

文章编号: 1671-6612 (2024) 06-768-08

考虑热效应的地下建筑 光导通风一体化系统自然通风特性研究

罗慧琳 曹晓玲 周旭

(西南交通大学机械工程学院 成都 610031)

【摘要】 光导照明通风一体化系统将天然采光与自然通风相结合,可以有效降低地下建筑的照明与通风能耗。针对以往的优化设计通常忽略光导管热效应的情况,建立了热效应和室内热源耦合作用下的光导照明通风一体化模型,对其作用下自然通风特性进行了分析。研究表明:光导管管壁因太阳辐射引起的热流密度分布十分不均匀,沿圆周方向热流密度呈对称分布最高可达 $227\text{W}/\text{m}^2$ 。热效应强化了光导照明通风一体化系统的自然通风效果,当考虑热效应时,自然通风量最高增加了17.9%,通道出口处空气平均流速提升了56%。在此基础上研究了太阳辐射强度对系统自然通风性能的影响,结果表明,随着太阳辐射强度从 $200\text{W}/\text{m}^2$ 增至 $1000\text{W}/\text{m}^2$,光导管热效应增强通道内的空气流量由 $187\text{m}^3/\text{h}$ 增加至 $202\text{m}^3/\text{h}$ 。

【关键词】 光导通风一体化系统;热效应;自然通风

中图分类号 TU929 文献标志码 A

Study on Natural Ventilation Characteristics of Integrated Optical Ventilation System for Underground Buildings Considering Thermal Effect

Luo Huilin Cao Xiaoling Zhou Xu

(School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031)

【Abstract】 The integrated lighting and ventilation system combines natural lighting and natural ventilation, which can effectively reduce the lighting and ventilation energy consumption of underground buildings. In view of the fact that the thermal effect of light guide tube is usually ignored in previous optimal design, the integrated model of light guide lighting ventilation under the coupling of thermal effect and indoor heat source is established, and the characteristics of natural ventilation under its action are analyzed. The results show that the heat flux distribution caused by solar radiation on the tube wall is very uneven, and the heat flux distribution along the circumference is symmetrical up to $227\text{W}/\text{m}^2$. The thermal effect enhances the natural ventilation effect of the integrated system of lighting and ventilation. When the thermal effect is taken into account, the natural ventilation volume increases by up to 17.9%, and the average air velocity at the outlet of the channel increases by 56%. On this basis, the effect of solar radiation intensity on the natural ventilation performance of the system is studied. The results show that with the solar radiation intensity increasing from $200\text{W}/\text{m}^2$ to $1000\text{W}/\text{m}^2$, the thermal effect of the light pipe is enhanced, and the air flow in the channel increases from $187\text{m}^3/\text{h}$ to $202\text{m}^3/\text{h}$.

【Keywords】 Integrated system of light ventilation; Thermal effect; Natural ventilation

基金项目: 四川省科技计划项目 (2021YFG0271)

作者简介: 罗慧琳 (2000.4-), 女, 在读硕士研究生, E-mail: 18270755675@163.com

通讯作者: 曹晓玲 (1984.8-), 女, 博士, 高级工程师, E-mail: xlcao@swjtu.edu.cn

收稿日期: 2024-08-12

0 引言

我国对地下空间的开发利用正在进入全新的发展时期,地下空间位于地下,封闭、自然光线缺乏、空气流动性差,采光与通风主要靠人工照明和机械通风实现,与地面建筑相比,照明和通风能耗显著偏高。因此,作为实现建筑物通风与照明,降低建筑运行能耗的有效途径,天然采光和自然通风技术已成为实现地下建筑可持续发展的重要策略之一^[1]。自然通风具有无能耗、无污染的优点可作为建筑节能的重要手段,而光导管照明系统被认为是日光领域最具创新性的技术,能够节约20%—30%的建筑用电^[2,3]。但是,天然采光技术与自然通风技术多年来一直沿着各自的方向独立发展,将光导管和自然通风相结合是近年来人们提出的新技术。光导照明通风一体化系统将光导照明技术和自然通风相结合,在满足采光需求的同时也保证了建筑内自然通风。

