

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.03.004

# 感应加热线圈参数对被试件温度场的影响分析

刘震涛, 潘俊, 尹旭, 黄瑞  
(浙江大学 动力机械及车辆工程研究所, 浙江 杭州 310027)

**摘要:**针对感应线圈参数对感应加热温度场的影响问题,以 ANSYS 软件为工具,采用磁热耦合分析的方法,对不同参数水平条件下的电磁感应加热过程进行了有限元计算。运用仿真结果对比分析的方法,研究了感应线圈形状、与加热面间的距离、线圈铜管宽度以及铜管间距对感应加热温度场的影响规律。并以平板被试件为对象,设计了平板感应加热测温试验,对仿真结果进行了试验验证。研究表明,感应加热温度场高温区域的形状与线圈形状相似;线圈与加热面之间距离越小,加热温度幅值越大,但对温度分布基本无影响;铜管越细或铜管间距越小,加热最高温度越高,且高温区域向平板边缘移动。

**关键词:**线圈参数;磁热耦合;感应加热;温度场

中图分类号:TH873.3;TK417+.13

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2015)03-0317-07

## Effects of induction heating coil parameters on the temperature field of the tested subjects

LIU Zhen-tao, PAN Jun, YIN Xu, HUANG Rui

(Power Machinery and Vehicular Engineering Institute, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** Aiming at the impact of induction coil parameters on the heating temperature field, finite element calculation of induction heating processes under different process parameters' levels was carried out, using ANSYS and magnetic-thermo coupling analysis. The impact of the induction coils shape, the distance between the induction coils and the heating surface, the width of the copper tube, and the distance between these copper tubes on the heating temperature field were studied by comparing the simulating results. And an induction heating temperature test experiment using a plate as the heated object was designed to testify the simulation results. The results indicate that the shape of induction heating temperature field is similar to the shape of the coil. The closer the coil and heating surface, the higher the heating temperature amplitude, while the distance between the coil and heating surface has little impact on the temperature field. The slenderer the copper tube and the closer the copper tubes, the higher the maximum heating temperature, and the high temperature area moves towards the edge of the plate.

**Key words:** coil parameters; magnetic-thermo coupled; induction heating; temperature field

## 0 引言

随着内燃机功率密度的提高,缸盖、活塞等受热零部件的热疲劳问题越来越突出。热疲劳模拟试验作为热疲劳问题研究的一个重要手段,也日益受到国内外专家学者的重视<sup>[1-3]</sup>。用于内燃机热疲劳模拟试验的加热方式主要有:感应加热、燃气加热、辐射加热、红外

加热、激光加热等。

感应加热的原理是在感应加热器中加载某一频率的交流电流,交流电流在感应器周围产生交变磁场,交变磁场又会在被加热的金属试件中产生感应电势,进而产生涡流,并生成热量,实现对金属试件的加热<sup>[4-6]</sup>。这种加热方式因为具有清洁、高效、低成本等优点<sup>[7-9]</sup>,越来越多地被应用到内燃机热疲劳模拟试验台。

在热疲劳模拟试验中,模拟热源对试件的加热效果直接影响疲劳试验的精度,因此,对模拟热源的选择极其重要。感应加热应用于热疲劳试验台时,感应线圈的形状与加热面之间的距离、线圈铜管宽度以及铜管间距等参数都会影响感应加热温度场的分布。近年来,国内外许多学者通过磁热耦合计算方法,研究了电磁感应加热的温度场分布以及电流大小、频率对加热的影响<sup>[10-12]</sup>,而关于感应线圈形状、与加热面之间距离、线圈铜管宽度以及间距等参数对加热效果影响的研究却鲜有涉及,研究这些参数对感应加热效果的影响对于感应加热器的设计具有非常重要的指导意义。

本研究利用 ANSYS 软件,对不同参数条件下的感应加热进行磁热耦合计算,并分析这些参数对感应加热的影响规律。

## 1 数学模型的建立

感应加热分为横向磁通感应加热和纵向磁通感应加热两种方式。在横向磁通感应加热方式中,感应线圈产生的磁通方向与被加热面垂直;而在纵向磁通感应加热方式中,磁通方向与被加热面平行。在内燃机缸盖和活塞热疲劳试验台中,一般采用横向磁通感应加热的方式,因此本研究中也采用这种方式。在本研究中,主要目的是分析感应线圈各参数对感应加热温度场的影响规律,因此把缸盖简化成平板,这样既能使计算模型大大简化,也消除了缸套内不同位置换热系数不同对感应加热温度分布的影响,便于对仿真结果进行分析。

