

斜交胎电加热氮气硫化工艺的研究

章华军, 范佩琳, 任鹏杰, 丁赵杨*, 戴家钧

(中策橡胶集团股份有限公司, 浙江 杭州 310020)

摘要: 本研究对 14.9-24-8PR CB538 斜交胎采用的电加热氮气硫化工艺进行了系统的验证与评估, 发现该工艺在硫化效率上与传统过热水硫化工艺相当, 硫化成本则与氮气硫化工艺相近。在当前电价条件下, 电加热氮气硫化工艺在能耗费用上相比氮气硫化工艺降低了约 20%, 显示出显著的节能潜力。然而, 硫化过程中胎里肩部位置和冠部中心出现的温差 ($> 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) 揭示了硫化均匀性有待优化。本研究不仅为电加热氮气硫化工艺在轮胎生产中的应用提供了实践依据, 而且全面评估了其硫化效果和能耗, 证实了其在节能环保方面的优势, 并指出了未来研究的方向, 包括提升硫化均匀性、优化工艺参数以及探索该工艺在不同轮胎型号和生产条件下的适用性, 旨在推动轮胎制造业向高效、节能、环保的方向发展。

关键词: 电加热氮气硫化; 斜交胎; 硫化效率; 能耗

中图分类号: TQ330.67

文献标识码: B

文章编号: 1009-797X(2025)02-0038-04

DOI: 10.13520/j.cnki.rpte.2025.02.009

0 引言

轮胎作为汽车的重要组件, 其性能的优劣直接关系到车辆的行驶安全与燃油效率。在轮胎制造过程中, 硫化工艺扮演着至关重要的角色, 它决定了轮胎的物理性能、耐用性以及整体质量。传统硫化技术, 如蒸汽硫化和热水硫化, 尽管技术成熟, 但在能源消耗和环境保护方面存在明显缺陷。面对全球对于节能减排与可持续发展的不断增长的需求, 开发新型硫化工艺显得尤为迫切。

电加热氮气硫化工艺, 作为一项新兴技术, 因其节能环保的特性而受到业界的广泛关注。该技术通过电能直接加热氮气, 有效避免了传统硫化过程中水和蒸汽的使用, 减少了能源消耗及对环境的影响。此外, 电加热方式能够实现更为精确的温度控制, 有助于提高硫化过程的均匀性, 这对于提升轮胎的力学性能和延长其使用寿命极为关键。

斜交胎, 以其独特的结构设计, 在特殊场地使用的特殊车辆, 如港口机械、井下作业、农业和林业等非道路地面车辆中, 有着不可替代的地位。这类轮胎的骨架材料通常采用熔点较低、拉伸性能优异的尼龙帘布, 其硫化过程的复杂性对温度和压力的精确控制提出了更高要求。本研究选取 14.9-24-8PR CB538 斜交胎作为研究对象, 目的在于验证电加热氮气硫化工艺在该型号轮胎上的应用潜力, 并全面评估其硫化

效果及能耗情况。

本研究旨在实现多重目标: 首先, 确认电加热氮气硫化工艺在斜交胎生产中的可行性; 其次, 与传统硫化工艺相比, 评估该工艺的硫化效率; 再次, 分析该工艺在实际生产中的能耗情况, 以探讨其经济效益; 最后, 评估该工艺对硫化均匀性的影响, 并探索技术改进的可能方向。通过深入研究, 本研究期望为轮胎制造业提供一种更为高效、节能、环保的硫化解方案, 促进行业的技术革新和可持续发展。

此外, 本研究将深入探讨电加热氮气硫化工艺对轮胎微观结构的影响, 研究如何通过优化硫化参数和改进硫化设备来进一步提升硫化均匀性和产品质量。同时, 本研究还将对电加热氮气硫化工艺的可持续性进行全面评估, 涵盖其在整个产品生命周期中的环境影响和社会经济效益, 为轮胎制造业的绿色发展提供科学依据。

