DOI：10.13890/j.issn.1000-128X.2023.01.008
文章编号：1000-128X(2023)01-0060-06

基于160 km/h电动车组的拉杆橡胶关节寿命提升研究

王峰宇[1]，程海涛[2]，赵　斌[1]，冯万盛[2]，杨　军[2]，曾繁盛[2]
（1.株洲时代瑞唯减振装备有限公司，湖南 株洲　412007；
2.株洲时代新材料科技股份有限公司，湖南 株洲　412007）

摘　要：从速度为160 km/h的动力集中电动车组转向架的轴箱拉杆橡胶关节应用失效案例出发，通过优化产品结构来解决该轴箱拉杆橡胶关节的使用寿命问题。通过运行工况的边界条件和既有结构的失效原因进行分析，基于分析结果设定合理的预压量，并结合贴近式橡胶型面和易流式金属弧面设计，以及采用合适的橡胶层厚度等多方面进行结构优化。通过对比两种结构的有限元疲劳仿真分析结果，优化结构的橡胶应变降低了9.64%，疲劳损伤值降低了60%，橡胶关节的使用寿命将显著提升。最后通过疲劳试验验证，进一步佐证了优化结构后的橡胶关节疲劳性能的提升。试验结果显示：疲劳次数提升了3倍。经过初步评估，结构优化后的橡胶关节的疲劳寿命将由2~5年提升至8年，使得机车的运行可靠性得到改善，降低非必要的维修次数。优化设计的橡胶关节目前已在线运行近4年，各项性能表现良好。本优化设计可为其他径向变形较大的橡胶关节优化提供参考：径向预压量应与橡胶关节疲劳变形相当，避免橡胶受拉伸应力；针对径向位移较大的橡胶关节类产品，贴近式橡胶型面可以均衡橡胶表面应变，可有效缓解橡胶受载后出现褶皱现象，提升橡胶关节的疲劳寿命。

关键词：轴箱拉杆橡胶关节；结构优化；有限元仿真分析；疲劳试验；寿命提升
中图分类号：U266.2　　**文献标识码：**A

Research on fatigue life improvement of axle box bushing on 160 km/h power concentrated EMUs

WANG Fengyu[1], CHENG Haitao[2], ZHAO Bin[1], FENG Wansheng[2], YANG Jun[2], ZENG Fansheng[2]

(1. Zhuzhou Times Ruiwei Anti-vibration Equipment Limited, Zhuzhou, Hunan, 412007, China;
2. Zhuzhou Times New Material Technology Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412007, China)

Abstract: The current study is aimed to extend the service life of axle box bushing mounted on the bogie of 160 km/h power concentrated EMUs by structural optimization, based on the failure cases of such a train component. Firstly, an analysis was made on the boundary conditions of operating cases and failure reasons of the original structure. Then, according to the analysis results, structural improvements were made in many aspects like a rational pre-compression, close-contact rubber profile, streamline cambered surface of steel parts, and suitable thickness of the rubber layer. By the contrast of finite element analysis (FEA) results between the optimized structure and original one, rubber strain decreased by 9.64% and fatigue damage value decreased by 60% for the former, contributing to an obvious improvement in the service life of bushings. Finally, the effectiveness of the optimized structure to improve fatigue performance was proved in the fatigue test, showing a tripled fatigue performance. Through the preliminary evaluation, the fatigue life of bushings in the optimized structure could be extended from 2-5 years to about 8 years, which could improve the operating reliability of the EMUs and reduce unnecessary maintenance. The optimized product has been applied in on-track operation for about 4 years, turning out satis-

通信作者：王峰宇（1992—），男，主要从事机车零部件产品设计开发；E-mail: wangfy3@csrzic.com
引用格式：王峰宇, 程海涛, 赵斌, 等. 基于160 km/h电动车组的拉杆橡胶关节寿命提升研究[J]. 机车电传动, 2023(1): 60-65.
Citation: WANG Fengyu, CHENG Haitao, ZHAO Bin, et al. Research on fatigue life improvement of axle box bushing on 160 km/h power concentrated EMUs[J]. Electric Drive for Locomotives, 2023(1): 60-65.

