第 33 卷　第 1 期　　石家庄铁道大学学报(自然科学版)　　Vol. 33　No. 1
2020 年 3 月　Journal of Shijiazhuang Tiedao University(Natural Science Edition)　Mar. 2020

固体蓄热电锅炉放热过程蓄热体组温降一致性研究

罗　勇，陈　鹏

(石家庄铁道大学 机械工程学院,河北 石家庄　050043)

摘要:针对固体蓄热电锅炉放热过程存在的蓄热体组温降不一致问题,采用数值模拟和实验测试相结合的方法对某公司生产的 240 kW 固体蓄热电加热锅炉的配风箱进行了改进,并采用反映各散热风道均匀性的 CU 值对改进前后配风箱出口流量的均匀性进行了评价。结果表明,对于结构形式极不规则的配风箱,采用设置导流板的措施可以有效提高多通道循环风量的一致性,改进后的配风箱出口流量的 CU 值较改造前提高了 66%。将改进后的配风箱安装在固体蓄热电加热锅炉进行了蓄热体组温度的测定。结果表明,在蓄热锅炉放热过程中,蓄热体组的温降一致性得到了显著的改善。

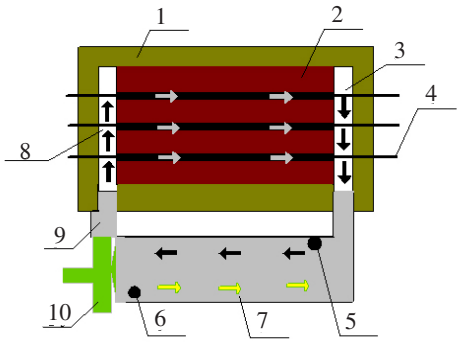
关键词:固体蓄热电锅炉;配风箱;蓄热体温降;实验;数值模拟

中图分类号:TK02　文献标志码:A　文章编号:2095-0373(2020)01-0116-06

1　前言

随着国家治理雾霾、煤改电供暖政策的推进,煤改电供暖设备的代表产品之一——固体蓄热电锅炉迎来了极大的市场需求。然而,固体蓄热锅炉本身存在的弊病(诸如电热丝或电热管容易烧坏、蓄热锅炉体积庞大等)也得到了业内人士的广泛关注。其中,蓄热锅炉放热过程中出现的蓄热体组温降不一致问题是电加热丝或电加热管烧坏的根源。因此实现蓄热体组放热过程温降一致性问题应引起重视。

固体蓄热电锅炉的典型结构如图 1 所示,低谷电时段电热丝通电加热使蓄热体的温度升高至 750 ℃左右,非低谷电时段停止加热,借助循环风机以及气水换热器使蓄热体降温并加热循环热水(或其他流体)。初始蓄热结束时蓄热体组内各点温度几乎相等,而放热过程中则会因为风道内循环风流速的不同导致蓄热体组内温度的不均匀。这样,在下一个蓄热周期内蓄热过程结束时蓄热体组内就会存在很大的温差。如果蓄热体温度传感器设置在流速较小的部位,则自控系统达到设定温度时,高流速部位蓄热体的温度将达不到设定温度,从而不能充分发挥蓄热体的蓄热能力。反之,如果传感器设置在流速较大的部位,则自控系统达到设定温度时,低流速部位蓄热体的温度将会严重超温,从而烧坏电加热丝。由于上述原因,目前许多生产企业大多采用降低蓄热锅炉蓄热温度的方法来保证锅炉运行的可靠性,即通过增加蓄热体的数量、减小蓄热体的有效蓄热温差来保证足够的蓄热量,进而在保证锅炉蓄热量的前提下实现锅炉的可靠运行。这样做不仅增加了蓄热锅炉的成本,而且还增加了锅炉房的基建投资[1]。因此,实现固体蓄热锅炉放热过程蓄热体组温降一致性对提高蓄热锅炉的性能至关重要。以某企业生产的 240 kW



1.绝缘层;2.蓄热砖;3.风道;4.电加热丝;5.出水口;6.进水口;7.换热器;8.均风室;9.配风箱;10.循环风机。

图 1　固体蓄热锅炉结构原理

收稿日期:2018-10-08　　责任编辑:车轩玉　　DOI:10.13319/j.cnki.sjztddxxbzrb.20180112

作者简介:罗勇(1964—),男,教授。主要从事制冷空调设备的节能研究。E-mail:1991386630@qq.com

罗勇,陈鹏.固体蓄热电锅炉放热过程蓄热体组温降一致性研究[J].石家庄铁道大学学报:自然科学版,2020,33(1):116-121.

