

产品·设计

轨道车辆用横向止档的研制

常浩¹,李禹¹,刘湘黔^{1*},葛琪²,程海涛²

(1. 湖南安全技术职业学院,湖南长沙 410151;2. 株洲时代新材料科技股份有限公司,湖南株洲 412007)

摘要:基于Abaqus软件开发一种轨道车辆用横向止档,该横向止档由金属底板、橡胶层和顶部耐磨板硫化加工而成。针对横向止档研制过程中出现的问题提出相应的解决措施,并完成产品试制。通过型式试验验证了该横向止档的结构可靠性,其已实现批量生产。本研究对该类产品的研发具有一定借鉴作用。

关键词:轨道车辆;横向止档;结构;有限元分析

中图分类号:TQ336.4⁺2

文献标志码:A

文章编号:1000-890X(2024)03-0216-06

DOI:10.12136/j.issn.1000-890X.2024.03.0216



OSID开放科学标识码
(扫码与作者交流)

由于具有独特的物理和化学特性,橡胶材料在轨道车辆转向架悬挂系统中得到了广泛的应用。在转向架悬挂系统中,设置在车体与构架之间的横向止档如图1所示。当车辆通过弯道时,横向止档能够有效减缓车体的横向振动,确保车辆行驶的舒适性和平稳性,同时防止车体出现过大的横向位移,保障行车安全^[1-5]。



图1 横向止档的安装示意

Fig. 1 Diagram of installation of lateral stop

本工作基于Abaqus软件,在满足客户各项要求的前提下开发一种结构紧凑型横向止档,其间针对试制过程中出现的问题提出相应的解决措施,顺利完成产品试制,并通过型式试验验证该产品结

构的可靠性,实现批量生产和装车,这对类似产品的开发具有参考性^[6-8]。

1 横向止档的技术要求

横向止档是由金属底板(简称底板)、橡胶层和顶部耐磨板(简称耐磨板)在一定硫化条件下加工而成的。其底板和橡胶层的设计主要包括刚度计算、强度校核以及疲劳寿命预测等^[9]。本工作需要的横向止档在限定轮廓尺寸的前提下,有较高的刚度要求,其刚度非线性明显。

通过前期的仿真计算,本工作横向止档采用底板与耐磨板之间夹橡胶层的“三明治”结构,如图2所示。该结构采用在橡胶层中部打孔的方式实现变刚度的目标,耐磨板可以保障纵向滑动的灵活性。

2 有限元仿真分析

在横向止档的开发中,有限元技术的应用极大地缩短了产品的开发周期,减少了试验设备的投入,降低了开发成本。通过有限元仿真分析可灵活调整产品的结构直至各项性能满足要求,且能有

基金项目:湖南省教育厅科学研究项目(22C0753);湖南省普通高校青年骨干教师培养项目(2023年);湖南安全技术职业学院科研项目(A Y22C003)

作者简介:常浩(1988—),男,湖南长沙人,湖南安全技术职业学院讲师/工程师,硕士,主要从事橡胶弹性元件的系统结构设计及仿真研究。

***通信联系人**(544799193@qq.com)

引用本文:常浩,李禹,刘湘黔,等.轨道车辆用横向止档的研制[J].橡胶工业,2024,71(3):216-221.

Citation: CHANG Hao, LI Yu, LIU Xiangqian, et al. Development of lateral stop for rail vehicle[J]. China Rubber Industry, 2024, 71(3): 216-221.

