

doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2024.05.017

城市快速轨道交通压力波及列车气密性措施分析

吴敏慧¹, 刘建超², 张戈², 王鲁平², 段海滨²

(1. 杭州市公路与港航管理服务中心, 杭州 311202; 2. 北京城建设计发展集团股份有限公司, 北京 100032)

摘要: 针对快速轨道交通列车在隧道内气动压力变化较快造成的舒适度降低问题, 对隧道内径尺寸、泄压方案对车内压力的影响进行研究。首先根据相关规范选定压力舒适度标准, 建立包含列车模型、隧道模型及隧道口泄压措施的有限元模型, 然后分别对不同隧道内径、不同气密指数条件下列车内外压力的变化进行研究, 最后对隧道入口设置缓冲方案对车内压力的影响进行分析。研究结果表明: 当隧道内径由 6.0 m 增加为 6.1 m 时, 车内压力变化最大值约降低 4.2%, 继续增大隧道直径对减小列车内外压力变化值作用有限; 当气密指数 ≤ 6 s 时, 每增加 1 s, 车内压力变化最大值约减小 15%~25%; 隧道洞口设置全封闭声屏障作为缓压结构时, 车内压力变化最大值可降低约 40%~50%; 为提高整车气密性, 可采取提高司机室/客室车门密封性、在新风口和废排风口设置启动压力保护阀以及提高车身及贯通道密封性等措施。

关键词: 城市快速轨道交通; 压力波; 气密性; 隧道内径

中图分类号: U237; U213.2

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2024)05-0116-08

Analysis of the Impact of Urban Rapid Transit Pressure on Train Airtightness Measures

WU Minhui¹, LIU Jianchao², ZHANG Ge², WANG Luping², DUAN Haibin²

(1. Hangzhou Highway and Port Management Service Center, Hangzhou 311202;

2. Beijing Urban Construction Design & Development Group Co., Ltd., Beijing 100037)

Abstract: To address the issue of reduced comfort resulting from rapid aerodynamic pressure changes inside the tunnels used for urban rapid transit trains, a study was conducted on the effects of the tunnel diameter and pressure-relief schemes on in-car pressure. First, pressure comfort standards were selected based on relevant regulations, and a finite element model was established, which included a train model, a tunnel model, and pressure relief measures at the tunnel entrance. Subsequently, the pressure variations inside and outside of a train were investigated for different tunnel diameters and airtightness indices. Finally, the impact of implementing buffering schemes at the tunnel entrance on the in-car pressure was analyzed. The research results indicated that when the tunnel diameter increased from 6.0 m to 6.1 m, the maximum in-car pressure variation decreased by approximately 4.2%, with further increases in tunnel diameter having a limited effect on reducing the pressure variation. When the airtightness index was ≤ 6 s, each additional second resulted in a 15–25% reduction in the maximum in-car pressure variation. Additionally, when a fully enclosed sound barrier was installed at the tunnel entrance as a pressure-relief structure, the maximum in-car pressure variation could be reduced by approximately 40–50%. Measures can be taken to enhance the overall

收稿日期: 2023-12-25 修回日期: 2024-06-25

第一作者: 吴敏慧, 女, 硕士, 教授级高级工程师, 主要从事交通运输发展规划研究工作, 378868984@qq.com

基金项目: 浙江省交通运输厅科研项目(浙交发函〔2022〕69号·计划编号202220号)

引用格式: 吴敏慧, 刘建超, 张戈, 等. 城市快速轨道交通压力波及列车气密性措施分析[J]. 都市轨道交通, 2024, 37(5): 116–123.

WU Minhui, LIU Jianchao, ZHANG Ge, et al. Analysis of the impact of urban rapid transit pressure on train airtightness measures[J]. Urban rapid rail transit, 2024, 37(5): 116–123.



