

文章编号:1671-6833(2010)05-0090-05

海底隧道竖井口污染物扩散的数值分析及应用

任锐, 谢永利

(长安大学公路学院, 陕西西安710064)

摘要:针对某海底隧道竖井排出污染物对人工岛上环境影响,以CO为主要污染源,运用计算流体力学软件CFdesign建立竖井CO排放及扩散的三维数值模型,对排风竖井周围CO浓度分布进行数值模拟,结合人工岛上对CO浓度及影响范围的控制标准,分析排风塔高度、排风风量、环境自然风风速对排风塔所排污染物的浓度分布的影响。计算结果表明:风塔高度越高,人工岛上限制高度范围内的CO浓度越小,当风塔高度在35m以上时,人工岛地面以上15m范围内空气质量达标,并不再随风塔高度而变化;排风风量越小,污染物沿排风方向的影响范围越小。

关键词:隧道工程;污染物浓度分布;数值仿真;通风;正交设计

中图分类号:U453.5 **文献标识码:**A

0 引言

某海底隧道两端置于人工岛上,采用纵向通风方式,在隧道暗埋段设置竖井集中排出污染空气。隧道排出的污染空气来源于汽车尾气,其主要成分为CO与NO_x。随着隧道的建成通车,隧道通风排出的污染气体将成为人工岛上的主要污染源。目前,对隧道污染物排放的研究主要集中于分析排放物的环境影响因素上,而对隧道竖井口污染物扩散分布的具体研究仍较少。笔者在前期相关研究的基础上^[1-4],采用数值模拟的方法,对不同工况下该海底隧道人工岛上竖井排出的污染物分布进行数值仿真分析,并在保证人工岛上空气质量达标的前提下,调整竖井设计参数,为工程设计提供有力支持。

1 模型建立

1.1 数学模型

隧道竖井集中排出的污染物在周围环境中的扩散包括湍流扩散与分子扩散,其中,分子扩散对污染物的稀释影响远小于湍流扩散,可忽略不计。因此,数值模拟过程中仅考虑湍流扩散以及排风风量、环境风速引起的污染物传输。污染物浓度 φ

的定常对流扩散控制方程组如下所示^[5-8]。

(1)连续性方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

(2)动量方程:

$$\frac{\partial \bar{v}_i}{\partial t} + v_j \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{v}_i}{\partial x_j^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial(-\rho v_i' v_j')}{\partial x_j} \quad (2)$$

(3)污染物扩散方程:

$$\frac{\partial \rho c_j}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i c_j)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma_i \frac{\partial \rho u_i c_j}{\partial x_i} \right) - \frac{\partial \rho u_i c_j'}{\partial x_i} + S_c \quad (3)$$

式中: ρ 为流体介质的密度; t 为时间; v_i 为坐标方向速度分量,其中 $i=1,2,3$; ν 为流体运动黏度; \bar{p} 为静压; c_j 为污染物浓度; Γ_i 为污染物扩散系数; $\rho u_i c_j'$ 为湍流的脉动流速引起的污染物浓度扩散量; S_c 为污染源项。

1.2 计算模型及参数

针对该海底隧道通风竖井污染物排出形式,运用CFdesign流体动力学计算软件建立与原形1:1比例的三维数值仿真模型,如图1所示。并通过试算确定模型的计算边界,当计算各边界的长宽高均大于1000m×800m×400m时,污染物浓度的空间分布不再随计算边界的扩大而变化,因此确定计算边界长宽高为1000m×800m×400m。鉴于设计排风口采用削竹式,模型排风

收稿日期:2010-01-30;修订日期:2010-04-14

基金项目:交通部西部交通建设科技项目(20073180038)

作者简介:任锐(1982-),女,陕西佳县人,长安大学博士研究生,主要从事公路隧道通风方面的研究,E-mail:renrui@163.com.

口水平设置,自然风向与排风方向相同.由于隧道排出的污染气体主要来自于汽车尾气,其主要成分为CO与NO_x,而现阶段我国公路隧道通风设计规范中主要考虑CO对环境的影响,因此选择CO作为隧道污染物排放的主要污染源.以海底隧道人工岛上排风塔周围环境为研究对象,按照人工岛内建筑物建设高度以及对污染物影响范围限制的要求,以空气中CO的分布为例,参照GB 3095—1996《环境空气质量标准》^[9],要求人工岛地面以上15 m高度范围内,CO浓度必须低于10 mg/m³,否则视为受CO影响的区域.