将光导管与自然通风相结合最早是由英国诺丁汉大学 Elmualim 等人^[4]提出的, Elmualim 等人采用二向色性材料构造光导管,实验结果表明二向色光导管与镜面反射率为95%的光导管具有相同的光传输效率,但该系统可将自然通风量提高14%。Shao 等人^[5]通过实验和理论分析研究了与太阳能供暖、自然通风相结合的光导管系统的性能,结果表明在阴天天气条件下光导管具有较高的传输效率,系统换气次数可达8次/h,将光导管自然光照明、自然通风系统相结合是可行的。Armando 等人^[6]通过数值模拟的方法研究了热压风压耦合作用下系统的自然通风特性,研究了四种不同的出风口末端,发现只有H型末端没有出现气流倒灌现象,而且体积流量较稳定。Szabolcs Varga 等人^[7]也针对与光导管结合的自然通风系统进行了实验和模拟研究,比较了不同风帽结构的通风效果,结果表明与无通风末端的系统相比风帽结构提高了系统的空气流量。

一些研究人员也对光导通风一体化系统的结构形式进行了改进, Riffat 等人^[8]通过实验研究了激光切割面板(LCP)对光导管照明效率的影响,测试结果显示,安装LCP面板的光导管可以实现更高水平的日光传输,照度最高可达到800lux。Taengchum^[9]设计了一个光管和太阳能集热器相结合的照明通风系统并进行了理论和实验研究,结果

表明空气流量足以满足通风需求和被动冷却,光导管传输了充足的自然光,可以用于一般照明。Sungsoontorn 等人^[10]设计了一种用于减热、增强自然通风和提供室内照度的光/排风管(LVP),结果表明,LVP诱导的自然气流速度约为1.8~5.4m³/h,提供约50~150Lx的室内照度。

通过以上研究发现,目前对光导照明通风一体化系统的研究多集中在室内外温差和室外气象条件对其自然通风效果的影响。然而在夏季强烈的太阳辐射下,光导管存在由红外线引起的热效应,在太阳光谱的近红外部分,光导管壁面反射率急剧下降^[11,12]。由于多次反射,太阳辐射通过光管传输时不可避免地被部分吸收在光管组件上,吸收的太阳辐射能量沿管道分布使其温度升高,实验研究表明在强太阳辐射下光导管各组件温度将显著升高最高可达74℃^[13]。实际上利用光导照明通风一体化系统进行自然通风时,存在室内热源和光导管热效应耦合作用。因此,本文建立考虑热效应的地下建筑光导照明通风一体化系统自然通风模型,对室内热源和光导管热效应耦合作用下的系统自然通风特性进行研究。

1 数值计算模型的建立及验证

1.1 数学模型的建立

本文设计的光导通风一体化系统示意图如图1所示,系统主要由光导管、集光器、漫射器、通风管道、地下空间构成,其中光导管内壁涂有高反射率膜。光导通风一体化系统实现建筑自然通风的热压主要来源于光导管热效应和室内的人员和建筑内发热设备发出的热量,光导通风一体化系统的工作原理为:在光导管热效应和内热源的耦合作用下,室外空气将通过进风口进入室内,空气在室内热源附近以及光导管壁面处被加热密度减小,室内外空气的密度差使建筑内外形成了压力梯度,产生向上的浮升力。通道内空气受到浮力驱动沿着光导管上升排出室外,进入外界环境,而室外空气不断从系统下部补充进入通道内部,从而实现建筑内的自然通风。

对光导通风一体化系统的自然通风进行模拟时,为有效简化计算模型,使数值模拟能够高效地进行,本文对模型做出如下简化假设:忽略系统内辐射传热;不考虑壁面的蓄热特性;忽略系统外部

环境风压的作用,由于地下建筑整体结构均位于地下且往往被周围其他地上建筑包围,相对于地上建筑而言系统受风压作用的影响较小^[14],认为空气密度符合 Boussinesq 假设。