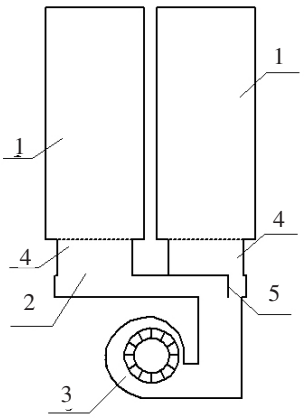
(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

固体蓄热锅炉为例,详细介绍了采用数值模拟与实验相结合的手段完善固体蓄热锅炉性能工程案例,为同类产品的改进提供了有益的参考。

2　原锅炉结构及相关参数测试

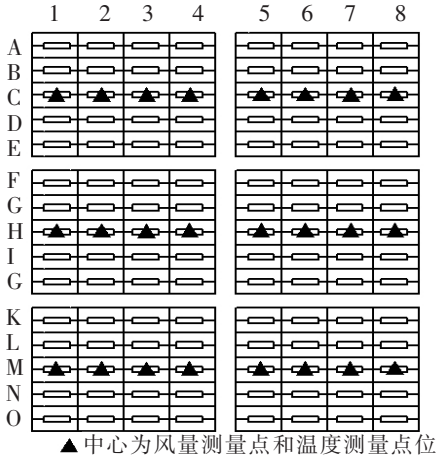
2.1　原锅炉配风箱及蓄热体组换热风道结构

原有蓄热锅炉的配风箱及均风室如图 2 所示。循环风机型号为 Y5-47NO.5。配风箱采用单个导流板将风量平均分配给 2 个支风道,2 个支风道分别连接 2 个均风室,为 2 个独立的蓄热体组模块提供循环风。每个蓄热模块有 60 个截面为 0.03 m×0.135 m、长度为 1.480 m 的换热风道,如图 3 所示。均风室为长方体结构,其几何参数:长×宽×高分别为 0.915 m×0.517 m×2.15 m。由于配风箱的结构复杂,导致 2 个蓄热模块,120 个换热风道的风量极不均匀,运行过程中经常出现电加热丝烧坏的故障。



1.均风室;2.配风箱;3.循环风机、4.支风道;5.导流板。

图 2　原有炉型的配风箱及换热通道示意图



▲中心为风量测量点和温度测量点位置

图 3　测点位置及编号对应图

2.2　原锅炉换热风道的流速及蓄热体温度测试

由于锅炉在实际使用过程中,电加热丝烧断的情况时有发生,首先对蓄热体组换热风道的流速进行了测试。2 个蓄热体组的换热风道的分布为 8 列、15 行,如图 3 所示,换热风道的位置采用矩阵的形式表示,如 A3 表示第一行第三列换热风道。

风速测量采用法国 KIMO 风速测量仪(可测量大于 0.1 m/s 的风速)。测量过程风机的频率分别设定为 50.0 Hz、22.9 Hz、10.5 Hz、4.8 Hz 和 2.2 Hz 5 个工况。实验得到的典型风道的出风口风速如图 4 所示。

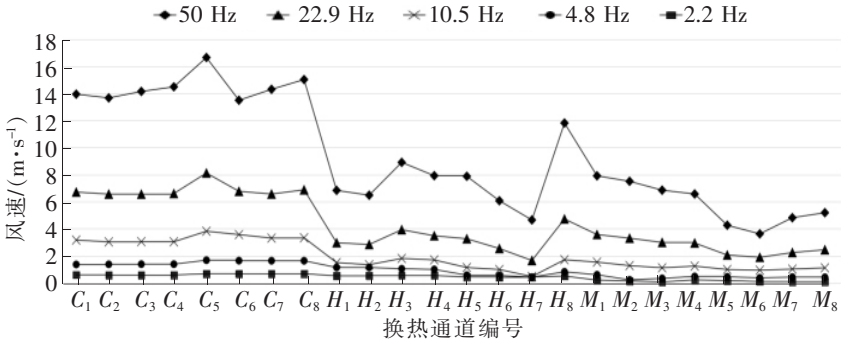


图 4　换热通道风量测量实验结果

从图 4 中可以看出,原有炉型在 5 个运行工况下换热风道的出口风速均存在较大的差异,低频率下运行时风速相差较小,高频率下运行时风速相差很大,对于 50 Hz 的工况而言,最大出风口的风速 $C_5=17$ m/s,最小出风口的风速 $M_6=2.8$ m/s,相差约 6 倍。

