

DOI: 10.19666/j.rlfed.202210257

太阳能蓄热水箱结构优化及储放热性能分析

耿直^{1,2,3}, 张梦琼¹, 鲁向武¹, 张贺磊¹, 张丽娜¹,
王剑利², 石天庆², 刘媛媛², 张斌², 顾煜炯⁴

(1. 郑州航空工业管理学院航空发动机学院, 河南 郑州 450046;

2. 华电郑州机械设计研究院有限公司, 河南 郑州 450046; 3. 清华大学能源与动力工程系, 北京 100084;

4. 华北电力大学国家火力发电工程技术研究中心, 北京 102206)

[摘要] 显热储热是解决太阳能热利用中不稳定与波动性的一种有效方式。以常见水介质作为显热储能的媒介材料, 采取蓄热罐体装置实现太阳能的储放热应用。初选水箱基本形状为圆柱形, 对罐底进行锥形结构优化, 探究了圆锥底角分别为 40°、45°、50° 3 类工况下蓄热水箱的各自蓄热变化特性。利用 Fluent 数值软件, 基于非稳态层流换热模型, 对蓄热装置的体平均温度变化和体最大温度变化等进行了模拟研究。结果表明, 当圆锥底角为 50° 时, 蓄热水箱整体充放热性能较优, 且该参数下蓄热水箱体平均温度为 308.612 K 时, 比圆锥底角为 40° 与 45° 的蓄热水箱体平均温度分别高出 0.202% 与 0.053%。在此基础上, 进一步分析了 50° 蓄热水箱的储热与放热动态变化规律, 研究了蓄热水箱内部储、放水过程中各自体积分、速度场等关键指标的分布特性。该研究可为太阳能蓄热系统的优化设计与工程化应用提供一定参考。

[关键词] 太阳能; 蓄热水箱; 结构优化; 储热; 热力分析; 数值模拟

[引用本文格式] 耿直, 张梦琼, 鲁向武, 等. 太阳能蓄热水箱结构优化及储放热性能分析[J]. 热力发电, 2023, 52(2): 64-72.
GENG Zhi, ZHANG Mengqiong, LU Xiangwu, et al. Structure optimization of solar thermal storage tank and analysis of its thermal storage and release performance[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(2): 64-72.

Structure optimization of solar thermal storage tank and analysis of its thermal storage and release performance

GENG Zhi^{1,2,3}, ZHANG Mengqiong¹, LU Xiangwu¹, ZHANG Helei¹, ZHANG Lina¹,
WANG Jianli², SHI Tianqing², LIU Yuanyuan², ZHANG Bin², GU Yujiong⁴

(1. School of Aero Engine, Zhengzhou University of Aeronautics, Zhengzhou 450046, China;

2. Huadian Zhengzhou Mechanical Design Institute Co., Ltd., Zhengzhou 450046, China;

3. Department of Energy and Power Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

4. National Thermal Power Engineering & Technology Research Center, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Sensible heat storage is an effective way to solve the instability and fluctuation of solar thermal utilization. The common water medium was used as the medium material of sensible heat energy storage, and the

收稿日期: 2022-10-16 网络首发日期: 2022-12-30

基金项目: 河南省科技攻关资助项目(212102210009); 河南省青年人才托举工程资助项目(2022HYTP021); 河南省土木建筑学会科技指导计划资助项目(202102); 中国华电集团重点科技资助项目(CHDKJ22-01-23); 教育部教指委高等学校能源动力类教学研究与实践资助项目(NSJZW2021Y-99)

Supported by: Henan Province Science and Technology Research Project (212102210009); Young Elite Scientists Sponsorship Program by Henan Association for Science and Technology (2022HYTP021); Science and Technology Guidance Program Project of Henan Civil Architecture Society (202102); Key Science and Technology Funded Project of China Huadian Corporation (CHDKJ22-01-23); The Energy and Power Teaching Research and Practice Program of Colleges and Universities sponsored by the Ministry of Education Guidance Committee (NSJZW2021Y-99)

第一作者简介: 耿直(1991), 男, 博士后, 讲师, 硕士生导师, 主要研究方向为可再生能源利用与开发, zhgz@zua.edu.cn.

通信作者简介: 顾煜炯(1968), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电站设备状态维修技术及清洁能源的开发利用, gyj@ncepu.edu.cn.

heat storage tank device was used to realize the application of solar energy heat storage and release. The basic shape of the initially selected water tank was cylindrical. The conical structure of the tank bottom was optimized, and the respective heat storage change characteristics of the heat storage water tank under the three working conditions of 40°, 45° and 50° cone bottom angles were explored. Based on the unsteady laminar heat transfer model, the volume average temperature change and the maximum volume temperature change of the heat storage device were simulated by using the Fluent numerical software. The results showed that, when the cone bottom angle was 50°, the overall heat charging and discharging performance of the heat storage tank was better. When the average temperature of the heat storage tank body was 308.612 K under this parameter, the average temperature of the heat storage tank body was 0.202% and 0.053% higher than that of the heat storage tank body with a cone bottom angle of 40° and 45°, respectively. On this basis, the dynamic change law of heat storage and heat release of 50° tank was further analyzed, and the distribution characteristics of key indicators such as volume fraction and velocity field in the process of water storage and drainage inside the tank were studied. This research can provide some reference for the optimal design and engineering application of solar energy thermal storage system.

