长大铁路隧道施工通风需风量计算与通风效果实测验证

秦江华[1]，马强[1]，武盛林[1]，叶锡钧[2]
（1. 中交四航局第一工程有限公司，广东 广州 510440；2. 广州大学土木与交通工程学院，广东 广州 510006）

摘 要：长大隧道施工通风是保障洞内作业安全与效率的关键环节。以马来西亚东海岸铁路(ECRL)项目的双文丹 2 号特长隧道为工程背景，根据其通风方案与通风段划分，依据规范准确计算每个通风段的需风量与通风阻力，完成大功率风机设备和风管的科学选型。为验证该方案的通风效果，在施工现场实施了系统的环境监测，结果表明：隧道内形成了稳定的定向风流，各断面平均风速均大于规范要求的 0.25 m/s；隧道内的总体氧气浓度满足施工安全标准；爆破作业产生的粉尘和有害气体可在 30 min 内能被有效排出，浓度均降至安全限值以下。该通风方案有效保障了长大隧道的施工环境安全与人员健康，可为类似工程提供实践参考与技术支撑。

关键词：隧道施工通风；需风量计算；风机选型；通风效果；现场实测分析
中图分类号：U6；U652.7；TV554.15 **文献标志码：**A **文章编号：**2095-7874(2026)11-0055-06
doi:10.7640/zggwjs202611009

Air demand calculation and field measurement verification of ventilation effectiveness for long railway tunnel construction

Qin Jianghua[1], Ma Qiang[1], Wu Shenglin[1], Ye Xijun[2]
(1. No.1 Engineering Co., Ltd. of CCCC Fourth Harbor Engineering Co., Ltd, Guangzhou, Guangdong 510440, China;
2. School of Civil Engineering and Transportation, Guangzhou University, Guangzhou, Guangdong 510006, China)

Abstract: Ventilation during the construction of long tunnels is crucial for ensuring safety and efficiency in underground working environments. This paper takes the Serendah No. 2 extra-long tunnel of the East Coast Rail Link (ECRL) project in Malaysia as the engineering background. According to the ventilation scheme and section division and in accordance with relevant standards, the air demand and ventilation resistance of each ventilation section were accurately calculated, and high-power fans and ducting were scientifically selected. To verify the effectiveness of the scheme, systematic environmental monitoring was carried out at the construction site. The results indicate that a stable directional airflow was established inside the tunnel, with the average wind speed at each cross-section exceeding the standard requirement of 0.25 m/s. The overall oxygen concentration met the construction safety standards. Dust and harmful gases generated by blasting operations could be effectively discharged within 30 minutes, with their concentrations falling below safety limits. This ventilation scheme effectively ensures the safety of the construction environment and the health of personnel in long tunnel projects, providing a practical reference and technical support for similar projects.

Key words: tunnel ventilation; air demand calculation; fan selection; ventilation performance; field measurement and analysis

0 引言

钻爆法因其对复杂地质条件适应性强、技术成熟、成本相对较低等优势，在硬岩地层的长大隧道施工中应用广泛[1]。然而，钻爆法施工过程

收稿日期：2025-11-06 修回日期：2025-12-30
基金项目：中交第四航务工程局有限公司科技项目（CCCC/ECRL/C08/JZ/2025/001）
作者简介：秦江华（1974— ），男，四川乐山人，工程师，主要研究方向为隧道施工通风技术。E-mail：69096109@qq.com

中，爆破作业会产生大量含有 CO、NO_2 等有毒有害气体的炮烟，同时配套的装碴、运输等内燃机械设备也会持续排放尾气并扬起岩尘[2-3]。这些污染物在隧道这一狭长封闭空间内积聚，若不能及时有效地稀释并排出将严重恶化洞内作业环境，直接危害施工人员的健康与安全，并导致机械设备效率下降、能见度降低，可能引发安全事故，最终制约工程的整体进度[4]。

