

白鹤滩水电站尾水隧洞施工通风效果研究

孙会想,汪海平,徐进鹏

(中国三峡建设管理有限公司,四川成都610000)

摘要:白鹤滩水电站右岸尾水隧洞平均埋深400 m以上,第I层开挖采用独头掘进方式,无进、排风竖井和平洞,通风线路结合施工支洞布置,不具备设置射流风机接力通风条件,一站式最远通风距离达3 700 m,施工通风十分困难。为确保通风效果,计算了各施工工序需风量,采用Fluent流体数值软件,建立了三维、非稳态的大埋深独头隧洞气体湍流模型,对爆破通风流场形态和污染物逸散、分布规律进行了研究,并通过现场污染物测试进行了验证。研究表明:尾水隧洞通风2 min后流场基本稳定,掌子面爆破后污染物浓度先急剧增加,之后随着时间的增加不断降低。通风12 min后,掌子面3 m附近污染物浓度满足规范要求;15 min后,所有部位污染物浓度均接近规范允许范围,气流组织顺畅,通风效果良好。

关键词:尾水隧洞;大埋深;独头掘进;施工通风;Fluent软件;白鹤滩水电站

中图分类号:TV672.1;TV554

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2019)03-0176-06

Study on construction ventilation effect of Baihetan hydropower station tail water tunnel

SUN Huixiang, WANG Haiping, XU Jinpeng

(China Three Gorges projects development Co., Ltd, Chengdu 610000, China)

Abstract: The average depth of Baihetan Hydropower Station right bank tail water tunnel is more than 400 m; therefore, layer I excavation adopts blind heading method, no wind shaft and tunnel, and ventilation lines are combined with construction branches, and can't set jet fans. The maximum one-stop ad-jective ventilation length is 3700 m, so the construction ventilation is very difficult. In order to ensure the ventilation effect, we calculated the air volume of each construction process. Using Fluent fluid numerical software, we established deep burying blind heading three dimensional and unsteady turbulent caverns model to study the blasting flow pattern and pollutants dispersion, distribution law, and verified using in-situ pollutant concentration field test. The results showed that tail water tunnel flow field is basically stable after 2 min ventilation. After excavation face blasting, pollutant concentration increases sharply, then decreases. After ventilation 12 min, pollutant concentration near tunnel face 3 m met standard re-quirement. After 15 min, pollutant concentration in all part was close to the standard allow scope. Air flow was smooth and ventilation effect was good.

Key words: tail water tunnel; deep buried; single end tunnel; construction ventilation; Fluent; Baihetan Hydropower Station

大型水电站尾水隧洞施工多采用新奥法或矿山法。具有通排风竖井前期不具备形成条件、隧洞独头掘进距离远、所需风量和风压大、爆破污染物浓度大且不易消散等特点。洞内污染物浓度一旦超标,将会对施工人员安全和健康造成严重威胁,因此施工通风是影响尾水隧洞施工安全且关系到工程进度

的关键因素之一^[1-2]。

1 研究现状及工程概况

1.1 研究现状

对水电站地下洞室施工通风研究目前多集中于主厂房等有专用通排风竖井或通道的较大洞室通风

收稿日期:2018-09-08; 修回日期:2018-12-17

基金项目:中国长江三峡集团科研项目(BHT/0307)

作者简介:孙会想(1985-),男,河南商丘人,硕士,工程师,从事隧道及地下工程建设与管理工作。

计算分析或洞室群施工通风方案及理论等方面。刘雪朋^[3]对水电站地下主厂房施工通风进行了数值模拟;马德萍等^[4]分析了向家坝地下洞室群混合式通风、串联风机布置和通风竖井等因素对通风效果的作用,但未研究无通风竖井工况下风场形态;徐蒯东等^[5]基于洞室设计的角度,对地下厂房洞室群各阶段通风方案进行了论述和探讨,但未进行试验验证;卢文波等^[6]提出了地下洞室群施工通风理论计算过程和优化思路。对于水电站独头隧洞施工通风研究多集中于通道较好的引水隧洞^[7-9],而结合三维数值模拟^[10]和现场污染物测试^[11],对大型水电站尾水隧洞独头开挖施工通风研究的较少,缺乏相应的分析。

