

基于加速试验的地铁车辆橡胶部件寿命预测

朱元正¹, 朱新荣¹, 韩春¹, 朱甲兴¹, 陈涛²

(1 安徽中车浦镇城轨交通运维科技有限公司, 安徽合肥 230011; 2 西南交通大学, 四川成都 610000)

摘要: 为了延长地铁车辆关键橡胶部件的服役寿命, 该文提出了一种基于加速寿命试验的寿命预测方法。针对地铁车辆上的车门护指胶条和贯通道橡胶, 使用新橡胶和已经服役五年的橡胶分别进行加速寿命试验。在试验过程中, 测试车门护指胶条的断裂伸长率、拉伸强度以及硬度, 测试贯通道橡胶的硬度。使用二次函数拟合橡胶各项参数的变化, 通过换算加速时间确定橡胶对应的实际服役时间, 对橡胶的剩余寿命进行预测。研究结果表明: 新橡胶和已经服役五年的橡胶在加速试验中呈现不同的性能变化趋势, 通过预测不同橡胶的剩余寿命, 为地铁车辆橡胶部件服役寿命的延长提供理论依据。

关键词: 地铁车辆; 橡胶部件; 加速试验; 寿命预测; 维修策略

中图分类号: TQ 333

Life Prediction of Rubber Parts for Subway Vehicles Based on Acceleration Test

ZHU Yuan-zheng¹, ZHU Xin-rong¹, HAN Chun¹, ZHU Jia-xing¹, CHEN Tao²

(1 Anhui CRRC Puzhen Urban Rail Transit Operation and Maintenance Technology Co., Ltd., Hefei 230011, Anhui, China;

2 Southwest Jiaotong University, Chengdu 610000, Sichuan, China)

Abstract: In order to extend the service life of key rubber components for subway vehicles, this paper proposes a life prediction method based on accelerated life tests. The accelerated life test is conducted for the door finger guard rubber and passageway rubber on subway vehicles, using new rubber and rubber that has been in service for five years. During the tests, the elongation at break, tensile strength, and hardness of the door finger guard rubber, and the hardness of passageway rubber were tested. A quadratic function was used to fit the variations of each parameter of the rubber, and the remaining life of the rubber was predicted by converting the acceleration time to determine the corresponding actual service time of the rubber. The results show that new rubber and rubber that has been in service for five years show different performance trends in the acceleration test, and by predicting the remaining life of different rubbers, it can provide a theoretical basis for the extension of the service life of rubber parts for subway vehicles.

Key words: subway vehicles; rubber components; accelerated testing; life prediction; maintenance strategies

地铁车辆作为现代城市交通的重要组成部分, 其可靠性和安全性要求极高。在地铁车辆的日常运行中, 橡胶是保障车辆正常运营的重要部件。悬挂系统中的减震器和隔振垫能有效吸收和隔离车辆在行驶过程中产生的振动和冲击, 提高乘坐舒适性, 同时减少对车辆结构的机械磨损^[1-2]。橡胶密封条和垫圈被广泛用于车门、窗户及其他接合部位, 防止雨水、灰尘以及外界污染物的侵入, 同时也保持车厢内的压力和气候控制系统的效率。车门边缘的护指橡胶条可以防止乘客在门关闭时夹伤手指, 提供必要的安全保护。此外, 一些防滑橡胶材料也用于车厢内的地面, 提高乘客的行走安全。某些橡胶部件如软管和接头被用于各种流体(如冷却液、润滑油)的输送中, 它们必须具备足够的弹性和耐用性, 以适应复杂的运行条件^[3]。同时, 橡胶部件在车辆结构中也起到隔音的作用, 尤其是在连接和固定各种设备的过程中, 帮助降低车辆运行和外部环境噪音对乘客的影响。因此, 橡胶部件在确保地铁车辆运行的可靠性、安全性和舒适

性方面起着至关重要的作用。对橡胶部件严格按照制定的标准进行维护和更换, 是保证地铁车辆高效和安全运营的必要前提。

随着地铁车辆运营时间的增长, 橡胶部件往往会呈现劣化、老化等现象, 从而影响其性能和寿命。因此, 探究橡胶各性能参数与其剩余寿命之间的关系, 对地铁车辆橡胶部件的可服役寿命进行准确预测, 对于确保地铁系统的安全、经济运行具有重要意义。橡胶的传统自然老化试验虽然可以模拟橡胶的真实退化过程, 但是试验周期较长, 因此, 为了模拟橡胶在相对短时间内经历的长期使用过程, 从而更快获取橡胶性能参数的变化趋势和寿命预测信息, 对橡胶进行加速老化试验^[4]。

