

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2014.05.007

不同通风方式对高温隧道掌子面温降效果研究

李俊生, 宗仁栋, 敖小兵, 罗福应

(中铁交通投资集团有限公司, 广西 南宁 530021)

摘要: 高温现象是长大隧道开挖过程中常见的一种自然灾害, 常用的解决手段是通风降温。以某高温隧道为例, 结合 Fluent 数值分析, 从理论层面探究了侧壁压入式通风、混合式通风和拱顶压入式通风 3 种常用通风方式解决这类灾害的优劣, 并从微观层面分析了隧道内射流气流的运动规律, 探讨了较为适宜的温控方式。研究表明: 高温隧道采用侧壁压入式通风温控方式的降温效果不佳; 采用混合式通风温控方式的降温效果最差, 且影响风机使用寿命, 存在安全隐患; 采用拱顶压入式通风温控方式在应对高温隧道时表现出高效的降温效果。

关键词: 高温隧道; 温控; 局部温降; 通风; Fluent 软件

中图分类号: U453.5

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2014)05-0032-06

The Effect of Different Ventilation Modes on High Temperature Drop of Tunnel Face

Li Junsheng, Zong Rendong, Ao Xiaobing, Luo Fuying

(China Railway Communications Investment Group Co., LTD., Nanning 530021, China)

Abstract: High temperature phenomenon is a kind of common natural disasters in the process of tunnel excavation, and the common solution is ventilation cooling. With a high temperature tunnel as an example and combining with the Fluent numerical analysis, explores from the theoretical level 3 kinds of common ventilation methods such as the side wall forced ventilation, the hybrid ventilation and the vault ventilation to solve this kind of disaster, and from the micro level analyzes the motion law of tunnel jet flow and discusses the suitable temperature control mode. The research results show that: the side wall pressure ventilation temperature control for high temperature tunnel has poor cooling effect; the cooling effect of hybrid ventilation temperature control is the worst, moreover it affects the service life of fans and exists security risks; the vault pressed ventilation temperature control mode for high temperature tunnel shows the efficient cooling effect.

Keywords: high-temperature tunnel; temperature control; local temperature drop; ventilation; Fluent software

0 引言

某客运专线隧道在开挖过程中遭遇了 40 °C 的高温灾害, 严重影响了施工进度, 施工方也曾采取了一些通风降温措施, 但是降温效果不理想。因此, 有必要对隧道内射流气流的运动规律进行分析与研究,

以便改进已有通风降温措施, 寻求较佳的降温通风方法, 解决高温带来的影响。

隧道施工过程中, 常用的通风降温方式有侧壁压入式通风、混合式通风和拱顶压入式通风 3 种^[1], 它们是根据通风过程中风筒布置位置的不同来进行区分的。已有研究中, 关于各通风方式对于隧道的

收稿日期: 2014-08-05

作者简介: 李俊生(1988-), 男, 湖南常德人, 中铁交通投资集团有限公司工程师, 硕士, 主要研究方向为隧道通风防灾,

E-mail: chooseljswillbeok@163.com

通风降温效果方面的比较研究较少, 而合理的通风方式能降低通风成本、有效控制掌子面温度、提高通风降温效率^[2]。因此, 本文拟借助 Fluent 软件, 模拟以上常用的 3 类通风方式^[3], 采用设置监测截面、监测直线等方法进行观测, 分别分析不同通风方式对隧道内温度小于 28 °C^[4](即华氏 301 度) 等值体区域涵盖图、射流气流微元迹线规律的影响, 以便选择适用于高温隧道施工的通风降温方案, 改善掌子面人员密集活动区的局部环境温度。

1 工况参数及监测截面

王英敏^[1]指出, 矿井通风设置中, 风管出口到掌子面的距离应小于有效射程, 通常 $L_x=(4\sim 5)\sqrt{S}$ ^[5], 其中 S 为隧道断面面积。根据这一要求, 设定本研究中模拟的隧道相关参数如表 1 所示。

