

中东抽水蓄能 K 项目尾调通气洞施工通风的分析与探讨

赵 维 刚

(中国水利水电第五工程局有限公司, 四川 成都 610066)

摘 要:在隧洞施工中,通风是隧洞内外空气交换的唯一手段。施工通风效果的好坏,直接关系到隧洞内作业人员的健康和施工效率、工程进度与施工安全。阐述了对中东抽水蓄能 K 项目尾调通气洞施工通风参数的计算、分析和探讨,有助于提高对隧洞独头掘进中施工通风的认识,可供类似工程参考。

关键词:中东抽水蓄能 K 项目;尾调通气洞;施工通风;需风量;风机工作风压

中图分类号:TV7;TV51;TV52;TV554

文献标识码: B

文章编号:1001-2184(2019)03-0058-05

Analysis and Discussion on Construction Ventilation of Tailrace Surge Chamber Ventilation Tunnel of Pumped Storage Project K in Middle East

ZHAO Weigang

(Sinohydro Bureau 5 Co., LTD, Chengdu, Sichuan, 610066)

Abstract: In tunnel construction, ventilation is the only means of air exchange inside and outside the tunnel. The effect of construction ventilation is directly related to the health and construction efficiency of tunnel operators inside, as well as project progress and construction safety. This paper expounds the calculation, analysis and discussion of construction ventilation parameters in tailrace surge chamber ventilation tunnel of Pumped Storage Project K in Middle East, which is helpful to improve the understanding of construction ventilation in tunnel blind heading, and can be used as a reference for similar projects.

Key words: Pumped Storage Project K in Middle East; tailrace surge chamber ventilation tunnel; construction ventilation; required airflow; operating air pressure of fan

1 工程概述

中东抽水蓄能 K 项目由上水库、输水系统、地下厂房系统、尾水系统、下水库、地面开关站及进场道路组成。其中进厂交通洞长度约 1 003 m,呈城门洞型和马蹄型断面。根据不同的围岩条件,开挖断面从 6.2 m×7.45 m 到 11.288 m×8.95 m(宽×高),洞内纵坡坡比为-10%,最大转弯半径为 628 m,转弯角度为 16.84°。

尾调通气洞连接进厂交通洞与尾水调压室,桩号为 ATL0+000~0+523.27,高程为-229.54~-176.5 m,洞内纵坡坡比为-10.5%。进口位于进厂交通洞桩号 AC0+476.457 处,与进厂交通洞轴线呈 120°夹角,隧洞断面呈马蹄形,结构尺寸为 6 m×(6.28~6.45)m,最大开挖面积为 36.4 m²,隧洞直径为 3.4 m。

尾调通气洞纵断面见图 1,尾调通气洞开挖典型断面见图 2。

2 通风的目的

在隧洞施工过程中,不可避免地会产生一些有害气体并排放到隧洞空气中,造成对隧洞空气的污染,严重地损害隧洞内作业人员的身心健康。这些有害气体主要包括一氧化碳、二氧化氮、一氧化氮、二氧化碳、二氧化硫、硫化氢和瓦斯等,其主要来源包括人员呼吸、放炮作业、内燃设备的尾气、洞内火灾、瓦斯爆炸、有机物氧化和焊接等。

因此,需要采用有效的施工通风措施以降低洞内空气中有害气体的浓度,保证施工人员正常呼吸及施工机械的有效运转和施工安全,保持施工进度、文明施工和员工的身体健康,为洞室开挖及支护施工提供一个安全良好的施工环境。

3 施工通风的计算及布置

收稿日期:2019-05-13

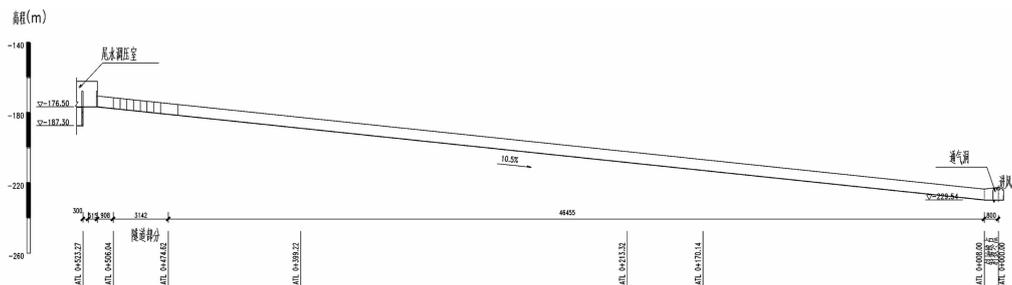
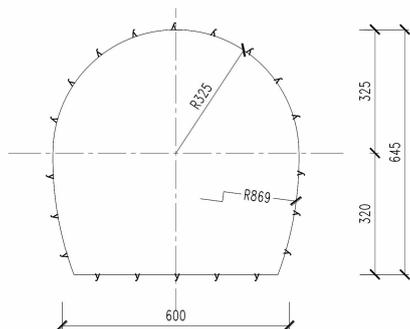


