

固体蓄热器蓄热过程分析与优化研究

徐耀祖¹, 商向东¹, 徐景久², 刘轶菡³

(1. 沈阳工业大学 机械工程学院, 辽宁 沈阳 110870; 2. 沈阳华维工程技术有限公司, 辽宁 沈阳 110168;
3. 沈阳理工大学 工程实践中心, 辽宁 沈阳 110159)

摘要: 固体蓄热器无论作为热电联产机组(CHP)的配置系统还是作为清洁电力的消纳系统都起到一定的“削峰填谷”作用。为了提高固体蓄热器的蓄热效率及蓄热容量,首先对工程常用蓄热体结构的蓄热过程提出了一种热物理参数非定值分析方法,并通过实验验证了该数值分析方法的可靠性。对现有蓄热体结构提出截面和功率分布的优化方式,通过建立数值分析方法对优化前后蓄热体结构进行蓄热性能比较,得出截面优化方式和功率分布优化方式在10 h时刻的最高温度分别降低了3.6%和4.0%,在600℃目标温度下的蓄热容量分别提高了5.0%和6.5%。结合截面优化和功率分布优化的特点进而提出复合优化方式,该优化方式具有横、纵两个方向的优化效果,与无优化结构的蓄热体相比,在10 h时刻的最高温度降低率和600℃目标温度下的蓄热容量提高率分别为7.2%和11.0%。

关键词: 固体蓄热器;蓄热体;截面优化;功率分布优化;复合型优化

中图分类号:TK513.5 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlge.2022.01.020

[引用本文格式]徐耀祖,商向东,徐景久,等. 固体蓄热器蓄热过程分析与优化研究[J]. 热能动力工程,2022,37(1):150-156. XU Yao-zu, SHANG Xiang-dong, XU Jing-jiu, et al. Study on heat storage process analysis and optimization of solid heat accumulator [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(1): 150-156.

Study on Heat Storage Process Analysis and Optimization of Solid Heat Accumulator

XU Yao-zu¹, SHANG Xiang-dong¹, XU Jing-jiu², LIU Yi-han³

(1. School of Mechanical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang, China, Post Code: 110870;
2. Shenyang Huawei Engineering Technology Co., Ltd., Shenyang, China, Post Code: 110168;
3. Engineering Practice Center, Shenyang Ligong University, Shenyang, China, Post Code: 110159)

Abstract: Solid heat accumulator plays a certain role of peak load shifting, whether it is used as the configuration system of combined heat and power (CHP) unit or as the consumption system of clean electricity. In order to improve the heat storage efficiency and capacity of solid heat accumulator, an unsteady value analysis method of thermophysical parameters is proposed firstly for heat storage process of heat accumulator structure commonly used in engineering, and the reliability of the numerical analysis method is verified by experiments. The optimization method of section and power distributions for existing regenerator structure is put forward. By establishing numerical analysis method, the heat storage performances of regenerator structure before and after optimization are compared. The results show that the maximum temperatures of section optimization method and power distribution optimization method are reduced by 3.6% and 4.0% respectively at 10 h, and the heat storage capacities of those are increased by 5.0% and 6.5% respectively at the target temperature of 600℃. Combined with the characteristics of section optimization and power distribution optimization, a compound optimization method is proposed furtherly,

which has the optimization effects in both horizontal and vertical directions. Compared with the regenerator without optimization structure, the maximum temperature reduction rate at 10 h and the heat storage capacity improvement rate at target temperature of 600 ℃ are 7.2% and 11.0% respectively.

