

直压硫化工艺金属内模电磁感应加热均匀性的试验研究

焦志伟^{1,2}, 孙嘉乐^{1,2}, 张金云^{2,3}, 王雷^{1,2}, 于源^{1,2}, 阎华^{1,2}, 杨卫民^{1,2}

(1. 北京化工大学 机电工程学院, 北京 100029; 2. 轮胎设计与制造工艺国家工程实验室, 北京 100029; 3. 三角轮胎股份有限公司, 山东 威海 264200)

摘要: 研究导磁体长度和截面尺寸对直压硫化金属内模电磁感应加热均匀性的影响。结果表明: 减小导磁体的长度可使得鼓瓦两端磁力线密度下降, 使电磁感应加热更均匀, 但会导致鼓瓦的加热功率下降, 当导磁体长度为170 mm时, 直压硫化金属内模电磁感应加热的均匀性最好; 增大导磁体的截面尺寸虽然会使得电磁感应加热均匀性有所降低, 但可以减小导磁体的涡流损耗和功率损耗, 有效解决了导磁体铁损的问题, 当导磁体的截面尺寸为20 mm×15 mm时, 直压硫化金属内模电磁感应加热效果最好。

关键词: 直压硫化内模; 电磁感应加热; 导磁体; 长度; 截面尺寸; 铁损; 温度场

中图分类号: TQ336.1; TQ330.6⁺7

文献标志码: A

文章编号: 1006-8171(2023)02-0117-05

DOI: 10.12135/j.issn.1006-8171.2023.02.0117



OSID 开放科学标识码
(扫码与作者交流)

为了满足高性能汽车的需求, 轮胎正向着高耐磨、低滚动阻力、抗湿滑和低噪声4个方面发展^[1]。硫化作为使得橡胶内部线性大分子结构发生交联的轮胎关键制造工艺, 对于提升轮胎各项性能起着十分重要的作用^[2-3]。但是传统硫化工艺存在两大问题, 即硫化不均匀和成品轮胎硫化精度低, 胶料分布不均匀。由于传统硫化工艺大多采用蒸汽作为介质, 为轮胎硫化提供所需的压力和温度, 而硫化过程中蒸汽会产生冷凝水, 影响温度场, 导致轮胎硫化不均匀。此外, 胶囊作为传统硫化工艺所采用的中心机构, 由于其自身的高弹性和低刚性, 势必难以获得均匀的几何结构及质量分布, 并且存在着膨胀不完全、不对称、材料易老化等问题, 从而导致轮胎的硫化精度不高, 动平衡和均匀性较差^[4]。针对传统硫化工艺的种种缺点, 相关研究人员提出了一种新型的直压硫化技术。

直压硫化技术采用可胀缩金属内模代替胶囊作为硫化工艺的中心机构, 使用电磁感应加热技术为硫化提供温度。高刚性的金属内模为硫化提供了足够的硫化压力, 保证了轮胎的硫化精度; 同时电磁感应加热耗能小、升温速度快、控温精确, 为实现轮胎均匀硫化提供了可能性^[5]。

本工作以直压硫化内模为研究对象, 通过理论和试验分析影响直压硫化内模温度场的因素。

1 直压硫化内模电磁感应加热系统

直压硫化内模的电磁感应加热系统主要由鼓瓦、线圈绕组和导磁体组成^[6], 每一块鼓瓦背部固定一组线圈绕组, 线圈绕组拆分为两段, 左右对称布置, 每段线圈中内置导磁体(见图1)。工作时, 高频电流通入线圈绕组产生高频交变磁场, 金属鼓瓦处于高频交变磁场中会产生涡流, 由于鼓瓦自身存在电阻, 在涡流的作用下会产生焦耳热, 由此实现电能到热能的转换。

电磁感应加热系统中导磁体的作用是通过控制磁通方向, 使鼓瓦端部也能产生感应电动势, 并产生涡流^[7]。目前, 电磁感应加热系统中导磁体尺寸为15 mm×15 mm×192 mm, 其长度与鼓瓦内侧两端的距离相当, 这导致缠有线圈绕组的导磁

基金项目: 山东省重点研发计划重大科技创新工程项目(2019JZZY010450); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(JD2215)

作者简介: 焦志伟(1985—), 男, 山西晋中人, 北京化工大学教授, 博士, 主要从事高分子材料成型加工原理与设备等方面的研究。

E-mail: jiaozw@126.com

体在通电后上下两端的交变磁力线要比其他部位更密集,如图2所示。同时这必然导致鼓瓦两侧与端部涡流热效应的不均匀^[8]。为保证内模两侧与端部的温升趋于同步,提高鼓瓦表面电磁感应加热的均匀性,研究导磁体对鼓瓦表面温度场的影响是十分必要的。

