

文章编号: 1674-599X(2021)01-0060-09

长大隧道双侧壁导坑法施工通风优化研究

曾婉琳¹, 凌同华¹, 张胜²

(1. 长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 湖南城市学院 土木工程学院, 湖南 益阳 413000)

摘 要: 针对长大隧道施工中爆破生成的 CO 对施工产生的不良影响。本研究在双侧壁导坑法施工中, 采用压入式通风, 测试在长大隧道中的通风效果, 利用 Fluent 流体力学软件对不同导坑、台阶长度与风筒位置的隧道通风模型进行数值模拟, 分析了其流场特性与 CO 气体扩散规律。研究表明: 隧道内导坑和台阶的存在, 会影响射流发展; 导坑和台阶工作面前方有涡流区形成, 会影响通风效果; 相同风筒布置条件下, 随着导坑和台阶长度的增加, 涡流区范围越明显, CO 气体越难排出; 隧道导坑和台阶长度相同的条件下, 风筒布置于隧道拱顶时, CO 气体的排放效果最好。该结果可为采用双侧壁导坑法施工的长大隧道通风提供参考依据。

关键词: 长大隧道; 压入式通风; 双侧壁导坑法; CO 分布; 数值模拟

中图分类号: U459.2

文献标志码: A

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021.01.009

Ventilation optimization for long tunnel constructed by both side drift method

ZENG Wan-lin¹, LING Tong-hua¹, ZHANG Sheng²

(1. School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;

2. School of Civil Engineering, Hunan City University, Yiyang 413000, China)

Abstract: During the construction of long tunnel, CO gas generated by blasting have a negative impact on construction safety and progress. In order to study the effect of press-in ventilation in long tunnel constructed by the both side drift method, the computational fluid dynamics software Fluent was used to model tunnel ventilation with different heading pits, step lengths and air duct layout positions., analysis the flow field characteristics and CO gas diffusion law were investigated. The results show that the pilot pits and steps in the tunnel will affect the development of jets, the ventilation effect will affected by the vortex areas located in front of the pilot pits and steps. It is easier to form the vortex zone impacting the discharging of CO gas with the increase of the length of the pilot pits and steps, when air duct arrangement conditions is the same. When the tunnel head and step length are the same, and the air duct is arranged on the tunnel vault, the CO gas can be diluted rapidly. This study provides a reference for the ventilation of tunnel using the construction of the both side drift method.

Key words: long tunnel; press-in ventilation; both side drift method; CO distribution; numerical simulation

在长大隧道施工过程中, 随着爆破工作的进行, 隧道内会产生大量的有害气体, 造成隧道内部的空气污染。若不及时通风排出, 将威胁到施工人

员的生命健康, 影响隧道施工进度, 并带来不可估量的经济损失^[1-5]。因此, 做好长大隧道的施工通风工作是隧道总体施工过程中的重要环节。

收稿日期: 2020-08-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(51678071)

作者简介: 曾婉琳(1996-), 女, 长沙理工大学硕士生。

压入式通风是长大隧道的一种常用的通风方式, 通过风机、风筒把新鲜空气压入隧道掌子面附近, 使隧道内的有害气体排出隧道, 具有安装方便、有效射程长、排出炮烟的作用强等优点。许多学者已对压入式通风的影响因素进行了研究。刘钊春^[6]等人利用 ADINA 有限元软件, 研究了独头掘进隧道压入式通风条件下有害气体的减排速度。方勇^[7]等人利用 Fluent 流体力学软件, 探讨了风筒出口位置对隧道施工通风效果的影响。刘敦文^[8]等人运用正交数值模拟试验, 分析了瓦斯隧道施工中风筒直径、悬挂位置及风筒口与掌子面距离对瓦斯浓度影响的重要性顺序。彭佩^[9]等人采用 Fluent 软件分析了台阶法施工的瓦斯分布规律, 提出了通过增加局扇改善通风效果的做法。张恒^[10]等人利用 Fluent 软件, 考虑压入式通风筒与射流风机共同作用对高瓦斯隧道通风效果的影响, 对射流风机、风筒的布置进行了优化。Fang^[11]等人利用 CFD 软件对瓦斯隧道全断面法与台阶法开挖的压入式通风进行了模拟, 确定了全断面与台阶法施工下的施工通风方案。Chang^[12]等人采用 CFD 软件, 模拟分析了风筒位置、通风口与掌子面的距离、通风风速及隧道横截面面积对压入式通风隧道中流场和 CO 浓度的影响, 确定了 CO 浓度分布与通风时间的关系。双侧壁导坑法是隧道施工中常采用的开挖方法, 在大断面隧道中广泛应用^[13]。一些学者还对全断面与台阶法开挖下的隧道施工通风情况进行了研究, 但针对双侧壁导坑法施工的通风布置对隧道内流场特性及污染气体浓度分布影响的研究鲜见。因此, 作者拟采用 CAD 软件建立隧道的三维模型, 利用 ICEM 软件对模型进行网格划分, 再用 CFD 软件中的求解器 Fluent 对隧道施工通风过程进行数值模拟, 分析不同工况下流场中速度与污染物气体扩散的情况, 并对双侧壁导坑法施工下的隧道通风方法提出优化措施。

1 模型建立

以浙江某隧道为工程背景, 该隧道断面面积 116.63 m², 净宽 14.00 m, 净高 9.73 m, 隧道左、右侧导坑断面面积 28.36 m², 主洞拱部面积 20.54 m², 主洞上半断面面积 19.79 m², 主洞下半断面面积 19.58 m², 模拟隧道总长度 200 m, 风筒直径

