

隧道迎头区温度计算及数值模拟

夏卫东,刘何清*,杨恩慧

(湖南科技大学 资源环境与安全工程学院,湖南 湘潭 411201)

摘要:为研究施工隧道内空气温度变化规律,基于热平衡方程建立稳定状态下隧道迎头区域内温度计算数学模型,利用数值模拟软件与温度计算模型结果进行对比并对模型进行修正.结果表明:空气温度计算值与模拟值最大相对误差为5.96%,修正后为1.73%,温度计算数学模型可以用于计算不同工况下迎头区域内空气平均温度;围岩温度、送风量会对隧道内温度产生影响,随着送风时间的增加,迎头区域内空气温度先增加然后达到稳定状态;围岩温度每上升5℃,空气平均温度上升1℃左右,不同围岩温度下空气温度变化速率基本一致;风量由20 m³/s增加至30 m³/s时,降温作用显著,之后随着风量增加,降温幅度降低.

关键词:施工隧道;迎头区域;温度计算;数值模拟

中图分类号:X936 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2021)04-0060-07

On Temperature Calculation and Numerical Simulation of Tunnel Head Area

XIA Weidong, LIU Heqing, YANG Enhui

(School of Resources, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: In order to study the variation law of air temperature in tunnel, a mathematical model of temperature calculation in the tunnel head area under stable state is established based on the heat balance equation. The accuracy of the temperature calculation model is verified by numerical simulation software and the model is modified. Results show that the maximum relative error between the calculated air temperature and the simulated value is 5.96%, which is changed to 1.73% after adding additional items. The mathematical model of temperature calculation can be used to calculate the average air temperature in the head-on area under different working conditions. The temperature in the tunnel is affected by the surrounding rock temperature and air supply volume. With the increasing of air supply time, the air temperature in the heading area increased first and then reached a stable state. When the surrounding rock temperature rised by 5℃, the average air temperature is raised by about 1℃. The change rate of air temperature under different surrounding rock temperatures is basically the same. When the air volume increases from 20 m³/s to 30 m³/s, the cooling effect is significant, and then the cooling range decreases with the increase of air volume.

Keywords: construction tunnel; head-on area; temperature calculation; numerical simulation

随着国内经济的不断发展和科技的日益成熟,我国修建隧道的数量不断增多.在施工过程中,人们越来越重视隧道内人员工作的舒适性和安全性,施工通风问题也越来越引起重视.因此,为满足通风需求,确定合适的通风方案,有必要对施工隧道内的温度场分布规律进行分析.对此,科研学者已经有了相关研究成果.王仁远等^[1]以正盘台隧道为研究对象,应用现场实测数据与ANSYS软件结合求解隧道内温度场,结