Key words: solar energy; heat storage tank; structural optimization; heat storage; thermal analysis; numerical simulation

伴随着“碳达峰碳中和”政策的大力实施,可再生能源的高效利用已成为构建低碳社会的重要一环^[1-5]。从全世界范围来看,在各类清洁可再生能源利用形式中,太阳能的分布最为广泛,且具有显著的无污染、取之不尽、用之不竭等优势^[6-9]。我国拥有较为丰富的自然气象资源,巨大的太阳能资源优势为太阳能利用与开发提供了得天独厚的条件。所以,加大太阳能领域的投资、探索与研发,势必对中国能源体系改革与发展起到重要的影响与推进作用。

然而,太阳能的应用受制于气象资源的波动性与随机性。因此,在实际应用中必须配备一定容量的储能装置以实现新能源的连续性出力。储热技术便是一种应用较为广泛的蓄能技术。依据储热特性的不同,可将其划分为显热储热、潜热储热和化学反应储热3类^[10-12]。其中,采用罐体结构作为蓄热装置,并且以水作为蓄热工质的显热储热相较于埋管、砾石等其他蓄热方式,具有充、放热运行方式简单、热容量大、换热效果较优、成本低廉、原料来源广泛等显著优势,在储热领域受到大力推广。

当前,围绕蓄热装置的核心设备开展了一系列的学术研究。Yang等人^[13]研究了封闭的蓄热水箱内层流与自然对流换热条件下,10种蓄热水箱形状对蓄热容量和热分层的影响,发现具有“尖角”的外形结构可使得蓄热设备获得较好的热分层效果。Al-Habaibeh等人^[14]提出了一种新型创新技术以改善水体分层,通过设计一种高度柔性的薄壁管,最大限度减少了蓄热水箱内的混合和湍流。Abhilash等人^[15]利用实验平台,对相变材料在太阳能热水器系统中的热能储存应用开展了实验研究。Bai等人^[16]采用维分析方法建立了蓄热装置冷却过程一维模型,

结果表明内部的自然对流效应主要沿上部对流。除此之外,国内也有众多学者就储热技术开展了不同层次的理论与实验探讨。王焯等^[17-18]以半球形顶圆柱体水箱为研究对象,分析了不同冷水入口流速对水箱内温度场和流场的影响。李安桂等^[19]通过调研、理论分析和数值模拟研究了蓄热水箱蓄热、释热的过程,提出了热力特性较优的蓄热水箱结构及进水管布置方式。胡晶晶等^[20-21]提出一种用于太阳能供热系统的即热式蓄热水箱,保证了系统集热效率。王智平等^[22]提出了一种新型温度分层储热装置,即分层换热储热装置,实现了保护蓄热水箱内部环境稳定的目标。

综上所述,当前针对显热蓄热技术的研究多集中于单罐热分层等方面^[23-25],针对水体蓄热装置的具体结构参数优化以及太阳能充放热动态过程规律探究相对较少。本文以传统圆柱形蓄热水罐为基础,探究罐底角度变化参数对于蓄热性能关键指标的变化影响,确立最优的蓄热装置结构设计参数;同时,研究在此结构下的罐体充、放热过程动态变化特性,进一步确保太阳能在应用过程中的系统整体稳定性与可靠性。该研究结果可为太阳能蓄热技术的工程化应用提供一定优化参考与理论支撑。

1 系统建模

1.1 物理结构

传统蓄热水箱的基本形状多为圆柱形。本论文提出了一种新型的罐体结构优化方案,即由1个圆柱加1个圆锥联合一起构成组合体装置,以承担必要的充、放热作用。水箱物理模型如图1所示。

图1中,水箱的下部储存的是低温水,被外界太阳能集热器加热吸热之后才变成满足一定温度

品质的高温水,重新返回蓄热水箱被储存。水箱在蓄放热过程中不可避免地会产生一定的热损失,且随着深度的不断变化,水箱内部温度会有所下降,与此同时,高、低温流体存在一定的密度差,所以在罐体内部会产生蓄热水体的内部流动,即水箱内存在流体的自然对流效应现象。水箱底部具有一定倾斜角度的圆锥壁面会阻碍流体流动,倾斜角度不同,其对流体的阻碍程度也不尽相同。通过改变圆锥底角 θ 的大小,就可得到不同倾角的水箱壁面对自然对流下的水箱流体换热性能的影响,从而得到使太阳能水箱蓄热最优的圆锥底角几何结构参数。

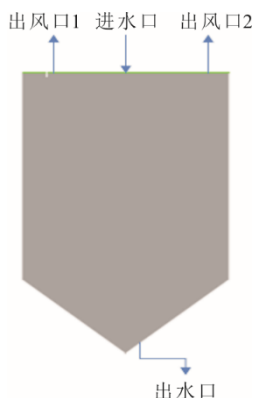


图1 水箱物理结构模型

Fig.1 Physical structure model of water tank

为简化计算,将圆柱直径、高度及圆锥底面直径均设置为4 m,由灌顶至罐底采取UG软件对太阳能蓄热水箱进行建模。水箱结构模型如图2所示。

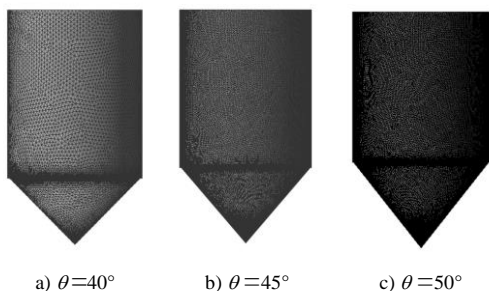


图2 不同圆锥底角的3类水箱结构模型

Fig.2 Three types of water tank structure models with different cone bottom angles

在上述物理结构基础上,为方便热力分析,进行后续数学建模时作如下5条假设:1)忽略太阳能水箱壁厚对换热的影响;2)系统处于非稳态传热过程;3)外界空气的物理参数为定值,其不受外界气象条件波动的影响;4)不考虑太阳能水箱内部的接触热阻;5)由于高低温流体的密度不同,会导致分层现象,因此,假定流体内部均为层流流动,并忽略湍流摩擦损失的影响。

1.2 数学模型

1.2.1 控制方程

蓄热水工质因为流动而产生的传热过程均要遵循质量守恒定律、动量守恒定律和能量守恒方程见式(1)一式(5)。

质量守恒方程为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho u_z)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

动量守恒方程为:

$$\frac{\partial(\rho u_x)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u_x \vec{u}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho f_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho u_y)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u_y \vec{u}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho f_y \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho u_z)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u_z \vec{u}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \rho f_z \quad (4)$$

