

# 基于模糊非线性回归的煤炭发热量预测研究

王江荣<sup>1</sup>, 赵振学<sup>1</sup>, 罗资琴<sup>2</sup>, 文 晖<sup>1</sup>

(1. 兰州石化职业技术学院 信息处理与控制工程系, 甘肃 兰州 730060; 2. 兰州石化职业技术学院 石油化学工程系, 甘肃 兰州 730060)

**摘 要:**针对经典线性回归模型无法反映变量间的非线性关系, 不适宜预测有模糊数的煤炭发热量的问题, 提出了一种基于三角模糊数的多元非线性回归的煤炭发热量预测模型。以我国新疆伊犁地区煤炭工业分析为建模数据和模型检验数据, 将计算模糊中心值和模糊幅度值的问题转化为约束非线性优化问题, 采用 MATLAB 优化工具箱求解。最后对比分析了模糊非线性回归、经典线性回归、BP (Back Propagation) 神经网络及支持向量机回归 4 种模型对测试煤样发热量的预测结果。结果表明, 模糊非线性回归模型的线性拟合优度值为 0.9997, 调整后的非线性拟合优度值为 0.9838, 均方误差为 0.4473; 测试煤样的平均相对误差为 0.0203, 80% 的测试煤样模糊隶属度大于 0.5。模糊非线性回归模型具有很高的精确度和可靠性, 可用来预测预报煤炭发热量。

**关键词:**三角模糊数; 多元非线性回归; 煤炭发热量; 模糊非线性

**中图分类号:** TQ533.4; TD849 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-6772(2015)01-0081-05

## Prediction research of calorific value of coal based on fuzzy nonlinear regression

WANG Jiangrong<sup>1</sup>, ZHAO Zhenxue<sup>1</sup>, LUO Ziqin<sup>2</sup>, WEN Hui<sup>1</sup>

(1. Department of Information Processing and Control Engineering, Lanzhou Petrochemical College of Vocational Technology, Lanzhou 730060, China;

2. Department of Petroleum Chemical Engineering, Lanzhou Petrochemical College of Vocational Technology, Lanzhou 730060, China)

**Abstract:** In order to cover the shortages of the classical linear regression model, which wasn't able to reflect the nonlinear relationship between variables and forecast the coal calorific value with fuzzy numbers accurately, a kind of multivariate nonlinear regression prediction model of coal calorific based on triangular fuzzy numbers was put forward. The proximate analysis of coal in Yili of Xinjiang was adopted as modeling data and model test data. The calculation of fuzzy center value and fuzzy amplitude value was converted to constrained nonlinear optimization, then the equation was solved with the MATLAB optimization toolbox. The predicting outcomes of calorific value of fuzzy nonlinear regression, traditional linear regression, BP neural network and SVR (support vector regression) were compared. The results showed that, the figure of merit of fuzzy nonlinear regression model was 0.9997, after adjustment, it was 0.9838, the mean square error was 0.4473. The average relative error of coal samples was 0.0203, the fuzzy membership degree of 80% coal samples were above 0.5. Because of the high accuracy and reliability, the fuzzy nonlinear regression model could be used to predict the coal calorific value.

**Key words:** triangular fuzzy number; multiple nonlinear regression; coal calorific value; fuzzy nonlinear regression

## 0 引 言

煤炭发热量是煤质研究、煤质评价及煤炭分类的重要指标, 也是动力煤或其他用煤计价的重要依据<sup>[1-3]</sup>。为充分了解煤炭性质, 有效利用煤炭资源,

科学合理地为煤计价, 必须及时、准确地预测和检测煤炭发热量。目前的预测预报方法主要是利用工业分析和元素分析指标, 建立煤的发热量的线性回归预测模型<sup>[4-8]</sup>。此类经验公式可快速估算煤的发热量, 但适用范围小, 具有一定局限性, 若盲目使用, 误

收稿日期: 2014-11-11; 责任编辑: 白娅娜 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.2015.01.019

基金项目: 甘肃省科技厅资助项目(1204GKCA004); 甘肃省财政厅专项资金立项资助项目(甘财教[2013]116号)

作者简介: 王江荣(1966—), 男, 甘肃静宁人, 教授, 硕士, 从事智能算法、数值计算和控制理论与应用方面的研究。E-mail: lzshwj@163.com

引用格式: 王江荣, 赵振学, 罗资琴, 等. 基于模糊非线性回归的煤炭发热量预测研究[J]. 洁净煤技术, 2015, 21(1): 81-85.