本文以白鹤滩水电站右岸尾水隧洞施工通风为研究对象,计算了隧道各施工工序需风量,采用 Fluent^[12] 流体数值软件,分析了空气流场形态和爆破污染物逸散、分布规律。对解决大型水电站尾水隧洞施工通风难题有一定参考意义。

1.2 工程概况

白鹤滩水电站位于金沙江下游川滇交界处,总装机容量 16 000 MW,是国家十三五规划的重点工程,西电东送的骨干电源点之一。地下洞室群规模巨大,在目前世界上已建、在建或拟建的工程中位居前列^[13]。两岸各近平行布置 4 条尾水隧洞,中心线间距 60 m。开挖体型为城门洞型,开挖断面为 16.7 m×20.2 m 和 17.5 m×21 m(宽×高)。右岸 5[#]~8[#]尾水隧洞最大埋深 600 m,平均埋深 400 m 以上,第 I 层开挖阶段,排风竖井不具备形成条件,一站式最远通风距离达 3 700 m,施工通风问题突出。

1.3 开挖方案

尾水隧洞分 3 层开挖,其中第 I 层分层高度 10.2~11 m,第 II 层分层高度 7 m,第 III 层为保护层开挖,分层高度 3 m。4 条尾水隧洞总体采用隔洞、错距方法施工,相邻洞室错距大于 30 m,第 I 层开挖施工采用独头送风方式通风。

2 通风量计算和通风方案

2.1 通风量计算

地下洞室各主要施工工序需风量取满足爆破散烟、人员呼吸、稀释内燃机排放废气和工作面最小风速中的最大值^[14]。

2.1.1 爆破散烟需风量 爆破散烟需风量根据洞室埋深和装药结构特点,按照最大单响药量、稀释 CO 至允许浓度、爆破产生所需风量三者中的最大值

取值。

按最大单响药量计算:

$$Q_e = \frac{5Ab}{t} \quad (1)$$

式中: A 为单响药量,kg; b 为每公斤炸药爆破所产生的有害气体体积,L; t 为通风时间,min。

按稀释 CO 至许可浓度计算

$$Q_{co} = \frac{5}{b} \times \frac{10AK}{t} \times 60 \quad (2)$$

式中: K 为风量备用系数。

按爆破产生所需通风量计算

$$Q_e = \frac{m_e \rho_r k_{ed} k_d}{t k_{er} (C_p - C_0)} \quad (3)$$

式中: m_e 为单次爆破所需炸药量,kg; ρ_r 为岩石密度,kg/m³; k_{ed} 为爆破产生量与岩石量之比; k_d 为降尘措施对应系数; t 为排出粉尘所用时间,min; k_{er} 为炸药量与爆破岩石体积之比,kg/m³; C_p 为时间加权平均容许浓度,mg/m³; C_0 为基底粉尘浓度,mg/m³。

2.1.2 按洞内同时工作人数呼吸所需风量

$$Q_{worker} = 3k \cdot m \quad (4)$$

式中: m 为同时工作的人数。

2.1.3 按稀释内燃机有害气体所需风量

$$Q_{ce} = v_0 N \quad (5)$$

式中: v_0 为单位功率需风量指标,m³/(kW·min); N 为同时工作的内燃机总额定功率,kW。

2.1.4 满足掌子面最小风速所需风量

$$Q_{\min v} = 60V \cdot S \quad (6)$$

式中: V 为掌子面最小风速,m/s; S 为洞室断面尺寸,m²。

开挖所需风量按公式(1)~公式(6)中的最大值计算;出渣及喷混凝土等需要柴油机械的作业需风量取公式(4)、公式(5)叠加和公式(6)中的最大值;使用湿式凿岩机(多臂钻)造孔及挂网作业需风量取公式 4、6 中的最大值,结果如表 1 所示。

表 1 单掌子面爆破开挖需风量表 m³/min

施工 工序	爆破 散烟	人员 呼吸	冲淡 废气	最小 风速	控制 因素
开挖	1004.8	101.3	328.9	403.8	爆破散烟
出渣及喷 混凝土		360.9	445.7	403.8	人员呼吸和冲 淡废气之和
钻孔及挂网		584.1		403.8	人员呼吸

