

深埋小断面输水隧洞 TBM 施工通风 技术研究与应用

郭树生

(山西省东山供水工程建设管理局, 山西 太原 030002)

【摘要】 本文介绍了山西省大水网东山供水工程输水隧洞 TBM 独头施工掘进 15.5km 通风系统方案设计, 根据工程特征参数计算风量、风压和风机功率, 并对通风系统设备进行了优化匹配选型。监测结果表明: 采用该通风系统满足工程施工需要, 为同类工程通风系统设计施工提供相关借鉴和参考。

【关键词】 输水隧洞; 作业环境; TBM; 通风方案; 设计施工

中图分类号: TV554

文献标志码: B

文章编号: 1005-4774(2017)07-0001-04

Research and application of embedded small-section water conveyance tunnel TBM construction ventilation technology

GUO Shusheng

(Shanxi Dongshan Water Supply Project Construction Administration, Taiyuan 030002, China)

Abstract: In the paper, the plan design of TBM sole-head construction excavating 15.5 ventilation systems in Shanxi major water network Dongshan Water Supply Project is introduced. Air quantity, wind pressure and fan power are calculated according to engineering characteristic parameters. Matching model selection is optimized for equipment of the ventilation systems. Monitoring results show that the ventilation system is adopted for meeting the demand of engineering construction, thereby providing related reference for the design and construction of similar engineering ventilation system.

Key words: water conveyance tunnel; working environment; TBM; ventilation plan; design and construction

1 工程概况

山西省东山供水工程是山西大水网“两纵十横”的第五横, 是“十二五”为提高山西省水资源合理配置和高效利用的省重点水利工程, 输水线路总长 255km, 其中输水管线 178km, 隧洞 77km。

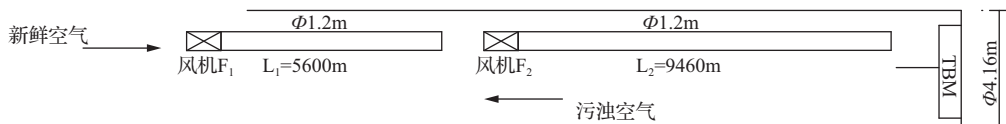
9 号隧洞全长 22.6km, 钻爆法从进口开挖 7.1km, 采用美国 Robbins 生产的双护盾 TBM, 从出口掘进 15.5km。TBM 开挖直径 4.16m, 预制混凝土管片衬砌

后隧洞直径 3.4m, 纵坡 $i = 1/2700$, 出口底高程 1007.60m。围岩覆盖厚度 200 ~ 560m, V 类围岩占基岩段长 40.7%, 在 V 类围岩中有 53.8% 为泥岩洞段, 有 46.2% 为断层及影响带。隧洞沿线为三叠系厚层砂岩、厚层泥岩、砂泥岩互层地层, 发育有较大规模断层, 地下水位一般埋深浅, 存在高外水压力。主要存在软质岩变形挤出、断层带涌水、突泥、塌方等工程地质问题。

2 通风方案

2.1 通风方式

隧洞工程施工通风方式主要有自然通风和机械通风两种,当自然通风不能满足施工要求时,应考虑采用机械通风。机械通风型式主要有管式、巷道式和分道式,管式又有压入式、抽出式和混合式。根据洞线布置,洞径规模、施工程序、施工方法等施工要素及方案比对,9号隧洞 TBM 施工段通风方式采用独头机械管道压入式通风。压入式通风系统的主要优点是将洞外新鲜空气通过风管直接送达工作区,可有效改善工作区的空气质量,并且随隧洞掘进延伸只需接长风管而无需移动风机,最大限度体现 TBM 施工快速、安全、文



TBM 施工通风系统布置图

明施工的设计理念。风管与风机布置应遵守以下规定:为保证通风效果最佳,风管设计应尽可能减少分管间接头数量,风管应按设计要求布设安装,吊挂风管应做到平、直、紧、稳、顺,风管材料应根据通风方式选择。风机应布置在洞口 30~50m 内,风机支架要牢固稳定,避免运行时震动影响通风效果,一台风机不能满足风压设计要求时,可数台风机串联运行。