横向磁通电磁感应加热示意图如图 1 所示。感应线圈为矩形螺旋线圈,尺寸与被加热平板相当,且线圈与被加热面平行。

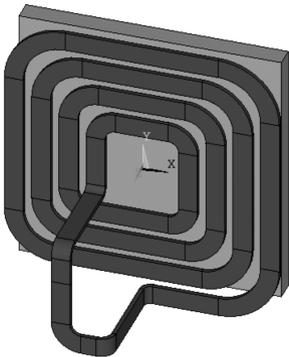


图 1 矩形线圈横向磁通感应加热示意图

### 1.1 电磁场数学模型

电磁场空间分布由麦克斯韦方程组描述,该方程组由安培环路定律、法拉第电磁感应定律、高斯电通定律和高斯磁通定律四大定律组成,其微分形式为:

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \vec{J}_s + \vec{J}_e + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (4)$$

式中:  $\nabla$ —汉密尔顿算子;  $\vec{H}$ —磁场强度矢量, A/m;  $\vec{J}$ —总传导电流密度矢量, A/m<sup>2</sup>;  $\vec{J}_s$ —源电流密度矢量, A/m<sup>2</sup>;  $\vec{J}_e$ —感应涡流密度矢量, A/m<sup>2</sup>;  $\vec{D}$ —电通密度矢量, C/m<sup>2</sup>;  $\vec{E}$ —电场强度矢量, V/m;  $\vec{B}$ —磁场强度矢量, T;  $\rho$ —电荷体密度, C/m<sup>3</sup>。

同时,  $\vec{B}$ 、 $\vec{H}$ 、 $\vec{D}$ 、 $\vec{E}$  满足下列关系:

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (5)$$

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (6)$$

式中:  $\mu$ —磁导率, H/m;  $\varepsilon$ —介电常数, F/m。

一般感应加热电流的频率范围为中低频,在这种条件下,位移电流密度的幅值远小于传导电流幅值,可以忽略,则式(1)可简化为:

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}_s + \vec{J}_e \quad (7)$$

### 1.2 温度场数学模型

对于感应加热过程,感应涡流相当于被加热试件的内热源,试件内部传热方式为导热,假设被加热试件材料物性为各项同性,则其控制方程为:

$$\rho_1 c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \lambda \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \lambda \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \lambda \frac{\partial T}{\partial z} + q_v \quad (8)$$

式中:  $\rho_1$ —材料密度, kg/m<sup>3</sup>;  $c$ —材料比热容, J/kg·°C;  $T$ —温度, °C;  $\lambda$ —导热系数, W/m·°C;  $q_v$ —由涡流产生的内热源, W/m<sup>3</sup>。

由于  $q_v$  由感应涡流单位体积发热产生,则它满足:

$$q_v = J_e^2 / \sigma \quad (9)$$

式中:  $\sigma$ —材料电导率, S/m。

### 1.3 磁热耦合计算方法

电磁感应加热过程中,磁场与温度场之间是相互影响相互耦合的,且它们之间的相互影响不能忽略<sup>[13]</sup>,因此,在进行仿真计算的时候,一般采用耦合场计算的方法。多物理场耦合计算包括两种方法:顺序耦合法和直接耦合法。顺序耦合法是在两个或多个物理场之间,按顺序进行多次迭代分析,且把前一个场的分析结果作为后一个场分析的载荷,从而实现多场之间的耦合。直接耦合法是利用包含有所有必需自由度的耦合单元类型,通过一次求解,得出耦合场的分析结果,这种方法对计算机配置要求较高,计算效率较低,因此本研究采用顺序耦合的方法。

