G318 线色季拉山隧道总体设计方案探讨

牟智恒，刘洋*，郑建国，周仁强，田尚志，杨枫
（1.四川省公路规划勘察设计研究院有限公司，四川 成都 610041）

摘要：G318 线色季拉山隧道是中国国内少有的近期山区国道与远期高速公路共用路段的隧道工程，具有高海拔、特长、近远期结合设计难度大等特点。本文对该隧道的总体设计、平导利用设计、近远期结合的通风排烟方案、防灾疏散与救援等关键技术进行研究，结果表明：①充分结合近远期需求开展设计，采用近期国道单洞对向交通隧道与远期高速公路双洞单向交通隧道共线的方案具备较大优势；②近远期平导的功能定位与利用设计尤为关键，创新提出近期为主洞+贯通平导布置，远期利用主洞作为高速右线隧道+扩挖平导为高速左线隧道的总体建设方案；③综合排烟控制难易性、交通量、经济性等因素，推荐近期采用主洞全纵向射流通风+竖井排烟，远期增设 1 座竖井形成两区段送排式通风排烟的总体通风方案；④提出火灾工况下合理可行的行车救援、通风排烟组织方案，采用 Pathfinder 仿真模拟得到近期、远期火灾工况人员疏散逃生最大时间分别为 163.5 s 与 217.8 s。

关键词：隧道工程；近远期结合设计；平导利用；通风排烟；防灾救援
中图分类号：U45　　**文献标识码：**A

Discussion on the overall Design scheme of the sejila mountain tunnel on G318 line

Mou Zhiheng, Liu Yang*, Zheng Jianguo, Zhou Renqiang, Tian Shanzhi, Yang Feng
(1. Sichuan Highway Planning,Survey,Design and Research Institute Ltd,Chengdu,Sichuan 610041,China)

Abstract: The Sejila Mountain Tunnel on G318 Line is a rare tunnel project in China where a near-term mountain national way and a long-term expressway share a common section. It is characterized by high altitude, extra-long length, and significant challenges in integrated short-term and long-term design. This paper investigates key technologies including the overall tunnel design, the utilization design of the parallel pilot tunnel, the ventilation and smoke extraction scheme integrating short-term and long-term needs, and disaster evacuation and rescue. The following main conclusions are drawn:1)By fully incorporating both short-term and long-term requirements, the scheme of aligning the near-term single-tube two-way national highway tunnel with the long-term twin-tube one-way expressway tunnel offers substantial advantages.2)The functional positioning and utilization design of the parallel pilot tunnel for the near-term and long-term phases are particularly critical. An innovative overall construction scheme is proposed: in the near term, a main tunnel together with a through pilot tunnel is arranged; in the long term, the near-term main tunnel is used as the right tube of the expressway, while the pilot tunnel is enlarged to form the left tube of the expressway.3)Considering factors such as the difficulty of smoke control, traffic volume, and economic efficiency, it is recommended that in the near term, full longitudinal jet ventilation combined with shaft smoke exhaust be adopted for the main tunnel; in the long term, one additional shaft be added to create a two-section supply-exhaust ventilation and smoke extraction system.4)Feasible and reasonable schemes for vehicle rescue and ventilation/smoke exhaust organization under fire scenarios are proposed. The maximum occupant evacuation times under near- term and long- term fire scenarios were determined to be 163.5 s and 217.8 s by Pathfinder simulation.

Keywords: Integrated short-term and long-term design; Tunnel; Utilization design of parallel tunnel; Ventilation and smoke extraction; Disaster prevention and rescue

0 引言

随着我国公路建设进入高峰期，高等级公路网由中、东部地区向地形地貌陡峻、地质构造复杂、气候环境恶劣、生态环境脆弱的西部艰险山区延伸，西部山区国道目前存在高海拔越岭、阴面积雪暗冰、

收稿日期：2026-04-21　修回日期：2026-09-07
基金项目：四川省交通运输科技计划资助（编号 2024-A-01）
作者简介：牟智恒，男，硕士，工程师.　E-mail：mzh19950609@163.com
***通信作者：**刘洋，男，硕士，工程师.　E-mail：17711577342@163.com

冬季雪害断道等问题；为提升路段通行能力和服务水平、保障行车安全，既有路段新增隧道缩短越岭里程、降低路线标高是山区既有国道常采用的改建方案，如已建成的 G317 线雀儿山隧道[1]、G318 线觉巴山隧道[2]、G317 线珠角拉山隧道，在建的 G318 线折多山隧道[3]、G549 线贡嘎隧道、G351 线夹金山隧道等。

G318 线提质改造工程（色季拉山越岭）位于林芝市巴宜区鲁朗镇米瑞乡境内，如图 1 所示。路线全长 69.81 公里，起于鲁朗镇跑马场北侧，设色季拉山特长隧道穿越色季拉山至米瑞乡，在米瑞乡利用县道接 G318 线。由于该路段路线走廊方案唯一，为最大程度地合理利用建设资源，近期实施的 G318 线提质改造工程与远期规划的 G4218 线高速公路共用色季拉山隧道，隧道主洞远期作为 G4218 线色季拉山隧道的半幅。

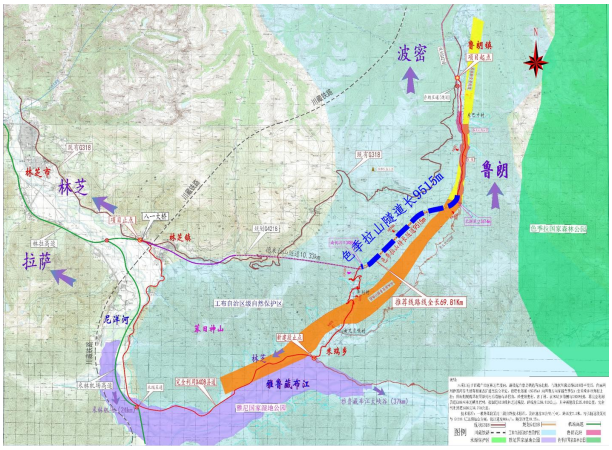


图 1　项目地理位置图

Figure 1　Project geographic location map

有关隧道工程总体设计的研究有案可循[4-7]，张金等[8]针对近期按四车道高速公路建设，预留远期扩建八车道条件的工程案例，从路线指标、平面组合、横断面加宽、互通设计等方面进行了探讨，但基于近远期结合设计的国道与高速共线的隧道总体设计案例研究极少。本文依托 G318 线色季拉山隧道工程设计阶段性成果，基于近远期结合的建设理念，对本隧道总体设计、通风排烟、防灾救援方案等关键技术进行研究探讨，以期为类似工程提供借鉴参考。