表 1 隧道工况参数

面积 /m ²	半径 /m	底宽 /m	送风速度 / (m · s ⁻¹)
100	6.87	13.2	20

风管直径 /m	隧道温度 / °C	送风温度 / °C
1.5	40	20

为了更好地观察隧道内气流微元的迹线, 设置距掌子面的距离 z 分别为 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30 m 处的截面为监测特征截面, 如图 1 所示。

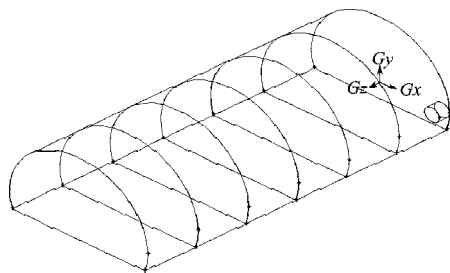


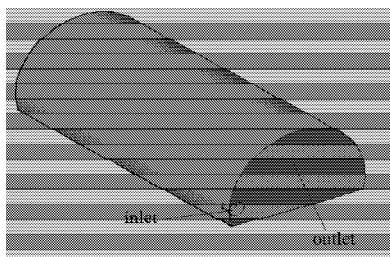
图 1 监测截面示意图

Fig. 1 Schematic diagram of monitoring section

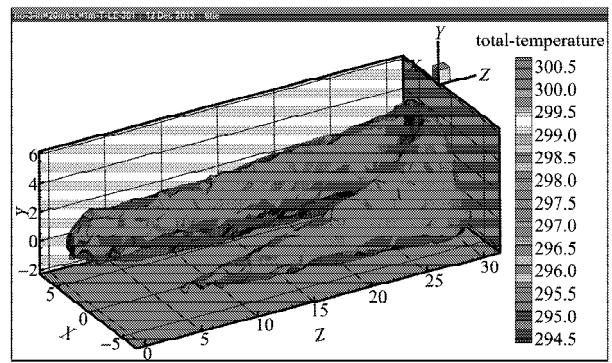
2 侧壁压入式通风温控评价与分析

2.1 模型及温度小于 28 °C 等值体区域涵盖图

侧壁压入式通风温控方式是指将风管置于侧壁处的通风方式, 其模型如图 2a 所示, 该方式下温度小于 28 °C 的特征监测截面温度云图如图 2b 所示。



a) 侧壁压入式通风模型



b) 温度小于 28 °C 的等值体区域涵盖图

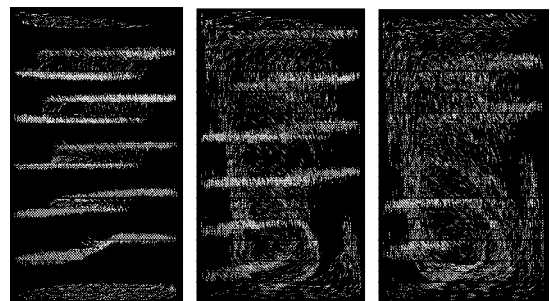
图 2 侧壁压入式通风温控模型与界面温度云图

Fig. 2 Temperature control model and the interface temperature contours of sidewall forced ventilation

观察采用侧壁压入式通风温控方式下隧道内温度小于 28 °C 的等值体区域涵盖图的分布情况, 可得出, 隧道内温度小于 28 °C 的等值体区域在 outlet 面附近并不涵盖, 由此可知此类通风方式的温控效果不佳。

2.2 侧壁压入式通风温控效果评价

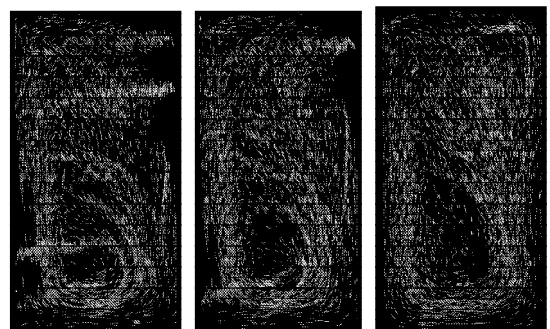
读取特征截面监测到的气流微元流动轨迹, 即迹线^[6], 可以找到侧壁压入式通风方式并不适用于高温隧道温度控制的原因。图 3 所示为从拱顶俯视监测截面的气流微元从开始到稳定的迹线图。



