

应用理论

高速列车塞拉门橡胶密封条的结构优化和压缩特性研究

李锦伟, 贡智兵, 谭文才, 王 卫

(南京康尼机电股份有限公司, 江苏 南京 210013)

摘要:采用两参数Mooney-Rivlin超弹性本构模型,对比不同硬度高速列车塞拉门橡胶密封条的压缩载荷-压缩量的仿真结果与试验结果,确定不同硬度密封条的材料常数;对优化后密封条的压缩特性进行仿真分析和对气密性进行试验验证。结果表明:在4 mm压缩量下,优化前后的密封条与门框压条间的最大接触压力基本相同;与优化前密封条相比,优化后密封条的压缩载荷减小了29.4%,密封性能提高了近1倍。

关键词:高速列车;塞拉门;橡胶密封条;结构优化;压缩特性;接触压力;密封性能

中图分类号:TQ336.4⁺2;O241.82

文献标志码:A

文章编号:1000-890X(2022)03-0163-06

DOI:10.12136/j.issn.1000-890X.2022.03.0163



OSID开放科学标识码
(扫码与作者交流)

门扇是列车最主要的活动部件之一,在列车行进过程中起着隔热、隔声和隔振等作用。门系统的密封性能是列车密封性能的关键因素,国内外列车主机企业标准和国际标准均对门系统的密封性能提出了相关要求^[1-5]。

作为高速列车塞拉门系统密封中的重要部件,其橡胶密封条(简称密封条)在塞拉门关闭过程中,通过塞拉门的塞拉运动在门框压条上产生压缩变形,以获得预定的密封力,满足介质密封、环境隔离及外观装饰等要求。然而,密封条因压缩变形而导致能量消耗,其密封力在满足塞拉门密封要求的同时,也成为塞拉门关闭过程中的主要阻力,从而需要驱动电动机提供驱动力来关闭塞拉门^[6]。因此,合理的密封条结构不仅需要提供足够的密封力,还要减小门扇在关门过程中的阻力。

在此介绍高速列车塞拉门密封条的结构及其密封原理,推导关门力与密封条压缩载荷间的

数学关系,对不同硬度密封条进行仿真与试验分析,确定不同硬度密封条的两参数Mooney-Rivlin超弹性本构模型的材料常数,并对优化后密封条的压缩特性进行仿真分析及对气密性进行试验验证。

1 密封条的结构及压缩特性

密封条的结构决定了门系统的密封性能^[7-10]。密封条的密封性能主要由其截面结构和整体外形结构决定,通常采用密封性能优异的整体外形结构,即将不同截面结构的密封条通过硫化连接,并使接头处平整光滑,从而使密封条与门框压条形成连续的密封环。密封条的截面形状虽有多种,但从截面结构功能而言,主要有密封功能和装卡功能。其中密封部位通常为唇形结构,在设计压缩量下可产生预定的密封力,从而实现密封功能;装卡部位可使密封条装入门扇型材后获得合适的拔脱力,以防止密封条从门扇中脱离甚至脱离。

作者简介:李锦伟(1987—),男,江苏响水人,南京康尼机电股份有限公司工程师,硕士,主要从事轨道交通车辆门系统关键零部件的数值分析工作。

E-mail:lijinwei_love@126.com

引用本文:李锦伟,贡智兵,谭文才,等.高速列车塞拉门橡胶密封条的结构优化和压缩特性研究[J].橡胶工业,2022,69(3):163-168.

Citation: LI Jinwei, GONG Zhibing, TAN Wencai, et al. Study on structural optimization and compression characteristics of rubber sealing strip for sliding plug door of high-speed train[J]. China Rubber Industry, 2022, 69(3): 163-168.

