\times 3.35\text{ m}$ 的小房间,其左右两侧为两个相同尺寸的实验用房,如图 3 所示.

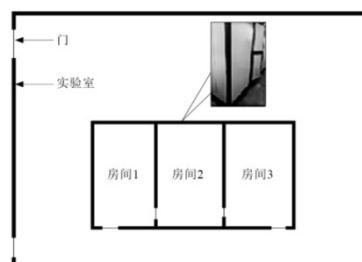


图 3 实验房间示意图

Fig.3 The experiment room map

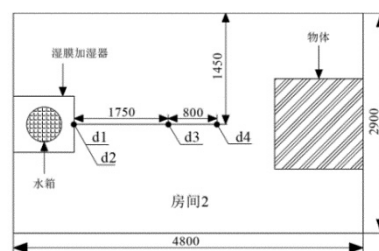


图 4 室内测点平面布置图

Fig.4 Layout of indoor measurement point

在实验房间一端正中布置一台湿膜加湿器,加湿器上放置一台电子称,并将补水箱布置在电子称上,通过塑料管将补水箱与湿膜加湿器连接. 实验测试前,测试室内、外各测点的温度、相对湿度及大气压力;实验进行时,测试室外各测点的温湿度及大气压,并且每隔 30 s 记录一次电子称读数,前后两次相减为每 30 s 向实验房间的加湿量,同时需监测湿膜加湿器送风口、回风口以及房间内测点的温度、相对湿度和大气压. 房间 2 为本实验建立的

实验房间.室内测点布置见图4.测点高度分别为:
d1距地面0.8 m、d2距地面0.4 m、d3距地面1.4 m、
d4距地面1.38 m.

2.2 数值模拟

为使模拟计算准确,对边界条件作如下设定:
实验房间保温、密闭性良好;房间壁面绝热,设为
wall 边界;测试人员在房间测试,模拟时作为体热
源和湿源给定;将加湿量与时间的变化关系、水吸
热蒸发的汽化潜热通过源项的方式定义为质量源、
能量源;动量源根据出口平均风速给定;室内空气
不可压缩,忽略固体壁面间的辐射.

为得到较好的计算结果并节约计算时间,在流
速、温度、湿度梯度变化较大的送、回风口以及存
在热源的壁面附近进行局部网格加密,网格划分均
采用分块结构化六面体网格,其余部分均划分为渐
变的六面体网格.同时,通过对不同网格数量的无
关性验证,确定计算模型的网格数量为80万.

2.3 结果对比

数值模拟与实验测试结果见图5~图8.从图中
可以看出,数值模拟得出的温湿度变化规律与实验
得出的变化规律基本一致,两者相对误差均小于
10%,说明数值模拟计算湿环境(包括源项、组分输
运、湍流模型)的可靠性和正确性.

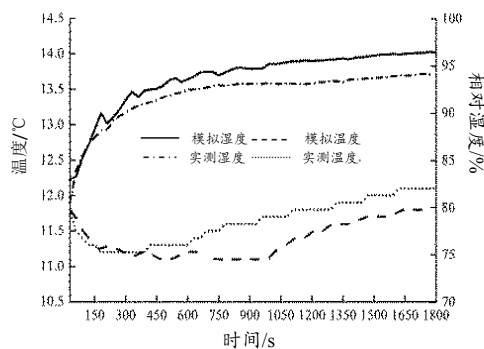


图5 测点d1(送风口)温湿度变化曲线图
Fig.5 Measuring point d1(air inlet) curve
of temperature and humidity

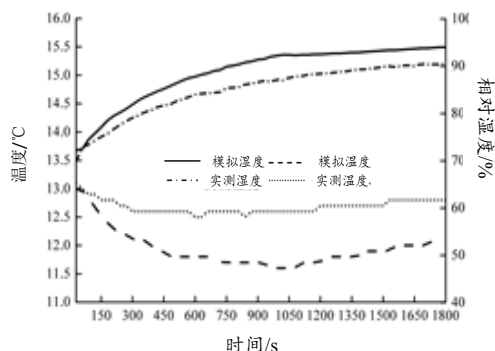


图6 测点d2(回风口)温湿度变化曲线图
Fig.6 Measuring point d2(air outlet) curves
of temperature and humidity

