

十三陵电站坝体廊道通风动态换热 节能设计理论基础研究

李安桂, 陈 强, 尹海国, 高 然

(西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 以十三陵水电站的交通洞为研究对象, 运用数值模拟的方法, 建立了交通洞数值计算模型. 通过交通洞现场测试数据与数值模拟结果的对比, 验证了模型的可靠性. 采用实测验证后的计算模型对夏季工况下, 十三陵水电站交通洞与室外进风的动态换热效果以及对应的节能潜力进行了研究, 并分析了交通洞长度对其与室外进风换热效果的影响. 十三陵水电站坝体廊道通风换热效果的研究, 可为水电站地下厂房中通风、空调系统的节能设计和运行调节提供理论参考.

关键词: 水电站; 通风; 换热; 节能潜力; 数值模拟

中图分类号: TU834.1; TU834.3⁺5

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2015)06-0874-05

Study on dynamic heat transfer and basic theory of energy saving design of Shisanling Hydropower Station based on the dam tunnel ventilation

LI Angui, CHEN Qiang, YIN Haiguo, GAO Ran

(School of Environment and Municipal Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: Numerical simulation method is used to study the dam tunnel of Shisanling Hydropower Station. The mathematical model of this tunnel is built, and the numerical simulation results by using this model are basically conforms with the data measured at the site. Using the validated calculation model, the dynamic heat transfer between dam tunnel and the outside air is studied, and the energy saving potential is predicted under the summer operational condition. In addition, the influence of tunnel length on heat transfer effect also is analyzed. The current results of dam tunnel ventilation of Shisanling Hydropower Station can provide a theory reference for energy saving design and regulation of underground powerhouse ventilation or air conditioning system.

Key words: hydropower station; ventilation; heat transfer; energy saving potential; numerical simulation

我国的地下水电站建设飞速发展. 如果水电站的廊道较长, 利用廊道通风可以实现对进风的加热或降温调节, 具有显著的节能环保意义^[1,2]. 关于廊道通风的研究, 文献[3]利用坝体廊道的温降效应为水电站上游副厂房进行通风降温, 研究表明坝体廊道通风能够节约能源, 具有明显的经济效益. 文献[4]则对地下水电站进行了现场实测, 得出水电站坝体廊道对室外进风有较好的升温或降温作用, 具有较大的节能潜力. 但现场测试受测试时间等因素限制, 不能全面体现廊道通风的换热规律. 文献[5]利用数值模拟的方法分析了坝体廊道的入口空气温度和流速等因素对廊道换热效果的影响, 但该数值模拟是基于假定通风温度恒定得到的结果. 有鉴于此, 关于水电站坝体廊道通风的换热效果和节能潜力有待于进一步研究.

选择北京十三陵水电站的交通洞为研究对象,

考虑室外气温的日波动, 建立数学模型, 应用 FLUENT 软件对空气流经交通洞的换热作用进行动态数值模拟, 预测交通洞夏季与室外进风换热效果和节能潜力, 并分析了交通洞的长度对进风温度调节效果的影响.

1 研究对象与方法

1.1 工程概况

北京十三陵水电站位于北京市十三陵风景区, 距北京市约 40 km. 电站厂房为深埋式地下厂房, 进厂交通洞为地下拱形建筑结构, 其实际长度为 1 104 m, 但由于靠近主厂房附近的洞内空气温度受主厂房影响较大, 所以只考虑 0~1 000 m 这一段对送风的调节能力, 交通洞宽 7.5 m, 高 6.0 m, 平均埋深约 70 m 以上, 水电站主厂房采用机械通风, 室外空气经交通洞送入主厂房, 十三陵电站交通洞

收稿日期: 2015-01-06 修改稿日期: 2015-12-04

基金项目: 住房和城乡建设部基金资助项目(2013-K1-50)

