

实心胎电磁加热均匀性研究

何权¹, 刘前卫², 江永富², 夏厚辉²

(1. 贵州轮胎股份有限公司, 贵州 贵阳 550000;
2. 中化(福建)橡塑机械有限公司, 广西 桂林 541002)

摘要: 以某规格实心轮胎为例, 通过有限元分析对电磁感应加热方案进行设计及优化, 根据理论分析结果采用电磁感应加热方法对工装模具板进行加热试验。试验结果表明, 工装模具板的温度均匀性可达 $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$, 且在8 h的模拟硫化时间内温度曲线极为稳定, 几乎无波动, 为电磁加热在实心胎硫化机上的应用提供实践依据。

关键词: 实心轮胎; 有限元分析; 电磁感应加热; 温度均匀性

中图分类号: TQ336.13

文献标识码: B

文章编号: 1009-797X(2025)02-0013-04

DOI: 10.13520/j.cnki.rpte.2025.02.004

0 引言

轮胎硫化是轮胎制造过程中的关键环节之一, 其质量直接影响到轮胎的性能和使用寿命。传统的轮胎硫化机加热方式主要采用电阻丝加热或蒸汽加热, 这些方式存在加热速度慢、能耗高、温度控制不准确等问题。随着能源紧张和环保要求的提高, 如何降低轮胎硫化过程中的能耗和排放, 提高加热效率和温度控制精度, 成为轮胎硫化技术亟待解决的问题。

硫化工艺及装备的改进一直是各大橡机企业及轮胎制造商多年来关注的焦点^[1]。实心轮胎以其优越的耐久性、耐压性和耐磨性广泛应用于各种工业车辆、建筑机械、港口机场的拖挂车辆等领域。实心轮胎的一般硫化工艺是轮胎挂胶料, 在具有一定温度和压力的模具中完成。早期实心轮胎主要采用硫化罐硫化, 劳动强度大、生产效率低、能源利用率低, 逐步被平板硫化机硫化取代。电磁加热作为一种新型的加热方式, 具有加热速度快、能耗低、温度控制精确等优点, 可以大大提高生产效率、降低生产成本、提高产品质量和性能, 同时也有助于环保节能。因此, 将电磁加热技术应用于轮胎硫化机上具有重要的实际意义和推广价值。

本研究提出一种用于实心轮胎硫化机外温加热的电磁感应加热方案, 通过对工装模具板进行加热试验, 得出试验数据, 验证电磁加热方案的温度均匀性。

1 电磁加热技术概述

1.1 电磁加热基本原理

电磁加热技术是利用电磁感应原理, 通过交变电流产生交变磁场, 进而在导体内部产生涡流, 使导体自身发热的一种加热方式。当导体置于交变磁场中时, 会在导体内部产生感应电动势和感应电流, 这些感应电流在导体内部流动时, 由于导体存在一定的电阻, 因此会产生热量, 从而实现加热的目的。

电磁加热技术具有加热速度快、加热均匀、能耗低、温度控制精确等优点。与传统的电阻丝加热或蒸汽加热相比, 电磁加热不需要通过热传导或热对流的方式将热量传递给被加热物体, 而是直接在被加热物体内部产生热量, 因此加热速度更快、效率更高。同时, 电磁加热的温度控制也更加精确, 可以根据需要调节交变电流的频率和强度, 从而实现精确的温度控制。

1.2 电磁加热技术特点

(1) 高效节能: 电磁加热技术具有高效节能的特点, 其能耗比传统加热方式降低30%以上。由于电磁加热直接在被加热物体内部产生热量, 减少了热传导和热对流过程中的能量损失, 因此能效更高。电磁加热与蒸汽加热对比如表1所示^[2]。

作者简介: 何权(1975-), 男, 电气工程师, 主要从事能源及设备管理的工作。

表 1 电磁加热与蒸汽加热对比

项目	电磁加热	蒸汽加热
加热效率 /%	70~90	30~50
能源消耗	低	高
热量来源	自身	蒸汽锅炉
环境影响	无	冷却水回收困难, 易形成水垢
加热方式	热板电磁感应生热	热板由蒸汽加热

