

玉米秸秆热裂解产物产率预测分析*

张春梅¹ 刘庆玉¹ 易维明² 柏雪卫¹ 张文基¹ 来世鹏³

(1. 沈阳农业大学工程学院, 沈阳 110866; 2. 山东理工大学清洁能源工程技术研究中心, 淄博 255049;
3. 建设部沈阳煤气热力研究设计院, 沈阳 110026)

【摘要】 以影响热裂解液化过程的因素(输入功率、压差、氩气流量和进料率)为网络输入,热裂解液化产物为网络输出,应用BP神经网络模型法对玉米秸秆热裂解液化产物产率进行了预测分析,并将预测结果与非线性回归分析法进行了比较分析。结果表明,采用BP神经网络模型预测输出值与试验值间的相对误差总体在5%之内,说明模拟预测的效果较好。对BP神经网络模型法与非线性回归方法的预测结果对比分析显示:在试验数据范围内,BP神经网络模型对玉米秸秆热裂解3种产物产率的预测值更接近试验值,计算精度比非线性回归方法略高。

关键词: 玉米秸秆 热裂解 神经网络模型 产率 预测
中图分类号: TK6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2011)09-0120-04

Predict Product Yields of Corn Stalk Plasma Pyrolysis

Zhang Chunmei¹ Liu Qingyu¹ Yi Weiming² Bai Xuewei¹ Moonki Jang¹ Lai Shipeng³

(1. College of Engineering, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China
2. Research Center of Engineering & Technology for Clean Energy, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China
3. Construction Ministry Shenyang Gas & Heat Research and Design Institute, Shenyang 110026, China)

Abstract

A method for predicting product-yield of corn stalk pyrolysis was established by means of BP neural network model. The model consisted of three neuron layers: input layer with four nodes which affected the pyrolysis process. It included input power, air flow rate, feeding rate and pressure, output layer with pyrolysis liquid yield and hidden layer. If the training data were representative, the results obtained by neural network model could be well in accordance with the experimental results and its errors would be less than 5%. The results obtained by neural network are more accurate than those obtained by non-linear regression.

Key words Corn stalk, Pyrolysis, Neural network, Product yields, Predict

引言

生物质热裂解液化是一个复杂过程,要分析这一过程需要考虑众多的化学反应、物质和能量平衡。热裂解过程的热力学特性和动力学特性很难用精确的数学式来表达,其内部机理还不是很清楚,很难从各影响因素入手来预测热裂解液化的效果,试验研究仍然占有重要的地位。目前预测产物产率的方法

有3种:反应动力学的经验模型、半经验半理论模型和机理模型^[1~3]。经验模型使用范围窄,计算精度低;半经验半理论模型使用范围稍广,计算精度比经验模型略高;机理模型使用范围广,计算精度较高,但计算量大,计算时间长^[4]。

生物质热裂解过程是强非线性热力学过程,用传统的建模方法较难对其进行确切描述。人工神经网络因其具备学习能力和描述非线性特性,近年来

收稿日期: 2010-11-15 修回日期: 2011-03-21
* 辽宁省秸秆能源化利用项目
作者简介: 张春梅,讲师,博士,主要从事生物质热化学转换技术研究,E-mail: zchunmei_1977@126.com
通讯作者: 刘庆玉,教授,博士生导师,主要从事生物质能开发与综合利用技术研究,E-mail: qyliu@126.com

在工程建模中得到广泛应用^[5]。生物物质的热裂解产物产率和成分受很多因素影响,可以采用正交试验的方法进行生物质热裂解影响参数的优化^[6]。完备的正交试验样本集可以用做学习训练样本集,并且是学习训练样本集的基本单元,它对于正交试验有相同影响因素和水平的样本预测精度很高^[7]。

本文以玉米秸秆为原料,在等离子体加热的小型流化床上进行生物质快速热裂解制取生物油试验研究。

1 热裂解液化模型

采用 Matlab 7.8 作为系统仿真平台,进行建模仿真。利用 Matlab 7.8 下的神经网络工具箱,建立了 BP 网络模型,对网络的训练和预测过程进行求解。