作者简介: 李安桂 (1963-), 男, 教授, 博导, 主要从事建筑通风空调及建筑节能研究. E-mail: liag@xauat.edu.cn

入口如图1所示,交通洞的尺寸如图2^[6]。



图1 十三陵水电站交通洞

Fig.1 Dam tunnel of Shisanling Hydropower Station

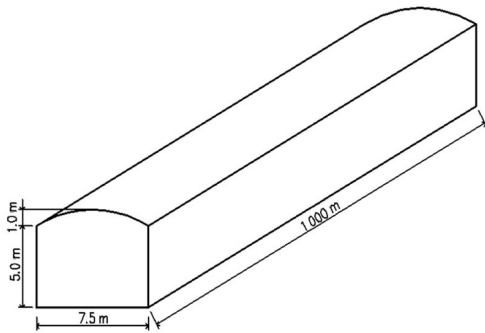


图2 十三陵水电站交通洞尺寸

Fig.2 Size of Shisanling Hydropower Station dam tunnel

1.2 廊道通风的解析模型

本文所研究是一个通风无衬、深埋、圆隧的廊道通风换热问题,可简化为图3所示的模型:

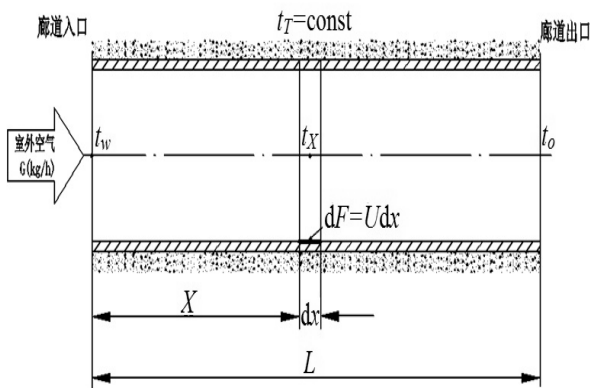


图3 廊道通风换热简化模型

Fig.3 Simplified chart of the dam tunnel ventilation

在某一特定时刻,岩温 t_T 和通风量 G 为定值,隧道内壁面热流强度 K 亦为定值,在流程 dx 内空气温度变化很小,比热 c 也可近似为定值,这样根据热平衡原理,空气通过 dx 后内能的变化等于其与壁面 Udx 的换热量^[7],即

$$-cG dt_x = K(t_x - t_T)U dx \quad (1)$$

对(1)式积分,得

$$-\frac{KU}{cG} \int_0^x dx = \int_{t_w}^{t_x} \frac{dt_x}{t_x - t_T} \quad (2)$$

$$\ln \frac{t_x - t_T}{t_w - t_T} = -\frac{KUx}{cG} \quad (3)$$

$$t_x = t_T + (t_w - t_T) e^{-\frac{KUx}{cG}} \quad (4)$$

式中: t_x 为廊道 x 位置处空气温度, $^{\circ}\text{C}$; t_T 为岩体温度,十三陵水电站岩体温度实测值为 22.3°C ; t_w 为室外气温, $^{\circ}\text{C}$; c 为空气比热, $1.005 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$; G 为通风量,实测值为 146880 kg/h ; K 为隧道内壁面热流强度(单位气温与岩温差时的热流值),根据毕渥准则数 Bi 和傅立叶准则数 Fo 查计算 K 值曲线图^[8]得, $K=8.2 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^{\circ}\text{C})$; U 为廊道截面周长,十三陵水电站的交通洞截面周长为 25.35 m 。

由以上数据计算十三陵水电站交通洞的换热问题,取 $x=1000 \text{ m}$, $t_w=30^{\circ}\text{C}$ (夏季通风温度),带入(4)式,得 $t_x=24.1^{\circ}\text{C}$,即交通洞出口空气温度为 24.1°C 。

1.3 数学模型

水电站交通洞属于三维空间问题,由于整个流场沿中心线对称,为加快计算速度,取交通洞轴对称的 $1/2$ 区域建立模型,将沿交通洞进深方向设为 Y 轴方向,水电站交通洞进深实体模型的网格划分图如图4所示。

