

# 基于模糊集合配煤方法预测焦炭性能

李 东,郝静远

(西安思源学院 能源及化工大数据研究中心,陕西 西安 710038)

**摘要:**为提高焦炭性能预测的精确度进而达到科学配煤炼焦,基于阿莫索夫-夏皮洛煤岩分析提出模糊集合配煤方法,根据活性组分与惰性组分的归类,利用在不同镜质组反射率条件下的最佳活惰比图与煤的变质程度、惰性组分和镜质组反射率的相互关系图,定义了类强度指数集合  $PSI$  和类组分平衡指数集合  $PCBI$ ,给出了从集合元素计算强度指数  $SI$  与组分平衡指数  $CBI$  的计算公式。研究结果表明:模糊集合配煤方法可以根据实测数据回归预测焦炭性能,根据 55 组数据回归结果,焦炭反应性  $CRI$  最大相对误差 4.8%,平均相对误差 1.6%。根据焦炭性能回归方程可做出不同强度指数  $SI$  与组分平衡指数  $CBI$  的等焦炭性能图,为预测焦炭性能提供了一种新方法。

**关键词:**焦炭性能;配煤;类强度指数;类组分平衡指数;等焦炭性能图

中图分类号:TQ520.1 文献标志码:A 文章编号:0253-2336(2017)10-0213-05

## Prediction of coke properties based on fuzzy set coal blending

LI Dong, HAO Jingyuan

(Energy & Chemical Engineering Research Center, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710038, China)

**Abstract:** In order to predict coke properties, then to blend coals for coking, based on Ammosov-Shapiro coal petrographic analytical method, the fuzzy set coal blending method was put forward. The classification of activity component and inert component has been used. Figures of ‘Optimum ration of reactive to inert for each vitrinite type’ and ‘Relationship of rank index, Inert and vitrinite type of coal’ have been adopted. Sets of pseudo strength index  $PSI$  and pseudo component balance index  $PCBI$  have been created. The calculation formula of elements and the transformation from elements to strength index  $SI$  and component balance index  $CBI$  have been defined. The study show that the linear additive characterization of coal macerals through  $PSI$  could be used to regress and predict the coke quality. According to the results of 55 data regression, the maximum relative error of coke reactivity index  $CRI$  is 4.8%, the average relative error is 1.6%. The drawings of four iso-coke properties have been attained. Both the regression equation and the drawing of iso-coke property can be used to predict the coke property.

**Key words:** coke properties; coal blending; pseudo strength index; pseudo component balance index; iso-coke properties drawing

## 0 引言

煤炭炼焦是一个复杂的过程,当炼焦工艺和焦炉设备都不变的情况下,参配煤性质和配比就决定了生产焦炭的热性能和冷性能。回顾国内炼焦配煤的方法,可以看出炼焦配煤的分析基水分、灰分、挥发分、发热量等理论值计算是基于配煤组分性质是线性可加的。焦炭的热性能和冷性能与参与配煤的各自成因(显微组分及含量)和各自变质程度(镜质组反射率)都有关。煤的镜质组反射率是煤岩学定

量研究煤变质程度的重要指标<sup>[1-4]</sup>,并用于煤炭分类、指导煤炭加工利用等方面<sup>[5-7]</sup>。而煤的显微组分及含量也借助煤岩显微镜能较为准确分类和定量测量,并用于炼焦配煤<sup>[8-9]</sup>,如煤岩反射率与煤黏结性<sup>[10]</sup>,煤岩配煤和焦炭强度的相互关系等<sup>[11]</sup>。对于煤岩配煤的原理,国内焦化界首推阿莫索夫-夏皮洛法(又称  $CBI-SI$  法,简称阿-夏法)。阿-夏法是根据美国用煤特性得到的,在应用时有其特定环境。阿-夏法是将煤的显微组分种类、含量和镜质组反射率分布结合的煤岩显微组分分析方法<sup>[12-14]</sup>。

收稿日期:2017-05-08;责任编辑:代艳玲 DOI:10.13199/j.cnki.cst.2017.10.036

作者简介:李 东(1953—),男,广东梅州人,教授,博士。Tel:18149051953, E-mail: zuizixuan123@163.com

引用格式:李 东,郝静远.基于模糊集合配煤方法预测焦炭性能[J].煤炭科学技术,2017,45(10):213-217.

