

新型进水结构对太阳能分层水箱热特性影响的研究

王子龙¹ 张 华¹ 王崇愿¹ 严倩雯²

(1. 上海理工大学 能源与动力学院, 上海 200093; 2. 东南大学 能源与环境学院, 江苏 南京 210096)

摘 要: 蓄热技术是太阳能光热利用的重要组成部分, 而以水作为蓄热介质的中低温蓄热技术是太阳能热利用系统中的关键技术之一。本研究设计了一种新型进口均流器, 并搭建了一套储热水箱热力学特性测试实验台。在初始水温 50 °C、进水温度 20 °C 的工况下, 分析对比了不同流量下储热水箱的热力学特性。结果显示: 均流器提高了分层蓄热水箱的分层效果以及水箱的效率。在同一进口流量下, 水箱的热分层效率先增大后减小。而随着无量纲时间的增加, 水箱的焓效率逐步降低, 此外, 水箱的焓效率还随着流量的增加, 先增大后减小。当无量纲时间为 0.6 时, 进口流量分别为 1.14、3.16 和 6.11 L/min 时, 水箱的焓效率分别为 85.9%、90.7% 和 83.9%。

关键词: 储热水箱; 热力学特性; 焓效率; 热分层; 混合数
中图分类号: TK114 文献标识码: A
DOI: 10.16146/j.cnki.rndlge.2016.05.019

引 言

近年来, 随着能源和环境问题日益突出, 可再生能源的开发和利用得到了全球学者的高度关注。太阳能是可再生能源中的主体部分, 更加受到广泛的关注^[1~3]。蓄热技术是太阳能光热利用的重要组成部分, 在太阳能热水系统、热发电系统以及包含储热的热电联合系统等技术中都有重要应用。作为系统中的核心设备, 蓄热水箱不仅决定了系统的蓄热量, 而且对系统效率会产生决定性的影响, 因此具有较高的研究价值^[4~6]。

国内外学者在对分层蓄热水箱进行了较为深入的模拟及实验研究。A. Castell 采用一种喇叭形进口均流器, 在不同流量工况下对比分析了 MIX number(混合数法)、Richardson number(理查德森数法)、Peclet number(皮克列数)、Reynolds number(雷诺数法)等表征分层水箱性能的参数, 结果表明

Richardson number 是用来表征分层水箱特性的最佳参数^[7]; Necdet Altuntop 通过数值分析的方法, 研究了 12 种不同结构的折流板对水箱分层特性的影响, 研究结果表明, 折流板可以有效提高水箱的分层效果, 并且指出, 在折流板中间开孔作用明显, 其中环形折流板效果最佳^[8]。

上海交通大学的王如竹教授等阐述了热分层的形成原因及破坏因素以及对热分层效果的评判指标, 并将导流板放置于储热水箱中, 从而改善水箱中的流道, 提高了水箱的使用效率^[9]; 东南大学的李舒宏教授等通过数值计算和实验的方法, 研究并分析了 3 种进口结构在不同流量条件下水箱内部的温度分层特性, 结果表明, 开孔型进口结构能有效改善用能过程的热分层效果, 比直接进口水箱用能效率提高 21%^[10]。

综上所述, 在蓄热水箱使用过程中影响水箱效率的最主要因素是进口水流对箱内高温热水的扰动, 因此, 设计水箱进口结构能有效降低进口水流对水箱内部流场的扰动, 从而提高水箱效率。本研究基于一种新型进水口结构, 对水箱的分层特性进行实验研究, 并采用混合数法和理查德森数法对水箱的分层特性进行定量分析, 研究结果可为太阳能水箱的进出口结构设计提供相应的参考数据。

1 实验系统

本实验系统主要研究新型进口结构对于水箱分层及其效率的影响。水箱箱体为不锈钢材料, 其顶盖通过螺栓与箱体联接, 以便于对冷水进口结构进行更改。本研究所设计的进水口结构如图 1 所示。