WANG Jiangrong, ZHAO Zhenxue, LUO Ziqin, et al. Prediction research of calorific value of coal based on fuzzy nonlinear regression[J]. Clean Coal Technology, 2015, 21(1): 81-85.

差较大。煤的发热量是煤中碳、氢、氧、硫等元素的综合反映,与水分、灰分、挥发分、固定碳等因素呈非线性关系,采用线性模型表征非线性关系并不科学<sup>[9]</sup>。另外,工业分析指标中水分、灰分、挥发分之间的界线并不明确,存在着一定的模糊性,导致采集到的历史数据往往不尽全面还带有模糊性。为解决带有模糊信息且与影响因素具有非线性关系的煤发热量预测问题,笔者提出了一种模糊非线性预测法,该方法在一定程度上克服了经典线性回归方法的不足,预测结果可以不是一个具体数值,而是相关量的取值范围,有效扩大了相关量的适用范围,避免了因具体数值不准确导致错误判断的缺陷。与其他诸如神经网络<sup>[10]</sup>、支持向量机<sup>[11-12]</sup>等非线性煤发热量预测模型相比,模糊非线性预测法模型结构简单,可操作性强,易于记忆和使用,具有借鉴价值。

### 1 模型建立

煤的工业分析主要有灰分( $A_{ad}$ )、水分( $M_{ad}$ )、挥发分( $V_{ad}$ )及固定碳( $FC_{ad}$ )。固定碳通常是根据水分、灰分、挥发分的测量值计算得到,不是独立变量,所以在建立预测模型时可不予考虑<sup>[13]</sup>。

#### 1.1 对称三角模糊数

定义  $\tilde{a} = (a - \delta, a, a + \delta)$  是一个对称三角模糊数,其隶属函数为

$$\mu(x) = \begin{cases} 1 - \left| \frac{a-x}{\delta} \right| & (|a-x| \leq \delta) \\ 0 & \text{(其他)} \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $a$  为对称中心,记  $\tilde{a} = (a, \delta)$ ;  $\delta$  为模糊幅度值(简称模糊度),  $\delta > 0$ 。

设  $x_1, x_2, x_3$  和  $y$  分别表示煤炭的灰分、水分、挥发分和发热量的测量值。用  $x_1, x_2, x_3$  预测因变量  $y$  的模糊多元线性回归方程为

$$\tilde{y} = A_0 + A_1x_1 + A_2x_2 + A_3x_3 \quad (2)$$

式中,  $A_0, A_1, A_2, A_3$  为对称模糊数,记作  $A_i = (a_i, \delta_i)$  ( $i=0,1,2,3$ )。拟合值  $\tilde{y}$  与测量值  $y$  之间的偏差  $\varepsilon$  是由这种模糊性引起的。

同经典线性回归一样,模糊多元线性回归中的因变量  $y$  为可取任意实数的连续性变量,这里因变量  $y > 0$ ,若作如下变量

$$Y = \ln \tilde{y} = A_0 + A_1x_1 + A_2x_2 + A_3x_3 \quad (3)$$

则式(3)中  $Y$  的取值范围为  $(-\infty, +\infty)$ ,即将  $y$  的取值范围由  $(0, +\infty)$  变为  $(-\infty, +\infty)$ ,满足了模糊线性回归模型的要求。

将式(3)转化成指数形式

$$\tilde{y} = e^{(A_0 + A_1x_1 + A_2x_2 + A_3x_3)} \quad (4)$$

式(4)为煤炭发热量的模糊非线性回归模型。该模型的特点是自变量之间呈线性关系,而自变量与因变量之间是非线性关系。

用已知测量数组估计  $A_i = (a_i, \delta_i)$  ( $i=0,1,2,3$ ),用于预测其他煤样的发热量。

#### 1.2 测量值的隶属函数

设有  $m$  组测量数据,分别为  $(y_k, x_1^k, x_2^k, x_3^k)$ ,  $k=1,2,3,\dots,m$ ,则  $y_k$  的隶属度函数<sup>[14-15]</sup>为

$$\mu(y_k) = \begin{cases} 1 - \frac{|y_k - e^{a_0 + \sum_{i=1}^3 a_i x_i^k}|}{e^{\delta_0 + \sum_{i=1}^3 \delta_i x_i^k}} & (e^{a_0 + \sum_{i=1}^3 a_i x_i^k} - e^{\delta_0 + \sum_{i=1}^3 \delta_i x_i^k}) \leq y_k \leq (e^{a_0 + \sum_{i=1}^3 a_i x_i^k} + e^{\delta_0 + \sum_{i=1}^3 \delta_i x_i^k}) \\ 0 & \text{(其他)} \end{cases} \quad (5)$$