参考JTJ 026.1—1999《公路隧道通风照明设计规范》^[10]以及该大桥海底隧道通风系统设计参数,取隧道通风最不利工况(阻滞工况)时的CO允许浓度174.7 mg/m³为竖井污染物排放浓度,模型计算参数排风口面积为30 m²,风塔高度分别为20,30,35,40 m,排风风量分别为150,300,400 m³/s,自然风速分别为2,3,4 m/s.通过数值模拟计算各参数对排风塔周围污染物浓度分布的影响.

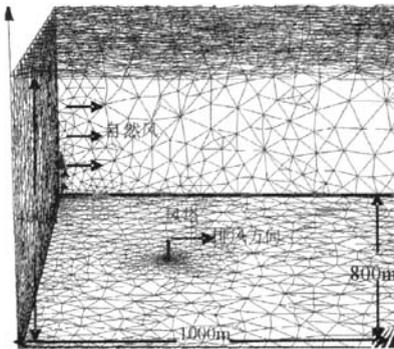


图1 污染物排放示意图

Fig.1 Model of pollutant exhaust

2 计算结果分析

由于排风塔中心位置污染物浓度最高,污染物浓度分布最显著,因此,取位于排风塔中心位置并且平行于排风方向的断面上的污染物浓度分布为研究对象.

2.1 排风口附近污染物浓度分布

取CO排放浓度为174.7 mg/m³,风塔高度25 m,排风风量450 m³/s,自然风风速3 m/s,污染物沿自然风下风向水平排出,污染物浓度分布与排风口前方速度矢量分布如图2,3所示.

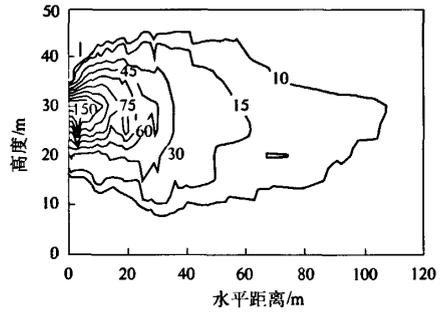


图2 污染物浓度沿高度分布曲线

Fig.2 Curve of concentration profiles of CO with height

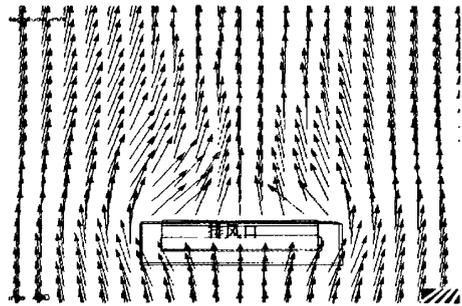


图3 排风塔前方流速矢量图

Fig.3 Velocity vector in front of shaft

由图2可以看出:CO浓度最高点位于排风口高度位置上,即距地面高度25 m处.沿排风方向,污染物浓度随着水平距离的增加而递减.根据自由紊动射流理论,当污染气体在排风动力下经过排风口以较高的速度射入大气时,污染气体与周围流体之间形成速度间断面,并在该间断面形成一部分有序的大涡拟序结构,在大涡卷吸作用下,大量的新鲜空气由射流边界逐步进入射流内部,污染物被稀释,其浓度随着距射流中心轴距离的增加而递减.射流卷吸过程如排风口附近的射流流态矢量如图3所示.因此,在平面紊动射流扩散作用下,大涡拟序结构中的展向涡以几乎不变的速度沿射流方向向下游移动,通过涡的相互作用、合并和卷吸,使涡的尺寸和涡距不断扩大,导致射流流量沿射程不断扩大,即污染气体的体积沿程膨胀,污染物被扩散稀释.因此,沿排放方向,污染物浓度随水平距离的增加而减小.

2.2 风塔高度对污染物浓度分布的影响

取CO排放浓度为174.7 mg/m³,排风风量450 m³/s,自然风风速2 m/s,污染物沿自然风下风向水平排出,排风塔高度分别取25,30,35,40 m,污染物浓度分布如图4所示.