收稿日期: 2015-12-24; 修订日期: 2016-01-27

基金项目: 上海市自然科学基金资助项目(15ZR1428800); 沪江基金研究基地专项(D14001); 教育部博士点基金资助项目(200802520006)

作者简介: 王子龙(1984-), 男, 陕西人, 上海理工大学博士研究生。



图 1 均流器结构

Fig. 1 Structure of a flow uniforming device

试验系统图如图 2 所示,由储热水箱、恒温水箱、变频水泵、流量计、球阀和手动调节阀组成。储热水箱高 60 cm,直径 35 cm,内部容积 60 L,内部插有 1.5 kW 电加热棒。

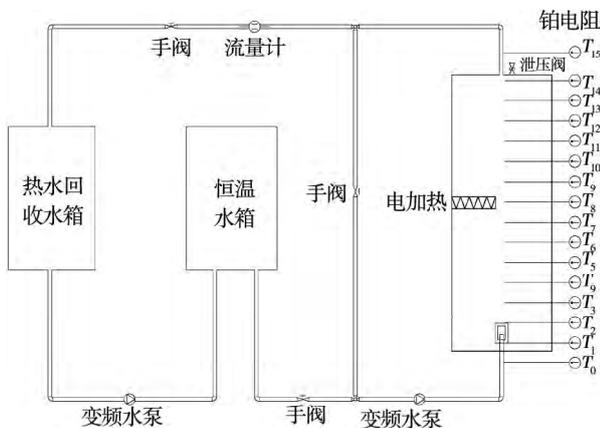


图 2 太阳能分层水箱热力学特性试验系统

Fig. 2 A solar power stratified water tank thermodynamic characteristics test system

通过变频水泵和电加热,需要进行循环以使得水箱温度均匀至 50 °C 左右,当均匀后水箱顶部与底部的温差小于 0.5 °C,即认为水箱内水温一致。恒温水箱的温度范围为 -20 ~ 100 °C,精度为 ±0.5 °C,以确保进水温度恒定。水箱的进出水口均设置在水箱的底部和顶部的中央。系统中流量测量采用 Krohne optiflux 5300,测量精度为 ±0.15%。

水箱共布置 16 根铂电阻,桶壁沿高度方向布置 14 根铂电阻,水箱底部和顶部出入口处分别布置一

根铂电阻,以测试水箱各层温度分布。水箱底部为进水口,进水口布置 1 根铂电阻以测试进水温度。水箱顶部出水,出水口布置 1 根铂电阻,以测试出水温度。储热水箱和稳压水箱四壁及进出水口用保温材料保温,大大减少了热量损失,近似可以认为与环境无换热。实验进行时,利用电加热以及内部循环的方法使得水箱内初始水温达到 50 ± 0.3 °C,测试时进水温度为 20 ± 0.3 °C。从开始进水瞬间记录直至水箱出水温度下降到接近进水温度时,停止数据采集,进行数据的保存和分析。

2 分层水箱热力学特性的计算模型

2.1 混合数法

由 Andersen 等提出的混合数法^[11],是建立在箱内能量与温度分布水平的基础上,并忽略实验储热水箱的热损系数。实验水箱的动量 M_{exp} 是可以确定的,并与两种理论情况的动量相关。混合数法变化范围为 0 ~ 1,当 $MIX = 0$ 即代表完美分层水箱, $MIX = 1$ 则代表充分混合水箱。

$$MIX = \frac{M_{stratified} - M_{exp}}{M_{stratified} - M_{full-mixed}} \quad (1)$$

其中:

$$M_{exp} = \sum_{i=1}^n y_i \cdot E_i \quad (2)$$

$$E_i = \rho \cdot V_i \cdot C_p \cdot T_i \quad (3)$$

$M_{stratified}$ 储存的总能量与实验储箱中的总能量相同。规定 T_{hot} 与 T_{cold} 为实验数据,即分别为 50 和 20 °C。 V_{hot} 与 V_{cold} 定义如下:

$$E_{stratified} = E_{exp} \quad (4)$$

其中:

$$M_{exp} = \sum_{i=1}^n E_i \quad (5)$$

$$E_{stratified} = V_{hot} \cdot \rho \cdot C_p \cdot T_{hot} + V_{cold} \cdot \rho \cdot C_p \cdot T_{cold} \quad (6)$$

$$V_T = V_{hot} + V_{cold} \quad (7)$$

斜温层的位置 $y_{stratified}$ 由式(8)确定:

$$V_{cold} = \pi \cdot \frac{D^2}{4} \cdot y_{stratified} \quad (8)$$

根据 V_{hot} 与 V_{cold} ,完美分层水箱的动量通过式(9)计算得出:

$$M_{stratified} = \sum_{i=1}^n E_{stratified\ i} \cdot y_i \quad (9)$$

充分混合水箱总能量与实验总能量相同:

$$E_{\text{fully-mixed}} = E_{\text{exp}} \tag{10}$$

充分混合水箱的动量计算如式(11)所示:

$$M_{\text{fully-mixed}} = \sum_{i=1}^n E_{\text{fully-mixed } i} \cdot y_i \tag{11}$$

其中:

$$E_{\text{fully-mixed}} = V_i \cdot \rho \cdot C_p \cdot T_{\text{fully-mixed}} \tag{12}$$

式中: $M_{\text{stratified}}$ —完美分层水箱的瞬时能量, $\text{kJ} \cdot \text{m}$; $M_{\text{fully-mixed}}$ —充分混合水箱的瞬时能量, $\text{kJ} \cdot \text{m}$; ρ —密度, kg/m^3 ; C_p —水的定压比热容, $\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$; V_i —每一块的体积, m^3 ; y_i —每个水层重心到水箱底部的垂直距离, m ; $y_{\text{stratified}}$ —跃温层到水箱底部的垂直距离, m ; V_{hot} —完美分层水箱热水部分的体积, m^3 ; V_{cold} —完美分层水箱冷水部分的体积, m^3 ; D —水箱直径, m 。

2.2 理查德森数

理查德数被广泛应用于描述分层^[12~13],它是浮力与混合力比率的度量;小的理查德森数表示混合的储箱,而大的理查德森数表示分层的储箱。理查德森数由式(13)表示。

$$R_i = \frac{\rho \cdot \beta \cdot H \cdot (T_{\text{top}} - T_{\text{bottom}})}{\nu_s^2} \tag{13}$$

其中:

$$\nu_s = \frac{Q}{\pi \cdot r_{\text{stratifier}}^2} \tag{14}$$

式中: β —膨胀系数; ν_s —分层状态下的平均流速, m/s 。

2.3 焓效率

对于两个具有相同能量的水箱,分层效果好的比分层效果差的具有更高的焓值。采用焓分析的方法,可以对水箱的分层特性、所具有的有用能效率进行一个比较合理的评价。Shah 和 Furbo 提出了一种焓效率的计算方法^[14]:

$$\xi^* = \frac{\xi_{\text{exp}}}{\xi_{\text{str}}} \tag{15}$$

式中: ξ_{exp} —实验水箱的焓值, J ; ξ_{str} —完美分层水箱的焓值, J 。

本研究定义的完美分层水箱是指在某一时刻,水箱中只有热水和冷水两个温度区,冷热水区无掺混,无换热,无中间温度区,边界处温度梯度无穷大;值得注意的是,这个公式计算的前提条件是实验水箱、假想的完美分层水箱具有相同的能量。 ξ^* 是一

个介于 0~1 的值, $\xi^* = 0$ 表示完全混合水箱, $\xi^* = 1$ 表示完美分层水箱。 ξ^* 值反应了实验水箱距离理想情况偏离的程度,反应了实验水箱分层情况的好坏。焓值的计算方法在 Rosen 的文章中有提及,具体如下^[15]:

$$\xi = E - \sum_{i=1}^n m_i C_p T_0 \ln\left(\frac{T_i}{T_0}\right) \tag{16}$$

$$E = \sum_{i=1}^n m_i C_p (T_i - T_0) \tag{17}$$

式中: E —水箱总能量, J ; n —以铂电阻为中心,将水箱分成的块数; m_i —每一块的质量, kg ; T_i —每一块的温度,以绝对温度计算, K ; T_0 —参考温度,取进水温度, K 。