1.4 m, 风筒长 180 m。为了研究双侧壁导坑施工的导坑与台阶长度及悬挂位置的共同影响, 设置 2 类通风模型: A 类模型为导坑和台阶长度为变量, 风筒悬挂位置在隧道左侧, 风速为 14 m/s; B 类模型为风筒悬挂位置为变量, 导坑和台阶长度不变(双侧导坑长 15 m, 上、下台阶长 5 m), 风筒风速为 14 m/s。试验方案设置见表 1。

表 1 各工况试验方案

Table 1 Test plan for each working condition

| 方案 编号 | 导坑长/m | | 台阶长/m | | 风筒位置 |
|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|------|
| | L ₁ | L ₂ | L ₃ | L ₄ | |
| A ₁ | 10 | 0 | 0 | 0 | 左侧 |
| A ₂ | 10 | 10 | 0 | 0 | 左侧 |
| A ₃ | 15 | 10 | 5 | 0 | 左侧 |
| A ₄ | 15 | 15 | 5 | 5 | 左侧 |
| B ₁ | 15 | 15 | 5 | 5 | 左侧 |
| B ₂ | 15 | 15 | 5 | 5 | 拱顶 |
| B ₃ | 15 | 15 | 5 | 5 | 中央 |

L₁、L₂、L₃、L₄ 分别代表左导坑长度、右导坑长度、主洞拱部长度及主洞上半断面长度。隧道左、右导坑, 主洞拱部, 主洞上、下断面位置如图 1 中所标 I、II、III、IV、V 的位置。隧道模型纵、横断面图如图 1~2 所示。

根据隧道的几何结构, 利用 ICEM 软件进行网格划分, 并对模型进行网格无关性验证。通过逐级

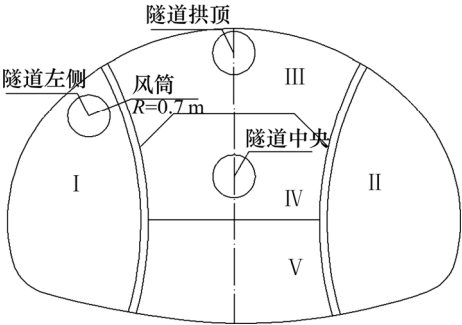


图 1 模型横断面示意

Fig. 1 Cross section of model

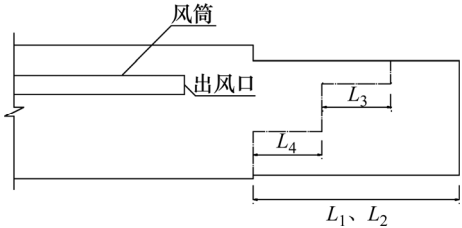


图 2 模型纵断面示意

Fig. 2 Longitudinal section of model

加密网格,对比不同网格数量下的模拟结果,最后选择满足计算精度的网格模型。 A_1 工况网格总数为 1 894 180, 网格质量评价指数最小值为 0.664, 最大值为 0.998, 该指标范围为 0~1, 越接近 1 的网格越好。将隧道施工开挖方向确定为 y 轴的正方向, 隧道横断面为 x - z 平面, x 、 z 轴正方向、模型网格划分如图 3 所示。

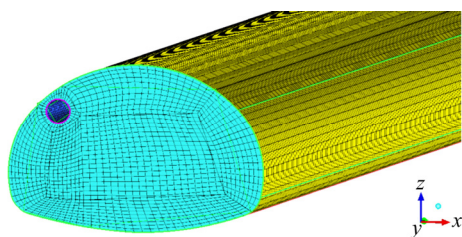


图 3 模型网格划分

Fig. 3 Model meshing

2 数学模型及 CO 初始浓度计算

2.1 数学模型

气体在隧道内流动情况较为复杂,需对隧道内气体流动情况进行简化,并做出基本假定^[14]: ①隧道内流体视为三维黏性不可压缩流体且非稳态; ②壁面绝热,忽略气体黏性力做功; ③假定初始时刻,有害气体均匀地分布在炮烟抛掷距离内。

边界条件设置:通风筒出风口设为速度入口;隧道口设为自由流出边界;结构网格与非结构网格交界面设为内部面边界条件;风筒管壁及隧道壁面设为壁面边界条件,默认为无滑移速度。

气体在隧道内的流动属于紊流流动状态,所以湍流模型采用计算功能较强、可信度和精度较高的 RNG k - ε 模型^[15]。隧道内气体流动需遵循数学模型,包括:质量守恒方程、动量守恒方程及能量守恒方程,选用无化学反应的组分运输方程来模拟隧道内 CO 气体的运动情况。求解方法是选择压强速度关联算法中的 SIMPLE 格式,收敛条件设置为各变量的残差是否小于 10^{-3} ,若小于则视为满足计算收敛。

2.2 CO 初始浓度计算

隧道爆破作业后,在工作面前方会产生大量 CO、CO₂、NO_x 及粉尘等有害物质。由于除 CO 以外的其他气体均可溶于水,粉尘也可通过水雾帘幕降尘,唯独 CO 的状态较为稳定,因此以 CO 浓度在隧道内的分布情况作为通风效果的评判标准。

用体积法计算用药总量 G 的公式为^[14]:

$$G = kL_5A \quad (1)$$

式中: G 为一个爆破循环的总药量, kg; k 为爆破单位体积岩石的炸药平均消耗量(简称炸药的单耗量), kg/m³, 其值取 1.0; L_1 为一个爆破循环的掘进进尺, m; A 为开挖断面面积, m²。

初始浓度计算式为:

$$c = \frac{Gb}{L_6A} \quad (2)$$

式中: c 为 CO 初始浓度; G 为爆破炸药用量, kg; b 为每千克炸药产生的有毒气体, m³/kg, 取 0.04; L_5 为炮烟抛掷长度, m, $L_6 = 15 + G/5$ 。

