

Comparative Study of Ventilation Specifications and Calculation Methods for Long Tunnels in China and Abroad

Ruiping Zhang Yan Li Ximin Zhang

CSCEC International Construction Co., Ltd., Beijing, 100020, China

Abstract

In order to determine the pollutant index control of long tunnels under construction overseas, solve the problems of blasting smoke, dilution of pollutant concentration and dust control, working temperature control in single-head ventilation, combining with the current safety standards of tunnel construction in China and Abroad, based on the concepts of science and rationality, optimal solutions, through the selection of ventilation methods, the comparative calculation of ventilation parameters, to demonstrate the differences and similarities of the calculation methods and explain the limitations and characteristics in China and Abroad. The result is applied to the Saudi Arabia NEOM tunnel project(Mountain section). The final calculation method can basically solve the ventilation problems of the tunnel, and can provide reference for the ventilation calculation of tunnels with complicated working conditions.

Keywords

tunnels; international standards; pollutant limits; ventilation calculations; blasting smoke exhaust

中外长大隧道施工通风规范和计算方法浅析及应用研究

张瑞平 李岩 张喜民

中建国际建设有限公司, 中国 · 北京 100020

摘 要

为确定海外长大隧道施工过程中的污染物指标控制, 解决独头通风中爆破排烟、污染物浓度稀释、粉尘控制、掌子面工作温度控制等问题, 结合国外和国内现行隧道施工控制标准, 基于科学合理、方案最优的理念, 通过对通风方案的比选、通风参数的对比计算, 论证中外计算方法的异同, 阐释目前计算方法的特点及其局限性, 并将计算结果应用于沙特NEOM隧道项目通风方案和计算。通过分析及对比研究, 最终采用的计算方法可基本解决国外标准下长大隧道的通风难题, 可为海外工况复杂的隧道通风方案选择和计算提供参考和借鉴。

关键词

隧道; 国外标准; 污染物限值; 通风计算; 爆破排烟

1 引言

论文结合一个海外经典的钻爆法施工长大隧道通风案例, 通过对英标隧道通风规范和通风计算方法的研究, 对比了国内隧道通风的相关规范和常用计算方法, 探讨两种规范体系下通风方案的特点和局限性。在满足规范要求的情况下, 解决极端工况下长大隧道的通风难题, 为海外长大隧道施工的通风提供参考。

2 工程概况

沙特 NEOM 隧道项目为沙特 NEOM 新城重要配套的双线铁路建设工程。最长独头通风长度为 4142m, 开挖断面面积约为 155m², 无放射性气体暴露。海拔约为 400m, 夏

季干燥高温, 气温约在摄氏 27℃~46℃间。通风标准执行英国隧道施工职业健康安全标准 (BS 6164: 2019)。

3 关键控制指标对比分析

3.1 回风速度

回风速度即全断面风速, 是隧道通风计算最重要指标之一 (见表 1)。

3.2 新鲜空气供应量

洞内作业人员呼吸及内燃机做功均需要消耗洞内氧气, 排放二氧化碳。为保证作业人员的正常供氧及内燃机正常运转需求, 需确保风机输入的新鲜空气量与洞内污染空气混合后的氧气浓度满足规范要求 (见表 2)。

【作者简介】张瑞平 (1976-), 男, 中国北京人, 硕士, 高级工程师, 从事海外工程管理和工程技术研究。

表 1 回风速度对比表

规范名称	洞内任意位置风速
英国隧道健康安全实践规范 BS6164 (2019)	钻爆法施工: $\geq 0.5\text{m/s}$; 瓦斯隧道: $\geq 2\text{m/s}$
瑞士标准协会地下建筑通风规范 (SIA 196) [2]	钻爆法施工: $\geq 0.3\text{m/s}$; 瓦斯隧道: $\geq 0.5\text{m/s}$
中国铁路隧道工程施工安全技术规程 TB 30104 (2020) [3]	全断面施工: $\geq 0.15\text{m/s}$; 台阶法施工: 坑道风速 $\geq 0.25\text{m/s}$; 瓦斯隧道: $\geq 0.5\text{m/s}$
中国公路隧道施工技术规范 JTG/T 3660 (2020) [4]	任何情况: $\leq 6\text{m/s}$; 全断面施工: $\geq 0.15\text{m/s}$; 台阶法施工: 坑道风速 $\geq 0.25\text{m/s}$; 瓦斯隧道: $\geq 0.5\text{m/s}$

