

# 基于 COMSOL 余热回收系统中频炉 管路传热仿真分析

陈 辉<sup>1</sup>, 史朝旭<sup>1</sup>, 齐永恒<sup>1</sup>, 聂国清<sup>2</sup>

(1. 沈阳建筑大学机械工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 中一精锻股份有限公司, 吉林 白城 137000)

**摘 要** 目的 对余热回收系统的中频炉管路进行研究, 进一步掌握管路内部的温度场变化。方法 利用 SolidWorks 软件对中频炉管路进行三维建模, 导入到 COMSOL 软件中, 设定边界条件, 建立网格模型, 进行瞬态温度场仿真分析, 得到中频炉管路内部温度随时间变化的规律。结果 通过实际测量进水口温度为 16 ℃, 出水口温度为 41.5 ℃, 仿真得出的出水口温度为 42.5 ℃, 误差约为 2.41%, 且每小时工艺水通过中频炉感应线圈能带走 74.7 kW 的热量。结论 应用 COMSOL 软件对中频炉管路进行瞬态温度场仿真分析, 仿真结果能够反映中频炉管路内的温度场分布, 并为后续余热回收温度控制打下良好基础。

**关键词** 余热回收; 中频炉; COMSOL; 仿真分析

中图分类号 TU391

文献标志码 A

## Heat Transfer Simulation Analysis of Intermediate Frequency Furnace Pipeline in the Waste Heat Recovery System Based on COMSOL

CHEN Hui<sup>1</sup>, SHI Zhaoxu<sup>1</sup>, QI Yongheng<sup>1</sup>, NIE Guoqing<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. Zhongyi Precision Forging Co., Baicheng, China, 137000)

**Abstract:** This paper studied the intermediate frequency (IF) furnace pipeline of the waste heat recovery system to investigate the temperature field. We use SolidWorks software to model the IF furnace pipeline in three dimensions, import it into COMSOL software, set boundary conditions, establish a mesh model, and conduct transient temperature field simulation analysis to obtain the law of temperature change inside the IF furnace pipeline with time. By actually measuring the inlet temperature of 16 ℃ and the outlet temperature of 41.5 ℃, the simulation yielded the outlet temperature of 42.5 ℃, with an error of about 2.41%, and the process water can take away 74.7 kW of heat per hour through the induction coil of the IF furnace. The application of COMSOL

收稿日期: 2020-12-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(61973224)

作者简介: 陈辉(1963—), 男, 教授, 博士, 主要从事材料加工和余热回收等方面研究。

software for transient temperature field simulation analysis of the IF furnace pipeline, the simulation results can reflect the temperature field distribution in the IF furnace pipeline, and lay a good foundation for the subsequent temperature control of waste heat recovery.

**Key words:** waste heat recovery; intermediate frequency furnace; COMSOL; simulation analysis

目前,中国的环境污染主要来源于化石燃料的燃烧,很多工厂将废气废水余热、高温产品、炉渣余热和冷却介质余热等等直接排在空气中<sup>[1]</sup>,这样不仅造成资源的浪费,还造成环境的污染,因此,将这些废弃的余热进行回收再利用成为目前众多学者研究的方向。

余热回收利用技术广泛应用于各个领域。苏盈贺<sup>[2]</sup>制造负压环境,实现了冶金行业高炉冲渣水的余热回收。魏君英<sup>[3]</sup>用 Fluent 软件对集热器辐射和对流传热过程进行了仿真分析。赵金姊<sup>[4]</sup>、赵玺灵<sup>[5]</sup>对烟气余热回收系统建立模型,并利用工程实测参数进行模型验证。曹卫华<sup>[6]</sup>根据烧结厂余热回收系统建立系统的效率优化模型,开发烧结余热回收优化控制系统,从而提高了余热发电的整体运行效率。O. Bamigbetan<sup>[7]</sup>对 20 kW 容量的级联热泵建模,研究了原型压缩机在高温条件下的性能。涂鸣<sup>[8]</sup>建立了有机朗肯循环热力学仿真模型,并预测了系统回收性能。夏建芳<sup>[9]</sup>利用 Fluent 软件平台对烧结矿气-固换热过程进行模拟。Wu Di<sup>[10]</sup>建立了水蒸气高温高压系统模型,对水蒸气 HTHP 系统具有很高的可靠性和准确性。吴敏<sup>[11]</sup>建立了一种改进的粒子群优化算法求解优化模型,提高了余热发电效率。肖恒<sup>[12]</sup>建立一种求解温差发电器内部温度分布的数学模型,为优化温差发电器工作条件和提高其输出功率提供有价值的理论指导。目前余热回收的研究主要是在钢铁企业、热力发电厂以及燃煤电厂等工厂中进行,而针对换热元件进行温度场仿真分析的研究,在相关的余热回收的研究比较少。基于此,笔者针对中频炉管路进行温度场的仿真