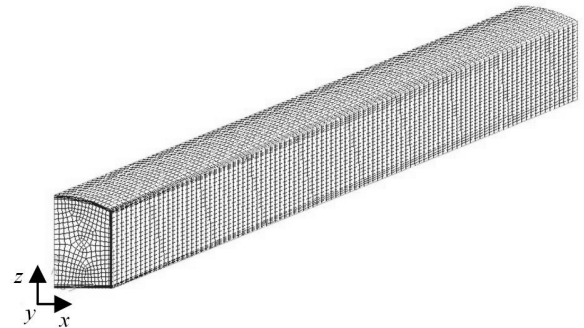


图4 交通洞模型网格划分图

Fig.4 Mesh generation of the dam tunnel model

假定空气为常物性,不可压缩流体,交通洞内空气的流动属于三维、非稳态的湍流流动。根据十三陵水电站的现场实测数据^[6],交通洞通风前后,洞内空气的绝对湿度并无变化,因此可以忽略湿传导对传热的影响。这是由于室外空气露点温度较低,坝体廊道的壁面温度高于室外空气露点温度,所以无法实现对空气的除湿功能,湿传导的影响可以近似忽略不计^[3]。

数值模拟控制方程的边界条件:

(1) 入口空气流速采用测试值,入口空气温度为室外逐时温度。对于室外逐时温度,工程上可以按一阶简谐波近似计算,给定气温峰值出现在下午

3 时, τ 时刻的室外气温为^[9]

$$t_{w,\tau} = t_{w,p} + (t_{w,\max} - t_{w,p}) \cos(15\tau - 225) \quad (5)$$

式中: $t_{w,\tau}$ 为 τ 时刻的室外气温, $^{\circ}\text{C}$; $t_{w,p}$ 为室外日平均温度, $^{\circ}\text{C}$; $t_{w,\max}$ 为室外最高气温, $^{\circ}\text{C}$. CFD 模拟时, 全天入口动态空气温度由 UDF 编程输入;

(2) 流场中心分界面选择为对称性边界条件;

(3) 测试水电站交通洞为深埋建筑, 太阳辐射和土壤换热对交通洞影响很小, 因此壁面边界条件根据测试数据选择定壁温边界条件^[6], 十三陵水电站交通洞壁面温度采用测试值 22.3°C .

1.4 数值求解方法

对北京十三陵水电站交通洞通风换热的数值模拟采用 Fluent 软件, 湍流模型选择标准的 $k-\varepsilon$ 双方程模型, 区域网格采用六面体网格, 方程的离散采用有限容积法, 离散后的代数方程用 SIMPLE 算法迭代求解^[10]. 为便于分析对比, 将以下图表中相关数据无因次化处理, 将交通洞的进深与总长之比 Y/L 作为交通洞断面距洞口的无因次距离.

1.5 模拟结果与实测数据对比

作者于 2007 年 8 月 29 日~9 月 2 日对十三陵水电站交通洞通风的换热效果进行了为期 5d 的现场测定. 将数值模拟的结果与 8 月 30 日交通洞通风换热实测的数据进行对比, 交通洞出口断面空气逐时温度实测值与模拟值的对比如图 5 所示, 交通洞在 3:00~15:00 时间段内, 洞内断面空气平均温度随进深变化曲线的对比如图 6. 从图 5 和图 6 可以看出, 数值模拟的结果与实测的数据基本一致, 两者误差都在 0.5°C 以内, 说明数值模拟对交通洞与空气换热的计算是准确、可靠的. 利用水电站的室外气象参数, 通过数值模拟能够预测不同时刻交通洞与室外进风的换热效果. 为此, 采用数值模拟的方法对夏季工况水电站交通洞与室外进风的换热效果进行进一步的预测与分析.

