

## 锅炉系统能耗分析与优化方案评价

骆超<sup>1,2</sup>, 刘广平<sup>1,2</sup>, 龚宇烈<sup>1,2</sup>, 邱泽晶<sup>3,4</sup>, 郑鑫<sup>3,4</sup>, 罗珂<sup>1,2</sup>

(1.中国科学院广州能源研究所 中国科学院可再生能源重点实验室, 广东 广州 510640; 2.广东省新能源和可再生能源研究开发与应用重点实验室, 广东 广州 510640; 3.南瑞集团公司(国网电力科学研究院), 江苏 南京 211000; 4.南瑞(武汉)电气设备与工程能效测评中心, 湖北 武汉 430074)

**摘要:**介绍了影响锅炉热损失及效率的几个关键因素,通过对锅炉系统模型进行简化,采用数值模拟的方法分析了排烟温度、过量空气系数和入口冷空气对锅炉热效率和排烟热损失的影响。采用层次分析法建立综合评价模型,全面、客观、综合分析各影响因素的权重,分析结果表明,排烟温度或冷空气温度每增加 10~15 °C,锅炉排烟热损失减少 0.8%~1%,锅炉热效率提高 0.8%~1%;影响锅炉热效率的关键因素为排烟温度和燃料挥发分,二者权重占比分别为 33.6%和 16.8%。最后对北京某锅炉厂提出了七种优化设计方案。结果表明,分层燃烧技术、增加空预器和保温措施,可以有效提高锅炉热效率。这些研究将为锅炉系统的节能改造方案提供理论基础。

**关键词:**锅炉;模型简化;数值模拟;热效率;层次分析法;评价模型;优化设计

中图分类号:TK11+2 文献标识码:A 文章编号:1001-6988(2017)02-0047-08

## Energy Consumption Analysis and Optimization Scheme Evaluation of Boiler System

LUO Chao<sup>1,2</sup>, LIU Guangping<sup>1,2</sup>, GONG Yulie<sup>1,2</sup>, QIU Zejing<sup>3,4</sup>, ZHENG Xin<sup>3,4</sup>, LUO Ke<sup>1,2</sup>

(1.Guangzhou Institute of Energy Conversion, Key Laboratory of Renewable Energy, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China; 2.Guangdong Key Laboratory of New and Renewable Energy Research and Development, Guangzhou 510640, China; 3.Nari Group Corporation(State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211000, China; 4.Economic and Technology of State Grid Hubei Electrical Power Company, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Several key factors that influence boiler heat loss and efficiency are introduced, through simplifying the model of boiler system, the effects of exhaust gas temperature, excess air coefficient and inlet cold air on thermal efficiency and exhaust heat loss of boiler are analyzed by numerical simulation. A comprehensive evaluation model is built by using analytic hierarchy process, the weight of each factor is analyzed in a comprehensive objection way. The results show that the exhaust gas temperature or the temperature of the cold air increases from 10 °C to 15 °C, the heat loss of the boiler flue gas reduces from 0.8% to 1%, and the thermal efficiency of the boiler increases from 0.8% to 1%; the key factors that affect the thermal efficiency of the boiler are exhaust gas temperature and fuel volatile, the proportion of the two weights are 33.6% and 16.8% respectively. In the end, seven optimization schemes are put forward for a boiler plant in Beijing. The results show that the layered combustion technology, adding air preheater and heat preservation measures, can improve the thermal efficiency of the boiler effectively. These studies will provide a theoretical basis for the energy saving renovation program of boiler system.

**Key words:** boiler; model reduction; numerical simulation; thermal efficiency; analytic hierarchy process (AHP); evaluation model; optimal design

收稿日期 2016-12-27

项目资助 国家电网公司科学技术项目“基于光热补偿的热泵及电锅炉供能技术研究及示范应用”(SCTYHT15-JS-191)

作者简介 骆超(1982—),男,在职博士,助理研究员,主要研究方向为典型用能系统节能诊断技术与建筑节能。

锅炉是高耗能特种设备之一,是人类社会生产和生活各个领域不可缺少的动力机械<sup>[1-3]</sup>,工业锅炉主要为工业生产提供工艺蒸汽,为社会大众提供热水,是工业和社会必须消耗品<sup>[4]</sup>,它使用面广、需求量大

大,每年耗燃料约4亿至5亿t标准煤<sup>[5]</sup>,每年消耗的能源约占我国能源消耗总量的1/4。据我国燃煤工业锅炉现状统计,2009年、2010年、2011年和2012年全国在用锅炉总数分别为59.52万台、60.73万台、62.03万台和62.3万台;其中,工业锅炉总数分别为58.48万台、59.50万台、61万台和61.2万台。从统计数据看,我国现役锅炉数量呈逐年缓慢递增之势<sup>[6]</sup>。链条锅炉是中国工业锅炉燃烧设备的主要方式,约占中国工业锅炉产量台数的60%,固定炉排锅炉约占30%,其他约占10%。燃煤锅炉的实际热效率平均仅为60%~65%(设计效率一般在72%~80%),与设计效率有较大的差距,比国际先进水平低15%~20%。这些锅炉在设计上和运行中存在的主要问题是:燃料燃烧不完全,煤耗大,锅炉运行效率低,锅炉出力不足,风室间漏风、窜风现象严重,炉渣含碳量高等。

