

文章编号: 1671-6612 (2023) 03-382-05

一侧出口受限的地下隧道自然通风散热数值研究

何 龙

(贵阳市公共交通投资运营集团有限公司 贵阳 550000)

【摘 要】 随着我国地铁和公路的不断发展,隧道逐渐成为连接城市交通动脉不可缺少的角色。自然通风散热作为最经济的一种散热形式,在各类场合中均得到了最大程度的利用。针对一侧出口受限的内存在发热源的地下隧道自然通风散热的进行了数值模拟分析,并对其温度场和速度场进行了描述。结果表明:在一侧受限的地下隧道中,一个独立热源距离入口面距离较大时,更有利于隧道内热量由入口处向外扩散;隧道内有两个独立热源时,功率比与高度比的变化对隧道内自然通风情况下的对流传热均有不同程度的影响。

【关键词】 隧道通风;自然通风;流固耦合;数值模拟

中图分类号 TU96+2 文献标识码 A

Numerical Study on Natural Ventilation and Heat Dissipation of Underground Tunnels with Limited Exits on one Side

He Long

(Guiyang Public Transportation Investment and Operation Group Co., Ltd, Guiyang, 550000)

【Abstract】 With the constant development of subway and highways in our country, tunnels have gradually become the indispensable role of connecting the urban traffic artery. Natural ventilation heat dissipation, as the most economical form of heat dissipation, has been used to the greatest extent in all kinds of occasions. In this paper, the numerical simulation of natural ventilation and heat dissipation in an underground tunnel with a limited outlet on one side and an internal heat source are carried out, and the temperature and velocity fields are described. The results show that when the distance between an independent heat source and the entrance surface is larger, the heat in the tunnel is more conducive to the outward diffusion from the entrance. When there are two independent heat sources in the tunnel, the change of power ratio and height ratio has different influence on the natural ventilation and heat dissipation of the tunnel.

【Keywords】 Tunnel ventilation; Natural ventilation; Fluid-structure coupling; Numerical simulation

0 引言

针对全球变暖这一严峻问题,我国明确提出了“双碳”政策。但在各类大型隧道中,相对封闭的环境对于散热有着一定的要求。在所有散热措施中,自然对流散热无疑成为最绿色环保的散热措施,在必要的情况下可以有效根据外部环境的情况进行有效散热。郭孝峰^[1]针对有输电线路的电力隧道的散热进行的实验和数值研究,给出了一种具体的优化通风方案,具有一定的参考意义;杨冬^[2]等

以红河州尼格隧道散热为背景,通过实测和模拟相结合的方式对隧道自然通风散热进行的分析,认为阴阳坡与纵坡会影响所带来的温差和风速会影响隧道内的降温幅度;梅方晨^[3]采用 SES 软件对济阳某有轨电车的隧道通风系统分正常工况和事故工况进行了各个参数的验证,确立了控制模式的可靠性;曾臻^[4]等以沙坪坝站为研究对象,搭建自然通风模型实验台,通过分析设立的各工况实验数据,认为合理设置车站出入口的数量可以有效利用自

作者(通讯作者)简介:何 龙(1991.3-),男,本科,机电工程师,E-mail:heweiwudi@foxmail.com

收稿日期:2023-02-06

然风量进行节能,并对过渡季节通风系统的运行设计提供了依据;胡康^[5]等采用计算流体力学软件对带有电缆的地下隧道的通风散热效果进行分析,提出增强散热效果不仅依靠通风系统,也应调整隧道内电缆的布置位置的建议;陈柳^[6]等通过实验分析了壁温、风速和入口温度等因素对传热系数的影响,并分析得出了矿井巷道对流换热的实验关联式;针对地下隧道的通风系统,工程师和专家们通过模拟和实验针对两端均有开口的地下隧道以及地铁站等进行了实测和模拟来分析通风散热的效果,而针对一侧受限的隧道内的自然通风相关研究较少,如在建隧道,有障碍物的地下管廊等,且除强迫对流换热外,自然通风散热应用效果与方式待进一步研究,本文以实际情况为背景,建立了一侧受限的圆柱断面隧道的三维模型,研究在自然通风条件下,其内部存在发热源时的对流传热的规律。

