工艺·设备

轮胎直压硫化内模温度的均匀性试验研究

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:研究电磁感应加热线圈的布线方式和绕组间隙对轮胎直压硫化内模电磁感应加热均匀性的影响。结果表明:电磁感应加热线圈的布线方式会对鼓瓦表面的温度场产生影响,2段式绕组电磁感应加热线圈的电磁感应加热均匀性最好;绕组间隙的变动会对鼓瓦表面的温度场产生巨大的影响,当绕组间隙为50 mm时,电磁感应加热线圈的电磁感应加热均匀性最好。

关键词:直压硫化内模;电磁感应加热;布线方式;绕组间隙;温度场

中图分类号:TQ330.6^{+}7 **文章编号**:1000-890X(2023)06-0456-07

文献标志码:A **DOI**:10.12136/j.issn.1000-890X.2023.06.0456

OSID开放科学标识码(扫码与作者交流)

轮胎的生产需要经历前处理、成型和硫化等多道工序,其中硫化作为轮胎生产的重要工序,在一定温度和压力条件下将线性橡胶大分子连接成三维网状结构,赋予胶料实际应用所需的性能[1]。目前轮胎行业大多以蒸汽或热水作为介质为轮胎硫化提供所需的压力和温度,但硫化过程中蒸汽会产生冷凝水,影响温度场的均匀性,并且传统的硫化方式一般会过硫化(蒸汽温度过高或硫化时间过长),难以保证轮胎各部位硫化温度的一致性[2]。随着硫化技术的不断进步,出现了电子束辐射硫化[3]、微波加热硫化[4]和电磁感应加热硫化[5]等新型硫化方式,其中电磁感应加热硫化应用已较广泛[6]。

与传统的硫化加热相比,电磁感应加热速率更快、热量传导效率更高、更符合节能减排的要求,同时还可以解决蒸汽加热硫化过程中产生的冷凝水导致内模上下温度产生偏差的问题,为提高内模加热的均匀性提供了有效方法[7]。

本工作以采用电磁感应加热的直压硫化内模为研究对象,通过理论和试验分析影响轮胎直压硫化内模温度场的因素。

1 直压硫化内模

传统的轮胎硫化工艺依靠高弹性和低刚性的胶囊来确定轮胎的内腔轮廓,以高温蒸汽为介质为胶囊提供硫化温度和硫化压力。但由于胶囊的高弹性和低刚性,难以获得均匀的几何结构和质量分布,并且存在膨胀不完全、不对称及材料易老化等问题,导致轮胎的硫化精度不高,动平衡性和均匀性较差[8]。针对胶囊的上述缺点,开发了采用高刚性和高导热的可控伸缩金属内模来替代柔软胶囊并采用电磁感应加热代替蒸汽加热的直压硫化技术[9]。直压硫化内模如图1所示。

直压硫化内模的电磁感应加热系统主要由鼓

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

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

引用本文:焦志伟,孙嘉乐,张金云,等.轮胎直压硫化内模温度的均匀性试验研究[J].橡胶工业,2023,70(6):456-462.

Citation:JIAO Zhiwei,SUN Jiale,ZHANG Jinyun,et al. Experimental study on temperature uniformity of direct pressure vulcanization inner mold of tire[J]. China Rubber Industry,2023,70(6):456-462.

(a)胀开状态　　(b)收缩状态

图1　直压硫化内模

Fig. 1　Direct pressure vulcanization inner mold

瓦(金属)、线圈绕组和导磁体组成,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2)。工作时,高频电流通入线圈绕组产生高频交变磁场,鼓瓦处于高频交变磁场中而产生涡流,由于鼓瓦自身存在电阻,在涡流的作用下产生热,由此实现电能到热能的转换。

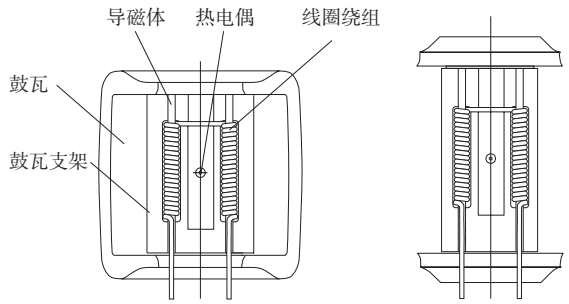


图2　直压硫化内模电磁感应加热系统示意

Fig. 2　Diagram of electromagnetic induction heating system of direct pressure vulcanization inner mold