a) t=0.5 s

b) t=1.0 s

c) t=1.5 s



d) t=2.0 s

e) t=2.5 s

f) t=3.0 s

图 3 侧壁压入式通风气流微元迹线图

Fig. 3 The sidewall ventilation airflow micro trace chart

由图 3 可以看出, 侧壁压入式通风方式下气流微元的流动轨迹规律为: 开始阶段, 气流呈有序运动;

随着通入气体量的增加，出现涡流卷吸，致使部分高温气体原地打转。

2.3 温控效果分析

研究隧道内气流微元的迹线规律可以分析出侧壁压入式通风温降效果不佳的原因如下：

1) 射流气体由 inlet 面射入隧道，然后沿程附壁运动直至掌子面，由于回流区气流与射流区气流相互掺混^[1]，它们因进行能量、动量的交换而形成了涡流，致使混合气流在离掌子面 5~15 m 区域内“不断打转”。随着交换时间的推移，能量逐渐耗散，致使高温空气“出不去”，使得隧道掌子面部分区域的温降效果较差。

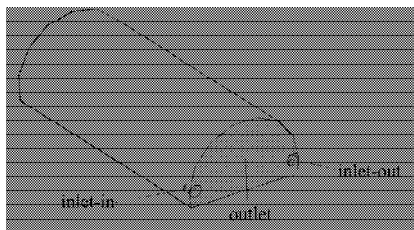
2) 在低速、污浊、高温气流回流向 outlet 面时，由于受到 inlet 面射入的高速、新鲜、低温的气流作用，速度梯度、温度梯度、污浊物浓度相差较大，两股气流势必进行动量、热对流、污浊物浓度等一系列复杂的交换。从而导致离 outlet 面较近和部分原本应穿过 outlet 面并离开隧道掌子面 30 m 范围的气流，改变运动方向折返回来，再次掺混在 inlet 面的射入气流中，使得温控效果比预期效果大打折扣。这也是隧道内温度小于 28 °C 等值体区域在 outlet 面附近并不涵盖的原因。

基于以上原因，回流区气流与射流区气流形成涡流，不能很好地将隧道中高温气体的热能交换出去，因此，采取侧壁压入式通风温控模式的温控效果不理想。

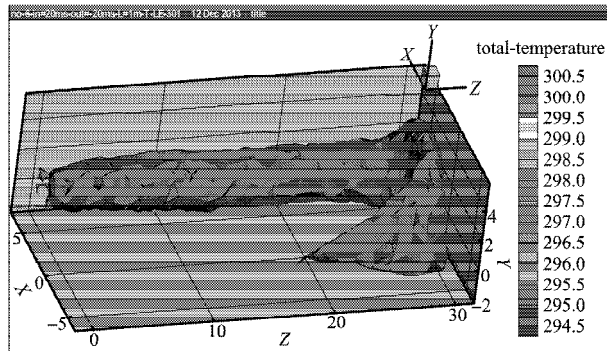
3 混合式通风温控评价与分析

3.1 模型及温度小于 28 °C 等值体区域涵盖图

混合式通风温控方式是指送风机械与抽风机械同时工作的一种通风方式，其模型如图 4a 所示，该方式下温度小于 28 °C 的特征监测截面温度云图如图 4b 所示。观察图 4 中图 b 所示采用混合式通风温控方式下隧道内温度小于 28 °C 的等值体区域涵盖图的分布情况，可以看到隧道内温度小于 28 °C 的等值体区域在 outlet 面附近并不涵盖，相较于侧壁压入式通风温控方式，其温控效果更差。