Key words: solid heat accumulator, regenerator, section optimization, power distribution optimization, compound optimization

引言

固体蓄热器以电力作为输入,热能作为输出,通过电热转换形成一套热能储存、热能释放的、循环机制^[1-3]。蓄热体作为固体蓄热器的能量存储介质,其蓄热材料和结构决定着蓄热容量和蓄热终止时刻温度分布的均匀度^[4-6]。MgO 粉末挤压烧结的 MgO 砖是目前热导率、耐高温性及热膨胀性等综合热物理性能较高的储热介质^[7-9]。针对蓄热体结构的研究中,邢作霞等人^[10]通过改变蓄热体整体孔隙率及单双通道结构参数得到综合性能良好的定参数化蓄热体尺寸。胡思科等人^[11]以蓄热体作为整体结构,采用数值模拟方法比较了不同数量的圆形和方形蓄热孔对蓄、放热过程的影响,得到蓄热孔蓄热量与达到目标蓄热时间成反比的结论。

目前,对蓄热体结构的研究多侧重于改变整体形状和蓄热孔数量方面,而针对工程常用蓄热体结构的优化研究甚少。本文首先对现有蓄热体结构建立数值分析模型,并进行实验验证;从蓄热体结构和蓄热功率的角度出发,分别对现有蓄热体提出蓄热孔截面结构优化和加热元件功率分布优化;结合两种优化形式及优化结果,提出一种复合型蓄热的优化方法,并将蓄热容量、温差缩小率及最高温度降低率等参数指标与现有蓄热体结构进行比较分析。

1 数值模拟与实验验证

1.1 蓄热体结构及物理模型

工程实际应用的 MgO 砖及蓄热体结构如图 1 所示。采用夹层蓄热式布置,夹层与蓄热层交错排列,保证蓄热体结构受热稳定性,夹层中间采用 MgO 砖间隔出放置电加热丝的蓄热孔。

在对物理模型边界条件的处理中,以直接作用到蓄热孔四周壁面的热传导代替蓄热过程中加热元

件的热辐射过程,蓄热体内 MgO 砖之间的面接触热阻忽略不计,蓄热体外壁面做绝热处理,热物性做非定值参数处理,最终得到的物理模型如图 2 所示, $K_1 \sim K_4$ 为模拟温度监测点。

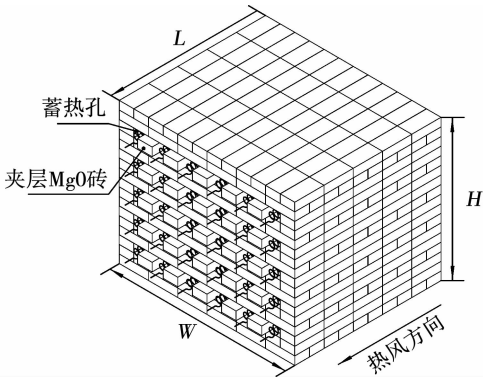


图 1 蓄热体结构模型
Fig. 1 Structural model of regenerator

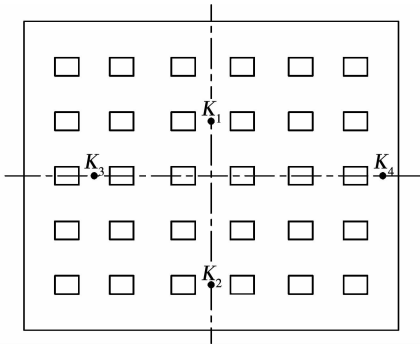


图 2 蓄热体物理模型
Fig. 2 Physical model of regenerator

1.2 数值模拟

采用 ANSYS Workbench 中的 Steady-State Thermal 及 Transient Thermal 模块进行热力学分析^[12]。首先,将 Solidworks 软件中建立的模型导入 ANSYS Workbench 流程图内,然后进行材料属性及热物理参数处理,根据 MgO 砖比热容、热导率与温度的关系,经二次函数拟合得到 MgO 砖比热容、热导率和温度的拟合公式为:

$$c = -9.86 \times 10^{-5} t^2 + 0.32 t + 952.30 \quad (1)$$
$$\lambda = 6.88 \times 10^{-6} t^2 - 0.018 t + 14.34 \quad (2)$$

式中： c —介质比热容， $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ ； t —介质温度， $^\circ\text{C}$ ； λ —介质导热系数， $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ 。