ANSYS11.0 之后版本新增了多场求解器,可以方便地对磁热耦合场进行顺序耦合求解。其求解流程如图2所示。

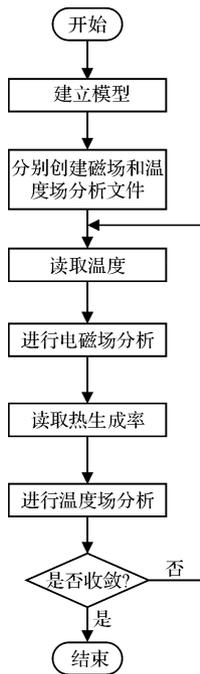


图2 磁热耦合计算流程图

## 2 感应加热仿真模型的建立

### 2.1 有限元模型的建立

电磁感应加热问题是一个多物理场耦合求解问题,涉及到电磁场和温度场的求解。本研究用 ANSYS 多场求解器进行求解,电磁场分析和温度场分析分别采用 SOLID117 单元和 SOLID90 单元。考虑到感应加热的集肤效应,笔者对平板被加热面进行网格局部加密。

平板网格模型如图3所示。

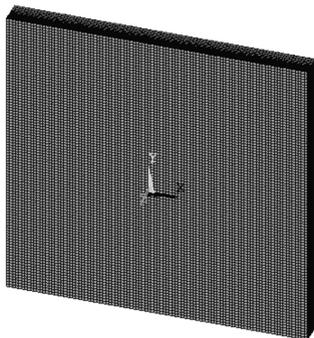


图3 平板网格模型

### 2.2 边界条件的设置

在电磁场分析中,磁力线垂直边界条件为自然边界条件,自动满足,不需要设置;因此,只需要在空气模型外表面设置磁力线平行边界条件。

在温度场分析中,考虑到平板感应加热实验时,采用了在平板背面进行多喷嘴平均排布喷水冲击冷却,因此本研究将平板背面换热系数设为一常数,其值为  $13\,280\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ,冷却水温度为  $300.8\text{ K}$ 。

### 2.3 仿真研究方案

为研究感应线圈形状、与加热面之间距离、铜管宽度以及间距对加热效果的影响,本研究一共计算 9 个 case,通过相应 case 之间计算结果的比较,分析各参数对加热效果的影响。各 case 参数如表 1 所示。

表1 各计算 case 参数表

模型	形状	距离/cm	铜管宽度/mm	铜管间距/mm
case1	矩形	2	18	8
case2	圆形	2	18	8
case3	矩形	1	18	8
case4	矩形	3	18	8
case5	矩形	2	10	8
case6	矩形	2	14	8
case7	矩形	2	18	4
case8	矩形	2	18	12

通过对 case1 和 case2 计算结果的比较可以分析线圈形状对感应加热温度场的影响规律。此时,两种形状线圈的圈数都为 4 圈,且圆形线圈的外径与矩形线圈的边长大致相同。圆形线圈几何模型如图4所示。

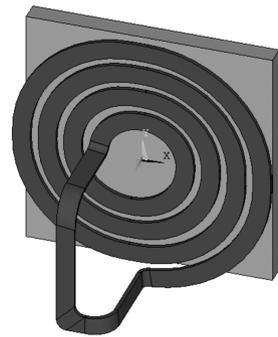


图4 圆形线圈感应加热几何模型图

通过对 case1、case3 和 case4 的计算结果进行比较,可以分析感应线圈与被加热面之间的距离对加热效果的影响。

通过对 case1、case5 和 case6 的计算结果进行比较,可以分析感应线圈铜管宽度对感应加热效果的影响。在保证线圈圈数相同的条件下,铜管宽度的变化必然导致感应线圈总体尺寸的变化。为保证可比较性,本研究控制线圈最外圈尺寸不变,只改变最内圈内空气区域的大小。