国内外研究指出:不同的工况下,锅炉热效率最高时对应不同的最佳空气系数;烟气温度和流量、排烟热损失和炉内对流换热均随空气系数增大而增大,锅炉热效率、炉膛和火焰温度均随空气系数先增大后减小<sup>[7]</sup>;送煤粒度分布情况会影响锅炉内的固相浓度分布、燃烧成分分布和煤炭的燃烧情况,通过优化给煤粒度分布来调整细颗粒稀释区和粗颗粒密集区的质量比,能够在稀释区获得较好的固体浓度分布,并且能够提高煤炭的燃烧性能,这可以保证锅炉的输出,降低煤渣含碳量、减少锅炉磨损和鼓风机的能量损耗<sup>[8]</sup>;文献[9]指出排烟热损失及固体不完全燃烧热损失占锅炉总损失90%以上,该文献对排烟热损失的研究,主要以空气系数及排烟温度为研究对象,通过定义新的锅炉输入热量炉膛放热量,经过一系列的推导得出了计算排烟热损失的工业分析公式,而对固体不完全燃烧热损失的研究主要集中在飞灰含碳量方面。

国外对电站锅炉和工业锅炉中沸腾炉的节能研究较多,而对链条锅炉的节能研究较少。R. Saidur等<sup>[10]</sup>将能量和焓利用率的概念运用于工业锅炉中,研究发现,燃烧室是锅炉系统焓损失的主要部位,其次是锅炉的换热器系统;对锅炉的鼓风机采用变速驱动以及对排烟进行热回收可以作为减少锅炉能源消耗的措施。Yang, Thunman和Tao等人<sup>[11-13]</sup>借助层燃数值模型,准确模拟链条炉中床层的燃烧特性,以此来研究给煤方式对燃烧的影响,考虑了不同颗粒大小

的生物质和垃圾对燃烧的影响,没有考虑大小颗粒同时存在时对燃烧的影响。

上世纪九十年代以来,很多科研机构和高校对锅炉节能方面进行了研究,为锅炉的能耗分析与优化打下了一定的基础。这些研究主要集中在以下这些方面:

王群等<sup>[14]</sup>研究了用复合燃烧技术改造链条锅炉,将链条锅炉加煤粉复合燃烧,提高锅炉热效率。长沙锅炉厂<sup>[15]</sup>通过结构分析计算,利用类比法找出了2~10 t/h链条锅炉炉拱与锅炉蒸发量的关系,从而确定了20 t/h链条炉排水管锅炉燃用II类烟煤的炉拱设计关键为增加中拱。

陆方等<sup>[16]</sup>针对高挥发分煤种在燃烧过程中出现炉内结渣、热效率低等问题,通过对煤种进行热天平分析,并进行单元体模拟炉燃烧及风室配风的试验研究,按照1:1的比例设计了风室的试验模型,采用超声波测高仪测量模型表面各点风压并进行了实炉改造,取得了较好的效果。

上海交通大学<sup>[17]</sup>对链条锅炉燃烧优化的3T+E要素进行了研究,这些要素主要由配风和炉拱来调节控制,针对燃烧优化设计缺乏理论预测的问题,建立基于煤质分析和供风配置的燃煤链条锅炉燃烧数值模型,该模型由床层燃烧模型,炉膛气相燃烧模型,以及两者的流动传热耦合组成。为验证模型的准确性,采用气相色谱测量了实际链条炉中煤层表面的气体成分分布,并与模型预测结果校对。

研究结果显示,模型具有较好预测结果,且精度较一般的等温模型有所提高。将模型用于配风和炉拱优化分析,研究了不同配风方式对不同挥发分等级煤种煤层燃烧的影响及作用机理。并针对新型双入字节能炉拱,研究了其工作原理、配风搭配,及拱型设计原则。

大连理工大学<sup>[18]</sup>对双锅筒链条蒸汽锅炉建立了数学模型,对炉膛内的相关参数进行数值模拟,分析结果表明,人字后拱比普通后拱更能加速引燃,促进燃烧,并分析了前后拱高度和长度对燃烧的不同影响。

哈尔滨理工大学<sup>[19]</sup>对链条锅炉的拱形和配风方式对燃烧性能的影响做了数值模拟研究,指出降低前拱高度、增大前拱的覆盖长度有利于新燃料的引燃,增大后拱的覆盖长度、降低后拱倾角有利于新燃料的引燃和燃尽,并得出尽早配风方式最有利于炉排前段新燃料的引燃,推迟配风方式最有利于燃料的燃尽。

上海交通大学<sup>[20]</sup>针对分层燃烧的特点在单粒径模型基础上建立了双粒径链条锅炉层燃模型,并在实际锅炉上进行实验验证,双粒径模型能更好地模拟安装分层煤斗后煤层的燃烧特性,并能够很好地模拟出大、小颗粒同时存在时床层的燃烧特性,分层堆叠的方式有利于煤层的引燃并加强燃尽。

哈尔滨工业大学<sup>[21]</sup>对拱型与配风方式对往复炉排锅炉燃烧性能的影响进行了数值模拟研究,研究表明:降低前拱高度、增大前拱的覆盖长度有利于新燃料的引燃;增大后拱的覆盖长度、降低后拱倾角不仅有利于新燃料的引燃而且有利于新燃料的燃尽;综合分析炉拱尺寸对往复炉排燃烧的影响可以得出,后拱覆盖长度变化对炉内燃烧造成的影响最大,前拱覆盖长度、后拱倾角次之,前拱高度最小;尽早配风方式最有利于炉排前段新燃料的引燃,推迟配风、强风后吹次之,均匀配风最差;推迟配风方式最有利于燃料的燃尽,强风后吹、尽早配风次之,均匀配风最差。

本文围绕提高锅炉热效率和降低排烟温度等方面进行了相关研究,通过简化锅炉系统的数值模型,定量分析锅炉能耗的主要因素,针对具体案例,提出优化方案并分析了各种优化方案的节能潜力,为锅炉系统运行效率的提高提供了理论和技术支撑。

