

长大公路隧道无动力通风系统试验模型的 太阳能集热效率数值模拟

刘 宁¹, 张孙孝², 屈长杰²

(1. 西安长安大学工程设计研究院有限公司, 陕西 西安 710064;

2. 长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710061)

摘 要:为了研究太阳能空气管集热器对隧道自然通风系统强化作用的特性,设计了一种综合利用太阳能、风能的长大公路隧道无动力通风系统的强化集热试验模型。采用基于计算流体动力学的 FLUENT 软件,对试验模型的太阳能空气管集热系统内的温度场进行数值模拟,将太阳辐射强度作为边界条件处理,分析不同辐射强度及不同通风量条件下集热管横截面温度分布、系统进出口温差和集热效率特性的变化。研究结果表明:在系统总风量一定的条件下,集热管进出口温差随太阳辐射强度的增大而增大,集热效率基本不变;在相同的太阳辐射强度与环境条件下,太阳能集热管进出口温差随系统总风量的增大而减小,集热效率随着总风量的增大而增大。太阳能集热器对长大公路隧道自然通风效果有明显的强化作用,但在实际工程应用时,还需要在通风量和集热效率之间进行平衡选择,并对系统整体性能进行综合评估。

关键词:隧道工程;无动力通风系统;数值模拟;太阳能空气集热系统;集热效率

中图分类号:U453.5

文献标志码:A

Numerical simulation of solar collector efficiency for experimental model of unpowered ventilation system in long highway tunnel

LIU Ning¹, ZHANG Sun-xiao², QU Chang-jie²

(1. Xi'an Civil Engineering Design Academy of Chang'an University Co. Ltd., Xi'an 710064, Shaanxi, China;

2. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China)

Abstract: In order to reveal the characteristics of strengthening effect of solar air tube heat collector on natural ventilation system of tunnel, a model of intensified heat collection test for unpowered ventilation system in long highway tunnel to comprehensively use solar and wind energy was designed. The FLUENT software of computational fluid dynamics (CFD) was used to simulate the temperature field in the solar air tube collector system of the experimental model. The solar radiation intensity was treated as the boundary condition. Temperature distribution of the cross section of the collector tube, the temperature difference between inlet and outlet and heat collection efficiency of the system under different radiation intensity and ventilation rate was analyzed. The results show that the temperature difference between inlet and outlet of the

collector increases with the increase of solar radiation intensity and the heat collection efficiency basically remains unchanged under the condition that total air volume is constant. The temperature difference between inlet and outlet of solar collector decreases with the increase of total air volume, and the heat collection efficiency increases with the increase of the total volume under the same solar radiation intensity and environmental condition. Solar collector has an obvious strengthening effect on the natural ventilation of long highway tunnel. But in actual application, it is necessary to make a balance between heat collection efficiency and ventilation volume. The overall performance of system also needs to be assessed comprehensively. 1 tab, 4 figs, 19 refs.

Key words: tunnel engineering; unpowered ventilation system; numerical simulation; solar air collector system; heat collection efficiency

0 引言

通风系统是公路隧道运营和管理中的重要环节,其目的是降低隧道内有害气体或污染物的浓度,保证汽车的安全通行。现阶段,中国需要通风的长大隧道不断增加,但大多数长大隧道采用竖井分段式纵向通风方式^[1-2],其耗电量较大,给隧道的运营和管理带来了沉重的经济负担。为了降低运营和管理成本,低耗能的自然通风方式日益受到关注。曾艳华等采用回路自然风压理论对有竖井公路隧道自然通风的风压状况进行了理论研究^[3];王光辉等指出长大隧道自然通风的产生原因为两洞口的超静压差及热位差^[4];于燕玲等对在冬季利用自然风稀释排污隧洞内有害气体(H_2S)浓度的理论可行性进行了研究^[5];吕康成给出了公路隧道中自然风压的计算公式,得出自然通风阻力为 $10\sim 30\text{ Pa}$ ^[6];肖益民建立了基于网络模型的自然通风模拟方法^[7];王荣科比较了隧道内交通对通风效果及空气质量的影响^[8];郑晖等对终南山公路隧道实际工程机械通风系统进行了监测,分析了自然风压和交通风压对运营的节能效应^[9]。以上研究主要集中于利用竖井进行自然通风和隧道两洞口超静压差及热位差产生的自然通风及其对隧道通风的影响,未涉及将竖井通风和隧道外丰富的自然(太阳能和风能)资源结合利用以增强隧道自然通风效果。长大公路隧道常位于太阳能、风能资源丰富的山区,若能充分利用自然能源,必将产生良好的经济和环境效益。