图 3 计算网格

Figure 3 Computational grid

2 压力舒适度标准

2.1 气密指数与车内压力波动

高速列车通过隧道时，车外压力波传入车内将引起车内空气压力波动。德国计算高速列车通过隧道引发的车内压力波动采用的计算式为^[7]

$$p_i = p_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (1)$$

式中， p_i 为当前时刻车内压力与上一时刻车内压力差值； p_0 为当前时刻车外压力与车内压力差值； t 为时间步长； τ 为气密指数，表示车辆气密性能的时间常数。本文将气密指数分为 0.7、2、3、4、5、6 s 共 6 种工况，研究不同气密指数对车外和车内压力变化的影响。

2.2 压力舒适度标准选取

压力舒适度评价通常采取一个特定的时间范围内的压力波动值。目前，国内城市快速轨道交通的压力舒适度标准主要参考《市域快速轨道交通规划与设计导则》(RISN-TG032—2018)^[2]、《市域快速轨道交通设计规范》(T/CCES 2—2017)^[8]和《地铁快线设计标准》(CJJT 298—2019)^[9]。其中《地铁快线设计标准》中关于压力舒适度的规定为列车客室任意 3 s 时间内的压力变化率不应大于 700 Pa，另外两本规范要求不大于 800 Pa/3 s。

城市快速轨道交通一般舒适性要求较高，结合已运营线路的实际情况及《地铁快线设计标准》，确定舒适度标准为压力变化率应小于 700 Pa/3 s。

3 隧道内径和列车气密指数对车内压力的影响

3.1 6.0 m 隧道内径下不同列车气密指数的压力波动分析

计算分析隧道内径 D 为 6.0 m 时不同列车气密指数对列车车内压力的影响。图 4 为不同气密指数下头

车、中间车和尾车车内外的压力变化曲线。

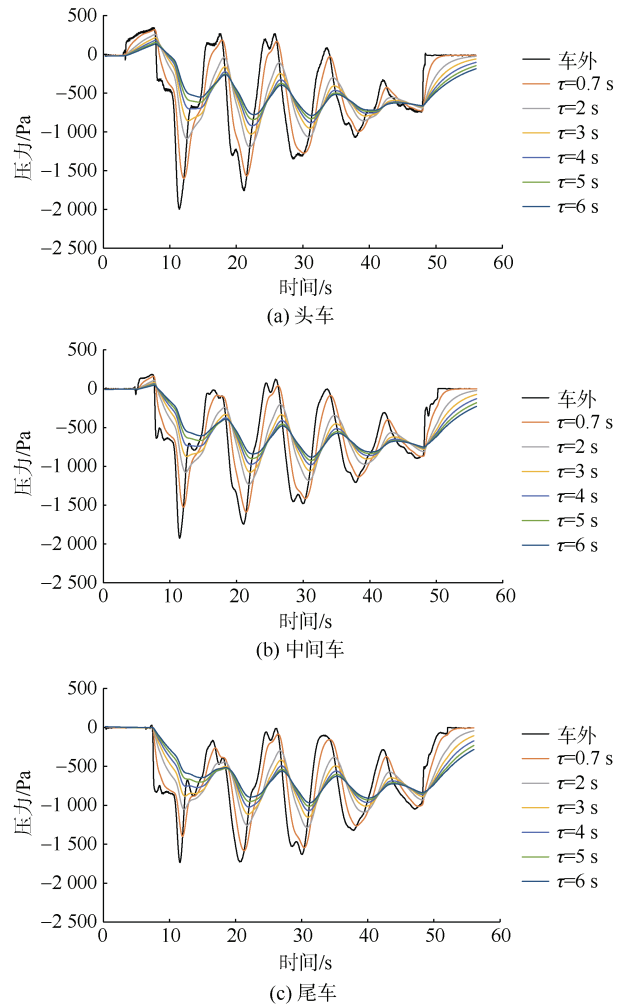


图 4 头车、中间车和尾车不同气密指数下车内外压力变化曲线($D=6.0$ m)

Figure 4 Pressure variation curves inside and outside the train with different airtightness indices for the leading, middle, and trailing cars ($D=6.0$ m)

由图 4 可知：①列车在刚进入隧道时压力最大，且车内和车外任意位置的压力呈现周期性变化，峰值逐渐收敛；随着列车气密指数的增加，车外压力向车内压力的传导逐步延迟，车内压力峰值及压力变化率随时间逐渐减小。当气密指数 ≥ 4 s 时，继续增加车内气密指数，对降低车内压力峰值及变化率作用不大；②将图 4 压力变化折算成 3 s 内的变化率，头车车外压力最大值为 1 950 Pa/3 s，中间车和尾车车外压力最大值分别衰减 10.92% 和 21.79%；0.7 s 气密指数下头车车内压力最大值为 1 595 Pa/3 s，中间车和尾车车内压力最大值分别为 1 540 Pa/3 s 和 1 390 Pa/3 s，