a) 混合式通风模型



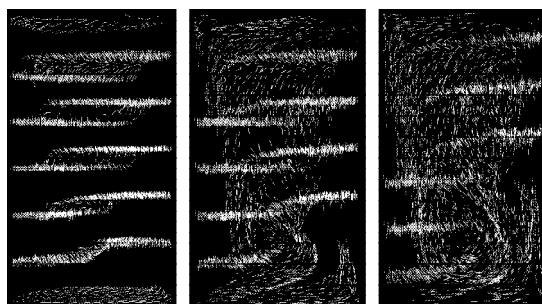
b) 温度小于 28 °C 的等值体区域涵盖图

图4 混合式通风温控模型与界面温度云图

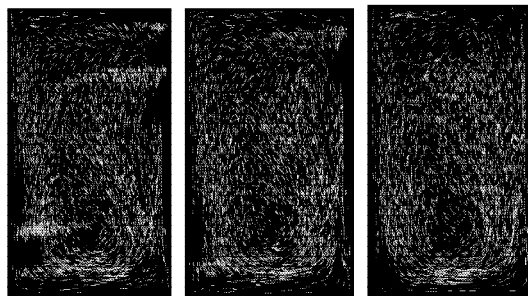
Fig. 4 Temperature control model and the interface temperature contours of hybrid ventilation

3.2 混合式通风温控效果评价

混合式通风也是隧道施工过程中常采用的降温方式之一。在遇到高温隧道时，施工方抱着“一边送风、一边抽气效果肯定好”的心态而选择混合式通风温控方式，但是其实际温降效果较差。施工方所希望的是送入的低温气流在隧道内与高温气流经过“充足的热交换”之后，再将其“吸离”掌子面，以使低温气流冷量得到最大程度的利用。但是由图 3 和 4 所示特征监测截面温度云图的模拟结果表明，在风机功率相同的情况下，混合式通风比侧壁压入式通风温降效率要差得多。究其原因，可以从图 5 所示拱顶俯视特征截面监测气流微元从开始到稳定的迹线图中找到答案。



a) t=0.5 s b) t=1.0 s c) t=1.5 s



d) t=2.0 s e) t=2.5 s f) t=3.0 s

图5 混合式通风气流微元迹线图

Fig. 5 The hybrid ventilation airflow micro trace chart

由图5可以看出, 混合式通风方式下气流微元的流动轨迹规律为: 开始阶段, 气流呈有序运动, 随着通入气体量的增加, 出现涡流卷吸, 并且比侧壁压入式通风方式下的更为严重, 致使高温气体很难被排出, 因而隧道内温控效果较差。

3.3 温控效果分析

研究隧道内气流微元的迹线规律, 可以得出混合式通风温降效果较差的原因如下:

1) 假定两台风机的机械功率相同, 即 inlet-in 与 inlet-out 的进/出风速度大小相等, 但在实际施工过程中, 对 inlet-out 面进行质量流率 (mass flow rate) 监测时发现, 其质量流率的值小于 inlet-in 面的。可能的原因在于: 抽风机械置于隧道壁面附近, 气流运动受限, 没有足够的气流由 inlet-out 面吸入, 导致抽风机内存在带负压的工作情况, 通常伴随着柔性风管“干瘪”现象, 机械本身工作效率低下。

2) 常用风机的风管直径为 1.5 m, 其截面积为 1.77 m², 相对于整个隧道的断面面积 (100 m²) 来说, 风管面积很小, 因而导致回流区部分气流并不能被 inlet-out 面所抽离。并且, inlet-out 面紧贴隧道壁面, 受到壁面的限制, 使得射入隧道的质量流率与抽离隧道的质量流率存在差值, 这一差值的气流经由 outlet 面离开。

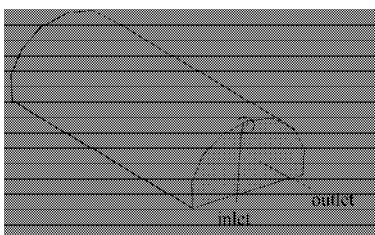
3) 抽风机源源不断地往外抽走空气, 相对于侧壁压入式通风温控方式来说, 其降低了隧道内的压强。这导致从 inlet-in 面射入隧道内的气流由于受压强的影响, 其速度降低速率加快, 难以与隧道内高温空气进行充足的热交换而“过早”被抽离。