A 类模型中的 4 种工况按照双侧壁导坑施工顺序依次设置,假设后一工况是在前一工况所产生的 CO 浓度完全排出隧道后进行的。如: A_1 模型的 CO 初始浓度仅由左侧导坑开挖 10 m 所产生,抛掷距离从左侧导坑工作面算起。A 类模型 CO 初始浓度具体计算结果见表 2。

表 2 爆破后隧道内 CO 初始浓度

Table 2 Initial concentration of CO in the tunnel after

| 方案 编号 | 总药量/ kg | 抛掷距 离/m | blasting | |
|----------|------------|------------|---------------------------|----------------------------------|
| | | | CO 生成 量/m ³ | CO 初始浓 度/($\times 10^{-6}$) |
| A_1 | 283.57 | 71.71 | 11.34 | 1 516 |
| A_2 | 283.57 | 71.71 | 11.34 | 1 470 |
| A_3 | 244.51 | 63.90 | 9.78 | 1 501 |
| A_4 | 240.76 | 63.15 | 9.63 | 1 444 |

因为 B 类的导坑及台阶长度 A_4 工况的相同,所以 CO 初始浓度也与 A_4 工况的相同。中国隧道施工中 CO 气体浓度最高容许浓度为 24 ppm,特殊情况允许进入浓度为 80 ppm。

3 结果分析

3.1 流场分析

1) 导坑与台阶长度的影响

通风 180 s 后,隧道内气体流速已经稳定,所以取 180 s 时的数值计算结果进行流场分析,以 A 类模型进行数值模拟计算。经过 Fluent 软件自带的后处理功能,可以得到出风口中心线至左侧导坑工作面的速度变化曲线(取 $x = -4.75$, $z = 7$, $y = 180 \sim 200$),如图 4 所示。

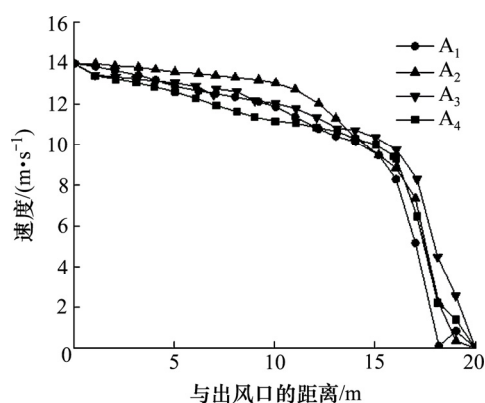


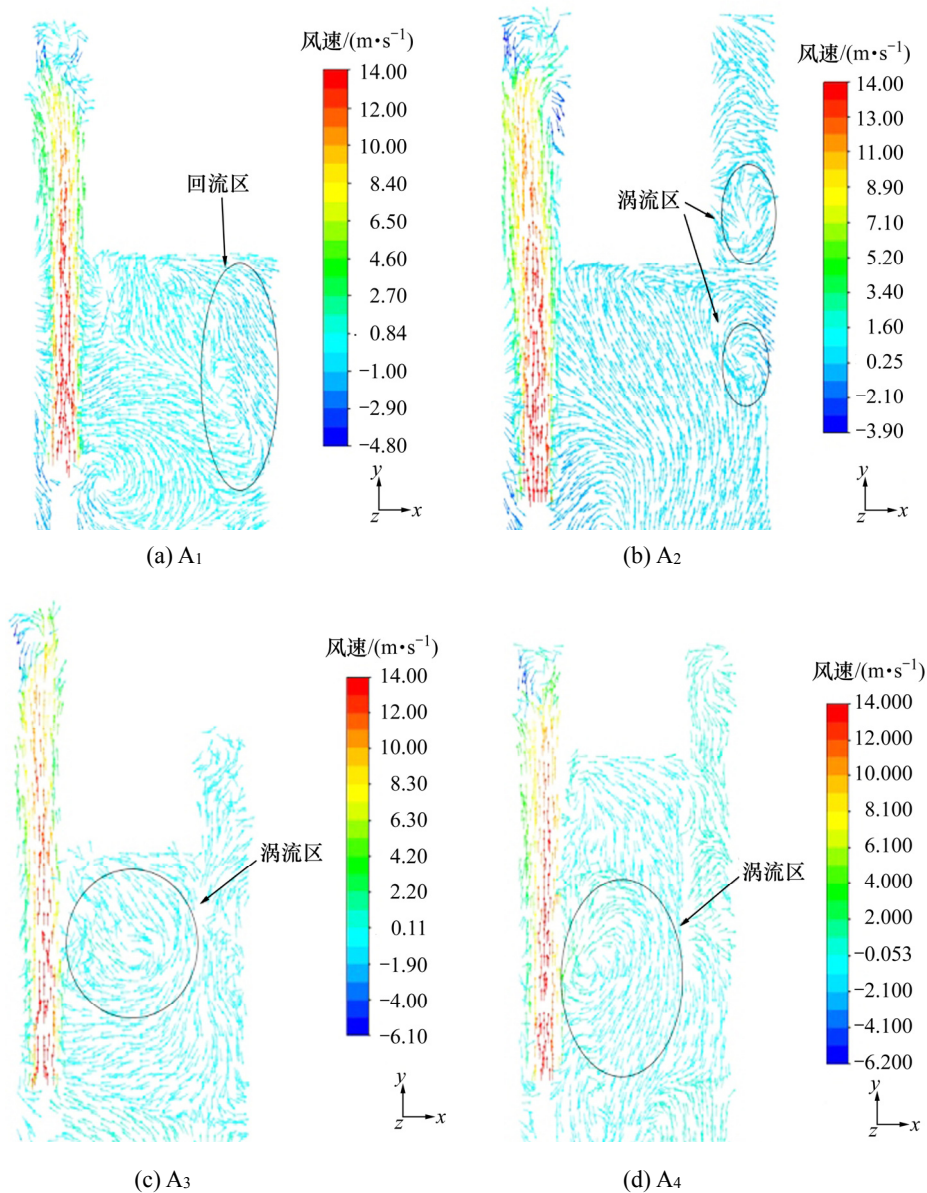
图 4 A 类模型通风口附近风速变化图

Fig. 4 Speed change diagram near the vent of the model A

从图 4 中可以看出, A 类模型的 4 种隧道工况速度变化趋势相似, 速度均随着到工作面的距离减小而减小。在距离出风口 17 m 处, 各曲线的速度梯度达到最大, 此处气流对工作面的冲击力也达到最大。

