DOI：10.13890/j.issn.1000-128X.2023.02.008　　文章编号：1000-128X(2023)02-0071-07

轨道交通弹性车轮轮箍承载特性研究

侯传伦[1]，杨新文[2]，戚　援[1]，李　稳[3]，郭　鑫[1]
（1. 中车戚墅堰机车车辆工艺研究所有限公司，江苏 常州　213011；
2. 同济大学 交通运输工程学院，上海　201804；
3. 中车长春轨道客车股份有限公司，吉林 长春　130062）

摘　要：针对轮箍在运用过程中的疲劳失效问题，结合弹性车轮结构特点和承载原理，对轮箍的承载特性及相关影响因素进行系统研究，以提高轮箍的承载强度和弹性车轮运用安全性。为了精确分析弹性车轮轮箍在弹性支撑下的应力特性，基于有限元理论，建立了考虑橡胶块弹性离散支撑的轮箍承载特性参数化计算模型，对不同车轮刚度、轮箍厚度和车轮直径等结构参数下的轮箍应力状态分布、动态变形量、应力幅值等进行了研究。研究结果表明，在车轮运行过程中，轮箍内表面和外表面应力分布均呈“W”形变化趋势，其中内表面以拉应力为主，外表面以压应力为主；随着轮箍厚度、车轮刚度的增大，轮箍承载性能和安全性得到改善；但随着车轮直径的增大，轮箍的承载强度呈降低趋势，因此对于直径较大的弹性车轮应当适当增大车轮刚度及轮箍厚度，以确保轮箍的安全性能。文章的研究方法和结果为弹性车轮结构及性能优化提供了可靠的设计依据，为提高弹性车轮的运用安全可靠性提供了极强的指导作用和参考价值。

关键词：轨道交通；弹性车轮；轮箍；承载特性；应力；有限元
中图分类号：U270.331^{+}.1　　**文献标识码：**A

Study on tyre load-bearing characteristics of resilient wheel for rail transit

HOU Chuanlun[1], YANG Xinwen[2], QI Yuan[1], LI Wen[3], GUO Xin[1]

(1. CRRC Qishuyan Institute Co., Ltd., Changzhou, Jiangsu 213011, China; 2. College of Transportation Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China; 3. CRRC Changchun Railway Vehicle Co., Ltd., Changchun, Jilin 130062, China)

Abstract: To address the fatigue failure of wheel tyre in train operation, improve the bearing capacity of tyres and safety of resilient wheel, a systematic study of the load-bearing characteristics and relevant influencing factors of wheel tyre was carried out combined with the structural characteristics and bearing mechanism of resilient wheel. In order to accurately analyze the stress characteristics of wheel tyre with elastic support, based on the finite element theory, a parameterized calculation model of wheel tyre load-bearing characteristics with rubber blocks discrete support was established. Then, the stress state distribution, dynamic deformation and stress amplitude of wheel tyre under different structural parameters such as wheel stiffness, wheel tyre thickness and wheel diameter were studied. The results show that the stress distribution on the inner and outer surface of the tyre shows a change trend in the shape of a “W” during operation of the wheels. The inner surface is dominated by tensile stress and the outer surface, by compressive stress. With the increase of tyre thickness and wheel stiffness, the bearing capacity and safety of tyre are improved. However, when the diameter of wheel increases, the bearing capacity of tyre tends to decrease. Therefore, for the resilient wheel with bigger diameter, the wheel stiffness and tyre thickness should be appropriately increased to improve safety. The research methods and results in this paper provide not only a reliable design basis for structural and performance optimization of resilient wheels, but also a strong guidance and reference value for improving the safety and reliability of resilient wheel application.

基金项目：国家自然科学基金资助项目（52178436）
通信作者：侯传伦（1985—），男，高级工程师，主要从事轨道交通减振降噪技术研究；E-mail: hcl20031125@126.com
引用格式：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.
Citation: 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.

Keywords: rail transit; resilient wheel; wheel tyre; load-bearing characteristics; stress; finite element

0 引言

弹性车轮能够有效降低轮轨振动与噪声，在轨道交通车辆上得到了广泛应用[1-2]。弹性车轮轮箍直接与钢轨接触，不仅承受弹性车轮装配过程中的装配应力，而且要承受车辆静载荷作用力和车轮滚动过程中的各种动态交变载荷[3]。与传统的整体钢轮不同，轮箍与轮心通过减振橡胶实现弹性连接，支撑刚度远小于传统整体钢轮的刚性支撑结构。在车轮运行过程中，轮箍会承受更大的弯曲变形和疲劳应力，由此引起的轮箍断裂等疲劳失效则会导致列车脱轨等重大事故[3]，带来极大的安全隐患。