2 交通洞通风模拟结果与分析

十三陵水电站夏季空调室外计算干球温度为 33.8°C , 夏季空调室外计算日平均温度为 29°C ^[8]. 水电站夏季空调室外计算逐时温度由(5)式得到, 通过数值模拟得出夏季交通洞对室外进风的调节效果.

2.1 交通洞对进风的调节效果

模拟夏季设计日全天不同时刻空气流过交通洞时与岩壁的换热效果. 距交通洞入口不同无因次

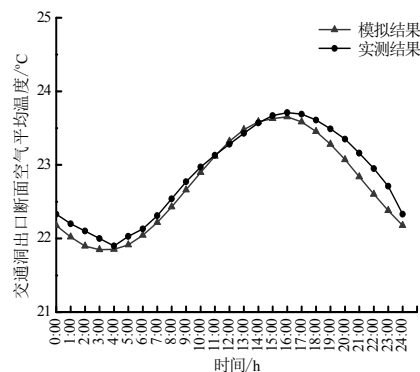


图5 交通洞出口空气逐时温度实测值与模拟值对比
Fig.5 Temperature measured vs temperatures simulated at the exist

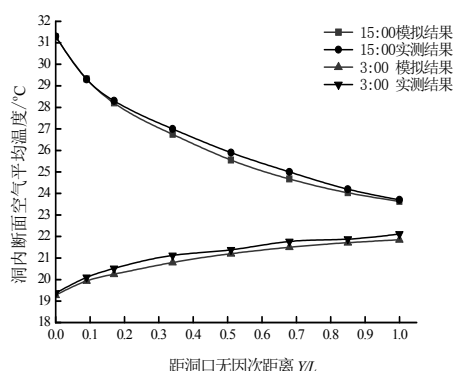


图6 交通洞内不同位置处空气温度实测值与模拟值对比
Fig.6 Temperature measured vs temperatures simulated at different locations inside the tunnel

距离处交通洞断面空气平均温度随时间变化曲线见图 7, 不同时刻交通洞断面空气平均温度随进深的变化曲线见图 8. 从图 7、图 8 可以看出:

(1) 夏季工况下交通洞入口温度波的振幅约 5°C , 随着交通洞断面距入口距离的增加, 温度波的振幅逐渐衰减, 到达交通洞出口处 ($Y/L=1$), 温度波的振幅衰减到最小值, 为 1°C 左右. 因此, 尽管室外空气温度全天内在 $24\sim34^{\circ}\text{C}$ 范围内变化, 交通洞出口处的空气温度都稳定在 $22.5\sim24.5^{\circ}\text{C}$ 的范围内;

(2) 室外进风温度高于交通洞壁面温度时, 交通洞对室外进风有降温效果, 交通洞的入口温度越高, 降温效果越明显. 15:00 左右交通洞的入口空气温度最高, 交通洞对室外进风的温降作用最大, 约 9°C ;

(3) 十三陵水电站交通洞通风换热数值模拟的结果与利用解析模型进行理论计算的结果差别不大, 进一步说明了数值模拟结果的可靠性.

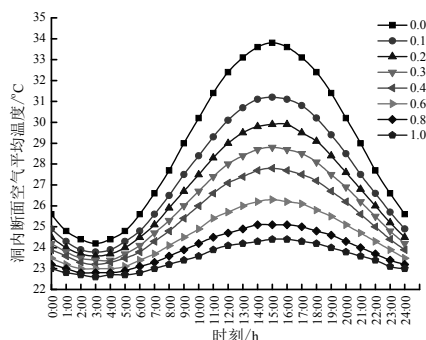


图7 交通洞不同断面处空气平均温度随时间变化

Fig.7 Mean temperature varies with time at different sections of the tunnel

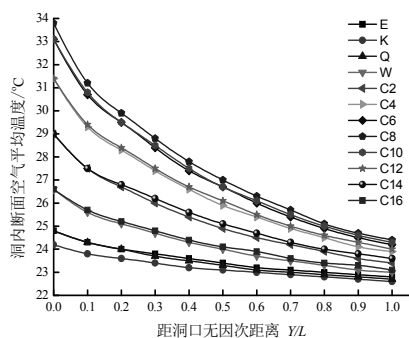


图8 不同时刻交通洞内空气温度随进深的变化

Fig.8 Temperature varies with depth at different moments of time inside the tunnel