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

另外,还对锅炉热态的温度进行了测量,图 5 是利用 JK-XU 多路温度巡检仪记录的换热通道 C_1、C_2、C_3、C_4、C_5、C_6、C_7、C_8、H_1、H_2、H_3、H_4、H_5、H_6、H_7、H_8、M_1、M_2、M_3、M_4、M_5、M_6、M_7、M_8 内部 32 h 的温度变化情况。

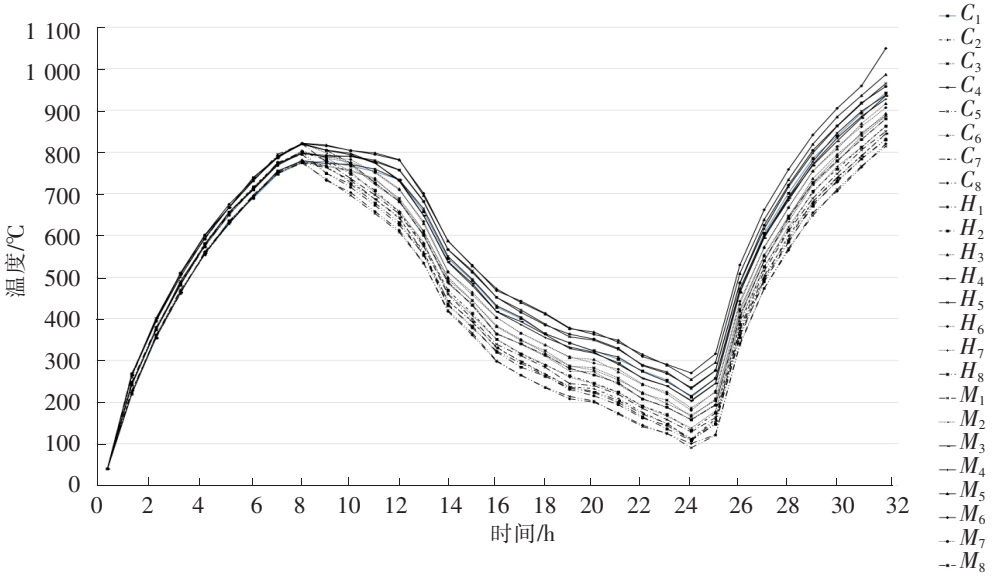


图 5 换热通道温度测量试验结果

从图 5 中可以看出,初次蓄热阶段结束时,蓄热体组的温度基本相等,而初次放热结束时,蓄热体组内部不同点的温度出现了较大的差别。温度最低点 C_5 约 90 ℃,温度最高点 M_6 约 270 ℃。第二次蓄热结束时,温度最低点 C_5 约 810 ℃,而温度最高点 M_6 约 1 050 ℃。结合锅炉运行的情况发现,电加热丝经常烧断的部位正是风速最小、温度最高的区域。

2.3 原锅炉配风箱的数值模拟

配风箱的出口风量是否一致是实现蓄热体换热风道风量一致性的关键。为了分析原锅炉配风箱的空气流动情况,利用 CFD 软件对其流场进行了数值模拟。模型建立及网格划分如图 6 所示。几何建模过程中将左右 2 个出风口分别均分为 4 等分,对 8 个等截面的出风口自左向右分别标记为出口 1、出口 2、…、出口 8。锅炉循环风机型号为 Y-5-47NO.5,几何建模过程采用了风机的实际几何参数。网格划分采用非结构三角形网格,网格总数为 52 902。