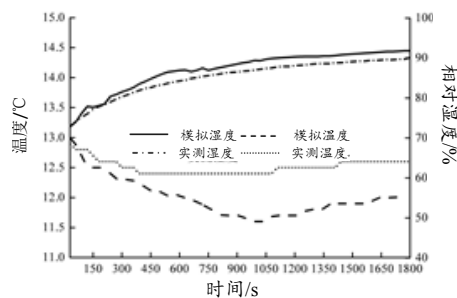


图7 测点d3(回风口)温湿度变化曲线图
Fig.7 Measuring point d3(air outlet)
curves of temperature and humidity

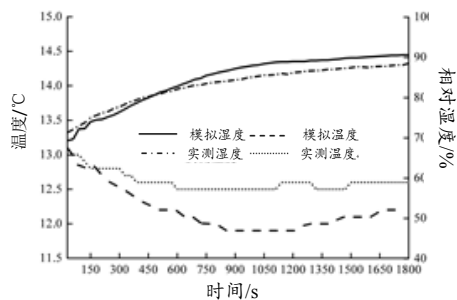


图8 测点d4温湿度变化曲线图
Fig.8 Measuring point d4 curves
of temperature and humidity

3 机械通风除湿数值模拟分析

3.1 模型建立

采用CFD数值模拟软件(Fluent)对某水电站地
下洞室群夏季施工期进行机械通风除湿模拟计算,
除湿设计以控制施工掌头区为主,并通过改变送风
状态,研究机械通风除湿对施工期水电站地下洞室
群掌头区不同的除湿效果.

3.1.1 几何模型

水电站地下洞室群错综复杂,多洞交叉,整个
模型十分庞大.在考虑现有计算条件以及施工进度
下,本文以施工期某水电站导流洞^[1](导流洞是一
个临时的工程建筑,它的特点之一是工期往往是很
紧迫的,如果不能按期完成,就会造成整个工程的
工期延长.施工期将原河道水流从上游围堰前导向
下游围堰后的隧洞)为基础,建立几何计算模型.如
图9所示.

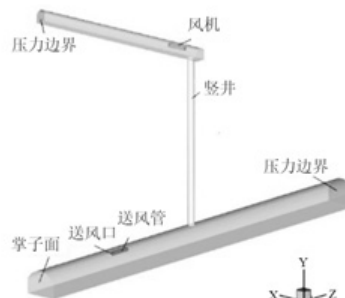


图9 隧道计算模型
Fig.9 The calculation model of tunnel

该模型中竖井高度为 85 m, 直径为 2 m, 距掌子面 110 m, 距隧道另一断面 100 m; 隧道断面尺寸为宽 16 m、拱顶高 12 m; 排风横通道断面尺寸的宽为 6 m、高为 6 m、全长 150 m。

3.1.2 边界条件

为了在数值模拟计算中得到较好的计算结果并节约计算时间, 对近壁面源项区域、送风口区域等流速、温度、相对湿度梯度变化较大的地方进行局部网格加密, 主流区则采用相对稀疏的六面体网格。同时, 通过对不同网格数量的无关性验证, 确定计算模型的网格数量为 113 万。为使模拟计算结果准确, 对边界条件进行下述设定:

(1) 通过实际测试, 隧道四周壁温基本稳定在 22℃。则在 CFD 模拟(Fluent)计算时, 将壁面设为定壁温边界。

(2) 通过 UDF 自定义函数, 将壁面散湿量随室内温度、相对湿度的变化以源项 SOURCE 的方式给定, 并在能量源项中设置壁面水分蒸发所吸收的热量。模拟时, 忽略隧道壁面与水膜之间的热传导作用, 并假设水分蒸发吸收的热量均来自空气。