1 研究方法

1.1 基本假设

针对一侧出口受限的隧道内自然通风条件下的对流传热问题,本文设置的物理模型如图 1 所示,隧道几何模型为一水平放置的圆桶形腔体,且一侧竖直壁面与大气相连,内部根据实际条件设置不同的热源,腔体壁面为刚性壁面,且满足无滑移边界条件,隧道断面直径为 $D=7\text{m}$,高为 $H=15\text{m}$,内置热源长为 l ,宽为 w ,高为 h ,热源中心与开口距离为 d ,对于自然对流传热问题,其空气的密度必然为可变的,所以选用最为广泛应用的标准 $k-\varepsilon$ 模型,可靠且收敛性好。

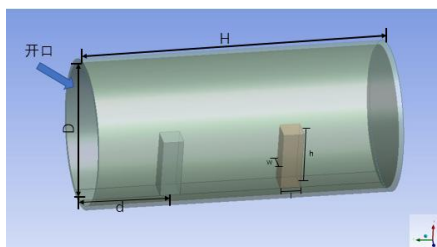


图 1 物理模型

Fig.1 Physical model

1.2 计算域与网格划分

首先,在建模过程中,固体与空气域应采用布尔运算减法进行分离,才能够保证在 Mesh 中热源与空气流固耦合面的建立,并将各热源的物理模型与空气域的物理模型合并为同一部分,在本次开口

模型的绘制过程中,将其放置于一个十倍自身的空气域中。

其次,划分网格时,对流体部分网格与固体部分网格进行了分批次划分,如此保证进入 FLUENT 后流体与固体可被识别为不同区域,由于 FLUENT 可自定义 wall 和 wall shadow 双面网格,所以这两部分区域的网格的交界可不共节点,从而计算时可分属不同的区域,用导热方程对固体区域进行求解,用连续性方程、动量方程和能量守恒方程对流体区域进行求解。

为提高计算精度,又能节省计算时间,对体积较小的热源采用结构化网格划分,针对隧道壁面及外部空气区域采用非结构化网格划分,网格由内向外依次变疏,如图 2 所示。

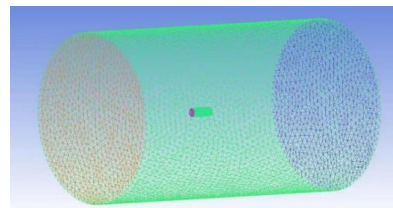


图 2 网格划分示意图

Fig.2 Grid diagram

针对同一工况选择了不同的网格数进行了数值研究,并监测了隧道入口处圆心温度,结果如表 1 所示,最终选择数值计算的网格数为 878148。

表 1 网格无关性验证

Table 1 Grid independence verification

网格数	圆心温度/K
462 664	302.126
718 404	302.216
878148	302.133
101 9800	302.159

1.3 边界条件与初始条件

热源设置为源项,壁面设置为第三类边界条件,开口处与外部空气连接,与空气接触的壁面设置为耦合壁面,开口面设置为压力出口,绝对压力设置为大气压,柱形隧道内初始条件为: $F=0$, $U=V=W=0$,热源表面为恒热流密度加热,初始温度为 300K。

1.4 求解器设置与收敛条件判断

$N-S$ 方程的高度非线性会导致求解过程的不稳定,对于自然对流换热的计算,本文的空气模型选择了 Boussinesq 假设模型,在一定程度上进行了简

化,在空气密度变化非常小的同时,保留浮升力项的密度差带来的驱动力,即在重力项的计算中只保留密度随着温度的变化,重力方向为 y 轴负方向,取 $g=-9.8\text{m/s}^2$ 。

进入 FLUENT 计算之前,需打开双倍精度模式,以适应自然对流中密度和温度变化非常小的情况,热膨胀系数 α 设置为 0.0035 , $Pr=0.7$,随后进行非稳态计算 30s ,选择一阶时间隐式格式,根据时间步起始时刻的温度速度迭代计算处时间步终了时刻的温度速度,选取时间步长为 1s ,一个时间步内迭代计算 20 次,残差设置为 1e^{-8} ,保证一个时间步内必须迭代至 20 次,得到在此时间步内的真解。

