

免充气空心轮胎的设计思路

王明江,马庆丽*

(江苏江昕科技股份有限公司,江苏 邳州 221316)

摘要:介绍免充气空心轮胎的设计思路。结构设计包括空腔结构设计、有限元分析和动力学方法、力学分析结合试验检测方法;配方设计包括无机粒子/橡胶复合材料的补强新机制、改性高分散白炭黑的应用、高性能低生热高导热高分子复合材料等。指出有免充气空心轮胎材料的应用和配比研究还只能使其在中低速车辆上应用,未来将加大在中高速车辆上应用的研发力度。

关键词:免充气空心轮胎;结构设计;配方设计;空腔结构;有限元分析;白炭黑

中图分类号:U463.341

文章编号:1006-8171(2023)06-0328-03

文献标志码:A

DOI:10.12135/j.issn.1006-8171.2023.06.0328

自轮胎发明以来,人们在生产生活中使用的大都是普通充气轮胎,这种轮胎容易漏气、爆胎、不抗枪击,特别是车辆在高速运行时,会因为突然爆胎出现车毁人亡等重大安全事故。国内外多家科研机构和轮胎企业投入了大量的人力、财力、物力,力图解决轮胎的免充气和安全问题^[1-3]。

我公司研发的免充气空心轮胎较好地解决了充气轮胎易漏气、爆胎的安全问题。以下对免充气空心轮胎的设计思路作简要介绍。

1 免充气空心轮胎结构设计

1.1 空腔结构设计

在轮胎内腔设计了由韧带和支撑架形成的由多组空腔组成的结构(见图1)。该结构兼顾了弹



图1 免充气空心轮胎内部结构剖视图

作者简介:王明江(1950—),男,江苏邳州人,江苏江昕科技股份有限公司董事长,教授级工程师,主要从事免充气轮胎研究和企业管理工作。

*通信联系人(1179571352@qq.com)

性好、滚动阻力低与承载能力强、导热快的优点;解决了免充气轮胎结构复杂、制造成本高、生产工艺难度大、设备复杂系数高以及性能不稳定等技术难题,同时也解决了现有非充气轮胎在高速下散热慢及重载变形等技术问题,为高性能免充气轮胎设计提供了新思路。

1.2 有限元分析和动力学方法

用有限元分析和计算流体动力学方法分析免充气空心轮胎的静力学与动力学特征^[4-7]。

按照轮胎几何形态的受力特征,在超弹性复合材料力学理论和空气动力学基本分析基础上进行结构建模,用有限元方法和计算流体动力学方法,分析免充气空心轮胎的静力学与动力学特征,以及高温摩擦环境下的空气动力学特征,形成了一套完整的免充气空心轮胎的力学分析机制,建立了系列化产品数据库,开发了系列化产品数字设计软件与数学模型。

结合低动态生热、耐疲劳、抗撕裂和高导热复合材料,实现了网架结构轻量化和轮胎滞后生热的快速传递;实现了轮胎的免充气、防爆、低滚动阻力、抗湿滑、舒适、节能和良好的越野性能等特点,解决了充气轮胎安全难题。同时,对免充气空心轮胎的温度场、耐磨性能以及轮胎的动态力学性能进行测试和表征。

1.3 力学分析结合试验检测方法

用力学分析与试验检测相结合的方法,在轮

胎内侧设计了热交换结构,使胎体内外的热冷空气自动交换,防止胎体热氧老化。

内外胎一体化设计,运用“XV”型网架式空腔结构,在胎体内形成了环形隧道,胎体设有热交换器,利用空气动力学射流原理设计思想,使胎体内腔和胎体外部的热冷空气随时自动交换,内外气压动态平衡。

2 免充气空心轮胎配方设计

采用低动态生热、耐屈挠、高强度胎体材料和高导热内腔散热材料,使网架结构轻量化和轮胎滞后生热快速传递。胎体橡胶复合材料及内腔散热材料是网架式空心轮胎的主体材料,网架材料的强支撑、受压变形后快速回复能力(低滞后生热)及长期耐屈挠性能直接影响免充气轮胎的性能和寿命。

