

文章编号: 1671-6612 (2024) 06-846-07

澳门轻轨东线隧道通风系统方案研究

刘伟 张倩文 汪红 高文鹏

(中铁大桥勘测设计院集团有限公司华东分公司 南京 210031)

【摘要】 为研究澳门轻轨东线隧道通风系统, 分别对工可方案及相关规范开展了详细分析与研究; 结合内地地铁设计经验及相关规范, 对工可阶段隧道通风系统进行了优化, 减少了隧道风机、活塞风井的设置数量, 将跨海段通风区段由 3 段优化为 2 段, 为避免隧道建设对海域环境的影响, 取消中间风井设置, 通过合理组织通风, 将跨海段隧道上部风道由双风道优化为单风道, 隧道直径由 13.5m 优化减小到 12.1m, 上述优化设计, 既满足了隧道通风效果及澳门地区特殊的设备要求, 也较大幅度地降低了投资, 全线隧道通风系统整体造价减少约 46%, 跨海段盾构隧道造价减少约 49%。在工期方面, 隧道全线工期缩短 8~10 个月, 其中跨海段工期可缩短 4~6 个月。另外, 分析了隧道风机设置、耐火、不同工况下的气流组织, 为类似工程隧道通风设计方案提供了参考, 同时全面介绍了澳门轻轨东线隧道通风系统。

【关键词】 澳门; 轻轨; 胶轮列车; 地铁; 隧道通风; 隧道风机; 耐火极限
中图分类号 U231.5 文献标志码 A

Research on Tunnel Ventilation System of Macao Light Rail East Line

Liu Wei Zhang Qianwen Wang Hong Gao Wenpeng

(China Railway Major Bridge Reconnaissance Design Institute Co., Ltd, Nanjing, 210031)

【Abstract】 To explore the tunnel ventilation system of the Macao Light Rail East Line, a detailed analysis and research were conducted on the feasibility study plan and relevant specifications; Based on Chinese mainland metro design experience and relevant specifications, the tunnel ventilation system during the feasibility study stage has been optimized, reducing the number of tunnel fans and piston air shafts. The ventilation section of the cross sea section has been optimized from 3 sections to 2 sections. To avoid the impact of tunnel construction on the marine environment, the middle air shaft has been canceled. By organizing ventilation reasonably, the upper air duct of the cross sea section tunnel has been optimized from double air ducts to single air ducts. The diameter of the tunnel has been optimized from 13.5m to 12.1m. The above optimized design not only meets the ventilation effect of the tunnel and the special equipment requirements in Macao, but also significantly reduces investment, the overall cost of the ventilation system for the entire tunnel has been reduced by about 46%, and the cost of the cross sea tunnel has been reduced by about 49%. In terms of construction period, the entire tunnel construction period has been shortened by 8-10 months, with the cross sea section shortened by 4-6 months. In addition, the setting of tunnel fans, fire resistance, and airflow organization under different working conditions were analyzed, providing reference for similar engineering tunnel ventilation design schemes. At the same time, a comprehensive introduction was given to the tunnel ventilation system of the Macao Light Rail East Line.

【Keywords】 Macao; Light rail; Rubber tired trains; Metro; Tunnel ventilation; Tunnel fan; Fire resistance limit

0 引言

澳门特别行政区由澳门半岛和氹仔、路环二岛

以及路氹城(路氹填海区)组成, 人口密度高。为应对往来澳门半岛、新城 A 区、新城 E 区及氹仔

地区的庞大交通需求, 轻轨东线应运而生。相对内地地铁^[1-4], 澳门轻轨有其独有特点, 首先是所用车辆为胶轮列车, 其轨道及供电均有别于内地的轻轨列车; 其次, 建造所用标准以澳门地区本地及欧美标准为主, 内地标准为辅; 其三, 隧道通风系统相关做法及要求有别于内地地铁、轻轨; 其四, 设备及其他要求有别于内地。鉴于澳门轻轨东线与内地地铁、轻轨有众多不同之处, 关于澳门轻轨介绍及研究较少, 主要集中在澳门轻轨网络构建、可持续发展、绿色设计及建造工艺方面^[5-8], 没有关于澳门轻轨隧道通风系统方面的研究, 为便于内地地铁设计借鉴与了解, 通过隧道通风方案研究过程, 全面介绍澳门轻轨东线隧道通风系统。