1.1 基础数据处理

基础数据来源于玉米秸秆在氩气等离子体加热条件下进行热裂解的试验数据。本试验所得到的生物油和固体炭均是收集器内的质量。考虑到实际生产中产物收集的损失,为了使产物收率与实际产率更接近,在热裂解产物收率中增加了 5% 的损失量。

试验过程中,固定热裂解终温为 480℃,研究了 4 个因素^[8](输入功率、氩气流量、进料率和反应器内压差)对生热裂解产物产率的影响。根据预试验结果,确定各个因素的指标范围如下:输入功率 22 ~ 44 kW,压差 200 ~ 600 mm 水柱,氩气流量 2.4 ~ 2.6 m³/h,进料速率 0.37 ~ 0.88 kg/h。

本文采用 prestd 函数对网络的输入和输出数据进行归一化,为较全面地评价 BP 神经网络模型,将试验数据分成 3 部分,70% 的试验数据(40 组数据)作为 BP 神经网络学习训练数据,15% 用于验证网络模型,剩余 15% 的试验数据作为预测数据。

1.2 模型建立

根据等离子体加热的条件和玉米秸秆热裂解液化的试验情况^[9-10],将 BP 神经网络模型的输入层设 4 个节点,输出层设 3 个节点,设 1 个隐含层。输入层为热裂解的影响因子,即:输入功率 x_1 、氩气流量 x_2 、压差 x_3 和进料率 x_4 。输出层为生物油产率 Y_1 、炭产率 Y_2 和不可冷凝气体产率 Y_3 。网络模型如图 1 所示。参数的选取如表 1 所示。模型的计算精度为 10^{-3} 。隐含层神经元数为 4 ~ 12 之间的常数,经过多次试验,当神经元数为 12 时网络精度较高。学习率为 0.001,训练次数 300。本次预测采用 Levenberg - Marquardt 算法,训练函数为 trainlm,输出函数为 purelin,传递函数 tan-sigmoid。

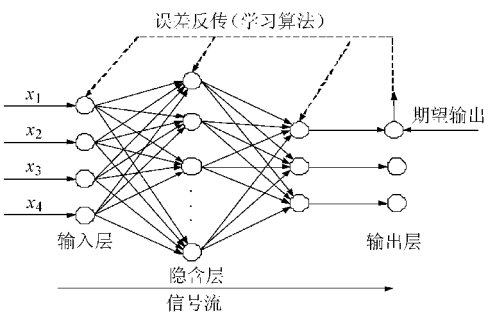


图 1 BP 神经网络模型示意图

Fig.1 Sketch map of BP neural network

2 预测结果与分析

2.1 预测结果

将数据输入神经网络模型进行学习训练之后,将第 3 部分数据代入 BP 神经网络模型进行产物产率的预测,其预测结果如表 1 所示。将所有数据都放在整个数据集中,包括训练数据、验证数据和测试数据,然后网络输出和相应的期望输出向量进行回归分析。线性回归之前需要对网络输出进行反规范化转换。

表 1 BP 神经网络模型在学习训练范围内对热裂解产物产率的预测结果

Tab.1 Yield prediction of pyrolysis products by BP neural network model %

序号	生物油		炭		气体	
	试验值	预测值	试验值	预测值	试验值	预测值
1	15.09	13.335 1	31.82	24.885 7	53.09	49.366 6
2	21.93	30.509 8	38.60	22.393 8	39.47	42.622 7
3	23.89	23.815 3	18.00	17.919 1	58.11	57.354 7
4	17.88	17.643 2	24.58	24.037 5	57.54	56.624 5
5	31.16	23.360 8	11.84	32.956 7	57.00	42.401 5
6	26.19	26.108 2	30.16	29.955 7	43.65	43.765 3
7	20.12	20.224 4	27.59	28.360 2	52.29	52.786 5
8	21.21	21.074 7	26.82	26.825 6	51.97	51.828 0
9	22.07	22.179 9	24.24	23.734 6	53.69	52.773 2
10	17.58	17.556 0	23.38	23.212 4	59.04	59.218 3
11	20.70	21.887 7	25.58	25.196 5	53.72	50.290 4
12	22.22	21.645 1	22.00	21.645 2	55.78	55.258 7
13	18.42	21.389 9	27.78	26.138 0	53.80	47.800 9
14	21.36	22.230 4	26.32	21.939 8	52.32	55.347 5
15	19.35	18.782 5	25.00	24.565 1	55.65	54.989 2
16	26.32	25.915 7	27.42	27.233 1	46.26	47.821 8
17	26.47	26.316 3	30.26	30.200 8	43.27	42.749 4
18	18.18	33.739 2	31.62	20.750 2	50.20	44.402 2