### 1 模型建立

锅炉系统主要由风烟系统和汽水系统组成,具体设备包括给水泵、换热器、锅筒、鼓风机、炉体、烟囱、蒸汽/热水出口和锅炉炉渣出口等部分。物理模型如图1所示。

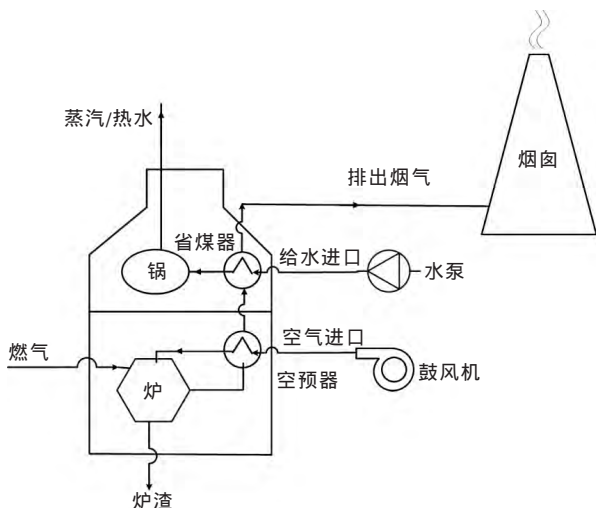


图1 锅炉系统物理模型示意图

锅炉热效率由反平衡法计算获得,通过计算各项热损失,分析影响锅炉能耗的主要因素。

反平衡效率计算公式:

$$\eta = 1 - q_2 - q_3 - q_4 - q_5 - q_6 \quad (1)$$

$$q_2 = [(m + na) \left( \frac{t_{py} - t_{lk}}{100} \right) \left( 1 - \frac{q_4}{100} \right)] / 100 \quad (2)$$

$$q_3 = 0.005 \quad (3)$$

$$q_4 = \frac{328.66 \times A_{ar}}{Q_{netvar}} \times \left( \alpha_{fh} \frac{c_{fh}}{100 - c_{fh}} + \alpha_{lm} \frac{c_{lm}}{100 - c_{lm}} + \alpha_{lz} \frac{c_{lz}}{100 - c_{lz}} \right) \quad (4)$$

$$q_5 = 0.02193 \quad (5)$$

$$q_6 = \frac{\alpha_{lz} A_{ar} (ct)_{lz}}{Q_{netvar} (100 - c_{lz})} \times 100\% \quad (6)$$

### 2 影响因素分析

#### 2.1 排烟温度对锅炉效率和排烟热损失影响

排烟温度对锅炉系统中排烟热损失有较大的影响,排烟热损失增加,导致锅炉系统主要性能指标热效率降低。如图2所示,排烟温度越高,烟气排量越大,则排烟热损失越大,排烟温度增加10~15℃,则 $q_2$ 增加约1%,锅炉热效率 $\eta$ 降低1%,这是由于高温烟气带走大量热损失引起的,锅炉排烟温度的高低与锅炉受热面积有关,降低排烟温度,一方面可以降低排烟热损失,另一方面也增加了锅炉尾部的受热面积。在煤粉炉及油、气锅炉中,排烟热损失是最大的一项热损失,为5%~10%。

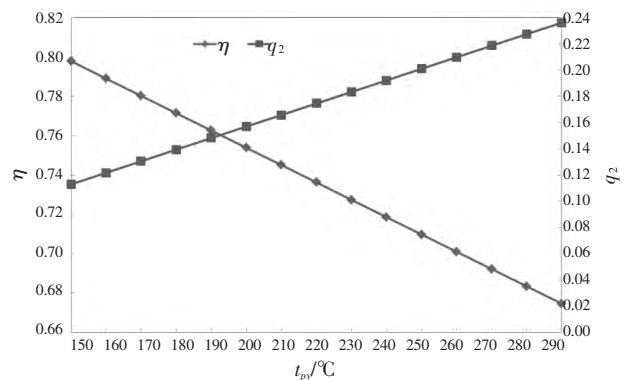


图2 排烟温度对锅炉效率和排烟热损失的影响图

#### 2.2 空气系数对锅炉效率和排烟热损失影响

图3给出了空气系数 $\alpha$ 对排烟热损失和锅炉热效率的影响,排烟热损失随着空气系数的加大而增加,锅炉热效率随着空气系数的加大而减小,过量空气系数每增加0.1,热效率减少0.8%~1%,这是由于炉膛结构和燃料的不充分燃烧造成的。



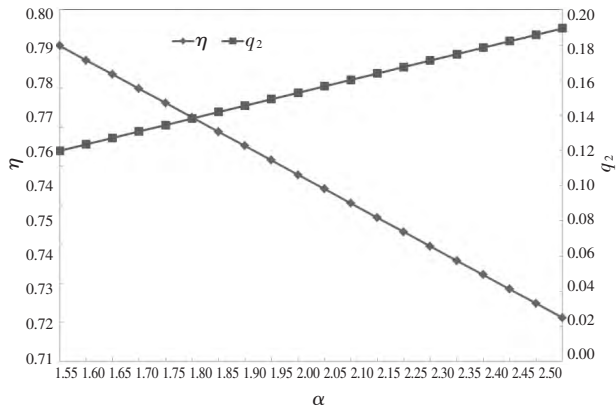


图3 空气系数对锅炉效率和排烟热损失的影响图

一般来说,  $q_2$  随  $\alpha$  的增加而增加,  $q_3$  随  $\alpha$  的增加而减小, 而  $q_4$  随  $\alpha$  的增加先减少, 后增加。总体来说, 上述三项损失之和随  $\alpha$  的增加先减少, 后增加。最佳空气系数  $\alpha$  应使上述三项损失达到最小。