单掌子面开挖最大需风量为 $1\,004.8\text{ m}^3/\text{min}$ ，出渣及喷混凝土最大需风量为 $806.6\text{ m}^3/\text{min}$ ，钻孔及挂网最大需风量为 $584.1\text{ m}^3/\text{min}$ 。开挖作业爆破散烟为风机选型的选择性因素。

2.2 通风方案

根据地下洞室群布置特点，洞外取风，支洞顶拱布置主送风管，通过风门和三通分别向相邻两个掌子面供风。通过调节风门开度，实现一台风机根据两个掌子面不同工序需要供风。

调研国内外风机产品，选定 SWEDVENT 变频风机。该风机一站式通风距离超过 4 km ；单机最大流量 $220\text{ m}^3/\text{s}$ ，最大风压达 $5\,200\text{ Pa}$ ， $0\sim 50\text{ Hz}$ 变频控制风机风量，节省能耗。风机布置在距施工支洞洞口 30 m 部位（见图 1），沿施工支洞顶拱布置两趟风管，右岸尾水隧洞风机配置见表 2。

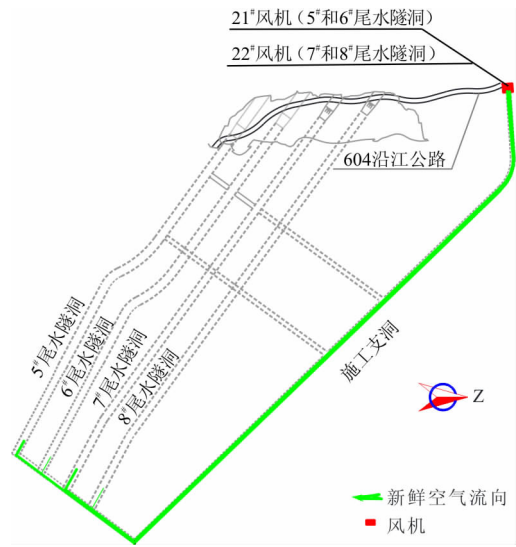


图 1 右岸尾水隧洞通风线路

表 2 右岸尾水隧洞风机配置

风机编号	功率/kW	类型	通风部位	通风距离/m	出口风量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$)	计算所需风量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$)
22 [#]	2 × 160	压入	5 [#] 、6 [#] 尾水	2650	2468	2245
21 [#]	2 × 160	压入	7 [#] 、8 [#] 尾水	2350	2123	2031

尾水隧洞隔洞开挖最不利工况为两个掌子面同时爆破，剩余两个掌子面进行出渣等其他工序施工，因一台风机控制相邻两个掌子面，每台风机供风量取开挖和出渣及喷混凝土最大需风量之和，不应小于 $18\,11.4\text{ m}^3/\text{min}$ 。

考虑通风过程中的摩擦风阻和漏风率，掌子面空气流量为：

$$Q_1 = Q_0 [1 - (\text{leakage}/100)]^{(L/100)} \quad (7)$$

式中： Q_1 为风管末端风量，取 $1\,811.4\text{ m}^3/\text{min}$ ； Q_0 为风机出口风量， m^3/min ； L 为风带长度， m ； Leakage 为漏风率（每 100 m 漏风率为 $1.0\% \sim 2.0\%$ ）。

由公式(7) 反算风机出口流量 Q_0 ，进而确定风机配置（见表 2）。

3 通风流场形态与污染物逸散分析

3.1 控制方程

洞室施工通风属于气固湍流问题，可采用三维非稳态单相流模型，气固两相流作为单相流处理，不考虑流体和颗粒间滑移，假定颗粒温度等于流体温度，污染物颗粒作为流体中的组分，其扩散与流体组分的扩散相同。控制方程包括：

连续性方程：

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (8)$$

动量方程：

$$\frac{\partial (u_i u_j)}{\partial x_i} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\nu + \nu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (9)$$

动能方程：

$$\begin{aligned} \frac{\partial (u_j K)}{\partial x_j} = & \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{C_k} \right) \frac{\partial K}{\partial x_j} \right] + \\ & \nu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] - \varepsilon \end{aligned} \quad (10)$$