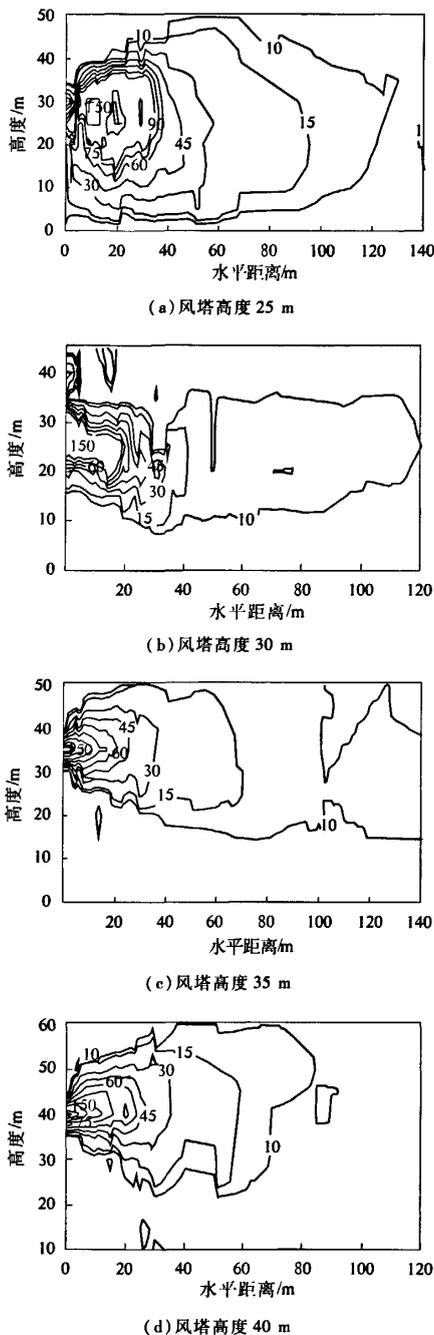


图4 风塔高度对污染物浓度分布的影响

Fig. 4 Impact of shaft height on concentration profiles

由图4可以看出:风塔高度25 m、30 m时CO浓度沿排风方向,随距排风口水平距离的增加而减小.不同风塔高度下,在距人工岛地面以上15 m高度的断面上,CO的浓度随风塔高度的增加而减小.当风塔高度为25、30 m时,CO浓度高

于 10 mg/m^3 的区域分别为距排风塔水平距离132 m与96 m的范围.当风塔高度在35 m以上时,CO浓度在限制高度15 m的断面上始终小于 10 mg/m^3 .根据自由紊动射流理论,当污染气体在排风动力下经过排风口以较高的速度射入大气时,在射流扩散的作用下,污染物浓度随着距射流中心轴距离的增加而递减.风塔高度的增加,使得人工岛上限制高度断面距排风口这个射流源的相对距离增加,而该限制高度断面上的CO浓度随着距射流中心轴距离的增加而减小.当排风口与限制高度断面之间的距离超过射流半扩展厚度 b 的一半时,该限制高度以下的区域就不再受射流的影响,这使得限制高度(15 m)断面以下的CO浓度不再随风塔高度的增加而变化.在实际工程设计中,风塔高度的设计需考虑排风口的排风风速,建议风塔高度大于排风的射流半扩展厚度 b 的一半即可.

2.3 排风风量对污染物浓度分布的影响

取CO排放浓度为 174.7 mg/m^3 ,风塔高度30 m,自然风风速 2 m/s ,污染物沿自然风下风向水平排出,排风风量分别为 $150, 300, 450 \text{ m}^3/\text{s}$,污染物浓度分布如图5所示.