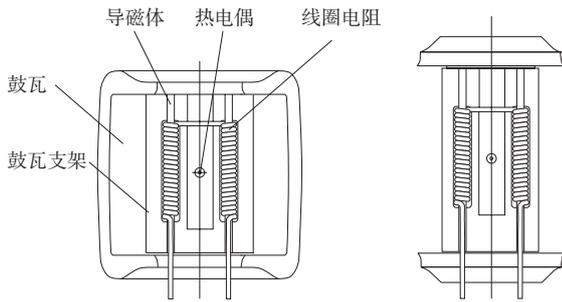


图1 直压硫化内模电磁感应加热系统示意

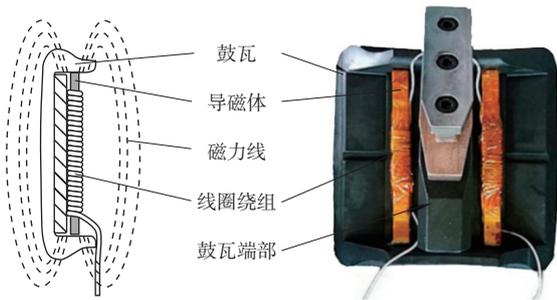


图2 内模磁力线分布示意

2 实验

导磁体也称磁通集中器,具有非线性的磁导率,因其磁阻较小而易于通过磁通,并且能够控制磁通的密度和方向,改变感应器中的电流分布,可以在较大程度上降低所处区域的磁阻^[9]。

为研究导磁体对温度场的影响,本工作以试验为基础,以导磁体的长度和截面面积为对象,研究其对鼓瓦表面温度场的影响。

2.1 导磁体长度

目前,直压硫化内模电磁感应加热系统采用的电磁线圈布线方案为每根导磁体上只有单段的电磁线圈绕组且居中布置,由于耦合效应,这种布线方式会使得鼓瓦中部的温度过高。通过将单段电磁线圈绕组拆分成两段,增大鼓瓦中部与线圈的距离,虽然降低了鼓瓦中部电磁感应加

热的温度,但两段式绕组的布线方案拉近了绕组与鼓瓦两端的距离,并且鼓瓦两端自身的磁力线密度本就高于其他部位,在两个因素的耦合作用下导致鼓瓦两端的温度过高。通过减小导磁体长度可以减小鼓瓦两端磁力线的密度,进而降低鼓瓦两端的温度。但减小导磁体长度的同时会影响导磁体的磁阻(R_m),计算公式如下:

$$R_m = l / (\mu s) \quad (1)$$

式中, l 为磁路的长度, μ 为磁路的相对导磁率, s 为磁路的截面面积^[10]。

在磁路的长度和截面面积不变的情况下,减小导磁体长度相当于增大磁路在空气中的穿越长度,减小了相对导磁率,使得磁阻大幅度增加,导致鼓瓦整体的加热功率随之降低,从而对温度场产生影响。

为研究不同长度导磁体对温度场的影响,准备了长度为160,165,170和192 mm的导磁体作为电磁感应加热试验材料。电磁感应加热试验的仪器有温控器、时间继电器、测温仪、加热器和鼓瓦。

采用磁吸式热电阻直接贴附在鼓瓦表面的方法进行测温,如图3所示。相较于热电偶,热电阻准确度高(可达1 mk),并且输出信号大、灵敏度高、测温范围广、稳定性好。热电阻测温无需参考点,温度值可由测得的电阻值直接求出,输出线性好。而热电偶测温必须有参考端并且温度要保持恒定,在高温或长期使用,因受被测介质影响或气氛腐蚀作用(如氧化、还原)等而发生劣化,因此不适合在工作环境较差的条件下进行测温。

由于测温仪端口有限,选取5个有代表性的点作为鼓瓦的测温点,测温点布置如图4所示。为方



图3 磁吸式热电阻

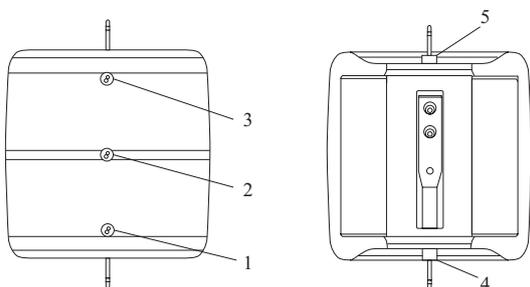


图4 测温点位置示意

便对照,4种长度导磁体的电磁线圈绕组布线方式均采用两段式,总电磁线圈圈数均为24,并且加热同一块鼓瓦。

2.2 导磁体截面尺寸

在电磁感应加热过程中,导磁体在高频电流作用下会发热,当导磁体承受过高的功率时会产生比较严重的铁损。在之前试验中所使用导磁体的截面尺寸均为15 mm×15 mm,导磁体两端会产生一定程度的铁损,虽然不严重,但不利于导磁体的长期使用。

