

文章编号:1003-0344(2017)02-062-5

## 基于CFD的太阳能蓄能水箱蓄能效果的优化分析

李永真<sup>1</sup> 云和明<sup>\*1,2,3</sup> 马芳芳<sup>1</sup> 陈宝明<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup> 山东建筑大学热能工程学院

<sup>2</sup> 可再生能源建筑利用技术省部共建教育部重点实验室

<sup>3</sup> 山东省可再生能源建筑应用技术重点实验室

**摘要:**本文以太阳能蓄能水箱为研究对象,对水箱内部进行温度分层和水蓄能特性的分析。采用CFD技术对结构不同的水箱建立数学和物理模型,进而对其进行数值模拟的研究,获得了不同时刻水箱的温度场、速度场和压力场,并基于热力学理论,研究不同结构水箱的温度分层特性,并以总储能焓值和可用能焓值为指标,对比各种蓄能水箱的蓄能效果和蓄能效率,获得水箱蓄能效果较好的结构,为深层次揭示太阳能蓄能水箱的蓄能机理奠定了基础。

**关键词:**蓄能水箱 温度分层 蓄能效率

## Energy Storage Effect Analysis of Solar Energy Storage Tank based on CFD

LI Yong-zhen<sup>1</sup>, YUN He-ming<sup>\*1,2,3</sup>, MA Fang-Fang<sup>1</sup>, CHEN Bao-ming<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup> School of Thermal Energy Engineering, Shandong Jianzhu University

<sup>2</sup> Key Laboratory of Renewable Energy Utilization Technologies in Building, Ministry of Education

<sup>3</sup> Shandong Key Laboratory of Renewable Energy Application Technology

**Abstract:** The solar energy storage tank has been investigated to analysis the characteristics of temperature stratification and energy storage of water inside the water tank. The mathematical and physical model of water tank with different structure has been set up by using CFD method, then numerical simulation has been conducted to obtain the temperature field, velocity field and pressure field of the water tank and different time. The temperature stratification characteristics of the water tank with different structures has been investigated by using thermodynamic theory. The water tank structure with better energy storage effect has been obtained by comparison the storage energy storage effect and storage efficiency with the total energy enthalpy value and the availability of exergy value as the index, which can lay a solid foundation for further revealing the energy storage mechanism of the solar energy storage tank.

**Keywords:** energy storage tank, temperature stratification, storage energy efficiency

## 0 引言

在蓄热技术发展的初期,显热蓄热是首先被提出和得到相应的应用,这种蓄热方式简单、成本较低、且技术上相对比较简单<sup>[1]</sup>。所谓水蓄热就是将水加热到

一定的温度后,使热能以显热的形式存储在水中,当需要使用时,再将其释放出来以提供采暖或直接作为热水供用户。太阳能水箱是太阳能集热系统中的储能设备,在集热系统中具有能量储存和调节的功能。因为温差传热是一种不可逆的过程,所以在太阳能水箱中

收稿日期:2016-3-15

通讯作者:云和明(1976~),男,博士,副教授;山东建筑大学热能工程学院(250101);E-mail: yunheming@163.com

基金项目:山东省自然科学基金(No. ZR2010EM06);住房和城乡建设部项目(138)

来自太阳能集热器的高温水和水箱中的低温水相互掺混,该过程是一个熵增的不可逆过程,导致太阳能集热水箱中可用能的损失<sup>[2]</sup>。因此,通过优化水箱内部结构,将减少冷热水之间的扰动,实现太阳能水箱中的温度分层,提高可用能品质,从而提高太阳能水箱的热利用效率。