基于上述原因, inlet-in 与 inlet-out 口的进/出风实际效率不一致, 不能很好地将隧道中高温气体的热能交换出去, 因此, 以混合式通风温控模式进行的温控效果较差。

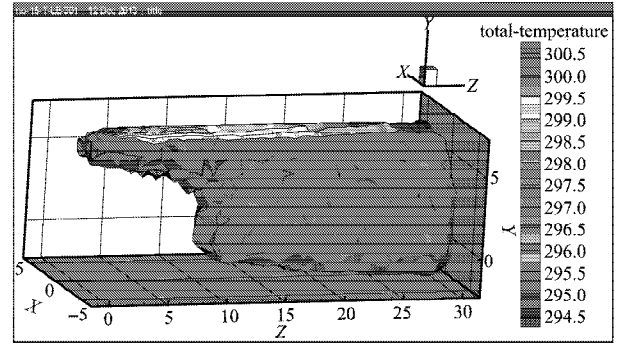
4 拱顶压入式通风温控评价与分析

4.1 模型及温度小于 28 °C 等值体区域涵盖图

拱顶压入式通风温控方式的模型见图 6a, 该方式下温度小于 28 °C 的特征监测截面温度云图见图 6b。



a) 拱顶压入式通风



b) 温度小于 28 °C 等值体区域涵盖图

图6 拱顶压入式通风温控模型与界面温度云图

Fig. 6 Temperature control model and the interface temperature contours of vault ventilation

观察图 6b 所示拱顶压入式通风隧道内温度小于 28 °C 的等值体区域涵盖图分布情况, 可知此通风方式的温控效果较好。

此通风方式在隧道施工通风中采用较少, 主要是因为该方式下风管需置于拱顶处, 施工较为复杂, 且悬吊设备不仅较麻烦还会影响施工。但是本隧道为高温隧道, 属特殊情况, 精心的施工组织及现场管理是可以采用这一通风方式的。

4.2 拱顶压入式通风温控效果评价

相比之前所设定的两类通风温控方式, 拱顶压入式能够很好地控制隧道内的温度。究其原因, 可以从图 7 所示侧视图观察特征截面监测气流微元从开始到稳定的迹线图中得到解释。

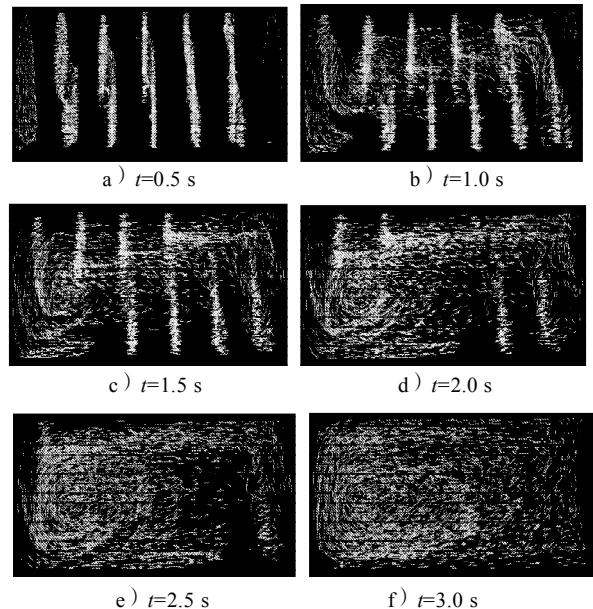


图7 拱顶压入式通风气流微元迹线图

Fig. 7 The vault ventilation airflow micro trace chart

由图 7 可以看出拱顶压入式通风方式下气流微元的流动轨迹规律为: 开始阶段, 隧道内的气流呈有序运动, 随着通入气体量的增加, 冷气流下沉, 与

隧道内热空气的热对流强烈，送入空气冷量得到了较好的利用。

4.3 温控效果分析

研究隧道内气流微元的迹线规律可以分析出拱顶压入式通风降温效果较好的原因如下：

1) 气流自 inlet 面射入隧道内，沿程运动至掌子面，回流区气流也掺混进来。在掌子面附近同样出现涡流现象，类似于侧壁压入式通风和混合式通风，涡流气体“打转”。仔细观察气流微元迹线规律可以发现，此类通风方式的涡流并非一直“原地打转”，而是在涡流的“形成—发展—稳定”中，不断地离开“涡流团”，同时也有气流不断地掺混补充进来。这才是拱顶压入式通风温控效果较好的主要原因。