2.2 交通洞的节能潜力

τ 时刻, 室外进风流经交通洞单位时间的换热量 (不计湿变化) 为

$$q = cm\Delta t = cAv\rho(t_{w,\tau} - t_{o,\tau}) \quad (6)$$

式中: q 为单位时间的换热量, kW; c 为空气的比热, 1.005 kJ/(kg·°C); A 为交通洞断面面积, 42.5 m²; v 为交通洞内空气流速, 测试值为 0.8 m/s; ρ 为空气密度, 1.2 kg/m³; $t_{w,\tau}$ 为 τ 时刻交通洞入口空气温度, °C; $t_{o,\tau}$ 为 τ 时刻交通洞出口空气温度, °C.

数值模拟得出交通洞出口空气温度, 计算出夏季空调设计日室外进风与交通洞的逐时换热量, 计算结果见图 9. 由图 9 可知, 交通洞与室外进风动态换热量变化近似余弦曲线, 且与交通洞出口空气温度的变化趋势一致. 由此可见, 夏季室外气温高于交通洞壁面温度时, 交通洞相当于一个较好的天然冷源, 它能够为水电站地下厂房提供一定的冷量, 十三陵电站交通洞在夏季空调设计日单位时间最大供冷能力约为 386 kW.

根据 (5) 式, 夏季空调室外计算日 τ 时刻的室外气温为

$$t_{w,\tau} = 29 + 4.8 \cos(15\tau - 225) \quad (7)$$

室外温度近似按余弦规律变化的空气流经交通洞, 到交通洞出口处, 其室外空气温度的日波幅

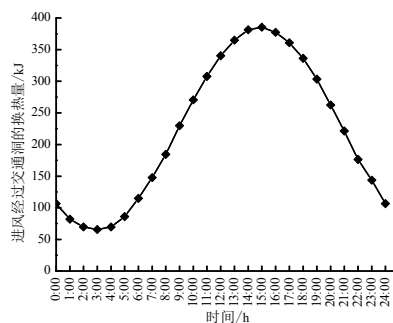


图9 交通洞与室外进风的逐时换热量

Fig.9 Heat transfer amount volume from tunnel exterior into interior

将发生显著衰减, 模拟得到交通洞出口处空气温度的日波幅为 0.86 °C, 交通洞出口处空气的日平均温度为 23.5 °C. 交通洞出口空气温度也近似按余弦规律变化, τ 时刻交通洞出口处温度的近似值为

$$t_{o,\tau} = 23.5 + 0.86 \cos(15\tau - 225) \quad (8)$$

交通洞总换热量:

$$Q = \int_0^{24} q d\tau \quad (9)$$

将 (6) 式带入得:

$$Q = \int_0^{24} cAv\rho(t_{w,\tau} - t_{o,\tau}) d\tau \quad (10)$$

将 (7) 式和 (8) 式带入得

$$Q = \int_0^{24} cAv\rho[5.5 + 3.94 \cos(15\tau - 225)] d\tau \quad (11)$$

通过对十三陵电站交通洞与室外进风夏季空调设计日全天换热量的积分计算, 可求得设计日总的换热量约 19 485 000 kJ, 这些冷量如果由风冷冷水机组提供 (二级能效比冷水机组的平均能效为 3.2), 大约需要消耗 1 691 kWh 的用电量. 根据《中国建筑热环境分析专用气象数据集》^[11]中北京地区典型气象年的逐时气象参数, 按照该方法, 得出十三陵电站交通洞通风在 6、7、8 三个月分别能够节省的空调耗电量, 如表 1 所示.