基于温度对传热介质密度的影响所形成的浮升力的驱动对太阳能水箱的分层特性进行了研究,水温由水箱底部到水箱顶部逐步增加而形成温度分层<sup>[3]</sup>。对于温度分层的影响因素,大多考虑理查逊数  $Ri$  ( $Ri=Gr/Re^2$ ) 的影响。温度分层水箱在重力影响下,由密度梯度形成的浮升力是提高分层效果的内在因素。 $Gr/Re^2$  是表征浮升力和流动中的惯性力之比的量度,一般认为  $Ri \leq 0.1$  时为纯强迫流动,而研究表明  $Ri \leq 3.6$  时,水箱进口结构对温度分层产生影响<sup>[4]</sup>,而当  $Ri > 10$  时可以不考虑进口对温度分层的影响<sup>[5-6]</sup>,对于水平放置的水箱,  $Ri > 0.2$  时水箱中的分层梯度变化很小<sup>[7]</sup>。Knudsen 对太阳能热水系统的分析表明,混合区域的体积占水箱总体积的 40% 时,其温度分布所决定的能量品质将下降 20%<sup>[8]</sup>。综上所述,太阳能分层水箱的温度分布特性受水箱进口几何特性和进口流量的影响。本文分析了 3 种太阳能分层水箱,其中的新型蓄能水箱以适合贮水量大、水箱安装空间受高度限制的要求,通过调整水箱不同温区的结构,获得较好的温度分层效果。

## 1 温度分层水箱的物理模型

本文所要分析的蓄能水箱基本构造如图 1 所示。

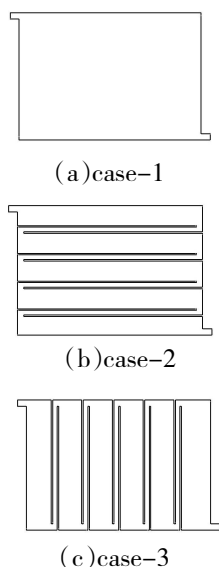


图 1 太阳能蓄能水箱结构示意图

蓄热时,温度较高的水由左边的上部入口流入水箱内,而温度较低的水由右边的下部出口流出,当整个水箱内全部为所需的温度较高的水时,蓄热过程结束。在水箱内部设置隔板,隔板与水箱壁以及隔板之间都起到了导流作用,并且所有分区内均为温度较高的水在上面,温度较低的水在下面,利用水温不同产生的密度差来防止冷、温水的混合,提高蓄能效率。图 1 为三个同等大小的水箱模型,结构尺寸的宽高为:  $W \times H = 6\text{m} \times 4.2\text{m}$ 。图 1 中 case-1 为不带隔板水箱模型, case-2 在上下方向上布置 8 个隔板,每两个隔板形成一流体折流通路, case-3 在左右方向上则需布置 10 个隔板。

模型假定:

- 1) 整个水箱无内热源;
- 2) 在保温良好时,忽略水箱内壁向周围环境的能量损失,认为水箱的壁面是绝热的;同时水箱内的隔板可用导热系数较小的材料制成的薄片,忽略这部分能量传递认为是绝热的。
- 3) 假设水箱在整个蓄能过程中,入口达到理想状态,即入口在任意时刻的流速、温度基本均匀一致。

## 2 数学模型

以水箱的整个流动区域中的传热流体为研究对象,建立数学模型。水箱中的流动为湍流,考虑重力的影响,计算流体为常物性条件,而浮升力项中的密度随温度的变化基于 Boussinesq 假设<sup>[9]</sup>,建立计算区域的无量纲控制方程如下:

连续方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j u_i) = \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{2}{Re} \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + Ri \theta_j \quad (2)$$

能量方程:

$$\frac{\partial \theta_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j \theta_i) = \frac{2}{Pe} \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\partial \theta_i}{\partial x_j} \right) \quad (3)$$

式中:  $\theta_i$ 、 $u_i$ 、 $P$  分别为量纲为 1 时的温度、速度、压力;  $Re$ 、 $Ri$  和  $Pe$  分别为雷诺数、理查德森数和贝克莱数,其中  $Ri = \frac{Gr}{Re^2}$ ,  $Pe = Re \cdot Pr$ ,  $Re = \frac{2D\bar{u}}{\nu}$ ,  $Pr$  为普朗特数,  $Pr = \frac{\nu}{\alpha}$ ,  $\nu$  为流体的动力粘度,  $\alpha$  热膨胀系数,  $a = \frac{\kappa}{\rho c}$ 。

数值计算采用 CFD 建立物理模型并划分网格,计算过程中采用有限容积法离散方程,同时求解流体的连续性方程,动量方程和能量方程。选用三维不可压缩流动模型,计算中为提高紊流的计算精度,选用标准  $k-\varepsilon$  紊流模型。动量方程的对流和扩散项采用 Quick 格式进行离散,采用 Simpler 方法计算压力和速度的耦合<sup>[10]</sup>。当能量方程中收敛残差小于  $10^{-6}$  时,整个计算过程被认为收敛。