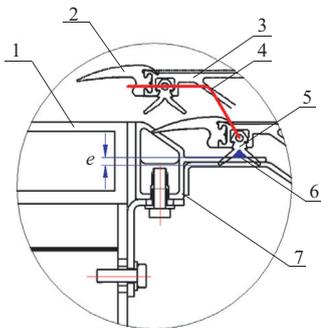
轨道车辆塞拉门密封条的结构形式及其优缺点和应用场合如表1所示^[6,11-13]。

表1 轨道车辆塞拉门密封条的结构形式及其优缺点和应用场合

Tab.1 Structural types, advantages, disadvantages and applications of sealing strip for sliding plug door of rail vehicle

结构形式	优点	缺点	应用场合
单唇密封	车外压力越大,密封效果则越好	隔热和隔声效果差,对门扇的刚度较敏感,对安装要求高,负压下密封失效	地铁或城际等低速列车车门系统
双唇密封	正负压下密封效果好,隔热和隔声效果好	对门扇的刚度较敏感,对安装要求高,需要较大的关门力	高速列车车门系统
压力密封	密封压力稳定,对门扇的刚度不敏感	可靠性差,需定期保养	特种车门系统

塞拉门的周边有内、外胶条的双重防护,其中外胶条硬度较高,其主要作用是隔绝雨雪和异物等进入,保护密封条不受损坏,防止密封失效。塞拉门关闭的密封结构如图1所示, e 为密封条压缩量。无论车厢外部气压高还是内部气压高,图中的双唇结构密封条均被压缩,接触面积较大。此外,该结构密封条在压缩变形后还可与门框压条间形成气腔,同时提高门系统的隔热和隔声性能^[12]。



1—车体;2—外胶条;3—塞拉门;4—塞拉轨迹;
5—密封条;6—气腔;7—门框压条。

图1 塞拉门关闭的密封结构示意图
Fig.1 Diagram of sealing structure of sliding plug door closing

在密封条(以下均指塞拉门密封条)的压缩特性分析中,因外胶条的刚度较小且压缩量也小,可忽略其对开门力的影响。设塞拉门高度为 h ,门系统宽度为 w ,塞拉门运动轨迹函数为 $f(x)$,密封条

的压缩载荷线密度为 q ,密封条与门框压条间的摩擦系数为 μ ,可得式(1)和(2)^[14]:

$$F_1 = \frac{2(h+w)[e-f(x)]q}{e} \quad (1)$$

$$F_2 = \frac{2\mu(h+w)[e-f(x)]q}{e} \quad (2)$$

式中: F_1 为密封条与门框压条间的压缩阻力,与门扇横向平行; F_2 为密封条与门框压条间的摩擦阻力,与门扇纵向平行。

塞拉门关闭过程中门系统上滚轮的受力如图2所示, N 为上滚轮所受的正压力, F_q 为驱动电动机的驱动力, f 为克服门系统摩擦所需的力, α 为塞拉角度, R 为上滚轮运动轨迹半径。

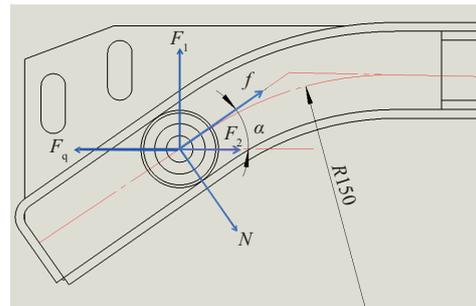


图2 塞拉门关闭过程中门系统上滚轮的受力示意
Fig.2 Diagram of forces on upper roller of door system during closing of sliding plug door

图2中各力满足式(3):

$$F_q \cos \alpha = f + F_1 \sin \alpha + F_2 \cos \alpha \quad (3)$$

将式(1)和(2)代入式(3),可得:

$$F_q = f \sec \alpha + \frac{2(h+w)[e-f(x)]q}{e} \tan \alpha + \frac{2\mu(h+w)[e-f(x)]q}{e} \quad (4)$$

令

$$a = \frac{(h+w)[e-f(x)]}{e}$$

代入式(4)得:

$$F_q = f \sec \alpha + 2a(\tan \alpha + \mu)q = f(q) \quad (5)$$

确定塞拉门的结构后,在一定的压缩量下,当 q 增大时,驱动电动机提供的关门驱动力是增大的,不利于关门,甚至会引发障碍检测等开门误操作;相反,当 q 减小时,门扇更容易关上,但密封压力会减小。可见,密封条的使用效果主要通过密封效果和塞拉力两方面来综合评估,密封条前期设计时,对其压缩特性的研究必不可少。

2 密封条仿真分析及材料常数的确定

2.1 密封条的有限元模型

优化前密封条截面结构如图3所示。考虑到密封胶条长度方向上的几何尺寸远远大于截面的几何尺寸,且沿长度方向均匀承受相同压缩量,故将密封条的应变分析简化为平面应变分析。