2.2 预测结果分析

图2为生物油BP神经网络的预测值与试验值的拟合曲线,表明预测输出值与试验真实值的变化趋势一致,但是试验2、5、18与预测值偏差较大。

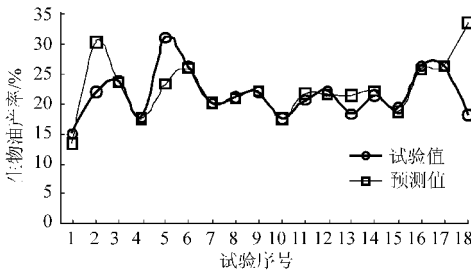


图2 生物油产率BP神经网络预测值与试验值比较

Fig.2 Analysis of BP neural network predict value and experimental value for bio-oil

图3为炭产率的BP神经网络的预测值与试验值的拟合曲线,表明除试验1、2、5和18外, BP神经网络的预测值与试验值拟合较好。试验中发现固体炭中有时会混有一部分石英砂,而且生物油中混有少量的旋风分离器未完全分离的炭颗粒,这些都增加了试验误差,导致炭产率不准确。

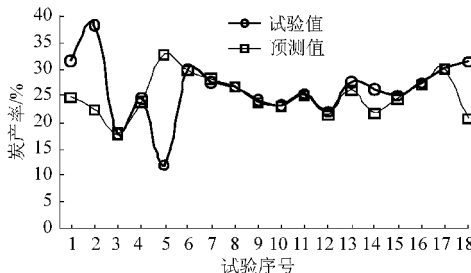


图3 炭产率BP神经网络预测值与试验值比较

Fig.3 Analysis of BP neural network predict value and experimental value for coke

图4为不可冷凝气体BP神经网络的预测值与试验值的拟合曲线。表明BP神经网络的预测值与热裂解试验不可冷凝气体的产率拟合效果较好。不可冷凝气体是由物质平衡差计算得到的,生物油残留在管壁上,使生物油产率降低,固体炭中混有石英砂,导致炭产率增加,因此二者影响相互削弱,导致不可冷凝气体产率相对准确。

综上所述,采用BP神经网络对生物质热裂解液化试验中,3种热裂解产物产率的预测结果与热裂解试验值拟合较好。

由表2可知,BP网络预测与试验值存在一定的误差,除2、5、13、18号数据的预测误差较大外,玉米秸秆热裂解液化的试验值与3种产物的预测值的误差均小于5%。说明在学习训练范围内,采用BP神经网络模型预测玉米秸秆的热裂解产物产率是可行的,且计算时间非常短,能够应对热裂解液化装置原