分析,以白城中一精锻股份有限公司的工艺水循环管网系统为实例,利用 COMSOL 软件针对工艺水循环管网系统的中频炉管路进行瞬态温度场仿真分析,并结合现场实际测量的入水口温度,研究中频炉工艺冷却水在管路中的温度变化及温度场的分布,最后利用 COMSOL 软件提前预测中频炉管路内部的温度的变化,并为工艺水循环管网系统中的管路优化提供参考。

## 1 理论分析

### 1.1 中频炉感应加热原理

中频炉的感应加热系统是由工件、感应线圈和电源所组成的。其加热原理是将工件放置在带有交流电的感应线圈内部,通入交流电的感应线圈将在周围产生交流磁场,工件处于交流磁场中,在感应线圈中产生高密度的磁力线,并切割感应线圈中的工件,在工件中产生很大的涡流,从而达到加热工件的目的<sup>[13]</sup>。

### 1.2 工艺水循环管网系统介绍

加工连杆件时,首先将剪切的原材料通过中频炉加热到 1 200 ~ 1 240 °C,经过辊锻、正火、抛丸等加工工艺进行加工成型。在锻造生产线中,将剪切后的毛坯件放入中频炉的感应线圈中加热。中频炉内部的感应线圈需要通入工艺冷却水进行冷却降温,以起到保护感应线圈的作用。通过工艺冷却水循环,可以将感应线圈中产生的热量带走,并将其回收应用于冬季供暖。

该余热回收系统包括工艺水循环管网系统、热泵机组外循环管网系统、热泵机组内循环管网系统、冷水池与管网软化水补水系统以及热水池管网系统五个子系统<sup>[14]</sup>。笔者

只针对工艺水管网系统中的中频炉管路进行仿真分析,中频炉管路原理图如图 1 所示。

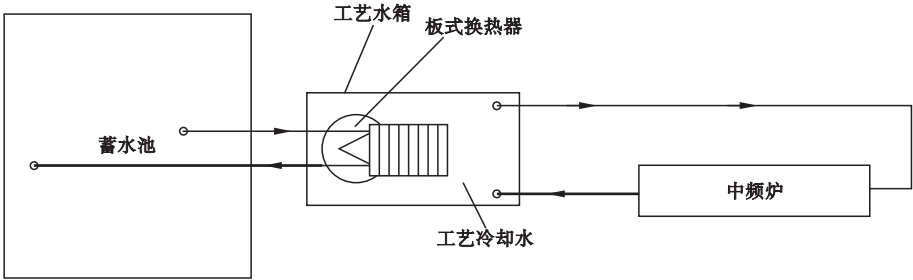


图 1 中频炉管路原理图

Fig. 1 Schematic pipeline diagram of intermediate frequency furnace

中频炉在工作时,工件通过热辐射将热量传递给感应线圈,在感应线圈内部通有工艺冷却水,并带走感应线圈的热量,中频炉的出入水口均与装有工艺水和板式换热器的工艺水箱相连接,形成闭式循环。为了防止结垢堵塞管路,因此需要使用软化水对中频炉管路进行冷却降温。另一端,蓄热水池中的冷却水通入板式换热器中,与工艺水箱已经换出热量的工艺水进行换热,再从板式换热器中的另一端流出,最后流入蓄热水池中,将换出的热量回收再利用,其中蓄热水池与板式换热器形成另一端的闭式循环。

1.3 工艺冷却水管路余热回收分析

在精锻连杆生产过程中,中频炉主要应用于锻造前的工件加热。其中感应线圈的热量主要来自于被加热的工件通过热辐射传递给感应线圈的热量,以及中频炉的电流流经感应线圈时,感应线圈因自身存在电阻,产生热量。