直压硫化内模的加热主体由鼓瓦组成,由于鼓瓦形状不规则,在交变磁场中难以获得均匀的涡流,并且缠有线圈绕组的导磁体在通电后上下两端的交变磁力线要比其他部位更密集(见图3),导致了鼓瓦在纵向上磁场强度不一致,涡流热效应不均匀。目前直压硫化内模电磁感应加热系统采用的布线方式为每个线圈绕组为单个串联线圈,对称布置在两根导磁体上,线圈绕组在导磁体上的位置水平居中。

经过试验发现采用这种布线方式会使鼓瓦中间的温度明显高于上下两端,且温差在20 ℃以上。而轮胎截面中部的胶料要比两端的胶料少,硫化所需热量也相对较少,因此要尽量避免中部温度过高。为避免鼓瓦中部温度过高,提升鼓瓦表面电磁感应加热的均匀性,本工作选择从电磁

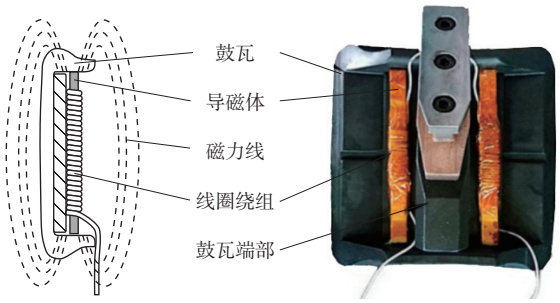


图3　直压硫化内模内模磁力线分布示意

Fig. 3　Distribution of magnetic lines of direct pressure vulcanization inner mold

感应加热线圈入手,通过研究电磁感应加热线圈对温度场的影响,找到降低鼓瓦中部温度、提高电磁感应加热均匀性的电磁感应加热线圈的排布方式。

2　实验

温度场所需要的热源是由鼓瓦在交变磁场中产生的涡流所提供的,根据电磁感应原理,鼓瓦表面各位置涡流的大小与电磁感应加热线圈的电感量呈正比。通过合理调整电磁感应加热线圈,可以调节鼓瓦表面各位置涡流的大小,减小鼓瓦中部和端部的温差,实现鼓瓦表面温度的均匀化。

为了研究电磁感应加热线圈对温度场的影响,本工作以试验为基础,以电磁感应加热线圈的布线方式和绕组间隙为对象,研究其对鼓瓦表面温度场的影响。

2.1　布线方式

电磁感应加热机理非常复杂,要精确表征出鼓瓦电磁感应加热耦合的物理过程十分困难,目前还没有一个完整的耦合理论[10]。在电磁感应加热设备中,电磁感应加热线圈的作用是将输入的电能转换为热能,因此电磁感应加热线圈是电磁感应加热模块的核心部件。根据焦耳-楞次定律和法拉第电磁感应定律[11],可得

$$B=\mu H \tag{1}$$

$$E=-N\frac{\mathrm{d}\varphi}{\mathrm{d}t} \tag{2}$$

$$Q=I^2Rt \tag{3}$$

式中,B为工件产生的磁感应强度,μ为被加热物体的磁导率,H为工件产生的感应磁场强度,E为工件产生的感应电动势,N为电磁感应加热线圈的匝

数，φ为穿过电磁感应线圈回路的磁通量，t为电磁感应的加热时间，Q为电流通过工件产生的热量，I为通过工件的电流，R为工件的电阻。

从式(1)—(3)可以看出，电磁感应的加热时间、被加热物体的物理属性、电磁感应加热线圈的匝数和工件产生的感应磁场强度等因素都将影响电磁感应的加热效果，其中工件产生的感应磁场强度与电磁感应加热线圈的等效阻抗(Z)有关。Z可以表示为

