

文章编号: 1671-6612 (2022) 01-054-07

地铁全封闭声屏障阻塞工况自然通风效果模拟研究

刘冰¹ 杨启凡¹ 邵建霖¹ 余涛²

(1. 中铁工程设计咨询集团有限公司 北京 100055; 2. 西南交通大学 成都 610031)

【摘要】 全封闭声屏障的设计可有效减小地铁列车在高架线上运行产生的噪声。针对北京某地铁线路高架段的全封闭声屏障结构,采用三维数值模拟计算的方法,对列车阻塞工况该高架段全封闭声屏障顶部不同开口下的自然通风效果进行模拟研究。结果表明:全封闭声屏障顶部不开口时,阻塞工况声屏障内空气平均温度最高可达70℃,不满足设计要求;相同开口率下,开口位置越靠近声屏障顶部中间位置,声屏障内通风换气量越大,热气流越易从顶部开口处流出,降温效果越好;开口位置靠近声屏障侧面时,顶部热气流较难排出,通风效果差;声屏障顶部采用通风消声百叶净开口率为5%时,各断面空气平均温度仍低于40℃,满足设计要求。

【关键词】 地铁;全封闭声屏障;噪声治理;通风效果;数值模拟

中图分类号 U231+.5 文献标识码 A

Numerical Study on Ventilation Effect of Fully-enclosed Noise Barrier for Subway under Blocking Condition

Liu Bing¹ Yang Qifan¹ Shao Jianlin¹ Yu Tao²

(1.China Railway Engineering Design and Consulting Group Co., Ltd, Beijing, 100055;

2.Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031)

【Abstract】 The design of fully-enclosed sound barrier can effectively reduce the noise generated by the subway train running on the elevated line. Aiming at the fully-enclosed sound barrier structure of an elevated section of a subway line in Beijing, the natural ventilation effect of the fully-enclosed sound barrier at the elevated section with different openings under the blocking condition is studied by using the method of three-dimensional numerical simulation. Results show that when there is no opening at the top of the fully-closed sound barrier, the average air temperature inside the sound barrier under blocking condition can reach up to 70 °C, which does not meet the design requirements. Under the same opening rate, when the opening position is closer to the middle of the top sound barrier, the ventilation rate in the sound barrier is larger. Warm air flow flows out from the opening more easily, and the cooling effect is excellent. When the opening is close to the side of the sound barrier, it is difficult to remove the warm air at the top, and the ventilation effect is poor. When ventilation silencing louvers are adopted at the top of the sound barrier with the net opening rate of 5%, the average air temperature of each section is still lower than 40°C, meeting the design requirements.

【Keywords】 subway; fully-enclosed sound barrier; noise control; ventilation effect; numerical simulation

作者(通讯作者)简介:刘冰(1982.03-),男,硕士研究生,高级工程师,E-mail:328348175@qq.com
收稿日期:2022-01-07

0 引言

地铁列车在市区高架线上运行时,对附近的地

面建筑物产生严重的噪声污染,需采取减振降噪措施保障周围的噪声环境质量^[1]。声屏障是城市轨道

交通地面段噪声污染的主要治理措施, 通常采用直立开敞型或下部直立顶部弧形的全封闭声屏障形式, 可有效治理地铁高架线上的噪声污染^[2-4]。全封闭声屏障的降噪效果虽好, 但对声屏障内的热环境和排烟效果造成不利影响^[5,6]。列车在声屏障区间内正常运行时, 会产生较强的活塞风, 与外部空气的掺混强, 区间内温度不会太高。但列车因事故阻塞在声屏障区间内时, 大量放热引起列车周围空气温度迅速升高; 同时, 由于夏季太阳辐射强, 全封闭声屏障顶部采用透光材料, 太阳辐射进入后加热声屏障内部, 声屏障内外的换气和换热弱, 内部热环境差, 空气温度过高可导致列车空调系统无法正常运行^[7]。结合火灾排烟需求, 声屏障顶部不能完全封闭, 顶部可设置通风消声百叶开口, 使各工况下声屏障内外进行通风换气, 有助于改善全封闭声屏障的排热和排烟效果。