### 2.3 入口冷空气对锅炉效率和排烟热损失影响

图4给出了入口冷空气对排烟热损失和锅炉热效率的影响, 从图中可以看出, 排烟热损失随着入口冷空气的增加而降低, 锅炉热效率随着入口冷空气的增加而加大, 入口冷空气温度每增加  $10\text{ }^\circ\text{C}$ , 锅炉排烟热损失减少  $0.8\%\sim 1\%$ , 锅炉热效率增加  $0.8\%\sim 1\%$ , 这是由于燃烧较为充分, 热损失降低。

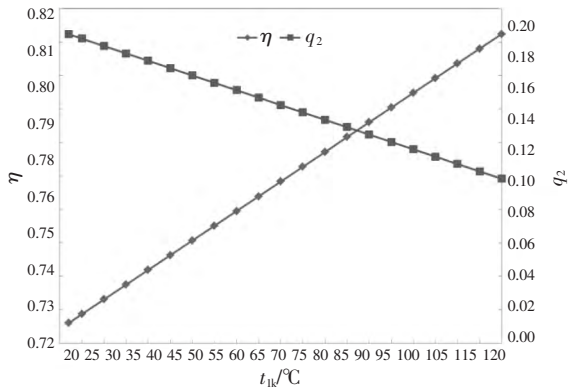


图4 冷空气温度对锅炉效率和排烟热损失的影响图

### 2.4 炉渣含碳量对锅炉热效率和固体未完全燃烧热损失的影响

炉渣含碳量对锅炉系统中固体未完全燃烧热损失和炉渣显热损失有较大的影响, 固体未完全燃烧热损失增加, 导致锅炉系统热效率降低。如图5所示, 炉渣含碳量从  $8\%$  增加至  $18\%$ , 其热效率从  $75.2\%$  降至  $73\%$ , 仅下降两个百分点, 炉渣含碳量对锅炉整体热效率的影响较小。

### 2.5 炉渣温度对锅炉效率和炉渣显热损失的影响

炉渣温度对锅炉系统中炉渣显热损失能有较大

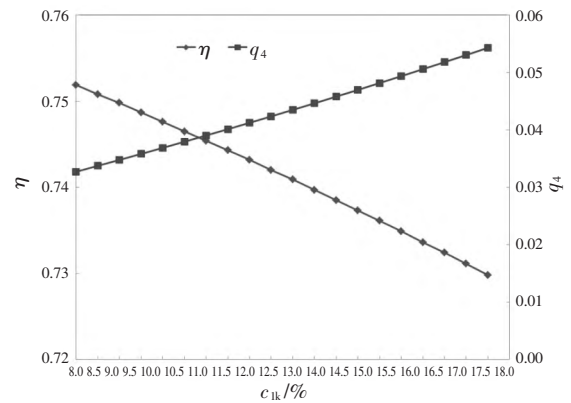


图5 炉渣含碳量对锅炉效率和固体未完全燃烧热损失的影响图

的影响, 但炉渣显热损失在锅炉所有热损失中的比例较小, 如图6所示, 当炉渣温度从  $500\text{ }^\circ\text{C}$  升至  $950\text{ }^\circ\text{C}$ , 锅炉热效率仅下降  $0.3\%$ 。

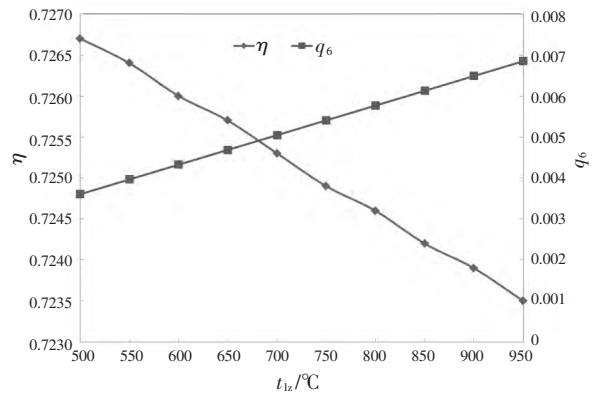


图6 炉渣温度对锅炉效率和排烟热损失的影响图

## 3 影响因素评价

### 3.1 层次分析法

影响锅炉热效率和各项热损失的因素较多, 采用层次分析法建综合评价模型, 全面、客观、综合分析各影响因素的权重。层次分析法分为以下四个步骤:

(1) 建立层次结构模型。明确所要解决的问题, 搞清楚问题所涉及的因素以及各因素之间的相互关系。

(2) 构造判断矩阵。设有  $m$  个目标(方案或元素), 根据某一准则, 将这  $m$  个目标两两进行比较, 层次分析法在对指标的相对重要性进行评判时, 引入了九分位的比例标度, 见表1。

表1 相对重要性的比例标度

甲指标 比乙指标	极 重 要	很 重 要	重 要	略 重 要	同 等	略 次 要	次 要	很 次 要	极 次 要
甲指标 评价值	9	7	5	3	1	1/3	1/5	1/7	1/9
备注	取 8, 6, 4, 2, 1/2, 1/4, 1/6, 1/8 为上述评价值的中间值								

(3)判断矩阵的一致性检验。对于每一层次作单准则排序时,均需要作一致性检验。对判断矩阵的一致性进行检验,首先计算一致性指标 C.I,计算公式:

$$C \cdot I = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (7)$$

计算一致性比率 C.R,计算公式:

$$C \cdot R = \frac{C \cdot I}{R \cdot I} \quad (8)$$

查找相应的随机一致性指标 R.I(见表 2),给出判断结果。当 C.R<0.10 时,认为判断矩阵的一致性是可以接受的,否则应对判断矩阵作适当的修改。

表 2 平均随机一致性指标

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
R.I	0	0	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51

