

特约来稿

非充气轮胎的结构设计与力学性能

刘晨, 李凡珠*, 卢咏来*, 张立群

(北京化工大学 有机无机复合材料国家重点实验室, 北京 100029)

摘要: 阐述充气轮胎具有在粗糙路面滚动时能量损失低以及垂直刚度和接地压力较小、承载效率较高的优势以及不抗刺扎、易爆胎、运转不平稳的不足。介绍两款典型的非充气轮胎——辐条式非充气轮胎和蜂巢式非充气轮胎的结构和力学性能。与传统充气轮胎相比, 非充气轮胎不仅垂向刚度和接地压力解耦, 垂向刚度、侧向刚度、扭转刚度也不再是强耦合关系, 这极大地拓展了轮胎的设计空间, 仅通过调整剪切带及轮辐的结构和几何参数就可以有效地优化轮胎的性能, 但非充气轮胎也存在很多问题, 使其仍处于设计研发阶段。今后非充气轮胎的市场需求将不断扩大, 其结构和力学性能将不断改进, 使非充气轮胎成为轮胎领域的一大品种。

关键词: 非充气轮胎; 蜂巢式; 辐条式; 结构设计; 力学性能

中图分类号: TQ336.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-890X(2021)02-0083-08

DOI: 10.12136/j.issn.1000-890X.2021.02.0083



OSID开放科学标识码
(扫码与作者交流)

1888年, 充气轮胎问世并迅速成为车轮的主导轮胎类型^[1], 其技术的发展极大地提高了人们的生活质量。但充气压力的存在使轮胎设计受到了很大的限制; 同时, 充气轮胎的结构特点也带来了一定的安全隐患, 从而造成车辆通过性降低或易丧失机动性^[2-3]。非充气结构设计使轮胎的力学性能得以优化, 且免去了充气和检查胎压的环节, 解决了充气轮胎易引发安全事故的问题。因此, 摆脱传统充气轮胎的结构设计, 研发新型非充气结构安全轮胎成为当前轮胎领域的一种趋势。

本工作基于前阶段对于20款非充气轮胎的研究^[4], 进一步对其进行结构设计和力学性能分析, 并对其今后的发展做出展望。

1 充气轮胎的特性及其存在的问题

1.1 充气轮胎的特性

轮胎作为车辆与道路直接接触的唯一部件, 起到承载车体质量、缓冲外界冲击、为车辆提供足

够驱动力和制动力以及方向稳定性的作用。充气轮胎具有在粗糙路面滚动时能量损失较低以及垂向刚度和接地压力较小、承载效率较高的特点, 其结构决定了其在复杂的行驶环境中存在不抗刺扎或易爆胎等安全隐患^[5-6]。

1.2 充气轮胎存在的问题

1.2.1 不抗刺扎

当车辆在地形恶劣、路面粗糙不平的环境中行驶时, 轮胎难免会因接触到尖锐物而被扎破, 从而发生泄气甚至爆胎, 以致无法继续行驶。轮胎在泄气失压后的安全性能对车辆及驾驶人员有着至关重要的影响^[7-8]。

1.2.2 爆胎

车辆行驶时轮胎既要承受路面产生的冲击负荷, 又要承受因车身质量引起的压缩变形, 这些都会使轮胎产生大量热量, 而轮胎是热的不良导体, 在胎体处热量大量聚集且难以散发, 胎体内部温度不断上升并伴随胎内气压升高, 当受到障碍物

基金项目: 国家重点研发计划课题(2018YFB1502501-04)

作者简介: 刘晨(1997—), 女, 山西大同人, 北京化工大学在读硕士研究生, 主要从事橡胶本构方程和非充气轮胎疲劳性能研究。

*通信联系人(lifanzhu@mail.buct.edu.cn; luyonglai@mail.buct.edu.cn)

引用本文: 刘晨, 李凡珠, 卢咏来, 等. 非充气轮胎的结构设计与力学性能[J]. 橡胶工业, 2021, 68(2): 83-90.

Citation: LIU Chen, LI Fanzhu, LU Yonglai, et al. Structural Design and Mechanical Properties of Non-pneumatic Tire[J]. China Rubber Industry, 2021, 68(2): 83-90.