最终得到的数值模拟参数如表 1 所示。进行网格无关性验证和步长独立性验证，网格无关性验证结果如表 2 ~ 表 3 所示。从表中可以看出，网格节点数的增加对终态温度基本无影响，因此网格划分 1 的节点数满足本文的计算精度需求。从表中可以看出，时间步长的等比例缩小对终态温度影响不大，因此本文选取时间步长为 7.5 min。

表 1 非定值分析参数表

Tab. 1 List of unsteady value analysis parameters

参 数	数 值
密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	2 796
蓄热起始温度/ $^\circ\text{C}$	100
蓄热时间/min	300
蓄热功率/kW	60

表 2 网格无关性验证

Tab. 2 Grid independence verification

网格划分	节点数	终态最低温度/ $^\circ\text{C}$	终态最高温度/ $^\circ\text{C}$
1	115 427	233.43	430.98
2	230 401	233.40	430.89
3	460 539	233.36	430.86

表 3 步长独立性验证

Tab. 3 Step independence verification

步长	时间步长/min	终态最低温度/ $^\circ\text{C}$	终态最高温度/ $^\circ\text{C}$
1	7.5	233.43	430.98
2	5.0	233.41	431.03
3	3.0	233.38	431.10

1.3 实验验证

蓄热体实验模型如图 3 所示。加热元件为螺距 14 mm、直径 3.5 mm 的镍铬加热丝，采用 Y 型接法进行连接。保温层采用 150 mm 厚度的纤维棉做保温填充物，50 mm 厚度的硅酸棉板用于外部固定。为了保证对称结构蓄热体不同部位的温度验证，选取 K_1, K_2, K_3, K_4 四点作为温度探测点。温度传感器采用铠装型热电偶，量程 0 ~ 1 300 $^\circ\text{C}$ ，放置到砖体

内深度 50 mm 处，其他相关参数如表 4 所示。

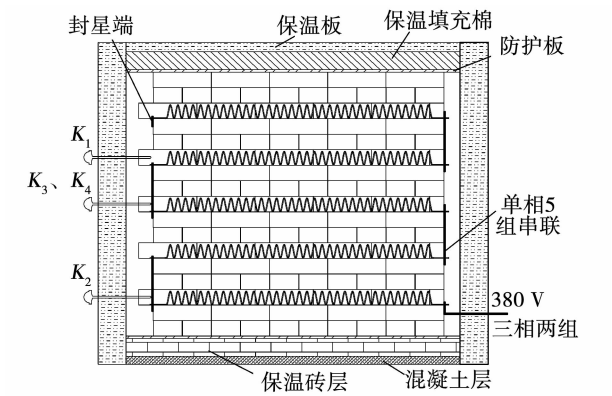


图 3 蓄热体实验模型

Fig. 3 Experimental model of regenerator

表 4 实验相关参数表

Tab. 4 List of experimental parameters

参 数	数 值
单相电阻/ Ω	4.85
电压值/V	230
单相电流/A	47.4
加热功率/kW	65.4
电阻丝表面负荷/ $\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$	3.83
蓄热起始温度/ $^\circ\text{C}$	45
蓄热终止温度/ $^\circ\text{C}$	600

根据表 4 中实际测量的数据，将蓄热功率设定为 65.4 kW，蓄热初始温度设定为 45 $^\circ\text{C}$ 。4 个选定温度探测点的比较结果如图 4 所示。

