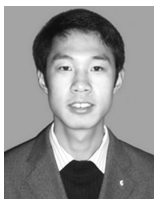


· 施 工 ·



长距离沉管隧道施工通风技术

马宗豪

(中交一航局第二工程有限公司, 山东 青岛 266001)

摘要: 港珠澳大桥沉管隧道全长约6 km, 海底隧道沿纵向呈“W”型布置, 长距离隧道通风存在难点。分别研究了长距离沉管隧道单机压入式通风和串联式通风技术, 通过在工艺设计、风机选型、经济性方面进行对比验证, 阐述了单机压入式通风技术的优点, 对于解决国内外长距离隧道通风有一定的借鉴和参考意义。

关键词: 长距离; 沉管隧道; 单机压入式通风; 港珠澳大桥

中图分类号: U 455

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)05-0148-04

Ventilation technology of immersed tunnel with long distance

MA Zong-hao

(No. 2 Engineering Company Ltd. of CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd., Qingdao 266001, China)

Abstract: The overall length of the Hong Kong-Zhuhai-Macao bridge immersed tunnel is 6 km. The channel tunnel arranges through “W” shape along the longitudinal position. It exists that the ventilation technology of the tunnel with long distance is difficult. The ventilation technology of the immersed tunnel with long distance between the ventilation for alone head and the ventilation in fan series is researched. Based on the technical design of ventilation, fan selection, economic contrast, etc., we expound the advantages of the ventilation for single head, which may serve as reference for the ventilation of tunnel with long distance.

Key words: long distance; immersed tunnel; ventilation for single head; Hong Kong-Zhuhai-Macao bridge

随着隧道掘进技术的发展, 长距离深埋隧道不断涌现, 隧道施工环境成为关键课题。在没有辅助导坑的条件下, 隧道传统的施工通风方式采用多台串联或抽压混合的通风方式^[1], 通过串联或混合来弥补因风机功率不足所引起的缺陷, 但该方式在经济性方面存在较大缺陷, 不利于长期的通风管理。近年来随着风机结构的不断优化, 风管材质的不断更新, 单机压入式通风方式在多个长大隧道中得到应用且效果明显。

1 长距离独头通风技术

单机独头压入式通风是指在单洞隧道通过一台风机压入式通风满足整个隧道施工通风。该项

技术的难点在于随着隧道的加长, 风机的功率和能量损耗成为瓶颈。为此, 大功率风机、大直径风管的研究成为重点。1995年西康线秦岭Ⅱ线6.2 km平导进口端采用独头压入式通风, 选用日产PF-110SW55型对旋轴流风机^[2]; 2007年锦屏水电站建设TBM项目8 km段采用Swedvent单机压入式通风, 风管直径3 m, 风机功率超过150 kW^[3]; 2012年南吕梁山隧道1#斜井5.2 km采用2 × 200 kW的两级轴流变频风机单机压入式通风, 风管直径2.2 m^[4]。港珠澳大桥沉管隧道全长5.99 km, 沿纵向呈“W”型布置, 隧道最低点底高程-43.947 m, 隧道结构为Y型中隔墙两孔一管廊形式, 中隔墙预留安全门与排烟道, 保证两行车

收稿日期: 2013-08-26

作者简介: 马宗豪(1983—), 男, 硕士, 工程师, 从事港口与航道工程。

孔相通。长距离较大高差的海底隧道通风采用单机压入式是本文研究的重点。

2 通风方案

港珠澳大桥沉管隧道建设分为两个阶段：E1-E29管节，全长约5.3 km，隧道纵断面呈下降后上升状态，最大落差约32 m；E33-E30管节，全长约750 m，隧道呈下降状态，最大落差约15 m。本文重点分析5.3 km段的施工通风，采用压入式送风，保证作业端的新鲜气流大，空气流通顺畅。压入式通风分为单机压入式、串联压入式，针对两种通风方式分别在设备选型和经济成本两方面进行比较。

