

综述·专论

轮胎全生命周期碳中和技术的发展

李翠平¹, 张新军^{2*}, 李鹏²

(1. 中国船级社质量认证有限公司, 北京 100006; 2. 北京橡胶工业研究设计院有限公司, 北京 100143)

摘要: 介绍在轮胎全生命周期中碳中和技术的发展。具体概述轮胎企业在合成橡胶、填料、可持续和可回收材料及废弃轮胎再生材料等原材料的选择和利用, 低滚动阻力和高抗湿滑性能胎面胶配方、自修复材料配方及可降解材料应用配方的设计, 轮胎结构设计的优化, 轮胎生产过程的节能降耗等方面可采取的碳中和技术措施, 并提出建议。

关键词: 轮胎; 全生命周期; 碳中和; 节能减排

中图分类号: TQ336.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-890X(2024)01-0075-05

DOI: 10.12136/j.issn.1000-890X.2024.01.0075



OSID开放科学标识码
(扫码与作者交流)

碳中和是指通过节能减排等形式抵消企业和产品等在一定时间内直接或间接产生的二氧化碳或温室气体排放总量以达到相对零排放。碳中和轮胎是指使用绿色能源或可持续原材料来抵消轮胎生产过程中产生的任何排放。碳中和概念提出后, 低碳和绿色成为各轮胎企业的研发方向和竞争重心。轮胎行业头部企业正在从轮胎全生命周期入手, 努力向碳中和靠拢。2020年11月米其林公司宣布了减排与碳中和生产的实施计划, 并研发出世界第一条碳中和轮胎e. PRIMACY。我国多家轮胎行业头部企业在生产工艺、产品研发、废旧轮胎翻新等领域也在践行节能减排责任, 为行业做出了表率^[1]。

我国提出2030年前实现碳达峰, 2060年前实现碳中和, 到2060年我国非化石能耗占比将达到80%, 国家“双碳”目标指引企业未来发展规划。欧美国家从碳达峰到碳中和历经约80年, 而我国实现碳中和的时间只余约30年, 窗口期非常短, 这就要求各企业在能源结构调整、可再生材料使用、工艺减碳、产业结构升级等方面采取更有力的措施。

轮胎在生产阶段消耗大量橡胶、填料、助剂和

电力等资源, 使用阶段消耗大量燃油, 报废后成为难以降解的黑色固体废弃物。在倡导低碳发展、推进资源化利用的今天, 轮胎产业引发的环境问题引起了广泛的关注, 因此开展轮胎全生命周期对环境影响的研究, 评估轮胎产品碳足迹, 有助于轮胎产业低碳发展。产品碳足迹主要指产品系统全生命周期直接和间接产生的温室气体排放总量。产品全生命周期评价方法可以对产品从最初的原材料采购到最终废弃处理进行全过程的跟踪, 并分析产品碳足迹。轮胎全生命周期碳足迹研究范围包括轮胎生产阶段(包括资源开采、原材料生产、半成品部件生产和轮胎生产)、运输阶段(从轮胎生产地点到轮胎销售和使用地点)、使用阶段和废弃物处理处置阶段4个主要阶段的碳足迹^[2]。

轮胎企业是轮胎全生命周期中的一部分, 涉及轮胎原材料选择、采购和轮胎设计、生产、销售。轮胎生产阶段的能耗占比并不是最大, 而是轮胎使用阶段的碳足迹贡献最大, 但是轮胎设计决定了其所需原材料、使用能耗、废弃物处理方式和可回收比例等, 是轮胎全生命周期中碳中和的核心。

作者简介: 李翠平(1981—), 女, 河北唐山人, 中国船级社质量认证有限公司助理工程师, 硕士, 主要从事绿色低碳技术研究工作。

***通信联系人:** (zhangxj1224@126.com)

引用本文: 李翠平, 张新军, 李鹏. 轮胎全生命周期碳中和技术的发展[J]. 橡胶工业, 2024, 71(1): 75-79.