相比于头车车内压力最大值分别衰减 3.45%和 12.86%；
③列车压力最大值出现在头车，向尾车方向逐渐衰减。

绘制头车车内最大压力值随气密指数变化曲线，如图 5 所示。由图 5 可知，随着列车气密指数由 0.7 s 增加至 6 s，头车车内压力最大值由 1 595 Pa/3 s 逐渐减少至 560 Pa/3 s。当气密指数 ≥ 4 s 后，车内压力衰减变化幅度随气密指数增加而逐渐平缓。

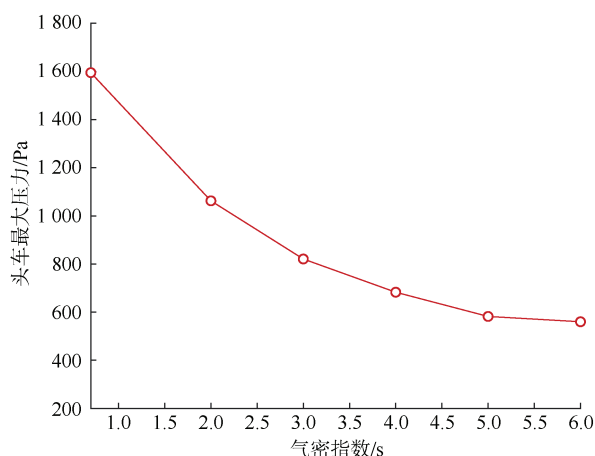


图 5 头车车内最大压力值随气密指数变化曲线

Figure 5 Curve representing the variation in the maximum pressure in the leading car with the air tightness index

统计得到隧道内径为 6.0 m 时，不同气密指数下列车内部的 3 s 内的压力变化最大值如表 2 所示。

表 2 不同列车气密指数下的压力变化最大值($D=6.0$)

Table 2 Maximum pressure change values for different cars under various train airtightness indices ($D=6.0$) Pa/3 s

位置	$\tau=0.7$ s	$\tau=2.0$ s	$\tau=3$ s	$\tau=4$ s	$\tau=5$ s	$\tau=6$ s
头车	1 633	1 062	821	683	582	506
中间车	1 438	945	706	570	492	432
尾车	1 336	879	651	511	421	377

由表 2 可知：当列车气密指数 ≥ 4 s 时，列车内部的 3 s 内压力变化率均小于 700 Pa/3 s，压力变化率满足本工程的人体压力舒适度标准。

3.2 6.1 m 隧道内径下不同列车气密指数的压力波动分析

计算分析隧道内径 D 为 6.1 m 时不同列车气密指数对列车车内压力的影响。考虑到头车位置的压力变化最大，仅分析头车影响。图 6 为头车不同气密指数下车外、车内的压力变化曲线。

由图 6 可知：6.1 m 隧道内径下，头车车外压力最大值为 1 890 Pa，0.7 s 气密指数下车内最大压力

为 1 520 Pa/3 s；随着列车气密指数由 0.7 s 增加至 6 s，头车车内压力峰值由 1 520 Pa/3 s 逐渐减少至 520 Pa/3 s。

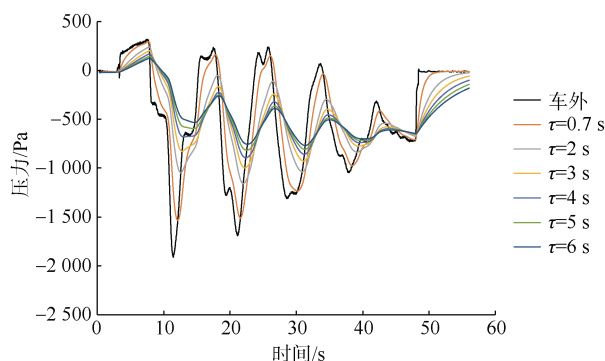


图 6 不同气密指数下头车内外压力变化曲线($D=6.1$ m)

Figure 6 Pressure variation curves inside and outside the leading car under different airtightness indices ($D=6.1$ m)

统计得到隧道内径为 6.1 m 时，不同气密指数下列车内部的 3 s 内的压力变化最大值如表 3 所示。

表 3 不同列车气密指数下的压力变化最大值($D=6.1$ m)

Table 3 Maximum pressure change values for different cars under various train airtightness indices ($D=6.1$ m) Pa/3 s

