

地下洞室施工期空气质量控制措施 研究与应用

古小梦¹, 钱凯旋¹, 古艺², 龚泽鹏¹

(1. 华电金沙江上游水电开发有限公司拉哇分公司, 四川 成都 610041;

2. 中核核电运行管理有限公司, 浙江 嘉兴 314000)

摘要:金沙江上游拉哇水电站的交通多以隧道为主, 在布置上又是纵横交错, 且多为长和特长, 因此, 给洞室空气质量控制带来较大的困难。通过精确的通风计算配置通风设备以及优化施工工艺, 有效降低了隧道内的烟尘及 CO 的浓度, 为地下洞室开挖空气质量控制提供实用、有效的方案, 保障了地下洞室的施工环境和施工人员的健康, 可供相关水电工程的地下洞室空气质量控制参考。

关键词:拉哇水电站; 地下洞室; 空气质量; 控制措施

中图分类号: [TM622]; U453.2; S625.5+3

文献标识码: B

文章编号: 1001-2184(2022)03-0031-04

Research and Application of Air Quality Control Measures during Construction of Underground Caverns

GU Xiaomeng¹, Qian Kaixuan¹, GU Yi², GONG Zepeng¹

(1. Lawa Branch of Huadian Jinsha River Upstream Hydropower Development Co., LTD, Chengdu, Sichuan, 610041; 2. CNNC Nuclear Power Operation Management Co, LTD,

Jiaxing, Zhejiang, 314000)

Abstract: Transportation during construction of Lawa Hydropower Station in the upper reaches of the Jinsha River relays mainly on crisscross arranged traffic tunnels, and most of them are long and extra-long tunnels. Therefore, it brings great difficulties to the control of air quality in the caverns. This paper expounds the research on configuration of ventilation equipment through accurate ventilation calculation and optimization of the construction process, which effectively reduces the concentration of smoke and CO in the tunnel, provides a practical and effective solution for air quality control during excavation of underground cavern, guarantees the construction environment of the underground cavern and the health of the construction personnel, and can be used as a reference for controlling air quality in underground cavern of related hydropower projects.

Key words: Lawa Hydropower Station; underground cavern; air quality; control measures

1 概述

拉哇水电站场内交通隧道多为长和特长隧道, 且坡比较大, 最大坡比达 10.68%, 导致通风线路较长, 粉尘、爆破烟雾等不能及时排除, 通风降尘管理难度大, 严重影响了施工人员的健康和工程进度^[1]。

目前, 常规的施工通风方式是用轴流风机压入为主, 来达到输送新鲜空气及降低污染物浓度的目的。正常情况下, 采用传统的方式既可以满足施工要求, 且费用不会太高, 但对于隧道群, 尽

管用传统的方式能降低费用, 却用时较长, 使施工进度得不到保障。

在高海拔地区, 通风要根据施工现场情况, 通过气体状态方程求得空气重率 and 海拔的关系来确定高原区修正系数, 确定单一隧道施工通风的需求量, 进而获取隧道群施工的通风需求量, 以便为施工通风设备选型提供依据。同时, 辅以合理的施工措施, 最大限度改善洞内空气质量, 有效保证洞内施工人员的健康, 保证隧道施工的进度和质量。

2 场内交通布置

收稿日期: 2022-05-05

场内交通规划结合永久交通要求,以有利施工、方便管理、节约投资、安全可靠为原则,左、右岸共布置 11 条主干道(均为隧道)。左岸①、③道路在大坝下游相交,①道路通向坝顶、必英沟料场和⑦道路,通过不同高程支洞①-1、①-2、①-3 道路连接大坝不同高程岸坡,形成左岸高低线回路。右岸②、④道路在下游金沙江大桥右岸附近相交,④道路基本沿江上行连接上游围堰堰顶,②道路通向坝顶,中间分支线⑧道路,在上游围堰堰顶附近与④道路连接,形成右岸高低线回路。电站场内交通隧道合计 23 条,总长约 24 km。电站施工总布置见图 1。

