

文章编号: 1671-6612 (2025) 05-711-09

# 蓄能水箱内部结构优化设计及仿真模拟

卢可洋<sup>1</sup> 胡安杰<sup>1</sup> 王建康<sup>2</sup> 向荣海<sup>3</sup> 奉有志<sup>3</sup> 刘东<sup>1</sup>

(1. 西南科技大学 绵阳 621010;

(2. 四川省五交化股份有限公司 成都 610000;

3. 啸驰电气股份有限公司 遂宁 629000)

**【摘要】** 随着能源高效利用需求的日益增长,蓄能水箱作为能量存储与调节的关键设备,其内部结构的优化具有重要现实意义。传统蓄能水箱内部结构在能量存储效率、温度分布均匀性及热损失控制等方面存在不足,限制了其在各类能源系统中的广泛应用。通过对蓄能水箱内部结构进行优化设计,能够显著提升其蓄能性能,减少能量损耗,增强系统稳定性。运用先进的设计理念与方法,对蓄能水箱内部结构开展优化设计,并借助仿真模拟技术,深入分析不同结构方案下水箱内的流场与温度场分布,评估优化效果。研究表明,合理的内部结构优化可有效提高蓄能水箱的能源利用效率,为其在能源领域的高效应用提供有力支撑,凸显了蓄能水箱内部结构优化的紧迫性与必要性。

**【关键词】** 蓄能水箱; 结构优化; 仿真模拟

中图分类号 TK124 文献标志码 A

## Optimized Design and Simulation of the Internal Structure of the Energy Storage Water Tank

Lu Keyang<sup>1</sup> Hu Anjie<sup>1</sup> Wang Jiankang<sup>2</sup> Xiang Ronghai<sup>3</sup> Feng Youzhi<sup>3</sup> Liu Dong<sup>1</sup>

(1. Southwest University of Science and Technology, Mianyang, 621010;

2. Sichuan Province Five Metals, Chemicals and Hardware, Co., Ltd, Chengdu, 610000;

3. Schorch Electric Co., Ltd, Suining, 629000)

**【Abstract】** With the increasing demand for the efficient utilization of energy, as a key device for energy storage and regulation, the optimization of the internal structure of the energy storage water tank is of great practical significance. The internal structure of the traditional energy storage water tank has deficiencies in aspects such as energy storage efficiency, uniformity of temperature distribution, and control of heat loss, which restricts its widespread application in various energy systems. By carrying out optimized design of the internal structure of the energy storage water tank, its energy storage performance can be significantly improved, energy loss can be reduced, and the stability of the system can be enhanced. This paper applies advanced design concepts and methods to conduct optimized design of the internal structure of the energy storage water tank, and with the help of simulation technology, deeply analyzes the distribution of the flow field and temperature field in the water tank under different structural schemes to evaluate the optimization effect. The research results show that reasonable optimization of the internal structure can effectively improve the energy utilization efficiency of the energy storage water tank, provide strong support for its efficient application in the energy field, and highlight the urgency and necessity of optimizing the internal structure of the energy storage water tank.

作者简介: 卢可洋 (2001.01-), 女, 硕士, 学生, E-mail: 13834852951@126.com

通讯作者: 刘东 (1984.11-), 男, 博士, 教授, E-mail: dtld123@126.com

收稿日期: 2025-04-19

【Keywords】 Energy storage Water tank; Structural optimization; Simulation

## 0 引言

在全球积极推进能源转型与可持续发展的时代浪潮下,能源的高效存储与合理调配成为关键议题。蓄能技术作为平衡能源供需、提升能源利用效率的核心手段,在各类能源系统中扮演着愈发重要的角色。蓄能水箱作为一种常见且应用广泛的蓄能设备,凭借其成本效益高、技术成熟等优势,在太阳能热水系统、区域供热供冷系统以及工业余热回收等诸多领域得到了大规模应用。

但是传统蓄能水箱由于内部结构不合理导致在能量存储过程中,内部流场与温度场分布不合理,大量能源在存储与传输过程中白白损耗。同时,不均匀的温度分层现象不仅降低了水箱的有效蓄热容积,还对整个能源系统的稳定性与可靠性产生负面影响。此外,不合理的内部结构还可能引发水流短路、热传导不畅等问题,进一步制约了蓄能水箱性能的提升。面对上述挑战,对蓄能水箱内部结构进行优化设计已成为推动能源高效利用、提升能源系统综合性能的必然选择。通过创新的结构设计与先进技术的应用,有望打破传统蓄能水箱的性能瓶颈,实现其在能源存储与转换效率、温度场均匀性以及系统稳定性等方面的全面提升。这不仅对于满足当前能源需求具有重要现实意义,更为未来能源系统的可持续发展奠定坚实基础。本文深入探讨蓄能水箱内部结构优化的方法与策略,并借助仿真模拟技术对优化效果进行精准评估,为蓄能水箱的升级换代提供理论依据与技术支持。