为确保施工顺利进行，必须建立高效的通风系统。在多种通风方式中，压入式通风因其系统简单、布设便捷、成本较低，且能将新鲜空气直接、快速地送至掌子面，有效稀释并排出爆破后产生的密集污染物，因而成为铁路隧道独头掘进阶段最常用、最基础的通风方式[5-6]。其工作原理是通过设置在洞外或洞内一定距离处的通风机新鲜空气经风管压送至隧道最前端的掌子面，与污浊空气混合后，沿隧道整体断面回流至洞外[7]。尽管压入式通风原理简单，但随着隧道独头掘进距离的不断延长，其技术挑战也愈发严峻。通风阻力（尤其是风管沿程阻力）随送风距离的增加而显著增大，导致风机能耗上升，掌子面有效风量可能不足[8]。同时，长距离通风中，风管的漏风率控制、布设的平顺度以及内燃设备尾气在回流过程中对后部施工区段的二次污染等问题，都直接影响着通风效果的优劣[9]。特别是在长大隧道施工中，如何根据隧道断面、掘进长度、污染物产出量等关键参数，科学地设计一套包括风机选型、风管直径确定、风压风量计算及风管布局优化在内的完整压入式通风方案，是实现安全、高效施工的核心环节[10-11]。

本文以马来西亚东海岸铁路项目的双文丹 2 号隧道为案例，针对该项目压入式通风方案的需风量和通风阻力进行计算，完成风机与风管选型，并通过现场实测验证通风效果，为类似工程的通风方案的制定提供理论依据和实践参考。

1 工程概况

马来西亚东海岸铁路项目（ECRL）第八标段共设计 3 座隧道工程，正线总长 14 440 m，分别是鹅唛隧道、双文丹 1 号隧道和双文丹 2 号隧道，如图 1 所示。其中，双文丹 2 号隧道线路最长，为 9 882 m。其进口里程 CH004+642，出口里程 CH014+524，正洞断面尺寸为 12 m×8 m，自进口端以 0.67%的下坡至出口端。双文丹 2 号隧道采用“四斜井”的斜井模式实行“长隧短打”，多个工作面平行钻爆组织施工，四处斜井辅助施工兼救援通道长度为 4 901 m，斜井净空断面尺寸为 5 m×8 m，最大综合坡率为–10%。

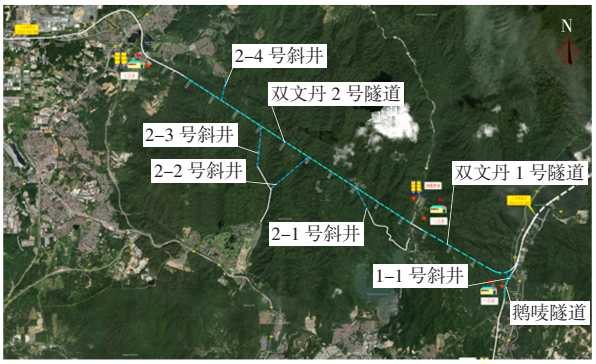


图 1 3 座隧道平面示意图

Fig. 1 Schematic plan of three tunnels

2 项目通风方案

隧道施工通风方案需根据隧道长度、断面大小、施工方法、施工设备配套等综合考虑。双文丹 2 号隧道项目结合总体施工计划及相关经验，斜井及正洞施工拟采用压入式通风方式，通风方案的平面布置如图 2 所示。

