第 39 卷第 3 期 工 程 热 物 理 学 报 Vol.39, No.3
2018 年 3 月 JOURNAL OF ENGINEERING THERMOPHYSICS Mar., 2018

电热水器能耗数值计算及保温性能优化分析

靳蒲航[1] 粘权鑫[1,2] 方文振[1] 陶文铨[1]

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院热流科学与工程教育部重点实验室，西安 710049;
2. 东风柳州汽车有限公司商用车技术中心，柳州 545000)

摘 要 电热水器中的能量传递过程主要包括电加热丝对内胆中水的加热过程，内胆中水的自然对流过程以及通过保温层的散热过程. 本文采用多尺度数值模拟方法：用 LBM 确定保温材料导热系数作为基于连续介质的 Fluent 的输入数据，对发生在电热水器中的流动和耦合传热过程进行了数值模拟，并采用 UDF 来控制电加热丝的动态间歇加热工作过程，建立了模拟电热水器 24 h 固有能耗系数测试过程的数值模拟方法. 采用该方法模拟得到的能耗系数与实验值符合良好，证明了该模型的准确性. 同时模拟获得了电热水器中水在加热和散热阶段的流动特性、温度分布，以及各个区域的散热占比和热流密度. 提出了优化电热水器保温隔热性能的判据，为电热水器保温结构的优化提供了依据.

关键词 电热水器；数值模拟；能耗系数；保温性能优化
中图分类号: TK123 **文献标识码**: A **文章编号**: 0253-231X(2018)03-0587-05

Numerical Prediction of Energy Consumption and Optimization of Thermal Insulation of an Electrically-Heated Water Heater

JIN Pu-Hang[1] NIAN Quan-Xin[1,2] FANG Wen-Zhen[1] TAO Wen-Quan[1]

(1. *Key Laboratory of Thermo-Fluid Science and Engineering of MOE, School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;*
2. *Technology center of commercial vehicle, Dongfeng Liuzhou Auto Co., Ltd, Liuzhou 545000, China*)

Abstract In the electrically-heated water heater, several major energy transfer processes are involved: the heating process of the water, natural convection of the water and heat dissipation of the water through the insulation layer. In the present paper, multiscale numerical simulation was conducted to simulate the heat transfer and fluid flow in the water heater: LBM was adopted to predict the thermal conductivity of the porous media insulation layer which served as input data for Fluent in ANSYS Fluent. In addition, User Defined Function was developed to control the intermittent heating to the water. The energy consumption coefficients obtained by the simulations fit well with the experimental results. Fluid flow characteristics, temperature profile and heat dissipation distribution were also obtained to guide the optimization of the thermal insulation layer.

Key words electrically-heated water heater; numerical simulation; energy consumption coefficient; thermal insulation optimization

0 前 言

近些年使用电热水器的家庭越来越多，使得电热水器成为紧随空调之后的第二大耗电家用电器. 我国于 2008 年 11 月 1 日正式颁布了 GB21519-2008《储水式电热水器能效限定值及能效等级》的国家标准 [1]，规定了储水式电热水器的能效限定值、节能评价值、能效等级等. 24 h 固有能耗系数是指在热水器不进水不出水的条件下，将水温维持在设置温度所需的能量与固有能耗基准值的比值，比值越低，节能效果越好. 电热水器 24 h 固有能耗系数通常是按照国标中的测试标准，通过制造样机，进行实验测定而获得的，产品开发周期长且耗资巨大. 董军等 [2] 对比了电热水器两种能耗测试的方法，并提出了改进措施. Aguilar [3] 总结了加拿大国内电热水器的基本情况以及能耗水平. 而目前对电热水器 24 h 固有能耗系数的数值模拟工作却罕见报道. 牛纪德等 [4] 采用理论模型来简化电热水器的非稳态传热过程，并对比了不同运行方式的能耗水平，为节能提供了指导方向. 郑金玲等 [5] 采用有限元法对电热水器

收稿日期: 2017-03-06; **修订日期**: 2018-02-11
基金项目: 国际合作重大基金 (No.51320105004); 国家自然科学基金重点基金 (No.51136004)
作者简介: 靳蒲航 (1992-)，男，博士研究生，主要从事相变换热的实验和数值模拟研究.

