

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2025.05.004

橡胶预压缩对弹性车轮力学特性的影响

张 勇, 田承春, 杨冠男, 黄理华, 刘水长

(湖南工业大学 机械工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘 要: 为探究橡胶预压缩对弹性车轮强度与刚度的影响, 基于 Mooney-Rivlin 模型, 建立考虑橡胶预压缩的弹性车轮有限元模型与不考虑橡胶预压缩的弹性车轮有限元模型, 参考国际标准, 对两模型分别进行强度与刚度计算, 并结合试验对弹性车轮刚度仿真进行了验证。研究表明: 考虑预压缩时, 车轮轮毂、轮芯、橡胶和安装环的危险系数分别为 0.07, 0.31, 0.70, 0.34, 其整体刚度为 167.22 kN/mm; 不考虑预压缩时, 车轮轮毂、轮芯、橡胶和安装环的危险系数分别为 0.07, 0.04, 0.19, 0.004, 其整体刚度为 49.85 kN/mm; 经弹性车轮刚度试验得其刚度值为 185.19 kN/mm, 与考虑预压缩时的弹性车轮刚度相对误差仅为 9.7%。

关键词: 弹性车轮; 安全性; 橡胶预压缩; 强度; 刚度

中图分类号: TH16; U270.1⁺1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-9833(2025)05-0024-07

引文格式: 张 勇, 田承春, 杨冠男, 等. 橡胶预压缩对弹性车轮力学特性的影响 [J]. 湖南工业大学学报, 2025, 39(5): 24-30.

Influence of Pre-Compression on the Mechanical Characteristics of Resilient Wheels

ZHANG Yong, TIAN Chengchun, YANG Guannan, HUANG Lihua, LIU Shuichang

(School of Mechanical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: In view of an investigation of the effect of rubber pre-compression on the strength and stiffness of resilient wheels, based on Mooney-Rivlin model, a finite element model of resilient wheels, which takes into consideration of the rubber precompression, as well as an resilient wheel finite element model without considering rubber pre-compression, have thus been established. By referring to international standards, strength and stiffness calculations are carried out for both models, with the stiffness simulation of resilient wheels to be verified through experiments. The results show that with pre-compression taken into consideration, the risk factors of wheel tire, wheel core, rubber and mounting ring are 0.07, 0.31, 0.70 and 0.34 respectively, with an overall stiffness of 167.22 kN/mm. While without considering pre-compression, the risk factors of wheel tire, wheel core, rubber and mounting ring are 0.07, 0.04, 0.19 and 0.004 respectively, with an overall stiffness of 49.85 kN/mm. Based on the resilient wheel stiffness test, its stiffness value is 185.19 kN/mm, with a relative error of only 9.7% compared to the resilient wheel stiffness with precompression taken into consideration.

Keywords: resilient wheel; security; rubber pre-compression; strength; stiffness

1 研究背景

随着我国城市轨道交通的迅速发展, 车辆运行过

程中的振动和噪声对环境影响问题日益突出^[1-3]。弹性车轮通过在轮辋和轮芯中间增设橡胶阻尼件, 可有效减轻车辆振动, 降低轮轨噪声。但与刚性车轮比,

收稿日期: 2024-12-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52372352); 湖南省自然科学基金资助项目(2023JJ50192); 湖南省人才托举工程-中青年优秀科技人才培养计划基金资助项目(2023TJ-Z16)

作者简介: 张 勇, 男, 湖南工业大学教授, 博士后, 主要研究方向为车辆工程, E-mail: 289714423@qq.com

弹性车轮结构较为复杂,各零件对整车安全性的影响也更复杂^[4-5]。1998年6月3日,采用弹性车轮的德国ICE-1高速列车因轮辋断裂造成重大脱轨事故^[6]。事故发生后,弹性车轮的安全性就变成了车轮安装中最为重要的指标,其应用场景也缩小为低速低轴重的城市轻轨列车。为了满足乘客对轨道交通舒适性的需求和开拓弹性车轮的应用场景,开展对弹性车轮安全性的研究迫在眉睫^[7-9]。