式中： μ_i 为速度矢量， m/s ； p 为压力， Pa ； ν 为运动黏性系数， m^2/s ； ν_t 为紊流黏性系数， m^2/s ； C_k 为常数。

采用标准的 $k - \varepsilon$ 双方程模型。

湍动能 k 方程：

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho k u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_e}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + (G_k - \varepsilon) \quad (11)$$

湍动能 ε 方程：

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \varepsilon u_j)}{\partial x_j} = & \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_e}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + \\ & \frac{\varepsilon}{k} (c_1 G_k - c_2 \rho \varepsilon) \end{aligned} \quad (12)$$

式中： σ_k 、 σ_ε 分别为 k 、 ε 方程紊流 Prandtl 数； c_1 、 c_2

为 $k-\varepsilon$ 返程常数; G_k 为紊流能量生成率。

3.2 模型简化和假设

利用 Fluent 流体数值软件,将所有污染物作为三维单相连续流体处理,有害气体及粉尘颗粒作为气体组分,其扩散量按爆破产生的 CO 流量计算。模型简化和基本假设有:

(1) 不考虑温差引起的浮升效应和质量力。

(2) 忽略洞室内机械设备对流场的扰动。

(3) 假定爆破时间(即粉尘源喷尘时间)为 1 s,粉尘颗粒粒径服从 Rosin-Rammler 分布,粉尘源设定为面源。

(4) 边界条件:隧道进出口设定为 escape,其他壁面设定为 reflect,压力设定为标准大气压力,温度设定为 25℃。

3.3 网格划分

尾水隧道通风网络结构复杂,流体区域大,网格划分采用结构化网格,对支洞与洞室连接处、掌子面等流动复杂的区域进行加密(图 2、3)。

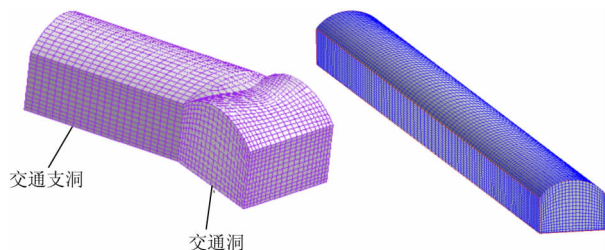


图2 洞室连接处网格

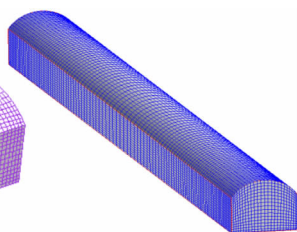


图3 主洞网格

3.4 流场分析

通风运行后不同时间尾水隧洞内空气流畅速度云图如图 4 所示,隧洞中部空气在射流卷吸作用下向前流动,底部空气向隧洞外流动,在隧洞中下部形成一个回流区,在射流未到掌子面时,回流区随射流不断向掌子面移动,直至稳定在距掌子面一定距离的部位,2 min 左右流场基本稳定。

流场稳定后,气流从出风口射出,射流主流不断

卷吸周围空气扩大射流面,但受限于空间和风流动量,射流到达掌子面形成回流。

从图 5 可看出,在出风口下方和掌子面上、下方各有一个回流区,主、回流间形成流速很小的断层区,不利于污染物排除和逸散,回流区污染物浓度较高。

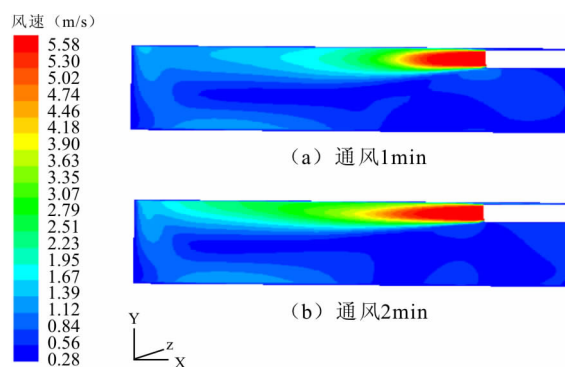


图4 通风运行后不同时间尾水隧洞内空气流畅速度云图

3.5 污染物逸散分析

选取 5#、7#尾水隧洞第 I 层独头开挖为典型工况,风管出风口距掌子面 30 m,将有害气体及粉尘颗粒作为气体组分折算为 CO 浓度。流场稳定后进行掌子面爆破。爆破后不同时间掌子面附近 50 m 范围内污染物变化情况如图 6 所示。

