

轮胎全生命周期中碳中和技术的发展研究

秦增辉，徐兴国，姜朝，孙术敏，桑明强，李超民

(山东万达宝通轮胎有限公司，山东 东营 257500)

摘要：随着全球变暖加剧，我国大力推行碳中和技术，在此背景下，轮胎行业作为碳排放的重要领域之一，研究碳中和技术的发展对轮胎行业提高市场竞争力、实现可持续发展至关重要。本文提出碳中和下轮胎全生命周期概念，详细分析轮胎在原材料获取、生产阶段、轮胎分销使用阶段及轮胎回收利用处理阶段的碳排放情况，为深入探讨在碳中和背景下轮胎企业如何应用全生命理论制定减少轮胎碳排放策略奠定基础，为轮胎行业实现碳中和目标提供帮助，为当前轮胎制造企业的持续高质量发展寻找新的途径。

关键词：全生命周期；轮胎；碳中和；节能减排

中图分类号：TQ330.9

文献标识码：B

文章编号：1009-797X(2025)10-0005-04

DOI:10.13520/j.cnki.rpte.2025.10.002

0 引言

随着全球工业化进程加速发展，气候变化问题日益严峻，影响人类生存环境。“碳中和”是应对全球气候变化的重要举措，大部分行业积极探索实现碳中和的有效路径。轮胎是汽车、电动车等交通工具的关键部件，随着汽车数量持续增长，轮胎生产规模不断扩大，这使轮胎企业碳排放问题凸出^[1]。

轮胎从原材料获取到生产、使用阶段再到回收利用处理阶段均伴随着一定程度的碳排放，轮胎的全生命周期对环境产生着一定的影响。当前环保法规、市场竞争等对轮胎行业生产提出更加严格的要求，具备低碳、环保特点的轮胎工具竞争优势。所以研究轮胎全生命周期中的碳中和技术对轮胎企业发展，环境保护均有重要意义，研究碳中和技术是轮胎行业响应全球碳中和号召的重要举措，也是提升企业竞争力，进行环境保护的必然选择。分析轮胎全生命周期的碳排放情况探索有效的碳中和技术可以推动轮胎行业可持续发展，为轮胎企业在激烈的市场环境下实现转型升级提供机遇。

1 碳中和下轮胎全生命周期概念的提出

从2020年11月开始，轮胎生产巨头米其林宣布正式开始碳中和生产计划，并研发出了e.Primacy型号的轮胎，这是第一条实现碳中和目标的轮胎。在激烈的市场竞争下，我国各大轮胎生产企业都加入了

碳中和轮胎的研究和生产中，共同践行碳中和下全生命周期理念和可持续发展战略^[2]。而轮胎从生产到废弃是一个漫长的过程，这一过程也被定义在轮胎的全生命周期，主要分为四个阶段，分别为原材料获取、轮胎生产、分销使用阶段、回收利用阶段，如图1所示。而这一过程均要适应当前碳中和战略目标的实施。为此，轮胎生产制造企业应该选择适合的原材料，加强轮胎的优化设计，大力推进轮胎的绿色生产。轮胎的使用环节则是能耗最高的环节，也是碳足迹贡献最显著的环节，要改变这一现状必须从轮胎的生产制造入手，通过优化轮胎的设计，直接降低轮胎的使用能耗，加强废料的处理，从而实现轮胎生产制造的良性循环，并确保碳中和目标的实现。

2 轮胎碳排放分析及计算

了解轮胎全生命周期碳排放是轮胎企业制定有效减排策略的前提。在轮胎的全生命周期中，每个阶段的碳排放量存在一定差异，应了解轮胎生产每个阶段进行的碳排放情况，为轮胎企业制定有效的减排策略奠定基础。

作者简介：秦增辉（1987-），男，本科，中级工程师，技术主管，主要从事轮胎原材料、成品检测及轮胎结构设计、公体系认证等相关工作，曾多次荣获“东营市五一劳动奖章”、“东营市劳动模范”、“垦利金牌工匠”等荣誉称号。