磁滞损耗的机理是磁通密度滞后于驱动磁场^[11]。其功率损耗为

$$P_h = C_a \times f^x \times B^y \quad (2)$$

式中, P_h 为磁滞损耗, C_a , x 和 y 为常数, f 为交变磁场频率, B 为磁通密度峰值。

而涡流损耗是由磁通在导磁体中引起的小涡流造成的,这些涡流以热的形式损耗,其能量的损耗可以表示为

$$P_e = (C_b \times f^2 \times B^2 \times A_e) / \rho \quad (3)$$

式中, P_e 为涡流损耗, C_b 为常数, A_e 为导磁体的有效截面面积, ρ 为电阻率。在 f 和 B 一定的情况下,可以通过增大 A_e 或采用高电阻率的材料来减小涡流损耗,降低导磁体自身的功率损耗,从而达到降低其工作温度的目的。

为减小导磁体的铁损,延长导磁体的使用寿命,通过增大其截面面积来减小涡流损耗,试验准备了长度为170 mm,截面尺寸分别为20 mm×15 mm和25 mm×15 mm的导磁体。

3 结果与讨论

3.1 导磁体长度

不同导磁体长度电磁感应加热鼓瓦的温升曲

线如图5所示。

从图5可以看出,当导磁体长度从192 mm减小至170 mm时,鼓瓦两端(4和5号点)的温度从152 ℃降低至143 ℃,与鼓瓦其他部位的最大温差从30 ℃降低至10 ℃。分析可得减小导磁体的长度能够降低鼓瓦两端磁力线的密度,从而降低鼓瓦两端的温度,使得鼓瓦表面的电磁感应加热更加均匀。

从图5还可以看出:随着导磁体长度的减小,鼓瓦两侧(1和3号点)温升曲线的升温速率逐渐减小,当导磁体长度从170 mm减小至160 mm时,鼓瓦两侧的最终温度从137 ℃降低至125 ℃,与此同时鼓瓦两端的最终温度只下降了6 ℃,使得鼓瓦表面的最大温差从10 ℃增加到16 ℃。分析原因为导磁体长度减小,磁路磁阻增大,从而导致加热功率减小。

综上所述,当导磁体长度为170 mm时,直压硫化内模电磁感应加热最为均匀。

3.2 导磁体截面尺寸

不同导磁体截面尺寸的电磁感应加热鼓瓦的温升曲线如图6所示。

从图6可以看出,截面尺寸为20 mm×15 mm和25 mm×15 mm导磁体的最高加热温度分别为152和155 ℃,相较于截面尺寸为15 mm×15 mm导磁体的最高加热温度(143 ℃),均有大幅度提升。这是因为导磁体的截面面积增大,导磁体自身的功率损耗减小,整体加热功率提高。在温度均匀性方面,由于导磁体截面尺寸的变化对鼓瓦表面温度场产生影响,导致截面尺寸为20 mm×15 mm和25 mm×15 mm导磁体的最大温差分别增大至12和15 ℃。虽然增大了导磁体的截面尺寸后,电磁感应加热的温度均匀性有所降低,但导磁体铁损的问题得到了解决。

在经历了多轮电磁感应加热试验,导磁体的两端只有轻微变色,并未出现铁损现象,这证明增大导磁体的截面尺寸可以减小其涡流损耗和功率损耗,有效解决了导磁体铁损的问题。在充分考虑导磁体的使用寿命后可得,导磁体截面尺寸为20 mm×15 mm时直压硫化内模电磁感应加热效果最好。