H. A. Richard等^[10]从断裂力学角度分析了1998年德国Eschede附近发生的轮辋断裂事故,发现半径为1.5 mm的裂纹最能自动计算其扩展,在90 kN的轮轨接触力和26次循环下,仿真结果与实际情况高度一致。郑志立等^[11]对弹性车轮的橡胶减振材料疲劳性能进行了研究,结果表明,添加白炭黑和合成橡胶能够显著提升车轮的抗疲劳性能。M. Kubota等^[12]对1998年ICE高速列车事故中弹性车轮轮辋裂纹的形成原因进行了研究,得知摩擦因数增加时其接触应力降低,但是橡胶与轮辋接触对微动疲劳的影响较小。张乐^[13]通过Abaqus有限元分析,对弹性车轮轮辋及其组装部件进行了优化设计,提出一种由36块橡胶元件构成的弹性车轮。发现静载荷条件下,其内表面应力随着轮辋厚度的减小而降低,而最大应力出现在凸台两侧。张保军等^[14]从螺栓失效视角对弹性车轮各零件进行了强度校核,发现随着螺栓失效数目增加,其最大等效应力明显上升。祁孟孟等^[15]研究了车轮刚度对车辆动力学性能的影响,发现车轮刚度会直接影响车辆运行安全,推荐车轮的径向刚度应为150 kN/mm。宫峰等^[16]采用Yeoh橡胶本构模型对剪切型弹性车轮的刚度与静强度进行了仿真研究,得知车轮轮辋、轮芯与压环的疲劳强度均符合单轴疲劳准则。但该研究未考虑橡胶的预压缩。

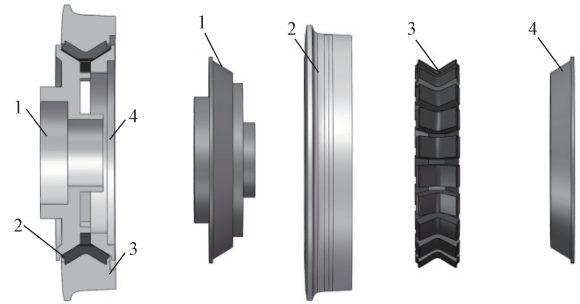
综上所述,当前关于弹性车轮安全性的研究涵盖了轮辋断裂、橡胶材料特性、摩擦因数、结构厚度、螺栓失效和车轮刚度等方面。这些研究为弹性车轮安全性研究提供了重要参考。然而,强度与刚度作为评判弹性车轮安全性的重要指标,橡胶预压缩状态对它们的影响尚未明晰。因此,本研究以分块式压剪复合型弹性车轮为研究对象,建立了考虑橡胶预压缩的弹性车轮模型与不考虑橡胶预压缩的弹性车轮模型,分别计算两种模型在直线工况下的各零件强度与刚度,以期高安全性的弹性车轮设计提供理论支撑。

2 弹性车轮模型

2.1 有限元模型

如图1所示,弹性车轮主要由轮芯、轮辋、橡胶

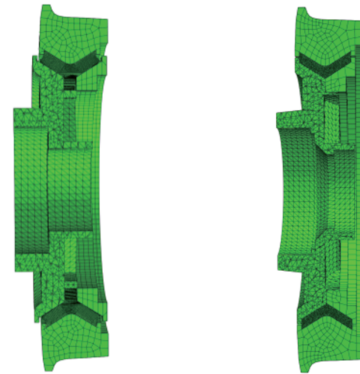
块和安装环等零件组成。为了便于后续的有限元计算,模型中忽略对强度与刚度影响较小的过渡圆角结构与螺栓孔。该模型采用笛卡尔坐标系, X 轴为车轮的轴向, Y 轴为车轮的径向, Z 轴为轨道方向。根据弹性车轮的几何结构,分别建立了两个有限元模型:一个考虑橡胶预压缩,另一个则不考虑橡胶预压缩,如图2所示。



a) 车轮剖面图 b) 轮芯 c) 轮辋 d) 橡胶块 e) 安装环

图1 弹性车轮几何模型

Fig. 1 Geometric model of resilient wheels



a) 考虑预压缩 b) 不考虑预压缩

图2 弹性车轮有限元模型

Fig. 2 Finite element model of resilient wheels

如图2所示,与不考虑预压缩的模型相比,考虑预压缩的模型中橡胶部件的厚度会大40 mm,两者的本质区别在于是否考虑弹性车轮的压装过程。为确保网格类型不影响仿真对比分析结果,两模型采用相同的单元类型进行离散。轮辋与安装环部件使用六面体缩减积分单元(C3D8R)进行网格划分,而轮芯采用四面体单元(C3D10),橡胶则使用类型为C3D8RH的杂交单元。

