

# 便携式旋转粘度计校准恒温容器的 温度响应特性研究\*

孔昭文<sup>1</sup> 王治云<sup>1</sup> 朱佳奇<sup>2</sup> 王鹏<sup>2</sup> 胡子峰<sup>2</sup>

(1. 上海理工大学 能源与动力工程学院 上海 200093;

2. 上海市质量监督检验技术研究院 上海 201114)

**摘要:** 对不同结构及流动参数下,一种加装螺旋隔板的便携式旋转粘度计校准恒温容器内流动与传热进行了数值模拟。考察了旋转粘度计内液体的温度响应特性。模拟采用 SIMPLE 算法求解压力与速度的耦合,对求解变量采用 QUICK 格式离散,湍流模型采用 Realizable k- $\epsilon$  模型。模拟结果表明:当水套内螺旋导流隔板圈数增加,与加热情况相比,冷却时内杯流体温度分层现象增强,不利于满足被测粘度液温度均匀性要求;加热和冷却温差相同时,对于加装不同层数螺旋隔板的结构,加热时的温度响应基本相同为 0.24 °C/min,冷却时温度响应随着螺旋隔板圈数增多而降低,最多相差 0.036 °C/min;当循环水量一定,恒温容器温度响应随热流密度提高而加快,但仅改变循环水量,对不同结构恒温容器的温度响应影响并不明显。

**关键词:** 旋转粘度计;温度响应;螺旋隔板;湍流流动;数值模拟

**中图分类号:** TK311;TN03 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.2010

## Research on temperature response characteristics of portable thermostatic bath to rotational viscometer calibration

Kong Zhaowen<sup>1</sup> Wang Zhiyun<sup>1</sup> Zhu Jiaqi<sup>2</sup> Wang Peng<sup>2</sup> Hu Zifeng<sup>2</sup>

(1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China

2. Shanghai Institute of Quality Inspection and Technical Research, Shanghai 201114, China)

**Abstract:** The numerical simulation of the flow and heat transfer in a portable thermostatic bath with spiral baffles to rotational viscometer calibration under different flow and structure parameters is developed. The temperature response characteristics of fluid in the rotational viscometer are investigated. SIMPLE algorithm is used to solve the pressure-velocity coupled governing equations employing QUICK-type scheme for variables discretization. Realizable k-Epsilon Model is adopted for modelling turbulence. The numerical results show that when the number of spiral baffles in the water jacket increases, compared with the heating condition, Thermal stratification phenomena of fluid within the cup in cooling condition is enhanced, which is not conducive to meet the temperature uniformity requirements for viscosity liquid which to be measured. When the temperature difference between heating and cooling condition is same, for Installed different spiral baffles structure heating temperature response is basically the same as 0.24 °C/min. Cooling temperature response decrease with the increasing number of spiral baffles, and the maximum difference is 0.036 °C/min. With a fixed flow rate, temperature response of thermostatic bath increases with the increase of heat flux density. While just change flow rate, the temperature response of thermostatic bath with different structure is not obvious.

**Keywords:** rotational viscometer; temperature response; spiral baffles; turbulent flow; numerical simulation

## 1 引言

旋转式粘度计是用于测量液体的粘性阻力与液体动力粘度的一种测量仪器,广泛用于石油化工、冶金、食品、医药

等领域中<sup>[1-3]</sup>。其中,盛载被测粘度液的容器即为恒温容器。恒温容器由圆柱形内杯体和同轴的循环水套所组成。该水套与一个恒温槽相通,恒温槽内的水在水套和恒温槽之间循环流动,以加热或冷却被测粘度液以控制其温度。

收稿日期:2016-11

\* 基金项目:国家自然科学基金(51306121)项目资助

测量时,一般要求恒温容器内的被测粘度液从初始温度尽快达到所需温度并保持稳定和均匀。对于工业应用的测量,为满足测试标准<sup>[4]</sup>,被测粘度液温度均匀性要求温差不超过 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。循环水套中的水与恒温容器内杯间的对流传热强度是影响加热或冷却被测粘度液的速率以及保持其温度均匀性的主要因素。为有效控制升降温速度及被测粘度液的温度,掌握旋转粘度计内液体的温度响应特性及传热情况显得尤为重要。