为此,本文设计了一种综合利用太阳能、风能,实现隧道无动力通风系统的试验模型,利用计算流体力学(CFD)方法对模型空气管太阳能集热性能及效率进行数值模拟,着重分析风量和太阳辐射强度与系统集热效率的相关性,以期使用无动力通风

的长大公路隧道实际工程优化设计的可行性评估和预测提供依据。

1 太阳能空气集热系统模型

1.1 试验模型

无动力通风系统试验模型如下页图1所示,模型由通风管道、太阳能空气集热系统和负压抽风系统组成。试验模型的通风管道为锥形钢管,通风管道的主要功能有2个:为气体流动提供通道;利用烟囱效应进行拔烟、抽气,提供实现自然通风的条件。烟囱抽风的原理是利用热压差使热空气上升,进出口的高差、空气温差越大则热压作用越明显,热空气上升越快,气体流动速度越快,通风效果就越好。烟囱效应的热压是由烟囱进出口空气温差和密度差引起的,与烟囱入口和出口在垂直方向上的距离以及烟囱进出口空气温度差成正比^[10-12]。若忽略外界和烟囱管壁的自然对流,假设烟囱内温度呈线性变化,则烟囱产生的热压 P_s 为

$$P_s = -\rho_0 g h \left(1 - \frac{T_o}{T_i} \right) \quad (1)$$

式中: T_o 为外界环境温度; T_i 为构筑物空气进口温度; ρ_0 为室外空气密度; g 为重力加速度; h 为两端高差。

太阳能空气集热系统有3个构件:太阳能空气集热管、支架和导热管。其中集热管倾斜安装于支架上,集热管与通风管通过导气管连接。集热管中的空气加热后,经导气管流入通风管,最后由负压抽风系统的叶轮排出,加热的空气使通风管道进出口温差增大,增加了管道内的热压差,强化了通风管道的烟囱效应,同时又能驱动负压抽风系统叶轮的旋转^[13]。负压抽风系统设置在通风管道顶部,由3片叶轮组成,当热空气从通风管道顶部经3片叶轮流时,流量不变,断流截面面积减小,流速增大。由

伯努利方程可知,流体总压强不变,流速增大时,流体的静压力减小,使通风管道顶部空气变得稀薄,通风管道底部的空气由于气压差补偿迅速上升,从而加快气流速度,提高系统的通风效率^[14],即

