

低功耗新型均匀加热的高频电磁加热装置

许朝曦^{1,2,3}

(1. 厦门大学化学化工学院, 福建 厦门 361005; 2. 南京睿元光电科技有限公司, 江苏 南京 211300;
3. 厦门阿尔特系统工程有限公司, 福建 厦门 361005)

[摘要] 针对高频加热装置目前存在加热效率低下、耗电量大、加热温度不均匀等缺点, 基于电磁场基本理论与平行磁场同向矢量叠加磁场增强原理, 研究发明了一种新型温度场均匀分布、低功耗的高频电磁加热装置。通过仿真实验对电磁线圈的排列方式、线圈匝数、线圈之间的间隔以及线圈与加热板距离等结构及参数进行优化研究, 获得平行线圈之间的最佳优化间隙为 15 mm, 导磁加热板和加热线圈的最佳距离为 5 mm, 实现了低功耗、中心和边缘加热温差小的性能。

[关键词] 高频电磁加热; 低功耗; 温度均匀分布

[中图分类号] O 441

Low Power Novel High-Frequency Electromagnetic Heating Device with Uniform Heating

XU Zhaoxi^{1,2,3}

(1. College of Chemistry and Chemical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China;
2. Nanjing Ruiyuan Optoelectronic Technology Co., Ltd., Nanjing 211300, China;
3. Xiamen Aerte System Engineering Co., Ltd., Xiamen 361005, China)

Abstract: In view of the disadvantages of high frequency heating devices such as low heating efficiency, large power consumption and uneven heating temperature, a new type of high frequency electromagnetic heating device with uniform distribution of temperature field and low power consumption is proposed based on the basic theory of electromagnetic field and the principle of parallel magnetic field co-directional vector superposition magnetic field enhancement. Simulation experiments were conducted to optimize the design parameters, including the arrangement of the electromagnetic coils, the number of coil turns, and the interval between the coil and the heating plate. The results indicate that the optimal spacing between the parallel coils is 15 mm, while the ideal distance between the magnetic conductive heating plate and the heating coil is 5 mm. This configuration brought about low power consumption and minimized the temperature difference between the center and the edge of the heating area.

Keywords: high-frequency electromagnetic heating; low power consumption; uniform temperature distribution

[收稿日期] 2024-09-23

[基金项目] 南京领军型科技创业人才引进计划项目“微射流水波导激光加工设备”(UID2450863)

[作者简介] 许朝曦(1970—), 从事激光光电技术、激光声雷达、无损检测、精密测量、高频电磁加热等方面研究及相关设备研制。E-Mail: xcxdawn@163.com

<http://xuebaobangong.jmu.edu.cn/zkb>

0 引言

电磁加热装置是一种利用电磁加热技术对物体加热的装置，广泛应用于工业、家电、医疗领域。其实质是利用电磁感应在导磁金属材料内部产生涡流，对工件进行加热。传统的电磁加热装置由感应线圈、中高频电源、整流电路和逆变电路组成。然而，由于其设备复杂、投资高、加热不均匀、耗电量大、加热温度分布不均匀，容易出现局部过热和汽化^[1]。

国外研究电磁感应加热技术较早，而国内起步较晚^[2-3]。目前，已有不少学者对高频电磁加热装置进行研究。王园武等^[4]研究了感应线圈参数对钢板温度场的影响及线圈尺寸选取的问题，建立了电磁加热钢板的数学模型。Ye等^[5]研究一种高效、精确的有限元网格简化方法，实现了厚板（线性变形）在电磁感应加热下的小挠度弯曲数值模拟。针对电磁加热技术的磁热耦合有限元分析，包括不同结构的温度特性磁热耦合、计算方程的简化与实验验证等方面，正在开展研究。董智东等^[6]针对电磁感应加热系统，运用电磁场和温度场的基本理论及有限元分析方法，对实际产品中的三种常见结构的电磁炉绕线组进行磁感应强度和温度场的耦合分析，研究了不同形态绕线组在同样工况下对锅具电磁场和温度场的影响。