1 工程概况

澳门轻轨东线工程总体呈南北走向, 连通澳门半岛、填海新城 A 区、填海新城 E 区及氹仔岛, 最终与现有澳门轻轨氹仔线氹仔码头站连接, 线路设计时速为 80km/h, 采用 DC750V (直流) 供电。线路全长约 7.43km (左线长度), 全线共新建车站 6 座 (暂定车站名称分别为 ES1~ES6), 最大站间距为 3198m, 为 ES5 至 ES6 站 (跨海段); 最小站间距为 556m, 为 ES4 至 ES5 站, 平均站间距 1342m; 其中起点自氹仔码头站西北段预留桥梁界

面处引出, 终点站 ES1 站为折返站并预留澳门半岛内港线接轨条件, ES4 站预留与规划 MZ 线换乘条件。

澳门轻轨东线工程不新购运营车辆, 利用氹仔线车辆运营。现有车辆采用 4 节编组胶轮 APM 车型, 澳门轻轨东线工程与现有氹仔线贯通运营, 同时土建工程预留氹仔线、石排湾线、横琴线接入以及将来澳门地区轨道交通网络建设和运营资源共享的要求。

2 隧道通风设计依据规范

根据招标文件及业主要求, 设计文件及图纸应参照中国澳门当地法规及欧美规范开展设计, 对于规范中无明确规定的可参照国内相关规范开展相关设计, 对于隧道通风, 主要参考的规范为: 澳门消防法例《防火安全规章》第 24/95/M 号法令 (简称 24/95/M 法令)^[9]、澳门《预防和控制环境噪音》第 8/2014 号法律^[10]、美国《NFPA-130》固定轨道运输和客运铁路系统标准 (2020)^[11]、《NFPA-502》公路隧道、桥梁和其他有限通道公路标准 (2020)^[12]、《NFPA-92》烟雾控制系统标准 (2018)^[13]等。

3 隧道通风方案研究

3.1 工可阶段隧道通风方案

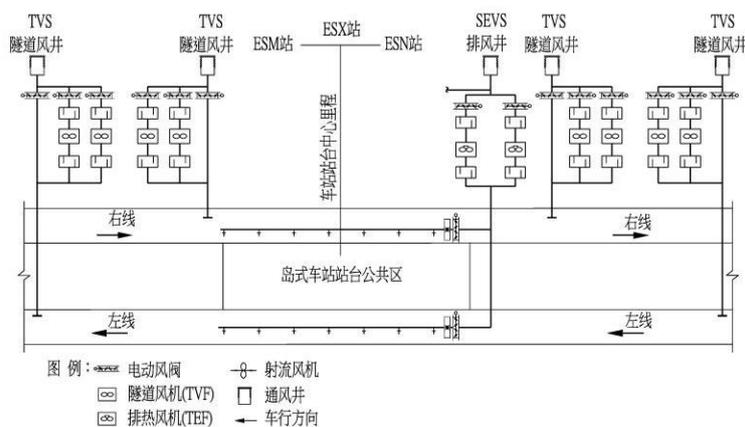


图 1 工可标准站隧道通风原理图

Fig.1 Tunnel ventilation schematic diagram of Gongke Standard Station

工可方案中, 区间隧道采用纵向通风方式, 跨海区间采用分段纵向通风, 其他区间采用不分段的纵向通风; 车站隧道采用半横向通风方式, 在轨行区有效站台范围内及停车线设置轨顶风道。在火灾

规模取值方面, 工可阶段车辆火灾规模按照新采购车辆取值 6MW, 未取已运营氹仔线车辆的实际 3.6MW 的火灾规模。在火灾发生次数方面, 按照一条线路同一时间只发生一次火灾考虑。在隧道风

