

6-14-2018

Analysis and Simulation of Temperature Control for Battery Pole Piece Electromagnetic Heating Roller

Jing Ran

School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China;

Feng Hua

School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China;

Yonggeng Wang

School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China;

Haiping Song

School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China;

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Original Article is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Analysis and Simulation of Temperature Control for Battery Pole Piece Electromagnetic Heating Roller

Abstract

Abstract: With the application of electromagnetic heating roller on battery pole piece rolling, the processing technology, quality and efficiency of the battery pole piece are improved. The special heating technology of electromagnetic heating roller which involves multi-physics coupling in the process of conversion makes it difficult to control the heating process and determine the control index. *By studying the electromagnetic heating theory, the mathematical model of electromagnetic heating roller is established and the simulation and analysis of the electromagnetic heating roller using MATLAB software and the finite difference method are carried out. The distribution, change rule and influence factors of the temperature field in the heating process of the electromagnetic heating roller are studied and the control parameters are determined, and both of which provide the theoretical basis for the design of control system.*

Keywords

battery pole piece, electromagnetic heating roller, mathematical modeling, simulation analysis

Authors

Jing Ran, Feng Hua, Yonggeng Wang, Haiping Song, and Yanjun Xiao

Recommended Citation

Jing Ran, Feng Hua, Wang Yonggeng, Song Haiping, Xiao Yanjun. Analysis and Simulation of Temperature Control for Battery Pole Piece Electromagnetic Heating Roller[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(6): 2245-2250.

电池极片电磁热辊的温度控制的分析与仿真

井然, 冯华, 王永庚, 宋海平, 肖艳军*

(河北工业大学机械工程学院, 天津 300130)

摘要: 随着电磁热辊在电池极片轧制上的应用, 电池极片的加工工艺、质量和效率得到了提高。但由于电磁热辊加热工艺的特殊性--转换过程中涉及多个物理场耦合, 使其控制参数的确定和加热控制变的困难。通过研究电磁加热相关的理论, 建立电磁热辊与之对应的数学模型, 采用 MATLAB 软件和有限差分法对其加热过程进行仿真分析。研究了电磁热辊加热过程中的温度场的分布、变化规律及影响因素, 确定了控制参数, 为控制系统的设计提供了理论依据。

关键词: 电池极片; 电磁热辊; 数学建模; 仿真分析

中图分类号: TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2018) 06-2245-06

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201806030

Analysis and Simulation of Temperature Control for Battery Pole Piece Electromagnetic Heating Roller

Jing Ran, Feng Hua, Wang Yonggeng, Song Haiping, Xiao Yanjun*

(School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

Abstract: With the application of electromagnetic heating roller on battery pole piece rolling, the processing technology, quality and efficiency of the battery pole piece are improved. The special heating technology of electromagnetic heating roller which involves multi-physics coupling in the process of conversion makes it difficult to control the heating process and determine the control index. By studying the electromagnetic heating theory, the mathematical model of electromagnetic heating roller is established and the simulation and analysis of the electromagnetic heating roller using MATLAB software and the finite difference method are carried out. The distribution, change rule and influence factors of the temperature field in the heating process of the electromagnetic heating roller are studied and the control parameters are determined, and both of which provide the theoretical basis for the design of control system.

Keywords: battery pole piece; electromagnetic heating roller; mathematical modeling; simulation analysis

引言

锂电池的生产过程中, 轧机对极片进行轧制是极片生产过程中非常重要的一道工序, 轧制过程中轧机通过带动轧辊对极片进行碾压。碾压后极片的

压实密度、活性参数是决定极片质量的关键因素。目前, 国内一般采用常温轧辊对极片进行轧制, 轧制后极片的压实密度低、反弹率较高且易对极片造成损伤。在国外, 以日本、韩国为代表的锂电池制造先进国家, 则是采用电磁热辊, 这样不仅能降低极片的反弹率、提高极片的压实密度还能减少对极片表面的活性物质的损伤。相对于国内使用的冷轧辊在极片轧制上改善了生产工艺、提高了生产质量^[1]。因此, 为提高我国锂电池的生产水平, 缩小