目前, 针对全封闭声屏障通风设计的研究较少, 《地铁设计规范》GB 50157-2013^[7]也未对其进行明确规定。声屏障顶部开口的通风设计方案可满足排热和排烟需求, 开口面积越大越有利于通风和排烟, 但由此导致的漏声现象会大大降低声屏障的隔声效果。近年来, 降噪减振措施、景观设计方案、结构动力性能分析等是地铁声屏障的研究重点。刘磊等^[6]基于流体动力学的三维数值仿真方法, 研究了地铁全封闭声屏障的自然排烟性能及影响因素。刘磊等^[8]还利用 CFD 方法对列车通过双线桥封闭式声屏障全过程的活塞风压进行了模拟分析。对顶部开口的地铁全封闭声屏障自然通风效果开展研究, 在满足通风排热要求的同时降低漏声量, 解决通风与降噪的矛盾, 对全封闭声屏障降噪的发展具有重要的意义。

本文以北京地铁 5 号线某区间高架段的全封闭声屏障为研究对象, 采用三维数值模拟计算方法研究列车在该高架段阻塞时全封闭声屏障顶部不同开口下的内部空气温度分布及自然通风换气效果, 为类似地铁工程的降噪设计提供参考。

1 工程概况

北京地铁 5 号线是首条贯穿城市中心、连接南北郊地区的快速轨道交通干线, 线路南起丰台区宋家庄站, 北至昌平区天通苑北站, 线路全长 27.5km, 其中地下段 21.5km、地面段 1km、高架段 5.5km。

共设 23 座车站, 其中地下站 16 座、地面站 1 座、高架站 6 座, 采用 6 节编组 B 型车。天通苑南站、天通苑站、天通苑北站为高架侧式车站, 对应有 3 个区间为高架明线, 为治理高架段周边噪声, 需要在高架段增设全封闭声屏障, 其结构示意图如图 1 所示。竖向声屏障板每侧高度 2.5m, 顶部一侧封闭, 另一侧采用 6mm 厚的 4 块聚碳酸酯板形成全封闭声屏障, 部分不安装时对应顶部开口率为 10%、20%、30%、40%。

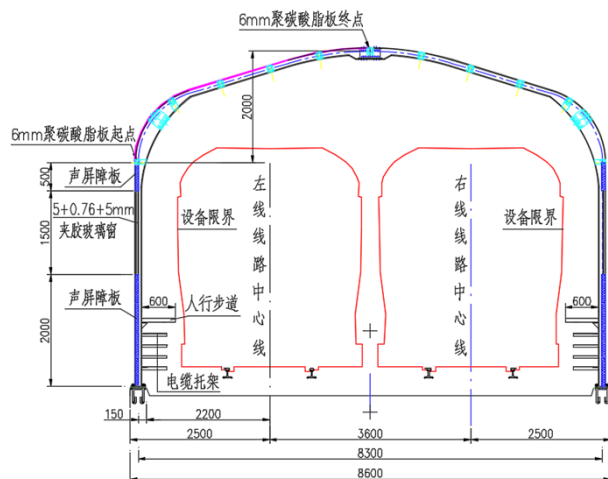


图 1 全封闭声屏障构造示意图 (单位: mm)

Fig.1 Schematic diagram of fully-enclosed sound barrier (Unit: mm)

2 三维数值模拟计算方法

本文采用三维 CFD 数值模拟计算方法建立全封闭声屏障的数值计算模型, 通过模拟获得声屏障内部的温度和风速分布, 从而评价声屏障的自然通风效果。

2.1 基本控制方程

声屏障内气流运动过程遵守流体力学的三大守恒定律和基本控制方程^[9], 其微分方程的通用形式为:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho u\phi) = \text{div}(\Gamma \text{grad}\phi) + S \quad (1)$$