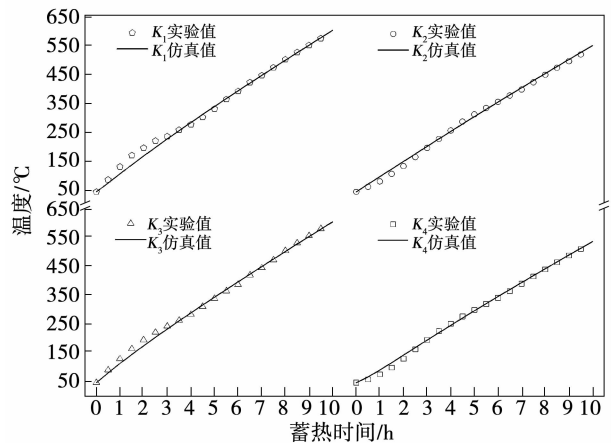


图 4 仿真与实验结果对比

Fig. 4 Comparison of simulation and experimental results

由图 4 中可知,非定值数值分析方法与实验测得的升温趋势是一致的,验证了非定值数值分析方法能够成为进一步研究的可靠依据。

2 蓄热体截面结构优化

由于蓄热体的砖型具有通用性,在不改变砖型的基础上改变蓄热体结构中孔的横向尺寸,分析其对蓄热性能的影响。蓄热孔变参数结构如图 5 所示。由于蓄热体为对称结构,因此可取 1/4 结构的蓄热孔横向尺寸进行参数化处理。根据蓄热孔热传导区域面积确定 a_1 、 a_2 、 a_3 尺寸为方形结构,对 a_2 、 a_3 、 b_2 、 b_3 和 c_2 、 c_3 进行等差参数赋值,得到 5 组参数值如表 5 所示。

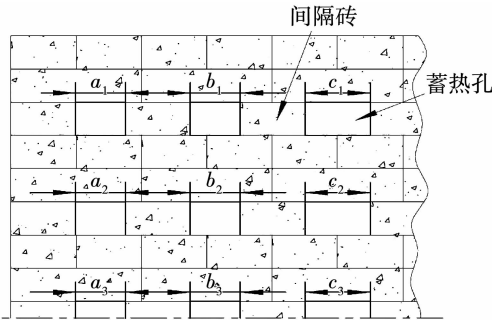


图 5 蓄热孔结构
Fig.5 Heat storage hole structure

表 5 变参数分析表

Tab.5 List of variable parameter analysis

参数	等截面	I	II	III	IV	V
b1	97	113	109	105	101	97
c1	97	113	117	121	125	129
b2	97	113	109	105	101	97
c2	97	113	117	121	125	129
b3	97	113	109	105	101	97
c3	97	113	117	121	125	129

根据表 5 的数据进行蓄热过程分析,蓄热体到达目标温度的相关参数如表 6 所示。截面优化后的蓄热容量高出等截面蓄热孔 5.0%,蓄热体到达 10 h 的蓄热最大温差为 214.54 ℃,相比等截面蓄热体温差缩小了 20.3%,最高蓄热温度降低了 3.6%。

选取综合表现最优的第Ⅲ组蓄热孔截面优化尺寸和无优化的蓄热体结构在蓄热 10 h 时的温度分

布云图进行比较,比较结果如图 6 所示。从图中可以看出,蓄热孔的截面优化对横向分布的温度改善较为明显,对纵向的温度分布影响较小。

表 6 变截面分析结果

Tab.6 Results of variable section analysis

参 数	等截面	I	II	III	IV	V
到达 600 ℃ 蓄热时长/h	8.33	8.67	8.75	8.75	8.75	8.75
温度偏差/℃	-1.42	-1.91	0.19	-1.88	-1.42	-0.51
到达 600 ℃ 蓄热容量/kW·h	500.0	520.0	525.0	525.0	525.0	525.0
蓄热 10 h 蓄热体最高温度/℃	686.53	666.39	664.08	661.82	662.14	663.11
蓄热 10 h 蓄热体最低温度/℃	471.99	488.54	489.36	490.15	490.94	491.76