3 隧洞通风标准及设计参数

3.1 通风系统功用

通风系统是深埋小断面输水隧洞施工的生命线,良好的运行环境是保障作业人员人身安全前提条件。因此,控制隧洞施工作业环境的有害物(气体、粉尘)和施工作业环境的温度,向工作区提供足够的新鲜空气,保证机电设备正常运行成为 TBM 隧洞通风系统的主要任务。

3.2 通风标准

根据《水利水电工程施工组织设计规范》(SL 303—2004)、《水工建筑物地下开挖工程施工规范》

(SL 378—2007)中规定:地下洞室开挖施工过程中洞内氧气体积不应少于 20%;平均温度不应高于 28℃;工作区噪音值大于 90dB(A)时,应采取消音或其他防护措施。空气中有害物质(有害气体、粉尘)允许含量详见以上规范中的卫生标准^[1-2]。

2.2 通风系统布置

9号隧洞 TBM 施工段(YD14+418.86~YD29+879.30)长 15460.44m,圆形衬砌断面,内径 3.4m。在 9号隧洞出口布置一台风机 F_1 (桩号 29+929.3),在隧洞内距 F_1 风机 5600m 布置第二台增压风机 F_2 (桩号 24+329.3),距 F_2 风机 9460m 与 TBM 后配套系统的辅助风机衔接,后配套系统设计长度为 440m。新鲜空气从风机 F_1 进入,经通风管送到增压风机 F_2 ,再通过通风管送达 TBM 后配套系统,最后由后配套系统上的辅助风机送达 TBM 机头附近。通风系统布置如下图所示。

3.3 设计参数

山西省东山供水工程 9号隧洞 TBM 施工段通风系统通风计算参数见下表。

9号隧洞 TBM 通风计算系数表

序号	项目名称	单位	取值	备注
1	开挖断面面积	m ²	13.58	
2	衬砌后断面面积 $S_{断}$	m ²	9.07	
3	风筒直径	m	1.2	
4	风筒面积 $S_{风}$	m ²	1.13	
5	过流面积 $S_{流}$	m ²	7.94	$S_{流} = S_{断} - S_{风}$
6	洞内最多作业人数	人	46	
7	风管百米漏风率	%	0.5	
8	空气密度	kg/m ³	1.2	

续表

序号	项目名称	单位	取值	备注
9	通风距离	m	5600	L_1
			9460	L_2
			440	TBM 后配套长度
10	风管达西系数	—	0.015	

4 TBM 通风系统风量计算

4.1 风量计算

TBM 正常掘进施工时,主要施工工序和施工人员集中在 TBM 主机及其后配套工作区域,通风系统的通风量由通风系统送达工作区。通风机设计风量的确定要同时满足洞内工作人员的新风需求以及稀释、排除隧道内产生有害气体和粉尘的风量要求;同时,还必须考虑附加漏风量,因为风管制作工艺、安装质量以及维护水平等影响,运行时通风管的漏风现象不可避免;因此设计风量计算依据应取其中的最大值。

a. 按洞内最多作业人数计算风量。

$$Q_1 = qmK^{[3]}$$

式中 q ——每人每分钟所需新鲜空气量, $3\text{m}^3/\text{人}\cdot\text{min}$;

M ——洞内同时最高施工人数, 46 人;

K ——风量备用系数, 取值 1.2。

经计算 $Q_1 = 165.6\text{m}^3/\text{min}$

b. 按稀释内燃机车产生的有害气体计算风量。

$$Q_2 = qwKn$$

式中 q ——机车每千瓦每分钟消耗空气量, $4\text{m}^3/$

$(\text{kW}\cdot\text{min})$;

w ——每台机车功率, 125kW;

K ——风量备用系数, 取值 1.1;

n ——发动机利用系数, 取值 0.63。

经计算 $Q_2 = 346.5\text{m}^3/\text{min}$ 。

c. 按洞内最低允许风速计算风量。

$$Q_3 = 60vS_{\text{流}}^{[3]}$$

式中 v ——隧洞内最小允许风速, 0.5m/s ;