$$Z=F(\sigma,\mu,f,h,r) \tag{4}$$

式中，σ为被加热物体的电导率，f为电源频率，h为电磁感应加热线圈与被加热物体之间的高度差，r为电磁感应加热线圈的结构参数。

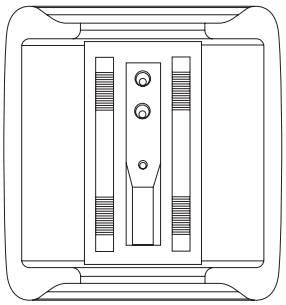
当电源的频率、被加热物体的电导率和磁导率以及电磁感应加热线圈与被加热物体之间的高度差均确定的情况下，电磁感应加热线圈的等效阻抗只与电磁感应加热线圈的结构参数有关。

电磁感应加热线圈的结构参数包括线圈形状、尺寸和布线方式等。布线方式为电磁感应加热线圈结构参数的重要组成部分，通过调整布线方式即可改变电磁感应加热线圈的等效阻抗，进而影响工件产生的感应磁场强度，对被加热物体的温度场分布起着重要的作用[12]。

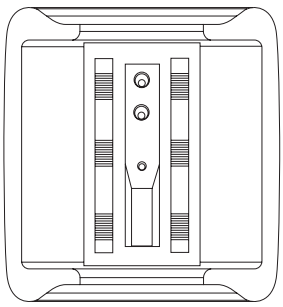
为研究不同电磁感应加热线圈的布线方式对温度场的影响，本工作将每根导磁体上单段式线圈绕组改为2段式线圈绕组、3段式线圈绕组和双层式线圈绕组(见图4)，其中双层式线圈绕组的布线方式为在已缠好的线圈上再叠加1层线圈。为减小其他因素对电磁感应加热试验的影响，4种布线方式均采用相同规格的导磁体，并且每种布线方式的总线圈数均为24。

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。

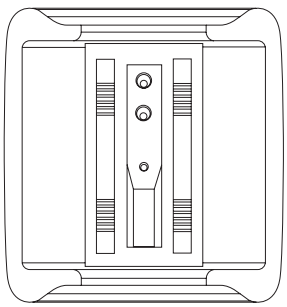
采用磁吸式热电阻直接贴附在鼓瓦表面的方法进行测温，如图5所示。相较于热电偶，热电阻测温准确度高，并且输出信号大、灵敏度高、测温范围广、稳定性好。热电阻测温无需参考点，温度值可由测得的电阻值直接换算出来，输出线性好。而热电偶测温必须有参考端并且温度要保持恒定，在高温或长期使用时，热电偶因受被测介质影响和环境介质腐蚀(如氧化、还原)等而发生劣化，故其不适合在工作环境较差的条件下进行测温。



(a) 2段式



(b) 3段式



(c) 双层式

图4 3种电磁感应加热线圈布线方式示意

Fig. 4 Diagram of 3 kinds of wire distribution modes of electromagnetic induction heating coils

图5 磁吸式热电阻

Fig. 5 Magnetic thermistor

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6所示。

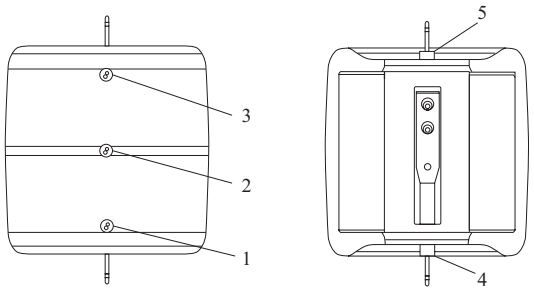


图6　测温点位置示意

Fig. 6　Diagram of temperature measuring point locations

2.2　绕组间隙

被加热物件与电磁感应加热线圈之间的距离直接影响二者之间的耦合效应，对加热效果影响极大。两者距离小，则耦合效果较强，能量转化率高，加热速率快，用时短；若两者距离大，能量转化率低，耦合效果较弱[13]。以2段式绕组的布线方式为基础，通过调整电磁感应加热线圈在导磁体上的具体排列，改变被加热物件与线圈之间的距离，从而调控被加热物件与电磁感应加热体系之间的耦合效应，使鼓瓦表面电磁感应加热更加匀。