式中, ϕ 为通用变量; Γ 为广义扩散系数; S 为广义源项。

模拟计算采用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型对控制方程进行求解。由于太阳辐射进入声屏障内后加热表面使其温度升高, 同时列车高温表面也会散热, 采用 Boussinesq 假设^[10]来模拟声屏障内部的自然对流

换热过程。

2.2 物理模型

列车在声屏障区间内正常运行时有较强的活塞风作用，热环境可满足设计要求。火灾时，顶部的开口可满足自然排烟^[6]。声屏障内有列车阻塞时，一方面声屏障内受太阳辐射得热的影响，另一方面列车空调冷凝器也向声屏障内散热，声屏障内空气流动弱，空气温度较高，可能使列车空调无法运行。因此，阻塞工况是声屏障内通风换气的最不利工况。本文仅考虑列车静止阻塞于声屏障内的自然通风效果，将列车简化为长方体，断面尺寸 3.6m×3.2m，断面积 11.52m²。忽略实际声屏障结构螺栓连接以及纵向梁间支撑等影响，断面简化模型如图 2 所示。顶部左侧的 4 处聚碳酸酯板可不安装，4 块板全开、开 3 块板、开 2 块板、开 1 块板时顶部声屏障开口率依次对应为 40%、30%、20%、10%。

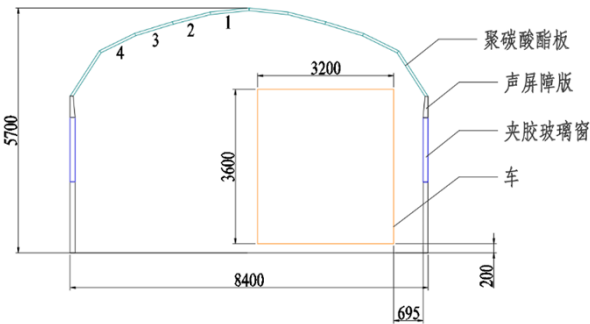


图 2 全封闭声屏障断面简化示意图 (单位: mm)

Fig.2 Simplified schematic diagram of fully-enclosed sound barrier (Unit: mm)

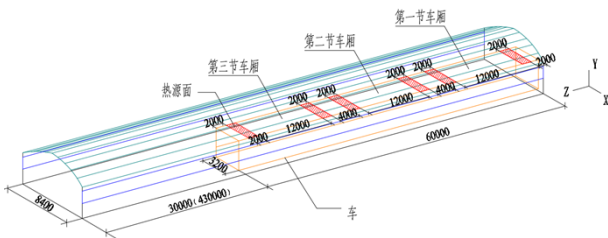


图 3 列车阻塞于声屏障内的物理模型图 (单位: mm)

Fig.3 Physical model of train congested in the sound barrier (Unit: mm)

列车阻塞于声屏障内的物理模型如图 3 所示，考虑对称性，列车采用 3 节共 60m 长的模型，列车顶部空调冷凝器简化为面热源散热。为确定顶部开口率的影响及减小计算量，首先建立总长度 90m 的声屏障模型一，除列车段外的区间长度取 30m。

