

# 金龙特长隧道施工通风技术

王朝晖

(中铁十四局集团有限公司工程管理部,山东 济南 250014)

**摘要:**结合金龙隧道施工通风方案的确定,阐述根据隧道的长度、掘进坑道的断面大小、施工方法和设备条件等诸多因素来确定隧道施工通风的方式、方法。

**关键词:**金龙特长隧道;隧道施工;通风技术

**中图分类号:**U455 **文献标识码:**B **文章编号:**1672-7428(2007)07-0059-04

## 1 工程概况

金龙隧道是沪蓉国道主干线湖北宜昌至恩施高速公路的第一长隧,是一座上下行分离式隧道,两隧道中心线相距 50 m。隧道进口位于湖北省宜昌市长阳县贺家坪镇堡镇村头道河北侧一小山脊的端部,出口位于宜昌市长阳县榔坪镇长丰村青岩沟与龙潭沟交汇口处。左线起止桩号为 ZK65+516~ZK74+209,全长 8693 m,右线起止桩号为 YK65+515~YK74+114,全长 8599 m,属特长隧道,是目前国内施工中的第二长隧。我单位承担的九合同段(出口段),左线长 4349 m,右线长 4254 m,在距洞口约 3000 m 处,左、右线分别设直径 7 m 和 5.3 m、深 332 m 和 355 m 通风竖井各一座。出口均位于曲线上,纵向坡度为 -1.50% 的单向坡。

该隧道岩性以页岩、灰岩为主,Ⅳ、Ⅴ围岩居多,有少部分Ⅱ、Ⅲ围岩。在 ZK71+570(YK71+643)附近发育 F1 断层,在 ZK72+750(YK721+800)附近发育 F2 断层。F1 断层对洞身影响范围较小,F2 断层对洞身影响范围较大。洞口段基岩裂隙水较丰富,隧道在 K70~K72 段穿越岩溶区,岩溶水较发育。

隧道设计净宽 9.75 m,净高 5.0 m。开挖最大断面面积 98.45 m<sup>2</sup>,衬砌后最大断面面积 83.6 m<sup>2</sup>。

本隧道采用无轨运输出渣方式施工,独头掘进长度 4300 m,独头通风 3000 m。该隧道工期 33 个月,较为紧张,月进尺达 260 m 左右。

## 2 通风方案选择

在无轨运输作业条件下,内燃机设备废气排放量大,污染源分散在隧道沿程,稀释比较困难,其施

工通风技术难度远大于有轨运输作业。目前国内有轨运输钻爆法施工时独头通风最长达 7500 m,TBM 施工最长超过 10 km。但在无轨运输钻爆法施工条件下,国内独头通风最长为 3600 m(朔黄铁路寺铺尖隧道,赣龙铁路金华山隧道),目前公路隧道独头通风超过 3000 m 的还没有。

在国外,采用压入式通风独头通风最长的为 3400 m(法国铁路新干线隧道)。采用巷道式通风时,通风长度将可大为延长。如日本关越公路隧道,长 11 km,正洞和辅助坑道均采用全断面开挖锚杆支护无轨运输施工。正洞开挖断面积 85.3 m<sup>2</sup>,辅助坑道开挖断面积 21.3 m<sup>2</sup>,采用移动风机压入式巷道通风机,总通风量 6200 m<sup>3</sup>/min,工作面离洞口最长距离为 4700 m。青函隧道和惠那山隧道也采用巷道式通风,通风量分别达到 5000 m<sup>3</sup>/min 和 2700 m<sup>3</sup>/min。

国内采用巷道式通风的工程实例很多,如大瑶山隧道(14.295 km)、南岭隧道、大秦线军都山隧道(8.46 km)、花果山隧道(3.74 km)、沙木拉达隧道(6.37 km)等。