2.2 橡胶材料模型

在弹性车轮中,轮芯、轮辋和安装环均由ER9钢制成,其杨氏模量 E 为 2.1×10^5 MPa,泊松比 ν 为0.3,屈服极限为580 MPa。而橡胶作为超弹性材料,具非常低的弹性模量和很高的伸长率,且不可压缩,因此其体积几乎不变,但形状可自由改变^[17-18]。由于橡胶与金属材料的性能差异,在进行有限元分析时,

无法利用橡胶的弹性模量和泊松比准确模拟其力学性能。通常使用多项式形式的应变能密度函数模拟橡胶的力学特性,即

$$U = \sum_{i+j=1}^N C_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j + \sum_{i=1}^N \frac{1}{D_i} (J - 1)^{2i}, \quad (1)$$

式中: U 为材料的应变势能;

C_{ij} 和 D_i 为与温度相关的材料参数,分别描述材料的剪切特性与可压缩性;

J 为弹性体积比;

N 为多项式中项的数量;

I_1 和 I_2 分别为材料的第一和第二变形张量不变量,可通过式(2)求得,

$$\begin{cases} I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2, \\ I_2 = \lambda_1^{-2} + \lambda_2^{-2} + \lambda_3^{-2}, \end{cases} \quad (2)$$

其中 λ 为主应变张量。

本文的橡胶材料模型选择保留了应变能的一阶 Mooney-Rivlin 本构模型,其应变势能为

$$U = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) + \frac{1}{D_1}(J - 1)^2. \quad (3)$$

橡胶可以被视为完全不可压缩 ($D_1=0$) 材料,因此可将上式简化为一个两参数的 Mooney-Rivlin 本构模型,即

$$U = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3). \quad (4)$$

为了确定橡胶的材料参数 C_{10} 和 C_{01} ,按照标准 GB/T7757—2009《硫化橡胶或热塑性橡胶压缩应力应变性能的测定》,制备了直径为 29 mm、高度为 12.5 mm 的橡胶圆柱体试件,并进行了橡胶压缩试验,如图 3 所示。试验中使用的是 WANCE 品牌的 TES 型电子万能试验机,其最大承载力为 100 kN,如图 4 所示。

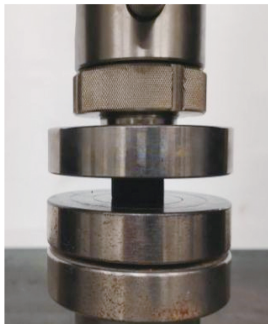


图 3 橡胶压缩试验

Fig. 3 Rubber compression tests



图 4 万能试验机

Fig. 4 Universal testing machine image

为了减少摩擦对试验结果的干扰,试验开始前,在橡胶试样的两个水平面上均匀涂抹润滑剂,然后将橡胶试样小心地放置在试验机的压盘中央。启动设

备,将压缩速度设定为每分钟 10 mm,逐步压缩试样,直到应变达到 25%。此后,以相同速度放松试样。这一过程重复 3 次,以消除材料的马林斯效应所造成的误差,第三次压缩作为正式试验。试验中,试样所受的力通过上方的力传感器测量,而位移由设备的横梁位移传感器记录。计算机会自动记录力-位移曲线,确保数据的准确性和完整性。

根据试验所获得的数据,利用 Mooney-Rivlin 本构模型进行最小二乘拟合,得到参数 $C_{10}=2.365$ 和 $C_{01}=0.883$ 。根据生产厂家提供的数据得知,橡胶的许用应力为 15 MPa。

2.3 接触模型

在弹性车轮的有限元模型中,存在着两种主要的接触类型:金属与金属的接触和金属与橡胶的接触。对于金属与金属之间的接触,由于其不会影响车轮的整体强度和刚度,故可以设置为硬接触。这种设置可以有效地避免网格穿透问题。另一方面,橡胶元件并不是直接与车轮上的金属元件固结的,因此需要建立橡胶与金属之间的接触关系。在强挤压条件下,橡胶与金属处于粘结状态,没有相对滑动。然而,为了增强模型的收敛性,可以允许接触面之间产生轻微的弹性滑移^[19]。因此,橡胶与金属之间的切向接触应设置为罚摩擦行为,并将摩擦因数设为 0.2,同时在法向接触方面保持硬接触。这种设置有助于确保模型的稳定性和准确性。