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

的散热过程进行了模拟，然而只模拟了电热水器的散热阶段，而对电热水器的加热过程并未研究，因而模拟获得的能耗系数误差较大。

本文以 ANSYS Fluent 为平台 [6]，采用自行编写的 UDF(User Defined Function) 程序，完整模拟了电热水器间歇加热，散热的非稳态过程，真实还原了国家标准 GB21519-2008 [1] 中规定的 24 h 固有能耗系数的实验测试过程。根据数值模拟结果，计算出 24 h 固有能耗系数，并与实验值进行对比；模拟获得了电热水器内部的流动特性以及温度分布，及不同区域的热流密度和散热占比，并据此对电热水器的保温性能提出优化的方向。

1 物理模型

电热水器整体结构经过简化后如图 1 所示：主要包含加热管、进水管、出水管、镁棒、内胆、聚氨酯发泡保温层以及外壳等结构。根据国标的规定，电热水器内胆的水温需要维持在一定的范围内。电热水器中的工作过程如下：当水温温控器所检测温度达到设定温度范围的下限时，电热水器中的加热丝开始加热；达到上限时停止加热。由于电热水器中的水温高于环境温度，因而始终会有热量从电热水器通过保温层和外壳散发到环境中去。在无加热源的情况下电热水器中水温缓慢下降，直至触发加热丝的下一轮启动。电热水器就是这样周而复始工作的。

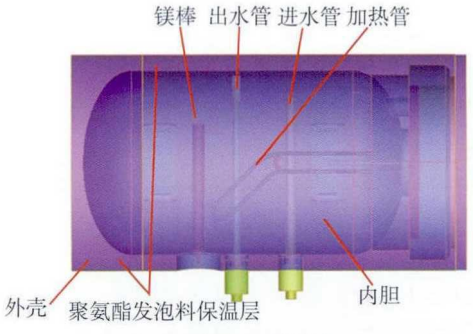


图 1 电热水器结构

Fig. 1 Diagram of an electric water heater

2 数值模拟方法

整个电热水器的传热过程包括：电加热丝对内胆中水的加热过程；内胆中水的自然对流换热过程；内胆中的水通过保温层的散热过程以及外壳与大空间的自然对流和辐射过程。采用非结构化网格离散计算区域，最小网格尺寸约 1 mm，最大网格尺寸约 20 mm，网格划分情况如图 2 所示，域与域之间的界面采用 “coupled” 的属性。

图 2 网格纵向剖面图

Fig. 2 Meshes of different parts

24 h 固有能耗系数的测试过程为非稳态过程，加热管为间断加热，本文编写 UDF 程序来控制这一过程。它通过监测五个测点的平均温度来控制电加热管的热源值，当监控水温大于 68°C 时，加热管内热源为 0；而当监控水温低于 62°C 时，给加热管赋予一定的加热功率。

为统计不同部位的散热比例和热流密度，本文将电热水器内胆及镁棒、进出水管的封闭曲面进行分块，最终将内胆表面划分为 23 个不同的区域，区域划分及五个测点的分布如图 3 所示。

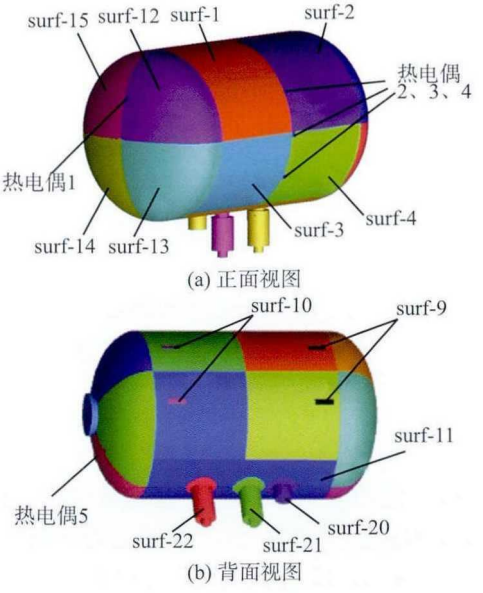


图 3 散热区域划分

Fig. 3 Partition of the heat dissipation area

本文将物质 “水” 的物性设置为随温度变化的函数，并考虑重力，以模拟内胆中水的自然对流。热水器外壳向环境的对流及辐射的散热也可以采用数值模拟方法计算，这样所研究的问题就成为多次耦合的多尺度问题，使得计算工作量大大增加。鉴于大空间自然对流已经有比较成熟的关联式，而辐射换热