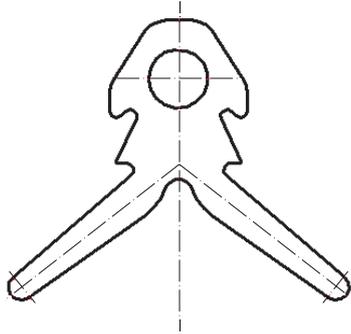


图3 优化前密封条的截面结构示意图
Fig. 3 Diagram of section structure of unoptimized sealing strip

根据所建立的有限元模型,结合试验中密封条的工况和边界条件,对与密封条相配合的门框型材施加固定约束,沿密封条的垂直方向施加指定的压缩量,门框压条与密封条接触面间的摩擦因数设为0.15,密封条采用Plane 183单元进行离散。

2.2 材料的本构模型

橡胶材料为典型的非线性材料,目前基于应变能密度的本构方程主要有两类。本工作采用Mooney-Rivlin模型来描述橡胶材料的应力-应变关系,该模型能够较好地描述橡胶材料应变(在150%以内):

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) \quad (6)$$

式中, W 为应变能密度函数, C_{10} 和 C_{01} 为材料参数, I_1 和 I_2 分别为第一和第二应变不变量。

根据橡胶材料的邵尔A型硬度(H_A)与弹性模量(E)的试验数据,经拟合得到式(7)^[15-19]:

$$E = \frac{15.75 + 2.15H_A}{100 - H_A} \quad (7)$$

因橡胶材料的不可压缩性,其泊松比(μ_1)约为0.5,故剪切模量(G)= $E/3$,从而得到式(8):

$$\begin{cases} G = \frac{E}{2(1 + \mu_1)} = 2(C_{10} + C_{01}) \\ \frac{C_{10}}{C_{01}} = k \end{cases} \quad (8)$$

式中, k 为材料常数。

2.3 不同硬度下密封条的仿真与试验验证

先以 H_A 为75度的密封条来预估Mooney-Rivlin模型中的材料参数(k 的取值分别为0,7.1和71)。仿真计算不同 k 下密封条压缩载荷和压缩量,并与试验结果进行对比,如图4所示。

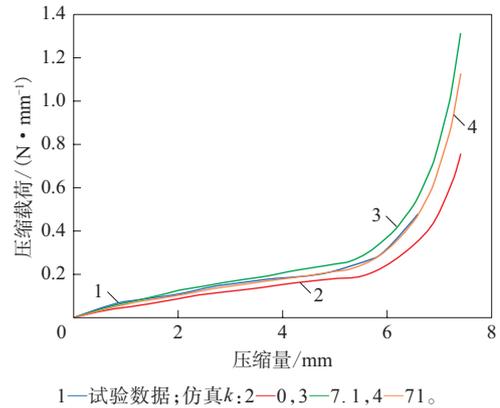


图4 不同 k 下密封条的压缩载荷-压缩量曲线
Fig. 4 Compression load-compression amount curves of sealing strips under different k

从图4可以看出:密封条的压缩载荷随压缩量的增大均呈明显的非线性特征;当压缩量在0~4.5 mm时,3种 k 下密封条的仿真结果与试验结果均表现较好的吻合度;当压缩量大于4.5 mm, k 取71时,仿真结果与试验结果吻合较好;当压缩量为6.6 mm, k 取0和7.1时,仿真计算得到的压缩载荷与试验压缩载荷间存在较大的误差,误差分别为25.6%和17.3%。

采用同样方法,分别对 H_A 为55,60,65和70度的密封条的仿真结果与试验结果进行对比。当密封条的 H_A 为55,60,65和70度时,对应 k 分别取19,25,34和48,仿真结果与试验结果较一致。密封条两参数Mooney-Rivlin模型的 k - H_A 曲线如图5所示。