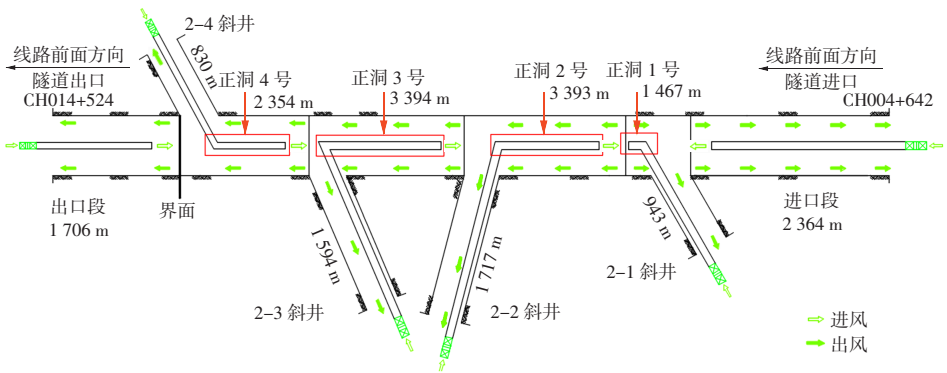


图 2 双文丹 2 号隧道通风平面布置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of ventilation layout for Serendah No.2 Tunnel

多个通风段的划分如下：

1）本隧道共有 4 处斜井，各斜井通风长度分别为 2–1 斜井（943 m）、2–2 斜井（1 717 m）、2–3 斜井（1 594 m）、2–4 斜井（830 m）。

2）本隧道正洞分为 5 个通风段，各段通风长度分别为进口段（2 364 m）、2–1 斜井正洞大里程段（正洞 1 号（1 467 m））、2–2 斜井正洞小里程段（正洞 2 号（3 393 m））、2–3 斜井正洞小里程段（正洞3 号（3 394 m））、2–4 斜井正洞小里程段（正洞4号（2 354 m））和出口段（1 706 m）。

结合实际施工顺序，施工要求第 1 阶段：在隧道斜井洞口 150 m 以内采用自然通风；第 2 阶段：在隧道斜井洞口 150 m 以后采用机械通风，将风机分别置于斜井洞口外 30 m，采用压入式通风；第 3 阶段：隧道正洞连接斜井风管分流大、小里程单独通风。

3　隧道施工通风需风量计算

3.1　设计标准

根据 JTG/T 3660—2020《公路隧道施工技术规范》[12]，通风要求标准如下：

1）洞内空气中的氧气体积浓度不得低于 19.5%；洞内粉尘容许浓度按游离二氧化硅含量≥10%的矽尘总尘时间加权平均容许浓度不大于 2 mg/m^3，游离二氧化硅含量<10%的矿物性粉尘总尘不大于 4 mg/m^3；同时，有害气体浓度需严控在限值以内，包括一氧化碳（CO≤30 mg/m^3）、二氧化碳（CO_2 体积浓度≤0.5%）及氮氧化物（按 NO_2 计≤5 mg/m^3）。

2）最小需风量标准：每人每 min 供应新鲜空气不低于 3.0 m^3，使用内燃机械设备时不低于 4.5 m^3/（min·kW）。

3）通风风速标准：全断面开挖时风速不小于 0.15 m/s，分部开挖坑道内不小于 0.25 m/s，且所有区域风速均不得超过 6 m/s。

3.2　需风量计算

根据 JTG/T D70/2–02—2014《公路隧道通风设计细则》[13]，隧道施工通风的设计风量须按稀释爆破炮烟、保证最小风速、供应人员新风及稀释内燃设备废气 4 项要求综合计算，以最大值作为设计依据。双文丹 2 号隧道的最长通风段为正洞 3 号（3 394 m），本文选取其作为计算实例，需风量的计算过程如下：

1）稀释单次爆破使用最多炸药量所产生的炮烟污染物到容许浓度的需风量 Q_1

$$Q_1=\frac{2.25}{t}\sqrt[3]{q_1\cdot b\cdot S^2\cdot L_0^2\cdot K/P_e^2} \tag{1}$$

式中：Q_1 为压入式通风时稀释和排出炮烟所需风量，m^3/min；t 为爆破后通风时间，min，取 40 min；q_1 为单次爆破的最多炸药量，kg，取 396 kg；b 为 1 kg 炸药有害气体生成量，L，本施工段属于 IV 级围岩，取 40 L；S 为坑道开挖断面面积，m^2，取 110 m^2；L_0 为临界长度，m，取 1 265 m；K 为考虑淋水使炮烟浓度降低的系数，取 0.8；P_e 为漏风系数，取 1.67。