1 实验部分

1.1 实验材料及设备

本研究采用斜交胎 14.9-24-8PR CB538 作为实验对象, 使用电加热氮气硫化设备进行硫化测试。埋

作者简介: 章华军 (1989-), 男, 工程师, 学士, 主要从事斜交 OTR 轮胎的结构设计和硫化工艺管理工作。

* 为通讯作者

线测温点如图所示。其中，1~7#与8~14#呈180°对称。

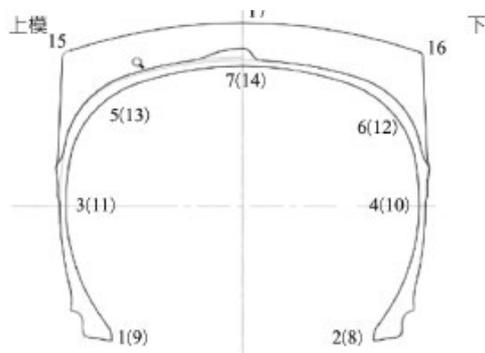


图1 埋线测温分布

实验设备包括电加热氮气硫化装置（电加热结构如图2所示）、测温设备、氮气供应系统等。

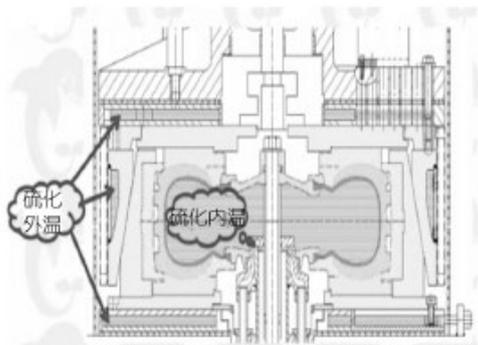


图2 电加热结构示意图

1.2 实验方法

分别对两条轮胎进行电加热氮气硫化埋线测试。第一条轮胎按现行过热水施工表（介质用175℃氮气保压）条件进行硫化，第二条轮胎将前六步硫化内温提高至185℃条件下进行硫化。

1.3 测试数据

主要测试指标包括对轮胎内腔对应位置的在规定的硫化时间周期内的硫化温度变化。

2 结果与分析

本研究中，对硫化过程中轮胎内腔对应位置的温度变化进行了详细记录，以评估电加热氮气硫化工艺的温度控制精度和硫化均匀性。以下是对温度分布的具体分析：

2.1 测温温度分布

(1) 轮胎硫化测温线

1号轮胎在硫化开始时的温度约为20℃，并在30min内迅速升至130℃，最终在硫化结束时稳定在

150℃。2号轮胎的升温过程类似，但在相同的硫化时间内，其最终稳定温度略高，达到155℃。这表明电加热氮气硫化工艺能够实现快速且可控的升温过程。

(2) 胎里侧部测温曲线

1号轮胎的上下胎侧在硫化结束时温度稳定在150℃左右，温差不超过3℃，显示出良好的温度均匀性，如图3。这可能归因于电加热系统的均匀热分布特性，有助于提高硫化过程的一致性。

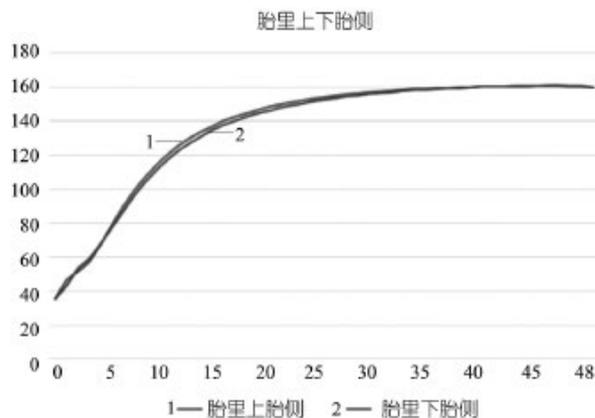


图3 1号轮胎胎里上下胎侧对比

(3) 胎里肩部测温曲线

1号轮胎在硫化开始时上下胎肩温度约为20℃，随后逐渐上升，在硫化结束时温度稳定在150℃左右，在升温阶段，温差超过了10℃。这种温差的增加可能与加热元件的热传导效率、介质的散热速度、硫化时内压和介质的流动速度有关，如图4。