从表 1 可以看出, 与传统蒸汽加热相比, 电磁加热的加热效率高, 能源消耗低, 可节约能源, 减小对环境的影响, 具备良好的使用性能。

(2) 加热速度快: 电磁加热的加热速度非常快, 可以在短时间内达到所需温度。这对于需要快速加热的场合非常有利, 可以大大提高生产效率。

(3) 加热均匀: 电磁加热的加热方式可以使被加热物体内部产生均匀的热量分布, 避免了传统加热方式中可能出现的温度不均现象。这有助于提高产品的质量和性能。

(4) 温度控制精确: 电磁加热的温度控制非常精确, 可以根据需要调节交变电流的频率和强度, 从而实现精确的温度控制。这对于需要精确控制温度的场合非常有利。

(5) 安全可靠: 电磁加热技术具有安全可靠的特点。由于电磁加热不需要通过热传导或热对流的方式将热量传递给被加热物体, 因此避免了传统加热方式中可能出现的火灾或爆炸等安全隐患。同时, 电磁加热设备也具有完善的保护措施和故障诊断功能, 可以确保设备的安全运行。

1.3 电磁加热设备分类

电磁加热设备根据其应用领域和加热方式的不同, 可以分为多种类型。在轮胎硫化机领域, 常用的电磁加热设备主要包括电磁感应加热器和电磁加热控制器等。

电磁感应加热器是电磁加热技术的核心部件之一, 它利用电磁感应原理将电能转化为热能。电磁感应加热器通常由电磁线圈、铁芯和散热装置等组成。当电磁线圈通电时, 会在铁芯中产生交变磁场, 进而在导体(如轮胎硫化机上的模具)内部产生涡流和热量。

电磁加热控制器则是用于控制电磁感应加热器工作的设备。它可以根据设定的温度和时间等参数, 自动调节电磁感应加热器的输出功率和加热时间, 从而实现精确的温度控制和时间控制。同时, 电磁加热控制器还具有故障诊断和保护功能, 可以确保设备的安

全运行。

2 试验方案

2.1 电磁加热方案设计

电磁感应加热方案设计如图 1 所示, 在线圈板上开有若干环形槽, 槽内布置若干圈电磁线圈, 上部设置有隔热板, 避免线圈直接与轮胎模具接触, 模具在电磁感应线圈的作用下直接生热, 热量从模具底部以传热形式传递给模具其他部位, 对胎胚进行加热, 因此模具底部表面温度的均匀性决定了轮胎硫化温度的均匀性。隔热层能有效减少与外界的热交换、减少热量损失, 有助于均匀温度场的形成。此外, 隔热板和线圈板均为不导磁材料制作, 隔绝磁场, 除模具外的其他金属不会发热, 保证工作环境适宜工人操作。

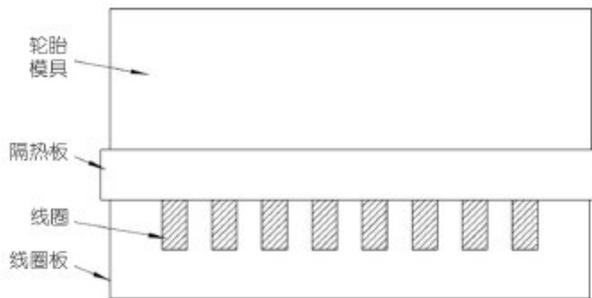


图 1 电磁感应加热方案示意图

试验以一块与某规格实心轮胎模具相同尺寸外形的工装模具板进行加热, 测量工装模具板表面的温度均匀性。按实心胎硫化过程中的关键部位温度控制要求, 选取三个圆环, 每个圆环上均布 8 个温度测量点, 测量验证 24 个点的温度均匀性。图 2 为参照某规格实心轮胎模具尺寸设计的模拟工装板外形。