## 1 蓄能水箱内部结构优化方案设计

### 1.1 蓄能水箱结构设计

独立水箱结构主要依据现有蓄能水箱整体布局 and 尺寸设计,考虑在传统水箱的局限条件下,蓄水箱内部的传热损失-损失热量是由蓄水箱中的温水传给冷水,其主要有两种可能:一是水和蓄水箱内表面的相互传热;二是不同温、冷水之间的界面热传导与混合。其中温、冷水的混合和通过界面的热传导是蓄水箱中发生的最主要的传热形式,这些传热损失和混合虽然对系统而言没有热损失,但却使箱中部分冷水温度上升,使系统的蓄冷量损失掉了,同时主机的制冷量在整个蓄冷过程中也有损

失,且增加了泵的工作量。为降低水箱的冷热水掺混和热损失,本文介绍了对蓄能水箱多种内部结构优化设计并进行仿真模拟。为避免热水直接从出水口逃逸出去导致能量损失,水箱内部存在死角,因此对水箱内部设计多个挡板,并且每个单元水箱结构均设布水器起到均流作用。

本文中入口速度分别取值为 0.3m/s、0.5m/s、0.8m/s、1.0m/s 和 1.2m/s;布水器尺寸分别取 50mm、150mm、250mm、350mm、450mm;管道距上壁面高度分别为 50mm、100mm、200mm、300mm、400mm。根据实际情况利用 ANSYS 中 SpaceClaim 对蓄能水箱进行三维建模,如图 1 所示,水箱长 1500mm、宽 800mm、高 500mm, 出水口直径均为 50mm,其中任意一组水箱结构示意图如图 1(a)所示,同时设置一组不加任何内部结构的水箱进行对照,如图 1(b)所示。

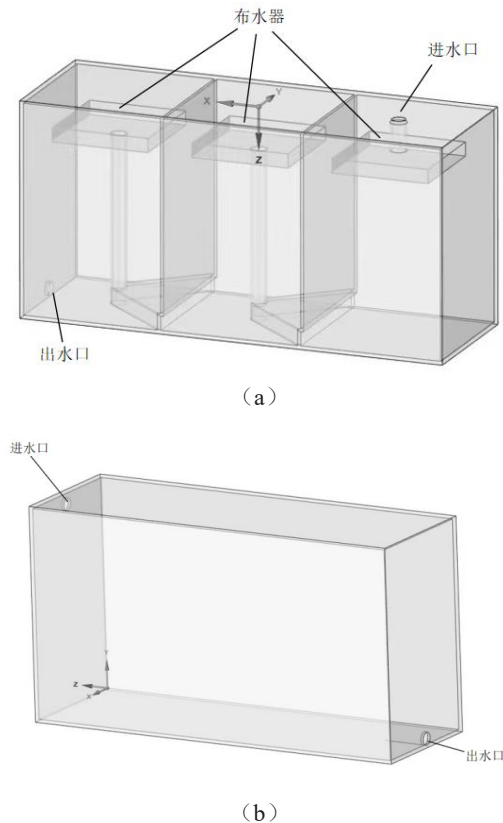


图 1 箱几何模型

Fig.1 Geometric model of the water tank

本文所示的布水器的设置为 fluent 中的多孔阶跃模型,参考粗效过滤器的渗透率所设置的面渗透

率为 100000, 布水器厚度为 0.01m, 压力跃变系数为 1500。

## 1.2 测试条件

此次蓄放热能力测试分为两种测试条件以及两种运行工况。第一种是未加任何内部结构的水箱, 此时水箱等同于传统水箱来进行蓄放能; 第二种是布有不同管道高度和布水器尺寸的内部结构水箱。工况一下的蓄能模式为两种水箱分别通入温度相同的 55℃ 高温热水进行蓄能, 当出水口温度达到预设温度 55℃ 则停止供热; 工况二下的放能模式为水箱的进出口进行互换, 蓄能模式下的进水口变为放能模式下的出水口, 而蓄能模式下的出水口则变为放能模式下的进水口, 同理两种水箱分别通入温度相同的 25℃ 低温冷水进行放能, 当出水口温度达到预设温度 25℃ 时停止放热。以不同流量补水进行蓄放能并测试出水口温升与温降达到预设水温的时间, 通过两种测试和工况运行时间对比不同结构的水箱对蓄放能阶段的影响。

## 2 仿真分析

### 2.1 数学模型

本研究在 fluent 模拟中默认开启能量方程。在流动和传热问题求解过程中所需主要变量(速度和温度等)的控制方程都可以表示成通用形式, 如式(1)所示。

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho U\phi) = \text{div}(\Gamma_{\phi} \text{grad}\phi) + S_{\phi} \quad (1)$$