通过对 case1、case7 和 case8 的计算结果进行比较,可以分析感应线圈铜管之间距离对感应加热效果的影响。同样,本研究保证线圈最外圈尺寸不变。

### 3 仿真研究及结果分析

#### 3.1 形状对加热效果的影响

矩形线圈和圆形线圈感应加热温度场分布如图 5 所示。

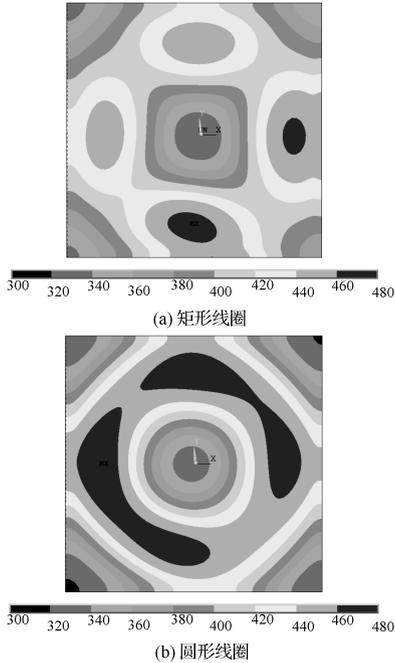


图 5 矩形及圆形线圈感应加热温度场云图

由温度场云图可知,矩形线圈加热平板时,在平板上形成一个与线圈形状相似的高温区域,在线圈拐角处,由于电流方向的改变,温度相对较低。圆形线圈加热平板时,也在平板上形成一个与圆形线圈形状相似的环形带状高温区域。

为便于分析平板被加热面温度分布规律,在平板一对称轴上取的 7 个点如图 6 所示,获取其温度值,并以加热面中心为原点,以所取点到平板被加热面中心的距离为横轴,以温度值为纵轴,绘制温度随该距离的变化趋势曲线,平板对称轴温度变化趋势曲线如图 7 所示。

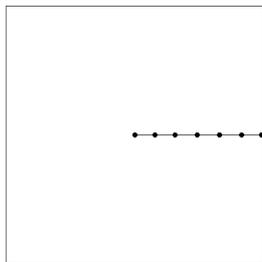


图 6 平板对称轴取点分布图

由矩形和圆形线圈的温度变化趋势曲线可知,两种线圈加热温度变化趋势基本相同,都是在平板中心处温度最低,随着与平板中心之间距离的增加,温度逐渐上升,并在距离为 83 mm 时,温度达到最大值,后随着与平板中心的远离,温度又逐渐降低。