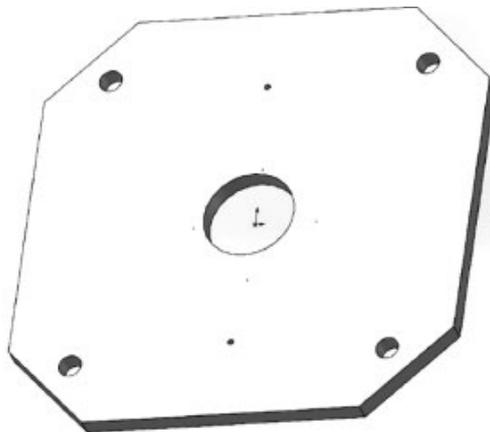


图 2 模拟工装板

良好的电路设计是形成稳定温度场的必要保障^[3]。

电磁感应控制电路如图 3 所示，电源为控制器供电，控制器向环形线圈内通入高频电流形成交变磁场，模

具作为金属工件在交变磁场内高速发热，热电阻与温控器组成闭合回路，起到测量和反馈作用。



图 3 电磁感应控制电路示意图

2.2 试验温度及升温方式

本研究以某规格实心轮胎为例，采用电磁感应加热硫化工艺，根据前期试验及生产经验，初步确定硫化温度为 145 °C。根据轮胎厂现场连续生产的实际情况及经验，硫化完成后，需进行出模、卸胎、装胎、装模等操作，模具温度会从 145 °C 降至 120 °C；部分厂家在第一次硫化时也会提前将模具整体预热至 120 °C。因此，为了使试验与现场情况一致，加热试验的升温方式确定为先将工装模具板加热至 120 °C，保温 3 h，使工装模具板的温度均匀后，再加热至 145 °C。

2.3 温度测量位置选择

根据实心胎硫化过程中的关键部位温度控制要求，选取三个圆，每个圆上均布 8 个温度测量点，测量并计算 24 个点的温度均匀性。图 4 为加热试验时温度测量点分布示意图，其中，“1#”点为温度控制点。

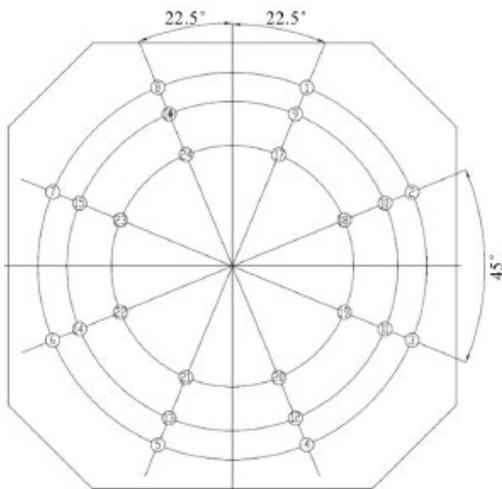


图 4 温度测量点分布示意图

2.4 线圈分布

通过有限元分析模拟比较得出线圈按圆形紧密排布存在加热盲区，边缘的感应磁场强度特别低，导致整体的温差比较大；而线圈按圆环型排布的方案中，由于增加了边缘线圈的范围且中间不添加加热导体，使得整体的磁场强度相对于紧密型较为均匀^[4-6]，所以本试验采用圆环型线圈排布方式。图 5 为线圈按圆环布置的有限元分析结果。

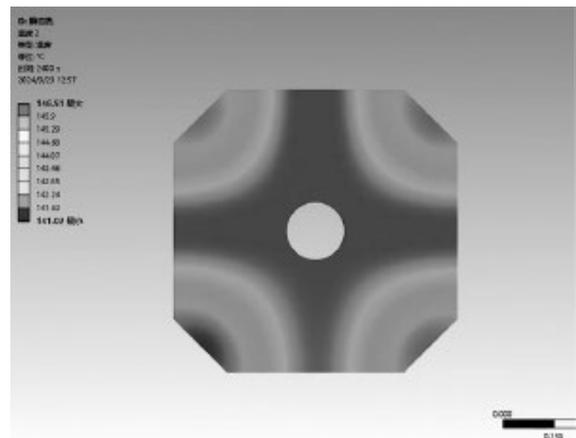


图 5 热均匀性有限元分析云图

从有限元分析结果来看，线圈按圆环布置的温度均匀性在 5.5 °C，可以按此方案进行试验。

3 试验过程

通过监控软件自动记录试验过程的加热时间和温度数据，温度刚升至 145 °C 时的最大温差为 3.6 °C；继续加热，0.5 h 后温度趋于稳定，最大温差降低为 2.9 °C；按实心胎硫化工艺持续加热 8 h，最大温差降