LI Dong, HAO Jingyuan. Prediction of coke properties based on fuzzy set coal blending [J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(10): 213-217.

阿-夏法根据煤的显微组分在成焦过程中的行为和作用,将煤的显微组分分为活性组分和惰性组分,认为这种特殊的结合可以反映由此煤炼成焦炭的性质,并用焦炭冷机械强度来检测。为实现科学配煤炼焦,笔者基于阿-夏法提出模糊集合配煤方法,以提高焦炭性能预测精度。

## 1 基于阿-夏法的模糊集合配煤方法

任何炼焦配煤方法和实践必须能够解决焦化厂里相互耦合的 3 个问题:①精确预测焦炭性能;②有效管理焦化煤场;③科学计算配煤比例。精确预测焦炭性能是前提,要做到这一点,必须收集一定量的数据回归得到煤岩显微组分与焦炭性能的关系,这需要计算强度指数和组分平衡指数,但科学配煤却是目的和经济效益之所在,科学计算配煤必须用到类强度指数集合和类组分平衡指数集合。

笔者所讨论的模糊集合配煤方法是基于阿-夏法<sup>[15~19]</sup>,利用活性组分和惰性组分,采用在不同镜质组反射率条件下的最佳活惰比图和煤的变质程度、惰性组分和镜质组反射率的相互关系图,定义两组集合:类强度指数集合  $PSI_i$  和类组分平衡指数集合  $PCBI_i$ ,其计算式分别为

$$PSI_i = \frac{a_i x_i}{\sum_{i=0.3}^{2.1} x_i} = \frac{a_i x_i}{R} (1 + R) \quad (1)$$

式中: $x_i$  为反射率 0.3%~2.1% 时活性组分的含量; $a_i$  为在反射率组型为  $i$ 、活性组分含量为  $x$  时焦炭的强度指数; $R$  为煤岩显微组分的活惰比,定义为活性组分(镜质组+壳质组)与惰性组分(煤岩显微组分-活性组分)质量之比。

$$PCBI_i = \frac{\frac{x_i}{b_i}}{100 - \sum_{i=0.3}^{2.1} x_i} = \frac{x_i}{b_i} (1 + R) \quad (2)$$

表 1  $SI$ 、 $CBI$  计算结果与焦炭性能实测结果

Table 1 Calculated results of  $SI$ 、 $CBI$  and measured results of coke properties

项目	$SI$	$CBI$	$M_{40}$	$M_{10}$	$CRI$	$CSR$
最小值	4.75	0.89	86.50	5.10	26.00	64.79
最大值	5.69	1.32	88.90	5.80	28.00	67.58
平均值	5.16	1.07	88.43	5.38	26.85	66.39

式中, $b_i$  为反射率组型为  $i$  时最佳活惰比。

方程(1)和方程(2)中的  $a_i$  和  $b_i$ ,可以根据在不同镜质组反射率条件下的最佳活惰比图和煤的变质程度、惰性组分和镜质组反射率的相互关系图计算得到。

根据强度指数  $SI$  的定义,其与类强度指数集合的关系为

$$SI = \frac{\sum_{i=0.3}^{2.1} a_i x_i}{\sum_{i=0.3}^{2.1} x_i} = \frac{\sum_{i=0.3}^{2.1} PSI_i}{\sum_{i=0.3}^{2.1} x_i} \quad (3)$$