收稿日期:2021-04-13

*通信作者,E-mail:hqliu8222638@163.com

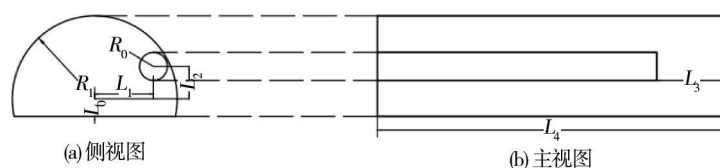
果表明隧道内围岩的初始温度是影响整体温度场的关键因素;杨勇^[2]对川藏铁路高温段施工通风温度场进行研究,结果表明在 120 min 后,通风速度对隧道内温度影响不大,通风温度发生变化时会影响隧道内的气温、壁面温度和低温范围;何青青^[3]以高温特长隧道为研究对象,分析不同送风参数下隧道内温度变化情况,研究表明隧道壁面温度会随着通风时间的增大逐渐趋于稳定,在稳定阶段时隧道出口位置的平均温度变化很小,不同的送风参数会改变射流的运动方式,进而形成不同的温度分布;貂祖国^[4]对新疆某高地隧道温度变化特性进行研究,结果表明掌子面处温度较高,洞口温度较低,从洞口到掌子面,温度变化为非线性增加;江亦元^[5]对昆仑山隧道施工进行分析,得到了隧道内温度场的分布规律,提出相应的温度场控制措施;赖鑫琼等^[6]对不同热源下空气温度变化规律进行研究,结果表明不同风向下移动热源和固定热源对洞内空气温度的影响不同,温度变化幅度与风速有关;张育玮等^[7]对高温环境下热源的分类和形成进行分析,得到热力风压影响风流方向的判断方法;于雨等^[8]研究了通风和围岩温度作用下的隧道内温度分布,结果表明风流温度决定了近壁面的围岩温度大小,风温每降低 5 °C,洞内同位置温度降低 3.8 °C;徐海等^[9]对 TBM 施工隧道通风进行研究,结果表明围岩放热是洞内的主要热源,增加通风量是改善洞内环境温度的有效措施;孙克国等^[10]利用数值模拟手段对某公路隧道进行研究,结果表明围岩初始温度越高,低温气流对隧道内温度场的降温幅度越大,影响范围越大;Feng Wang 等^[11]对 TBM 施工隧道进行仿真研究和现场测试,结果表明随着岩石温度和 TBM 利用率增加,隧道内空气温度呈线性增加,随着通风量的增加,隧道内空气温度呈抛物线的形式下降;Kang Fangchao 等^[12]对隧道内的温度场进行研究,结果表明保温层可以有效减少高温隧道中围岩与气流之间的热交换,降低洞内温度的上升速率;Zeng Yanhua^[13]以高黎贡山为例,通过数值模拟研究了通风速度对隧道内环境温度影响,结果表明通风速度对温度场的影响很大,为使隧道内温度低于 28 °C,通风速度应小于 3.5 m/s;DuCuifeng 等^[14]对隧道内流固耦合传热规律进行研究,研究结果表明近壁面区域的围岩热通量大于远离围岩区域热通量,最大值位于岩壁上;Tan Xianjun 等^[15]对通风条件下的西藏嘎朗拉隧道围岩温度场进行研究,结果表明气温和风速是影响隧道内围岩温度的两个重要因素,在隧道的入口和出口区域受周围环境的影响较大,容易出现不利条件。

由以上研究内容可以看出,隧道内温度受多种因素影响,其变化关系到工作人员舒适度和通风降温效果.因此,本文以某隧道工程为例,考虑围岩、机电设备、人员、通风的综合影响,利用热平衡方程推导隧道迎头区域空气温度计算数学模型,同时分析不同围岩温度和送风量下空气温度的变化规律,为后续通风工艺参数的选择与优化提供参考。

1 数值模型建立

1.1 物理模型

物理模型以某隧道工程实际尺寸作为参考,基本几何尺寸:断面半径 5.9 m,模拟隧道长度 100 m,采用压入式通风方式,风筒布设于隧道侧壁且风筒出口距离工作面 20 m,隧道模型图如图 1 所示.风管半径为 R_0 ,隧道半径为 R_1 ,隧道中心离地面高度为 L_0 ,风筒中心距离隧道中心水平距离为 L_1 ,竖直距离为 L_2 ,风筒出口到工作面距离为 L_3 ,隧道长度为 L_4 .根据以上尺寸,利用三维建模软件 Solidwork 建立物理模型,然后将模型导入网格划分软件 ICEM 中,采用非结构网格进行划分,网格类型为 Tetra/Mixed,最大歪斜率控制在 0.5 内^[16].



$$R_0=1; R_1=5.90 \text{ m}; L_0=1.25 \text{ m}; L_1=4.2 \text{ m}; L_2=2.3 \text{ m}; L_3=20 \text{ m}; L_4=100 \text{ m}$$