由图 6 可看出,爆破后污染物主要集中于掌子面附近,扩散较慢,风流到达掌子面后,开始推动污染物向远离掌子面方向流动,随着时间的增加,污染物浓度被不断稀释,15 min 时掌子面附近大部分污染物已排出,残余污染物分布均匀,其浓度接近规范要求。

4 污染物测试及通风效果

4.1 污染物浓度测试

在 5#尾水隧洞距离掌子面约 3 m 距离处的横断面上布置 4 个监测点,布置方式见图 7;在隧洞中心线上布置 4 监测点,布置方式如图 8 所示。

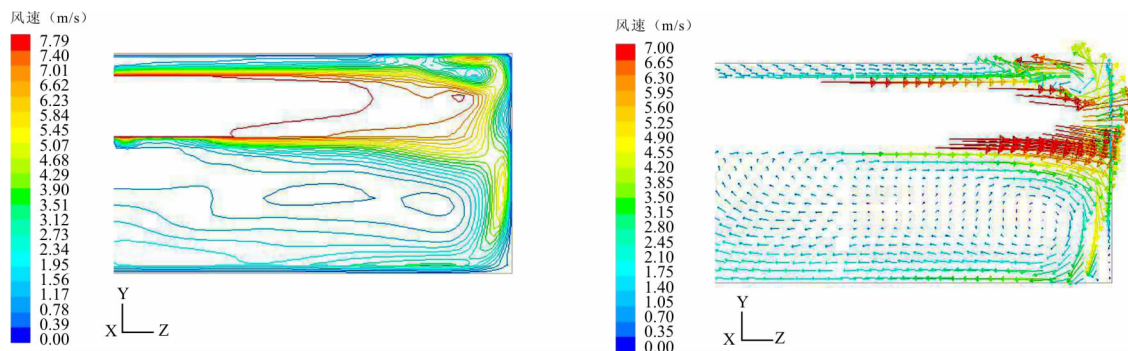


图5 风管中心线处剖面速度流场图

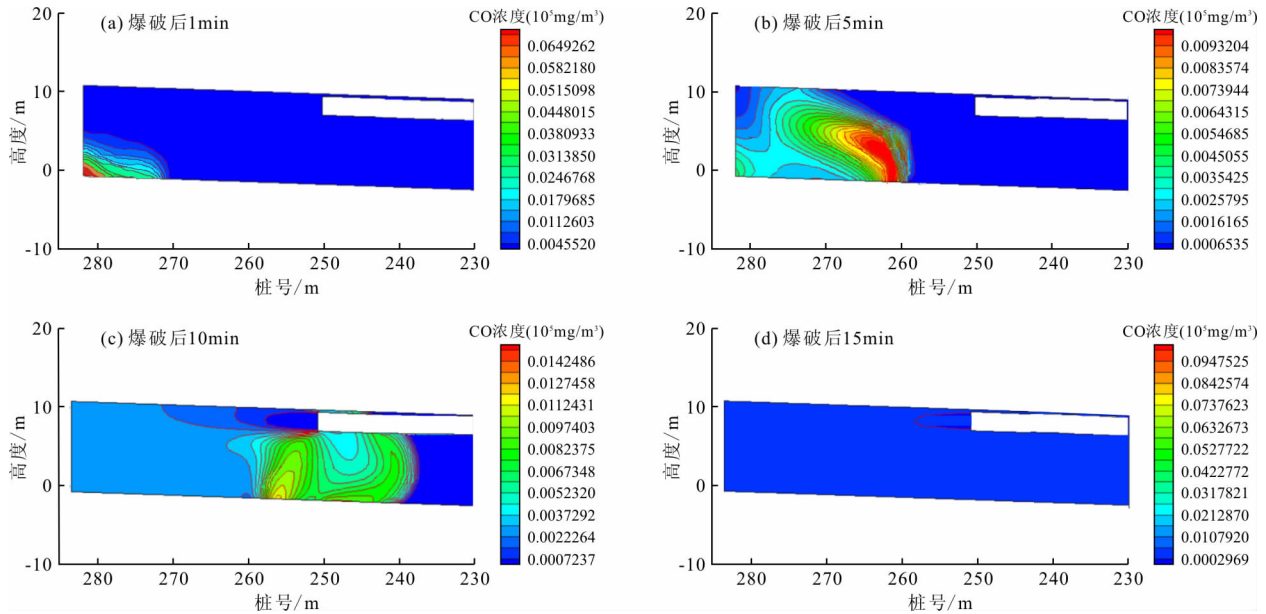


图6 不同时间掌子面附近 50 m 范围内 CO 浓度分布图

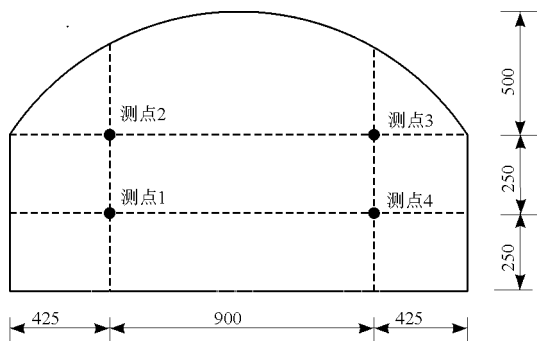


图7 尾水隧洞横断面测点布置(单位:cm)

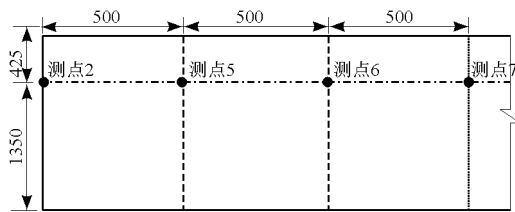


图8 尾水隧洞中心线测点布置(单位:cm)