综上所述，目前国内外对于线圈盘不同结构对加热均匀性影响方面的研究较少，而现有的加热均匀性设计提升主要考虑绕线组内部导线间距的优化，还未从电磁场基本理论与磁场矢量叠加同向增强基本特性方面进行研究。因此，从线圈盘电磁线圈结构布局来优化设计，是有效实现提升线圈加热温度均匀性的另一途径，具有较好的研究价值和市场前景。针对现有电磁加热装置中加热不均匀以及功耗大的问题，本文基于电磁场基本理论与磁场矢量叠加同向增强基本特性，提出了一种采用加热平行线圈均匀分布的新型高频电磁加热装置。

1 工作原理与数学模型

如图1所示，基于法拉第电磁感应定律，电磁感应加热装置是由一个交流电源产生的，它利用高频电磁波感应加热原理将50 Hz的交流电转化为高于20 kHz的高频电流，经过电感线圈产生高频磁场。这个磁场与线圈形状和电流大小、频率有着相应的联系，当交变的磁场穿过导磁加热板时，会在导体内感生出频率相同、方向相反的感应电动势和感应电流。根据频率变化的不同而使被加热导磁加热板不断切割磁力线产生不同的涡流，导致加热板原子间碰撞，这种运动会使加热板内部产生大量的热量^[7]。这个热量会使得导体的温度升高，从而达到加热的目的。

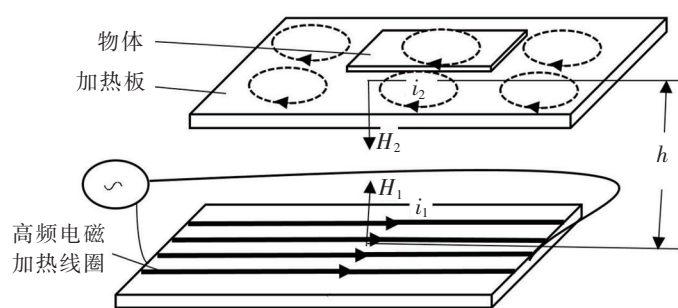


图1 电磁感应加热原理图

Fig.1 Electromagnetic induction heating principle

这个热量会使得导体的温度升高，从而达到加热的目的。

1.1 涡流效应

利用电磁感应原理产生涡流使被加热导体发热的方法即为感应加热技术，其能量转换过程如图2所示。电涡流效应的强度取决于磁场频率、材料导电率以及导体形状和尺寸等因素。高频磁场会产生更强的涡流效应，导电率越高的材料涡流效应越明显，导体形状和尺寸的变化也会影响涡流电流的路径和分布。

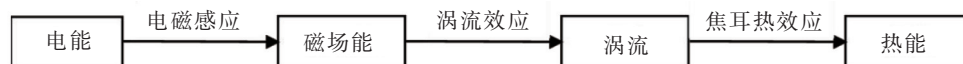


图2 感应加热能量转化过程

Fig.2 Induction heating energy conversion process

1.2 集肤效应

对电磁线圈结构整体布局进行设计时不仅要考虑磁场和温度场的边缘效应,还要考虑导磁加热板表面的集肤效应。这里主要阐述电磁线圈中电流的分布对集肤效应的影响。由于集肤效应的作用,线圈中的电流主要分布在表面。加热导体的电导率、磁导率以及电流频率与加热板表面感应涡流的集肤深度有直接的关系。在实际加热过程中,导磁加热板一经选定,其电导率和磁导率就已确定了。因此,只能通过改变电流频率来改变电涡流的集肤深度。由于电涡流产生的焦耳-楞次热与外加交变电流频率的平方成正比,因此电流频率的大小改变对导磁加热板温度分布有直接影响。