收稿日期: 2016-02-22 修回日期: 2016-08-03;
基金项目: 河北省自然科学基金 (E20132022230);
作者简介: 井然(1992-), 女, 河北保定, 硕士, 研究方向为机电一体化成套设备极其关键技术。

<http://www.china-simulation.com>

• 2245 •

与发达国家的差距。必须使用电磁热辊实现由冷轧向热轧的过度。

其次，“电磁感应加热”技术目前发展的较为成熟，且具有加热速度快、加热能耗小、清洁环保的特点，因此使用电磁热辊对提高锂离子电池的质量非常关键。在未来的锂离子电池制造产业以及新能源产业中具有广阔的市场前景。

但电磁加热辊的加热过程中由于涉及的加热理论繁多、能量转换过程复杂。导致控制参数的确定以及加热过程的控制变的困难^[2-4]。加上在实际操作中常用传感器对辊面进行温度测量，由于工业现场环境复杂，导致测量精度低。在这种情况下辊面的温度控制常常仅凭经验控制，缺乏理论支撑，具有一定的工艺不稳定性^[5]。基于此本文通过研究电磁感应加热相关的原理，从电磁场和温度场相互耦合的角度出发对电磁热辊的加热过程进行分析，并在此基础上建立数学模型，并通过 MATLAB 软件进行仿真。求出电磁加热辊加热过程中辊内部温度的瞬态分布以及变化趋势。根据仿真结果，设计控制参数的大小。保证在合理的时间加热到工况所要求的温度，为后续控制系统的设计奠定了基础。保障电磁加热辊安全、有效的使用。

1 电磁场温度场的数学模型

1.1 涡流分布特征

电磁热辊的加热过程：感应线圈内通入动态的交流电产生动态磁场，该磁场与辊体内壁金属管道形成磁回路，磁场切割金属内壁产生涡流，涡流通过辊体自身电阻作用转化为热能，加热辊体表面。在实际加热过程中，涡流在轧辊内部的分布呈不均匀状态，根据上述原理介绍我们可以了解到，利用涡流产生的焦耳热发热，涡流的分布即影响温度的分布，涡流的大小影响温度的大小，基于此首先从涡流分布特征的角度出发对电磁场进行分析。在电磁加热原理中渗透层深度和集肤效应对涡流的分布规律进行了一定的阐述。

1.1.1 集肤效应

集肤效应是指涡流分布从物体与线圈的接触表面向内部方向呈现指数规律衰减的现象，根据集肤效应可推导出，距离接触表面 X 处的涡流强度为^[6]：

$$I_x = I_0 \exp\left(\frac{-x}{ds}\right) \quad (1)$$

式中： I_0 为接触表面的涡流强度(A/m²)； I_x 为距离接触表面 X 处的涡流强度(A/m²)； ds 为渗透层深度(m)。

根据上述公式，可得出电磁热辊内部感生涡流分布的曲线，如图 1 所示。

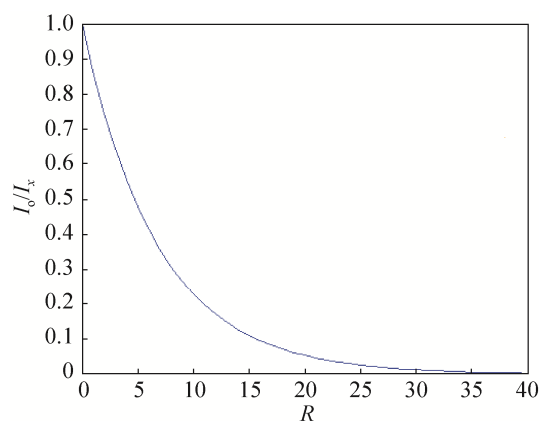


图 1 电磁感应辊内部感生涡流分布

Fig. 1 Internal eddy current distribution in electromagnetic induction roller

由图(1)可知，涡流的分布主要集中于接触表面层，在距离表面 10 mm 左右下降到接触面涡流的 0.1 倍以下，而在 20 mm 以下内部几乎没有涡流。根据电磁热辊利用涡流加热的特点，在不考虑热传导的情况下，涡流分布的状态会导致表面温度高而内部温度低。