确定开口率的影响后，为使计算模型更贴近实际情况，再建立总长度 490m 的声屏障模型二，除列车段外的区间长度取 430m，根据对称性相当于模拟了一个完整区间。

模拟中需要考虑声屏障壁面的导热，实际声屏障结构的组成材料及热物性参数如表 1 所示。

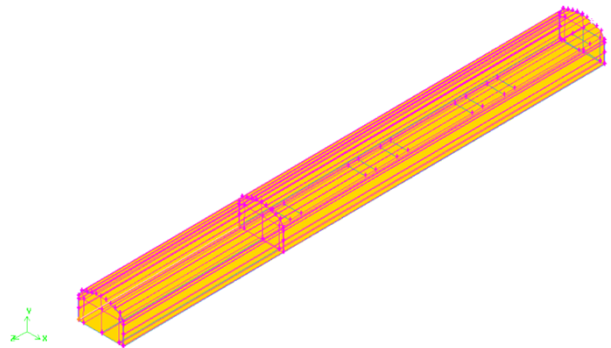
表 1 材料热物性参数

Table 1 Thermal properties of material

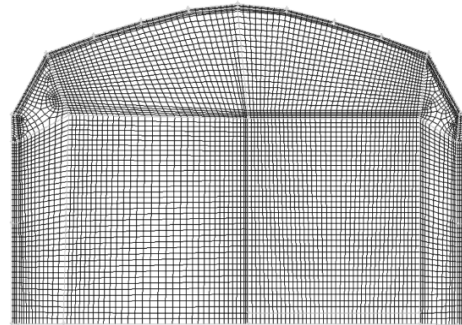
材料	导热系数 /[W/(m·K)]	密度 /(kg/m ³)	比热 /[J/(kg·K)]	可见光 透光率
声屏障板	0.04	40	1060	—
聚碳酸酯板	0.19	1200	900	0.88
夹胶玻璃窗	0.70	2500	840	0.80

2.3 数值计算模型

采用 GAMBIT 软件建立该段声屏障的三维数值计算模型，如图 4 所示。为准确模拟表面附近的流动和传热，对车体附近以及壁面位置进行网格加密，采用结构化网格进行网格划分，模型一和模型二的网格总数分别为 5782006 个和 15647714 个。划分网格后的模型导入 Fluent 软件中进行设置和模拟计算。



(a) 全封闭声屏障整体数值计算模型



(b) 声屏障断面数值模型

图 4 声屏障数值计算模型

Fig.4 Numerical models of the sound barrier

2.4 边界条件

(1) 太阳辐射强度

由于顶部聚碳酸酯板以及两侧夹胶玻璃窗具有较好的透光性, 应考虑声屏障内太阳辐射得热的影响。本模拟采用 Fluent 软件的太阳辐射计算模型, 太阳辐射取北京夏季最热月 7 月每天 14 点的平均值 $700\text{W}/\text{m}^2$, 同时考虑壁面间的长波辐射换热, 开启 S2S 辐射模型进行计算。

(2) 边界条件设置

声屏障外的空气温度取夏季通风计算温度 30.0°C ^[11], 声屏障结构内表面为耦合边界条件, 列车侧为对称边界条件, 声屏障入口侧为压力入口边界。列车顶部采用面热源散热, 考虑中午非高峰时间段空调系统一半负荷运行, 每块面热源强度为 18kW 。声屏障顶部聚碳酸酯板开启时采用压力出口条件。

3 结果及分析

采用三维 CFD 软件模拟了声屏障顶部不同开口下列车阻塞于声屏障内空调系统运行时, 声屏障内受太阳辐射得热和空调冷凝器散热同时作用下的自然通风效果。

3.1 模型一不同开口率及开口位置下的自然通风效果

(1) 声屏障内断面平均温度分布

为研究声屏障顶部开口率对自然通风效果的影响, 对模型一在不同开口率下声屏障内沿程断面空气平均温度进行分析, 结果如图 5 所示。图中, 0open 表示顶部全封闭不开口; 1open 表示顶部开口率为 10%, 开图 2 中的板 1; 2open 表示顶部开口率为 20%, 开图 2 中的板 1、2; 3open 表示顶部开口率为 30%, 开图 2 中的板 1、2、3; 4open 表示顶部开口率为 40%, 开图 2 中的板 1、2、3、4。

从图 5 可以看出, 如果声屏障顶部不开口, 列车阻塞位置处由于太阳辐射得热和列车散热, 将导致声屏障内空气温度极高, 对称面附近 (车中部)

