

文章编号:0253-4339(2013) 05-0013-05
doi:10. 3969/j. issn. 0253-4339. 2013. 05. 013

进口结构对水箱性能影响的模拟及实验研究

李 阳¹ 李舒宏¹ 赵 苗² 张小松¹

(1 东南大学能源与环境学院 南京 210096; 2 北京国建设计有限公司 北京 100001)

摘 要 建立了高为 80cm,截面为 40cm×40cm 的长方体水箱,并对水箱的热力性能进行了模拟及实验研究。实验分别设计了开槽型进口和直接进口结构的水箱 CFD 三维模型,并利用水箱 *Ri* 数和用能效率对不同进口结构的性能进行分析比较。同时,搭建不同进口结构水箱实验台,验证分析不同进口结构对水箱用能效率的影响。实验结果表明其中的开槽型结构水箱与直接进口结构相比能有效改善用能过程的热分层效果,明显提高用能效率。在 5L/min 流量条件下,开槽型进口结构的用能效率比直接进口的高出 7%,而当流量为 15L/min 时,两者之间的差距增大至 25%。

关键词 用能效率; CFD 模拟; 热分层

中图分类号:TK114; TU822 **文献标识码:**A

Simulation and Experimental Investigation of the Influence on the Performance of Tanks with Different Inlets

Li Yang¹ Li Shuhong¹ Zhao Miao² Zhang Xiaosong¹

(1. School of energy and environment, Southeast University, Nanjing, 210096, China; 2. Beijing Guojian Design Corporation, Beijing, 100001, China)

Abstract This paper designed a solar water tank with dimension of 80cm(height)×40cm(width)×40cm(length) and the slotting inlet and direct inlet to study discharging performance of tank by presenting some experiments and simulations. The *Ri* number and the discharging efficiency were introduced to investigate the performance of the different inlet-tanks. The discharging efficiency was introduced to evaluate the thermal performance of the tank with different inlets. The result indicated that slotting inlet improved the efficiency of thermal stratification effectively and promoted discharging performance obviously. The discharging efficiency of slotting inlet was 7% higher than the direct inlet with the flow rate of 5L/min and the gap increased to 25% when the flow rate is 15L/min.

Keywords discharging efficiency; CFD simulation; thermal stratification

目前,太阳能已经成为全世界应用最广泛的可再生能源利用方式,而有效提高和改进太阳能热水器的性能成为人们不断追求和探索的重点。国内外学者通过研究发现,太阳能热水箱中存在热分层现象,而导致水箱用能性能发生变化,影响太阳能热水系统的性能^[1-4]。José 和 Furbo 等人通过研究不同进出口的位置和结构对水箱性能的影响发现,在进口处设置加装挡板以及优化水箱进口位置均能有效提高水箱热分层^[5-6]。同济大学于航教授对大温差水蓄冷空调系统进行了模拟,并对不同类型的布水器模型进行模拟,分析其充冷过程中的温度场分布和速度场分布,从而优化布水器的设计^[7]。天津大学的赵军等人提出了扩散器设计的基本假设及方法,并对分层型蓄冷水箱的热力性能进行实验研究^[8]。此外,太阳能制

冷空调技术的发展也不断促使蓄热水箱在太阳能吸收式制冷系统和太阳能吸附式制冷系统的应用^[9-10]。优化蓄热水箱的结构,提高水箱的蓄热性能,能够有效解决太阳能系统中存在的冬季热水出流量低下、不能充分利用太阳能的问题,从而有效节约能源,实现太阳能制冷空调系统的全年高效运行。通过对长方体结构的水箱进行数值模拟和实验分析,分别研究开槽型进口和直接进口结构对水箱内部温度场及用能效率的影响,并通过对水箱 *Ri* 数的分析进一步探求水箱热分层的形成机理。

1 建立模型

国外学者通过建立二维 CFD 模型对夹套层水箱温度场进行了研究^[11]。而文章分别建立了两种不同

基金项目:“十二五”国家科技支撑计划课题(2011BAJ03B05)资助项目。(The project was supported by the 12th Five Year Key Technologies R&D Program of China (No. 2011BAJ03B05).)