能量守恒方程为:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda \text{grad} T) + T\beta \frac{dp}{dt} + q + \Phi \quad (5)$$

式中: u_x 、 u_y 、 u_z 分别为速度矢量在 x 轴、 y 轴、 z 轴各方向的速度分量, m/s; β 为体积膨胀系数, K^{-1} ; ρ 为密度, kg/m^3 ; λ 为导热系数, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; μ 为运动黏度, m^2/s ; T 为温度, K ; c_p 为定压比热容, $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$; τ 为蓄热水箱放热时间, s; ϕ 为内热源, W/m^3 。

1.2.2 边界及初始条件

边界条件:模型内流体为层流状态,水的密度特性设为线性变化;储热工况下,模型顶部设置为出风口 outlet-vent,中间设置进水口 inlet;放热工况下,模型底部圆锥侧设置出水口为 outlet,进风口 inlet-vent 设置在水箱顶部两边;壁面为横壁温。

初始条件:水箱内水体的初始温度为 343 K,壁面温度为 287 K,储热时外界平均温度取为 298 K,放热时外界平均温度取为 283 K。

1.2.3 网格无关性验证

为排除网格数量对计算的影响,开展网格无关性验证。选取体平均温度 T_{mean} 和体最大温度 T_{max} 为对比指标,以圆锥底角为 45° 水箱为例,得到结果如图3所示。由图3可见,随着网格数的大幅度增加, T_{mean} 分别相差 0.118%、0.314%、0.530%、0.121%和 0.450%, T_{max} 分别相差 0.281%、0.133%、0.186%、0.225%和 0.160%,变化均处于在误差所允

许的范围内。由于网格数加密可提高计算的精准性，所以选择网格数为 1 754 893 来进行仿真计算。因此，本文所选择的网格数量和质量均可满足要求，确保了计算准确性。

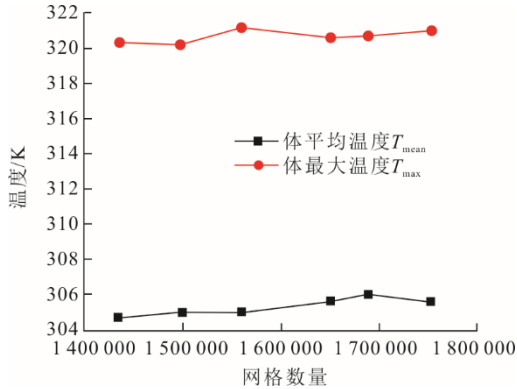


图 3 网格无关性验证结果
Fig.3 Grid independence verification results

1.2.4 步长独立性验证

时间步长分别取为 1.00、0.50、0.10、0.05 s，依然取圆锥底角 45° 为例进行模拟运算，模拟时间共进行 1 000 s，监测水箱体平均温度分别为 304.626、304.978、305.583、306.985 K。该结果说明时间步长对计算结果影响较小，若步长取的太小会增加计算周期，步长值太大又会影响计算精度，综合考虑模拟计算步长设为 0.10 s。

2 仿真结果分析

以 YZ 轴为平面，选取不同罐体蓄热过程中第 60、120 s 的内流场分布云图进行分析。

2.1 蓄热水箱内部流场特性分析及结构优化

2.1.1 流场特性

1) 温度场

蓄热水箱的温度场分布如图 4 所示。由图 4 可见，水箱内温度分层较为明显，倾角参数的改变对于水箱内温度的初始分布影响不明显，但是随着时间的推移，温度层发生改变。在第 60 s 时， $\theta=40^\circ$ 水箱的 $T_{mean}=296.54$ K， $T_{max}=305.45$ K；同时刻 $\theta=45^\circ$ 水箱的 $T_{mean}=296.77$ K， $T_{max}=306.27$ K； $\theta=50^\circ$ 水箱的 $T_{mean}=296.87$ K， $T_{max}=306.16$ K。在第 120 s， $\theta=40^\circ$ 水箱的 $T_{mean}=289.91$ K， $T_{max}=293.41$ K； $\theta=45^\circ$ 、 50° 2 类罐体的 T_{mean} 分别比 40° 水箱的高 0.04、0.08 K， T_{max} 均高出 0.40 K。水箱中高温水体聚集在水箱顶部，低温水主要位于底部位置。上下层不同的流体温差致使流体密度不同，从而于内部产生对流流动。随着时间推移，水箱中的最大温度有所降低，低温水越来越多，分层程度愈发明显，引起跨层次传递热量，最终使得内部整体蓄热水体温差不大，趋向于平稳。