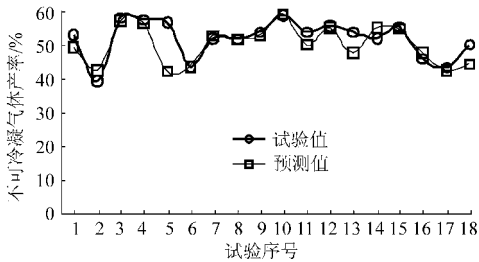


图4 不可冷凝气体产率BP神经网络预测值与试验值比较

Fig.4 Analysis of BP neural network predict value and experimental value for gas

表2 玉米秸秆热裂解产物产率的预测误差值

Tab.2 Errors of corn stalk pyrolysis

序号	生物油产率 误差/%	炭产率误差 /%	不可冷凝气体 产率误差/%
1	1.754 9	6.934 3	3.723 4
2	-8.579 8	16.206 2	-3.152 7
3	0.074 7	0.080 9	0.755 3
4	0.236 8	0.542 5	0.915 5
5	7.799 2	-21.116 7	14.598 5
6	0.081 8	0.204 3	-0.115 3
7	-0.104 4	-0.770 2	-0.496 5
8	0.135 3	-0.005 6	0.142 0
9	-0.109 9	0.505 4	0.916 8
10	0.024 0	0.167 6	-0.178 3
11	-1.187 7	0.383 5	3.429 6
12	0.574 9	0.354 8	0.521 3
13	-2.969 9	1.642 0	5.999 1
14	-0.870 4	4.380 2	-3.027 5
15	0.567 5	0.434 9	0.660 8
16	0.404 3	0.186 9	-1.561 8
17	0.153 7	0.059 2	0.520 6
18	-15.559 2	10.869 8	5.797 8

料变化的频繁状况。

3 BP神经网络模型与非线性回归比较

用非线性回归方法对玉米秸秆热裂解产物产率进行预测。非线性回归多项式为

$$\begin{aligned} Y_1 = & 22.25 - 0.36x_1 - 1.37x_3 + 1.01x_4 - 0.35x_1^2 - \\ & 1.06x_1x_2 - 1.76x_1x_3 - 0.52x_1x_4 - 0.15x_2^2 + \\ & 2.19x_2x_3 - 2.44x_2x_4 + 0.28x_3^2 - 1.16x_3x_4 + 0.15x_4^2 \\ Y_2 = & 29.49 + 0.90x_1 + 2.02x_2 - 0.07x_3 - 0.53x_4 - \\ & 1.14x_1^2 + 2.58x_1x_2 + 1.38x_1x_3 - 2.31x_1x_4 - 0.72x_2^2 - \\ & 0.84x_2x_3 + 1.06x_2x_4 - 0.81x_3^2 + 1.87x_3x_4 + 0.37x_4^2 \\ Y_3 = & 48.26 + 0.92x_1 - 0.73x_2 + 1.24x_3 - 1.78x_4 + \\ & 1.81x_1^2 + 0.67x_1x_2 + 0.33x_1x_3 + 0.65x_1x_4 + 1.20x_2^2 - \\ & 1.67x_2x_3 - 0.55x_2x_4 + 0.85x_3^2 - 0.40x_3x_4 - 0.20x_4^2 \end{aligned}$$

多项式由 BP 神经网络用于训练的那部分数据进行回归拟合得到。 $x_1 \sim x_4$ 与 BP 神经网络模型输入层的 4 个节点相同,为玉米秸秆等离子加热条件下的系统参数(输入功率、氩气流量、压差和进料率)。将试验中第 3 部分数据分别代入非线性回归多项式。进行热裂解 3 种产物产率的预测。BP 神经网络模型与非线性回归方法对玉米秸秆热裂解产物产率的预测值与试验值的绝对误差如图 5~7 所示。