收稿日期:2012 年 9 月 21 日

进口结构水箱的三维 CFD 模型研究不同进口对水箱性能的影响。水箱均为长方体立式水箱,具体参数为 40cm(L) × 40cm(D) × 80cm(H), 体积为 128L。冷水进水口和热水出水口分别位于水箱底部和顶部的中间位置,如图 1 所示。水箱的出水口均采用传统的直接出水方式,高度为 5cm,进水口分别设置成直接进口和开槽型进口结构,两种进口结构的进口高度均不超过 5cm,小于 0.0625H,不同进出口结构及参数如图 2 所示。其中开槽型进口底部设有 3 条宽为 3mm,长为 70mm 的凹槽,如图 2(a) 所示。

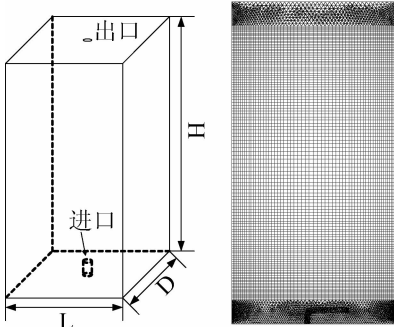


图 1 水箱结构及网格划分

Fig.1 Structure of the tank and the unstructured grid

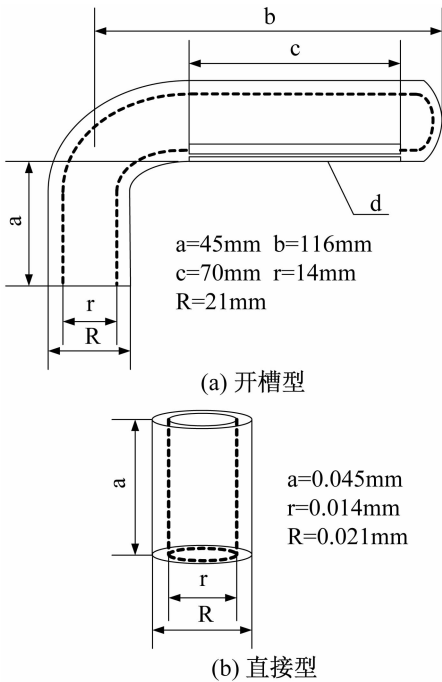


图 2 水箱进口结构

Fig.2 Inlet structures of the tanks

2 模拟分析

为了便于统一分析,实验考察将整个水箱中水置换一次过程中水箱中各层水体温度的分布情况以及出水温度特性,因此定义无量纲用能时间如下:

$$t_{\text{use}} = V_{\text{sl}}/v_{\text{use}} \tag{1}$$
$$\tau_{\text{use}} = t/t_{\text{use}} \tag{2}$$

式中: V_{sl} 为水箱体积, m^3 ; v_{use} 为释能水流量, m^3/s ; t 为释能时间, s ; t_{use} 为用能时间, s ; τ_{use} 为无量纲用能时间。

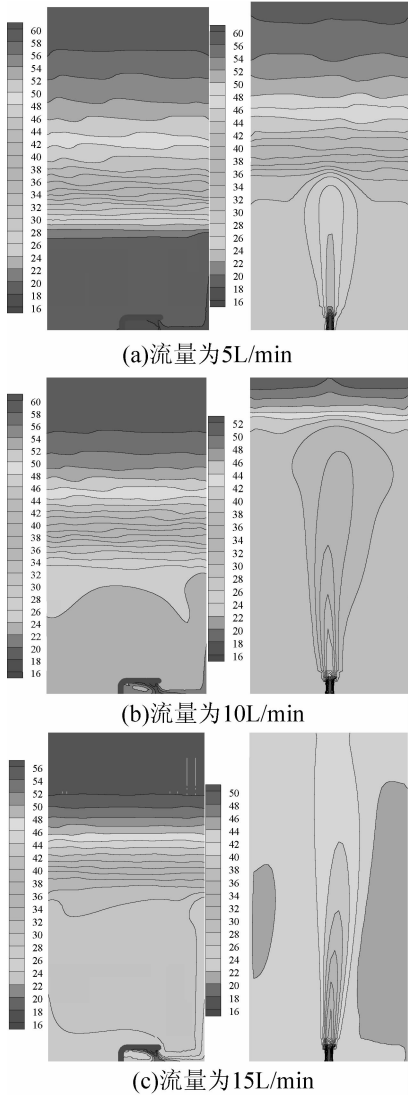


图 3 两种不同进口在不同流量条件下的水箱温度场分布
Fig.3 The changing of the temperature field in the tank with different inlet structures

当无量纲用能时间为 1 时,水箱中的水体被完整置换一次。不同的模拟实验均考察无量纲用能时间达到 1 的过程中水体温度场变化。建模完成后导入 FLUENT6.3 中,为了研究不同流量条件下两种不同进口结构对水箱性能的影响,水箱分别设置了流量为 5L/min、10L/min 和 15L/min 条件下的水体温度场变化,并采用 $k-\epsilon$ 模型进行计算,共开展了六组算例,时间步长均设置为 1s,并采用二阶精度模拟无量纲用能时间达到 1 时的水箱温度场变化。

