

# 煤质多变下火电厂最经济煤种决策

谭厚章, 苗杨, 王洋, 王学斌, 徐通模

(西安交通大学能源与动力工程学院, 陕西省 西安市 710049)

## Decision of the Most Economic Coal in Power Plant With Coal Quality Variation

TAN Hou-zhang, MIAO Yang, WANG Yang, WANG Xue-bin, XU Tong-mo

(School of Energy and Power, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi Province, China)

**ABSTRACT:** It is impossible for most of the coal-burning power plant to burn the designed coal, the coal quality gets inferior, the coal price is soaring and tube explosion accidents occur frequently. In order to get the mathematic model of the comprehensive economic loss, the experiment was done at a power plant to investigate the impact of the variation of the coal on the economy of the entire plant. The results show that the equipment maintenance cost, combustion-supporting oil quantity, and frequency of tube explosion are changed with the ash content exponentially. With the consideration of the price of the standard coal, equipment maintenance cost, discharge cost, et .al. the most economical coal for the plant is found out, whose quality parameters are between the designed coal and poor-quality coal. A method for calculating the most economical coal under a system where the coal price is fluctuating was also presented.

**KEY WORDS:** coal quality; coal price fluctuation; economical coal quality; power plant; comprehensive cost

**摘要:** 我国火电厂大多无法燃烧设计煤种, 煤质变差、煤价高涨和锅炉磨损爆管事故频发。为定量得到煤质变差后给火电厂带来的综合经济损失的计算模型, 在某电厂进行了煤种变化对全厂经济性影响的试验研究。试验结果表明: 设备维修费用、助燃油量、爆管泄漏的频率均与灰分呈指数关系变化; 综合考虑标煤单价、设备维护费用、排放成本等各项因素, 找到该厂当前最经济煤种, 煤质参数介于设计煤种和劣质煤之间; 并提出煤价波动体系下一种快捷的求取火电厂最经济煤种的计算方法。

**关键词:** 煤质; 煤价波动; 经济煤质; 火电厂; 综合成本

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(973 项目)(2005CB221206); “十一五” 国家科技支撑计划重大项目(2006BAK02B03)。

The National Basic Research Program of China (973 Program) (2005CB221206); Key Project of the National Eleventh-Five Year Research Program of China(2006BAK02B03).

## 0 引言

火电厂成本 70% 以上用于购买煤炭, 目前由于煤价高涨而电价受控的大环境影响, 火电厂普遍处于亏损边缘, 大多不能购买煤价高的设计煤种<sup>[1]</sup>。为控制发电成本, 发电厂往往就近购买成本相对较低但与设计煤质相差较远的高灰份、高硫、低挥发份的劣质煤, 且一个大电厂为保证煤量不得不每天购进多达二三十矿的煤炭, 这些煤炭品质不一, 煤价也处于波动中, 从而带来各种负面效应: 磨损加剧、制粉耗电升高、冲灰水量翻倍、排污罚款激增、脱硫效率下降、着火延迟、飞灰含碳高<sup>[2-10]</sup>。因此, 在当前复杂的煤价波动体系下, 如何确定燃烧的最经济煤质, 如何选择最合理价位的煤入厂, 如何科学评估各种附加费用等, 以保证电厂购煤款、附加损失相对最小、达到供电煤耗最低, 成为目前乃至今后相当长时间内国内火电厂需要解决的难题。

已有研究利用神经网络等统计学的方法对煤质变化及混合燃煤系统进行了优化, 并根据燃煤锅炉的性能建立了相应的专家系统<sup>[11-20]</sup>; 定性分析了煤种变化对锅炉经济性的影响, 并考虑了购煤成本和发热量造成的附加成本对电厂成本的影响, 但均未考虑煤质变化对电厂安全性成本的影响, 更没有分析如何指导购煤<sup>[21-24]</sup>。该文作者在山西某电厂进行了长达半年的变煤种试验, 得出相关计算结果和评判依据。