恒温容器内的流动与传热问题较复杂,研究者多采用数值模拟的方法对其进行研究,多数研究主要针对夹套间换热性能进行分析<sup>[5-7]</sup>。杨振岭等人<sup>[8]</sup>进行了针对太阳辐射度绝对辐射计真空环境中腔体温度响应特性的研究工作。周茜等<sup>[9]</sup>设计了一种便携式仓储温湿度检测仪。兰羽提出了具有温度补偿功能的超声波测距系统<sup>[10]</sup>。Baek等人在前人<sup>[11]</sup>实验的基础上模拟了螺旋形水套加热的太阳能蓄热水箱内的流动与传热<sup>[12]</sup>。基于以上研究,本文对一种用于校准旋转粘度计的便携式恒温容器给出了在其循环水套内加装螺旋隔板的设计方案,并对其中的流动与传热进行了数值模拟,分析旋转粘度计内液体的温度响应特性,以实现快速加热或冷却被测粘度液的目的。

## 2 数值方法及计算模型

### 2.1 数值方法

本次模拟采用非稳态换热模型,对水套和内杯的流动和传热进行了模拟和对比,考察加热或冷却时,内杯所盛载被测粘度液达到要求温度的响应时间及其对流动和传热的影响。本文数值计算基于以下假设:所涉及的流体为不可压缩牛顿流体;流体物性参数为常数;忽略流动的粘性耗散;浮力的计算采用 Boussinesq 假设处理;流动计算时忽略壁面的厚度。

采用 Realizable  $k-\epsilon$  模型配合壁面函数法 (wall function) 求解水套中的水与内杯壁面之间的对流传热。其中,压力与速度的耦合求解采用的是 SIMPLE 算法<sup>[13]</sup>,对流项差分格式为具有三阶精度的 QUICK 格式<sup>[14]</sup>。

### 2.2 计算模型

恒温容器模型如图 1 所示,恒温容器由一个内杯体与外部的的水套所组成。水套和内杯被测液体初始温度相同,

循环水由右下角进口流入,沿螺旋形隔板从右上角出口流出后,返回进口再次循环。水套中水流量为  $0.033\text{ kg/s}$ ,入口水温等于出口水温。实际恒温容器进出口相通,而计算模型简化了进出口连通部分。现阶段拟考察加装 3~5 圈螺旋形隔板后的换热效果,模型网格划分均采用结构化网格。

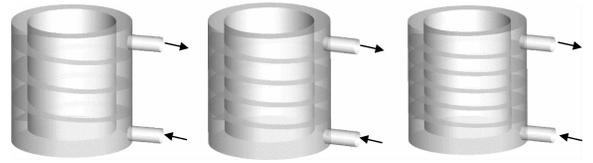


图 1 水套中加装螺旋隔板的恒温容器模型

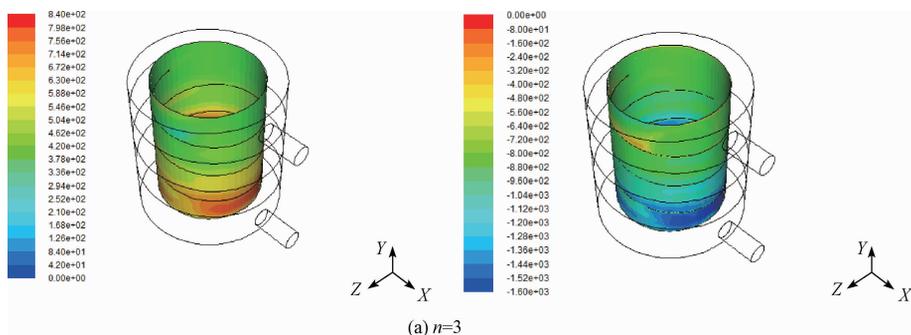
## 3 数值结果与分析

### 3.1 恒温容器内的传热分析

当加热内杯所盛载被测粘度液时,恒温容器初始温度为  $16\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,恒温水套壁面处内置加热器,其热流密度为  $500\text{ W/m}^2$ ,考察内杯所盛载被测粘度液被完全加热至  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  所需时间及内杯壁面对流换热系数分布。冷却时,恒温容器初始温度为  $24\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,恒温水套底部内置冷却模块,冷却功率与加热功率相同,其热流密度为  $-12\text{ }600\text{ W/m}^2$ ,考察内杯所盛载被测粘度液被完全冷却至  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  所需时间及内杯壁面对流换热系数分布。