图 3 分别表明了当无量纲用能时间为 0.5 时,两

种不同进口结构在不同流量条件下的水箱温度场分布。水箱的冷水进水温度均为 15℃, 初始温度均为 60℃。通过对六个算例的温度场模拟发现, 当流量相同时, 开槽型进口结构水箱的水体温度分层明显优于直接进口结构, 顶层出口温度较高。对于开槽型进口结构的水箱, 由于进口对进水的抑制作用, 水箱底层水流扰动较弱, 最终形成温度较高的水箱热分层。对于直接进口结构水箱, 当冷水进入水箱时, 水流受进水压力的影响直接向上射流, 破坏水箱内部的温度分层, 最终在水箱垂直方向上形成环形等温场, 不利于水箱热分层的稳定。当水箱流量增加至 15L/min 时, 进口冷水对水箱内水体温度场的扰动进一步扩大。对于开槽型进口结构的水箱, 上层高温水域仍然保持着较好的热分层。而对于直接进口结构的水箱, 由于进口水体的水流势头较大, 进口冷水高速向上运动, 并在用能过程的初始阶段破坏了顶层高温水体热分层的稳定, 直接影响热水出流, 最终在水箱侧面形成高温水区域, 不利于高温水出流。

同时, 进口处的 Ri 数可以用作分析不同进口结构在不同流量条件下的热分层差异的有效参数^[12]。 Ri 数的定义如下:

$$Ri = \frac{Gr}{Re^2} = \frac{\frac{g\beta l^3 \Delta t}{v^2}}{\left(\frac{ul}{v}\right)^2} = \frac{g\beta l \Delta t}{u^2} \quad (3)$$

式中: Gr 、 Re 分别表示格拉晓夫数和雷诺数; g 表示重力加速度, m^2/s ; Δt 表示进口与水箱底部的温度差, $^{\circ}C$; l 表示特征长度 m ; v 为粘度, m^2/s ; u 表示进口流速, m/s ; β 表示热膨胀系数 ($1/K$)。

图 4 表示模拟结果中不同进口结构在不同流量条件下的 Ri 数变化。从图中可以看出, 在相同流量条件下, 开槽型进口结构的 Ri 数远远大于直接进口结构, 表明开槽型进口水箱内水体的浮升力占主导作用, 自然对流作用较为明显, 而直接进口水箱中进水惯性势能对水体影响较大, 湍流作用较强。当流量由 5L/min 增加至 15L/min 时, 开槽型进口和直接进口的 Ri 数均出现大幅度降低, 降幅分别为 80% 和 74%, 进水扰动进一步增大, 湍流作用明显增强, 进口水流初期产生的混合和耗散削弱了水体热分层。

3 实验系统

建立了如图 5 所示的实验系统用于研究两种不同进口结构条件下水箱的热分层特性, 进口特性如图 2 所示。水箱设计成规格为 80cm(H) × 40cm(L) × 40cm(W) 的长方体形状, 大小与 CFD 模型一致, 且顶

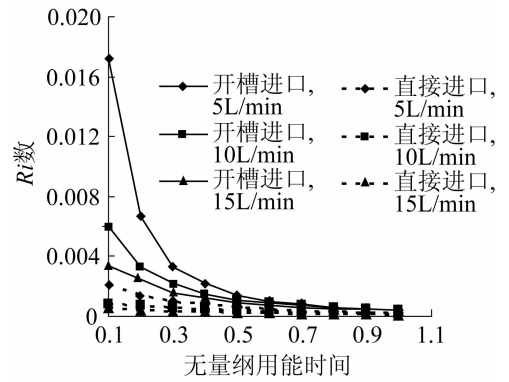


图 4 不同进口结构在不同流量条件下的 Ri 数变化

Fig. 4 The changing of the Richardson number of the tanks with different inlets under different flow rate

盖可拆卸, 实验时可通过顶盖螺栓的拆卸可以对水箱的冷水进口结构方便地进行更改, 同时在水箱垂直方向上安装八根热电偶用以测量水箱温度变化, 从而研究改进进口结构后的水箱在蓄能用能特性上的差异。

