

基于喷雾冷却的隧道围岩施工降温效果分析

孟令辰

(中交一公局土木工程建设研究院有限公司,北京市 100024)

摘要:为了研究基于喷雾冷却的特长隧道围岩施工降温效果,该文依托中梁山隧道工程,采用数值模拟计算的方法,分析了不同喷雾量下隧道平均温度变化特征、不同湿度下喷雾蒸发效率和温降变化特征,以及不同喷雾位置下隧道断面平均气温变化特征,并对隧道断面空气温度的实测值与模拟值进行了对比分析。研究结果表明:①随着喷雾量的增大,隧道内的平均温度逐渐减小,当喷雾量为0.038 kg/s时,相比隧道初始温度,温度下降了2.75℃;②随着空气含湿量的增大,雾滴蒸发率逐渐减小,当空气含湿量为12 g/kg时,相比其他含湿量,雾滴蒸发率最高;③在距掌子面距离相同条件下,当空气含湿量为12 g/kg时,相比其他含湿量,喷雾后温降最大,最大温降为7.06℃;④空气温度实测值平均温度与模拟值平均温度相差不大,可认为空气温度实测值和模拟值基本相同。在实际隧道喷雾降温工程中,喷雾降温系统应与隧道的通风系统紧密结合,合理设置通风口的位置和通风量,促进空气形成良好的对流,同时控制隧道内的湿度,提高降温效果。

关键词:特长隧道;喷雾降温;蒸发效率;气体温度;数值模拟

中图分类号:U455;U451.2

文献标志码:A

Analysis of Cooling Effect of Tunnel Surrounding Rock Construction Based on Spray Cooling

MENG Lingchen

(Civil and Architectural Engineering Institute of CCCC-FHEB., Ltd., Beijing 100024, China)

Abstract: To study the cooling effect of spray cooling on the surrounding rock during the construction of an extra-long tunnel, based on the Zhongliangshan Tunnel Project, numerical simulations were performed to analyze the characteristics of average temperature variation in the tunnel under different spray rates, the evaporation efficiency and temperature drop characteristics of spray under different humidity levels, and the average temperature variation characteristics of the tunnel section under different spray positions. The measured values of the air temperature in the tunnel section were compared with the simulated values. The results indicate that: ① With the increase of the spray rate, the average temperature in the tunnel decreases gradually; when the spray rate is 0.038 kg/s, the temperature drops by 2.75 °C compared with the initial temperature of the tunnel; ② As air humidity increases, the droplet evaporation rate decreases gradually; when air humidity is 12 g/kg, the droplet evaporation rate is the highest compared to other humidity levels; ③ At the same distance from the tunnel face, when the air moisture content is 12 g/kg, the temperature drop after spraying is the largest compared with other moisture contents, with a maximum temperature drop of 7.06 °C; ④ There is no significant difference between the average measured air temperature and the average simulated value, suggesting that the measured and simulated air temperatures are basically consistent. In actual tunnel spray cooling projects, the spray cooling system should be closely combined with the tunnel ventilation system. The position and air volume of the vents should be reasonably set to promote good air convection, while controlling the humidity in the tunnel to improve the cooling effect.

Keywords: extra-long tunnel; spray cooling; evaporation efficiency; air temperature; numerical simulation

0 引言

随着公路建设的高速发展,隧道数量日益增多。在地形复杂的山区,隧道长度也逐渐增大。在隧道开挖过程中,洞内的高温危害严重影响施工效率和施工安全。因此,工程中在常规通风降温基础上,增加了喷雾降温系统。为探求隧道喷雾降温规律,学者们进行了多方面研究。刘向阳等^[1]对高地温施工隧道冰块与通风组合降温效果进行了对比研究,发现当围岩温度为 $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,拱顶压入式通风和侧壁通风均不能将冰块产生的冷空气很好地控制在掌子面附近;祁占锋^[2]基于热源量化研究了高温隧道动态综合降温措施,指出洞内放置冰块产生的冷量较小,通风带来的冷量较大;邹丽等^[3]对高压细水雾降温技术在长大隧道中的应用进行了研究,探讨了风机与细水雾喷头位置关系;张庆明等^[4]研究了不同通风方式对高地温施工隧道通风降温效果的影响,研究结果表明:对于高地温隧道施工,风流速度越大降温效果越明显;覃宇含等^[5]对吸收式制冷系统应用于高温热害隧道降温进行了理论分析,研究结果表明:当蒸发温度提高至 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,可以利用 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上的隧道涌水作为热源驱动吸收式制冷系统。以上研究通过冰块和通风降温的方式,客观分析了隧道通风降温的效果,但未系统研究隧道喷雾冷却和通风降温相结合的降温效果。