最高温度可达到 70°C , 无法满足设计要求。开口率 10% 至 40% 时的内部空气温度分布比较接近, 均低于 40°C 。

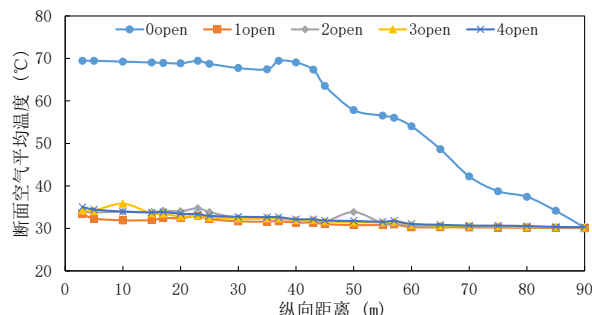


图 5 模型一声屏障内断面平均温度分布

Fig. 5 Average temperature distribution inside the sound barrier of model 1

(2) 声屏障内换气量和换热量

进一步分析模型各进出口的换气量和换热量, 结果如表 2 和表 3 所示。表中进口表示声屏障左侧的压力入口, 出口表示声屏障顶部的各个开口。流量正值表示空气从外界流入声屏障, 负值表示空气从声屏障流出; 热量正值表示从声屏障排走的热量, 负值表示从外界带入声屏障内的热量。

开口率为 20% 时进出口流量和换热量都最大, 开口率为 10% 时进出口流量和换热量次之。声屏障内热空气在顶部累积, 形成较强的热压作用, 外界空气从压力入口进入, 热空气从顶部流出。相同开口率下, 开口部位越靠近顶部中间位置换气量和换热量均越大。如开板 1 比开板 4 的通风换热效果好, 主要是由于中间部位更接近冷凝器所在部位, 冷凝器上方的热空气更易流出; 而当开口位置越靠近侧边, 离冷凝器位置越远, 热空气在冷凝器上方累积不易排除, 开口位置处空气温度稍低, 换热和换热量都相应减少。图 6 给出了进出口总空气流量, 顶部 2 个开口时进出口流量最大; 当靠近侧边的板 3 和板 4 开启时, 流量小很多。声屏障内由于热空气的浮升力作用, 热量累积在顶部, 开顶部开口时自然通风效果更好。

表 2 不同开口情况下时进出口空气流量 (kg/s)

Table 2 Air flow rate at the inlet and the outlet with different openings (kg/s)

	1open		2open		3open		4open
开口部位	1	4	1、2	3、4	1、2、3	2、3、4	1、2、3、4
开口率	10%		20%		30%		40%

续表 2 不同开口情况下时进出口空气流量 (kg/s)

	1open		2open		3open		4open	
出口	1	-83.8	---	-54.5	---	-53.0	---	-53.1
	2	---	---	-30.1	---	-28.8	-50.4	-29.2
	3	---	---	---	-47.0	-0.2	-19.1	-0.6
	4	---	-73.2	---	-28.3	---	-7.8	3.4
进口	83.8	73.2	84.6	75.3	82.0	77.3	79.4	

表 3 不同开口情况下时进出口空气热量 (W)

Table 3 Thermal energy of air at the inlet and the outlet with different openings (W)

	1open		2open		3open		4open	
开口部位	1	4	1、2	3、4	1、2、3	2、3、4	1、2、3、4	
开口率	10%		20%		30%		40%	
进口	1	-572667.9	---	-413197.7	---	-393062.8	---	-401465.0
	2	---	---	-220036.3	---	-226629.3	-372609.1	-215885.1
	3	---	---	---	-354114.2	-52415.2	-162639.0	-52635.4
	4	---	-654101.7	---	-221968.7	---	-110297.1	-46594.9
出口	420643.4	364357.8	424024.1	377217.5	410035.4	386833.8	396789.6	

