

固体蓄热式电锅炉蓄热模拟及实验

苏俊林¹, 张亚仁², 胡月红¹

(1. 吉林大学热能工程系, 吉林 长春 130022; 2. 吉林省能源研究所, 吉林 长春 130012)

摘要: 研究一种新型的蓄能装置——固体蓄热式电热锅炉。该设备利用低谷电加热穿插在蓄热体耐火砖孔道中的电热丝, 蓄热体吸收电热丝释放的热量并暂时贮存起来, 在需要的时候通过二次换热释放出来, 供用户使用。采用 ANSYS 进行蓄热体温度场的三维数值模拟, 得到了不同时刻的温度分布。为了验证 ANSYS 模拟温度分布的正确性, 在 260~900 °C 范围内进行了试验测试。其结果表明, 在此温度范围内, 两者误差小于 10%, 在 7 h 谷电期间, 蓄热温度可达 900 °C。实验样机表明, 锅炉热效率可达 97.4%。研究表明: 此型固体蓄热式电热锅炉具有蓄热能力高, 结构紧凑, 运行安全、高效节能及无大气污染等特点, 对固体蓄热式电热锅炉的应用推广具有一定的指导意义。

关键词: 固体蓄热; 电热锅炉; 低谷电; 实验研究; 数值模拟

中图分类号: TK229.92 文献标识码: A

引言

近年来, 随着水电、核电的迅速崛起, 同时伴随着燃料等常规能源价格的上涨, 电热锅炉显示出很强的“生命力”。电热锅炉自 1986 年在我国问世以来, 得到了迅速的发展, 但还主要是局限在电力系统和电量富裕的地区。随着电力峰谷差的加大, 人们对环保要求的进一步提高, 以及电力部门用电优惠政策的贯彻, 电热锅炉蓄热式采暖成为采暖热源的一种比较好的形式。热能储存技术用于解决热能供给与需求失配的矛盾, 是提高能源的利用效率和保护环境的重要技术, 在太阳能利用, 电力的“削峰填谷”, 废热和余热的回收利用以及工业与民用建筑物采暖与空调的节能等领域具有广阔的应用前景, 近年来已成为世界范围内的研究热点^[1-2]。

目前应用最广的是显热蓄热, 包括液体的显热蓄热和固体的显热蓄热。瑞典、美国、英国等国家都对显热蓄热器进行了较为深入的研究, 并在一些领域已投入使用。从目前的研究进展情况看, 瑞典处于领先地位^[3]。潜热蓄热技术主要集中在冰蓄冷场

合, 如制冷空调领域^[4-5]。

在我国热水蓄热电锅炉在一些城市得到了成功的推广使用^[6-7], 但热水蓄热器存在体积大、蓄热温度低、耗钢大等缺点。针对这种情况, 本文研制了一种新型蓄热装置——固体蓄热电锅炉, 并进行了传热性能的模拟及实验。

1 结构设计特点

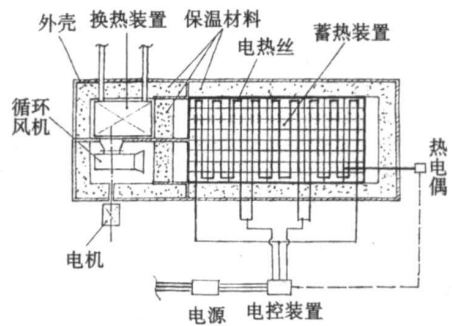


图 1 固体蓄热式电锅炉简图

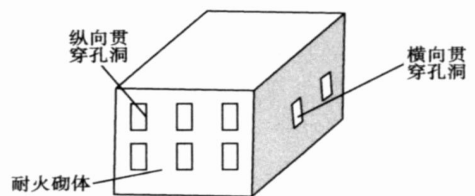


图 2 耐火砌体简图

如图 1 和图 2 所示, 固体蓄热式电热锅炉的工作原理为: 装置是由外壳、换热装置、循环风机、保温材料、电热丝、电源、温度测量器、控制装置及电机组成。其特征是: 蓄热装置是由耐火砌块砌筑而成, 耐火砌块上设有若干个纵向贯穿孔洞和横向贯穿孔洞。装置的工作过程是: 当电源接通后, 穿插在耐火