(3) 送风口采用速度入口边界, 即 velocity_inlet。

(4) 出口采用 pressure_outlet, 边界上的参数按实际情况给定。

3.1.3 布置方案

本文对施工期水电站地下洞室群除湿设计以掌头区控制为主, 通风除湿系统布置如图 10。

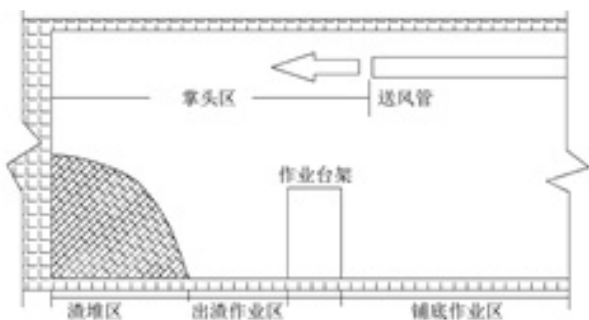


图 10 通风除湿系统布置方案

Fig.10 Ventilation and dehumidification system layout

3.1.4 计算工况

运用数值模拟计算无室外新风与有室外新风两种条件下的机械通风除湿方式, 并对有室外新风条件下的机械通风除湿进行了不同室外送风状态的数值模拟计算, 主要计算工况见图 11 所示。采用机械通风除湿模拟时, 隧道内初始状态为: 相对湿度 $\phi=96\%$; 温度 $t=26\text{ }^{\circ}\text{C}$; 大气压 $B=93\ 856\text{ Pa}$ 。基本通风量为排除污染物所需通风量, $L=1\ 500\text{ m}^3/\text{h}$ 。

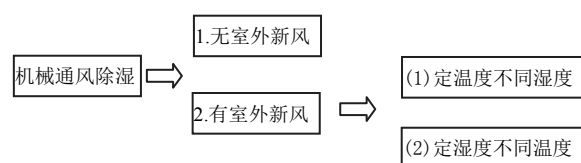


图 11 机械通风除湿模拟工况

Fig.11 Mechanical ventilation and dehumidification simulation condition

3.2 无新风机机械通风除湿模拟结果

隧道内空气的相对湿度分布如图 12, 通风系统运行稳定后, 掌头区甚至整个隧道内湿环境并未得到有效改善。当隧道壁面散湿与排风系统排湿达到动态平衡后, 隧道内空气的平均相对湿度为 98.7%, 与实测隧道内相对湿度平均值 96%以上基本相同, 如图 13。因此, 采用无新风机机械通风除湿方案除湿效果较差, 不适合该类隧道的除湿。



图 12 隧道内相对湿度分布

Fig.12 Relative humidity distribution inside the tunnel

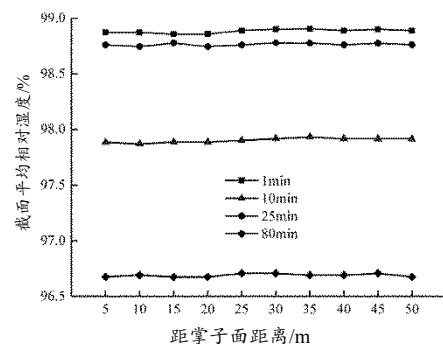


图 13 不同时刻隧道截面相对湿度分布

Fig.13 Relative humidity distribution of the tunnel section at different time

3.3 有新风机机械通风除湿模拟结果

3.3.1 不同送风湿度的模拟结果

为分析定温度, 不同送风湿度条件下机械通风方式对掌头区的除湿效果, 模拟了夏季送风温度 $t=26\text{ }^{\circ}\text{C}$, 相对湿度 ϕ 分别为 40%、50%、60%、65%、70% 几种工况的机械通风除湿效果, 其模拟结果分别见图 14(a)、(b)、(c)、(d)、(e)。



图 14(a) $t=26\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $\phi=40\%$ 相对湿度分布图