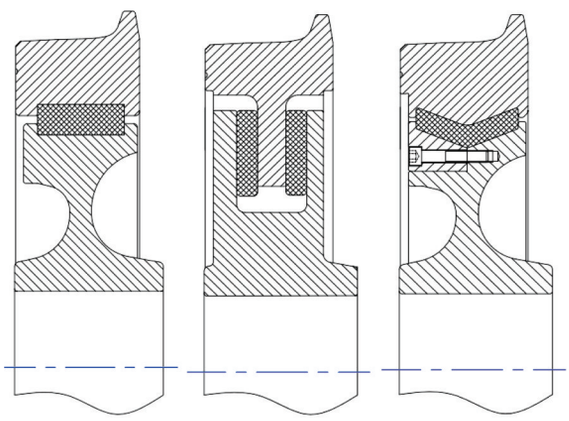
文献[4]采用有限元理论对磨耗后的弹性车轮轮箍应力状态和疲劳强度进行了计算分析，并对内侧设置初始裂纹缺陷的轮箍裂纹扩展特性进行了研究；文献[5]通过试验和有限元方法开展了橡胶与轮箍间接触摩擦特性对轮箍疲劳强度和裂纹萌生扩展的影响研究。文献[6]采用有限元方法计算分析了静载作用下弹性轮对的应力、变形和模态特性，并与刚性轮对进行了对比分析。文献[7-11]针对不同结构弹性车轮的静强度和疲劳强度开展了大量研究。

以上研究大多针对某种特定结构，缺乏对轮箍承载强度影响因素及变化规律的系统研究。弹性车轮作为轨道交通车辆的关键走行部件，通过对轮箍承载特性的深入研究，对于优化弹性车轮结构，提高其承载能力，确保列车运用安全，具有重要意义。

1 弹性车轮结构及承载原理

根据橡胶的变形承载特点，弹性车轮一般分为压缩型、剪切型和压剪复合型 3 种结构形式，如图 1 所示。对于压剪复合型橡胶弹性车轮，其橡胶元件同时承受压缩变形和剪切变形，结构较简单，可实现径向刚度与轴向刚度的匹配设计，得到了广泛应用[12-13]。典型的压剪复合型弹性车轮主要由轮箍、轮心、压环和减振橡胶组成[14]，减振橡胶被压缩填充在车轮内部的型腔中，同时为了方便对车轮检修维护，轮心压环为可分离结构，两者通过螺栓紧固连接，如图 2 所示。组装完成后的弹性车轮为弹性支撑结构，轮箍与钢轨直接接触，轮轨间的相互作用力通过减振橡胶层传递至轮心和车轴。

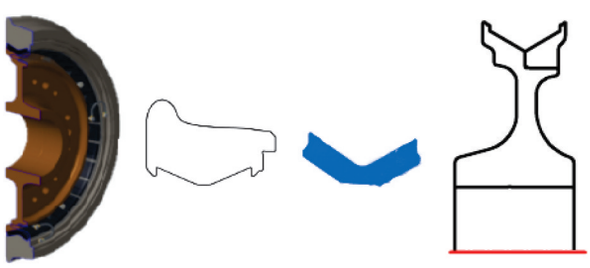
根据弹性车轮作用原理，在轮轨作用下弹性车轮的承载变形模型可简化成图 3，将其中轮箍及内圈的轮心压环视为刚体，减振橡胶简化为离散支撑的三向刚度弹簧。当弹性车轮承受轮轨垂向力时，轮箍相对于轮心产生一定的垂向变形，此时减振橡胶会在其径向和切向方向上产生弹性变形力，并作用于轮箍内表面。



(a) 压缩型　(b) 剪切型　(c) 压剪复合型

图 1　弹性车轮类型

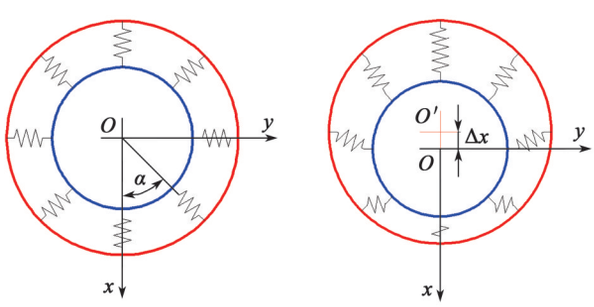
Fig. 1　Types of resilient wheel



(a) 整轮　(b) 轮箍　(c) 减振橡胶　(d) 轮心和压环

图 2　压剪复合型橡胶弹性车轮

Fig. 2　Compressive shear compound rubber resilient wheel



(a) 组装状态　(b) 承载后变形

图 3　弹性车轮承载变形示意图

Fig. 3　Schematic diagram of load-bearing deformation of resilient wheel

弹性车轮的整轮径向刚度[15]为

$$k_{\mathrm{wr}}=\frac{F_{\mathrm{z}}}{\Delta x}=k_{\mathrm{rr}}\sum_{n=1}^{N}\cos^2\alpha_n+k_{\mathrm{rt}}\sum_{n=1}^{N}\sin^2\alpha_n=\frac{N}{2}\left(k_{\mathrm{rr}}+k_{\mathrm{rt}}\right) \quad (1)$$