在隧道降温工程中,多数学者采取换热器、取热蓄冷系统等方式对隧道环境进行降温。姚庆等^[6]研究了考虑季节影响的地铁区间隧道围岩动态热交换,结果表明:换热器在夏季能有效减小围岩温度的变化幅度,提高围岩的蓄热能力;姚曙光等^[7]分析了地铁隧道岩土体取热蓄冷系统的效果及参数,表明在混凝土管片中布置热交换管,通过管内低温水流动可降低混凝土管片和岩土体温度;马超豪等^[8]采用数值模拟方法对高地温隧道内的热流耦合温度场进行了研究;乔红彦^[9]对高地温隧道超长独头施工降温及热环境特征进行了研究,发现风管以上隧道环境温度整体高于风管以下;谢高英^[10]对高地温隧道施工期冰块辅助降温效果进行了研究,结果表明:与纯机械通风对比,加以冰块辅助后各截面气温显著降低且各截面温度差距显著减小。

以上学者通过多种方式研究了隧道降温技术在长大隧道中的应用,并对高温热害隧道降温理论进行了分析。然而,学者们未系统地考虑特长隧道喷

雾和通风相结合冷却降温的效果。基于此,本文依托中梁山隧道工程,采用数值模拟计算方法,研究喷雾冷却对特长隧道围岩的施工降温效果,分析不同喷雾量下隧道平均温度变化特征、不同湿度下喷雾蒸发效率和温降变化特征,以及不同喷雾位置下隧道断面平均气温变化特征,并对隧道断面空气温度的实测值与模拟值进行对比分析。

1 工程概况

本项目为中梁山隧道工程,位于重庆市北碚区水土街道附近。隧道进洞口位于北碚区水土街道屋基村,出洞口位于北碚区东阳街道先锋村。左线隧道起讫里程为 $\text{ZK}20+945\sim\text{ZK}26+288$,全长 $5\,343\text{ m}$,最大埋深里程桩号为 $\text{ZK}23+820$,最大埋深约 379.29 m 。右线隧道起讫里程为 $\text{K}20+925\sim\text{K}26+235$,全长 $5\,310\text{ m}$,最大埋深里程桩号为 $\text{K}23+860$,最大埋深约 358.83 m ,属特长隧道(图1)。本次研究选取左线隧道里程 $\text{ZK}24+320\sim\text{ZK}26+232$ 施工段作为研究对象。



图1 中梁山隧道施工现场

Figure 1 Construction site of Zhongliangshan Tunnel

隧道开挖区洞身岩土层主要为粉质黏土,颜色为褐黄色,土层内含砂岩和泥岩碎石,隧道穿越煤层、断层破碎带、石膏层等区域,地质条件差。隧道断面最大宽度为 11.8 m ,最大高度为 9.4 m ,通风管道安装在隧道顶部,直径 2.0 m ,距掌子面 30 m 。在隧道开挖过程中,隧道洞身内部温度为 $30.8\sim 28.4\text{ }^{\circ}\text{C}$,壁面温度为 $35.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,该开挖区属低高温区^[11],在该温度下,喷射混凝土的水分将加速蒸发,降低其支护强度,同时施工人员易发生中暑现象,降低施工效率^[12],因此,拟采用喷雾方式降低隧道内温度。喷雾喷嘴安装在隧道顶部,距地面 8.0 m ,从掌子面往出口方向设置喷嘴,纵向3个,横向2个,共设置6个喷嘴,纵向相邻喷嘴的间隔为 15 m ,横向2个为一组,共3组,第1组超出风管出风口距离 15 m ,然后往隧道出

口方向依次设置第2、3组喷嘴,喷嘴的喷口扩散角度为40°。

2 数值模型建立

2.1 喷雾降温控制方程

采用DPM(离散相模型)建模时,设置喷雾为稀薄喷雾,且雾滴之间不存在相互作用力;喷雾雾滴按照其尺寸分成粒子组,每组雾滴半径、温度、运动速度以及运动轨迹相同;雾滴与空气间的相互作用通过相对运动、对流、导热等方式实现能量和质量交换。

在笛卡尔坐标系下,每一组雾滴在隧道中运动时,雾滴的作用力在x方向平衡方程如下:

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + \frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho} + F_x \quad (1)$$

$$\text{其中: } F_D = \frac{18\mu C_D Re}{\rho_p d_p^2 24} \quad (2)$$

$$Re = \frac{\rho d_p |u_p - u|}{\mu} \quad (3)$$

$$C_D = a_1 + \frac{a_2}{Re} + \frac{a_3}{(Re)^2} \quad (4)$$

式中: u 为流体相速度(m/s); u_p 为雾滴速度(m/s); g_x 为x方向的重力加速度(m/s²); ρ_p 为雾滴密度(kg/m³); ρ 为空气密度(kg/m³); F_x 为x方向的其他作用力(N); μ 为流体黏动度(Pa·s); d_p 为雾滴直径(m); Re 为雷诺系数; C_D 为曳力系数; a_1 、 a_2 、 a_3 均为曳力系数经验公式的拟合常数,无量纲。

2.2 数值模型建立及参数选取

根据现场情况,采用流体力学软件建立模型进行模拟计算,将隧道开挖区从掌子面至出口方向200 m长隧道作为研究对象,隧道的宽度为11.8 m,高度为9.4 m,设置隧道开挖方向为z方向,竖直向上为y方向,垂直y方向指向隧道壁面为x方向,建立的模型如图2所示。