2.4 边界条件

在计算弹性车轮的强度和刚度之前,对于考虑橡胶预压缩的弹性车轮,需要进行压装仿真。在弹性车轮压装过程中,轮箍需被完全固定,同时对轮芯和安装环施加指向橡胶的轴向位移载荷,以保持模型的稳定性,同时需要限制安装环和轮芯在非轴向方向上的自由度。

完成弹性车轮压装仿真后,应根据国际铁路联盟标准 UIC 510-5 和欧洲标准 EN 13979-1,确定弹性车轮强度和刚度的计算工况。本研究选择直线运行作为分析条件,因此重点分析弹性车轮的径向刚度和静强度。在该工况下,车轮主要承受径向载荷(即垂直于地面的载荷)。因此,在施加边界条件时,需要解除压装仿真中的约束,并按照标准对轮芯进行固定,还需在轮箍与轨道接触的位置施加径向载荷。此外,为了保证计算的稳定性,需要对安装环、轮芯和轮箍的轴向运动进行约束。

对于不考虑橡胶预压缩的弹性车轮,可以省去压装仿真过程,其边界条件的设置应与考虑预压缩的弹性车轮在直线运行条件下保持一致。

3 橡胶预压缩对弹性车轮静强度的影响

3.1 静强度计算方法

橡胶是弹性车轮能发挥减震降噪作用的核心零件,其应力状态对弹性车轮静强度有着至关重要的影响。静强度可以通过 Von-Mises 等效应力衡量^[20-21], Von-Mises 等效应力 σ_{eqv} 的计算式如下:

$$\sigma_{eqv} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}, \quad (5)$$

式中: σ_1 、 σ_2 和 σ_3 分别为第一、第二和第三主应力。

通过等效应力可以对弹性车轮各部件的危险系数进行计算,计算公式如下:

$$S = \sigma_{eqv, max} / [\sigma], \quad (6)$$

式中 $[\sigma]$ 为材料的许用应力。

3.2 弹性车轮静强度仿真结果与分析

直线工况下,对考虑橡胶预压缩的弹性车轮进行静态强度分析,所得结果见图5,应力单位为 MPa。

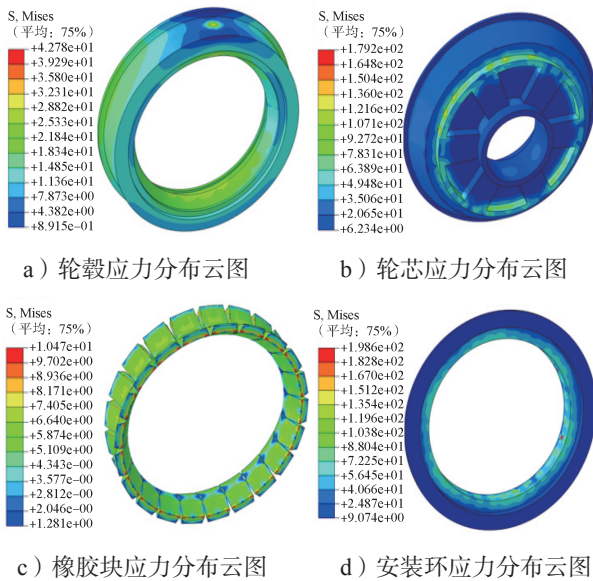


图5 考虑预压缩的弹性车轮 Von-Mises 应力分布云图
Fig. 5 Von-Mises stress nephogram of the resilient wheel with pre-compression taken into consideration

从图5所示结果可以看出,考虑预压缩的弹性车轮的最大 Von-Mises 应力出现在安装环内侧,值为 198.6 MPa。此区域受到橡胶元件的反作用力,并与轮芯发生挤压,因此应力集中;同样地,轮芯与安装环接触处的应力也较大,达 179.2 MPa。相比之下,轮毂的最大 Von-Mises 应力出现在载荷施加处,为 42.78 MPa,这是因为轮毂与轮芯和安装环之间存在一定间隙,仅与橡胶接触,所以该处的应力较小。

橡胶块的最大 Von-Mises 应力出现在橡胶外侧,特别是在橡胶与轮芯及安装环接触的地方,最大应力为 10.47 MPa,这是因该处橡胶变形较大导致的。基于危险系数计算公式,考虑预压缩的弹性车轮模型各部件的危险系数依次为轮毂 0.07、轮芯 0.31、橡胶 0.70、安装环 0.34。