图 1 隧道模型

1.2 边界条件

隧道内的空气温度受许多因素的影响,包括围岩散热、机电设备散热、人员散热、通风等.洞内空气与围岩之间的热交换主要是由于温差存在,当空气温度高于岩石温度时,周围岩石会吸收空气中的热量,当空气温度低于岩石温度时则相反.围岩温度一般处于 20 °C 左右,但在某些高温隧道中,岩石温度会达到 40 °C 以上^[17].在某一时间内,隧道围岩及工作面与风流之间的传热量可以按照式(1)计算:

$$Q_1 = h(UL + S)(T_R - T_0). \quad (1)$$

式中: Q_1 为隧道围岩散热量, kW; h 为围岩与风流之间的对流换热系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$; U 为隧道断面周长, m; L 为距离开挖面长度, m; S 为隧道断面面积, m^2 ; T_R 为隧道围岩温度, $^\circ C$; 对流换热系数 h 受到隧道内风速的影响,由文献[1]可知,风速与对流换热系数成正相关,通过数据拟合可得两者关系式为

$$h = 3.06v + 4.11. \quad (2)$$

式中: v 为隧道内平均风速, m/s.

机电设备主要包括隧道内使用的装载机、挖掘机、运渣车,在设备正常使用过程中会产生大量的热量,从而导致周围空气温度上升,机电设备散热量计算如式(3)所示:

$$Q_2 = W\eta. \quad (3)$$

式中: Q_2 为设备散热量, W; W 为设备功率, W; η 为设备工作时的热利用率系数,此时其值为 0.65,不同设备功率及其热负荷如表 1 所示.

表 1 不同设备功率及热负荷

设备类别	设备功率/kW	设备负荷/kW
小松 WA470-6 装载机	14	96.20
PC220 挖掘机	125	81.25
运渣车	163	105.95

隧道内人员的热负荷相对较小,主要集中在工作面区域,人员散热量计算如式(4)所示:

$$Q_3 = qnn'. \quad (4)$$

式中: Q_3 为人员散热量, W; q 为人均产热率,此时为 200 W; n 为在隧道内工作人员数目,文中 n 确定为 20; n' 为集群系数,取值为 1.

隧道施工通风是保障正常施工的有效措施,在通风过程中,当环境温度低于洞内空气温度时,施工通风可以有效降低隧道内空气温度.冷负荷的主要影响因素为温差和风量,可以通过式(5)计算:

$$Q_4 = -\rho V(T_0 - T_1). \quad (5)$$

式中: Q_4 为通风降温负荷, W; c 为空气的比热容, $J/(kg \cdot ^\circ C)$; ρ 为空气密度, kg/m^3 ; V 为送风风量, m^3/s ; T_1 为送风温度, $^\circ C$.

结合上述分析与计算结果,边界条件的具体设置如下.

1) 出入口边界条件:风筒出口设置为速度入口边界,按照隧道施工规范中允许最低风速 0.15 m/s 要求,不同工况下风量分别设置为 20, 30, 40, 50 m^3/s ,送风温度与外界环境温度一致,设置为 20 $^\circ C$,出口自由出流.

2) 壁面边界条件:围岩温度按照不同工况分别设置为 25, 30, 35, 40 $^\circ C$ ^[17].

3) 热流边界条件:装载机 96.2 kW/台、挖掘机 81.25 kW/台、运渣车 105.95 kW/台,人体热流量 200 W/人.

1.3 控制方程

受洞内围岩温度、设备、人员散热及低温射流影响,重力和浮力因素对隧道内温度分布会有很大影响.在 RNG $k - \varepsilon$ 湍流模型中,浮力 G_b 具体形式如式(6):

$$G_b = -g_i \frac{\mu_t}{\rho \nu} \frac{\partial \rho}{\partial x_i}. \quad (6)$$

式中: g_i 是重力在 i 方向上的分量; μ_i 为湍流黏性; ρ 为密度; pr 湍流动能普朗特数. 在当前数学模型中, 浮力对于湍流动能的影响主要在受温度变化产生的不稳定层当中.

此外, 在 RNG $k - \varepsilon$ 模型当中, R_ε 作为附加项被添加到 ε 方程当中, 其具体形式如下:

$$R_\varepsilon = \frac{C_\mu \eta^3 (1 - \eta/\eta_0) \beta \varepsilon^2}{1 + \beta \eta^3} \frac{\varepsilon}{k} \quad (7)$$

式中: C_μ 为实验常数, 其值为 0.085; η 表示流体流动的各向异性程度; $\eta_0 = 4.38$; $\beta = 0.012$; ε 为湍流动能耗散率; k 为湍流动能.