表 2 新鲜空气供应量对比表

规范名称	新鲜空气需求量	氧气浓度
英国隧道健康安全实践规范 BS6164 (2019)	人员: $0.3\text{m}^3/\text{min}/\text{p}$; 设备: $3\text{m}^3/\text{kW}/\text{min}$	$\geq 19\%$
中国铁路隧道工程施工安全技术规程 TB 30104 (2020)	人员: $3\text{m}^3/\text{min}/\text{p}$; 设备: $3\text{m}^3/(\text{kW} \cdot \text{min})$	$\geq 20\%$
中国公路隧道施工技术规程 JTG/T 3660 (2020)	人员: $3\text{m}^3/\text{min}/\text{p}$; 设备: $3\text{m}^3/(\text{kW} \cdot \text{min})$	$\geq 19.5\%$

3.3 有害气体排放限值

目前国际通行污染物浓度限值规定,一般采用时间加权平均容许浓度(PC-TWA)、短时间接触容许浓度(PC-STEL)和最高容许浓度(MAC)等指标(见表3)。

表 3 污染物限值对比表 [5]

气体名称	污染限值(单位:PPM*)	国标公路规范	国标铁路规范	英标	瑞标	日标	德标
二氧化碳	PC-TWA (8h)	4644	—	5000	—	4644	4644
	PC-STEL	9288	—	15000	—		
	PC-TWA	—	—	—	—		9288
一氧化碳	PC-TWA (8h)	16.2	24.3	20	30	46.2	26.8
	PC-STEL	24.3	81.1	100	60		
	PC-TWA	12.2/16.2		—	—	69.7	53.5
二氧化氮	PC-TWA (8h)	2.47	2.47	0.5	3		4.4
	PC-STEL	4.94	—	1	6		
	PC-TWA	—	—	—	—	5	8.8
二氧化硫	PC-TWA (8h)	1.77	—	5	2		
	PC-STEL	3.54	—	5	4		
	PC-TWA	—	—	—	—	5	2
硫化氢	PC-TWA (8h)	—	—	10	10		
	PC-STEL	—	—	15	20		
	PC-TWA	6.66	—	—	—	5	10

注: 国标限值单位为 mg/m^3 , 已按照 0°C , 标准大气压换算为 PPM 值。

3.4 通风方式的比选

因本项目不含平导,且英标对全洞要求 0.5m/s 的回风风速,巷道式通风无法满足要求。因导洞需布置 4 条主洞所需风管,且导洞通行要求较高,并用式通风风管无法在导洞内排布。综合设备造价、风管维护、易用性等因素,独头压入式通风为项目首选通风形式。

4 通风计算方法对比

为确保通风计算适用英标 BS6164 标准,计算中所有参数取值均按照英标相关规定取值。

4.1 风量计算

风量的计算主要是计算出各种工况下所需的通风量,如人员呼吸、稀释围岩散发出的有害气体、排出炮烟、稀释柴油机车尾气、排尘等的风量。选择最大风量作为通风需风量。

4.1.1 按洞内允许最低风速计算

洞内允许最低风速计算:

$$Q_1 = 60 \times V \times A = 4650\text{m}^3/\text{min}$$

其中, V 为洞内允许最小风速,取值为 0.5m/s ; A 为开挖断面面积,取值为 155m^2 ; 60 为 min 和 s 换算常数。

4.1.2 按洞内所需的新鲜空气计算

人员新鲜空气需求量计算:

$$Q_2 = q' \times k \times m = 76.94\text{m}^3/\text{min}$$

其中: q' 为每人每分钟需供应新鲜空气标准为 $0.3\text{m}^3/\text{min}$; k 为风量备用系数,一般取 $1.15\sim 1.25$,按 1.15 取值; m 为同一时间洞内工作最多人数,按 223 人计。