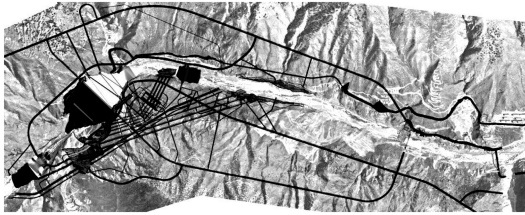


图 1 电站施工总布置图

3 空气质量控制措施

在洞室开挖过程中,不可避免地会产生一些有害物质,并散发到隧道空气中,造成污染,使空气质量不达标,对隧道施工人员的身心健康造成损害,也对工程进度造成一定影响,因此,施工通风是隧道施工过程中必不可少的重要措施。在水

电站隧道施工中,主要采用压入式通风方式,其通风设备采用轴流风机为主,辅以射流风机加强隧道内空气流通。随着洞室开挖距离增长,采用单纯的通风措施,将空气质量指标降低到一定范围内所需的时间也逐渐增长,且对空气质量控制效果不佳,进而影响工程进度,因此,需再辅以合理的施工措施,在短时间内快速提升空气质量。

3.1 隧道施工通风主要参数

隧道施工通风应能提供洞内各项作业所需要的最小风量,须按以下参数控制:

- (1)每人应供给新鲜空气 $3 \text{ m}^3/\text{min}$,高原区按 $4 \text{ m}^3/\text{min}$ 计算;
- (2)采用内燃机作业时,供风量不宜小于 $4.5 \text{ m}^3/\text{min} \cdot \text{kW}$;
- (3)全断面开挖时风速不应小于 0.15 m/s ,但不应大于 6 m/s ;
- (4)通风管每 100 m 平均漏风率不得大于 2%。
- (5)根据气态方程求得空气重率与海拔高度的

关系,确定高原修正系数 $K_y = (1 - \frac{z}{44300})^{4.256}$,工程海拔在 2 600~2 700 m 之间,因此,按最高海拔 $Z=2 700 \text{ m}$ 计算得出高原修正系数 $K_y=0.77$ 。

根据施工总体方案,隧道群各个施工面的风机出口最小供风量见表 1。

表 1 隧道群各个施工面的风机出口最小供风量

施工部位	通风距离 /m	百米漏风率 /%	风机出口供风量 / $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$
②道路隧道进口作业面	2 000	1.5	2 597.6
②道路隧道与⑧道路隧道交叉口向进口方向作业面	1 600	1.5	2 392.5
②道路隧道与⑧道路隧道交叉口向出口方向作业面	1 900	1.5	2 543.1
④道路隧道进口作业面	1 800	1.5	2 490.8
④道路隧道与上游索桥连接道交叉口向出口方向作业面	1 140	1.5	2 193.4
⑧道路隧道出口作业面	1 200	1.5	2 217.4
⑩道路隧道进口作业面	750	1.5	2 048.8

3.2 施工通风设备的选型与布置

在施工过程中,要选择合理的施工通风设备,需要较为精确的通风计算结果。目前,对于隧道压入式通风,使用较多的风机是多级变速轴流风机^[2],这样可以根据隧道内实际情况去控制通风的风量和风压,以达到施工过程中的节能目标。在布置风机时,送风式的进风管

口应在洞外离洞口距离至少 30 m。同时,为了保证各作业面通风不受干扰,风机布置宜采用独立通风的布置方式。工程施工选择的多级变速轴流风机参数见表 2。

3.3 隧道施工工艺优化及粉尘控制

隧道内的粉尘主要是由初期支护过程中的喷射混凝土与开挖过程中的爆破两个工序产生,根

表 2 工程施工选择的多级变速轴流风机参数表

风机型号	最大功率 /kW	流量 / $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$	风压 /Pa	配置风筒直径 /mm
SFD-III-No12.5	2×110	1 600~2 950	1 300~5 500	1 600
SFD-III-No11	2×55	1 150~1 950	900~4 200	1 400

据公路隧道施工技术规范规定:矽尘浓度应小于 $2 \text{ mg}/\text{m}^3$ (含有 10% 以上游离 SiO_2 的粉尘),水泥粉尘浓度应小于 $6 \text{ mg}/\text{m}^3$ (游离 SiO_2 含量小于 10%)^[3],所以,隧道施工粉尘主要通过减少矽尘和水泥粉尘来控制。