砌块横向贯穿空洞中的电热丝开始发热, 把热量传给由耐火砌块所砌成的蓄热装置, 当温度达到预定数值后, 经温度测量器把信号传给控制装置, 使电源断开, 保温材料把蓄热装置所得到的热量贮存起来, 当需要热量时, 开启循环风机, 使空气通过保温材料的缝隙, 进入耐火材料的纵向贯穿孔洞中, 空气温度得到提高, 然后再被抽到循环风机中循环流动。与此同时, 热空气通过换热装置把热量传给换热装置中的循环水, 供用热对象使用, 其水温的控制是通过调节风机驱动电机的转速来实现的。

2 蓄热温度场模拟

固体蓄热式电锅炉中的蓄热是三维的非稳态导热问题, 其导热微分方程为:

$$\frac{\partial}{\partial \tau} = a \nabla^2 t + Q / c \cdot \rho \quad (1)$$

$$\nabla^2 t = \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \quad (2)$$

式中: t —格砖温度; τ —时间; a —导温系数 $a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho}$; x —蓄热体长度方向上从表面至内部的距离; z —在蓄热体同一高度上垂直于 x 方向的距离; y —蓄热体高度方向的距离; λ —格砖的导热系数; ρ —格砖的密度; c —格砖的比热; Q —电阻丝的电热功率。

由于三维的非稳态导热问题的复杂性, 难以得到解析解。随着计算机技术和计算方法的发展, 复杂的工程问题可采用离散化的数值计算方法借助计算机得到满足工程要求的数值解。

依据蓄热体的砌体剖面图 2, 对蓄热体结构进行有限元分析, 建模, 利用 ANSYS 软件得到实验装置中蓄热体在 13.5 kW 电功率加热下不同时间点的温度分布结果如图 3~图 6 所示。