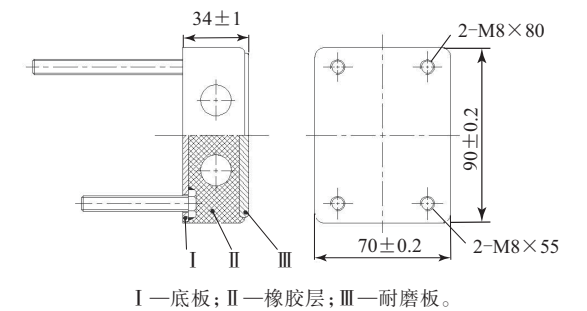


图2 横向止档的结构示意
Fig. 2 Diagram of structure of lateral stop

效避免产品出现应力集中^[10]。

2.1 有限元模型的建立

横向止档的有限元模型采用简化后的实体全模型(见图3),底板和耐磨板采用C3D8R单元进行模拟,橡胶层采用C3D8H单元进行模拟,底板网格数量为5 640,耐磨板网格数量为8 460,橡胶层网格数量为46 389。

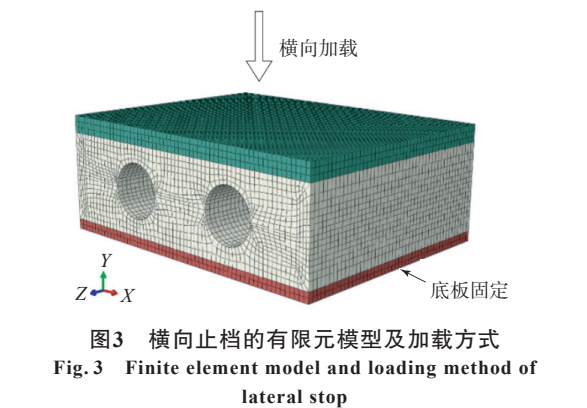


图3 横向止档的有限元模型及加载方式
Fig. 3 Finite element model and loading method of lateral stop

2.2 橡胶材料的超弹性模型及性能

根据横向止档的结构特点,其橡胶材料采用天然橡胶胶料,本构模型采用超弹性本构模型,相应的Mooney-Rivlin参数如下:邵尔A型硬度60度, C_{10} 0.269 MPa, C_{01} 0.065 MPa, D_1 0.000 1。这些数据来源于株洲时代新材料科技股份有限公司的材料基础数据库。

横向止档橡胶材料的物理性能如表1所示。

横向止档底板由Q345B低碳合金钢板与螺栓

表1 橡胶材料的物理性能			
Tab. 1 Physical properties of rubber material			
项 目	测试值	指标	
邵尔A型硬度/度	55		
拉伸强度/MPa	29.4	≥15	
拉断伸长率/%	555	≥400	

焊接而成,耐磨板采用锦纶66材料,二者的材料性能要求分别如表2和3所示。

表2 底板材料的性能要求			
Tab. 2 Property requirements of bottom plate material			
项 目	指标	项 目	指标
弹性模量/GPa	200	屈服强度/MPa	≥325
泊松比	0.29	拉伸强度/MPa	470~630

表3 耐磨板材料的性能要求			
Tab. 3 Property requirements of wear-resistant plate material			
项 目	指标	项 目	指标
拉伸强度/MPa	≥65	压缩强度/MPa	≥85
弯曲强度/MPa	≥60	洛氏硬度(HRR)	110±10
缺口冲击强度/(kJ·m ⁻²)	≥6.5		

2.3 载荷与边界条件

加载过程贴近实际,采用底板固定及横向施加载荷的方式(见图3)。

3 结果与讨论

3.1 结构可靠性

横向止档的横向载荷-变形曲线如图4所示,在横向极限载荷下横向止档的应变和应力云图如图5所示。

从图4可以看出,横向止档的试验和仿真横向载荷-变形曲线基本吻合,该横向止档的结构能够较好地满足变刚度的设计要求。

从图5可以看出:在横向极限载荷下横向止档橡胶层的最大应变为106.9%,远低于橡胶材料的拉断伸长率;底板的最大应力为27.62 MPa,远小于其材料的屈服强度;耐磨板承受的最大应力为