图 2、3 所示分别为加热、冷却内杯被测粘度液时,加装不同层数螺旋隔板的恒温容器内杯内、外壁面对流换热系数分布 ( $n$  为螺旋隔板圈数),其中左右两侧分别对应内杯内、外壁面。从图 2 中可以看出,水套进口处所对内杯壁面附近对流换热系数较大,这说明循环水在水套中不断被加热,当再次进入下一循环时入口水温较高,使得此处对流换热系数较大。另外内杯溶液被加热时内杯内壁面从外部吸热,对流换热系数为正,内杯外壁面放热为负。

从图 3 中可以看出,内杯壁面上部对流换热系数较大,这是由于循环水在水套中流动过程中不断被冷却,从出口流出时温度最低,接着从入口进入到下一循环时入口水温与内杯溶液温差较大,所以导致此处对流换热系数较大。与加热工况相反,被冷却时内杯内壁面向外放热,对流换热系数为负,内杯外壁面吸热为正。从图 3 还可以看出,当



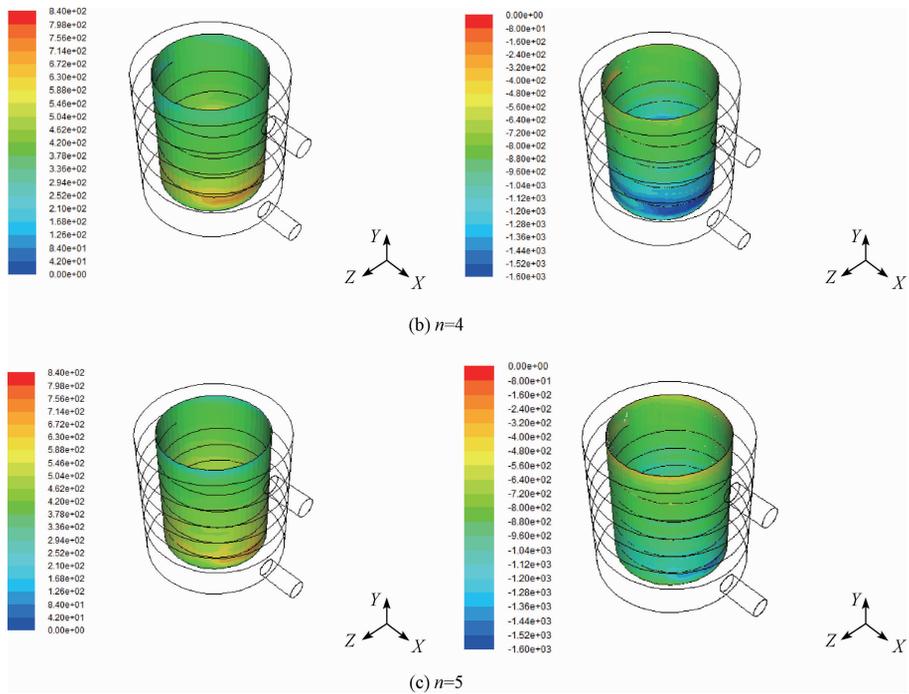


图 2 恒温容器内杯内、外壁面对流换热系数分布

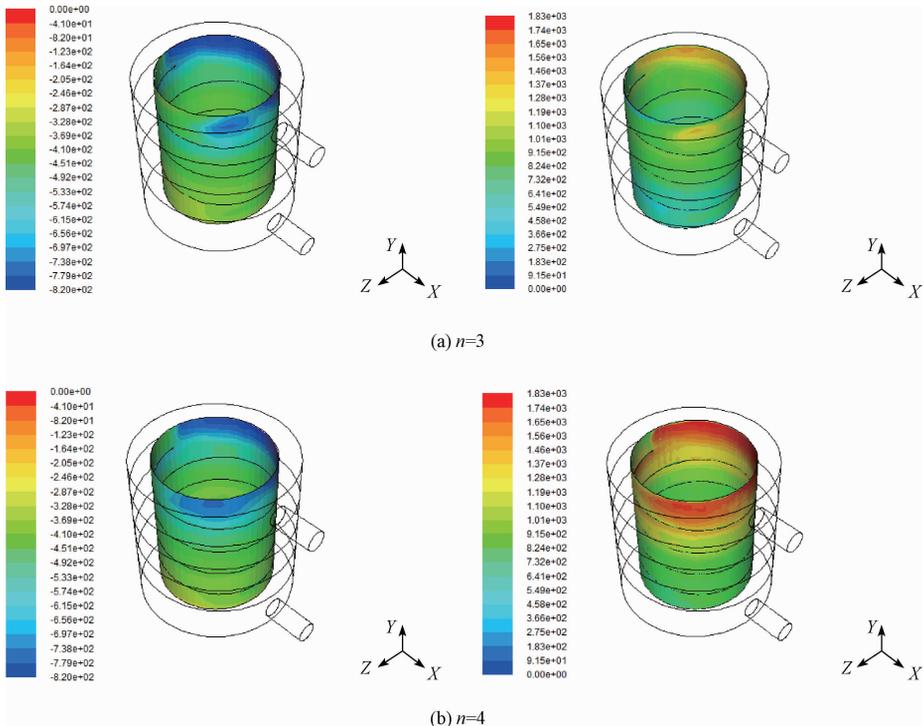
水套内螺旋导流隔板圈数增加,内杯壁面对流换热系数分布梯度有所扩大,这是由于杯内热量主要以导热方式向下传递,而底部温度不断下降,杯内温度分层现象较加热时更为明显。

### 3.2 温度的时间响应

图 4、5 分别为加热、冷却内杯被测粘度液时内杯中心

点处温度随时间的变化,可以看出随着时间增加,加装不同层数螺旋隔板内杯中心点处温度变化趋势一致,与其他设计结构相比,3 圈螺旋隔板稍快达到所给状态。对监测数据取 300 s 后稳定值进行线性回归如图 6、7 所示。