2 模拟结果与分析

2.1 独立热源对隧道自然散热的影响

2.1.1 温度与速度云图

如图 3 所示,隧道的几何尺寸为 $H=15\text{m}$, $D=7\text{m}$,热源尺寸为 $l=1\text{m}$, $w=1\text{m}$, $h=3\text{m}$,工况 I、II、III 热源与入口面的距离分别为 $d=4\text{m}$, $d=7\text{m}$, $d=10\text{m}$,热源功率设置为 0.3W/cm^2 ,截取 $t=10\text{s}$ 时的速度云图及温度云图,如图 3 所示,热源周围被加热的空气先到达隧道顶部后向周围扩散,在入口处冷空气从入口处下方流入,热空气从隧道顶部流出,流出后因隧道外冷空气黏滞力的阻挡,流速逐渐降低。随着 d 的增加,热源上方高温区域逐渐变大,入口处空气流速降低,封闭侧空气温度变高,自然对流换热的程度更加剧烈。

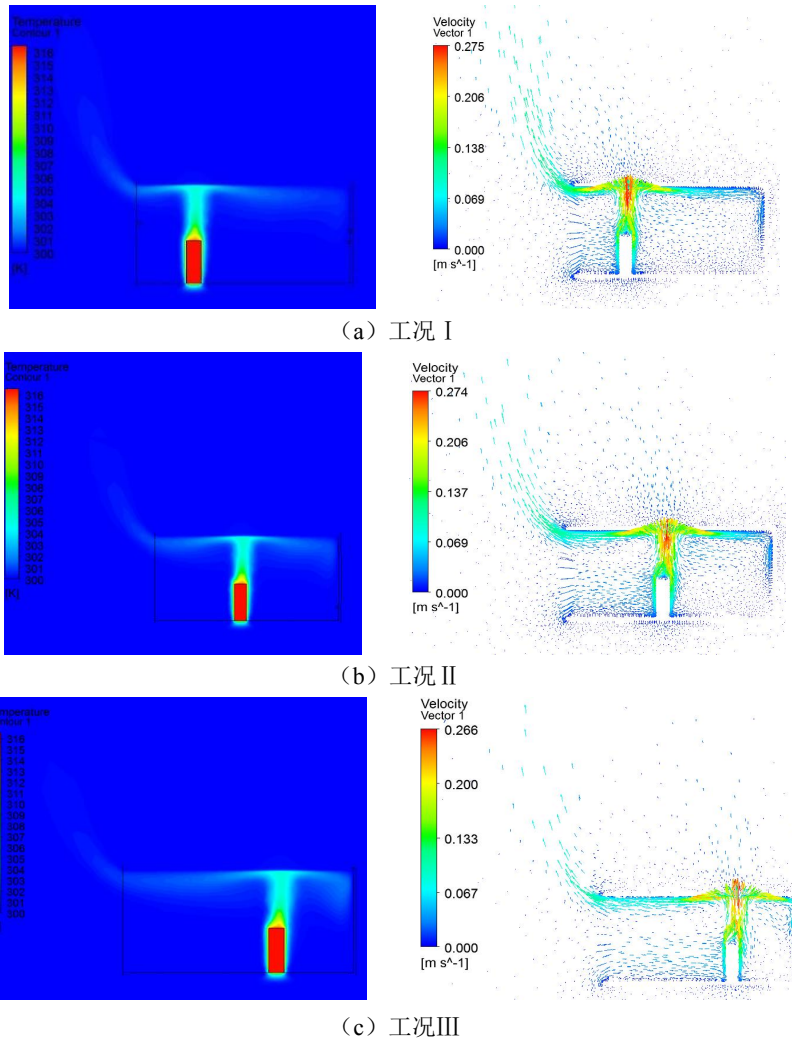


图 3 热源与入口距离不同时隧道内 xy 截面温度分布云图与速度矢量图

Fig.3 Temperature distribution nephogram and velocity vector diagram of xy section in tunnel with different distance between heat source and inlet

2.1.2 入口处散热量分析

为了更直观的比较自然对流换热的程度，计算过程中对隧道入口面的传热量进行了监测，并对其占总传热量的比例进行了对比分析，如图 4 所示。在散热刚开始发生时，工况 I 与工况 II 的壁面散热稍有延迟，随着时间的推移，封闭侧与入口侧处热量增加。对于隧道自然通风对流换热，入口处传热量比重的增大表明散热优势的增加。工况 III 入口处传热量占比对比工况 I、II 在 15s 之内稍显弱势，后由于隧道内空气流速逐渐加快，增长幅度快速提高并超越工况 I、II，散热逐渐以入口处对流换热为主，但由于前期占比不占优势，热量更多的积聚于壁面，实际情况中可在此前期时间内进行强迫对流辅助散热，更有利于热量的发散。