式中：k_{wr}为弹性车轮的整轮径向刚度；F_{z}为轮轨垂向力；Δx为轮箍相对轮心的垂向弹性变形；k_{rr}为减振橡胶块径向刚度；k_{rt}为减振橡胶块切向刚度；N为每个弹性车轮所包含的减振橡胶块数量；α_n为第n个减振橡胶

与加载平面的夹角。

橡胶块作用在轮箍上的总垂向力为

$$F_z = k_{rr}\Delta x\sum_{n=1}^{N}\cos^2\alpha_n + k_{rt}\Delta x\sum_{n=1}^{N}\sin^2\alpha_n \tag{2}$$

其中，轮箍在第 n 个橡胶块位置承受的径向载荷为

$$F_{rrn} = k_{rr}\Delta x_{rrn} = k_{rr}\Delta x\cos\alpha_n \quad (n=1,2,\cdots,N) \tag{3}$$

轮箍在第 n 个橡胶块位置承受的切向载荷为

$$F_{rtn} = k_{rt}\Delta x_{rtn} = -k_{rt}\Delta x\sin\alpha_n \quad (n=1,2,\cdots,N) \tag{4}$$

在实际承载状态下，弹性车轮除橡胶本身的弹性变形外，轮箍本身也会产生一定的弹性变形[15]，进而对减振橡胶的作用力分布产生影响，因此需要采用更精确的有限元方法对轮箍承载特性进行研究。

2　轮箍承载特性有限元模型

基于图 3 所示的弹性车轮承载原理，进一步考虑轮箍弹性变形特性，建立了基于橡胶离散支撑的轮箍承载特性有限元模型，如图 4 所示，仿真计算参数见表 1。将轮心部分简化为固定约束的刚性质量点，将减振橡胶简化为连接轮箍、轮心且具有三向刚度的离散弹簧单元，轮箍采用六面体单元，根据实际结构尺寸建立。其中，轮箍为全磨耗状态，轮箍厚度为 h，车轮径向载荷 F_z 加载在滚动圆位置。

表 1　仿真计算参数

Table 1　Simulation parameters

参数名称	参数值
弹性模量/GPa	210
泊松比	0.28
轴重/t	14
橡胶径向预压缩力/kN	400
橡胶块数量	27

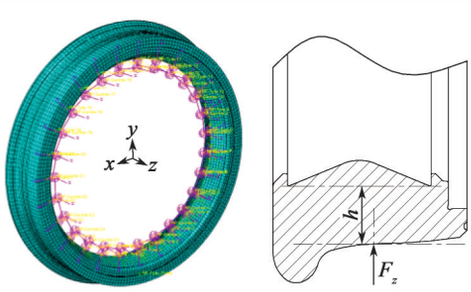


图 4　轮箍承载有限元模型

Fig. 4　Finite element model of tyre bearing

3　结果分析

应用参数化设计语言完成轮箍承载特性计算模型的建模、分网、加载和计算参数设置，对不同车轮刚度（80~1 100 kN/mm）、不同轮箍厚度（25 ~ 55 mm）、不同车轮滚动圆直径（500~770 mm）下的轮箍应力与变形量进行计算，获得了不同计算条件下的轮箍应力分布、变形量等变化趋势和分布规律。

3.1　轮箍应力分布

图 5 为在车轮刚度 280 kN/mm、轮箍最小厚度 35 mm、垂向载荷 70 kN 条件下的弹性车轮轮箍载荷施加断面和轮箍圆周方向的应力云图和应力状态分布。由于不考虑轮轨接触区的接触应力，因此图 5 未显示载荷施加位置产生的集中应力。由图 5 可知，当对弹性车轮轮箍施加垂向载荷时，加载断面的轮箍应力基本呈对称分布状态，并且在不考虑轮轨接触区域应力情况下，轮箍的最大应力分布在轮箍与橡胶块接触面的中间位置，该区域的最大 Von- Mises 应力约为 85.4 MPa。

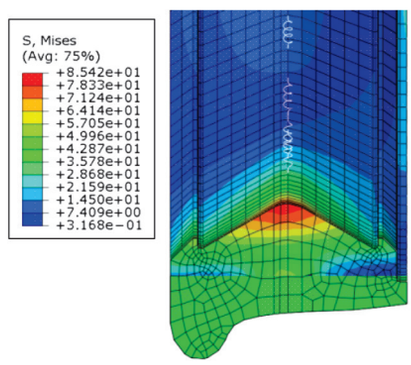


图 5　轮箍应力状态(加载平面)