冲击时,轮胎极易发生爆破^[9-12]。爆胎已成为威胁汽车安全行驶的重要因素。

1.2.3 运转不平稳

轮胎长时间行驶,不同部位的磨损情况不同,轮胎内部原有的气压平衡被破坏,导致轮胎运转不平稳。此外,橡胶老化、轮胎与路面间的高频振动等因素也会影响车辆的行驶性能,其原因也与轮胎的充气状况有关^[13]。

充气问题给轮胎带来的缺陷与安全隐患困扰着车辆运行,因此,克服充气轮胎的弊端,研发抗爆轮胎、安全舒适的非充气轮胎成为轮胎行业的重要课题。

2 典型的非充气轮胎结构

2.1 辐条式非充气轮胎

2005年米其林公司率先设计出Tweel非充气轮胎,它由轮辋、辐条式弹性支撑体、增强剪切带以及胎面组成,如图1所示^[14]。这种非充气轮胎采用剪切模量较低的特殊剪切带结构代替充气结构,在剪切带沿径向向内和向外均分布不可拉伸的增强薄膜,形成增强薄膜-剪切层-增强薄膜“三明治结构”^[15-18],且内外层薄膜的拉伸模量远大于剪切层的剪切模量,以使变形主要由剪切层承担,剪切层的剪切模量一般在3~20 MPa范围内^[19]。



图1 Tweel轮胎的结构
Fig. 1 Structure of Tweel tire

剪切带的外层增强膜嵌入到胎面中,从而实现胎面与剪切带的连接,胎面经过纹理化处理,可以产生足够的抓地力。同时,辐条式弹性支撑体在通过障碍物时会发生弹性形变,吸收来自路面的冲击力,减小轮胎负荷^[20],为了实现辐条在接地区域内屈曲,需要保证辐条有一定的曲率。另一方面,可变形的辐条应该具有较好的侧向及纵向

承载能力,为了实现这一要求,可以通过辐条结构和加强剪切带合理设计实现轮胎垂向刚度、侧向刚度、纵向刚度及接地压力的独立设计。

2.2 蜂巢式非充气轮胎

2008年美国Resilient技术公司和威斯康星州大学麦迪逊分校聚合体工程学中心的研发人员利用仿生学原理开发出一种新型非充气轮胎——蜂巢式轮胎,如图2所示^[21]。它巧妙地将蜂巢六边形结构运用到轮胎的轮辐上,这些轮辐采用了能够保持柔性的高性能材料,以使其弹性高、散热快,且具有一定的强度。目前,蜂巢式非充气轮胎已被用于高机动性多用途轮式车(HMMWV)上。



图2 蜂巢式轮胎
Fig. 2 Honeycomb-type tire

3 非充气轮胎的力学性能

3.1 承载机制及刚度

轮胎的承载机制可分为顶部承载和底部承载,如图3所示^[22]。

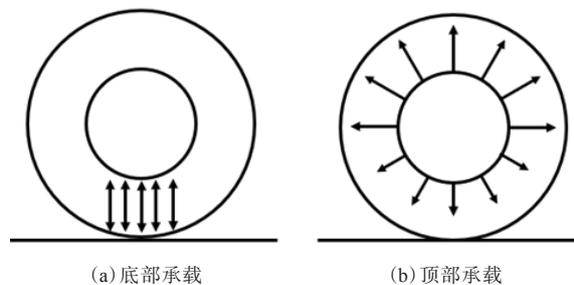


图3 轮胎的承载机制示意

Fig. 3 Fundamental load-carrying mechanism of tires

实心轮胎采用底部承载机制,通过接地部分被压缩变形,将负荷从接地区域传递到轮毂,轮胎中仅有极小部分参与承担负荷,单位质量承载效率较低。而充气轮胎和非充气轮胎均采用顶部承

载机制,轮胎接地部分基本不承担负荷,通过接地区域以外的其他部分承担大部分负荷,单位质量的承载效率较高。当非充气轮胎承载时,由于剪切带的增强薄膜是不可拉伸的,接地区域剪切带的剪切层受到负荷而被压缩时,剪切带多余部分的长度被用于增大剪切带的直径,与此同时,非接地部分的辐条产生拉力,将轮胎“悬挂”起来,从而使轮胎的垂直刚度减小。非充气轮胎具有比充气轮胎更大的侧向刚度,其主要原因是非充气轮胎的轮辐采用了侧向圆周排布方式,当承受侧向负荷时,轮胎侧向变量较小,侧向刚度较大^[23]。岳红旭等^[24-25]通过对非充气轮胎的仿真研究发现,在一定范围内,轮胎的侧向刚度和扭转刚度随着垂向负荷的增大而增大。

传统充气轮胎的刚度在轮胎设计时只能通过扁平比进行调整,轮胎扁平比越大,抓着力越大,弹性越好,垂直刚度则越小,但这也使轮胎的设计受到很多限制^[26]。而非充气轮胎却完全不同,其纵向、侧向和横向刚度既可通过柔软可弯曲的轮辐调节^[27],还可以通过富有弹性的可变形轮辋调节,完全可以满足不同道路条件、行驶工况和使用个人偏好,可达到最佳效果。