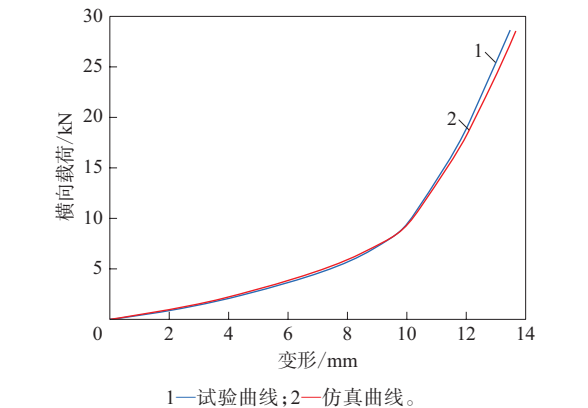


图4 横向止档的横向载荷-变形曲线
Fig. 4 Lateral load and deformation curves of lateral stop

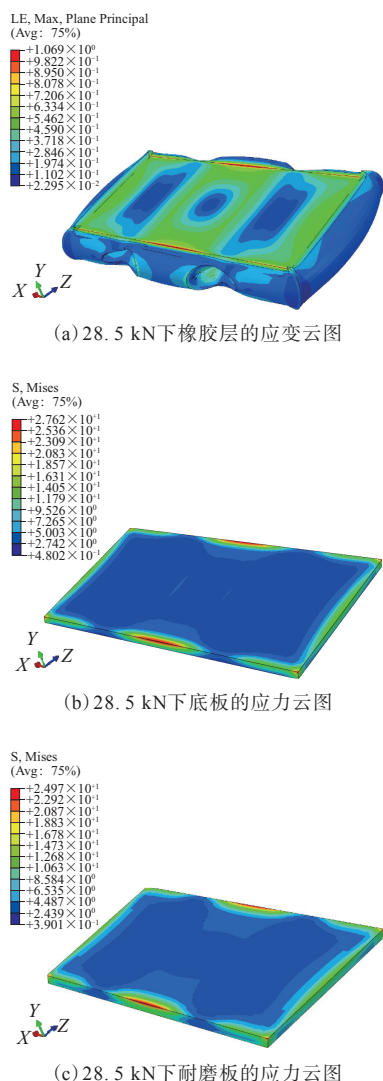


图5 在横向极限载荷下横向止档的应变和应力云图
Fig. 5 Strain and stress nephograms of lateral stop under lateral ultimate load

24.97 MPa, 满足其材料的强度要求。因此, 横向止档的结构可靠性能够得到保证。

3.2 产品试制

本工作横向止档较小, 且刚度性能要求较高, 在试制过程中多次出现质量问题, 通过设计、工艺、检测等部门的合作, 均得到妥善解决。现将问题和解决措施简介如下。

(1) 安装尺寸难以保证。横向止档的安装尺寸公差较小, 而底板仅有3 mm厚, 底板在运输和喷砂过程中出现碰撞、硫化过程中出现热胀冷缩不均匀(在橡胶层挖孔部位更为明显)现象均会导致横向止档的安装尺寸变化, 其中碰撞导致的安装尺寸变化是随机的, 而热胀冷缩导致的安装尺寸

变化则有规律可循。

解决措施如下: 横向止档的底板采用泡棉、气泡袋等包装后运输, 采用定喷方式喷砂, 从而避免变形; 通过对10个横向止档样品的整个加工过程的跟踪测量, 发现其硫化的热胀冷缩会导致0.5 mm左右的变形尺寸偏差(见图6), 在产品优化设计中将该变形计入。

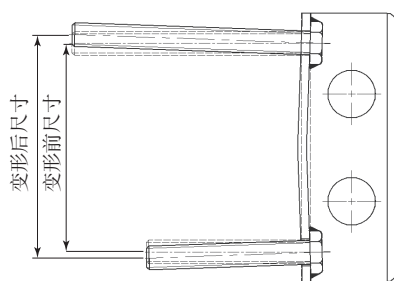


图6 硫化后横向止档的变形示意
Fig. 6 Diagram of deformation of lateral stop after vulcanization