1 工程概况及建设条件

1.1 工程概况

色季拉山隧道为川藏公路 G318 线提质改造工程的控制性工程，隧道起点位于东巴才村，穿越色季拉山后从米瑞端出洞。隧道主洞长 9 515 m，贯通平导长 9 585 m，最大埋深 810 m，洞口标高 3 500 m，为典型的高海拔隧道，是西藏自治区第一长的“万米级”低等级公路隧道。

本隧道与远期规划 G4218 线川藏高速公路色季拉山隧道共线，近期为 G318 线单洞对向交通隧道，远期为规划 G4218 线利用。路线技术标准为三级公路，设计速度 30 km/h，隧道主洞按远期高速公路半幅设计，技术标准为高速公路，设计速度 80 km/h。

1.2 工程地质概况

1.2.1 地层岩性

隧址区主要为第四系上更新统冰水堆积层（Q_3^{gfl}）块石土、第四系全新统坡积层（Q_4^{dl}）块石土；下伏基岩为外来基底岩（WNq）片麻岩、色季拉单元（SN_1）黑云母花岗闪长岩、德母拉单元（ODN_1）石英闪长岩、念青唐古拉山岩群（$AnNq^a$）黑云母长英质片麻岩，钻孔岩芯如图 2 所示。

1.2.2 地质构造及水文地质

隧址区位于冈底斯-拉萨陆块与雅鲁藏布江缝合带交界处，如图 2 所示。隧道进口端与 F7 米林断裂韧性剪切带斜交，该断裂为晚更新世活动断裂。场区地震动峰值加速度为 0.30 g，反应谱特征周期为 0.45 s，地震基本烈度为Ⅷ度。

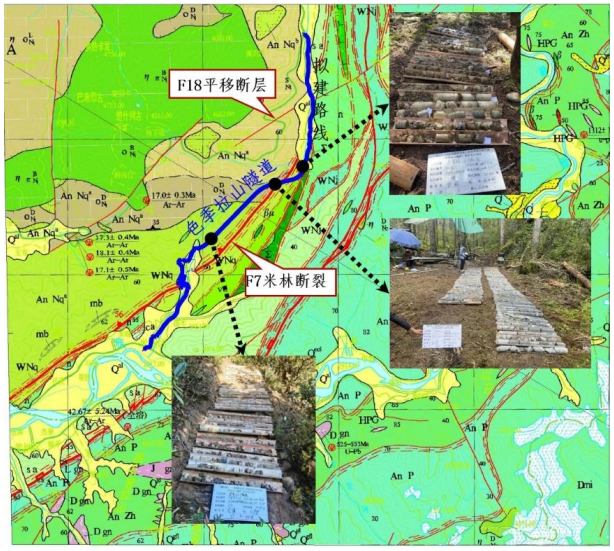


图 2　隧址区主要地质构造及钻孔岩芯

Figure 2　Major geological structures and borehole cores of the tunnel site

隧址区地下水类型为基岩裂隙水，地下水以大气降雨入渗、侧向径流方式接受补给。本隧道平水期总涌水量为 53 753 m^3/d；丰水期总涌水量为 80629 m^3/d。

2 项目特点及难点

本隧道规模大、近远期结合设计难度大、建设条件复杂，是国内少有的近期山区国道与远期高速公路共用路段的干线隧道工程，可借鉴的工程案例仅有在建的 G318 线折多山隧道[3]，折多山隧道总体建设方案为：近期建设二级公路隧道主洞（8 415 m）,设两段非贯通平导,远期将二级公路隧道作为高速公路隧道右洞,贯通隧道平导作为高速公路隧道左洞。相较折多山隧道，本隧道设贯通平导（9585 m），采用高速公路技术标准，近期总体建设规模更大，近远期结合设计充分发挥平导功能的需求更高，总体设计存在多个技术难点。

（1）本隧道主洞近期作为国道单洞对向行车隧道，远期作为 G4218 高速公路隧道右洞；主洞与平导的平、纵、横断面布置、停车带及横通道布设、通风排烟、防灾救援等问题是本工程近远期结合设计的重点与难点。

（2）本隧道设置贯通平导，通常平导具备以下功能：通风排烟、应急救援、运营维护、辅助施工；如何最大程度利用平导，使其在近期及远期均发挥最大功效是本文研究的重难点，平导在近期、远期中的功能定位是本工程近远期结合设计的关键点。

（3）本隧道近期为单洞对向行驶隧道，远期为双洞单向行驶隧道，其通风及排烟方式存在本质区别，且规范要求也存在较大差异，基于近远期结合的隧道通风排烟方案研究，是本工程设计一大挑战。

3 近远期结合的隧道总体设计方案研究

3.1 隧道轴线及平、纵面布置

路段远期规划的 G4218 雅安至叶城高速处于前期研究阶段，十四五期间无实施计划。结合高速公路前期资料，轴线从峡谷内通过，受地形限制，本隧道轴线与远期高速基本一致，平、纵面总体布置如图 3 所示，方案如下：

（1）基于地形选线、地质选线的原则，隧道进口段设置半径为 1 225.17 m 的曲线段，以缩短隧道进口段穿越冰水堆积体（Q_3^{gfl}）段落长度，同时大角度穿越米林断裂。