式中:  $\phi$  为通用变量, 可以代表  $u, v, w, T$  等求解变量;  $\Gamma_{\phi}$  为广义扩散系数;  $S_{\phi}$  为广义源项。

#### (1) 质量守恒方程

质量守恒方程对于没有化学反应不产生源项的流动, 在单位时间内, 流入这个微元体的质量和流出这个微元体的质量是一致的, 适用于可压和不可压流动的质量守恒方程的一般形式如式(2)所示。

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V) = S_m \quad (2)$$

式中:  $\rho$  为密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $t$  为时间,  $\text{s}$ ;  $V$  为速度矢量;  $S_m$  为源项, 是加入到连续相的质量, 也可以是其他自定义的源项。

在本文的模拟研究中, 系统内无自定义源项, 需要考虑水的密度变化随着温度的变化而变化, 则质量守恒方程可以简化为如式(3)所示。

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial X_i}(\rho u_i) = 0 \quad (3)$$

#### (2) 动量守恒方程

所有作用在微元体上的外力, 其总和就是内部流体的动量对时间的变化率。对任何流体(包括非牛顿流体)在惯性(非加速)坐标系中的动量守恒方程如式(4)所示。

$$\frac{\partial(\rho V)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V V) = -\nabla p + \nabla \cdot (\tau) + \rho g + F \quad (4)$$

式中:  $p$  为流体微元体上的压力(静压),  $\text{Pa}$ ;  $g$  为作用在微元体上的重力体积力;  $F$  为作用在微元体上的其他外部体积力, 而且还包括了其他的模型的相关源项;  $\tau$  为因为分子粘性作用而产生的作用在微元体表面上的粘性应力张量。

对于牛顿流体, 粘性应力和流体的变形率成比例, 则应力张量如式(5)所示。

$$\tau = \mu \left[ (\nabla V + \nabla V^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot V I \right] = \tau_{ij} = \mu \left[ \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right] \quad (5)$$

式中:  $\mu$  为动力粘性系数, 对于非牛顿流体粘性应力与流体的变形率成非线性关系。

#### (3) 能量守恒方程

在 FLUENT 中所求解的能量方程形式, 如式(6)所示。

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot (V(\rho E + p)) = \nabla \cdot \left\{ k_{\text{eff}} \nabla T - \sum_j h_j J_j + (\tau_{\text{eff}} \cdot V) \right\} + S_h \quad (6)$$

式中:  $k_{\text{eff}}$  为有效导热系数;  $J_j$  为组分  $j$  的扩散通量;  $S_h$  为由于化学反应引起的放热和吸热以及代表其他自定义的热源项;  $E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{V^2}{2}$  为流体微团的总能, 即内能和动能之和。

### 2.2 网格划分

合理的网格划分是确保流体计算准确性的关键。过粗的网格可能无法捕捉到流场中的细节, 导致模拟结果的误差。而合理细致的网格划分可以细致地描述流体的运动及相互作用现象, 提高计算准确性。本文采用四面体网格对计算域进行划分以提高模拟效率, 如图 2 所示, 面网格最小尺寸在 0.005-0.01 左右变动, 最大尺寸在 0.03-0.01 左右, 保证以 100000 左右的网格数量为间隔, 探讨网格

数量对模拟结果的影响。然后基于面网格生成多面体网格,要求保证网格质量 $\geq 0.2$ ,以确保模型收敛。

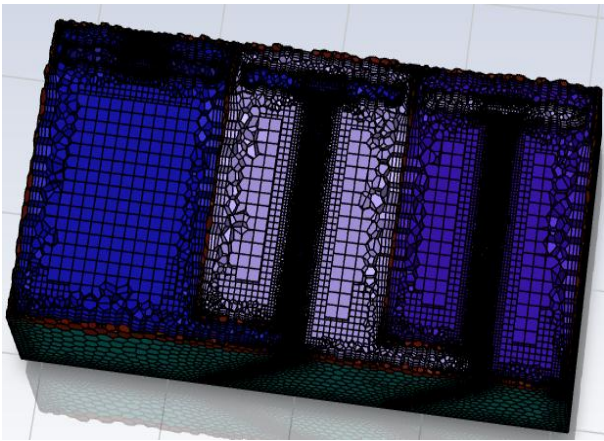


图2 水箱模型网格划分

Fig.2 Mesh generation of the water tank model

网格独立性验证的目的是确定合适的网格大小,保证计算的稳定性和收敛性以及结果的可靠性。本研究是在箱体水温为 $25^{\circ}\text{C}$ 、进口温度为 $55^{\circ}\text{C}$ 的条件下对该模型进行网格无关性验证,并选择达到最佳出口温度的时间作为权衡标准。不同网格数量下的最高出口温度随时间的变化如图3所示,本文确定六种不同类型的网格数量分别为:378082、432145、522210、644347、759499、855319。通过网格无关性验证,发现模型在378082数量下的网格所达到最高出口温度所用时间最短,因此确定不同模型下的网格数量为378082。