以上工程实例中,施工条件和掘进长度与金龙隧道工程实例相似。根据本隧道的特点及实际情况,初步进行巷道式通风和压入式通风的方案的首选,以便最终确定该隧道的通风方式。

### 2.1 巷道通风方案

#### 2.1.1 系统布置

如图 1 所示,采用单级双速轴流式隧道通风机与射流风机相结合,新鲜风流从 B 线隧洞进入,经风机 F<sub>1</sub> 及其管道压往 B 线工作面。B 线工作面的乏风流经安装在横通道内的射流风机 F<sub>0</sub> 引导进入

收稿日期:2007-03-22

作者简介:王朝晖(1968-),男(汉族),山东菏泽人,中铁十四局集团有限公司工程管理部部长、高级工程师,铁道工程专业,硕士,从事大跨度桥梁、地下工程施工技术研究工作,山东省济南市和平路 1 号,13606405626,ylhy7501@sina.com。

A线隧洞;新风流往安装在横通道内的风机 $F_2$ 及其管道压往A线工作面。两个工作的炮烟及乏风流在射流风机的引导下经右线隧道流出洞外。除风机 $F_2$ 和射流风机 $F_0$ 。安装的横通道外,所有后方横通道及风门都应封闭。

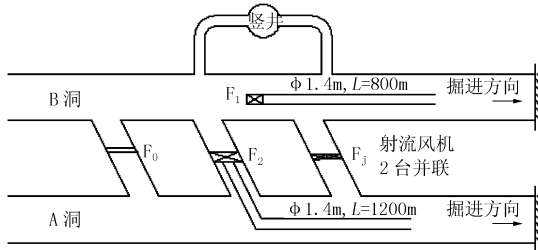


图1 巷道式联合通风方案系统布置图

注: $F_1$ 、 $F_2$ —SDA-125AD-FS90型单级双轴流风机,设计风量 $1800\text{ m}^3/\text{min}$ ,全压 $2200\text{ Pa}$ ,电动机功率 $95\text{ kW}$ 双级调速; $F_j$ —射流风机NSL-125型,风量 $31\text{ m}^3/\text{s}$ ,电动机功率 $30\text{ kW}$ ,出口风速 $34\text{ m/s}$

## 2.1.2 巷道通风方案的优缺点

### 2.1.2.1 优点

(1)不设控制风门,省略通风支洞工程和控制风门设施。

(2)利于车辆通行,简化施工管理,减少施工干扰。

(3)风机、通风管以及其它通风设备少。

(4)通过增减射流风机台数可以调节总风量的大小。

(5)横通道的射流风机 $F_0$ 安装在顶部,下部允许人员及车辆通过。

### 2.1.2.2 缺点

被污染的风流会进入工作面,但当风量足够大时,可将污染物含量控制在合理范围内,也就不会影响工作面的空气质量。

### 2.1.3 总风量计算

在无轨运输的条件下,总风量需求主要由稀释内燃设备废气所需要的风量控制。

金龙隧道共有A线(左线)、B线(右线)2个工作面同时施工,在计算总风量时,应满足2个工作面的施工要求,但不必考虑2个工作面有同时爆破和装渣的情况,因为这种考虑必然导致计算的总风量成倍增加,况且这种情况发生较少,在施工组织上可以避免。

从无轨运输长度分别达到 $4300\text{ m}$ 的目标看,一个工作面同时使用的内燃设备总量一般有:装渣设备2台,功率 $161\text{ kW}$ ,如CAT公司966F、ZL50等型号;自卸汽车7辆,功率为 $200\text{ kW/辆}$ ,载重量 $10\sim$

$15\text{ t/辆}$ ,如红岩CQ3260TF18、铁马XC3320A6 $\times$ 6等车型;其它内燃设备共 $200\text{ kW}$ 。

### 2.1.3.1 用单位功率风量指标法计算总风量

$$Q = K \sum_{i=1}^n N$$

式中: $K$ ——功率通风系数,取 $3.0\text{ m}^3/\text{min}$ ;  $\sum N$ ——洞内同时作业的柴油机功率总和, $\text{kW}$ 。