为进一步研究导坑与台阶长度不同的模型出风口附近流场的特点, 取出风口的中心面 $z=7$ 为观测面, 得到 A 类模型通风口附近速度分布矢量图, 如图 5 所示。

A_1 模型如图 5(a)所示, 气流从风筒射出, 射入左侧导坑内, 在导坑工作面前端大约 3 m 处, 射流受隧道壁面影响, 射流方向改变, 部分气流反向产

图 5 A 类模型通风口附近速度矢量图($z=7$)Fig. 5 The velocity vector diagram near the vent of the model A ($z=7$)

生回流,部分气流在工作面前端形成湍流。在距离管口 0~10 m 处,通入的气流吸卷带动隧道左侧壁面处与右侧掌子面前端的气体随之运动。在距离管口 10 m 处(导坑起始位置),因隧道断面面积缩小,射流右侧气体向右侧发展,在隧道右侧形成回流。 A_2 模型如图 5(b)所示,左侧导坑内流场特性与 A_1 情况相似,主要差异表现在右侧导坑内。右侧导坑受导坑壁面影响,风流速度小且右侧导坑内的前端存在涡流。 A_3 模型如图 5(c)所示,气流在上台阶处形成范围较大的涡流区,所以台阶的存在对射流的影响大,污染气体往往易在台阶处发生积聚,影响通风效果。 A_4 模型如图 5(d)所示, A_4 模型与 A_3 模型的流场情况较为接近,范围较大的涡流区分布在距离上台阶工作面前端大约 5 m 处。

2) 风筒悬挂位置的影响

为研究风筒悬挂位置对双侧壁导坑法施工中的通风情况的影响,取 B 类模型出风口中心垂直于工作面的直线为观测线,B 类模型通风口至工作面风速变化如图 6 所示。

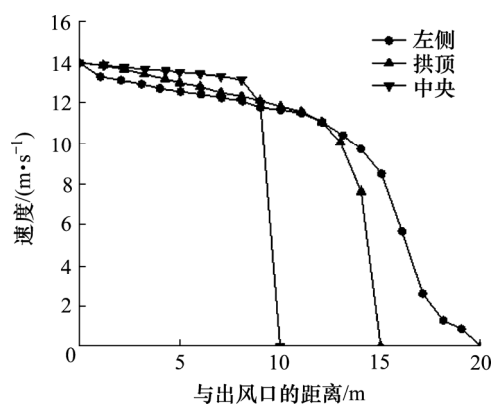


图 6 B 类模型通风口附近风速变化图

Fig. 6 Speed change diagram near the vent of the model B

从图 6 中可以看出,风筒布置在不同位置,风速变化有所不同。在 0~8 m 内,风筒布置于隧道中央时速度最大,拱顶次之,左侧最小。这是因为风筒位于隧道中央时,射流发展不受隧道侧壁面的影响,而风筒位于拱顶与左侧时,风筒贴壁程度增加,受壁面摩擦力的影响,风速下降较快。但双侧壁导坑法开挖下的隧道掌子面不是一个平面,风筒在不同位置处,出风口与工作面的距离也不同,风筒布置于隧道中央、拱顶和左侧时,管口距工作面的距离分别为 10 m、15 m 和 20 m。射程逐渐增加,有效射程越远,则越有利于通风。

当取 $x=-4.75$ 为观测面时,B 类模型通风口附近速度分布矢量图如图 7 所示。

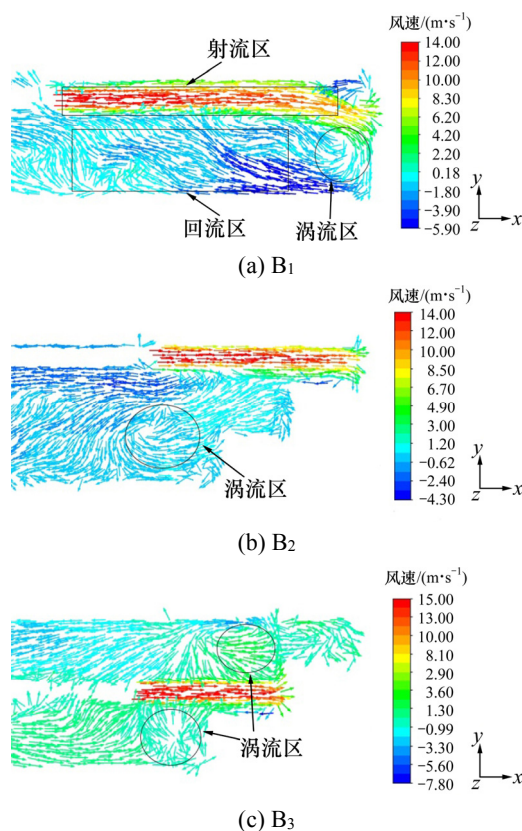


图 7 B 类模型通风口附近速度矢量图

Fig. 7 The x -plane velocity vector diagram near the vent of the B model

从图 7(a)中可以看出, B_1 模型流场中明显存在着射流区、涡流区与回流区 3 个区域。空气从通风口以 14 m/s 的速度射出,上侧受到隧道内壁的限制,呈现出贴附射流。射流到达工作面后,受壁面作用反向形成回流,在距离导坑工作面前端大约 5 m 处,部分风流向下方偏移,与隧道下侧附近的回流共同形成涡流。当取 $x=0$ 为观测面时,从图 7(b)中可以看出,射流区位于顶部,有一个范围较小的涡流区位于出风口下方,回流区分布在隧道底部,射程为 15 m。当风筒位于隧道中央时,从图 7(c)中可以看出,在隧道上、下台阶工作面前端均形成涡流,因出口距离台阶工作面仅 10 m,射程最短,受台阶工作面的影响,风筒出口的射流得不到充分发展,通风效果不好。