图 6、7 为加热、冷却被测粘度液拟合后的温度响应,从图中可以看出,对于加装不同层数螺旋隔板的结构,加



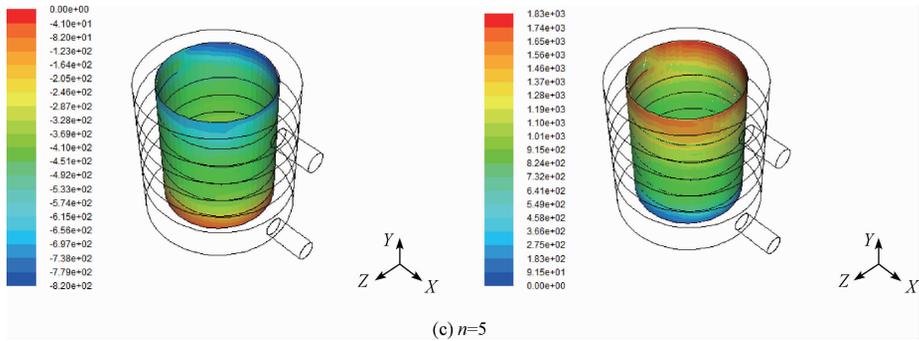


图3 恒温容器内杯内、外壁面对流换热系数分布

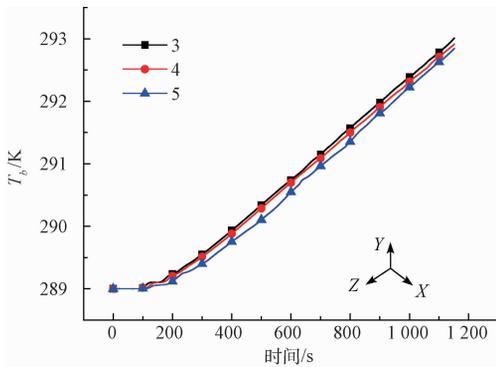


图4 加热被测粘度液时内杯中心点处温度随时间的变化

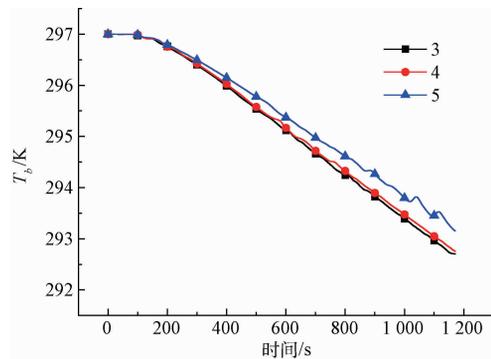


图5 冷却被测粘度液时内杯中心点处温度随时间的变化

热时的温度响应基本相同为  $0.24\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ , 冷却时随着螺旋隔板圈数增多温度响应依次分别为  $0.258\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 、 $0.252\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 、 $0.222\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。螺旋隔板圈数较少时, 对冷却和加热温度响应影响不大, 但随着螺旋隔板圈数增多, 冷却时温度响应最多相差  $0.036\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ , 这说明由于从底部冷却时, 螺旋隔板圈数增多使得内杯热分层现象增强, 导致冷却时响应减缓。与其他设计结构相比, 3圈螺旋隔板温度响应较为稳定。

### 3.3 不同工况对恒温容器传热的影响

图8所示为不同工况下, 在循环水套内加装不同圈数螺旋隔板时内杯中心处温度变化, 其中  $F_1 = 500\text{ W}/\text{m}^2$ ,  $F_2 =$

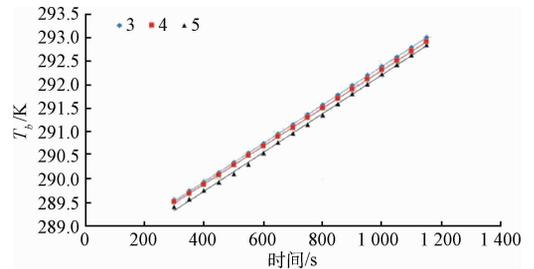


图6 加热被测粘度液的温度响应

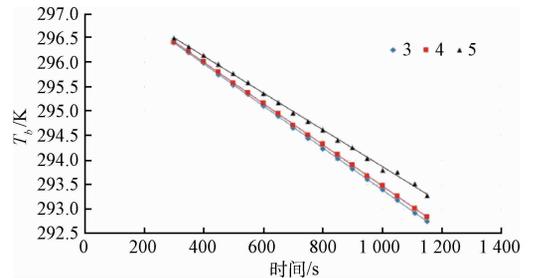
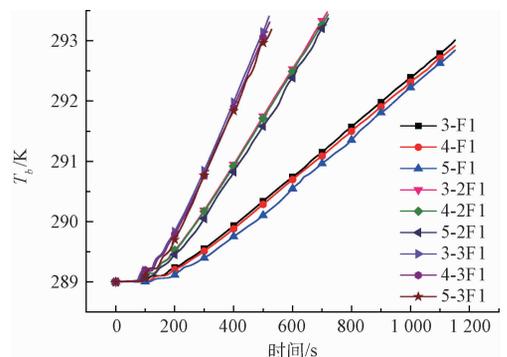


图7 冷却被测粘度液的温度响应

$-12\text{ }600\text{ W}/\text{m}^2$ ,  $Q=0.033\text{ kg}/\text{s}$ 。从图8中(a)、(c)可以看出, 循环水量一定时, 提高热流密度, 使得水套中水与内杯间的对流传热增强, 恒温容器温度响应明显加快, 但加热和冷却被测粘度液功率相同时, 不同结构恒温容器的温度响应基本相同。从图8中(b)、(d)中可以看出, 改变循环



(a) 热流密度变化对中心点处温度的影响(加热)