## 1 煤质变化对电厂成本的影响因素分析

煤质变差, 通常表现为灰分远高于设计煤种, 导致在相同发电量条件下, 总燃煤量大幅增加。其次是含硫量过高, 导致脱硫成本激增, 附加大气污

染缴费增加。表1为本次试验的4个煤种。其中2、3、4号煤种为该厂供应量较大的典型煤种。

从表1可见,折算到全年相同发电量75亿kW·h条件下,1号煤(设计煤种)总耗煤量为273.54万吨,而燃用4号煤时全年耗煤量为377.82万吨,多耗104.28万吨煤,其中多增加73.31万吨灰,也就是说要多输送、多制粉、多送粉、多燃烧104.28万吨煤,尾部受热面要多经过104.28万吨煤对应的巨大烟气流磨损,电除尘多处理73.31万吨灰,引风机多耗大量厂用电。

表1 试验煤质  
Tab. 1 Coal quality for experiments

煤种	1号(设计煤种)	2号	3号	4号
灰份/%	19.77	24.69	28.93	33.72
硫分/%	0.2425	1.140	1.360	2.740
标煤单价/(元/吨)	416.0	385.0	360.0	335.0
折算全年实际煤量/万吨	273.55	293.07	329.92	377.83
折算全年标煤量/万吨	235.67	237.62	240.67	249.38
全年购煤费用/万元	98 038.7	91 483.7	86 641.2	83 542.3
总灰量/万吨	54.09	72.36	95.46	127.40

此外,由于煤耗量大,烟尘总量也大,导致烟尘罚款增大;虽然试验煤质的氮元素含量基本相同,但由于煤耗总量大增,NO<sub>x</sub>排放总量也大增,NO<sub>x</sub>罚款费用也大增;灰分大还使磨损加剧,因磨损造成的设备检修费用增大;过大灰分还是威胁锅炉安全运行的最大隐患,灰分增大,助燃油量增大,造成购油费用上升;灰分增大,爆管泄漏的次数增多,造成频繁停炉,停运一次,将损失巨大利润。归纳起来,煤种变差对电厂造成的附加费用由附加排灰成本、附加大气污染缴费、附加污水排放缴费、附加设备维护费用等4大项组成。如图1所示。

图1中,选取设计煤种为基准,所谓的煤质变

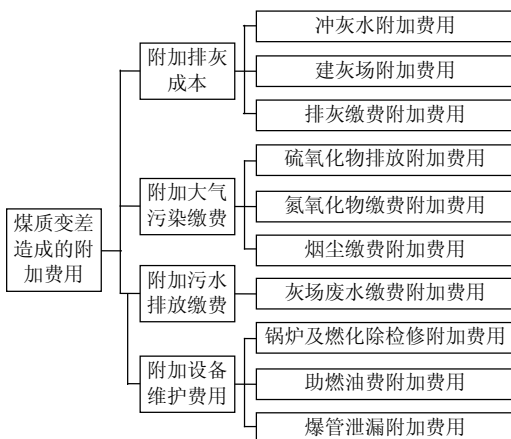


图1 煤质变差造成的附加费用

Fig. 1 Additional fee from the fluctuation of coal quality

差造成的附加费用是指排灰成本、大气污染缴费、污水排放缴费、设备维护费用这4类成本与设计煤种的这4类成本的差值。煤质变化不仅影响各项附加成本,还影响购煤成本。本文提出综合成本为购煤成本与各项附加成本和。其数学模型如下式,即

$$F_{zh} = F_{gm} + F_{fj} \quad (1)$$

式中:  $F_{zh}$ 为综合成本,元;  $F_{gm}$ 为购煤成本,元;  $F_{fj}$ 为煤质变化造成的附加费用,元。

## 2 煤质变化对电厂综合成本影响的试验研究

为研究不同煤质对电厂各种附加费的影响,试验选取灰分和硫分相差较大的4个煤种。从表1可以看出,标煤单价随灰分的降低而升高,随硫分的升高而降低。为了能够定量计算出煤质变化对综合成本的影响,关键是能否定量计算出煤质变化对各种附加费用的影响,而其中的附加排灰成本、附加大气污染缴费、附加污水排放缴费都有相关的国家收费标准,容易计算。最难计算的是附加设备维护费用与煤质变化的关系。