确定  $(a_i, \delta_i)$  ( $i=0,1,2,3$ ) 的准则是使每个  $\mu(y_k)$  不小于事先给定的  $h_0$  ( $0 < h_0 < 1$ ,在模糊集理论中称“ $h_0$  水平截集”,保证不存在隶属度小于  $h_0$  的  $y_k$ ,这里取  $h_0 = 0.5$ ),且回归函数的模糊性尽可能小( $A_0, A_1, A_2, A_3$  的模糊度总和达到最小),即将确定模糊中心值  $a_i$  和模糊度  $\delta_i$  的问题转化为下列约束优化问题

$$\begin{cases} \min \delta = \sum_{i=0}^3 \delta_i \\ \mu(y_k) \geq h_0 \end{cases} \quad (6)$$

#### 1.3 模型的求解

式(5)和式(6)对应的非线性约束问题为

$$\begin{aligned} \min \delta &= \sum_{i=0}^3 \delta_i \\ \text{s.t.} & \begin{cases} e^{a_0 + \sum_{i=1}^3 a_i x_i^k} - (1 - h_0) e^{\delta_0 + \sum_{i=1}^3 \delta_i x_i^k} \leq y_k \\ e^{a_0 + \sum_{i=1}^3 a_i x_i^k} + (1 - h_0) e^{\delta_0 + \sum_{i=1}^3 \delta_i x_i^k} \geq y_k \\ \delta_i \geq 0 \quad (i=0,1,2,3; k=1,2,3,\dots,m) \end{cases} \end{aligned} \quad (7)$$

式(7)的解为  $a_i, \delta_i$ 。在  $A_i = (a_i, \delta_i)$  中,如果  $a_i \neq 0$  且  $\delta_i = 0$ ,则  $A_i$  为精确数。