### 3 瞬态数值计算结果及储能对比分析

三种不同结构的水箱,赋予相同的边界和流动条件,来自蓄能水箱的入口流速均为  $0.047\text{m/s}$ ,入口温度为  $318\text{K}$ ,出口为自由流条件下,水箱中的初始温度均为  $308\text{K}$ 。

#### 3.1 温度场对比分析

从图 2 至图 4 水箱流动瞬态温度场对比可以看出,对于尺寸大小相同的水箱,在相同的进出口水流条件下,内部设置隔板对水体的温度分布影响明显,图 4 所示为左右方向布置十个隔板的水箱,从太阳集热器来的高温水进入第一个分区,水箱中初始温度为  $308\text{K}$ , $900\text{s}$  后第一第二分区已完全充满  $318\text{K}$  的水,而第四第五第六分区的温度仍为水箱初始温度,冷热水只在第三分区掺混且有明显的温度分层,而使得这种新型水箱的温度分层在每个分区之间形成。而到  $1800\text{s}$  时第六分区水温度仍然保持在初始温度, $3600\text{s}$  的出口水温度  $316.9\text{K}$ ,完成蓄热要求。不同时刻的各个分区内的温度较均衡,而分区之间存在较大的温度梯度。因此,可以看出,由左右布置隔板组成流道在分区之间形成的有限空间能够有效地抑制源于冷热水相互掺混引起的热扩散,在各个分区之间形成梯度较大的温度分层。图 3 所示为上下方向布置八个隔板的水箱, $900\text{s}$  时第一分区仍未充满  $318\text{K}$  的水,冷热水在第二第三分区有明显掺混,第四第五分区为水箱初始温度。 $1800\text{s}$  时第一第二分区基本充满  $318\text{K}$  的水,第三第四第五分区仍有明显掺混,出口温度已经达到  $309\text{K}$ 。 $3600\text{s}$  时出口温度为  $316.6\text{K}$ ,且第四第五分区仍未充满  $318\text{K}$  的水。图 2 为未设置隔板水箱, $900\text{s}$  时整个水箱已有  $65\%$  的区域达到  $300\text{K}$  以上, $1800\text{s}$  与  $3600\text{s}$  时水箱的整体水温比较均匀,降低了水的能源品质。

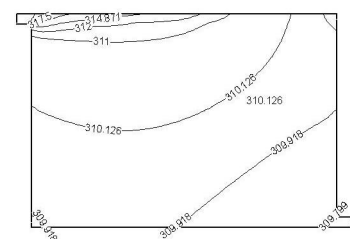
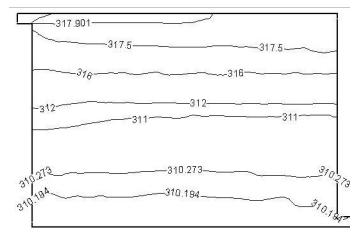
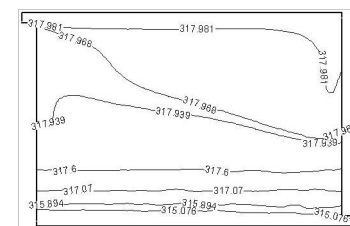
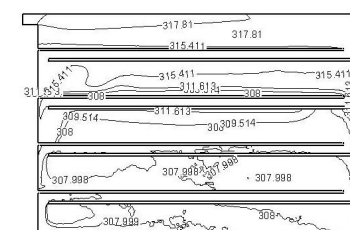
(a)  $t=900\text{s}$ (b)  $t=1800\text{s}$ (c)  $t=3600\text{s}$ 