P. Amarnath^[28]采用具有几何非线性的二维平面有限元模型对Tweel轮胎的滚动过程进行数值模拟,根据力-位移曲线表明,增大剪切带厚度和增加辐条对数都会使地面的反作用力和刚度成比例增大,但与辐条对数的变化相比,辐条厚度的变化对轮胎的刚度起到主导作用。同时,在辐条总质量相等的情况下,辐条对数越小、辐条厚度越大,轮胎可承载的负荷和刚度越大。L. R. William^[29]研究发现:辐条厚度是对Tweel轮胎质量和垂向刚度影响最大的参数,辐条厚度越大,轮胎的质量和刚度越大;剪切带厚度和辐条曲率分别是影响轮胎垂直刚度的第二和第三大参数,较厚的剪切带和较小的辐条曲率都会使轮胎的刚度增大。N. Akshay^[15]基于聚氨酯剪切层单轴试验数据,根据力-位移曲线的斜率研究Tweel轮胎的垂向刚度,结果表明轮胎的垂向刚度随着剪切层剪切模量的增大而增大。

对于蜂巢式轮胎,较大的蜂巢角度会减小轮胎的垂向刚度,且负泊松比蜂巢结构降低了横向

反作用力,从而降低轮胎的整体反作用力;同时,较大的蜂巢角度降低了蜂巢结构因屈曲导致的不稳定性的几率,因此应当合理设计蜂巢角度。K. Kwangwon等^[30]的研究表明,轮胎的垂向刚度随着负荷增大而单调递减,这是因为在变形初始阶段,蜂巢结构接地印痕区域由于压缩而具有较大的阻力,随着负荷的增大,蜂巢壁发生屈曲而导致垂向刚度减小。

非充气轮胎采用高效的顶部承载机制,使每一时刻轮胎的每一部分都参与承载。与普通充气轮胎相比,非充气轮胎的垂向刚度与负荷呈负相关,且通过调整轮辐厚度和曲率以及剪切带厚度和剪切层剪切模量都可以有效地减小非充气轮胎的刚度。

3.2 接地压力

充气轮胎的接地压力和垂向刚度都与气压直接紧密耦合;而非充气轮胎的接地压力主要与轮胎外形尺寸和剪切带参数有关,从而保证了接地压力与垂向刚度的相对独立,即接地压力与垂向刚度解耦,同时垂向刚度、侧向刚度和扭转刚度也不再是强耦合关系。由于负荷等于接地压力与接触面积的乘积,因此非充气轮胎可以同时具有大的接地压力和刚度,或同时具有小的接地压力和刚度。

轮毂加载时,剪切带发生变形,在接地处形成“接触片”,由于内层和外层薄膜是不可拉伸的,因此从弯曲到平面的变形是由剪切层产生的。Tweel轮胎的接地压力计算公式^[22]如下:

$$P = \left(\frac{G}{R + \frac{x^2}{R}} \right) h \quad (1)$$

式中, P 为接地压力, G , R 和 h 分别为剪切层剪切模量、轮胎圆周半径和剪切带厚度, x 为接地印痕纵向坐标。

由于接地印痕纵向坐标 x 相对于轮胎圆周半径 R 可以忽略不计,则有:

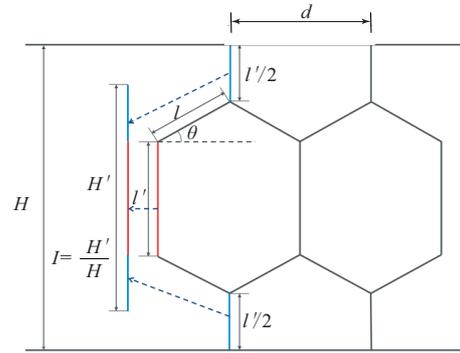
$$P \cong \frac{Gh}{R} \quad (2)$$

上述公式的成立对剪切带的材料性能有着特殊的要求,即在设计时应保证剪切带的增强薄膜具有较小的弯曲刚度及较大的周向刚度,剪切层具有较小的剪切模量;同时,增强薄膜的拉伸模量

与剪切层的剪切模量之比至少为1 000 : 1^[31]。通过对方程(2)中3个参数进行调整,可以使Tweel轮胎的接地压力与充气轮胎一样低。

采用有限元方法对Tweel轮胎进行仿真分析,结果表明,Tweel轮胎剪切带的“三明治”结构可以为其提供均匀的接地压力,而没有剪切带结构的轮胎则接地印痕较短,压力大且分布较不均匀^[32]。V. Mallikarjun等^[33]的研究表明:随着剪切带厚度从10 mm增大到20 mm,Tweel轮胎的接地长度减小,最大接地压力增大了27%;随着剪切层剪切模量的增大,Tweel轮胎的垂向刚度增大,由于剪切能力降低,使得接地区域的材料变形减小,因此能量损失较低,同时使得最大接地压力升高,接地长度变小。通过正交试验设计发现对于Tweel非充气轮胎,剪切层剪切模量对轮胎的最大接地压力有重要的影响,剪切带厚度其次,辐条厚度对最大接地压力基本无影响。L. A. Berglund等^[34]基于Tweel轮胎辐条结构,设计了锥形刷毛式的剪切带,可以有效地利用材料变形使高剪切变形下轮胎受到的应力分布更加均匀,但由于锥形刷毛结构使轮胎的接地长度变小,进而导致其轮胎的最大接地压力比实心剪切带轮胎大。