1.1.2 渗透层深度

当电磁加热辊内部某一点的感应磁场强度和电流密度下降为接触表面值的 1/E 时，该点到接触表面的距离被称为渗透层深度。该定义的计算公式为：

$$ds = \sqrt{\frac{p}{u_r u_0 \cdot 2\pi f}} = 503 \sqrt{\frac{p}{u_r f}} \quad (2)$$

式中： p 为电阻率($\Omega \cdot M$)； u_r 为相对磁导率； f 为电源频率(Hz)。

在渗透层内部, 其涡流密度的大小为接触表面的 0.368 倍, 当距离延伸至两倍渗透层的大小时, 其涡流密度下降至接触表面 0.135 倍, 这样的数据对轧辊加热来说影响非常小。并且涡流是通过辊体自身电阻作用转化为热能, 其产生的热能大小与涡流平方呈正比, 因此能量衰减的更为剧烈。作用在电磁热辊这样的大尺寸工件上, 可忽略不计, 我们近似的认为, 涡流主要集中在渗透层内部且分布均匀。

1.1.3 材料的物性参数

由式(2)可知, 对加热过程有影响的材料物性参数主要有: 材料电阻率、相对磁导率。在加热过程中受温度变化的影响, 材料的物性参数也会随之改变, 反过来物性参数的变化也会引起加热状态的变化。这种变化在感应加热过程中具有一定的影响。本次研究的电磁热辊的材料为 45 号钢, 目标温度为 120°C, 45 号钢的材料电阻率、相对磁导率的变化规律如图 2~3 所示^[5,7]。

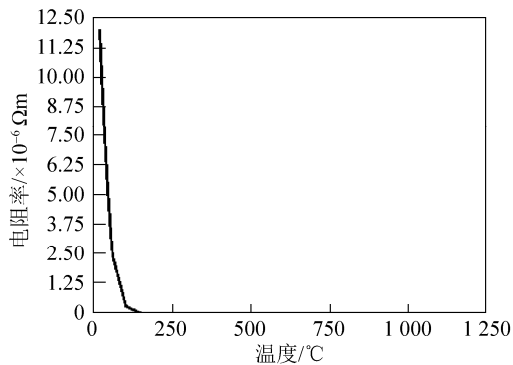


图 2 电阻率与温度的关系

Fig. 2 The relation between resistivity and temperature

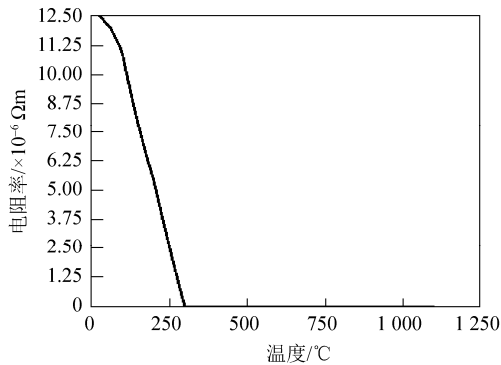


图 3 磁导率与温度的关系

Fig. 3 The relationship between magnetic permeability and temperature

由图 2~3 可知, 当电磁热辊的辊面温度加热至 120°C 左右时, 45 号钢的磁导率变化不大。对渗透层的影响可忽略。根据渗透层的计算公式, 我们可以了解到影响渗透层的主要因素为电源频率。