图 1 中东抽水蓄能 K 项目尾调通气洞纵剖面图



单位:cm

图 2 中东抽水蓄能 K 项目尾调通气洞开挖典型断面图

(1)通风标准。

按照《中东一般隧洞施工技术要求》54.06.02 款中的规定及中东标准 5567 的要求,隧洞洞室断面面积小于 100 m² 的隧洞洞内的最低风速为 0.5 m/s,洞内每人的供风量为不小于 5.6 m³/min,柴油设备供风量不少于 3.8 m³/kW。

表 1 隧洞工作场所空气中化学物质容许浓度对比表

序号	中文名	中国规范化学物质 职业接触限值 /mg · m ⁻³			中东抽水蓄能标准 5567 隧洞空气中有毒气体的浓度	
		最高容许 浓度	加权平均 容许浓度	短时间接触 容许浓度	ppm	百分比
1	一氧化碳	—	20	30	30	0.003
2	一氧化氮	—	15	—	—	—
3	二氧化氮	—	5	10	3	0.000 3
4	二氧化硫	—	5	10	—	—
5	硫化氢	10	—	—	10	0.001
6	二氧化碳	—	9 000	18 000	5 000	0.5

表 2 隧洞内风速标准、设备及人员需风量标准对比表

序号	名称	单位	中国 规范	中东抽水蓄 能标准 5567
1	隧洞内最低风速	m/s	0.15	0.5
2	设备需风量	m ³ /(min · kW)	3	3.8
3	人员需风量	m ³ /min	3	5.6

关于洞内有害气体浓度,中东标准 5567 有以下规定的限值:二氧化碳(CO₂),隧洞中空气的 5 000 ppm(0.5%);一氧化碳(CO),隧洞中空气的 30 ppm(0.003%);二氧化氮(NO₂),隧洞中空气的 3 ppm(0.000 3%);硫化氢(H₂S),隧洞中空气的 10 ppm(0.001%);甲烷,隧洞开挖面的 1.5%。

而对于影响作业环境的相关因素和卫生标准,在我国《工业企业设计卫生标准》(GBZ 1—2010)《工作场所有害因素职业接触限值 第 1 部分:化学因素》(GBZ 2.1—2007)和《工作场所有害因素职业接触限值 第 2 部分:物理因素》(GBZ 2.2—2007)中,对与隧洞施工作业环境有关、常见的几种化学物质(有害气体)容许浓度及粉尘容许浓度都有明确的规定,其主要内容见表 1。

中东标准 5567 中有害气体的浓度与我国规范中的相关规定对比情况见表 1,隧洞内风速标准、设备及人员需风量标准对比情况见表 2。

(2)通风规划。

依据经监理工程师审核的开挖及支护施工方案,尾调通气洞的开挖及支护由进厂交通洞向尾水调压室单向独头掘进,施工通风方式选择压入式通风,利用设置在洞外的通风机械通过通风管道将新鲜空气送至工作面,供给洞内足够的新鲜

空气。

根据施工方案中的人力资源、设备配置、爆破设计等计算施工现场的通风量及风速,除必须满足施工人员正常呼吸、稀释机械废气浓度、降低有害气体的浓度及降温等的最小通风量外,还需满足洞内的最小风速,以保持洞内空气的新鲜程度。

施工通风采用正压轴流风机供风、柔性连续风筒送风。风机架设在进厂交通洞外约 30 m,风筒出风口距掌子面约 20 m,风筒通过钢丝悬吊在隧洞拱顶位置。

(3) 通风风量。

通过对满足施工人员正常呼吸、排除爆破及机械废气、降低有害气体浓度等的最大通风量,以及满足洞室最小风速且不超过最大容许风速进行施工所需通风量的分别计算,确定最大的需风量。

① 施工人员正常呼吸所需风量计算公式:

$$Q_1 = m \times q_1 \times k$$

式中 Q_1 为隧洞内作业人员呼吸所需的总风量 (m^3/min); m 为工作人数; q_1 为每个人需要的通风量,取 $5.6 \text{ m}^3/\text{min}$; k 为通风备用系数,取 $1.1 \sim 1.25$ 。