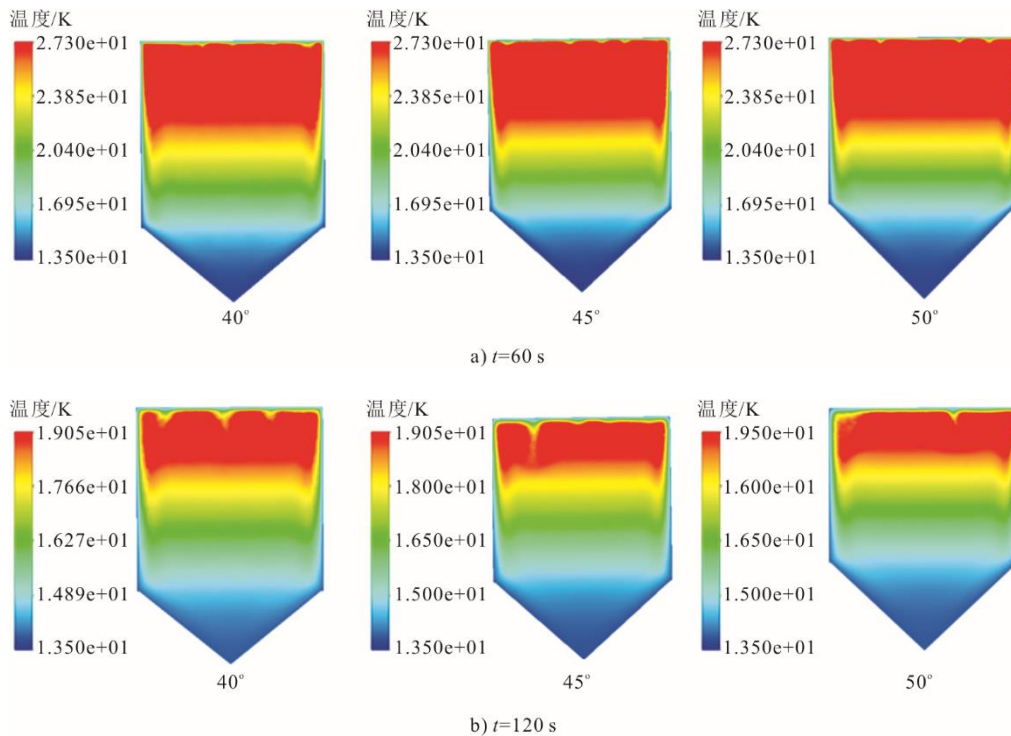


图 4 $\theta=40^\circ$ 、 45° 、 50° 时不同时刻的水箱温度云图
Fig.4 Temperature nephogram of water tank at different times of $\theta=40^\circ$ 、 45° and 50°

2) 速度场

蓄热水箱的速度场分布如图5所示。由图5可见,水介质在罐体内的自然对流是沿着水箱壁面进行传递,靠近水箱壁面处的流速 u 更大,底部侧壁面流体速度 u 则较小。在第60s,圆锥底角为 40° 的水箱内部,水流平均速度 u_{\min} 为 0.00549 m/s ; $\theta=45^\circ$ 的水箱内部 u_{\min} 为 0.00475 m/s ; $\theta=50^\circ$ 的水箱内部 u_{\min} 最小,为 0.00443 m/s 。相应地,当时间推移至120s时,3个不同倾角参数水箱的平均速度

均呈现递减趋势,分别减少了 0.00028 、 0.00016 、 0.00016 m/s 。

由以上分析可知,靠近上部水箱范围温度更高,上下部温度不同导致密度不同,引起内部对流传热,且对流方向朝向水箱的顶部,这也是上半部分流体速度更大、水箱底部流体速度更小的原因。随着时间的推移,蓄热水存在一定的热量散失,管内水温分布趋于一致,密度差较之前减小,对流程度削弱,速度也随之变小。

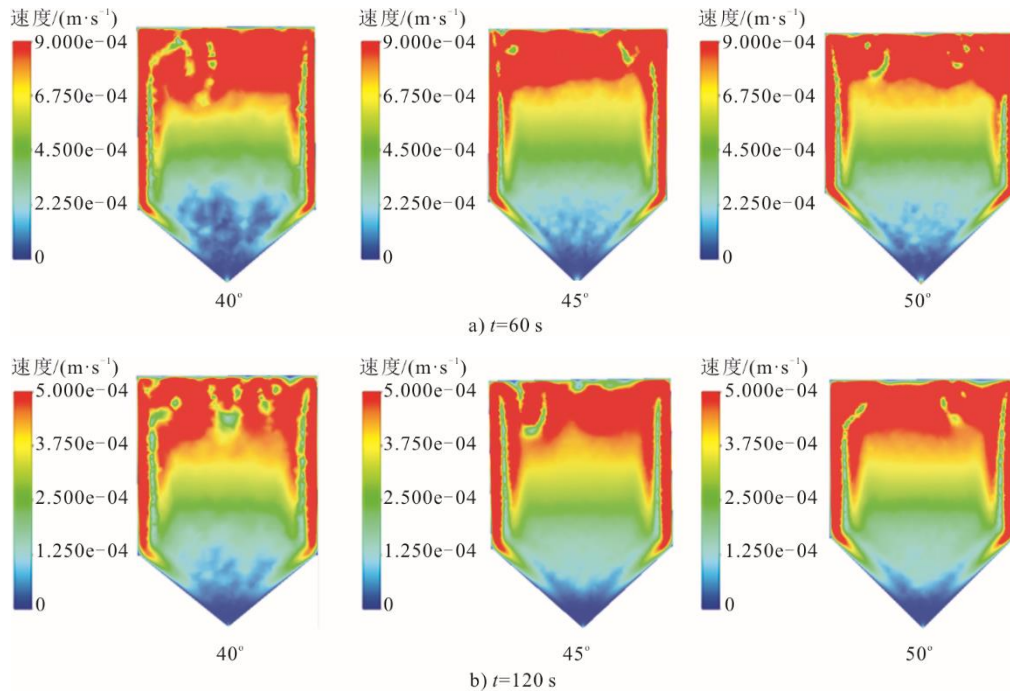


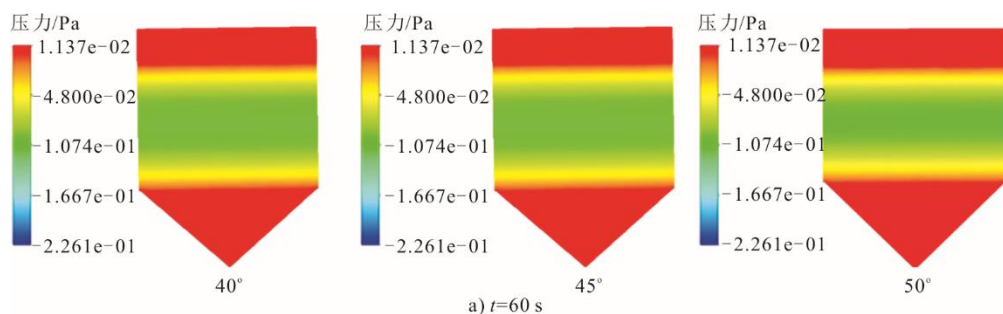
图5 $\theta=40^\circ$ 、 45° 和 50° 时不同时刻的水箱速度云图