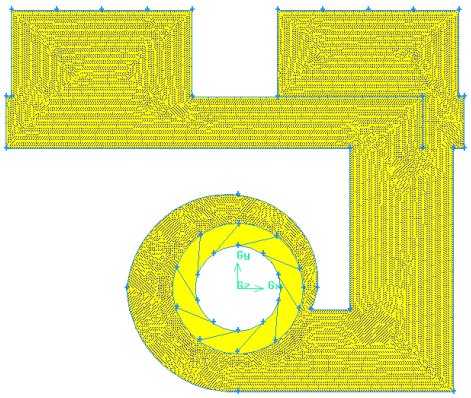


图 6 网格划分示意图

在利用 Fluent 软件进行数值模拟过程中,叶轮的过流部分为旋转区域[2]。分别模拟了 304 rad/s、139.02 rad/s、63.742 rad/s、29.1 rad/s 和 13.36 rad/s(对应变频器频率为 50.0 Hz、22.9 Hz、10.5 Hz、4.8 Hz 和 2.2 Hz)5 种运行工况。风道内流体采用标准湍流模型 k-ε,采用 SIMPLE 算法求解耦合关系,壁面附近采用标准壁面函数。湍流动能、湍流耗散项、动量方程均采用二阶迎风格式离散。进口边界条件为 pressure-inlet,出口边界条件为 pressure-outlet。

图 7、图 8 分别给出了 50 Hz 工况下配风箱的速度矢量图和 8 个出口空气的质量流量图。

从图 7、图 8 可以看出,由于送风道结构极不规则,原设计仅在配风箱内设置了一个导流板,很难使 8 个出风口的风量相等或接近。尤其右侧换热模块出风口,风速极不均匀,出风口 8 的风量几乎占据了右侧出风口的全部风量。这样的结果将会影响右侧蓄热体组内 x 方向(水平方向)散热风道风量的均匀性,最终对蓄热体放热过程温降的一致性带来很大的困难。

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

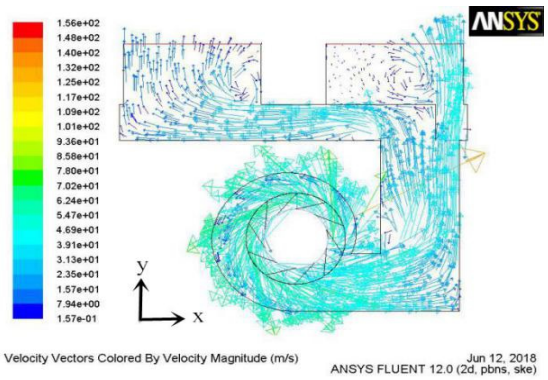


图 7　原锅炉 50 Hz 工况下配风箱速度矢量图

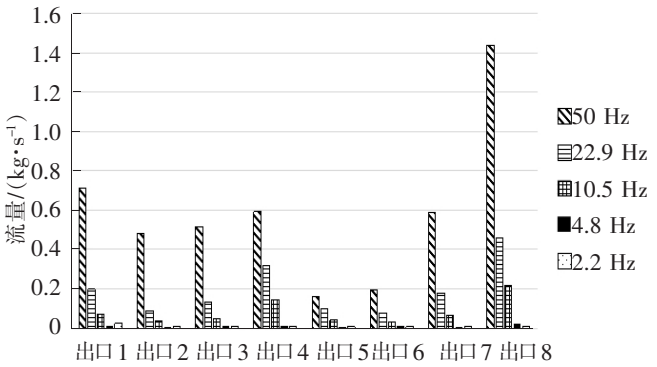


图 8　改进前不同工况下出口 1-8 的流量

3　锅炉配风箱的改进

3.1　改进方案

为了实现配风箱 8 个出风口风量相等或接近,在多次数值实验的基础上,提出了图 9 所示的配风箱改进方案,并通过对各导流板角度的多次调整得到了最终的配风箱几何参数。

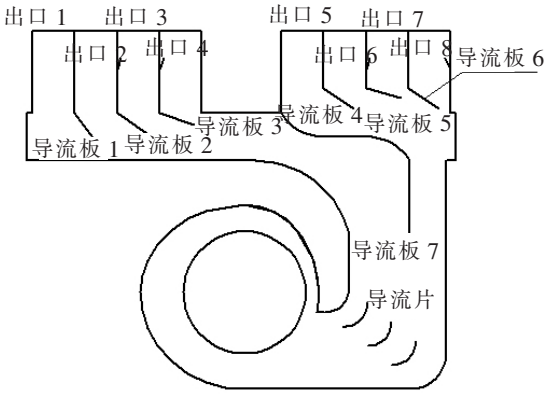


图 9　锅炉配风箱改进方案示意图

3.2　改进后配风箱流场数值模拟结果

图 10、图 11 分别给出了配风箱改进后的速度矢量图和出风口风量分布图,通过数值模拟可以得到不同频率下出风口 1-8 的流量分布情况。

由图 10 可以看出,配风箱内部以及 8 个出风口的速度场得到了明显的改善。从图 11 可以看出,相对原配风箱而言,8 个出风口流量的差别已经很小,基本达到了预期的效果。