位置	$\tau=0.7$ s	$\tau=2.0$ s	$\tau=3$ s	$\tau=4$ s	$\tau=5$ s	$\tau=6$ s
头车	1 551	1 017	783	652	556	484
中间车	1 369	906	679	546	472	415
尾车	1 286	845	626	492	405	362

由表 3 可知，当列车气密指数 ≥ 3 s 时，列车内部的 3 s 内压力变化率均小于 700 Pa/3 s，满足本工程的人体压力舒适度标准。

3.3 6.2 m 隧道内径下不同列车气密指数的压力波动分析

计算分析隧道内径 D 为 6.2 m 时不同列车气密指数对列车车内压力的影响。图 7 为不同气密指数下头车、中间车和尾车的车外、车内的压力变化曲线。

由图 7 可知：6.2 m 隧道内径下，列车通过洞口区域时车内外的压力变化最大，且头车的压力变化大于中间车和尾车；同一时刻，头车、中间车和尾车内部存在一定的压力差，该压力差随列车气密指数的增加而减小。

统计得到隧道内径为 6.2 m 时，不同列车气密指数下列车内部的 3 s 内的压力变化最大值如表 4 所示。

由表 4 可知：当列车气密指数 ≥ 4 s 时，列车内部的 3 s 内压力变化值均小于 700 Pa/3 s，满足本工程的

人体压力舒适度标准。

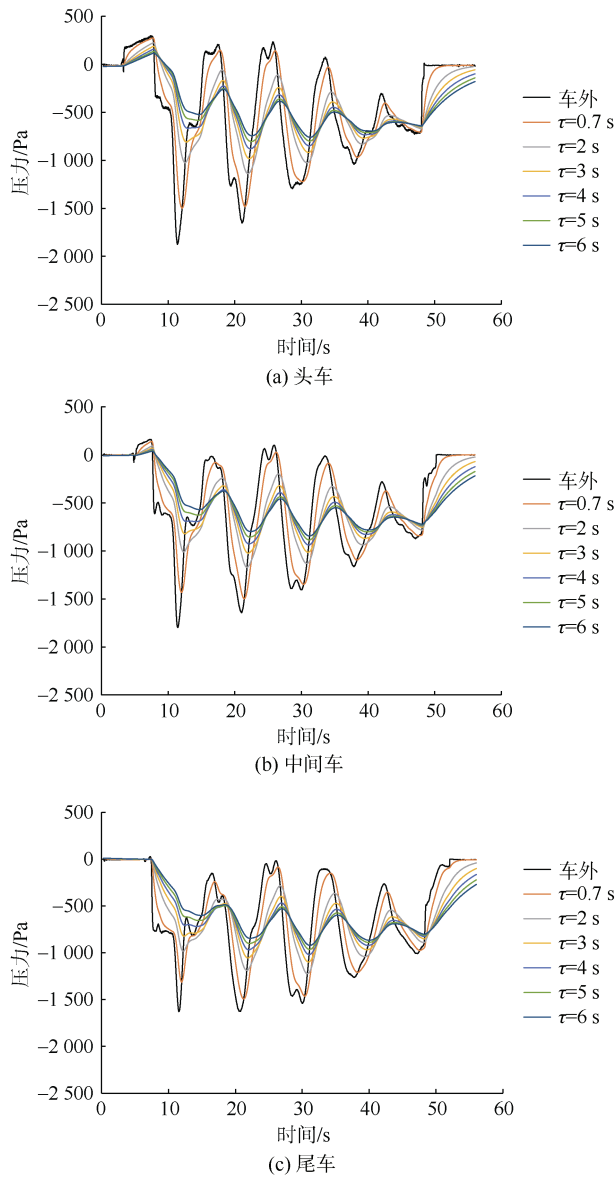


图 7 不同气密指数下头车、中间车和尾车内外压力变化曲线($D=6.2\text{ m}$)

Figure 7 Pressure variation curves inside and outside the train with different airtightness indices for the leading, middle, and trailing cars ($D=6.2\text{ m}$)

表 4 不同列车气密指数下的压力变化最大值($D=6.2\text{ m}$)
Table 4 Maximum pressure change values for different cars under various train airtightness indices ($D=6.2\text{ m}$) Pa/3 s

位置	$\tau=0.7\text{ s}$	$\tau=2.0\text{ s}$	$\tau=3\text{ s}$	$\tau=4\text{ s}$	$\tau=5\text{ s}$	$\tau=6\text{ s}$
头车	1507	991	759	632	539	469
中间车	1334	883	663	531	459	404
尾车	1268	834	619	486	401	353