$$p+\frac{1}{2}\rho v^2=C\tag{2}$$

式中: p 为通风管道流体压强; ρ 为气流密度; v 为流体速度; C 为常数。

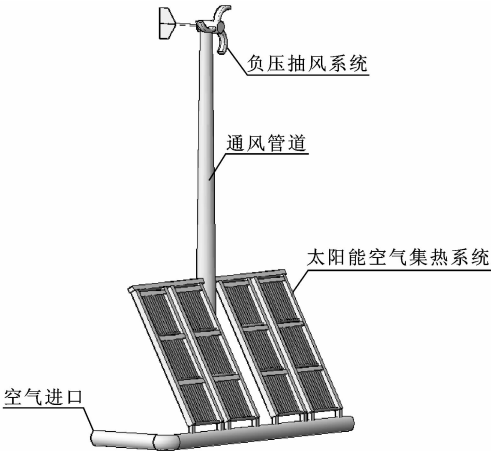


图1 无动力通风系统试验模型

Fig.1 Experimental model of unpowered long highway tunnel ventilation system

1.2 物理模型

无动力通风系统试验模型的太阳能空气集热系统由 180 根太阳能空气集热管组成,集热管倾斜 60° 安装。由于空气集热管并联设置,取其中 1 根空气集热管作为研究对象。图 2 为太阳能空气集热管的物理模型,由玻璃外管和锌插管组成。集热管材料的热物理性质如表 1 所示。玻璃外管长 1 800 mm,外径 58 mm;锌插管外径 22 mm,距玻璃外管底部 100 mm。空气从锌插管进入玻璃管,然后从玻璃管与锌管间的环形间隙流出。

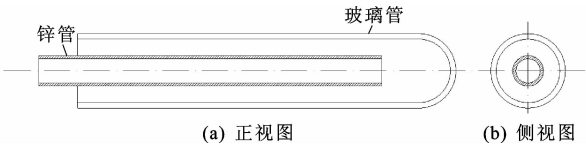


图2 内插式太阳能空气集热管的物理模型

Fig.2 Physical model of inserted solar air collector tube

表 1 材料的热物理性质

Tab.1 Thermophysical properties of material

材料	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	比热容/ [$\text{kJ}\cdot(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})^{-1}$]	导热系数/ [$\text{W}\cdot(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})^{-1}$]	黏性系数/ ($\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}$)
玻璃管	2 550.00	0.779	1.200	
锌管	7 140.00	419.000	116.000	
空气	1.27	1.009	0.027	0.000 018 6

1.3 数学模型

本文模型假设:①由于长大公路隧道通风时,空气温度及压强在一定范围内变化不大,因而假定集热管内的流体不可压缩^[15];②集热管长度相对于管径很长,所以忽略流体轴向导热;③管壁很薄,忽略管壁热阻;④由于空气流速较快,速度和温度交换发展很快,所以将流动和换热按充分发展处理^[16]。

1.4 数据处理

采用 CFD 的 FLUENT 软件对太阳能集热管内的流体进行数值模拟,以离散化的数值计算方法为依据,对流体在不同边界条件的内、外流场进行数值流动模拟与研究分析,通过有限差分法、有限元法和有限体积法进行详细的数值求解^[18]。将 FLUENT 软件输出结果导入 CFD Post 软件中提取各项数据,获得不同风速和辐射强度下太阳能空气集热管出口的空气平均温度。太阳能空气集热管的空气质量流量、集热量和集热效率计算公式为^[19]

$$\dot{m}=\rho_p F \bar{v}\tag{3}$$

$$Q=\dot{m} C_p \Delta T\tag{4}$$

$$\eta=\frac{Q}{Q_a}\tag{5}$$

式中: \dot{m} 为集热管空气质量流量; \bar{v} 为集热管空气的平均流速; F 为集热管内插管进口有效截面面积; ρ_p 为空气密度,取 1.27 kg/m^3 ; C_p 为空气定压比热容,取 $1.009\text{ kJ}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$; ΔT 为集热器进出口空气温差; Q_a 为集热管接收的辐射热量; Q 为集热热量; η 为集热效率。

2 数值模拟结果及分析

2.1 不同季节下太阳能空气集热管的工作效率

为研究不同季节下太阳能空气集热管的工作效率,在总风量为 $1\ 080\text{ m}^3/\text{h}$ 的工况下,模拟试验模型在西安地区 2016 年 1 月 25 日集热管出口温度分布,结果如下页图 3(a)所示。分别模拟了 2016 年 3 月 25 日、7 月 25 日、11 月 25 日集热管出口温度分布,并进行了对比分析,集热管进出口温差和集热管集热效率对比如图 3(b)、(c)所示。由图 3 可知:在晴空指数为 1 且风量相同的条件下,集热管进出口温差随太阳辐射强度的增大而增大,约 12:00 达到最大值;1 月份的集热管进出口日平均温差最低,7 月份的最大;随太阳辐射强度的变化,集热管集热效率变化不大,平均效率为 $55\%\sim 65\%$ 。当晴空指数小于 1 时,虽然太阳辐射强度减小,但集热管进出口温差和集热效率与晴空指数为 1 时的变化趋势是一致的。