## 2 模糊非线性回归模型预测煤炭发热量

### 2.1 数据来源

选用我国新疆伊犁地区具有代表性的40种不

同煤样的工业分析数据<sup>[16]</sup>作为样本,具体见表1。其中前30组数据作为建模煤样,后10组作为测试煤样进行建模预测试验。

表1 伊犁地区煤样工业分析与实测发热量

| 煤样 | $A_{ad}/\%$ | $M_{ad}/\%$ | $V_{ad}/\%$ | $Q_{gr,ad}/(MJ \cdot kg^{-1})$ |
|----|-------------|-------------|-------------|--------------------------------|
| 1  | 2.96        | 4.89        | 36.34       | 29.40                          |
| 2  | 3.92        | 2.81        | 30.62       | 28.72                          |
| 3  | 3.78        | 3.29        | 31.62       | 28.42                          |
| 4  | 4.06        | 8.32        | 27.57       | 26.84                          |
| 5  | 11.33       | 5.96        | 27.52       | 24.44                          |
| 6  | 3.05        | 3.66        | 38.65       | 30.67                          |
| 7  | 5.74        | 7.53        | 28.96       | 26.10                          |
| 8  | 4.04        | 6.40        | 33.02       | 28.18                          |
| 9  | 6.92        | 10.62       | 31.28       | 25.13                          |
| 10 | 4.08        | 5.61        | 27.73       | 28.05                          |
| 11 | 4.03        | 7.78        | 28.15       | 26.94                          |
| 12 | 7.28        | 4.24        | 36.84       | 27.37                          |
| 13 | 4.20        | 2.28        | 36.95       | 29.31                          |
| 14 | 2.39        | 6.50        | 39.09       | 28.57                          |
| 15 | 7.91        | 4.21        | 36.82       | 27.82                          |
| 16 | 10.14       | 7.01        | 28.2        | 25.34                          |
| 17 | 10.96       | 3.30        | 36.34       | 26.92                          |
| 18 | 2.71        | 3.02        | 38.95       | 30.04                          |
| 19 | 3.42        | 4.24        | 38.52       | 29.19                          |
| 20 | 4.84        | 4.53        | 29.30       | 27.85                          |
| 21 | 4.94        | 5.00        | 30.04       | 27.28                          |
| 22 | 5.31        | 4.99        | 29.48       | 27.01                          |
| 23 | 14.19       | 4.28        | 28.26       | 25.20                          |
| 24 | 6.80        | 7.10        | 29.88       | 26.77                          |
| 25 | 7.05        | 7.62        | 32.35       | 25.39                          |
| 26 | 4.15        | 6.53        | 38.04       | 27.83                          |
| 27 | 6.88        | 4.96        | 31.48       | 26.80                          |
| 28 | 6.27        | 4.40        | 29.88       | 27.79                          |
| 29 | 7.44        | 2.46        | 31.36       | 28.31                          |
| 30 | 5.03        | 3.37        | 38.83       | 28.40                          |
| 31 | 6.32        | 6.50        | 32.96       | 26.15                          |
| 32 | 5.68        | 5.92        | 30.47       | 27.04                          |
| 33 | 7.33        | 4.31        | 30.32       | 27.27                          |
| 34 | 4.92        | 5.36        | 33.03       | 26.75                          |
| 35 | 5.88        | 4.72        | 32.00       | 27.15                          |
| 36 | 6.19        | 7.63        | 31.76       | 27.00                          |
| 37 | 6.42        | 5.99        | 32.73       | 25.65                          |
| 38 | 6.29        | 6.00        | 31.44       | 26.99                          |
| 39 | 4.74        | 8.61        | 27.06       | 25.93                          |
| 40 | 11.08       | 3.21        | 36.26       | 26.19                          |

## 2.2 模糊中心值及模糊度计算

根据式(7)定义目标函数  $Fitness = \sum_{i=0}^3 \delta_i$ , 利用表

1前30个煤样数据和MATLAB编写目标函数Fitness的计算程序和非线性约束条件(函数名定义为Nonlinearfunction)计算程序,将参数向量 $[a_0, a_1, a_2, a_3, \delta_0, \delta_1, \delta_2, \delta_3]$ 的下限设置为 $L = [-10, -10, -10, -10, 0, 0, 0, 0]$ ,上限设置为 $U = [10, 10, 10, 10, 1, 1, 1, 1]$ ,参数的初始值取 $X_0 = [3.3460 \quad -0.0106 \quad -0.0131 \quad 0.0030 \quad 0.05 \quad 0.05 \quad 0.05 \quad 0.05]$ ,然后利用MATLAB优化工具箱提供的求解约束最优化问题的函数Fmincon<sup>[17]</sup>完成上述计算,调用命令格式为

$$[\theta, fval] = \text{Fmincon}('fitness', X_0, [], [], [], [], L, U, 'Nonlinearfunction') \quad (8)$$

式中,使目标函数达到最小的一组向量 $\theta$ 为参数的最终估计值;fval为目标函数的最后输出值。计算得到的参数最优估计值为: $\theta = [3.3725 \quad -0.0141 \quad -0.0147 \quad 0.0031 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0.0120]$ ,此时的fval=0.012。将参数估计值代入式(4)得到的煤炭发热量的模糊非线性回归模型为

$$\hat{y} = e^{3.3725 - 0.0141x_1 - 0.0147x_2 + (0.0031, 0.0120)x_3} \quad (9)$$

由式(9)可知,在影响煤炭发热量的工业分析中只有挥发分有较强的模糊性。因此,模型的拟合值或预测值与实际测量值的偏差主要由挥发分的模糊性引起。另外,用模糊中心值为模型系数对建模煤样发热量进行拟合,得到模型线性拟合优度值为 $R^2 = 0.9997$ ,调整后的非线性拟合优度值 $R^2 = 0.9838$ ,模型的均方误差mes=0.4473。因此模型(9)具有很高的精确度和可靠性,可用来预测预报煤炭发热量。

## 2.3 模型测试

将测试煤样(煤样31~40)的3个指标( $A_{ad}$ 、 $M_{ad}$ 、 $V_{ad}$ )代入式(9),得到煤炭发热量的模糊中心预测值和模糊度预测值,结果见表2。