3.3.1 工艺优化一:通过湿法作业控制粉尘的产生

由于粉尘颗粒与水结合后,能凝结成含水的较重颗粒,使粉尘颗粒转变为不易纷飞的较大颗粒来有效地控制粉尘的产生,从而粉尘的二次扩散也因此被阻断,这是一项能直接减少粉尘产生的重要除尘技术。湿法作业在实际施工中有以下几个具体措施:

- (1) 钻机钻孔和凿岩作业时进行带水作业,减少钻孔产生的粉尘;
- (2) 爆破时使用水封而不是泥封;
- (3) 出渣前对堆渣直接洒水以减少堆渣转运产生的粉尘;
- (4) 出渣时在运渣行驶路线上提前洒水减少道路扬尘;
- (5) 喷混凝土施工时采用湿喷法减少水泥粉尘的产生。

3.3.2 工艺优化二:缩短隧道单头开挖长度降低通风难度

根据现场实际情况,及时开挖具备条件并和特长隧道或长隧道相交的永久或临时支线道路隧道,使隧道形成多个开挖施工作业面,减小隧道单头掘进长度,降低隧道内通风难度^[4]。在实际施工过程中,提前开挖与隧道相交的支线道路,使隧道开挖能多断面同时施工,可有效降低隧道的通风难度。

3.3.3 控制措施一:通过施工通风促进洞室内粉尘稀释、排出

通风除尘是通过通风设备往洞室内部不间断输送洞室外的新鲜空气,以稀释洞室内粉尘浓度,促进洞室内空气携带着粉尘向洞室外流动,稀释通风和置换通风同时进行,以达到降尘除尘的目的。在实际施工过程中,将通风措施纳入施工方

案严格执行,通风设备采用多级变速轴流风机与其配套软风管,并辅以射流风机。施工时由多级变速轴流风机将洞室外新鲜空气输送至施工作业面加快粉尘稀释,同时射流风机加速洞室内空气向洞室外流动,促进粉尘加速排出。

3.3.4 控制措施二:通过洒水和水幕降低飞扬的粉尘

和湿法作业原理一样,由于粉尘颗粒能与水结合形成较重、较大、不易飞扬的颗粒直接降落至洞内,使洞室内随空气运动的粉尘与水结合,从而降低洞室内飞扬的粉尘浓度,达到降尘效果。在施工过程中,从隧道施工面到隧洞出口,每间隔 250 m 距离沿洞身轮廓布置一根均匀钻有 1.5 mm 小孔的水管,孔口垂直于洞身轮廓,并持续向水管内泵送输水,通过水压作用使水从孔口径直喷出形成水幕和空气中的粉尘结合形成较重颗粒降落,经过洞室内均匀弥补的多道水幕,降低空中飞扬的粉尘。对于累积粉尘在空气流动过程中产生粉尘飞扬的情况(如道路通行),可以采用洒水的方式进行降尘。

3.3.5 控制措施三:通过干式除尘机防止粉尘扩散

随着洞身开挖长度的增加,通风设备送风到达爆破作业面的时间会越来越长,稀释粉尘的效果会越来越差,因此,就近处理是解决粉尘的最好方式。为此,引进了 SCI3 型移动干式除尘机。干式除尘机是利用净气箱使其与其联结的滤袋产生负压,在滤袋和滤袋外空气的压差作用下将粉尘吸入滤袋,使用被过滤后的空气循环进入隧道。实际操作是在距离开挖爆破作业面 400 m 的位置,将干式除尘机安装在平板车上,待爆破后开始启动,然后缓慢向作业面移动,粉尘在向洞外扩散时被干式除尘机吸收集,这样,大幅缩短了炮烟向洞外扩散的距离,这种除尘方式在单头开挖长度大的隧道中效果更明显。在喷混凝土作业时将干式除尘机布置在作业面附近,同样可以起到明显的除尘作用。

