

不同进水方式对大型水体储热效率的影响

黄凯良,杨倩,冯国会,谢幸丽,李艾浓

(沈阳建筑大学市政与环境工程学院,辽宁沈阳110168)

摘要 针对大型水体跨季节储热时间不匹配问题,分析不同进水方式对储热效率的影响,减少储热过程中的热量损失。**方法** 利用CFD数值模拟软件建立水体储热的分析模型,研究水体储热过程中的热交换规律,以及单双进水口、水平间距、动态进水、流速等因素对水体储热效果的影响。**结果** 进水总流量越小,内部水体温度分层越好;在相同的储热时间内,双进水口方式效率最佳,水体内部平均温度至少比单一进水和动态进水高出16.83%,储热效率分别提高了9.89%和16.14%;相比单一进水口,双进水口方式焓损失降低了21.97%;进水管之间距离越小,水体储热效率越高。**结论** 进水方式对水体储热效率影响至关重要,进水管越靠近中轴线,采用小流量、双开口的进水形式储热效率越好。

关键词 跨季节储热;储热效率;焓损失;进水方式;温度分层;热交换

中图分类号 TU833+.1

文献标志码 A

引用格式:黄凯良,杨倩,冯国会,等.不同进水方式对大型水体储热效率的影响[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2024,40(4):706-713.(HUANG Kailiang, YANG Qian, FENG Guohui, et al. The influence of different inlet methods on the heat storage efficiency of large water bodies[J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2024, 40(4): 706-713.)

The Influence of Different Inlet Methods on the Heat Storage Efficiency of Large Water Bodies

HUANG Kailiang, YANG Qian, FENG Guohui, XIE Xingli, LI Ainong

(School of Municipal and Environmental Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: Regarding the problem of mismatched cross seasonal heat storage time in large water bodies, in this paper the impact of different inflow methods on heat storage efficiency was analyzed to reduce the heat loss during the heat storage process. An model for water thermal storage analysis was established by CFD numerical simulation software. The heat exchange law during water thermal storage process was analyzed, and the influencing factors such as single and double inlet, horizontal spacing, dynamic inflow, and flow velocity on water thermal storage efficiency were discussed. The research results showed that the smaller the total inflow rate, the better the

收稿日期:2023-09-25

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFC3802404);辽宁省“兴辽英才计划”项目(XLYC2203184)

作者简介:黄凯良(1985—),男,教授,博士,主要从事跨季节储热、相变储能等方面研究。

temperature stratification inside the water body. Within the same heat storage time, the heat storage efficiency with the dual inlet method had better than that of single inlet and dynamic inlet, and the average temperature inside the water body high at least 16.83%, and the heat storage efficiency being increased by 9.89% and 16.14% respectively. Compared to the single inlet, the exergy loss with the double inlet method was reduced by 21.97%. And the smaller the distance between the inlet pipes, the higher the heat storage efficiency of the water body. So the water inlet method has a crucial impact on the thermal storage efficiency of water bodies. The closer the inlet pipeline is to the central axis, the better the thermal storage efficiency can be achieved by using a small flow rate and double inlet form.

Key words: cross seasonal heat storage; heat storage efficiency; exergy loss; water inlet method; temperature stratification; heat exchange

我国拥有丰富的火电余热、工业余热以及未来新兴产业的余热,集中供热管网的覆盖率又非常高,如何将这此低品位余热转化为零碳清洁供热能源是实现供热“双碳”目标的一个有效途径。工业余热等主要受生产时间影响,与供热时间无关^[1-4],因此利用余热供热存在地理位置、温度和时间三个供需不匹配问题。储热技术是解决这一问题的有效方法,储热技术分为短期储热和长期储热,短期储热仅可以满足60%的供热需求,长期储热即季节性储热,该技术几乎可以满足100%的供热需求,但经济成本相对较高^[5]。跨季节水体储热是指利用水体在不同季节储存和释放热量的方法,从而达到“夏储冬用”的效果,该储热方式可以平衡季节性的能源供需差异,提高能源利用效率,降低成本,减少对环境影响^[6]。1959年美国学者首次提出了跨季节储热概念,利用太阳能集热器与埋地管进行储热^[7];随后,瑞典研究人员发明了一项利用埋地水池进行跨季节储热技术以满足冬季热水供应需求^[8-9]。国内对于跨季节储热技术研究起步相对较晚,1984年,马文麒等^[10]通过研究发现太阳池及地下土壤具有跨季节长期储热的能力。C. Chang^[11]和J. Fan等^[12]建立水体储热数学模型,为长期预测水坑储热温度的变化奠定基础。罗艳^[13]和C. W. J. V. Koppen等^[14]对储热池中温度分层与供暖热性能的关系进