2.1 单机压入式通风

采用两个行车道单机压入式送风，最长送风距离约5.3 km；每个行车道设一台大功率轴流风机，采用变频控制，可根据距离调节风量需求，节约用电成本，见图1。

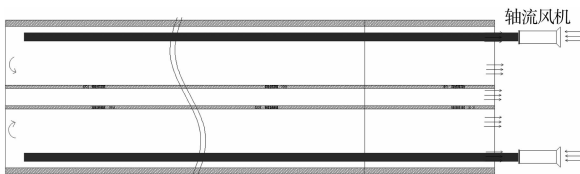


图1 单机压入式通风

2.1.1 通风设计标准

在整个施工过程中，隧道作业环境应符合下列职业健康及安全标准：1) 空气中氧气含量，按体积计不得小于20%；2) 粉尘容许浓度，空气中含有10%以上的游离二氧化硅的粉尘不得大于 2 mg/m^3 ，10%以下的游离二氧化硅的矿物性粉尘不得大于 4 mg/m^3 ；3) 有害气体最高容许浓度：一氧化碳最高容许浓度为 30 mg/m^3 ，二氧化碳按体积计不得大于0.5%，氮氧化物（换算成 NO_2 ）为 5 mg/m^3 以下；4) 隧道内气温不得高于 $28 \text{ }^\circ\text{C}$ ；5) 隧道内噪声不得大于90 dB；6) 隧道施工通风应提供管内作业所需的最小风量，每人应供应新鲜空气 $3 \text{ m}^3/\text{min}$ 。

2.1.2 计算条件

1) 单管廊最大作业人数按200人考虑；2) 隧

道施工内燃机设备及废气量为 1496 kW ；3) 沉管隧道最大高差 14.6 m ；4) 采用内燃机械作业时 1 kW 功率的机械设备供风量不宜小于 $4.5 \text{ m}^3/\text{min}$ ，内燃机设备利用系数取0.65，同时利用系数取0.85；5) 按允许最低风速计算时，要求隧道内平均风速不低于 0.2 m/s ；6) 管路阻力计算时，需要考虑隧道的坡度变化；7) 通风管直径 $\phi 1.5 \sim 3.0 \text{ m}$ ，根据试算确定，管节不短于 20 m ；8) 风管百米漏风率 $\beta = 1.0\%$ （根据有关调研，目前最好的 10 m 节长拉链软管管的百米漏风率通常在1%以下）；9) 风管内摩阻系数 $\lambda = 0.014$ （摩擦系数 λ 主要取决于所用风管内壁的相对光滑度，目前一些国外承包商为我国隧道工程项目提供的技术文件中常用的数值为0.014）；10) 风量备用系数 $k = 1.2$ 。

2.1.3 计算公式

1) 供风量计算。

风量计算按压入式通风考虑，确定工作面需风量，需计算出满足洞内工作人员呼吸所需空气量 Q_1 ，施工内燃机设备所需要的空气量 Q_2 ，满足洞内最小风速（ $v = 0.2 \text{ m/s}$ ）所需空气量 Q_3 ，取3种计算中的最大值作为通风系统出风口的所需风量。

①按作业人员数量计算。

$$Q_1 = qnk \quad (1)$$

式中： q 为每人每分钟呼吸所需新鲜空气量，取 $3.0 \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{人})$ ； n 为隧道内同时工作的最多人数，按照隧道作业最多人数计算，考虑后续内装施工较多，初步估计 5300 m 段单管廊最大作业人数约200人； k 为风量备用系数。

②按稀释和排除内燃机废气计算风量。

沉管隧道管内作业主要涉及水电管路、拆除钢封门、压载混凝土现浇等。单管廊需要的机械设备有运输车、高空作业车、叉车、混凝土罐车等。

$$Q_2 = K \sum_{i=1}^N N_i T_i \quad (2)$$

式中： K 为功率通风计算系数，我国暂规定为 $4.5 \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{kW})$ ； N_i 为各台柴油机械设备的功率； T_i 为内燃机设备利用系数；一般取0.65（考