根据尾调通气洞开挖支护施工方案,施工作业面高峰期的人员总数为 31 人,按照中东标准 5567 的要求,以每人 $5.6 \text{ m}^3/\text{min}$ 新鲜空气需要量进行计算,施工人员所需风量计算如下:

$$\begin{aligned} Q_1 &= m \times q_1 \times k \\ &= 30 \times 5.6 \times 1.25 = 217 (\text{m}^3/\text{min}) \end{aligned}$$

② 计算爆破排烟需风量。

尾调通气洞爆破开挖施工过程中的主要爆破参数见表 3。

表 3 尾调通气洞爆破参数表(进尺 3 m)

段位	孔数 / 个	药卷数 / 个	装药量 / 段 / kg	非电雷管数量 / 个	导爆索 / m
20	96	56.5	118.5	66	190

考虑到中东规范 5567 要求达到的 CO 浓度为 30 ppm,即 0.003%,遂选择采用沃洛宁公式计算压入式通风方式下排除炮烟的需风量,其计算公式为:

$$Q_2 = 0.456 \div t \times \sqrt[3]{\frac{Gb(AL_0)^2}{P_q \times C_a}}$$

式中 Q_2 为爆破排烟工作面需风量 (m^3/min); t 为通风时间。依国际隧协规定,取 15 min; G 为

同时爆破的炸药量,依据爆破设计,取 118.5 kg ; b 为每千克炸药爆炸时产生的 CO (L/kg),一般取 $b = 40 \text{ L/kg}$,遇到煤层时取 $b = 100 \text{ L/kg}$; L_0 为通风长度; A 为隧洞开挖断面积,依据设计图计算为 42 m^2 ; P_q 为通风区段内通风管始末端风量之比; C_a 为要求达到的 CO 浓度(%),取值为 0.003%。

a. 通风长度的确定。

当隧洞长度较短、小于排烟安全距离时,隧洞长度即为通风长度;当隧洞长度较长、大于排烟安全距离时,则取排烟安全距离作为通风长度(排烟安全距离指炮烟从工作面面向外排除过程中浓度不断降低、隧洞断面上的炮烟平均浓度已降到平均浓度时该断面到掘进工作面的距离)。

排烟安全距离的计算公式根据沃洛宁公式推导得到,即:

$$\begin{aligned} L_s &= 0.1 \times G \times b / (C_a \times A) \\ &= 0.1 \times 118.5 \times 40 / (0.003 \times 36.4) \\ &= 4\,340.66 (\text{m}) \end{aligned}$$

尾调通气洞长度为 523.7 m,小于排烟安全距离,故通风长度 L_0 取 523.7 m。

b. 通风区段内通风管始末端风量之比 P_q 的计算。

尾调通气洞用于连通进厂交通洞及尾水调压室,开挖及支护施工时,供风风机架设在进场交通洞外,通风风管经进厂交通洞转入尾调通气洞,风管的长度应为尾调通气洞与相应进厂交通洞段及洞外安全距离的总和,计算通风管漏风量时应予以考虑,以便于计算通风管始末端风量之比。

$$\begin{aligned} P_q &= 1 / (1 - L / 100 \times P_{100}) \\ &= 1 / (1 - 1\,059.73 / 100 \times 2\%) = 1.27 \end{aligned}$$

式中 P_q 为通风区段内通风管始末端风量之比; P_{100} 为百米通风管漏风率,一般取 2%; L 为洞长或风机控制长度,取值 1 059.73 m(尾调通气洞长 523.27 m,进厂交通洞段长 476.46 m,风机离开洞口的安全距离为约 10 倍隧洞直径,即 60 m)。

c. 排除炮烟的需风量计算。

$$\begin{aligned} Q_2 &= 0.456 \div t \times \sqrt[3]{\frac{Gb(AL_0)^2}{P_q \times C_a}} \\ &= 2\,155.69 (\text{m}^3/\text{min}) \end{aligned}$$

按允许最低风速计算风量:

$$Q_3 = 60 \text{ vA}$$

式中 Q_3 为最小风速通风量 (m^3/min); v 为洞室

中要求的最小风速 (m/s)。

按照中东隧洞开挖指导准则要求,隧洞中的最低风速按 $0.5 m/s$ 、隧洞最大开挖断面积按 $36.4 m^2$ 进行计算,所需风量如下:

$$Q_3 = 60 \times v \times A = 60 \times 0.5 \times 36.4 \\ = 1\ 092 (m^3/min)$$

d. 按稀释和排出内燃机废气计算风量。

稀释内燃设备废气所需的总风量为:

$$Q_4 = W \times q_2$$

式中 Q_4 为稀释内燃设备排放废气隧洞内所需要的总风量 (m^3/min); W 为洞内同时作业的内燃设备的总额定功率 (kW); q_2 为内燃设备每千瓦需要的通风量,按国际隧协规定,柴油机械按额定功率计算的最小供风量为 $4 m^3/(min \cdot kW)$ 。