(4)层次排序,给出决策排名。

### 3.2 影响因素评价分析

建立评价模型的目标是分析影响锅炉系统能耗的关键因素,并对其排序,通过上述分析,锅炉系统供选择的影响因素主要有:①排烟温度、②空气系数、③冷空气温度、④燃料挥发分、⑤炉渣含碳量、⑥锅炉容量、⑦炉渣温度;考虑的主要因素包括:①排烟热损失  $q_2$ 、②可燃气体不完全燃烧热损失  $q_3$ 、③固体不完全燃烧热损失  $q_4$ 、④锅炉散热损失  $q_5$ 、⑤灰渣物理显热损失  $q_6$ 。锅炉能耗影响因素构建评价模型如图 7 所示。

根据上述影响因素分析结果,构造准则层对目标的成对比较矩阵 A,对目标矩阵 A 进行归一化处理得到  $q_2, q_3, q_4, q_5, q_6$  的权重系数  $\omega_A$  分别为:

$$A = \begin{matrix} & \begin{matrix} q_2 \\ q_3 \\ q_4 \\ q_5 \\ q_6 \end{matrix} \\ \begin{matrix} q_2 \\ q_3 \\ q_4 \\ q_5 \\ q_6 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 7 & 3 & 5 & 9 \\ \frac{1}{7} & 1 & \frac{1}{3} & \frac{2}{3} & \frac{3}{2} \\ \frac{1}{3} & 3 & 1 & 2 & 2 \\ \frac{1}{5} & \frac{3}{2} & \frac{1}{2} & 1 & 3 \\ \frac{1}{9} & \frac{2}{3} & \frac{1}{2} & \frac{1}{3} & 1 \end{bmatrix} \end{matrix}, \omega_A = \begin{matrix} q_2 \\ q_3 \\ q_4 \\ q_5 \\ q_6 \end{matrix} \begin{bmatrix} 0.5509 \\ 0.0767 \\ 0.1891 \\ 0.1225 \\ 0.0608 \end{bmatrix}$$

目标矩阵 A 的最大特征向量  $\lambda_{\max}$  和一致性指标 C.I 分别为:

$$\lambda_{\max} = 5.102, C.I = 0.026$$

一致性比率  $C.R = C.I/R.I = 0.023 < 0.1$ , 矩阵 A 通过一致性验证。

构造方案层对准则层的目标矩阵  $B_1^{(7)}, B_2^{(7)}, B_3^{(7)}$ ,

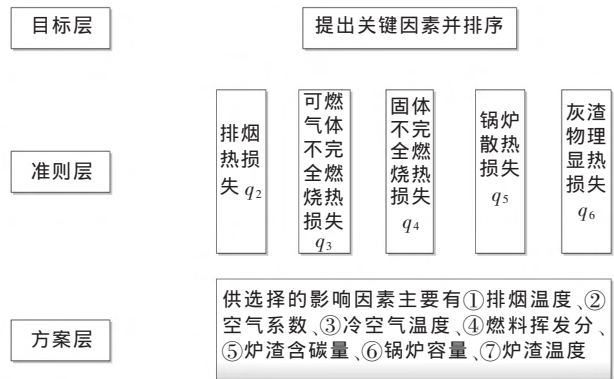


图 7 锅炉系统能耗因素评价模型示意图

$B_4^{(7)}, B_5^{(7)}$ 。

$$B_1^{(7)} = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 7 & 5 & 9 & 7 & 9 \\ \frac{1}{3} & 1 & 2 & \frac{3}{2} & 3 & 2 & 3 \\ \frac{1}{7} & \frac{1}{2} & 1 & \frac{2}{3} & \frac{3}{2} & 1 & \frac{3}{2} \\ \frac{1}{5} & \frac{2}{3} & \frac{3}{2} & 1 & 2 & \frac{3}{2} & 2 \\ \frac{1}{9} & \frac{1}{3} & \frac{3}{2} & \frac{1}{2} & 1 & \frac{3}{4} & 1 \\ \frac{1}{7} & \frac{1}{2} & 1 & \frac{2}{3} & \frac{4}{3} & 1 & \frac{3}{2} \\ \frac{1}{9} & \frac{1}{3} & \frac{3}{2} & \frac{1}{2} & 1 & \frac{2}{3} & 1 \end{bmatrix}$$

$$B_2^{(7)} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{3} & 7 & \frac{1}{5} & 9 & 9 & 9 \\ 3 & 1 & 9 & \frac{1}{2} & 9 & 9 & 9 \\ \frac{1}{7} & \frac{1}{9} & 1 & \frac{1}{9} & \frac{3}{2} & \frac{3}{2} & \frac{3}{2} \\ 5 & 2 & 9 & 1 & 9 & 9 & 9 \\ \frac{1}{9} & \frac{1}{9} & \frac{2}{3} & \frac{1}{9} & 1 & 1 & 1 \\ \frac{1}{9} & \frac{1}{9} & \frac{2}{3} & \frac{1}{9} & 1 & 1 & 1 \\ \frac{1}{9} & \frac{1}{9} & \frac{2}{3} & \frac{1}{9} & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$B_3^{(7)} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{4}{5} & 9 & \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & 9 & 9 \\ \frac{5}{4} & 1 & 9 & \frac{1}{4} & \frac{1}{2} & 9 & 9 \\ \frac{1}{9} & \frac{1}{9} & 1 & \frac{1}{9} & \frac{1}{9} & 1 & 1 \\ 5 & 4 & 9 & 1 & 2 & 9 & 9 \\ 3 & 2 & 9 & \frac{1}{2} & 1 & 9 & 9 \\ \frac{1}{9} & \frac{1}{9} & 1 & \frac{1}{9} & \frac{1}{9} & 1 & 1 \\ \frac{1}{9} & \frac{1}{9} & 1 & \frac{1}{9} & \frac{1}{9} & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$B_4^{(7)} = \begin{bmatrix} 1 & 5 & \frac{1}{5} & 7 & 7 & \frac{1}{9} & 7 \\ \frac{1}{5} & 1 & \frac{1}{7} & \frac{3}{2} & \frac{3}{2} & \frac{1}{9} & \frac{3}{2} \\ 5 & 7 & 1 & 9 & 9 & \frac{1}{2} & 9 \\ \frac{1}{7} & \frac{2}{3} & \frac{1}{9} & 1 & 1 & \frac{1}{9} & 1 \\ \frac{1}{7} & \frac{2}{3} & \frac{1}{9} & 1 & 1 & \frac{1}{9} & 1 \\ 9 & 9 & 2 & 9 & 9 & 1 & 9 \\ \frac{1}{7} & \frac{2}{3} & \frac{1}{9} & 1 & 1 & \frac{1}{9} & 1 \end{bmatrix}$$