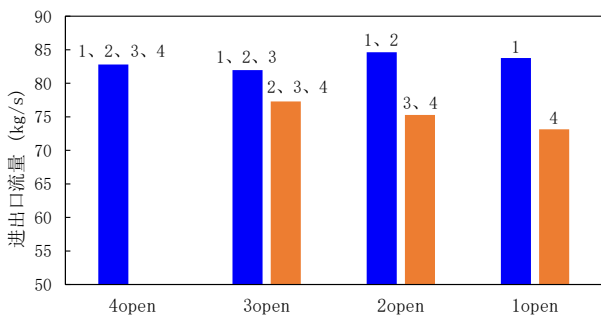


图 6 不同开口位置进出口空气流量

Fig.6 Air flow rate under different openings

(3) 不同开口位置时的断面温度分布

图 7 和图 8 分别给出了靠侧面开口和从顶部开口时第一节车厢中间断面处的温度分布, 温度高

于 40℃ 的区域不显示, 1open (1) 和 1open (4) 分别表示只开板 1 和板 4, 对应开口率 10%, 其他类似。声屏障内部得热量大, 不开口时断面温度均高于 40℃。有开口时, 外部气流流入对内部进行降温, 温度最高位置基本位于列车顶部及右侧区域。对比相同开口率但不同开口位置的结果, 开口位置越靠近顶棚中部的排热效果越好。图 7 中, 10% 开口率, 开口位于板 4 时, 车顶部部分区域温度超过 40℃, 因为板 4 位于边缘处, 不利于顶部散热。图 8 中, 10% 开口率、开口位于板 1 时, 车顶部温度在 40℃ 以内, 因为板 1 位于声屏障顶部, 有利于顶部散热。当采用 1 个开口时, 应布置在最顶部, 自然通风排热效果好。

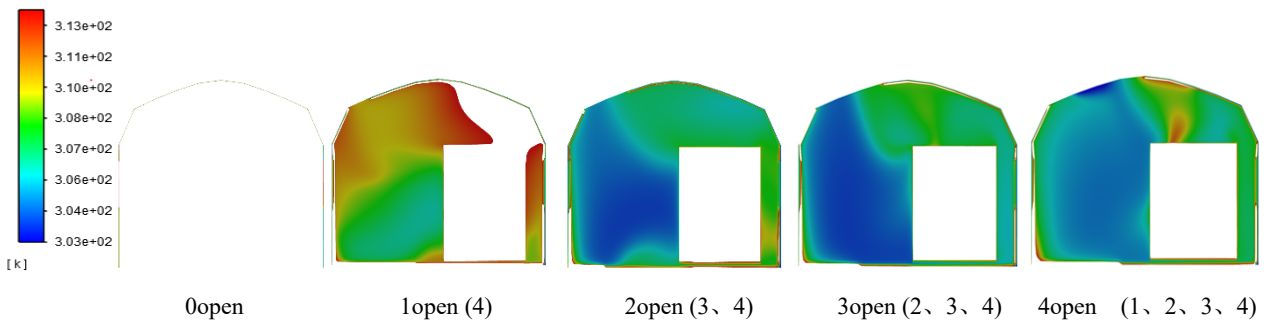


图 7 靠侧面开口时第一节车厢中间断面温度分布

Fig.7 Surface temperature distribution of the first carriage with the side openings

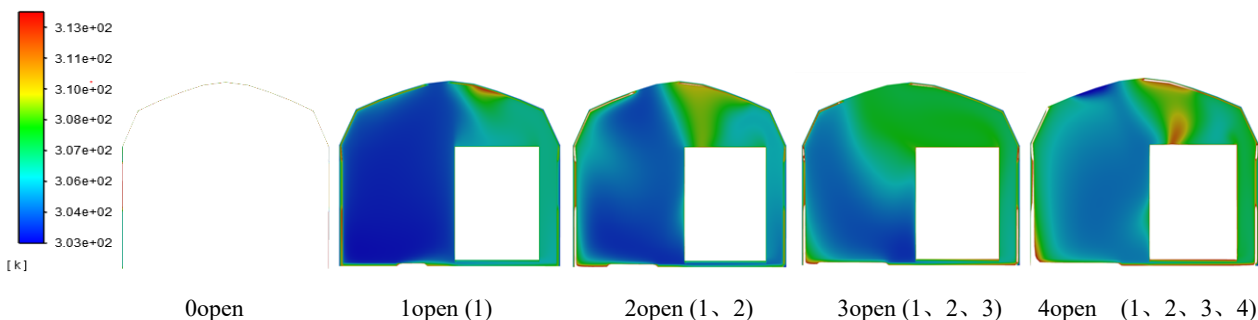


图 8 从顶部开口时第一节车厢中间断面温度分布

Fig.8 Surface temperature distribution of the first carriage with the top openings