（2）隧道出口较高速公路前期方案轴线北移约 200m，以减短隧道出口段穿越冰水堆积体（Q_3^{gfl}）段落长度，同时使路线与后段互通接线更顺直。

（3）隧道纵面采用人字坡（0.35%/2 596.68 m，-1.99%/6 919.32 m），最大程度缩短隧道进口段穿越 F7 米林断裂段逆坡施工长度。

（4）路面采用单坡，高速公路修建期间主洞可行车，路面结构无需改造，利于施工组织及交通组织。

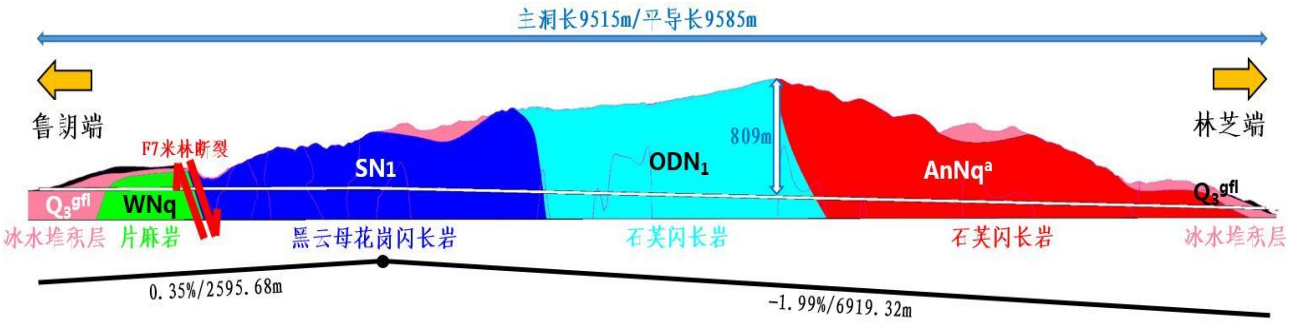


图 3　隧道平、纵面总体布置图

Figure 3　General arrangement plan and longitudinal profile of the tunnel

基于近远期结合设计，本隧道远期需进行改扩建以满足高速公路技术要求，目前国内外已开展了诸多隧道的改扩建实践，隧道改扩建的主要型式可分为增建（新建）隧道、原位扩建隧道、组合扩建隧道、改建隧道 4 种模式[9-13]。本隧道近期采用主洞+平导布置，远期可考虑平导扩挖为主洞或新建半幅主洞，综合实施难度、地质、工期、经济性，远期平导采用钻爆法+机械开挖进行扩挖施工。

综合考虑近期两洞施工相互影响及远期平导扩挖对既有主洞影响，主洞与平导洞身净距设置为 40m；平导布置于远期主洞钻爆掏槽部位，既能利用建设资源、节约项目投资、降低施工难度，又可根据揭露地质情况控制远期高速施工风险。

综上所述，提出隧道近远期结合的建设方案如图 4 所示，近期总体布置为：主洞+贯通平导；远期总体布置为：利用主洞作为高速右线隧道+扩挖平导作为高速左线隧道。

图 4　近远期主洞+平导横断面布置图

Figure 4　Cross-sectional arrangement of the main tunnel and parallel adit (short- and long-term)

3.2 隧道平导近远期利用设计

本隧道设置贯通平导，为最大程度发挥平导功能，其利用设计如下：

（1）近期疏散救援通道[14-15]：在非火灾情况下，平导作为紧急状况下的疏散救援通道；在火灾情况下，平导作为独立的应急救援道，司乘人员可由平导逃生至洞外，救援车辆可通过平导第一时间快速到达事故现场进行救援。

（2）近期运营期养护维修通道[14]：平导作为隧道运营检修养护通道，可快捷方便地到达主洞，极大程度地避免了检修养护车辆绕行以及对正常行驶车辆的影响。

（3）远期左线隧道：隧道主洞远期为高速公路隧道右线，平导扩挖为隧道左线。平导Ⅴ级围岩长度 4640 m（48.4%），Ⅳ级围岩长度 4 160 m（43.4%），Ⅲ级围岩长度 785 m（8.2%），为便于平导远期扩挖施工，平导Ⅳ、Ⅲ级围岩段落采用喷锚支护，Ⅴ级围岩及地质较差段落采用复合式衬砌，如图 5 所示。

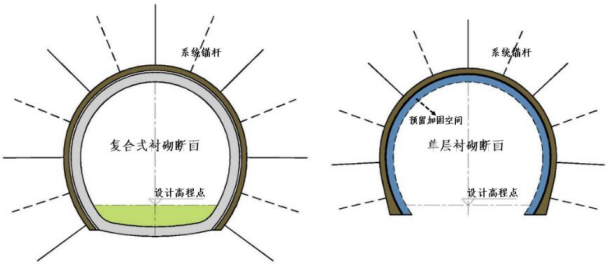


图 5　平导衬砌结构横断面图

Figure 5　Cross-sectional drawing of the lining structure of the parallel adit

3.3 隧道紧急停车带及救援通道布设

（1）按高速公路标准，车行横通道间距应小于 1 000 m，按低等级公路标准，同侧紧急停车带间距应小于 1 500 m。结合近远期设计总体方案，近期色季拉山隧道设计方案：同侧紧急停车带间距小于 1 000 m，紧急停车带布设双侧，车行横通道位置对应的紧急停车带设于外侧，如图 6 所示。

（2）为同时满足高原高海拔隧道人员逃生时间需求与横通道布设要求，2 处车行横通道间布设 3 处人行横通道，使人行横通道间距小于 250 m，如图 6 所示。

（3）远期平导扩挖期间利用车行横通道作为施工通道，多开工作面，长隧短打，实现高效扩挖。

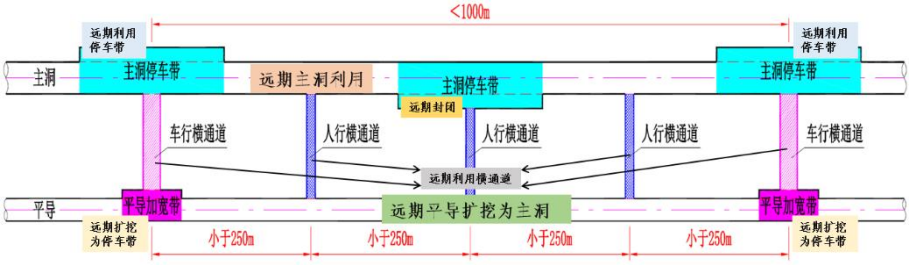


图 6　近远期横通道总体布置

Figure 6　General arrangement of cross passages (short- and long-term)

4 近远期结合的隧道通风排烟方案研究

4.1 近期运营通风及火灾排烟方案

4.1.1 单洞对向交通超特长隧道通风排烟方式

针对单洞对向行驶隧道通风排烟国内已作多项研究[16-18]，本隧道为特长隧道，设置贯通平导，对类似隧道（单洞特长隧道+贯通平导）的通风排烟方式进行调研，如表 1 所示。

表 1 单洞对向交通超特长隧道通风排烟方式统计

Table 1 Statistics of ventilation and smoke extraction methods for single-tube opposite-traffic extra-long tunnels

隧道	长度/m	海拔/m	通风方案	火灾排烟方案
贡嘎隧道	9961	3279	平导压入式通风，两端大平导+中部小平导	大平导上部设置隔板排烟，下部逃生救援
夹金山隧道	9350	3052	平导压入式通风，大平导	平导设置隔板，上部排烟，下部逃生救援
雅加梗隧道	9553	3500	平导两区段送排，小平导	平导逃生救援，主洞排烟（排烟距离超 3km）
雪山梁隧道	7966	3380	平导压入式通风，小平导	平导逃生救援，主洞排烟（排烟距离超 3km）
巴郎山隧道	7954	3850	平导压入式通风，小平导	平导逃生救援，主洞排烟（排烟距离超 3km）
雀儿山隧道	7079	4371	平导压入式通风，小平导	平导逃生救援，主洞排烟（排烟距离超 3km）
扎尕梁隧道[9]	5782	2500	全射流风机纵向通风	平导逃生救援，斜井排烟