J. Jaehyung等^[35]研究了不同角度蜂巢结构轮胎的剪切带对接地压力分布的影响,发现剪切带上蜂巢角度为负值时,在能够实现面内剪切特性的同时,减小接地压力,且在一定范围内蜂巢角度负值越大,接地压力越小。剪切层剪切模量决定了施加给定负荷时轮胎的接地压力和接地长度。剪切层最大剪切应变不会直接影响轮胎的接地压力特性,但是根据接地长度,剪切层在发生破坏之前应承受一定水平的剪切应变。B. Luke^[36]为了同时得到具有高剪切模量 G_{12}^* 和高剪切应变 $(\gamma_{12}^*)_{\max}$ 的剪切带,为蜂巢结构建立了一种设计方法。在该方法中常规参数被有效垂直构件高度 I 和水平间距 d 所代替,通过参数研究发现:有效垂直构件高度 I 和水平间距 d 对剪切模量 G_{12}^* 均有显著影响;而对于剪切应变 $(\gamma_{12}^*)_{\max}$ 而言,仅有有效垂直构件高度 I 对其有显著影响。这些新参数使得设计空间容易进行调整,并且它们相互独立,有效垂直构件高度 I 或水平间距 d 可以在不影响对方的情况下自由修改,如图4所示。



H 为单层蜂巢支撑体的整体高度, H' 为单层蜂巢支撑体中垂直结构高度, l 为蜂巢单元倾斜长度, l' 为蜂巢单元垂直高度, θ 为蜂巢角度。

图4 蜂巢结构设计方法

Fig. 4 Design method of honeycomb structure

美国国防部在2018—2019年资助的SBIR研究项目(用于高速路面和越野路面的非充气轮胎)中,开发了规格为16.00R20的非充气轮胎模型。其中提到了一种多面体相变细胞矩阵(Polyhedral Phase Transforming Cellular Matrix, PXCM)结构, PXCM结构具有比传统蜂巢结构更加卓越的力学性能,可以直接通过胞状结构发生相变来优化轮胎的刚度和接地压力,以适应不同负荷和变化地形对轮胎带来的冲击,使轮胎能够在军事任务环境中提高生存能力^[37]。

在非充气轮胎中,剪切带的“三明治”结构为其提供了均匀的接地压力;同时,解耦使非充气轮胎仅通过改变轮胎的外观结构即可有效地调整接地压力,从而解决了传统轮胎由于强耦合而导致设计受限问题。

3.3 在粗糙路面上的滚动阻力及动态温升

3.3.1 滚动阻力

轮胎在粗糙路面上经历反复循环变形和恢复过程中,原本用来驱动轮胎的机械能由于滚动阻力的存在而被转换成热能并从轮胎中散发出去,尽管滚动阻力只消耗车辆燃油总能量的4%~7%,但滚动阻力的小幅降低会提高燃油经济性。统计数据示,假设其他影响因素不变,滚动阻力降低10%将导致燃油经济性提高1%~2%^[11,38],因此,使轮胎滚动阻力最小化具有很大的经济效益。

T. B. Rhyne等^[22]采用有限元方法模拟充气轮胎和Tweel轮胎滚过障碍物的运动过程并记录其平动速度的损失情况,在这个模拟试验中,充气轮胎在越过障碍物时损失6%的平动速度,而Tweel

轮胎仅损失了3.2%的平动速度,这表明通过障碍物时,Tweel轮胎较充气轮胎的能量损失更小。V. Mallikarjun^[39]采用有限元模型研究了Tweel轮胎的辐条厚度、剪切带厚度及剪切层剪切模量对其能量损失特性的影响,结果表明:剪切带厚度和剪切层剪切模量对轮胎的滚动阻力的影响较大,且随着剪切带厚度和剪切层剪切模量的增大,Tweel轮胎的滚动阻力减小;辐条厚度增大时,由于体积的增大,其变形减小,从而导致轮胎的滚动阻力减小。V. Mallikarjun通过对上述参数进行优化,调整剪切层剪切模量为10.29 MPa、剪切带厚度为19.61 mm、辐条厚度为3 mm,使优化后Tweel轮胎的滚动阻力比优化前降低了25%~32%。通过DOE软件和Pareto图进行的敏感性分析表明,剪切层剪切模量是决定轮胎滚动阻力、垂向刚度和接地压力的最重要参数^[33]。

K. Kwangwon等^[40]基于DOE及RSM软件,针对蜂巢型结构,以优化后轮胎的滚动阻力为目标,进行了轮胎的结构优化设计,优化后轮胎的滚动阻力降低了约15%。C. S. Lu等^[41]对轮胎的滚动阻力的分析发现,在相同承载能力下,轮胎的滚动阻力与蜂巢结构质量及其角度呈正相关。A. M. Aboul-Yazid等^[42]研究发现:与蜂巢轮胎相比,Tweel轮胎的滚动阻力更低;在有增强剪切带的情况下,Tweel轮胎的滚动阻力比蜂巢轮胎降低55%,在没有增强剪切带的情况下,Tweel轮胎的滚动阻力比蜂巢轮胎降低43%。