Fig.5 Water tank speed nephogram at different times of $\theta=40^\circ$, 45° and 50°

3) 压力场

蓄热水箱的压力场分布如图6所示。由图6可见,蓄热水箱内部的上下压力分层现象较为明显。当 $t=60\text{ s}$ 时, $\theta=50^\circ$ 的水箱内部压力比 $\theta=45^\circ$ 的高出 1.16% ,比 $\theta=40^\circ$ 的压力水箱高出 1.35% 。相应地,在第120s时, $\theta=50^\circ$ 的水箱压力依然最大,比 θ 为 45° 与 40° 的水箱分别高出 1.03% 与 1.17% 。蓄热水箱顶部和底部及靠近圆锥锥顶的部分压力较高,但

此2部分压力较高的原因不尽相同。水箱顶部压力高是因为水箱上部流体速度较大,流体一直向上自然对流,冲击着水箱顶部,造成水箱顶部压力较大;底部流体压力大是由于流体冷却后沉积在水箱底部,致使本处承压较大。随着时间前移,水箱内流体温度逐步降低,对流程度也减弱,绝大部水工质沉积于底部。同温度场、速度场保持一致,压力分层情况不断减弱且逐渐平缓。



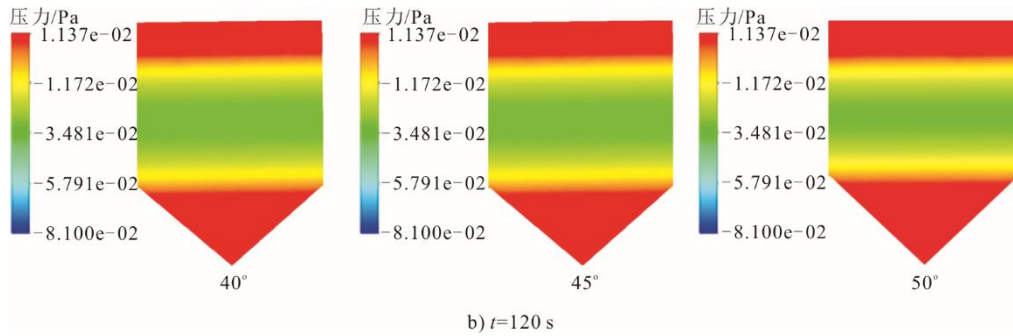


图 6 $\theta=40^\circ$ 、 45° 和 50° 不同时刻的水箱压力云图
Fig.6 Water tank pressure nephogram at different times of $\theta=40^\circ$, 45° and 50°

4) 速度矢量场

蓄热水箱内流体速度矢量分布如图 7 所示。由图 7 可见，圆锥底角为 50° 的水箱内产生的涡旋最为剧烈。涡旋的出现表明蓄热水箱流体速度减小，相应的对流换热强度也会减弱。由于蓄热水箱的

顶部速度大于底部速度，所以蓄热水箱的顶部速度矢量也比底部速度矢量密集。相应地，水箱顶部出现涡旋，蓄热水箱靠近圆锥部分也有较小的涡旋出现。涡旋数量越多越密集，则表示水箱蓄热性能更优。

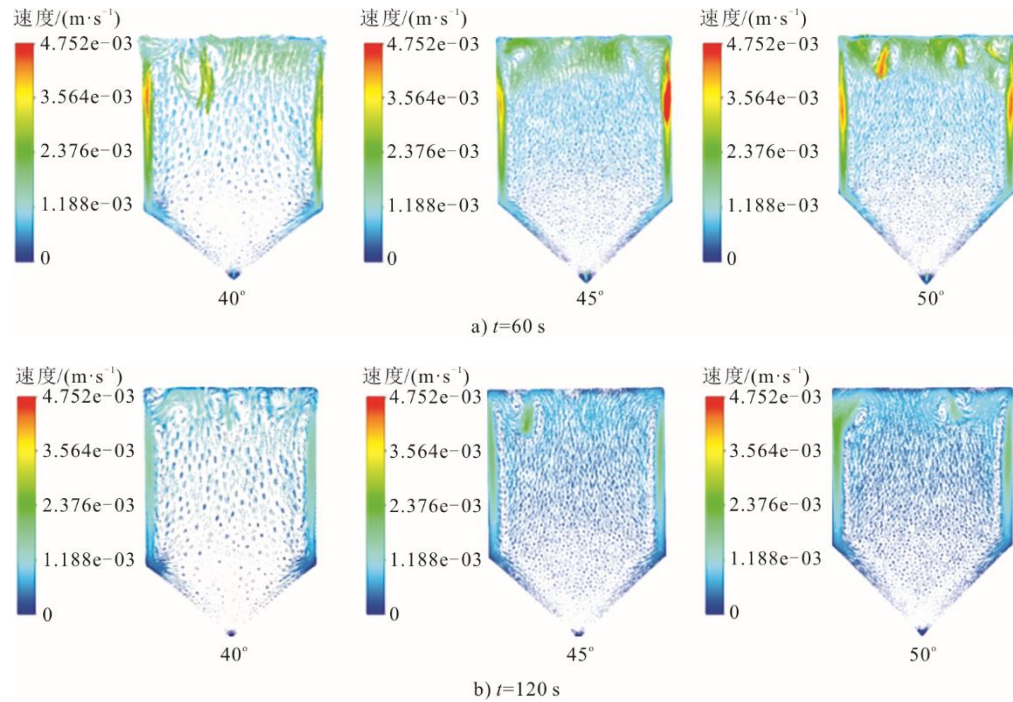


图 7 $\theta=40^\circ$ 、 45° 和 50° 不同时刻的水箱速度矢量云图
Fig.7 Water tank velocity vector nephogram at different times of $\theta=40^\circ$, 45° and 50°