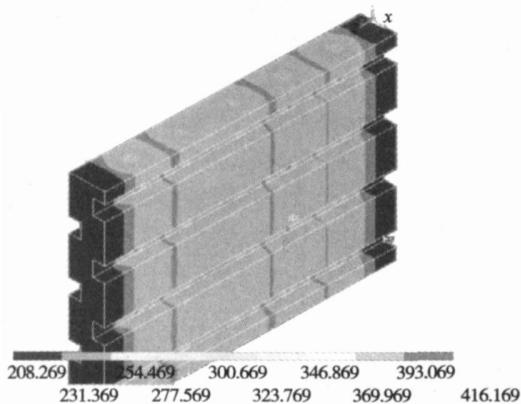


图 3 加热 1 h 后的温度分布

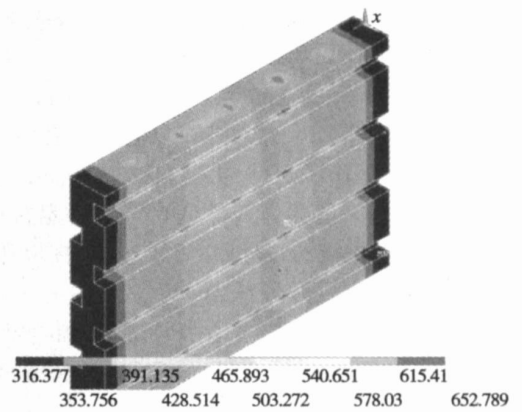


图 4 加热 3 h 后的温度分布

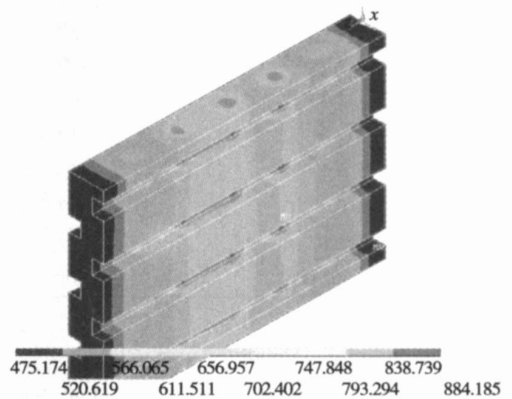


图 5 加热 5 h 后的温度分布

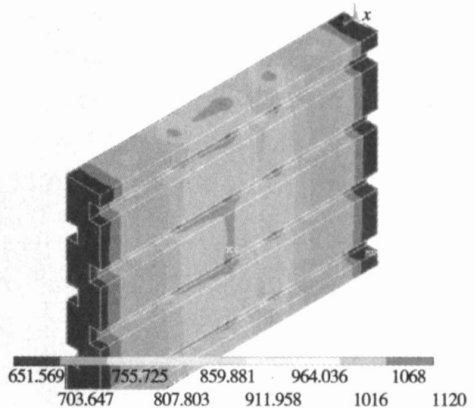


图 6 加热 7 h 后的温度分布

3 实验测试

为了得到固体蓄热式电热锅炉实际性能参数以及验证 ANSYS 模拟的正确性, 对图 1 所示的炉型进行了实验测试。此炉型的电功率为 13.5 kW, 蓄热体是用 112 块普通耐火砖和 175 块薄形耐火砖砌筑

而成,总长为 804 mm,宽 572 mm,高 900 mm,其中电热丝孔和通风孔均为贯通式,前后对齐。电热丝孔纵向贯通,截面积的尺寸为 29 mm×33 mm,沿蓄热体长度方向均分为 5 组,共 40 个电热丝孔洞,通风孔横向贯通,截面积尺寸为 44 mm×65 mm,共设有 28 格通风孔道。蓄热体外面设有多层保温材料,从里到外分别有保温砖、硅酸铝纤维毡、石棉板和钢板等。循环风机参数为功率 250 W、风量 9 m³/min、风压 294 Pa。采用 100 W 循环水泵,散热器为翅片管式换热器,换热面积为 3.62 m²,实验水箱的尺寸为 0.5 m×0.5 m×0.5 m。

表 1 蓄热体温度分布模拟与实验对比

时间/h	ANSYS 模拟温度/°C	试验测量温度/°C
0.5	260.044	258
1	329.765	299
2	408.430	389
3	503.272	503
4	601.967	607
5	702.407	697
6	806.304	792
7	911.958	901

用电偶测取蓄热体的温度分布,然后求某一时刻的温度平均值作为炉内温度,通过实验作出不同时间加热过程蓄热体的温度变化曲线。

实验模拟实际运行工况,7 h 谷电加热,此情况一般是夜间 23 点至清晨 6 点,电费仅是峰电(清晨 6 点至晚 23 点)的 1/2~1/3。17 h 蓄热体放热,由实验得到蓄热体电加热后的温度变化曲线,如图 7 所示。加热时间越长,温度越高,温度增长速度减慢,由图可知加热 7 h 后蓄热体温度可达 900 °C 以上。

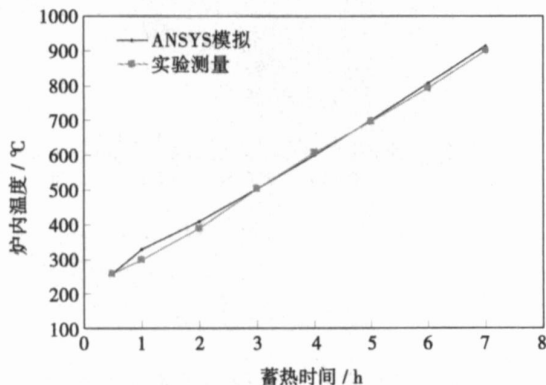


图 7 蓄热体加热过程温度变化及比较

图 7 是 ANSYS 计算的平均温度与实验测试值的比较,表 1 是蓄热体温度分布数值模拟值与实验测试值的对比情况。由此可知,在 7 h 谷电期间,蓄热温度可达 900 °C。数值模拟值与实验测试值的误差小于 10%。