接下来进行未考虑橡胶预压缩的弹性车轮的静态强度分析,所得结果如图6所示。

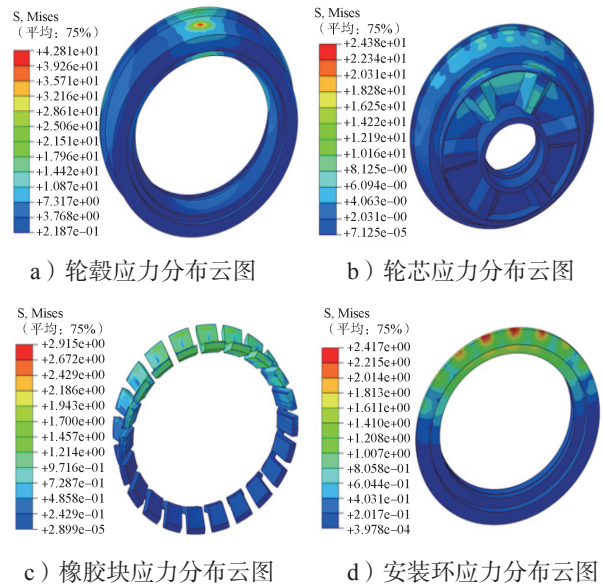


图6 未考虑预压缩的弹性车轮 Von-Mises 应力分布云图
Fig. 6 Von-Mises stress nephogram of the resilient wheel without taking pre-compression into consideration

由图6可知,在该模型中,最大 Von-Mises 应力出现在轮毂承受载荷的区域,值为 42.81 MPa,这一区域与轨道接触,所承受的载荷最大,所以相应的应力值也最大。轮芯的最大 Von-Mises 应力出现在靠近载荷施加端的部位,最大值为 24.38 MPa。由于未考虑橡胶的预压缩,该模型的最大应力相对较小。同样,安装环的最大 Von-Mises 应力较小,仅为 2.42 MPa,出现在与载荷施加处接近的部位。由于未考虑预压缩,橡胶的变形有限,故其最大 Von-Mises 应力较小,为 2.92 MPa。因此当不考虑橡胶预压缩时,车轮轮毂、轮芯、橡胶和安装环的危险系数分别为 0.07, 0.04, 0.19, 0.004。

通过对比分析,发现考虑橡胶预压缩的弹性车轮模型与未考虑预压缩的模型在最大 Von-Mises 应力和危险系数方面存在显著差异。前者的应力和危险系数明显高于后者,表明在进行弹性车轮强度分析时,忽略橡胶预压缩会导致仿真结果严重失真。因此,考虑橡胶预压缩的因素在弹性车轮强度分析中至关重要。

4 橡胶预压缩对弹性车轮刚度的影响

4.1 弹性车轮刚度计算方法

弹性车轮刚度直接影响着轨道车辆的安全性^[22],因此弹性车轮刚度的精准计算是高安全性弹性车轮设计的重要一环,其中弹性车轮中橡胶是否考虑预压缩间接对弹性车轮刚度产生影响。弹性车轮刚度 K 可由下式进行计算:

$$K = (P_2 - P_1) / (S_2 - S_1), \quad (7)$$

式中: P_1 为施加载荷下限;

P_2 为施加载荷上限;

S_1 为变形下限;

S_2 为变形上限。

4.2 弹性车轮刚度试验

为了验证弹性车轮刚度在有限元计算中的准确性,对某款实际在用压剪复合型弹性车轮进行刚度试验测试。如图 7 所示,试验中固定车轮的轮芯,并在车轮表面施加载荷测试弹性车轮的刚度。同时,在轮毂侧面使用传感器记录车轮径向变形产生的位移。

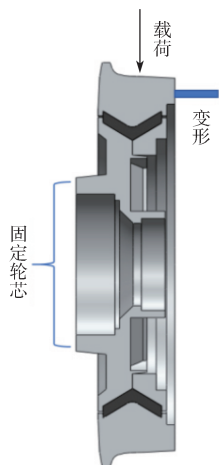


图 7 弹性车轮刚度测试示意图

Fig. 7 Diagram of the resilient wheel stiffness test

弹性车轮刚度试验平台

如图 8 所示。试验过程中载荷的施加与仿真过程保持一致,载荷以 2 000 N/s 的速度增加至 50 kN,然后卸载至 0 kN,此过程构成一个试验循环。整个试验共循环 3 次,并记录第三次加载过程中的载荷与位移数据。