根据组分平衡指数  $CBI$  的定义,其与类组分平衡指数集合  $PCBI$  的关系为

$$CBI = \frac{100 - \sum_{i=0.3}^{2.1} x_i}{\sum_{i=0.3}^{2.1} \frac{x_i}{b_i}} = \frac{1}{\sum_{i=0.3}^{2.1} PCBI_i} \quad (4)$$

从上述分析可知:从煤岩的镜质组反射率分布和活惰比既可计算出 2 个集合(类强度指数集合、类组分平衡指数集合),也可计算出 2 个数值(强度指数、组分平衡指数);2 个集合用于科学计算配煤,类似于解线性方程组;2 个数用于焦炭性能预测。

## 2 数据来源和要求

所有入炉煤的煤岩数据,实测镜质组反射率分布和活惰比,以及相应的焦炭性能指标都是云南煤业能源股份有限公司安宁分公司的数据。利用模糊集合配煤的思路,先计算类强度指数集合  $PSI_i$  和类组分平衡指数集合  $PCBI_i$  两个集合中的元素,再计算强度指数  $SI$  和组分平衡指数  $CBI$ 。表 1 列出了计算所得强度指数  $SI$  与组分平衡指数  $CBI$ ,4 项焦炭性能(焦炭反应性  $CRI$ 、焦炭反应后强度  $CSR$ 、焦炭耐磨强度  $M_{10}$  和焦炭抗碎强度  $M_{40}$ )最大值、最小值和平均值(共 55 组)。

对 55 组数据有 4 个要求:①有效性:煤岩性能

必须包括镜质组反射率分布、显微组分种类和含量

(活惰比),缺一无效;②对应性:煤岩与焦炭要一一对应,特别注意的是数据要来源于同一个焦炉;③稳定性:只讨论因煤种、比例变化对焦炭性质的影响,而其他炼焦条件(如炉温、升温速度、顶装焦炉、捣固焦炉等)以及配煤的水分、密度和粒度等,按照原有工艺操作的要求进行;④统计性:初始满足条件的数据大于15组,以后可不断积累。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 回归方程的选择与判定<sup>[15-16]</sup>

以强度指数  $SI$  和组分平衡指数  $CBI$  为自变量,

表 2 4 种预测焦炭性能的回归方程均方根误差

Table 2 Root-mean-square-error of regression equation for four kinds of coke performance prediction

二元多项式回归方程	均方根误差			
	$CSR$	$CRI$	$M_{10}$	$M_{40}$
线性二元多项式	0.750	0.564	0.133	0.469
纯二次二元多项式	0.759	0.573	0.133	0.461
交叉二元多项式	0.756	0.569	0.134	0.459
完全二次二元多项式	0.732	0.566	0.134	0.465

表 3 焦炭性能预测回归方程

Table 3 Regression equations of coke properties prediction

焦炭性能	回归方程	方程编号
焦炭反应性	$CRI = 96.183 - 42.308SI + 74.014CBI - 26.593SI \times CBI + 6.9376SI^2 + 27.716CBI^2$	方程(5)
焦炭反应后强度	$CSR = -40.949 + 66.327SI - 118.9CBI + 37.7SI \times CBI - 10.411SI^2 - 33.565CBI^2$	方程(6)
焦炭耐磨强度	$M_{10} = 4.5867 + 0.2586SI - 0.5097CBI$	方程(7)
焦炭抗碎强度	$M_{40} = 68.696 + 3.081SI + 22.559CBI - 3.6578SI \times CBI$	方程(8)

#### 3.2 焦炭性能回归方程验证

现以焦炭反应性  $CRI$  为例,说明如何对焦炭反应性  $CRI$  回归方程进行验证。

1) 验证方法之一是图解法。按方程(5)可以做出在一定的  $SI$  和  $CBI$  数值区间的  $CRI$  曲面,结果如图 1 所示。将这 55 组计算的  $SI$  和  $CBI$  值、实测  $CRI$  值加入曲面,如果这些点与曲面吻合很好,则说明该回归方程对于实测值是合适的。