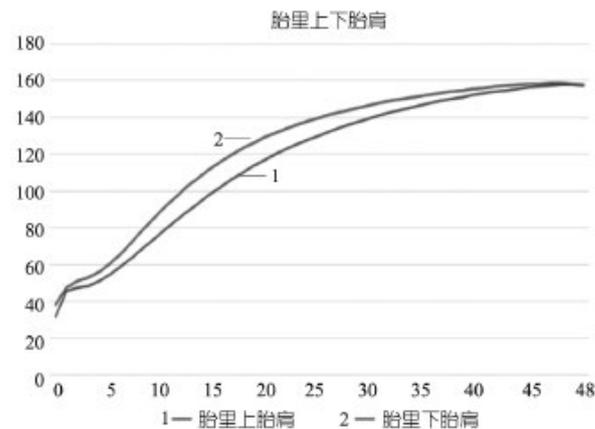


图4 1号轮胎胎里上下胎肩对比

2号轮胎硫化开始时上下胎肩温差约为20℃。随着硫化继续，温差逐渐缩小，硫化结束时温差超过了10℃。这种温差可能与测温点位置、热电偶的敏感度、喷嘴方向有关。此外，也与介质的散热速度、硫化时内压和介质的流动速度有关，如图5。

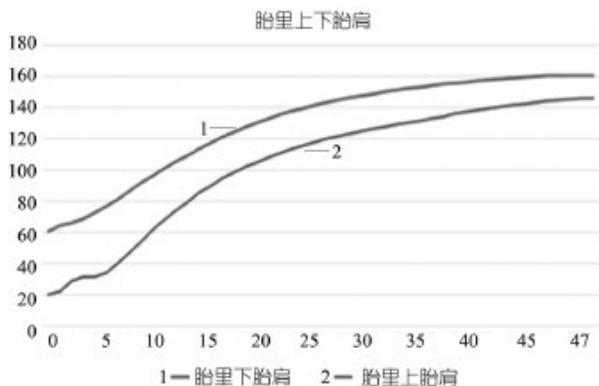


图 5 2 号轮胎胎里上下胎肩温度对比

(4) 胎里冠中心测温曲线

1 号轮胎硫化开始时两个冠部中心测温点初始温度在 20~30 °C 之间。随着轮胎硫化，温差逐渐扩大，最大温差超过 20 °C。在硫化结束时温度稳定在 150 °C 以上，硫化结束时，最终温差超过 10 °C，如图 6。

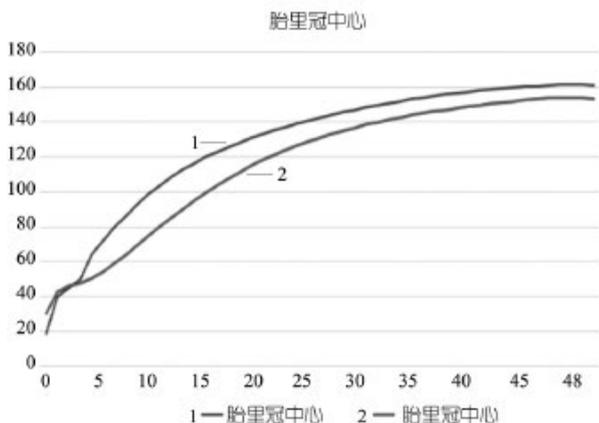


图 6 1 号胎里冠部中心温度对比

2.2 能耗对比

实际硫化 2 条测试轮胎的平均能耗为 14.52 kW·h。通过与我司现有的硫化工艺进行对比，我们可以发现，电加热氮气硫化工艺在成本方面具有明显优势。从下表可以看出，氮气硫化工艺相较于过热水介质硫化，能耗费用下降了约 20%。同时，电加热氮气硫化工艺相较于氨气硫化工艺，能耗费用也下降了约 20%。

表 1 电加热氮气硫化与现有硫化工艺能耗对比

硫化方式	成本 / 元
过热水介质硫化	18.91
高温蒸汽氨气硫化	15.36
电加热氮气硫化	12.83

2.3 综合分析

通过对电加热氮气硫化工艺的温度分布和能耗数

据的综合分析，我们可以得出以下结论：

电加热氮气硫化工艺能够实现快速且可控的升温过程，对于提高硫化效率具有积极作用。

在侧部硫化温度控制方面，该工艺显示出良好的均匀性，有利于提高轮胎的一致性和质量。

然而，肩部和冠部中心位置的温差问题表明，硫化均匀性仍有改进空间。未来的研究和工艺优化应着重于解决这些区域的温度控制问题。

能耗对比分析证实了电加热氮气硫化工艺在降低能耗和生产成本方面的优势，这为轮胎制造业提供了一种经济环保的生产方式。

3 讨论与结论

本研究通过精确的实验设计，验证了电加热氮气硫化工艺在斜交胎硫化中的应用潜力。实验结果表明，该工艺在硫化效率上与传统过热水硫化工艺相当，同时在能耗上相比氮气硫化工艺降低了约 20%，这一发现对于推动轮胎制造业的节能减排具有重要意义。然而，硫化过程中胎里肩部和冠部中心出现的温差问题提示了硫化均匀性有待进一步优化。未来的研究需要采用高分辨率测温设备和数值模拟技术，深入分析硫化过程中的热传递机制，以优化硫化工艺。