根据上述参数，计算得 Q_1=250 m^3/min。

2）洞内满足工作面要求允许最小风速的需风量 Q_2

$$Q_2=60VS \tag{2}$$

式中：Q_2 为洞内允许最小风速风量，m^3/min；V 为洞内最小风速，m/s，全断面开挖取 0.15 m/s。

根据上述参数，计算得 Q_2=990 m^3/min。

3）最多工作人员同时作业的需风量 Q_3

$$Q_3=q_2\cdot k\cdot m \tag{3}$$

式中：Q_3 为保证洞内最多工作人员同时作业的需风量，m^3/min；q_2 为洞内每人每 min 需要新鲜空气量，取 3.0 m^3/（min·人）；k 为风量备用系数，取 1.2；m 为同一时间洞内工作最多人数，本项目正洞的施工最多人数取 100 人。

根据上述参数，计算得 Q_3=360 m^3/min。

4）稀释隧道内机械设备作业排放污染气体至容许浓度的需风量 Q_4

$$Q_4=k_1\times\sum N_iT_i \tag{4}$$

式中：Q_4 为稀释机械设备排放废弃的需风量，m^3/min；k_1 为规定的单位需风量，取 4.5 m^3/（min·kW）；N_i 为洞内同时使用机械作业的总功率，kW；T_i 为同时工作柴油设备的利用率系数，本项目正洞内机械设备考虑最不利的环境同时工作利用系数，装载机、混凝土罐车、挖掘机取 0.5，自卸车取 0.4。

机械设备数量如表 1 所示。根据上述参数，计算得 Q_4=2 083 m^3/min。

表 1　机械设备数量表

Table 1　Quantity of mechanical equipment

机械名称	规格/型号	功率/kW	数量/辆
装载机	SL50WN	162	2
挖掘机	VOLVO EC210	123	1
自卸车	15 m^3	204	3
混凝土罐车	8 m^3	226	2

取上述 4 种情况的最大值 $Q_{max}=\max\{Q_1, Q_2, Q_3, Q_4\}$，即为隧道施工通风的最大理论需风量。考虑通风距离较长，风管漏风明显，需考虑风管漏风损失系数，实际需风量 $Q=P_c\cdot Q_{max}=3\ 479\ m^3/min$。

3.3 系统风压计算及风机配置

通风时风流与管壁频繁接触，形成了阻碍风流运移的摩擦阻力，或新鲜风在运移时由于风管壁面条件变化而受到局部阻力，因此为将新鲜空气运至作业面，风流需具有一定风压以克服阻力。

1）摩擦阻力计算

$$h_{摩}=\frac{\alpha\cdot L\cdot U\cdot P_c(\gamma\cdot Q_{max}^2)}{s^3} \tag{5}$$

式中：$h_{摩}$为风流受到的摩擦阻力，Pa；α 为摩擦阻力系数，$N\cdot s^2/m^4$，取 0.002 2 $N\cdot s^2/m^4$；L 为通风长度，m，取 3 394 m；U 为风管周长，m，取 5.65 m；γ 为坡度系数，取 1.1；Q_{max} 为最大理论通风量，m^3/s，取（2 083/60）m^3/s；s 为风管断面面积，m^2，取 2.54 m^2。

根据上述参数，计算得 $h_{摩}$=5 686 Pa。

2）局部阻力计算

$$h_{局}=0.612\times\zeta\times\frac{Q_{max}^2}{s^2} \tag{6}$$

式中：$h_{局}$为风流受到的局部阻力，Pa；ζ 为局部阻力系数，ζ=2.62/1.22=2.15。

根据上述参数，计算得 $h_{局}$=245 Pa。

综上，系统总风压 $h_{总阻}=\sum(h_{摩}+h_{局})$=5 931 Pa。根据系统总风压，选定风机型号和设备品牌如表 2 所示。

表 2 配备风机型号及参数表

Table 2 Models and parameters of equipped fans

风机型号	风管直径/m	转速/(r·min⁻¹)	风量/(m³·min⁻¹)	风压/Pa	电机功率/kW	设备选型
SDDY III-№14	1.8	1 450	3 433~4 333	5 500~7 100	200×2	法国 ECE 风机 T2.160.2×200.4