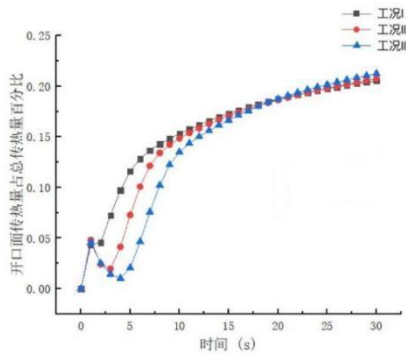


图 4 各工况入口面传热量占总传热量百分比随时间变化图

Fig.4 The percentage of inlet surface heat transfer in total heat transfer over time

2.2 双热源对隧道自然散热的影响

在讨论隧道内仅有单独热源的自然散热情况后，针对隧道内热源分散，且热源几何尺寸大小和功率不同的情况继续进行了模拟计算。

2.2.1 热源高度比不同时隧道入口处散热对比分析

在本次数值计算中，模型设置了三种工况，隧道与热源几何尺寸与 2.1.1 相同，隧道内设有两个热源，靠近入口处的热源与入口距离 $d=4m$ ，两热源间距为 $5m$ ，隧道内入口侧热源与封闭侧热源高度比为 1:2 和 2:1 以及 1:1 分别为工况 I、工况 II、工况 III，由图 5 可见，随着时间推移，三种情况入口处散热能力均呈稳步增长趋势，在 $\tau=30s$ 时，工况 I 入口处散热量占比为 37.9%，对比工况 III 入口处散热量占比增长 28%，入口处散热量占比增长幅度明显占有优势，此时的隧道内其他壁面负担的热

量更小，热量从入口处集中发散的越多，隧道内部积聚热量减少，可有效延长各发热元件的寿命。

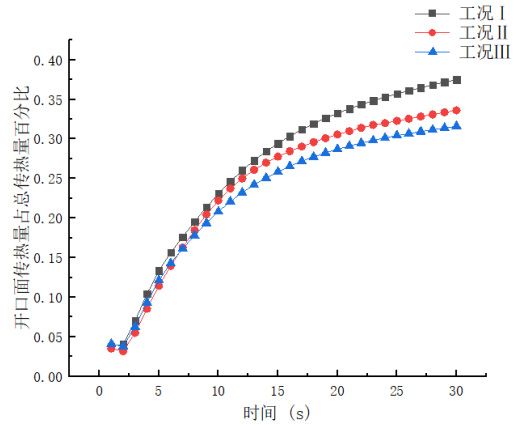


图 5 各工况入口面传热量占总传热量百分比随时间变化图

Fig.5 The percentage of inlet surface heat transfer in total heat transfer over time

2.2.2 热源功率比不同隧道入口处散热对比分析

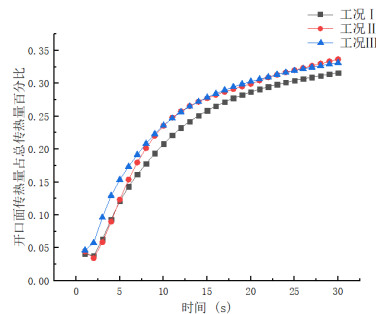


图 6 各工况入口面传热量占总传热量百分比随时间变化图

Fig.6 The percentage of inlet surface heat transfer in total heat transfer over time

针对 2.2.1 小节中的工况 III，本小节对模型进行了热源功率的调节，继而观察隧道入口面自然通风对流换热的强弱。本次计算设置了三种工况，隧道与热源几何尺寸与 2.1.1 节相同，高发热量热源功率设置为 $0.6W/cm^2$ ，低发热量热源功率设置为 $0.3W/cm^2$ ，隧道内入口侧热源与封闭侧热源功率比为 1:1 和 1:2 以及 2:1 分别为工况 I、工况 II、工况 III。如图 6 所示，工况 III 在 $\tau=10s$ 内入口处散热量占比最大，在 $\tau=10s$ 后由于热量的增加，空气流速加快，工况 II 入口处散热量逐渐增加至与工况 III 相同，在 $\tau=30s$ 时，工况 II 入口处散热量占比为 33.2%，对比工况 I 入口处散热量占比增长 14%，