为研究风筒不同悬挂位置对隧道内平均风速的影响,取隧道不同断面上的平均风速进行比较,如图 8 所示。3 种风筒布置下,隧道出口断面平均风速均为 0.17 m/s,但在距离隧道出口 140 m 至掌

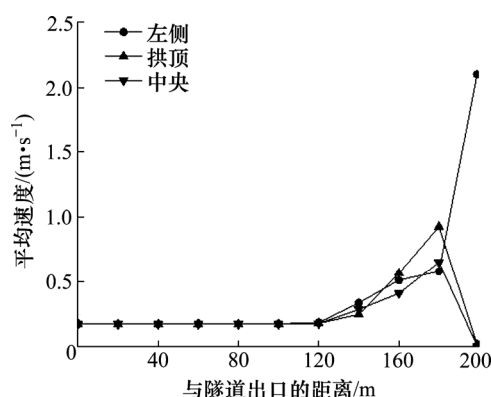


图 8 B 类模型隧道断面平均风速

Fig. 8 The average wind speed of the tunnel section of the model B

子面这段范围内,沿隧道拱顶布置时的断面平均风速均大于中央布置时的;风筒布置在隧道左侧时,在 140~180 m 段的断面平均风速介于拱顶与中央布置之间,在 180 m 至掌子面区间段的平均风速远大于拱顶布置与中央布置。因为风筒在左侧布置时位于左侧导坑前方,所以左侧导坑内风速较大拉高了导坑段风速的平均值。

3.2 CO 浓度分布分析

1) 导坑与台阶长度的影响

通过 Fluent 软件的后处理功能,可得到隧道内各断面的 CO 平均浓度值。通风 1 200 s 后, A 类模型隧道各断面 CO 平均浓度变化曲线如图 9 所示。

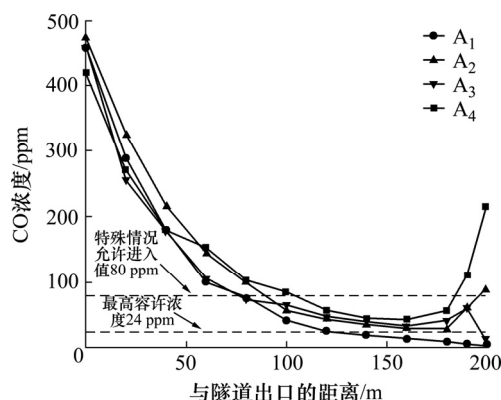


图 9 A 类模型隧道断面 CO 平均浓度

Fig. 9 The average concentration of CO in the tunnel section of the type model A

从图 9 中可以看出, A₁、A₂、A₃ 和 A₄ 模型在 180 m 断面处, CO 平均浓度相比于初始值分别降低了 99.38%、98.11%、97.25% 和 96.08%。随着导坑和台阶长度的增加, CO 平均浓度逐渐降低。在

180~200 m 段 A₂ 和 A₄ 的 CO 平均浓度上升, 而 A₃ 的 CO 平均浓度则先上升后下降, A₁ 和 A₃ 在 200 m 处的 CO 平均浓度水平均在 24 ppm 以下。表明: 导坑和台阶的存在影响了 CO 气体的排放。当导坑和台阶越长, 越不利于 CO 气体的排放, 左侧导坑的通风情况比右侧的好。取 A 类模型的风筒中心面 ($x=-4.75$) 在通风 300 s、600 s 和 1 200 s 时刻的 CO 浓度分布云图如图 10 所示。

从图 10 中可以看出, 在通风 300 s 和 600 s 时, A 类模型的 CO 浓度分布云图相似。在通风

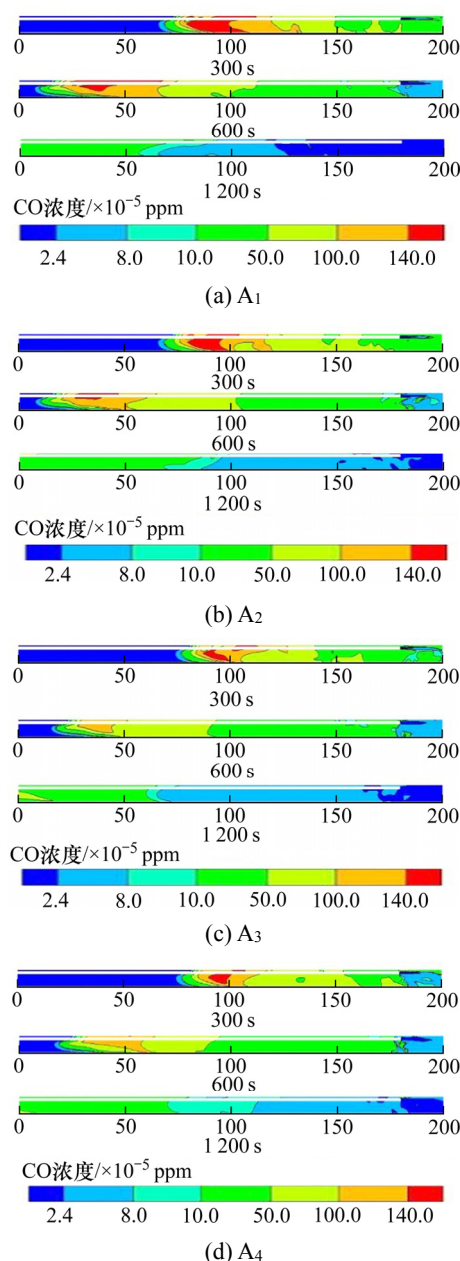


图 10 A 类模型 CO 气体扩散浓度变化云图

Fig. 10 The cloud diagram of the CO gas diffusion concentration change of the model A