注：表中大、小平导区分为具备行车功能为大平导，仅具备行人功能为小平导。

由上表可知，我国低等级公路高海拔特长隧道以采用平导压入式通风+主洞排烟的模式为主，随着《公路隧道通风设计细则》[19]发布，提出纵向排烟的单洞双向交通隧道火灾烟雾在隧道内的最大行程不宜大于 3 000 m。新规后的新建隧道如贡嘎隧道、夹金山隧道均采用平导排烟，平导同时作为排烟、通风及救援通道，因此平导排烟段需设置隔板分隔风道与烟道，使得平导排烟段断面面积增大，工程造价随之增加；雅加埂隧道采用平导两区段送排式通风，采用小平导可满足通风排烟需求，但主洞排烟距离超过 3 000 m。

4.1.2 通风计算及方案比选研究

根据通风计算并结合调研结果，考虑本隧道高海拔、特长、设贯通平导（具备应急救援车辆行驶功能）等实际情况，提出三种可行的通风排烟方案

如表 2 所示。

表 2 通风计算控制参数表

Table 2 Ventilation calculation control parameter table

项目	单位	计算控制参数
近期交通量（旅游旺季）	pcu/d	4733
CO 设计浓度	ppm	100
烟雾设计浓度	m^{-1}	0.009
正常行车设计控制风速	m/s	≤8
火灾工况临界风速	m/s	3~4
稀释异味设计控制风速	m/s	≥1.5
CO 基准排放量 q_{CO}	m^3/辆·km	0.007
烟雾基准排放量 q_{VI}	m^2/辆·km	2

方案一：主洞运营通风采用全射流纵向通风，火灾工况利用平导进行排烟+利用主洞进行逃生救援；

方案二：主洞运营通风采用平导压入式通风，采用隔板分隔平导，火灾工况利用隔板上部空间进行排烟，下部空间作为逃生救援空间；该方案需要在两端洞口约 1 950 m 范围设扩大平导，以便设横隔板后不影响平导行车空间。

方案三：运营通风采用全射流纵向通风，火灾工况利用竖井进行排烟+利用平导进行逃生救援。

表 3 主洞全纵向通风计算结果

Table 3 Main tunnel full longitudinal ventilation calculation results

年份	稀释 CO (m^3/s)	稀释烟雾 (m^3/s)	稀释异味 (m/s)	设计风速 (m/s)	控制工况
2031 年	165.27	46.19	175.63	2.70	稀释异味
2035 年	180.47	73.85	175.63	2.78	稀释 CO
2040 年	208.92	83.26	175.63	3.22	稀释 CO
2045 年	214.48	85.00	175.63	3.30	稀释 CO

表 4 通风排烟方案比选研究

Table 4 Ventilation and smoke extraction scheme comparison study

方案	方案一	方案二	方案三
平导规模（面积/长度）	26.60m^2/9585m	43.76m^2/3975m, 26.60m^2/5610m	26.60m^2/9585m
竖井规模（面积/深度）	/	/	15.9m^2/645m
风速（m/s）	3.30	1.63/1.61	3.30
20 年运营费用（万元）	1823	1483	1823
土建费用（万元）	41738	52905	44538
总费用（万元）	43561	54388	46361
通风控制	较复杂	较复杂	容易
排烟方式	利用与火灾同侧平导进行排烟，烟雾在主洞内最大行程 1000m，通风控制要求较高；人员与烟雾未完全分离。	利用平导隔板上部进行排烟，烟雾在洞内最大行程 2800m，通风控制要求较高；人员与烟雾完全分离。	利用竖井进行排烟，烟雾在主洞内最大行程 2400m，通风控制容易；人员与烟雾完全分离。

计算结果及方案对比分析如表 3、表 4 所示，采用全纵向射流通风的总投资费用较低、通风控制简单，本隧道近期交通量较小，采用全纵向射流通风可满足运营要求。

在火灾工况下，采用独立的排烟通道（竖井或平导隔板上部空间）更利于排烟控制与远期高速利用，可完全实现人员与烟雾分离，人员可由横通道进入平导逃生，主洞逃生距离不超过 250 m。结合控制难易、经济性、工程规模综合考虑，推荐采用方案三：全纵向射流通风+竖井排烟，竖井设置于隧道中部，距隧道进口 4 891 m，距隧道出口 4 624m。近期主洞布设射流风机 26 台，竖井布设 90 kW 轴流风机 2 台，横通道布设射流风机 9 台。

4.2 远期运营通风及火灾排烟方案

根据 G4218 雅安至叶城高速公路资料，远期高速公路交通量 28 277 pcu/d 与近期国道 318 旅游旺季交通量 4 733 pcu/d（非旅游旺季交通量 3 895 pcu/d）差异大，远期高速公路利用期间，需采用分段式通风[20-22]，拟定以下 6 种远期建设与运营通风