通过对该厂2003~2006年与煤质变化相关的磨损检修相关费用、爆管泄漏次数、助燃油量的试验与统计分析,发现整体设备维修成本(含磨损)与灰分成良好的指数关系,如图2所示。

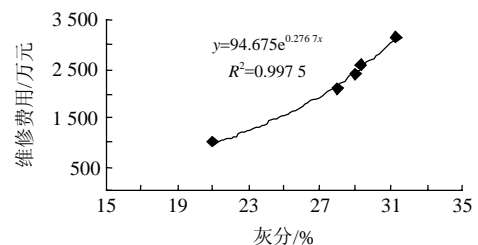


图2 维修费用随灰分变化趋势

Fig. 2 Change of maintenance costs with ash content

同时发现爆管泄漏次数、助燃油量也都随灰分呈良好的指数关系,如图3、4所示:煤质变化主要是灰分、硫分、挥发分,但后2个变化不影响设备检修维护费用,煤质变化后只需计算灰分变化对应这3条指数曲线的费用变化即可求出煤质变化与设备检修维护费用的关系。图5描述了不同硫分造成的附加排放费用,同样以设计煤种为基准。随着硫分的增大,硫分造成的附加成本加剧。将煤质变化引起的附加排灰成本、附加大气污染缴费、附加污水排放缴费计算后与图2~4计算值叠加后得到煤质变化与总附加费用的关系曲线,见图6。

图6计算了4种试验煤质由于灰分变化造成的附加成本,由于设计煤种是比较的基础,附加费用

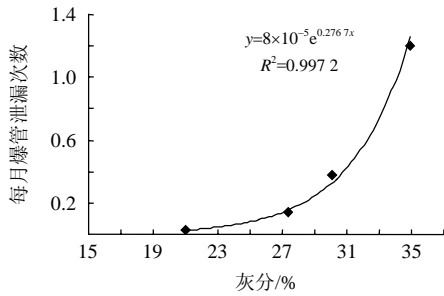


图 3 平均每月爆管泄漏次数与灰分关系  
Fig. 3 Relation between tube explosion frequency and ash content

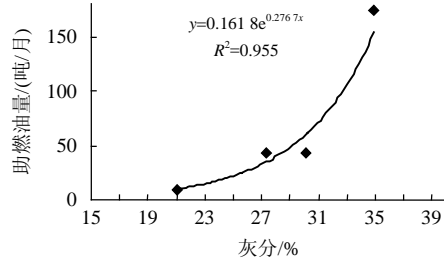


图 4 助燃油量随灰分变化曲线图  
Fig. 4 Relation between combustion-supporting oil and ash content

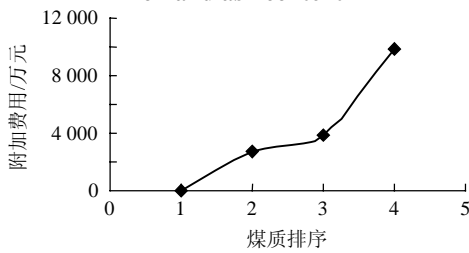


图 5 硫分变化引起的附加费用与煤种的关系  
Fig. 5 Relation between ash content and additional costs from change of sulphur content