4 实例应用

为更直观、准确地评价施工中空气质量控制措施的应用效果,首先在②道路隧道工作面进行测试,测试地点在距洞口150 m、300 m处,定时分别对仅采用通风机与采用综合控制措施的空气污染物(CO、 N_xO_y 、粉尘)浓度及风速进行监

测^[5]。150 m处仅采用风机效果监测、150 m处采用综合措施效果监测、300 m处仅采用风机效果监测、300 m处采用综合措施效果监测分别见表3~6。

表3 150 m处仅采用风机效果监测

检测项目	CO浓度 /($mg \cdot m^{-3}$)	N_xO_y /($mg \cdot m^{-3}$)	粉尘浓度 /($mg \cdot m^{-3}$)	风速 /($m \cdot s^{-1}$)
爆破前	15	1	0.6	1.5
爆破后 20 min	47	18	13.4	2.2
爆破后 40 min	23	3	1.5	1.7
规范标准	30	5(NO_2)	2	≥ 0.15

表4 150 m处采用综合措施效果监测

检测项目	CO浓度 /($mg \cdot m^{-3}$)	N_xO_y /($mg \cdot m^{-3}$)	粉尘浓度 /($mg \cdot m^{-3}$)	风速 /($m \cdot s^{-1}$)
爆破前	15	0.9	0.7	1.5
爆破后 20 min	45	14	12.8	2.1
爆破后 40 min	20	2.6	1.3	1.6
规范标准	30	5(NO_2)	2	≥ 0.15

表5 300 m处仅采用风机效果监测

检测项目	CO浓度 /($mg \cdot m^{-3}$)	N_xO_y /($mg \cdot m^{-3}$)	粉尘浓度 /($mg \cdot m^{-3}$)	风速 /($m \cdot s^{-1}$)
爆破前	16	1.2	0.7	1.4
爆破后 20 min	62	25	20.1	2.9
爆破后 40 min	35	8	4.1	2.2
规范标准	30	5(NO_2)	2	≥ 0.15

表6 300 m处采用综合措施效果监测

检测项目	CO浓度 /($mg \cdot m^{-3}$)	N_xO_y /($mg \cdot m^{-3}$)	粉尘浓度 /($mg \cdot m^{-3}$)	风速 /($m \cdot s^{-1}$)
爆破后 20 min	15	1.1	0.7	1.5
爆破后 40 min	53	16.8	14.5	2.4
规范标准	25	4.2	2.2	1.9
规范标准	30	5(NO_2)	2	≥ 0.15

由上述测试结果可知,在150 m处时,采用通风机与采用综合措施空气控制质量效果基本一致;在300 m处时,采用综合控制措施的效果明显好于只采用风机措施,说明在开挖到一定距离时,采用本文提出的空气质量控制措施是合理的。

随着工程的逐步展开和施工的隧道开挖面的增加,难以准确测试单一工作面开挖时的空气质量。为确定该控制措施在多工作面开挖时应用的合理性,在工程洞室开挖高峰期选取同时开挖工作面最多的阶段,对各工作面的风速、空气污染物浓度进行了测试。各工作面空气污染物监测结果见表7。

根据监测数据可知,隧道通风状态、空气污染物浓度均满足规范要求。

表7 各工作面空气污染物监测结果

检测项目	CO浓度 /($mg \cdot m^{-3}$)	粉尘浓度 /($mg \cdot m^{-3}$)	风速 /($m \cdot s^{-1}$)
②道路隧道	16	1.1	1.6
④道路隧道	14	0.9	1.8
⑧道路隧道	12	0.7	1.2
⑫道路隧道	15	1.2	1.6

5 结语

针对水电站地下洞室施工期空气质量控制难题,根据施工进度,在施工初期及施工高峰期,合

(下转第40页)

回填透水性良好的石渣,分层碾压密实,压实度不宜低于96%。

6.3 排水明渠

排水明渠沿转料场坡脚线布置,因转料区间是一个动态过程,明渠随转料挖填过程调整,底宽须不小于4 m,排水明渠进口接一字挡墙缺口,水流随缺口流入明渠,排进金沙江。明渠两侧及底板采用格宾石笼防护,格宾石笼表面喷厚15 cm的C20喷混凝土。