橡胶材料的退化通常受机械应力、温度、紫外线等多种因素影响且其退化过程中的物理特征、力学性能特征和微观化学成分均可以表征其性能退化程度^[5]。肖坤等^[6]以压缩永久变形率作为老化参数, 对某引信用 O 型橡胶密封圈在不同温度下进行恒定应力加速退化试验,

将退化数据外推来模拟试验环境下O型圈的老化结果。同时,将外推结果与模拟试验结果进行对比,验证了加速退化试验的可行性。Woo等^[7]通过测定橡胶在加速老化条件下的力学性能变化,预测了三元乙丙橡胶和丁腈橡胶的使用寿命,把橡胶产品在不同温度下进行不同时间的老化试验后,将老化试验结果和服役条件下使用阿伦尼乌斯方法的老化过程相结合,通过橡胶材料寿命预测方程预测橡胶的使用寿命。鲁相等^[8]提出了一种基于似然比检验的橡胶密封件加速试验机理一致性判别方法,针对橡胶密封件失效机理一致和变化两种不同情况,分别提出对数线性和非对数线性两类加速模型对部件退化过程进行描述,然后通过似然比检验判别其失效机理是否发生变化,并由此确定失效机理一致性的应力水平界限。Xu等^[9]对连接器密封件用橡胶件进行了不同温度下的恒定应力加速老化试验,将压缩永久变形率作为退化参数,建立预测模型对橡胶在室温下的使用寿命进行预测。Chen等^[10]针对橡胶密封圈,基于累积损伤理论建立寿命预测模型,提出了一种基于循环和恒温应力结合加速退化试验的寿命预测方法。吕向飞等^[11]为了提高橡胶部件加速试验数据外推的准确性,在加速时温数据的基础上提出了一种加权外推方法对橡胶的加速寿命进行预测,首先采用非线性最小二乘法对加速因子进行识别,然后通过所建立的模型对活化能进行加权推算,最后根据活化能推算出橡胶在不同温度下的寿命,有效提高了橡胶寿命预测的准确率。Sun等^[12]将传统加速模型和Gamma随机过程相结合,对不同温度应力下橡胶O型圈的可靠性和贮存寿命进行了评估。

本文提出了一种基于加速试验的地铁车辆橡胶服役寿命预测方法。选取地铁车辆车门护指胶条和贯通道橡胶两个关键橡胶部件,分别使用新橡胶件和已经服役五年的橡胶件进行加速寿命试验。通过测试并拟合橡胶的性能参数变化情况,推导出橡胶的实际服役时间,并预测橡胶剩余寿命。

1 加速试验数据拟合

对橡胶性能参数在加速试验过程中的变化趋势进行拟合。使用决定系数 R^2 和均方误差(MSE)对预测效果进行评价,计算公式如式(1)和式(2)所示:

$$R^2(y, y^{pre}) = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y_i^{pre})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - y_{mean})^2} \quad (1)$$

$$MSE(y, y^{pre}) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - y_i^{pre})^2 \quad (2)$$

式(1)~(2)中, y 为实验数据, y_{mean} 为数据平均值, y_i^{pre} 为拟合曲线预测数据。

MSE衡量预测值与真实值之间偏差, R^2 反映的自变量 x 对因变量 y 的变动的解释程度。 R^2 越接近于1,MSE越接近于0,模型对参数的拟合效果越好。

1.1 车门护指胶条

对车门护指胶条(新胶条、服役5年胶条)在36天50℃的加速试验中的性能参数变化(断裂伸长率、拉伸强度、硬度)进行二次函数拟合,换算加速试验时间对应的实际服役时间。使用 R^2 、MSE对拟合函数进行评价。断裂伸长率变化拟合函数及评价指标见表1,拟合

曲线如图1所示。在橡胶加速老化过程中,断裂伸长率呈明显下降趋势,其中已服役5年橡胶的下降速度远大于新橡胶。

表1 车门护指胶条断裂伸长率拟合函数和评价指标
Table 1 Fitting function and evaluation metrics for elongation at break of door finger guard rubber