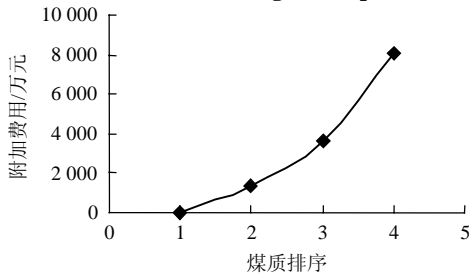


图 6 灰分变化引起的附加费用与煤种的关系  
Fig. 6 Relation between coal quality and additional costs from ash content

为 0。从图中可以看出，灰分越大，附加费用越大。

根据该电厂 4 种试验煤质当前的标煤单价(见表 1)，可得到购煤成本随灰分变化趋势图 7。从图 7 可以见，随着灰分升高，虽然标煤量增大了一些，但由于标煤单价随灰分下降幅度很大，购煤成本还是急剧下降。可见，控制标煤单价是控制综合成本的主要措施。

综合成本为购煤成本与各种附加费用之和，因

此，将图 5~7 叠加得到综合成本与煤质的关系，如图 8 所示。图 8 的横坐标是煤质的排序序号，纵坐标的综合成本是基于式(1)的综合成本分析模型求出的。从图 8 可以看出，燃用劣质煤不一定成本低，燃用优质煤不一定费用高。在当前标煤单价下，3 号煤的综合成本低于设计煤种(1 号煤)，低于煤质较好的 2 号煤，也低于标煤单价很低但煤质很差的 4 号煤种，因此 3 号煤是最经济的煤种。

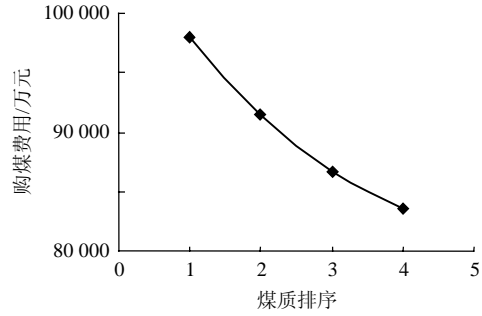


图 7 不同煤种的购煤费用  
Fig. 7 Cost of coal-purchase for different coal

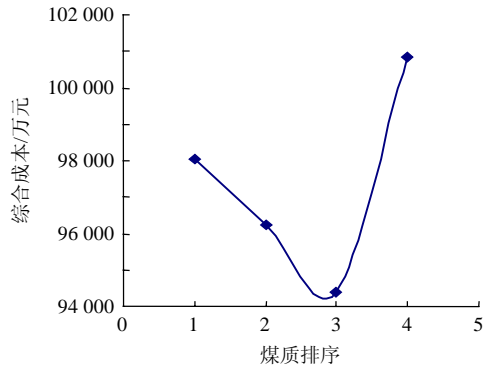


图 8 试验工况不同煤种的综合成本  
Fig. 8 Integrated cost for different coal quality

### 3 煤价变化对电厂经济性影响试验研究

最经济煤质是随着标煤单价的波动而改变的。燃用设计煤时锅炉效率高，但煤价也高，所以往往不是最经济煤质。当优质煤的涨价幅度低于劣质煤的涨价幅度时，劣质煤相对于优质煤的购煤成本的优势减小，最经济煤质向优质煤移动。反之亦然。

图 9 为 2006~2007 年 2 年中 4 个试验煤种在当地发生过的典型标煤单价变化曲线；图 10 为对应图 9 的 7 组标煤单价下由上述试验得到的综合成本计算模型计算得到的 7 组综合成本曲线。图 9 中曲线 1~6 为真实价格曲线，曲线 7 是人为计算得到的基准标煤单价曲线，曲线 7 的计算依据是假设 4 个煤种都按上面试验得到的综合成本模型计算而且综合成本总数相同下求得的标煤单价曲线。对应的图 10 中曲线 7 综合成本为一直线，表明在这