所谓同时工作的柴油机功率,就是应考虑设备的利用率和负载率,才是实际使用的功率。

总的额定功率为: $200 \times 7 + 161 \times 2 + 200 = 1920\text{ kW}$ 。

取负荷率 $0.9$ ,利用率 $0.9$ ,使用最大功率总和为 $1920 \times 0.9 \times 0.9 = 1556\text{ kW}$ 。

所需总风量为: $Q = 1556 \times 3 = 4668\text{ m}^3/\text{min}$ 。

### 2.1.3.2 按设备类别计算总风量

日本把隧道内燃机设备需风量按设备类别分开计算,即:

$$Q = Q_P + Q_{\max}$$

$$Q_{\max} = H_m q_m \alpha_m + H_D q_D \alpha_D + H_E q_E \alpha_E$$

式中: $Q_P$ ——作业人员所需风量, $3.0\text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{人})$ ;  $Q_{\max}$ ——内燃机所需风量; $H_m$ 、 $H_D$ 、 $H_E$ ——分别为装渣机、汽车和其它各类机械的总额定功率, $\text{kW}$ ;  $q_m$ 、 $q_D$ 、 $q_E$ ——分别为装渣机、汽车和其它各类机械的通风指标,一般取 $q_m = 3.0\text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{kW})$ ,  $q_D = 1.1\text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{kW})$ ,  $q_E = 1.1\text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{kW})$ ;  $\alpha_m$ 、 $\alpha_D$ 、 $\alpha_E$ ——分别为装渣机、汽车和其它各类机械的工作率(包括利用率和负荷率),一般取 $\alpha_m = 0.2 \sim 0.3$ ,  $\alpha_D = 0.4 \sim 0.5$ ,  $\alpha_E = 0.15 \sim 0.2$ 。

由此可得:

$$Q_{\max} = (161 \times 3.0 \times 0.3) + (200 \times 8 \times 1.1 \times 0.5) + (200 \times 1.1 \times 0.2) = 1069\text{ m}^3/\text{min}$$

取最多作业人员为 $100$ 人,则2个工作面人员受需风量为: $Q_P = 100 \times 3.0 = 300\text{ m}^3/\text{min}$ 。

总风量: $Q = Q_P + Q_{\max} = 300 + 1069 = 1369\text{ m}^3/\text{min}$ 。

### 2.1.3.3 洞内平均风速的确定

两种计算方法的所得结果相差很大,我们认为日本所推荐的方法计算风量偏小,总风量的实际取值还应结合施工经验确定。本设计取总风量 $4800\text{ m}^3/\text{min}$ ,则A、B线洞内平均风速为:

$$\bar{V} = Q/(tA)$$

式中: $\bar{V}$ ——洞内平均风速; $Q$ ——所需总风量; $t$ ——时间; $A$ ——隧道断面面积。

经计算得: $\bar{V} = 4800/(60 \times 83.6) = 0.96\text{ m/s}$ 。

### 2.1.4 工作面所需风量计算

工作面所需风量主要以排除爆破烟尘来计算。计算方法很多,差异也很大。

#### 2.1.4.1 按洞内作业人数计算

取最多工作人数 100 人。

$$Q = 100 \times 4 = 400 \text{ m}^3/\text{min}$$

#### 2.1.4.2 按排除炮烟计算

$$Q = 2.25 \times \sqrt[3]{G(Al)^2 b \psi / p^2} / t$$

式中:  $Q$ ——工作面所需风量,  $\text{m}^3/\text{min}$ ;  $t$ ——爆破后通风时间,  $\text{min}$ ;  $G$ ——同时爆破的炸药用量, 取 370  $\text{kg}$ ;  $b$ ——每千克炸药有害气体生成量, 取 40  $\text{L/kg}$ ;  $A$ ——开挖面断面积, 取 98.5  $\text{m}^2$ ;  $\psi$ ——淋水系数, 取 0.6;  $p$ ——风管漏风吸收系数, 取平均百米漏风率 1.2% 时, 则 3000  $\text{m}$  风管的漏风系数  $p = 1.56$ ;  $L$ ——隧道独头掘进长度, 当通风段长度  $L$  大于临界长度时, 式中  $L$  用  $L_{\text{临界}}$  代替, 长度  $L_{\text{临界}} = 12.5Gbk / (Ap^2)$  (其中  $k$ ——紊流扩散系数, 取 0.6), 按以上参数计算, 求得临界长度  $L_{\text{临界}} = 462 \text{ m}$ 。