为了研究电磁感应加热线圈的绕组间隙（见图7）对电磁感应加热体系温度场的影响，使用相同的导磁体并设置了4种绕组间隙（46，50，52和56 mm）的电磁感应加热线圈。为保证鼓瓦电磁感应加热的对中性，4种电磁感应加热线圈绕组均匀对称分布在导磁体两端。

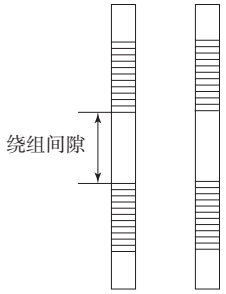


图7　电磁感应加热线圈绕组间隙示意

Fig. 7　Diagram of coil winding group intervals of electromagnetic induction heating coils

3　结果与讨论

3.1　布线方式

不同电磁感应加热线圈布线方式的电磁感应加热鼓瓦的温升曲线如图8所示。

从图8可以看出，加热至7 min时，单段式绕组布线的鼓瓦中部（2号测温点）的温度达到150 ℃，而此时鼓瓦其他部位还不足130 ℃，最大温差多达40 ℃。其他3种电磁感应加热线圈的布线方式相较于单段式电磁感应加热线圈的绕组布线，鼓瓦中部的温度均有所降低，2段式、3段式和双层式绕组的鼓瓦中部温度分别降低10，15和20 ℃。在温度均匀性方面，2段式、3段式和双层式绕组鼓瓦的最大温差分别降低了32，14和22 ℃，相较于单段式绕组鼓瓦，这3种布线方式的鼓瓦的温度均匀性都有所改善，这证明了电磁感应加热线圈的布线方式对感应磁场强度具有影响作用。在所有的布线方式鼓瓦中，2段式绕组鼓瓦各测温点的温升曲线重合度最高，电磁感应加热均匀性最好。

虽然鼓瓦电磁感应加热耦合磁场十分复杂，但通过对4种不同电磁感应加热线圈的布线方式的试验，运用叠加的思想，可以推测出电磁感应加热线圈产生的磁场分布大致情况：线圈产生的磁场，越靠近线圈处，磁感应强度越大。在线圈平面上，其内部圆心处的电磁感应强度最小，沿径向靠近线圈处的磁感应强度逐渐增大，沿径向远离线圈处的磁感应强度逐渐减小；在空间中，线圈附近处的磁感应强度大。因此，将集中于导磁体中间的单段电磁线圈绕组拆分为多段，可有效解决鼓瓦中部温度明显高于其他部位的问题，使鼓瓦表面的温度场分布更加均匀。

3.2　绕组间隙

不同电磁感应加热线圈绕组间隙的电磁感应加热鼓瓦的温升曲线如图9所示（2段式绕组布线）。

从图9可以看出：在加热至7 min时，随着绕组间隙的逐渐增大，鼓瓦中部（2号测温点）的温度从142 ℃降至137 ℃；在绕组间隙逐渐增大的同时，鼓瓦两端与电磁感应线圈之间的距离逐渐减小，受到耦合效应的影响，鼓瓦两端（4和5号测温点）的温度从120 ℃分别上升至140和153 ℃。