表1 交通洞通风空调季节节省的空调耗电量

Tab.1 Power saved from air conditioning inside the tunnel

时间/月	6	7	8	总计
节省耗电量/ 万 kWh	1.66	3.24	2.67	7.57

由表 1 可知, 十三陵水电站利用交通洞通风在空调季节可节省约 7.57 万 kWh 的空调耗电量, 可见交通洞通风的节能潜力巨大. 本案例对夏季交通洞与室外进风逐时换热量的计算, 有助于预测水电站厂房交通洞通风的节能潜力, 利用交通洞通风能有效地节约水电站通风空调系统的初投资以及运

行能耗。

3 交通洞长度对其通风换热影响

交通洞通风的节能潜力与通风量和交通洞长度密切相关,本文测试发现空调季节内电站主厂房所需的通风量变化不大^[6],因此本研究不考虑通风量变化带来的节能潜力,而主要研究交通洞长度对其通风换热效果的影响,对不同交通洞长度(变化至3 000 m)进行了数值模拟。模拟时截面尺寸和壁面温度、入口风速同上,改变进风温度,数值模拟结果如图10。由图10可知,交通洞的温升或温降曲线接近对数曲线,曲线斜率随着进深增加而减小。进入交通洞的初始一段距离(1 000 m左右)断面温度变化曲线的斜率较大,交通洞对室外进风的调节作用较明显,这段距离对室外进风起主要的调节作用。进深超过1 000 m以后,交通洞对室外进风的调节作用已非常小,这种情况在入口空气温度接近壁温时更为明显。计算表明,室外进风温度为35℃时,交通洞前1 000 m对进风的温降约10.5℃,而之后的1 000~2 000 m温降仅不到2.5℃;当进风温度为25℃时,交通洞前1 000 m的温降约2.5℃,之后1 000~2 000 m温降仅为0.5℃。因此,关于地下水电站交通洞对室外进风温度的调节,并不是交通洞越长越好。工程设计阶段,如果交通洞同时承担运输和对室外空气的降温作用,那么可以在满足运输需求的前提下,合理确定交通洞的长度,以此降低系统开挖初投资和实现交通洞降温作用的最大化。

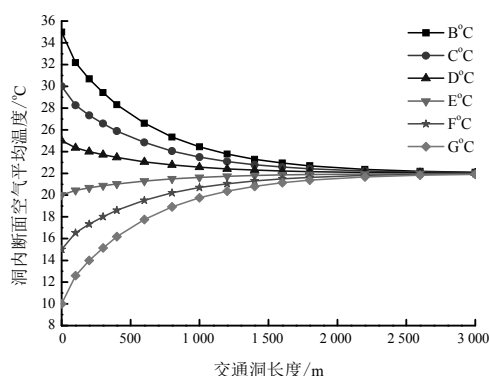


图10 交通洞内的空气温度变化曲线
Fig.10 Temperature varies with time inside tunnel

4 结论

采用CFD数值模拟的方法,对北京十三陵水电站交通洞的通风特性进行了研究,预测了夏季工况下交通洞对室外进风的动态调节效果,并分析了交通洞长度对换热效果的影响,得出以下结论:

(1) 在夏季空调设计计算工况下,十三陵水电站交通洞对室外进风可实现9℃温降,最大具有386 kW供冷潜力,整个空调季节预计节省约7.57万kWh空调用电量,节能潜力巨大,是较好的天然冷源。

(2) 交通洞对室外进风有着较好的调节作用,随着交通洞进深的增加,洞内空气温度波的振幅逐渐减小,交通洞末端的空气温度最稳定。

(3) 交通洞长度超过一定距离以后,洞内空气温度的变化已相当小,进深的进一步增加对进风调节效果并不显著,对于十三陵水电站,交通洞对室外进风调节的有效长度在1 000 m左右。因此,在交通洞设计阶段,可以在满足运输需求的前提下,结合交通洞的节能效果和初投资等因素,合理确定交通洞的长度。