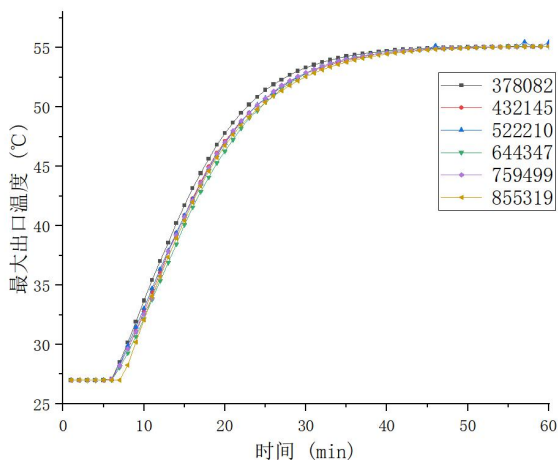


图3 不同网格数量随时间对最大出口温度的影响

Fig.3 Influence of different grid numbers on maximum outlet temperature with time

## 2.3 边界条件设定

模拟采用非稳态模拟方法,水箱入口初始温度均设为 $55^{\circ}\text{C}$ 。水箱进口设置为速度进口,出口为压力出口,布水器上下两面均设为porous-jump多孔跳跃介质。

求解参数的设置,采用Pressure-Velocity Coupling压力-速度耦合求解方式SIMPLE对求解的控制方程进行求解;压力修正方程离散格式为标准(Standrd),动量方程离散格式为二阶迎风格式(Second Order Upwind),能量方程离散格式为二阶迎风格式(Second Order Upwind);所求解的控制方程和一些变量的松弛因子Under-Relaxation Factor中均为求解器中的默认设置。

各个方程的计算结果残差要满足的残差收敛标准分别为:对于连续性方程,其相对残差为 $10^{-3}$ ,对 $u$ 、 $v$ 、 $w$ 方程相对残差为 $10^{-3}$ ,对于能量方程相对残差为 $10^{-6}$ 。时间推动类型选用Fixed,推进方法选用User-Specified,迭代时间步长(Time Step Size)取0.5s,每一个时间步内迭代20次,共迭代7200步。

## 3 数值模拟结果与分析

### 3.1 不同速度进口对水箱蓄能的影响

根据给排水设计手册和工程实践中最常采用的蓄能水箱入口流速范围应控制在 $1.2\text{m/s}$ 左右最佳,但由于本文水箱尺寸符合日常家用蓄水箱大小,考虑到较小的容量并不需要快速补水并且有极致的安全与静音等优势,因此所选取的低流速为 $0.3\text{m/s}$ 。

结合实际工况设置不同的速度进口对水箱内部温度场进行数值模拟,对入口速度一共设置五组,分别为: $0.3\text{m/s}$ 、 $0.5\text{m/s}$ 、 $0.8\text{m/s}$ 、 $1\text{m/s}$ 、 $1.2\text{m/s}$ ,研究不同速度进口对水箱蓄能效果的影响,蓄能状态下无结构水箱温度场分布云图如图4所示,最左侧为温度比色卡,范围是 $25^{\circ}\text{C}$ – $55^{\circ}\text{C}$ ,自左往右为不同时刻下的温度分布,自上而下为改变进口速度对温度分布的影响情况;在有结构的同一模型下改变进口速度的温度场云图如图5所示。

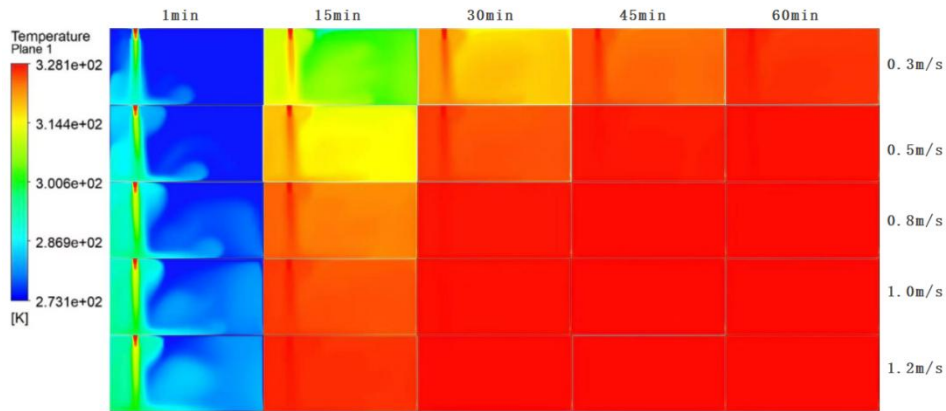


图 4 无结构水箱不同速度进口下的温度场分布云图

Fig.4 Nephogram of temperature field distribution in unstructured water tank with different inlet velocities.