根据不同工况计算洞内机械设备的用风量,根据施工方案,钻孔采用两臂钻,清渣采用液压反铲挖掘机,出渣采用装载机装车、自卸汽车运输,支护采用湿喷台车、锚杆台车施工(表 4)。

表 4 不同工况下洞内施工设备表

工况	主要内燃设备名称	设备额定功率 /kW	数量
钻孔	两臂钻	115	1
清渣	液压反铲挖掘机	170	1
出渣	装载机	163	1
	自卸汽车	235	4
支护	湿喷台车	130	1
	锚杆台车	110	1

在出渣工况下,隧洞内同时工作的内燃设备总额定功率最大,因此计算内燃设备用风量时考虑的洞内设备组合为装载机装卸、自卸汽车运输。由于弃渣运输距离较短、装载机装车效率高、出渣时洞内实际同时作业的内燃设备应为装载机 1 台、自卸汽车 1 台,考虑装载机全部时间在洞内作业的设备额定总功率计算如下:

$$W = 163 + 235 = 393 (kW)$$

稀释上述设备组合内燃机废气所需的总风量为:

$$Q_4 = W \times q_2 = 393 \times 4 = 1\ 716.25 (m^3/min)$$

e. 风机工作点风量的计算。

$$Q_0 = P_q \times Q$$

式中 Q_0 为风机工作点风量, m^3/min ; Q 为以各种条件计算的洞内所需最大通风量, m^3/min ; P_q 为通风区段内通风管始末端风量之比。

根据以上计算,可以确定洞内通风所需的最

大风量为爆破排烟所需的风量 ($2\ 155.69 m^3/min$),通风区段内通风管始末端风量之比为 1.27,则风机工作点风量的计算如下:

$$Q_0 = P_q \times Q \\ = 1.27 \times 2\ 155.69 = 2\ 737.72 (m^3/min)$$

洞室需风量计算结果见表 5,钻孔、爆破排烟、出渣、支护等阶段的最大需风量见表 6。

表 5 洞室需风量计算结果一览表

洞室名称	需风量计算成果 / $m^3 \cdot min^{-1}$				风机工作点风量
	施工工人所需风量	爆破排烟需风量	最低风速要求计算需风量	按稀释和排出内燃机废气计算风量	
尾调通气洞	217	2 155.69	1 092	1 716.25	2 737.72

表 6 钻孔、爆破排烟、出渣、支护等阶段最大需风量表

洞室名称	各阶段最大需风量计算成果 / $m^3 \cdot min^{-1}$			
	钻孔需风量	爆破排烟需风量	出渣需风量	支护需风量
尾调通气洞	460	2 155.69	1 716.25	960

(4) 通风风压。

根据通风量计算风阻及通风机的全风压,计算结果见表 3~5。

① 通风风压计算公式。

计算通风管通风阻力:

$$h_1 = (R_f + R_j) \times Q_0 \times Q / 3\ 600$$

式中 h_1 为通风管通风阻力, Pa; R_f 为通风管摩擦阻力, $R_f = 6.5 \times \alpha \times L / d^5$; R_j 为通风管局部阻力, $R_j = \zeta \times 1 / d^4$; d 为通风管直径,取值 $1.5 m$; α 为通风管摩擦阻力系数 ($N \cdot s^2 / m^4$),取值为 $0.003\ 04$; ζ 为通风管局部阻力系数; L 为洞长或风机控制长度,取值 $1\ 059.73 m$ 。

a. 通风管局部阻力系数的计算。

弯道局部阻力系数按照 $\xi = 0.008 \times a^{0.75} / n^{0.8}$ 进行计算,式中 ξ 为弯道局部阻力系数; a 为转弯角度; $n = R / d$, R 为隧洞转弯半径, d 为通风管直径。