(4) 数值模拟预测得到了交通洞在夏季工况的逐时供冷量及节能效果,可为水电站通风空调系统的设计和运行调节提供理论参考。

参考文献 References

- [1] 林志勇,李光华. 水利水电工程暖通空调设计发展历程[J]. 暖通空调, 2015, 45(2): 10-14.
LIN Zhiyong, LI Guanghua. Development course of HVAC design for water resources and hydropower engineering[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2015, 45(2): 10-14.
- [2] 张晓华. 三峡左岸电站暖通空调系统设计与运行[J]. 暖通空调, 2012, 42(9): 95-99.
ZHANG Xiaohua. HVAC system design and operation of Three Gorges Left Bank Power Station[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2012, 42(9): 95-99.
- [3] 朱世琦,王代禹,习亚华. 漫湾水电站坝体廊道温降效应研究[J]. 制冷, 2000, 19(4): 1-6.
ZHU Shiqi, WANG Daiyu, XI Yahua. Study for temperature descend when air passing through the dam gallery ManWan power station[J]. Refrigeration, 2000, 19(4): 1-6.
- [4] 李安桂,李辉,党义荣,等. SSL水电站交通洞温度测试及节能潜力分析[J]. 太阳能学报, 2010, 31(9): 1215-1219.
LI Angui, LI Hui, DANG Yirong, et al. Field test on temperature in tunnel of SSL hydropower station and an analysis on potential energy utilization[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2010, 31(9): 1215-1219.
- [5] 温建军,李安桂. 坝体廊道通风换热性能的模拟研究[J]. 水电能源科学, 2010, 28(7): 98-102.
WEN Jianjun, LI Angui. Simulation research on heat transfer performance in dam tunnel ventilation[J]. Water Resources and Power, 2010, 28(7): 98-102.
- [6] 李辉. 十三陵地下水电站交通洞通风换热效果实测及理论分析[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2009.
LI Hui. Field test and theoretical analysis on tunnel ventilation heat exchange efficiency of Shisanling hydropower station[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2009. (下转第884页)