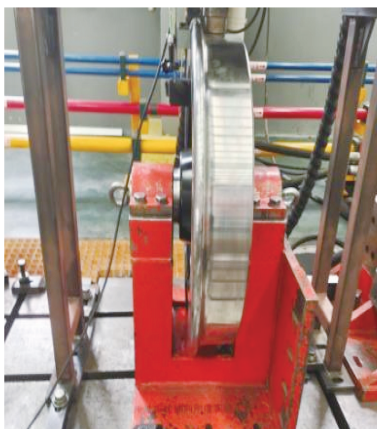


图 8 弹性车轮刚度试验平台

Fig. 8 Resilient wheel stiffness test platform

弹性车轮刚度试验结果如图 9 所示,可发现在载荷为 50 kN 时,弹性车轮受载荷所产生的位移为 0.27

mm,根据弹性车轮刚度公式计算可得,其刚度值为 185.19 kN/mm。

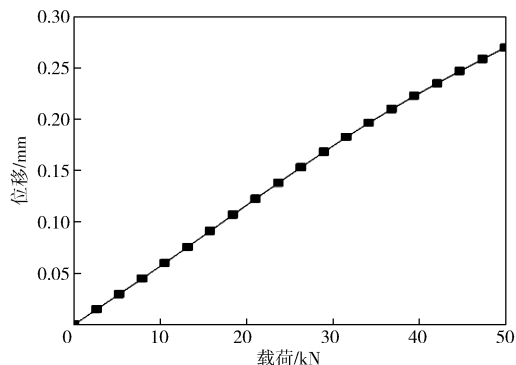


图 9 刚度试验载荷-位移曲线

Fig. 9 Load-displacement curve of the stiffness test

4.3 弹性车轮刚度计算结果分析

在直线工况弹性车轮仿真下,对弹性车轮刚度进行求解计算,其边界条件与弹性车轮强度计算条件一致,但是需要在载荷加载处添加监测点。通过监测点,提取载荷加载处的反作用力与位移随时间变化的数据,通过这些数据绘制考虑橡胶预压缩与未考虑橡胶预压缩的弹性车轮力-位移曲线,如图 10 所示。

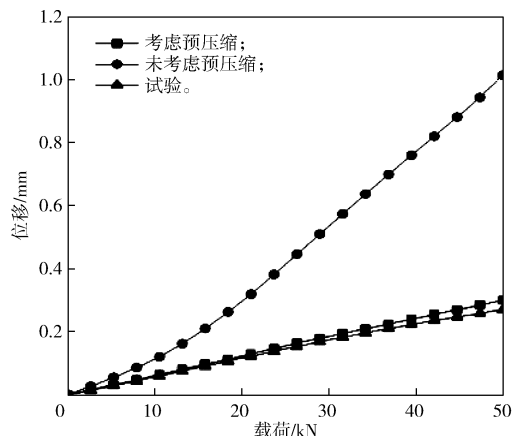


图 10 仿真与试验载荷-位移曲线

Fig. 10 Simulation and test load-displacement curves

由图 10 可知,未考虑橡胶预压缩的弹性车轮刚度仿真所产生的变形位移较大,其值为 1.003 mm,经计算得其刚度为 49.85 kN/mm。而考虑橡胶预压缩的弹性车轮刚度仿真所产生的变形位移较小,其值为 0.299 mm,经计算得其刚度为 167.22 kN/mm。显然,相对于未考虑橡胶预压缩的弹性车轮,考虑橡胶预压缩才能精确地计算出弹性车轮的刚度。

5 结论

本文采用有限元分析方法,分别对考虑橡胶预压缩和未考虑橡胶预压缩的弹性车轮模型进行了静强度与刚度方面的力学特性分析,并通过试验结果对仿

真结果进行了验证, 得到如下结论:

1) 在直线工况下, 对比了考虑橡胶预压缩和未考虑橡胶预压缩的弹性车轮模型的静强度计算结果。得知考虑橡胶预压缩的模型中, 轮毂、轮芯、橡胶和安装环的危险系数分别为 0.07, 0.31, 0.70, 0.30。未考虑橡胶预压缩的模型中, 轮毂、轮芯、橡胶和安装环的危险系数分别为 0.07, 0.04, 0.19, 0.004。这一计算结果表明, 考虑橡胶预压缩时, 各部件的危险系数更大, 且与实际情况更吻合。