3.4 通风参数及设备选型

依照上述过程，对本隧道的其他通风段代入计算参数，得到各通风段的需风量计算结果和设备选型结果如表 3 所示。斜井区域的实际需风量相对较少，为 1 300~2 400 m^3/min，正洞区域的实际需风量为 2 300~3 500 m^3/min。

表 3 全部通风段的所需供风量及设备选型

Table 3 Air demand and equipment selection for all ventilation sections

阶段	区域	围岩级别	风管长度/m	实际需风量 Q/(m³·min⁻¹)	风管直径/m	系统风压/Pa	法国 ECE 风机设备选型
斜井	2-1	IV	943	1 338	1.8	842	T2.140.2×75.4
	2-2	II	1 717	2 383	1.8	1 739	T2.140.2×90.4
	2-3	III	1 594	2 339	1.8	1 584	T2.140.2×90.4
	2-4	IV	830	1 315	1.8	729	T2.140.2×75.4
正洞	进口段	III	2 364	2 977	1.8	3 082	T2.160.2×200.4
	正洞 1	III	1 467	2 294	1.8	3 662	T2.140.2×110.4
	正洞 2	III	3 393	3 478	1.8	5 684	T2.160.2×200.4
	正洞 3	III	3 394	3 479	1.8	5 931	T2.160.2×200.4
	正洞 4	III	2 354	2 973	1.8	3 431	T2.140.2×110.4
	出口段	IV	1 706	2 696	1.8	2 013	T2.140.2×110.4

本项目风管选型严格依据工程通风需求与行业规范[13]，核心选用带高强度骨架的柔性 PVC 风筒，满足百米漏风率≤2%、经济风速下比摩阻达标、能承受 3 000 Pa 压力以及难燃 B1 级等关键性能与安全指标，并确保管径匹配、连接密封与布置合理。

4 施工通风效果评价

为验证通风方案的实际效果，在隧道进口段 CH050+100 断面布设监测点，采用电子风速仪、P-5 型数字式粉尘计和 SET-PB-3000 气体检测仪等仪器分别对氧气浓度、粉尘浓度、有毒气体浓度（CO、CO_2 和 NO_2）以及风速等关键指标进行了现场实测。

4.1 风速监测结果

风速监测在 1.5 m 高度平面上进行，沿隧道轴向设置了左、中、右 3 条间距 4 m 的测线，每条测线以 5 m 间距布设 14 个测点，监测范围覆盖至掌子面后 70 m。风速监测结果见图 3。可见，隧道内风速整体呈现随着与掌子面距离增加而衰减的趋势。中轴线（M 测线）风速最高，在10 m 处

达峰值 1.42 m/s，至 70 m 处衰减至 0.61 m/s。所有断面 3 条测线的平均风速均超过 0.25 m/s，满足最小风速标准要求(0.15 m/s)。