Citation: LI Cuiping, ZHANG Xinjun, LI Peng. Development of carbon-neutral technology for whole life cycle of tire[J]. China Rubber Industry, 2024, 71(1): 75-79.

本文从轮胎原材料选择、产品设计、生产过程节能降耗、废弃轮胎回收再生等方面探讨轮胎全生命周期碳中和技术的发展。

1 轮胎原材料的选择

轮胎生产的原材料主要是橡胶和填料,其次是作为骨架材料的钢丝帘线和纤维帘线,最后是防老剂、硫化剂、增塑剂和活性剂等橡胶助剂。研究^[3]表明,轮胎生产阶段中原材料生产和轮胎加工过程的碳足迹贡献分别为81%和19%,原材料生产中合成橡胶生产的碳足迹贡献为27%,其次为炭黑生产的碳足迹贡献(23%)和钢丝帘线生产的碳足迹贡献(18%),其他原材料生产的碳足迹贡献为13%。

轮胎企业是橡胶产品最大的用户,其橡胶消费量占比可达到70%左右。轮胎企业对原材料的选择是有方向性的,对原材料行业的发展具有重大影响。

1.1 合成橡胶

合成橡胶生产需要大量的化石资源,而化石资源是不可持续的。轮胎企业应在合成橡胶采购中优选单体转化率高的产品,即轮胎企业通过有倾向性的选择,倒推合成橡胶企业技术升级,促进合成橡胶行业提效降耗。以乳聚丁苯橡胶为例,不同企业乳聚丁苯橡胶生产的单体转化率差异巨大,从60%至75%,高的单体转化率可以明显提高合成橡胶的生产效率,降低生产能耗。

选择可降解橡胶材料以降低废弃轮胎处理能耗也是一个重要的方向。目前已经有多家轮胎企业与高校进行了相关课题的联合研发,如北京化工大学先进弹性体材料研究中心牵头完成的生物基可降解聚酯橡胶材料已经通过了中国石油和化学工业联合会组织的科技成果鉴定^[4]。

1.2 白炭黑

轮胎补强填料已经从全炭黑逐渐过渡到以白炭黑为主。白炭黑生产不需要炭黑生产所需的油和气,并且白炭黑作为填料可以降低轮胎滚动阻力及在使用过程中燃油消耗。但是,白炭黑替代炭黑作为填料时,为了提高白炭黑分散性,胶料混炼时间延长,甚至混炼段数都有所增加,既降低了生产效率,又增大了生产能耗。采用预改性白炭黑混炼胶,最好是湿法混炼白炭黑胶料,可以较好

地解决以上问题。目前预改性沉淀法白炭黑混炼胶的研究较多,但是大多仅限于实验室研究,其经济性和技术性均较差,且其尚不具备工业生产的可能。白炭黑湿法混炼工艺研究也较多,目前怡维怡橡胶研究院有限公司开发的白炭黑湿法混炼液体黄金橡胶已在轮胎企业得到应用。因此,轮胎企业应该与原材料生产企业加强合作,开展相关研究,开发可工业化的性能优异的白炭黑湿法混炼橡胶。

1.3 可持续和可回收材料

可持续材料主要来自植物基材料,包括蒲公英橡胶、稻壳灰生产的白炭黑、植物油和植物树脂等。

北京化工大学与山东玲珑轮胎股份有限公司联合开展了蒲公英橡胶轮胎的应用研究,韩泰轮胎公司等也进行了同类轮胎的试制与应用研究。普利司通公司、大陆集团和倍耐力公司等进行了银菊胶在轮胎中的应用研究。用稻壳灰生产的白炭黑在橡胶制品中也得到了应用。木质素作为可持续材料也被作为填料和氧化锌分散剂等得到了大量的应用研究。