2.1 无机粒子/橡胶复合材料的增强新机制

轮胎中含有纳米级的炭黑和白炭黑等补强粒子,形成了多层次、多网络的复杂微观网络结构^[8-11]。通过模拟轮胎实际工况,设计了大形变循环剪切场,运用同步辐射X射线三维成像和动态粘弹性测试技术,揭示了橡胶复合材料中补强粒子聚集体的微观结构演变与损耗因子、模量等动态性能的关系机制,发现补强粒子均匀分散的橡胶复合材料在循环力场作用下,粒子间的橡胶分子链会产生取向,使储能模量上升,损耗因子下降,同时若干分子链取向带来的增强效应也显著提高了抗裂纹扩展性能。

2.2 改性高分散白炭黑的应用

基于提出的增强新机制,白炭黑均匀分散的橡胶材料具有低生热和良好抗湿滑性能,但白炭黑粒子因表面羟基间氢键作用极易聚集。硅烷偶联剂液相水解两步法改性白炭黑粒子的新方法解决了这一难题。通过偶联剂预水解分子与白炭黑粒子表面羟基的定向缩合反应,实现白炭黑粒子单分散。特别设计了含巯基的偶联剂,在橡胶高温硫化阶段,巯基与橡胶分子乙烯基通过点击化学加成反应,使白炭黑粒子与橡胶间形成更牢固的化学界面键合,使用改性高分散白炭黑的复合材料动态生热降低45%。

2.3 高性能低生热高导热复合材料

免充气空心轮胎在高速、大负荷的条件下运行生热很大,且产生的热量不易导出,造成热量集聚,从而对轮胎产生热损伤,损害轮胎性能,缩短使用寿命。同时,轮胎的动态力学性能、抗撕裂性能和耐疲劳性能都面临挑战。

对于高速高载免充气空心轮胎,热损伤比普通轮胎更严重,通过大量研究,提出采用石墨烯和多壁碳纳米管(MWCNTs)与高分子材料并用的技术路线,发现三者存在正协同导热作用,可以在保证低生热的情况下,大幅提高橡胶复合材料的热导率,且物理性能良好,达到了低生热、高导热的要求^[12-18]。因为轮胎使用环境复杂,单轮负荷为1~1.5 t,需要较高的抗撕裂和耐疲劳性能,利用白炭黑、氧化石墨烯、碳纳米管与微纤维等功能性助剂在橡胶中的原位改性和均匀分散,从而获得满足胎体性能要求的复合材料。

石墨烯与MWCNTs在橡胶中具有协同作用,通过石墨烯连接MWCNTs(MWCNTs本身作为传导通道),橡胶/石墨烯/MWCNTs三相复合材料中填料分散性大大提高,MWCNTs为石墨烯搭桥促使其均匀分散,增大了基体与填料的接触面,MWCNTs作为电子、应力大尺度的传导,石墨烯作为MWCNTs连接点形成局部传导。与橡胶/石墨烯两相复合材料相比,橡胶/石墨烯/MWCNTs三相复合材料的拉伸强度、弹性模量和撕裂强度分别提高了312%,118%,165%。

免充气空心轮胎三相复合材料示意图2。

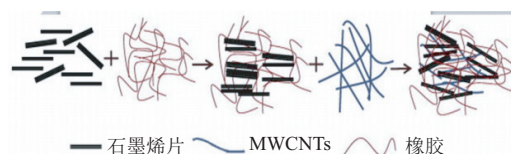


图2 三相复合材料示意

3 结语

我公司从1980年开始展开免充气空心轮胎课题研究,经过多年实践和不断探索,虽然有一定的技术工艺基础,形成了一整套生产工艺和生产装备设计和应用,产品也受到了国内外业内专

家学者的好评和市场的认可,但现有材料的研究还只能使免充气空心轮胎的应用停留在中低速车辆上,目前在行驶速度大于 $100\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 的车辆中的应用还没有完全市场化,未来我们还将将在高层次结构设计与材料的研究和技术方面进一步探索,加大免充气空心轮胎在中高速车辆上应用的研发力度。