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

可以采用大包壳内的小物体模型 [7]，因此采用大空间自然对流经验关联式 [7] 来获得外壳与周围环境的自然对流换热系数，外壳的辐射发射率设定为 0.25。保温材料聚氨酯为多孔介质，其等效导热系数是通过数值重构、采用介观的格子玻尔兹曼方法计算求得，然后赋值给相应的材料，作为连续介质的模拟 (采用 ANSYS Fluent 平台) 的输入数据，因此所模拟的问题即使简化了外壳散热的计算，仍然是一个多尺度过程 [8]。经过网格独立性和时间步长独立性考核，最终采用 165 万的非结构化网格以及 20 s 的时间步长进行计算 [9]。

3 结果与讨论

3.1 模型验证

数值模拟中 5 个 "热电偶" 的平均温度随时间的变化过程如图 4 所示。在加热丝通电和断电时刻记录此时的时刻和五个 "热电偶" 的平均温度，然后根据国标 GB 21519-2008 [1] 中的方法计算电热水器 24 h 固有能耗系数。通过模拟获得两个某型号的电热水器 24 h 固有能耗系数分别为 0.53 和 0.43，其对应的实验值分别为 0.58 和 0.45，相对误差分别为 10.3%和 4.4%，证明了所建立的数值模拟模型的准确性。

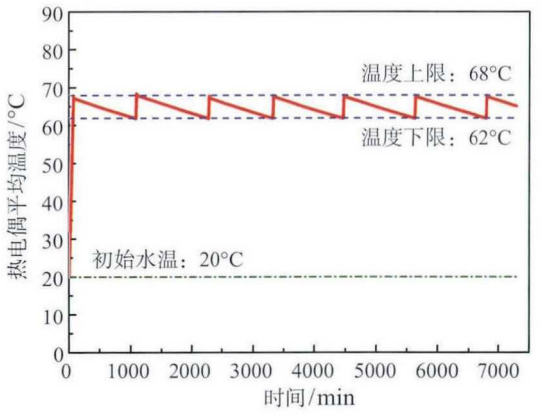


图 4 模拟中 "热电偶" 平均温度随时间变化曲线

Fig. 4 Average temperature variation with time of the five "Thermal couples"

3.2 内胆中水的流动特性和温度分布

图 5 所示为在加热 4.3 min 后过加热丝截面上水的温度分布云图，图 6 所示为加热 4.3 min 后过加热丝截面上水的速度矢量图。可以看出，加热丝附近水温较高，热水的密度较小，向上运动，到达顶端后从左右两侧回流至内胆底部，这时截面顶部与底部最大温差大于 15°C，自然对流强烈，水的最大流速为 0.14 m·s^{-1}.

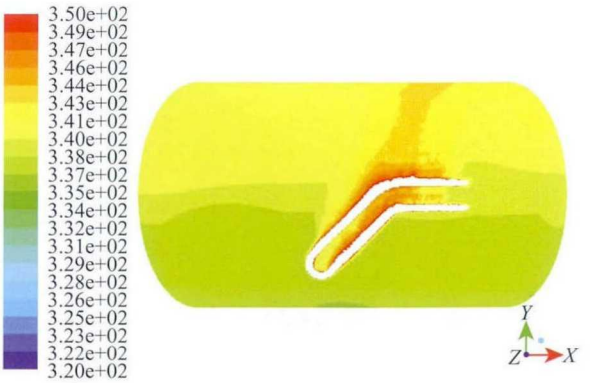


图 5 过加热丝截面水温云图 (加热 4.3 min 时)

Fig. 5 Temperature profile in the water container (heated 4.3 min)