Fig. 5　Stress state of tyre (loading plane)

轮箍加载位置处横截面的应力状态如图 6 和图 7 所示。其中，图 6 为轮箍与减振橡胶接触的内表面横截面的应力变化情况，图 7 为轮箍踏面外表面横截面的应力变化情况。

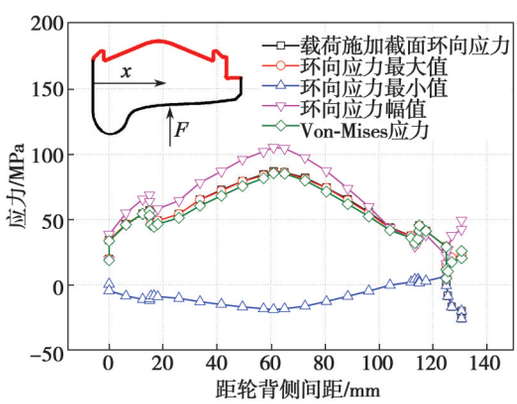


图 6　轮箍内表面应力状态

Fig. 6　Stress state of tyre inner surface

由图 6 可知，轮箍内表面的最大 Von-Mises 应力、最大环向应力和最大环向应力幅值均出现在橡胶接触部位的“屋脊”处，并且该区域以拉应力为主，最大环向应力为 86.2 MPa，环向应力幅值达 105.1 MPa，为确保轮箍的运用安全应重点关注该区域的材料强度。由图 7 可知，轮箍外表面的最大 Von-Mises 应力、最大

环向应力主要发生在轮轨接触区域和轮缘顶部区域，但总体来看轮箍外表面主要以环向压应力为主，总体应力状态要优于内表面。

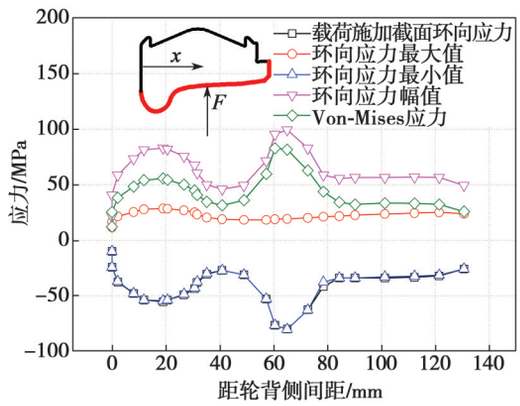


图7 轮箍外表面应力状态

Fig. 7 Stress state of tyre outer surface

在轮箍圆周方向，轮箍内表面（与橡胶接触面中间位置）和踏面表面（滚动圆位置）的圆周应力分布变化规律基本相反，呈对称的“W”形的应力变化趋势，如图8所示。在加载平面位置，轮箍内表面呈最大拉应力，环向应力为86.2 MPa，踏面表面呈最大压应力状态，环向应力为−80.0 MPa（“−”表示受力方向）；距离加载平面±60 °相位位置，轮箍内表面呈最大压应力，环向应力为−18.3 MPa，踏面表面呈最大拉应力状态，环向应力为19.2 MPa。轮箍总体呈现椭圆形变形，如图9所示，并且最大变形位置位于轮轨接触区附近，最大变形量Δh达到0.3 mm。

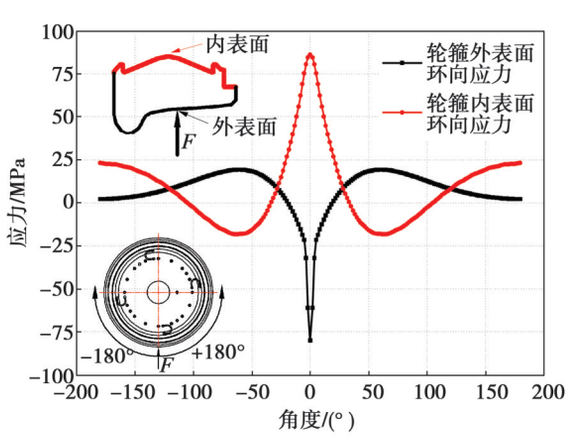


图8 轮箍圆周方向应力分布

Fig. 8 Stress distribution in the tyre circumferential

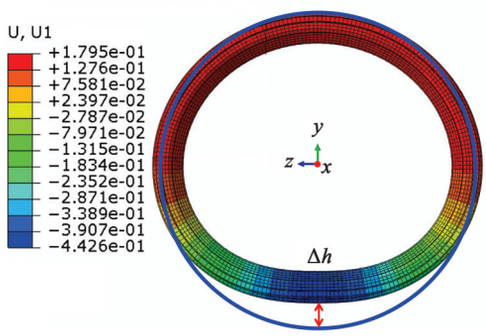


图9 轮箍变形（放大200倍）

Fig. 9 Tyre deformation (200 times magnification)