参考文献:

- [1] 郝章程,王明江:免充气空心轮胎的40年情怀[J]. 中国橡胶,2019,35(5):39-43.
- [2] 于清溪. 驱动创新发展,助推实施新型轮胎产业——再论轮胎工业现状与未来(下)[J]. 橡塑技术与装备,2017,43(15):7-12.
- [3] 王文峰. 免充气轮胎有限元仿真与优化设计[D]. 青岛:青岛科技大学,2019.
- [4] 孟照宏,史彩霞,翟明荣. 轮胎转向残余回正力矩的有限元分析及关键影响因素研究[J]. 橡胶工业,2021,68(11):822-826.
- [5] 周海超,李慧云,夏琦,等. 辐条式免充气轮胎的减振分析[J]. 橡胶工业,2022,69(2):91-96.
- [6] 王国林,祁劭,梁晨,等. 轮胎充气压力损失仿真方法及其影响因素研究[J]. 橡胶工业,2021,68(10):729-734.
- [7] 蒋红敏. 轮胎声振模态测试与不同噪声源对低频段影响范围研究[D]. 青岛:青岛理工大学,2021.
- [8] 姜海燕,程晓奕. 轮胎用白炭黑的环保改性研究进展[J]. 广东化工,2021,48(17):72-74.
- [9] 徐召来,刘震,孔祥朋,等. 炭黑和白炭黑填充硫化胶的湿摩擦差异性分析[J]. 轮胎工业,2021,41(9):548-552.
- [10] 关新欣. 改性白炭黑填充橡胶复合材料性能及温度相关性本构关系研究[D]. 青岛:青岛科技大学,2021.
- [11] 朱东林,边慧光,汪传生,等. 湿法混炼雾化干燥技术增大全钢载重子午线轮胎胎面胶白炭黑用量的研究[J]. 橡胶工业,2021,68(3):208-211.
- [12] 蔡飞. BIIR、XNBR和SBR/石墨烯复合材料界面结构对其导热和介电性能的影响:实验和分子模拟[D]. 北京:北京化工大学,2021.
- [13] 王雅菲. 橡胶基复合材料导热性能的计算机模拟研究[D]. 北京:北京化工大学,2021.
- [14] 戚桂村,韩朋,王湘,等. 基于碳纳米管包覆超细全硫化丁腈粉末橡胶制备抗静电聚氯乙烯复合材料的研究[J]. 塑料科技,2021,49(12):13-16.
- [15] 刘影. 离子液体改性碳纳米管对丁腈橡胶纳米复合材料性能的影响[D]. 青岛:青岛科技大学,2021.
- [16] 杨前勇,郭新,瞿金磊,等. 单壁碳纳米管/丁基橡胶复合材料的性能研究[J]. 橡胶工业,2020,67(11):833-838.
- [17] 马连湘,王一雯,张庆玲,等. 炭黑/多壁碳纳米管/天然橡胶复合材料密炼工艺参数的优化[J]. 橡胶工业,2020,67(10):777-780.
- [18] 刘力,许宗超,温世鹏. 二维片层材料在轮胎橡胶复合材料中的应用[J]. 轮胎工业,2021,41(3):176-184.

收稿日期:2023-01-18

Design of Non-pneumatic Hollow Tire

WANG Mingjiang, MA Qingli

(Jiangsu Risingsun Tyre Co., Ltd, Pizhou 221316, China)

Abstract: The design of non-pneumatic hollow tires was introduced. The structure design included cavity structure design, finite element analysis, dynamic analysis method, mechanical analysis and tests. The formula design included the new reinforcement mechanism of inorganic particles/rubber composites, the application of modified highly dispersible silica, and high performance polymer composites with low heat build-up and high thermal conductivity. It was pointed out that based on the progress of application and formula research, the non-pneumatic hollow tires could only be applied on medium and low speed vehicles up to now. In the future, the research and development of applications on medium and high-speed vehicles would be strengthened.

Key words: non-pneumatic hollow tire; structural design; formula design; cavity structure; finite element analysis; silica