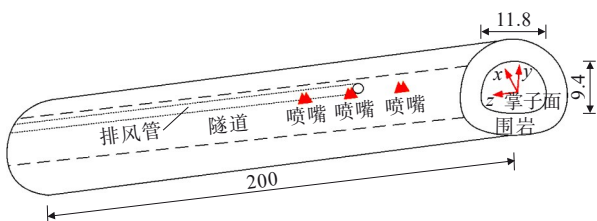


图2 模拟计算模型(单位:m)

Figure 2 Simulation calculation model(unit: m)

设置通风管内风速为10.8 m/s,风量为33.91 m³/s,单个喷嘴的流量为0.028 kg/s,纵向相邻喷嘴的间隔为15 m,喷嘴高度为8.0 m,内径为0.002 m,喷雾时扩散角度为40°,喷雾水温为18℃,隧道外平均温度为22.8℃,即风管口进风温度为22.8℃,隧道内空气含湿量为12 g/kg,空气温度为30.8℃。

建模过程中,隧道二次衬砌采用C35混凝土,围岩、二次衬砌固定区域和隧道内部流体交界面设置为耦合面,隧道内所有壁面均为无滑移界面,风管壁边界设置为耦合面,风管壁材料为聚氯乙烯材料,雾滴本质为离散离子,采用离散相模型,当扩散过程中蒸发为水汽时,采用组分运输模型。隧道壁面捕捉类型设置为基于碰撞模型(Stanton-Rutland)的壁膜(wall-film)形式。在模拟计算过程中,模型材料的计算参数如表1所示。

表1 模型材料的计算参数

Table 1 Calculation parameters of model materials

材料名称	密度/ (kg·m ⁻³)	比热容/ [J· (kg·K) ⁻¹]	导热系数/ [W· (m·K) ⁻¹]	黏性指数/ [kg· (m·s) ⁻¹]
围岩	2 540	1 254.2	1.960 0	—
隧道支护	2 460	968.5	1.450 0	—
空气	—	1 005.5	0.024 4	1.795 4×10 ⁻⁵
风管壁	1 350	900.5	0.16	—

2.3 研究方案

为研究隧道喷雾的降温效果,本次试验设置了3种不同的喷雾量,分别为0.018 kg/s、0.028 kg/s、0.038 kg/s,以掌子面中心为原点,在隧道z方向选取50 m、55 m、60 m、65 m、70 m断面为研究对象,分析不同喷雾量下各断面的温度场分布和隧道截面平均温度变化;设置了5种不同的空气含湿量,分别为12 g/kg、16 g/kg、27 g/kg、30 g/kg、36 g/kg,分析不同空气温度下,喷雾的蒸发效率以及喷雾后的温降效果;从掌子面至隧道出口方向,设置了5个断面作为研究对象,分别距掌子面25 m、45 m、65 m、85 m、105 m,设置编号为断面1~5。同时,设置了4个工况^[13],工况1:通风和第2组喷雾开启,其他喷雾关闭,喷雾水温18℃;工况2:通风和第2组喷雾开启,其他喷雾关闭,喷雾水温15℃;工况3:通风和第1组喷雾开启,其他喷雾关闭,喷雾水温18℃;工况4:通风和第3组喷雾开启,其他喷雾关闭,喷雾水温18℃。在

喷嘴喷雾持续工作 31 min 后,分析 4 种工况下各断面的温度变化。

3 计算结果与分析

3.1 不同喷雾量下隧道平均温度变化

当喷雾量分别为 0.018 kg/s、0.028 kg/s、0.038 kg/s 时,隧道 z 方向 50 m、55 m、60 m、65 m、70 m 断面温度场云图如图 3 所示。

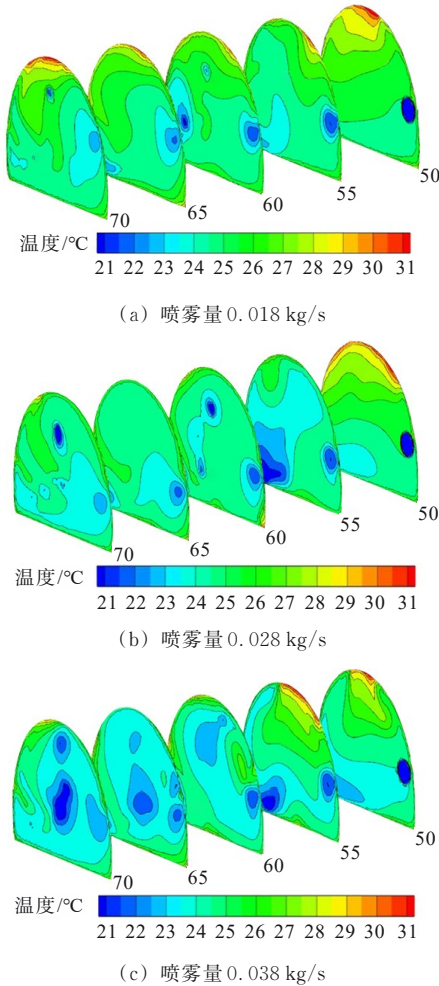


图 3 不同喷雾量下隧道断面温度场分布云图

Figure 3 Temperature field distribution contours of tunnel section under different spray rates