4.1.3 按照爆破有害气体浓度稀释计算

作业面爆破产生的炮烟主要包括一氧化碳、二氧化碳和氮氧化物等有毒气体,以及粉尘爆破后排出的炮烟,各国标准需风量的计算均以一氧化碳为基础的。

①国内计算方法。

国内通行计算方法一般为沃洛宁公式或其变形简化公

式,通常规定通风时间,计算通风风量。

同时爆破的炸药消耗量 G 计算:

$$G = A \times l \times q = 1030.75 \text{ kg}$$

其中, A 为开挖断面面积取值为 155 m^2 为最大开挖进尺,取值为 5 m ; q 为炸药单耗,本项目使用铵油炸药,经评估单耗约为 1.33 kg/m^3 。

爆破后炮烟扩散长度计算:

$$L_0 = K_0 \left(15 + \frac{G}{5} \right) = 265.38 \text{ m}$$

其中,电起爆时 $L_0 = K_0 \left(15 + \frac{G}{5} \right)$,非电起爆时 $L_0 = K_0 (15 + G)$; K_0 为安全系数,一般取值为 1.2 。

通风管始末端比值 P_b 计算:

$$P_b = \frac{1}{1 - \frac{L\beta}{100}} = 1.71$$

其中, L 为隧道通风长度,取值为 4142 m ; β 为百米漏风率,取值为 1% 。

爆破有害气体浓度稀释需风量计算:

$$Q_3 = \frac{0.456}{t} \cdot \sqrt[3]{\frac{G \cdot b(A \cdot L_0)^2}{P_b^2 \cdot C_a}} = 3155 \text{ m}^3/\text{min}$$

其中, t 为通风时间,取值为 30 min ; b 为每 kg 炸药折合的废气体积,取值一般为 30 L/kg ; P_b 为风管是始末端比值,计算结果为 1.71 ; C_a 为允许浓度($\%$),按照 PC-TWA 工况一氧化碳取值 20 ppm ,换算为 0.002 。

此公式的局限是通风长度问题。当隧道掘进长度较短,小于排烟安全距离时,隧道长度即为通风长度。当隧道长度较大,大于排烟安全距离时,则取安全距离作为通风长度。排烟安全距离是指炮烟从工作面向外排除过程中浓度不断降低,巷道断面上的炮烟平均浓度已降低到允许浓度时,该断面到掘进工作面的距离,称为排烟安全距离。若通风长度太长,在规定的时间内,将整个通风长度区段内的炮烟有害气体浓度降到规定的浓度以下,则需要较大的风量,会极大增加通风费用。

②欧洲计算方法。

欧洲部分通风设备供应商计算时采用的计算公式来自 AMC 公司出版的 *BASIC MINE VENTILATION* 中的排烟计算理论,此理论在欧美矿山通风工程中一般作为企业标准或计算参照。

抛烟长度 L_0 计算:

$$L_0 = \frac{C_r \times G}{l \times D \times \sqrt{A}} = 133.4 \text{ m}$$

其中, C_r 为岩石发展常数,一般取值为 25 ; G 为同时爆破的炸药消耗量, 1030.75 kg ; l 为最大开挖进尺,取值为 5 m ; D 为岩石密度,取值为 3.1 t/m^3 ; A 为掌子面面积,取值为 155 m^2 。

混合体积计算:

$$V_l = L \times A = 642010 \text{ m}^3$$

烟气混合浓度 C_m :

$$C_m = \frac{b \times G}{V_l} = 48 \text{ ppm}$$

其中, b 为每千克炸药折合的废气体积,取值一般为 30 L/kg 。

烟气在隧道长度范围内混合时间计算:

$$t_m = \frac{(L - L_0) \times A}{Q_0} = 133.62 \text{ min}$$

其中, Q_0 为按洞内允许最低风速计算供风量, $4650 \text{ m}^3/\text{min}$ 。

计算烟气排出时间计算:

$$t_d = \frac{L \times A}{Q_0} \times \ln \left(\frac{C_m}{C_a} \right) = 35738 \text{ s} \approx 120 \text{ min}$$