2.1.2 结构优化

水箱的蓄热性能优劣不仅与自然对流换热强弱有关，还受水箱比表面积大小的影响。水箱比表面积 W 等于表面积与其体积之比：

$$W=S/V \tag{6}$$

式中： S 为水箱表面积， m^2 ； V 为水箱体积， m^3 。

W 值越大，则表示水箱内平均温度在一定的时间内冷却速率越快，散热量增多，蓄热性能差。通

过计算上述不同结构下的性能指标，结果见表 1。

表 1 3 种圆锥底角下的水箱比表面积结果
Tab.1 Results of specific surface area of water tank under 3 kinds of cone bottom angles

角度 $\theta(^{\circ})$	表面积 S/m^2	体积 V/m^3	比表面积 W/m^{-1}
40	79.20	57.27	1.38
45	80.56	58.61	1.37
50	82.34	63.27	1.30

结合上文不同罐体的内流场分布云图及蓄热水箱比表面积核心指标数值结果,综合考虑圆锥底角 $\theta=50^\circ$ 时,蓄热水箱中的整体储热性能较优。因此,本文确立圆锥底角 $\theta=50^\circ$ 作为优化后的罐体关键结构设计参数。

2.2 蓄热水箱储放热特性分析

本节以上述计算最优的 $\theta=50^\circ$ 时水箱为基础,开展太阳能储、放热过程的动态模拟。其中,储蓄着重取罐体中水充满圆锥、圆柱 1/2 和全部水箱 3 个时刻的动态结果予以分析,放热过程恰好相反。

2.2.1 储热过程分析

蓄热水箱的储水蓄热动态过程分布如图 8 所示。大部分白天具有丰富的太阳能资源,可进行有效的热量存储。

分别选取罐体内的水体积分数与流速作为分析变量。当水体充满圆锥时,太阳能蓄热水箱储存的热量为 1.886×10^9 J;当水充满圆柱 1/2 体积之时,水箱储存的热量为 6.634×10^9 J;最终,当水充满整个水箱时储存的热量为 1.138×10^{10} J,完成全部储热过程共计需 980 s。随着罐体内蓄热工质体积的不断增多,水流最大值由初始的 0.39 m/s 降低至 0.25 m/s,内部流场由最开始的较为剧烈扰动不断趋于平稳。

2.2.2 放热过程分析

储热的目的在于气象条件不佳工况下,可实现将之前储存的热量及时地供给热用户侧,以满足必要的热负荷需求。图 9 为罐体内放水释热动态过程分布云图。

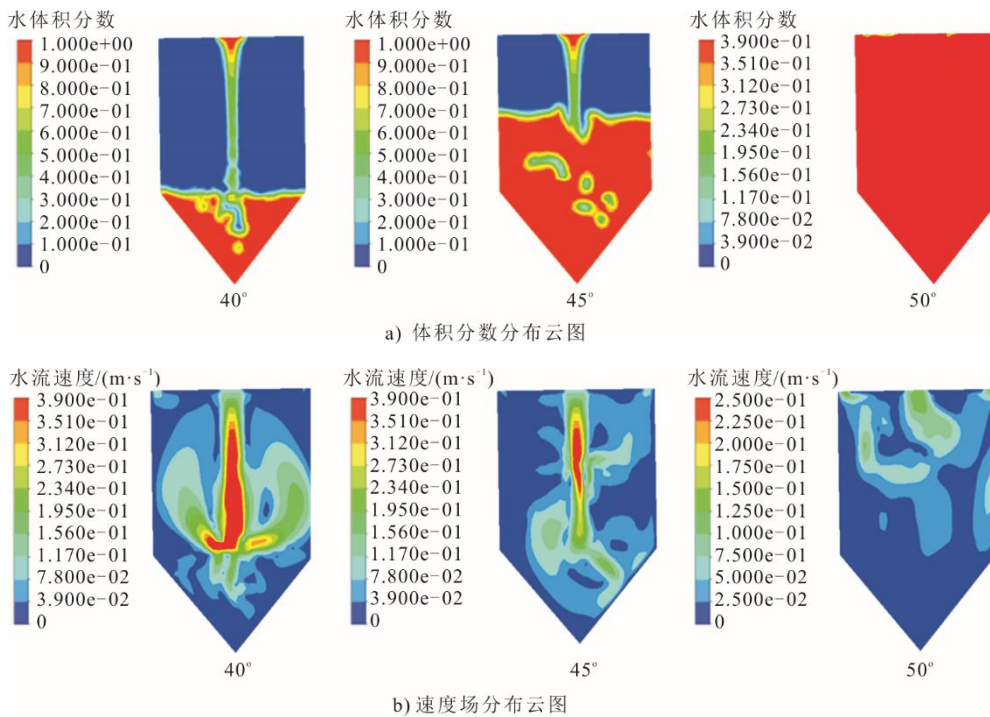
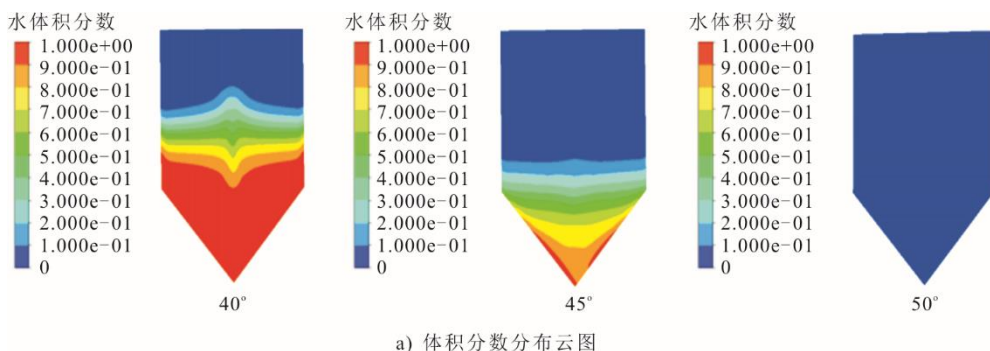
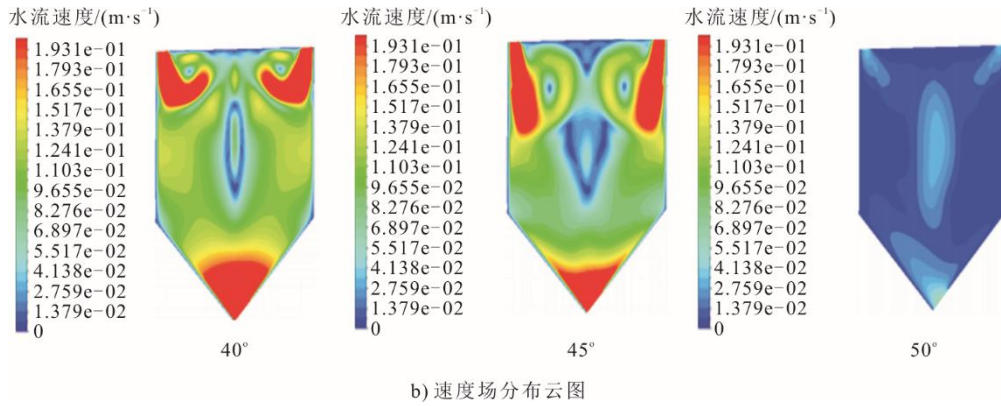