对于拥有热电联产系统的轮胎企业，引入电加热氮气硫化工艺需细致评估其经济性。考虑到改造成本和长期效益，规模较大或当地热电争议较大的企业可能更倾向于采用此工艺。新建工厂则有机会在设计阶段整合此工艺，从源头上实现高效率 and 低能耗生产。

本研究的结论为电加热氮气硫化工艺在轮胎生产中的应用提供了实践依据，并指出了未来工艺改进的方向。实验结果表明，该工艺在硫化效率上与传统硫化工艺相当，而在能耗上实现了约 20% 的降低，显示出显著的节能潜力。然而，硫化过程中出现的温差问题提示了硫化均匀性有待进一步优化。

未来的工作应集中于解决温差问题，并通过实证研究来验证工艺的广泛适用性。此外，建立示范项目和制定行业标准将有助于加速电加热氮气硫化工艺的工业化进程。电加热氮气硫化工艺的推广需要跨学科的合作和政策层面的支持。通过整合各方资源和知识，可以加速这一创新技术的市场化步伐。

4 未来研究方向

(1) 热传递机制的深入研究：未来的研究可以更

深入地探讨硫化过程中的热传递机制，包括电加热元件与橡胶之间的热交换效率、橡胶内部的热传导特性以及加热过程中的热膨胀效应。研究可以采用数值模拟和实验验证相结合的方法，以期发现并解决硫化过程中的热传递不均匀问题。

(2) 硫化工艺参数的优化：考虑到硫化温度、时间和压力等参数对轮胎性能的显著影响，未来的研究可以采用多变量实验设计，结合统计学和机器学习算法，优化这些关键参数，以实现最佳的硫化效果和最低的能耗。

(3) 新型橡胶材料的开发：研究可以聚焦于开发新型橡胶材料，这些材料应具有更好的热传导性能和硫化响应性，以适应电加热氮气硫化工艺。同时，新

型材料应考虑其可持续性，包括生物基来源和可回收性。

(4) 硫化工艺的环境影响评估：未来的研究可以采用生命周期评估方法，全面评估电加热氮气硫化工艺的环境影响，包括原材料获取、生产加工、产品使用和废弃处理的各个阶段。研究结果将为工艺的进一步优化提供环境方面的指导。

(5) 跨学科合作与知识整合：电加热氮气硫化工艺的研究需要材料科学、化学工程、机械工程、环境科学等多个学科的知识和技术支持。未来的研究可以鼓励跨学科团队的合作，整合不同领域的专业知识，共同推动硫化工艺的创新。

Research on the process of electric heating nitrogen curing for bias ply tires

Zhang Huajun, Fan Peilin, Ren Pengjie, Ding Zhaoyang *, Dai Jiajun

(Zhongce Rubber Group Co. LTD., Hangzhou 310020, Zhejiang, China)

Abstract: This study comprehensively validated and evaluated the electric heating nitrogen curing process used in 14.9-24-8PR CB538 bias tires. The research results indicate that this process is comparable to traditional superheated water sulfurization process in terms of sulfurization efficiency, while its sulfurization cost is similar to nitrogen sulfurization process. Under current electricity pricing conditions, the electric heating nitrogen curing process reduces energy consumption costs by about 20% compared to the nitrogen curing process, demonstrating significant energy-saving potential. However, the temperature difference ($\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) between the shoulder and crown centers of the tread during the vulcanization process indicates that the uniformity of vulcanization still needs further optimization. This study not only provides empirical basis for the application of electric heating nitrogen curing process in tire production, but also comprehensively evaluates its vulcanization effect and energy consumption performance, confirms its advantages in energy conservation and environmental protection, and points out future research directions. These directions include improving vulcanization uniformity, optimizing process parameters, and exploring the applicability of this process under different tire models and production conditions, aiming to promote the development of tire manufacturing towards high efficiency, energy conservation, and environmental protection.

Key words: electrically heated nitrogen curing; bias ply tire; curing efficiency; energy consumption

(R-03)