考虑到隧道内内燃机设备同时公用的原则，可以乘以同时利用系数0.85)。

③按允许最低平均风速计算。

$$Q_3 = 60Av \tag{3}$$

式中：A为隧道有效断面积；v为隧道内平均风速。

2) 漏风量计算。

通风机的供风量除满足上述计算的需要风量外，还应考虑漏失的风量。

漏风系数的计算公式如下：

$$P_L = \frac{1}{(1-\beta)^{\frac{L}{100}}} \tag{4}$$

式中：β为风管百米漏风率，取1.0%；L为风管计算长度。

3) 风机送风量计算。

$$Q_j = P_L Q \tag{5}$$

式中：Q_j为通风机风量 (m³/s)；Q为风管出口风量 (m³/s)。

4) 风管直径选择见表1。

表1 风管直径对照

风管直径 D/m	管内风速 v/(m·s ⁻¹)	风管沿程损失/Pa
2.0	33.6	15 472.4
2.1	30.5	12 123.0
2.2	27.8	9 607.1
2.3	25.4	7 692.5
2.4	23.3	6 218.0
2.5	21.5	5 070.0
2.6	19.9	4 167.2
2.7	18.4	3 450.5
2.8	17.1	2 876.8
2.9	16.0	2 413.9
3.0	14.9	2 037.5

从表1风管与风速、沿程损失的关系看出，风管越大，沿程损失越小，风速也越小。沿程损失减小的梯度大于管内风速的梯度，风管内风速不宜大于15 m/s，风管直径可根据沉管断面的富裕情况在2.5~3.0 m选择，本计算选3.0 m。

5) 管路通风阻力计算。

通风阻力包括风管内的摩擦阻力、局部阻力，以及隧道内沿程摩擦损失、车辆设备通风阻力；

风管及隧道的摩擦阻力在风流的全部流程内存在，如拐弯、分支及风流受到其他阻碍的地方。为保证将所需风量送到工作面，并达到规定的风速，通风机应有足够的风压以克服管道系统阻力，即H>H_阻。其中，总通风阻力为摩擦阻力与局部阻力之和，即有：

$$H_{阻} = \sum h_{摩} + \sum h_{局} + \Delta P_r + \Delta P_t \tag{6}$$

①风管局部阻力损失。

在本隧道通风方案中，主要有转弯引起的局部压力损失，按下列公式计算：

$$h_{局} = \xi \frac{\rho}{2} v^2 \tag{7}$$

式中：ξ为局部阻力系数；ρ为空气密度；v为转弯管道风速。

拐弯局部阻力系数ξ计算公式^[5]如下：

$$\xi = \left[0.131 + 0.1632 \cdot \left(\frac{D}{r} \right)^{\frac{7}{2}} \right] \cdot \left(\frac{\theta}{90} \right)^{\frac{1}{2}} \tag{8}$$

式中：D为风管直径 (m)；r为弯曲管段内壁半径 (m)。

②风管沿程阻力损失。

考虑漏风影响，在洞口轴流风机出口处的风量最大，等于风机设计风量；在风管末端出风口风量最小，等于实际所需的风量，按下列公式计算：

$$h_{摩} = \lambda \frac{\rho}{2} \frac{L}{D} [Q_j(1-\beta)^{\frac{L}{100}}]^2 \tag{9}$$

式中：λ为摩擦系数；ρ为空气密度；D为过风断面当量直径；L为风管长度；β为风管百米漏风率平均值；Q_j为风机工作点风量。

③隧道内沿程阻力损失。

$$\Delta P_r = \left(1 + \lambda \frac{L}{D_r} \right) \frac{\rho}{2} v_r^2 \tag{10}$$

