

动车组车钩缓冲装置橡胶缓冲器失效机理分析及优化^{*}

郑 伟 闫立志 张泽云 鲁青君 王金莎

(中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 266111, 青岛//第一作者, 正高级工程师)

摘 要 基于目前动车组车钩缓冲装置的检修要求,为了延长动车组的检修周期,对橡胶缓冲器进行了动载荷耐久试验和热老化试验。通过对比分析两项试验后橡胶缓冲器的自由高数据,发现交变动载荷只对初始状态的橡胶缓冲器作用效果明显,而橡胶材料的老化才是导致橡胶缓冲器失效的主要因素。研发出橡胶缓冲器改良品,并对其进行耐久性试验和热老化试验,发现改良后的橡胶缓冲器耐老化性能较改良前有显著改善,满足取消动车组运行120万km(约3年)分解检修的要求。

关键词 动车组; 车钩缓冲装置; 橡胶缓冲器; 失效机理
中图分类号 U260.34⁺²
DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.06.033

Failure Mechanism Analysis and Performance Optimization of Rubber Draft Gear of Coupler Buffer in EMU

ZHENG Wei, YAN Lizhi, ZHANG Zeyun, LU Qingjun, WANG Jinsha

Abstract Based on the maintenance requirements of current EMU coupler buffer device, to prolong the maintenance cycle of EMU, the dynamic load endurance test and thermal aging test are carried out on the rubber draft gear. By comparing and analyzing the free height data of the rubber draft gear after the two tests, it is found that the alternating dynamic load only has a significant effect on the rubber draft gear in the initial state, and the aging of the rubber material is the main factor leading to function failure. Modified rubber draft gear is developed, on which endurance test and thermal aging test are carried out. Results show that aging resistance performance of the modified rubber draft gear is significantly improved, which meets the requirements to cancel the breakdown maintenance for every 1.2 million km (about 3 years).

Key words EMU; coupler buffer device; rubber draft gear; failure mechanism

Author's address CRRC Qingdao Sifang Co., Ltd., 266111, Qingdao, China

车钩缓冲装置是保证动车组运行安全性和舒适性的核心部件之一。按照目前动车组车钩缓冲装置的检修要求,车钩缓冲装置必须在运行120万km(约3年)后返厂分解更换橡胶缓冲器^[1],该检修要求成为延长动车组检修周期的最大障碍。因此,研究动车组车钩缓冲装置橡胶缓冲器的失效机理,在此基础上优化、改进橡胶缓冲器性能,对延长车钩缓冲装置的检修周期具有重要的实际应用价值。

1 动车组车钩缓冲装置橡胶缓冲器的功能及原理

车钩缓冲装置中橡胶缓冲器的主要作用是吸收列车连挂和运行过程中的列车低速冲击能量^[2-3]。每套动车组车钩缓冲装置(见图1)包含2组橡胶缓冲器,其中,橡胶缓冲器1(GK666)主要用于吸收列车运行过程中拉伸方向的冲击能量,橡胶缓冲器2(GK667)主要用于吸收列车运行过程中压缩方向的冲击能量^[4]。

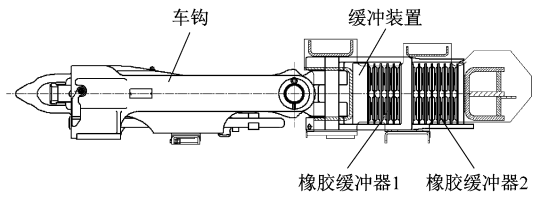


图1 车钩缓冲装置结构

Fig.1 Structure of coupler buffer device

2 橡胶缓冲器失效机理分析

根据CRH2型动车组在运行120万km后车钩

^{*} 中国国家铁路集团科技研究重大项目(P2020J010)

缓冲装置中橡胶缓冲器的各项技术参数统计结果(见表1)分析,现有车钩缓冲装置中橡胶缓冲器失效的主要原因是车钩缓冲装置在运行 120 万 km 后,橡胶缓冲器的自由高检测值(静置 24 h)超出其限值要求,导致橡胶缓冲器无法继续使用。

表 1 CRH2 型动车组运行 120 万 km 后橡胶缓冲器自由高统计结果

Tab.1 Statistical results of rubber draft gear free height after CRH2 EMU operating 1.2 million km