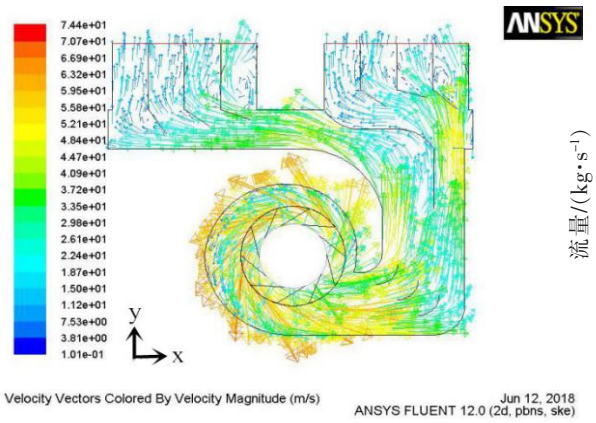


图 10　改进后配风箱 50 Hz 工况下速度矢量图

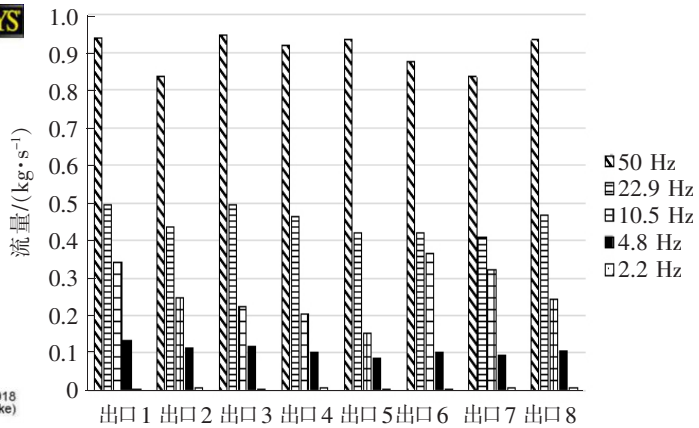


图 11　改进后不同工况下出口 1-8 的流量

3.3　配风箱出风口风速均匀性评价

多通道风量的均匀性可利用出风口 1-8 的风量进行评价,评价方法采用克里斯琴森均匀系数[3]

$$CU = \left(1 - \frac{\sum_{j=1}^{n} | q_j - \bar{q} |}{\sum_{j=1}^{n} q_j}\right) \tag{1}$$

式中,q_j 为 j 出口对应的出口流量;$\bar{q}$为各出口平均出口风量;n 为设定的出口个数。

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

显然,CU 值越接近 1,整个系统的气流组织均匀性越好。通过数值模拟的结果整理得到的配风箱改进前后的相关数据及用于评价出口流量均匀性的 CU 值见表 1。

表 1 改进前后配风箱 50 Hz 工况下出口风量均匀性结果

状况	$\sum^{n} \lvert q_j - \bar{q} \rvert$	$\sum^{n} q_j$	CU	CU 提高幅度/%
改进前	1.980 591 79	4.683 579 29	0.577 120 05	0
改进后	0.316 730 54	7.215 905 06	0.956 106 61	66