## 2.4 不同模型对比

分别用经典线性回归、BP(Back Propagation)神经网络及支持向量机回归对表1中测试煤样(煤样31~40)的发热量进行预测,结果见表3。

由表3可知,4种模型均取得了理想的预测效果(本文模型的预测结果取中心值)。经典线性回归模型的预测效果很好,但不宜推广,主要是由于煤的发热量与水分、灰分、挥发分、固定碳等因素呈非线性关系,影响因素及统计数据存在一定模糊性。模糊非线性回归模型、BP神经网络及支持向量机均为非线性模型。支持向量机和BP神经网络模型具

有极强的非线性处理能力,但结构复杂,对样本质量要求较高。模糊非线性回归模型结构简单,便于使用和记忆,且自变量之间是线性关系,而这种线性关系与因变量之间又是非线性关系。模糊非线性回归模型的预测结果是一个区间,即存在一个最悲观的下限和一个最乐观的上限,可避免因具体预测

值不准确所导致的错误判断,提高了预测的可靠性。隶属度则反映了预测值接近实际值的程度。由表2可知,80%的预测结果达到了理想程度(隶属度 $\mu(y_k) > 0.5$ )。其他3种模型预测结果均在对应区间 $(\tilde{a}_i - \tilde{\delta}_i, \tilde{a}_i + \tilde{\delta}_i)$ 内。

表2 测试煤样期望输出与预测结果对比

| 煤样 | 发热量测量值/<br>(MJ·kg <sup>-1</sup> ) | 拟合                |                        |                                       |                                       | $\mu(y_k)$ | 相对误差的绝对值 |
|----|-----------------------------------|-------------------|------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|------------|----------|
|    |                                   | 中心值 $\tilde{a}_i$ | 模糊度 $\tilde{\delta}_i$ | 下限 $(\tilde{a}_i - \tilde{\delta}_i)$ | 上限 $(\tilde{a}_i + \tilde{\delta}_i)$ |            |          |
| 31 | 26.15                             | 26.8845           | 1.4852                 | 25.3993                               | 28.3697                               | 0.5055     | 0.0281   |
| 32 | 27.04                             | 27.1468           | 1.4414                 | 25.7054                               | 28.5882                               | 0.9259     | 0.0039   |
| 33 | 27.27                             | 27.1447           | 1.4388                 | 25.7059                               | 28.5835                               | 0.9129     | 0.0046   |
| 34 | 26.75                             | 27.8879           | 1.4864                 | 26.4015                               | 29.3743                               | 0.2345     | 0.0425   |
| 35 | 27.15                             | 27.6836           | 1.4681                 | 26.2155                               | 29.1517                               | 0.6365     | 0.0197   |
| 36 | 27.00                             | 26.3916           | 1.4639                 | 24.9277                               | 27.8555                               | 0.5844     | 0.0225   |
| 37 | 25.65                             | 27.0288           | 1.4811                 | 25.5477                               | 28.5099                               | 0.0691     | 0.0538   |
| 38 | 26.99                             | 26.9651           | 1.4583                 | 25.5068                               | 28.4234                               | 0.9829     | 0.0009   |
| 39 | 25.93                             | 26.1629           | 1.3836                 | 24.7793                               | 27.5465                               | 0.8317     | 0.0090   |
| 40 | 26.19                             | 26.6601           | 1.5451                 | 25.1150                               | 28.2052                               | 0.6957     | 0.0179   |

注:相对误差是中心值相对测量值的误差; $\tilde{a}_i$ 是式(4)中以模糊系数的中心值 $a_i(i=0,1,2,3)$ 为模型系数求得的测试煤样的中心预测值; $\tilde{\delta}_i$ 是式(4)中以模糊度 $\delta_i(i=0,1,2,3)$ 为模型系数求得预测样本的模糊度