机配方面，利用地铁隧道热环境模拟软件 SES 模拟，选择配置隧道风机风量与数量，车站两端设置隧道风机（TVF 风机），车站一端设置排热风机（TEF 风机），隧道风机和排热风机均设置备用风机，车站每端设置 4 台风量 $80\text{m}^3/\text{s}$ （跨海段为 $110\text{m}^3/\text{s}$ ）的 TVF 风机，车站一端设置 2 台风量 $25\text{m}^3/\text{s}$ 的 TEF 风机。活塞风井设置方面，所有车站两端均采用双活塞风井，风井对室外地块需求较大。各工况运行模式方面，正常运行时，利用列车运行的活塞效应，使隧道与外界通风换气；区间阻塞工况时，根据列车的阻塞地点对阻塞段区间隧道进行机械通风，保证该段区间隧道内温度不超标；当列车发生阻塞或火灾时，通过多台风机的组合运行，在隧道内有效组织纵向气流，满足排烟、排热要求。车站标准车站隧道通风设置如图 1 所示。

跨海段，隧道采用大盾构形式穿越海域，盾构直径为 13.5m （外径），隧道内加设中隔墙，设计为防火墙，将隧道分为 2 个相对独立的部分，墙上每 244m 开设防火门 1 个，为人员疏散使用。盾构断面如图 2 所示。

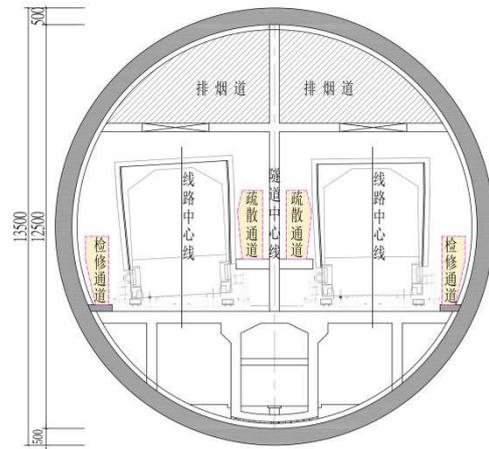


图 2 工可跨海段隧道断面图

Fig.2 Cross sea tunnel section diagram of Gongke Standard Station

盾构采用分段通风，在跨海段海岸附近设置两处中间风井，将跨海隧道分成 3 个通风区间，在中间风井附近的（ 200m 范围内）盾构区间，利用圆形隧道上部比空间在两条线路的顶部各设置一条土建通风道，每条土建风道面积约 14m^2 ，分别负担左右线执行通道的通风，其他区段的盾构区间不设置轨顶风道，具体设置情况如图 3 所示。

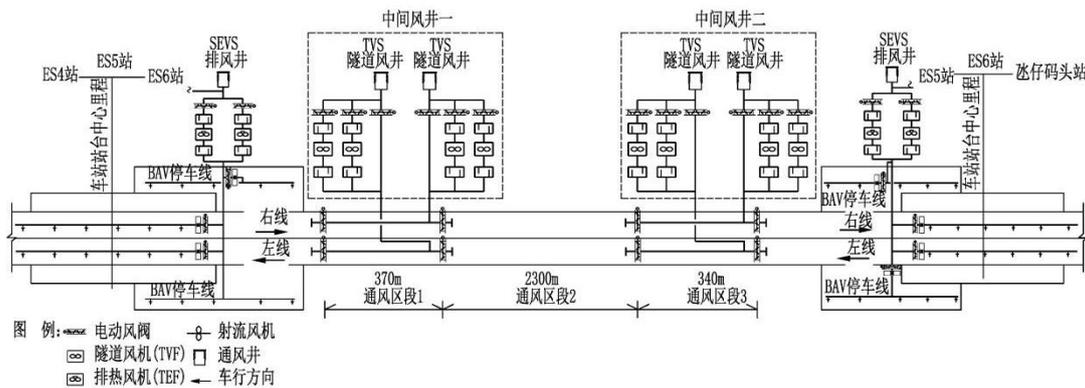


图 3 工可跨海段隧道通风原理图

Fig.3 Cross sea tunnel ventilation schematic diagram of Gongke Standard Station

3.2 隧道通风方案优化

根据工可阶段隧道通风系统设计方案，依据《防火安全规章》第 24/95/M 号法令（2016 修订草案）、《NFPA-130》（2020）、《NFPA-502》（2020）等技术标准，对隧道通风系统进行优化，具体优化有以下几点：