从图9中还可以看出，绕组间隙为50 mm时，鼓瓦表面各测温点的加热曲线重合度最高，在加热至7 min时温差控制在8 ℃左右，电磁感应加热均

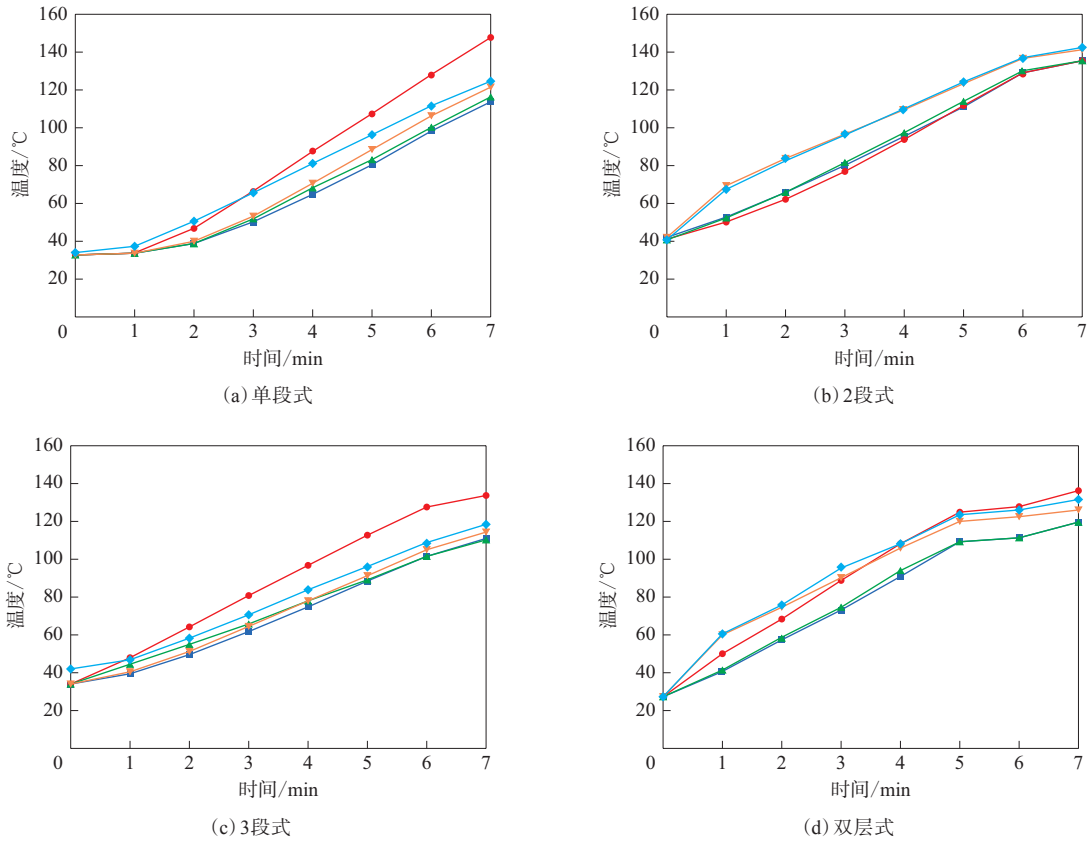


图8 不同电磁感应加热线圈布线方式的电磁感应加热鼓瓦的温升曲线

Fig. 8 Temperature rise curves of electromagnetic induction heating drum pad with different wire distribution modes of electromagnetic induction heating coils

匀性最好。

4 结论

(1) 电磁感应加热线圈的布线方式会对鼓瓦表面温度场产生影响，经试验证明2段式绕组电磁感应线圈的电磁感应加热均匀性最好。

(2) 在确定2段式绕组为电磁感应加热线圈的最佳布线方式后，设计了绕组间隙分别为46，50，52和56 mm的4种电磁感应加热线圈的排布。试验结果表明，绕组间隙的变动会对鼓瓦表面的温度场产生巨大的影响，鼓瓦与电磁感应加热线圈距离较大的部位温度较低，距离较小的部位温度较高；绕组间隙为50 mm的电磁感应加热线圈的加热均匀性最好。