表3 不同模型对测试煤样发热量的预测结果

| 煤样     | 发热量测量值/<br>(MJ·kg <sup>-1</sup> ) | 发热量预测值/(MJ·kg <sup>-1</sup> ) |         |         |         |
|--------|-----------------------------------|-------------------------------|---------|---------|---------|
|        |                                   | 模糊非线性回归                       | 经典线性回归  | BP神经网络  | 支持向量机   |
| 31     | 26.15                             | 26.8845                       | 26.9174 | 26.3194 | 26.7761 |
| 32     | 27.04                             | 27.1468                       | 27.1571 | 26.3376 | 27.0923 |
| 33     | 27.27                             | 27.1447                       | 27.1919 | 27.7594 | 27.1449 |
| 34     | 26.75                             | 27.8879                       | 27.8316 | 27.8479 | 27.6702 |
| 35     | 27.15                             | 27.6836                       | 27.6647 | 27.3813 | 27.5356 |
| 36     | 27.00                             | 26.3916                       | 26.4388 | 25.4820 | 26.3601 |
| 37     | 25.65                             | 27.0288                       | 27.0580 | 26.4890 | 26.9227 |
| 38     | 26.99                             | 26.9651                       | 26.9960 | 26.2336 | 26.9017 |
| 39     | 25.93                             | 26.1629                       | 26.1886 | 24.9101 | 26.4853 |
| 40     | 26.19                             | 26.6601                       | 26.8020 | 27.5152 | 26.8836 |
| 平均相对误差 |                                   | 0.0203                        | 0.0205  | 0.0307  | 0.0204  |

### 3 结 语

准确预测煤炭发热量对煤质研究和煤炭经济具有重要意义。研究表明煤的发热量与影响因素之间存在模糊非线性关系。基于此,建立了一种基于对称三角模糊数的非线性煤炭发热量预测模型,该模型的优点是避免少数指标变化较大或统计不准确带来的影响。突出特点是预测结果不是一个准确

值,而是一个区间,给出了预测结果的合理范围,提高了预测的可靠性。对模型参数的估计采用了MATLAB工具箱提供的求解非线性约束优化问题的函数fmincon,该函数功能强大,运算速度快(远快于遗传算法等方法),稳定性好,不容易陷于局部极小范围,计算结果准确。煤的挥发分对煤的发热量具有较强的模糊性,预测误差主要由这种模糊性引起。模糊非线性回归模型是一种简单直观、容易记

忆、预测能力强的模糊非线性初等预测模型,在一定程度上克服了神经网络、支持向量机等模型复杂不易掌握等优点,也克服了传统线性回归在解决非线性问题上的缺点,为煤炭发热量的预报预测提供了新思路和新方法。

#### 参考文献:

- [1] 刘晓国,赵志根,黄文辉.汝箕沟煤矿煤炭发热量的回归分析研究[J].洁净煤技术,2011,17(2):51-53.
- [2] 陈晓华,邵金元.利用 EXCEL 进行煤炭发热量的快速回归分析[J].煤炭工程,2007,39(7):80-82.
- [3] 赵桂宇.开滦矿区动力煤炭发热量回归方程的推导及应用[J].商场现代化,2010(12):12.
- [4] 陈开玲,郝俊.基于多元线性回归的洗混煤低位发热量数学模型研究[J].选煤技术,2014(3):1-3.
- [5] 邵金元.无烟煤发热量与水分、灰分、挥发分的回归分析[J].煤炭工程,2012,44(10):125-126.
- [6] 吴春灵,赵凯利,王少华.基于 Eviews 的神华煤直接液化用煤炭发热量的回归分析研究[J].内蒙古石油化工,2014(5):8-9.
- [7] 段莉莉.矿区商品煤炭发热量回归方程的推导及应用[J].煤质技

术,2008(2):14-15,19.

- [8] 孙晓华,高亚平,卢安民.田庄选煤厂洗混煤发热量回归分析与应用[J].煤炭加工与综合利用,2010(3):30-31.
- [9] 周翠红,路迈西.线性回归与神经网络预测煤炭发热量[J].煤炭科学技术,2009,37(12):117-120.
- [10] 郑忠,宋万利.基于主成分分析的中煤发热量的检测研究[J].煤炭技术,2014,33(6):218-220.
- [11] 王建军,王世营,雷萌.粒子群优化算法在煤炭发热量预测中的应用[J].工矿自动化,2012(5):50-53.
- [12] 廖爽.新疆伊犁地区煤发热量计算模型研究[D].乌鲁木齐:新疆大学,2012:8-16.
- [13] 王晓红,吴德会.一种燃煤发热量的综合预测方法[J].煤炭科学技术,2006,34(6):16-18.
- [14] 刘合香.模糊数学理论及其应用[M].北京:科学出版社,2012:130-131.
- [15] 王江荣.基于遗传算法模糊多元线性回归分析的瓦斯涌出量预测模型[J].工矿自动化,2013,39(12):34-37.
- [16] 廖爽,叶枫,武英.基于 MATLAB 的逐步回归法计算新疆伊犁地区煤的发热量[J].煤质技术,2011(7):1-5.
- [17] 王正林,龚纯,何倩.精通 MATLAB 科学计算[M].北京:电子工业出版社,2007:422-423.