factory in all performance indexes. The optimization design presented provides a reference for other bushings with a large radial deformation. Specially, the radial pre-compression should be equivalent to fatigue deformation to avoid tensile load on the bushings; aiming at the bushings with a large radial displacement, the close-contact rubber profile could balance rubber surface strain and effectively relieve folds arising from loading on them, thus improve their fatigue life.

Keywords: axle box bushing; structural optimization; finite element analysis; fatigue test; life improvement

0　引言

速度为160 km/h的动力集中电动车组作为全面替代25T客车车型，是我国下一代普速客车的主力产品。该车型设计理念参考中国标准动车组，要求核心部件实现简统化设计，不同供应商配件可实现对等替换、互联互通。

该电动车组动力车采用200 km/h电力机车平台设计，其中200 km/h电力机车在进行车体动力学测试时因一系刚度过大出现了震颤现象。经过初步评估，需要降低一系悬挂的刚度，即在纵向牵引载荷不变的条件下，将橡胶关节的径向刚度降低55%，以增加一系的柔性，实现车辆运行的平稳性。

一系悬挂刚度降低后，橡胶关节的径向变形增加了122%，因此对橡胶关节的使用寿命要求极为严苛。本文从轴箱拉杆橡胶关节的失效形式、原因分析、仿真分析、结构优化、试验验证及装车运行入手，解决该橡胶件的失效问题，提升其疲劳寿命，最终满足使用要求。

1　既有结构分析

根据轴箱拉杆橡胶关节的应用工况以及速度为160 km/h的动力集中电动车组的维修计划，轴箱拉杆橡胶关节的设计寿命为8年。依据《机车修程手册》要求，轴箱拉杆橡胶关节的维修计划为6年架修期满后进行更换，因此，轴箱拉杆橡胶关节的使用寿命需要留有一定的设计裕量，以保证一系悬挂装置的可靠性。

1.1　轴箱拉杆橡胶关节运行工况

轴箱拉杆橡胶关节用于一系悬挂装置的导向和牵引，安装在构架和轴箱之间，主要承受径向、轴向、偏转和扭转载荷，实现缓冲和减振作用，轴箱拉杆橡胶关节结构示意如图1所示，轴箱拉杆橡胶关节技术参数及工况参数见表1。

1.2　既有结构的有限元疲劳仿真分析

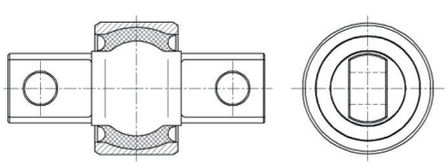
对既有结构进行疲劳载荷下的有限元应力应变分析后，进行既有结构的疲劳仿真分析。在额定工作载荷37.5 kN下，橡胶关节的橡胶应变为1.017，如图2所示。

基于Mars[1-3]的开裂能理论[4-8]的橡胶疲劳分析方法在部件的橡胶内部任意位置虚拟初始裂纹，采用开裂能表征造成裂纹扩展的撕裂能，建立开裂能与裂纹扩展速率的关系，当橡胶部位任意处的撕裂能强度超过材料的临界撕裂强度时，裂纹即发生扩展，以最终累积至裂纹长度1 mm时的寿命作为产品的形核寿命。

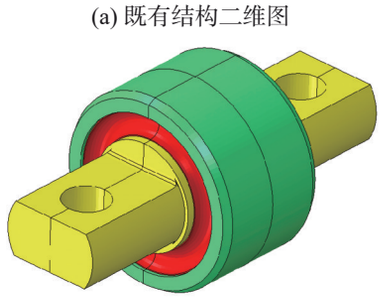
表1　技术参数及工况

Table1　Technical requirement and operation cases

参数	技术要求
径向刚度/（kN·mm^{-1}）	18×(1±20%)
使用环境温度/℃	−50~70
最大工作载荷/kN	37.5
疲劳工况	25 kN±12.5 kN，10次；−25 kN±12.5 kN，10次；20次为一个周期，交替循环进行，共计300万次