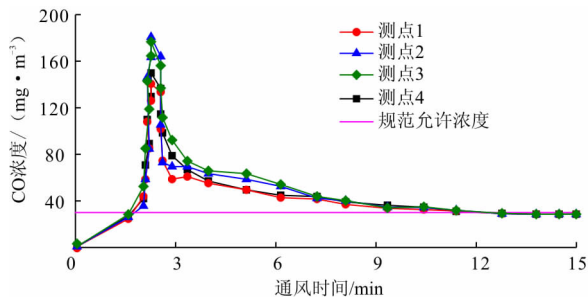


图9 同一断面各测点 CO 浓度随时间变化规律

各测点污染物峰值大小随至掌子面距离增加而

选取 5#、7# 尾水隧洞爆破为典型工况,通风 2 min 空气流场稳定后,进行掌子面爆破,采用气体采样器配合气体检定管测定空气中 CO 气体浓度。

1#~4#测点处污染物随通风时间变化规律如图 9 所示。由图 9 可看出,测点 1#~4#测点处的 CO 浓度变化规律基本一致:爆破后 CO 浓度先急剧增加,之后随着时间增加不断降低,通风 12 min 后,掌子面 3 m 附近污染物浓度降至规范允许浓度以下。通风 2.4 min 时 CO 浓度同时达到峰值,峰值随测点高度增加而稍有增加,同一高程 CO 浓度相近。

从图 10 中可看出,与施工断面距离不等的各测点 CO 浓度变化规律与同一断面测点变化规律相似,但不同距离各测点 CO 浓度达到峰值的时间不同,距离掌子面越远,达到峰值所需的时间越长,其原因是距离掌子面越远,新鲜空气达到掌子面的时间越长,污染物需要越多的新鲜空气卷吸带出隧洞,其达到峰值所需的时间也越长。