1.3 新型电磁加热装置

本文研究发明的新型电磁加热装置如图 3 所示,电磁线圈采用平行分布的直线线圈,其平行磁场同向矢量叠加使磁场强度增强,达到磁通量场最大化,并对电磁线圈的线圈匝数、线圈之间的间隔以及线圈与加热板距离等结构及参数进行了优化。由于通电导线采用平行均匀分布,可以产生均匀分布的磁力线,从而在导磁加热板产生均匀分布的电涡流,实现加热板加热温度均匀。采用平行线圈,在某一时刻磁场矢量同向叠加获得最大的磁能,可以感应出最大电涡流,从而产生最大的热能。引入最佳中心间隙后有利于磁场进一步集中,在其余条件不变的情况下能在相同加热时间达到更高的加热温度,降低了功耗。

在电磁加热过程中,热量首先在被加热物体的表面产生,并通过热传导方式向物体内部传递。温度分布模型描述了物体内部温度随时间和位置的变化规律。对于一维导磁加热板,可以使用热传导偏微分方程 $\frac{\partial u}{\partial t} = k \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$ 来描述温度 u 随时间 t 和位置 x 的变化。其中: k 是物体的热导率。而对于二维或三维情况,需要引入更多的空间变量,并相应地修改热传导方程。

磁场叠加规则一般适用于线性磁场的叠加,磁场方向相同则叠加后的磁感应强度增强;磁场方向相反则叠加后的磁感应强度减弱。图 4 中任意形状的载流导线在给定点 P 产生的磁场,等于各段电流元在该点产生的磁场的矢量和 $\mathbf{B} = \int_L d\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{I d\mathbf{l} \times \mathbf{r}}{r^3}$ 。从图 4 可以看出,在某一时刻各处磁场分矢量叠加在 P 点处的磁场强度。

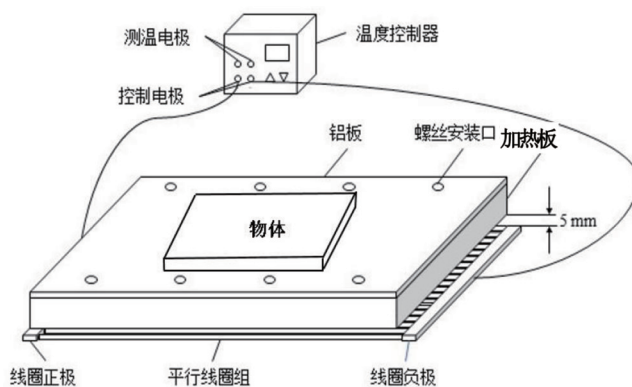
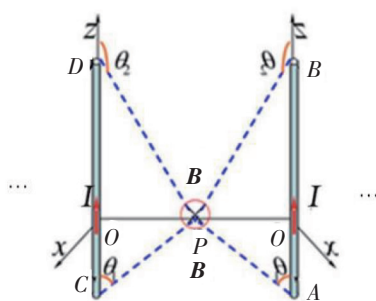
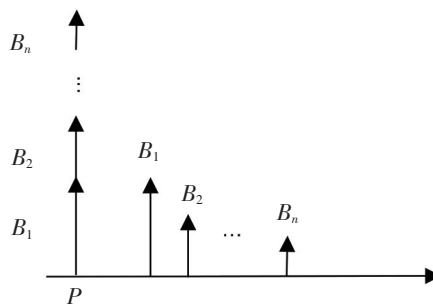


图 3 高频电磁加热装置系统原理图

Fig.3 The schematic show of a high frequency electromagnetic heating system



a) 各加热导线在某一时刻在 P 点产生的磁场强度



b) 各分矢量的叠加图

图 4 平行加热点在空间 P 点磁场强度叠加图

Fig.4 Superposition of magnetic field intensity at P point in space

2 仿真实验与结果分析

保证电磁加热装置产生热量的同时减小能源消耗及加热板的温度均匀性是本研究的重点。根据电磁场基本理论,采用平行线圈使磁场均匀分布;根据平行磁场同向矢量叠加磁场增强的原理,可使磁通量场最大化。使用数值分析软件 COMSOL Multiphysics 对影响电磁加热装置能效的相关因素进行仿真实验,通过模拟不同结构及参数(如电磁线圈的排列方式、线圈匝数、感应线圈的频率、电流、线圈之间的间隔以及线圈与加热板距离等)下的加热过程,可以得到加热板内部的电磁场和温度分布信息,然后对相应结构及参数进行优化研究。