显然,改进后的配风箱其 8 个出口流量对应的 CU 值达到 0.956 106 61,在原来的基础上提高了 66%。

4 配风箱改进后蓄热体换热风道风速及蓄热体温度实测结果

将改进后的配风箱安装在锅炉上进行了冷态流速和热态温度的实际测量,数据曲线见图 12 和图 13。

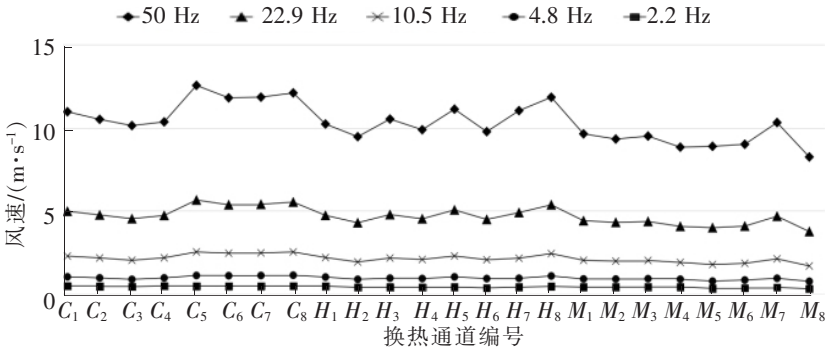


图 12 蓄热体组换热通道风速分布

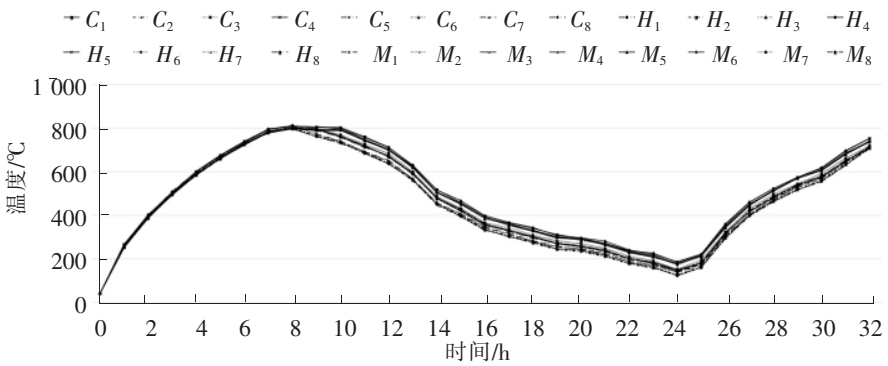


图 13 蓄热体组换热通道温度分布

由图 12 可以看出,在 5 种工况下运行时,典型风口的风速较改进前得到了明显的改善。由图 13 可以看出,典型风口处蓄热体的温差也得到了明显的控制,初次放热结束时,蓄热体组内部的最低温度约 120 ℃,最高温度约 170 ℃。第二次蓄热结束时,最低温度约 700 ℃,最高温度约 750 ℃。显然,相对于改进前而言,蓄热体组内部的温度分布得到了显著的改善。可见,保证固体蓄热锅炉运行过程中各换热通道空气流速尽量一致是实现固体蓄热电锅炉放热过程蓄热体温降一致性的有效途径,并且配风箱各出口风量的一致性直接影响换热通道内空气流速的一致性。

5 结论

(1)保证固体蓄热锅炉运行过程中各换热通道风速的均匀性是实现固体蓄热电锅炉放热过程蓄热体温降一致性的有效途径,其中配风箱各出口风量的一致性直接影响换热通道内风速的一致性。

(2)在复杂形状配风箱内设置导流板可实现配风箱出口空气流量的一致性。为达到这一目的,采用数值模拟的方法来完善配风箱的流场是一种行之有效的方法。

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

参 考 文 献

[1]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.
[2]陈新进,王庆顺,孙伟.基于 Fluent 的蓄热体传热过程的数值模拟[J].机械工程师,2015(4):71-73.
[3]李坦,靳世平,黄素逸,刘伟.流场速度分布均匀性评价指标比较与应用研究[J].热力发电,2013,42(11):60-63,92.

Study on Consistency of Temperature Drop of Heat Storage Unit in Solid Heat Storage Electric Boiler During Exothermic Process

Luo Yong,　Chen Peng

(School of Mechanical Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: In view of the inconsistency of the temperature drop of the regenerator group in the heat release process of the solid heat storage electric boiler, the combination of numerical simulation and experimental test is used to improve the air distribution box of the 240 kW solid heat storage boiler produced by a company, and the *CU* value reflecting the uniformity of the heat dissipation duct is adopted to improve the outlet flow of the air distribution box before and after the improvement. The uniformity of the quantity is evaluated. The results show that the adoption of the guide plate can effectively improve the consistency of the multi channel circulation air volume, and the *CU* value of the outlet flow rate of the improved air distribution box is 66% higher than that before the reform. The improved air distribution box is installed in a solid heat storage electric heating boiler and the temperature of the regenerator unit was measured. The results show that during the heat release process of the regenerative boiler, the temperature drop consistency of the regenerator group has been significantly improved.

Key words: solid heat storage boiler; air distributor; regenerative temperature drop; experiment; numerical simulation

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net