方案比选如表 5 所示。

方案 A：两区段送排式纵向通风（主洞为高速隧道右线+平导扩挖为高速隧道左线+增设 1 座竖井），如图 7 所示。

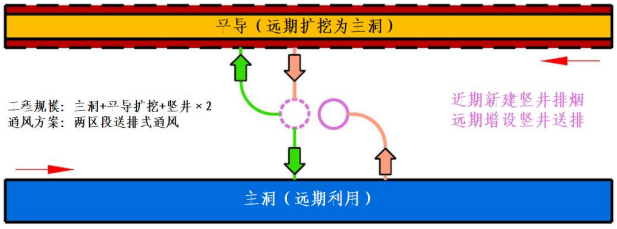


图 7　方案 A 建设与通风方案示意图

Figure 7　Schematic diagram of construction and ventilation scheme for option A

方案 B：两区段送排式纵向通风（主洞为高速隧道右线+平导扩挖为高速隧道左线+增设 2 座斜井），如图 8 所示。

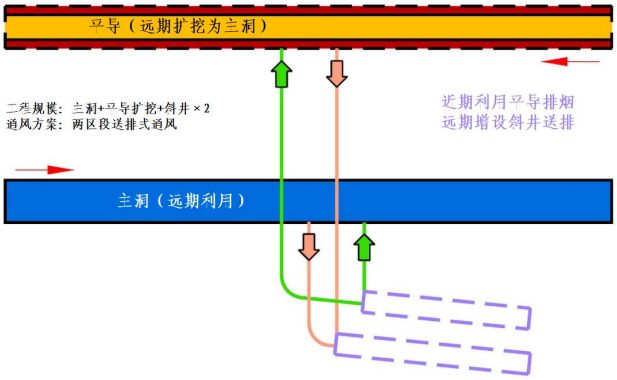


图 8　方案 B 建设与通风方案示意图

Figure 8　Schematic diagram of construction and ventilation scheme for option B

方案 C：两区段纵向通风三区段排烟（主洞为高速隧道右线+平导扩挖为高速隧道左线+增设 2 座斜井），如图 9 所示。

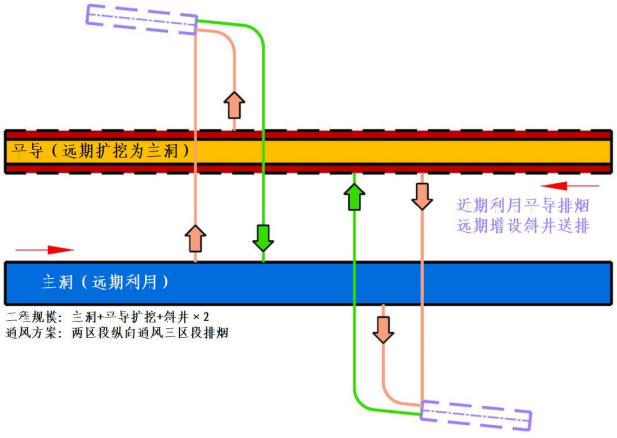


图 9　方案 C 建设与通风方案示意图

Figure 9　Schematic diagram of construction and ventilation scheme for option C

方案 D：三区段送排式纵向通风（主洞为高速隧道右线+平导扩挖为高速隧道左线+增设 4 座斜井），如图 10 所示。

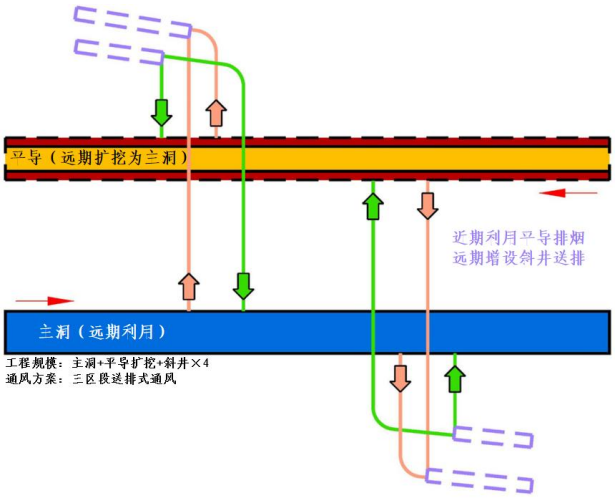


图 10　方案 D 建设与通风方案示意图

Figure 10　Schematic diagram of construction and ventilation scheme for option D

方案 E：三区段送排式纵向通风（主洞为高速隧道右线+新增隧道左线+平导作排烟道+增设 2 座斜井），如图 11 所示。

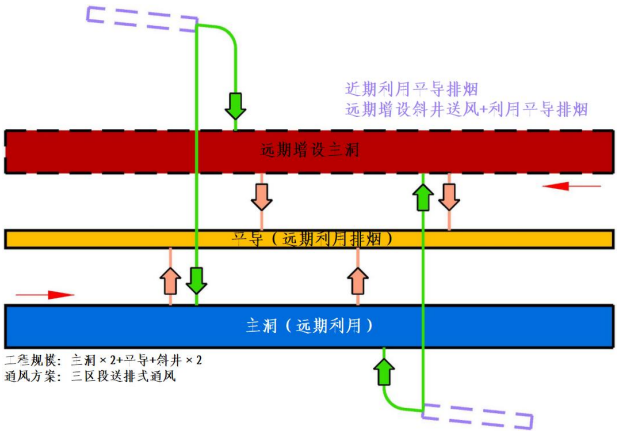


图 11　方案 E 建设与通风方案示意图

Figure 11　Schematic diagram of construction and ventilation scheme for option E

方案 F：两区段送排式纵向通风（主洞为高速隧道右线+新增隧道左线+平导作排烟道+增设 1 座竖井），如图 12 所示。

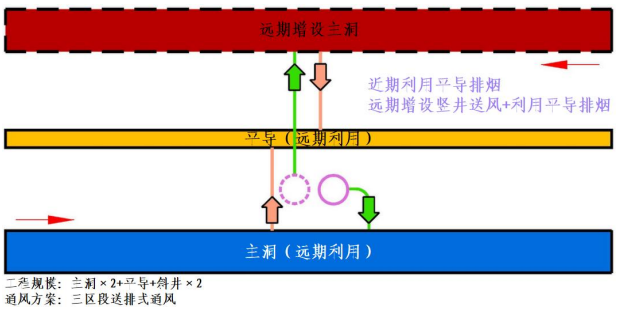


图 12　方案 F 建设与通风方案示意图

Figure 12　Schematic diagram of construction and ventilation scheme for option F

表 5　远期隧道通风方案比选

Table 5 Long-term tunnel ventilation scheme comparison

项目		单位	方案 A	方案 B	方案 C	方案 D	方案 E	方案 F
分段长度		m	4800/4715	5000/4315	3160/3300/3055	3160/3300/3055	3160/3300/3055	4800/4715
平导利用方案		/	扩挖为主洞	扩挖为主洞	扩挖为主洞	扩挖为主洞	新建半幅主洞+平导排风	新建半幅主洞+平导排风
1#风井	面积	㎡	60.3	50	70.35	47.98	47.98	60.3
	长度	m	645（竖井）	2150（斜井）	1350（斜井）	1350（斜井）	1350（斜井）	645（竖井）
	坡度	%	∞	11.9%	11.26%	11.26%	11.26%/	∞
2#风井	面积	㎡	60.3	52	70.35	47.98	26.6	26.6
	长度	m	654（竖井）	2150（斜井）	1569（斜井）	1350（斜井）	3170（平导）	4800（平导）
	坡度	%	∞	11.9%	10.57%	11.26%	0.4%,-1.95%	0.4%,-1.95%
3#风井	面积	㎡	/	/	/	48.69	48.69	26.6
	长度	m	/	/	/	1569（斜井）	1569（斜井）	4715（平导）
	坡度	%	/	/	/	10.57%	10.57%	-1.95%
4#风井	面积	㎡	/	/	/	48.69	26.6	/
	长度	m	/	/	/	1569（斜井）	3220（平导）	/
	坡度	%	/	/	/	10.57%	-1.95%	/
装机总功率		kw	7754	9711	10420	4588	9000	11251