橡胶缓冲器型号	自由高限值/mm	自由高检测值/mm
GK666	≥154	152.4
CK667	≥214	212.2

针对橡胶缓冲器在动车组列车运行过程中所承受的载荷变化特点、应用环境及橡胶的材料特性等 3 方面进行分析,导致橡胶缓冲器在运行 120 万 km 后自由高下降的可能因素主要有 2 个:一是橡胶缓冲器在列车运行过程中所承受的交变动态拉伸和压缩载荷导致橡胶缓冲器发生蠕变;二是由于橡胶缓冲器在列车运行过程中所处的环境因素导致的橡胶材料老化^[5]。

为了进一步研究导致橡胶缓冲器自由高下降的主要原因,本文通过动载荷耐久试验和热老化试验,模拟橡胶缓冲器在列车实际运行过程中受到交变动态拉伸和压缩载荷的作用效果,以及其受到环境因素的影响。

为方便对比不同因素对橡胶缓冲器失效机理的影响,定义橡胶缓冲器蠕变量影响因子 δ_1 为:

$$\delta_1 = \frac{|h_0|}{|h_{总}|} \times 100\% \tag{1}$$

式中:

δ_1 ——相同温度条件下,交变动载荷对橡胶缓冲器蠕变量影响因子;

h_0 ——每 100 万次动态加载后橡胶缓冲器自由

高相对其初始状态的变化量,mm;

$h_{总}$ ——动车组运行 120 万 km 后橡胶缓冲器自由高相对其初始状态的变化量,mm。

定义橡胶缓冲器老化时间影响因子 δ_2 为:

$$\delta_2 = \left| 1 - \frac{|t_0|}{|t|} \right| \times 100\% \tag{2}$$

式中:

δ_2 ——相同动载荷条件下,环境温度因素对橡胶缓冲器自由高达到指定高度时对应老化时间的影响因子;

t_0 ——相同温度条件下,橡胶缓冲器自由高达到指定高度的时间与橡胶缓冲器失效时间(约 3 年)的时间差;

t ——动车组列车运行 120 万 km 时所用的时间,即老化失效时间。

定义橡胶缓冲器失效影响因子 $\delta = \delta_1 + \delta_2$,其中, δ 代表不同因素的影响因子对橡胶缓冲器失效的作用大小。

2.1 橡胶缓冲器动载荷耐久试验

CRH2 型动车组车钩缓冲装置中橡胶缓冲器的安装预压力约为 63.7 kN,车钩缓冲装置在动车组实际运行过程中实测的最大车钩力约为 100 kN。为了尽可能真实地模拟车钩缓冲装置在列车实际运行过程中承受的交变动态载荷,按照表 2 所示的动态载荷加载条件进行橡胶缓冲器的动载荷耐久试验^[6]。橡胶缓冲器的动载荷耐久试验加载示意图如图 2 所示。

表 2 橡胶缓冲器动载荷耐久试验加载条件
Tab.2 Loading conditions of rubber draft gear dynamic load endurance test

安装预压力/kN	动载荷/kN	加载频率/Hz	加载次数/万次	环境温度/℃
63.7	±100	1	500	23(常温)

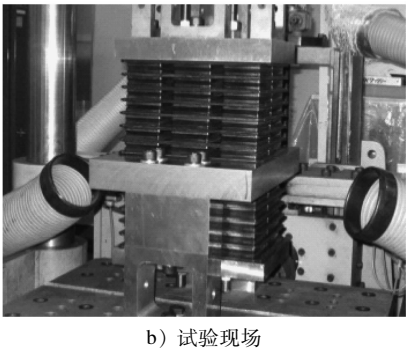
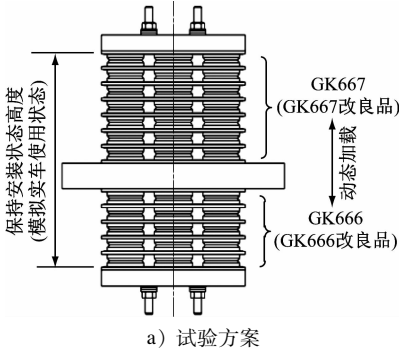


图 2 橡胶缓冲器动载荷耐久试验加载示意图

Fig.2 Schematic diagram of dynamic load endurance test of rubber draft gear

在橡胶缓冲器动载荷耐久试验过程中,每完成 100 万次动态加载,将橡胶缓冲器拆下并静置 24 h,测量其自由高,测试统计结果见表 3。该试验条件下,由于环境温度相同(常温且时间较短),因此 δ 主要由 δ_1 决定。