图 2 未设置隔板水箱流动瞬态温度场



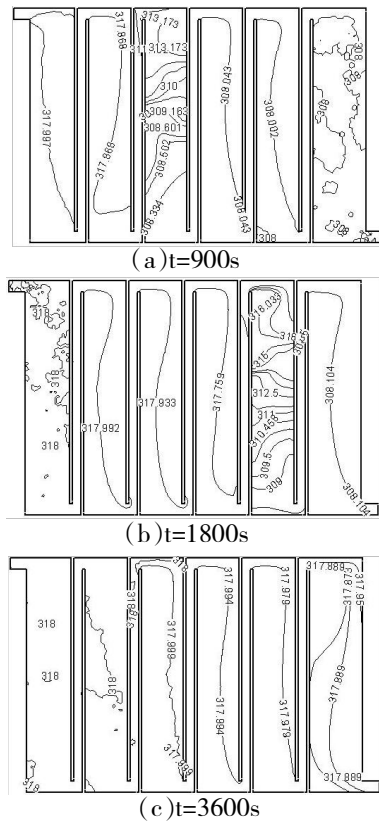


图 4 左右方向布置十个隔板的水箱流动瞬态温度场

图 5 是水箱蓄热过程中出口温度随时间的变化规律,图 6 是水箱内平均温度随时间的变化规律。从图 5、图 6 可以看出,改变水箱内部结构对水箱的出口温度及水箱内平均温度产生了较大影响。在整个蓄热过程中,case-3 内平均温度要高于其余两个水箱。蓄热初期,case-3 的出口温度最低,而达到 318K 的时间最少。表明 case-3 随着蓄热过程的进行水箱内的冷、热水混合相对较少,整体的蓄热效果要好。

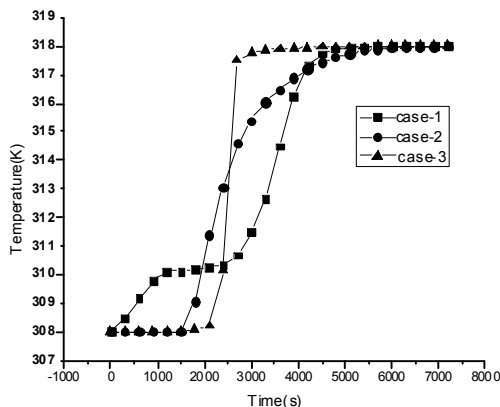


图 5 水箱蓄热过程中出口温度随时间的变化

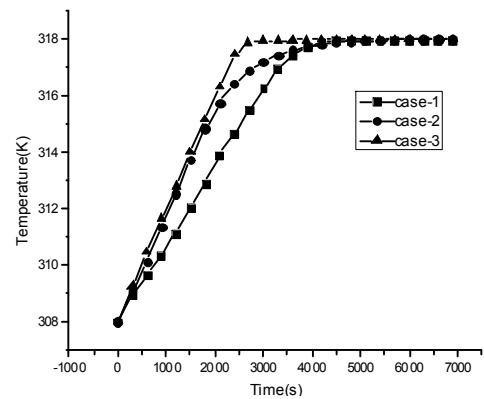


图 6 水箱内平均温度随时间的变化

### 3.2 储能及可用能对比分析

根据上述分析,新型结构水箱中的水温近似满足阶梯型温度分布模型,内部的平均温度为

$$T_m = \frac{1}{L} \int_0^L T(x) dx \quad (4)$$

$T(x)$  为沿一维  $x$  方向的局部温度,作为阶梯型分布的特征,  $T(x)$  表示

$$T(x) = \begin{cases} T_1, & X_0 \leq x \leq X_2 \\ T_2, & X_1 \leq x \leq X_2 \\ \dots \\ T_k, & X_{k-1} \leq x \leq X_k \end{cases} \quad (5)$$

式中的温度阶梯起始坐标段应当满足

$$0 = X_0 \leq X_1 \leq X_2 \leq \dots \leq X_{k-1} \leq X_k = L。$$

引入质量分数因子  $x_i$ , 令  $x_i = \frac{m_i}{m}$ , 其中分子  $m_i$  为第  $i$  温度梯度段  $(X_i - X_{i-1})$  的流体质量  $m_i = \rho V = \rho AL$

流体整体质量  $m = \rho V = \rho AL$ , 因此

$$x_i = \frac{m_i}{m} = \frac{X_i - X_{i-1}}{L} \quad (6)$$

由式(4)的定义,水箱的总焓  $E$ , 混合平均总焓  $E_m$  具有如下关系:

$$E = E_m = mc(T_m - T_0) \quad (7)$$

总焓

$$E_x = E - mcT_0 \ln\left(\frac{T_e}{T_0}\right) \quad (8)$$