3.2 轮箍厚度影响分析

通过参数化建模，对不同轮箍厚度条件下的应力状态变化趋势进行计算分析。表2为当车轮滚动圆直径为770 mm、车轮刚度为280 kN/mm、垂向载荷为70 kN时，不同轮箍厚度下的轮箍内表面最大Mises应力、最大环向应力、环向应力幅值、轮箍变形量的变化趋势。

由表2可知，随着轮箍最小厚度的增加，轮箍的各应力状态及椭圆变形量均呈降低趋势，当轮箍厚度由25 mm增大至55 mm，最大Von-Mises应力降低了49.5%，最大环向应力降低50.6%，环向应力幅值降低了48.3%，轮箍变形量降低了56.0%。这主要是由于随着轮箍厚度的增大，轮箍整体抗弯刚性越强，进而改善了轮箍的承载能力。图10为在相应的轮箍厚度区间内，轮箍厚度变化导致的轮箍应力变化率与变形量变化率的变化趋势。由图10可知，当轮箍厚度超过45 mm后，轮箍厚度对轮箍承载性能的影响程度逐渐降低。

图11为在不同整轮刚度下，轮箍内表面环向应力、环向应力幅值和轮箍变形量随轮箍厚度的变化趋势。由图11可知，整轮刚度越小，轮箍厚度的增加对轮箍应力状态的改善越明显；当轮箍厚度由25 mm增大至55 mm时，在整轮刚度为80 kN/mm时，轮箍环向应力幅值由177.4 MPa降低至79.5 MPa，降低了55.2%，而当整轮刚度为960 kN/mm时，轮箍环向应力幅值由96.7 MPa降低至52.3 MPa，降低了45.9%。

3.3 车轮刚度影响分析

表3为在车轮滚动圆直径770 mm、轮箍厚度35

表2 不同轮箍厚度条件下轮箍应力变形特性

Table 2 Stress-deformation characteristics of tyre under different thicknesses

轮箍最小厚度/mm	最大Von-Mises应力/MPa	最大环向应力/MPa	环向应力幅值/MPa	轮箍变形量/mm
25	109.60	111.79	133.03	0.389
35	85.42	86.08	104.38	0.299
45	68.02	68.46	84.43	0.227
50	61.72	61.82	76.73	0.197
55	55.39	55.25	68.80	0.171

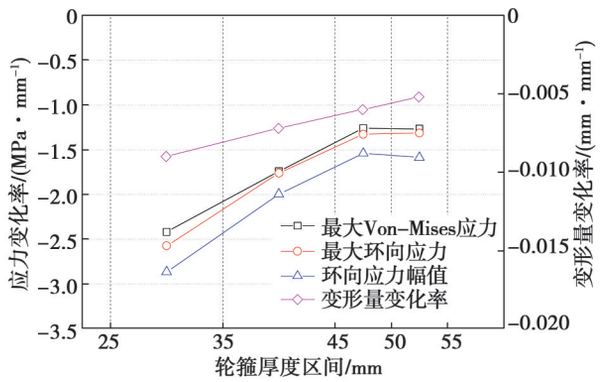
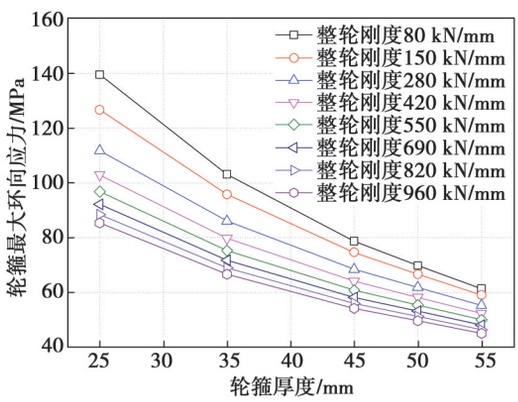
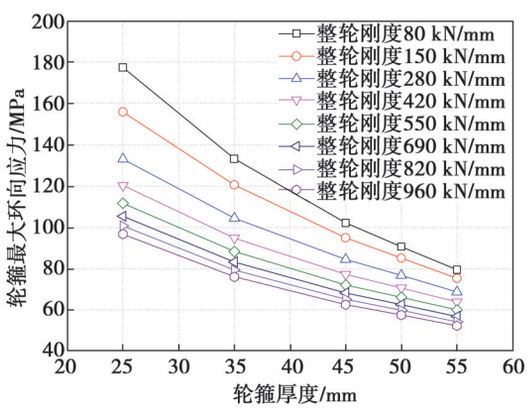


图 10　轮箍厚度变化对应力变化率和变形量变化率的影响

Fig. 10　Influence of tyre thickness variation on stress changing rate and deformation changing rate