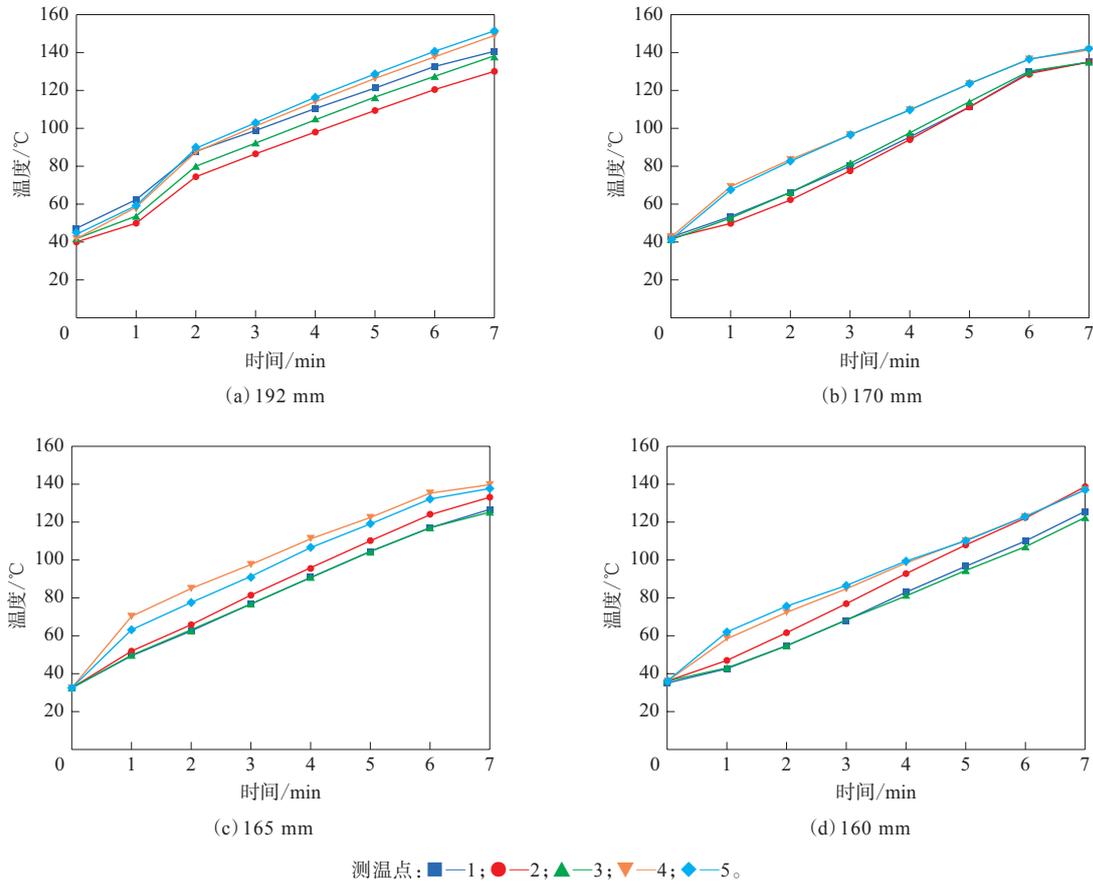
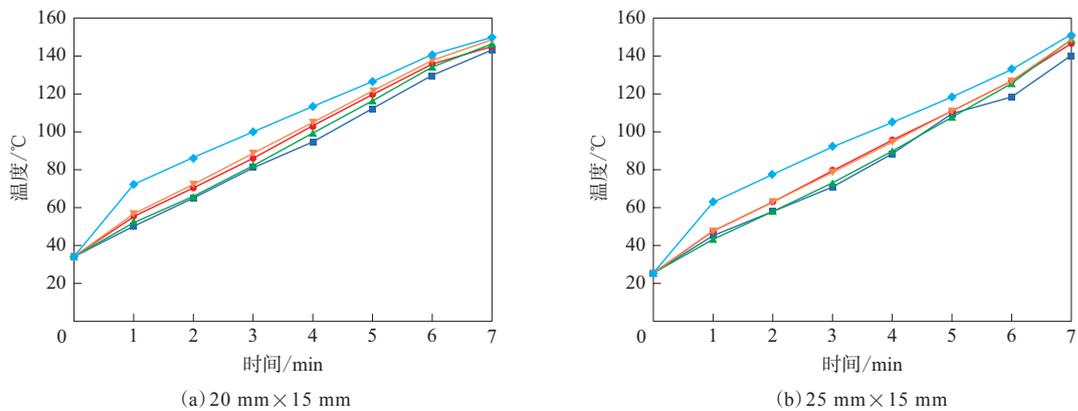


图5 不同导磁体长度电磁感应加热鼓瓦的温升曲线



注同图5。

图6 不同导磁体截面尺寸的电磁感应加热鼓瓦的温升曲线

4 结论

(1) 减小导磁体的长度可使得鼓瓦两端磁力线密度下降,降低鼓瓦两端过高的温度,使电磁感应加热更均匀,但同时会增大磁路中的磁阻,导致鼓瓦的加热功率下降。鼓瓦两侧的温度对于导磁