1.2 感应电源功率分析

根据上述分析, 考虑到电磁感应加热过程的特点, 以及本次研究的电磁热辊感应线圈内置式的特点, 将电磁感应加热辊从 z 向和 r 向两个方向进行离散化处理, 根据上述电磁加热原理的分析, 得出离散处理后的单元格的感应生热功率:

$$Q_{(i,j)} = I_0^2 \cdot 2\pi \Delta z_j p_{(i,j)} \int_{r_i}^{r_{i+1}} \exp\left(2 \frac{r-60}{\delta}\right) \cdot r dr \quad (3)$$

式中: I_0 为接触面电流密度(A/m²); Δz_j 为离散处理的 z 向取值; $p_{(i,j)}$ 为电阻率; r_{i+1} 为单元格外径; r_i 为单元格外径; δ 为渗透层深度。

根据能量守恒定律以及电源总供电功率和电磁感应加热辊的结构特点得出整体的感生功率:

$$P = \eta P_0 = I_0^2 \cdot 2\pi \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} \Delta z_j p_{(i,j)} \int_{r_i}^{r_{i+1}} \exp\left(\frac{r-60}{\delta}\right) \cdot r dr \quad (4)$$

式中: η 为感应加热效率; P_0 为电源供电功率

根据式(4), 将电源供电功率带入到式(4), 计算得出电磁热辊表层电流密度, 再将得出的电磁热辊表层电流密度 带入到公式(3), 推出单个单元格的感应生热功率。将电磁场的总功率作为内热源带入到温度场分析中。

1.3 温度场建模分析

加热过程中电磁热辊的温度场随加热时间的变化而变化, 成不稳定态温度场状, 且其在时间、空间上的变化规律为非线性。但由傅里叶定律可知, 电磁热辊内部的热流量和温度分布之间具有一定的数值关系, 其表达式为:

$$\vec{q} = -\lambda \cdot \vec{T} \quad (5)$$

式中: \vec{q} 为热流密度; \vec{T} 为温度向量。

在根据热力学第一定律的定义, 热量的变化为: 物体与所处环境交换的热 Q 和与所处环境交

换的功 W 的和(差)。将热力学定律以及傅里叶定律相结合, 推出通用的导热方程, 考虑到实际环境中热量传递系数方向的不一致性, 导热方程的微分形式为^[8-10]:

$$pc \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) - q_v = 0 \quad (6)$$

式中: p 为材料密度; c 为材料比热容; λ 为材料的导热系数; q_v 为热源。

本文研究的电磁热辊在结构上采用的是内置式感应线圈, 其形状可近似被认为是同心圆柱体, 因此建立在圆柱坐标系下的微分方程为:

$$pc \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial \phi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q_{\text{内}} \quad (7)$$

由于同心圆柱具有一定的轴对称行, 因此本文主要从 R 向和 Z 向两个方向对电磁热辊进行建模讨论。因此建立有源情况下的二维圆柱坐标系方程:

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{Q_{\text{内}}}{\lambda} \quad (8)$$

对于上述微分方程的求解, 通过显示差分方程进行代替, 将电磁热辊看做同心圆柱, 从 Z 向和 R 向两个方向进行离散化处理, 图形示意图见图 4。

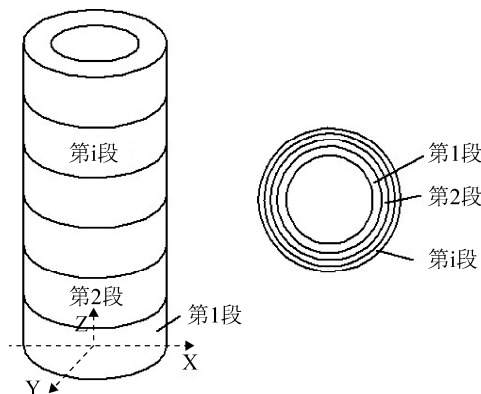


图4 电磁加热辊离散化处理示意图

Fig. 4 A schematic diagram of discrete treatment for electromagnetic heating roller