2.4 无量纲时间

$$t^* = t/T \tag{18}$$

式中: t —从进水瞬间开始所经历的时间, min ; T —将水箱内的水全部置换一遍所需时间, min 。

$$T = V/v \tag{19}$$

式中: V —水箱容积, L ; v —进水流量, L/min 。

3 实验结果与分析

3.1 理查德森数分析

基于重力的作用和温度对传热介质密度的影响所形成的浮升力的驱动,使得从水箱顶部至底部温度逐步减小而形成温度分层。对于温度分层的影响因素,大多考虑理查德森数($Ri = Gr/Re^2$)的影响。

图 3 表明了当进口水流量不同时,是否安装均流器对水箱 Ri 数的影响情况。由图可知,随着进口流量的增大, Ri 数逐渐减小。这主要是因为随着进口流量的增加, Re 数变大,从而导致 Ri 数逐渐减小。当进水流量小于 $0.5 \text{ L}/\text{min}$ 时,未安装均流器水箱的 Ri 数大于 7,基本可以忽略进口结构对水箱分层的影响。而当进水流量大于 $0.7 \text{ L}/\text{min}$ 时,未安装均流器水箱的 Ri 数小于 4.3,则需要考虑进水结构对水箱分层的影响。当进口流量为 $0.69 \text{ L}/\text{min}$ 时,未安装均流器水箱的 Ri 数为 4.37,而加装均流器水箱的 Ri 数为 1.1×10^7 ,明显地提高水箱的热分层性能,这主要是由于进口水经过分水器后流速下降且水流方向变成流向水箱底部,使其与水箱底部的水充分进行热交换,降低底部水温,使水箱形成热分层。但随着流量的增加,均流器对提高水箱的

热分层性能明显降低,当流量为 6.11 L/min 时,未安装均流器水箱的 Ri 数为 0.055 72,而加装均流器水箱的 Ri 数为 1.4×10^5 。这主要是因为均流器出口流速随进水流量的增加而变大,均流器出口流速的增加,破坏了冷热水的分界面,从而强化了水箱内冷热水的混合,降低了水箱的 Ri 数。

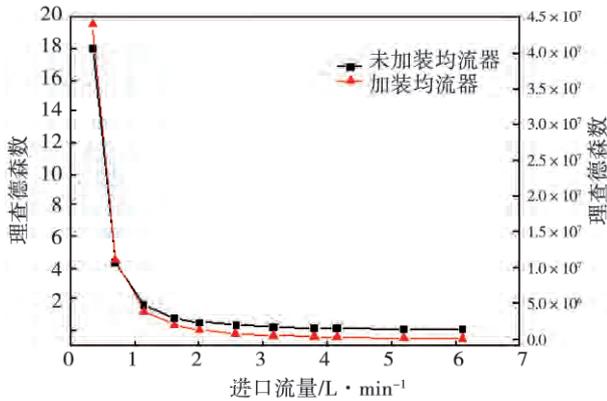


图 3 进口流量对理查德森数的影响

Fig. 3 Influence of the flow rate at the inlet on the Richardson number

3.2 混合数分析:

如图 4 所示,当进口流量改变时,分层水箱的混合数法随着无量纲时间的变化情况。由图可知,在不同流量条件下,初始和结束时刻的混合数法均为 1,表明开始和结束时刻水箱均处于同一温度条件下,为充分混合状态,其中,初始时刻表示水箱为高温水,结束时刻代表水箱为低温水。而随着充注过程的进行,混合数法随时间的推移均呈先减小后增大的趋势,表明水箱在各个流量下的分层程度先增大后减小,分层效率先增大后减小。当流量为 1.14 L/min 时,初始状态水箱的混合数法为 1,而后由于均流器的作用,迅速下降至 0.028,表明此时水箱处于较好的分层状态,当充注过程即将结束时,混合数法又迅速增大到 1,这表明此刻水箱中的高温水已完全被低温水所替代。由图还可知,当充注过程处于稳定状态时(图中无量纲时间 0.2 ~ 0.85),水箱的混合数法随着进口流量的变大而增加,当进口流量为 1.14 L/min 时,混合数法为 0.028,而当进口流量为 6.11 L/min 时,混合数法为 0.051,表明分层程度随进口流量的增大而减小,这主要是由于进水流量的增加,破坏了冷热水的分层,并强化了水箱中