(a) 轮箍最大环向应力



(b) 轮箍环向应力幅值

图 11　不同整轮刚度条件下轮箍厚度对轮箍应力状态的影响

Fig. 11　Influence of tyre thickness on tyre stress state under different wheel stiffness

mm、垂向载荷 70 kN 的条件下，不同整轮刚度对应的轮箍内表面最大 Von-Mises 应力、最大环向应力、环向应力幅值、轮箍变形量的变化趋势。由表 3 可知，随着整轮径向刚度的增大，轮箍的各应力状态及椭圆变形量均呈降低趋势；当整轮径向刚度由 80 kN/mm 增大至 960 kN/mm，最大 Von-Mises 应力降低了 34.9%，最大环向应力降低了 35.4%，环向应力幅值降低了 43.0%，轮箍变形量降低了 68.0%。这主要是由于随着整轮刚度的增大，减振橡胶层对轮箍的支撑性也随之变强，轮箍的局部变形降低，进而改善轮箍的应力状态。

表 3　不同整轮刚度条件下轮箍应力及变形特性

Table 3　Stress-deformation characteristics of tyre under different wheel stiffness

整轮刚度/(kN·mm⁻¹)	最大 Von-Mises 应力/MPa	最大环向应力/MPa	环向应力幅值/MPa	轮箍变形量/mm
80	102.10	103.15	133.23	0.465
150	94.92	95.82	120.54	0.390
280	85.42	86.08	104.38	0.299
420	79.27	79.77	94.82	0.245
550	74.87	75.25	88.24	0.209
690	71.48	71.76	83.26	0.184
820	68.75	68.95	79.30	0.164
960	66.48	66.61	76.00	0.149

图 12 为在计算刚度区间内，每单位整轮刚度引起的轮箍应力变化率和变形量变化率的变化趋势。由图 12 可知，当整轮径向刚度超过 400 kN/mm 后，车轮刚度对轮箍承载性能的影响程度逐渐降低。

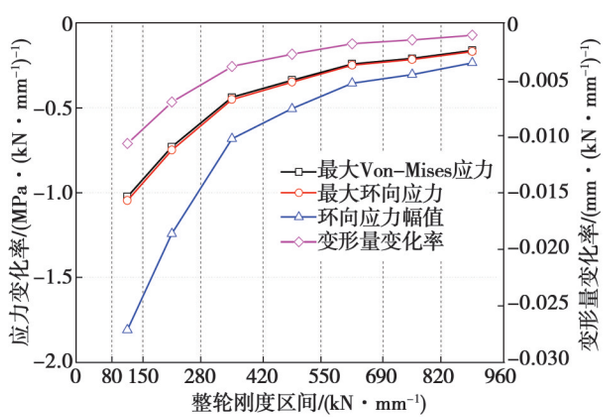


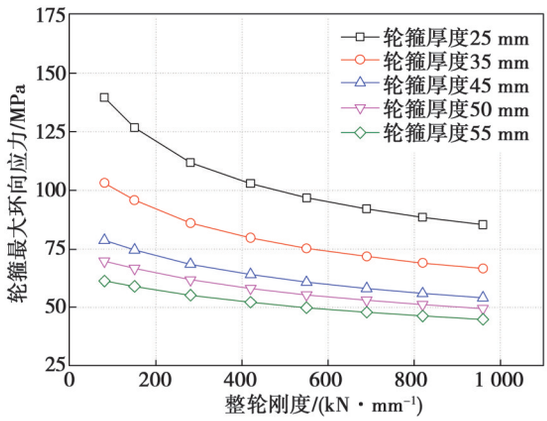
图 12　整轮刚度变化影响

Fig. 12　Influence of wheel stiffness variation

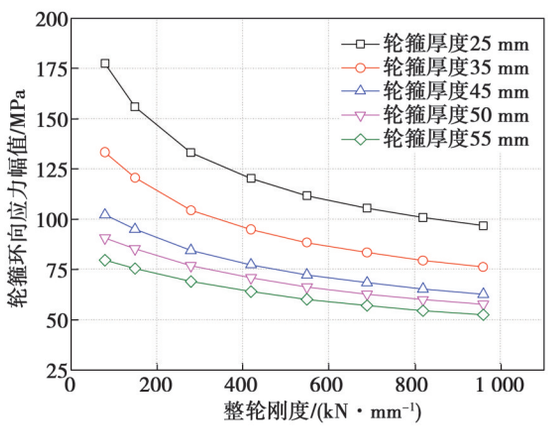
图 13 为在不同轮箍厚度条件下，轮箍内表面环向应力、环向应力幅值随整轮刚度的变化趋势。由图 13 可知，轮箍厚度越小，整轮刚度的增加对轮箍应力状态的改善越明显；当整轮径向刚度由 80 kN/mm 增大至 960 kN/mm 情况下，在轮箍厚度为 25 mm 时，轮箍环向应力幅值由 177.4 MPa 降低至 96.7 MPa，降低了 45.5%，而在整轮厚度为 55 mm 时，轮箍环向应力幅值由 79.5 MPa 降低至 52.3 MPa，降低了 34.2%。