(2) 底板与螺栓焊接处易反酸。初始设计中横向止档的底板与螺栓采用点焊的方式固定, 在硫化过程中发现底板与螺栓头间隙有反酸的现象[见图7(a)], 影响胶粘剂的粘结性能。

解决措施如下: 横向止档的底板与螺栓采用满焊后打磨的处理方式[见图7(b)], 既解决了反酸问题又可以避免焊缝过大影响横向止档的刚度。

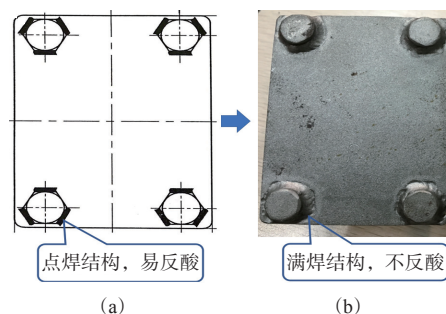


图7 横向止档底板的防反酸结构改进
Fig. 7 Improvement of anti acid structure of bottom plate of lateral stop

(3) 耐磨板容易错位。针对横向止档的结构特点, 其硫化装模采用倒置固定的形式, 耐磨板在模具槽内依靠自身重力定位。由于耐磨板的质量较小, 横向止档硫化时因高温高压橡胶流体的冲击作用, 会出现耐磨板错位的现象[见图8(a)]。

解决措施如下: 在放置耐磨板的横向止档四周添加固定卡扣[见图8(b)], 保证耐磨板准确定位。

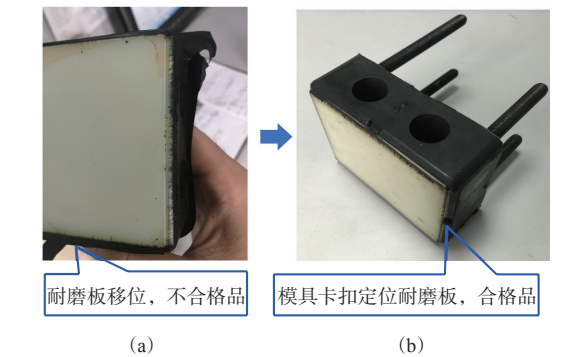


图8 耐磨板固定前后的横向止档
Fig. 8 Lateral stop before and after fixation of wear-resistant plate

4 型式试验验证

根据横向止档的安装位置及使用功能, 本工作设计了横向止档的型式试验验证方案(见表4), 对外观、尺寸和材料性能检验合格的横向止档产品进行试验验证^[11-12]。

表4 横向止档的型式试验验证方案
Tab. 4 Verification scheme for type experiments of lateral stop

序号	试验项目	序号	试验项目
1	横向静态刚度试验	3	热老化试验
2	摩擦试验	4	疲劳试验

4.1 横向静态刚度试验

横向止档的横向静态刚度试验方案为: 连续施加0~28.5 kN的3个横向加、卸载循环, 加、卸载速度均为20 mm·min⁻¹, 记录第3个循环的加载中1.5、9.2和27.5 kN载荷下的变形。

横向止档的横向静态刚度试验装置如图9所示, 横向止档的横向载荷-变形特性如表5所示。

4.2 摩擦试验

为了确定横向止档的摩擦性能, 验证纵向位移过大时横向止档能否及时滑动, 本工作对横向



图9 横向静态刚度试验装置
Fig. 9 Device of lateral static stiffness experiment

表5 横向止档的横向载荷-变形特性
Tab. 5 Lateral load-deformation characteristics of lateral stop

载荷/kN	变形/mm	
	测试值	指标
0	0	0
1.5	3.5	3.3±0.66
9.2	9.5	10.0±2.00
27.5	12.6	13.3±2.66