(a) 既有结构二维图



(b) 既有结构三维图

图1　既有结构橡胶关节示意图

Fig. 1　Schematic diagram of bushing in original structure

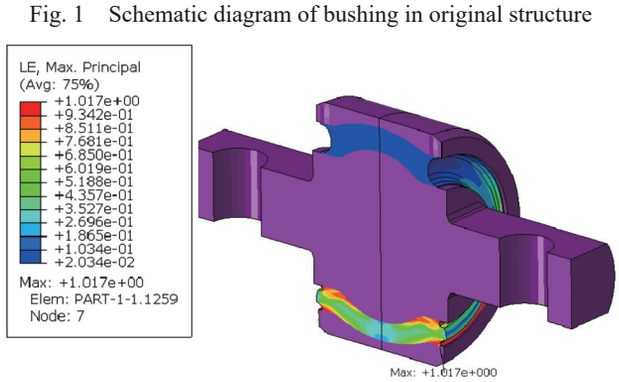


图2　既有结构在37.5 kN下的应变云图

Fig. 2　Strain contour of original structure at 37.5 kN

根据Mars的开裂能理论定义，开裂能密度与产品应变能密度建立直接关系，可以将开裂能分析理论与

橡胶有限元仿真结合，从而方便地对橡胶的形核寿命进行预报。具体结构疲劳分析方法[9-10]为：对产品进行网格划分，根据有限元仿真分析得到各工况下橡胶部件所有单元的应力−应变历程，在单元中心虚拟初始裂纹，并以此作为输入，按照开裂能疲劳仿真理论对单元中心所有方向裂纹寿命进行分析，以寿命最短方向的裂纹作为最危险位置，并将该寿命定义为该单元的形核寿命，最终统计可得到所有单元的寿命，以寿命最短的单元作为产品的疲劳破坏的危险位置。

依据疲劳仿真结果和开裂能理论计算，应用断裂力学理论，采用撕裂应变能密度方法对橡胶制品进行疲劳预测。轴箱拉杆橡胶关节橡胶体部分的疲劳寿命次数预测采用Lake-Lindly分析模型，依据在美国Axel实验室测试所得的橡胶材料疲劳裂纹扩展数据，既有结构橡胶体部分的总疲劳损伤值为1.807，预测疲劳寿命[11-13]次数为167万次，危险区域如图3所示。

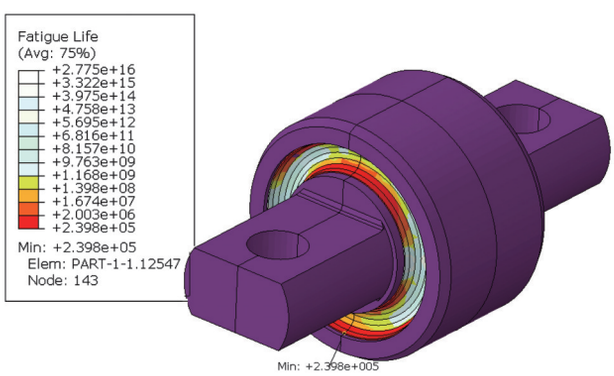


图3 既有结构疲劳寿命分析云图

Fig. 3 Fatigue life analysis contour of original structure

1.3 既有结构的疲劳试验验证

针对既有结构进行了疲劳试验验证，样品在疲劳工况下运行110万次时出现了裂纹，刚度变化率达到29.19%，在130万次时超出了刚度变化率30%的要求，无法满足橡胶关节的运行要求，疲劳后橡胶关节外观如图4所示。