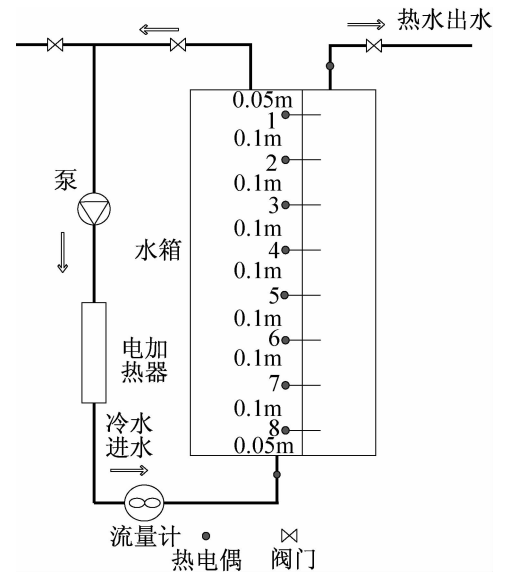


图 5 实验系统示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the experiment system

4 实验与模拟对比分析

为了对不同流量条件下不同进口结构对水箱用能性能的影响进行研究, 采用用能效率定义水箱性能变化。用能效率即是指用能过程中累计出水所含能量与用能过程开始时刻水箱内含有能量的比值。以下为该评价指标的定义过程。

$$\eta = \frac{E}{E_{st}} \quad (4)$$

式中,

$$E_{st} = Mc_p (T_{st} - T_i) \quad (5)$$

$$E = \sum mc_p (T_o - T_i) t \quad (6)$$

式中: m 为水箱质量流量, kg/s ; c_p 为水体定压比热容, $4.18\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$; M 为初始时刻水箱内水体总质量, kg ; T_{st} 、 T_i 和 T_o 分别为水箱初始温度、进口温度和出水温度, $^\circ\text{C}$ 。

当无量纲用能时间为1时,不同进口结构的水箱用能效率变化如图6所示。从图中可以看出,在相同流量条件下,开槽型进口结构水箱的用能效率均高于直接进口结构水箱。当流量为 $5\text{L}/\text{min}$ 时,开槽型进口结构水箱的用能效率高达95%,比直接进口高约7%。当流量增加至 $15\text{L}/\text{min}$ 时,开槽型进口结构水箱的用能效率比直接进口高25%。通过图表数据分析表明,在相同流量条件下,开槽型进口结构能有效抑制进口水流的扰动,减小热量耗散,使热量大部分集中于水箱上部,从而提高水箱用能效率。而直接进口水流直接冲击水箱上层水体,破坏了水箱上部温度层的稳定,降低了水箱的用能效率。同时,随着流量的增加,进口水流对水箱用能效率的影响增大,但开槽型进口结构水箱相比于直接进口仍具有提高水箱用能效率的作用。

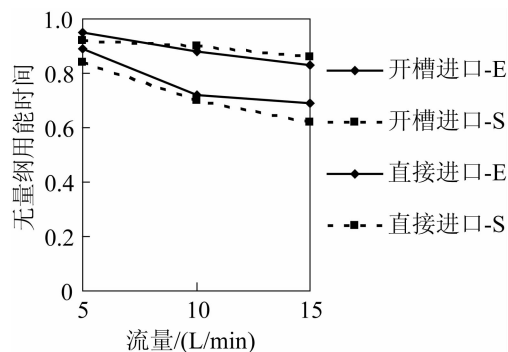


图6 不同流量条件下不同进口结构用能效率的变化
Fig. 6 The changing of the discharging efficiency of different inlets under different flow rates

5 结论

分别建立了开槽型进口结构和直接进口结构水箱的三维CFD模型,并分别对不同流量条件下水箱内的水体热分层特性和不同进口结构对水箱用能效率的影响进行了模拟和实验研究。研究结果表明,开槽型进口能够有效抑制进口水流的扰动,浮升力占主导作用,并保持上层高温水体温度层的稳定,形成良好的热分层。而直接进口水箱的冷水进入水箱后直接破坏水箱内部的温度层,形成垂直方向上的环形温度场,水体湍流作用明显,不利于水箱热分层的稳定。同时,不同进口结构水箱的用能效率表明,当流量为 $5\text{L}/\text{min}$ 时,开槽型进口结构的用能效率高达95%,比直接进口高7%。当流量增加至 $15\text{L}/\text{min}$ 时,开槽型

进口水箱的用能效率仍能保持在80%以上,且比直接进口水箱的用能效率高25%,有效提高了水箱的用能效率。

本文受江苏省自然科学基金(BK2010199)项目资助。
(The project was supported by Jiangsu Province Science Foundation of China (No. BK2010199).)