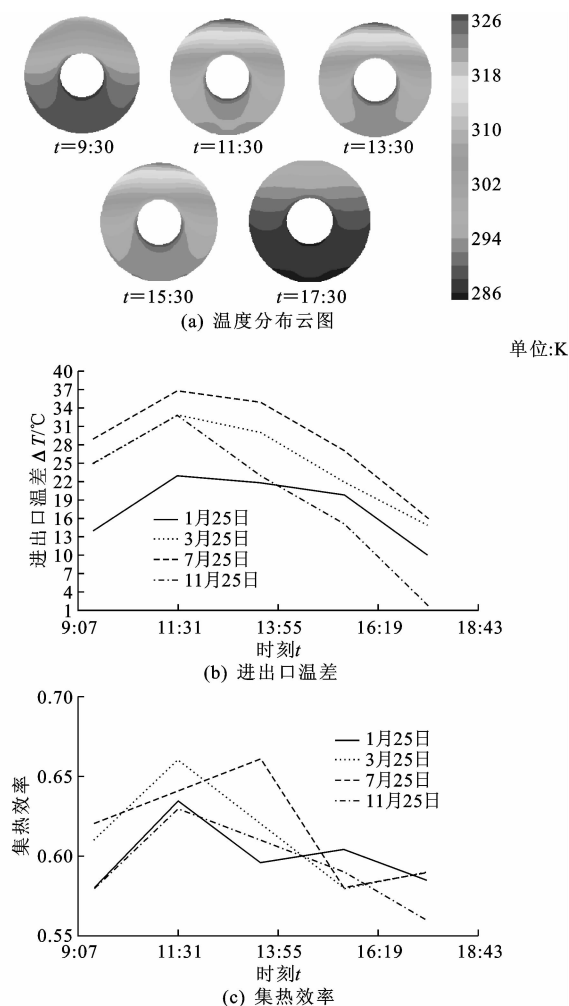


图 3 集热管进出口温差和集热效率随时间的变化

Fig. 3 Temperature difference and collector efficiency of inlet and outlet changes with time

2.2 不同风量下太阳能空气集热管的工作效率

为研究不同风量工况下太阳能空气集热管的工作效率,模拟试验模型在西安地区空气集热系统总风量 q 分别为 540、720、900、1 080、1 260 m^3/h 工况下集热管的出口温度分布,见图 4(a),并计算集热管进出口温差和集热管工作效率,如图 4(b)、(c)所示。由图 4 可知:集热管进口温度为 $12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 且晴空指数为 1 时,在相同的辐射强度与环境条件下,太阳能空气集热管的进出口温差随总风量的增大而减小;集热效率随着总风量的增大而增大,其原因可能是总风量越大,空气流速越大,单位时间得到的热量降低,但空气的传热系数却提高了。当集热效率增大到约 65% 时,其效率增量变小,曲线变缓。当晴空指数小于 1 时,虽然太阳辐射强度减小,但集热管进出口温差和集热效率与晴空指数为 1 时的变化趋势是一致的。由此可知,综合考虑送风温差与集热器集热效率,选择适宜的进风量,可以获得较好的集热效果。