冷热水的混合程度,使得水箱的斜温度层厚度增加,进而使得水箱的分层效率降低,混合数法变大。

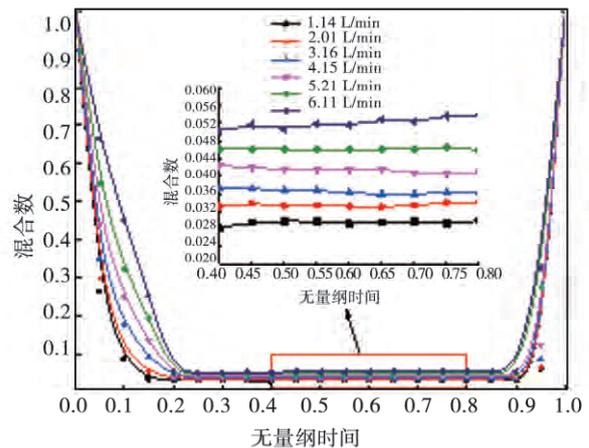


图 4 混合数随着无量纲时间的变化

Fig. 4 Changes of the MIX number with non-dimensional time

3.3 焓效率

当进口流量改变时,分层水箱的焓效率随着无量纲时间的变化情况,如图 5 所示。由图可知,随着无量纲时间的增加,水箱的焓效率逐步降低,当无量纲时间为零时,不同流量下水箱的焓效率相差不大,最大相差为 0.756%。而当无量纲时间为 0.6 时,此时不同流量下水箱的焓效率出现拐点,其焓效率的最大相差为 6.83%。当无量纲时间为 1 时,其焓效率的最大相差为 14.4%。当无量纲时间 $t^* = 0 \sim 0.6$ 时,不同流量下水箱的焓效率减小幅度不大,均在 0.8 以上,表明这一时间段内水箱的分层效果较好。但当无量纲时间 $t^* = 0.6 \sim 1$ 时,由于混合作用的加剧,不同流量下水箱的焓效率减小幅度变大。此外,水箱的焓效率随着流量的增加,先增大后减小。当无量纲时间为 0.6 时,进口流量为 1.14 L/min 时水箱的焓效率为 85.9%,而当进口流量增大到 3.16 L/min 时,水箱的焓效率增加为 90.7%,达到峰值,此后,当进口流量进一步增大到 6.11 L/min 时,水箱的焓效率减小为 83.9%。这主要是因为,当流量增大时,位于底部的分流器降低了进口速度,减缓了水箱内冷热水的混合,因此水箱的焓效率有所提升。但随着流量的进一步增大,分流器对进口流量的缓冲作用减小,从而加剧了水箱内冷热水的混合程度,进而减小了水箱的焓效率。