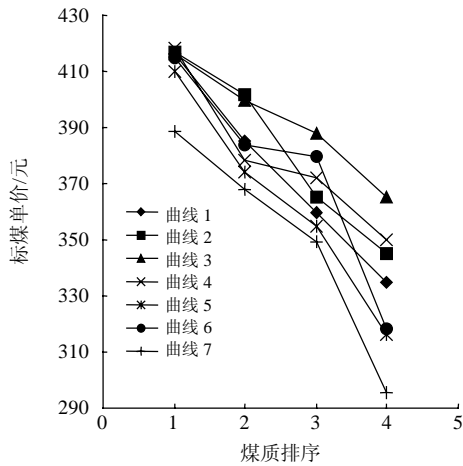


图9 标煤单价随煤质变化图

Fig. 9 Change of coal-price with coal quality

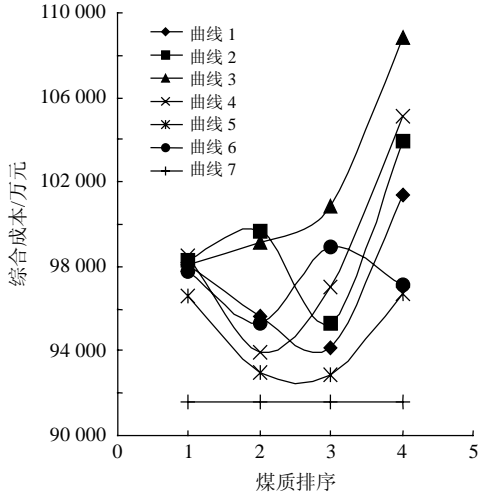


图10 综合成本随煤质变化趋势图

Fig. 10 Change of integrated cost with coal quality

组标煤单价曲线下各试验煤质的综合成本相同,不存在相对最经济煤质,电厂可以选择任一煤种。而图10中其他综合成本曲线呈现不同的规律。

从图9可见,电厂实际燃烧煤种煤价是频繁波动的。下面以曲线7作为基准,讨论标煤单价上涨后的最佳煤质波动情况。

如曲线5所示,2号煤种与3号煤种标煤单价上涨幅度相同,但同时低于最优煤质和最差煤质标煤单价上涨幅度,则最经济煤质介于2号煤和3号煤之间。

若优质煤上涨幅度较大,最经济煤质向劣质煤移动。当较优煤种2号煤的标煤单价上涨幅度仅高于较差煤种3号煤,综合成本的趋势由曲线5演变为曲线1;最经济煤质逐步向3号煤移动。当2号煤种标煤单价的上涨幅度同时大于1号煤种和3号煤种时,综合成本在该段会形成一个峰值,综合成本的趋势演变为曲线2。此时,应尽量避免在该段

购煤,而应选择煤质好于2号煤的设计煤种或最经济煤质3号煤。

若劣质煤上涨幅度较大,最佳煤质向高价煤移动。图9的曲线4描绘了3号煤的上涨幅度大于2号煤的情形,此时,最经济煤质向2号煤质移动。若3号煤种的上涨幅度同时大于2号煤种和4号煤种,综合成本在该段会形成一个峰值,如曲线6所示。此时,应尽量避免在该段购煤,而选择煤质最差的4号煤或煤质较好的2号煤。如果随着煤质的变差,标煤单价的上涨幅度逐步增大,最优煤质即为最经济的煤质,如曲线3所示。

由以上讨论可总结出煤价波动的情况下,最经济煤质的求解模型为

$$A = \{i | \min(c_i - c'_i | i = 1, 2, \dots, n)\} \quad (2)$$

式中:  $A$  为集合,用于存放最经济煤质的煤质序号;  $c'_i$  为第  $i$  号煤的基准标煤单价;  $c_i$  为第  $i$  号煤当前的标煤单价。