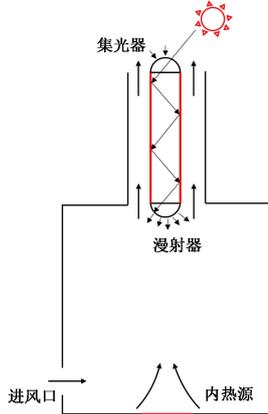


图 1 考虑热效应的光导通风一体化系统

Fig.1 Integrated optical ventilation system considering thermal effect

光导通风一体化系统内的空气流动属于稳态的、不可压缩的湍流流动,对应的控制方程为^[15]:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial (u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(g \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \overline{u_i u_j} \right) + g_i \beta (T_0 - T) \quad (2)$$

$$\frac{\partial (T u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\lambda}{\rho c_p} \frac{\partial T}{\partial x_j} - T \overline{u_j} \right) \quad (3)$$

式中: i, j 为 $i, j=1, 2, 3$ 表示坐标系的三个方向即 x, y, z ; u_i 为 x_i 方向上的平均速度分量, m/s; u_j 为 x_j 方向上的平均速度分量, m/s; ρ 为空气密度, kg/m³; P 为压力, Pa; g 为空气的运动黏度系数, m²/s; $\overline{u_i u_j}$ 为 Reynolds 应力项。

各边界条件设置如下:

(1) 计算域入口: 压力入口边界条件, $P=0, T=293K$;

(2) 计算域出口: 压力出口边界条件, $P=0, T=293K$;

(3) 通风管道壁面、室内围护结构: 绝热边界, $u=v=w=0, \partial T / \partial \vec{n} = 0$;

(4) 室内热源: 定热流, $-K \nabla T = q$;

(5) 光导管壁面: 定热流, $-K \nabla T = \dot{q}$; 进行自然通风模拟计算前,先通过 Tracepro 软件对光导管进行光线追踪,将模拟得到的光导管壁面热流密度分布进行分段处理并拟合成与坐标相关的函数,将拟合出来的多项式函数编写成 UDF 作为边界条件施加到光导管壁面上。

1.2 数值求解方法

模型中的压力速度耦合算法采用 SIMPLEC 算法,对于方程的离散选择二阶迎风格式,采用体积力加权格式 (Body Force Weighted) 对压力项进行离散。压力、密度、体积力、动量和能量的松弛因子分别设定为: 0.3, 1, 1, 0.7, 0.8, 0.8, 1, 1。数值模拟的收敛判断依据: 动量方程、能量方程、连续性方程的残差值设置为 10^{-5} 。为了解决网格数量对数值结果的影响,在初步研究中采用了三种网格数量,分别为 814649、1270832、2187145,比较了不同网格数量下 $y=1m$ 处的空气速度分布来得到网格独立解,由图 2 可知,第二套网格与第三套网格计算结果最大相对误差仅为 4.6%,当网格数达到 1270832 时,数值计算的精度不再随网格增大而提高。选择第二套网格划分方式进行模拟计算,采用结构网格进行划分,对壁面、风口附近及热源附近网格进行加密。