3.3.2 动态温升

依据能量守恒定律,轮胎滚动阻力导致的能量损失会转化为热量,该能量损失占轮胎总能量损失的90%~95%,因此轮胎使用粘弹性材料会带来生热严重的问题^[43]。B. N. Thyagaraja^[44]通过在剪切带中引入线弹性材料来降低非充气轮胎由于动态温升引起的能量损失,优化材料后的轮胎与现有材料轮胎相比,能量损失降低了17.49%。Y. Sairom等^[45]研究发现,当非充气轮胎滚动时,剪切带的温度高于弹性轮辐,此外,剪切带比相对较薄的轮辐推迟了内部热量向空气的散热,剪切带由于温度较高,可考虑采用多孔结构等。J. Jaehyung等^[46]将连续层剪切带改为由多孔纤维弹性体组成的镂空剪切带,通过在多孔剪切带中使

用复合材料来补偿刚度损失,结果表明,在不影响结构刚度的情况下,多孔弹性体剪切带非充气轮胎的能量损失比连续剪切带非充气轮胎的更低。

在非充气轮胎中,随着剪切带厚度的增大,轮胎对剪切效应的抵抗力增大,表明滚动过程中损失的能量减小,轮胎的滚动阻力减小;随着剪切层剪切模量的增大,剪切能力下降,导致接地区域的材料变形较小,轮胎的滚动阻力也随之减小。当轮胎的滚动速度增大时,相比于暴露在空气中的高比表面积的轮辐,剪切带的动态温升较为明显,可以通过优化剪切带的材料及结构来减小动态温升带来的能量损失。

3.4 振动响应

非充气轮胎最初在进行高速滚动试验时,轮胎产生的噪声极大。研究表明,Tweel非充气轮胎在高速滚动过程中产生噪声的3个来源如下^[17]:

(1)进入和离开接地区域时,辐条的屈曲和拉回产生的振动;(2)剪切带产生的振动;(3)轮胎与地面相互作用产生的振动和剪切带与辐条之间的振动传递。K. M. Kranti^[47]通过Abaqus的二维分析表明,辐条的振动频率主要发生在近190,360和620 Hz,同时在Tweel轮胎转速改变时辐条的振动频率保持不变,表示辐条振动不是与车轮相连的强迫振动,而是辐条固有频率的自由振动。

M. Ramachandran等^[48]研究发现:对辐条边缘进行扇形减宽(如图5所示),可以显著减小振动幅度,但对频率峰值影响不大;辐条厚度对频率的影响不大,但会影响振动幅度;辐条宽度对频率和振动幅度都没有显著影响。B. Shashank^[16]对Tweel轮胎的研究表明:只改变几何参数而不改变质量的辐条对模型与均匀分布的辐条对模型相比,辐条对的辐条厚度和曲率微小变化可以有效地改变振动幅度;将大曲率细辐条和小曲率粗辐条组合在一起形成奇偶交替轮辐对(如图6所示),可以减小轮辐振动及轮胎与地面相互作用产生的振动。

P. Amarnath^[28]利用稳健参数设计法和正交试验法,系统地研究了Tweel轮胎的关键几何参数对振动的影响,结果表明:辐条长度和曲率是影响轮胎与地面相互作用产生的振动和剪切带振动的重要参数;辐条长度与厚度之间没有强的交互作用。L. R. William^[29]研究发现:减小Tweel轮胎辐

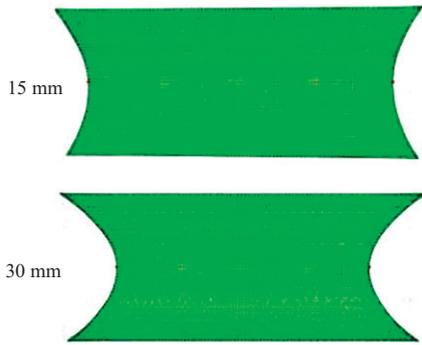


图5 对辐条边缘进行扇形减宽处理

Fig. 5 Spoke models with edge width-reduced scalloping on both sides

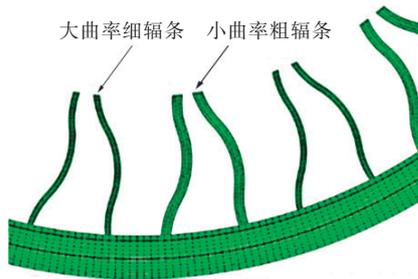


图6 奇偶交替辐条对

Fig. 6 Alternating odd and even spoke pairs

条长度和增大辐条曲率都会同时减小辐条、剪切带及轮胎与地面相互作用产生的振动幅度;通过Tweel轮胎中几何参数的调整,可以实现辐条振动峰值和振幅频率的较大变化。

早期的Tweel轮胎由于高速振动产生的噪声问题,使得车速的提升受到限制。近几年的研究表明:通过增大辐条厚度和曲率均会明显降低轮胎的振动;同时,偶数对采用大曲率细辐条,奇数对采用小曲率粗辐条,将它们组合在一起,既可以减小辐条振动,又可以减小轮胎与地面相互作用产生的振动。