参考文献：

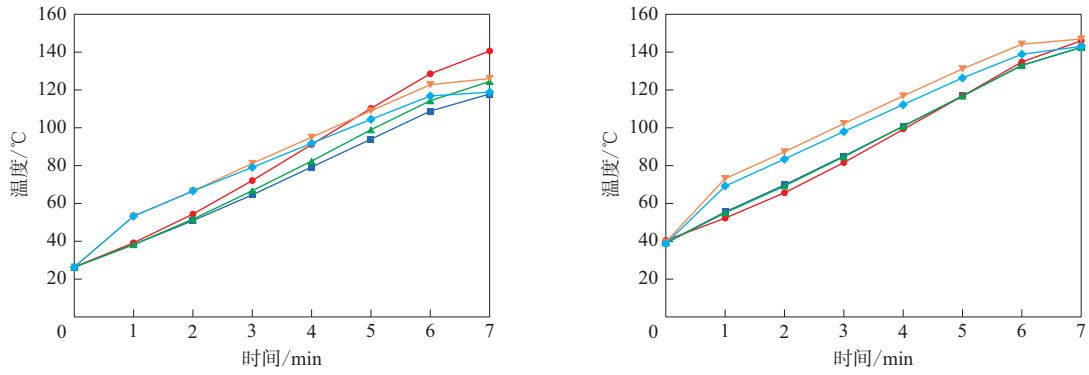
[1] 潘星，王冠中. 电磁感应加热技术在轮胎硫化机上的应用研究[J]. 橡胶工业，2020，67(9)：706-708.
PAN X，WANG G Z. Study on application of electromagnetic induction heating technology in tire vulcanizing machine[J]. China Rubber Industry，2020，67(9)：706-708.

[2] 陈超. 轮胎硫化机电磁感应加热系统研究[D]. 济南：山东大学，2020.
CHEN C. Research on electromagnetic induction heating system of tire curing press[D]. Jinan：Shandong University，2020.

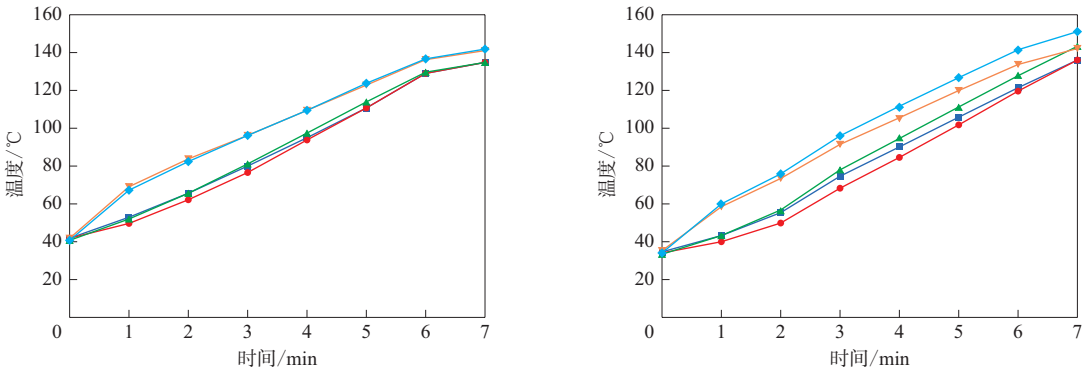
[3] YASIN T，AHMED S，YOSHII F，et al. Radiation vulcanization of acrylonitrile-butadience rubber with polyfunctional monomers[J]. Reactive and Functional Polymers，2002，53(2-3)：173-181.

[4] 唐伟强，郑月军，张海，等. 橡胶轮胎胎坯硫化前微波预热的研究[J].特种橡胶制品，2005，26(4)：56-58.
TANG W Q，ZHENG Y J，ZHANG H，et al. Study on microwave preheating of rubber tire preform before curing[J]. Special Purpose Rubber Products，2005，26(4)：56-58.

[5] 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.
LIU F. Development and performance study of direct pressure curing



(a) 绕组间隙为46 mm　　(b) 绕组间隙为50 mm



(c) 绕组间隙为52 mm　　(d) 绕组间隙为56 mm

注同图8。

图9　不同电磁感应加热线圈绕组间隙的电磁感应加热鼓瓦的温升曲线

Fig. 9　Temperature rise curves of electromagnetic induction heating drum pad with different coil winding group intervals of electromagnetic induction heating coils

mechanism for tire with guide rail[D]. Beijing:Beijing University of Chemical Technology,2015.

[6] 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.
WANG Y H. Research on ladder-type tire curing internal mold and the mechanical properties of tire[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology,2020.

[7] 翟子程. 轮胎直压硫化机的优化设计及工艺研究[D]. 北京:北京化工大学,2018.
ZHAI Z C. Optimization design and process research of tire direct press curing press[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology,2018.