对瞬态热传导问题进行数值分析的基本手段是有限差分方程代替微分方程, 得到有源非稳态二维圆柱坐标系下的导热式差分方程:

$$T_{(i,j)}^{n+1} = \frac{\alpha \cdot \Delta t}{\Delta z^2} \cdot T_{(i+1,j)}^n + \frac{\alpha \cdot \Delta t}{\Delta z^2} \cdot T_{(i-1,j)}^n + \left(\frac{\alpha \cdot \Delta t}{\Delta r^2} + \frac{\alpha \cdot \Delta t}{r \Delta r} \right) \cdot T_{(i,j+1)}^n + \frac{\alpha \cdot \Delta t}{\Delta r^2} \cdot T_{(i,j-1)}^n + \left(1 - \frac{2\alpha \cdot \Delta t}{\Delta r^2} - \frac{\alpha \cdot \Delta t}{r \Delta r} - \frac{2\alpha \cdot \Delta t}{\Delta z^2} \right) T_{(i,j)}^n + \frac{Q_{(i,j)} \cdot \alpha}{\lambda} \quad (9)$$

式中: $\alpha = \frac{\lambda}{pc}$ 为材料的热扩散率; $T_{(i,j)}^{n+1}$ 为位于 (i,j)

这一点在 $N+1$ 时刻的温度。

根据电磁感应加热的特点, 边界条件判定为温度场第三类边界条件, 热量交换规律遵从傅里叶定律和牛顿散热公式。热传导方式考虑对流和辐射, 因此边界条件的表达式为:

$$-\lambda \vec{T} = h_K (T_a - T) + h_R (T_a - T) \quad (10)$$

式中: h_K 为对流换流系数; h_R 为热辐射系数; T_a 为介质温度。

2 数值模拟

2.1 分析流程

通过上述对电磁场和温度场的分析, 确定电磁场、温度场的耦合分析过程。利用 MATLAB 进行仿真计算。根据以得出的分析方程, 确定分析过程中的时间步长, 保证仿真分析的电磁热辊内部的温度场的计算精度满足要求。

在上述的分析中可知: 电磁加热过程是电磁场和温度场相互耦合影响的过程。将感应加热物理模型在空间上进行离散化处理。在选定的时间步长内, 根据仿真条件, 首先对电磁场进行分析, 计算渗透层深度、电流密度、单元格的感应生热功率。将计算结果带入到求出的导热式差分公式中, 对这一时刻的温度场进行分析, 得出当前时刻的温度场分布。根据温度场分析结果, 判断电磁场和温度场在当前温度分布下的 45 号钢的物性参数值, 带入到下一个采样时间的迭代计算。依次循环进行, 分析流程图如图 5 所示。

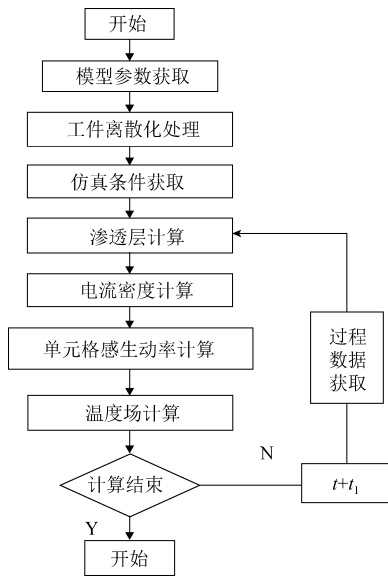


图 5 分析流程图

Fig. 5 Flow chart of analysis

2.2 仿真结果

进根据上述的分析流程利用 MATLAB 进行仿真, 仿真条件为: 加热时间确定为 60 s; 时间步定为 1 s; 计算中取定初始温度为 20 °C; 相对磁导率 20 °C 下为 200; 导热系数 20 °C 下为 32.1 W/(m·K); 比热容 20 °C 下为 460 J/(kg·K); 热辐射系数为 0.7; 电阻率 20 °C 下为 5.9E-7(Ω·M); 轧辊尺寸为 200 mm× 1210 mm; 通过改变电源的供电功率和电源频率的大小, 来计算不同工况下电磁热辊内部不同位置的温度变化情况。工况取以下 3 种: A: 频率 1.6 kHz, 功率 10 kW; B: 频率 16 kHz, 功率 10 kW; C: 频率 16 kHz, 功率 5 kW。以接触表面和距离接触面 38 mm 处为例进行模拟。图 6~8 为接触表面和距离接触面 38 mm 处的 R 向温度变化曲线。