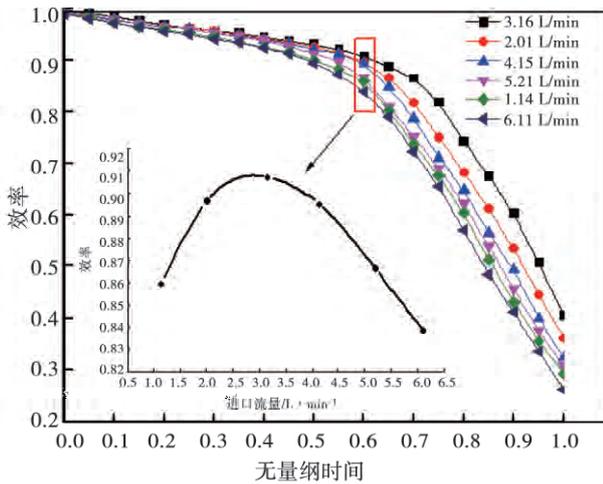


图 5 焓效率随着无量纲时间的变化

Fig.5 Changes of the exergy efficiency with non-dimensional time

4 结 论

(1) 均流器提高了分层蓄热水箱的理查德森法,并且效果随进口流量的增大而减弱。当进口流量为 0.69 L/min 时,未安装均流器水箱的 Ri 数为 4.37,而加装均流器水箱的 Ri 数为 1.1×10^7 ,而当流量为 6.11 L/min 时,未安装均流器水箱的 Ri 数为 0.055 72,而加装均流器水箱的 Ri 数为 1.4×10^5 ;

(2) 混合数法随时间的推移均呈先减小后增大的趋势,表明水箱在各个流量下的分层效率先增大后减小。而当充注过程处于稳定状态时,水箱的混合数法随着进口流量的变大而增加,当进口流量为 1.14 L/min 时,混合数法为 0.028,而当进口流量为 6.11 L/min 时,混合数法为 0.051,表明分层程度随进口流量的增大而减小;

(3) 随着无量纲时间的增加,水箱的焓效率逐步降低。当无量纲时间为 0.6 时,此时不同流量下水箱的焓效率出现拐点,表明 $t^* = 0 \sim 0.6$ 内水箱的分层效果较好。此外,水箱的焓效率随着流量的增加,先增大后减小。当无量纲时间为 0.6 时,进口流量为 1.14 L/min 时水箱的焓效率为 85.9%,而当进口流量增大到 3.16 L/min 时,水箱的焓效率增加为 90.7%,达到峰值,此后,当进口流量进一步增大到 6.11 L/min 时,水箱的焓效率减小为 83.9%。

参考文献:

- [1] Rhee J, Campbell A, Mariadass A, Morhous B. Temperature stratification from thermal diodes in solar hot water storage tank [J]. Solar Energy 2010, 84(3): 507 – 511.
- [2] Oro E, Castell A, Chiu J, et al. Stratification analysis in packed bed thermal energy storage systems [J]. Applied Energy, 2013, 109 (SI): 476 – 487.
- [3] Li SH, Zhang YX, Li Y, et al. Experimental study of inlet structure on the discharging performance of a solar water storage tank [J]. Energy and Buildings 2014, 70: 490 – 496.
- [4] 王爱辉, 金苏敏. 基于太阳能空调系统的分区蓄热水箱的研究 [J]. 太阳能学报 2013, 34(8): 1380 – 1384.
WANG Ai-hui, JIN Su-min. Study of a partitioned heat storage tank based on a solar power air conditioning system [J]. Acta Energetica Solaris Sinica 2013, 34(8): 1380 – 1384.
- [5] Bahnfleth WP, Song J. Constant flow rate charging characteristics of a full-scale stratified chilled water storage tank with double-ring slotted pipe diffusers [J]. Applied Thermal Energy 2005, 25(17 – 18): 3067 – 3082.
- [6] Han YM, Wang RZ, Dai YJ. Thermal stratification within the water tank [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2009, 13(5): 1014 – 1026.
- [7] Castell A, Medrano M, Sole C, et al. Dimensionless numbers used to characterize stratification in water tanks for discharging at low flow rates [J]. Renewable Energy 2010, 35(10): 2192 – 2199.
- [8] Altuntop N, Arslan M, Ozceylan V, et al. Effect of obstacles on thermal stratification in hot water storage tanks [J]. Applied Thermal Energy 2005, 25(14 – 15): 2285 – 2298.
- [9] 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试验研究 [J]. 太阳能学报, 2008, 29(3): 277 – 282.
HAN Yan-min, WANG Ru-zu, DAI Yan-jun, et al. Analysis and experimental study of the heat storage performance of a horizontal thermal partitioned solar power water tank [J]. Acta Energetica Solaris Sinica 2008, 29(3): 277 – 282.
- [10] 李舒宏, 闻才, 张小松, 等. 入水口结构对太阳能储热水箱用能特性的影响研究 [J]. 太阳能学报, 2013, 34(4): 670 – 675.
LI Shu-hong, WEN Cai, ZHANG Xiao-song, et al. Study of the effect of the structure at the inlet on the energy consumption characteristics of a solar power heat storage water tank [J]. Acta Energetica Solaris Sinica 2013, 34(4): 670 – 675.
- [11] Andersen E, Furbo S, Fan H. Multilayer fabric stratification pipes for solar tanks [J]. Solar Energy 2007, 81(10): 1219 – 1226.
- [12] 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.
- [13] Ghajar A J, Zurigat Y H. Numerical study of the effect of inlet geometry on stratification in thermal energy storage [J]. Numerical Heat Transfer Part A, 1991, 19(1): 65 – 83.
- [14] Shah LJ, Furbo S. Entrance effects in solar storage tanks [J]. Solar Energy 2003, 75(4): 337 – 348.
- [15] Rosen MA, Tang R, Dincer I. Effect of stratification on energy and exergy capacities in thermal storage systems [J]. International Journal of Energy Research 2004, 28(2): 177 – 193.