由图 5 可知,BP 网络的生物油预测值与非线性

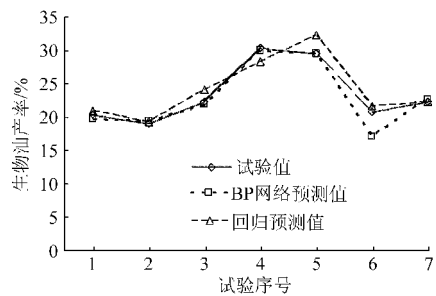


图 5 生物油产率的预测值与试验值的比较分析
Fig. 5 Comparison of bio-oil yields by three methods

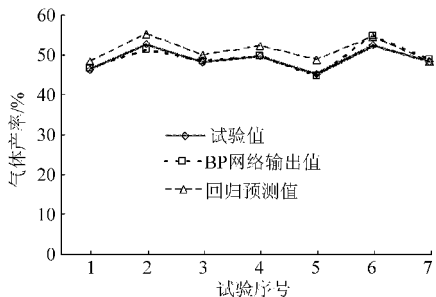


图 6 气体产率的预测值与试验值的比较分析
Fig. 6 Comparison of gas yields by three methods

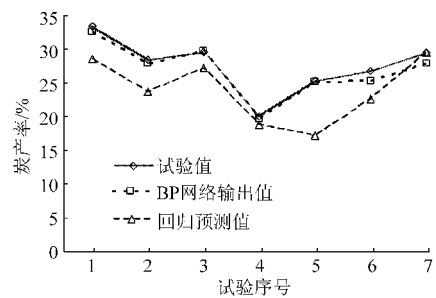


图 7 炭产率的预测值与试验值的比较分析
Fig. 7 Comparison of char yields by three methods

回归的生物油预测值都很接近试验值,但是 BP 网络的预测值更接近试验值。由图 6 可知,非线性回归法对于不可冷凝气体产率的预测值略高于试验值,而 BP 网络的预测值与试验值很接近。因此,可以认为 BP 神经网络模型的预测值更接近试验值,计算精度比非线性回归方法略高。由图 7 可知,非线性回归法对于炭产率的预测值低于试验值,且偏差较大。而 BP 网络的预测值(除个别试验外)与试验值都很接近。

4 结论

- (1)采用 BP 神经网络模型预测输出值与试验值间的相对误差总体上在 5% 之内,说明模拟预测的效果较好。
- (2)对 BP 神经网络模型法与非线性回归方法的预测结果对比分析显示:在试验数据范围内,BP 神经网络模型对玉米秸秆热裂解 3 种产物产率的预测值更接近试验值,计算精度比非线性回归方法略高。

参 考 文 献

1 Luo Zhongyang, Wang Shurong, Cen Kefa. A model of wood flash pyrolysis in fluidized bed reactor [J]. Renewable Energy, 2005, 30(3): 377~392.

2 Janse A M C, Westerhout R W J, Prins W. Modeling of flash pyrolysis of a single wood particle [J]. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2000, 39(3): 239~252.

3 Avdhesh Kr Sharma. Equilibrium modeling of global reduction reactions for a downdraft (biomass) gasifier [J]. Energy Conversion and Management, 2008, 49(4): 832~842.

4 王国清,杜志国,张利军,等. 应用 BP 神经网络预测石脑油热裂解产物产率[J]. 石油化工, 2007,36(7):699~704.
Wang Guoqing, Du Zhiguo, Zhang Lijun, et al. Applying BP neural networks to predict product—yields of naphtha steam cracking[J]. Petrochemical Technology, 2007, 36(7): 699~704. (in Chinese)

5 王俊国. 基于神经网络的建模方法与控制策略研究[D]. 武汉:华中科技大学,2004.
Wang Junguo. Research of modeling methods and control strategies based on neural networks [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2004. (in Chinese)

6 刘荣厚,栾敬德. 榆木木屑快速热裂解主要工艺参数优化及生物油成分的研究[J]. 农业工程学报,2008,24(5):187~190.
Liu Ronghou, Luan Jingde. Optimization of the key parameters for fast pyrolysis of elm sawdust and the composition of the bio-oil[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(5): 187~190. (in Chinese)

7 蔡安辉,刘永刚,孙国雄. 基于正交实验的 BP 神经网络预测研究[J]. 中国工程科学,2003,5(7):67~71.
Cai Anhui, Liu Yonggang, Sun Guoxiong. Research on the forecast of the BP neural network based on the orthogonal test[J]. Engineering Science, 2003, 5(7): 67~71. (in Chinese)

(下转第 185 页)

为,实现了 N 个点均匀分布在给定二维平面多边形区域内的方法,这种均匀样点布局也是 N 个点均匀分布在给定多边形内的计算几何问题的一种解法。

(2) 电荷排斥模拟方法相比规则多边形格网方法更适用于在带有限制区域采样区的均匀采样布局的实现,且效率比模拟退火方法高很多,因此它比较

适合于带有限制区域的多边形采样区域内实现 N 个样点的均匀分布问题。

(3) 边界电荷带电量与场内电荷带电量大小的比例(Q_2/Q_1)要适中,该比例直接影响靠近边界的电荷到边界的距离,大量实验表明, Q_2 取 0.1 且 Q_1 取 1 比较合理,而且方便计算。