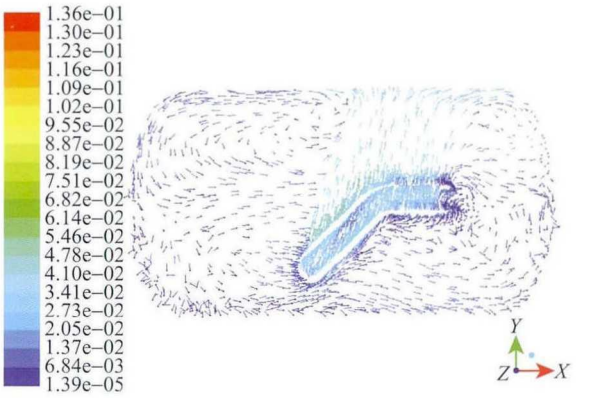


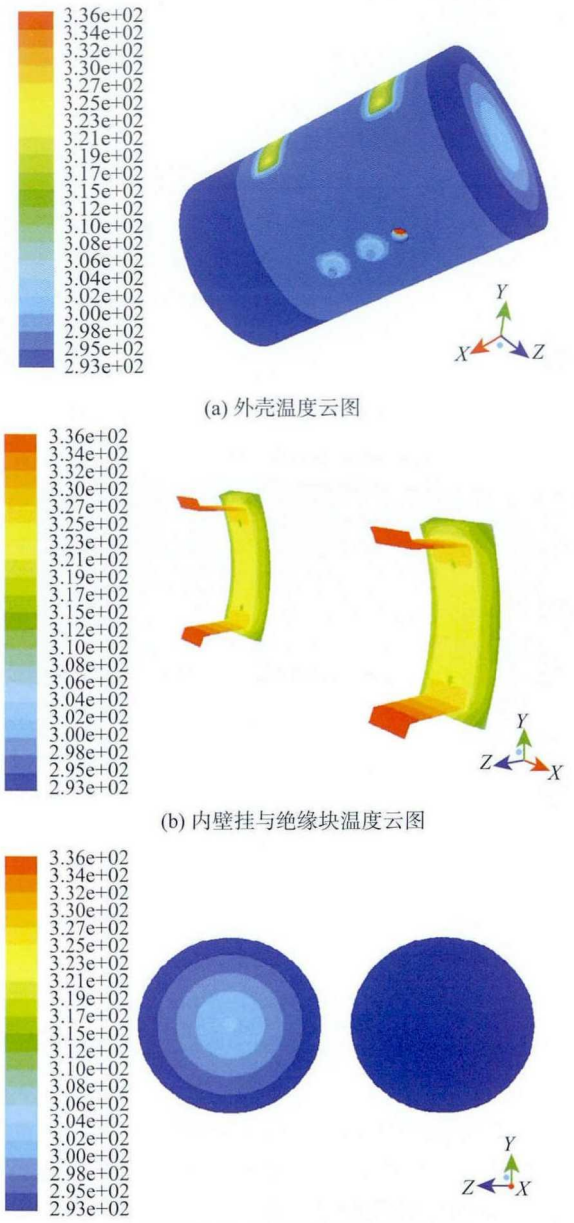
图 6 过加热丝截面水的速度矢量图 (加热 4.3 min 时)

Fig. 6 Velocity profile in the water container (heated 4.3 min)

图 7 所示为加热 4.3 min 后电热水器外壳的温度分布云图. 由图 7(a) 可知外壳的大部分区域温度与室温 (20°C) 差距很小，在 5°C 以内，进出水管与镁棒处温度较高；由图 7(a)~(b) 可知由于内壁挂与内胆直接接触，而壁挂处保温材料的导热系数高于周围聚氨酯发泡料，因此热量主要从壁挂处导出，此处温度明显高于机身平均温度；由图 7(c) 可以看出左端面的最高温度达 29°C，右端面温度约 20°C，这是因为左端和右端的保温结构不尽相同，因此左端需进一步加强保温。

图 8 为散热阶段中心纵向截面的水温分布云图。由图 (a) 可知，在停止加热 40 min 时，横向水温分布均匀，纵向上仍然存在温差，上部温度较高，下部温度较低，但最大温差仅有 1°C 左右，由于保温良好，水温仍维持在 67~68°C 左右。由图 (b) 可知，停止加热 521 min 后，内胆中水温更加均匀，水温约为 62°C 左右，即将达到温度下限使加热管开始工作。

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



(a) 外壳温度云图

(b) 内壁挂与绝缘块温度云图

(c) 左端面 (左) 与右端面 (右) 温度云图

图 7 电热水器外壳温度 (加热 4.3 min 后)