2) 对两种弹性车轮模型进行了刚度有限元仿真计算, 结果表明考虑橡胶预压缩的模型整体刚度为 167.22 kN/mm, 而未考虑橡胶预压缩的模型整体刚度仅为 49.85 kN/mm。对同款实际在用弹性车轮进行了试验, 结果表明其整体刚度为 185.19 kN/mm, 与考虑预压缩时的弹性车轮刚度的相对误差仅为 9.7%。由此可见, 未考虑橡胶预压缩时, 仿真结果显著低于实际值。

综上所述, 橡胶预压缩状态对弹性车轮强度与刚度的有限元分析影响较大, 在进行相关仿真分析时不可忽略。强度与刚度是评判弹性车轮安全性的重要指标, 本研所得结论将为高安全性弹性车轮的设计提供参考。

参考文献:

- [1] 郭奇睿, 祁孟孟, 周 信, 等. 弹性车轮对地铁直线段轨道减振特性研究[J]. 机械工程学报, 2022, 58(22): 395-405.
- WU Qirui, QI Mengyu, ZHOU Xin, et al. Research on Vibration Reduction Characteristics of Straight Section of Metro Track with Damping Wheel[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(22): 395-405.
- [2] 刘 洋, 冷莎莎, 臧晓蕾, 等. 地铁弹性车轮减振降噪效果测试分析[J]. 设备管理与维修, 2022(3): 22-25.
- LIU Yang, LENG Shasha, ZANG Xiaolei, et al. Test and Analysis of Vibration and Noise Reduction Effect of Subway Resilient Wheels[J]. Plant Maintenance Engineering, 2022(3): 22-25.
- [3] 圣小珍, 葛 帅, 成 功, 等. 考虑旋转效应的弹性车轮降噪效果与影响参数研究[J]. 交通运输工程学报, 2022, 22(2): 197-207.
- SHENG Xiaozhen, GE Shuai, CHENG Gong, et al. Study of Noise Reduction Effect and Influencing Parameters for a Resilient Wheel Considering Rotation Effect[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2022, 22(2): 197-207.
- [4] 刘虹蔚, 陆正刚, 岳科宇. 弹性车轮刚度与金属件结构优化研究[J]. 机电工程技术, 2020, 49(5): 26-28, 78.
- LIU Hongwei, LU Zhenggang, YUE Keyu. Research on Stiffness of Elastic Wheels and Structure Optimization of Metal Parts[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2020, 49(5): 26-28, 78.
- [5] 陈兆玮, 蒲前华, 龙权明, 等. 考虑结构非线性的铁路弹性车轮动态特性研究[J]. 中国科学: 技术科学, 2024, 54(4): 709-721.
- CHEN Zhaowei, PU Qianhua, LONG Quanming, et al. Dynamic Characteristics of Railway Resilient Wheel Considering Structural Nonlinearity[J]. Science China Technological Science, 2024, 54(4): 709-721.
- [6] 杨 阳. 压剪复合弹性车轮作用下轮轨动态特性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
- YANG Yang. Study on Wheel/Rail Dynamic Characteristics Under Compression-Shear Composite Resilient Wheel[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.
- [7] 付加平, 崔玉辉, 李 稳, 等. 弹性车轮踏面裂纹产生机理研究及解决措施探讨[J]. 铁道车辆, 2023, 61(3): 143-146.
- FU Jiaping, CUI Yuhui, LI Wen, et al. Study on Mechanism of Elastic Wheel Tread Crack Generation and Discussion on Solution Measures[J]. Rolling Stock, 2023, 61(3): 143-146.
- [8] 侯传伦, 杨新文, 戚 援, 等. 轨道交通弹性车轮轮箍承载特性研究[J]. 机车电传动, 2023(2): 71-77.
- HOU Chuanlun, YANG Xinwen, QI Yuan, et al. Study on Tyre Load-Bearing Characteristics of Resilient Wheel for Rail Transit[J]. Electric Drive for Locomotives, 2023(2): 71-77.
- [9] 陈 清, 段金兰. 弹性车轮的应用与典型故障分析[J]. 科学技术创新, 2017(21): 15-16.
- CHEN Qing, DUAN Jinlan. Application and Typical Fault Analysis of Resilient Wheels[J]. Scientific and Technological Innovation, 2017(21): 15-16.
- [10] RICHARD H A, FULLAND M, SANDER M, et al. Fracture in a Rubber-Sprung Railway Wheel[J]. Engineering Failure Analysis, 2005, 12(6): 986-999.
- [11] 郑志立, 郭晓晖, 戚 援, 等. 弹性车轮用橡胶减振材料疲劳性能的研究[J]. 机车车辆工艺, 2009(6): 18-19.
- ZHENG Zhili, GUO Xiaohui, QI Yuan, et al. Study on Fatigue Properties of Rubber Damping Materials for Resilient Wheels[J]. Locomotive & Rolling Stock Technology, 2009(6): 18-19.
- [12] KUBOTA M, HIRAKAWA K. The Effect of Rubber Contact on the Fretting Fatigue Strength of Railway Wheel Tire[J]. Tribology International, 2009, 42(9): 1389-1398.