体长度的减小更加灵敏,当导磁体的长度小于170 mm时,相比于鼓瓦两端的温度下降,鼓瓦两侧温度下降的幅度更大。当导磁体长度为170 mm时,直压硫化金属内模电磁感应加热最为均匀。

(2) 增大导磁体的截面尺寸虽然会使得电磁感应加热均匀性有所降低,但可以减小导磁体的

涡流损耗和功率损耗,有效解决了导磁体铁损的问题。当导磁体的截面尺寸为 $20\text{ mm}\times 15\text{ mm}$ 时,直压硫化金属内模电磁感应加热效果最好。

参考文献:

- [1] 于清溪. 轮胎的绿色特性与发展[J]. 橡塑技术与装备,2013,39(1): 21-32.
- [2] 李昭,傅乃霁,王小娟,等. 轮胎硫化研究概况[J]. 科技创新导报,2012(17):82.
- [3] 潘星,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,2020,67(9):706-708.
- [4] 王曜辉. 阶梯式轮胎硫化内模设计与轮胎力学性能的研究[D]. 北京:北京化工大学,2020.
- [5] 谭晶,谭敏,杨卫民,等. 轮胎电磁感应加热直压硫化模具内鼓瓦感应线圈的优化设计[J]. 北京化工大学学报(自然科学版),2021,48(3):99-105.
- [6] 刘斐. 导轨式轮胎直压硫化机构研制与性能研究[D]. 北京:北京化工大学,2015.
- [7] 杨卫民,张金云,张涛,等. 轮胎硫化外模具电磁感应加热装置[P]. 中国:CN 103538188A,2013-11-18.
- [8] 张金云. 高性能轮胎直压定型电磁感应加热智能硫化技术的研究[D]. 北京:北京化工大学,2017.
- [9] ZHANG J Y, WANG B G, LIU X Y, et al. Energy-saving performance and production accuracy of the direct-pressure tire curing technology with an expandable steel internal mold[J]. Applied Sciences,2019,10(1):1-15.
- [10] 徐正亚. 高频感应钎焊金刚石砂轮的基础研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2008.
- [11] 李小银. 轴承套圈中频感应淬火导磁体的改进[J]. 金属热处理,2001(5):39.

收稿日期:2022-08-14

Experimental Study on Electromagnetic Induction Heating Uniformity of Inner Metal Mold in Direct Compression Vulcanization Process

JIAO Zhiwei^{1,2}, SUN Jiale^{1,2}, ZHANG Jinyun^{2,3}, WANG Lei^{1,2}, YU Yuan^{1,2}, YAN Hua^{1,2}, YANG Weimin^{1,2}

(1. Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China; 2. National Engineering Laboratory of Tire Design and Manufacturing Technology, Beijing 100029, China; 3. Triangle Tire Co., Ltd, Weihai 264200, China)

Abstract: The influence of the length and section size of the magnetic conductor on the electromagnetic induction heating uniformity of the inner metal mold in direct compression vulcanization was studied. The results showed that reducing the length of the magnetic conductor could reduce the magnetic line density at both ends of the drum pad, making the electromagnetic induction heating more uniform, but it would lead to the decrease of the heating power of the drum pad. When the length of the magnetic conductor was 170 mm, the electromagnetic induction heating uniformity of inner metal mold was the best. Although increasing the section size of the magnetic conductor would reduce the uniformity of electromagnetic induction heating, it could reduce the eddy loss and power loss of the magnetic conductor, effectively solving the problem of iron loss of the magnetic conductor. When the section size of the magnetic conductor was $20\text{ mm}\times 15\text{ mm}$, the effect of electromagnetic induction heating of inner metal mold in direct compression vulcanization was the best.

Key words: internal mold in direct compression vulcanization; electromagnetic induction heating; magnetic conductor; length; section size; iron loss; temperature field

启事 《轮胎工业》《橡胶工业》《橡胶科技》不向作者收取审稿费。任何机构、个人以任何名义向作者收取审稿费均为诈骗行为。请广大作者互相转告,勿信诈骗信息。有任何疑问请及时与编辑部联系。《轮胎工业》《橡胶工业》《橡胶科技》投稿渠道为官方网站 <http://www.rubbertire.com.cn> 与 <http://www.rubbertire.cn>, 任何其他网上投稿渠道均为假冒。