(上接第 80 页)

2)从煤和半焦的煤质分析数据来看,热解后煤质得到了提升,但半焦的燃烧特性仍接近于原煤。焦油中芳烃含量较高,轻质组分以苯酚、甲酚和乙酚为主。气体成分主要为  $\text{CH}_4$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{CO}_2$  等。

3)根据对热解产物的分析,对五彩湾煤的热解多联产工艺路线进行了分析。由于焦油中芳烃含量较高,适合于先提取化学品,然后加氢处理得到优质燃料。

**致谢:**感谢澳大利亚科廷大学李春柱教授和 Daniel Mourant 博士等对本文研究工作的指导帮助。

#### 参考文献:

- [1] 马风云,郭靖,玛·伊·拜克诺夫,等.高惰质组分五彩湾煤直接液化性能研究[J].煤炭转化,2010,33(2):22-26.
- [2] 梁鹏,曲旋,王志峰,等.对 CFB 燃烧/煤热解多联产工艺过程的开发[J].热能动力工程,2010,25(3):276-282.
- [3] 徐晓光,赵毅.褐煤提质技术的应用现状及前景[J].热力发电,2012,41(5):1-3,11.
- [4] 李现勇,任相坤.关于煤液化多联产系统发展的思考[J].煤炭科学技术,2004,33(9):4-11.
- [5] 刘耀鑫,李润东,杨天华,等.煤热解燃烧多联产方案试验研究[J].热力发电,2008,37(5):1-5.
- [6] 李文英,冯杰,谢克昌.煤基多联产系统技术及工艺过程分析[M].北京:化学工业出版社,2011:127-169.
- [7] Sathe C, Hayashi J I, Li C Z, et al. Release of alkali and alkaline

earth metallic species during rapid pyrolysis of a victorian brown coal at elevated pressures[J].Fuel,2003,82(12):1491-1497

- [8] Su W, Fang M, Gen J, et al. Research on coal pyrolysis for polygeneration technology[C]//International conference on digital manufacturing and automation. Changsha: IEEE Xplore Digital Library, 2010:191-197.
- [9] Garcia-perez M, Wang X S, Shen J, et al. Fast pyrolysis of oil Mallee woody biomass: effect of temperature on the yield and quality of pyrolysis products[J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 2008, 47(6):1864-1854.
- [10] Lievens C, Mourant D, He M, et al. An FT-IR spectroscopic study of carbonyl functionalities in bio-oils[J]. Fuel, 2011, 90:3417-3423.
- [11] 桂文君,马祥林,石辉文.气相色谱-质谱法分析酚焦油的主要组分[J].洁净煤技术,2010,16(1):103-105.
- [12] 李香兰,崔新涛,张永发.GC-MS 在内蒙褐煤型煤块低温煤焦油成分分析中的应用[J].分析仪器,2012(3):17-24.
- [13] Li C Z, Wu F, Cai H Y, et al. UV-fluorescence spectroscopy of coal pyrolysis tars[J]. Energy and Fuels, 1994, 8(5):1039-1048.
- [14] 冯志华,聂百胜,常丽萍.煤的快速热解影响氮氧化物前驱物的生成分析[J].煤炭科学技术,2005,33(9):42-45.
- [15] 范红宇,曹欣玉,李宁,等.煤中不同形态硫分在高温下的析出特性研究[J].热力发电,2004,33(9):33-36,39.
- [16] 熊道陵,陈玉娟,欧阳接胜,等.煤焦油深加工技术研究进展[J].洁净煤技术,2012,18(6):57-83.
- [17] 张军民,刘弓.低温煤焦油的综合利用[J].煤炭转化,2010,33(3):92-96.