结合远期高速公路 6 种建设方案，从方案的新建结构规模、既有结构物利用、施工风险、施工工效、建安费等 5 个方面进行比选，结果如表 6 所示。

表 6　远期高速建设方案比选

Table 6 Long-term expressway construction scheme comparison

比选项目 \ 比选方案	方案 A	方案 B	方案 C	方案 D	方案 E	方案 F
新建通风排烟结构规模	竖井 654 m/1 座	斜井 4 300 m/2 座	斜井 2 919 m/2 座	斜井 5 838 m/4 座	斜井 2 919 m/2 座	竖井 654 m/1 座
既有结构物利用	平导扩挖为主洞，横通道利用				新增半幅主洞，横通道不可利用	
施工风险	应力提前释放，不良地质提前揭露，平导扩挖风险低				新增主洞施工风险高	
施工工效	利用横通道多开工作面，扩挖封闭施工 1 年，总工期 2 年				两端独头掘进，总工期 5 年	

近期土建建筑安装工程费（亿）	14.8	14.0				14.8
远期土建建筑安装工程费（亿）	11.6	12.5	12.1	13.4	13.1	12.2
20 年运营电费（亿）	2.8	3.5	3.8	1.7	3.3	4.1
远期建筑安装工程费+20 年运营电费（亿）	14.4	16.0	15.9	15.1	16.4	16.3

依据比选成果，远期高速公路利用平导扩挖为隧道左线的施工风险较新增半幅主洞低、施工工效更高，施工工期优势明显，平导洞身段Ⅳ、Ⅲ级围岩段落采用喷锚支护利于平导的远期扩挖施工；考虑远期高速运营通风及排烟需求，结合近期主洞推荐的全纵向通风+竖井排烟方案，方案 A（两区段送排式通风）运营费用最低，通风模式更优，风井总体规模适中，故综合建设方案与通风方案，推荐远期高速公路采用方案 A（主洞利用+平导扩挖+增设 1 座竖井）。

5 防灾疏散与救援

为了保障隧道近期运营安全[23]，本隧道共设置有车行横通道 9 处，人行横通道 30 处，利用平导作为紧急情况下的疏散救援通道；火灾工况下应以人烟分离、逃生救援迅速、通风排烟易操作控制为主要原则。

5.1 火灾工况行车及救援组织

火灾情况下，关闭隧道，禁止车辆继续驶入隧道，立即组织疏散、救援、灭火。

（1）疏散阶段

驶离火灾点的车辆快速驶出隧道；驶向火灾点的车辆，停止前进，司乘人员弃车通过就近车行、人行通道逃生后关闭所有横通道，严禁隧道内车辆调头，避免发生二次灾害，待人员疏散完毕后开启救援通道。

（2）灭火救援阶段

Ⅰ、当主洞第一区段作为排烟通道，开启射流风机将烟雾往隧道进口排；当主洞第二区段作为排烟通道，则开启射流风机将烟雾往竖井方向排。

Ⅱ、火灾点上游（新鲜风吹向火灾点方向为上游）距离火灾点第二近距离的车行横通道开启，作为救援通道。

Ⅲ、救援车辆、灭火车辆从平导救援通道端经横通道从火灾点上游进入隧道进行灭火。

火灾点分别位于第一区段、第二区段时行车组织如图 13、图 14 所示。

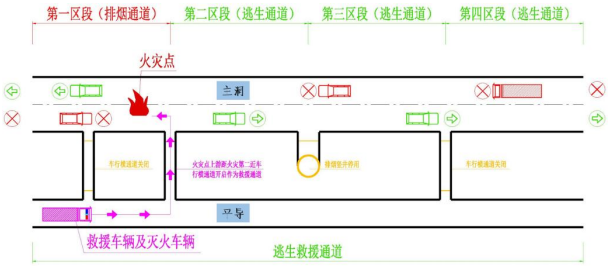


图 13 火灾点位于第一区段行车组织

Figure 13 Traffic organization for a fire incident located in the first section

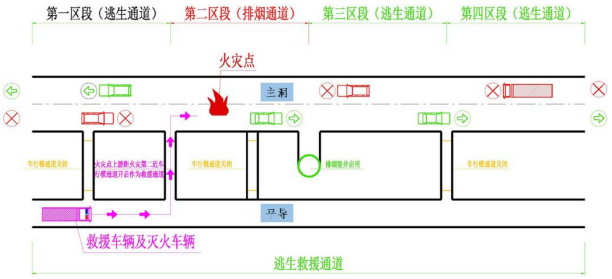


图 14 火灾点位于第二区段行车组织

Figure 14 Traffic organization for a fire incident located in the second section

5.2 火灾工况通风排烟组织

风流组织应视逃生和灭火救援工作的进度分阶段实施。

（1）疏散逃生阶段

Ⅰ、调整风机运行状态，采用疏散阶段风速 0~0.5m/s，控制火灾的发展和烟气向隧道洞口方向或竖井方向流动；

Ⅱ、主洞救援通道段的风流方向为吹向火灾点，并将烟雾控制在第一区段或第二区段内，并使得火灾产生的烟雾不蔓延至火灾点上游第二条车行横通道；

（2）灭火救援阶段

Ⅰ、待隧道内逃生人员完全安全撤离后，采用临界风速往隧道洞口或竖井排烟。

Ⅱ、主洞风向为新鲜风由救援通道吹向排烟通道。确保救援通道的人员安全。

Ⅲ、作为救援通道的车行横通道的风流方向为由平导吹向主洞，与主洞风流汇合后吹向排烟通道。

火灾点分别位于第一区段、第二区段时通风及排烟组织如图 15、图 16 所示。

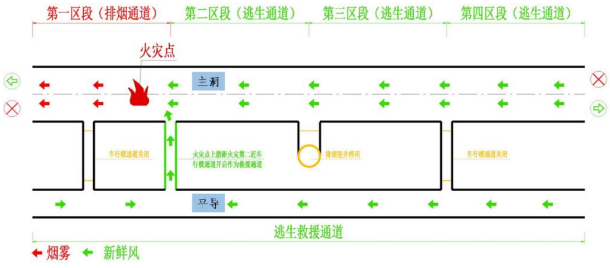


图 15　火灾点位于第一区段通风及排烟组织

Figure 15　Ventilation and smoke extraction organization for a fire incident in the first section

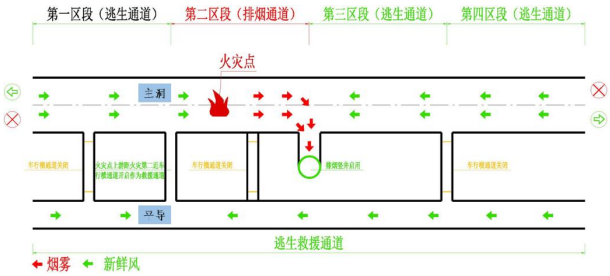


图 16　火灾点位于第二区段通风及排烟组织

Figure 16　Ventilation and smoke extraction organization for a fire incident in the second section