综上，基于 $700\text{ Pa}/3\text{ s}$ 的压力舒适度标准，不同隧道内径对应的列车动态气密指数不同。

为满足本工程的压力舒适度标准($700\text{ Pa}/3\text{ s}$)，当隧道内径为 6.0 m 时，列车气密指数应 $\geq 4\text{ s}$ ；当隧道内径为 6.1 m 和 6.2 m 时，列车气密指数应 $\geq 3\text{ s}$ 。

增加隧道内径，能够降低车内外的压力变化最大值；当隧道内径由 6.0 m 增加为 6.1 m ， 3 s 内压力变化最大值约降低 4.2% ；当隧道内径由 6.1 m 增加为 6.2 m ， 3 s 内压力变化最大值约降低 2.4% 。说明当隧道内径 $\geq 6.1\text{ m}$ 时，车内外的压力变化随隧道内径的增加变化很小。

相同列车外压力变化时，车内压力变化随列车气密指数的增加而显著减小；当气密指数 $\leq 6\text{ s}$ ，列车气密指数每增加 1 s ，列车内的 3 s 压力变化最大值约减小 $15\% \sim 25\%$ 。

4 隧道入口缓冲结构设置方案

隧道洞口缓压结构一般采用土建喇叭口，其造价较高且占地面积大，本文以洞口设置全封闭声屏障作为缓压结构，隧道直径以 $D=6.1\text{ m}$ 为例进行计算，如图 8 所示。洞口设置缓冲结构计算域如图 9 所示。



图 8 洞口设置的全封闭声屏障

Figure 8 Fully enclosed sound barrier as a pressure buffering structure at entrance



图 9 洞口设置的缓冲结构计算域

Figure 9 Calculation region of buffer structure at the tunnel entrance

将图 9 中橙色分段设定为分段 1，绿色外形设定为分段 2，紫色外形设定为分段 3。三段长度分别为 200 m 、 200 m 和 300 m ，其断面如图 10 所示。

由图 4、图 6 和图 7 可知，列车在通过洞口区域时压力变化最大，因此对洞口设置缓冲结构进行模拟分析^[6]。

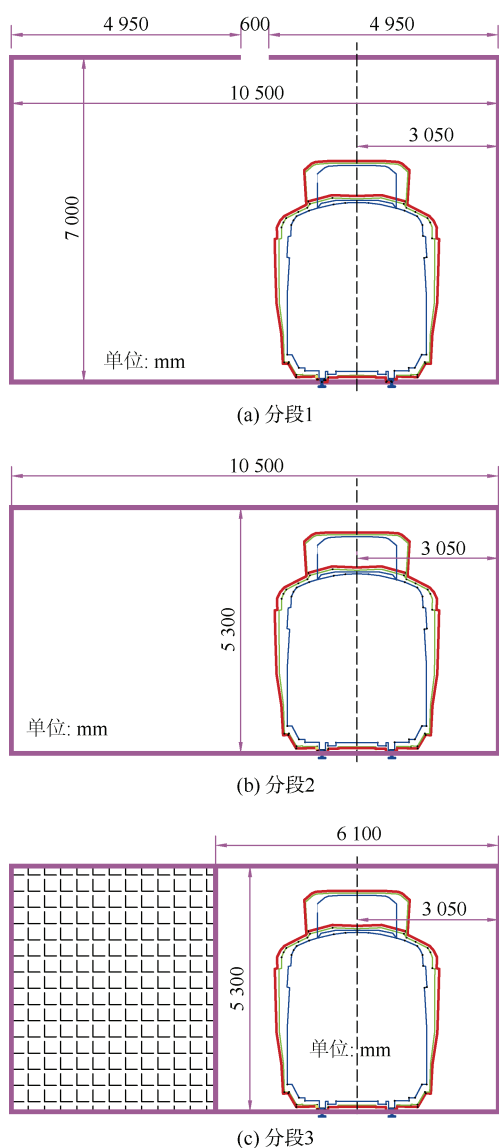


图 10 分段断面

Figure 10 Cross-sectional view of different segments

洞口设置缓冲结构时，头车和尾车的车内外压力随时间的变化如图 11 所示。通过统计模拟数据，可得到洞口设置缓冲结构时，不同列车气密指数下列车内部的 3 s 内的压力变化最大值如表 5 所示。