在湍流中, 附加项 R_ε 通过添加流场中 η 变化提高复杂流动的精度, 特别是结合了旋流对湍流的影响, 可以更加准确的对流线弯曲进行模拟. 在上述数学模型当中, 隧道内设备及人员都会对流场产生干扰, 流场会因回流、旋流及阻碍作用等产生强各向异性. 此外, 在 Rohdin 与 Moshfegh^[18] 的研究当中, RNG $k - \varepsilon$ 模型在大型空间设施中的流场与温度分布相比其他湍流模型的预测值与测量值更加一致. 因此选用 RNG $k - \varepsilon$ 模型适合隧道施工通风模拟, 其控制方程包括连续性方程、动量守恒方程和能量守恒方程.

2 迎头区域空气温度计算模型

2.1 模型验证

隧道迎头区域是人员作业的集中区域, 该区域内的温度变化对人员作业有很大影响. 因此, 对工作面附近 20 m 区域进行分析, 由 1.2 节可知, 隧道内温度主要受到围岩、设备、人员及通风影响. 在隧道温度逐渐稳定时, 隧道内冷源和热源之间达到能量平衡状态. 因此, 隧道内温度变化可以表示为

$$c\rho V_s \frac{\partial T_{\text{air}}}{\partial t} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 \quad (8)$$

式中: T_{air} 为迎头区空气温度; V_s 为迎头区域空间体积, m^3 .

在隧道内达到热平衡时, 洞内空气温度不再随时间发生变化, 即 $\frac{\partial T_{\text{air}}}{\partial t} = 0$, 于是有

$$c\rho V(T_{\text{air}} - T_0) = h(UL + S)(T_R - T_{\text{air}}) + W\eta + qnn' \quad (9)$$

进而可以得到平衡状态下的迎头区空气温度计算式为

$$T_{\text{air}} = \frac{h(UL + S)T_R + W\eta + qnn' + c\rho VT_0}{c\rho V + h(UL + S)} \quad (10)$$

为了验证数值模型的准确性, 按照 1.2 节中不同围岩温度和通风量进行计算, 得到不同工况下的隧道内平均温度的计算值和模拟值(如表 2 所示). 对比表 2 中数据可知, 不同工况下隧道内空气平均温度计算值与模拟值之间最大误差为 1.71 $^{\circ}\text{C}$, 相对误差 5.96%, 最小误差为 0.15 $^{\circ}\text{C}$, 相对误差 0.58%, 平均相对误差为 3.19%, 误差程度较小, 因此确定了模型的可靠性, 建立的数值模型可用于隧道施工内温度场研究.

2.2 空气温度计算式修正

对表 2 中数据进一步分析可以明显看出在不同工况下空气平均温度计算值均大于模拟值, 因此为使空气温度预测公式更加准确, 可以在式(10)中增加附加项, 表示为

$$T_{\text{air}} = \frac{hULT_R + W\eta + qnn' + c\rho VT_0}{c\rho V + hUL} - \Delta T \quad (11)$$

式中: $\Delta T = A + BT_R + CV$.

对数据处理后进行多元线性回归分析, 得到 ΔT 的拟合公式($R^2 = 0.71926$)如式(12):

$$\Delta T = 3.21356 - 0.03261T_R - 0.03652V \quad (12)$$

按式(10)、式(11)计算得到不同参数下隧道内迎头区域空气温度计算值和修正值, 其空气温度变化情况如图 2 所示. 由图 2 可知, 增加附加项后, 空气平均温度计算值与模拟值基本一致, 最大误差由 1.71 $^{\circ}\text{C}$ 下降为 0.37 $^{\circ}\text{C}$, 最大相对误差由 5.96% 下降为 1.73%, 增加附加项后的空气温度计算式可以更加准确的