4 结语

本文总结了充气轮胎的优势及不足,介绍了辐条式和蜂巢式两款典型非充气轮胎的结构及性能特点。与普通充气轮胎相比,非充气轮胎通过优化剪切带和轮辐的结构和几何参数可以有效地减小其垂向刚度;同时,垂向刚度、侧向刚度和扭转刚度与接地压力之间解耦,也使轮胎的设计空间得以拓展。在滚动阻力方面,非充气轮胎比充

气轮胎更小。在此分析的基础上,认为非充气轮胎与充气轮胎相比具有一定的有效竞争性。

非充气轮胎特殊的结构设计,使其具有许多优良的性能。但轮胎在高速行驶时产生的噪声与散热问题、轮辐连接部位在受力时由于应力集中而产生的强度及耐久性问题、镂空结构排斥异物的问题以及生产工艺和成本等使其仍处于设计研发阶段。相信随着未来市场需求的不断扩大,这些困扰非充气轮胎发展的的问题都会逐步得到解决,使非充气轮胎成为轮胎领域的一大品种。

参考文献:

- [1] Calzonetti J A, Laursen C J. Patents of Charles Goodyear: His International Contributions to the Rubber Industry[J]. Rubber Chemistry and Technology, 2010, 83 (3): 303-321.
- [2] 苏博,张浩成. 全球非充气轮胎市场概况及专利技术分析[J]. 中国橡胶, 2013, 29 (20): 22-26.
- [3] 张仲志,吕建刚,宋彬,等. 非充气轮胎技术的分析与展望[J]. 轮胎工业, 2014, 34 (9): 523-527.
- [4] 朱华健,牛金坡,李凡珠,等. 新型轮胎结构的现状与发展[J]. 高分子通报, 2019 (11): 1-14.
- [5] 薛梓晨,贺建芸,丁玉梅,等. 非充气安全轮胎的研究现状[J]. 橡胶工业, 2014, 61 (10): 632-635.
- [6] 唐帆,黎广,蒋水金,等. 新型防爆安全轮胎的研究进展[J]. 橡胶科技, 2019, 17 (6): 305-310.
- [7] Menzies T R. Tires and Passenger Vehicle Fuel Economy: Informing Consumers, Improving Performance[J]. TR News, 2006 (245): 22-23.
- [8] 李力. 中国可缺气行驶轮胎技术领域竞争及发展状况[J]. 汽车与配件, 2009 (9): 39-41.
- [9] 曲晓海,杨中江,张宏壮,等. 新型汽车轮胎防爆内胎的研制[J]. 机械设计与制造, 2012 (7): 97-99.
- [10] 马双华,田栢苓,胡慧杰,等. 子午线轮胎发展综述[J]. 轮胎工业, 2009, 29 (7): 387-390.
- [11] 佟金,杨欣,张伏,等. 零压续跑轮胎技术现状与发展[J]. 农业机械学报, 2007 (3): 182-187.
- [12] 金汉杰,肖凌云,周安伍,等. 中美缺陷汽车轮胎召回分析与对比研究[J]. 橡胶工业, 2018, 65 (4): 471-475.
- [13] 高晓东,杨卫民,张金云,等. 国内外非充气轮胎的最新研究进展[J]. 橡胶工业, 2015, 62 (3): 183-188.
- [14] Anon. Michelin® X® Tweel® Airless Radial Tire[EB/OL]. <https://michelinmedia.com/pages/blog/detail/article/c0/a963/>, 2020-04-14.
- [15] Akshay N. A Computational Method for Analysis of Material Properties of a Non-pneumatic Tire and Their Effects on Static Load-deflection, Vibration, and Energy Loss from Impact Rolling over Obstacles[D]. South Carolina: Clemson University, 2010.