由图 1 可知,焦炭反应性回归方程对于所实测焦炭反应性是合适的。同样可以得出组分平衡指数、强度指数分别与焦炭反应后强度、焦炭抗碎强度、焦炭耐磨强度理论曲面与实测值比较。虽然图解法的优点是比较直观,但缺点是由于坐标的相对大小以及旋转角度的变化,很难和实测值进行量化比较。

2) 验证方法之二是计算法。将这 55 组的  $SI$  和

以某一焦炭性能为因变量作图,则回归方程应选择二元多项式。最常用的二元多项式回归方程有二类 4 个,其中纯二次二元多项式和完全二次二元多项式的 2 个自变量的相互关系是类似圆或椭圆的封闭曲线,而线性二元多项式和交叉二元多项式的 2 个自变量的相互关系则是不封闭曲线。

根据统计学计算的规范,先将 4 个二元多项式回归方程都进行计算。比较均方根误差的大小来判定回归结果。4 种预测焦炭性能的二元多项式的均方根误差见表 2。预测焦炭性能的回归方程见表 3。

表 2 4 种预测焦炭性能的回归方程均方根误差

Table 2 Root-mean-square-error of regression equation for four kinds of coke performance prediction

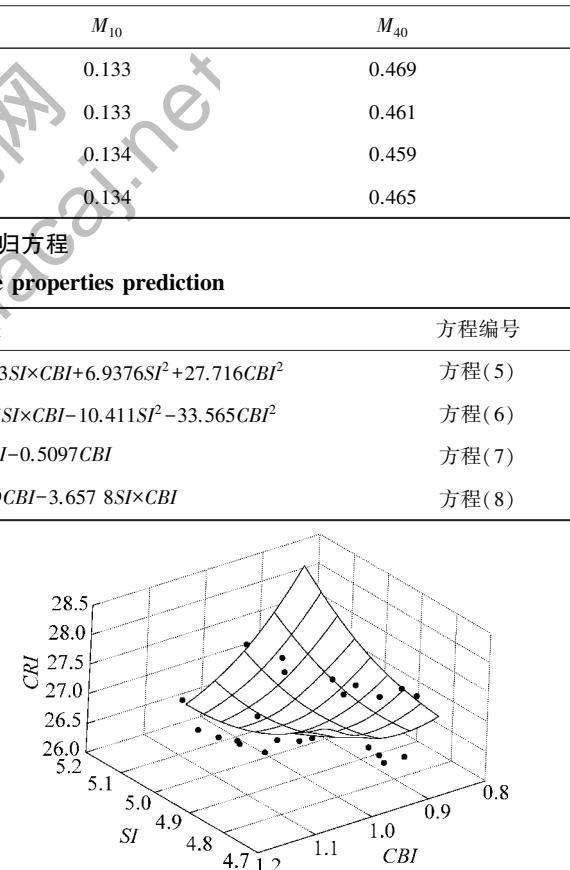


图 1 组分平衡指数、强度指数与焦炭反应性理论曲面与实测值比较

Fig. 1 Comparison of theoretical surface and measured value of  $SI-CBI-CRI$

$CBI$  值代入方程(5)计算得出理论  $CRI$  值,或称为回归值,  $CRI$  实测值与理论值的绝对差值与  $CRI$  实测值的比值即为相对误差。4 个焦炭性能计算值的相对误差结果见表 4。

表4 焦炭性能计算值的相对误差

Table 4 Relative error value of four coke properties calculated value

项目	相对误差/%			
	$M_{40}$	$M_{10}$	CRI	CSR
最小值	0	0	0	0
最大值	2.20	6.40	4.80	2.80
平均值	0.30	1.90	1.60	0.80