当通风时间  $t = 30 \text{ min}$  时,  $Q = 1470 \text{ m}^3/\text{min}$ ; 当通风时间  $t = 35 \text{ min}$  时,  $Q = 1260 \text{ m}^3/\text{min}$ 。

#### 2.1.4.3 按允许最小平均风速计算

《公路隧道施工规范》(JTJ 042-94) 规定, 施工中隧道内平均风速  $\leq 0.15 \text{ m/s}$ 。

$$Q = AV$$

式中:  $A$ ——隧道平均断面积, 取 98.5  $\text{m}^2$ ;  $\bar{V}$ ——洞内平均风速, 取 0.15  $\text{m/s}$ 。

则:  $Q = 98.5 \times 0.15 = 887 \text{ m}^3/\text{min}$ 。

#### 2.1.4.4 按稀释内燃设备废气计算

假设每台装载机间隔 5  $\text{min}$  (包括调车时间) 装一车, 自卸车在隧道内的平均车速为 15  $\text{km/h}$ , 则 2 台装载机同时工作时, 出渣过程中运渣最大车距为 625  $\text{m}$ , 在 4300  $\text{m}$  的长度内, 有 7 辆车同时运输。所以, 无论配备多少车辆, 一个工作面出渣车最多为 7 辆。

自卸车的内燃机功率 200  $\text{kW}/\text{台}$ , 装载机功率 160  $\text{kW}/\text{台}$ , 其他内燃设备的功率 200  $\text{kW}$ , 则内燃设备同时工作总装机功率为:  $7 \times 200 + 2 \times 160 + 200 = 1920 \text{ kW}$

取机械平均荷载系数 0.9, 平均利用率 0.9, 则实际工作总功率:  $1920 \times 0.9 \times 0.9 = 1556 \text{ kW}$ 。

取需风量系数为 3.0  $\text{m}^3 / (\text{min} \cdot \text{kW})$ , 则总供风量为:  $1556 \times 3.0 = 4668 \text{ m}^3/\text{min}$ 。

#### 2.1.4.5 通风总量

工作面风量可按 1470  $\text{m}^3/\text{min}$  计算, 总供风量可按 4800  $\text{m}^3/\text{min}$  计算。

### 2.1.5 压入式风机的选择

压入式风机  $F_1$  和  $F_2$  可选用天津市通创风机有限公司生产的 SDA-125AD-FS90 型单级双速隧道轴流通风机, 设计风量为 1800  $\text{m}^3/\text{min}$ , 全压 2200  $\text{Pa}$ , 功率 95  $\text{kW}$ , 双级调速型, 配用  $\phi 1.4 \text{ m}$  优质软管, 通风距离可达 1500  $\text{m}$ 。

### 2.1.6 隧道通风阻力

取隧道壁面摩擦系数  $\lambda = 0.048$ , 局部阻力系数 0.5, 当风速 = 0.61  $\text{m/s}$  时, 通风阻力损失为:

$$p_B = (\lambda L / d_B + \xi + 1) \rho \bar{V}_B^2 / 2$$

式中:  $d_B$ ——B 线水力直径, 取 11.2  $\text{m}$ ;  $\lambda$ ——隧道壁面摩擦系数, 取 0.048;  $\xi$ ——局部阻力系数, 取 0.5;  $L$ ——隧道独头掘进长度, 当通风段长度  $L$  大于临界长度时, 式中  $L$  用  $L_{\text{临界}}$  代替,  $L_{\text{临界}} = 12.5Gbk / (Ap^2)$  ( $k$ ——紊流扩散系数, 取 0.6), 按以上参数计算, 求得临界长度 462  $\text{m}$ ;  $\bar{V}_B$ ——洞内平均速度, 取 0.61  $\text{m/s}$ 。