- [16] Shashank B. Design and Analysis of Alternating Spoke Pair Concepts for a Non-pneumatic Tire with Reduced Vibration at High Speed Rolling[D]. South Carolina:Clemson University,2009.
- [17] Maya R. Nonlinear Finite Element Analysis of Tweel Geometric Parameter Modifications on Spoke Dynamics during High Speed Rolling[D]. South Carolina:Clemson University,2008.
- [18] Amir G, Joseph P F, Rhyne T B, et al. Development of a Two-dimensional Model of a Compliant Non-pneumatic Tire[J]. International Journal of Solids and Structures,2012,49 (13) :1723-1740.
- [19] Grah M D. Structurally Supported Resilient Tire and Materials[P]. USA:USP 6 994 134,2006-02-07.
- [20] Gasmı A, Joseph P F, Rhyne T B, et al. Closed-form Solution of a Shear Deformable Extensional Ring in Contact between Two Rigid Surfaces[J]. International Journal of Solids and Structures,2011,48 (5) :843-853.
- [21] Manesh A, Tercha M, Anderson B, et al. Tension-based Non-pneumatic Tire[P]. USA:USP 8 109 308,2012-02-07.
- [22] Rhyne T B, Cron S M. Development of a Non-pneumatic Wheel[J]. Tire Science and Technology,2006,34 (3) :150-169.
- [23] 赵又群,付宏勋,林菜,等. 非充气车轮及其力学特性研究进展[J]. 江苏大学学报(自然科学版),2016,37 (6) :621-627.
- [24] 岳红旭,赵又群. 一种新型安全车轮的非线性有限元分析[J]. 中国机械工程,2012,23 (11) :124-129.
- [25] Zhao Y Q, Du X B, Fan X L, et al. Static Stiffness Characteristics of a New Non-pneumatic Tire with Different Hinge Structure and Distribution[J]. Journal of Mechanical Science and Technology,2018,32 (7) :3057-3064.
- [26] Jaehyung J, Summers J D. Compliant Hexagonal Periodic Lattice Structures Having Both High Shear Strength and High Shear Strain[J]. Materials and Design,2011,32 (2) :512-524.
- [27] Cron S M, Rhyne T B. Spoke for a Tire with Optimized Thickness for Improved Durability[P]. USA:USP 9 290 045,2016-03-22.
- [28] Amarnath P. Robust Parameter Design and Finite Element Analysis for a Non-pneumatic Tire with Low Vibration[D]. South Carolina:Clemson University,2009.
- [29] William L R. Use of Orthogonal Arrays for Efficient Evaluation of Geometric Designs for Reducing Vibration of a Non-pneumatic Wheel during High-speed Rolling[D]. South Carolina:Clemson University,2009.
- [30] Kwangwon K, Jaehyung J, Kim D M. Static Contact Behaviors of a Non-pneumatic Tire with Hexagonal Lattice Spokes[J]. SAE International Journal of Passenger Cars-Mechanical Systems,2013,6 (3) :1518-1527.
- [31] Rhyne T B, Demino K W, Cron S M. Structurally Supported Resilient Tire[P]. USA:USP 6 769 465,2004-08-03.
- [32] Gasmı A. On the Modeling of Contact Problems for Curved and Straight Elastic Thin Continuum with Application to Non-pneumatic Tires[D]. South Carolina:Clemson University,2011.
- [33] Mallikarjun V, Jaehyung J, Thompson L L, et al. Optimisation of Geometry and Material Properties of a Non-pneumatic Tyre for Reducing Rolling Resistance[J]. International Journal of Vehicle Design,2014,66 (2) :193-216.
- [34] Berglind L A, Jaehyung J. Aluminum Taper Bristle-shaped Shear Band for a Nonpneumatic Tire[J]. Tire Science and Technology,2012,40 (3) :152-170.
- [35] Jaehyung J, Balajee A, David S J, et al. Design of Cellular Shear Bands of a Non-pneumatic Tire: Investigation of Contact Pressure[J]. SAE International Journal of Passenger Cars-Mechanical Systems,2010,3 (1) :598-606.
- [36] Luke B. Design Tool Development for Cellular Structure Synthesis to Achieve Desired Properties[D]. South Carolina:Clemson University,2010.
- [37] Scott Hartford. Non-pneumatic Tire for On-highway and Off-road Mobility[EB/OL]. <https://www.sbir.gov/node/1413851>, 2020-04-30.
- [38] Bert B, Austin C. Life-cycle Environmental Impact of Michelin Tweel Tire for Passenger Vehicles[J]. SAE International Journal of Passenger Cars-Mechanical Systems,2011,4 (1) :32-43.
- [39] Mallikarjun V. Modeling, Finite Element Analysis, and Optimization of Non-pneumatic Tire (NPT) for the Minimization of Rolling Resistance[D]. South Carolina:Clemson University,2011.
- [40] Kwangwon K, Heo H, Uddin M S, et al. Optimization of Non-pneumatic Tire with Hexagonal Lattice Spokes for Reducing Rolling Resistance[J]. SAE Technical Papers,2015,45 (2) :159-168.
- [41] Lu C S, Fan X L, Hou C, et al. Investigation on the Static and Dynamic Behaviors of Non-pneumatic Tires with Honeycomb Spokes[J]. Composite Structures,2018,187 (3) :27-35.
- [42] Aboul-Yazid A M, Emam M A A, Shaaban S, et al. Effect of Spokes Structures on Characteristics Performance of Non-pneumatic Tires[J]. International Journal of Automotive and Mechanical Engineering,2015,11 (1) :2212-2223.
- [43] Walter J D, Conant F S. Energy Losses in Tires[J]. Tire Science and Technology,1974,2 (4) :235-260.
- [44] Thyagaraja B N. Requirements Determination of a Novel Non-pneumatic Wheel Shear Beam for Low Rolling Resistance[D]. South Carolina:Clemson University,2011.
- [45] Sairom Y, Uddin M S, Heo H, et al. Deformation and Heat Generation in a Nonpneumatic Tire with Lattice Spokes[J]. SAE Technical Papers,2015 (1) :1512.
- [46] Jaehyung J, Mallikarjun V, Joshua S D, et al. Rolling Resistance of a Non-pneumatic Tire having a Porous Elastomer Composite Shear Band[J]. Tire Science and Technology,2013,41 (3) :154-173.
- [47] Kranti K M. Computational Method for Solving Spoke Dynamics on High Speed Rolling Tweel™[D]. South Carolina:Clemson University,2008.
- [48] Ramachandran M, Bezzgam S, Thompson L L, et al. On the Effects of Edge Scalloping for Collapsible Spokes in a Non-pneumatic