止档进行了摩擦试验, 试验装置如图10所示。横向止档的摩擦试验结果如表6所示。

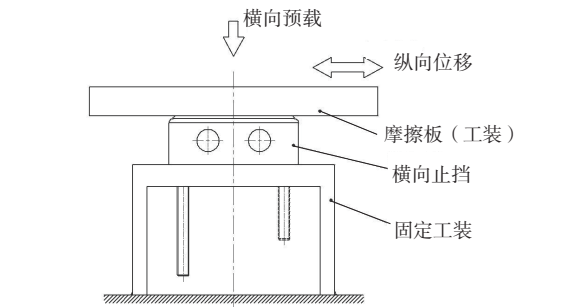


图10 摩擦试验装置示意
Fig. 10 Diagram of device of friction experiment

表6 横向止档的摩擦试验结果
Tab. 6 Friction experiment results of lateral stop

项 目	加载速度/(mm·s ⁻¹)		
	1	5	15
打滑点纵向位移 ¹⁾ /mm	10	8	5
摩擦因数	0.141	0.172	0.190

注: 横向载荷为10 kN, 水平位移为±30 mm, 加载循环次数为5次。1) 横向止档底板与摩擦板开始相对滑动时的纵向位移。

从表6可以看出: 在不同的加载速度下, 横向止档的打滑点纵向位移和摩擦因数各不相同, 最大的打滑点纵向位移为10 mm; 加载速度越大, 打滑点纵向位移越小, 加载速度为15 mm·s⁻¹时, 打滑点纵向位移为5 mm, 此时摩擦因数为0.190, 仍满足设计要求(≤0.200)。

摩擦试验后的横向止档如图11所示。

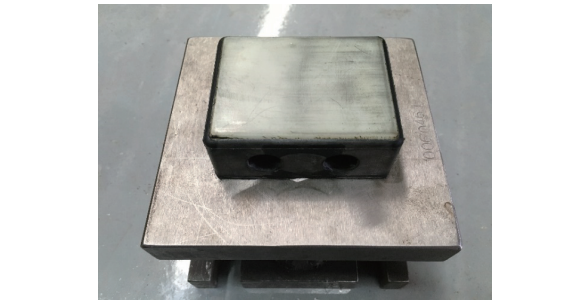


图11 摩擦试验后的横向止档
Fig. 11 Lateral stop after friction experiment

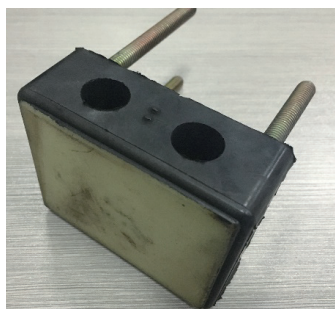
从图11可以看出,摩擦试验后的横向止挡外观良好,无开裂、脱胶和掉渣等现象,满足设计要求。

4.3 热老化试验

热老化试验主要验证横向止挡在较高的环境温度下的性能变化,试验过程为:先将横向止挡在70℃的环境中放置14 d,再在室温环境中放置48 h,之后进行性能检测。横向止挡热老化试验如图12所示。



(a) 热老化试验装置



(b) 热老化试验后横向止挡外观

图12 横向止挡的热老化试验

Fig. 12 Thermal aging experiment of lateral stop

经检测,热老化试验后横向止挡的横向刚度变化率约为+7%,满足技术要求(不超过+15%),且承受横向载荷22.25 kN时,变形为11.7 mm,也满足技术要求(≤ 16 mm)。

4.4 疲劳试验

完成横向止挡结构与刚度的匹配后,采用基于Abaqus和Endurica平台下的多轴疲劳寿命预测方法对横向止挡进行疲劳寿命预测,并针对预测寿命合格的横向止挡进行疲劳试验^[13]。