1.4 废弃轮胎再生材料

废旧轮胎的处理主要以机械破碎方式回收轮胎中的纤维帘线和钢丝,并利用废弃轮胎制取再生橡胶。废旧轮胎的回收利用可以大量节约和补充橡胶、钢材和石油等资源。废旧轮胎资源化再利用产生的环境收益在轮胎全生命周期中可贡献-3.2%的碳足迹^[3]。合理的废旧轮胎资源化再利用方式可以适度减小轮胎全生命周期碳足迹。因此,应推动废弃轮胎的回收再生及其再生材料的使用。

目前,我国废旧轮胎的再利用方式主要集中在再生橡胶生产、轮胎翻新和热裂解方面,其中用于再生橡胶生产的废旧轮胎占70%,其他回收利用方式还没有形成较大的规模。废旧载重轮胎主要采用生产再生橡胶方式再利用,轮胎再生橡胶在某些力车胎中可较大量地使用。废旧半钢子午线轮胎主要采用热裂解方式再利用,轮胎热裂解产物主要是油、钢丝、热裂解炭黑及可燃气体,轮胎裂解产物价格低廉,因此轮胎热裂解方式经济性不佳。随着相关研究的开展,目前热裂解炭黑改性技术取得了长足的进步,热裂解炭黑可以部

分替代炉黑使用^[5-6],例如山东耐斯特炭黑有限公司在轮胎胎面胶中使用部分热裂解炭黑替代高耐磨炉黑,取得良好使用效果;青岛双星环保设备有限公司将热裂解炭黑还原产物经过超细研磨、活化改性、造粒等工艺制成高品质热解炭黑,用其替代工业炭黑或与工业炭黑搭配用于轮胎补强。此外,美国Pyrolyx公司从北美地区的废弃轮胎中回收炭黑;瑞典回收炭黑生产商Enviro Systems公司与我国的万力轮胎股份有限公司在华南地区建立了一家回收炭黑工厂。

轮胎企业对热裂解炭黑的应用极大地推动了废弃轮胎的再生利用。

轮胎企业对填料的选用越来越具有多样性,这对废弃轮胎的热裂解再生造成了一定的困难。如果轮胎生产时在轮胎上添加纯炭黑或高用量白炭黑等填料体系的标识,更有利于废旧轮胎的回收利用。

应指出的是,轮胎翻新在国际上被认为是节约橡胶原材料、减少废旧轮胎“黑色污染”的最有效途径。翻新质量较好的轮胎使用寿命甚至能够接近或长于新轮胎,且翻新一条轮胎的橡胶消耗量仅为新轮胎的20%左右,经济效益十分显著,尤其是工程机械轮胎,其损坏多为胎面脱层和崩花掉块等,而轮胎胎体还有较大的继续使用价值^[7]。但是目前国内用于翻新的轮胎占比较小,轮胎翻新技术仍有待提高。

2 轮胎设计

轮胎使用阶段产生的碳足迹主要来源于汽车行驶过程中驱动轮胎转动产生的能耗。轮胎使用阶段是轮胎全生命周期中最重要的阶段,贡献了80%的碳足迹^[2]。轮胎使用阶段的能耗与轮胎滚动阻力直接相关,其主要受到路面状况、汽车行驶速度以及轮胎结构、气压、负荷等因素的影响。轮胎滚动阻力主要与轮胎设计相关,如优化配方设计可以降低轮胎滚动阻力,优化结构设计可以减小轮胎质量,白炭黑的使用可以更明显地降低轮胎滚动阻力。因此好的轮胎设计可以降低轮胎使用阶段的能耗,进而减小该阶段的碳足迹。

2.1 配方设计

轮胎配方设计对碳中和的贡献主要有以下几

个方面。

(1) 低滚动阻力和高抗湿滑性能的绿色轮胎胎面胶配方设计。目前轮胎行业根据市场需求,产品向绿色环保方向发展,要求胎面胶具有高抗湿滑性能和低滚动阻力。尤其是随着电动汽车的发展,对胎面胶的低滚动阻力、高抓着力和高抗湿滑性能的要求越来越高。胎面胶配方设计一是使用高填充量的白炭黑作为填料,二是加入抗湿滑树脂,在保证胎面胶低滚动阻力的前提下,进一步提高其抗湿滑性能与干路面抓着力。