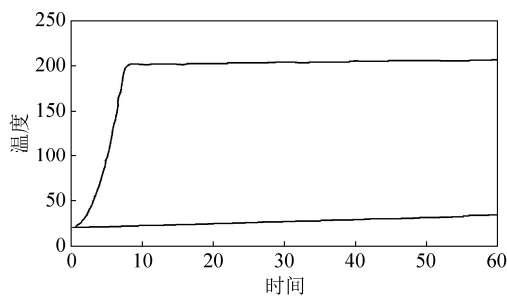


图 6 频率 1.6 kHz, 功率 10 kW

Fig. 6 Frequency 1.6 kHz, power 10 kW

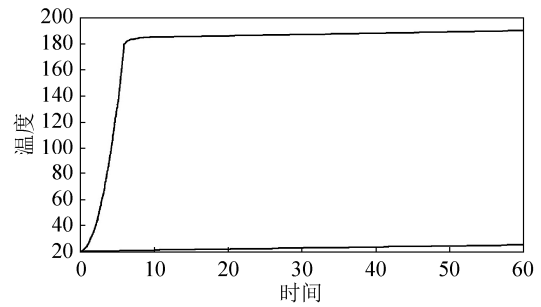


图 7 频率 16 kHz, 功率 10 kW

Fig. 7 Frequency 16 kHz, power 10 kW

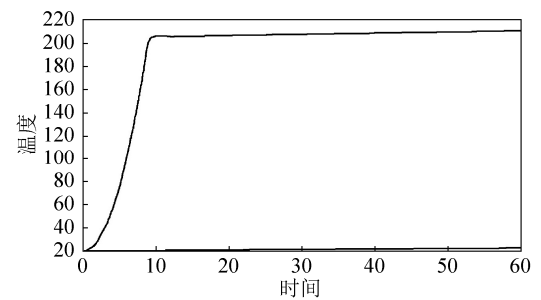


图 8 频率 16 kHz, 功率 5 kW

Fig. 8 Frequency 16 kHz, power 5 kW

电磁热辊辊面 Z 向上的温度分布状况见图 9。

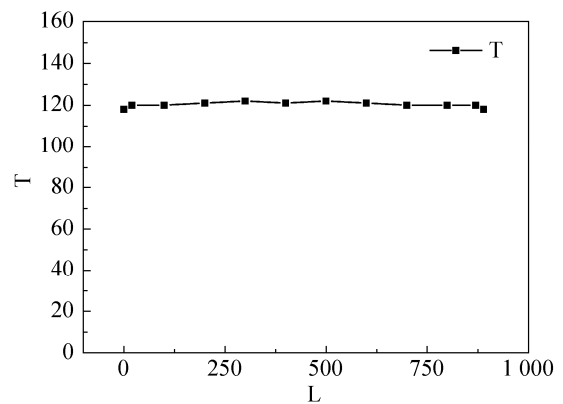


图 9 电磁加热辊辊面 Z 向上的温度分布

Fig. 9 The temperature distribution of Z upward on the surface of the roll surface of the electromagnetic heating roller

(1) 对比 A、B 两种工况的分析结果, 我们了解到在一定的电源功率下, 频率越高, 温度分布越集中在感应加热接触表面, 即电磁热辊内壁, 不利于电磁热辊表面的加热。频率越低, 渗透层越大, 温度分布方向逐渐靠近电磁热辊表面, 但频率过低, 导致感应电源工作在非谐振状态。影响感应电源功率的感应加热效率。综合考虑上述两种因素,