## 4 结论

1) 试验发现,随着煤质变差,灰分增加,锅炉检修费用、爆管泄漏次数、助燃油量急剧增加,且与灰分的关系均呈良好的指数关系变化。

2) 针对目前火电厂煤质多变的现状,随着灰分、硫分增大,煤质变差,虽然购煤成本降低,但带来的各种附加成本急剧上升。而购买优质煤又会导致购煤成本大幅增加,将购煤成本与各种附加成本相加构成文中的综合成本。试验数据证明,在当前标煤单价下,试验可求得综合成本最低所对应的当前最经济煤质,其灰分为28.9%,介于设计煤种和劣质煤之间。

3) 最经济的煤种随标煤单价的波动而变化。该文找到一种简单快捷的求取最佳经济煤质的方法:首先以各煤种的综合成本相等时对应的某组标煤单价为基准,当各煤种煤价无序波动时,只需比较不同煤种当时标煤单价与该煤种基准值的差值,差值最小的煤种即为当前最经济煤种。

## 参考文献

- [1] 刘振东, 杨杰. 劣质煤对电站锅炉安全、经济性的影响[J]. 电站系统工程, 2006, 22(6): 23-24.  
Liu Zhendong, Yang Jie. Influence of inferior coal on safe and economic operation of utility boiler[J]. Power System Engineering, 2006, 22(6): 23-24(in Chinese).
- [2] Patterson J H, Hurst H J. Ash and slag qualities of Australian bituminous coals for use in slagging gasifiers[J]. Fuel, 2000, 79(13): 1671-1678.