Fig.14(a) $t=26\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $\phi=40\%$ Relative humidity distribution



图 14(b) $t=26^{\circ}\text{C}$ 、 $\varphi=50\%$ 相对湿度分布图
Fig.14(b) $t=26^{\circ}\text{C}$ 、 $\varphi=50\%$ Relative humidity distribution

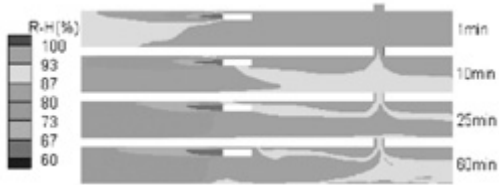


图 14(c) $t=26^{\circ}\text{C}$ 、 $\varphi=60\%$ 相对湿度分布图
Fig.14(c) $t=26^{\circ}\text{C}$ 、 $\varphi=60\%$ Relative humidity distribution

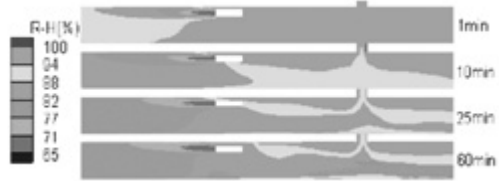


图 14(d) $t=26^{\circ}\text{C}$ 、 $\varphi=65\%$ 相对湿度分布图
Fig.14(d) $t=26^{\circ}\text{C}$ 、 $\varphi=65\%$ Relative humidity distribution

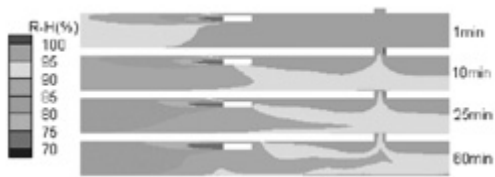


图 14(e) $t=26^{\circ}\text{C}$ 、 $\varphi=70\%$ 相对湿度分布图
Fig.14(e) $t=26^{\circ}\text{C}$ 、 $\varphi=70\%$ Relative humidity distribution

图 14(a)、(b)、(c)、(d)、(e)显示,在定温情况下,随送风相对湿度减小,掌头区的除湿效果越好。通过监测整个掌头区相对湿度的变化,发现在定温条件下,送风相对湿度的大小是决定隧道内空气除湿效果优劣的关键因素,见图 15。图 15 显示,在定温条件下,送风的相对湿度由 70%下降到 40%,可将隧道内掌头区湿度从 85%控制到 64%左右,除湿效果十分显著。

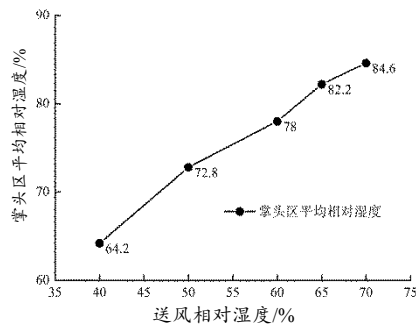


图 15 掌头区平均相对湿度
Fig.15 The average relative humidity of metacarpal head

3.3.2 不同送风温度的模拟结果

为分析定湿度,不同送风温度条件下机械通风方式对掌头区的除湿效果,模拟了夏季送风相对湿度 $\varphi=60\%$,温度 t 分别为 24°C 、 25°C 、 26°C 、 28°C 、 30°C 情况下的机械通风除湿,其模拟结果分别见图 16(a)、(b)、(c)、(d)、(e)所示,相对湿度一定,送风温度不相同,机械通风方式对掌头区除湿效果不同,通过监测掌头区相对湿度的变化,见图 17,发现在定相对湿度情况下,送风温度越高,即含湿量越大,对掌头区除湿效果越差。



图 16(a) $t=24^{\circ}\text{C}$ 、 $\varphi=60\%$ 温度分布云图
Fig.16(a) $t=24^{\circ}\text{C}$ 、 $\varphi=60\%$ Temperature distribution