首先，减少隧道风机设置数量。将每台风机均设置备用风机，优化为隧道风机互为备用，在隧道内同一时间只发生一处火灾情况下，完全能满足隧道通风需求，将车站每端设置的隧道 TVF 风机数量由 4 台

调整为 2 台，减少了一半 TVF 风机设置，详见图 4。

其次，参照内地相关研究^[14-16]，将标准车站双活塞风井优化为单活塞风井。考虑澳门紧张用地现状，减小项目拆迁占地阻力，将标准站活塞风井数量由每端 2 个优化为每端 1 个，对于存在中间疏散楼梯（出地面）的区间，因其在一条隧道火灾，另一条发生阻塞的极端情况下两条隧道通风方向不一致，保留此区间两端双活塞风井设置。对于跨海段，考虑多种工况气流组织需求，保留车站两端双活塞风井设置，具体详见图 4、图 5。

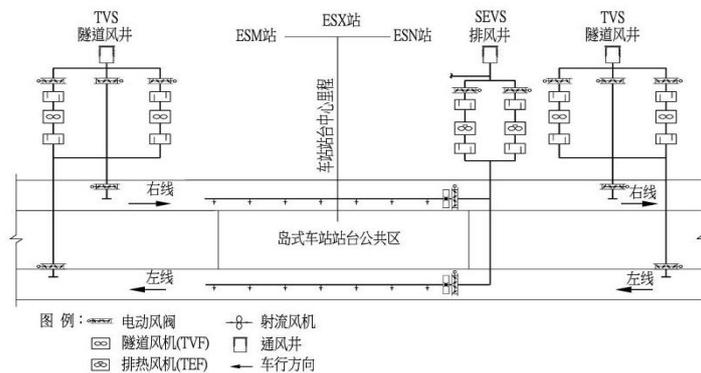


图 4 典型车站隧道通风原理图

Fig.4 Typical Station Tunnel Ventilation Principle Diagram

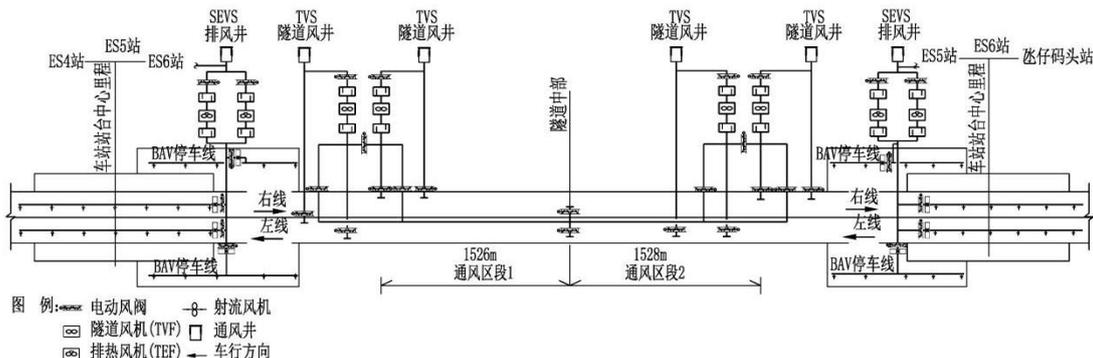


图 5 跨海段隧道通风原理图 (一)

Fig.5 Ventilation schematic diagram of Cross Sea Tunnel (1)

其三, 火灾规模取值方面, 因本延伸线不新采购车辆, 故参照氹仔线已运营车辆实际火灾规模取值, 火灾规模取 3.6MW。

其四, 优化跨海段隧道通风方式。结合工可方案, 跨海段有多种通风方案可选, 具体方案如下:

方案一: 采用小盾构方式跨海, 单洞单线, 隧道通风为 2 段纵向通风方式, 在海域中部设置一处中间风井, 两洞隧道之间设置多处联络通道。

方案二: 采用工可方案, 大盾构方式跨海, 单洞双线, 隧道通风为 3 段纵向通风方式, 在盾构上

方设置两个风道分别负担左右线通风, 在海岸附近设置两处中间风井, 将隧道通风分为 3 段。

方案三: 大盾构方式跨海, 单洞双线, 隧道通风为 2 段纵向通风方式, 在盾构上方设置一个风道负担左右线通风, 海域内不设置中间风井。

方案四: 大盾构方式跨海, 单洞双线, 隧道通风为半横向通风方式, 在盾构上方设置两个风道, 风道内每隔 60m 在左右线分别设置风阀, 负担左右线通风排烟, 如图 6 所示。

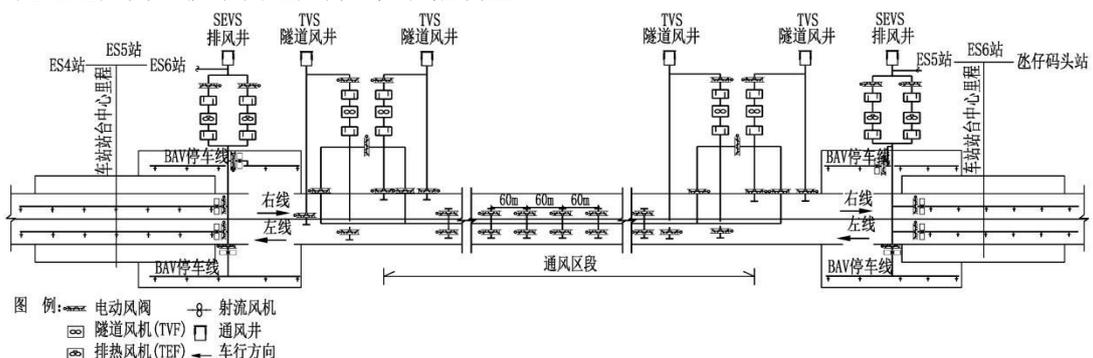


图 6 跨海段隧道通风原理图 (二)

Fig.6 Ventilation schematic diagram of Cross Sea Tunnel (2)

各通风方案对比如表 1 所示。

表 1 各通风方案对比表

Table 1 Comparison Table of Various Ventilation Plans

方案	方案介绍	优缺点分析	结论
方案一	小盾构+1 处中间风井+2 段纵向通风	1.盾构直径 7m, 直径小, 造价低, 较方案三造价低约 30%; 2.排烟工况较少, 与方案三相当, 气流顺畅; 3.工期较方案三多 2~3 个月; 4.因《NFPA-130》(2020 版) 6.3 条规定, 隧道出地面的疏散出口最大间距不应超过 762m (2500 英尺), 当超过时可设置间距不大于 244m (800 英尺) 的横向疏散通道, 此区间为跨海段, 只能设置十余处的联络通道, 施工风险及施工难度均较大、风险点多	不推荐
方案二	大盾构+双风道+2 处中间风井+2 段纵向通风	1.通风区段间距小, 通风效果好; 2.设置双风道及双风井, 盾构直径 13.5m (工可尺寸), 直径大, 工程规模大, 投资高, 较方案三多约 49%; 3.海岸附近设置两处中间风井, 对海域环境影响大; 4.工期较方案三多 4~6 个月; 5.每个区段有多个排烟工况, 致使排烟工况过多, 约为方案三的 4 倍, 控制模式复杂	不推荐
方案三	大盾构+单风道+2 段纵向通风	1.盾构直径 12.1m, 直径相对较小, 无需建设中间风井, 投资较少; 2.通风模式少, 控制简单; 3.上部风道及行车道均为通风通道, 气流组织要求高	推荐
方案四	大盾构+单风道+半横向通风	1.风阀多, 控制模式复杂, 为方案三控制数量的 10 倍以上; 2.风阀+风道漏风量大, 排烟效果难控制; 3.盾构直径 13.5m, 直径大, 投资高, 较方案三多约 40%; 4.工期较方案三多 1 个月左右	不推荐