由图5可以看出,随着距排风口水平距离的增加,CO浓度明显减小.当排风风量分别为 $150, 300, 450 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,CO浓度大于 10 mg/m^3 的区域,分别为距风塔水平距离56,100,96 m的范围.当排风风量 $150 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,CO浓度超标的区域最小,但CO浓度峰值最高.这是由于:首先,污染物排放量减小,其影响范围相应较小;其次,根据射流流系理论,当污染气体在排风动力下经过排风口以较高的速度射入大气时,射流中心轴纵向时均速度随着纵向距离的增加而衰减,当射流流速与周围环境风速近似时,速度间断面消失,自由紊动射流现象消失.随着射流出口速度 u_0 减小,射流中心流速到达环境风速所需的水平距离减小,即射流影响范围减小,同时射流卷吸流量也减小.因此,随着排风量 Q 的减小,排风口风速减小,其射流范围减小,即污染气体沿排风方向扩散的距离减小,污染气体主要聚集在排风塔附近.但是,射流卷吸流量的减小,使得进入射流范围的新鲜空气流量减小,在人工岛限制高度断面上,CO浓度峰值相对较高.综合考虑污染物在水平方向扩散的影响,在隧道运营过程中,应严格管理车辆排污量,减小隧道污染物的排放量,从而缩小CO影响范围,或采取设置绿色隔离墙等附加污染物稀

释措施,从而保证人工岛上大部分区域的空气质量达标.

2.4 自然风风速污染物浓度分布的影响

取 CO 排放浓度为 174.7 mg/m³,风塔高度

30 m,排风风量 450 m³/s,污染物沿自然风下风向水平排出,自然风风速分别为 2,3,4 m/s,距离人工岛地面高度 15 m 处,污染物浓度沿水平方向分布如图 6 所示.

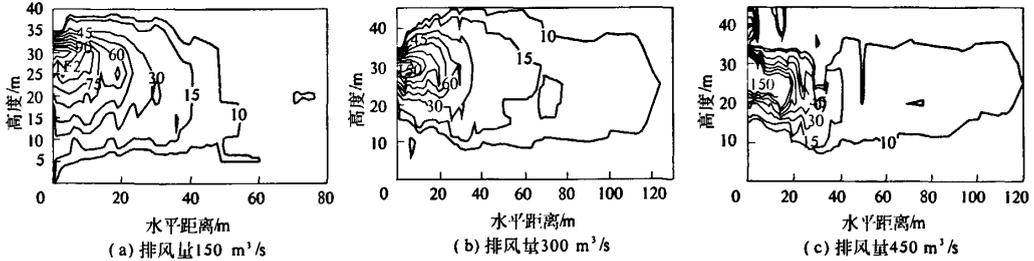


图 5 排风量对污染物浓度分布的影响

Fig.5 Impact of exhaust air volume on concentration profiles

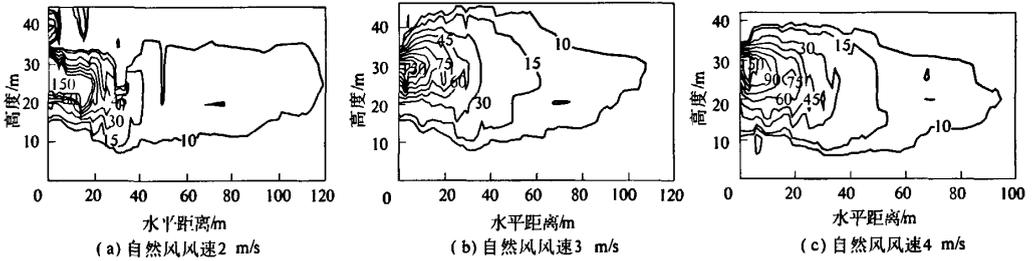


图 6 自然风风速对污染物浓度分布的影响

Fig.6 Impact of wind velocity on concentration profiles

由图 6 可以看出,在距人工岛地面以上 15 m 高度的断面上,随着距排风口水平距离的增加,CO 浓度减小;随着环境自然风风速的增加,该断面上 CO 的最大浓度也在减小.当自然风风速分别为 2,3,4 m/s 时,CO 影响范围分别为 132,92,68 m,呈逐步缩小趋势.这是由于自然风风速的增加,使得排风口周围沿排风方向的水平风速增加,同时,通过排风口的新鲜空气的流量增加,有利于排风口周围污染物的稳流扩散与稀释.因此,较大的自然风风速有利于提高环境空气质量.

2.5 污染物浓度分布影响因素分析

由以上分析可知,影响排风塔附近污染物浓度分布的因素包括排风塔高度、排风风量与环境自然风风速.以人工岛地面以上 15 m 断面上 CO 影响范围,通过正交试验,进一步分析各影响因素的主次顺序,影响因素水平及分析结果如表 1、表 2 所示.