$$B_5^{(7)} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{5} & \frac{1}{7} \\ 1 & 1 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{5} & \frac{1}{7} \\ 2 & 2 & 1 & 1 & 1 & \frac{1}{2} & \frac{1}{3} \\ 2 & 2 & 1 & 1 & 2 & \frac{1}{2} & \frac{1}{3} \\ 2 & 2 & 1 & \frac{1}{2} & 1 & \frac{1}{2} & \frac{1}{3} \\ 5 & 5 & 2 & 2 & 2 & 1 & \frac{2}{3} \\ 7 & 7 & 3 & 3 & 3 & \frac{3}{2} & 1 \end{bmatrix}$$

对第二层次目标矩阵  $B_1^{(7)}$ 、 $B_2^{(7)}$ 、 $B_3^{(7)}$ 、 $B_4^{(7)}$ 、 $B_5^{(7)}$ ，归一化处理，得到①排烟温度、②空气系数、③冷空气温度、④燃料挥发分、⑤炉渣含碳量、⑥锅炉容量、⑦炉渣温度的权重分别为： $\omega_{B1}$ 、 $\omega_{B2}$ 、 $\omega_{B3}$ 、 $\omega_{B4}$ 、 $\omega_{B5}$ 。

$$\omega_{B1} = \begin{bmatrix} 0.4904 \\ 0.1542 \\ 0.0742 \\ 0.1047 \\ 0.0522 \\ 0.0729 \\ 0.0514 \end{bmatrix}, \omega_{B2} = \begin{bmatrix} 0.1922 \\ 0.2847 \\ 0.0393 \\ 0.3860 \\ 0.0303 \\ 0.0303 \\ 0.0303 \end{bmatrix}, \omega_{B3} = \begin{bmatrix} 0.1504 \\ 0.1661 \\ 0.0252 \\ 0.3678 \\ 0.2401 \\ 0.0252 \\ 0.0252 \end{bmatrix},$$

$$\omega_{B4} = \begin{bmatrix} 0.1561 \\ 0.0428 \\ 0.2917 \\ 0.0318 \\ 0.0318 \\ 0.4138 \\ 0.0318 \end{bmatrix}, \omega_{B5} = \begin{bmatrix} 0.0512 \\ 0.0512 \\ 0.1079 \\ 0.1222 \\ 0.0995 \\ 0.2301 \\ 0.3380 \end{bmatrix}$$

第二层次目标矩阵  $B_1^{(7)}$ 、 $B_2^{(7)}$ 、 $B_3^{(7)}$ 、 $B_4^{(7)}$ 、 $B_5^{(7)}$ 的一致性指标  $C.I_{B1}$ 、 $C.I_{B2}$ 、 $C.I_{B3}$ 、 $C.I_{B4}$ 、 $C.I_{B5}$  和一致性比率  $C.R_{B1}$ 、 $C.R_{B2}$ 、 $C.R_{B3}$ 、 $C.R_{B4}$ 、 $C.R_{B5}$  分别为： $C.I_{B1}=0.001$ ， $C.R_{B1}=0.001$ ； $C.I_{B2}=0.06$ ， $C.R_{B2}=0.05$ ； $C.I_{B3}=0.07$ ， $C.R_{B3}=0.05$ ； $C.I_{B4}=0.09$ ， $C.R_{B4}=0.07$ ； $C.I_{B5}=0.01$ ， $C.R_{B5}=0.01$ ；

第二层次目标矩阵  $B_1^{(7)}$ 、 $B_2^{(7)}$ 、 $B_3^{(7)}$ 、 $B_4^{(7)}$ 、 $B_5^{(7)}$ 均通过一致性验证。

第二层次目标矩阵  $B_1^{(7)}$ 、 $B_2^{(7)}$ 、 $B_3^{(7)}$ 、 $B_4^{(7)}$ 、 $B_5^{(7)}$ 的权重组成新的矩阵  $\omega_B$ 。

层次总目标排序：

$$\omega = \omega_B \omega_A = \begin{bmatrix} 0.4904 & 0.1992 & 0.1504 & 0.1561 & 0.0512 \\ 0.1542 & 0.2847 & 0.1661 & 0.0428 & 0.0512 \\ 0.0742 & 0.0393 & 0.0252 & 0.2917 & 0.1079 \\ 0.1047 & 0.3860 & 0.3678 & 0.0318 & 0.1222 \\ 0.0522 & 0.0303 & 0.2401 & 0.0318 & 0.0995 \\ 0.0729 & 0.0303 & 0.0252 & 0.4138 & 0.2301 \\ 0.0514 & 0.0303 & 0.0252 & 0.0318 & 0.3380 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0.3361 \\ 0.1465 \\ 0.0767 \\ 0.1891 \\ 0.1225 \\ 0.0608 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.1681 \\ 0.0865 \\ 0.1120 \\ 0.0599 \end{bmatrix}$$