感应电源的输出频率控制在 16~24 kHz。

(2) 对比 B、C 两种工况的分析结果，在频率一定的情况下，功率越大，电磁热辊表面温度变化越快。温度越高，但温度过高，会造成电磁热辊的损坏以极不必要的损失。根据分析结果电磁热辊的功率控制在 10 kW 左右。

(3) 在功率、频率不能改变的情况下，可通过延长加热时间来达到目标温度，但加热时间不能过长，否则会引起工件温度超高，加热时间不足，又不能将电磁热辊加热到固定的温度。根据实验结果，加热时间在 25 min 左右，之后进入均热状态。

(4) 由图 7 可知，电磁热辊辊面在轴向上的温度分布误差在 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 左右，基本满足生产要求。

3 结论

本文从电磁场和温度场相互耦合的角度出发，在 MATLAB 软件下开发了电磁热辊磁场温度场模型，模拟了 3 种不同工况下的电磁热辊不同位置的温度变化情况。分析出电源频率、电源功率以及加热时间对加热状态的影响。根据对比仿真结果和电磁热辊的工作要求，确定了控制指标，保证了在能源合理利用的基础上在合理的时间加热到工况所要求的温度，为后续控制系统的。

参考文献：

- [1] 陈功, 许清泉, 朱锡芳, 等. 锂电池极片质量监控系统的设计和实现[J]. 仪表技术与传感器, 2013, (12): 87-89.
Chen Gong, Xu Qingquan, Zhu Xifang, et al. Design and implementation of the lithium-ion battery electrode quality monitoring system and implementation of[J]. instrument technology and sensors, 2013, (12): 87-89.
- [2] 王文成. 轧辊感应加热系统开发[D]. 天津: 天津工业大学, 2012.
Wang Wencheng. Roll induction heating system development[D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2012.
- [3] 朱绍军. 电磁感应加热在热整理机中的应用[D]. 浙江:

浙江大学, 2012.

Zhu Shaojun. Application of electromagnetic induction heating in heat finishing machine [D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2012.

- [4] 张增至. 模具表面涂层技术的应用与发展[J]. 铸造技术, 2011, 32(1): 114-117.
Zhang Zengzhi. Application and development of die surface coating technology and development of[J]. casting technology, 2011, 32 (1): 114-117.
- [5] 杨建鸣, 秦义. 圆柱体工件高频感应熔涂温度场数值模拟[J]. 铸造技术, 2012, 33(4): 419-422.
Yang Jianming, Qin Yi. Numerical simulation of high frequency induction melting temperature field of cylindrical workpiece by [J]. casting technology, 2012, 33 (4): 419-422.
- [6] 王文成, 张国文. 轴型工件感应加热温度控制系统开发[J]. 计算机与应用化学, 2012, 29(7): 773-778.
Wang Wencheng, Zhang Guowen. Development of induction heating temperature control system for axial workpiece[J], computer and Applied Chemistry, 2012, 29 (7): 773-778.
- [7] 《机械制造工艺材料技术手册》编写组. 机械制造工艺材料技术手册(第一册)[M]. 北京: 机械工业出版社, 1993.
"manual of mechanical manufacturing technology materials". The manual of mechanical manufacturing technology materials (Volume 1)[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 1993.
- [8] 李金娥. 非傅里叶热传导方程及热应力的数值解[D], 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
Li Jine. Numerical solution of non Fourier heat conduction equation and thermal stress[D], Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
- [9] 张月红, 王马华. 感应加热参数对钢件温度分布的影响[J]. 金属热处理, 2011, 36(9): 61-64.
Zhang Yuehong, Wang Ma Hua. Effect of induction heating parameters on the temperature distribution of steel parts[J]. Metal heat treatment, 2011, 36(9): 61-64.
- [10] 肖述文. 热辊压机轧辊加热过程热应力分析和试验研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2015.
Xiao Shuwen. The Analysis of Heating Process and Thermal Stress of the Roll of the Hot Press Mill and Experimental Study[D], Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2015.