从图5可以看出, k 与 H_A 呈非线性关系。

3 优化后密封条的压缩特性仿真分析与气密性试验验证

3.1 压缩特性仿真分析

优化后密封条的截面结构如图6所示,密封条的 H_A 为55度,将其原来的双层结构优化为多層结构,并在密封条中部设计空腔。

优化前后密封条的压缩载荷-压缩量曲线如

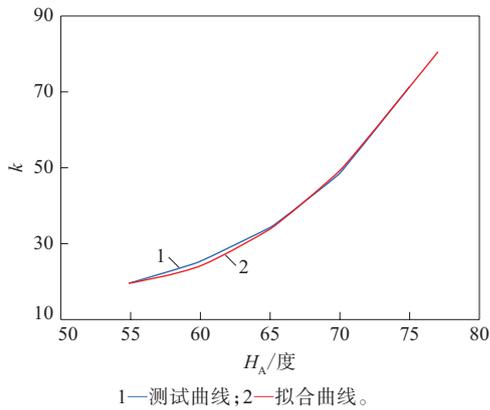


图5 密封条的 $k-H_A$ 曲线
Fig. 5 The $k-H_A$ curves of sealing strips

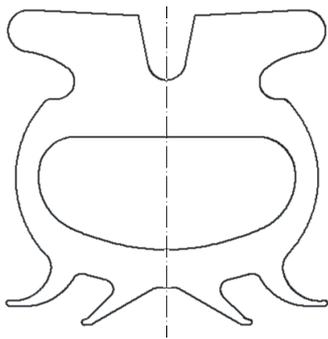


图6 优化后密封条的截面结构示意图
Fig. 6 Diagram of section structure of optimized sealing strip

图7所示。
从图7可以看出,当压缩量在0~5.5 mm时,优化后密封条的压缩载荷小于优化前密封条,且与压缩量呈非线性关系。进一步分析得出,当压缩量在0~1.5 mm时,优化后密封条的内唇与门框压条接触,因内唇刚度较小,相应的压缩载荷也较

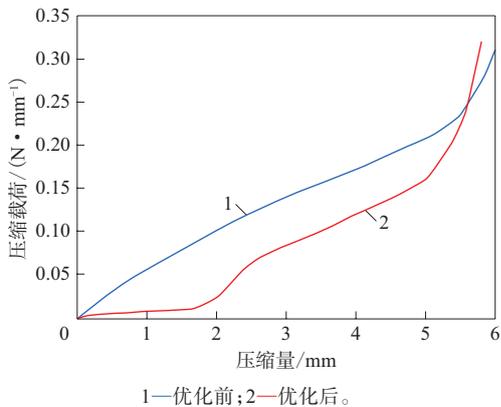


图7 优化前后密封条的压缩载荷-压缩量曲线
Fig. 7 Compression load-compression amount curves of unoptimized and optimized sealing strips

小;当压缩量大于1.5 mm时,优化后密封条的内外4个唇均与门框压条接触,接触面积增大,相应的压缩载荷显著增大;随着压缩量的继续增大,优化后密封条的空腔内壁相互接触,密封条的自身刚度提高,压缩载荷急剧增大。

在压缩量为4 mm下优化前后密封条的接触压力云图如图8所示。

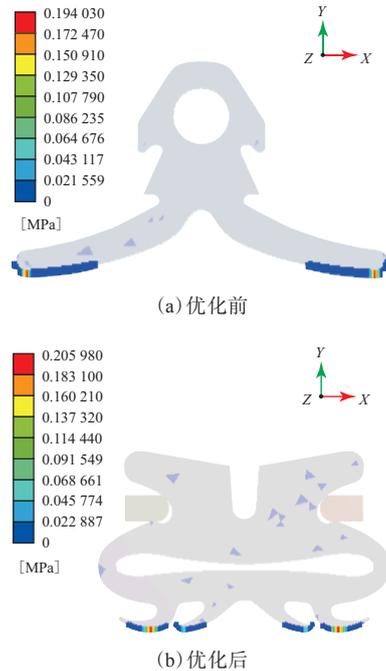


图8 在压缩量为4 mm下优化前后密封条的接触压力云图
Fig. 8 Contact pressure nephograms of unoptimized and optimized sealing strips under compression amount of 4 mm

从图8可以看出:优化前密封条的最大接触压力出现在密封唇的前端部区域,优化后密封条的最大接触压力出现在外侧唇的后端部区域,且4个密封唇均起密封作用;此外,优化前后密封条的最大接触压力分别为0.194 030和0.205 980 MPa,基本相同,但其对应的压缩载荷由原来的0.17 $N \cdot mm^{-1}$ 减小到0.12 $N \cdot mm^{-1}$,减小了29.4%,从而使门扇更容易关闭。