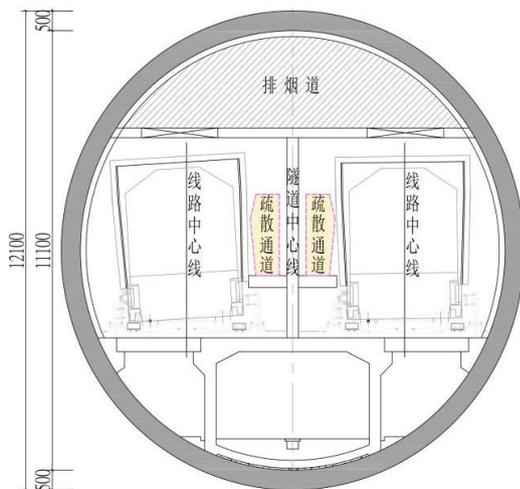


图 7 跨海段隧道断面图

Fig.7 Cross Sea Tunnel Section

综合比选各通风方式, 参考国内相关研

究^[17,18], 最终选择方案三为最终通风方案。相对工可方案, 取消中间风井设置, 将跨海段通风区段由 3 段优化为 2 段, 大盾构上部通风道不设置隔墙, 左右线共用一个通风道; 隧道内仍设中隔墙, 将隧道分为 2 个相对独立的部分, 根据 NFPA-130 墙上每 244m 开设防火门 1 个, 为列车着火时人员疏散使用; 考虑检修时可直接沿疏散通道或轨行区行走, 取消跨海段盾构区间检修通道; 跨海段大盾构直径由 13.5m 优化为 12.1m; 考虑隧道长度大及风道、风阀漏风量, 通过模拟计算, 仍按照工可方案选取风量 110m³/h 的隧道风机。断面如图 7 所示。

3.3 隧道风机及相关要求

3.3.1 风机风量

根据隧道断面尺寸、澳门气象条件、车辆相关参数, 借助地铁隧道热环境模拟软件 SES 模拟, 配置隧道风机风量, 根据模拟结果, TVF 风机风量,

跨海区间为 $110\text{m}^3/\text{s}$, 其他区间隧道风机为 $80\text{m}^3/\text{s}$; 对于 TEF 风机, 所有车站风机风量均为 $25\text{m}^3/\text{s}$ 。

3.3.2 防火要求

根据 24/95/M 法令规定, 排烟风机应设置在专有的机房内, TVF 风机和 TEF 风机为通风兼排烟风机, 应设置在专有机房内, 不同于内地, 将风机设置于风道内即可, 其应在风道内隔出专用机房, 机房耐火等级 (CRF) 参照 24/95/M 法令 VI 类建筑满足 CRF120min 的要求, 机房布置如图 8 所示。

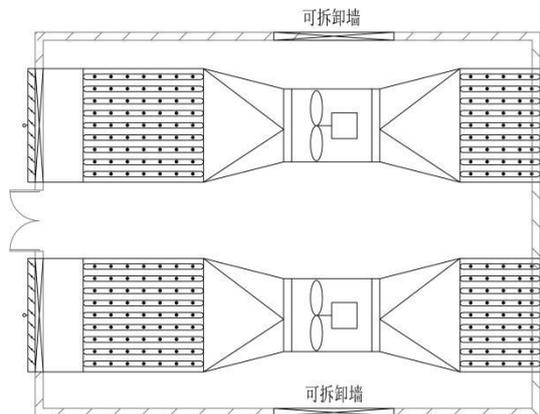


图 8 隧道风机房布置图

Fig.8 Layout of Tunnel Fan Room

对于隧道风机、风阀、风管的耐火要求, 24/95/M 法令规定排风管所用材料以及所用风机应保证在烟或热气达到 400°C 高温情况下, 在结构耐火性能所要求的时间内保持正常运转, 因目前市场中无 400°C 排烟风机, 且地铁隧道风机房间隔墙耐火等级为参照工业建筑取的高值, 经综合考量, 参照内地规范^[9]并提高耐火时间, 隧道风机、风阀、风管的防火要求为满足 250°C 条件下 120min 的耐火极限。