1200 s 时, A₁ 模型在隧道 120~200 m 段 CO 浓度降至 24 ppm, 达到 CO 最高允许浓度值; A₂、A₄ 模型仅在 180~200 m 段 CO 浓度降至 24 ppm; A₃ 模型在 170~200 m 段, 其浓度满足最高允许浓度值。对比 A 类模型的 CO 气体平均浓度与分布云图, 表明: 当风筒布置在隧道左侧时, 左侧导坑长 10 m 的隧道, 其 CO 排放情况最好。随着导坑和台阶长度的增加, CO 气体的排放效果越差。

2) 风筒悬挂位置的影响

通风 1200 s 后, B 类模型隧道各断面 CO 平均浓度变化曲线如图 11 所示。

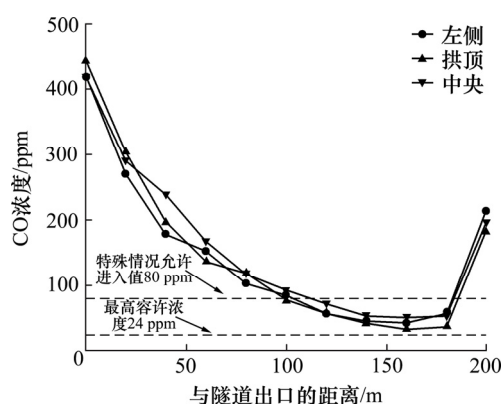


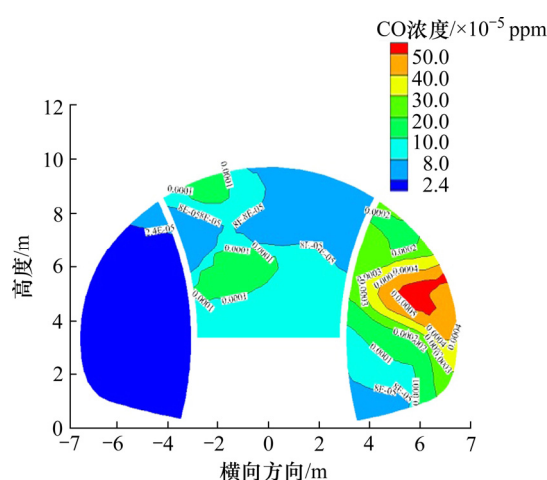
图 11 B 类模型各断面平均 CO 浓度变化曲线

Fig. 11 The average CO concentration change curve of each section of the model B

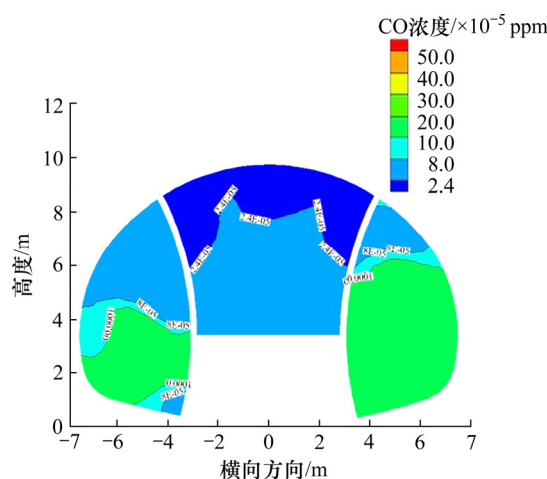
从图 11 中可以看出, 当风筒位于左侧时, 导坑和台阶区段内 CO 平均浓度总体较高, 在隧道 100~180 m 内的 CO 平均浓度处于中间水平。当风筒位于拱顶时, 导坑和台阶区段与隧道 100~180 m 内 CO 平均浓度均处于较低水平。当风筒位于中央时, 导坑和台阶区段内的 CO 平均浓度处于中间水平, 在隧道 100~180 m 内的 CO 平均浓度总体较高。

以导坑及台阶断面为观测面, 取 $y=190$ m 截面对不同风筒布置下导坑和台阶面 CO 浓度分布作进一步分析, CO 浓度分布情况如图 12 所示。

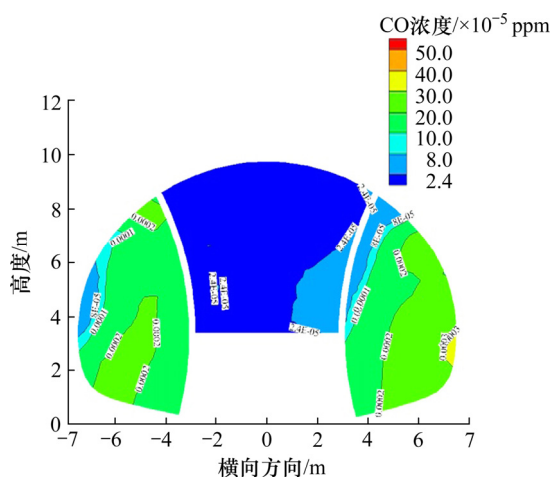
从图 12 中可以看出, CO 浓度分布总体规律表现: 离风筒距离越近, CO 浓度越低。随着离风筒距离的增加, CO 浓度也逐渐增大。风筒位于左侧时, 左导坑大范围内 CO 浓度低于 24 ppm, 而右导坑内 CO 浓度偏高, 最高浓度达到 500 ppm, 远超于标准值。风筒位于拱顶时, 隧道拱顶区域 CO 浓度低于 24 ppm, 上台阶面 CO 浓度低于 80 ppm, 左侧导坑底部小范围及右侧导坑大范围区域的 CO