3.2 模型二不同开口率的自然通风效果

由 3.1 节可知, 顶部开口率为 10%和 20%的换气量和换热量都很接近, 沿程断面平均温度和车体周围区域温度均低于 40℃。为保证最佳隔音效果, 声屏障顶部可只开 1 个板即 10%开口率。本节继续研究一个完整区间列车阻塞的工况, 采用 490m 长的对称数值计算模型二。根据设计方案, 顶部 10%开口率时可采用一块百叶风口, 由于风口百叶有一定阻挡作用, 使风口的净流通面积减小, 现分别考虑风口位于板 1, 且开度减小使顶部净开口率降低到 10%、7%、5%的工况, 探索这三种工况下的自然通风效果。考虑极端室外气候, 室外空气计算温度选取 33.5℃, 每列车顶部空调冷凝器散热强度为 36kW。

(1) 声屏障内换气量和断面平均温度

图 9 为不同净开口率下声屏障内的换气量结果, 三种开口率下换气量基本相当, 随着开口率的降低, 换气量略有上升。

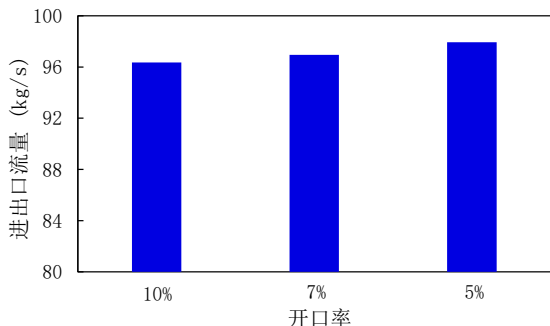


图 9 模型二不同开口率下进出口空气流量

Fig.9 Air flow rate of the inlet and the outlet under different openings of model 2

图 10 给出了不同净开口率下声屏障内断面空气平均温度分布, 为方便比较, 图中仅显示车附近 90 m 范围的结果。由图可知, 三种开口率下断面空气平均温度均低于 40℃, 其中 10%开口率的温度分布略高, 7%与 5%开口率下空气温度分布较为接近。5%的净开口率能满足列车阻塞时的通风换气, 使声屏障内空气温度满足设计要求。

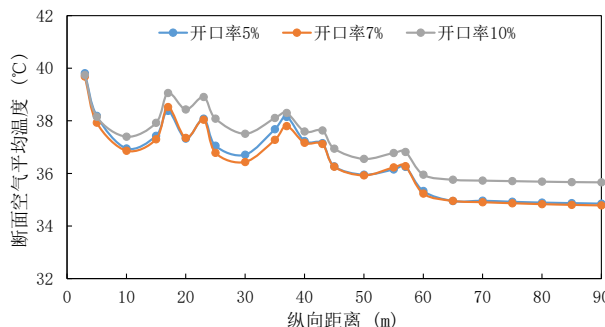


图 10 模型二声屏障内断面平均温度分布

Fig.10 Average temperature distribution inside the sound barrier of model 2

(2) 不同开口率下的断面温度分布

不同开口率下第一节车厢中间断面温度分布如图 11 所示。由图可知, 断面右侧区域温度普遍高于左侧, 主要是由于太阳辐射得热在右侧区域累积, 右侧区域受列车阻塞空间的限制, 空气流动弱, 且冷凝器散热部位布置于车厢顶部。开口率 7%和 10%的断面温度局部高于 40℃的范围更大, 开口率 5%时, 断面整体温度分布最低, 且较为均匀, 满足设计要求。声屏障顶部设置通风消声百叶, 即使百叶净流通面积仅有一半, 自然通风降温也是可行的。