总排烟时间 T_t 计算:

$$t_t = t_m + t_d = 253 \text{ min}$$

此计算方法局限性同样在于通风长度取值,按照标准及现场监理要求,洞内任何有人工作区域控制质量必须达标。故按照此计算公式,极限工况下,全洞空气达到指标要求时间超过四小时,无法满足正常施工要求。如需缩短通风时间,就必须变更通风长度取值,若需达到 30 min ,反算通风长度取值约为 600 m 。因洞内所有位置的空气一直处于不断变化和稀释过程,实际的通风长度可能有别于计算值。

4.1.4 按稀释内燃机废气计算风量

使用内燃机动力设备时,隧道的通风量应足够将设备所排出的废气全部稀释和排出,使隧道内各主要作业点空气中有毒、有害气体的浓度降至允许浓度以下。目前选用较多的两种计算方法为经验法和允许浓度法计算法。

①经验法。

考虑在洞内设备有:挖掘机 1 台、装载机 2 台、自卸车 4 台,同时作业。

设备最大运行功率 P_{MAX} 计算:

$$P_{MAX} = 194 \times 1 + 180 \times 2 + 213 \times 4 = 1406 \text{ (kW)}$$

式中机械功率按照项目策划中选型设备额定功率取值。

稀释内燃机废气需风量 Q_4 计算:

$$Q_4 = P_{MAX} \times \alpha \times q_1 = 3936.8 \text{ m}^3/\text{min}$$

其中, α 为设备平均利用率,取值为 0.7 ; 为设备每千瓦需风量,取值为 $4 \text{ m}^3/\text{min}$ 。

②允许浓度法。

能量消耗 E_u 计算:

$$E_u = P_{MAX} \times H_w = 11248 \text{ kWh}$$

其中, H_w 为工作时长,按 8 h 计算。

稀释内燃机废气需风量计算:

$$Q_4 = \frac{E_u \times C_E}{t_e \times 60 \times C_a} = 3497 \text{ m}^3/\text{min}$$

其中, t_e 为 PC-TWA 工况下工作时长,取值为 8 h ; C_E 为设备氮氧化物排放值,按照 $400 \text{ mg/kW} \cdot \text{h}$ 取值(欧洲非道路移动设备 V 阶段排放标准); C_a 为氮氧化物允许浓度,取值为 2.68 mg/m^3 ,即 2 ppm 。

4.1.5 最大需风量

按照国标计算方法:

$$Q_{max} = \max\{Q_1, Q_2, Q_3, Q_4\} = 4650 \text{ m}^3/\text{min}$$

按照英标计算方法:

$$Q_{max} = \max\{Q_1, Q_3, Q_2+Q_4\} = 4650 \text{ m}^3/\text{min}$$

4.1.6 沿程管道漏风耗损量计算

①按照百米漏风率计算。

对于长大隧道,管道的漏风现象造成入口处与出口处的风量差别很大,计算一般取值为1%~2%,数值越大漏风量越大。

沿程管道漏风耗损计算:

$$Q_l = \frac{Q_{max}}{(1-\beta)^{\frac{L}{100}}} - Q_{max} = 2399.4 \text{ m}^3/\text{min}$$

其中, L 为隧道通风长度 4142m; β 为管道百米平均漏风率,取1%; Q_{MAX} 为设备掌子面需风量最大值,取 4650m³/min。

②按照泄漏面积计算。

针对不同材料,维护水平不同的管道,摩擦系数和漏风率的取值不同。中国一般采用经验取值,欧标则对不同管道进行了分级,例如 SIA196 规范对通风管路进行了如下分级,见表 4。

表 4 风管分级

管道等级	管道达西系数 λ	泄漏面积比	状态描述
S 级	0.015	5	新风管,安装良好,定期维护,标准段 ≥ 100 米,接头少
A 级	0.018	10	新风管,维护良好,损坏风险小
B 级	0.024	20	已运行一段时间或多次使用,定期维护