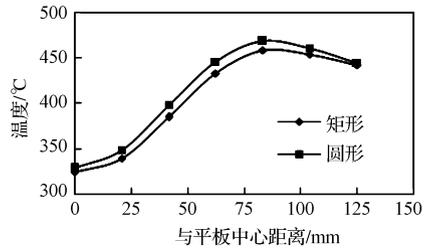


图 7 平板对称轴温度变化趋势曲线

两种形状下,由于距离、线圈尺寸等参数都不变,温度场的最大值也基本相同。

#### 3.2 距离对加热效果的影响

感应加热器与加热表面的距离分别为 1 cm、2 cm 和 3 cm 时,仿真结果云图及对称轴温度变化趋势曲线分别如图 8、图 9 所示。

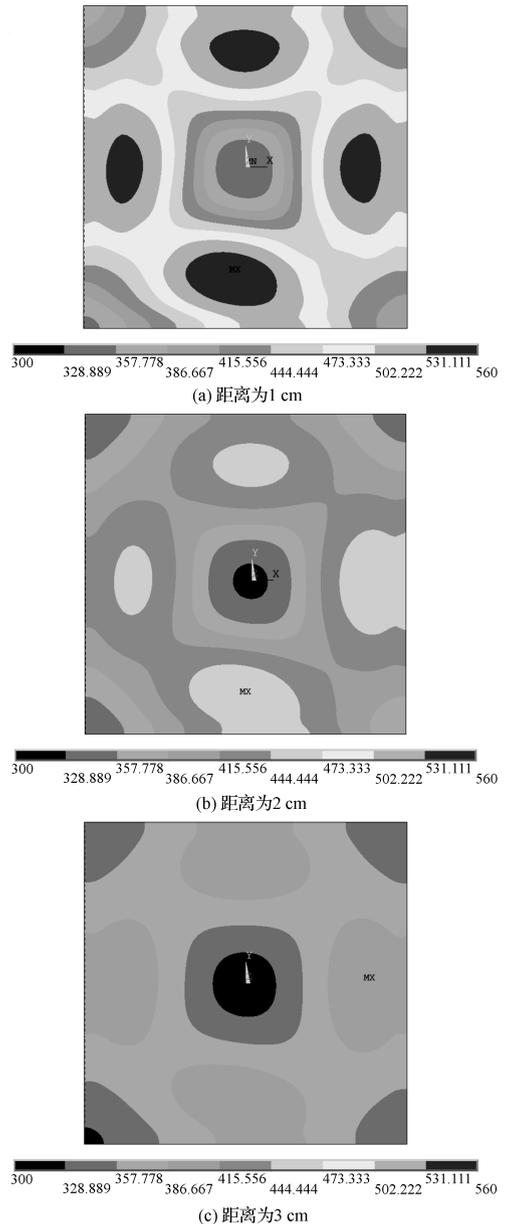


图 8 距离为 1 cm、2 cm、3 cm 时温度场云图

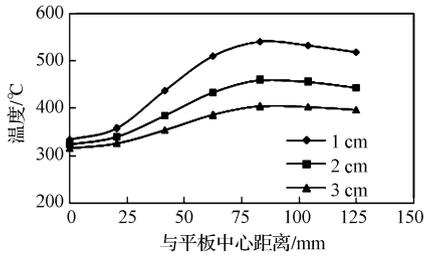


图9 平板对称轴温度变化趋势曲线

由仿真结果云图和温度变化趋势曲线可知,随着感应加热器与被加热面之间距离的减小,温度场的分布基本不变,而温度的总体幅值有较大幅度的上升。距离从3 cm 缩小为1 cm 时,加热温度的最大值由406 K 上升到560 K,上升幅度为37.9%。由此可见,通过减小距离,可以有效地提升感应加热的效率。

### 3.3 铜管宽度对加热效果的影响

铜管宽度分别为18 mm、14 mm 和10 mm 时的感

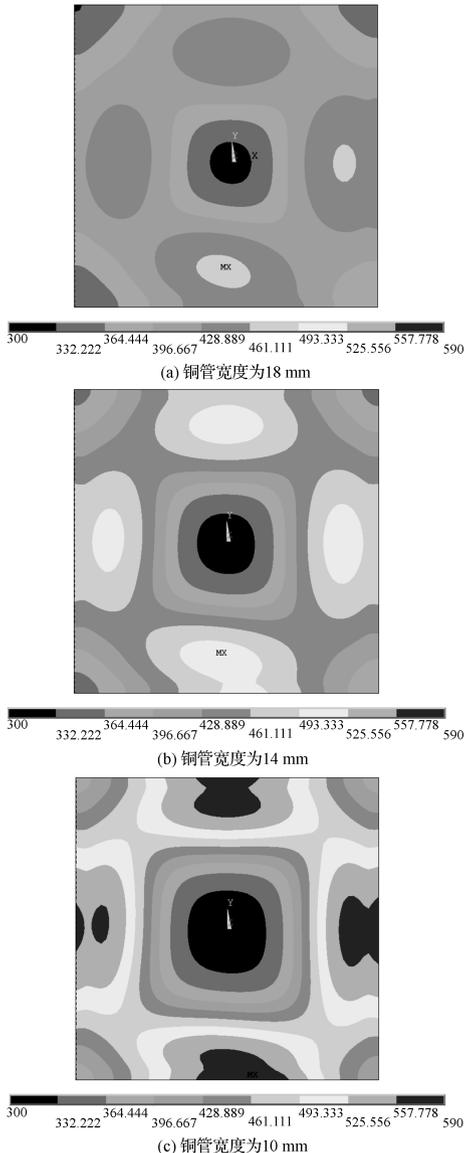


图10 铜管宽度为18 mm、14 mm、10 mm 时温度场云图

应加热温度场云图及平板对称轴温度变化趋势曲线分别如图10、图11 所示。

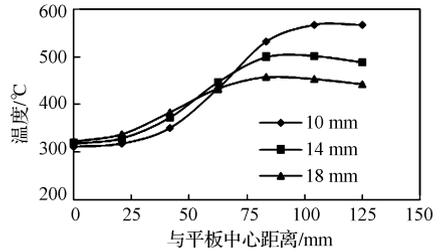


图11 平板对称轴温度变化趋势曲线

由温度场云图和温度变化趋势曲线可知,随着感应线圈铜管宽度变小,平板中心温度降低,且平板高温区域的位置更偏向于平板边缘,主要原因是随着铜管宽度减小,感应线圈中心的空气区域增大,感应线圈的中部位置相对于平板向外侧移动。这也说明,感应加热温度最高的位置出现在线圈中部对应的平板位置。