由图 3 可知:① 当喷雾量为 0.018 kg/s 时,隧道最高温度主要集中在 50 m 和 70 m 断面顶部,55 m、60 m、65 m 断面顶部的温度相对较低;② 当喷雾量为 0.028 kg/s 时,隧道各断面顶部的温度降低,除 50 m 断面外,其他断面顶部温度均降至 27 °C 以下;③ 当喷雾量为 0.038 kg/s 时,各断面的温度进一步降低,相比喷雾量为 0.028 kg/s 时,在 50 m、55 m 断面,隧道顶部最高温度的范围减小,温度降低,在 65 m、70 m

断面,大部分区域的温度已降至 24 °C 以下。

当喷雾量不同时,隧道风管出口至掌子面间截面的平均温度变化如图 4 所示。

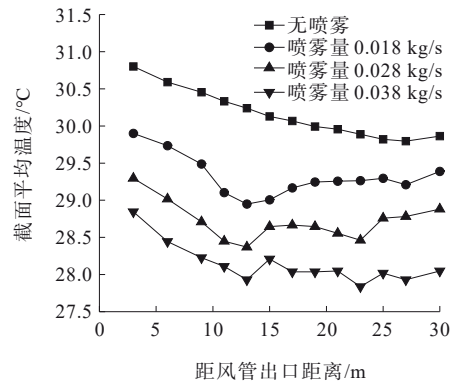


图 4 不同喷雾量下隧道截面平均温度变化

Figure 4 Variation of average temperature of tunnel section under different spray rates

由图 4 可知:在不同喷雾量下,随着距风管距离的增大,隧道各截面的平均温度呈先减小再增大趋势^[14]。在无喷雾时,隧道内的温度最高;随着喷雾量的增加,隧道内的平均温度逐渐降低,且喷雾量越大,降温效果越显著。当喷雾量为 0.038 kg/s 时,相较无喷雾时风管出风口区域,距风管出口 30 m 断面温度下降了 2.75 °C。然而,在掌子面附近,隧道内的温度逐渐升高。

3.2 不同湿度下喷雾蒸发效率及降温变化

在实际隧道施工过程中,围岩渗水现象会导致隧道空气内含湿量增大,而空气湿度的变化对雾滴的蒸发有明显影响^[15]。基于此,本文分析了空气含湿量分别为 12 g/kg、16 g/kg、20 g/kg、24 g/kg、28 g/kg、32 g/kg、36 g/kg 的情况,喷雾雾滴平均蒸发时间如图 5 所示。

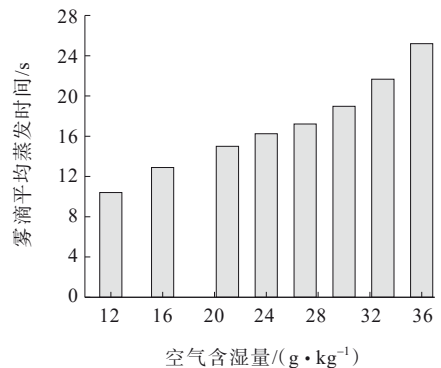


图 5 不同湿度下喷雾雾滴平均蒸发时间变化

Figure 5 Variation of average evaporation time of spray droplets under different humidity levels

由图5可知:随着空气含湿量的增加,喷雾雾滴的平均蒸发时间增大。空气含湿量越小,空气中水蒸气分压力越小,相比饱和水蒸气的压力差异越大,因此,单个雾滴蒸发时间加快,雾滴平均蒸发时间缩短。

雾滴蒸发时,需从周围环境吸收热量,从而降低环境温度。蒸发效率是衡量蒸发效果的重要指标,即喷雾过程中蒸发量与喷雾量的比值^[16-17]。在不同空气湿度条件下,喷雾蒸发率的变化如图6所示。

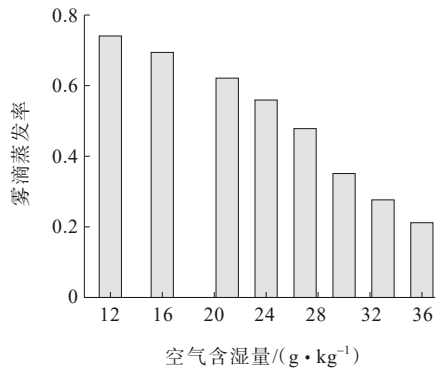


图6 不同湿度下喷雾雾滴蒸发效率变化

Figure 6 Variation of spray droplet evaporation efficiency under different humidity levels

由图6可知:随着空气含湿量的增加,雾滴蒸发率逐渐减小。即空气含湿量越小,雾滴蒸发率越大^[18]。当空气含湿量为12 g/kg时,相比其他含湿量,雾滴蒸发率最高。结合图3可知,当空气含湿量小于30 g/kg时,雾滴平均蒸发时间小于20 s,雾滴蒸发率大于47%;当空气含湿量大于30 g/kg时,雾滴蒸发率降至47%以下。