3.2 气密性试验验证

将优化后密封条安装在门扇上,然后根据BS EN 14752—2019进行气密性台架试验,其试验台架如图9所示。

首先将门系统按尺寸规范安装到试验台架上,并将门扇关闭,进行气密性试验。密封条气密



图9 气密性试验台架

Fig. 9 Air tightness test bench

性测试及其要求为：(1)将密封舱充气,气压达到4.2 kPa后停止充气；(2)在密封舱压力由4.0 kPa降至1.0 kPa过程中,降压时间不短于210 s。

气密性试验结束后,优化后密封条的气密性满足要求。

优化后密封条密封舱的气压-时间曲线如图10所示。

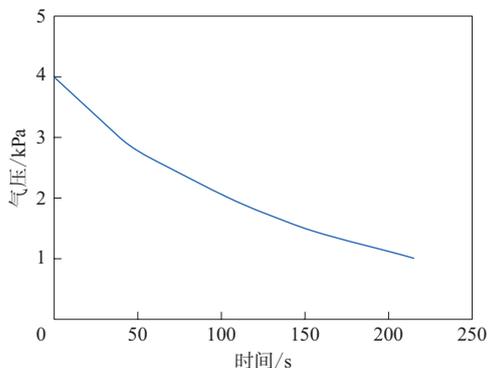


图10 优化后密封条密封舱的气压-时间曲线

Fig. 10 Air pressure-time curve of sealed chamber with optimized sealing strip

从图10可以看出,优化后密封条密封舱的气压从4.0 kPa降至3.0 kPa的时间为43 s,从4.0 kPa降至2.0 kPa的时间为106 s,从4.0 kPa降至1.0 kPa的时间为224 s。与优化前密封条密封舱的气压降至1.0 kPa的时间(113 s)相比,优化后密封条密封舱的气压降至1.0 kPa的时间延长98.2%,即优化后密封条的密封性能提高近1倍。

4 结论

(1)对塞拉门关门过程进行受力分析,得到驱动电动机的驱动力与密封条的压缩载荷间的数学

关系。

(2)通过仿真结果与试验结果对比,得到不同硬度橡胶材料Mooney-Rivlin模型的 k ,为仿真分析密封条的压缩特性研究奠定了基础。

(3)在压缩量为4 mm下,优化前后密封条与门框压条间的最大接触压力基本相同,但优化后密封条的压缩载荷由原来的 $0.17 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1}$ 减小到 $0.12 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1}$,减小了29.4%,从而降低了关门过程中的阻力。

(4)经气密性试验验证,密封条的密封性能较优化前提高近1倍。

参考文献:

- [1] British Standards Institution. Railway applications—Body side entrance systems for rolling stock: BS EN 14752—2019[S]. England: BIS Standard limited BSI, 2019.
- [2] 陆敏恂,肖庭林. 高速列车电动塞拉门设计[J]. 现代制造技术与装备, 2019(2): 31–32.
LU M X, XIAO T L. Design of electric plug door for high speed train[J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2019(2): 31–32.
- [3] 刘振宇. 动车组塞拉门控制优化研究[J]. 铁道运营技术, 2021, 27(2): 12–14.
LIU Z Y. Research on optimization of sliding plug door control of EMU[J]. Railway Operation Technology, 2021, 27(2): 12–14.
- [4] 何岳峰. 中国动车组客室侧门密封性研究[J]. 现代城市轨道交通, 2017(12): 10–14.
HE Y F. Study on sealing property of passenger compartment sliding door for EMU in China[J]. Modern Urban Transit, 2017(12): 10–14.
- [5] 江松伟,庄成. 基于能量的车门关闭轻便性分析与研究[J]. 时代汽车, 2020(19): 127–129.
JIANG S W, ZHUANG C. Analysis and research on the portability of car door closing based on energy[J]. Auto Time, 2020(19): 127–129.
- [6] 金元贵,史金飞,史翔. 轨道交通车辆门系统设计[M]. 北京: 高等教育出版社, 2011: 108–110.
- [7] 王宝星,赵小聪,李滔. 城际动车组塞拉门密封条设计研究[J]. 内燃机与配件, 2020(5): 23–25.
WANG B X, ZHAO X C, LI T. Design and research of sealing strip for sliding plug door of intercity EMU[J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2020(5): 23–25.
- [8] 张雨,杨泰隆,朱文明. 城轨车辆门密封条维护周期优化的灰色关联分析[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2020, 34(8): 50–54.