2.1 电磁线圈排列方式

2.1.1 导线并联式(横向)电磁加热

在指定排列线圈区域($440\text{ mm} \times 240\text{ mm} \times 2\text{ mm}$)内和在线圈匝数为300匝、线圈电流为150 A、电流频率为15 kHz、线圈与加热板距离为8 mm的情况下,通过仿真实验调整不同线圈间隙对加热板温差场的影响,如表1和图5~7所示。

表1 对不同线圈间距的仿真结果

Tab. 1 Simulation results of different coil spacings

线圈间距/mm	加热时间/min	最高温度/ $^{\circ}\text{C}$	温差/ $^{\circ}\text{C}$
15	10	185.85	3
30	10	190.85	5
45	10	195.85	8

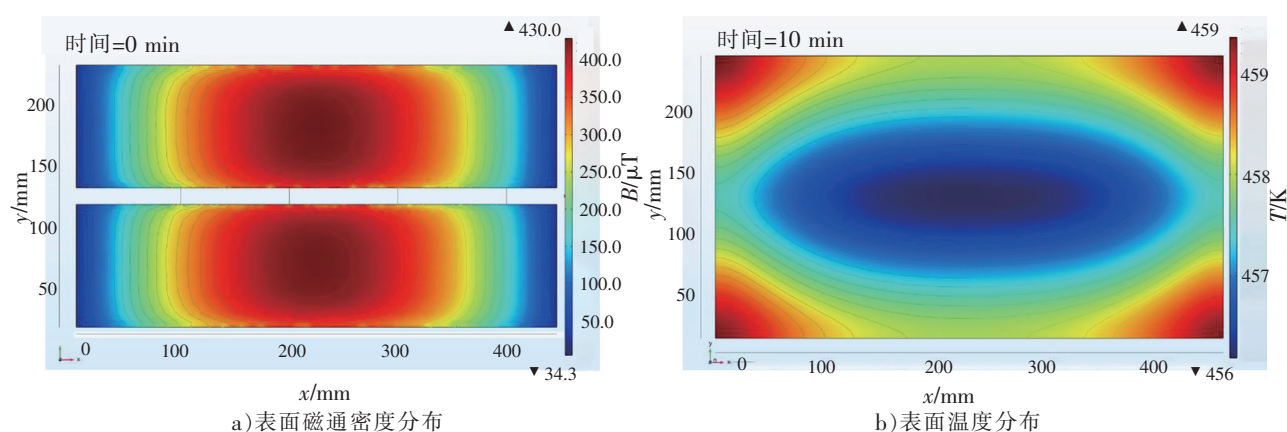


图5 线圈中间间隙15 mm时对加热板的影响

Fig.5 Distribution of coil flux and surface temperature of heating plate while the intermediate gap is 15 mm