行研究,结果表明增大温度分层会提高系统的热性能。基于此,为更好地解决跨季节水体储热技术的适用性,笔者分析不同进水方式对水体温度分层以及储热效率的影响,通过探讨不同流量、单双进水口、动态进水、以及进水管位置对储热效率的影响,旨在降低冷热水混合后的能量损失,为提高大型蓄热工程的存储效率提供了一条解决途径。

1 大型水体储热模型

1.1 物理模型

跨季节储热系统如图1所示。为避免热量损失,水体上方采用“三明治”夹芯结构,上下两层采用高密度聚乙烯片材,中间层为橡胶绝缘泡沫,以达到保温隔热的效果。考虑经济性与稳定性等因素,水体形状一般采用倒截顶式金字塔形^[9]。

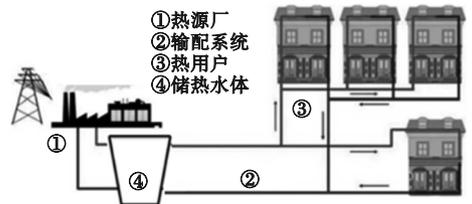


图1 跨季节储热水体系统图

Fig. 1 Cross seasonal thermal storage water system diagram

利用 FLUENT 软件建立水体储热的数值分析模型,水体构造及参数如图2(a)所示。为监测水体的温度分布情况,在水体内

部的中轴线上每隔 0.12 m 设置 1 个监测点^[15], 监测点布置如图 2(b) 所示。

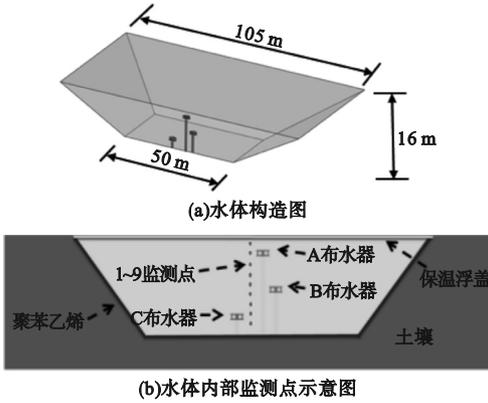


图 2 水体构造以及监测点布置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of water tank structure and monitoring point set

利用水体进行蓄热时, 由于冷热水之间密度差异, 冷热水掺混会造成水体扰动, 进而导致能量损失, 这种情况造成的热损失远大于热传导。为了解决这一问题, 参考丹表现有的工程, 在进出水口处增加了布水器^[15], 布水器结构形式及参数设置如图 3 所示。该布水器在热存储过程中能够更好地形成温度分层, 减少流动扰动的发生, 从而有效降低由动量引起的热损失。

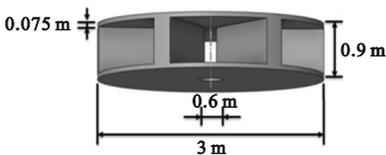


图 3 布水器结构图

Fig. 3 Diagram of water distributor structure

1.2 控制方程

建立基于连续性、动量和能量守恒方程的瞬态三维 CFD 模型, 模拟分析由热损失引起的浮力驱动对流对温度分层的影响。为了节约计算成本, 对模型做出以下简化:

- ① 流体是不可压缩的;
- ② 基于 Boussinesq 假设, 水的物性参数除密度随温度变化, 其余恒定;
- ③ 忽略黏性耗散;

④ 忽略水体在管道内部流动损失以及扩散器、管道的支撑作用。

针对水体内部流动换热情况, 列出系统的控制方程。

连续性方程:

$$\nabla \times \mathbf{u} = 0. \quad (1)$$

动量方程:

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial \tau} + (\rho \mathbf{u} \times \nabla) = -\nabla p + \nabla \times \boldsymbol{\tau} -$$

$$\rho \beta (T - T_{\text{ref}}) \mathbf{g}. \quad (2)$$

能量方程:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial \tau} + \rho C_p \mathbf{u} \times \nabla T = \nabla \times (\lambda \times \nabla T). \quad (3)$$

式中: \mathbf{u} 为速度矢量, m/s; ρ 为密度, kg/m³; ∇ 为散度运算符, m⁻¹; p 为压力, Pa; β 为体积膨胀系数, K⁻¹; T_{ref} 为参考温度, K; C_p 为比热容, J/(kg·K); $\boldsymbol{\tau}$ 为时间, s; λ 为热导率, W/(m·K)。

1.3 评价指标

在分析储热效率时, 常用焓损失、储热效率等指标评价水体的热容量, 用 MIX 数、分层数来评价水体分层效果。

1.3.1 MIX 数

依据监测点的位置将储热水体划分为 9 个离散层。MIX 数是用比较存储系统来识别完全混合或者完全分层, 以存储系统的温度分布来评估存储分层, 进行无量纲处理后得到 MIX 数, 值为 0~1, 分别代表完全分层至完全混合状态。根据能量矩可计算出 MIX 数:

$$M_i = \rho_i C_{p,i} V_i T_i Y_i. \quad (4)$$

$$M = \sum_{i=1}^n M_i. \quad (5)$$

$$K_{\text{mix}} = \frac{M_{\text{str}} - M}{M_{\text{str}} - M_{\text{min}}}. \quad (6)$$

式中: ρ_i 为温度为 T_i 时水的密度, kg/m³, i 取值为 1, 2, ..., 9; $C_{p,i}$ 为温度为 T_i 时水的比热, J/(kg·K); V_i 为第 i 层水的体积, m³; Y_i 为水体底部距第 i 层水体的垂直距离, m; $n = 9$;

M_{str} 为水体完全分层的能量矩, $J \cdot m$; M_{min} 为水体完全混合的能量矩, $J \cdot m$ 。

1.3.2 分层数

分层数用来表征水体温度与平均水温的偏离程度, 分层数越小, 表明水体混合越严重, 热量损失越大, 计算公式:

$$K_{St} = \sum_{i=1}^n \frac{m_i (T_i - T_{avg})^2}{m_{total}} \quad (7)$$

式中: T_{avg} 为水体的平均温度, $^{\circ}C$; m_{total} 为水体的总质量, kg 。

1.3.3 焓损失

与第一定律相比, 焓分析同时考虑了能量的数量和品质。由于水体在换热过程中存在温差, 导致高温时释放的焓值较大、低温时吸收的焓值较小, 从而产生不可逆的焓损失。这种焓损失是冷热混合、热传导和扩散综合作用的结果^[16], 因此, 在对水体储热进行评价时, 通常采用焓分析方法, 焓损失的计算公式:

$$E_x = \Delta H - T_0 \Delta S \quad (8)$$

$$\Delta H = m C_p (T - T_0) \quad (9)$$

$$\Delta S = m C_p \ln(T/T_0) \quad (10)$$

式中: ΔH 为焓值的变化量, kJ/kg ; ΔS 为熵值的变化量, $kJ/(kg \cdot K)$; T_0 为水体初始温度值, K 。

1.3.4 储热效率

储热效率指蓄热水体系统的有用能与进入系统的总能量的比值。

1.4 边界条件

储热介质为水, 进水口流速设为管口初始流速, 水温为 $90^{\circ}C$; 出水口设为自由流出。为减少热量损失, 在水体周围设置厚 40 mm 的聚苯乙烯板作为保温层。考虑水体内部为三维非稳态湍流流动状态, 选择 Standard $k-\varepsilon$ 模型模拟; 基于压力-速度耦合算法求解方法, 采用 SIMPLEC 算法; 动量、湍流动能、湍流耗散率均采用一阶迎风格式。