图 8 $\theta=50^\circ$ 水箱夏季储水蓄热过程分布云图

Fig.8 Cloud chart of thermal storage process of water tank in summer of $\theta=50^\circ$



a) 体积分数分布云图

图9 $\theta=50^\circ$ 水箱储水放热过程分布云图Fig.9 Cloud chart of heat release process of water storage tank in winter of $\theta=50^\circ$

由图9可见：当 $t=330$ s 时，水位降低至圆柱 $1/2$ 高度处，水箱释放热量 6.66×10^9 J；当 $t=660$ s，水外放至圆锥部分高度时，水箱放热量达到 1.27×10^{10} J，较之前增加了 6.04×10^9 J，增加了近1倍；当 $t=980$ s 时，罐体内的水全部释放完毕，此时水箱总体放热量达到 1.36×10^{10} J。在速度场分布方面，同储热过程相类似，起始罐体的顶部两侧圆锥尖底部具有较高的速度分布，最大值为 0.193 m/s；随着时间推移，罐内水的质量越来越多，上下具有内部的热量传递与质量传输过程，最终当水充满整个蓄热装置时，罐体内部的水体流速基本维持在 0.028 m/s 左右。

3 结 论

本文以常规圆柱形水体单罐蓄热装置为研究对象，利用结构优化方式建立了3种不同锥体角倾角的物理结构简化模型，利用Fluent软件对各蓄热水箱的内流场特性进行了仿真分析，得到了最优化结构设计参数，并以此分析了该罐体结构参数下的水体介质充放、热动态特性，最终结论如下。

1) 水箱壁面圆锥倾斜角度 θ 对蓄热水箱内的自然对流换热有一定影响。锥体结构致使壁面不再如圆柱形垂直分布，对箱内水体流动产生一定阻碍作用，影响箱内水体的运动速度与压力分布，并一定程度上削弱内部的对流作用强度。

2) $\theta=50^\circ$ 的水箱蓄热性能相较于另2种的综合热性能较优。其体平均温度值比 $\theta=40^\circ$ 、 45° 2类水箱结构分别高出 0.202% 和 0.053% ；其最大体温度比二者分别高出 0.405% 与 0.109% 。

3) 该蓄热水箱可实现灵活调控太阳能的蓄放热过程，提升太阳能装置的年利用率，随着时间的推移，内流场分布逐步趋于平衡。

[参 考 文 献]

- [1] 张琦. 跨季节太阳能水箱蓄热数值模拟研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2020: 1.
ZHANG Qi. Study on numerical simulation of cross season solar water tank heat storage[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2020: 1.
- [2] 中国政府网. 中共中央关于制定国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标的建议[EB/OL]. (2020-11-03) [2022-10-16]. http://www.gov.cn/zhengce/2020-11/03/content_5556991.htm.
Chinese government website. Suggestions of the central committee of the communist party of China on formulating the Fourteenth Five Year Plan for national economic and social development and the vision for the year 2035[EB/OL]. (2020-11-03) [2022-10-16]. http://www.gov.cn/zhengce/2020-11/03/content_5556991.htm.
- [3] 唐云霓, 闫如雪, 周艳玲. 碳中和愿景下能源政策的结构表征与优化路径[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2023, 63(1): 1-14.
TANG Yunni, YAN Ruxue, ZHOU Yanling. Structural characterization and optimization path of energy policy under the carbon neutral vision[J]. Journal of Tsinghua University(Natural Science Edition), 2023, 63(1): 1-14.
- [4] 舒印彪, 赵勇, 赵良, 等. “双碳”目标下我国能源电力低碳转型路径[J/OL]. 中国电机工程学报: 1-9. (2022-10-08)[2022-10-16]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.221407>.
SHU Yinbiao, ZHAO Yong, ZHAO Liang, et al. Low carbon transformation path of China's energy and power under the “dual carbon” goal[J/OL]. Proceedings of the CSEE: 1-9. (2022-10-08)[2022-10-16]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.221407>.
- [5] 杜冬梅, 曹冬惠, 何青. “双碳”目标下我国电力行业低碳转型的思路探讨[J]. 热力发电, 2022, 51(10): 1-9.
DU Dongmei, CAO Donghui, HE Qing. Discussion on ideas of low-carbon transformation of China's power industry under the “dual carbon” goal[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(10): 1-9.
- [6] 陈静, 刘建忠, 沈望俊, 等. 太阳能热发电系统的研究现状综述[J]. 热力发电, 2012, 41(4): 17-22.
CHEN Jing, LIU Jianzhong, SHEN Wangjun, et al. Overview of research status of solar thermal power generation system[J]. Thermal Power Generation, 2012, 41(4): 17-22.
- [7] 肖瑶, 钮文泽, 魏高升, 等. 太阳能光伏/光热技术研