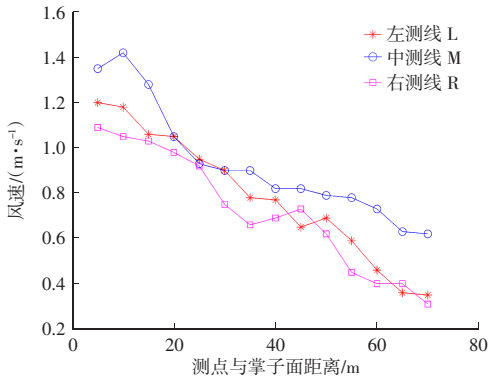


图 3　风速监测结果

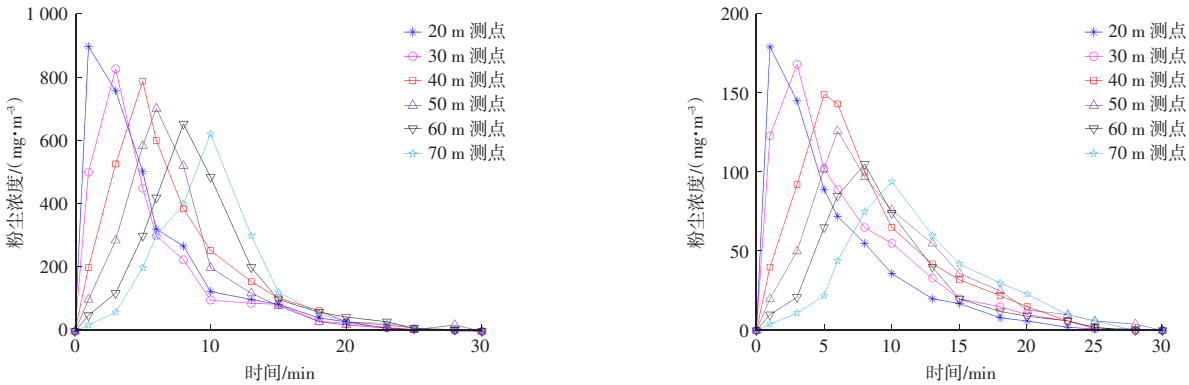
Fig. 3　Wind speed monitoring results

4.2　粉尘和气体浓度监测结果

为监测爆破后污染物分布和气体浓度变化趋势，沿隧道中轴线在 0.3 m 与 1.5 m 高度处分别布设 1 条测线。每条测线设置 6 个测点，首测点距掌子面 20 m，以 10 m 间距向后延伸至 70 m 处，并持续监测爆破后的粉尘与气体浓度变化。

1）粉尘浓度监测结果

粉尘浓度监测结果如图 4 所示。可见，粉尘浓度因重力沉降效应在不同高度呈现显著差异，0.3 m 高度处的浓度始终显著高于 1.5 m 高度处的浓度；爆破初期(10 min 内)，0.3 m 高度处浓度峰值超 800 mg/m³，1.5 m 高度处浓度不足 180 mg/m³；此后，粉尘浓度同步快速衰减，并在 25 min 后均降至检测限值以下，降至 0。



(a) 0.3 m 高度处　　(b) 1.5 m 高度处

图 4　不同高度粉尘浓度实测值

Fig. 4　Measured dust concentration values at different heights

2）气体浓度监测结果

气体浓度的监测结果如表 4 所示。在爆破后的 30 min 后，隧道内的总体氧气浓度满足施工安全标准。有毒气体(CO、CO_2、NO_2)均能在合理时间内(30 min)被有效排出，下降至安全限值以下，满足规范要求。

表 4　气体浓度监测结果

Table 4　Gas concentration monitoring results

%

气体类型	0.3 m 高度处气体浓度		1.5 m 高度处气体浓度		规范要求值
	30 min 后最大值	30 min 后平均值	30 min 后最大值	30 min 后平均值	
O_2	24.84	23.35	25.63	22.38	>19.5(满足)
CO	10.68	8.72	11.80	9.62	<30.0(满足)
CO_2	0.41	0.22	0.34	0.20	<0.50(满足)
NO_2	3.45	2.05	3.24	1.89	<5.00(满足)

5　结语

通过对马来西亚东海岸铁路项目的双文丹 2 号隧道的压入式通风方案进行需风量计算和通风效果实测分析，结论如下：

1）依据该项目的通风方案和规范进行需风量与系统风压计算，据此完成风机与风管合理选型。

2）现场实测数据表明，通风系统运行期间，隧道工作面的风速及关键空气质量参数均满足规范要求，验证了该通风方案在工程实践中的有效性与可靠性，保障了施工安全与职业健康。

3）本文主要验证了既定方案的执行效果，但在通风系统的动态优化与智能控制方面尚有深入空间。建议后续研究可探索基于实时监测数据的风机变频智能调控策略，以进一步提升通风效率，实现节能降耗。

参考文献：

[1] 江超文，赵世龙，赵宇，等. 基于实时监测的智能隧道风机调控方法研究与应用 [J]. 中国港湾建设，2024，44（4）：29-32，53.
Jiang C W, Zhao S L, Zhao Y, et al. Research and application of intelligent tunnel fan regulation method based on real time monitoring[J]. China Harbour Engineering, 2024, 44(4): 29-32, 53.