水温是通过调节风门来控制的,放热过程如图 8~图 9 所示。

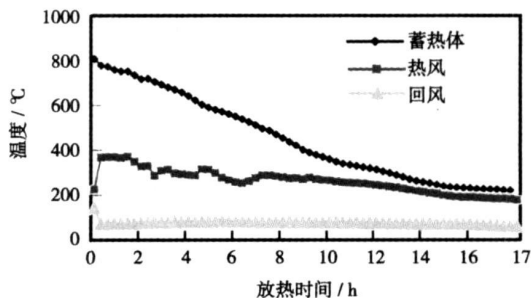


图 8 蓄热体放热过程温度变化曲线

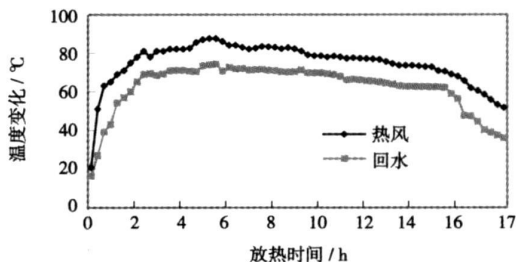


图 9 锅炉出水和回水温度的变化

由图 8 可知,在放热初始阶段,由于风门的调节,蓄热体温度和风温变化比较明显,但是后来变化比较有规律,蓄热体温度越来越接近风温,最后余温为 236 °C,而回风温度变化幅度不大。

图 9 表明放热过程出水温度与回水温度变化几乎同步,两者的温度差值几乎为定值,热水最高温度接近 90 °C。

由实验数据分析可知:固体蓄热式电热锅炉电热功率为 13.5 kW,蓄热体密度为 1 648 kg/m³,蓄热体体积为 0.324 m³,耗电量为 340 200 kJ,蓄热量为 326 933 kJ,锅炉热效率为 97.4%。

4 结 论

采用 ANSYS 对固体蓄热式电热锅炉的蓄热过程进行数值模拟,得到蓄热体不同时刻的温度分布。模拟结果与实验结果较为一致。在 7 h 谷电期间,

蓄热温度可达 900 °C。数值模拟值与实验测试值的误差小于 10%。此方法具有直观、快速、准确等优点。

通过对固体蓄热式电热锅炉的实测, 得到其蓄热、放热规律及性能参数。在样机功率为 13.5 kW 工况下, 蓄热量为 326 933 kJ, 锅炉热效率为 97.4%。

理论和实验表明: 固体蓄热式电热锅炉具有蓄热能力高、结构紧凑、运行安全、高效节能及无大气污染等特点, 应用推广固体蓄热式电热锅炉具有广阔的前景。

参考文献:

[1] SILVERMAN J. Energy storage-a vital element in mankind's quest for survival and progress[M]. Oxford: Pergamon Press, 1980

- [2] HASNAIN S M. Review on sustainable thermal energy storage technology[J]. Energy Conversion and Management, 1998, 39(11): 1127-1138.
- [3] 庄斌彪, 陈兴华. 蓄热(冷)器[J]. 能源研究与利用, 2000(3): 31-34
- [4] 张正国, 余晓福, 王世平. 潜热储能系统的传热及热力学优化研究[J]. 新能源, 2000(8): 24-26.
- [5] ZHANG YUWEN, FAGHRI A. Heat transfer enhancement in latent heat energy storage system by using an external radial finned tube[J]. Journal of Enhanced Heat Transfer, 1996, 3(2): 119-127.
- [6] 黄 飞, 陶进庆. 论电热锅炉发展的必要性[J]. 能源研究与利用, 2000(1): 12-13
- [7] 郭永葆. 电热锅炉技术概述[J]. 山西能源与节能, 2001(1): 28-33

(编辑 滨)

能源利用

Fr6B 燃气轮机改烧焦炉煤气技术

据《Gas Turbine World》2006 年 7~8 月号报道, GE Energy 与 Eurofo 国际集团(一家中国的“绿色能源”公司)签订一项新协议, 修改两台 42 MW Frame 6B 燃气轮机, 以便燃烧发电净化后的炼焦炉煤气(COG)。

该型已有两台 Frame 6B 燃气轮机安装在大连的某电站, 并记录了以重油为燃料的几千小时运行情况。

在将其燃烧和燃料系统修改以后, 改造的两台燃机将被安装在山西省孝义市一个新建的 Eurofo 联合循环电站。

以炼焦炉煤气作为燃料, 基本负荷下该装置联合循环额定输出功率将是 113 MW, NO_x 排放量低于 39 mg/kg。

修改工作由 GE 公司在该项目现场进行。燃气轮机在 2007 年 7 月运行。

GE 公司声称, 它正在与 Eurofo 集团和钢厂合作, 以便制定用于中国的炼焦炉煤气发电计划, 其目的是减少有害气体的排放。

2006 年 5 月, GE 公司与中国国家发展和改革委员会签订了一份备忘录, 以便扩大双方在开发先进环保技术方面的合作。

(吉桂明 供稿)