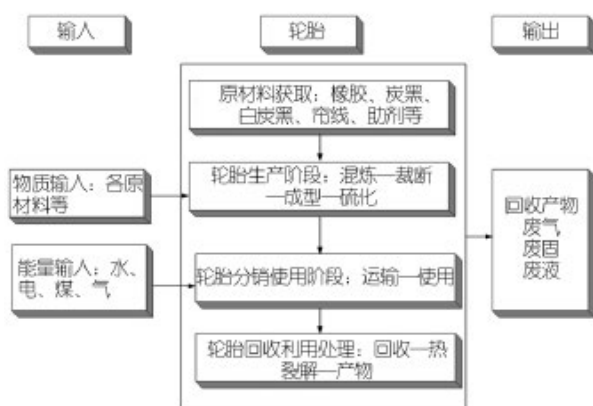


图1 轮胎全生命周期

2.1 原材料阶段

在轮胎企业制造生产过程中，橡胶是轮胎生产的基础性原材料，对轮胎性能起着决定性作用。当前，轮胎工业广泛应用的橡胶主要有五大类，即天然橡胶、丁苯橡胶、丁二烯橡胶、异戊橡胶及丁基橡胶。

2.1.1 橡胶

未经补强处理的橡胶机械性能欠佳，难以满足轮胎高强度的使用要求，无法支撑起轮胎复杂的力学结构，故轮胎制造过程中的橡胶补强环节至关重要。

2.1.2 炭黑

回顾轮胎制造历史，炭黑作为补强剂被广泛用于轮胎生产，其在橡胶工业中的用量仅次于橡胶，是轮胎生产的第二大关键原材料，可以有效提升轮胎的强度。

2.1.3 白炭黑

白炭黑是橡胶工业新兴的重要补强剂，具有良好的补强性能，但在橡胶制品领域应用起步相对较晚，但白炭黑的制备工艺与炭黑不同，在制备过程中无需依赖石油资源，在全球石油资源紧张背景下为轮胎制作可持续发展提供了新路径。白炭黑具备良好的减阻特性，可以降低胶料滞后损失，进而减小轮胎滚动阻力，同时保障轮胎的抗湿滑性能，这与我国所倡导的绿色轮胎发展理念相契合。

白炭黑得益于良好的物理和化学性质在轮胎胶料中的应用比例越来越高，当前在性能要求较高的轮胎的胎面胶配方体系中，白炭黑已逐渐取代炭黑，成为轮胎生产的主导性补强剂，革新轮胎补强技术，未来白炭黑应用前景将更为广阔。

2.1.4 轮胎原材料的碳排放情况

为直观呈现轮胎原材料与碳排放的关联，以常见

规格的215/45R17轮胎为例进行分析，该规格的轮胎全胎质量为10.4 kg，1条轮胎生产所需原材料的用量详见表1。

表1 生产1条轮胎所需的原材料用量

序号	原材料	用量/kg
1	合成橡胶	2.847
2	天然橡胶	1.184
3	补强剂	2.724
4	钢丝帘线和纤维帘线	2.881
5	助剂	0.764

根据轮胎生产各原材料的碳排放系数，根据材料的用量、质量占比及碳排放系数计算碳排放量，一条轮胎生产原材料所需的碳排放量为32.652 kg CO₂-eq，详见表2。

表2 一条轮胎生产原材料所需的碳排放量

原材料	用量/kg	质量占比/%	碳排放系数/kg CO ₂ -eq·kg ⁻¹	碳排放量/kg CO ₂ -eq
合成橡胶				
丁苯橡胶	2.116	20.35	2.49	5.289
非丁苯橡胶	0.725	7.01	2.49	1.823
天然橡胶	1.183	11.37	0.11	0.129
炭黑	1.739	16.72	3.32	5.783
白炭黑	0.983	9.44	0.07	0.068
纤维帘线	1.191	11.43	4.69	5.602
钢丝帘线	1.686	16.43	6.41	10.835
其他	0.763	7.25	4.09	3.123
总计	10.386	100		32.652

2.2 生产阶段

轮胎外表是一个壳体，由胎圈、缓冲层、胎面、密布层、胎冠、胎肩、胎侧组成（见图2），其生产过程较为复杂，包括胶料混料、压延和裁断、胎胚成型、胎胚硫化、轮胎检测等多个工序，轮胎生产阶段主要依赖于电力设备，能源消耗以电能为主，以轮胎的胶料混炼生产为主，所用到的设备包括切胶机、皮带输送机、密炼机及胶片冷却装置等，其中耗电量最高的为密炼机，耗电量约为0.321 3 kW·h，耗电量最小的设备为皮带输送机，耗电量约为0.005 3 kW·h。