由表 3 可知,环境温度相同条件下,每 100 万次动态加载后,橡胶缓冲器自由高随着动态加载次数的增加而缓慢下降;在加载 300 万次后,自由高基本趋于稳定,且远大于橡胶缓冲器的最小使用限度。

表 3 每 100 万次动态加载后橡胶缓冲器自由高和 δ 统计结果

Tab.3 Statistical results of rubber draft gear free height and δ after each 1 000 000 dynamic loadings

试验次数/ 万次	不同类型橡胶缓冲器的自由高和 δ			
	橡胶缓冲器 GK666		橡胶缓冲器 GK667	
	自由高/mm	δ /%	自由高/mm	δ /%
0	168.38	0	231.80	0
100	165.18	20.03	230.26	7.86
200	164.99	21.21	229.91	9.64
300	164.52	24.16	228.93	14.64
400	163.23	32.23	228.52	16.73
500	163.20	32.42	228.50	16.84

2.2 橡胶缓冲器热老化试验

选取橡胶缓冲器 GK667,按照表 4 所示的试验条件和试验方法进行热老化试验。试验加载过程示意如图 3 所示。

表 4 橡胶缓冲器 GK667 热老化试验条件

Tab.4 Conditions of rubber draft gear GK667 thermal aging test

夹紧力/kN	试验温度/℃	预计时长/h
63.7	50	1 500 ~ 2 000
63.7	70	1 500 ~ 2 000
63.7	100	1 500 ~ 2 000

注:橡胶缓冲器 GK667 的初始自由高为 231.80 mm。

根据表 4 所示的热老化试验条件,记录橡胶缓冲器 GK667 在各种温度条件下的自由高,见表 5。根据试验数据,利用阿伦尼乌斯方程计算橡胶缓冲器 GK667 在常温(23 ℃)条件下自由高与老化时间之间的对应关系,并绘制其变化曲线,如图 4 所示。该试验条件下,除环境温度不同外,缓冲器未施加动载荷,因此 δ 主要由 δ_2 决定。

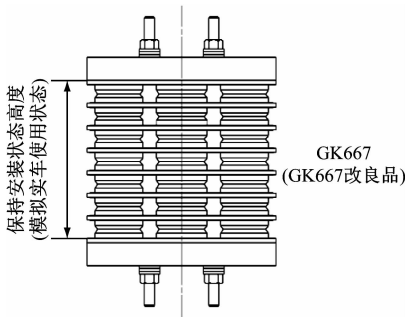


图 3 橡胶缓冲器 GK667 热老化试验加载示意图

Fig.3 Schematic diagram of thermal aging test loading of rubber draft gear GK667

表 5 橡胶缓冲器 GK667 自由高达到 212.2 mm 时对应的老化时间和 δ

Tab.5 Corresponding aging time and δ of the rubber draft gear GK667 with free height at 212.2 mm

试验温度/℃	老化时间/年	δ /%
23	3.100	96.67
50	0.185	6.17
70	0.025	0.83
100	0.004	0.13

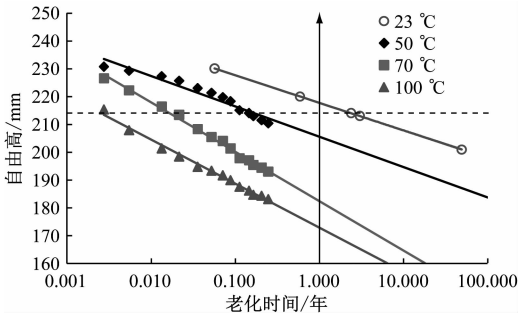


图 4 橡胶缓冲器 GK667 自由高随老化时间变化曲线

Fig.4 Curve of rubber draft gear GK667 free height changing over aging time

根据阿伦尼乌斯方程计算结果,在常温(23 ℃)条件下,橡胶缓冲器自由高达到其指定高度(212.2 mm)需约 3.1 年,该数据与动车组实际运行过程中橡胶缓冲器 GK667 自由高达到相同高度对应的老化时间基本吻合。

2.3 试验结果对比分析

通过对比分析橡胶缓冲器动载荷耐久试验数据和热老化试验数据,在环境温度相同的条件下,动载荷对 δ 的作用占比约为 32.42%;在动载荷相同的条件下,环境温度对 δ 的作用占比约为 96.67%。由此说明,动车组运行过程中由环境因素