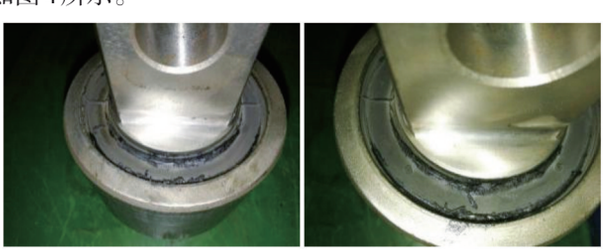


图4 疲劳失效橡胶关节外观

Fig. 4 Appearance of bushing in fatigue failure

1.4 既有结构失效原因分析

橡胶关节遵循传统结构设计，常规半圆形橡胶型面，预压缩为径向挤压，压缩应变为11.4%，在径向载荷下的变形为2.08 mm。

针对橡胶关节在疲劳试验过程中的失效问题，分析原因如下：

①预压缩不匹配。径向预压缩比径向变形小，橡胶关节受载时，橡胶部分受拉伸载荷，拉伸应力导致了橡胶初现裂纹，并迅速扩展。

②橡胶自由面较小。橡胶关节径向变形较大，因橡胶材料的不可压缩特性，受载时向自由端扩散和移动。因既有结构的橡胶自由面小，橡胶型面受载时鼓出明显，表面的拉伸应变达到了1.017，导致橡胶在受疲劳载荷反复振动时出现本体开裂，无法满足疲劳寿命要求。

③受载后，自由面存在褶皱现象。采用半圆形型面易出现褶皱区域，通过反复折叠，并迅速升温发粘，导致橡胶型面开裂，并迅速扩展。

2 轴箱拉杆橡胶关节优化设计

针对以上既有结构失效原因，对橡胶关节进行结构优化以提升其使用寿命，以下介绍具体优化措施。

2.1 设计合理的预压缩量

对于橡胶关节而言，径向刚度会随着预压缩量[14]的增加而增加，增加幅度与预压缩量成正比，而适当的径向预压量能显著提升橡胶关节的疲劳寿命。

橡胶关节的最大载荷为37.5 kN，在径向刚度为18 kN/mm时，其径向变形为2.08 mm，径向变形计算公式为

$$y_{\max}=\frac{P_{\max}}{K_{\mathrm{r}}} \tag{1}$$

式中：K_{r}为橡胶关节径向刚度；$P_{\max}$为径向极限载荷；$y_{\max}$为径向最大位移。

结合橡胶关节的设计经验，当径向预压量与实际变形相当时，疲劳性能表现最佳。

考虑到橡胶关节自由面较小，挤压量过大后易导致橡胶表面的受力情况恶劣，故对直径方向挤压量进行优化设计，保证橡胶部位在径向最大疲劳载荷下基本不承受拉伸应力。

2.2 优化橡胶层厚设计

橡胶关节径向刚度计算[15]公式为

$$K_{\mathrm{r}}=\frac{P}{y}=\frac{3\pi Gl}{2}\cdot\frac{l^2+6\left(r_2-r_1\right)^2}{l^2+3\left(r_2-r_1\right)^2}\left(\frac{r_2+r_1}{r_2-r_1}\right)^3 \tag{2}$$

式中：K_{r}为径向刚度；P为径向载荷；y为径向位移；r_2为该层橡胶外径；r_1为该层橡胶内径；l为该层橡胶宽度；G为橡胶剪切模量；同时令$t=r_2-r_1$，$r=(r_2-r_1)/2$。

橡胶关节径向应变公式为

$$\varepsilon_i=\frac{y_i}{t_i}=\frac{P}{K_{ri}\bullet t_i}=\frac{l_i^2+12r_i^2}{8r_i^3}\cdot\frac{t_i^2}{l_i+6t_i^2} \tag{3}$$