橡胶已服役时间	拟合函数	R^2	MSE
0年	$y_1=0.61x^2-9.98x+245.86$	0.98	5.01
5年	$y_2=-0.27x^2-8.39x+298.01$	0.99	6.35

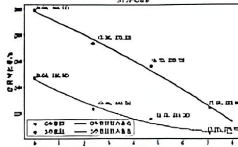


图1 车门护指橡胶断裂伸长率拟合曲线

Fig.1 Fitting curve of elongation at break for door finger guard rubber

拉伸强度变化拟合函数及评价指标见表2,拟合曲线如图2所示。在未加速试验之前,新护指橡胶拉伸强度比服役5年护指橡胶拉伸强度高出1.35MPa。拉伸强度在橡胶老化过程中会发生一定程度的下降,其中新护指橡胶在经过36天加速老化(对应服役寿命7.08年)之后下降了0.67MPa,已服役5年的护指橡胶下降了0.61MPa。

表2 车门护指胶条拉伸强度拟合函数和评价指标
Table 2 Fitting function and evaluation metrics for tensile strength of door finger guard rubber

橡胶已服役时间	拟合函数	R^2	MSE
0年	$y_1=0.0094x^2-0.16x+9.78$	0.99	0.0007
5年	$y_2=-0.00135x^2-0.078x+8.43$	1	0.0001

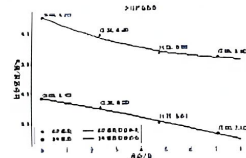


图2 车门护指橡胶拉伸强度拟合曲线

Fig.2 Fitting curve of tensile strength of door finger guard rubber

硬度变化拟合函数及评价指标见表3,拟合曲线如图3所示。在橡胶的老化过程中,硬度会随着老化程度逐渐增大,二次函数可以很好地拟合硬度增大过程。

表3 车门护指胶条硬度拟合函数和评价指标
Table 3 Fitting function and evaluation metrics for hardness of door finger guard rubber

橡胶已服役时间	拟合函数	R^2	MSE
0年	$y_1=0.036x^2+0.129x+63.01$	0.97	0.027
5年	$y_2=-0.0027x^2+0.52x+70.09$	1	0.005

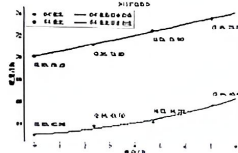


图3 车门护指橡胶硬度拟合曲线

Fig.3 Fitting curve of hardness of door finger guard rubber

1.2 贯通道橡胶

对贯通道胶条(新橡胶、已服役5年橡胶)在进行36天50℃加速试验中的性能参数进行拟合,拟合采用

二次函数,使用 R^2 和MSE评价。在加速老化过程中,硬度变化拟合函数及评价指标见表4,拟合曲线如图4所示。

表4 贯通道胶条硬度拟合函数和评价指标
Table 4 Fitting function and evaluation metrics for hardness of passageway rubber seal

橡胶已服役时间	拟合函数	R^2	MSE
0年	$y_1 = -0.109x^2 + 1.62x + 44.81$	1	0.0036
5年	$y_2 = -0.023x^2 + 1.14x + 53.198$	0.99	0.0744

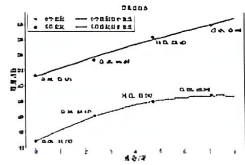


图4 贯通道橡胶硬度拟合曲线
Fig.4 Fitting curve of hardness of passageway rubber

从图4中可以看出,对于新橡胶,试验后橡胶硬度增加了6.06HA,变化速率先增大后减小,意味着橡胶硬度在服役初期变化更为明显,当达到一定服役时间后,硬度变大情况会减弱。对于已经服役5年的橡胶,试验后橡胶硬度增加了6.68HA,在进行加速试验时,随着试验时长的增加,硬度变化速率基本保持一致。

2 橡胶延长服役年限可行性分析

通过对橡胶参数变化的分析,发现老化试验过程中橡胶的性能参数出现了明显衰退。根据《CRH2A、2C及380A平台动车组-外风挡-高级修检修技术条件》标准要求:(1)当外风挡胶囊上下端部开裂长度 $\leq 5\text{mm}$ 时,通过割除或打磨端部橡胶的方法去除裂纹,割除橡胶的长度以消除裂纹为限,割除橡胶的长度最大不应超过8mm;(2)外风挡胶囊上下端部开裂长度在5~40mm时,通过割除端部橡胶的方法去除裂纹,割除橡胶的程度以消除裂纹为限,割除橡胶的长度最大不应超过45mm,外风挡上下端部开裂长度 $>40\text{mm}$ 时更新;(3)外风挡胶囊眼孔周围出现裂纹时更换新品。在36h、50℃加速试验后,所有试验橡胶未出现裂纹、开裂,符合服役条件。