Fig. 7 Temperature profile of the outer surface

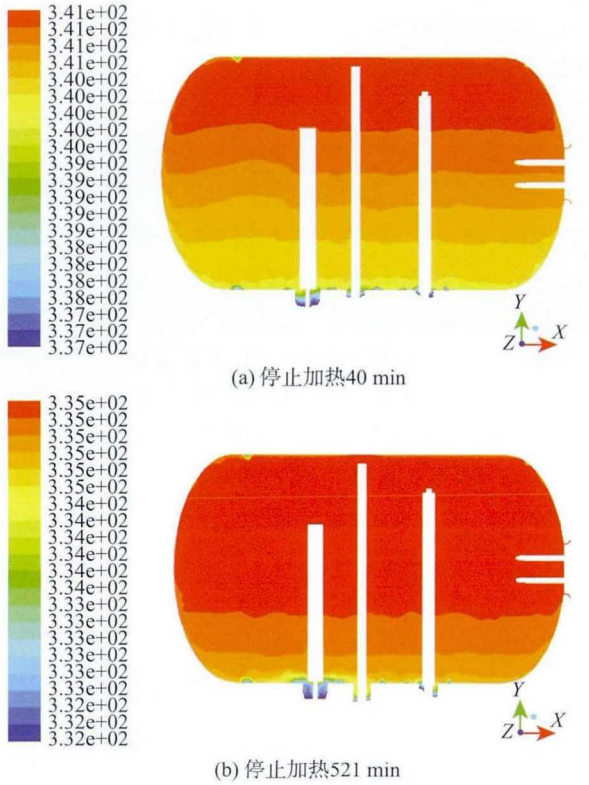
图 9 所示为电热丝停止加热后，几个具有不同保温材料模型的散热速率随时间的变化曲线。曲线下的面积代表一段时间内的总散热量。由图中可以看出，散热速率随时间下降，这是因为内胆水温由于散热而逐渐降低，与室温温差减小所致。对每一个模型，其对应曲线下的面积为整个散热阶段的散热量，理论上等于 50 L 水在 68°C 与 62°C 的焓差，因此保温性较差的结构散热速率大，总散热时间短，其 24 h 固有能耗系数也较大。

3.3 电热水器中热流密度分布及优化

为统计不同部位的散热比例，前面对电热水器中的内胆划分了 23 块区域。限于电热水器内胆结构，划分的 23 个区域面积不等。为了考察通过每个区域的散热情况，定义参数 F：

$$F_i = \frac{i\text{ 区域散热量占比}}{i\text{ 区域面积占比}} = \frac{i\text{ 区域热流密度}}{\text{整机平均热流密度}}$$

F 值大于 1 时代表该区域的热流密度高于整机平均热流密度。各个区域的 F 值及散热量占比如图 10 所示。



(a) 停止加热40 min

(b) 停止加热521 min

图 8 散热阶段中心截面水温云图

Fig. 8 Temperature profile in the water container in the non-heating process

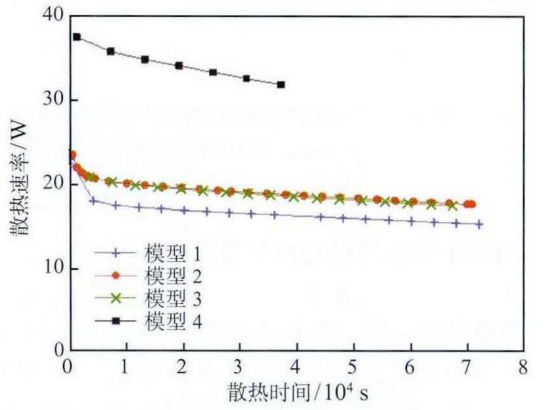


图 9 散热速率随时间变化

Fig. 9 Variation of heat dissipation rate with time

由图 10 可以看出，区域 9、10 热流密度远大于

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

平均热流密度，且散热占比很大，为保温薄弱环节。区域 12-15 的热流密度虽然只比整机平均热流密度高 0.2 倍左右，但由于左端盖的面积较大，通过左端盖区域的散热量占总散热量的 25%以上。区域 20-22 虽然 F 值大于 1，即热流密度比整机平均热流密度大，但由于结构突出，若进行包裹则影响美观，且通过这三个区域的散热量仅占整体的 5%左右，故此部分可不予优化。

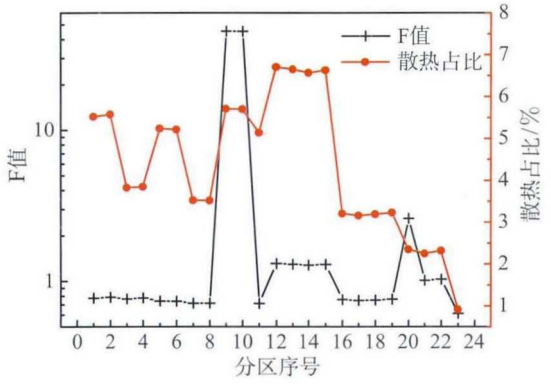


图 10　各区域 F 值对比

Fig. 10　F value and ratio of heat dissipation of different areas

图 11 给出了两种不同桶身保温材料厚度时，各区域 F 值和散热占比的对比。Case 1 的桶身厚度 20 mm，Case 2 的桶身厚度为 60 mm，可以发现 Case1 中 surface 1-8, 11 的散热占比和 F 值明显高于 Case2，并且桶身的散热占比超过挂角和左端面成为最主要的散热因素。因而桶身保温材料厚度对电热水器保温隔热性能有显著影响。