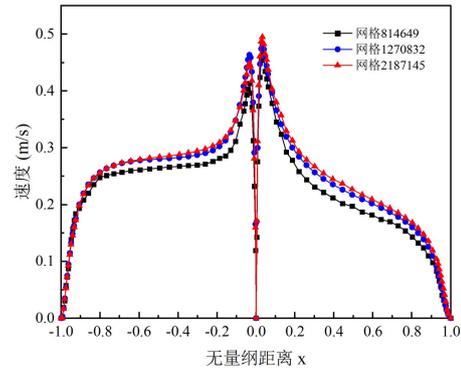


图 2 网格无关性验证

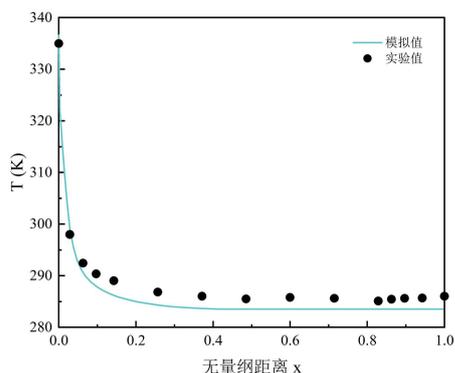
Fig.2 Grid independence verification

1.3 模型验证

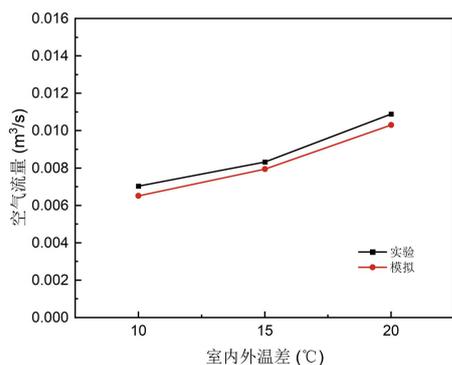
搭建光导通风一体化系统实验平台,验证光导管热效应驱动自然通风模型的可靠性,当壁面热流密度为 $300W/m^2$ 时,通道内空气温度模拟结果与实验结果对比如图 3 (a) 所示,从整体上来看,沿通道宽度方向 $y=1m$ 处通道内空气温度数值结果与实验数据基本吻合,数值计算结果与实验数据的相对误差最大为 4.5%。结果表明,本文所提出的

光导管热效应驱动自然通风模型是可靠的。

为了验证室内热源驱动自然通风模型的可靠性, 对文献[16]实验条件下具有自然通风功能的光导管系统进行了数值模拟。模拟结果与实验结果对比如图 3 (b) 所示, 数值计算结果与实验数据的相对误差最大为 7.3%在误差允许范围内, 验证了本文所用数值模型和计算方法的可靠性和有效性。



(a) 通道内空气温度对比



(b) 空气流量对比

图 3 模拟结果与实验结果对比

Fig.3 Comparison of simulation results with experimental data

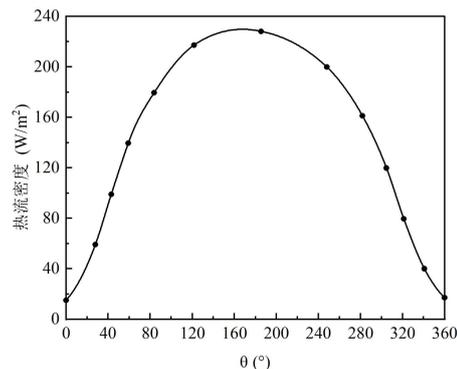
2 模拟结果分析

2.1 光导管热效应分析

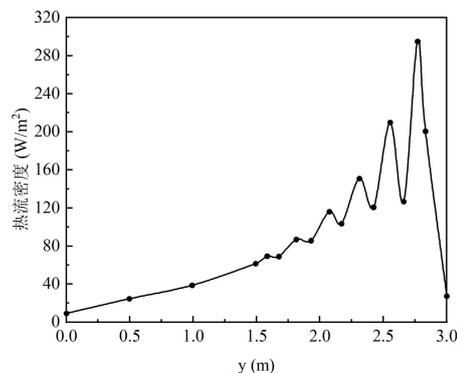
利用 Tracepro 软件对光导通风一体化系统进行光学性能分析, 可得到光导管壁面热流密度分布情况。图 4 为太阳辐射强度 $1000\text{W}/\text{m}^2$ 时, 光导管沿圆周方向和长度方向壁面热流密度分布。如图 4 (a) 所示, 沿圆周方向, 光导管壁面热流密度先增大再减小近似对称分布, 热流密度主要分布在 $\theta = 100^\circ \sim 280^\circ$ 范围内, 即迎光面上, 在周向角 $\theta = 185^\circ$ 处热流密度达到最大值 $227\text{W}/\text{m}^2$, 而背光

面由于受光导管形状影响以及考虑了太阳形状, 热流密度并不为零仍有较高热流分布。

如图 4 (b) 所示, 沿光导管长度方向, 随着轴向位置远离光导管出口壁面热流密度逐渐增大, 且增长幅度越来越大最后壁面热流密度最大值 ($300\text{W}/\text{m}^2$) 出现在光导管入口处 ($y=2.75\text{m}$)。这是因为随着太阳光线在光导管内向下传播, 光线反射次数不断增加, 光线数量和能量减小, 光导管壁面吸收的热量也就减小。光导管壁面热流密度分别在 $y=2.77\text{m}$ 、 2.55m 、 2.31m 、 2.07m 、 1.81m 、 1.58m 处达到了峰值, 各波峰间存在波谷, 由于光导管壁面吸收的能量是由太阳光线在光导管管壁的多次反射而引起的, 说明波峰的位置即太阳光线遇到光导管壁面而发生反射的位置。当 $y < 1.5\text{m}$ 时, 没有出现波峰, 这是由于太阳光线主要被光导管上半部分吸收引起的。