在GB/T 20028《硫化橡胶和热塑性橡胶 应用阿累尼乌斯推算寿命和最高温度》中,在选择临界值时,以原始性能值变化到50%作为达到失效的临界值。针对车门护指橡胶(新橡胶)而言,在老化过程中,断裂伸长率由246.86%下降至204.83%,拉伸强度由9.77MPa下降至9.10MPa,性能参数未下降至50%,未达到失效状态。针对已服役5年的车门护指橡胶而言,在老化过程中,断裂伸长率由299.14%下降至223.9%,拉伸强度由8.42MPa下降至7.81MPa,性能参数未下降至50%,未达到失效状态。

根据《CRH2A、2C及380A平台动车组-外风挡-高级修检修技术条件》标准,贯通道橡胶在老化试验过程中未出现裂纹,符合服役条件。新的贯通道橡胶可以安全服役7.08年,已服役5年的贯通道橡胶可以延长7.08年至12.08年。

综上《CRH2A、2C及380A平台动车组-外风挡-高级修检修技术条件》和GB/T 20028两种评判指标进

行分析,橡胶在36天50℃的加速试验中未达到性能失效状态,即在实际运行环境中7.08年内可以安全服役。因此,对于新的车门护指胶条,可以安全服役7.08年。对于已服役5年的车门护指胶条,还可继续服役7.08年,即服役总寿命可达12.08年。

3 结论

本文针对地铁车辆关键部位的橡胶部件开展了加速寿命试验,重点测试了车门护指胶条的断裂伸长率、拉伸强度和硬度,以及贯通道橡胶的硬度。针对获取的试验数据采用二次函数拟合方法,将加速试验时间转换为实际服役时间,并利用决定系数 R^2 和均方误差(MSE)对拟合模型进行评价。在橡胶加速老化过程中,断裂伸长率和拉伸强度呈明显下降趋势,而硬度随老化程度增加而逐渐增大。此外,通过对新件与已服役五年的橡胶件参数拟合数据进行对比分析,推导出橡胶部件的实际服役时间,并预测其剩余寿命。研究表明,从理论上可将已服役5年的两种橡胶部件寿命延长7.08年。本文的研究结果不仅为地铁车辆橡胶部件的寿命预测提供了新的思路和方法,还为地铁车辆的运营管理提供了重要参考,促进地铁车辆维护策略的完善,延长橡胶部件的使用寿命,提高地铁车辆运行的可靠性和安全性。

参考文献

- [1] ZHANG K, YAO J Y, JIANG T M. Thermooxidation degradation and life prediction of nitrile butadiene rubber based on Kinetics model[C]//2012 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management. IEEE,2012:782-786.
- [2] KANG W, LIU J, XIONG W, et al. Basic mechanical and fatigue properties of rubber materials and components for railway vehicles: A literature survey[J]. Reviews on Advanced Materials Science, 2022,61(1):587-610.
- [3] 石伟,张凯林,谭智学,等.变温环境对橡胶力学性能的影响[J].高分子材料科学与工程,2021,37(11):110-116,124.
- [4] WANG H, ZHAO Y, MA X. Rubber lifetime prediction for ADT data considering non-arrhenius behavior [C]//2017 Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS). IEEE,2017:1-6.
- [5] GUO X, YUAN X, HOU G, et al. Natural Aging Life Prediction of Rubber Products Using Artificial Bee Colony Algorithm to Identify Acceleration Factor[J]. Polymers, 2022,14(17):3439.
- [6] 肖坤,顾晓辉,彭琛.基于恒定应力加速退化试验的某引信用O型橡胶密封圈可靠性评估[J].机械工程学报,2014,50(16):62-69.
- [7] WOO C S, CHOI S S, LEE S B, et al. Useful lifetime prediction of rubber components using accelerated testing[J]. IEEE Transactions on reliability, 2010,

(下转第42页)