由正交实验结果可以看出,影响污染物 CO 浓度分布的因素的主次分别为:A 排风塔高度、B 排风风量、C 自然风风速.这说明:首先,自然风风速的变化对排风塔附近污染物浓度分布的影响不

表 1 影响因素及水平

Tab.1 Factors and levels

水平	风塔高度 /m	排风风量 / (m ³ · s ⁻¹)	自然风风速 / (m · s ⁻¹)
1	25	450	2
2	30	300	3
3	35	150	4

表 2 正交设计计算结果分析

Tab.2 Analyze of result

因素	评价 指标	因素				因素 主次
		A	B	空列	C	
CO 影响 范围	K1	262	254	79	154	A B C
	K2	186	122	186	214	
	K3	36	108	88	116	
极差	R	226	146	107	98	

明显,在设计计算时可不考虑自然风风速的变化;其次,排风风量主要取决于隧道交通量,而交通量在短时间内不会发生太大变化,在实际工程中也可以暂不考虑排风风量的影响;最后,风塔高度是影响污染物浓度分布的主要因素,结合上面数值分析的结果,参考该大桥海底隧道人工岛上的环境要求,推荐人工岛上排风塔设计高度采用 35 m

以上。

3 结论

(1)影响隧道排风塔周围污染物(CO)浓度分布因素的主次顺序为:排风塔高度、排风风量、自然风风速。

(2)随着风塔高度的增加,人工岛限制高度断面上限制高度断面上的污染物(CO)的影响范围减小。当排风口与限制高度之间距离超过射流半扩展厚度的一半时,该限制高度断面以下区域的污染物(CO)影响范围不再随风塔高度的增加而变化。该大桥海底公路隧道排风塔建议高度为35 m以上。

(3)较小的排风风量虽不能使污染物沿排风方向迅速扩散,但可以将污染物的影响区域控制在距风塔水平距离较近的范围内。

参考文献:

- [1] 窦明,马军霞,谢东瑜,等.北江重金属镉污染事故数值模拟[J].郑州大学学报:工学版,2007,28(2):117-120.
- [2] 徐琳,张旭.受限CO射流扩散规律的数值模拟及其工程应用[J].同济大学学报:自然科学版,2004,33(5):612-616.
- [3] 邓顺熙,张广.特长公路隧道洞口污染物扩扩散的有限元法模拟[J].中国公路学报,2006,19(3):59-64.
- [4] BETTA V, CASCETTA F. Numerical study of the optimization of the pitch angle of an alternative jet fan in a longitudinal tunnel ventilation system[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2009, 24(2): 164-172.
- [5] 李万平.计算流体力学[M].武汉:华中科技大学出版社,2004.
- [6] 刘沛清.自由紊动射流理论[M].北京:北京航空航天大学出版社,2008.
- [7] 李云雁,胡传荣.试验设计与数据处理[M].北京:化学工业出版社,2009.
- [8] 张兆顺,崔桂香.湍流理论与模拟[M].北京:清华大学出版社,2005.
- [9] 国家环境保护局,国家技术监督局.GB 3095—1996环境空气质量标准[S].北京:中国环境科学出版社,1999.
- [10] 中华人民共和国交通部.JTJ 026.1—1999公路隧道通风照明设计规范[S].北京:人民交通出版社,1999.

Numerical Analysis of Pollutant Exhaust of Immersed Tunnel and Engineering Application

REN Rui, XIE Yong-li

(School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: Considering the environmental impact of pollutants on the artificial islands, which are discharged from the shaft in ventilation of immersed tunnel in a project, a three-dimensional numerical simulation model of the emissions and the diffusion of CO is established, and the concentration profiles of CO in the air on artificial island by CFD method is simulated. The impacts of shaft height, exhaust air volume and wind velocity on CO concentration distribution in the air on artificial island are analysed. The results show that: concentration of CO at 15 m height position above ground of artificial island decreased with the increasing of shaft height; When the shaft height exceeds 35 m, the concentration of CO at 15 m high position above ground is lower than 10ppm; range of influence on CO decreased with the reduction of exhaust air volume.

Key words: tunnel engineering; concentration profiles of CO; numerical simulating; ventilation; orthogonal