(2) 自修复材料配方设计。通过在轮胎中设置独特的自修复材料,使轮胎胎面在被尖锐物刺穿时可自动修复而不损失轮胎充气压力。自修复轮胎具有安全性好、行驶里程长和燃油效率高等优点,并且不会牺牲轮胎舒适性。自修复轮胎是利用吸水性聚合物的溶胀压力防止漏气,自修复材料中胶粘剂与吸水性聚合物的比例是关键。目前大陆集团、韩泰轮胎公司和米其林公司等均有自修复轮胎产品面世。配置自修复轮胎的汽车无需携带备胎,可以降低汽车油耗,并且一般的刺扎问题基本不影响轮胎使用寿命,这可减少轮胎更换,有效降低物料和能源损耗。

(3) 可降解合成橡胶材料应用配方设计。2008年,张立群教授在马来西亚国际橡胶会议上首次提出了“生物基工程弹性体”的概念,随后其团队研发成功一种生物基可降解的聚酯橡胶材料,并用其制造了可降解轮胎。可降解轮胎既可以在土壤环境中生物降解,也可以将通过醇解方法使回收的原材料再聚合,重新用于制造轮胎。整个过程极大地降低了废弃轮胎处理能耗,并提高了废弃轮胎再回收利用比例^[8]。

新的材料需要全新的应用配方设计,需要配方人员通过优化调整得到轮胎需要的胶料配方。

此外,某些新型的轮胎如聚氨酯轮胎通过配方设计,可以提高其耐温性能和耐水解性能,使其具有实际应用价值。

2.2 结构设计

通过轮胎结构设计,可以达到减小轮胎质量的效果,从而减少生产用材料和降低能耗。

轮胎采用更高强度的骨架帘线可以降低其骨架帘线规格,减小轮胎部件厚度,进而减小轮胎质

量,目前高强度帘线在胎体和带束层部位均有应用。此外,利用高强度和高模量纤维帘线替代钢丝帘线可以大幅度减小轮胎骨架材料质量,并使轮胎获得良好的耐疲劳性能^[9]。

2007年,普利司通公司采用埃克森美孚化工公司开发的新型合成特种弹性体/尼龙合金(DVA)膜材替代传统的溴化丁基橡胶胶料用于轮胎气密层。国内北京橡胶工业研究设计院有限公司和北京化工大学等也进行了相关研究,其中北京橡胶工业研究设计院有限公司研制的热塑性动态硫化橡胶(TPV)膜材在山东玲珑轮胎股份有限公司成功进行了轮胎试制。该类膜材气密层可以提供比传统溴化丁基橡胶气密层更好的气密性,并使轮胎质量减小约6%^[10]。

轮胎其他部位如胎面、胎侧也可以在满足性能要求的前提下通过结构设计进行减薄处理,以达到减小轮胎质量的效果。

3 轮胎生产过程的节能降耗

3.1 空气净化材料无害处理后的再利用

在环保要求下,目前国内各轮胎企业均配备了环保除尘装置和空气净化装置,装置多采用活性炭吸附方式。哈尔滨工业大学采用新型吸附理念,使用高极性、高吸附性的无机物进行粉体和有害气体的吸附,该无机物在中策橡胶集团有限公司等轮胎企业进行了应用,取得了良好的效果。另外,使用后更换下来的无机物通过无害处理后,由于其表面吸附的有机物有改性作用,其与橡胶基体具有良好的相容性,在橡胶基体中分散良好,具有中等补强性能,可以作为填料进行再利用。