预测稳定状态下迎头区域空气平均温度值。

表2 不同工况下空气平均温度计算值与模拟值

工况	围岩温度/℃	送风量/(m ³ ·s ⁻¹)	平均温度计算值/℃	平均温度模拟值/℃
1	25	20	30.34	28.63
2	30	20	31.08	29.42
3	35	20	31.81	30.23
4	40	20	32.54	31.05
5	25	30	27.21	26.01
6	30	30	27.80	26.75
7	35	30	28.38	27.52
8	40	30	28.97	28.28
9	25	40	25.57	24.91
10	30	40	26.07	25.66
11	35	40	26.58	26.43
12	40	40	27.09	26.90
13	25	50	24.55	23.60
14	30	50	25.00	24.28
15	35	50	25.46	24.99
16	40	50	25.91	25.68

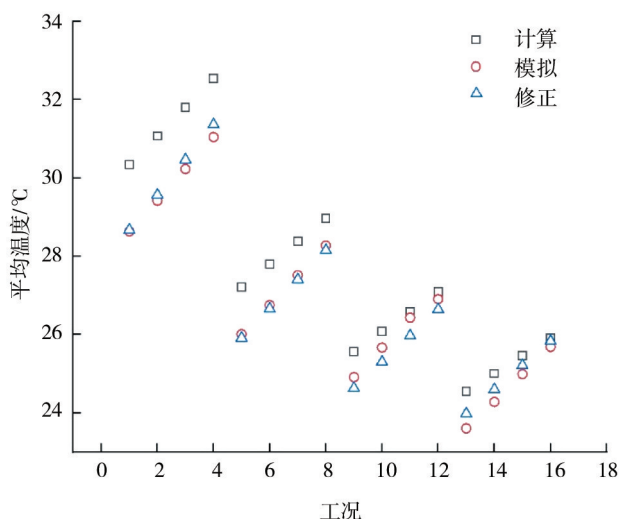


图2 不同工况下隧道内空气平均温度变化情况

3 模拟结果分析

3.1 围岩温度 T_R 对隧道内温度的影响

风流与岩壁之间对流换热,低温风流从围岩带走热量,进而导致围岩逐渐降温,因此围岩的初始温度对隧道内温度情况有很大影响.以围岩温度 25,30,35,40℃,风量 20 m³/s 为例,计算得到隧道迎头区域内空气平均温度变化如图 3 所示.由图 3 可知,随着通风时间增加,空气平均温度逐渐增大,在通风时间 25 min 左右时空气温度逐渐稳定,不同围岩温度通风过程中温度变化速率差异不大,这时温度变化速率可以表示为

$$\frac{\partial T_{\text{air}}}{\partial t} = \frac{h(UL + S)(T_R - T_{\text{air}}) + W\eta + qnn' - c\rho V(T_{\text{air}} - T)}{c\rho V_s} \quad (13)$$

迎头区域内体积 V_s 为 1 222.76 m³,空间体积较大.因此在围岩温度变化时, $(T_R - T_{\text{air}})$ 的变化对空气

温度变化速率的影响较小.此外,围岩温度越高,隧道内空气温度达到稳定阶段所需要的时间越短,稳定时的隧道内空气温度越高.围岩温度每上升 5 ℃,隧道迎头区域内稳定阶段的空气温度上升 1 ℃ 左右.

在稳定阶段,以上述工况为例,对通风时间为 45 min 时隧道内温度分布情况进行分析,不同工况下温度变化如图 4 所示.由图 4 可知,迎头区域附近温度受新鲜风流的影响较大,低温射流对迎头区域有明显的降温作用,而在其他区域,由于射流运动过程中产生热交换,射流温度不断上升,对其余区域的降温作用减弱,随着围岩温度的增加,迎头区域内远离风筒一侧温度受围岩温度的影响明显,其温度高于近风筒一侧.