由表 5 可知：当列车气密指数 ≥ 3 s 时，列车内部的 3 s 内压力变化值均小于 700 Pa/3 s，满足本工程的压力舒适度标准。

结合表 3 和表 5 数据，可得到洞口有无缓冲结构、不同列车气密指数对应的列车内部 3 s 内的压力变化最大值如表 6 所示。

由表 6 可知：洞口设置缓冲结构能有效降低车外外的压力变化，与无缓冲结构相比，3 s 内压力变化最大值约降低 40%~50%。推荐在洞口区域设置缓冲结

构，以便有效降低车内压力的冲击，提升轨道交通乘坐舒适性。

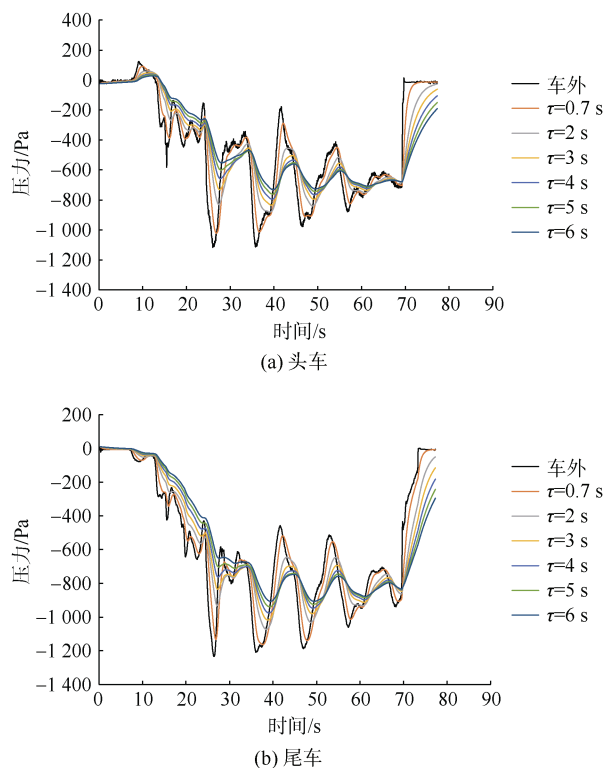


图 11 头车和尾车车内外压力随时间的变化曲线

Figure 11 Curves of pressure variation inside and outside the leading and trailing cars over time

表 5 不同列车气密指数下 3 s 内的压力变化最大值 (洞口设置缓冲结构)

Table 5 Maximum pressure variation within 3 s under different train airtightness indices (with buffer structure at the tunnel entrance) Pa/3 s

位置	$\tau=0.7$ s	$\tau=2.0$ s	$\tau=3$ s	$\tau=4$ s	$\tau=5$ s	$\tau=6$ s
头车	1551	1017	783	652	556	484
尾车	1286	845	626	492	405	362

表 6 洞口有无缓冲结构、不同列车气密指数对应的列车内部 3 s 内的压力变化最大值

Table 6 Maximum pressure change within 3 s in the train interior corresponding to different train airtightness indices with and without buffer structure at the tunnel entrance Pa/3 s

缓冲结构	测点位置	车外	$\tau=0.7$ s	$\tau=2.0$ s	$\tau=3$ s	$\tau=4$ s	$\tau=5$ s	$\tau=6$ s
无	头车	1865	1551	1071	783	652	556	484
	尾车	1466	1286	845	626	492	405	362
有	头车	964	779	531	424	357	311	277
	尾车	804	653	459	358	300	265	238

5 列车气密性措施

列车气密指数 ≥ 3 s时即满足盾构内径6.1 m下的列车舒适性要求。随着列车服役周期增加,气密指数逐渐降低,为此设定新车气密指数标准为5 s,试验保压时间要求在列车整备状态下,车内压力由2 600 Pa降至1 000 Pa,时间需大于15 s。

5.1 气密性指标的分解

根据整车气密指数与各部件气密指数的关系,将整车气密指标分解至各部件的气密指数^[10-11],整车气密指标的计算式为

$$\tau = \frac{T}{\ln(\Delta P_1 / \Delta P_0)}$$

式中, T 为保压时间,h; ΔP_1 为保压开始时压力差,Pa; ΔP_0 为保压结束时压力差,Pa。整车气密指标与各部件气密指标的关系式为

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_2} + \dots + \frac{1}{\tau_n}$$