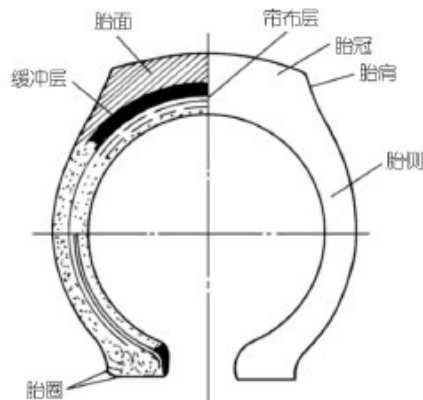


图2 轮胎主要结构

轮胎具体生产步骤包括原材料准备及密炼、压延、裁断及挤出、成型、硫化、检测。每个生产步骤所产生的碳排放存在一定差异，详见具体分析如下：

2.2.1 材料准备及密炼

轮胎原材料准备包括烘胶、切胶、配胶、筛选等过程，原材料密炼需要将生胶与配合剂混炼，经密炼得到混炼胶经压片，后续存放备用，此阶段碳排放量约为 $0.407 \text{ kg CO}_2\text{-eq}$ 。

2.2.2 压延、裁断及挤出

压延、裁断及挤出指将胶料压延成一定形状的胶片，裁断成符合要求的形状和尺寸，最后通过设备将胶料挤出成胎面、胎侧、内衬层等部件。此阶段碳排放量约为 $0.772 \text{ kg CO}_2\text{-eq}$ 。

2.2.3 成型

使用成型器将半成品胎胚进行组装和成型，此阶段碳排放量约为 $0.297 \text{ kg CO}_2\text{-eq}$ 。

2.2.4 硫化

将生胎送入钢制硫化模具中进行加热加压硫化处理，在硫化过程中会出现大量蒸汽，碳排放量约为 $0.289 \text{ kg CO}_2\text{-eq}$ 。

2.2.5 检测

对硫化轮胎进行动态平衡、均匀性检测，检测合格后才可入库。

2.3 分销与使用阶段

轮胎运输一般采用公路运输，当轮胎在运输时，会产生一定的碳排放，源于运输车辆的燃油消耗，运输距离为 500 km ，碳排放量约为 $0.996\sim 0.289 \text{ kg CO}_2\text{-eq}$ 。使用过程中，轮胎 $2.925 \text{ l kg CO}_2\text{-eq}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时碳排放量为 $700.345 \text{ kg CO}_2\text{-eq}$ 。

2.4 回收利用阶段

轮胎磨损后进入回收利用阶段，需要将轮胎进行热裂解，分解成为炭黑、白炭黑、氧化锌等，在此过程中可能产生碳排放量为 $-30.278 \text{ kg CO}_2\text{-eq}$ 。

综上，在轮胎全生命周期中，碳排放量最高的为原材料阶段与分销、使用阶段，应通过优化轮胎原材料选择、轮胎的设计、生产过程的节能降耗，以此降低轮胎使用过程中的碳排放量。

3 碳中和背景下轮胎生产制造企业全生命周期理论应用策略

3.1 轮胎原材料的选择与优化

原材料选择与优化可以有效降低轮胎的碳排放量，本文表 1 显示，白炭黑的碳排放量最少，这与白炭黑材料独特的微观结构、制备工艺有关。白炭黑微观结构可以与橡胶产生较强的相互作用，可以减少轮胎滚动的阻力，以此减少车辆行驶时的能量损耗。与炭黑的制备工艺相比，白炭黑生产采用的是可再生的资源，并通过环保工艺合成，可大幅度降低碳排放。芳纶帘线与白炭黑均可以作为轮胎原材料，芳纶帘线具有较高的拉伸强度，比钢丝帘线强度高，可以减少原材料的使用，王瑶瑶等研究中提到芳纶帘线可以有效延长轮胎的使用寿命，减轻轮胎重量，使轮胎具有寿命长、操作稳定性好、节油的特点^[3]。芳纶帘线还具有的耐高温特点，能够在高温环境下确保轮胎不发生明显的强度衰退，可以使汽车延长轮胎的更换周期，从而减少能源消耗与碳排放。