- 究现状与发展趋势综述[J]. 发电技术, 2022, 43(3): 392-404.
- XIAO Yao, NIU Wenzhe, WEI Gaosheng, et al. Overview of research status and development trend of solar photovoltaic/photothermal technology[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(3): 392-404.
- [8] LI G, LI M, TAYLOR R, et al. Solar energy utilisation: current status and roll-out potential[J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 209: 11825.
- [9] 张博智, 卢妍, 谭晨, 等. 光伏光热互补发电系统多目标容量优化研究[J]. 热力发电, 2022, 51(5): 9-17.
- ZHANG Bozhi, LU Yan, TAN Chen, et al. Study on multi-objective capacity optimization of photovoltaic solar thermal complementary power generation system[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(5): 9-17.
- [10] 李亚溪, 李传常, 白开皓, 等. 热储能技术及其工程应用[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2022, 19(3): 1-19.
- LI Yaxi, LI Chuanchang, BAI Kaihao, et al. Thermal energy storage technology and its engineering application[J]. Journal of Changsha University of Technology (Natural Science Edition), 2022, 19(3): 1-19.
- [11] YU K Y, LIU Y S, YANG Y Z. Review on formstable inorganic hydrated salt phase change materials: preparation, characterization and effect on the thermophysical properties[J]. Applied Energy, 2021, 292: 116845.
- [12] 梁立晓, 陈梦东, 段立强, 等. 储热技术在太阳能热发电及热电联产领域研究进展[J]. 热力发电, 2020, 49(3): 8-15.
- LIANG Lixiao, CHEN Mengdong, DUAN Liqiang, et al. Research progress of heat storage technology in the field of solar thermal power generation and cogeneration[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(3): 8-15.
- [13] YANG Z, CHEN H S, WANG L, et al. Comparative study of the influences of different water tank shapes on thermal energy storage capacity and thermal stratification[J]. Renewable Energy, 2016, 85: 31-44.
- [14] AL-HABAIBEH, AMIN, SHAKMAK, et al. Assessment of a novel technology for a stratified hot water energy storage-the water snake[J]. Applied Energy, 2018, 222: 189-198.
- [15] ABHILASH A, DHEERAJ K, BALACHANDRAN M. An experimental investigation on PCM incorporated solar water heater[J]. International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, 2016, 5(4): 5477-5484.
- [16] BAI Y, YANG M, WANG Z, et al. Thermal stratification in a cylindrical tank due to heat losses while in standby mode[J]. Solar Energy, 2019, 185(6): 222-234.
- [17] 王焯, 石成志, 孙振东, 等. 流体参数与隔板结构对太阳能蓄热水箱性能的综合影响[J]. 化工进展, 2020, 39(增刊 1): 1-2.
- WANG Ye, SHI Chengzhi, SUN Zhendong. Comprehensive influence of equivalent fluid parameters and diaphragm structure on the performance of solar thermal storage tank[J]. Chemical Progress, 2020, 39(Suppl.1): 1-2.
- [18] 王焯, 宋荣飞, 胡悦, 等. 内置隔板开孔方式对太阳能蓄热水箱热分层的影响[J]. 储能科学与技术, 2019, 8(5): 1-2.
- WANG Ye, SONG Rongfei, HU Yue, et al. The influence of the opening mode of the built-in partition on the thermal stratification of the solar thermal storage tank[J]. Energy Storage Science and Technology, 2019, 8(5): 1-2.
- [19] 李安桂, 史丙金, 张婉卿, 等. 基于太阳能利用的相变蓄热水箱结构优化[J]. 太阳能学报, 2020, 41(2): 1-8.
- LI Angui, SHI Bingjin, ZHANG Wanqing, et al. Structural optimization of phase-change heat storage tank based on solar energy utilization[J]. Journal of Solar Energy, 2020, 41(2): 1-8.
- [20] 胡晶晶. 太阳能供热系统中蓄热水箱性能分析与优化[D]. 太原: 太原理工大学, 2019: 1.
- HU Jingjing. Performance analysis and optimization of heat storage tank in solar heating system[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2019: 1.
- [21] 胡晶晶, 杜震宇. 太阳能供暖系统用即热式蓄热水箱热工性能的试验研究[J]. 太原理工大学学报, 2019, 50(4): 510-516.
- HU Jingjing, DU Zhenyu. Experimental study on thermal performance of instant heat storage tank for solar heating system[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2019, 50(4): 510-516.
- [22] 王智平, 陈丹丹, 王克振, 等. 太阳能储热水箱温度分层的研究现状及发展趋势[J]. 材料导报, 2013, 27(15): 70-73.
- WANG Zhiping, CHEN Dandan, WANG Kezhen, et al. Research status and development trend of temperature stratification in solar thermal storage tank[J]. Materials Guide, 2013, 27(15): 70-73.
- [23] 殷奕泽, 殷明, 殷勇. 农户太阳能跨季节蓄热供暖系统: CN212299163U[P]. 2021-01-05[2022-10-16].
- YIN Yize, YIN Ming, YIN Yong. Farmers' cross seasonal solar heat storage heating system: CN212299163U[P]. 2021-01-05[2022-10-16].
- [24] 姜培朋, 王思合, 杨瑛, 等. 一种用于居民供热的太阳能蓄热采暖系统: CN208983460U[P]. 2019-06-14[2022-10-16].
- JIANG Peipeng, WANG Sihe, YANG Tian, et al. A solar energy thermal storage heating system for residential heating: CN208983460U[P]. 2019-06-14[2022-10-16].
- [25] KURSUN, BURAK. Thermal stratification enhancement in cylindrical and rectangular hot water tank with truncated cone and pyramid shaped insulation geometry[J]. Solar Energy, 2018, 169(7): 512-525.

(责任编辑 邓玲惠)