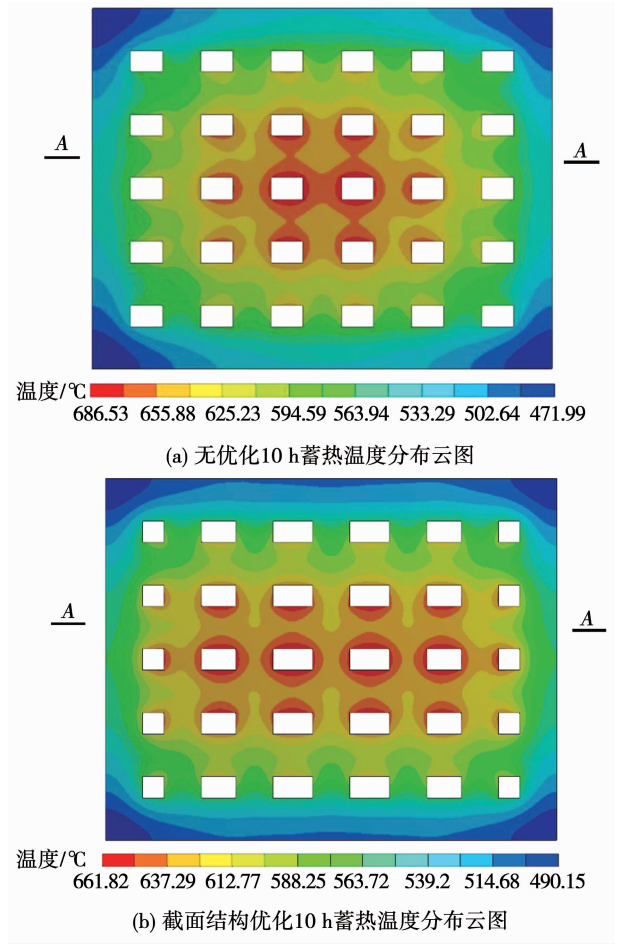


图 6 温度分布对比

Fig.6 Comparison of temperature distributions

图 7 为 A - A 截面的仿真温度分布曲线。从截

面温度分布可以看出,无优化的 $A-A$ 截面温度呈凸抛物分布,截面温度差值为 $54.76\text{ }^{\circ}\text{C}$;而截面优化后的 $A-A$ 截面温度呈波动性恒值分布,截面温度差值为 $25.17\text{ }^{\circ}\text{C}$,优化后的截面温度分布更均匀。

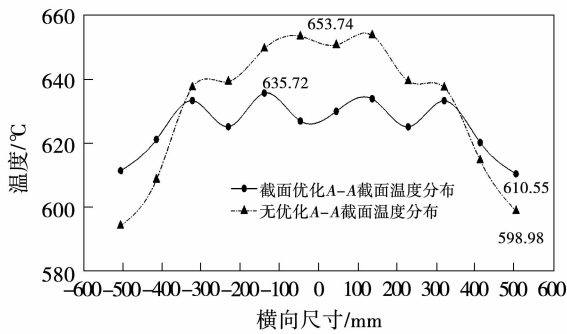


图 7 $A-A$ 截面温度对比

Fig. 7 Comparison of section $A-A$ temperatures

3 蓄热功率分布优化

蓄热功率优化分析模型如图 8 所示。从无优化蓄热体纵向温度分布看,在蓄热过程中 P_3 所在列及其对称列为最高温度分布区。考虑到蓄热功率优化为单方向性的优化方式,并结合工程中电阻丝的连接形式,决定将 P_1, P_4 及 P_7 所在行的各蓄热孔进行等功率赋值。根据模型的对称性设置 3 个加热功率变量,使用 Workbench 中的 Design Exploration 工具,采用梯度迭代法对蓄热功率进行参数化处理,最终计算结果如图 9 所示。

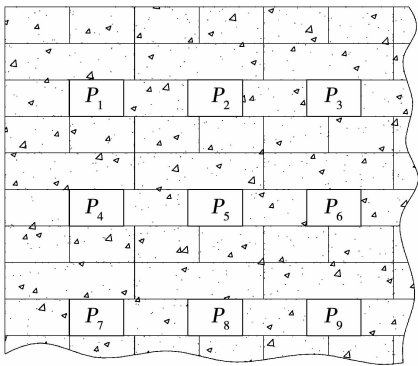


图 8 蓄热功率优化模型

Fig. 8 Optimization model of heat storage power

从图 9 中可以看出,在迭代至第 8 次时出现了蓄热温度极值,将该迭代次数下的蓄热性能参数与无优化结构蓄热性能参数进行对比,对比结果如表

7 所示。功率优化后的蓄热体达到目标温度的时长增加了 6.6% ,蓄热容量增加了 32.5 kWh ,蓄热体温差缩小了 18.7% ,最高蓄热温度降低了 4.0% 。