导致的橡胶材料老化是影响车钩缓冲装置中橡胶缓冲器失效的主要原因。

3 橡胶缓冲器性能优化及效果验证

针对现车橡胶缓冲器 GK666 和 GK667 的大蠕变特点,在保持橡胶缓冲器与现有动车组车体接口尺寸及技术参数不变的基础上,研发具有低蠕变性能的橡胶缓冲器 GK666 改良品和 GK667 改良品。

针对新研制的橡胶缓冲器 GK666 改良品和 GK667 改良品,在相同条件下分别进行动载荷耐久试验和热老化试验,以验证新研发的橡胶缓冲器是否满足取消 120 万 km 分解检修的要求。

3.1 优化后的橡胶缓冲器动载荷耐久试验

橡胶缓冲器 GK666 改良品和 GK667 改良品动载荷耐久试验加载过程如图 2 所示。动态载荷加载条件如表 2 所示。动车组现车运行里程与等效试验次数之间的对应关系如表 6 所示。试验完成后将橡胶缓冲器拆下并静置 24 h,测量其自由高,测试统计结果见表 7。

表 6 动车组现车运行里程与等效试验次数对应关系表

Tab.6 Corresponding relationship between EMU current running mileage and the number of equivalent tests		
现车运行里程/万 km	等效运行时间/年	等效试验次数/万次
120	3	400
240	6	800

表 7 橡胶缓冲器改良品动态加载后的自由高

Tab.7 Free heights of modified rubber draft gears after dynamic loading		
试验次数/万次	不同类型橡胶缓冲器改良品的自由高/mm	
	GK666 改良品	GK667 改良品
0	167.8	232.9
100	165.0	230.4
200	164.6	229.7
400	164.3	228.8
500	164.2	228.3
800	163.2	228.5

3.2 优化后的橡胶缓冲器热老化试验

橡胶缓冲器 GK667 改良品的老化试验条件如表 4 所示。试验加载示意如图 3 所示。试验结果如表 8 所示。

表 8 橡胶缓冲器 GK667 改良品自由高达到指定高度时对应的老化时间

Tab.8 Corresponding aging time when modified rubber draft gear GK667 free height reaches the specified value

试验温度/℃	不同自由高下的老化时间/年	
	自由高为 212.2 mm	自由高为 214.0 mm
23	17.957	8.626
50	0.656	0.380
70	0.040	0.028
100	0.004	0.003

根据试验数据,利用阿伦尼乌斯方程计算在常温(23 ℃)条件下橡胶缓冲器 GK667 改良品的自由高与老化时间之间的对应关系,并绘制其变化曲线,如图 5 所示。橡胶缓冲器现有产品 GK667 和 GK667 改良品自由高随老化时间变化曲线如图 6 所示。

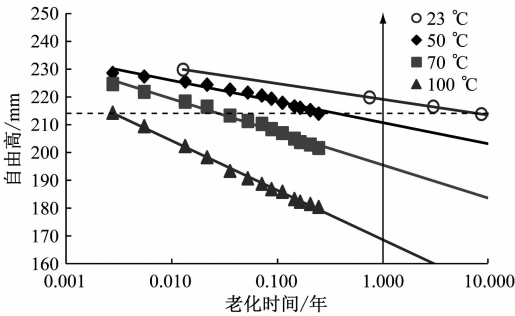
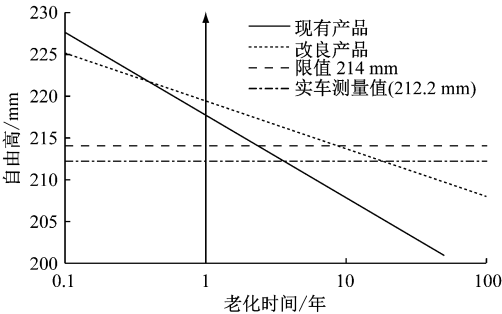


图 5 橡胶缓冲器 GK667 改良品自由高随老化时间变化曲线

Fig.5 Curve of modified rubber buffer GK667 free height changing over aging time



注:试验温度为 23 ℃。

图 6 橡胶缓冲器 GK667 和 GK667 改良品自由高随老化时间变化曲线

Fig.6 Curve of common and modified rubber buffer GK667 free heights changing over aging time

根据阿伦尼乌斯方程计算结果,在常温(23 ℃)

条件下橡胶缓冲器 GK667 改良品的自由高达到其指定高度 212.2 mm 约需 17.957 年,达到其限值 214 mm 约需 8.626 年,大于动车组实际运行 240 万 km 对应的等效时间(6 年)。因此,改良后的橡胶缓冲器满足车钩缓冲装置取消动车组运行 120 万 km 后分解检修的要求。