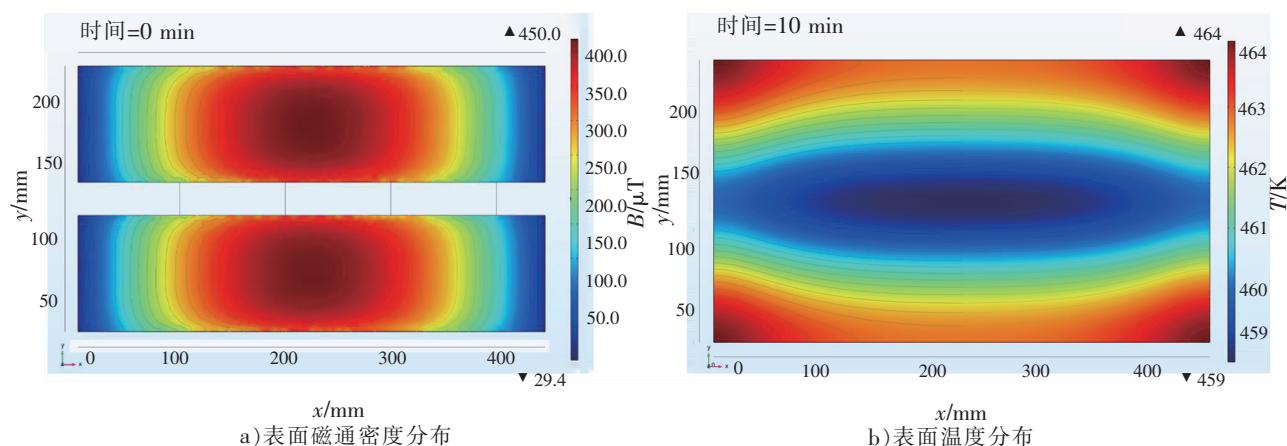


图6 线圈中间间隙30 mm时对加热板的影响

Fig.6 Distribution of coil flux and surface temperature of heating plate while the intermediate gap is 30 mm

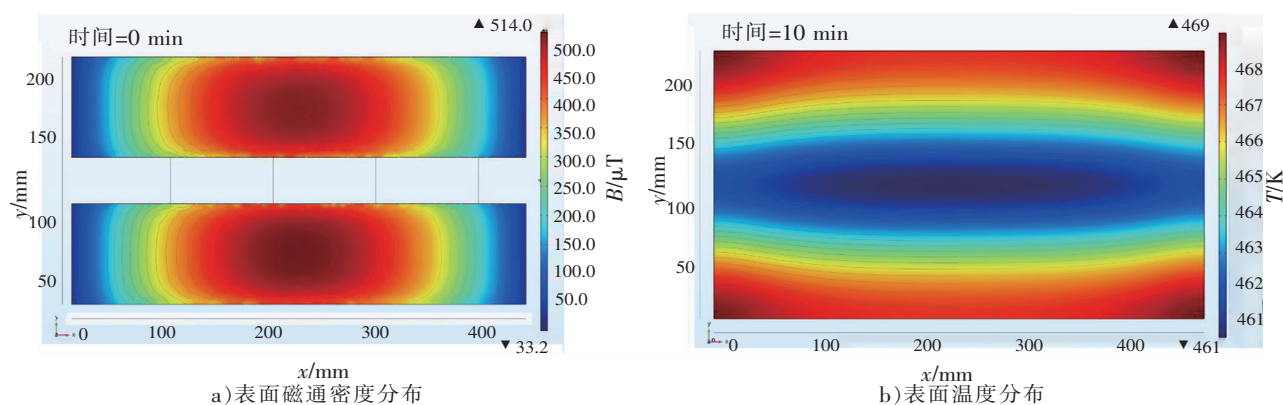


图 7 线圈中间间隙 45 mm 时对加热板的影响

Fig.7 Distribution of coil flux and surface temperature of heating plate while the intermediate gap is 45 mm

2. 1. 2 导线并联式 (纵向) 电磁加热

在指定排列线圈区域 ($440 \text{ mm} \times 240 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$) 内和在线圈匝数为 550 匝、线圈电流为 150 A、电流频率为 15 kHz、线圈与加热板距离为 8 mm 的情况下, 通过仿真实验调整不同线圈间隙对加热板温差场的影响, 如表 2 和图 8 ~ 10 所示。