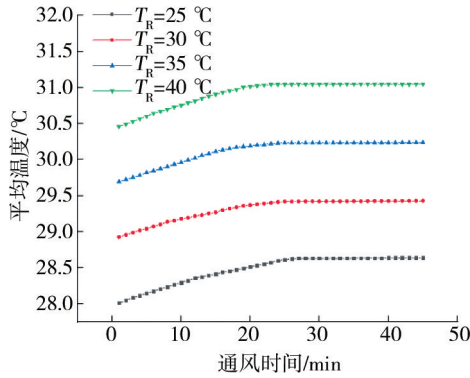


图 3 不同围岩温度下空气平均温度变化

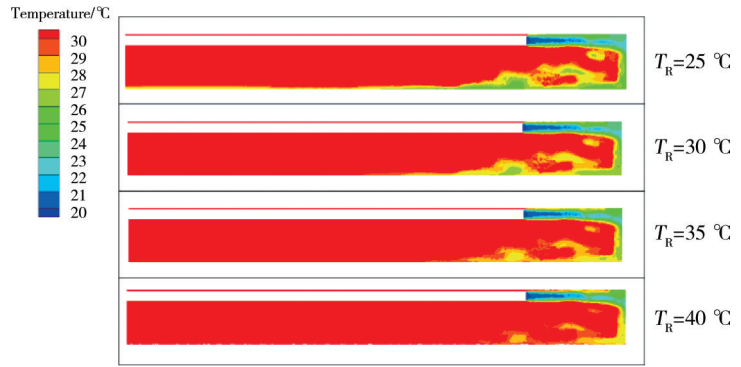


图 4 不同围岩温度下隧道内温度分布 ($t=45\text{ min}$)

3.2 送风风量 V 对隧道内温度的影响

风量大小决定着进入隧道内新鲜风流的多少,进而影响着隧道内的温度变化.以 $T_R=40\text{ }^\circ\text{C}$,送风风量 20,30,40,50 m^3/s 为例,随着送风时间增加,隧道内迎头区域的空气平均温度变化情况如图 5 所示.由图 5 可知,随着送风风量的增加,稳定状态时隧道内的温度越低,这是由于风量越大,进入洞内的冷空气越多,隧道内气流的换热速率增大.送风风量每增加 10 m^3/s ,空气温度分别下降 2.77,1.38,1.22 $^\circ\text{C}$,降温效果逐渐减弱.这是由于在风量较低时,隧道内的空气平均温度较高,送风温度与空气平均温度之间温差较大,因此在增大风量时隧道内降温效果明显.随着风量增加,送风温度与空气平均温度之间的温差减小,增大风量后降温效果减弱.以 28 $^\circ\text{C}$ 作为施工温度标准时,送风量为 40 m^3/s 时达到施工要求.

进一步分析风量增加对隧道内稳定状态时温度分布规律影响,以上述工况为例,在通风时间为 45 min 时,隧道内温度分布如图 6 所示.由图 6 可知,随着送风风量的增加,低温射流加快了隧道内热量的排出,对隧道内的降温范围逐渐扩大,风量由 20 m^3/s 增加至 30 m^3/s 时,工作面附近的温度变化最明显,对设备和人员的降温作用显著.在靠近出口区域,空气温度较高.

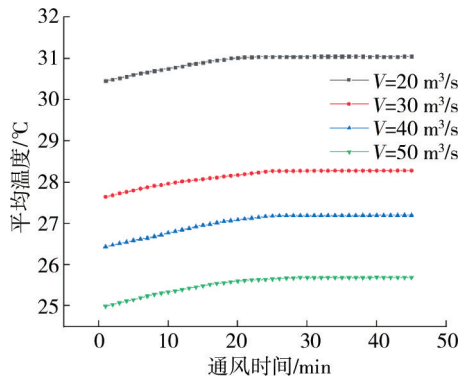


图 5 不同风量下隧道内空气平均温度变化

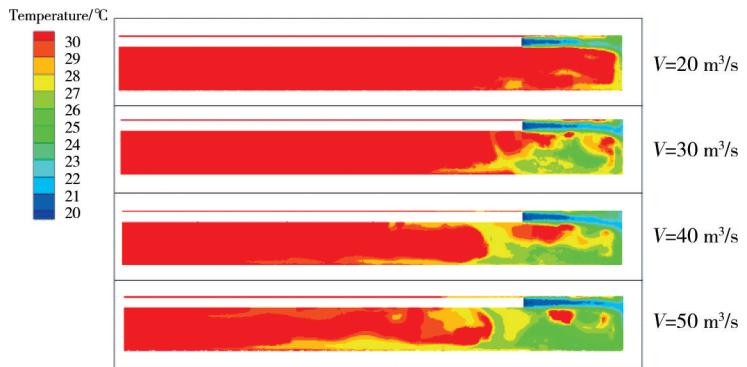


图 6 不同风量下隧道内温度分布 ($t=45\text{ min}$)