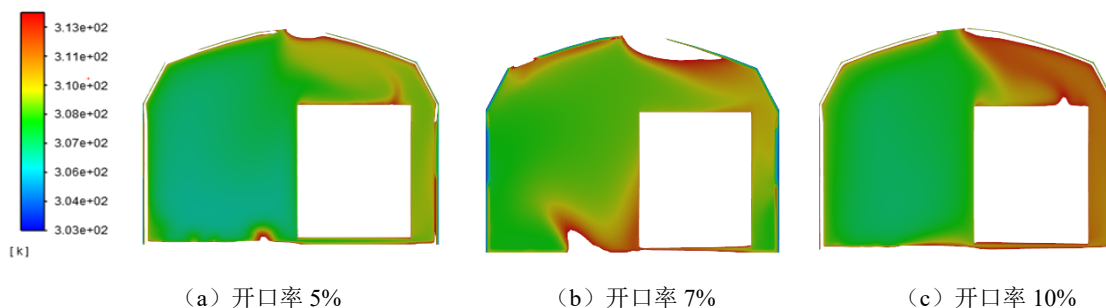


图 11 模型二不同开口率下第一节车厢中间断面温度分布

Fig.11 Surface temperature distribution of the first carriage with different opening ratios for model 2

4 结论

本文针对北京地铁 5 号线噪声治理中在高架段明线上加装声屏障后的通风问题,开展了 CFD 数值模拟计算,对列车阻塞工况声屏障顶部不同开口情况下的自然通风效果进行了分析,得到以下结论:

(1) 当同时考虑列车空调冷凝器散热和太阳辐射得热时,顶部不开口,声屏障内断面空气平均温度最高可达 70℃,不满足设计要求,声屏障顶部必须设置开口。

(2) 相同开口率下,开口位置越靠近顶部中间位置,热压作用越强,通风换气量越大,声屏障内热空气更易从顶部开口流出,自然通风降温效果越好;开口越靠近声屏障侧面位置,顶部热气流较难排出,换热效果稍差。

(3) 顶部采用通风消声百叶且顶部净开口率为 5%时,声屏障内的不同断面空气平均温度仍低于 40℃,满足设计要求,列车阻塞时冷凝器能正常工作。

参考文献:

[1] 吴建忠,田德水.北京地铁八通线减振降噪措施[J].铁道建筑,2003,(11):38-39.

[2] 易强,王平,赵才友,等.高架铁路环境噪声空间分布特性及控制措施效果研究[J].铁道学报,2017,39(3):120-126.

[3] 马娜.上海轨道交通 6 号线全封闭声屏障工程设计[J].现代城市轨道交通,2010,(5):38-39.

[4] 李小珍,杨得旺,高慰,等.高速铁路半、全封闭声屏障振动与降噪效果研究[J].噪声与振动控制,2018,(S1):8-13.

[5] 刘磊.宁波轨道交通 1 号线声屏障设计中的若干问题研究[J].声学技术,2020,39(3):342-348.

[6] 刘磊,康钟绪,张良焊,等.地铁全封闭声屏障自然排烟仿真研究[J].铁道标准设计,2020,64(11):168-175.

[7] GB 50157-2013,地铁设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2013.

[8] 刘磊,李志新,余世策.全封闭声屏障列车活塞风压研究[J].城市道桥与防洪,2020,(2):176-181,20.

[9] 王福军.计算流体力学分析[M].北京:清华大学出版社,2004:5-36.

[10] 帕坦卡 S V.传热与流体流动的数值计算[M].北京:科学出版社,1989.

[11] 中国气象局气象信息中心气象资料室,清华大学建筑技术科学系.中国建筑热环境分析专用气象数据集[M].北京:中国建筑工业出版社,2005.