- [13] 张 乐. 弹性车轮结构刚度和强度研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
ZHANG Le. Study on Structural Stiffness and Strength of Resilient Wheel[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.
- [14] 张保军, 安 涛, 周 信, 等. 螺栓失效对压剪复合弹性车轮强度安全性影响 [J]. 机车电传动, 2021(3): 73-79.
ZHANG Baojun, AN Tao, ZHOU Xin, et al. Influence of Bolt Failure on Strength Safety of Compression-Shear Composite Resilient Wheel[J]. Electric Drive for Locomotives, 2021(3): 73-79.
- [15] 祁孟孟, 安 涛, 肖新标, 等. 考虑橡胶非线性的弹性车轮刚度计算方法及参数优化 [J]. 机械设计与制造, 2023(2): 206-210.
QI Mengyu, AN Tao, XIAO Xinbiao, et al. Calculation Method and Parameter Optimization of Resilient Wheel Stiffness Considering Nonlinear of Rubber[J]. Machinery Design & Manufacture, 2023(2): 206-210.
- [16] 宫 峰, 戚 援, 侯传伦. 剪切型弹性车轮的刚度分析与强度校核 [J]. 机车车辆工艺, 2019(3): 7-9.
GONG Feng, QI Yuan, HOU Chuanlun. Rigidity Analysis and Strength Check of Shearing Elastic Wheels[J]. Locomotive & Rolling Stock Technology, 2019(3): 7-9.
- [17] 张 琦, 时剑文, 索双富, 等. 基于 Mooney-Rivlin 模型和 Yeoh 模型的橡胶材料有限元分析 [J]. 合成橡胶工业, 2020, 43(6): 468-471.
ZHANG Qi, SHI Jianwen, SUO Shuangfu, et al. Finite Element Analysis of Rubber Materials Based on Mooney-Rivlin Models and Yeoh Models[J]. China Synthetic Rubber Industry, 2020, 43(6): 468-471.
- [18] 屠璐琼, 吴佳钉, 胡清波. 橡胶压缩 Mooney-Rivlin 本构模型参数拟合分析 [J]. 噪声与振动控制, 2020, 40(1): 42-45.
TU Luqiong, WU Jiading, HU Qingbo. Parameters Fitting Analysis of Compressive Mooney-Rivlin Constitutive Model of Rubbers[J]. Noise and Vibration Control, 2020, 40(1): 42-45.
- [19] 祁孟孟. 直线电机地铁弹性车轮动力学及刚度特性分析 [D]. 成都: 西南交通大学, 2021.
QI Mengyu. Dynamic and Stiffness Characteristics Analysis of Linear Motor Metro Resilient Wheels[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021.
- [20] 戚 援, 陈 沛. 弹性车轮有限元静强度分析及疲劳强度校核 [J]. 轨道交通装备与技术, 2018(6): 13-15.
QI Yuan, CHEN Pei. Finite Element Static Strength Analysis and Fatigue Strength Assessment for Elastic Wheels[J]. Rail Transportation Equipment and Technology, 2018(6): 13-15.
- [21] 朱逸伦, 周 信, 圣小珍, 等. 踏面制动弹性车轮应力分析及影响因素研究 [J]. 机床与液压, 2023, 51(18): 26-32.
ZHU Yilun, ZHOU Xin, SHENG Xiaozhen, et al. Parameter Optimization Analysis for Resilient Wheel During Tread Braking Based on Orthogonal Method[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2023, 51(18): 26-32.
- [22] 杨 阳, 丁军君, 李 芾, 等. 弹性车轮等效刚度对车辆动力学性能的影响 [J]. 中国铁道科学, 2018, 39(3): 63-70.
YANG Yang, DING Junjun, LI Fu, et al. Effect of Equivalent Stiffness of Resilient Wheel on Vehicle Dynamic Performance[J]. China Railway Science, 2018, 39(3): 63-70.

(责任编辑: 廖友媛)