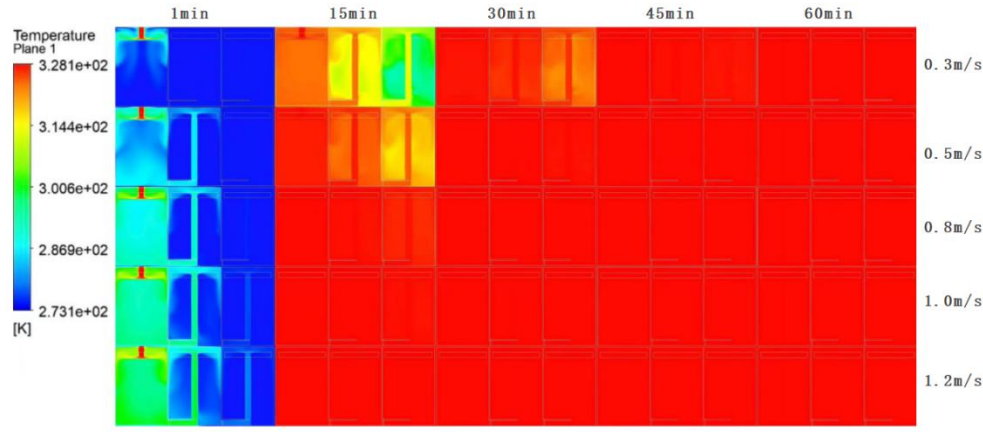


图 5 有结构水箱不同速度进口下的温度场分布云图

Fig.5 Nephogram of temperature field distribution of structured water tank with different inlet velocities.

从对蓄热过程在相同管道高度和布水器尺寸条件下,不同进口速度的水箱出口温度随时间变化的比较分析可知,不同速度对水箱内的温度分布产生了影响,温、冷水的混合程度不同。其中结构优化后的水箱内中间区域的温、冷过渡层较厚,而且上、下分层水的波动较大,冷热水掺混较轻,并且随着速度的增加,率先达到最高出口温度所用的时间越短。

水箱出口温度随时间变化的特性具有典型性。对相同几何结构下蓄热过程水箱出口温度随时间的变化做比较分析。由于进口速度的不同变化较多,在同一张图中全部绘出便于比较和观察,所以在同一幅图中绘出不同速度下出口温度随时间的变化分布图,如图 6 所示。

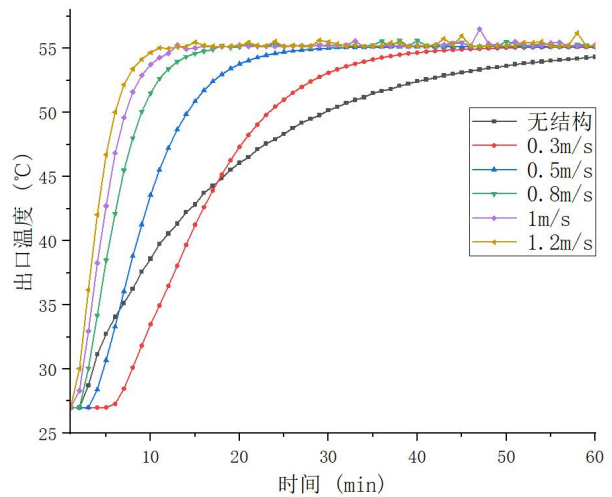


图 6 出口温度随时间变化图

Fig.6 Graph of the outlet temperature changing with time

可见，随着速度的增加，出口温度达到预设温度的时间随之缩短，以便后续数值模拟结果更加明显因此后面的模型统一取 0.3m/s 的进口速度，在此基础上设置布水器尺寸及管道高度作为变量。

### 3.2 不同布水器尺寸对水箱蓄能的影响

结合实际工况对不同布水器尺寸下的蓄能水箱内部温度场进行数值模拟，为探究布水器的尺寸

对水箱蓄能的影响，在水箱底面积与布水器尺寸比例为 1:1 范围内分别设置尺寸增量为 100mm 的布水器，分别为：50mm、150mm、250mm、350mm、450mm；不同布水器尺寸下的温度场分布云图如图 7 所示，自左往右为不同时刻下的温度分布，自上而下为改变布水器尺寸对温度分布的影响情况；出口温度随时间变化的散点图如图 8 所示。