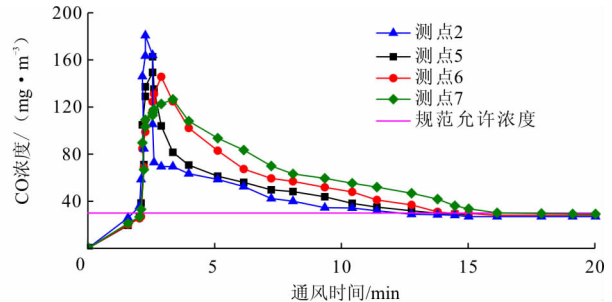


图10 不同距离各断面 CO 浓度随时间变化规律

减小,其原因为距掌子面越远,隧道总空间越大,风

流到达时压入的空气容量越大,对污染物的稀释作用也越明显。通风 15 min 后,掌子面附近的污染物浓度均接近规范允许范围。

4.2 现场通风效果

爆破通风 15 min 后,尾水隧洞现场空气状况如图 11,综合数值计算和现场污染物测试可知,掌子面附近所有部位污染物浓度接近规范允许范围,通风时间小于规范要求^[15],通风效果良好。现场污染物变化规律和浓度与数值模拟结果一致,验证了数值计算结果。



图 11 通风 15 min 后尾水隧洞现场空气状况

5 结论与建议

(1)大埋深独头隧洞施工通风各影响因素中,爆破散烟为关键因素,也是风机选型的关键性因素。

(2)通风 2 min 后尾水隧洞内流场基本稳定,出风口下方和掌子面上、下方等部位存在回流区,不利于污染物排除,污染物浓度较高。

(3)掌子面爆破后污染物逸散和分布规律为:污染物浓度先急剧增加,之后随着时间增加不断降低,通风 12 min 后,距掌子面 3 m 附近污染物降至规范允许浓度以下;通风 15 min 时掌子面附近所有部位污染物浓度均接近规范允许范围。污染物浓度随高度增加稍有增加,同一高程浓度相近,随至掌子面距离增加而减小;同一断面污染物浓度达到峰值时间一致,距离掌子面越远,污染物浓度达到峰值的时间越长。

参考文献:

- [1] 赖涤泉. 隧道施工通风与防尘[M]. 北京:中国铁道出版社,1994.
- [2] 杨立新. 现代隧道施工通风技术[M]. 北京:人民交通出版社,2012.
- [3] 刘雪朋. 水电站地下主厂房施工通风数值模拟与优化[D]. 天津:天津大学,2008.
- [4] 马德萍,李艳玲,莫政宇,等. 向家坝地下洞室群施工通风效果三维数值模拟[J]. 人民长江, 2011,42(1):29-32+53.
- [5] 徐蒯东,林志勇,章程. 白鹤滩水电站地下洞室群通风方案[J]. 暖通空调, 2015,16(2):37-42.
- [6] 卢文波,苏利军. 水电工程大型地下洞室群施工中的通风散烟问题研究[J]. 湖北水力发电, 1999(3):39-43.
- [7] 李国华,陈恩瑜. 超长引水隧洞施工期通风措施研究——以巴基斯坦 N-J 水电工程为例[J]. 人民长江, 2016,47(1):66-69.
- [8] 沈熙智,苏利军,付卫新,等. 引大济湟引水长隧洞 TBM 施工通风研究[J]. 人民长江,2008,39(3):19-21.
- [9] 冯璐,田志斌. 山西中部引黄工程 TBM 长距离独头掘进通风研究[J]. 人民长江,2018,49(4):67-70+82.
- [10] 邓祥辉,刘钊,刘钊春. 两河口长隧道独头掘进压入式施工通风三维数值模拟[J]. 土木建筑与环境工程, 2014,36(2):35-41.
- [11] 危宁,李力,等. 隧道施工通风中的有害气体浓度变化分析[J]. 三峡大学学报(自然科学版),2006,28(4):324-327.
- [12] 韩占忠,王敬,兰小平. FLUENT-流体工程仿真计算实例与应用[M]. 北京:北京理工大学出版社,2004.
- [13] 孟国涛,樊义林,江亚丽,等. 白鹤滩水电站巨型地下洞室群关键岩石力学问题与工程对策研究[J]. 岩石力学与工程学报,2016,35(12):2549-2559.
- [14] 中华人民共和国水利部. 水利水电工程施工组织设计规范:SL 303-2017[S]. 北京:中国水利水电出版社,2017.
- [15] 中华人民共和国水利部. 水工建筑物地下开挖工程施工规范:SL378-2007[S]. 北京:中国水利水电出版社,2007.