由于跨季节储热时间较长、水体体量较大, 对整个系统进行试验研究比较困难, 基于

经济性与时间成本, 采用相似原理建立模型, 进行数值模拟。相似准则要求, 两现象相似必须满足几何相似、运动相似、动力相似、热力学相似以及质量相似, 在几何相似的前提下, 可推出 Re 、 Pr 、 Fo 、 Bi 、 Nu 等准则数对应相等^[17]。比例因子取 15, 缩小后的水体上下表面边长分别为 7 m 和 3.3 m , 高度为 1.1 m , 侧壁面倾斜角度依旧为 30° 。采用正态相似模型对大型水体温度预测时, 需要满足如下温差换算关系^[18]:

$$\Delta T_m T_m = \Delta T_p T_p \quad (11)$$

式中: ΔT_m 为模型上下表面温差, $^{\circ}C$; ΔT_p 为原型上下表面温差, $^{\circ}C$ 。

1.5 工况设置

进出水口位置与布置方式在大规模水体储热技术中起到关键作用, 因此, 设置了两个进水口 A 和 B, 以及一个出水口 C。为了探讨进水口 A、B 的开启时间对储热过程的影响, 选取了储热过程的初期和中期两个时间点。根据水管管径与流速推荐表, 选取了两组不同流速用以分析流速对储热效率和温度分层的影响。综合以上因素, 分析不同的进水方式, 探讨单双进水口、水平间距、动态进水、以及流速等因素对水体储热效果的影响, 设置七种工况进行对比分析(见表 1)。

表 1 模拟条件工况表

Table 1 Simulated condition information

工况	进水方式		进水口间距/mm	入口流量/ ($m^3 \cdot \text{min}^{-1}$)
	进水口 A	进水口 B		
一	打开	关闭	200	108
二	打开	关闭	200	216
三	仅前 2.5 h 打开	A 关闭 后打开	200	108
	仅前 8.5 h 打开	A 关闭 后打开		
四	打开	打开	200	108
五	打开	打开	200	54
六	打开	打开	1 640	54
七	打开	打开	3 532	54

所有工况中, 进水口 A 的垂直高度为整体高度的 9/11, 进水口 B 的垂直高度为整体

高度的5/11,而出水口C距离地面的高度为整体高度的2/11。

2 结果与分析

2.1 进水流量对水体储热的影响

图4为不同进水流量的焓损失和MIX数的对比分析。工况一由于流量小,因此流速较低,导致混合过程更加温和,热量损失小于流量较大的工况二,工况一的MIX数小表明温度水体内部分层效果更好。综合考虑热量损失与水体分层效果,在储热设计过程中,优先选取流速较小的工况。