感应线圈的电阻计算公式为

$$R = \frac{\rho l}{A}.$$
 (1)

电阻率随温度变化的公式为

$$\Delta T = T_2 - T_1.$$
 (2)

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha \Delta T).$$
 (3)

式中: $\Delta T$ 为线圈温度的变化值; $T_1$ 为升温前的感应线圈的温度; $T_2$ 为升温后感应线圈的温度; $\rho$ 为感应线圈的电阻率; $\rho_0$ 为室温感应线圈的电阻率; $\alpha$ 感应线圈的电阻温度系数。

当感应线圈的温度升高到  $T_2'$  时,此时感应线圈的电阻为

$$\Delta T_1 = T_2' - T_1.$$
 (4)

$$R_1 = \rho_0 (1 + \alpha \Delta T_1) \frac{l}{A}.$$
 (5)

电阻的变化率为

$$\frac{R_1 - R}{R} = \frac{\alpha \Delta T_1}{1}.$$
 (6)

中频炉感应线圈使用紫铜制成的,紫铜的电阻率  $\rho_0$  为  $0.0172 (\Omega \cdot \text{mm}^2)/\text{m}$ ,电阻温度系数  $\alpha$  为  $4.3 \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ,紫铜管的熔点为  $1083 \text{ }^\circ\text{C}$ 。当中频炉刚启动时,感应线圈的温度  $T_1$  升高到  $50 \text{ }^\circ\text{C}$  时,电阻的变化率不超过  $13\%$ ;中频炉正常工作时,感应线圈内通入工艺冷却水,若感应线圈的温度升高  $\Delta T_1$  在  $27 \text{ }^\circ\text{C}$  以内,电阻的变化率不超过  $11.6\%$ ,变化很小,可以忽略不计。假设当感应线圈温度为  $1083 \text{ }^\circ\text{C}$  时,通过  $Q = I^2 R t$  计算得出每小时感应线圈自身电阻产生的热量为  $951.758 \text{ J}$ ,而工件通过切割感应线圈产生的热量通过公式  $Q = 0.24 UI$  计算为  $3.024 \times 10^5 \text{ kJ}$ ,因此,感应线圈自身电阻产生的热量可忽略不计。

中频炉中的感应线圈一般选择矩形截面,与圆形截面的感应线圈相比,线圈加工成矩形能够增大电流通道的有效面积,漏磁减少,有利于感应磁场的均匀分布,可以提高加热效率。图 2 为圆形截面与矩形截面线圈通电时线圈及在工件上的电流分布情况。当圆形截面的直径与矩形的截面的线圈的边长相

等时,由于电流的集肤效应,矩形截面的电流通过的有效面积大于圆形截面中电流通过的有效面积,因此本研究采用矩形截面的铜管作为感应线圈的绕制材料。

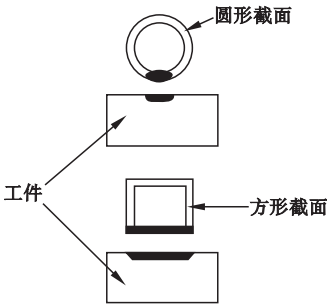


图2 不同截面上的电流分布及工件的感应电流分布  
Fig. 2 Current distribution on different cross-sections and induced current distribution of the workpiece

中频炉的供水要求:①最高进水温度不高于25℃;②最低进水温度不低于15℃,防止冷凝;③工作压力:0.2~0.4 MPa;④出水温度:不高于55℃。经过对工艺水循环管网系统中中频炉进出水口温度的测量得知,中频炉的入水口温度为16℃,出水口温度为41.5℃,温升为25.5℃。中频炉的额定功率为350 kW,冷却水流量为30 t/h,感应线圈共有20匝,流速为2.6 m/s。感应线圈截面为30 mm×25 mm的矩形管,壁厚5 mm,线圈呈螺旋状,螺旋半径 $r$ 为90 mm。感应线圈的结构如图3所示。