5.3 火灾工况逃生模拟

各建设方案火灾工况下近、远期排烟及逃生方案如下表 7 所示。

表 7 各方案近、远期火灾工况下排烟及逃生方案

Table 7 Smoke extraction and evacuation schemes for each scheme under short- and long-term fire conditions

建设方案	火灾工况下排烟及逃生方案	
	近期	远期
方案 A	竖井排烟+平导逃生	竖井排烟+左右洞互为逃生
方案 B	平导排烟+主洞逃生	斜井排烟+左右洞互为逃生
方案 C		
方案 D		
方案 E		
方案 F		

采用 Pathfinder 仿真模拟隧道内火灾工况下疏散逃生[24-25]如图 17，逃生段落为靠近人行横通道两侧主洞范围，逃生段落内按车辆满布考虑，司乘人员逃生速度按 0.6 m/s~1.2 m/s 取值。

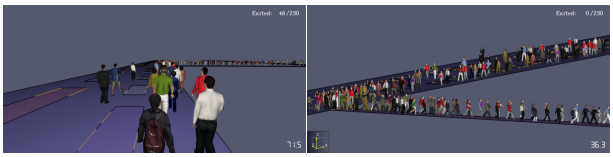
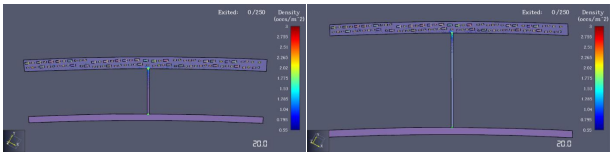


图 17　火灾工况逃生疏散仿真模拟

Figure 17　Simulation of evacuation under fire conditions

工况 1：近期主洞发生火灾，司乘人员由主洞经人行横通道逃生至平导；

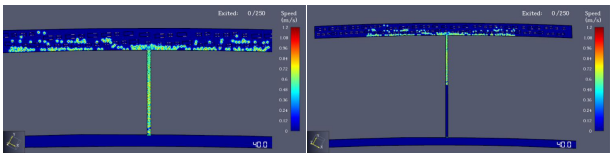
工况 2：远期任意主洞发生火灾，司乘人员由火灾洞经人行横通道逃生至安全洞。



(a) 工况 1　　(b) 工况 2

图 18　逃生疏散密度云图（20s 时）

Figure 18　Evacuation density nephogram (at 20s)



(a) 工况 1　　(b) 工况 2

图 19　逃生疏散速度云图（40s 时）

Figure 19　Evacuation velocity nephogram (at 40s)

仿真模拟计算如图 18、图 19，得到结果工况 1 最大逃生时间为 163.5 s，工况 2 最大逃生时间为 217.8 s。

6 结论

（1）提出了近期国道单洞对向交通隧道与远期高速公路双洞单向隧道共线的总体方案，该方案在满足路网远期规划、合理利用既有结构物及工程经济性方面优势明显。

（2）明确了近期“主洞＋贯通平导”、远期“主洞利用为高速右线＋平导扩挖为高速左线”的总体布置方案，并给出了相应的路线平纵面、横断面及横通道布设方法。

（3）创新规划了平导的近、远期功能定位：近期作为疏散救援及运营养护通道，远期扩挖为高速公路左线隧道。平导洞身段围岩较好段采用喷锚支护，为远期高效扩挖创造条件。

（4）综合排烟控制难易性、交通量、经济性等，推荐隧道近期采用“主洞全纵向射流通风+竖井排烟”方案，平导作为疏散救援通道，主洞布设射流

风机 26 台，竖井布设 90 kW 轴流风机 2 台，横通道布设射流风机 9 台。

（5）结合近期通风方案，推荐隧道远期采用“主洞利用+平导扩挖+增设 1 座竖井”方案，远期建安费与 20 年运营电费合计 14.4 亿，该方案在运营费用、通风性能及工程规模方面综合最优。

（6）提出火灾工况下的行车救援、通风排烟组织方案，采用 Pathfinder 仿真计算近期工况人员最大逃生时间为 163.5 s，远期工况人员最大逃生时间为 217.8 s。

参考文献

[1]郑金龙,蔚艳庆,杨枫.高海拔雀儿山隧道建设关键技术创新与实践[J].隧道建设(中英文),2020,40(7):1088-1097.
ZHENG Jinlong,WEI Yanqing,YANG Feng.Tunneling at high altitude:Technology innovations and practices in Que’ershan Tunnel[J].Tunnel Construction,2020,40(7):1088-1097.

[2]蔡鹏飞.觉巴山高海拔特长公路隧道施工通风优化研究[J].现代隧道技术,2021,58(S1):156-161.
CAI Pengfei.Study on Construction Ventilation Optimization in Juebashan High Altitude Extra-long High Tunnel[J].MODERN TUNNELING TECHNOLOGY,2021,58(S1):156-161.

[3]唐锐,向龙,王俊,等.基于远、近期合建的折多山公路隧道总体设计方案研究[J]. 隧道建设(中英文),2019,39(S1):340-345.
TANG Rui,XIANG Long,WANG Jun,et al.Overall Design Scheme for Zheduoshan Tunnel in Both Long-term and Short-term Perspectives[J].Tunnel Construction,2019,39(S1):340-345.

[4]肖明清,孙文昊,曲立清,等.胶州湾第二海底隧道总体设计方案研究[J].隧道建设(中英文),2023,43(2):199-216.
XIAO Mingqing,SUN Wenhao,QU Liqing,et al.Study on general design of second Jiaozhou Bay subsea tunnel[J].Tunnel Construction,2023,43(2):199-216.

[5]徐国平,黄清飞.深圳至中山跨江通道工程总体设计[J].隧道建设(中英文),2018,38(4):627-637.
XU Guoping,HUANG Qingfei.General Design of Shenzhen-Zhongshan River-crossing Link Project[J].Tunnel Construction,2018,38(4):627-637.

[6]吴强.汕头至汕尾铁路汕头湾海底隧道设计综述[J].铁道标准设计,2021,65(10):38-44.
WU Qiang.Summary of Shantou Bay Cross-Harbour Tunnel Design for Shantou-Shanwei Railway[J].RAILWAY STANDARD DESIGN,2021,65(10):38-44.