4 结论

1) 现有橡胶缓冲器产品失效是动载荷和老化因素共同作用的结果,但老化因素是造成橡胶缓冲器自由高下降的主要原因。

2) 相较现有橡胶缓冲器产品,改良后的橡胶缓冲器产品对动载荷的耐久性能试验效果不明显,但对环境的耐老化性能试验效果显著。

3) 改良后的橡胶缓冲器产品在试验状态下自由高达到其限值 214 mm 的时间约为 8.5 年,满足车钩缓冲装置取消动车组运行 120 万 km 分解检修的要求。

参考文献

- [1] 李瑞淳. 动车组车钩缓冲装置统型研究[J]. 城市轨道交通研究, 2013(8): 68.
- LI Ruichun. Unified design for draught-gear for electric multiple unit[J]. Urban Mass Transit, 2013(8): 68.

- [2] 孙树磊,李芾,黄运华,等. 车辆调车纵向冲击特性研究[J]. 铁道学报, 2014(1): 22.
- SUN Shulei, LI Fu, HUANG Yunhua, et al. Research on longitudinal characteristics of vehicle shunting impact[J]. Journal of the China Railway Society, 2014(1): 22.
- [3] 张锁怀,张平满,贾坤. 地铁调车作业中车钩缓冲器冲击特性分析[J]. 机械设计与研究. 2016(6): 61.
- ZHANG Suohuai, ZHANG Pingman, JIA Kun. Impact analysis on the coupler and buffer of subway vehicle for the shunting operations [J]. Machine Design and Research, 2016(6): 61.
- [4] 郑伟,孙现亮,陈书翔,等. CRH2 型动车组中间钩缓装置参数分析[J]. 城市轨道交通研究. 2015(7): 77.
- ZHENG Wei, SUN Xianliang, CHEN Shuxiang, et al. Analysis on performance parameters of CRH2 motor car set intermediate coupler buffer device[J]. Urban Mass Transit, 2015(7): 77.
- [5] 汪艳萍,张树勇,卫忠玲. 硫化天然橡胶动态力学性能研究[J]. 内蒙古工业大学学报. 2010(2): 120.
- WANG Yanping, ZHANG Shuyong, WEI Zhongling. Investigation of dynamic mechanical properties for vulcanized natural rubber [J]. Journal of Inner Mongolia University of Technology, 2010(2): 120.
- [6] 张彬,庄国华,曾向荣. 橡胶减振器蠕变的试验研究[J]. 噪声与振动控制. 2008(4): 56.
- ZHANG Bin, ZHUANG Guohua, ZENG Xiangrong. Test study on creep of rubber isolators[J]. Noise and Vibration Control, 2008(4): 56.

(收稿日期: 2020-04-15)

(上接第 170 页)

- [5] 何元勋. 高速铁路钢轨预打磨技术探讨[J]. 铁路技术创新, 2013(1): 17.
- HE Yaunxun. Discussion on high-speed railway rail pre-grinding technology[J]. Railway Technical Innovation, 2013(1): 17.
- [6] 王华川,王仲林. 打磨技术在地铁轨道养护中的实践探讨[J]. 甘肃科技, 2006(1): 51.
- WANG Huachuan, WANG Zhonglin. Discussion on practice of grinding technology in metro track maintenance[J]. Gansu Science and Technology, 2006(1): 51.
- [7] 李克飞,王进,黑勇进. 城市轨道交通钢轨预打磨技术要求及验收标准[J]. 铁道建筑, 2019(12): 147.
- LI Kefei, WANG Jin, HEI Yongjin, et al. Rail pre-grinding tech-

nical requirement and quality acceptance standard for urban rail transit[J]. Railway Engineering, 2019(12): 147.

- [8] 孙艺恬,王治,张亮,等. 北京新机场轨道交通与市区线网衔接规划方案分析[J]. 城市轨道交通研究, 2017(6): 31.
- SUN Yitian, WANG Zhi, ZHANG Liang, et al. Integration planning of Beijing New Airport Line and urban rail transit network [J]. Urban Mass Transit, 2017(6): 31.
- [9] 盛骤,谢式千,潘承毅,等. 概率论与数理统计[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008.
- SHENG Zhou, XIE Shiqian, PAN Chengyi, et al. Probability and mathematical statistics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2008.

(收稿日期: 2020-04-14)

欢迎订阅《城市轨道交通研究》

服务热线 021—56830728 转 821