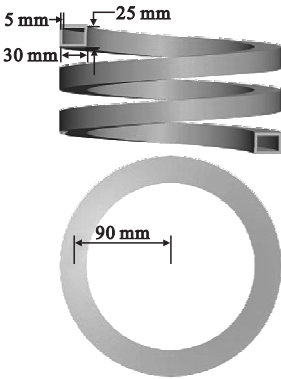


图3 感应线圈结构  
Fig. 3 Induction coil structure

## 2 COMSOL 仿真分析

### 2.1 COMSOL 仿真软件介绍

选择 COMSOL 软件,正是因为其完善的多物理场耦合的分析能力。COMSOL 较其他流体仿真软件具有以下特点:①提供多种专业的求解模块,方便求解多物理场耦合问题,可自定义求解参数;②建模方便;③网格构建方便;④支持多平台操作,大规模计算能力,接口丰富;⑤后处理功能强大。

应用流固耦合的方法对中频炉管路进行瞬态温度场仿真分析:①需对中频炉管路建立模型;②定义中频炉管路模型的材料属性参数;③设定中频炉管路的边界条件参数;④对中频炉进行网格划分;⑤对模型进行瞬态仿真分析,并对中频炉管路进行非等温流动计算;⑥对仿真结果进行分析。COMSOL 仿真分析基本流程如图4所示。

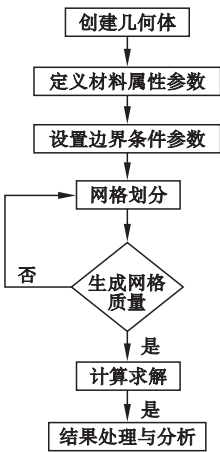


图4 COMSOL 仿真分析的基本流程  
Fig. 4 The basic flowchart of COMSOL simulation analysis

### 2.2 建立几何模型

在传热过程的数值模拟中,需要同时考虑热传导、热对流和热辐射对换热的影响,且同时考虑不同物理场的耦合。笔者针对中频炉管路部分进行几何建模,感应线圈尺寸如图3所示。中频炉管路出入水管路均为DN65圆管,中频炉入水管与出水管之间的距离为2 500 mm,中频炉与板式换热器之间

的距离为 7 278 mm。

利用 SolidWorks 软件,建立工艺水循环管网系统的中频炉管路模型,并对中频炉管路进行瞬态温度场仿真分析,中频炉感应线圈模型如图 5 所示。将中频炉管路模型导入到 COMSOL 软件中,中频炉管路模型如图 6 所示。

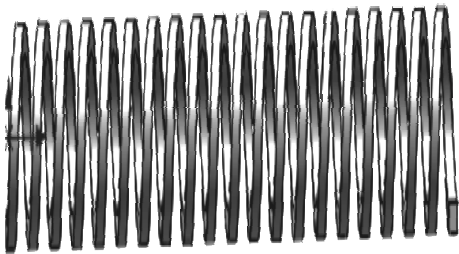


图 5 中频炉感应线圈模型

Fig. 5 Induction coil model of intermediate frequency furnace

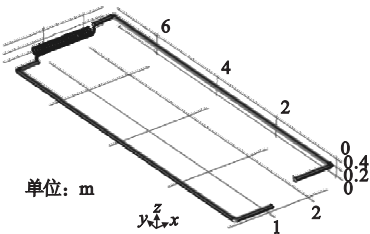


图 6 中频炉管路模型

Fig. 6 Pipeline model of intermediate frequency furnace

2.3 定义材料参数

设定工艺水循环管网系统的中频炉管路部分的材料参数,感应线圈的材料为紫铜, DN65 管材料为镀锌钢管,内部流体材料为工艺水,因此中频炉管路材料属性参数如表 1 所示。

表 1 中频炉管路材料属性参数

Table 1 Material property parameters of pipeline in the intermediate frequency furnace

参数类型	密度/ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	比热容/ ( $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )	导热系数/ ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ )
紫铜管	8 960	386.4	407
镀锌钢管	8 030	500	628
工艺水	1 000	4 183	0.589

由于镀锌钢管外表面包裹保温材料,工艺冷却水将热量换出时,镀锌钢管与外界不会进行换热,因此不需要考虑外界会与镀锌钢管表面进行换热。

2.4 设定物理场边界参数

测量中频炉管路的入水口的温度为 16 ℃,因此设定入水口温度为 16 ℃,环境温度为 16 ℃,根据流量、管径和流速之间的关系,管径为 DN65,流量为 30 t/h,确定入水口流速为 2.6 m/s,其中管径为 DN65 时,流量和流速的对照表如表 2 所示。