计算得:  $p_B = 18.8 \text{ Pa}$ 。

### 2.1.7 射流风机选择

选择各台射流风机  $F_0$  的型号相同, 均为 NSL-125 型, 流量 31  $\text{m}^3/\text{s}$ , 出口速度 34  $\text{m/s}$ , 电动机功率 30  $\text{kW}/\text{台}$ 。

#### 2.1.7.1 每台射流风机产生的推力

$$P_j = 2\theta(1 - \varphi)i(\rho/2)V_j^2$$

式中:  $\theta$ ——断面积比,  $A_j/A_r$ ;  $V$ ——流速比,  $V_r/V_j$ ;  $i$ ——每处并联射流风机台数;  $V_j$ ——射流风机出口流速,  $\text{m/s}$ ;  $\rho$ ——空气密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。

本工程中:

$$A_j = \pi d^2 / 4 = 1.25^2 \pi / 4 = 1.227 \text{ m}^2$$

$$A_r = 83.6 \text{ m}^2$$

$$\varphi = 1.227 / 83.6 = 0.0147$$

$$V_r = 0.96 \text{ m/s}$$

$$V_j = 34 \text{ m/s}$$

$$\psi = V_r / V_j = 0.96 / 34 = 0.028$$

当  $i = 1$  时,  $P_j = [2 \times 0.0147 \times (1 - 0.028) \times 1.2] / 2 \times 34^2 = 9.9 \text{ Pa}$ 。

当  $i = 2$  时,  $P_j = 20 \text{ Pa}$ 。

#### 2.1.7.2 射流风机总台数

$$N_j = P_{\text{总}} / P_j = 18.8 / 9.9 = 2 \text{ 台}$$

共安装 2 台射流风机可满足要求。

#### 2.1.7.3 设备总数及总风量调节方法

该方法需要单级双速隧道轴流通风机 2 台、

射流风机2台。通过增加或减少射流风机的总台数,可调节总风量,但工作面的风速不改变。

### 2.1.8 射流风机的布置

射流风机可分散布置,也可集中布置,但从施工及管理方便计,最好的布置方式是靠近工作面的横通道内布置2台并联,也可以在距隧道洞口500 m处布置2台,相距150 m。

## 2.2 压入式独立通风方案(见图2)

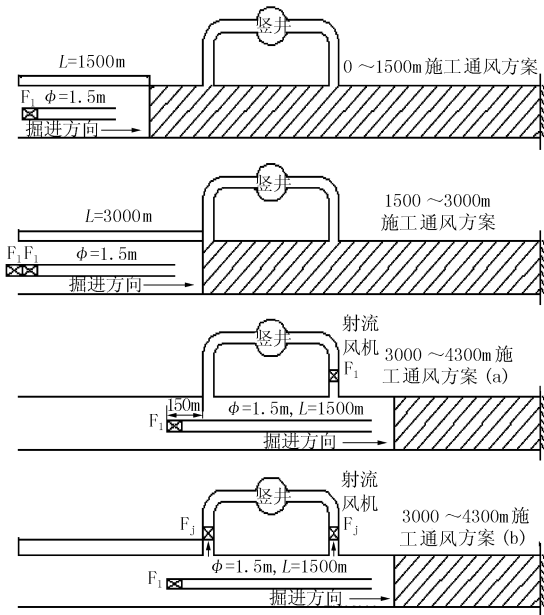


图2 压入式独立通风方案示意图

注:  $F_1$ —SDA-140AD-FS115型单级双速轴流风机,设计风量  $2300 \text{ m}^3/\text{min}$ ,全压  $2250 \text{ Pa}$ ,电动机功率  $15 \text{ kW}$ ,双级调速