[7]唐雄俊,肖明清,焦齐柱,等.甬舟铁路金塘海底隧道总体设计与关键技术研究[J].铁道标准设计,2021,65(10):20-25.
TANG Xiongjun,XIAO Mingqing,JIAO Qizhu,et al.Investigation of Overall Design and Key Technology of Jintang Subsea Tunnel of Ningbo-Zhoushan Railway[J].RAILWAY STANDARD DESIGN,2021,65(10):20-25.

[8]张金,张焱发,潘丹.预留远期改扩建条件下高速公路超前设计探讨[J].中外公路,2020,40(4) :318-322.

[9]张在晨,林丛谋,李家盛,等.我国公路隧道改扩建技术发展现状及研究展望[J]. 隧道建设(中英文),2022,42(4):570-585.
ZHANG Zaichen,LIN Congmou,LI Jiasheng,et al.Development Status and Prospect of Highway Tunnel Rehabilitation and Expansion in China[J].Tunnel Construction,2022,42(4):570-585.

[10]宋战平,张泽坤,程昀,等.既有公路隧道改扩建技术研究动态及展望[J].地下空间与工程学报,2023,19(4):1216-1234.
Song Zhanping,Zhang Zekun,Cheng Yun,et al.Research Trend and Prospect of Reconstruction and Extension Technology of Existing Highway Tunnels[J].Chinese Journal of Undergroud Space and Engineering,2023,19(4):1216-1234.

[11]吴涛,胡瑶瑶,孟杰.黑峪隧道改扩建工程总体设计[J].山东交通科技,2022,(4):77-79.
WU Tao,HU Yaoyao,MENG Jie.Overall design for the reconstruction and expansion project of Heiyu tunnel[J].SHANGDONG JIAOTONG KEJI,2022,(4):77-79.

[12]黄伦海,钱七虎.公路隧道大断面改扩建施工开挖方案研究[J]. 现代隧道技术,2016,53(5):145-153+160.
HUANG Lunhai,QIAN Qihu.Study on Excavation Schemes for the Redevelopment Construction of Highway Tunnels with Large Sections[J].MODERN TUNNELLING TECHNOLOGY,2016,53(5):145-153+160.

[13]刘天琦,冯现大,何家智.公路隧道改扩建方案比选及施工工法数值模拟[J].济南大学学报(自然科学版),2025,39(01) :56-62.
LIU Tianqi,FENG Xianda,HE Jiazhi.Schemes Comparison and Construction Methods Numerical

Simulation of Highway Tunnel Reconstruction and Expansion[J].Journal of University of Jinan (Science and Technology).2025,39(01):56-62.

[14]李玉文，蔚艳庆.大凉山 1 号隧道设计与施工关键技术[J].现代隧道技术, 2024, 61(2): 232-240.
LI Yuwen,WEI Yanqing.Key Technologies for Design and Construction of the Daliangshan No.1 Tunnel[J].Modern Tunnel-ling Technology,2024,61(2):232-240.

[15]唐协,林国进,李玉文,等.龙门山超长公路隧道横断面布置方案[J].隧道建设(中英文),2025,45(10):1935-1946.
TANG Xie,LIN Guojin,LI Yuwen,et al. Cross-sectional layout schemes for Longmenshan ultra-long highway tunnel [J].Tunnel Construction,2025,45(10):1935-1946.

[16]李志鹏.扎尕梁特长公路隧道通风方案比选研究[J].隧道建设(中英文),2019,39(9):1486-1493.
LI Zhipeng.Comparison and Selection of Ventilation Schemes for Zhagaliang Extra-long Highway Tunnel[J].Tunnel Construction,2019,39(9):1486-1493.

[17]霍建勋,舒东利,刘祥,等.考虑火灾防排烟的公路隧道纵向射流式运营通风设计方法[J].现代隧道技术,2019,56(S2):485-493.
HUO Jianxun,SHU Dongli,LIU Xiang,et al.On design Method of Longitudinal Jet Ventilation in Operational Highway Tunnel Considering Fire Control[J].MODERN TUNNELLING TECHNOLOGY,2019,56(S2):485-493.

[18]王明年,李琦,于丽,等.高海拔隧道通风、供氧、防灾与节能技术的发展[J].隧道建设(中英文),2017,37(10):1209-1216.
WANG Mingnian,LI Qi,YU Li,et al.Development of New Technlogies for Ventilation,Oxygen Supply,Disaster Prevention and Energy Saving for High-altitude Tunnels[J].Tunnel Construction,2017,37(10):1209-1216.

[19]中华人民共和国交通运输部.公路隧道通风设计细则:JTG D70／2T-02-2014[S].北京:人民交通出版社,2014.
Ministry of Transport of the People’s Republic of China.Guidelines for Design of Ventilation of Highway Tunnels:JTG D70／2T-02-2014[S].Beijing:China Communications Press,2014.

[20]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 Panshi,LIU Chang,LUO Gang.Optimization Study on Ventilation Scheme for Inclined Shaft and Main Tunnel of Extra-Long Highway Tunnel[J].China & Foreign Highway,2022,42(1):187-192.

[21]杨涛,曾岳凯,李培军,等.不同纵坡隧道自然排烟竖井合理参数研究[J].中外公路,2025,45(3):191-198.
YANG Tao,ZENG Yuekai,LI Peijun,et al. Study on Reasonable Parameters of Natural Smoke Exhaust Shafts in Tunnels with Different Longitudinal Slopes[J].Journal of China & Foreign Highway,2025,45(3):191-198.

[22]高恒潮,陶家清,陈训,等.公路隧道断面横向双火源火灾烟气控制风速研究[J].中外公路,2026,46(1):205-212.
GAO Hengchao,TAO Jiaqing,CHEN Xun,et al.Smoke Control Wind Speed of Transversal Double-Source Fire in Road Tunnel Sections[J].Journal of China & Foreign Highway,2026,46(1):205-212.

[23]郑建国,黄兵,林国进,等.雅康高速二郎山隧道多功能交通转换带设计与分析[J].中外公路,2021,41(6):296-301.

[24]王安民,彭维圆,何佳银,等.三车道大交通流公路隧道火灾人员安全疏散[J].公路交通科技,2024,41(4):167-175.
WANG Anmin,PENG Weiyuan,HE Jiayin,et al. Pedestrian Evacuation under Fire in Three-lane Highway Tunnel with Large Traffic Flow [J].Journal of Highway and Transportation Research and Development,2024,41(4):167-175.

[25]赵文忠,罗宇,戎贤.基于 FDS 的高速公路隧道火灾人员疏散研究[J].消防科学与技术,2020,39(12):1683-1687.
ZHAO Wenzhong,LUO Yu,RONG Xian.Study on evacuation from highway tunnel fire based on FDS [J].Fire Science and Technology,2020,39(12):1683-1687.