[2] 杨磐石，刘畅，罗刚. 超长公路隧道斜井及正洞通风方案优化研究[J]. 中外公路，2022，42（1）：187-192.
Yang P S, Liu C, Luo G. Research on optimization of ventilation scheme of inclined shaft and main tunnel in super-long road tunnels[J]. Journal of China and Foreign Highway, 2022, 42(1): 187-192.

[3] Yang S, Ren R, Wang Y Q. Study on air cabin ventilation system by local structural optimization during tunnel construction[J]. Buildings, 2022, 12(12): 2235.

[4] JTG F90—2015 公路工程施工安全技术规范[S].
JTG F90—2015 Safety technical specifications for highway engineering construction[S].

[5] 王朋，潘红伟，程锋，等. 特长隧道斜井施工段通风优化[J]. 长安大学学报（自然科学版），2023，43（1）：72-81.
Wang P, Pan H W, Cheng F, et al. Optimization of ventilation in construction section of inclined shafts in extra-long tunnels[J]. Journal of Chang′an University(Natural Science Edition), 2023, 43(1):72-81.

[6] 焦红卫. 郑万高铁巫山特长隧道长风室接力通风污染物运移特征研究[J]. 隧道建设（中英文），2023，43（7）：1127-1138.
Jiao H W. Pollutant diffusion law in relay ventilation of long ventilation chamber in Wushan Tunnel on Zhengzhou-Wanzhou High-Speed Railway[J]. Tunnel Construction, 2023, 43(7): 1127-1138.

[7] Liu R, He Y, Zhao Y, et al. Tunnel construction ventilation frequency-control based on radial basis function neural network[J]. Automation in Construction, 2020, 118: 103293.

[8] 郭志杰，张灿程，李志鹏，等. 基于清洁能源车辆调查的太岳山隧道通风方案优化[J]. 现代隧道技术，2022，59（增刊 1）：81-84.
Guo Z J, Zhang C C, Li Z P, et al. Optimization of ventilation scheme for Taiyueshan Tunnel based on survey of clean energy fuelled vehicles[J]. Modern Tunnelling Technology, 2022, 59(S1): 81-84.

[9] 王阅章. 基于正交试验的瓦斯隧道施工通风方案优化研究[J]. 公路，2021，66（12）：395-403.
Wang Y Z. Research on ventilation optimization of gas tunnel construction based on orthogonal test[J]. Highway, 2021, 66(12): 395-403.

[10] 赵宁雨，吕陈伏，陈弘杨，等. 高海拔长大隧道压入式施工通风的合理长度研究[J]. 重庆交通大学学报（自然科学版），2020，39（3）：94-99，128.
Zhao N Y, Lyu C F, Chen H Y, et al. Optimal length of forced ventilation in construction of long tunnel at high altitude[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University(Natural Science), 2020, 39(3): 94-99, 128.

[11] 陈峰，王庭川，杨帅，等. 风机及风管布设参数对隧道通风除尘效果的影响[J]. 公路，2025，70（7）：356-364.
Chen F, Wang T C, Yang S, et al. Influence of fan and duct layout parameters on the dust removal effect of tunnel ventilation[J]. Highway, 2025, 70(7): 356-364.

[12] JTG/T 3660—2020 公路隧道施工技术规范[S].
JTG/T 3660—2020 Technical specifications for construction of highway tunnel[S].

[13] JTG/T D70/2-02—2014 公路隧道通风设计细则[S].
JTG/T D70/2-02—2014 Guidelines for design of ventilation of highway tunnels[S].

欢 迎 订 阅