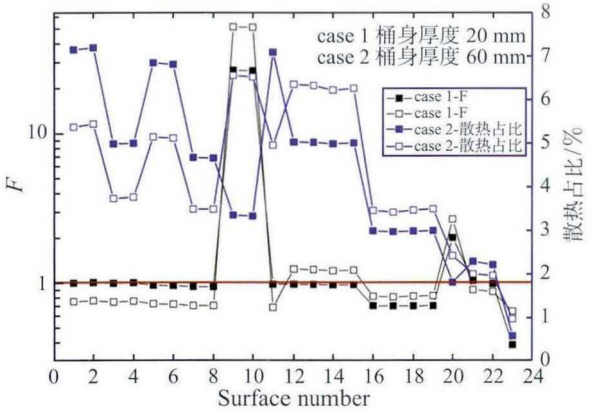


图 11　两种不同桶身厚度的 F 值和散热占比对比

Fig. 11　Comparison between two insulation methods

4 结　论

本文对储水式电热水器 24 h 固有能耗测试过程中的流动和耦合传热过程进行了多尺度数值模拟，编写 UDF 程序来控制加热管的间歇加热过程，得到了以下结论：

1) 建立了完整模拟电热水器 24 h 固有能耗系数的模拟方法，24 h 固有能耗系数的模拟值与实验值符合良好；

2) 模拟获得了电热水器各个区域的散热占比和热流密度，提出了电热水器保温隔热性能优化的判据，并查明了该热水器的保温薄弱环节，发现桶身保温材料的厚度是影响电热水器能耗水平的关键参数。

参 考 文 献

[1] 中国国家标准化管理委员会. GB21519-2008 储水式电热水器能效限定值及能效等级 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008
Standardization Administration of China. GB21519-2008 Storage Type Electric Water Heaters Limited Values of Energy Efficiency and Rating Criteria [S]. Beijing: Standards Press of China, 2008

[2] 董军. 储水式电热水器能耗测试方法探讨 [J]. 家电科技, 2011(10): 66–68
DONG Jun. Study on Thermal Storage Type Electric Water Heaters Energy Consumption Test Methods [J]. Science and Technology of Household Electric Appliance, 2011(10): 66–68

[3] Aguilar C, White D J, Ryan D L. Domestic Water Heating and Water Heater Energy Consumption in Canada [R]. Canadian Building Energy End-Use Data and Analysis Centre, 2005

[4] 牛纪德, 周遵凯, 杨先亮. 电热水器运行方式与能耗的理论分析 [J]. 山西建筑, 2012, 38(26): 213–214
NIU Jide, ZHOU Zunkai, YANG Xianliang. Theoretical Analysis of Operation Mode of Electric Water Heaters and Energy Consumption [J]. Shanxi Architecture, 2012, 38(26): 213–214

[5] 郑金玲, 胡小芳, 黄焕文. 储水式电热水器的有限元能效分析 [J]. 化工机械, 2011, 38(3): 309–312
ZHENG Jinling, HU Xiaofang, HUANG Huanwen. Finite Element Analysis of Energy Efficiency of Electric Water Heaters [J]. Journal of Chemical Machinery, 2011, 38(3): 309–312

[6] ANSYS FLUENT 14.0 Theory Guide. ANSYS Incorporated, USA, 2011

[7] 杨世铭, 陶文铨. 传热学 [M]. 第 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2006
YANG Shiming, TAO Wenquan. Heat Transfer [M]. 4th Edition. Beijing: Higher Education Press, 2006

[8] He Y L, Tao WQ. Multiscale Simulation of Heat Transfer and Fluid Flow Problems [J]. ASME J Heat Transfer, 2012, 134: 031018

[9] 陶文铨. 数值传热学 [M]. 第 2 版. 西安：西安交通大学出版社, 2001
TAO Wenquan. Numerical Heat Transfer [M]. 2nd Edition. Xi'an: Xian Jiaotong University Press, 2001

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net