表 2 对不同线圈间距的仿真结果

Tab. 2 Simulation results of different coil spacing

线圈间距/mm	加热时间/min	最高温度/℃	温差/℃
15	10	182.85	5
30	10	186.85	9
45	10	189.85	14

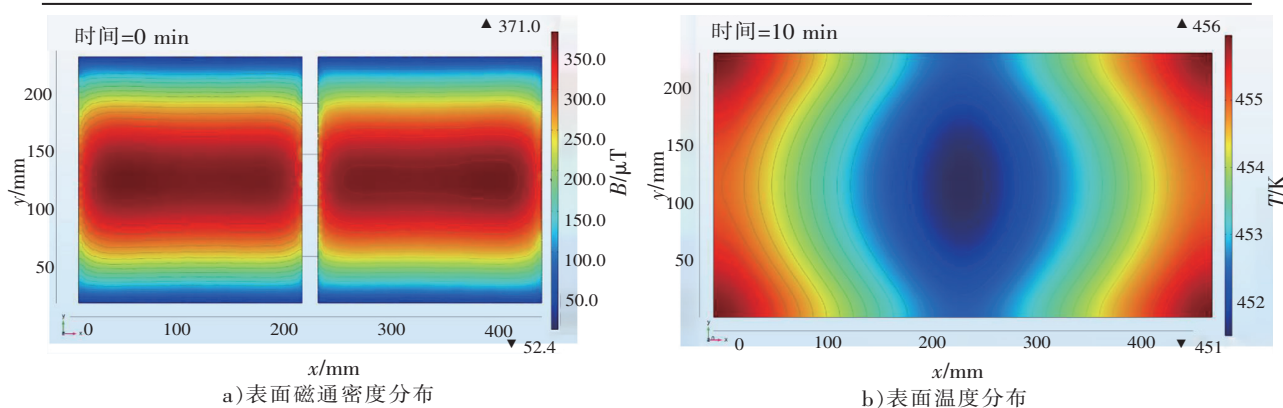


图 8 线圈中间间隙 15 mm 时对加热板的影响

Fig.8 Distribution of coil flux and surface temperature of heating plate while the intermediate gap is 15 mm

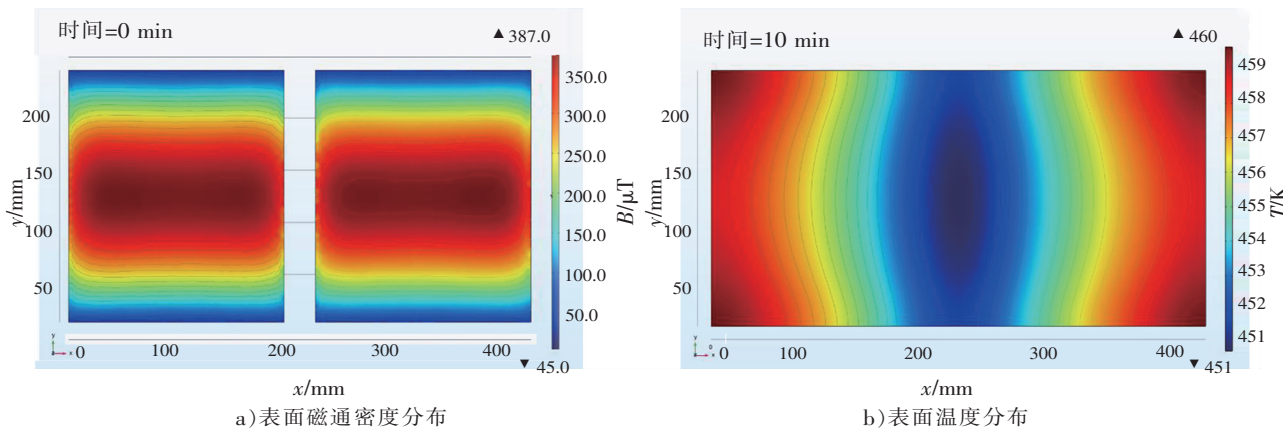


图 9 线圈中间间隙 30 mm 时对加热板的影响

Fig.9 Distribution of coil flux and surface temperature of heating plate while the intermediate gap is 30 mm