$S_{\text{流}}$ ——洞内净过风断面, $S_{\text{流}} = 7.94\text{m}^2$ 。

经计算 $Q_3 = 238.2\text{m}^3/\text{min}$ 。

取以上计算得到的最大通风量作为设计通风量, 设计通风量为 $Q_{\text{总}} = Q_1 + Q_2 = 512.1\text{m}^3/\text{min} \geq Q_3 = 238.2\text{m}^3/\text{min}$ 。

d. 按允许风速校核通风量。

$$v = Q_{\text{总}}/S_{\text{流}}$$

式中 $S_{\text{流}}$ ——洞内净过风断面, $S_{\text{流}} = 7.94\text{m}^2$ 。

经计算 $v = 1.1\text{m}^3/\text{s}$, 则满足风速大于 0.5m/s , 小于 4m/s 的施工组织设计规范要求^[4]。

e. 通风系统风机设计风量。

$$Q_{\text{设2}} = Q_{\text{总}}/(1 - P_{100}L_2/100)$$

式中 $Q_{\text{总}}$ ——工作区需风量, $Q_{\text{总}} = 512.1 \div 60 = 8.54\text{m}^3/\text{s}$;

P_{100} ——通风系统风管百米漏风率, 0.5%;

L_2 ——风机 F_2 距工作区距离 $15500 - 5600 - 440 = 9460\text{m}$ 。

经计算 $Q_{\text{设2}} = 16.23\text{m}^3/\text{s}$ 。

$$Q_{\text{设1}} = Q_{\text{设2}}/(1 - P_{100}L_1/100)$$

式中 L_1 ——风机 F_1 距 F_2 距离 5600m 。

经计算 $Q_{\text{设1}} = 22.56\text{m}^3/\text{s}$ 。

4.2 风压计算

通风系统风机的风压是用来克服通风阻力并保证送风管末端的风流具有一定动压,以维持通风系统的连续流动,实现 TBM 施工工作区的劳动作业环境符合《水工建筑物地下开挖工程施工规范》规定的劳动卫生标准。

a. 动态风压 $P_{\text{动}}$ 。

$$P_{\text{动}} = 0.5\rho v^2$$

式中 ρ ——空气密度, 取 $1.2\text{kg}/\text{m}^3$;

v ——通风管末端管口风速。

$v_2 = 8.54/1.13 = 7.56\text{m/s}$, $v_1 = 16.23/1.13 = 14.36\text{m/s}$ 。经计算, $P_{\text{动2}} = 34.29\text{Pa}$, $P_{\text{动1}} = 123.73\text{Pa}$ 。

b. 摩擦阻力 $P_{\text{阻}}$ 。

$$P_{\text{阻}} = (6.5\alpha LQ^2/D^5)/P_L^{[4]}$$

式中 α ——管道的摩阻系数, $\alpha = \rho\lambda/8$;

ρ ——空气平均密度, 取 $1.2\text{kg}/\text{m}^3$;

λ ——管道达西系数,取 $0.0015^{[5]}$, $\alpha = 0.00225\text{kg/m}^3$;

Q ——通风机设计风量, $Q_{\text{设}2} = 16.23\text{m}^3/\text{s}$,
 $Q_{\text{设}1} = 22.56\text{m}^3/\text{s}$;

D ——风管直径 1.2m;

L ——通风管道长度, $L_2 = 9460\text{m}$, $L_1 = 5600\text{m}$;

P_L ——通风管道的漏风系数, $P_L = 1/(1 - P_{100}L/100)$, $P_{L2} = 1.90$, $P_{L1} = 1.39$ 。