式中, τ_1 、 τ_2 、 \dots 、 τ_n 分别为列车车门、空调…贯通道等部分气密性指标,具体设置值如表7所示。

表7 各部件气密性指标

Table 7 Airtightness index of each component

部件名称	气密性指标
整车	由2 600 Pa降至1 000 Pa的时间 ≥ 15 s(密封指数15.7 s)
车门	由2 600 Pa降至1 000 Pa的时间 ≥ 210 s(密封指数219.7 s)
空调	由2 600 Pa降至1 000 Pa的时间 ≥ 200 s(密封指数209.2 s)
车体(含车窗)	由2 600 Pa降至1 000 Pa的时间 ≥ 28 s(密封指数29.2 s)
贯通道	由2 600 Pa降至1 000 Pa的时间 ≥ 100 s(密封指数104.6 s)

5.2 气密性部件增强措施

气密性增强措施主要从车门、空调、车体、贯通道等部件优化,具体措施如下。

1) 司机室/客室车门采用单开电气密封塞拉门^[11-12],通过密封胶条、护指胶条、辅助锁等措施,保证车门部件系统的气密性。车门系统结构见图12。

2) 空调机组送风口、回风口与车体的接口通过压缩橡胶密封条与车体型材压接密封(见图13)。空调机组集成废排,在新风口和废排风口设置气动压力保护阀,当车外压力突变时关闭风口,短时隔绝内外气流通,达到避免车内压力突变的目的。

3) 车体方面,司机室与客室材质均采用轻型铝合金材料。司机室与车体连接处采用全焊接技术。地板

上表面的焊缝采用满焊方式,将客室与地板下方的空间隔绝。地板以上空间,通过车外的满焊措施,将客室与车外隔绝。车窗采用整体密封式设计,保证车窗的整体密封性能。

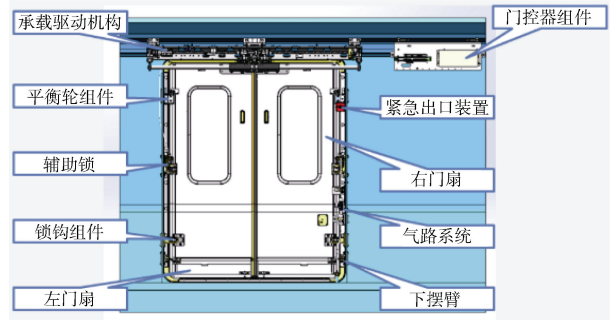
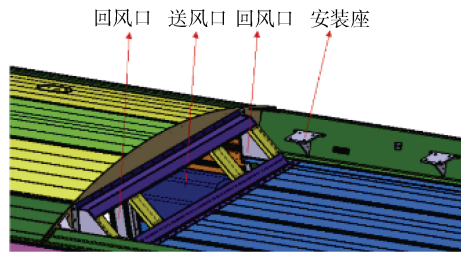
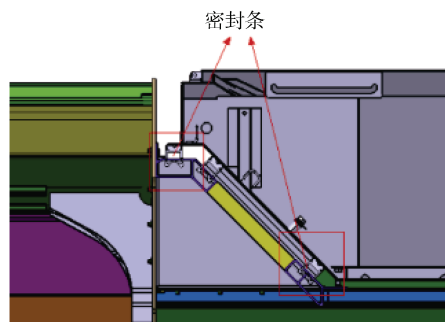


图12 车门系统结构

Figure 12 Door system structure diagram



(a) 密封方案顶部



(b) 密封方案侧面

图13 空调与车体安装连接处密封方案

Figure 13 Sealing solution for air conditioner and vehicle body installation connections

4) 贯通道方面,通过安装框与车体端墙连接,安装框内部设计专用橡胶密封件,安装框外部周圈打胶,使其密封性更优异,实现贯通道在运动状态下,特别是曲线运行时的密封。通过增加胶条、胶带、密封胶等措施,增加贯通道折棚的整体密封性。在贯通道折棚组成弯头搭接处缝纫线位置刷一层透明胶层,将缝纫线针孔及缝纫线本身用胶层包裹,起到防水、密封、保护缝纫线的作用。另外还可以采用自发泡沫密封胶

技术对穿线孔进行密封,对不适用于密封胶密封的区域,采用夹块和夹块安装衬套进行密封。

6 结论

本文建立了包括列车、隧道以及洞口缓冲结构的列车压力波分析模型,计算分析了 6.0、6.1 和 6.2 m 三种隧道内径和列车气密性下车内外的压力变化,并给出了列车各部件的气密性指标,得到以下主要研究结论:

1) 当隧道内径由 6.0 m 增加为 6.1 m 时,车内压力变化最大值约降低 4.2%;当隧道内径由 6.1 m 增加为 6.2 m 时,压力变化最大值约降低 2.4%。当隧道内径 ≥ 6.1 m 时,继续增大隧道内径对减小车内外压力变化值作用有限。

2) 车内压力变化随列车气密指数 τ 的增加而显著减小;当 $\tau \leq 6$ s 时, τ 每增加 1 s,列车内的 3 s 压力变化最大值约减小 15%~25%。

3) 在进出隧道洞口设置全封闭声屏障作为缓冲措施,可以有效降低列车进入洞口时车内压力变化最大值(3 s 内)约 40%~50%。

4) 本文根据列车各部件的气密指标,提出可通过提高司机室/客室车门密封性、在新风口和废排风口设置启动压力保护阀以及加强车身及贯通道密封性等措施以提高整车的气密性。

参考文献

- [1] 刘晓日,罗江泽,赵哲,等.车头长度对高速列车气动特性与声场特性影响的数值分析及降噪研究[J].中国铁道科学,2018,39(5):88-96.
LIU Xiaori, LUO Jiangze, ZHAO Zhe, et al. Numerical analysis of influence of head length on aerodynamic and sound field characteristics of G-series high-speed train and research on noise reduction[J]. China railway science, 2018, 39(5): 88-96.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部标准定额研究所.市域快速轨道交通规划与设计导则:RISN-TG032—2018[S].北京:中国建筑工业出版社,2018.
- [3] 朴荣煥.地铁车辆通过隧道的气动性能试验与仿真研究[D].成都:西南交通大学,2021.
PIAO Ronghuan. Experimental and simulation study on aerodynamic performance of metro vehicles passing through tunnels[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021.
- [4] 尹小春.隧道工况下高速列车气密性及压力舒适度数值模拟方法研究[D].成都:西南交通大学,2022.

- YIN Xiaochun. Study on numerical simulation method of air tightness and pressure comfort of high-speed train under tunnel working conditions[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2022.
- [5] 徐威.高速列车气密性与人体安全标准研究[J].铁道标准化,1995(5):31-33.
- [6] 李梁,刘家栋,孙瑶,等.地铁车辆气密性影响因素及主要评价指标研究[J].现代城市轨道交通,2021(1):35-39.
LI Liang, LIU Jiadong, SUN Yao, et al. Study on influencing factors and main evaluation indexes of air tightness of metro vehicles[J]. Modern urban transit, 2021(1): 35-39.
- [7] 梅元贵,周朝晖,许建林.高速铁路隧道空气动力学[M].北京:科学出版社,2009.
MEI Yuangui, ZHOU Chaohui, XU Jianlin. High-speed rail tunnel aerodynamics[M]. Beijing: China Science Press, 2009.
- [8] 中国土木工程学会.市域快速轨道交通设计规范:T/CCES 2—2017[S].北京:中国建筑工业出版社,2017.
China Civil Engineering Society. Code for design of metropolitan rapid rail transit system: T/CCES 2—2017[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2022.
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部.地铁快线设计标准:CJJ/T 298—2019[S].北京:中国建筑工业出版社,2019.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for design of metro express: CJJ/T 298—2019[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019.
- [10] 李明,张雷,刘斌,等.动静态气密性分析方法及其在动车组上的应用[J].力学学报,2021,53(1):126-135.
LI Ming, ZHANG Lei, LIU Bin, et al. Dynamic and static air tightness analysis method and their application in emu[J]. Chinese journal of theoretical and applied mechanics, 2021, 53(1): 126-135.
- [11] 邓长海.市域快轨车辆主要部件密封性措施的研究[J].铁道车辆,2021,59(1):47-48.
DENG Changhai. Research on sealing measures for main parts on inner-city rapid rail transit vehicle[J]. Rolling stock, 2021, 59(1): 47-48.
- [12] 郭蕾,宋元全,王天宇.城轨车辆车门气密性研究及设计[J].轨道交通装备与技术,2020(5):39-41.
GUO Lei, SONG Yuanquan, WANG Tianyu. Research and design of air tightness of urban rail vehicle doors[J]. Rail transportation equipment and technology, 2020(5): 39-41.

(编辑:王艳菊)