- [3] Alekhnovich I A N, Artemeva I N V, Bogomolov V V. Slagging properties of coals and allowance for them in the analysis of the possibility of using out-of-design fuel[J]. *Power Technology and Engineering*, 2006, 40(3): 170-174.
- [4] Godoy S M, Lockwood F C, Williamson J. The effect of coal quality on NO<sub>x</sub> emissions: early stages of devolatilization[J]. *Clean Air*, 2002, 3(4): 305-314.
- [5] Niksa S, Helble J, Haradac M, et al. Coal quality impacts on alkali vapor emissions from pressurized fluidized bed coal combustors [J]. *Combustion Science and Technology*, 2001(165): 229-247.
- [6] 杨冬, 路春美, 王永征. 不同种类煤粉燃烧NO<sub>x</sub>排放特性试验研究[J]. *中国电机工程学报*, 2007, 27(5): 18-21.  
Yang Dong, Lu Chunmei, Wang Yongzheng. Experimental study on the characteristics of NO<sub>x</sub> emission with different pulverized coal combusting[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2007, 27(5): 18-21(in Chinese).
- [7] Banerjee D, Hirani M, Sanyal S K. Coal-quality deterioration in a coal stack of a power station[J]. *Applied Energy*, 2000, 66(3): 267-275.
- [8] Sarah M M, James C H. Impact of coal properties on coal combustion by-product quality: examples from a Kentucky power plant [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2004, 59(3-4): 153-169.
- [9] Chundnovsky B. Prediction of furnace and boiler performance: coal quality factor[C]. *Proceeding of the International Technical Conference on Coal Utilization & Fuel Systems*, 2002, 2(27): 979-989.
- [10] Stephenson P. Computer modelling of the combined effects of plant conditions and coal quality on burnout in utility furnaces[J]. *Fuel*, 2007, 86(4): 2026-2031.
- [11] Carpenter A M. Coal quality assessment the validity of empirical tests[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2004, 57(3-4): 283.
- [12] Dong Xiuchen. Study on new control method for boiler combustion system[C]. *Proceedings of the 6<sup>th</sup> World Congress on Intelligent Control*, Dalian, 2006.
- [13] Ma Fangqing, Liu Yunxia. Quality control of coal jigging in a coal-preparing plant using MEBML method[C]. *International Conference on Control And Automation*, Budapest, 2005.
- [14] 闫顺林, 胡三高, 徐鸿, 等. 火电机组热经济性分析的统一物理模型和数学模型[J]. *中国电机工程学报*, 2008, 28(23): 37-41.  
Yan Shunlin, Hu Sangao, Xu Hong, et al. Research on the unified physical model and mathematic model of heat-economic analysis for the coal-fired power unit[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2008, 28(23): 37-41(in Chinese).
- [15] Liao Yanfen, Wu Changhong, Ma Xiaoqian. New hybrid optimization modeling for power coal blending[C]. *Proceeding of 4<sup>th</sup> International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, Guangzhou, 2005.
- [16] 刘强. 定功率下喷水减温对机组热经济性影响的数学模型[J]. *中国电机工程学报*, 2008, 28(26): 19-23.  
Liu Qiang. Mathematical model for the influence of spray desuperheating on thermal economy under conditions of constant power output[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2008, 28(26): 19-23(in Chinese).
- [17] Zhou Junhu, Shen Binbin, Chen Yinbiao, et al. Research on boltzman optimization model for coal blend based on genetic algorithm [J]. *Power Engineering*, 2003, 23(4): 2598-2602.
- [18] 阎维平, 陈吟颖, 邢德山, 等. 电站煤粉锅炉掺烧强结渣煤的混煤结渣性能研究[J]. *中国电机工程学报*, 2006, 26(14): 93-97.  
Yan Weiping, Chen Yinying, Xing Deshan, et al. Performances of pulverized-coal boilers burning heavy slagging blending coals [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2006, 26(14): 93-97(in Chinese).
- [19] 熊杰, 张超, 赵海波, 等. 基于热经济学结构理论的电站热力系统全局优化[J]. *中国电机工程学报*, 2007, 27(26): 65-71.  
Xiong Jie, Zhang Chao, Zhao Haibo, et al. Global optimization of thermal power system based on structure theory of thermoeconomics [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2007, 27(26): 65-71(in Chinese).
- [20] Sharma M K, Chaudhuri A J, Prasad S, et al. Development of new coal blend preparation methodologies for improvement in coke quality[J]. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 2007, 27(1-3): 57-77.
- [21] 朱永强, 周永刚, 赵虹. 提高燃煤发热量对电厂综合经济性影响的试验研究[J]. *电站系统工程*, 2005, 21(5): 7-9.  
Zhu Yongqiang, Zhou Yonggang, Zhao Hong. Experimental research on increasing coal's calorific value impact the power plant's integrate economy[J]. *Power System Engineering*, 2005, 21(5): 7-9(in Chinese).
- [22] 周永刚, 赵虹, 卢广法, 等. 煤种综合经济性的试验研究[J]. *热力发电*, 2004, 33(5): 4-8.  
Zhou yonggang, Zhao Hong, Lu Guangfa, et al. Test and study on comprehensive economic aspects of coal sorts[J]. *Thermal Power Generation*, 2004, 33(5): 4-8(in Chinese).
- [23] 王运民, 李录平, 潘维加. 燃煤电厂运行经济性综合评价指标的研究[J]. *长沙理工大学学报: 自然科学版*, 2006, 3(1): 47-51.  
Wang Yunmin, Li Luping, Pan Weijia. Comprehensive evaluation index of economical operation in coal-fired power plant[J]. *Journal of Changsha University of Science & Technology: Natural Science Edition*, 2006, 3(1): 47-51(in Chinese).
- [24] 王晋一. 火电厂掺烧非设计煤种安全经济性分析[J]. *热力发电*, 2006, 33(12): 25-29.  
Wang Jinyi. Analysis of safety and economic behavior for blend-firing with non-designed coal sort[J]. 2006, 33(12): 25-29(in Chinese).



谭厚章

收稿日期: 2008-12-03。

作者简介:

谭厚章(1965—), 男, 副教授, 主要从事火电厂煤洁净燃烧、燃烧污染物生成与控制技术研究, tanhz@mail.xjtu.edu.cn;

苗杨(1984—), 女, 硕士研究生, 主要从事火电厂燃煤经济性研究。

(编辑 张媛媛)