图 16(b) $t=25^{\circ}\text{C}$ 、 $\varphi=60\%$ 温度分布云图
Fig.16(b) $t=25^{\circ}\text{C}$ 、 $\varphi=60\%$ Temperature distribution



图 16(c) $t=26^{\circ}\text{C}$ 、 $\varphi=60\%$ 温度分布云图
Fig.16(c) $t=26^{\circ}\text{C}$ 、 $\varphi=60\%$ Temperature distribution



图 16(d) $t=28^{\circ}\text{C}$ 、 $\varphi=60\%$ 温度分布云图
Fig.16(d) $t=28^{\circ}\text{C}$ 、 $\varphi=60\%$ Temperature distribution



图 16(e) $t=30^{\circ}\text{C}$ 、 $\varphi=60\%$ 温度分布云图
Fig.16(e) $t=30^{\circ}\text{C}$ 、 $\varphi=60\%$ Temperature distribution

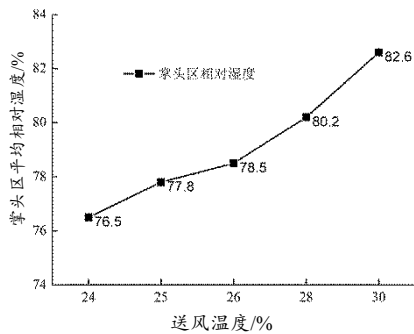


图 17 掌头区相对湿度变化曲线
Fig.17 Variation curve of metacarpal head relative humidity

综上所述,说明通过改变不同送风状态参数对水电站地下洞室群进行机械通风除湿的效果不同. 现将上述送风定温度不同湿度以及定湿度不同温度条件下,通风除湿达到稳定状态时的情况总结见表 1、表 2.

表 1 除湿效果对比
Tab.1 The dehumidifying effect comparison

| 室外温度/°C | 室外相对湿度/% | 室外含湿量/g·kg ⁻¹ | 掌头区平均相对湿度/% | 掌头区平均温度/°C |
|---------|----------|--------------------------|-------------|------------|
| 26 | 40.0 | 9.04 | 64.0 | 22.5 |
| 26 | 50.0 | 11.35 | 73.0 | 22.8 |
| 26 | 60.0 | 13.67 | 78.5 | 23.1 |
| 26 | 65.0 | 14.83 | 82.0 | 23.3 |
| 26 | 70.0 | 16.00 | 85.0 | 23.5 |

表 2 除湿效果对比
Tab.2 The dehumidifying effect comparison

| 室外温度/°C | 室外相对湿度/% | 室外含湿量/g·kg ⁻¹ | 掌头区平均相对湿度/% | 掌头区平均温度/°C |
|---------|----------|--------------------------|-------------|------------|
| 24 | 60.0 | 12.10 | 76.5 | 22.4 |
| 25 | 60.0 | 12.86 | 77.8 | 22.5 |
| 26 | 60.0 | 13.67 | 78.5 | 23.1 |
| 28 | 60.0 | 15.41 | 80.2 | 24.2 |
| 30 | 60.0 | 17.35 | 82.6 | 25.3 |

表 1 和表 2 显示,采用机械通风除湿方案,掌头区除湿效果的决定性因素是室外空气含湿量的大小,室外空气含湿量越小,除湿效果越好. 室外空气自身的温度或相对湿度对隧道内的除湿也有一定影响. 表中显示,对于一般夏季室外空气温度在 24 ~30 °C 之间时,选择机械通风方案进行除湿设计时,应尽量使相对湿度低于 60%.

4.3.3 不同送风量的模拟结果

本文所模拟隧道的基本通风量为排除污染物所需通风量, $L=1\ 500\ \text{m}^3/\text{h}$, 为了分析不同送风量的除湿效果,分别按基本送风量的 1.2 倍、1.5 倍、2 倍和 2.5 倍进行数值模拟. 首先对室外参数为

$t=26\ ^\circ\text{C}$, $\varphi=65\%$ 的情况进行模拟,模拟稳定后隧道掌头区平均相对湿度与送风量之间的关系见图 18.