固体蓄热式电锅炉蓄热模拟及实验 = **Heat-storage Simulation and Experiments of a Solid Heat-storage Type Electric Boiler** [刊, 汉] / SU Jun-lin, HU Yue-hong (Thermal Energy Engineering Department, Jilin University, Changchun, China, Post Code: 130022), ZHANG Ya-ren (Jilin Provincial Energy Source Research Institute, Changchun, China, Post Code: 130012) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(6). — 638 ~ 641

Studied was a new type of energy storage device—solid heat-storage type electrically-heated boiler, which uses valley-load electric power to heat electrically heated wires running through the hole passage of refractory bricks of a heat storage body. The heat storage body absorbs the heat released from the electrically heated wires and stores it temporarily. Then, they release the heat in question through a secondary heat exchange for use by users when necessary. By using software ANSYS, a three-dimensional numerical simulation was conducted of the temperature field in the heat storage body with the temperature distribution at different times being obtained. To verify the accuracy of software ANSYS in simulating the temperature distribution, a measurement test was performed in a range of temperatures from 260 °C to 900 °C. The results show that in the above temperature range, the error is less than 10%. During the valley-load electric power period lasting for 7 hours, the temperature of heat storage can reach 900 °C. The experimental sample machine proves that the boiler can have a thermal efficiency up to 97.4%. The research results show that the solid heat-storage type electrically heated boiler under discussion features a high heat-storage capacity, compact structure, safe operation, high-efficiency energy saving as well as the absence of atmospheric pollution etc. **Key words:** solid heat storage, electrically-heated boiler, valley-load electric power, experimental study, numerical simulation

高浓度 CO₂ 下 CaCO₃ 循环煅烧试验与模拟 = **CaCO₃ Circulating Calcination Tests and its Simulation at a High Concentration of CO₂** [刊, 汉] / LI Zhen-shan, FANG fan, CAI Ning-sheng (Education Ministry Key Laboratory on Thermal Sciences and Power Engineering, Thermal Energy Engineering Department, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(6). — 642 ~ 646

A mathematic model has been established for CaCO₃ circulating calcination process at an atmosphere of high CO₂ concentration and verified in multiple circulating calcination experiments by utilizing calcium-based absorbents. On this basis, the influence of a variety of parameters, such as CO₂ concentration, absorbent category, particle diameter and circulating frequency etc. on CaCO₃ calcination has been analyzed. The results show that the decomposition temperature of CaCO₃ will increase with an increase of CO₂ content in the gas phase. Under a high concentration of CO₂, the circulating reaction activity of the absorbents will degrade and the quality of CaCO₃ produced will become lower with an increase in the number of times of the circulating reaction, leading to a shortening of the time duration needed for a complete calcination of CaCO₃ when the number of times of the circulating reaction has increased. **Key words:** CO₂ separation, CaCO₃ decomposition, circulating reaction/ calcination, model

温度对超细煤焦再燃还原 NO 效率的影响 = **Effect of Temperature on the Efficiency of NO Reduction Through a Reburning of Superfine Coal Coke** [刊, 汉] / ZHAO LI, YAN Wei-ping, LIU Zhong (College of Environmental Science and Engineering, North China Electric Power University, Baoding, China, Post Code: 071003), DAI Wen-nan (Environment Engineering Evaluation Center, National Environmental Protection Administrative Bureau, Beijing, China, Post Code: 100012) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(6). — 647 ~ 650

With superfine pulverized coal-prepared coke serving as a reburning fuel and N₂, O₂, CO₂ and NO being prepared to act as simulation flue gases, a study was performed of the effect of temperature on the efficiency to reduce NO emissions through reburning. The results show that within the range of experimental temperatures, the efficiency to reduce NO through reburning will increase with an increase of the temperature in the reburning zone. Chemical dynamics represents a major factor controlling the NO reduction reaction speed through a reburning of superfine pulverized coal. To raise the temperature in the reburning zone can properly shorten the residence time, but such a residence duration should not be shorter than 0.6 s, otherwise, the NO reduction efficiency will dramatically decrease and, meanwhile, the burn-out rate will also diminish. During the reburning of the pulverized coal, NO reduction through the reburning of coal coke plays a dominant role. **Key words:** superfine coal coke, reburning, NO, temperature