随着感应线圈铜管宽度减小,感应加热的温度幅值有上升的趋势。加热温度的最大值由18 mm 时的465 K 上升为10 mm 时的587 K,上升幅度为26.2%。这主要是因为,在计算过程中,加载在不同铜管宽度的线圈上的电流相同,随着铜管宽度减小,感应线圈电阻增大,感应加热器两端电压随之增大,导致实际功率增加,从而导致温度场幅值总体上升。

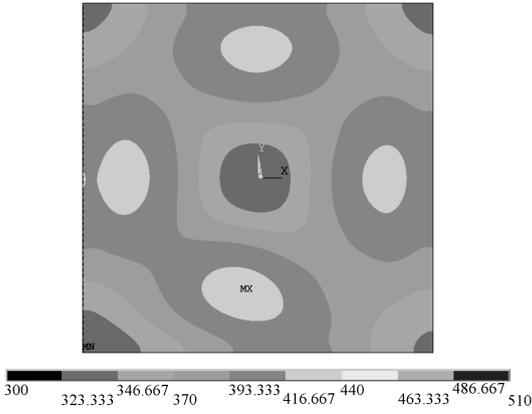
### 3.4 铜管间距对加热效果的影响

感应线圈铜管之间的间距为12 mm、8 mm 和4 mm 时的感应加热温度场云图及平板对称轴温度变化趋势曲线分别如图12、图13 所示。由温度场云图和温度变化曲线可知,随着线圈铜管间距减小,感应加热温度场高温区域温度有上升的趋势,最高温度由12 mm 时的427 K 上升为4 mm 时的502 K,上升17.6%。主要原因是铜管间距减小,感应线圈更紧凑,感应加热的功率更集中于平板中部的带状高温区域内,导致高温区域温度上升。

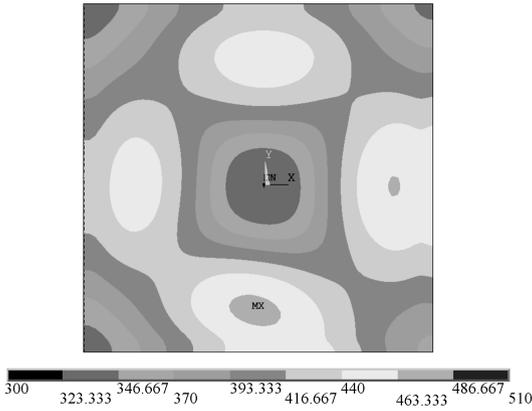
同时,随着铜管间间距减小,高温区域更趋向于平板边缘,原因也是间距减小,导致线圈中心的空气区域增大。

## 4 试验验证

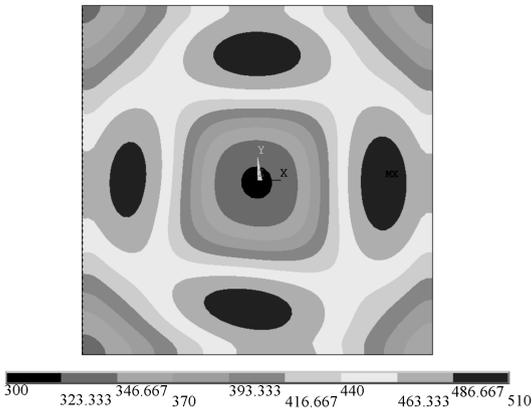
为了验证仿真计算的准确性,本研究搭建的试验平台如图14 所示。试验中采用的感应线圈为矩形线圈,铜管宽度18 mm,铜管间距8 mm,线圈与被加热面距离2 mm。试验过程中,笔者对平板背面进行喷水冷却,为保证冷却的均匀性,本研究在平板背面范围内均匀布置3·3 个冷却水喷嘴。在平板被加热表面安装