低至 $1.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ；从图 6 的试验全过程温度曲线可以看出，持续加热时温度线稳定在 $144.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 水平线上，几乎无波动。

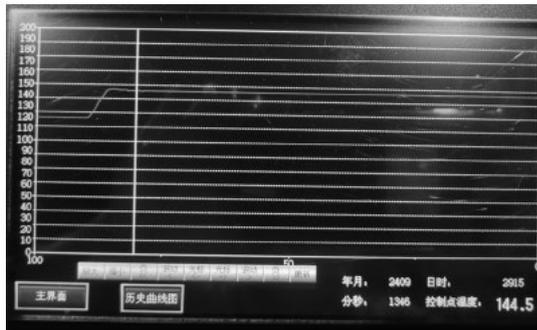


图 6 试验全过程温度曲线

4 结论

本研究试验通过模拟某规格尺寸的实心胎硫化过程，使用电磁加热系统对工装模具板进行加热，测量工装模具板上 24 个点，温度均匀性可以达到 $2.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，且持续加热 8 h 温度线稳定无波动，为电磁加热在实心胎硫化机上的应用提供实践依据。

将电磁加热技术应用于实心胎硫化机中，可以取得显著的应用效果。首先，由于电磁加热的加热速度快、能耗低、温度控制精确等优点，可以提高轮胎硫化机的生产效率、降低生产成本并提高产品质量和性能。

其次，电磁加热技术的应用还可以减少轮胎硫化过程中的能源消耗和碳排放，对节能环保具有重要意义。

义。与传统的电阻丝加热或蒸汽加热相比，电磁加热的能耗更低、效率更高，可以减少能源消耗和碳排放量，符合可持续发展的要求。

此外，电磁加热技术的应用还可以提高轮胎硫化机的自动化水平和智能化水平。通过集成先进的控制系统和传感器技术，可以实现轮胎硫化过程的自动化控制和智能化监测，进一步提高生产效率和产品质量。

综上所述，电磁加热方案通过试验验证了可行性，可用于实心胎硫化机外温加热改造或新机配备，具有显著的优势和广阔的应用前景。通过合理设计电磁加热系统，可以充分发挥电磁加热技术的优势，提高实心胎硫化机的生产效率、降低生产成本并提高产品质量和性能。同时，电磁加热技术的应用还有助于节能环保和推动轮胎硫化机的自动化和智能化发展。

参考文献：

- [1] 刘斐, 杨卫民, 张金云, 等, 实心轮胎电磁感应加热硫化工艺[J], 轮胎工业, 2015, 35(6): 361-364.
- [2] 潘兴, 王冠中. 电磁感应加热技术在轮胎硫化机上的应用研究[J], 橡胶工业, 2020, 69(9): 706-708.
- [3] 李博, 焦志伟, 张金云, 等, 电磁感应加热在轮胎硫化机上的应用研究[J], 橡胶工业, 2018, 65(10), 1155-1159.
- [4] 孙国通. 硫化机热板电磁加热有限元模拟及实验验证[D], 浙江, 宁波大学, 2022.
- [5] 樊若男. 轮胎硫化机内外模电磁加热装置研究[D], 山东, 山东大学, 2023.
- [6] 陈超. 轮胎硫化机电磁感应加热系统研究[D], 山东, 山东大学, 2020.

Research on the uniformity of electromagnetic heating in solid tires

He Quan¹, Liu Qianwei², Jiang Yongfu², Xia Houhui²

(1. Guizhou Tire Co. LTD., Guiyang 550000, Guizhou, China;

2. Sinochem (Fujian) Rubber Machinery Co. LTD., Guilin 541002, Guangxi, China)

Abstract: Taking a solid tire of a certain specification as an example, this article designs and optimizes the electromagnetic induction heating scheme through finite element analysis. At the same time, based on the theoretical analysis results, the electromagnetic induction heating method is used to conduct heating tests on the tooling mold plate. The experimental results show that the temperature uniformity of the tooling mold plate can reach $\pm 1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, and the temperature curve is extremely stable with almost no fluctuations during the simulated vulcanization time of 8 hours. This test provides a practical basis for the application of electromagnetic heating in solid tire curing press.

Key words: solid tire; finite element analysis; electromagnetic induction heating; temperature uniformity

(R-03)