(a) 左侧布置



(b) 拱顶布置



(c) 中央布置

注: x 代表隧道断面横向方向, z 代表隧道高度。

图 12 风筒布置不同下 $x=190$ m 截面上 CO 浓度分布云图

Fig. 12 The CO concentration distribution on $x=190$ m section with different air duct layout

浓度高于 100 ppm。风筒位于中央时, CO 浓度低于 24 ppm 的区域范围分布在台阶面, 且范围大于拱

顶; 左右侧导坑中 CO 浓度均偏高, 左侧最高浓度达到 200 ppm, 右侧最高浓度达到 300 ppm。

为研究风筒在不同布置位置下隧道内 CO 气体随时间移动扩散的规律, 分别取 B 类模型隧道中轴面($x=0$)在通风 300 s、600 s、1 200 s 时的 CO 浓度云图, 如图 13 所示。

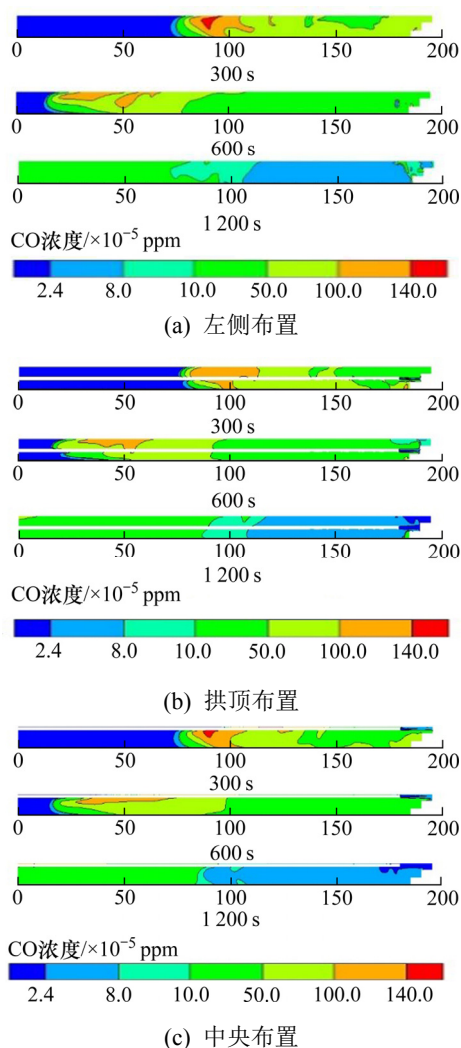


图 13 B 类模型 CO 气体扩散浓度变化云图

Fig. 13 The CO gas diffusion concentration change of the model B

从图 13 中可以看出, 风筒布置于隧道左侧, 通风 300 s 时, 由于壁面摩擦阻力的影响, 隧道中部的 CO 浓度扩散较四周的快, CO 高浓度区在风流的作用下已经移动到隧道内距离出口 80~110 m 处的空间内呈团状分布, 距隧道出口约 70 m 内的空间无 CO 气体。通风 600 s 时, CO 高浓度区已扩散至距隧道出口 20~70 m 处, 且贴近隧道顶部, 这是因为 CO 气体的密度略小于空气的。通风 1 200 s

时, CO 高浓度区已排出隧道, 在距掌子面前 95 m 的空间内, CO 浓度已经低于 80 ppm, 满足隧道施工人员允许进入要求。

风筒布置在隧道拱顶处, 通风 300 s 时, 出风口前大约 8 m 内的隧道上部 CO 浓度已经低于 24 ppm, 其他区域 CO 浓度分布与左侧布置时相似。通风 600 s 时, CO 高浓度区扩散至距离隧道出口 30~70 m 处, 且贴近隧道上壁面呈细带状分布。表明: CO 气体正在逐渐稀释。通风 1 200 s 时, 距离掌子面前 30 m 内的隧道上部空间 CO 浓度已低于 24 ppm, 掌子面前大约 113 m 的空间内已是允许进入区域。

风筒布置在隧道中央, 通风 300 s 时, 出风口距上台阶掌子面仅 10 m, 射流发展受到壁面限制, 导致在下台阶掌子面前出现高浓度的 CO 气体滞留, 其他区域内 CO 浓度的分布情况与左侧布置、拱顶布置的相似。通风 600 s 时, 下台阶面滞留的 CO 气体浓度有所降低, 但高于周围分布的 CO 浓度。CO 高浓度区移动至距隧道出口 30~60 m 处的隧道中上部。通风 1 200 s 时, 出风口至上台阶工作面及其上方的 CO 浓度均小于 24 ppm, 但下台阶前方 3 m 范围内的 CO 浓度远高于标准值。

4 结论

利用 Fluent 流体力学软件对浙江某长大隧道采用双侧壁导坑法施工的压入式通风模型进行数值模拟, 得出结论为:

1) 导坑和台阶的存在对隧道内流场的特性有一定影响, 风流在导坑中形成涡流, 台阶工作面前方涡流区的存在, 会对污染物气体的排放造成不良影响。

2) 风筒位置不变的情况下, 隧道左侧导坑长 10 m 时, CO 排出的效果最好。在通风 1 200 s 时, 125~200 m 内的 CO 断面平均浓度降至最高允许浓度值以下。随着右侧导坑和上下台阶长度的增加, CO 气体排放明显受到影响。表明: 导坑和台阶情况越复杂, 越不利于 CO 气体的排放。