7 结 语

渣场防洪是渣场施工期和运行期安全运行的关键。曲引朗沟具有流量大、沟道长、坡降大、堆渣高度大的特点,设计洪水流量80.1 m³/s,综合利用沟道长2.5 km,沟道底坡坡降超12%,渣场堆渣高度280 m。渣场堆渣量巨大,防洪问题比较突出。不同的规范对渣场截排水措施的设计标准规定不一致,而且差别较大,针对水电工程弃渣场,采用NB/T35111-2018规范执行,对工程较为有利。

曲引朗沟渣场排水方案根据渣场总体布置方案,以排水隧洞出口水流与下游水流的衔接状态、工程投资、施工难度等为主要分析因素,推荐采用挡水坝挡水、右岸隧洞排水,临时排水方式为表

(上接第34页)

理地进行优化,缩短隧道单头开挖长度,动态调整通风措施,配合湿法作业、水幕和喷雾,有效降低了洞室内空气污染物浓度,保证了洞室施工期间空气的质量。

通过施工期间的通风监测显示,隧道内空气质量符合规范要求,说明该措施可以解决长、特长洞室施工期空气质量控制难题。工程施工期隧道开挖单个作业面正常情况下Ⅲ级围岩洞段月开挖平均进尺可达140 m/m,最高达202.8 m/m,同时通过监测,洞内空气质量满足施工要求,工作面能见度大,从而保障了施工进度及洞内施工人员的健康。

本文所研究的通风降尘技术,在实际工程应用中取得了良好的成效,可为其他类似工程参考。

参考文献:

[1] 杨建林. 丰宁抽水蓄能电站地下洞室群散烟及通风系统研

面明渠排水和圆管涵联合排水等综合排洪设计方案。

通过对工程的深入研究,针对陡坡隧洞半有压流流态水力计算问题,提出了“泄流能力下限包络线”计算方法,即按有压短洞和全洞有压取泄流能力低值包络线,对工程而言较为稳妥,对于河道坡降较大的抽水蓄能电站导流洞及水电工程渣场排水洞等类似工程,具有一定的借鉴意义。

参考文献:

[1] 吴文洪,杨虎,符小虎,等. 拉哇水电站可行性研究报告[R]. 2017,556-568.
[2] NB/T 35111-2018. 水电工程渣场设计规范[S]. 北京:中国水利水电出版社,2018,6-9.
[3] NB/T 10491-2021. 水电工程施工组织设计规范[S]. 北京:中国水利水电出版社,2021.
[4] GB 51018-2014. 水土保持设计规范[S]. 北京:中国水利水电出版社,2014.
[5] 周琦,王立杰,吴佩涛,等. 拉哇水电站排水隧洞水力特性研究报告[R]. 2015.
[6] 李炜. 水力计算手册(第2版)[M]. 北京:水利水电出版社. 2006,317-328.

作者简介:

王 迎(1986-),女,湖南益阳人,高级工程师,学士,从事水利水电工程施工组织设计工作。

(责任编辑:卓政昌)

究[D]. 华北科技学院. 2019.

[2] 公路隧道通风设计指南[S]. (DB41/T 2156-2021).
[3] 公路隧道施工技术规范[S]. (JTG/T3660-2020).
[4] 水工建筑物地下工程开挖施工技术规范[S]. (DL/T 5099-2011).
[5] 李路恒,杨新安,王浩,等. 八达岭长城站大型地下洞室群施工期通风技术探究[J]. 隧道建设(中英文),2021,41(7): 1234-1237.

作者简介:

古小梦(1993-),男,四川泸县人,助理工程师,本科,从事工程建设管理工作;
钱凯旋(1995-),男,安徽蚌埠人,助理工程师,硕士,从事工程建设管理工作;
古 艺(1995-),女,四川泸州人,助理工程师,本科,从事 DE-HETS 系统运维工作;
龚泽鹏(1997-),男,四川成都人,助理工程师,本科,从事工程建设管理工作。

(责任编辑:卓政昌)