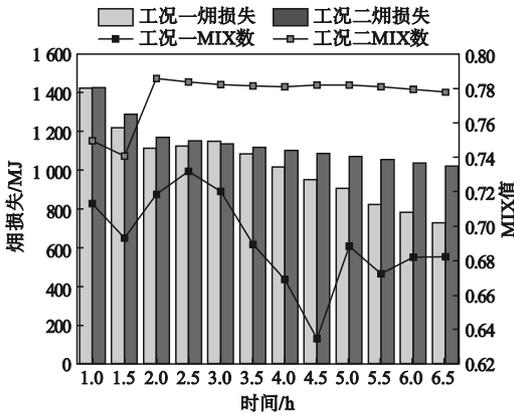


图4 不同流量下焓损失与MIX数的对比

Fig. 4 Comparison of heat loss and MIX number under different inlet flow

2.2 进水口匹配方式对水体储热的影响

在相同流量和时间条件下,进水口A预热冷水所需的时间对储热效果的影响如图5

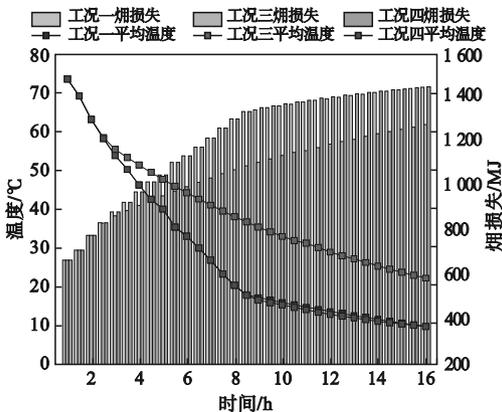


图5 不同预热时间对水体温度和焓损失的影响

Fig. 5 The influence of different preheating times on water temperature and heat loss

所示。工况一的水体内部平均温度大于工况四,而工况四又大于工况三。在焓损失方面,工况四和工况一之间的差别不大,工况四的热损失最小,由此可以得知,进水口开启时间越久,水体内部热损失越少,储热效果越好。

图6为不同工况下水体内部平均温度随时间的变化情况。模拟数据对比分析表明,在相同时间内,相较工况一与工况三,工况五的整体温度较高。可以观察到采用双进水口的方式,水体内部平均温度最高,而采用动态进水的切换机制,系统的温度最低,但是其温度上升速率最快。在工况五中,在流量不变的情况下同时打开两个进水口,由于低流速延长了冷热水的接触时间,有助于减少湍流,从而加速整个水体温度的提升,这使得水体温度分布更加均匀,同时流速减小降低了水体的掺混,进而减少了水体的能量损失。

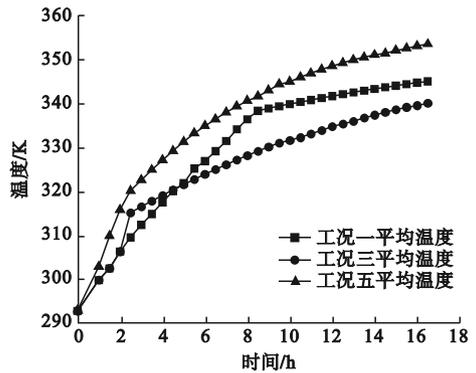


图6 三种工况水体内部平均温度图

Fig. 6 Average temperature inside water bodies under three working conditions

图7为三种工况的MIX数对比情况。工况五的MIX数最大,其次是工况一和工况三,表明工况五的分层效果不明显。初始状态下,三种工况的MIX数均在1附近,这是因为在20℃初始状态下,水体内部处于完全混合状态,热水进入后,水体逐渐形成温度分层,导致MIX数急速下降。随着热水注入过程进行,MIX数呈现上升的趋势,最终出现局部震荡。

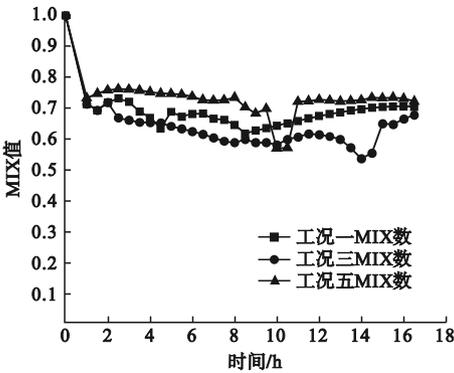


图7 三种工况水体 MIX 数

Fig. 7 MIX number of water bodies under three working conditions

图8为三种不同工况的分层数计算结果。工况五的分层系数小于工况一和工况三,表明工况五水体内部温度偏差程度最小,水体在垂直方向上的分层现象不够明显或者几乎没有分层现象,这与 MIX 数的分析结果一致。