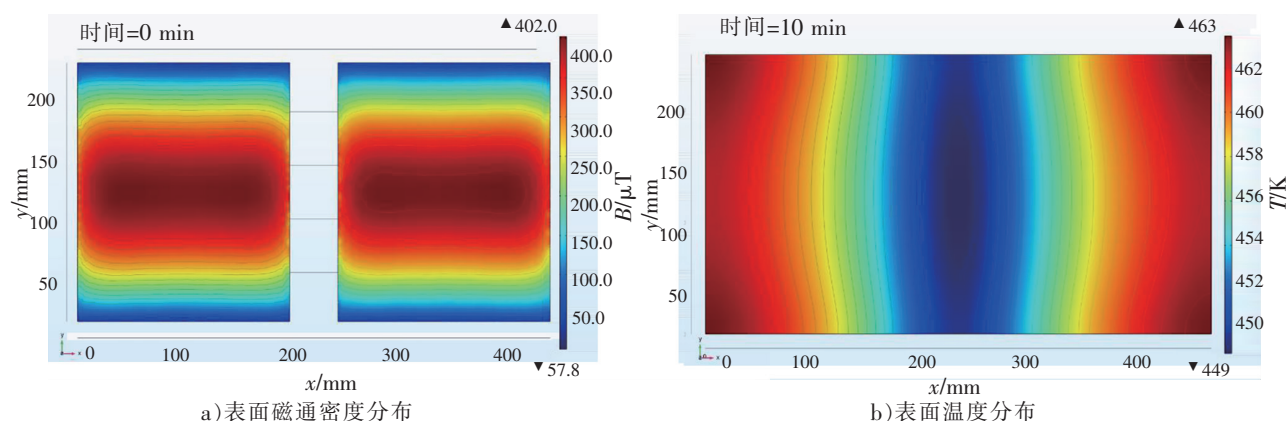


图 10 线圈中间间隙 45 mm 时对加热板的影响

Fig.10 Distribution of coil flux and surface temperature of heating plate while the intermediate gap is 45 mm

2.1.3 实验结果

从上述仿真实验数据可以看出，线圈间距越小，加热板磁通密度越大，相应磁感应强度也越大，产生的电涡流分布越密集均匀，从而感应的热能也越均匀分布，对应表面的温度差越小。采用电磁线圈横向排列，在同等间距的情况下，加热板的温差更小，而且间距 15 mm 为最佳的线圈之间的间距。

2.2 不同参数实验研究

电磁线圈采用横向排列方式，对线圈和加热板间距、不同电流频率、不同线圈匝数、线圈整体宽度等参数对电磁加热影响进行比对实验，获取最佳的参数设置。实验设备如图 11 所示。

2.2.1 线圈和加热板不同间距下的加热效果

在线圈整体宽度、线圈匝数、线圈电流、电流频率、平行导线间距相同的情况下，通过调整线圈和加热板之间不同间距观察加热效果，结果如表 3 所示。从表 3 可以看出，线圈和加热板间距为 5 mm 时，温差最小。



图 11 实验设备实物图

Fig.11 Actual picture of the experimental unit

表 3 线圈和加热板不同间距下的加热效果
Tab.3 Heating effect of coil and heating plate
at different spacings

间距/mm	加热时间/min	最高温度/℃	最低温度/℃	温差/℃
12	16	181.85	178.85	3.00
8	14	182.85	180.85	2.00
5	12	182.31	181.76	0.55
3	10	176.85	173.85	3.00

2.2.2 不同电流频率加载下的加热效果

在线圈整体宽度、线圈匝数、线圈电流、线圈和加热板间距、平行导线间距相同的情况下，通过加载不同电流频率的加热效果如表 4 所示。从表 4 可以看出，电流频率为 15 kHz 时，温差最小。