通过层次分析评价模型和计算，影响锅炉能耗的7个影响因素：①排烟温度、②空气系数、③冷空气温度、④燃料挥发分、⑤炉渣含碳量、⑥锅炉容量、⑦炉渣温度所占的权重分别为33.6%、14.7%、9.1%、16.8%、8.7%、11.2%、6.0%。即对锅炉能耗影响因素从大到小依次为：①排烟温度、④燃料挥发分、②空气系数、⑥锅炉容量、③冷空气温度、⑤炉渣含碳量、⑦炉渣温度。

#### 4 锅炉系统节能潜力分析

按照实际锅炉改造的可操作性原则，对北京某锅炉厂在技术和工艺上进行了如下7种优选方案，并从经济性、节能型和环保型三方面进行了潜力分析。原有锅炉系统的相关原始/基准数据和计算性能指标数据如表3所示。

表3 原有锅炉系统原始数据和性能指标

原始/基准数据					
锅炉容量 /MW	低位发热值 /kJ·kg <sup>-1</sup>	单位耗煤 CO <sub>2</sub> 减排量 a/t·t <sup>-1</sup>	煤价 C /元·t <sup>-1</sup>	年运行时间 T/h (150 d)	燃料耗量 B/t·h <sup>-1</sup>
7	23 843	2.62	420	1 500	1.247
计算性能指标数据					
热效率 /%	排烟温度 /°C	空气系数	炉渣含碳量 /%	炉体温度 /°C	
71	231.5	2.434	18.95		

优化方案一,即通过分层燃烧技术,使锅炉的排烟温度和炉渣含碳量分别降为 190 ℃和 12.23%;

优化方案二,即通过强化传热技术,增加空气预热器,使锅炉的进口冷空气温度升高至 70 ℃,炉渣含碳量降为 17%,排烟温度稍有上升至 245 ℃;

优化方案三,即对锅炉系统增加保温技术,使锅炉的散热损失系数降低为 0.5;

优化方案四,即通过分层燃烧技术和强化传热技术,使锅炉的排烟温度和炉渣含碳量分别降为 200 ℃和 13%,冷空气进口温度预热至 55 ℃;

优化方案五,即通过强化传热和保温技术,使锅炉的冷空气进口温度预热至 55 ℃,散热损失系数降低为 0.5,排烟温度增加至 235 ℃;

优化方案六,即通过分层燃烧技术和保温技术,使锅炉的排烟温度和炉渣含碳量分别降为 195 ℃和 13%,散热损失系数降低为 0.5;

优化方案七,即通过分层燃烧技术、强化传热技术和保温技术,使锅炉的排烟温度和炉渣含碳量分别降为 170 ℃和 12%,冷空气预热温度升至 50 ℃,散热损失系数降低为 0.7。由于材料和市场波动影响初投资,经济性分析只考虑运行费用。利用反平衡法计算各种优化方案的性能指标,如表 4 所示。

表 4 优化方案性能指标

项目	热效率 /%	排烟温度 /℃	空气系数	炉渣含碳量/%
原有系统	71.2	231.5	2.434	18.95
优化方案一	77.9	190.5	2.434	12.23
优化方案二	75.6	245	2.434	18.95
优化方案三	74	231.5	2.434	18.95
优化方案四	79.77	200	2.434	13
优化方案五	76.55	235	2.434	18.95
优化方案六	78.65	195	2.434	13
优化方案七	83.2	170	2.434	12

在锅炉额定功率和燃煤热值及成分不变的情况下,锅炉系统热效率与燃料耗量  $B$  成反比。通过下述公式计算锅炉系统的经济、节能和环保潜力:

$$B = \frac{Q \times 3.6}{Q_{\text{net, var}} \eta} \times T \quad (9)$$

$$\text{经济性节能潜力: } (B_1 - B_2) \times C \times T \quad (10)$$

$$\text{节能性节能潜力: } (B_1 - B_2) \times T \quad (11)$$

$$\text{环保性节能潜力: } (B_1 - B_2) \times \alpha \times T \quad (12)$$

对原有锅炉系统的经济性(运行费用)、节能性(燃料耗量)、环保性(CO<sub>2</sub> 减排量)进行计算,按照锅炉额定需求量为 7 MW,燃料热值为 23 843 kJ/kg 的

基准数据计算,原有锅炉系统的耗量如表 5 所示。

表 5 原有锅炉系统节能潜力基准数据

经济 年运行费用 /万元·a <sup>-1</sup>	节能 燃料耗量 /t·a <sup>-1</sup>	环保 CO <sub>2</sub> 减排 /t·a <sup>-1</sup>
93.52	2 227	5 834

利用式(9)~(12)及表 4,计算优化方案的评价指标,如表 6 所示。

表 6 优化方案评价指标

	经济年运行费用 万元/a	节能燃料耗量 t/a	环保 CO <sub>2</sub> 排放 t/a	相对经济性 元/a	相对节能量 t/a	相对碳减排量 t/a
原有系统	93.52	2 227	5 834			
优化方案一	85.48	2 035	5 332	8.04	191.51	501.75
优化方案二	88.08	2 097	5 494	5.44	129.59	339.53
优化方案三	89.98	2 142	5 613	3.54	84.25	220.74
优化方案四	83.47	1 987	5 207	10.05	239.22	626.75
优化方案五	86.98	2 071	5 426	6.54	155.62	407.72
优化方案六	84.66	2 015	5 281	8.86	210.92	552.6
优化方案七	81	1 928	5 053	12.51	297.97	780.68

表6给出了原有系统和7种优化方案的节能性、运行费用和环保性比较,从表中数据可以看出,优化方案七的节能性、经济性和环保性最好,每年可节约燃煤近 300 t,节约运行费用近 13 万元和减排 CO<sub>2</sub> 近 800 t;方案四、六和一的节能潜力次之,但相差不大;方案二和五的节能潜力相差不大;优化方案三的节能性、经济性和环保性最差,每年可节约燃煤近 85 t,节约运行费用近 3.5 万元和减排 CO<sub>2</sub> 近 220 t。