在不同空气湿度条件下,喷雾后隧道断面空气的温降变化如图7所示(温降为喷雾前和喷雾后隧道的平均温度差)。

由图7可知:在不同空气湿度条件下,随着距掌子面距离的增大,喷雾后温降先增大再减小,且最大温降均位于距掌子面36~40 m区域。在距掌子面相同位置,空气含湿量越大,喷雾后的温降越小^[19-20]。例如,当空气含湿量为12 g/kg时,喷雾后的最大温降7.06 °C;当空气含湿量为36 g/kg时,相比空气含湿量为12 g/kg时,最大温降降低了3.36 °C,最大温降差异大,降温效果差。因此,当空气含湿量小时,降温效果更佳,最佳空气含湿量小于30 g/kg。

在不同空气湿度条件下,喷雾后隧道断面空气的相对湿度变化如图8所示。

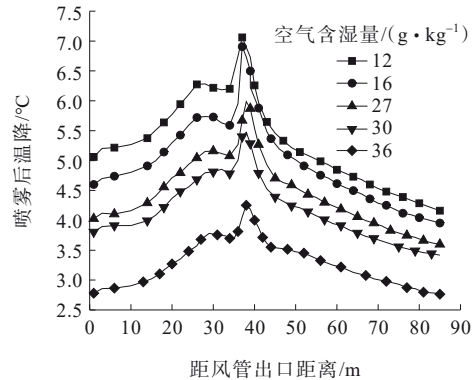


图7 不同湿度下隧道断面空气温降变化

Figure 7 Variation of air temperature drop at tunnel sections under different humidity levels

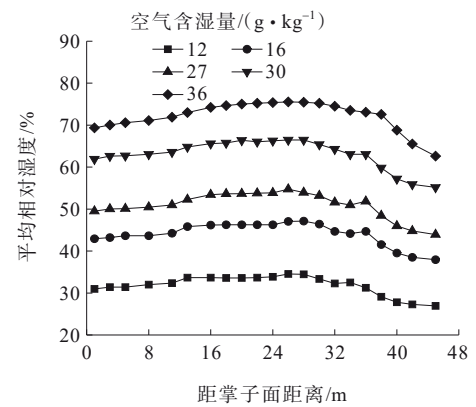


图8 不同湿度下隧道断面空气相对湿度变化

Figure 8 Variation of relative air humidity of tunnel section under different humidity levels

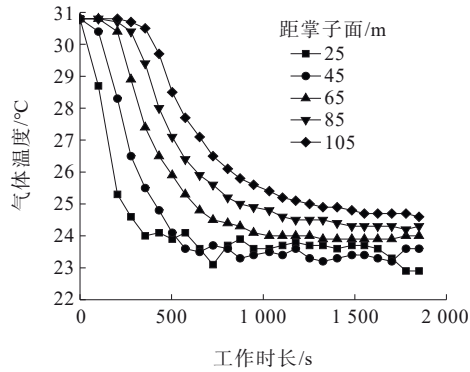
由图8可知:随着距掌子面距离的增大,喷雾后隧道空气的相对湿度先增大再减小,最大相对湿度位于距掌子面16~32 m区域。在距掌子面相同位置,空气含湿量越大,喷雾后隧道空气的相对湿度越大。

3.3 不同喷雾位置下隧道断面平均气温变化

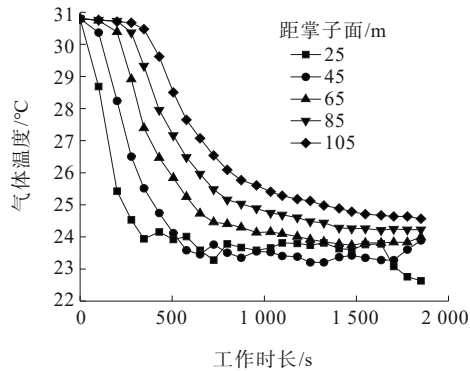
在不同工况下,当喷雾持续工作31 min时,在距掌子面25 m、45 m、65 m、85 m、105 m断面,隧道断面空气温度变化如图9所示。

由图9可知:

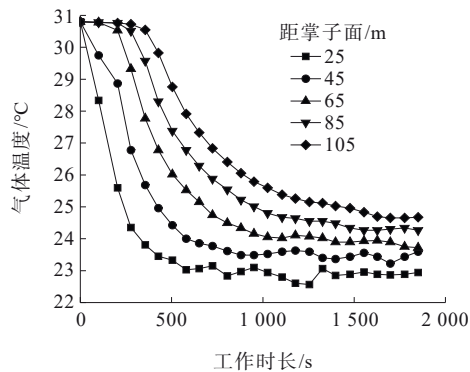
(1) 工况1时,随着喷雾时长的增大,隧道内空气温度总体先快速减小,然后再缓慢减小,最终趋于平稳。当距掌子面距离分别为25 m、45 m时,在喷雾初始阶段,断面1的空气温度小于断面2,随着喷雾的持续工作,断面1的空气温度逐渐大于断面2。当距掌子面距离分别为65 m、85 m、105 m时,断面2、断面3和断面4的空气温度快速下降,最终趋于平稳,