疲劳试验是在产品结构开发阶段验证其设计可靠性的有效手段,本工作根据横向止挡的实际使用工况设计了如图13所示的疲劳试验装置,其模拟横向止挡实际使用过程中同时出现横向载荷和纵向位移的情况。

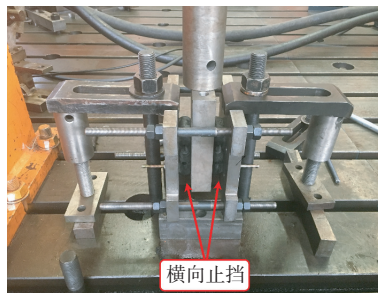


图13 疲劳试验装置

Fig. 13 Device of fatigue experiment

疲劳试验参考EN 13913—2003进行,实时监测橡胶层温度,采用风扇、空调等保障橡胶层温度不高于40℃,试验方法如下:横向预载为8.9 kN(静态),纵向位移为 ± 10 mm(动态,频率1~2 Hz),疲劳73 000次,共有7 300个小循环,每个小循环包含10个周期(误差为 ± 10 mm),相邻2个小循环间隔2 s进行。疲劳试验后的横向止挡如图14所示。

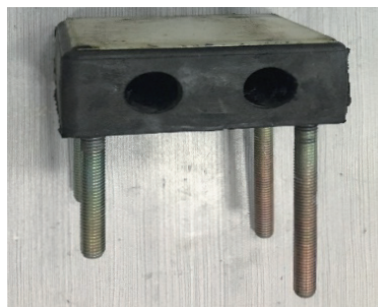


图14 疲劳试验后的横向止挡

Fig. 14 Lateral stop after fatigue experiment

对试验后的横向止挡进行外观检查,并测量其横向刚度和自由高度。从图14可以看出,疲劳试验完成后,横向止挡的橡胶层、耐磨板和底板均没有裂纹和严重磨损等损坏,组件之间没有开胶,外观良好。另外,疲劳试验后的横向止挡承受横向载荷22.25 kN时变形为10 mm(要求 ≤ 16 mm),横向刚度变化率最大为+7.56%(要求 $\leq +15\%$),自由高度变化为+1.5 mm(要求 $< +2.5$ mm)。试验结果表明,该横向止挡的使用寿命能较好地满足设计要求。

5 结论

(1) 本工作开发的横向止挡的刚度具有明显的非线性,试验表明其结构的可靠性高,能较好地满足轨道车辆过弯道时的横向变刚度要求,同时

满足车辆的动力学性能。

(2) 本工作开发的横向止挡采用“三明治”结构,耐磨板使横向止挡在10 mm的纵向变形时即可打滑,能有效避免因纵向大变形导致横向止挡的剪切力过大,从而延长横向止挡的疲劳寿命,降低其全生命周期成本。

(3) 本工作横向止挡的开发充分考虑了底板运输碰撞、工艺规程和硫化变形(尤其橡胶层的挖孔等结构会影响橡胶层收缩率和底板热胀冷缩均匀性)等多方面因素对产品性能的影响,产品的性能稳定。

参考文献:

- [1] 龚积球,龚震震,赵熙雍. 橡胶件的工程设计及应用[M]. 上海:上海交通大学出版社,2003.
- [2] 严雋毫,傅茂海. 车辆工程[M]. 北京:中国铁道出版社,2008.
- [3] 彭立群,林达文,周鹏,等. 轨道交通橡胶弹性元件蠕变试验设计与研究[J]. 机车车辆工艺,2021(4):40-43.
PENG L Q, LIN D W, ZHOU P, et al. Design and study of creep test for rubber elastic elements in rail transit[J]. Locomotive & Rolling Stock Technology, 2021(4):40-43.
- [4] 彭立群,林达文,王进. 橡胶弹性元件复合加载疲劳试验装置及方法[P]. 中国:CN 116067809A, 2023-05-05.
- [5] 潘锋,彭立群,林达文,等. 低温和频率对橡胶弹性元件刚度性能的影响[J]. 橡胶工业,2020,67(5):323-329.
PAN F, PENG L Q, LIN D W, et al. Influence of low temperature and frequency on the stiffness performance of rubber elastic components[J]. China Rubber Industry, 2020, 67(5):323-329.
- [6] 卜继玲,刘柏兵,吴希. 硫化工艺仿真技术在橡胶弹性元件研发中的应用[J]. 机车电传动,2021(1):20-24.
BU J L, LIU B B, WU X. Application of vulcanization process simulation technology in the development of rubber elastic components[J]. Electric Drive for Locomotives, 2021(1):20-24.
- [7] 黄友剑. 减振橡胶疲劳寿命预测方法与工程应用[D]. 湘潭:湘潭大学,2020.
HUANG Y J. Prediction method of fatigue life of vibration damping rubber and its engineering application[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2020.
- [8] 常浩,张杨,程海涛,等. 基于有限元仿真技术的轨道车辆锥形弹簧的结构优化研究[J]. 橡胶工业,2023,70(6):443-450.
CHANG H, ZHANG Y, CHENG H T, et al. Structural optimization of conical spring of rail vehicle based on finite element simulation technology[J]. China Rubber Industry, 2023, 70(6):443-450.
- [9] 常浩. 多轴载荷下橡胶球铰疲劳寿命预测方法研究[D]. 湘潭:湘潭大学,2015.
CHANG H. Research on fatigue life prediction method for rubber ball joints under multi axial loads[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2015.
- [10] 何燕. 橡胶横向止挡结构设计[J]. 机械强度,2010,32(3):513-516.
HE Y. Structure design of rubber transverse backstop[J]. Journal of Mechanical Strength, 2010, 32(3):513-516.
- [11] 孙海燕,兰加标,冯万盛,等. 一种轨道车辆用纵向牵引橡胶装置的设计[J]. 铁道机车车辆,2018,38(1):57-61.
SUN H Y, LAN J B, FENG W S, et al. Design and application of a kind of rubber traction equipment used on railway vehicle[J]. Railway Locomotive & Car, 2018, 38(1):57-61.
- [12] 彭立群,林达文,周鹏,等. 轨道交通橡胶弹性元件疲劳性能试验设计及应用[J]. 橡塑技术与装备,2023,49(7):48-53.
PENG L Q, LIN D W, ZHOU P, et al. Design and application of fatigue performance test for rubber elastic components in rail transit[J]. China Rubber/Plastics Technology and Equipment, 2023, 49(7):48-53.
- [13] 葛琪,黄友剑,邓娇,等. 有限元仿真在高速动车组橡胶牵引球铰结构优化中的应用[J]. 特种橡胶制品,2021,42(4):43-48.
GE Q, HUANG Y J, DENG J, et al. Application of FEA simulation to structural optimization of traction bushing used for high-speed EMU[J]. Special Purpose Rubber Products, 2021, 42(4):43-48.

收稿日期:2023-11-16

Development of Lateral Stop for Rail Vehicle

CHANG Hao¹, LI Yu¹, LIU Xiangqian¹, GE Qi², CHENG Haitao²

(1. Hunan Vocational Institute of Safety Technology, Changsha 410151, China; 2. Zhuzhou Times New Material Technology Co., Ltd, Zhuzhou 412007, China)

Abstract: A lateral stop for rail vehicle was developed based on Abaqus software. The lateral stop was made of metal bottom plate, rubber layer and top wear-resistant plate by vulcanization processing. Corresponding solutions were proposed to the problems encountered during the development process of the lateral stop, and the trial production of the product was completed. The structural reliability of the lateral stop had been verified through type experiments, and the lateral stop had been put into mass production. This study had certain reference value for the research and development of this type of products.

Key words: rail vehicle; lateral stop; structure; finite element analysis