表 2 流量与流速对照表

Table 2 The flow rate table with pipe diameter

流速/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	流量/( $\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ )
0.8	9.6
1.6	19.1
2.4	28.7
2.6	31.1
3.0	35.8

2.5 管路传热仿真方程

固体和流体传热方程:

$\rho C_p u \cdot \Delta T + \nabla \cdot q = Q,$  (7)

$q_1 = -k \Delta T,$  (8)

$q_0 = h \times (T_{\text{ext}} - T).$  (9)

式中: $\rho$  为密度; $C_p$  为比热容; $u$  为流速场; $\Delta T$  为温度梯度; $\nabla$  为 Hamilton 算子,用于计算梯度; $q$  为热传导速率; $Q$  为空间分布的热源; $q_1$  为热通量矢量场; $k$  为热传导系数; $q_0$  为热通量; $h$  为传热系数; $T_{\text{ext}}$  为固体传热温度; $T$  为流体传热温度。

湍流方程:

$\rho(u \cdot \nabla)u = \nabla \cdot [-p\boldsymbol{I} + \boldsymbol{K}] + \boldsymbol{F},$  (10)

$\rho \nabla \cdot u = 0.$  (11)

式中: $\boldsymbol{I}$  为单位对角矩阵; $\boldsymbol{F}$  为影响流体的体积力。

2.6 单元网格划分

在划分网格时,单元的尺寸、形状以及网格的分布,对计算的精度产生重要的影响。当划分的网格尺寸较小时,计算的精度会比



较高,但计算时间会加长;若划分的网格尺寸太大,计算的精度会偏低,这样会导致计算的结果不收敛<sup>[15]</sup>。因此,自适应的网格单元的划分,需通过设置最大与最小单元尺寸、单元的增长率、曲率因子以及狭窄区域分辨率,来调整网格大小和分布,令网格划分合理,保证计算出准确的结果的同时,又缩短了时间。

网格采用四面体、三角形等结构划分,共有 485 513 个单元,最小单元质量为 0.001 084 kg,平均单元质量为 0.702 kg,网格统计信息如表 3 所示,中频炉管路网格模型如图 7 所示。

表 3 网格划分的统计信息

Table 3 The meshing grid table

单元/个	最小单元 质量/kg	平均每个单 元质量/kg	单元体 积比/ $10^{-4}$	网格体 积/ $m^3$
$4.9 \times 10^5$	0.001 1	0.702	4.746	0.14

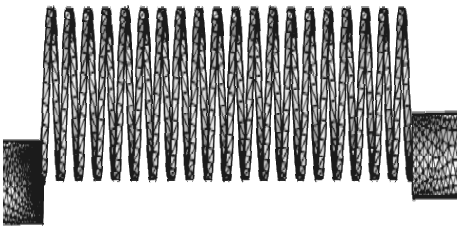


图 7 中频炉管路网格模型

Fig. 7 The pipeline grid model of intermediate frequency furnace

3 仿真结果与分析

建立网格后,对中频炉管路模型进行瞬态温度场仿真分析,设定的时间范围为 0 ~ 60s,每秒计算一次,仿真出中频炉管路的温度场分布以及工件和感应线圈换热方向如图 8 所示。

由图 8 可知:工件通过感应线圈时,通过热辐射将部分热量传递给感应线圈,工艺冷却水起到冷却感应线圈的作用,而工件的热量与感应线圈的内螺旋面存在热交换(箭头所指的方向),感应线圈与感应线圈之间放置保温材料。图 8 为中频炉感应线圈在29 s

时的温度场分布,感应线圈的最低温度为 16 ℃,即入水口温度,最高温度为 42.9 ℃,即感应线圈出水口温度。

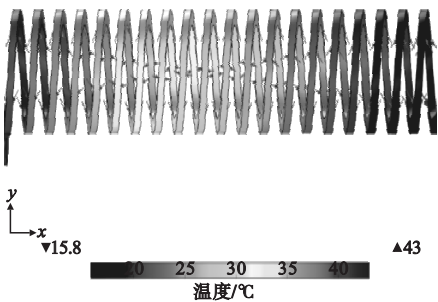


图 8 中频炉管路的温度场分布和工件与感应线圈换热方向

Fig. 8 Temperature field distribution and heat transfer between workpiece and induction coil of medium frequency furnace tube circuit