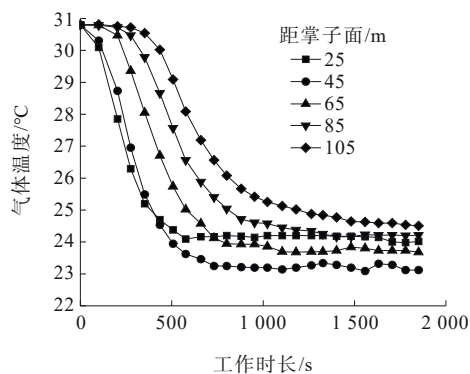
(a) 工况 1



(b) 工况 2



(c) 工况 3



(d) 工况 4

图9 不同工况下隧道断面空气温度变化

Figure 9 Variation of air temperature at tunnel sections under different operating conditions

距掌子面距离越远,温度降低的幅度越小。

(2) 工况 2 时,随着喷雾时长的增大,隧道内空气温度与工况 1 基本相同。随着喷雾的持续工作,空气温度降低幅度减小,最终趋于平稳,因此,在此工况下,喷雾的温度对 105 m 范围内空气的降温无明显影响。

(3) 工况 3 时,随着喷雾时长的增大,隧道内空气温度先快速减小,最终趋于平稳。在喷雾时长相同条件下,距掌子面距离越远,温度降低的幅度越小。

(4) 工况 4 时,距掌子面 25 m 区域,当喷雾时间为 0~500 s 时,隧道内空气温度快速降低,从初始温度 30.8 °C 快速降低至 24.37 °C;当喷雾时间大于 500 s 时,隧道内空气温度逐渐处于平稳状态,温度在 24.2 °C 上下波动。在断面 2~5,喷雾时间为 880 s 时,其空气温度分别为 23.21 °C、23.92 °C、24.72 °C、25.66 °C,其中断面 1 的空气温度大于断面 2 和断面 3,断面 2 温度最低。由于喷雾装置所在的隧道截面气温会迅速降低,但雾滴的蒸发过程主要发生在喷头后方区域,这使得喷头后方的隧道截面降温效果更为显著,其降温影响范围约为 45 m。

(5) 所有工况下,随着喷雾时长的增大,隧道内空气温度先快速减小,最终趋于平稳。工况 1~3 时,喷雾时长相同时,距掌子面距离越远,温度降低的幅度越小。工况 4 时,当喷雾时间小于 500 s 时,隧道内空气温度从 30.8 °C 降低至 24.37 °C,在喷雾时间大于 500 s 时趋于平稳,当喷雾时间大于 880 s 时,断面 2~5 的空气温度逐渐趋于平稳,且断面 1 的空气温度大于断面 2 和断面 3,断面 2 温度最低。再次印证喷雾降温的影响范围为 45 m 左右。

4 模拟气温变化与实测值对比分析

在工况 1 条件下,选取距掌子面 25 m 断面作为研究对象进行实际监测,并将实际监测数据与模拟结果进行对比,如图 10 所示。

由图 10 可知:工况 1 时,随着喷雾时长的增大,隧道内空气温度的实测值和模拟值先快速减小再逐渐趋于平稳。当喷雾时间小于 875 s 时,空气温度实测值和模拟值均快速减小;当喷雾时间为 875 s 时,空气温度实测值和模拟值分别为 23.9 °C、24.2 °C,两者相差 0.3 °C,相差不大;当喷雾时间大于 875 s 时,空气温度实测值在 22.8~23.8 °C 范围内波动,平均温度为 23.4 °C,模拟值在 22.9~23.9 °C 范围内波动,平均温度为 23.5 °C,空气平均温度实测值比模拟值低 0.1 °C,两者相差不大,可认为空气温度实测值和模拟值基

本相同。

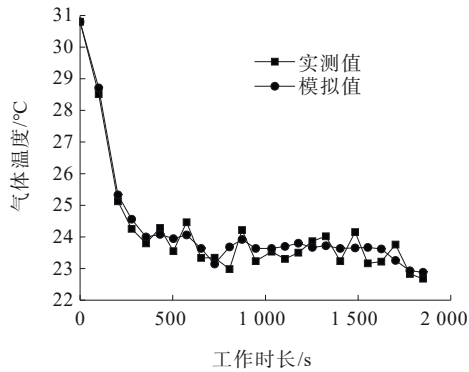


图10 工况1下隧道断面空气温度实测值与模拟值对比

Figure 10 Comparison between measured and simulated air temperature in tunnel section under working condition 1

5 工程建议

综合以上分析,在实际隧道喷雾降温工程中,先对隧道环境进行评估,确定隧道内空气温度和岩层温度,并详细测量隧道尺寸,选取合适的喷雾系统,确定喷雾范围,对于大型隧道,选用高压喷雾系统,对中小型隧道,选用中低压喷雾系统。