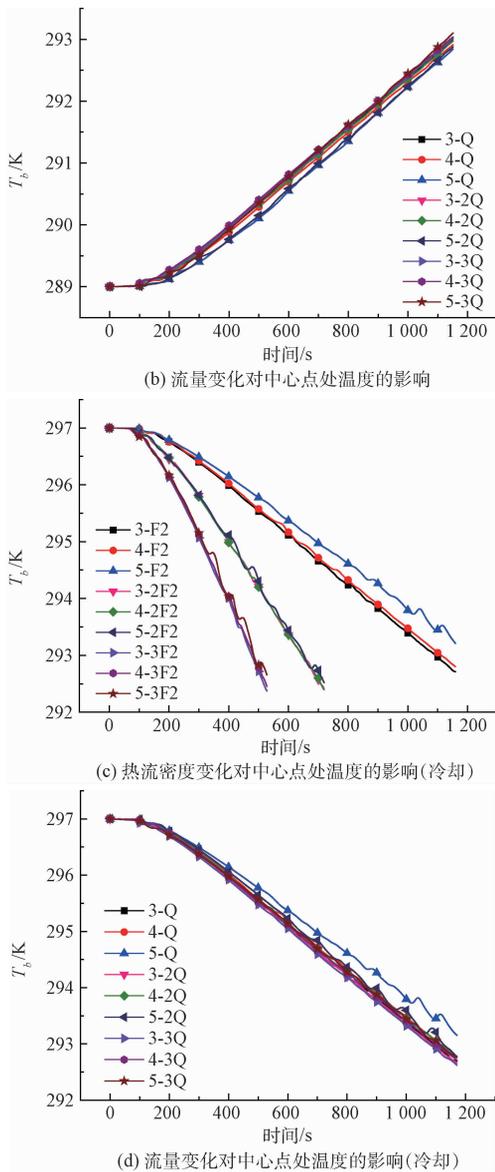


图 8 不同工况下中心点处温度随时间变化

水套中水流量,对恒温容器的温度响应影响并不明显。

## 4 结 论

本文在不同结构和流动参数下对恒温容器内的流动和传热进行了数值模拟,得到以下结论:

1)通过对恒温容器内的传热分析得出,当水套内螺旋导流隔板圈数增加,底部冷却使得杯内流体温度分层现象较侧面加热情况明显,不利于被测粘度液温度均匀性要求。

2)当加热和冷却温差相同的情况下,对于不同层数螺旋隔板的结构,加热时的温度响应基本为  $0.24\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ;从底部冷却时,螺旋隔板圈数增多使得内杯热分层现象增

强,导致冷却时响应减缓,最多相差  $0.036\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。

3)循环水量一定时,提高热流密度,可快速加快恒温容器温度响应,但仅改变循环水量,对不同结构恒温容器的温度响应影响并不明显。

## 参 考 文 献

- [1] 陈惠钊. 粘度测量(修订版)[M]. 北京:中国计量出版社,2003.
- [2] 童刚,陈丽君,冷健. 旋转式粘度计综述[J]. 自动化博览,2007,24(1):68-70.
- [3] 杨斌,程杰,李国芳. 浅谈旋转粘度计的使用[J]. 现代制造技术与装备,2014(2):52-52.
- [4] GB/T 10247-2008,粘度测量方法[S]. 北京:中国标准出版社,2008.
- [5] 傅吉坤. 夹套热-固耦合分析设计[J]. 应用能源技术,2013(6):5-7.
- [6] 罗小平,黄岗. 夹套间缩放管传热性能研究及场协同分析[J]. 炼油技术与工程,2008,38(11):38-42.
- [7] 刘美丽,毛羽,王娟,等. 气粒两相流与夹套耦合传热的数值模拟[J]. 化学反应工程与工艺,2011,27(2):121-126.
- [8] 杨振岭,方伟,叶新. 太阳辐射度绝对辐射计真空中腔温响应测量[J]. 电子测量与仪器学报,2013,27(8):709-714.
- [9] 周茜,马军平. 一种便携式仓储温湿度检测仪的设计[J]. 国外电子测量技术,2013,32(11):45-48.
- [10] 兰羽. 具有温度补偿功能的超声波测距系统设计[J]. 电子测量技术,2013,36(2):85-87.
- [11] REINDL D, SUN K K, KANG Y T, et al. Experimental verification of a solar hot water heating system with a spiral-jacketed storage tank [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2008, 22(11):2228-2235.
- [12] BAEK S M, JIN H N, HONGH, et al. Effect of brine flow rate on the performance of a spiral-jacketed thermal storage tank used for SDHW systems: A computational fluid dynamics study [J]. Applied Thermal Engineering, 2011, 31(14-15):2716-2725.
- [13] 陶文铨. 数值传热学[M]. 2版. 西安:西安交通大学出版社,2010.
- [14] PATANKAR S V. Numerical heat transfer and fluid flow[M]. Hemisphere, Washington D. C., 1980.

## 作 者 简 介

孔昭文,上海理工大学工学硕士研究生,主要从事流动和传热的数值模拟技术研究。

E-mail:kwen5712@163.com