3.2 硫化过热水热能的再利用

轮胎硫化工序消耗大量的能源,其能耗占全部生产流程能耗的50%以上。通过合理的工艺设计,可以降低生产能耗,产生较好的经济效益和社会效益。另外,轮胎企业蒸汽的余热利用具备可行性和广阔空间。

徐州徐轮橡胶有限公司采用新的轮胎节能硫化工艺^[11],在硫化过程中减少了大量外压饱和蒸汽和内压过热水的能源消耗,经济效益显著。

风神轮胎股份有限公司分别在夏季和冬季增设温水型余热制冷机和将表冷器改造为冷热双用

换热器^[12],构成半成品车间恒温系统,高效地回收利用轮胎制造过程中所产生的高品质余热资源,降低了生产成本。

贵州轮胎股份有限公司利用压差余热发电、增加反渗透除盐系统、硫化机由蒸锅式加热改为热板式、回收利用硫化废热水等措施^[13],有效地提高了热能利用效率,使得综合能耗降低15%以上。

中国平煤神马能源化工集团橡胶轮胎有限责任公司采用活性炭吸附轮胎硫化热水中的油分并采用石英砂过滤而去除胶沫、炭黑、铁锈等杂质^[14],使硫化废热水水质达到了锅炉用水标准,降低了硫化废热水排污率,节约了大量水和能源。

轮胎企业对过热水的回收利用已较为到位,而过热水的其他用途还有冬季取暖、职工洗浴用水加热等。但轮胎企业过热水的再利用仍有提升空间,如改性白炭黑和低锌氧化锌造粒时均可利用过热水进行干燥处理。

3.3 硫化氮气的回收利用

贵州轮胎股份有限公司制氮系统实现氮气硫化清洁生产以及氮气有效回收利用,取得了良好的经济效益和社会效益,消除了氮气回收后直接排空产生的异味,硫化现场环境显著改善。

四川轮胎橡胶(集团)股份有限公司开发了一种轮胎硫化氮气回收装置^[15],其氮气回收率高,能节能降耗、降低生产成本、提高经济效益。

3.4 其他措施

轮胎企业厂区内各种运输工具尽量采用新能源车辆。

轮胎企业厂房房顶一般较为平坦,可以在房顶上大面积铺设光伏发电板,可作为常规电能源的有效补充,也可以将光伏电进行存储以作备用能源。

通过专业设计提高轮胎厂区绿化面积也是碳中和举措的一部分。

4 结语

轮胎企业是轮胎全生命周期碳中和的核心与关键。轮胎企业通过轮胎原材料选择、轮胎配方和结构设计、轮胎生产工艺设置等确定轮胎原材料种类和用量、轮胎生产能耗、轮胎使用能耗以及废旧轮胎回收利用处理方式和可回收比例等。轮

胎企业需要进一步提升技术和管理水平,使我国早日实现碳中和及碳达峰的目标。

参考文献:

- [1] 武新苗.“双碳”目标下的汽车业:加速拥抱“碳中和”全产业链脱碳成关键[N].中国能源报,2021-08-02.
- [2] 黄菊文,李光明,贺文智,等.轮胎生命周期的能量分析[J].汽车工程,2012,34(3):277-281.
HUANG J W, LI G M, HE W Z, et al. Energy analysis of tire life cycle[J]. Automotive Engineering, 2012, 34(3): 277-281.
- [3] 杨东,刘晶茹,杨建新,等.乘用车子午线轮胎碳足迹分析[C].2014中国可持续发展论坛论文集.北京:中国可持续发展研究会,2014:110-114.
- [4] 王润国,孙超英,安晓鹏,等.生物基弹性体的研究进展[J].橡胶工业,2023,70(9):675-685.
WANG R G, SUN C Y, AN X P, et al. Research progress of bio-based elastomers[J]. China Rubber Industry, 2023, 70(9): 675-685.
- [5] 徐宗平,郭庆民.废轮胎热解回收中的废气综合利用[J].再生资源与循环经济,2017,10(4):34-37.
XU Z P, GUO Q M. The multipurpose utilization of waste gas in waste tire pyrolysis recycling[J]. Recycling Research, 2017, 10(4): 34-37.
- [6] 权家薇,于佳雪,许君清,等.废轮胎的资源化回收利用[J].上海节能,2019(4):262-270.
QUAN J W, YU J X, XU J Q, et al. Resources recovery and utilization of scrap tires[J]. Shanghai Energy Conservation, 2019(4): 262-270.
- [7] 王强,齐晓杰,王云龙,等.基于生命周期理论的工程翻新轮胎经济性模型及评价[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2019,38(5):118-122.
WANG Q, QI X J, WANG Y L, et al. Economic model and evaluation of engineering retread tires based on life cycle theory[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Sciences), 2019, 38(5): 118-122.
- [8] 雷巍巍,王润国,宋啸宇,等.新型衣康酸酯生物基工程弹性体的合成与性能研究[C].全国高分子学术论文报告会论文集.上海:中国化学会高分子学科委员会,2013:692.
- [9] 李汉堂.轮胎轻量化技术研究进展[J].中国橡胶,2006,22(23):31-35.
LI H T. Technical research progress of lightweight tire[J]. China Rubber, 2006, 22(23): 31-35.
- [10] 王清才,周志峰,赵天琪,等.聚酰胺/溴化丁基橡胶动态硫化热塑性弹性体研究进展[J].橡胶工业,2017,64(4):249-252.
WANG Q C, ZHOU Z F, ZHAO T Q, et al. Development of studies on polyamide/brominated butyl rubber dynamic vulcanized thermoplastic elastomer[J]. China Rubber Industry, 2017, 64(4): 249-252.
- [11] 张耀,陈忠强,窦海征,等.轮胎节能硫化工艺研究[J].轮胎工业,2019,39(4):239-241.
ZHANG Y, CHEN Z Q, DOU H Z, et al. Study on tire energy-saving curing process[J]. Tire Industry, 2019, 39(4): 239-241.
- [12] 李鹏,赵兰春,李靖.轮胎制造行业余热的回收利用[J].轮胎工业,2016,36(1):54-58.
LI P, ZHAO L C, LI J. Recycling of waste heat in tire industry[J]. Tire Industry, 2016, 36(1): 54-58.
- [13] 陈波.轮胎硫化蒸汽供热系统节能优化[J].轮胎工业,2011,31(9):564-566.
CHEN B. Energy efficiency optimization of steam heat system in tire curing[J]. Tire Industry, 2011, 31(9): 564-566.
- [14] 王志杰,田公臣,李彦方.轮胎硫化废热水再利用的新途径[J].橡胶科技市场,2010,8(3):20-21.
WANG Z J, TIAN G C, LI Y F. A new way of waste heat water utilization in tire curing[J]. China Rubber Science and Technology Market, 2010, 8(3): 20-21.
- [15] 张俊伟,汪彬,许波,等.轮胎生产氮气硫化回收装置[P].中国:CN 214790466U,2021-11-19.

收稿日期:2023-11-06

Development of Carbon-neutral Technology for Whole Life Cycle of Tire

LI Cuiping¹, ZHANG Xinjun², LI Peng²

(1. China Classification Society Certification Co., Ltd, Beijing 100006, China; 2. Beijing Rubber Industry Research and Design Institute Co., Ltd, Beijing 100143, China)

Abstract: The development of carbon-neutral technology for the whole life cycle of tire was introduced. Possible carbon-neutral technical measures and suggestions by tire enterprises in the selection and utilization of raw materials such as synthetic rubber, fillers, sustainable and recyclable materials and recycled materials from waste tire, design of low rolling resistance and high wet slip resistance tread compound formulas, self-healing material formulas and biodegradable material application formulas, optimization of tire structure design, energy conservation and consumption reduction in tire production process were specifically outlined.

Key words: tire; whole life cycle; carbon-neutrality; energy conservation and emission reduction