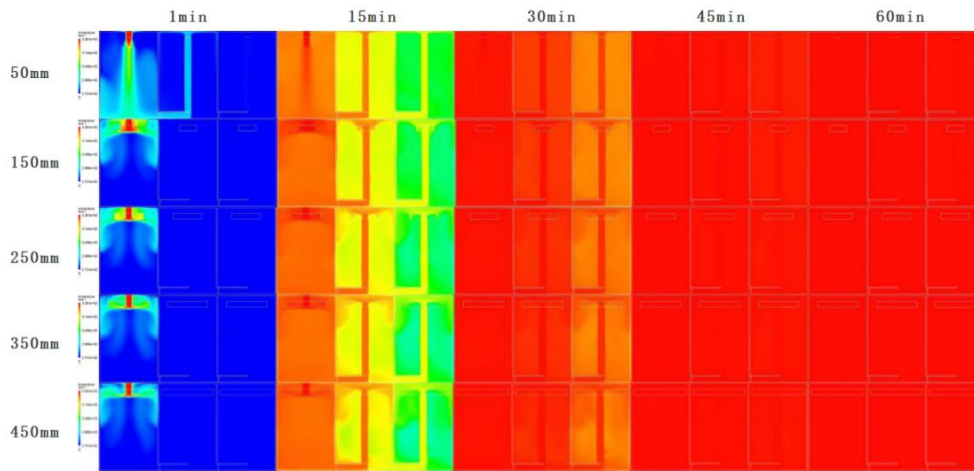


图 7 不同布水器尺寸下的温度场分布云图

Fig.7 Nephogram of temperature field distribution under different sizes of water distributor

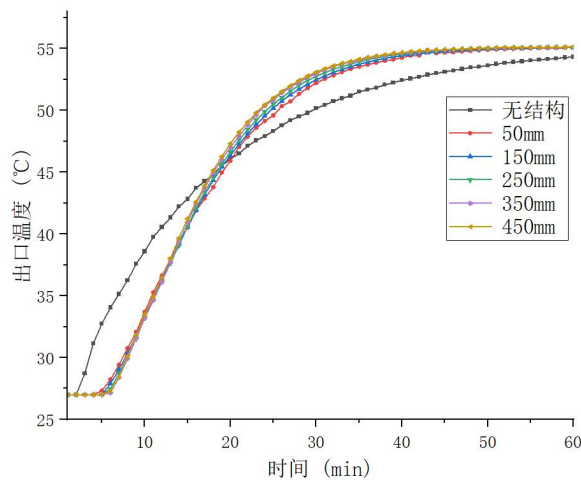


图 8 出口温度随时间变化图

Fig.8 Graph of the outlet temperature changing with time

可见，在水箱运行 20min 后有结构组的水箱升温优于无结构组水箱，并且随着布水器尺寸的增加而最先达到预设温度，此时布水器尺寸与单元水箱

底面积尺寸之比越接近 1:1，水箱性能越好。

### 3.3 不同管道高度对水箱蓄能的影响

结合实际工况对不同管道高度下的蓄能水箱

内部温度场进行数值模拟, 为探究管道高度对蓄能的影响, 在管道高度与水箱高度比例为 1:2 范围内对管道高度一共设置五组, 分别为: 50mm、100mm、200mm、300mm、400mm; 不同管道高度下的温度