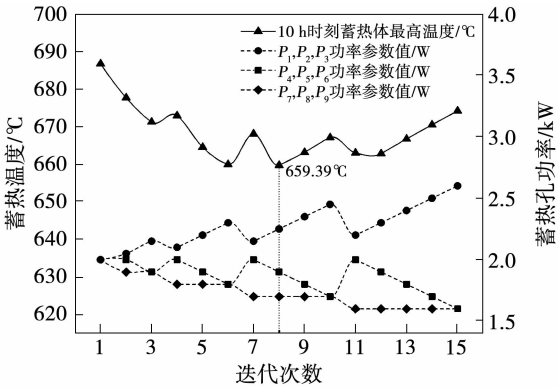


图 9 变功率迭代曲线

Fig. 9 Variable power iteration curves

表 7 蓄热体功率优化对比表

Tab. 7 Comparison table of regenerator power optimization

参 数	等功率	功率优化
到达 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 蓄热时长/h	8.33	8.88
温度偏差/ $^{\circ}\text{C}$	-1.42	1.93
到达 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 蓄热容量/ $\text{kW}\cdot\text{h}$	500.0	532.5
蓄热 10 h 蓄热体最高温度/ $^{\circ}\text{C}$	686.53	659.39
蓄热 10 h 蓄热体最低温度/ $^{\circ}\text{C}$	471.99	484.87

图 10 为功率优化后蓄热体结构在蓄热 10 h 时刻的温度分布云图。从图中可以看出,蓄热体功率优化后只对纵向的温度分布产生了影响,对横向温度分布影响较小。

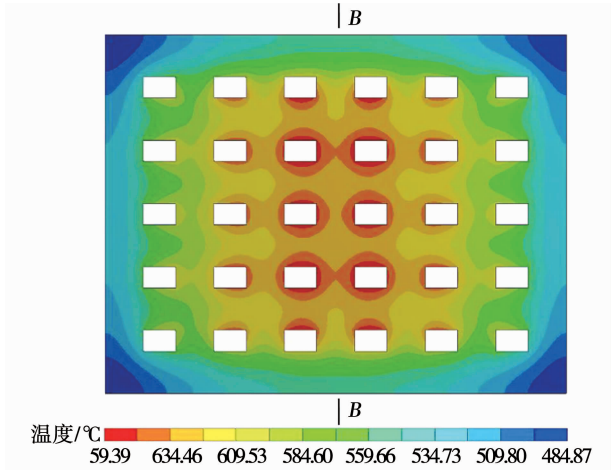


图 10 功率优化温度云图

Fig. 10 Temperature nephogram of power optimization

图 11 为 $B-B$ 截面的温度分布曲线。可以看出,功率优化后的纵向截面温度分布更均匀,无优化的截面温度差值为 $74.32\text{ }^{\circ}\text{C}$,优化后的温度差值为 $32.76\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

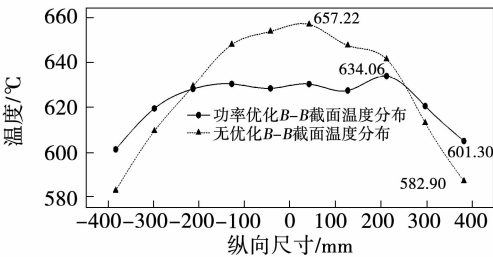


图 11 $B-B$ 截面温度对比

Fig. 11 Comparison of section $B-B$ temperatures

4 蓄热过程复合型优化

复合型优化是在结构优化的基础上进行功率优化,选取蓄热体截面优化中第Ⅲ组作为基础模型,采用梯度迭代方式对功率进行赋值优化,如图 12 为优化结果。经过 10 h 的蓄热过程后,进行变截面优化的蓄热体最高温度的最低值为 $661.82\text{ }^{\circ}\text{C}$,而复合优化的最低值为 $637.38\text{ }^{\circ}\text{C}$,优化率提升了 3.7% 。