喷淋系统喷头应均匀分布在隧道顶部和两侧壁区域,避免出现降温盲区。在隧道顶部区域,喷头沿着拱顶中心线两侧对称布置,建议横向布设2排,成对分布,纵向根据施工需求布设多排,排距在15 m左右,喷雾过程中注意水质,防止喷嘴堵塞,影响喷雾效果。通过以上布置,可快速有效降低隧道内温度,同时在通风管道出风口前端也建议布设喷嘴,可实现掌子面和开挖作业面快速降温。

喷雾降温系统应与隧道的通风系统紧密结合,合理设置通风口的位置和通风量,促进空气形成良好的对流,同时有效控制隧道内的湿度,以提升降温效果。在喷雾设备安装过程中,需确保管道安装牢固,且连接完好,防止出现漏水现象。在喷雾过程中,根据现场需求,设置合理的喷雾时间和喷雾频率,当隧道温度高时,可增加喷雾时间和喷雾频率。定期对喷雾设备进行维护,确保设备在工作时正常运行,定期检查喷嘴,防止喷嘴堵塞,影响喷雾效果。

6 结论

本文依托中梁山隧道工程,采用数值模拟计算的方法,研究了喷雾冷却对特长隧道围岩施工的降温效果,分析了不同喷雾量下隧道平均温度变化特

征、不同湿度下喷雾蒸发效率及温降变化特征,以及不同喷雾位置下隧道断面平均气温变化特征,并对隧道断面空气温度的实测值与模拟值进行了对比分析。主要结论如下:

(1) 在喷雾过程中,喷雾量越大,隧道内的温度越低;空气含湿量越大,喷雾雾滴平均蒸发时间越长,雾滴蒸发率越低。

(2) 不同空气湿度下,在距掌子面距离增大时,喷雾后温降和隧道空气的相对湿度均先增大再减小。空气含湿量越大,喷雾后的温降越小。当空气含湿量小于30 g/kg时,降温效果最佳。

(3) 随着喷雾时长的增长,隧道内空气温度快速减小,最终趋于平稳,且距掌子面25 m区域的空气温度大于距掌子面45 m、65 m区域,表明喷雾降温的影响范围为45 m左右。

(4) 将隧道内空气温度的实测值和模拟值进行对比分析,空气温度实测值的平均温度与模拟值的平均温度相差不大,可以认为空气温度实测值和模拟值基本相同。

(5) 在实际隧道喷雾降温工程中,喷淋系统喷头应均匀分布在隧道顶部和两侧壁区域,喷雾过程中注意水质,防止喷嘴堵塞,影响喷雾效果。同时在通风管道出风口前端也建议布设喷嘴,可实现掌子面和开挖作业面快速降温。

参考文献:

References:

- [1] 刘向阳,罗兵兵,吴静,等.高地温施工隧道冰块与通风组合降温效果对比研究[J].隧道与地下工程灾害防治,2024,6(2):66-75.
LIU Xiangyang, LUO Bingbing, WU Jing, et al. Comparative study on the cooling effect of ice block and ventilation combination in high ground temperature tunnel construction[J]. Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering,2024,6(2):66-75.
- [2] 祁占锋.基于热源量化的高温隧道动态综合降温措施研究[J].地下空间与工程学报,2024,20(3):987-996,1015.
QI Zhanfeng. Research on dynamic comprehensive cooling measures for high-temperature tunnels based on heat source quantification[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2024,20(3):987-996,1015.
- [3] 邹丽,王亮,丛北华.高压细水雾降温技术在长大隧道中的应用研究及系统设计[J].暖通空调,2024,54(增刊1):435-440.
ZOU Li, WANG Liang, CONG Beihua. Application research and system design of high pressure water mist cooling technology in long tunnel[J]. Heating Ventilating &