经计算 $P_{\text{阻}2} = 7703.20\text{Pa}$, $P_{\text{阻}1} = 12043.37\text{Pa}$ 。

c. 局部阻力 $P_{\text{局}}$ 。

$$P_{\text{局}} = 0.1P_{\text{阻}}$$

经计算 $P_{\text{局}2} = 770.32\text{Pa}$, $P_{\text{局}1} = 1204.34\text{Pa}$ 。

d. 总风阻力 $P_{\text{总}}$ 。

$$P_{\text{总阻}} = P_{\text{动}} + P_{\text{阻}} + P_{\text{局}}$$

经计算 $P_{\text{总阻}2} = 8507.81\text{Pa}$, $P_{\text{总阻}1} = 13371.44\text{Pa}$ 。

4.3 通风机的计算功率

通风机配用电机的功率按下式计算:

$$N = \frac{kQP_i}{n \times 60 \times 1000}$$

式中 k ——功率备用系数,取 1.05;

Q ——通风机设计风量, $Q_{\text{设}1} = 22.56\text{m}^3/\text{s} = 1353.6\text{m}^3/\text{min}$, $Q_{\text{设}2} = 16.23\text{m}^3/\text{s} = 973.8\text{m}^3/\text{min}$;

P_i ——通风总阻力, Pa, $P_{\text{总阻}1} = 13292.40\text{Pa}$,
 $P_{\text{总阻}2} = 8485.89\text{Pa}$;

n ——通风机效率取值 0.85。

经计算 $N_1 = 370.40\text{kW}$, $N_2 = 192.82\text{kW}$ 。

4.4 通风设备选型

根据计算的通风机设计风量和风压,确定风机性能曲线和风管阻力特性曲线,其交点作为风机工作点,结合该工程采用 TBM 从隧洞出口掘进,独头通风距离 15.5km。比选结果是选用法国 ECE COGEMACOUSTIC 公司生产的隧洞轴流风机,型号分别为 F_1 选用 T2-90-4X90-2,风量 $22.6\text{m}^3/\text{s}$,风压 293.5daPa ; F_2 选用 T2-90-3X90-2,风量 $17.4\text{m}^3/\text{s}$,风压 346daPa 。风筒直径

$\Phi 1.2\text{m}$,单根长度 200m,风管与风管是拉链式连接。

5 结论及建议

根据 TBM 设备安装的监测仪器 (CH_4 、 CO 、 O_2 、 CO_2 、 H_2S 等)实时监测洞内有害气体均满足《水工建筑物地下开挖工程施工规范》(SL 378—2007)中规定的卫生标准,使 TBM 机电设备安全运行,工作区施工人员取得舒适工作作业环境。山西省东山供水工程 9 号隧洞采用美国 Robbins 生产的双护盾 TBM 独头掘进 15.5km,实践证明该通风系统运行正常,取得良好通风效果。对解决同类型工程深埋小断面长距离输水隧洞 TBM 独头掘进施工通风提供一种新的思路,具有广泛的借鉴和示范作用。

中国正在进行全流域和跨流域的水资源配置与调度^[6],隧洞施工已成为世界上发展最快的国家。目前,有些施工单位对隧洞通风重视不足,通风技术水平低下,不能满足隧洞施工作业环境卫生标准要求。建议对深埋特长隧洞施工在招标设计阶段,明确要求潜在中标人在工程实施过程要成立专门隧洞通风作业队伍,提供通风设计、通风监测、设备配套、通风系统管理等分包业务,切实改善隧洞施工作业环境,以保护施工作业人员的身体健康。◆

参考文献

- [1] 中水东北勘测设计研究有限责任公司. SL 303—2004 水利水电工程施工组织设计规范[S]. 北京:中国水利水电出版社,2004.
- [2] 中水东北勘测设计研究有限责任公司. SL 378—2007 水工建筑物地下开挖工程施工规范[S]. 北京:中国水利水电出版社,2007.
- [3] 杜彦良,杜立杰. 全断面岩石隧道掘进机:系统原理与集成设计[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2011.
- [4] 余学敏. 特长隧道 TBM 法施工 20km 独头通风方案研究[J]. 四川建材,2013,39(2):114-117.
- [5] 朱齐平,郭京波,赖涤泉. 辽宁大伙房输水隧洞 TBM1 段通风技术研究[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版),2004,17(4):13-16.
- [6] 鲁帆,蒋云钟,王浩,等. 水资源综合调配概念与关键技术问题浅析[J]. 水利水电技术,2010,41(1):11-14.