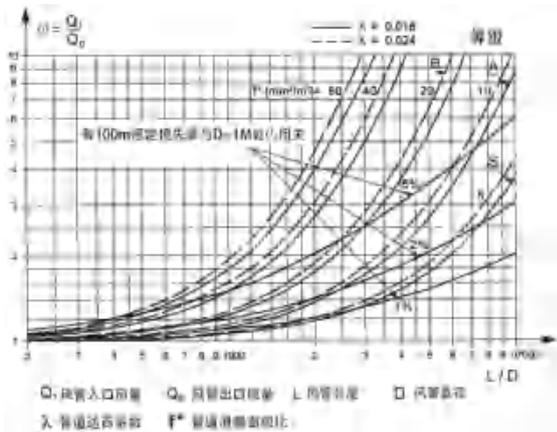


图 1 风机出风量与风管出风量关系

沿程管道漏风耗损:

由图 1 查询在 $L/D=4142/2.8=1479$, 对应 A 级风管

$\omega=1.25$,

$$Q_l = Q_{max} \times \omega - Q_{max} = 1162 \text{ m}^3/\text{min}$$

4.1.7 海拔校正计算

海拔压力损失 Q_f :

$$Q_f = \left(\frac{100}{P_f} - 1 \right) \times (Q_{max} + Q_l) = 248.12 \text{ m}^3/\text{min}$$

其中,本工程海拔 400m,根据换算地区大气压 96.6kPa;按照不利情况百米漏风率法计算取值。

4.1.8 风机供风量计算

风机供风量 Q_j 计算:

$$Q_j = Q_{max} + Q_l + Q_f$$

在出口风量取值为 4650 情况下,按照国标计算为 7292.52,欧标计算为 6016。

4.1.9 风机供风量计算结果对比

由上述计算可知,在一般隧道施工中,回风速度为通风计算最不利工况,但在长大隧道极端工况下,在通风时间短、断面面积大、通风长度大情况下,爆破排烟计算风量为最不利工况。同时,在同等出风量情况下,采用欧标泄漏面积计算指标计算的风机出口风量较小。另外,影响风机出风量计算最重要的指标为风管维护水平,即漏风率控制及管道质量控制。

4.2 风压计算

4.2.1 国内通用算法

管道摩擦系数计算:

$$a = \frac{\lambda \times \rho}{8} = 0.002565$$

其中, λ 为管道达西系数,取 0.018; ρ 为空气密度,取 1.14kg/m³。

管道风阻系数计算:

$$R_f = \frac{6.5 \times a \times L}{D^5} = 0.40$$

其中, L 为管道长度,取 4142m; D 为风管直径,取 2.8m。

沿程阻力损失计算:

$$P_j = R_f \times \sqrt{Q_j \times Q_h^2} = 3779.81 \text{ (pa)}$$

其中, Q_h 为设备掌子面需风量最大值; Q_j 为风机供风量。

局部阻力损失 P_x 计算:

$$P_x = P_j \times \varepsilon = 755.96 \text{ (pa)}$$

其中, P_j 为简化计算,局部阻力采用局部阻力系数 ε ,取值为 0.2。

隧道风机全压 P_d 计算:

$$P_d = P_j + P_x = 4535.77 \text{ (pa)}$$

4.2.2 欧洲常用计算方法

通风管道的通风阻力损失包括沿程阻力损失和局部阻力损失两部分,通风机应有足够的风压以克服管道系统阻力。

出口风压 P_d 计算:

$$P_d = \frac{1}{2} \times \rho \times V^2 = 90.5 Pa$$

其中, ρ 为空气密度, 取 1.14 kg/m^3 ; V 为风管出口风速 12.6 m/s 。

沿程阻力损失 ΔP 计算:

$$\Delta P = P_d \times \lambda \times \frac{L}{D} = 2410 Pa$$

其中, 各参数与前文取值相同。

消音器损失 ΔP_1 计算:

$$\Delta P_1 = \Delta P \times 0.22 = 530 Pa$$

风机格栅损失 ΔP_2 计算:

$$\Delta P_2 = \left(1 - \frac{S_0}{S_1}\right)^2 \times \Delta P = 828 Pa$$

其中, S_0 为风机出口面积, 风机直径为 2.6 m ; S_1 为风管面积。

通风全压计算:

$$P_A = P_d + \Delta P + \Delta P_1 + \Delta P_2 = 3858.5 \text{ (pa)}$$

4.2.3 风压计算结果对比

两种标准风压计算方法本质差异在管道静压计算, 中国通行的计算方法考虑进出口不同的风速和管道漏风; 欧洲厂商的计算方法仅利用出口风速作为参数, 将风管视为理想的管道模型, 采用流体力学经典的沿程压力损失公式计算, 忽略了漏风影响, 计算值偏小。