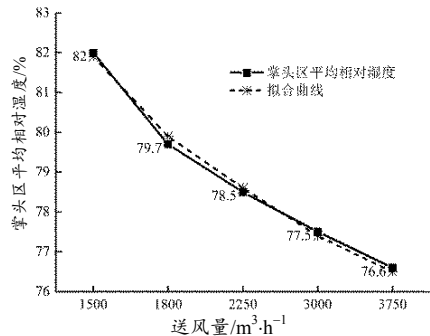


图 18 掌头区相对湿度变化曲线
Fig.18 Variation curve of metacarpal head relative humidity

从图 18 可知:随着送风量的不断增大,掌头区平均相对湿度不断降低,说明除湿效果越好. 但同时需要注意不断增大送风量,势必会造成隧道断面风速以及工程造价的增加. 为了得出此送风状态的最佳送风量,将送风量与掌头区平均相对湿度按负指数型曲线拟合,得出送风量与掌头区相对湿度的变化关系,即

$$\varphi = 660.4e^{-0.003\ 632Q} + 80.86e^{-0.000\ 014\ 35Q} \quad (1)$$

式中, Q 为送风量, m^3/min ; φ 为除湿后掌头区相对湿度%, 式(1)显示,该函数为单调递减,斜率随着送风量增加而逐渐减小,说明当送风参数一定时,通过增加送风量使掌头区平均相对湿度满足设计要求,必定存在最佳送风量,该通风量即将掌头区相对湿度除到 80%. 通过计算,得出室外温度 $t=26\ ^\circ\text{C}$, 相对湿度 $\varphi=65\%$ 时的最佳通风量为 $1\ 750\ \text{m}^3/\text{min}$.

为了得到不同送风状态下的最佳通风量,本文通过上述计算方法,得到了室外温度 $t=26\ ^\circ\text{C}$, 相对湿度 φ 分别为 40%、50%、60%及 70%等不同湿度条件下的最佳通风量,其计算结果见图 19.

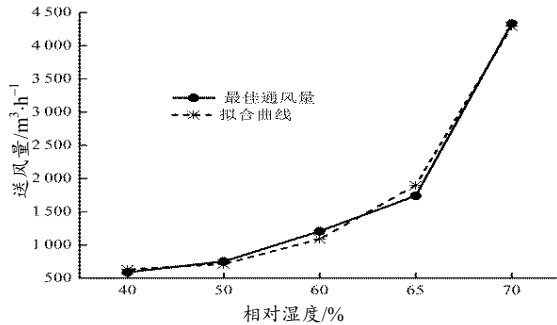


图 19 不同湿度下最佳送风量
Fig.19 The best air under different humidity

从图 19 可知:送风温度一定时,送风相对湿度越小,最佳通风量越小. 最佳通风量与送风相对

湿度呈指数变化规律,利用指数型函数对最佳通风量进行拟合,得到在送风温度 $t=26\text{ }^{\circ}\text{C}$,不同相对湿度下对应的最佳通风量的关系式,

$$\varphi=509.2e^{0.005\ 712Q}+0.0005275e^{0.224\ 4Q} \quad (2)$$

式中, Q 为送风量 m^3/min ; φ 为除湿后掌头区相对湿度%,式(2)显示,送风相对湿度与最佳通风量呈指数变化规律.当送风湿度超过 65% 时,所需最佳通风量急剧增加,可能在实际工程会造成风机匹配困难及初投资较高等情况.因此,在实际工程中应综合送风参数,除湿要求等控制标准,权衡利弊,综合考虑,选择最佳通风量进行机械通风除湿.

4 结论

本文主要对隧道施工期掌头区的无室外新风和有室外新风的机械通风除湿效果进行了研究,结论如下:

(1) 采用无室外新风机械通风除湿,无法除去隧道施工期内空气湿度.