本方案按左、右线施工互不干扰的原则,制定独立通风方案,以压入式通风模式为主,后期利用左、右线已贯通的通风竖井,形成混合式通风系统。

该方案按三期考虑:

(1) 0~1500 m 施工期:由一台单级轴流风机配用软管作为压入式通风,送风最长1500 m;

(2) 1500~3000 m 施工期:由二台单级轴流风机集中串联,配用软管作为压入式通风,送风最长3000 m;

(3) 3000~4300 m 施工期:由一台单级轴流风机配用软管作为压入式通风,送风最长1500 m;同时在竖井设抽出式风机,使乏风从通风竖井排出地面,这是以压入式为主的混合通风方式。

### 2.2.1 通风机设计风量

按照风量计算结果,工作面需要风量  $1470 \text{ m}^3/\text{min}$ ,按照最长送风距离3000 m计算,取漏风系数  $P_1 = 1.56$ ,则通风机供风量为:

$$Q_F' = PQ_1 = 1.56 \times 1470 = 2293 \text{ m}^3/\text{min}$$

取通风机设计风量  $Q_F = 2300 \text{ m}^3/\text{min}$ 。

### 2.2.2 风阻系数

取管道达西系数  $\lambda = 0.011$ ,空气密度  $\rho = 1.2 \text{ kg}/\text{m}^3$ ,摩阻系数  $\alpha = \lambda\rho/8 = 0.011 \times 1.2/8 = 0.0017 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。

按配用软管直径  $d = 1.5 \text{ m}$ ,总长  $L = 3000 \text{ m}$ 计算,风阻系数  $R_f = 6.5AL/d^5 = (6.5 \times 0.0017 \times 3000)/1.5^5 = 4.42 \text{ N} \cdot \text{s}^2/\text{m}^8$ 。

### 2.2.3 管道压力损失及风机设计全压

$$H_f = R_f Q_F Q_1 = 4.42 \times 38 \times 25 = 4235 \text{ Pa}$$

每台风机设计全压  $2200 \text{ Pa}$ ,2台串联工作。

### 2.2.4 风机配用电动机功率

$$\begin{aligned} N &= 1.05 Q_F H_f / \eta \\ &= 1.05 \times 38 \times 2200 / 0.8 \\ &= 110 \text{ kW} \end{aligned}$$

选用电机功率  $115 \text{ kW}$ 。

### 2.2.5 竖井风机

竖井风机为抽出方式工作,可安装在竖井底部通风道内,该风机可采用前述压入式轴流风机,技术参数为:设计风量  $2300 \text{ m}^3/\text{min}$ ,全压  $2200 \text{ Pa}$ ,功率  $115 \text{ kW}$ ,双级调速型。

### 2.2.6 设备总数

采用压入式通风需配置4台单级轴流风机。

## 2.3 两种方案对比

巷道式通风经济上也比较合理,两洞分别掘进4.3 km,通风系统总功率  $250 \text{ kW}$ ,该通风方式适合一个是主洞另一个是平导的隧道,平导内后续工序不多,衬砌、路面、照明、通风设施工作面较少,一般以平导作为排烟通道,不影响后续工程施工,由于金龙隧道两个均是主洞,工期非常紧张,后续工作相继展开,巷道式通风要牺牲一个洞子,该隧道的后续工序将无法施工,进而影响总工期;压入式通风2个隧道投入风机4台,总功率  $460 \text{ kW}$ ,通风效果较好,不影响后续工序的施工,可以保证总工期的实现,综合比较选择了压入式通风。

## 3 结语

目前隧道已经开挖到竖井,在这个过程中,洞内空气良好,可视距离长,环境舒适,通风效果较好。

射流风机在巷道式通风中应用先例很少,具有一定的探索性和创新性。如有可能,可对该系统的实际效果进行实验与测试,根据实际需要对该系统进行调整和改进。