面原理,将竖直壁面贴附式送风当做冲击射流的一半来考虑。

参考文献 References

- [1] ASHRAE. 2001 ASHRAE Handbook: Fundamentals[M]. Atlanta: American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Inc., 2001: 26.2-26.3.
- [2] 马仁民. 置换通风的通风效率及其微热环境评价[J]. 暖通空调, 1997, 27(4): 1-6.
MA Renmin. Displacement ventilation effectiveness and evaluation of the micro thermal environment[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 1997, 27(4): 1-6.
- [3] 李强民. 置换通风原理、设计及应用[J]. 暖通空调, 2000, 30(5): 41-46.
LI Qiangmin. Displacement ventilation: principles, design and applications[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2000, 30(5): 41-46.
- [4] HAMILTON S, ROTH K W, BRODRICK J. Displacement ventilation[J]. ASHRAE Journal, 2004, 46(9): 56-58.
- [5] KARIMIPANAH T, SANDBERG M, AWBI H B. A comparative study of different air distribution systems in a classroom[C]//Proceedings of the ROOMVENT 2000, Reading, UK, 2000, Vol. II: 1013-1018.
- [6] MELIKOV A K, RADIM C, MILAN M. Personalized ventilation: evaluation of different air terminal devices[J]. Energy and Building, 2002, 34(8): 829-836.
- [7] 林章, 周天泰, 曾志宽. 层式通风—高温空调下的出路[J]. 化工学报, 2008, 59(S2): 235-241.
LIN Zhang, CHOW T T, TSANG C. Ventilation system for higher room temperature setting[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2008, 59(S2): 235-241.
- [8] CAO G Y, SIRÉN K, KILPELÄINEN S. Modelling and experimental study of performance of the protected occupied zone ventilation[J]. Energy and Building, 2014, 68(Part A): 515-531.
- [9] 李安桂, 邱少辉, 王国栋. 竖壁贴附射流空气湖模式通风系统: 中国, 200810017349.0 [P]. 2008-01-21.
LI Angui, QIU Shaohui, WANG Guodong. A downward directed vertical wall jet ventilation system based on air lake model: China, 200810017349.0 [P]. 2008-01-21.
- [10] LI Angui, YIN Haiguo, ZHANG Wangda. A novel air distribution method-Principles of air curtain ventilation[J]. International Journal of Ventilation, 2012, 10(4): 383-390.
- [11] 李安桂, 尹海国, 陶鹏飞. 一种出风均匀且风口可调式静压箱[P]. 中国, 201010549210.8, 2012.07.25.
LI Angui, YIN Haiguo, TAO Pengfei. A plenum chamber with uniform air supply and adjustable air outlet[P]. P.R. China, 201010549210.8, 2012.07.25.
- [12] THORSHAUGE J. Air-velocity fluctuations in the occupied zone of ventilated spaces[J]. ASHRAE Transactions, 1982, 88(2): 753-764.
- [13] RAJARATNAM N. Turbulent Jets[M]. Amsterdam: Elsevier, 1976: 211-213.
- [14] ASHRAE. 1993 ASHRAE Handbook: Fundamentals[M]. Atlanta: American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Inc., 1993.
- [15] CHO Y J, AWBI H B, KARIMIPANAH T. Theoretical and experimental investigation of wall confluent jets ventilation and comparison with wall displacement ventilation[J]. Building and Environment, 2008, 43(6): 1091-1100.
- [16] KARIMIPANAH T, AWBI H B. Theoretical and experimental investigation of impinging jet ventilation and comparison with wall displacement ventilation[J]. Building and Environment, 2002, 37(12): 1329-1342.
- [17] CAO G. Modelling the attached plane jet in a room[D]. PhD thesis, Finland: Helsinki University of Technology, 2009.
- [18] FÖRTHMANN E. Turbulent jet expansion[R]. Washington, D.C.: National Aeronautics and Space Administration, 1934: No. TM-789.
- [19] VERHOFF A. The two-dimensional turbulent wall jet without an external free stream[R]. Princeton: Princeton University, 1963: No. 626.
- [20] SCHWARZ W H, COSART W P. The two-dimensional turbulent wall jet[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1961, 10(4): 481-495.
- [21] BELTAOS S, RAJARATNAM N. Plane turbulent impinging jets[J]. Journal of Hydraulic Research, 1973, 11(1): 29-59.

(编辑 吴海西)

(上接第 878 页)

- [7] 赵鸿佐. 地下建筑通风热计算公式[M]. 西安: 西安冶金建筑学院, 1973.
ZHAO Hongzuo. Ventilation heat calculation formula of underground construction[M]. Xi'an: Xi'an institute of metallurgical construction, 1973.
- [8] 水电站机电设计手册编写组. 水电站机电设计手册(采暖通风与空调)[M]. 北京: 水力电力出版社, 1987.
Hydropower station mechanical and electrical design manual group. Mechanical and electrical design manual of hydropower station(Heating, Ventilating and Air conditioning)[M]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1987.
- [9] 赵荣义, 范存养, 薛殿华, 等. 空气调节[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008: 26-28.
ZHAO Rongyi, FAN Cunyang, XUE Dianhua, et al. Air conditioning[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008: 26-28.
- [10] 陶文铨. 数值传热学[M]. 第二版. 西安: 西安交通大学出版社, 2001: 347-376.
TAO Wen quan. Numerical heat transfer[M]. 2nd ed. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2001: 347-376.
- [11] 中国气象局气象信息中心气象资料室, 清华大学建筑技术科学系. 中国建筑热环境分析专用气象数据集[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
Meteorological reference room of China meteorological information center, Department of Building Science, Tsinghua University. Special meteorological data set of China building thermal environment analysis[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2005.

(编辑 沈波)