3.2 轮胎设计的优化

3.2.1 优化轮胎胎面胶配方设计

随着汽车行业的蓬勃发展，人们对汽车安全性能的提高，对轮胎抓地能力的改善、低滚动阻力及高抗湿滑性能等方面的要求越来越严格，同时，轮胎的胎面配设计必须遵循可持续发展战略。针对以上现状，轮胎生产制造企业坚持在选择填料时采用具有高填充量的白炭黑填料，再加入具有抗湿滑性的树脂，从而提高轮胎胎面的抗湿性能和抓地力。例如在硫化体系应用方面，选择硫黄硫化时可配合促进剂 OBS；选择含轮胎再生胶的胎面胶时可配合使用促进剂 CZ 和促进剂 DM，其中促进剂 CZ 用量一般略高于促进剂 DM 用量，从而增强轮胎面胶配方的安全环保性。

3.2.2 优化轮胎自修复材料配方设计

汽车轮胎的自修复材料能够在轮胎被刺穿时进行紧急的修复，避免轮胎直接失去胎压而带来安全事故。为此，轮胎生产企业纷纷采用吸水性聚合物的溶胀压力来防止轮胎漏气，并在轮胎中加入自修复材料，提高了汽车使用的便利程度，降低了汽车的油耗。例如在第十五届中国国际橡胶技术及轮胎展上，山东玲珑轮胎有限公司推出的最新自修复材料真空轮胎，这款自修复真空轮胎的内壁上附有一层自愈胶，当轮胎高速运行受到外力破坏时能自行快速愈合，大大地提高了行车的安全。

3.2.3 优化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。可降解轮胎能够被自然界中的微生物降解,或是直接采用醇解进行人工降解,而且所降解的原材料还能够重新进行聚合,并可以用于新轮胎的生产,可以极大程度地降低废弃轮胎对环境的危害和废弃轮胎的处理难度。

3.3 生产过程节能降耗

轮胎生产过程节能降耗措施包括材料无害化处理利用、硫化过热水热能再利用及硫化氯气回收利用等。其中硫化是轮胎生产的重要工序,传统硫化工艺在硫化任务完成后会产生大量的热能释放,为减少能源消耗,可以建立硫化过热水热能有效利用,或可以使用空气净化装置对无机物的粉体与有害气体进行吸附^[4]。针对材料的无害化处理可以使用机械粉碎或化学解聚,将其转化为可再生橡胶,并可用于轮胎的非关键部位,能够减少对原生橡胶材料的需求,以此减少轮胎原材料生产过程中的能耗,减少碳排放。传统的硫化氯气的回收利用会使用氯化物作为硫化助剂,大量排放

氯气,对环境与人体造成危害。企业可以使用较为成熟的硫化氯气回收方法对硫化过程的氯气进行吸附,例如采用特定的吸收剂,如氢氧化钠溶液、碳酸钠溶液等,与氯气发生化学反应,并通过解吸工艺将吸附的氯气释放,净化过后再排放,可以减少碳排放量。

4 结语

综上所述,轮胎在日常生活中扮演着重要的角色,但传统轮胎在其制造、运输、使用时,皆会对大气、水源及土壤造成一定程度的污染及伤害。轮胎生产过程中原材料选择与使用过程碳排放量最高,在碳中和背景下和全生命理论的要求下,轮胎生产企业应从轮胎的原材料选择、设计优化到生产过程,全面推行节能降耗措施,不断优化改进设计、进行工艺技术创新、提高生产效率、努力降低生产成本,同时提高轮胎的性能和质量,通过科学的方式实现轮胎生产使用的全周期的管理,以达到保护环境,实现可持续发展的目标。

Study on the development of carbon neutral technologies in the full life cycle of tires

Qin Zenghui, Xu Xingguo, Jiang Chao, Sun Shumin, Sang Mingqiang, Li Chaomin

(Shandong Wanda Baotong Tire Co. LTD., Dongying 257500, Shandong, China)

Abstract: With the intensifying global warming, China is actively promoting carbon neutrality technology. In this context, the tire industry, as one of the important areas of carbon emissions, researching the development of carbon neutrality technology is of crucial significance for enhancing its market competitiveness and achieving sustainable development. This paper proposes the concept of the tire's full life cycle in the context of carbon neutrality, and provides a detailed analysis of the carbon emissions of tires during the stages of raw material acquisition, production, distribution and use, as well as recycling and disposal. This lays the foundation for an in-depth exploration of how tire companies can apply the full life cycle theory to formulate strategies for reducing carbon emissions in the context of carbon neutrality. The aim is to assist the tire industry in achieving carbon neutrality goals and explore new paths for the sustained high-quality development of current tire manufacturing enterprises.

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

(R-03)