图 12 和图 13 分别为复合优化后蓄热过程温度曲线及终止时刻的温度分布云图。从温度分布图可以看出,在终止时刻的温度分布较为均匀,横、纵方向均有改善。表 8 为 3 种优化方式与无优化结构蓄热体对比结果。可以看出,复合优化方式对蓄热体的蓄热容量、终止时刻的温差和温度分布等方面的性能均有提升。复合优化的加热方式能够在不改变蓄热体结构和提高功率的前提下,将蓄热容量增大 11.0% ,将蓄热终止时刻的最高温降低 7.2% ,在优化条件简化的同时达到了较好的优化效果。

表 8 复合优化结果比较

Tab. 8 Comparison of compound optimization results

优化方式	10 h 时刻最高温度降低率/%	600 $^{\circ}\text{C}$ 目标温度下蓄热容量增高率/%	600 $^{\circ}\text{C}$ 目标温度下温差缩小率/%
截面优化	3.6	5.0	20.3
功率优化	4.0	6.5	18.7
复合优化	7.2	11.0	37.8

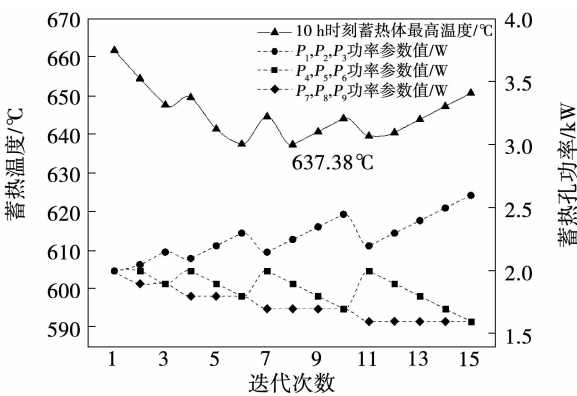


图 12 第Ⅲ组变截面蓄热体功率迭代曲线

Fig. 12 Power iterative curves of variable section regenerator in Group III

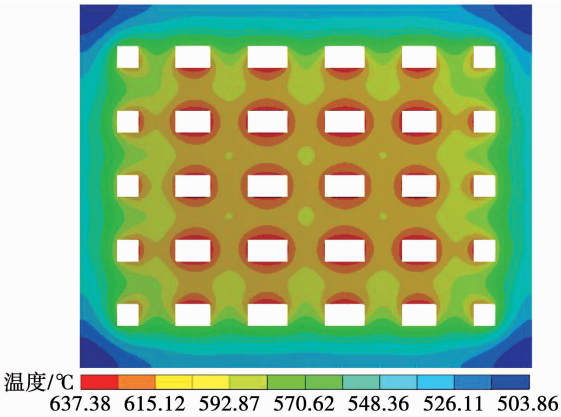


图 13 复合优化蓄热体温度分布

Fig. 13 Temperature distribution of regenerator of compound optimization

5 结 论

- (1) 对于工程常用蓄热体,在热物理参数非定值条件下,建立了一种数值模拟方法,并通过实验验证了该数值模拟方法的可靠性。
- (2) 对现有蓄热体结构提出截面和功率分布优化方式,通过建立的数值模拟方法分析,并与无优化结构的蓄热体相比较,得出两种优化方式在 10 h 时刻的最高温度降低率分别为 3.6% 和 5.0% , $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 目标温度下的蓄热容量提高率分别为 4.0% 和 6.5% 。
- (3) 提出一种结合截面和功率优化的复合优化方式,该优化方式具有横、纵两个方向的优化效果,

与无优化结构的蓄热体相比,在 10 h 时刻的最高温度降低 7.2% ,600 ℃ 目标温度下的蓄热容量提高 11.0% ,600 ℃ 目标温度下的温差缩小 37.8% 。

参考文献:

[1] 杨小平,杨晓西,丁 静,等. 太阳能高温热发电蓄热技术研究进展[J]. 热能动力工程,2011,26(1): 1-6,118.
YANG Xiao-ping, YANG Xiao-xi, DING Jing, et al. Research progress of solar thermal power generation and heat storage technology [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2011, 26(1): 1-6, 118.