Wheel during High Speed Rolling[C]. Proceedings of the ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition.

Florida, USA: ASME, 2009: 685-697.

收稿日期: 2020-08-10

Structural Design and Mechanical Properties of Non-pneumatic Tire

LIU Chen, LI Fanzhu, LU Yonglai, ZHANG Liqun

(Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: The advantages of pneumatic tires, such as lower energy loss when rolling on rough pavement, smaller vertical stiffness, smaller contact pressure and high load efficiency, as well as the disadvantages of low non-puncture resistance, low burst resistance and unstable operation are described. The structure and mechanical properties of two typical non-pneumatic tires, namely, spoke-type non-pneumatic tires and honeycomb-type non-pneumatic tires are introduced. Compared with traditional pneumatic tires, not only the vertical stiffness and contact pressure of non-pneumatic tires can be decoupled, but also the vertical stiffness, lateral stiffness and torsional stiffness are no longer strongly coupled, which greatly expands the design space of tires. The performance of non-pneumatic tires can be effectively optimized only by adjusting the structure and geometric parameters of the shear band and spokes. However, non-pneumatic tires also have many problems, making them still in the design and development stage. In the future, the market demand of non-pneumatic tires will continue to expand, and its structure and mechanical properties will continue to improve, making non-pneumatic tires a major category in the tire field.

Key words: non-pneumatic tire; honeycomb-type; spoke-type; structural design; mechanical property

益阳橡胶机数字化云平台项目验收 日前,益阳橡胶塑料机械集团有限公司(简称益阳橡胶机)数字化研发云平台建设项目通过验收。这标志着益阳橡胶机智能型橡胶机械数字化制造基地建设项目中云平台项目正式完成。

据介绍,益阳橡胶机研发云平台作为智能型橡胶机械数字化制造基地项目信息化部分,采用Citrix和VMware技术,将现有的研发设计数据、应用、管理整合到一个统一的云平台,不仅可解决研发设计过程的数据安全管理,同时也为益阳橡胶机运维管理提供了一套业界领先的云管理平台经验,帮助企业实现自动化IT运维。

通过1年的建设,该项目取得两大成果。一是实现了业务管理系统上云,建立虚拟化服务器,所有的应用系统都迁移至虚拟服务器上;通过服务器整合,建立资源池,实现计算资源、存储资源、图形资源动态按需分配,充分发挥硬件资源的使用效率。二是实现了研发设计上云,搭建企业研发虚拟化桌面平台,涵盖技术中心、工艺部等部门所有应用软件和系统,实现设计、工艺工作模式

切换到虚拟化桌面平台,并支持设计、工艺集中统一管理。

(摘自《中国化工报》,2020-12-16)

低密度粘接型阻燃硅橡胶及其制备方法 由唐山三友硅业有限责任公司申请的专利(公布号CN 111534276A,公布日期 2020-08-14)“低密度粘接型阻燃硅橡胶及其制备方法”,涉及的阻燃硅橡胶由A和B组分按质量比1:1混合制得。A组分配方为:端乙烯基硅油 60~80,高粘度端乙烯基硅油 0.1~2,硅微粉 10~30,氢氧化铝 10~50,增粘剂 0.5~20,阻燃剂 0.005~0.5,铂催化剂 $(5\sim40)\times 10^{-6}$,抑制剂 0.01~0.2,稳定剂 0.01~0.2,有机锆 0.1~2。B组分配方为:端乙烯基硅油 20~40,端含氢硅油 1~20,侧链含氢硅油 10~50,甲基硅油 2,硅微粉 40~120,色浆 1。该阻燃硅橡胶具有较好的流动性和力学性能,储存期长,用作有机硅液体灌封材料。

(本刊编辑部 赵敏)