由式(3)可知，在径向载荷P、剪切模量G、橡胶关节宽度l都一定的情况下，应变与胶层厚度呈负相关，

与橡胶层厚平均直径呈正相关。

在胶层设计准则确定之后，根据公式反复迭代确定了具体胶层厚度，从而得出橡胶关节的径向刚度以及橡胶应变。胶层厚度的增加减小了橡胶部分的应变，应变值减小了 22.2%。

2.3　采用贴近式橡胶型面设计和易流式金属弧面设计

轴箱拉杆橡胶关节的橡胶型面设计为大开口的贴近式型面，经过径向预压缩后，橡胶型面呈现接近于平直的状态，以保证橡胶关节受载时，橡胶型面的各个部分受力均匀，不会出现某个区域反复折叠开裂的情况，从而提高橡胶关节的抗疲劳性能，最终使用状态型面如图 5 所示。

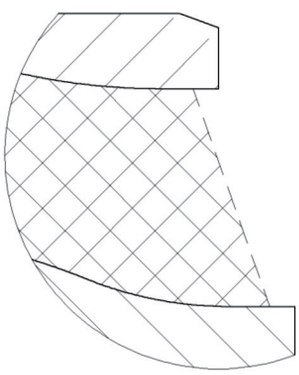


图 5　橡胶型面设计(径向预压缩后的状态)[16]

Fig. 5　Design of rubber profile(radially pre-compressed)

调节橡胶型面的斜面角度和弧面半径，使其在径向预压缩后橡胶型面无褶皱，进一步提高轴箱拉杆橡胶关节的抗疲劳性能。

增加外套和芯轴球面的曲率半径，使芯轴和外套的金属球面更加平缓，以增加橡胶层的主承载面积。同时，易流式的金属弧面设计使得橡胶部位受载时易往轴向方向移动，进一步提高轴箱拉杆橡胶关节的抗疲劳性能。

优化结构的橡胶关节如图 6 所示。

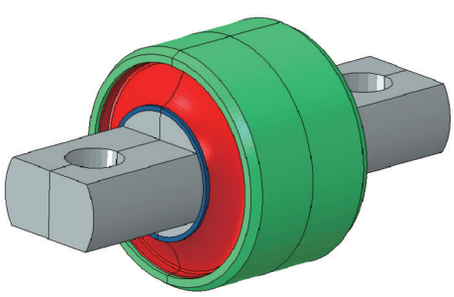


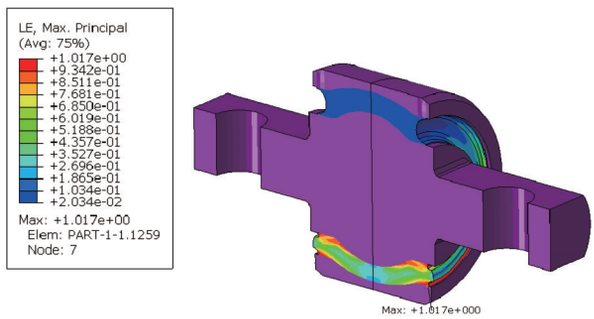
图 6　优化结构橡胶关节示意图

Fig. 6　Schematic diagram of bushing of optimized structure

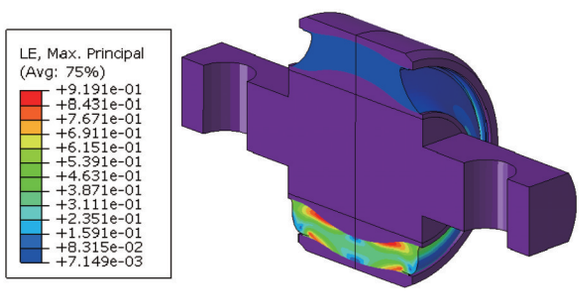
2.4　对优化结构进行有限元疲劳仿真分析

对比既有结构和优化结构在疲劳载荷下应力应变情况：在额定工作载荷 37.5 kN 下，橡胶关节的橡胶应变由 1.017 变为 0.919，降低 9.64% 左右，二者对比如图 7 所示。