由表4可知,4个所选定的焦炭性能回归方程对于所实测焦炭性能值是合适的,如焦炭反应性CRI最大相对误差为4.8%,平均相对误差仅为1.6%。

### 3.3 组分平衡指数、强度指数与等焦炭性能曲线

现仍以焦炭反应性CRI为例,说明如何根据相应的回归方程做组分平衡指数、强度指数与等焦炭反应性CRI曲线。

1)假设焦炭反应性 $CRI=31$ ,则方程(5)为  

$$65.183-42.308SI+74.014CBI-26.593SI \times CBI+6.9376SI^2+27.716CBI^2=0 \quad (9)$$

2)取 $CBI=a$ ,方程(9)为

$$6.9376SI^2-(42.308SI+26.593a) \times SI+(65.183+74.014a+27.716a^2)=0 \quad (10)$$

3)方程(10)是一个一元二次方程,有标准的解法。有一个 $a$ 值,则有2个是实数且大于零 $SI$ 值。可以得到等焦炭反应性 $CRI=31$ 时,系列 $CBI$ 所对应的 $SI$ ,因此可以做出一条组分平衡指数、强度指数与等焦炭反应性曲线。

4)重复上述步骤,则可以得到另一组等 $CRI$ 值曲线。

按照上述步骤得到的组分平衡指数、强度指数与等焦炭反应性曲线如图2所示。

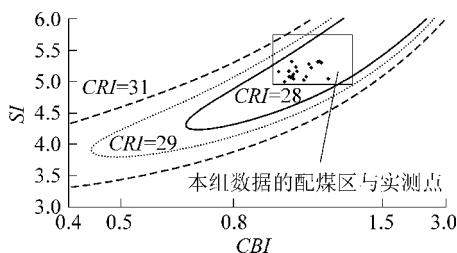


图2 组分平衡指数、强度指数与等焦炭反应性关系

Fig. 2 Relationship of SI, CBI and CRI for coke

图2中的矩形区为强度指数 $SI=4.75\sim5.69$ 与组分平衡指数 $CBI=0.89\sim1.32$ 的区域,将其定义为“本组数据的配煤区”。这个区域与参考文献[20]中的“各国常用配煤参数及其焦炭质量预测方法”所列 $SI=3.8\sim4.5$ 与 $CBI=0.8\sim1.4$ 有部分吻合。根

据同样方法,可以画出组分平衡指数、强度指数分别与等焦炭反应后强度、等焦炭抗碎强度、等焦炭耐磨强度的关系,分别如图3—图5所示。

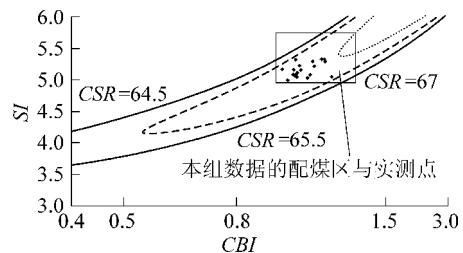


图3 组分平衡指数、强度指数与等焦炭反应后强度关系

Fig. 3 Relationship of SI, CBI and CSI for coke

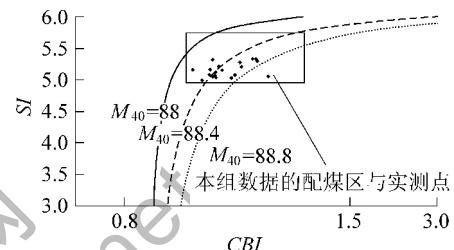


图4 组分平衡指数、强度指数与等焦炭抗碎强度关系

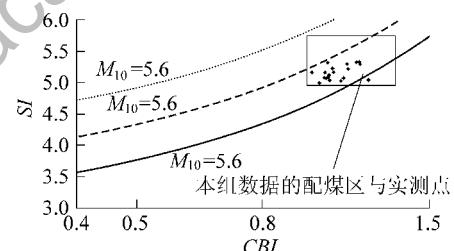
Fig. 4 Relationship of SI, CBI and M<sub>40</sub> for coke