且工况 II、III 相对于工况 I 均有明显的优势,说明隧道内热源发热功率不同时,可以提高入口处对隧道内的热量传递效率,且改变热源位置对最终入口处散热量占比影响不大,但工况 II 对比工况 III 在 10s 内由入口散失热量占比较小,存在热量积聚的现象,前期隧道内热量与工况 I 相同均为隧道壁面承担,不利于各发热元件的散热,则工况 III 自然对流传热效果最佳。

3 结论

本文通过对一侧受限的隧道自然通风情况下对流传热进行了模拟计算,观察了温度场与速度场的分布规律,并对通过入口面的散热量进行了分析,结论如下:

(1) 一侧受限的隧道内入口处形成了热空气从入口处顶部流出,冷空气从底部流入的散热形式,且随着 d 的增加,在入口处的冷热空气的换热程度会更加剧烈;

(2) 通过对隧道入口面的传热量进行监测,由于热量充分扩散,入口面空气自然对流传热变得更加剧烈,工况 III 的入口面传热量占比随着时间的增加逐渐增大。

(3) 当隧道内有双热源散热时,改变两个热源的高度和功率都会影响入口处热量的传递,在热源高度比发生变化时,工况 I 入口处散热量占比随

时间变化趋势明显优于其他两种工况,且工况 I 与工况 III 对比,入口处散热量占比增长 28%,能有效减轻壁面热量负担;

(4) 当热源功率比发生变化时,工况 II 与工况 III 隧道入口面的散热量占比在 10s 后变化趋势相近,且明显优于工况 I,其中工况 III 对比工况 I 入口处散热量占比增长 14%,但由于工况 II 在前期入口处散热量较工况 III 小,存在热量积聚的现象,则工况 III 为最佳工况。

参考文献:

- [1] 郭孝峰.埋地电力隧道温度特性的数值模拟与试验研究[D].上海:上海交通大学,2010.
- [2] 杨冬,蒋树屏,黄锋,等.自然通风下高温隧道的热气流特征[J/OL].铁道科学与工程学报,[2023-01-18]:1-11.
- [3] 梅方晨.现代有轨电车地下区间隧道自然通风口参数研究[J].暖通空调,2022,52(S2):140-145.
- [4] 曾臻,肖益民,渠永通,等.地铁车站自然通风模型实验研究[J].都市轨道交通,2022,35(3):123-128.
- [5] 胡康,赵德宁,吴劲松,等.地下电力电缆隧道通风系统的模拟计算[J].电力勘测设计,2020,(6):55-60.
- [6] 陈柳,薛韩玲.高温矿井巷道风流对流换热相似实验研究[J].金属矿山,2017,(7):155-159.
- [7] 唐家鹏.ANSYS FLUENT 16.0 超级学习手册[M].北京:人民邮电出版社,2016.
- [8] 马福东,王婷,彭斌,等.复杂深埋地下高铁车站站台及通道空气动力学效应模拟及设计对策选定[J].铁道标准设计,2020,64(1):40-44.
- [9] 刘俊,车轮飞.高速模式下地铁隧道空气动力学效应断面优化分析[J].暖通空调,2016,46(5):1-6,16.
- [10] 徐世南,张继业,熊骏,等.地铁列车通过隧道时的气动性能研究[J].城市轨道交通研究,2016,19(9):99-104.
- [11] 高伟,林剑洋,雷波,等.列车在城际铁路地下段越行过站时的屏蔽门气动压力变化规律[J].城市轨道交通研究,2022,25(8):52-55.
- [5] KU Y C, RHO J H, YUN S H, et al. Optimal cross-sectional area distribution of a high-speed train nose to minimize the tunnel micro-pressure wave[J]. Structural & Multidisciplinary Optimization, 2010,42(6): 965-976.
- [6] 王英学,高波,赵文成,等.高速列车进出隧道空气动力学特征模型实验分析[J].流体力学实验与测量,2004,(3):73-78.
- [7] 赵晶.高速列车通过隧道时气动影响研究[D].成都:西南交通大学,2011.

(上接第 348 页)