对优化结构进行疲劳仿真分析，依据疲劳仿真结果和开裂能理论[17-18]计算，优化结构橡胶体部分的总疲劳损伤值为 0.72，预测疲劳寿命次数为 417 万次，危险区域如图 8(b)所示。



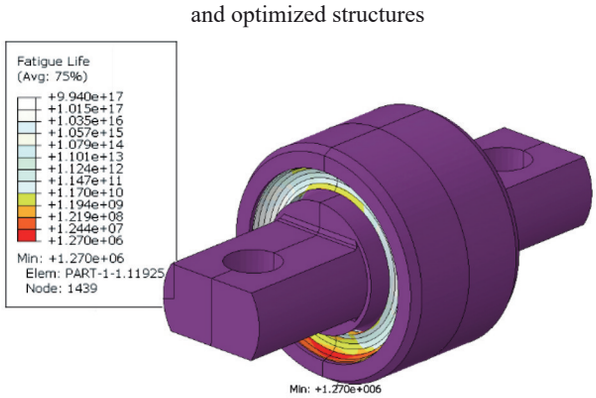
(a) 既有结构在额定工作载荷下的应变云图



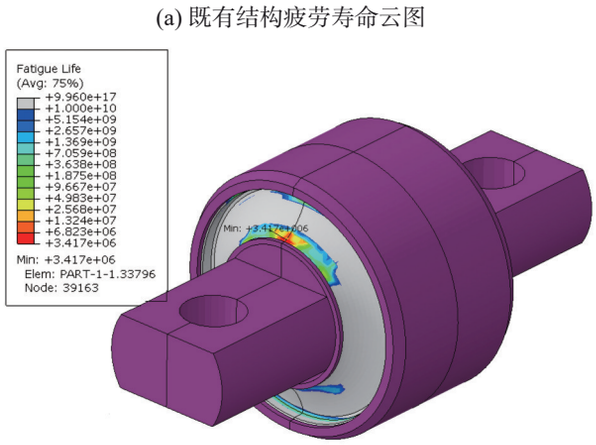
(b) 优化结构在额定工作载荷下的应变云图

图 7　既有结构与优化结构对比应变云图比较

Fig. 7　Comparison of strain contour between original and optimized structures



(a) 既有结构疲劳寿命云图



(b) 优化结构疲劳寿命云图

图 8　既有结构与优化结构疲劳寿命分析云图

Fig. 8　Comparison of fatigue life contour between original and optimized structures

3 疲劳试验对比验证

在室温下进行优化结构的疲劳试验验证，通过与既有结构产品的疲劳试验对比，得出结果如表2所示。

表2 对比疲劳试验结果数据表

Table 2 Results of fatigue test between two structures

项点	既有结构	优化结构
径向刚度/(kN•mm^{-1})	16.99	16.81
疲劳载荷/kN	25±12.5	25±12.5
	−25±12.5	−25±12.5
开裂时循环次数/(10^4 次)	110	310
开裂时径向刚度/(kN•mm^{-1})	12.03	15.53
开裂时刚度变化率	29.19%	7.61%

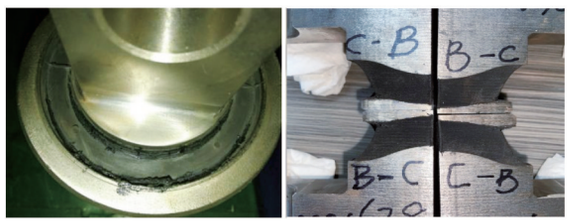
优化结构的橡胶关节疲劳试验结果对比如下：

①疲劳开裂时循环次数提升：既有结构在疲劳工况下运行110万次时出现开裂，130万次时出现功能特性失效。优化结构在疲劳工况下运行310万次时出现裂纹，在满足其疲劳寿命的同时，仍旧保持其功能特性在较小的变化率范围之内，具有良好的抗疲劳特性和功能特性。