参考文献

- [1] Zurigat Y H, Liche P R, Ghajar A J. Influence of inlet geometry on mixing in thermocline thermal energy storage [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1991, 34(1): 115-125.
- [2] Ghajar A J, Zurigat Y H. Numerical study of the effect of inlet geometry on stratification in thermal energy storage [J]. Numerical Heat Transfer, 1991, 19(1): 65-83.
- [3] 方贵银. 空调水蓄冷温度分层动态特性研究[J]. 太阳能学报, 1999, 20(3): 279-283. (Fang Guiyin. A study on stratified temperature dynamic characteristics of cold water storage tank [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 1999, 20(3): 279-283.)
- [4] 韩延民, 王如竹, 代彦军, 等. 卧式热分区太阳能水箱内的贮热性能分析及实验研究[J]. 太阳能学报, 2008, 29(3): 277-282. (Han Yanmin, Wang Ruzhu, Dai Yanjun, et al. Analysis and experimental studies on heat storage performance with in a horizontal thermal partition solar water tank [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2008, 29(3): 277-282.)
- [5] Shah L J, Furbo S. Entrance effects in solar storage tanks [J]. Solar Energy, 2003, 75(4): 337-348.
- [6] José F S, Francisco J U, Jaime S. Experimental analysis of a domestic electric hot water storage tank. Part II: dynamic mode of operation [J]. Applied Thermal Engineering, 2007, 27(1): 137-144.
- [7] 于航, 邓育涌, 孙斌, 等. 温度分层型水蓄冷罐的仿真研究[J]. 能源技术, 2006, 27(3): 122-126. (Yu Hang, Deng Yuyong, Sun Bin, et al. Study of a stratified chilled-water thermal energy storage HVAC system with simulation [J]. Energy Technology, 2006, 27(3): 122-126.)
- [8] 赵军, 余乐渊, 宋佳钊, 等. 分层型蓄冷水箱中扩散器的设计与实验研究[J]. 制冷学报, 2003, 24(2): 5-7. (Zhao Jun, Yu Leyuan, Song Jiafang, et al. Diffuser design and experiment on a stratified chilled-water storage tank [J]. Journal of Refrigeration, 2003, 24(2): 5-7.)
- [9] 代彦军, 王如竹. 太阳能空调制冷技术最新研究进展[J]. 化工学报, 2008, 59(S2): 1-8. (Dai Yanjun, Wang Ruzhu. New development and perspective of solar air conditioning and cooling technology [J]. Journal of Chemical

(下转第27页)

(Y0E4031001)-面向绿色制冷压缩机系统成套润滑技术的开发与产业化,广东省引进创新科研团队计划资助项目(2011D052)-先进电子封装材料等。

About the corresponding author

Sun Rong (1968 –), female, Ph. D./lecturer, Shenzhen Institute of Advanced Integration Technology, (0755) 86392158, E-mail:rong.sun@siat.ac.cn. Research fields: Industrial lubrica-

ting materials, organic-inorganic functional composites and power-storage materials. The author takes on project supported by Project for cooperation of Guangdong Province and Chinese Academy of Sciences; the development and industrialization of complete lubrication technology for green refrigeration compressor system, and Program for Innovation Team of Guangdong province; the Advanced Electronic Packaging Materials.

(上接第 16 页)

Industry and Engineering (China), 2008,59 (S2):1-8.)

[10] 马伟斌,梅建滨,李戡洪,等. 太阳能空调系统性能分析[J]. 制冷学报,2000,21(4):13-17. (Ma Weibin, Mei Jianbin, Li Jianhong,et al. The performance analysis of solar air-conditioning system[J]. Journal of Refrigeration, 2000,21(4):13-17.)

[11] Savick D L, Vielmo H A, Krenzinger A. Three-dimensional analysis and investigation of the thermal and hydrodynamic behaviors of cylindrical storage tanks[J]. Renewable Energy, 2011,36(5): 1364-1373.

[12] Brown N M, Lai F C. Enhanced thermal stratification in a liquid storage tank with a porous manifold[J]. Solar Energy, 2011,85(7):1409-1417.

通信作者简介

李舒宏,男(1973 –),研究员,博士生导师,南京东南大学能源与环境学院,13705168965, E-mail:equart@163.com。研究方向:地源热泵、制冷、建筑节能及可再生能源利用等方面研究等。现进行的项目:“十二五”国家科技支撑计划课题(2011BAJ03B05);江苏省自然科学基金(BK2010199)。

About the corresponding author

Li Shuhong (1973 –), male, Ph. D., School of energy and environment, Southeast University, 13705168965, E-mail: equart@163.com. Research fields: research of ground source heat pump, refrigeration technology, building energy efficiency and the use of renewable energy and so on. The author takes on project supported by the 12th Five Year Key Technologies R&D Program of China (No. 2011BAJ03B05); Jiangsu Province Science Foundation of China (No. BK2010199).