3 结论

(1) 以环氧树脂、固化剂、磨碎玻璃纤维、磨碎碳纤维以及纳米二氧化硅为主要原料, 通过手工铺层技术可制备一种适合基坑支护工程用的新型纤维增强复合材料。

(2) 纳米二氧化硅的加入能够有效提升新型纤维增强复合材料的力学性能, 推荐纳米二氧化硅的最佳质量分数为 0.3%, 可使新型纤维增强复合材料的拉伸强度、压缩强度和弯曲强度分别达到 701.5MPa、152.6MPa 和 600.4MPa。

(3) 新型纤维增强复合材料具有良好的耐老化性能, 在高温高矿化度湿热老化环境下老化 16d 后, 材料的失重率仅为 0.47%, 拉伸强度、压缩强度和弯曲强度保留率均在 95% 以上, 能够满足基坑支护工程施工对材料耐老化性能的要求。

参考文献

- [1] 赵峰山. 深基坑支护施工技术在建筑工程中的实践探讨[J]. 全面腐蚀控制, 2024, 38(07):165-169.
- [2] 景芳达, 韩松, 秦野, 等. 玄武岩纤维增强聚合物复合材料及其机械性能的研究进展[J]. 当代化工, 2023, 52(01):219-222.
- [3] 柴勇林, 李秉洪, 梁晓东, 等. 纤维增强复合材料在土木工程中的应用研究[J]. 合成材料老化与应用, 2023,

- 52(06):130-132.
- [4] 张吉庆, 武亚磊, 杨俊杰, 等. 全固废胶凝材料在基坑支护中的应用研究[J]. 工程勘察, 2022, 50(08):7-12.
- [5] 陈健, 杨公标, 王志奎, 等. 纤维增强复合材料在大直径盾构隧道工程中的研究与应用[J]. 工业建筑, 2024, 54(06):54-60.
- [6] 张小平, 范乾松, 甄东华, 等. 无机纳米与有机纤维改性复材对透水混凝土耐久性影响研究[J]. 粘接, 2023, 50(11):114-117.
- [7] 韩庆, 付颖, 刘凯文. 纳米颗粒填充玻璃纤维增强环氧树脂复合材料的力学性能[J]. 塑料工业, 2024, 52(03):76-82.
- [8] 毛南平, 陈中伟, 卞荣, 等. 纤维增强树脂基复合材料芯模拟湿热老化性能[J]. 工程塑料应用, 2021, 49(01):114-119.
- [9] 徐乾倬. 碳纤维树脂基复合材料 RTM 制备及其抗高温性能[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2021.
- [10] 岳永兵. 纤维增强复合材料在土建结构加固工程中的应用[J]. 合成材料老化与应用, 2024, 53(03):74-76.
- [11] 康文. 基于 ABAQUS 的基坑支护复合材料腰梁的研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2010.
- [12] 陈超, 徐东升, 徐学勇, 等. 玻璃纤维锚杆在基坑支护中的应力分布规律[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(32):13394-13401.

(上接第 24 页)

- 59(1): 11-17.
- [8] 鲁相, 汪亚顺, 陈循, 等. 基于似然比检验的橡胶密封件加速试验机理一致性判别方法[J]. 国防科技大学学报, 2019, 41(02):144-149.
- [9] XU L, HU K, CHEN D, et al. Accelerated Aging Test and Life Prediction of Rubber Strip for Connector Sealing[C]//2021 3rd International Conference on System Reliability and Safety Engineering (SRSE). IEEE, 2021:187-191.
- [10] CHEN S, ZHANG S, HUANG B, et al. A Life Evaluation Method Based on Accelerated Degradation Tests Under

- Combination of Cycling and Constant Temperature Stresses for Rubber Sealing Rings[C]//2023 Global Reliability and Prognostics and Health Management Conference (PHM-Hangzhou). IEEE, 2023:1-6.
- [11] 吕向飞, 任琪, 张博, 等. 结合加速时温数据和加权外推的橡胶老化寿命预测[J]. 机械科学与技术, 2024, 43(06):1072-1077.
- [12] SUN B, YAN M, FENG Q, et al. Gamma degradation process and accelerated model combined reliability analysis method for rubber O-rings[J]. IEEE Access, 2018, 6:10581-10590.

《合成材料老化与应用》杂志投稿邮箱: hc11hyyy@163.com

欢迎 QQ:441438064 在线投稿