(a) 铜管间距为12 mm



(b) 铜管间距为8 mm



(c) 铜管间距为4 mm

图 12 间距为 12 mm、8 mm、4 mm 时温度场云图

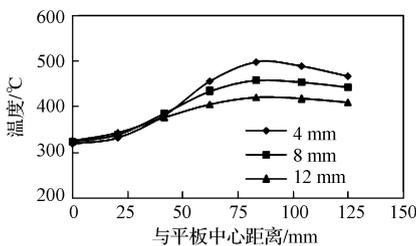


图 13 平板对称轴温度变化趋势曲线

9 个 K 型热电偶,并采用 NI9213 板卡对热电偶温度进行实时测量。平板热电偶布置图如图 15 所示。

热平衡条件下,各测点位置的实验值与仿真值对比如表 2 所示。由此可知,试验值与仿真值之间的最大相

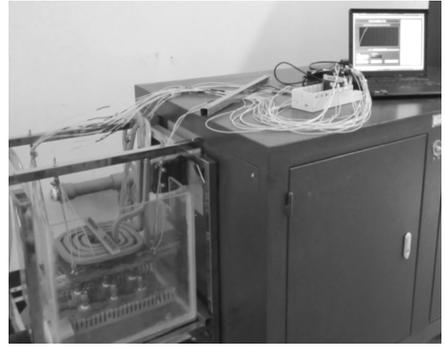


图 14 感应加热测温试验台

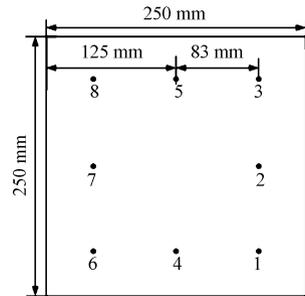


图 15 平板温度测点布置图

对误差为 9.0%,说明数学模型有较高的计算精确度。

表 2 试验值与仿真值的比较

测点编号	试验值/(°C)	仿真值/(°C)	相对误差/(%)
1	135.9	137.4	1.1
2	207.8	190.1	8.5
3	129.7	130.8	0.8
4	182.6	189.4	3.7
5	159.6	174.0	9.0
6	116.9	121.0	3.5
7	190.7	179.0	-6.1
8	123.7	122.7	-0.8

## 5 结束语

本研究对不同参数条件下的电磁感应加热过程进行了有限元计算,得到如下结论:

(1)感应线圈形状对加热温度场有较大的影响,温度场的高温区域形状与感应线圈的形状相似。

(2)感应线圈与被加热平面之间的距离越小,感应加热温度场的温度值越大;二者之间的距离由 3 cm 缩小为 1 cm 时,最高温度上升 37.9%。主要原因是距离减小,磁漏损失减小,感应加热效率增加。同时,距离对温度场的分布几乎没有影响。

(3)随着感应线圈铜管宽度减小,感应加热的高温区域向平板边缘移动,同时,感应加热总体温度上升;宽度为 10 mm 时的最高温度较 18 mm 时上升 26.2%。

(4)随着感应线圈铜管之间的间距减小,感应加热的

高温区域向平板边缘移动,同时,高温区域总体温度上升;间距为4 mm时的最高温度较12 mm时上升17.6%。

## 参考文献 (References):

- [1] 张卫正,魏春源,郭良平,等. 发动机受热件热疲劳台架的感应加热特征[J]. 北京理工大学学报,2001,21(3):314-316.
- [2] 李洪民,雷基林,文均,等. 内燃机受热部件热疲劳模拟试验台的研究与开发[J]. 小型内燃机与摩托车,2014,43(2):79-85.
- [3] 俞小莉,金瑞斌,沈瑜铭,等. 内燃机活塞热疲劳模拟试验台[J]. 内燃机工程,1997,18(4):43-47.
- [4] 沈庆通,梁文林. 现代感应加热处理技术[M]. 北京:机械工业出版社,2008.
- [5] RUDNEV V I, LOVELESS D, COOK R, et al. Handbook of Induction Heating[M]. Boca Raton: CRC Press,2002.
- [6] KAWAGUCHI H, ENOKIZONO M, TODAKA T. Thermal and magnetic field analysis of induction heating problems [J]. *Journal of Materials Processing Technology*,2005,161(1):193-198.