参 考 文 献

- 靳国栋,刘衍聪. 距离加权反比插值法和克里金插值法的比较[J]. 长春工业大学学报:自然科学版,2003,24(3): 53~57.
Jin Guodong, Liu Yancong. Comparison between inverse distance weighting method and Kriging [J]. Journal of Changchun University of Technology: Natural Science Edition, 2003, 24(3): 53~57. (in Chinese)
- Stevens Jr D L. Spatial properties of design-based versus model-based approaches to environmental sampling[C] //Caetano M, Painho M. 7th International Symposium on Spatial Accuracy Assessment in Natural Resources and Environmental Sciences. Lisbon, Portugal; Instituto Geografico Portugues, 2006: 119~125.
- 吴才聪,马成林,张书慧,等. 基于 GIS 的精确农业合理采样与施肥间距研究[J]. 农业机械学报,2004,35(2): 80~83.
Wu Caicong, Ma Chenglin, Zhang Shuhui, et al. Research on reasonable distances of soil sampling and fertilizing based on GIS in precision agriculture[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(2): 80~83. (in Chinese)
- Wang Hongbin, Yang Qing, Liu Zhijie, et al. Determining optimal density of grid soil-sampling points using computer simulation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(8): 145~148.
- 王秀,赵春江,孟志军,等. 精准农业土壤采样栅格划分方法的研究[J]. 土壤学报,2005,42(2): 199~205.
Wang Xiu, Zhao Chunjiang, Meng Zhijun, et al. Field soil sampling grids for precision agriculture [J]. Acta Pedologica Sinica, 2005, 42(2): 199~205. (in Chinese)
- Yfantis E A, Flatman G T, Behar J V. Efficiency of Kriging estimation for square, triangular, and hexagonal grids[J]. Mathematical Geology, 1987, 19(3): 183~205.
- Van Groenigen J W, Stein A. Constrained optimization of spatial sampling using continuous simulated annealing [J]. Journal of Environmental Quality, 1998, 27(5): 1 078~1 086.
- Van Groenigen J W, Siderius W, Stein A. Constrained optimization of soil sampling for minimization of the Kriging variance [J]. Geoderma, 1999, 87(3~4): 239~259.
- Simbahan G C, Dobermann A. Sampling optimization based on secondary information and its utilization in soil carbon mapping [J]. Geoderma, 2006, 133(3~4): 345~362.
- 张亮,王凌,郑大钟. 有限计算量下模拟退火算法的参数序优化[J]. 控制与决策,2004,19(2): 226~229.
Zhang Liang, Wang Ling, Zheng Dazhong. Parameter ordinal optimization for simulated annealing with limited computational efforts[J]. Control and Decision, 2004, 19(2): 226~229. (in Chinese)
- 姜成晟,王劲峰,曹志冬. 地理空间抽样理论研究综述[J]. 地理学报,2009,64(3): 368~380.
Jiang Chengsheng, Wang Jingfeng, Cao Zhidong. A review of geo-spatial sampling theory [J]. Acta Geographica Sinica, 2009, 64(3): 368~380. (in Chinese)

(上接第 123 页)

- 张春梅,刘荣厚,易维明,等. 玉米秸秆等离子体热裂解液化实验[J]. 农业机械学报,2009,40(8): 96~99.
Zhang Chunmei, Liu Ronghou, Yi Weiming, et al. Experiment on plasma pyrolysis of corn stalk for liquid fuel [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(8): 96~99. (in Chinese)
- 李大中,张瑞祥,韩璞. 生物质气化过程神经网络模型拟合方法[J]. 太阳能学报,2008,29(5): 539~543.
Li Dazhong, Zhang Ruixiang, Han Pu. The method on simulation of biomass gasification with a neural network model[J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2008, 29(5): 539~543. (in Chinese)
- 张春梅,易维明,刘庆玉,等. 流化床等离子体加热稳定性试验[J]. 农业机械学报,2010,41(增刊): 121~123.
Zhang Chunmei, Yi Weiming, Liu Qingyu, et al. Experiment on the stability of plasma heating fluidized bed [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(Supp.): 121~123. (in Chinese)