- Air Conditioning,2024,54(sup 1):435-440.
- [4] 张庆明,杨寿忠,向兵,等.不同通风方式对高地温施工隧道通风降温效果影响研究[J].武汉理工大学学报(信息与管理工程版),2024,46(2):210-215.
ZHANG Qingming,YANG Shouzhong,XIANG Bing,et al. Study on the influence of different ventilation methods on the ventilation and cooling effect of high ground temperature construction tunnel[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Information & Management Engineering),2024,46(2):210-215.
- [5] 覃宇含,孟祥林,苏留锋,等.吸收式制冷系统应用于高温热害隧道降温的理论分析研究[J].隧道建设(中英文),2023,43(11):1887-1895.
QIN Yuhan,MENG Xianglin,SU Liufeng,et al.Theoretical analysis of absorption refrigeration system for treating high temperature heat damage in tunnels[J]. Tunnel Construction,2023,43(11):1887-1895.
- [6] 姚庆,夏才初.考虑季节影响的地铁区间隧道围岩动态热交换研究[J].施工技术(中英文),2024,53(10):44-50.
YAO Qing,XIA Caichu.Research on dynamic heat exchange in subway tunnel surrounding rock considering seasonal effects[J].Construction Technology,2024,53(10):44-50.
- [7] 姚曙光,夏才初.地铁隧道岩土体取热蓄冷系统的效果及参数分析[J].施工技术(中英文),2024,53(5):83-89.
YAO Shuguang,XIA Caichu.Effectiveness and parameter analysis of heat extraction and cold storage system for rock and soil in subway tunnel[J].Construction Technology, 2024,53(5):83-89.
- [8] 马超豪,梁艳,汪涛,等.基于高地温隧道热流耦合温度场的数值模拟研究[J].北方交通,2023(1):77-80.
MA Chaohao,LIANG Yan,WANG Tao,et al.Research on numerical simulation of coupled temperature field based on heat flow of high geothermal tunnel[J].Northern Communications,2023(1):77-80.
- [9] 乔红彦.高地温隧道超长独头施工降温及热环境特征研究[J].地下空间与工程学报,2023,19(2):632-639.
QIAO Hongyan. Research on cooling and thermal environment of super-long single-headed tunnel construction with high ground temperature[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2023,19(2):632-639.
- [10] 谢高英.高地温隧道施工期冰块辅助降温效果研究[J].地下空间与工程学报,2023,19(4):1329-1338.
XIE Gaoying. Research on cooling effect of ice cube assisted method in high ground temperature tunnel construction period[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2023,19(4):1329-1338.
- [11] 方建平,张孟喜,姚潇南.基于双光栅传感器隧道混凝土温度应变发展特性研究[J].中外公路,2024,44(4):217-224.
FANG Jianping,ZHANG Mengxi,YAO Xiaonan. Temperature and strain development characteristics of tunnel concrete based on double grating sensors[J].Journal of China & Foreign Highway,2024,44(4):217-224.
- [12] 陈奇,赵祎琪,周云雷,等.地热区隧道施工热害分级防护方法研究[J].地下空间与工程学报,2024,20(5):1717-1729,1750.
CHEN Qi,ZHAO Yiqi,ZHOU Yunlei,et al. Study on hierarchical prevention method of heat hazard in geothermal tunnel construction[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2024, 20(5): 1717-1729,1750.
- [13] 岳昆,包小华,敖翔,等.隧道施工期间不同通风方式的对比研究[J].中外公路,2024,44(5):218-224.
YUE Kun,BAO Xiaohua,AO Xiang,et al. Comparative study of different ventilation methods during tunnel construction[J].Journal of China & Foreign Highway,2024, 44(5):218-224.
- [14] 田宝华,张彪,刘延龙,等.考虑环境湿度条件下高地温隧道喷雾降温研究[J].公路工程,2023,48(6):23-30,93.
TIAN Baohua,ZHANG Biao,LIU Yanlong,et al.Research on spray cooling in high geothermal temperature tunnel considering ambient humidity[J]. Highway Engineering, 2023,48(6):23-30,93.
- [15] 陈兴,苏卫迪,蒋雅君,等.岩溶地区隧道衬砌施工缝渗漏水处治技术[J].中外公路,2022,42(2):193-196.
CHEN Xing,SU Weidi,JIANG Yajun,et al. Treatment technology of leaking of tunnel lining construction joints in Karst area[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022,42(2):193-196.
- [16] 李准.玉磨铁路高地温隧道降温技术及其经济研究[J].铁道工程学报,2022,39(6):95-99.
LI Zhun. Technical and economic research on the efficiency reduction and cooling measures in high geothermal tunnel in Yuxi-Mohan railway[J]. Journal of Railway Engineering Society,2022,39(6):95-99.
- [17] 王志杰,姜逸帆,林铭,等.高地温尼格隧道综合降温体系研究[J].隧道建设(中英文),2022,42(1):16-25.
WANG Zhijie,JIANG Yifan,LIN Ming,et al.Comprehensive cooling system of nige tunnel with high ground temperature [J].Tunnel Construction,2022,42(1):16-25.
- [18] 刘庆平,冯炼.长大公路隧道喷雾降温可行性分析[J].制冷与空调(四川),2020,34(5):577-580.
LIU Qingping,FENG Lian. Feasibility analysis of spray cooling for long highway tunnel[J]. Refrigeration & Air Conditioning,2020,34(5):577-580.
- [19] 王林峰,钟宜宏,李鸣,等.高瓦斯隧道温湿度联合作用下瓦斯分布以及运动规律[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2022,41(10):100-107.
WANG Linfeng,ZHONG Yihong,LI Ming,et al. Gas distribution and movement rule under combined action of temperature and humidity in high gas tunnel[J].Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science),2022,41 (10):100-107.
- [20] 肖益民,毛宏智,陈军,等.冷凝对隧道通风热压的影响分析[J].中国公路学报,2022,35(8):258-266.
XIAO Yimin,MAO Hongzhi,CHEN Jun,et al. Thermal pressure analysis of the influence of condensation in tunnel ventilation[J]. China Journal of Highway and Transport,2022,35(8):258-266.