(a) 周向热流密度分布



(b) 轴向热流密度分布

图 4 光导管壁面热流密度分布

Fig.4 Heat flux distribution on the wall surface of the light guide tube

2.2 有无热效应的系统自然通风特性对比分析

图 5 是不考虑热效应和考虑热效应作用下光导照明通风一体化系统的温度场和速度场分布对

比。由图 5 (a) 可知, 单独室内热源作用下, 室内温度分布比较均匀, 房间下部温度较低, 仅热源附近空气有明显温升。室内热源产生的热羽流向右侧墙倾斜并附着在围护结构侧壁上, 这是因为热羽流向上发展时受到侧墙的限制, 冷气流从左侧进风口流入到达热羽流处时, 冷空气削弱了热羽流流量且气流速度足够大, 热羽流被碰撞弯曲, 热量集中在房间右侧角落。由图 5 (b) 可知, 室内热源和热效应共同作用下, 光导管热效应会对温度场分布产生一定影响, 但室内温度场分布与不考虑热效应时相差不大, 仅在垂直通道内表现出较大差异。光导管壁面附近形成了温度边界层, 通道内换热方式以对流换热为主, 沿通道水平方向, 随着与热壁面距离的增加, 通道内空气温度逐渐下降; 沿通道高度方向, 由于沿程光导管壁面热流密度增加且空气不断吸收壁面热量, 空气温度沿着光导管长度方向不断增加, 温度分布不均匀。

由图 5 (c) 可知, 室内热源单独作用时, 室内气流速度最大值出现在垂直通道内和进风口处, 而室内大部分区域气流速度较低。这是因为室内空气的流动主要受热压作用的影响, 空气经过截面较小的进口时速度增大, 而室内其他区域远离了热源, 空气流动完全依靠浮力驱动, 自然通风效果大大降低, 所以空气流动缓慢。由图 5 (d) 可知, 室内热源和热效应共同作用时, 速度场分布在垂直通道内和进风口处表现出较大差异, 流体速度相比室内热源单独作用时有所提高。通道内空气被光导管壁面加热密度减小产生密度差, 形成向上的浮升力热压作用增强, 光导管热效应增强了垂直通道对室内空气的抽吸作用, 因此进风口处和通道内空气速度远大于不考虑热效应时的空气速度。

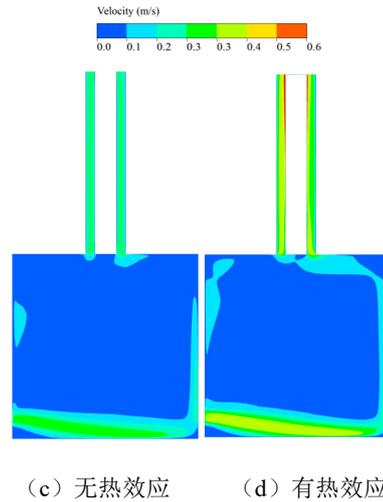
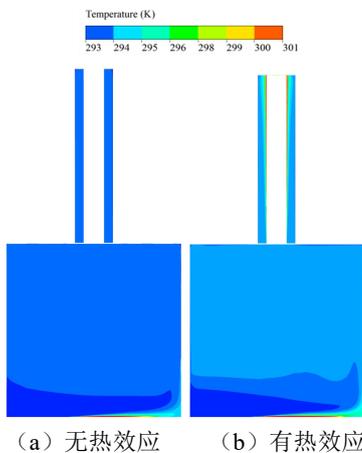
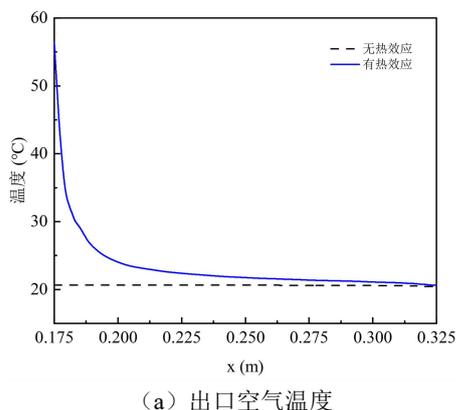