式中：λ为行车道内摩擦系数；L为行车道长度 (m)；D_r为行车道当量直径 (m)，考虑路面铺设后的断面净空，计算公式如下：

$$D = \frac{4A_r}{C_{隧}} \tag{11}$$

式中：ρ为空气密度 (kg/m³)；v_r为行车道内风速 (m/s)。

④隧道内车辆设备通风阻力。

$$\Delta P_i = \frac{A_m \rho}{A_r} \frac{nv_r^2}{2} \quad (12)$$

式中： ΔP_i 为车辆、机械设备造成的通风阻力； n 为隧道内的车辆数（辆）； v_r 为隧道设计风速（m/s）； A_m 为汽车等效阻抗面积（ m^2 ）。

2.1.4 计算结果

单机压入式通风计算结果：风管出风量为 3 719.4 m^3/min ，漏风系数为 1.7，风机送风量为 6 323 m^3/min ，风机风压为 2 077 Pa。

2.2 串联压入式通风

采用两个行车道串联压入式送风，最长送风距离约 5.3 km，每个行车道设 2 台大功率轴流风机，洞口 1 台，中间接力 1 台风机，采用变频控制，可根据距离调节风量需求，节约用电成本（图 2）。

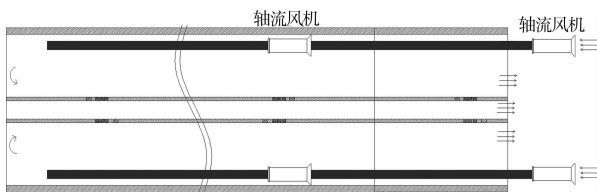


图 2 串联压入式通风

风量计算过程与单机压入式完全相同，但沿程阻力计算存在差异。

2.2.1 风管沿程阻力损失

按照考虑漏风率的沿程损失计算公式，前半段的沿程损失值为：

$$h_{\text{摩}} = \lambda \frac{\rho}{2} \frac{L}{D} [Q_j(1-\beta)^{\frac{L}{100}}]^2 \quad (13)$$

式中： λ 为摩擦系数； ρ 为空气密度； D 为过风断面当量直径； L 为前半段的风管长度； β 为风管百米漏风率平均值； Q_j 为风机工作点风量。

后半段的风机风量为：

$$Q'_j = Q_j(1-\beta)^{\frac{L}{100}} \quad (14)$$

后半段的沿程损失值为：

$$h_{\text{摩}} = \lambda \frac{\rho}{2} \frac{L}{D} [Q'_j(1-\beta)^{\frac{L}{100}}]^2 \quad (15)$$

2.2.2 计算结果

串联式通风计算结果见表 2。

表 2 风机出风量

风机	风管出风量/ ($m^3 \cdot \text{min}^{-1}$)	漏风系数	风机送风量/ ($m^3 \cdot \text{min}^{-1}$)	风机风压/Pa
第 1 台	3 719.4	1.31	4 872	1 293.4
第 2 台	4 872.0	1.31	6 382	744.2

3 设备选型及经济性对比

通过以上计算结果，对通风设备进行选型，进而比较经济性。方案以浙江上风实业股份有限公司 DTF 系列风机为样本进行分析（表 3）。

表 3 经济性对比

方案	风管直径/ m	风机型号	风机数量/ 台	单台风机电机功率/ kW	每个回路电机功率/ kW	风机购置成本/ 万元	电费/ 万元	维护成本/ 万元	长距离通风稳定性及可靠性	噪音污染	综合成本/ 万元
方案 1: 单机压入	3.0	DTF-2400-1250-6P	2	420	420	110	2 286	30	较好	良好,仅限于洞口段	2 426
方案 2: 串联接力压入	3.0	洞口:DTF-2200-1120-6P 中继:DTF-2000-1000-8P	4	250/132	382	65/40	2 294	60	较差,存在风险	一般,洞口及洞内中继风机处均有噪音	2 459

注：按 3 a 工期计算。

综合以上分析，可以看出两种方案的总成本相差不大，串联压入式的能耗高一些，如果采用变频技术的情况下，总成本会有所降低；单机压入式具有安装方便、维护简单、操作灵活的特点，且在管内没有太大的噪音污染。通过以上对比分析，建议选用单机压入式通风方案。

4 结语

本文从长距离沉管隧道施工通风着手，分析了国内外长隧道施工通风方案，得出单机压入式通风与串联压入式通风是长隧道通常采用的方案。