通过仿真得出 0 ~ 60 s 的中频炉管路温度场分布,当时间为 29 s 时,中频炉的出水口温度基本稳定,如图 9 所示。在 29 s 时,中频炉的入水口为 16 ℃,经过仿真后中频炉管路的出水温度为 42.5 ℃,温度升高了 26.5 ℃。

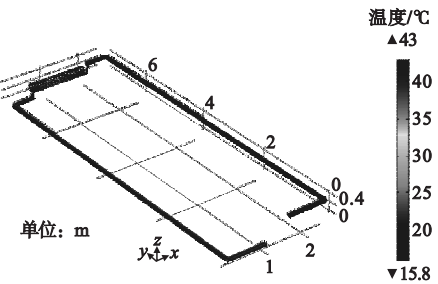


图 9 中频炉管路模型 29 s 温度场分布图

Fig. 9 The temperature field distribution diagram of IF furnace pipeline model at 29 s

通过一维绘图组画图,中频炉感应线圈的出水口温度变化曲线,如图 10 所示。由图可知,在 0 ~ 29 s,感应线圈的出水口温度从 16 ℃升至 42.9 ℃,21 s 后趋于稳定为 42.9 ℃。

中频炉管路模型出水口温度变化曲线,如图 11 所示。由图可知,在 0 ~ 2 s,出水口温度为 2 ℃;在 2 ~ 36 s,出水口温度从 16 ℃升至最高 42.5 ℃,36 s 后趋于稳定为 42.5 ℃。

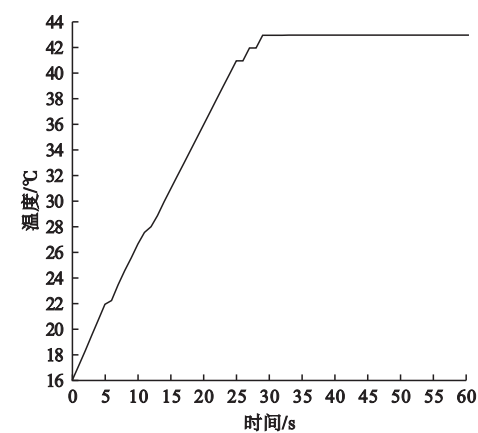


图 10 中频炉感应线圈出水口温度变化曲线

Fig. 10 Temperature curve of the water outlet of the induction coil in the intermediate frequency furnace

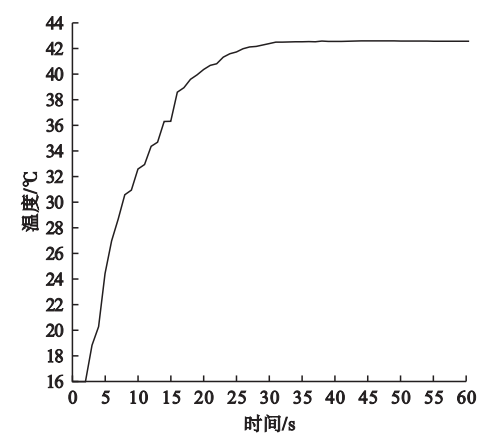


图 11 中频炉管路模型出水口温度变化曲线

Fig. 11 Temperature curve of the pipeline outlet in the intermediate frequency furnace model

由图 10 可知,中频炉感应线圈内部工艺冷却水温度从 16℃升高到 42.9℃,导出其内部工艺冷却水随感应线圈的长度变化的数据,通过公式计算得出感应线圈的管壁温度变化曲线,如图 12 所示,中频炉感应线圈管壁温度从 16℃升高至 513.68℃。铜的熔点 在 1 083℃,因此中频炉内部感应线圈(紫铜管)未被融化。

通过仿真,得出工艺冷却水在螺旋管中的温度变化过程,中频炉的入水口温度为 16℃,而中频炉管路的出水口温度为 42.5℃,入水口与出水口为温度差为 26.5℃。通过实际测量出水口的温度为