(2) 采用有室外新风机械通风除湿时,室外空气的绝对含湿量是掌头区除湿效果好坏的关键因素,即室外空气含湿量越小,掌头区除湿效果越好.夏季室外空气温度为 $24\sim30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下,建议送风相对湿度不超过 60%.

(3) 通过改变送风量的数值计算表明:送风量越大,除湿效果越好.通过计算得出满足施工期水电站地下隧道掌头区除湿需求的最佳通风量,并给出了送风温度 $t=26\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,不同相对湿度下最佳通风量的计算公式,为实际工程中风机变频提供参考.

参考文献 References

- [1] 杨立新.现代隧道施工通风技术[M].北京:人民交通出版社,2012.
YANG Lixin. Modern tunneling ventilation technology[M]. Beijing: China Communications Press, 2012.
- [2] 张寅平.建筑环境传质学[M].北京:中国建筑工业出版社,2006.
ZHANG Yingping. Mass transfer in built environment[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2006.
- [3] 邓祥辉.两河口长隧道独头掘进压入式施工通风三维数值模拟[J].土木建筑与环境工程,2014,36(2):35-41.
DENG Xianghui. 3D numerical simulation on forced construction ventilation of long single head tunnel of liang hekou[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2014, 36(2):35-41.
- [4] 马国川.单线铁路隧道内热湿环境模拟[D].成都:西南交通大学,2011.
MA Guochuan. Invertigation of heat and humidity condition in single railway tunnel[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011.
- [5] 袁艳平.铁路隧道热湿环境研究综述[J].铁道建筑,2011(8):49-52.
YUAN Yanping. Review of heat and humid environment of railway tunnel[J]. Railway Engineering, 2011(8):49-52.
- [6] CHENG Zhongqing. Air dehumidification with the porous hydrophobic wall in underground tunnel[J]. Advances in Environmental Science and Engineering, 2012(6):4409-4412.
- [7] AMPOFO F, MAIDMENT G. Underground railway environment in the uk part 3: methods of delivering cooling[J]. Applied Thermal Engineering, 2004,24(5):647-659.
- [8] 叶蔚.隧道路面通风除湿传质模型机经济性分析[J].地下空间与工程学报,2011,7(4):771-775.
YE Wei. The mass transfer model and economic analysis for removing water accumulation on pavement in tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 7(4):771-775.
- [9] 赵平歌.地下建筑的防潮除湿研究[J].地下空间与工程学报,2007,3(6):987-989.
ZHAO Pingge. Study on moisture proofing and dehumidifying of underground structure[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3(6):987-989.
- [10] 徐驰.大连地铁通风空调系统方案研究与分析[J].铁道工程学报,2012,169(10):111-114.
XU Chi. Research and analysis of scheme for ventilation and air conditioning system for Dalian subway[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2012, 169(10):111-114.
- [11] AREK Kurnitiski. Crawl space air change, heat and moisture behavior [J]. Energy and Building, 2000(7):19-39
- [12] JAREK Kurnitiski. Ground moisture evaporation in crawl spaces[J]. Building and Environment, 2001(3):360-373
- [13] LAI Y M, LIU S Y, WU Z W, et al. Approximate analytical solution for temperature fields in cold regions circular tunnels[J]. Cold Regions Science and Technology, 2002, 13(4):43-49.
- [14] LOWNDES I S, YANG Z Y, JBLING S. A parametric analysis of a tunnel climatic prediction and planning model[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2006, 21(5):520-532.
- [15] BETTA V, CASCETTA F, MUSTO M, et al. Numerical study of the optimization of the pitch angle of an alternative jet fan in alongitudinal tunnel ventilation system[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2009, 24(2):164-172.
- [16] VON F H, BLUHM S J. Practical aspects of the ventilation of high developing tunnels in hot working environments[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2000, 15(4):471-477.
- [17] LOWNDES I S, CROSSLEY A J, YANG Z Y. The ventilation and climate modeling of rapid development tunnel drivages[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2004, 19(2):139-150.

(编辑 吴海西)