3.4 运行工况

3.4.1 正常运行工况

正常运行时, 利用车辆运行产生的活塞效应, 使隧道与外界通风换气, 维持温度不超过 40°C 设计 (参照《地铁设计规范》(GB 50157-2013))。

3.4.2 区间阻塞工况

当车辆因事故阻塞在区间隧道时, 根据车辆阻塞地点对阻塞段区间隧道进行机械通风, 保证该区间隧道内温度不超过 40°C , 且最不利点温度满足列车空调冷凝器工作温度 (45°C)。考虑列车远期最短发车时间间隔 (120s)、列车平均速度 (60km/h), 预计在一个通风段内有一列车辆的最

长隧道长度为 2000m 左右, 故对于区间长度超过 3000m 的跨海区间, 存在两辆列车同时阻塞的极端情况, 轨顶风道是隧道通风分区设计的重要组成部分, 其将隧道分成 A 和 B 两个通风区段, 发生极端阻塞情况时, 一端车站向区间送风, 另一端车站排风, 经模拟验证, 该种通风方式可有效保证阻塞通风, 且该段区间风速大于 2m/s ; 对于跨海段普通工可阻塞通风, 当车辆阻滞在 A 通风区段时, 靠近 A 的隧道风机向车行隧道送风, 隧道中部阻滞线路上方轨顶风道风阀打开, 另一端隧道风机通过排风道排风, 反之车辆阻滞在 B 通风区段时, 靠近 A 端隧道风机通过通风道向车行道内送风, 另一端隧道风机从车行道排风。

3.4.3 区间火灾工况

对于标准区间, 排烟模式一致, 分车头、车中部着火和车尾着火两种模式。车头着火时排烟方向与车行方向一致, 人员疏散方向与排烟方向相反; 当车尾着火时, 排烟方向与车行方向相反, 人员疏散方向与排烟方向相反。

对于跨海段, 因其存在两辆车同时在区间的情况, 在跨海段区间隧道中部附近风道板左右线各设置一组风阀, 每组 3 个风阀, 风阀尺寸为 $2\text{m}\times 3\text{m}$, 风阀可以作为排烟口, 同时也可以作为送风口, 列车着火时可根据火灾位置组织气流纵向送风, 人员可以通过隔墙上的防火门进入另一条隧道逃生。活塞风井至排烟口之间的距离为 1500m 左右, 而两列车在本区间的最小间距约为 2000m , 因此在活塞风井和排烟口之间不可能同时存在两辆列车。火灾时, 打开中部排烟口, 根据火灾位置的不同, 开启隧道一端 (远离火灾点) 的隧道风机通过排烟道进行排烟, 开启另一端 (靠近火灾点) 的隧道风机通过车行隧道进行送风。

4 结语

澳门轻轨东线, 相对于内地地铁、轻轨, 采用一套独特的车辆、技术标准体系, 诸多方面与内地地铁不同, 所用车辆为胶轮列车, 使用混凝土条形轨道, 采用接触轨 $\text{DC}750\text{V}$ 电压供电。

相对于工可方案, 通过隧道通风系统优化设计, 较大幅度降低了隧道造价, 同时也大幅度缩短了隧道建设工期。造价方面, 优化后的隧道通风系统, 整体造价约为工可方案的 54% , 跨海段盾构隧

道造价约为工可阶段造价的 51%。工期方面,优化后的轻轨东线隧道,全线工期可缩短 8~10 个月,跨海段可缩短 4~6 个月。

在隧道通风设计中,主要参考美国规范,隧道暗埋段长度超过 305m(1000 英尺)时设置机械通风系统,隧道长度在 61m(200 英尺)~305m(1000 英尺)时可设置非机械通风系统。隧道风机及对应阀门耐火要求高,应结合业主需求及市场供货情况综合考量设置各设备材料耐火极限。