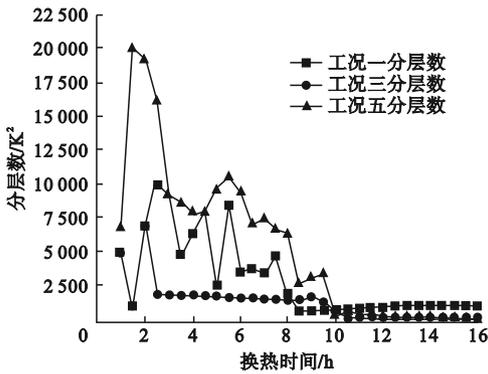


图8 三种工况水体分层数

Fig. 8 Stratification coefficients of water bodies under three working conditions

图9为不同工况下水体平均温度与焓损失的对比。工况五的焓损失最小,其次是工况一,工况三的焓损失最大。通过计算得出工况一、三、五在水体储热过程中焓损失分别为 715 852 kJ、961 156kJ、558 559 kJ,工况五的焓损失分别比工况一、三低 21.97%、41.89%,工况一的焓损失比工况三少 25.52%。由此看出,在相同流量和进水口距离的前提下,采用双进水口的进水方式储热效果最佳。

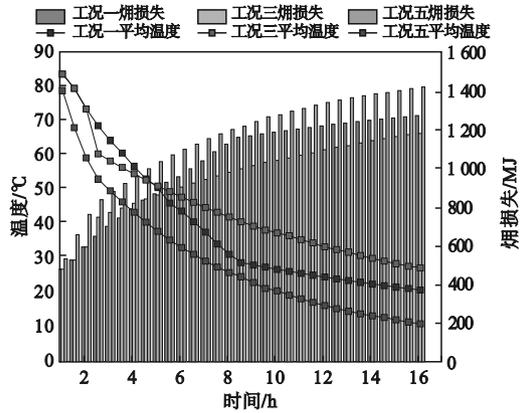


图9 三种工况水体温度与焓损失

Fig. 9 Water temperature and energy loss under three working conditions

2.3 进水口之间距离对水体储热的影响

图10为在同时打开状态下进水口 A、B 的距离对储热效果的影响。从三种工况焓损失的对比分析可知,工况五的焓损失最小,工况七的焓损失最大,这是因为工况五进水口位置靠近中轴线,热量优先传给水体,而工况七进水管位置距离中轴线远,部分热量会传递给土壤,造成热量损失,所以相同情况下,工况五水体内部温度最高。

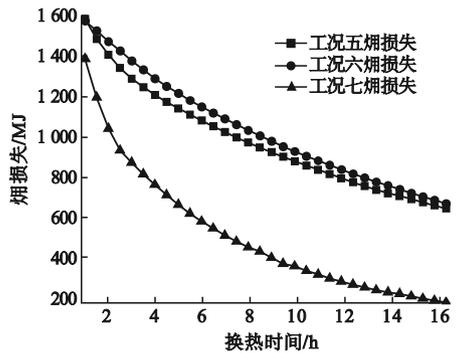


图10 工况五、六、七的焓损失

Fig. 10 Energy loss under working condition 5, 6 and 7

储热效率直接影响能源的利用率和运行成本。表2为总流量相同的情况下六种工况的储热效率,可以看出工况五的储热效率最高,即热损失最小,采用双进水口的方式储热效率比单一进水方式提高 10.98%,比动态进水方式提高 19.24%。

表2 各工况的储热效率

Table 2 Energy storage efficiency under all working conditions %

工况	储热效率	工况	储热效率
一	80.85	五	89.73
三	75.25	六	66.40
四	80.93	七	65.97

2.4 水体换热规律分析

图11分别为水体在蓄热5 min、15 min、30 min时的温度云图。当注入热水时,冷水和热水发生混合,此时系统内部温度梯度最大,冷热掺混严重,导致储热效率下降。通过