场分布云图如图 9 所示, 自左往右为不同时刻下的温度分布, 自上而下为改变管道高度对温度分布的影响情况; 出口温度随时间变化的点线图如图 10 所示。

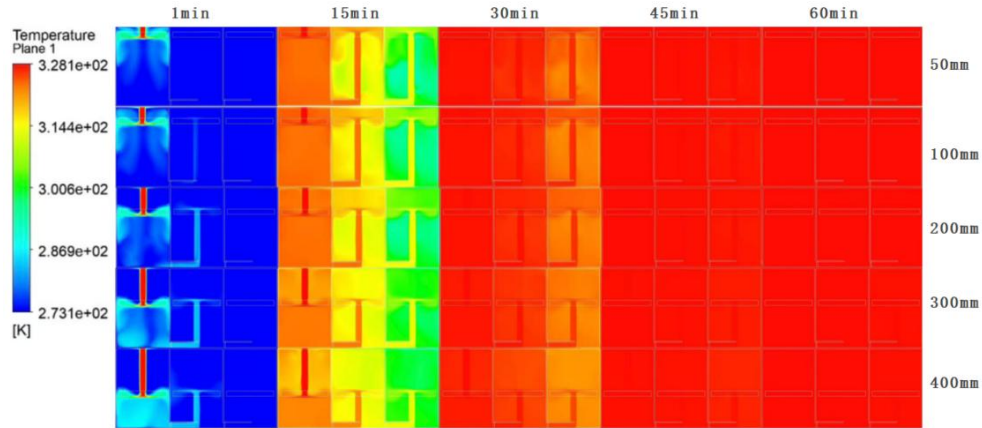


图 9 不同管道高度下的温度场分布云图

Fig.9 Nephogram of temperature field distribution at different pipe heights

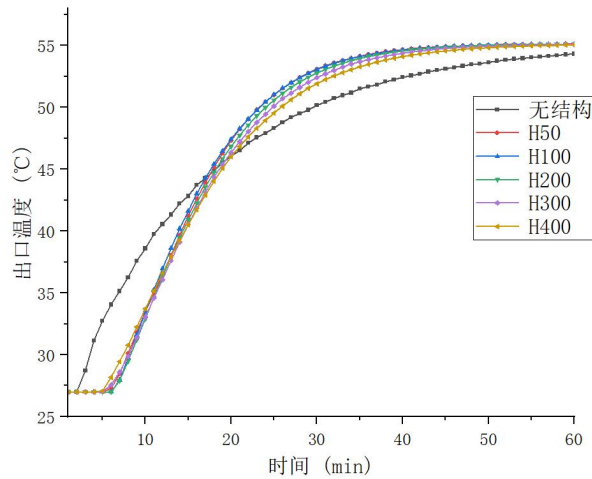


图 10 出口温度随时间变化图

Fig.10 Graph of the outlet temperature changing with time

可见, 在水箱运行 20min 后有结构组的水箱温升优于无结构组水箱, 管道高度或高或低都会降低水箱蓄热性能, 在管道高度与水箱高度之比为 1:8 时效果最佳。

#### 4 放能模式下的数值模拟结果与分析

##### 4.1 不同布水器尺寸进口对水箱放能的影响

现在将水箱的进出口交换, 初始模型 inlet

为现在的 outlet, 仅改变水流交换的方向, 模拟放能模式下的温度场云图, 在上节相同变量情况下分别观察其温度场的变化如下图所示, 图 11 为变化布水器尺寸下的温度场云图, 图 12 为出口温度随时间的变化图, 仍以最先达到预设最终出口温度为判断依据, 所用时间短者则效果最佳。

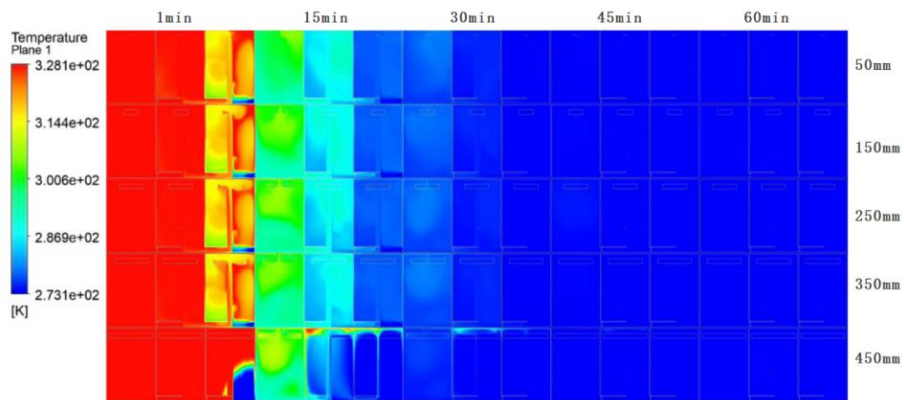


图 11 不同布水器尺寸下的温度场分布云图

Fig.11 Nephogram of temperature field distribution under different sizes of water distributor