[8] 董燕卓. 注塑机感应加热塑化理论及能耗研究[D]. 北京:北京化工大学,2012.
DONG Y Z. Study on induction heating plasticization theory and energy consumption of injection molding machine[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology,2012.

[9] 张金云,邓世涛,焦志伟,等. 高性能轮胎直压硫化精密制造技术[J]. 橡塑技术与装备,2014,40(5):11-14.
ZHANG J Y,DENG S T,JIAO Z W,et al. Precision manufacturing technology of direct pressing curing for high performance tire[J]. China Rubber/Plastics Technology and Equipment,2014,40(5):11-14.

[10] RUDNEV V. Unique computer modeling approaches for simulation of induction heating and heat-treating processes[J]. Journal of Materials Engineering and Performance,2013,22(7):1899-1906.

[11] 李静. 厚壁件埋弧焊中频感应加热焊后热处理的多场耦合数值模拟[D]. 青岛:青岛科技大学,2017.
LI J. Multi field coupling numerical simulation of post-weld heating treatment of thick-wall part submerged arc welding with medium frequency induction heating[D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology,2017.

[12] 颜跃文. 船舶高强钢焊接电磁感应加热工艺方法研究[D]. 镇江:江苏科技大学,2017.
YAN Y W.Study on the process method of electromagnetic

induction heating for welding of high-strength steel for ships[D].Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology,2017.

[13] 韩硕. 内孔感应加热器的设计及其对大型筒体加热温度场影响的数值研究[D].青岛:青岛科技大学,2018.

HAN S. Design of the inner bore induction heater and numerical study of the its affect on heating temperature field of the large cylinders[D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology,2018.

收稿日期:2023-02-13

Experimental Study on Temperature Uniformity of Direct Pressure Vulcanization Inner Mold of Tire

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

Abstract: The effect of the wire distribution modes and coil winding group intervals of the electromagnetic induction heating coils on the electromagnetic induction heating uniformity of the direct pressure vulcanization inner mold of tire was studied. The results showed that the wire distribution modes of the electromagnetic induction heating coils could affect the temperature field on the surface of the drum pad, and the electromagnetic induction heating coils with the 2-section winding groups provided the best heating uniformity. In addition, the change of the intervals between coil winding groups would have a huge impact on the temperature field on the surface of the drum pad. It was found that, when the coil winding group interval was 50 mm, the electromagnetic induction heating coils had the best heating uniformity.

Key words: direct pressure vulcanization inner mold; electromagnetic induction heating; wire distribution mode; coil winding group interval; temperature field

2023中国(河北)国际塑料橡胶及包装工业博览会在石家庄举办

2023年5月7—9日,河北省橡塑产业协会主办的2023中国(河北)国际塑料橡胶及包装工业博览会在石家庄国际会展中心举办。本届展会以“科技创新、绿色环保、专业客户、OEM精准对接”为主题,总展出面积近2万m^2,吸引了400多家企业参展。

本届展会涵盖了塑料橡胶及包装工业的上、中、下游各个领域,包括塑料橡胶机械设备、原材料、辅助设备、模具、塑料制品、包装机械、轮胎和非轮胎橡胶制品等。

《橡胶工业》《轮胎工业》《橡胶科技》三刊编辑部新媒体平台“橡胶工业传媒”借此次展会,采访或走访了数家企业,包括河北华密新材料科技股份有限公司、山东法恩新材料科技有限公司、河南省开仑化工有限责任公司、河北瑞威科技有限公司、青岛一诺橡胶机械有限公司、山西中埃科技有限公司等的展位。部分企业针对在此次展会上展示的新产品、新技术以及公司未来的发展规划和战略进行了介绍。

中国(河北)国际塑料橡胶及包装工业博览会是由河北省橡塑产业协会主办、石家庄龙威展览服务有限公司承办的一个专业展会,旨在展示先进的塑料橡胶及包装工业的产品、技术和服务,促进国内外企业的交流与合作,推动相关行业的发展与创新。该展会还特别设置了OEM橡塑洽谈会,为企业提供了一个精准对接的平台,帮助企业建立生产和销售产业链,寻找新的商机和市场。

(本刊编辑部 许亚双)