图5 组分平衡指数、强度指数与等焦炭耐磨强度关系

Fig. 5 Relationship of SI, CBI and M<sub>10</sub> for coke

### 3.4 焦炭性能精确预测

根据入炉煤的镜质组反射率分布、显微组分和含量(活惰比)计算得到组分平衡指数CBI和强度指数SI后,有2种方法可以预测焦炭性能。现以焦炭反应性CRI为例,说明如何对入炉煤生产的焦炭反应性CRI进行预测。

1)根据已得到相应焦炭反应性CRI的回归方程预测焦炭性能。利用原先用于预测焦炭质量的煤岩数据,结合实测的焦炭质量,得到新的回归方程。

2)根据已得到的组分平衡指数、强度指数与等焦炭反应性CRI关系图,可判定在特定的组分平衡指数CBI和强度指数SI坐标下,焦炭反应性CRI值。

## 4 结语

模糊集合配煤法是基于阿-夏法而推出的,只

要收集一定量符合要求的数据,就可以回归得到煤显微组分与焦炭性能的关系。煤岩性能必须包括镜质组反射率分布、显微组分和含量(活惰比),缺一不可。根据均方根误差的大小,选定合适的组分平衡指数-强度指数-焦炭性能的回归方程,或根据相应的组分平衡指数、强度指数、等焦炭性能曲线即可预测焦炭性能。