3.4　车轮直径影响分析

表 4 为在整轮径向刚度 280 kN/mm、轮箍厚度 35 mm，垂向载荷 70 kN 的条件下，不同车轮直径对应的轮箍内表面最大 Von-Mises 应力、最大环向应力、环向应力幅值、轮箍变形量的变化情况。由表 4 可知，随着车轮直径的增大，轮箍的各应力状态及椭圆变形量均呈增大趋势；当车轮滚动圆直径由 500 mm 增大至 770



(a) 轮箍最大环向应力



(b) 轮箍环向应力幅值

图 13　不同轮箍厚度条件下整轮刚度对轮箍应力状态的影响

Fig. 13　Influence of the wheel stiffness on the stress state of the trye under the different thickness

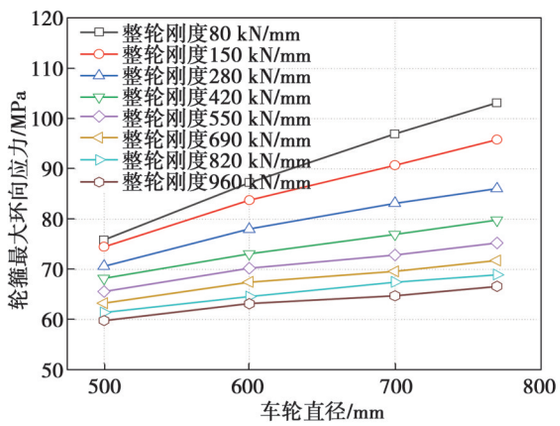
mm 时，最大 Von-Mises 应力增大了 18.6%，最大环向应力增大了 21.1%，环向应力幅值增大了 19.0%，轮箍变形量增大了 141.1%。这主要是由于随着车轮滚动圆直径的增大，轮箍整体抗弯刚度降低，进而降低了轮箍的承载能力。

表 4　不同车轮直径条件下轮箍应力–变形特性

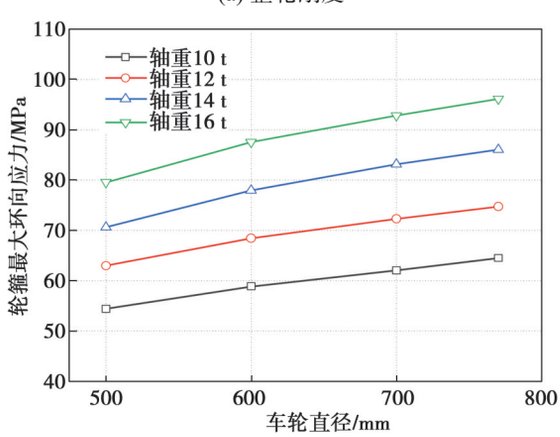
Table 4　Stress-deformation characteristics of tyre under different wheel diameters

车轮直径/mm	最大 Von-Mises 应力/MPa	最大环向应力/MPa	环向应力幅值/MPa	轮箍变形量/mm
500	71.79	71.07	87.72	0.124
600	77.76	78.01	96.26	0.187
700	82.44	83.14	101.78	0.254
770	85.15	86.08	104.38	0.299

图 14 为在轮箍厚度为 35 mm 时，不同车轮直径的轮箍内表面环向应力随整轮刚度和轴重的变化趋势。由图 14 可知，随着车轮直径的增大，不同整轮刚度和轴重下轮箍最大环向应力均呈增大趋势；同时，整轮刚度越小，车轮直径对轮箍环向应力的影响越明显，而随着轴重的增加，轮箍环向应力基本呈线性增大趋势。因此，在相同轴重条件下，对于车轮滚动圆直径较大的弹性车轮应当适当增大车轮刚度和轮箍厚度，以提高弹性车轮轮箍的承载性能。对于轴重低、车轮直径小的有轨电车弹性车轮，一般采用低刚度、薄轮箍的设计，从而在保证安全承载的前提下，提高车轮减振降噪性能，而对于轴重大、车轮直径大的地铁弹性车轮，则应适当增大车轮刚度和轮箍厚度，以提高车轮的承载安全性。



(a) 整轮刚度



(b) 轴重

图 14　不同车轮直径下整轮刚度和轴重对轮箍应力状态的影响

Fig. 14　Influence of the wheel stiffness and axle load on the stress state of the trye under the different wheel diameter