隧道通风应结合隧道疏散进行设计,根据疏散通道或疏散出口设置情况合理组织通风模式,澳门轻轨东线疏散通道参照《NFPA-130》(2020)进行设置,对于有条件设置出地面疏散救援通道的区间,按照每 762m(2500 英尺)设置一处疏散救援楼梯间,如果无条件设置出地面的楼梯间,如跨海区间,在隧道每隔 244m(800 英尺)设置一处疏散横通道。

参考文献:

- [1] 朱颖心,江亿,杨旭东,等.地铁系统环控方案分析[J].都市快轨交通,1991(1):21-26.
- [2] 华正博.屏蔽门制式地铁轨行区通风模式研究[D].成都:西南交通大学,2012.
- [3] 姜波.地铁运营初期区间隧道气温变化规律研究[J].都市快轨交通,2018,31(2):113-118.
- [4] 翟毅.地铁隧道通风排烟系统构成及火灾工况运行模式[J].建筑科学,2010,(11):3.
- [5] 林瑞海.澳门轨道交通线网探索与实践[J].现代城市轨道交通,2023,(10):1-7.
- [6] 林瑞海,袁智伟.澳门轻轨系统与可持续发展[C].粤港澳可持续发展研讨会,2013.
- [7] 汤树强.澳门氹仔轻轨车站的绿色设计研究[D].泉州:华侨大学,2021.
- [8] 王文敬,梁斌,陈建国.城市轻轨高架桥胶接缝预制节段箱梁的力学性能研究[J].河南大学学报:自然科学版,2017,47(1):108-114.
- [9] 澳门特别行政区政府第 24/95/M 号法令核准消防安全规章[EB/OL]. [2022-03-12]. https://bo.io.gov.mo/bo/i/95/23/declei24_cn.asp.
- [10] 澳门特别行政区政府第 8/2014 号法律预防和控制环境噪音[EB/OL]. [2024-04-9]. https://bo.io.gov.mo/bo/i/2014/34/lei08_cn.asp
- [11] National Fire Protection Association. Standard for fixed guideway transit and passenger rail systems: NFPA 130-2020[S]. US: NFPA, 2020.
- [12] Standard for Road Tunnels, Bridges, and Other Limited Access Highways: NFPA 502-2020[S]. US: NFPA, 2020.
- [13] Standard for Smoke Control Systems: NFPA 92-18[S]. US: NFPA, 2018.
- [14] 郝娜.地铁隧道通风系统活塞风井布置探讨[J].城市轨道交通研究,2012,15(8):141-144.
- [15] 安伟光,孔维浩,广大庆,等.地铁隧道活塞风演化规律及其对通风安全的影响[J].安全与环境工程,2023,30(5):84-92.
- [16] 胡浩明.地铁隧道内气流分布特征及排热模式研究[D].西安:西安建筑科技大学,2017.
- [17] 李琼.地铁长大区间中间风井设置探讨[J].都市快轨交通,2020,33(4):113-116.
- [18] 张之启.南京地铁过江隧道通风系统方案研究[J].铁道工程学报,2012,29(4):104-107,117.
- [19] 北京市规划委员会.地铁设计规范[M].北京:中国建筑工业出版社,2014.
- [9] 贺伟,朱龙潜.夏热冬暖地区太阳能-空气源热泵热水器的研究[J/OL].制冷与空调, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4519.tb.20240426.1001.002.html>.
- [10] GB 50015-2019,建筑给水排水设计标准[S].北京:中国建筑工业出版社,2019.
- [11] 张志尧,褚赛,林桐,等.集中式太阳能热水系统精细化设计[J].山西建筑,2022,48(20):176-179.

(上接第 845 页)

- [7] 林小辉,张骞,张栋喆,等.高校宿舍太阳能-空气源热泵复合热水系统设计与应用探讨[J].山西建筑,2024,50(13):151-154,198.
- [8] 马一程,席剑飞,蔡杰,等.太阳能-空气源热泵热水系统多水箱设计方案的优化与能效分析[J].太阳能学报,2023,44(10):229-236.