41.5℃,误差约为 2.41%。冷却水经过中频炉感应线圈并带出其中的部分热量,温差为 25.5℃,通过公式计算,循环一小时中频炉感应线圈对水的散热量为  $2.69 \times 10^5$  kJ,且每小时从中频炉感应线圈中所提取的热量为 74.7 kW。

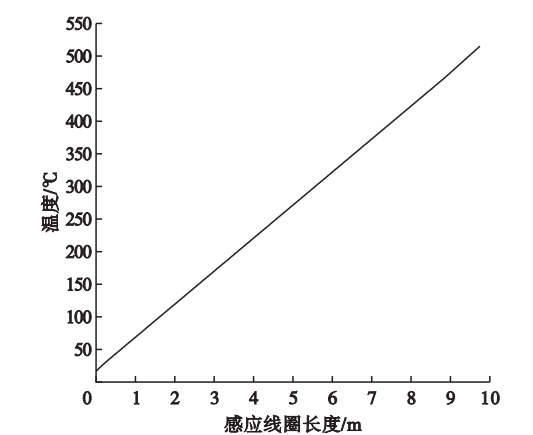


图 12 感应线圈管壁温度

Fig. 12 Tube wall temperature of the induction coil

## 4 结 论

(1)应用 COMSOL 软件对中频炉管路进行瞬态温度场仿真,可以提前通过 COMSOL 软件仿真得出出水口温度,通过测量入水口温度为 16℃时,通过实际测量出水口的温度为 41.5℃,仿真得出的出水口温度为 42.5℃,实际测量的出口温度与仿真的温度误差范围在 2.5% 以内,且每小时冷却水从感应线圈中换出 74.7 kW 的热量。

(2)中频炉管路仿真为工艺水循环管网系统的仿真提供了关键环节;采用实际测量与 COMSOL 仿真相结合的方法,得出管路中的温度场分布,验证了其准确性和可行性,对在实际工程中的应用提供了借鉴意义,并为后续余热回收温度控制打下良好基础。

## 参考文献

[1] 刘镇,朱玉凡,郭文凯,等.兰州市化石燃料燃烧源排放 VOCs 的臭氧及二次有机气溶胶生成潜势[J].环境科学,2019,40(5):73-81.  
(LIU Zhen,ZHU Yufan,GUO Wenkai,et al. Formation potential of ozone and secondary