在进出口设置布水器,有效减少流体的紊乱程度,从而降低斜温层的厚度,有助于能量损失最小化,提高储热效率。由于浮力的作用,冷热水掺混时,密度小的热水会向上流动,密度大的冷水向下流动,刚开始水体顶部温度小于入口处水温,还没有形成明显的热水区-过渡区-冷水区,随着换热时间的推移,逐渐形成稳定的温度分层或斜温层,从而使水体顶部温度最高、底部最低。通过30 min温度云图分析可见,随着换热进行,水体内部形成涡流,出现“温度死区”,产生换热不均匀现象,从而影响换热效果。

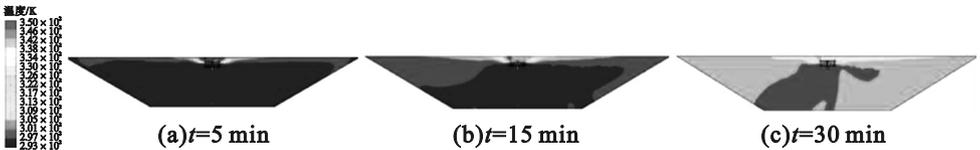


图11 不同时刻温度云图

Fig. 11 Temperature cloud maps at different time points

图12为中轴线上不同换热时刻等温线云图。由图12可知,同一时刻,水体的上下

温度较高,中间温度偏低,进一步验证了水体中心处存在涡流,造成换热不均匀现象发生。

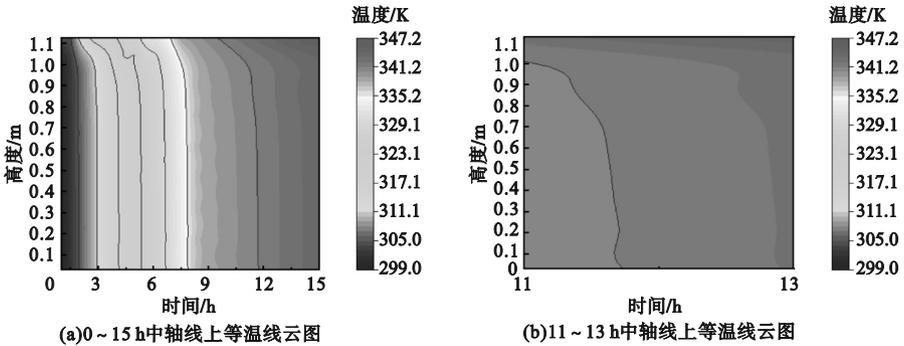


图12 水体内中轴线上等温线云图

Fig. 12 Isotherms cloud map along the central axis of a water body

3 结论

(1) 双开口的进水方式在流量和换热时间一定的情况下,能够使水体内部的平均温度达到最高,至少比单进水口和动态进水方式高出16.83%,同时焓损失最小;具体工况方面,工况五的焓损失比工况三少41.89%,比工况一少21.97%,工况一比工况三焓损失少25.52%;双开口进水方式比单进水和

动态进水方式的焓损失更小。

(2) 相同情况下,采用单一进水的方式储热效率为80.85%;交替进水策略储热效率最低,为75.25%;而同时打开两个进水口的储热效率最优为89.73%,双开口进水方式具有更高的储热效率。