图 5 不考虑热效应和考虑热效应作用下 $z=0$ m 截面温度场与速度场分布图

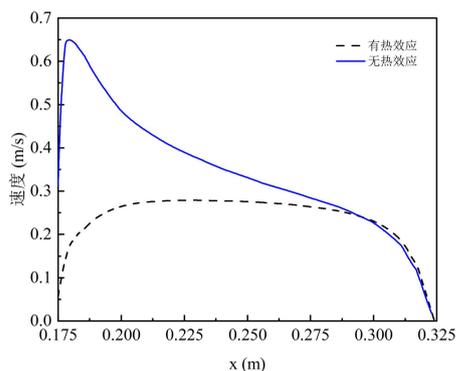
Fig.5 Temperature field and velocity field distribution of $z=0$ m section without considering thermal effect and considering thermal effect

图 6 (a) 是室内热源单独作用和考虑热效应两种情况下, 垂直通道出口处温度分布。室内热源单独作用时, 此时没有热效应垂直通道内温度分布均匀。热效应和室内热源共同作用时, 发现在光导管壁面附近的薄层内, 流体温度发生剧烈变化有较大温度梯度, 而在薄层外温度变化逐渐趋于平缓温度梯度几乎等于零。总体来说, 相较于室内热源单独作用时, 此时房间内空气被加热的程度增强温升也更加明显。

图 6 (b) 是室内热源单独作用和考虑热效应两种情况下, 垂直通道出口处速度分布。不考虑热效应时, 贴壁处由于黏性作用空气速度为零, 随着离开壁面距离的增加流体速度急剧增大, 经过一个薄层后增长到接近主流速度。除壁面附近有较大速度梯度外, 远离壁面处空气速度分布较为均匀。考虑热效应时, 沿通道宽度方向从左到右空气速度逐渐增大, 这是因为通道内空气被热壁面加热温度上升密度减小, 造成壁面附近流体密度的不均匀, 形成向上的浮升力驱动光导管壁面附近的空气流动; 到热壁面附近某一位置时, 流体速度开始明显减小, 这是因为越靠近热壁面空气被加热的程度越高, 局部浮升力也就越大。与不考虑热效应作用时相比, 考虑光导管热效应时通道出口处空气平均流速由原来的 0.23m/s 增大至 0.28m/s 。



(a) 出口空气温度



(b) 出口空气速度

图 6 竖直通道出口处空气速度和温度分布对比

Fig.6 Comparison of air velocity and temperature distribution at vertical channel exit

图 7 为光导管直径为 0.35m, 光导管长度为 3m、空气通道间距为 0.15m 时, 考虑热效应的通风系统与没有热效应的通风系统在不同室内热源强度下所对应的诱导通风量大小。与不考虑热效应的通风系统相比, 室内热源和光导管热效应共同作用时自然通风量最高增加了 17.9%, 通道内空气温升明显, 热压作用增强, 使得空气流速增加, 从而诱导更多的空气从进风口流入室内。

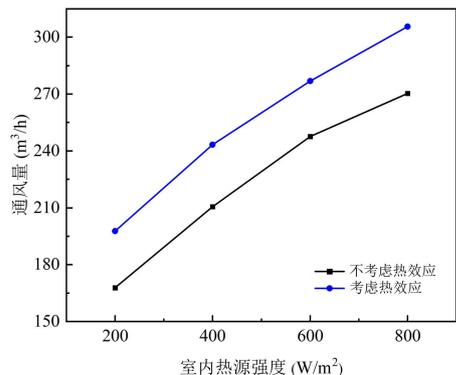
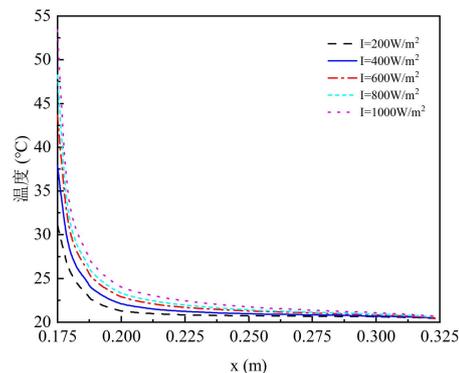