- organic aerosol of VOCs from fossil fuel combustion in Lanzhou city [J]. Environmental science, 2019, 40 ( 5 ): 2069 – 2077. )
- [ 2 ] 苏盈贺,张红岩,刘明军,等. 溴化锂吸收式机组在冲渣水余热回收领域的应用[J]. 机电信息, 2020(13): 64 – 69.  
(SU Yinghe, ZHANG Hongyan, LIU Mingjun, et al. Application of lithium bromide absorption unit in the field of waste heat recovery of flushing water [J]. Mechanical and electrical information, 2020(13): 64 – 69. )
- [ 3 ] 魏军英,江政,王吉岱,等. 一种熔融铝液辐射余热回收用集热器的性能仿真研究[J]. 热能动力工程, 2020, 35(5): 274 – 280.  
(WEI Junying, JIANG Zheng, WANG Jidai, et al. Simulation study on performance of a collector for waste heat recovery of radiant heat of molten aluminum liquid [J]. Journal of engineering for thermal energy and power, 2020, 35(5): 274 – 280. )
- [ 4 ] 赵金姊,赵玺灵,王静怡,等. 基于喷淋换热的燃煤锅炉烟气余热回收系统建模及模型验证[J]. 制冷学报, 2017, 38(6): 39 – 45.  
(ZHAO Jinzi, ZHAO Xiling, WANG Jingyi, et al. Establishing and validating a model of waste-heat recovery system for coal-fired boilers based on spray tower [J]. Journal of refrigeration, 2017, 38(6): 39 – 45. )
- [ 5 ] 赵玺灵,付林,王笑吟,等. 分布式热泵调峰型燃气热电联产烟气余热回收供热系统建模及模拟分析[J]. 太阳能学报, 2018, 39(10): 2779 – 2787.  
(ZHAO Xiling, FU Lin, WANG Xiaoyin, et al. Modeling and simulation analysis of waste heat recovery heating system for flue gas of peak-shaving gas-fired combined heat and power plant with distributed heat pump [J]. Acta energiae solaris sinica, 2018, 39(10): 2779 – 2787. )
- [ 6 ] 曹卫华,蔡伊青,袁艳,等. 烧结合余热回收系统效率计算及参数动态优化[J]. 上海交通大学学报, 2014, 48(7): 1046 – 1052.  
(CAO Weihua, CAI Yiqing, YUAN Yan, et al. Exergy efficiency calculation and parameter optimization of the sintering waste heat recovery system [J]. Journal of Shanghai jiaotong university, 2014, 48 ( 7 ): 1046 – 1052. )
- [ 7 ] BAMIGBETAN O, EIKEVIK T M, NEKSA P, et al. The development of a hydrocarbon high temperature heat pump for waste heat recovery [J]. Energy, 2019, 173 ( 4 ): 1141 – 1153.
- [ 8 ] 涂鸣,李刚炎,胡剑. 不同工况柴油机排气余热回收系统试验与仿真[J]. 农业机械学报, 2014, 45(2): 1 – 5.  
(TU Ming, LI Gangyan, HU Jian. Experiment and simulation of diesel engine exhaust heat recovery system under variable conditions [J]. Transactions of the Chinese society of agricultural machinery, 2014, 45(2): 1 – 5. )
- [ 9 ] 夏建芳,陈锦,赵先琼. 烧结合冷却过程数值仿真及环冷机漏风率研究[J]. 计算机仿真, 2015, 32(7): 208 – 212.  
(XIA Jianfang, CHEN Jin, ZHAO Xianqiong. Simulation of sinter cooling process and research on air leakage in sinter cooler [J]. Computer simulation, 2015, 32 ( 7 ): 208 – 212. )
- [ 10 ] WU Di, YAN Hongzhi, HU Bin, et al. Modeling and simulation on a water vapor high temperature heat pump system [J]. Energy, 2019, 168(2): 1063 – 1072.
- [ 11 ] 熊永华,姜云涛,吴敏,等. 基于产热量优化的烧结合余热回收操作参数设定[J]. 上海交通大学学报, 2011, 45(8): 1119 – 1124.  
(XIONG Yonghua, JIANG Yuntao, WU Min, et al. Operating parameters setting method of sintering waste heat recovery process based on heat production optimization [J]. Journal of Shanghai jiaotong university, 2011, 45 ( 8 ): 1119 – 1124. )
- [ 12 ] 杨素文,肖恒,欧强,等. 废热式温差发电器性能仿真[J]. 计算机仿真, 2012, 29(11): 341 – 344.  
(YANG Suwen, XIAO Heng, OU Qiang, et al. Simulation on performance of thermoelectric generator applied in waste heat recovery [J]. Computer simulation, 2012, 29 ( 11 ): 341 – 344. )
- [ 13 ] 赵朋成,许志森,韩硕. 开口式感应线圈的结构设计与钢 – 铜管插接接头感应钎焊电磁场和温度场的数值分析[J]. 青岛科技大学学报(自然科学版), 2019, 40(3): 99 – 106.  
(ZHAO Pengcheng, XU Zhisen, HAN Shuo. Structural design of an open profiled coil and modeling of electromagnetic and heat fields on induction brazing of copper-steel inserting tubes [J]. Journal of Qingdao university of science and technology ( natural science edition ), 2019, 40(3): 99 – 106. )
- [ 14 ] 陈辉,刘金朋,张丽秀,等. 中一精锻余热回收供暖系统构建[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2020, 36(2): 352 – 360.  
(CHEN Hui, LIU Jinpeng, ZHANG Lixiu, et al. Heating system design for Zhongyi precision based on forging waste heat recovery [J]. Journal of Shenyang jianzhu university ( natural science ), 2020, 36(2): 352 – 360. )
- [ 15 ] 周思柱,刘思,华剑,等. 行星架轴孔过盈配合面微动磨损研究[J]. 石油机械, 2019, 47(12): 7 – 14.  
(ZHOU Sizhu, LIU Si, HUA Jian, et al. Fretting wear of interference fitting surface of planet carrier axle hole [J]. China petroleum machinery, 2019, 47(12): 7 – 14. )
- (责任编辑:刘春光 英文审校:范丽婷)