- ZHANG Y, YANG T L, ZHU W M. Gray correlation analysis of maintenance period optimization of urban rail door sealing strips[J]. Journal of Chongqing Institute of Technology (Natural Science Edition), 2020, 34(8): 50–54.
- [9] 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 L, SONG Y Q, WANG T Y. Research and design of door air tightness of urban rail vehicles[J]. Rail Transportation Equipment and Technology, 2020(5): 39–41.
- [10] 胡兆东. 高速动车组塞拉门密封性的影响因素及解决方法[J]. 冶金与材料, 2020, 40(6): 181–182.
- HU Z D. Influencing factors and solutions of sealing performance of sliding plug door of high speed EMU[J]. Metallurgy and Materials, 2020, 40(6): 181–182.
- [11] 韩永新. 高速动车组塞拉门密封性的影响因素及解决措施[J]. 铁道车辆, 2017, 55(12): 41–42.
- HAN Y X. Influencing factors and solving measures of sealing properties of plug sliding door of high speed EMU[J]. Rolling Stock, 2017, 55(12): 41–42.
- [12] 李恒文. 干线轨道车辆塞拉门的密封性能研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2011.
- [13] 张亮亮. 城轨车辆塞拉门系统密封性设计及验证[J]. 电力机车与城轨车辆, 2016, 39(4): 47–49.
- ZHANG L L. Design and verification for sealing function of urban rail vehicle plug sliding door[J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2016, 39(4): 47–49.
- [14] 曾世文. 城市轨道交通车辆塞拉门关门性能研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2011.
- [15] 王伟, 邓涛, 赵树高. 橡胶Mooney–Rivlin模型中材料常数的确定[J]. 特种橡胶制品, 2004, 25(4): 8–10.
- WANG W, DENG T, ZHAO S G. Determination for material constants of rubber Mooney–Rivlin model[J]. Special Purpose Rubber Products, 2004, 25(4): 8–10.
- [16] 黄敏, 黄舟, 贾东, 等. 基于压缩试验的两种橡胶材料本构模型分析[J]. 噪声与振动控制, 2018, 38(z1): 483–486.
- HUANG M, HUANG Z, JIA D, et al. Constitutive models of two kinds of rubber materials based on compression tests[J]. Noise and Vibration Control, 2018, 38(z1): 483–486.
- [17] 龚积球, 龚震震, 赵熙雍. 橡胶件的工程设计与应用[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2003: 7–8.
- [18] 王周矩, 苏金英. ANSYS Workbench有限元分析实例详解[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2017: 302–303.
- [19] 张选利, 彭冬冬. 基于ANSYS Workbench的橡胶材料十字形试样的设计和有限元分析[J]. 橡胶工业, 2020, 67(4): 311–315.
- ZHANG X L, PENG D D. Design and finite element analysis of rubber material cruciform specimen based on ANSYS Workbench[J]. China Rubber Industry, 2020, 67(4): 311–315.

收稿日期: 2021-09-06

Study on Structural Optimization and Compression Characteristics of Rubber Sealing Strip for Sliding Plug Door of High-speed Train

LI Jinwei, GONG Zhibing, TAN Wencai, WANG Wei

(Nanjing Kangni Mechanical & Electrical Co., Ltd, Nanjing 210013, China)

Abstract: Using the two parameter Mooney–Rivlin hyperelastic constitutive model, the simulation and test results of the compression load–compression amount of the rubber sealing strips for the sliding plug door of high-speed train with different hardness were compared, and the material constants of the sealing strips with different hardness were determined. The compression characteristics of the optimized sealing strip were simulated and the air tightness was verified by experiments. The results showed that under the compression amount of 4 mm, the maximum contact pressure between the door frame bead and the sealing strip before and after optimization was basically the same. Compared with the unoptimized sealing strip, the compression load of the optimized sealing strip was reduced by 29.4%, and its sealing performance was nearly doubled.

Key words: high-speed train; sliding plug door; rubber sealing strip; structural optimization; compression characteristic; contact pressure; sealing performance