②由既有结构橡胶关节与优化结构橡胶关节开裂时刚度变化率的对比可知：优化结构开裂时的刚度变化率为7.61%，低于既有结构开裂时的刚度变化率29.19%，说明优化结构的疲劳裕量仍旧富余。同时，优化结构刚度变化率7.61%远低于既有结构功能失效时的刚度变化29.19%，说明优化结构功能特性的稳定性和耐久性极佳。

③裂纹初现区域和形式的转移：既有结构裂纹分布于外套和芯轴根部的橡胶褶皱区域，因其结构的局限性，褶皱区域经过反复折叠摩擦导致裂纹出现并迅速扩展，削弱了轴箱拉杆橡胶关节的功能特性。优化结构裂纹仅存在于外套侧橡胶型面的圆角处，因该部位在预压缩后和最终使用状态下，均包裹于橡胶型面之内，在疲劳载荷振幅下，裂纹的出现，并不会造成较快的裂纹扩展，具有稳定的结构特性。

④疲劳使用寿命的推算：如果不考虑使用过程中橡胶老化等因素，仅以循环次数作为评估橡胶关节寿命指标，优化结构可提升寿命约3倍。依据目前既有结构产品可使用2~5年的情况，优化结构可满足8年使用寿命的要求，疲劳后样品的状态如图9所示。



(a) 既有结构疲劳后外观 (b) 优化结构疲劳后外观

图9 疲劳后既有结构和优化结构情况对比

Fig. 9 Comparison of condition after fatigue test between original and optimized structures

4 结论

基于160 km/h动力集中电动车组拉杆橡胶关节结构和疲劳工况，采用调节预压缩量、贴近式橡胶型面和易流式金属弧面等方法优化其结构，并进行了有限元疲劳仿真分析和疲劳试验验证，实现了拉杆橡胶关节的寿命显著提升。优化设计的轴箱拉杆橡胶关节已在线运行近4年，橡胶关节各项性能表现良好，成功解决了电力机车在运行过程中的震颤问题，提高了机车车辆运行的平稳性。

本次优化设计为轴箱拉杆橡胶关节等其他径向变形较大的橡胶关节优化提供了设计经验：

①承受径向载荷和偏转载荷为主的橡胶关节疲劳性能表现最佳的设计为：径向预压量与疲劳载荷下的实际变形相当，目的为避免橡胶受拉伸应力。

②橡胶层厚度的增加可改善橡胶部件的应力应变情况，设计合适的橡胶层厚度可以解决橡胶关节的应变过大问题。在产品的安装限界条件下，尽可能将橡胶层厚做到极限，以保证更大的橡胶承载面积，同时提高橡胶关节类产品功能上的可靠性。

③针对径向变形较大的橡胶关节类产品，贴近式橡胶型面可以均衡橡胶表面应变、避免褶皱。本文通过优化橡胶型面的弧度和倾斜角度，确保橡胶型面预压后始终保持平直状态，缓解了橡胶型面的褶皱现象，有效地提升了橡胶关节的疲劳寿命。

参考文献：

[1] MARS W V. Cracking energy density as a predictor of fatigue life under multiaxial conditions[J]. Rubber Chemistry and Technology, 2002, 75(1): 1-17.

[2] MARS W V, FATEMI A. Multiaxial fatigue of rubber: Part I: equivalence criteria and theoretical aspects[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2005, 28 (6): 515-522.

[3] MARS W V, FATEMI A. Multiaxial fatigue of rubber: Part II: experimental observations and life predictions[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2005, 28(6): 523-538.

[4] 陶华. 天然橡胶撕裂能和疲劳裂纹扩展速率研究[J]. 西北工业大学学报, 1998(1): 144-147.
TAO Hua. Tearing energy and crack growth rate of a kind of natural rubber[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 1998(1): 144-147.