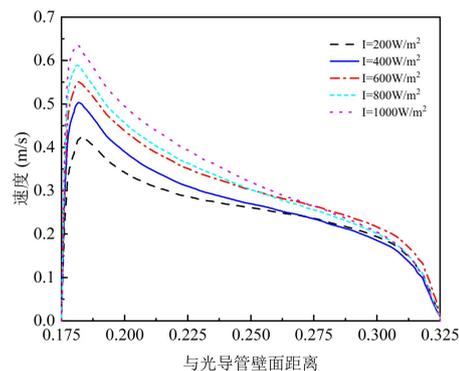
图 7 系统自然通风量对比

Fig.7 System natural ventilation volume comparison

2.3 太阳辐射强度对系统的影响



(a) 出口空气温度



(b) 出口空气速度

图 8 不同太阳辐射强度下竖直通道出口处空气速度和温度分布

Fig.8 Distribution of air velocity and temperature at the outlet of vertical channel under different solar radiation intensities

图 8 (a) 是不同太阳辐射强度下通道出口温度分布曲线。不同太阳辐射强度下, 出口处均呈现出从通风管道壁面侧到热壁面侧, 温度逐渐上升, 至光导管壁面处空气温度到达最高值的温度分布, 且热壁面附近温度梯度大。太阳辐射强度增强空气吸收的热量增多, 从而提升通道内空气温度, 随着太阳辐射强度从 200W/m² 增至 1000W/m², 出口处热壁面附近空气温度从 31°C 增加至 53°C, 可以看到, 随着太阳辐射强度的增加, 通道内空气温升不是很明显, 随着通道宽度增加, 通道内中部温度变化不是很大, 仅仅在热边界层内温度变化较大。

图 8 (b) 是不同太阳辐射强度下通道出口速度分布曲线。在不同太阳辐射强度下, 通道出口速度分布趋势是一致的, 流体速度随着与光导管壁面距离的增大从零增加至最大值, 而后又随着距离的

增加逐渐减小,热壁面附近有明显的速度边界层。整体而言太阳辐射强度增大能够提升通道内空气速度,在光导管壁面附近速度变化幅度大,随着与热壁面距离的增加速度变化不明显。太阳辐射从 200W/m^2 增大至 1000W/m^2 ,流动增强,出口处空气平均速度从 0.23m/s 增加到 0.31m/s 。这是因为太阳辐射强度增大,光导管壁面吸收的太阳辐射增多,使得垂直通道对室内空气的抽吸作用增强,增强了通道内空气的流动。

图 9 绘制了室内热源强度为 200W/m^2 ,光导管长为 3m 、空气通道间距为 0.15m 时,空气流量随太阳辐射强度的变化曲线。随着太阳辐射强度从 200W/m^2 增至 1000W/m^2 ,通道内的空气流量由 $187\text{m}^3/\text{h}$ 增加至 $202\text{m}^3/\text{h}$ 。分析其原因:太阳辐射强度增加光导管热效应增强,通道内空气与热壁面对流换热吸收的热量也在增加,使得垂直通道内空气温升更加明显,最终导致出口处空气温度的增加烟囱效应增强,加速了通道内空气的流动,而系统其他参数不变的情况下风速提高将导致空气流量的增加。

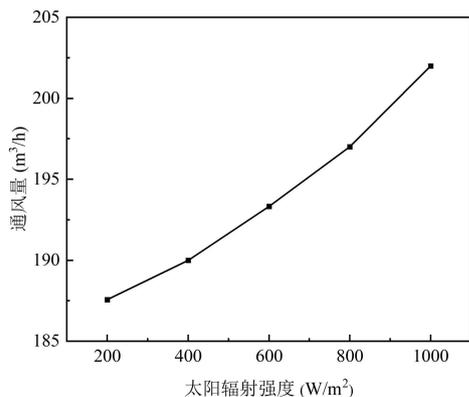


图 9 风量随太阳辐射强度的变化

Fig.9 Variation of mass flow with solar radiation intensity

3 结论

本文通过 Tracepro 软件研究了光导管壁面吸收的太阳辐射热流密度的分布情况,为系统自然通风模拟提供了边界条件。在此基础上建立考虑热效应的光导通风一体化系统自然通风数值模型,进一步研究了太阳辐射强度对系统通风性能的影响规律,得出以下结论:

(1) 光导管管壁因吸收太阳辐射而存在热效应,对于光导管表面热流密度分布,沿圆周方向,

光导管壁面热流密度先增大再减小近似对称分布,在周向角 $\theta = 185^\circ$ 处热流密度达到最大值 227W/m^2 ;沿光导管长度方向,随着轴向位置远离光导管出口壁面热流密度逐渐增大。

(2) 光导管热效应增强了垂直通道对室内空气的抽吸作用,与不考虑热效应的通风系统相比,室内热源和光导管热效应共同作用时自然通风量最高增加了 17.9% ,通道出口处空气平均流速由原来的 0.23m/s 增大至 0.28m/s 。

(3) 随着太阳辐射强度从 200W/m^2 增大至 1000W/m^2 光导管热效应增强,光导通风一体化系统内部浮升力增强,热壁面附近空气温度从 31°C 增加至 53°C ,出口处空气平均速度从 0.23m/s 增加到 0.31m/s 。

参考文献:

- [1] Kai Zhou, Jia-Wei Leng. State-of-the-art research of performance-driven architectural design for low-carbon urban underground space: Systematic review and proposed design strategies[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2023,182:113411.
- [2] 王凡,龙惟定.太阳能光导管采光技术应用现状和发展前景[J].建筑科学,2008,(8):109-113.
- [3] Bruno Malet-Damour, Dimitri Bigot, Stéphane Guichard, et al. Photometrical analysis of mirrored light pipe: From state-of-the-art on experimental results (1990–2019) to the proposition of new experimental observations in high solar potential climates[J]. Solar Energy, 2019,193:637-653.
- [4] AA Elmualim, S Smith, SB Riffat, et al. Evaluation of dichroic material for enhancing light pipe/natural ventilation and daylighting in an integrated system[J]. Applied Energy, 1999,(4):253-266.
- [5] L Shao, SB Riffat. Daylighting using light pipes and its integration with solar heating and natural ventilation[J]. Lighting Research and Technology, 2000,(3):133-139.
- [6] Armando Oliveira, António Silva, Clito Afonso, et al. Experimental and numerical analysis of natural ventilation with combined light/vent pipes[J]. Applied Thermal Engineering, 2001,(18):1925-1936.
- [7] Szabolcs Varga, Armando C Oliveira. Ventilation terminals for use with light pipes in buildings: a CFD

- study[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2000,(18):1743-1752.
- [8] G Oakely, S Smith, SB Riffat, et al. The investigation and monitoring of a combined natural daylighting and stack ventilation system[C]. *Proceeding of World Renewable Energy Congress Vii*, Germany, 2002.
- [9] Thanyalak Taengchum, Surapong Chirarattananon, Robert H B Exell, et al. A study on a ventilation stack integrated with a light pipe[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2013,(1):546-554.
- [10] Sopida Sungsoontorn, Dittha Nonthiworawong, Phadungsak Rattanadecho, et al. Experimental investigation of attic heat gain reduction and indoor illuminance using a light-vent pipe[J]. *International Journal of Heat and Technology*, 2019,37(4):1171-1179.
- [11] Annica M Nilsson, Jacob C Jonsson, Arne Roos. Spectrophotometric measurements and ray tracing simulations of mirror light pipes to evaluate the color of the transmitted light[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2014,124:172-179.
- [12] Darula. Daylight in buildings based on tubular light guides[J]. *Journal of Building Engineering*, 2021,44.
- [13] Omishore Ayodeji, Kalousek Miloš, Mohelnik Petr. Thermal testing of the light pipe prototype[J]. *Faculty of Engineering, University of Rijeka*, 2019,(3):283-291.
- [14] 刘亚南. 地下建筑热压通风多态性研究[D]. 重庆:重庆大学,2020.
- [15] 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,2004,7-11.
- [16] 李仪. 具有自然通风功能的光导管系统通风效果实验研究[C]. 中国工程热物理学会第十一届年会工程热力学与能源利用学术会议,2005.