上述方案的结果主要是由于分层燃烧技术的效果显著、空预器节能效果次之,保温措施虽然有效,但节能效果不及分层燃烧技术和增加空气预热器。

## 5 结论

(1) 排烟温度或冷空气温度每增加 10~15 ℃,锅炉排烟热损失减少 0.8%~1%,锅炉热效率提高 0.8%~1%,最佳空气系数  $\alpha$  应使  $q_2$ 、 $q_3$  和  $q_4$  三项损失达到最小,有个最佳值,炉渣含碳量和温度对锅炉整体热效率在 2%以内。

(2) 影响锅炉热效率的关键因素及其权重从大到小依次为:排烟温度(33.6%)、燃料挥发分(16.8%)、



空气系数(14.7%)、锅炉容量(11.2%)、冷空气温度(9.1%)、炉渣含碳量(8.7%)、炉渣温度(6.0%),为锅炉系统的节能改造方案提供理论基础。

(3)分层燃烧技术、增加空预器和保温措施,可以有效提高锅炉热效率,实施节能改造中,最优方案比原有锅炉系统每年可以节煤近300 t、节约运行费用近13万元和减少CO<sub>2</sub>排放近800 t。

符号说明:

$A_{ar}$ —燃料收到基灰分, %

$B$ —煤耗量, t/y

$B_1, B_2$ —节能方案实施前后燃料耗量, t/a

$C$ —燃料市场价格, 元/t

$c_{fh}$ —飞灰可燃物含量, %

$c_{lm}$ —漏煤可燃物含量, %

$c_{lz}$ —炉渣可燃物含量, %

$Q$ —锅炉容量, kW

$Q_{netvar}$ —燃料低位发热值, kJ/kg

$T$ —锅炉年运行时间, h

$a$ —单位耗煤CO<sub>2</sub>减排量, t/t

$c$ —炉渣比热容, kJ/(kg·°C)

$m, n$ —计算系数,  $m=0.3, n=3.5$

$q_2$ —排烟热损失, %

$q_3$ —气体未完全燃烧热损失, %

$q_4$ —固体未完全燃烧热损失, %

$q_5$ —锅炉散热损失, %

$q_6$ —灰渣显热损失, %

$t$ —炉渣温度, °C

$t_{py}, t_{lk}$ —排烟温度和入炉冷空气温度, °C

$\alpha$ —排烟处空气系数

$\alpha_{fh}, \alpha_{lm}, \alpha_{lz}$ —飞灰、漏煤、炉渣含灰量占入炉燃料总量的重量百分比, %

$\eta$ —锅炉热效率, %

参考文献:

- [1] 周德超.浅谈锅炉水质检验中的问题及整治措施[J/OL].城市建设理论研究(电子版), 2015, 5(28).
- [2] 王保卫,瞿玉华.谈谈锅炉节煤的基本措施[J].锅炉制造, 1999(1):

65-70.

- [3] 余堃.循环流化床锅炉在热电联产中的应用[J].化学工程与装备, 2011(9):165-166.
- [4] 石云.工业锅炉水处理节能减排措施探讨[J/OL].商品与质量:科教与法, 2014(7).
- [5] 赵军明.广州市工业锅炉能耗分析与节能技术研究[D].广州:华南理工大学, 2010.
- [6] 梁兴,王乃继.煤粉工业锅炉及其污染物联合控制现状[J].区域供热, 2014(6):52-58.
- [7] 赵俊杰,罗立权,吴豪,等.过量空气系数对燃煤电站锅炉热效率和脱硝的影响[J].锅炉技术, 2015, 46(3):30-34.
- [8] MA S, CHANG W M, ZHANG J C, et al. Optimizing calculation of particle size distribution of feeding coal for circulating fluidized bed boiler[J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 87(5):463-470.
- [9] 陈保奎.煤粉炉锅炉效率综合诊断及高温腐蚀分析[D].济南:山东大学, 2009.
- [10] SAIDUR R, AHAMED J U, MASJUKI H H. Energy, exergy and economic analysis of industrial boilers [J]. Energy Policy, 2010, 38(5):2188-2197.
- [11] YANG Y B, RYU C, KHOR A, et al. Fuel size effect on pinewood combustion in a packed bed[J]. Fuel, 2005, 84(16):2026-2038.
- [12] THUNMAN H, BO L. Influence of size and density of fuel on combustion in a packed bed [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2005, 30(2):2939-2946.
- [13] LING T, ZHAO G, RUI S, et al. Combustion characteristics of particles of hazardous solid waste mixtures in a fixed bed[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 181(1-3):305-314.
- [14] 王群,潘名麟.用复合燃烧技术改造链条锅炉[J].电站系统工程, 1997(2):53-56.
- [15] 钟连阳,杨海娟,彭铁汉.锅炉出力与炉拱关系的探讨与应用[J].工业锅炉, 1999(1): 21-23.
- [16] 陆方,罗永浩,徐华东,等.燃用高挥发分煤种链条炉排锅炉燃烧特性及配风的实验研究[J].工业锅炉, 2004(1):15-18.
- [17] 季俊杰.燃煤链条锅炉燃烧的数值建模及配风与炉拱的优化设计[D].上海:上海交通大学, 2008.
- [18] 张斌.炉拱对链条炉内燃烧特性影响的数值分析[D].大连:大连理工大学, 2011.
- [19] 许铭涛.拱形与配风方式对链条炉燃烧性能影响的数值模拟研究[D].哈尔滨:哈尔滨理工大学, 2013.
- [20] 张品,杜海亮,王苑,等.链条炉分层燃烧的数值模型与计算[J].热能动力工程, 2013(1): 93-98.
- [21] 储继峰.拱形与配风方式对往复炉燃烧性能影响的数值模拟研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2014.