- [7] 杨晓光,汪友华. 横向磁通感应加热装置中线圈形状对涡流及温度分布的影响[J]. 金属热处理,2003,28(7):49-54.
- [8] 赵前哲,柳亦兵,刘衍平,等. 铁磁性材料感应加热过程的数值分析[J]. 材料热处理学报,2012,33(3):151-155.
- [9] 原思宇,宋华,王旭. 球扁钢感应加热温度场模拟与工艺优化[J]. 材料热处理学报,2014,35(5):214-218.
- [10] CHABOUDEZ C, CLAIN S, GLARDON R, et al. numerical modeling in induction heating for axisymmetric geometries [J]. *Transactions on Magnetics*,1997,33(1):739-744.
- [11] 庄宏,梁明明,唐文献,等. 半组合式曲轴感应加热过程的数值模拟[J]. 现代制造工程,2012(9):79-83.
- [12] 张雪彪,杨玉龙,刘玉君. 钢板高频感应加热过程电磁-热耦合场分析[J]. 大连理工大学学报,2012,52(5):676-682.
- [13] KRANJC M, ZUPANIC A, MIKLAVCIC D, et al. Numerical analysis and thermographic investigation of induction heating [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*,2010(53):3585-3591.

[编辑:李辉]

## 本文引用格式:

刘震涛,潘俊,尹旭,等. 感应加热线圈参数对被试件温度场的影响分析[J]. 机电工程,2015,32(3):317-323.

LIU Zhen-tao, PAN Jun, YIN Xu, et al. Effects of induction heating coil parameters on the temperature field of the tested subjects [J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2015,32(3):317-323.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

(上接第311页)

据式(12),计算得装置扩展不确定度  $U=0.7119\%$ ,按照涡街流量计检定规程<sup>[3]</sup>,装置的扩展不确定度( $k=2$ )应不大于被检流量计最大允许误差的1/2。所以该装置能检定精度等级低于1.5级的流量计。与之前相比较,大大降低了装置的扩展不确定度。

## 5 结束语

为解决受标准表本身线性度影响导致标准表法标准装置的扩展不确定度较高的问题,本研究经过理论计算证明,通过单台流量计在全量程范围内标定多个点,压缩流量计的量程,提高流量计在量程内的精度,可以降低标准装置扩展不确定度。分析标准装置在各个流量范围内的标准表组合情况,得出在各量程范围内的不确定度,最后可以根据式(14)计算出装置的标准流量计测量A类不确定度。

通过上述本研究提出的方法,能够大大降低标准装置的不确定度,为高精度标准表法标准装置的研制提供方法和理论上的依据。

## 参考文献 (References):

- [1] 杜金榜,王跃科. 仪器仪表技术的发展趋向[J]. 仪器仪表

- 学报,2002,23(5):228-230,236.
- [2] 郭爱华. 标准表法气体流量标准装置[J]. 自动化仪表,2005(12):50-54.
- [3] 齐利晓,孙立军. 标准表法气体流量标准装置的研制[J]. 检测与仪表,2010(11):34-38.
- [4] 刘永刚. 气体流量标准装置的研制以及需要注意的问题[J]. 计量技术,2005(5):12-14.
- [5] JJG 643—2003,标准表流量标准装置[S]. 北京:中国计量出版社,2003.
- [6] JJG 1029—2007,涡街流量计检定规程[S]. 北京:中国计量出版社,2007.
- [7] 江宏俊. 流体力学[M]. 第一版. 北京:高等教育出版社,1985.
- [8] 王翥,佟晓筠,陈晓娟. 提高涡街流量计精度的一种补偿算法及实现[J]. 化工自动化及仪表,2005,32(3):80-82.
- [9] 张涛,曹光明. 采用雷诺数修正法的高精度气体涡街流量计的研究[J]. 仪表技术与传感器,2003,41(4):42-45.
- [10] 陈向东,喻志强,郑家强. 采用涡街流量计法测量压缩机排气量[J]. 液压气动与密封,2014(12):47-49.
- [11] JJF 1059. 1—2012,测量不确定度与表示[S]. 北京:中国计量出版社,2012

[编辑:李辉]