4.3 风机功率计算

$$W = \frac{k \times Q_j \times P_A}{60 \times \eta} \div 1000$$

式中: K 为风量备用系数, 取 1.15 ; η 为风机工作效率系数, 取 0.8 ; W 为风机计算功率。

隧道施工用通风机大部分为轴流风机, 不同厂家的风机输出风量和输出风压不同, 工作效率不同, 形成的个体特性曲线不同。一般在计算出风量和风压后, 由设备供应商协助进行选型。

5 海外长大隧道通风计算及应用的思考

5.1 规范标准的选定

空气质量控制标准的提高, 有益于劳动者权益的保护, 但洞内空气质量标准的制定应充分结合现有技术和经济发展水平。项目应在遵循项目所在地标准, 并参照国标的情况下, 采用适当宽松的指标, 在施工过程中根据隧道所处环境、不同工况制定贴合实际且合理有效的监控措施, 做到既保护劳动者的健康, 又提高经济效益。

5.2 通风距离和通风时长的选择

因隧道工况各异, 国内外标准均不可能覆盖所有通风工况, 国内企业在通风工序上安排的时间很短, 有的虽有通

风时间的安排, 但在执行过程中, 通常会在掌子面空气未达标而提前进入作业面, 严重危害劳动者健康。而欧洲项目执行时, 严格按照洞内空气质量监测结果确定出渣时间和工作面准入时间, 容易造成严重降低工效、项目拖期, 同时项目成本增加。合理的通风距离和通风市场的选择是长达隧道通风的重难点。

5.3 减小风阻技术措施

对于无巷道式通风条件且独头掘进长度长的单线特长隧道, 可考虑采用风仓模式设计通风系统。该方式能大幅度加长通风距离, 提高通风效率, 有效改善洞内空气质量。

5.4 漏风率取值和风管维护

百米漏风率参数的选择, 对通风计算及方案确定影响很大。随着漏风率增大, 会导致风机提供风量的显著增大, 而风阻与风量的平方成正比关系, 从而使风阻增大。经计算, 当漏风率取值为 2% 时, 目前市场上没有风机能满足本项目风量要求, 因此在实际施工中务必加强风管维护, 降低漏风率, 以提高风管的通风能力。

5.5 风管直径选择

风管风阻的大小与风管直径的 5 次方成反比关系, 因此风管直径的变化对风阻影响十分显著。在确保通行能力和二衬台车加工要求情况下, 采用极大直径风管可以有效减少风管沿程摩阻, 降低设备需求和通风成本。

6 结语

长大隧道的通风往往是一个系统性、多元素的复杂问题, 会遇到难以预料的困难和问题, 同时理论计算也存在局限性。在生产实践中, 应结合现场条件及实际情况, 既要充分尊重规范, 又要在特定条件跳出规范, 充分考虑既有条件及现场情况, 通过充分的技术储备, 多方努力、通力协作, 以解决生产中的实际困难和问题。同时, 加强对洞内空气质量指标及风机运行状态的监控, 及时反馈通风效果, 不断改进隧道通风理论建设, 提高隧道通风技术和应用水平, 共同推动中外长大隧道施工通风控制技术取得进一步发展。

参考文献

- [1] BS 6164 DRAFT IN PUBLIC CONSULTATION[J].Tunnels & tunnelling international: T&T international, 2019(Apr).
- [2] Archives S I, sysadmin.SIA Acc. 01-196, History of Science Society, Committee Records, 1996-1998[J].
- [3] 单位中铁二局集团有限公司.铁路隧道工程施工安全技术规程[M].北京:中国铁道出版社,2009.
- [4] 佚名.公路隧道施工技术规范 JTG/T 3660-2020 交通运输[M].北京:人民交通出版社股份有限公司,2020.
- [5] 杨立新.现代隧道施工通风技术[M].北京:人民交通出版社,2012.