[2] 王 艳,白凤武,王志峰. 高温空气在蜂窝陶瓷体内蓄热特性研究[J]. 工程热物理学报,2011,32(9): 1541-1544.
WANG Yan, BAI Feng-wu, WANG Zhi-feng. Study on thermal storage characteristics of high temperature air in honeycomb ceramics [J]. Journal of Engineering Thermal Physics, 2011, 32(9): 1541-1544.

[3] LAING D, LEHMANN D, FIB M, et al. Test results of concrete thermal energy storage for parabolic trough power plants [J]. ASME Journal of Solar Energy Engineering, 2009, 131(4): 410071-410076.

[4] 苏俊林,张亚仁,胡月红. 固体蓄热式电锅炉蓄热模拟及实验[J]. 热能动力工程,2007(6): 638-641, 689.
SU Jun-lin, ZHANG Ya-ren, HU Yue-hong. Solid heat storage electric boiler heat storage simulation and experiment [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2007(6): 638-641, 689.

[5] 徐耀祖,阿迪力江·对山拜,商向东,等. 基于高倍率蓄热的固体蓄热器研究及应用分析[J]. 热能动力工程,2020,35(10): 72-78.
XU Yao-zu, ADILIJIAN D S B, SHANG Xiang-dong, et al. Research and application analysis of solid heat storage based on high storage [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2020, 35(10): 72-78.

[6] KHARE S, DELL A M, KNIGHT C, et al. Selection of materials for

high temperature sensible energy storage[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2013, 115(3): 114-122.

[7] 梁炬祥. 固体蓄热传热过程的模拟分析及实验研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2017.
LIANG Ju-xiang. Simulation analysis and experimental study on heat transfer process of solid thermal storage [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2017.

[8] 许晓海,冯改山. 耐火材料技术手册[M]. 北京:冶金工业出版社,2000: 13-41.
XU Xiao-hai, FENG Gai-shan. Technical handbook of refractory materials [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2000: 13-41.

[9] 黄 浩,孙志坚,李鹏程,等. 蓄热式波纹板孔隙率影响(烟)损特性的研究[J]. 热能动力工程, 2017, 32(1): 31-37, 119-120.
HUANG Hao, SUN Zhi-jian, LI Peng-cheng, et al. Study on the influence of porosity on (exergy) loss characteristics of heat storage corrugated plate [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2017, 32(1): 31-37, 119-120.

[10] 邢作霞,赵海川,陈 雷,等. 基于耦合传热的电制热固体蓄热结构优化研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(20): 5999-6007, 6180.
XING Zuo-xia, ZHAO Hai-chuan, CHEN Lei, et al. Research on optimal design of electric heating and heat storage structure with coupled heat transfer [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(20): 5999-6007, 6180.

[11] 胡思科,刘建宇,邢姣娇. 具有圆、方孔道的固体蓄、放热特性的分析与比较[J]. 流体机械, 2015, 43(9): 73-78.
HU Si-ke, LIU Jian-yu, XING Jiao-jiao. Analysis and comparison of solid storage and exothermic characteristics with circular and square channels [J]. Fluid Machinery, 2015, 43(9): 73-78.

[12] 杨世铭,陶文铨. 传热学(第四版)[M]. 北京:高等教育出版社,2006: 112-117.
YANG Shi-ming, TAO Wen-quan. Heat transfer (4th edition) [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006: 112-117.

(刘 颖 编辑)