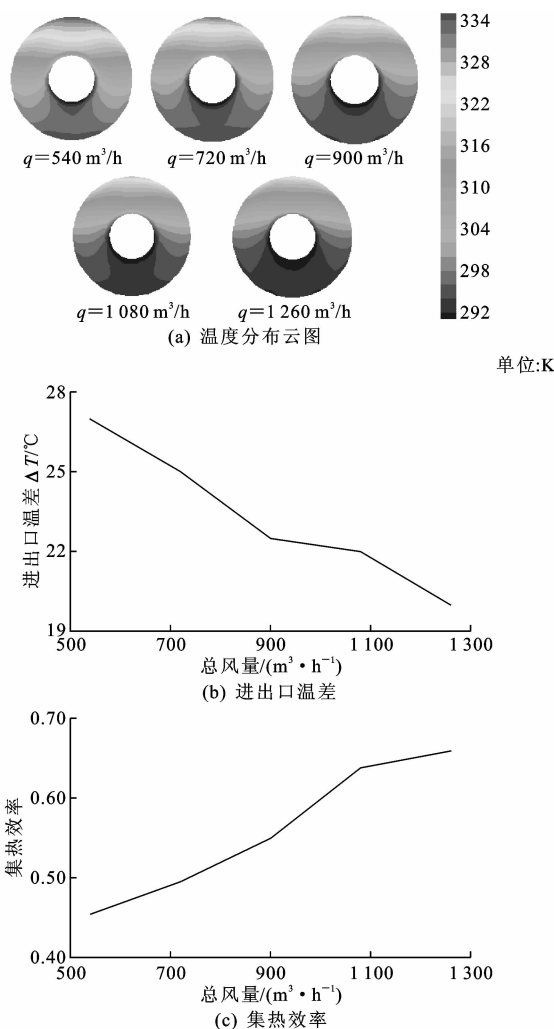


图 4 总风量对集热管进出口温差和集热效率的影响

Fig. 4 Effect of total wind amount on collector efficiency and temperature difference of inlet and outlet

3 结 语

(1) 本文数值模拟研究的太阳能集热系统在风量一定的条件下,其集热效率随时间的变化不大,平均集热效率为 55%~65%。

(2) 相同太阳辐射强度与环境条件下,太阳能空气集热管的进出口温差随总风量的增大而减小,集热效率随总风量的增大而增大。

(3) 在实际长大公路隧道无动力通风系统工程中,应综合考虑送风温差与集热器的集热效率,选择适宜的进风量,并综合评估系统的集热效果与节能效应,以同时获得较好的经济性能。

(4) 本文仅对太阳能集热系统试验模型进行了数值模拟,下一步还需进行实际试验验证,将试验结果与数值模拟结果进行对比分析,并将模型进行整体系统性模拟,以指导无动力通风系统在实际隧道

通风工程中的应用。

参考文献:

References:

- [1] 杨超, 王志伟. 公路隧道通风技术现状及发展趋势[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(4): 819-824.
YANG Chao, WANG Zhi-wei. Current status and development trend of ventilation technology for highway tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 7(4): 819-824.
- [2] 张铭鑫, 张振宇. 公路隧道竖井纵向式通风探讨[J]. 科技情报开发与经济, 2005, 15(6): 288-289.
ZHANG Ming-xin, ZHANG Zhen-yu. Probe into the longitudinal ventilation of the vertical shaft of the highway's tunnels[J]. Sci-Tech Information Development & Economy, 2005, 15(6): 288-289.
- [3] 曾艳华, 何川, 关宝树. 有竖井隧道自然风压的研究[J]. 地下空间, 2003, 23(1): 69-71.
ZENG Yan-hua, HE Chuan, GUAN Bao-shu. Research on natural ventilation in tunnel with vertical shaft[J]. Underground Space, 2003, 23(1): 69-71.
- [4] 王光辉, 李治国, 周镕义. 圆梁山隧道贯通后自然通风的研究[J]. 隧道建设, 2004, 24(5): 28-30.
WANG Guang-hui, LI Zhi-guo, ZHOU Rong-yi. Study on natural ventilation of Yuanliangshan Tunnel holing-through[J]. Tunnel Construction, 2004, 24(5): 28-30.
- [5] 于燕玲, 由世俊, 张欢, 等. 狭长排污隧洞冬季自然通风的研究[J]. 地下空间与工程学报, 2006, 2(3): 480-484.
YU Yan-ling, YOU Shi-jun, ZHANG Huan, et al. Natural ventilation in the long and narrow sewer tunnel in winter[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006, 2(3): 480-484.
- [6] 吕康成. 公路隧道运营管理[M]. 北京: 人民交通出版社, 2006.
LU Kang-cheng. Highway tunnel operation management [M]. Beijing: China Communications Press, 2006.
- [7] 肖益民. 水电站地下洞室群自然通风网络模拟及应用研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2005.
XIAO Yi-min. Studies on natural ventilation network simulation and application of the underground excavation cluster of hydropower station [D]. Chongqing: Chongqing University, 2005.
- [8] 王荣科. 长距离公路隧道通风方式及空气品质优化研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2010.
WANG Rong-ke. Research on the ventilation methods and air quality optimization of the long highway tunnel [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2010.
- [9] 郑 晷, 郭佳奇. 终南山公路隧道非机械式通风效果研究[J]. 中国工程科学, 2010, 12(3): 39-44.
ZHEN Xuan, GUO Jia-qi. Research on non-mechanical ventilation effect in Zhongnanshan Road Tunnel [J]. Engineering Sciences, 2010, 12(3): 39-44.
- [10] BANSAL N K, MATHUR R, BHANDARI M S. Solar chimney for enhanced stack ventilation[J]. Building and Environment, 1993, 28(3): 373-377.
- [11] ARCE J, JIMÉNEZ M J, GUZMÁN J D, et al. Experimental study for natural ventilation on a solar chimney[J]. Renewable Energy, 2009, 34(12): 2928-2934.
- [12] 赛娜. 超高层建筑在“烟囱效应”作用下的压差分布特性研究[D]. 天津: 天津商业大学, 2012.
SAI Na. Characteristics of pressure distribution caused by stack effect in high-rise buildings [D]. Tianjin: Tianjin University of Commerce, 2012.
- [13] HAGHIGHI A P, MAEREFAT M. Solar ventilation and heating of buildings in sunny winter days using solar chimney [J]. Sustainable Cities and Society, 2014, 10: 72-79.
- [14] 王崇杰, 管振忠, 薛一冰, 等. 渗透型太阳能空气集热器集热效率研究[J]. 太阳能学报, 2008, 29(1): 35-39.
WANG Chong-jie, GUAN Zhen-zhong, XUE Yi-bing, et al. Simulation study on unglazed transpired solar air collector [J]. Acta Energlae Solaris Sinica, 2008, 29(1): 35-39.
- [15] JTJ 026—90, 公路隧道设计规范[S].
JTJ 026—90, Design specification for highway tunnel [S].
- [16] 杨 莱, 周 方, 赵 婷, 等. 管内变密度流体流动与换热的充分发展及解析解[J]. 工程热物理学报, 2008, 29(7): 1199-1201.
YANG Mo, ZHOU Fang, ZHAO Ting, et al. Analytic solution of fully developed flow and heat transfer for variable density fluid in tube [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2008, 29(7): 1199-1201.
- [17] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1988.
TAO Wen-quan. Numerical heat transfer [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1988.
- [18] 严导淦. 流体力学中的总流伯努利方程[J]. 物理与工程, 2014, 24(4): 47-53.
YAN Dao-gan. The total flow Bernoulli equation in fluid mechanics [J]. Physics and Engineering, 2014, 24(4): 47-53.
- [19] 张 涛, 闫素英, 田 瑞, 等. 全玻璃真空管太阳热水器数值模拟研究[J]. 可再生能源, 2011, 29(5): 10-14.
ZHANG Tao, YAN Su-ying, TIAN Rui, et al. The numerical simulation study of all-glass evacuated tube solar water heater [J]. Renewable Energy Resources, 2011, 29(5): 10-14.