2) 本方式下出现的这类涡流现象，不但没有降低通风效率，反而加快了低温气流与高温气流间的热交换，提高了风机的工作效率。

3) 由 inlet 面射入的气流温度较低，而隧道内原有气流的温度较高，根据热胀冷缩原理，冷空气的密度较大，有“下沉”的运动趋势；热空气的密度较小，有“上扬”的运动趋势。这样，上扬的热空气正好遇到射入的冷空气，促使并加快了冷热气体的热交换进程；下沉的冷空气也在下沉过程中与高温空气进行热交换，并且在这个过程中被“挤出” outlet 面。

基于上述原因，inlet 与 outlet 面的进/出风能很好地进行热交换，不断将隧道中高温气体的热能交换出去，因此，采用拱顶压入式通风温控模式的温控效果较佳。

5 监测直线温度分析

为了验证拱顶压入式通风方式的温控效果，为实际操作提供理论依据，本研究在该方式下设置了3条直线监测其温度变化情况。

5.1 监测直线设置

本研究中，设置沿z轴方向的3条监测直线①~③，具体如图8所示。

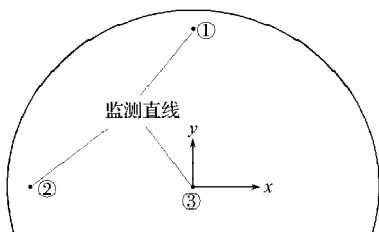


图8 监测直线示意图

Fig. 8 Schematic diagram of monitoring line

由于拱顶压入式通风隧道的温度分布为左右对称，所以未在x轴正向设置监测直线，其变化可以参考监测直线②。监测直线①和监测直线②距离隧道壁面的距离为0.5d，监测直线③位于圆心处，其中d为风管直径。

5.2 监测直线数据分析

试验所得各监测直线的温度变化如图9所示。

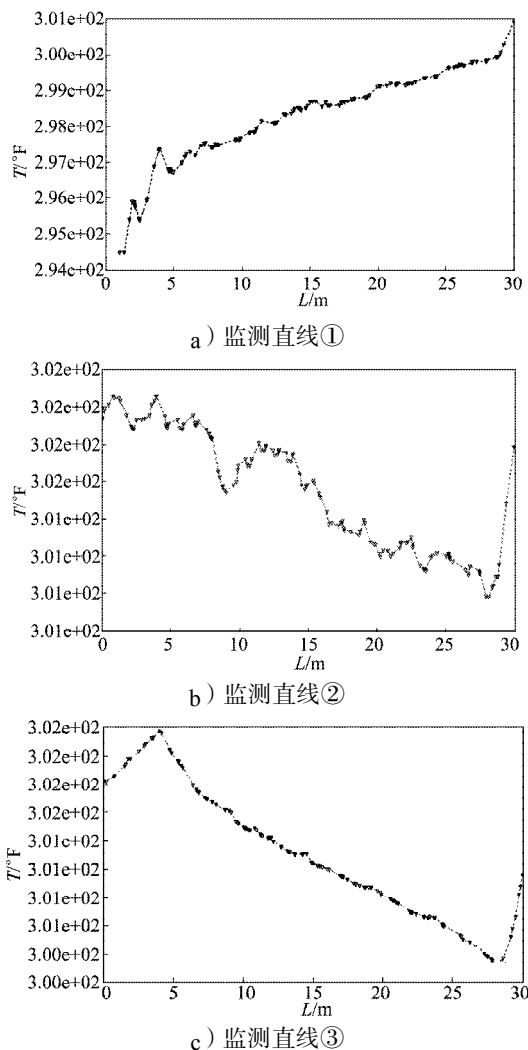


图9 监测直线沿程变化图

Fig. 9 Diagram for the variation of monitoring line

由图9可得出：

1) 监测直线①为射流中心线，它靠近隧道壁面，由图9中的图a可见，射流中心温度沿程增加，并且维持在27℃以内，满足规范要求。同时，图a的结果表明，高温围岩壁面的热辐射尚不足以大幅度增加射流气流的温度。