[5] MARS W V, FATEMI A. Fatigue crack nucleation and

growth in filled natural rubber[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2003, 26(9): 779-789.

[6] LAKE G J, LINDLEY P B. The mechanical fatigue limit for rubber[J]. Journal of Applied Polymer Science, 1965, 9 (4): 1233-1251.

[7] LAKE G J, LINDLEY P B. Cut growth and fatigue of rubbers. II. Experiments on a noncrystallizing rubber[J]. Rubber Chemistry and Technology, 1965, 38(2): 301-313.

[8] GENT A N, LINDLEY P B, THOMAS A G. Cut growth and fatigue of rubbers. I. The relationship between cut growth and fatigue[J]. Journal of Applied Polymer Science, 1964, 8(1): 455-466.

[9] 李志超, 危银涛, 金状兵, 等. 基于裂纹形核理论的橡胶制品疲劳研究[J]. 弹性体, 2014, 24(6): 28-34.
LI Zhichao, WEI Yintao, JIN Zhuangbing, et al. Fatigue research of rubber products based on the crack nucleation theory[J]. China Elastomerics, 2014, 24(6): 28-34.

[10] 丁智平, 陈吉平, 宋传江, 等. 橡胶弹性减振元件疲劳裂纹扩展寿命分析[J]. 机械工程学报, 2010, 46(22): 58-64.
DING Zhiping, CHEN Jiping, SONG Chuanjiang, et al. Analysis of fatigue crack growth life for rubber vibration damper[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46 (22): 58-64.

[11] 王伟晓. 橡胶弹性减振元件疲劳寿命预测研究[D]. 株洲: 湖南工业大学, 2009.
WANG Weixiao. Study on fatigue life prediction of rubber elastic absorber[D]. Zhuzhou: Hunan University of Technology, 2009.

[12] 王尤颜, 白鸿柏, 侯军芳. 金属橡胶材料疲劳损伤性能研究[J]. 机械工程学报, 2011, 47(2): 65-71.
WANG Youyan, BAI Hongbai, HOU Junfang. Fatigue damage performance of metal rubber material[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(2): 65-71.

[13] 刘建勋, 黄友剑, 刘柏兵, 等. 一种橡胶弹性元件疲劳寿命预测方法的研究[J]. 电力机车与城轨车辆, 2011, 34(3): 12-14.
LIU Jianxun, HUANG Youjian, LIU Baibing, et al. Research on fatigue life prediction method of rubber components[J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2011, 34(3): 12-14.

[14] 荣继刚, 黄友剑, 唐先贺, 等. 预压量对橡胶球铰综合性能的影响[J]. 特种橡胶制品, 2006, 27(2): 36-39.
RONG Jigang, HUANG Youjian, TANG Xianhe, et al. Effect of pre-compression on comprehensive performance of rubber bushing[J]. Special Purpose Rubber Products, 2006, 27(2): 36-39.

[15] 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.
GONG Jiqiu, GONG Zhenzhen, ZHAO Xiyong. Engineering design and application with rubber components[M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 2003.

[16] 王峰宇, 刘晴美, 赵斌, 等. 一种轴箱拉杆橡胶关节及提高抗疲劳性能方法: CN201910675943.7[P]. 2019-07-25.
WANG Fengyu, LIU Qingmei, ZHAO Bin, et al. A rubber joint of axle box pull rod and a method for improving fatigue resistance: CN201910675943.7[P]. 2019-07-25.

[17] RIVLIN R S, THOMAS A G. Rupture of rubber. I. Characteristic energy for tearing[J]. Journal of Polymer Science, 1953, 10(3): 291-318.

[18] MARS W V, FATEMI A. A literature survey on fatigue analysis approaches for rubber[J]. International Journal of Fatigue, 2002, 24(9): 949-961.

收稿日期：2022-01-28
修回日期：2022-11-16