(3) 保持总流量和进水方式不变,采用双进水口的方式,两进水管间距越小,水体的储热效率越大。

参考文献

- [1] 郭璞维,彭跃,邓靖敏,等. 烟气余热回收与储能技术耦合应用的可行性研究[J]. 华电技术,2021,43(9):62-68.
(GUO Puwei, PENG Yue, DENG Jingmin, et al. Feasibility study on the coupling application of flue gas waste heat recovery and energy storage technology [J]. *Huadian technology*, 2021, 43(9):62-68.)
- [2] 国家发展和改革委员会. 北方地区冬季清洁取暖规划(2017-2021年)[R]. [s.l.]:[s.n.],2017.
(National Development and Reform Commission. Winter Clean Heating Plan for the Northern Region(2017-2021)[R]. [s.l.]:[s.n.], 2017.)
- [3] 清华大学建筑节能研究中心. 中国建筑节能年度发展研究报告2022(公共建筑专题)[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2022.
(Building Energy Conservation Research Center, Tsinghua University. Research center annual development research report on building energy efficiency in China 2022: Special Topic on Public Buildings [M]. Beijing: China Construction Industry Press, 2022.)
- [4] 江亿. 发展热泵技术是实现零碳能源的关键途径[J]. 中国电力企业管理,2021(34):12-15.
(JIANG Yi. Developing heat pump technology is a key way to achieve zero carbon energy [J]. *China power enterprise management*, 2021(34):12-15.)
- [5] NOVO A V, BAYON J R, CASTRO-FRESNO D, et al. Review of seasonal heat storage in large basins; water tanks and gravel-water pits [J]. *Applied energy*, 2010, 87(2):390-397.
- [6] ZHANG Y, ZHOU G, LIN K, et al. Application of latent heat thermal energy storage in buildings: State-of-the-art and outlook [J]. *Building and environment*, 2007, 42(6):2197-2209.
- [7] HESARAKI A, HOLMBERG S, HAGHIGHAT F. Seasonal thermal energy storage with heat pumps and low temperatures in building projects—A comparative review [J]. *Renewable & sustainable energy reviews*, 2015, 43:1199-1213.
- [8] FURBO S, PERERS B. Yearly thermal performances of solar heating plants in Denmark—measured and calculated [J]. *Solar energy*, 2018, 159:186-196.
- [9] DAHASH A, OCHS F, JANETTI M B, et al. Advances in seasonal thermal energy storage for solar district heating applications; a critical review on large-scale hot-water tank and pit thermal energy storage systems [J]. *Applied energy*, 2019, 239(C):296-315.
- [10] 马文麒,李申生. 太阳池和池下土壤的跨季度蓄热[J]. 太阳能学报,1984,5(4):358-367.
(MA Wenqi, LI Shensheng. Seasonal heat storage of the solar pond and the ground underneath [J]. *Acta energiae solaris sinica*, 1984, 5(4):358-367.)
- [11] CHANG C, WU Z, NAVARRO H, et al. Comparative study of the transient natural convection in an underground water pit thermal storage [J]. *Applied energy*, 2017, 208:1162-1173.
- [12] FAN J, HUANG J, CHATZIDIAKOS A, et al. Experimental and theoretic investigations of thermal behavior of a seasonal water pit heat storage [C]//ISES solar world conference 2017 and the IEA SHC solar heating and cooling conference for buildings and industry 2017, [s.l.]:[s.n.], 2017.
- [13] 罗艳,汤金华. 蓄热水箱温度分层模型与分析[J]. 节能,2008,27(12):15-18.
(LUO Yan, TANG Jinhua. Thermal tank temperature stratification mode and analysis [J]. *Energy conservation*, 2008, 27(12):15-18.)
- [14] KOPPEN C W J V, THOMAS J P S, VELTKAMP W R. Actual benefits of thermally stratified storage in a small and a medium size solar system [J]. Pergamon press, 1979(1):576-580.
- [15] SIFNAIOS I, JENSEN A R, FURBO S, et al. Performance comparison of two water pit thermal energy storage (PTES) systems using energy, exergy, and stratification indicators [J]. *Journal of energy storage*, 2022(52):104947.
- [16] WANG Z, XIONG W, TING S K, et al. Conventional and advanced exergy analyses of an underwater compressed air energy storage system [J]. *Applied energy*, 2016, 180:810-822.
- [17] ABBAS Z, CHEN D, LI Y, et al. Experimental investigation of underground seasonal cold energy storage using borehole heat exchangers based on laboratory scale sandbox [J]. *Geothermics*, 2020, 87:101837.
- [18] 柳海涛,孙双科,王晓松,等. 大型深水库分层取水水温模型试验研究[J]. 水力发电学报, 2012, 31(1):129-134.
(LIU Haitao, SUN Shuangke, WANG Xiaosong, et al. Water temperature model test for a multi-level power intake of large deep reservoir [J]. *Journal of hydroelectric engineering*, 2012, 31(1):129-134.)
- (责任编辑:王国业 英文审校:唐玉兰)