#### 参考文献(References):

- [1] 周师庸,陈实.新疆钢铁公司煤岩配煤研究[J].燃料与化工,1985,16(2):4-13.  
ZHOU Shiyong, CHEN Shi. Study on the coal petrography for coal blending in Xinjiang iron and steel company [J]. Fuel & Chemical Processes, 1985, 16(2): 4-13.
- [2] 宋旗跃,白向飞,于景峰.煤岩学在焦化生产中应用现状探讨[J].冶金能源,2000(2):7-11.  
SONG Qiyue, BAI Xiangfei, YU Jingfeng. Discussion on the applying status of coal petrography in coking production [J]. Energy for Metallurgical Industry, 2000(2): 7-11.
- [3] 贺小平,邱红,胡中元,等.理论计算法确定炼焦配煤方案的应用[J].燃料与化工,2014,45(2):11-13.  
HE Xiaoping, QIU Hong, HU Zhongyuan, et al. Determination of coal blending option by theoretical calculation [J]. Fuel & Chemical Processes, 2014, 45(2): 11-13.
- [4] 白向飞.焦化生产中煤岩学应用现状及对策分析[J].煤质技术,2009(2):1-3.  
BAI Xiangfei. Application status and countermeasure analysis of coal petrology in coking production [J]. Coal Quality Technology, 2009(2): 1-3.
- [5] 燕瑞华,高志军,耿印权,等.镜质组反射率分布在配煤炼焦中的应用[J].燃料与化工,2001,32(5):227-229.  
YAN Ruihua, GAO Zhijun, GENG Yinquan, et al. Application of Vitrinite reflectance distribution figure in coal blending and coke-making [J]. Fuel & Chemical Processes, 2001, 32(5): 227-229.
- [6] 张雅茹,徐君,曲恒.炼焦煤镜质组反射率及其分布可加性的研究[J].现代化工,2009,29(S1):59-61.  
ZHANG Yarlt, XU Jun, QU Heng. Research of mean max reflectance and distribution curve of coking coals [J]. Modern Chemical Industry, 2009, 29(S1): 59-61.
- [7] 王方东.煤的镜质组平均最大反射率分布图在炼焦配煤中的应用[J].煤炭加工与综合利用,1998(6):13-14.  
WANG Fangdong. The application of coal average maximum vitrinite reflectance distribution figure in coal blending for coking [J]. Coal Processing and Comprehensive Utilization, 1998(6): 13-14.
- [8] 张代林,姚伯远.确定单种煤中纯活性组分质量的方法[J].燃料与化工,2001,32(6):289-290.  
ZHANG Dailin, YAO Boyuan. Method for determining quality of pure reactive component in single kind of coal [J]. Fuel & Chemical Processes, 2001, 32(6): 289-290.
- [9] 徐兴福,孙宝东,盛建文,等.南钢焦炭质量预测模型研究[J].煤化工,2012(2):32-35.  
XU Xingfu, SUN Baodong, SHENG Jianwen, et al. Study on the coke quality prediction model [J]. Coal Chemical Industry, 2012 (2): 32-35.
- [10] 胡德生.煤岩反射率在宝钢的应用[J].燃料与化工,2001,32(2):67-69.  
HU Desheng. Application of reflectance of coal macerals at Baosteel [J]. Fuel & Chemical Processes, 2001, 32(2): 67-69.
- [11] 叶道敏,肖文钊,罗俊文.煤岩配煤和焦炭强度的预测[J].燃料与化工,1998,29(5):233-236.  
YE Daomin, XIAO Wenzhao, LUO Junwen, et al. Coal petrology blending prediction of coal strength [J]. Fuel & Chemical Processes, 1998, 29(5): 233-236.
- [12] SCHAPIRO N, GRAY R J, EUSNER G R. Recent development in coal petrography [C]. Proceedings Blast Furnace, Coke Oven and Raw Materials Committee, Metallurgical Society Conference, Dallas, AIME, 1961: 89-112.
- [13] SCHAPIRO N, GRAY R J. Petrographic classification applicable to coals of all ranks [C]. Proceedings of the Illinois Mining Institute Annual Meeting, 1960: 83-97.
- [14] SCHAPIRO N, GRAY R J. The use of coal petrography in coke making [J]. Journal of the Institute of Fuel, 1964, 11(30): 234-242.
- [15] 张学梅,程实,魏亚玲,等.模糊集合度量配煤方法在昆钢焦炭性能预测的应用[J].煤质技术,2015(3):1-5.  
ZHANG Xuemei, CHENG Shi, WEI Yaling, et al. The application of coke performance prediction of Kunming steel using coking coals blending methods of fuzzy sets metrics [J]. Coal Quality Technology, 2015(3): 1-5.
- [16] 李东,张昆钢,程实,等.模糊集合度量配煤方法在数据处理及昆钢煤场管理改进的应用[J].煤质技术,2015(2):33-38.  
LI Dong, ZHANG Kungang, CHENG Shi, et al. The application of fuzzy set methods for coking coal blending on data processing and coal storage field management in Kunming steel [J]. Coal Quality Technology, 2015(2): 33-38.
- [17] 魏亚玲,王震,李东,等.模糊集合度量配煤方法用于昆钢焦炭配煤计算比例[J].煤质技术,2015(4):34-38.  
WEI Yaling, WANG Zhen, LI Dong, et al. Coal blending proportion calculation for Kunming Steel using coal blending method of fuzzy set measure [J]. Coal Quality Technology, 2015(4): 34-38.
- [18] 李东,张学梅,程实,等.模糊集合在煤变质程度与煤层气预测中的应用[J].山西科技,2015 30(3):86-88.  
LI Dong, ZHANG Xuemei, CHENG Shi, et al. The application of fuzzy sets in forecasting coal metamorphic degree and coal seam gas [J]. Shanxi Science and Technology, 2015 30(3): 86-88.
- [19] 张学梅,魏亚玲,程实,等.宁夏宝丰能源集团80焦性能预测[J].煤质技术,2017(2):4-8.  
ZHANG Xuemei, WEI Yaling, CHENG Shi, et al. The forecast of 80 coke properties of Ningxia Baofeng Energy Group [J]. Coal Quality Technology, 2017(2): 4-8.
- [20] 周敏,王泉清,马名杰.焦化工艺学[M].徐州:中国矿业大学出版社,2011:24-26.