4 结论

1)数值模型经理论计算结果检验,理论计算值与模拟值平均相对误差为3.19%,在合理范围内,验证了采用的数值模型和计算方法可靠。

2)对隧道稳定状态时空气温度计算式增加附加项,修正后计算式最大相对误差由5.96%减小为1.73%,可以更加准确地计算稳定状态下隧道内平均温度。

3)围岩温度会对隧道内迎头区域空气平均温度产生影响,随着围岩温度上升,迎头区域内空气平均温度逐渐增加,围岩温度每上升5℃,空气平均温度上升1℃左右.不同围岩温度下的空气温度变化速率基本一致。

4)增加通风量可以加快隧道内的换热效率,大幅降低隧道内空气温度,但随着通风量的增加,降温效果逐渐减弱。

参考文献:

- [1] 王仁远,朱永全,高焱,等.正盘台隧道洞内空气和围岩温度场分析[J].科学技术与工程,2020,20(18):7464-7471.
- [2] 杨勇.高海拔高地温特长隧道长距离施工通风及供氧技术研究[D].石家庄:石家庄铁道大学,2020.
- [3] 何青青.高壁温铁路隧道独头射流通风及喷雾降温数值计算研究[D].成都:西南交通大学,2012.
- [4] 貂祖国.高地温引水隧洞瞬态温度场数值模拟及温度效应研究[D].石河子:石河子大学,2019.
- [5] 江亦元.昆仑山隧道施工温度控制及施工措施[J].现代隧道技术,2002(6):56-58.
- [6] 赖鑫琼,吴柯杉,张一夫,等.井下移动热源对巷道局部风流温度影响规律研究[J].中国安全生产科学技术,2018,14(9):100-104.
- [7] 张育玮,邹声华,李永存.高温矿井热源对风流稳定性影响的分析[J].中国安全生产科学技术,2015,11(8):46-51.
- [8] 于丽,孙源,王明年,等.考虑通风与围岩条件的寒区隧道温度场模型及作用规律研究[J].隧道建设(中英文),2019,39(s2):85-91.
- [9] 徐海,薛永庆,罗飞宇,等.高岩温TBM施工隧道的通风效果研究[J].筑路机械与施工机械化,2019,36(11):108-112.
- [10] 孙克国,徐雨平,仇文革,等.寒区隧道温度场分布规律及围岩特性影响[J].现代隧道技术,2016,53(6):67-72.
- [11] Wang F, Luo F, Huang Y, et al. Thermal analysis and air temperature prediction in TBM construction tunnels[J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 158:113822.
- [12] Kang F C, Li Y C, Tang C A. Numerical study on airflow temperature field in a high-temperature tunnel with insulation layer[J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 179:115654.
- [13] Zeng Y H, Tao L L, Ye X Q, et al. Temperature reduction for extra-long railway tunnel with high geotemperature by longitudinal ventilation[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, 99(s2):103381.
- [14] Du C F, Bian M L. Numerical simulation of fluid solid coupling heat transfer in tunnel[J]. 2018, 12:117-125.
- [15] Tan X J, Chen W Z, Yang D S, et al. Study on the influence of airflow on the temperature of the surrounding rock in a cold region tunnel and its application to insulation layer design[J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 67(1-2):320-334.
- [16] 董亮,刘厚林,谈明高,等.一种验证网格质量与CFD计算精度关系的方法[J].中南大学学报(自然科学版),2012,43(11):4293-4299.
- [17] 李湘权,代立新.发电引水隧洞高地温洞段施工降温技术[J].水利水电技术,2011,42(2):36-41.
- [18] Rohdin P, Moshfegh B. Numerical modelling of industrial indoor environments; A comparison between different turbulence models and supply systems supported by field measurements[J]. Building and Environment, 2011, 46(11):2365-2374.