(刘瑶 编辑)

aligned and the depth of the air flow in the arch portion going down is small ,especially ,the air flow along the rear arch going downwards can only reach the tertiary air zone in the wall portion. With an increase of the ratio $R2/R3$, the misalignment degree of the flow field will become alleviated and the flow field will also become more symmetrical. However ,when the ratio $R2/R3$ increases to 35% /23.89% ,the depth of the air flow in the arch portion going down will be excessively big ,thus making the pulverized coal flow tend to scour the ash cooling hopper in its middle part and the temperature in the ash cooling hopper is relatively high ,therefore likely resulting in a slagging in the ash cooling hopper. With the symmetry of the flow field in the furnace ,the temperature of flue gases at the outlet of the furnace and NO_x emissions level being taken into a comprehensive consideration ,the ratio $R2/R3$ should be properly chosen as 28.35% /30.54% . **Key words:** W-shaped flame boiler ,multi-ejection staged combustion technology ,secondary and tertiary air flow ratio ,numerical simulation

新型进水结构对太阳能分层水箱特性影响的研究 = **Study of the Influence of New Type Water Inlet Structure on the Characteristics of a Solar Power Stratified Water Tank** [刊 ,汉] WANG Zi-long ,ZHANG Hua , WANG Chong-yuan (College of Energy Source and Power Engineering ,Shanghai University of Science and Technology ,Shanghai ,China ,Post Code: 200093) ,YAN Qian-wen (College of Energy Source and Environment Engineering ,Southeast University ,Nanjing ,China ,Post Code: 210096) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016 ,31(5) . -124 ~128

The heat storage technology is an important part of the solar concentrating power heat utilization. The medium and low temperature heat storage technology with water serving as the heat storage medium is one of the key technologies for use in solar concentrating power heat utilization systems. A new type inlet flow equalizer was designed and a test rig was set up for testing the thermodynamic characteristics of a heat storage water tank. At an initial water temperature of $50\text{ }^\circ\text{C}$ and inlet water temperature of $20\text{ }^\circ\text{C}$,the thermodynamic characteristics of the heat storage water tank at various flow rates were analyzed and contrasted. It has been found that the flow equalizer can enhance the stratification effectiveness of the stratified heat storage water tank and the efficiency of the water tank. At a same flow rate at the inlet ,the thermal stratification efficiency of the water tank will first increase and then decrease. With an increase of the non-dimensional time ,the exergy efficiency of the water tank will gradually decrease. In addition ,the exergy efficiency of the water tank will first increase and then decrease with an increase of the flow rate. When the non-dimensional time equals to 0.6 and the flow rate at the inlet is 1.14 L/min ,3.16 L/min and 6.11 L/min respectively ,the exergy efficiency of the water tank will be 85.9% ,90.7% and 83.9% respectively. **Key words:** heat storage water tank ,thermodynamic characteristics ,exergy efficiency ,thermal stratification ,MIX number