3) 导坑和台阶长度不变情况下, 风筒布置于隧道左侧时, 右侧导坑中 CO 浓度较高, 难以扩散。风筒布置于隧道中央时, 有效射程受台阶工作面限

制且下台阶前方有CO气体滞留。风筒布置于隧道拱顶时,导坑和台阶段的CO浓度较低,满足允许施工人员进入的隧道范围最广,通风效果最好。

参考文献(References):

- [1] 杨立新,洪开荣,刘招伟.现代隧道施工通风技术[M].北京:人民交通出版社,2012.(YANG Li-xin, HONG Kai-rong, LIU Zhao-wei). Modern tunneling ventilation technology[M]. Beijing: China Communications Press, 2012.(in Chinese))
- [2] 曹峰,凌同华,李洁,等.循环爆破荷载作用下小净距隧道中夹岩的累积损伤特征分析[J].振动与冲击,2018,37(23):141-148.(CAO Feng, LING Tong-hua, LI Jie, et al. Cumulative damage feature analysis for shared rock in a neighborhood tunnel under cyclic explosion loading[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(23): 141-148. (in Chinese))
- [3] 张胜,李宁羽,黎永索,等.隧道掌子面前方空洞的正演模拟与模型试验研究[J].四川建材,2019,45(8):64-66.(ZHANG Sheng, LI Ning-yu, LI Yong-suo, et al. Forward simulation and model test of cavity in front of the tunnel[J]. Sichuan Building Materials, 2019, 45(8): 64-66.(in Chinese))
- [4] 张胜,何文超,黎永索,等.基于小波变换时能密度法的隧道空洞充填物识别[J].煤炭学报,2019,44(11):3504-3514.(ZHANG Sheng, HE Wen-chao, LI Yong-suo, et al. Identification of tunnel cavity fillings by time-energy density analysis based on wavelet transform[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(11): 3504-3514. (in Chinese))
- [5] 王茜,凌同华,刘唐利,等.穿越断层破碎带隧道入口段施工数值模拟[J].交通科学与工程,2019,35(4):78-84.(WANG Qian, LING Tong-hua, LIU Tang-li, et al. Numerical simulation of construction method of tunnel entrance section throughing fractured fault zone[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2019, 35(4):78-84.(in Chinese))
- [6] 刘钊春,柴军瑞,贾晓梅,等.压入式通风掘进面有害气体浓度扩散数值模拟[J].岩土力学,2009,30(S2):536-539.(LIU Zhao-chun, CHAI Jun-rui, JIA Xiao-mei, et al. Numerical simulation of concentration diffusion of harmful gas in heading face with forced ventilation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(S2): 536-539. (in Chinese))
- [7] 方勇,彭佩,赵子成,等.风管出口位置对隧道施工通风效果影响的研究[J].地下空间与工程学报,2014,10(2):468-473.(FANG Yong, PENG Pei, ZHAO Zi-cheng, et al. Numerical simulation of the effect of outlet position of air duct on the construction ventilation of the tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014,10(2):468-473.(in Chinese))
- [8] 刘敦文,唐宇,李波,等.瓦斯隧道施工通风风筒优化数值模拟及试验研究[J].中国公路学报,2015,28(11):98-103,142.(LIU Dun-wen, TANG Yu, LI Bo, et al. Numerical simulation and test analysis of construction ventilation air duct optimization in gas tunnel[J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(11): 98-103, 142. (in Chinese))
- [9] 彭佩,熊艳.公路隧道施工压入式通风流场及瓦斯分布规律研究[J].公路交通技术,2015,31(2):117-121,126.(PENG Pei, XIONG Yan. Research on flow fields and gas distribution laws of press-in ventilating and gas in construction of highway tunnels[J]. Technology of Highway and Transport, 2015, 31(2): 117-121, 126. (in Chinese))
- [10] 张恒,吴瑾,陈寿根,等.风机布置方式对高瓦斯隧道施工通风效果的影响[J].安全与环境学报,2018,18(5):1834-1841.(ZHANG Heng, WU Jin, CHEN Shou-gen, et al. Impact of the fan arrangement mode on the construction ventilation effect along the highly intensive gas tunnel[J]. Journal of Safety and Environment, 2018, 18(5):1834-1841.(in Chinese))
- [11] Fang Y, Yao Z G, Lei S. Air flow and gas dispersion in the forced ventilation of a road tunnel during construction[J]. Underground Space, 2019, 4(2):168-179.
- [12] Chang X K, Chai J R, Luo J P, et al. Tunnel ventilation during construction and diffusion of hazardous gases studied by numerical simulations[J]. Building and Environment, 2020, 177:106902.
- [13] 黄迪辉,蓝柳海,张江山.超大断面扁平型隧道安全开挖方法及力学分析[J].交通科学与工程,2019,35(4):71-77.(HUANG Di-hui, LAN Liu-hai, ZHANG Jiang-shan. A safety construction method of the oval-shaped super-large section tunnel and its mechanical analysis[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2019, 35(4): 71-77. (in Chinese))
- [14] 陈寿根,张恒.长大隧道施工通风技术研究与实践[M].成都:西南交通大学出版社,2014.(CHEN Shou-gen, ZHANG Heng. Research and practice of the construction ventilation technology for long tunnel[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2014.(in Chinese))
- [15] 刘斌.FLUENT 19.0 流体仿真从入门到精通[M].北京:清华大学出版社,2019.(LIU Bin. Fluid simulation from entry to proficiency for the Fluent 19.0[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2019.(in Chinese))