4　结论

本文基于橡胶块弹性离散支撑的轮箍承载特性参数化计算模型，对比分析了车轮刚度、轮箍厚度、车轮滚动圆直径等结构参数对弹性车轮轮箍承载特性的影响，得到以下结论：

①当弹性车轮轮箍承受垂向载荷时，轮箍内表面的最大应力区域位于轮箍与橡胶块接触面的“屋脊”处，该区域以环向拉应力为主；轮箍外表面的最大应力区域位于轮轨接触区域和轮缘顶部区域，主要以环向压应力为主，轮箍内表面的应力水平高于外表面。

②在轮箍圆周方向，轮箍内表面和外表面的应力

分布变化规律基本相反，均呈“W”形变化趋势。在加载处，轮箍内表面呈最大拉应力，踏面表面呈最大压应力状态；距离加载平面60 °区域，轮箍内表面呈最大压应力，踏面表面呈最大拉应力状态。轮箍总体呈椭圆形变形，最大变形位于轮轨接触区附近。

③随着轮箍厚度、车轮刚度的增大，轮箍的各应力及椭圆变形量均呈降低趋势，轮箍承载性能和安全性得到改善。当轮箍厚度超过45 mm，整轮径向刚度超过400 kN/mm后，对轮箍承载性能的影响程度逐渐降低。

④随着车轮直径的增大，轮箍的各应力和变形量均呈增大趋势，因此在相同轴重条件下，对于车轮滚动圆直径较大的弹性车轮应当适当增大车轮刚度及轮箍最小厚度，以提高弹性车轮轮箍的承载性能。

本文的研究成果对于弹性车轮轮箍承载强度计算、结构优化设计和安全可靠性评估具有重要的理论和工程指导价值。

参考文献：

[1] 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.

[2] ZHOU Xin, HAN Jian, ZHAO Yue, et al. Characteristics of vibration and sound radiation of metro resilient wheel[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2019, 32(1): 67.

[3] 史和平, 郭立军. 城市轨道车辆弹性车轮研究[J]. 城市公共交通, 2000(3): 25-27.
SHI Heping, GUO Lijun. Research on resilient wheels of urban rail vehicles[J]. Urban Public Transport, 2000(3): 25-27.

[4] ESSLINGER V, KIESELBACH R, KOLLER R, et al. The railway accident of Eschede-technical background[J]. Engineering Failure Analysis, 2004, 11(4): 515-535.

[5] 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.

[6] 孙明昌, 曾京, 温泽峰. 弹性轮对的有限元分析[J]. 交通运输工程学报, 2002, 2(4): 38-42.
SUN Mingchang, ZENG Jing, WEN Zefeng. Finite element analysis for resilient wheelset[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2002, 2(4): 38-42.

[7] 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. Research on structural stiffness and strength of resilient wheel[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.

[8] 黄彪, 戚援, 杜利清. 弹性车轮非线性有限元分析及疲劳强度校核[J]. 轨道交通装备与技术, 2014(2): 44-47.
HUANG Biao, QI Yuan, DU Liqing. Nonlinear finite element analysis and fatigue strength assessment of resilient wheel[J]. Rail Transportation Equipment and Technology, 2014(2): 44-47.

[9] 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.

[10] 周信. 地铁弹性车轮的减振降噪及动态特性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
ZHOU Xin. Study on vibration and noise reduction and dynamic characteristics of metro resilient wheel[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019.

[11] 郑剑云. 压剪复合型橡胶弹性车轮有限元分析[J]. 机车车辆工艺, 2007(5): 1-4.
ZHENG Jianyun. FEA of compressive shear compound rubber elastic wheel[J]. Locomotive & Rolling Stock Technology, 2007(5): 1-4.

[12] WEBER K H, VAN SICKEL E L. Rubber-cushioned wheels for light rail transit[C]//Transportation Research Board. National Conference on Light Rail Transit. California: Transportation Research Board, 1989: 486-502.

[13] 范蓉平, 孟光, 崔银会. 弹性车轮的发展与研究现状[J]. 机车电传动, 2005(1): 8-11.
FAN Rongping, MENG Guang, CUI Yinhui. Current status of development and study on resilient wheel[J]. Electric Drive for Locomotives, 2005(1): 8-11.

[14] 戚援, 侯传伦, 郑志立, 等. 分块式橡胶弹性车轮的研制[J]. 机车车辆工艺, 2015(1): 5-7.
QI Yuan, HOU Chuanlun, ZHENG Zhili, et al. Development of rubber block resilient wheel[J]. Locomotive & Rolling Stock Technology, 2015(1): 5-7.

[15] WALTZ M. Dynamisches verhalten von gummigefederten eisenbahnrädern[D]. Aachen: RWTH Aachen University, 2005.

收稿日期：2022-04-26
修回日期：2022-06-05