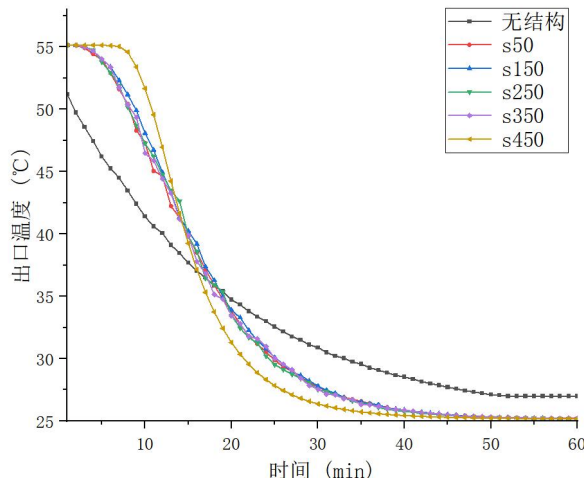


图 12 出口温度随时间变化图

Fig.12 Graph of the outlet temperature changing with time

4.2 不同管道高度对水箱放能的影响

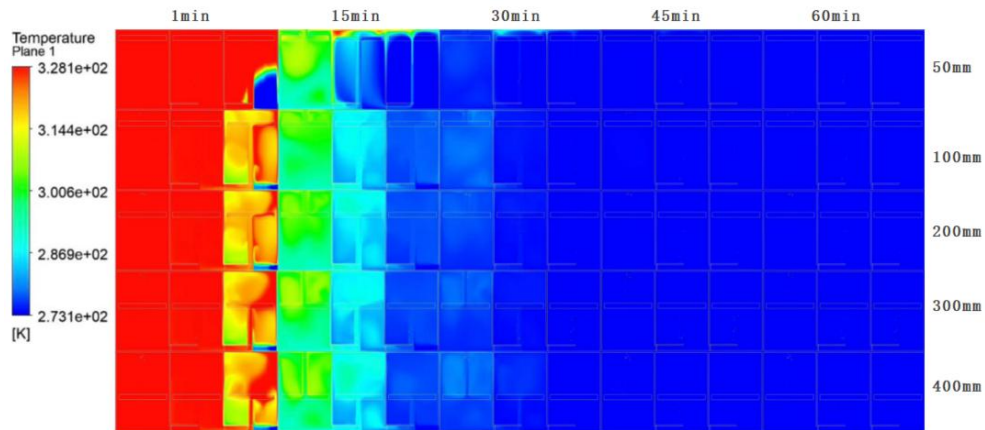


图 13 不同布水器尺寸下的温度场分布云图

Fig.13 Nephogram of temperature field distribution under different sizes of water distributor



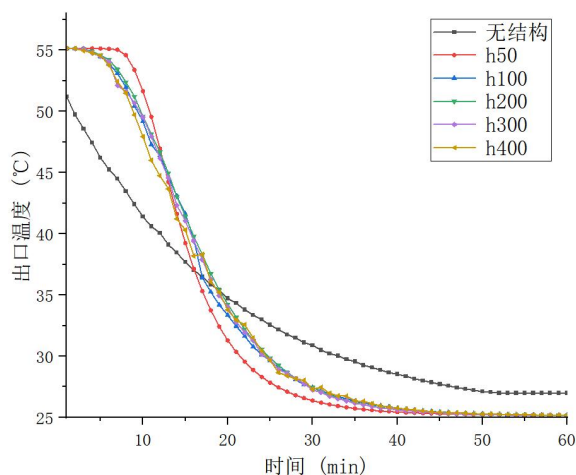


图14 出口温度随时间变化图

Fig.14 Graph of the outlet temperature changing with time

由上述两组数据可以发现放能模式下模型结果最佳的布水器尺寸仍为布水器面积与单元体箱体底面积接近 1:1 者,而最佳的管道高度仍为管道高度与水箱箱体高度比例为 1:8 者。因此可选择一套最优模型与热泵机组应用于宿舍楼的生活用水,在最短的时间内可将生活用水水箱进行蓄放能并在其余时间进行蓄能。

## 5 结论

温度分层型水蓄能是基于水因密度不同而形成不同温度的分层,是简单、有效和经济的水蓄能方法。分区隔板式分层蓄能,在美国和日本都有很多实例,大多将建筑物的地下室用作蓄水槽,在温度分层效果和防止横向热交换方面还有很多影响因素,在很多方面还需要进一步深入研究:

(1) 相同布水器形式下,流量变化对分区水箱内各区温度分层的影响及可达到最佳效果的质量流量值;

(2) 不同形状的布水器及布水器的设计参数和布置变化下,变换管径对分区水箱蓄能的影响;

(3) 分区水箱内的结构材料对抑制热交换的传热性能的讨论,减少箱内“死水区”形成方面的进一步研究;

(4) 在数值模拟中,本文对布水器整体结构进行了简化,忽略了干管和支管等连接管对水流动的影响,对布水器整体模拟研究和建立更加符合实

际的数学模型,还有很多方面需要考虑。

## 参考文献:

- [1] 白鹏.自然分层型水蓄冷条缝形布水器的优化研究[D].天津:天津大学,2009.
- [2] 陈晓冉.水蓄冷空调系统负荷预测方法的研究[D].天津:天津大学,2009.
- [3] 章学来.空调蓄冷蓄热技术[M].大连:大连海事大学出版社,2005.
- [4] 于航.空调蓄冷技术与设计[J].北京:化学工业出版社,2007.
- [5] 方贵银,邢琳,杨帆.蓄冷空调技术的现状及发展趋势[J].制冷与空调,2006,6(1):1-5.
- [6] 张永铨.国内外冰蓄冷技术的发展与应用制冷技术[J].制冷技术,1999,(2):21-24.
- [7] 张永铨.我国蓄冷技术的发展[J].暖通空调,2010,40(6):2-5.
- [8] 巨永平,孙志荣.空调工程中的蓄冷技术-蓄冷空调工程实例简介[J].暖通空调,1996,(3):49-53.
- [9] 程志华.蓄热空调[J].能源技术,1996,(4):32-36..
- [10] 范庆,叶水泉,陈永林.蓄能中央空调系统在区域供热供冷(DHC)中的应用[J].制冷空调与电力机械,2002,23(1):38-45.
- [11] 崔海亭,杨锋.蓄热技术及其应用[M].北京:化学工业出版社,2004.
- [12] 陶文铨.数值传热学(第二版)[M].西安:西安交通大学出版社,2001.