2.2.3 不同线圈匝数下的加热效果

在线圈整体宽度、线圈电流、线圈和加热板间距相同的情况下，通过调整线圈匝数观察加热效果，结果如表 5 所示。从表 5 可以看出，线圈匝数为 200 匝时，温差最小。

表 4 不同电流频率加载下的加热效果

Tab. 4 Experimental results under different current frequency loadings

电流频率 /kHz	加热时间 /min	最高温度 /℃	最低温度 /℃	温差 /℃
15	12	181.14	180.64	0.50
20	12	182.31	181.76	0.55
25	12	184.85	187.85	1.00
30	12	187.85	185.85	2.00
50	10	198.85	181.85	17.00

表 5 不同线圈匝数下的加热效果

Tab. 5 Experimental results under different coil turns

线圈匝数 /匝	线圈间距 /mm	加热时间 /min	最高温度 /℃	最低温度 /℃	温差 /℃
200	1.2000	12	181.14	180.64	0.50
250	0.9600	11	198.36	197.80	0.56
300	0.8000	9	175.03	174.47	0.56
350	0.6857	9	203.18	202.53	0.65

2.2.4 实验结果

1) 线圈和加热板之间的距离和电流频率共同影响加热板上表面的温度分布,从目前的实验数据得出最佳线圈和加热板距离为 5 mm,最佳电流频率建议为 15 kHz 时温差最小,这跟仿真结果是相吻合的。虽然减小间距可以有效提高加热速率,但是当间距过小时,加热板上的温度分布均匀度会发生显著降低,因此,采用减小间距提高升温速率在有温度分布均匀度要求的条件下并不可取。

2) 线圈匝数是对加热速率产生影响的一个主要参数,当线圈匝数在 250 匝及以上、350 匝及以下时,在线圈电流 100 A、电流频率 15 kHz、线圈和加热板距离 5 mm 的条件下,达到在空载状态下 10 min 内升温到 180 ℃ 并且温差控制在 1 ℃ 内的要求。

3 结论与展望

本文研究了一种低功耗新型均匀加热的高频电磁加热装置,电磁线圈采用平行分布的直线线圈,基于电磁场基本理论与平行磁场同向矢量叠加磁场增强原理,优化线圈几何尺寸及布局,解决边缘与中心的温差问题,实现温度均匀分布及低功耗。本研究成果具备结构上节能及温度场均匀分布两大创新点。

预计未来,高频电磁加热装置行业将继续保持快速发展的态势。随着环保政策的不断加强和能源结构的优化以及特定应用场景对低功率高频电磁场均匀加热的迫切需求,本文研究的新型温度场均匀分布、低功耗的高频电磁加热装置正好迎合市场需求,可以在工业、医疗、航空等更多领域得到更为广泛的应用。

[参考文献]

- [1] 张夕明,李光岩,唐建峰,等. 管道流体感应加热器原理及研究与应用现状[J]. 煤气与热力,2020,40(10):1-6,22.
- [2] NOVAC M, NOVAC O, GORDAN M, et al. Numerical modeling of electromagnetic induction heating process using an inductor with constant step between turns[J]. Lecture Notes in Electrical Engineering, 2013, 152(4):1027-1037.
- [3] 陈勇. 感应加热应用基础[J]. 锻造与冲压, 2021(21):69-73.
- [4] 王园武,柳存根,汪学锋. 感应线圈参数对钢板温度场的影响及线圈尺寸选取[J]. 金属热处理, 2016, 41(4):178-182.
- [5] YE Z, YU L. A simplified heat source model for thick plate bending via high-frequency induction line heating[J]. Ships & Offshore Structures, 2019, 14(1):64-73.
- [6] 董智东. 电磁感应加热系统的多物理场耦合分析与优化设计[D]. 杭州:浙江大学, 2019.
- [7] 王云超,曹嘉宁,吴忠秋,等. 基于电磁感应加热原理的节能环保型水加热系统设计[J]. 电子制作, 2020(7):54-56.

(责任编辑 彭海滨 英文审校 郑青榕)