通风管的弯道局部阻力计算结果见表 7。

在隧洞施工通风中常用的局部阻力系数取以下值。管道入口, $\xi = 0.6$; 管道出口, $\xi = 1$ 。

尾调通气洞通风管局部阻力系数的计算: $\xi = 0.6 + 0 + 0.05 + 0.02 + 0.01 + 0.03 + 1 = 1.72$ 。

b. 计算通风管的摩擦阻力。

$$R_f = 6.5 \times \alpha \times L / d^5 \\ = 6.5 \times 0.003\ 04 \times 1\ 059.73 / 1.5^5$$

$$= 2.76(\text{kg}/\text{m}^3)$$

c. 计算通风管的局部阻力。

表 7 尾调通气洞通风管弯道局部阻力系数表

项 目			数 值			
弯道局部阻力系数	ξ	0	0.05	0.02	0.01	0.03
转弯角度	a	16	63	60	36	54
$n=R/d$	n	418.67	5.11	16.67	16.67	6.67
通风管直径	d	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
转弯处的曲率半径	R	628	7.67	25	25	10

$$R_j = \xi \times 1/d^4 = 1.72 \times 1/1.5^4 = 0.34(\text{Pa})$$

d. 计算通风管的通风阻力。

$$\begin{aligned} h_1 &= (R_f + R_j) \times Q_0 \times Q/3\ 600 \\ &= (2.76 + 0.34) \times 2\ 737.73 \times 2\ 155.69/3\ 600 \\ &= 5\ 075.82(\text{Pa}) \end{aligned}$$

② 由于通风机的全风压等于总的通风阻力，因此通风机工作的全风压为：

$$h_{\text{全}} = h_1 + h_0$$

式中 $h_{\text{全}}$ 为通风机工作的全风压； h_0 为通风管出口风阻， $h_0 = \zeta \times Q^2/d^4$ ； h_1 为通风管通风阻力。

a. 计算通风管出口风阻。

$$\begin{aligned} h_0 &= \zeta \times Q^2/d^4 \\ &= 1.72 \times 2\ 155.69^2/1.5^4 = 437.16(\text{Pa}) \end{aligned}$$

表 9 风机及风筒配置表

风机安装位置	风机风量 / $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	风压/Pa	风机型号	功率 /kW	风阻及工作全风压 /Pa	
					通风管通风阻力	通风管出口风阻
厂房交通洞洞口	24.6	2 100	SFD-III-NO11	2×55	5 075.82	437.16
					5 512.98	

4 施工通风的管理

目前，在进厂交通洞洞口布置了一台正压轴流风机 SFD-III-NO11 并配备了 $\phi 1.5\text{ m}$ 的柔性风筒，用于尾调通气洞的施工通风，并在施工过程中加强了对施工通风的管理，采用风速测试仪 4 h 监测一次，风筒出风口处的风力满足设计要求。

根据项目实际情况，笔者认为：在施工过程中应加强以下几项工作：

(1) 加强环境保护意识，重视通风工作，成立专业的通风队伍，负责通风机、通风管的安装、维护以及通风方式的变换，承担通风效果的责任。

(2) 加强对有害气体浓度、放射性物质的监测，根据浓度调整风量，合理供风。

(3) 风机应由专业人员管理，及时了解风机的工作压力，以免造成风阻过载而烧毁电机。

5 结 语

通过学习和参考隧洞施工通风方面的专业资料，结合中东抽水蓄能 K 项目现场实际情况，笔

b. 计算通风机工作的全风压。

$$\begin{aligned} h_{\text{全}} &= h_1 + h_0 \\ &= 5\ 075.82 + 437.16 = 5\ 512.98(\text{Pa}) \end{aligned}$$

风机工作风压的计算成果见表 8。

表 8 风机工作风压计算成果一览表

洞室名称	风阻及工作全风压 /Pa			备注
	通风管通风阻力	通风管出口风阻	工作全风压	
尾调通气洞	5 075.82	437.16	5 512.98	

(5) 通风机械设备的选择。

根据最大需风量及风机工作全风压选择适配的正压轴流式局部通风机及配套的柔性连续风筒，推荐采用的通风机械设备及配套的风筒的型号、数量见表 9。

者仅以尾调通气洞作为计算对象，通过对隧洞开挖及支护施工过程中对隧洞环境的污染源分析，从满足作业人员呼吸需风量、爆破排烟需风量、按允许最低风速计算风量、按稀释和排出内燃机废气计算供风量等四个角度计算了在隧洞独头施工中采用通风管路将新鲜空气送到施工作业面、排出有害气体和粉尘、创造必要的施工作业环境所需的最大供风量、风机工作风压、通风管路直径等参数，对尾调通气洞的施工通风进行了分析和探讨，以提高对隧洞施工通风计算的认识，所取得的经验可供类似工程参考。

参考文献：

[1] 杨立新,等,编著.现代隧道施工通风技术[M].北京:人民交通出版社,2012.
[2] 陈寿根,张 恒,编著.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.

作者简介：

赵维刚(1980-),男,陕西咸阳人,工程师,学士,从事工程施工技术与管理工作。

(责任编辑:李燕辉)