2) 监测直线②主要是监测回流气流，由图9中的图b可见，在z∈(0, 15)m内，T>28℃，其主要是因为，射流气流与隧道内原有气流进行了充足的热交换之后气温升高；其次，监测直线靠近隧道壁面，

其受高温壁面热辐射作用较强。

3) 监测直线③主要监测的也是回流气流, 由图9中的图c可见, 在 $z \in (0, 10)\text{m}$ 内, $T > 28\text{ }^\circ\text{C}$, 其主要原因是因为气流回流到 outlet 面时“冷量”被耗尽, 致使温度大于 $28\text{ }^\circ\text{C}$ 。

4) 在 $z \in (28, 30)\text{m}$ 内, 3个监测直线所监测到的温度数据都存在一个急剧上升的变化趋势, 且斜率相近。这是因为受掌子面围岩热辐射的影响, 致使距离掌子面 2 m 区域内气流温度陡增, 故需在此区域做特殊温控处理。

通过以上分析, 可知采用拱顶压入式通风温控方式的温控效果较为理想, 可以在实际工程中应用, 但是需要注意在距离掌子面 2 m 的区域内做特殊温控处理。

6 结论

通过以上试验与分析, 可得出如下结论:

1) 隧道在施工过程中多采用侧壁压入式或混合式通风, 在遭遇高温自然灾害时, 施工人员因没意识到其特殊性, 往往采取增加机械数量和增大风管直径的应对方式, 现场温控效果并不理想, 建议采用拱顶压入式通风方式以期获得良好的降温效果。

2) 对于高温隧道, 混合式通风方式的温降效果较差, 并且在增加风机数量、高耗能的情况下, 故不推荐采用此类方式。

3) 隧道内附壁设置抽风机械时, 因风机本身多为带负压工作, 柔性风管时常出现“干瘪”现象, 影响机械使用寿命, 存在一定的安全隐患, 因此应尽量避免使用此种方式。

以上结论给高温隧道通风降温控制提供了理论

依据, 可供实际施工参考。

参考文献:

- [1] 王英敏. 矿井通风与防尘[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1992: 192-203.
Wang Yingmin. Mine Ventilation and Dust Control[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1992: 192-203.
- [2] 李俊生. 基于通风方式对高温隧道掌子面温降效果的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
Li Junsheng. Research on Ventilation Mode of High Temperature Tunnel Face Temperature Drop Effect[D]. Chengdou: Southwest Jiaotong University, 2014.
- [3] 韩占忠. FLUENT: 流体工程仿真计算实例与应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2010: 38-46.
Han Zhanzhong. FLUENT: Fluid Engineering Simulation Examples and Application[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2010: 38-46.
- [4] 中铁二局集团有限公司. TB10204—2002铁路隧道施工规范[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2002.
China Railway Bureau Group Co., Ltd. TB10204—2002 Railway Tunnel Construction Specification[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2002.
- [5] 余常昭. 紊动射流[M]. 北京: 高等教育出版社, 1993: 118-125.
Yu Changzhao. Turbulent Jet[M]. Beijing: Higher Education Press, 1993: 118-125.
- [6] 欧特尔 H. 普朗特流体力学基础[M]. 朱自强, 钱翼稷, 李宗瑞, 译. 北京: 科学出版社, 2008: 37-40.
Alltel H. Prandtl Fluid Mechanics Basics[M]. Zhu Ziqiang, Qian Yiji, Li Zongrui, Translated. Beijing: Science Press, 2008: 37-40.

(责任编辑: 廖友媛)