

木屑、稻壳和煤混合型煤压缩成型过程建模与工况优化*

李大中 李晓江

(华北电力大学自动化系, 保定 071003)

【摘要】 基于已有文献实验数据,建立了木屑和煤、稻壳和煤混合压缩成型过程LS-SVM模型。结果表明,两种模型预测值与实验值相对误差最大值分别为3.46%、5.83%,两类型煤混合压缩成型过程具有较好的模拟效果。在此基础上设计拟合了两类型煤混合压缩成型过程多目标优化目标函数,寻优分别得到木屑、稻壳与煤混合型煤压缩成型过程Pareto最优解集。依据生物质固体成型燃料标准和生物质型煤综合性能 C_v 值,进一步从Pareto最优解集中选出了对木屑和煤、稻壳和煤混合型煤不同指标要求下的压缩成型工艺过程运行工况的优化目标值。

关键词: 生物质型煤 混合压缩成型 建模 优化

中图分类号: TK6 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2012)04-0083-05

Modeling and Engineering Optimization of Compression Process for Biomass Compound Coal Mixed with Sawdust, Rice Hull and Coal

Li Dazhong Li Xiaojiang

(Department of Automation, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract

The compression process LS-SVM model of biomass compound coal mixed with sawdust, coal and rice hull was established according to the published experimental data. The test result showed that the maximum relative error of predicted and experimental values of two models was 3.46% and 5.83%, which proved the efficiency of model. On this base, the multi-objective optimization objective function of compression process was designed and fitted, by which the Pareto optimal solutions were gained in a single run. According to the standard target of solid biomass fuels and C_v value which represented the comprehensive performance of biomass compound coal, the efficient solutions that are suitable for compression process were selected from the Pareto optimal solutions under different indicators for compound coal mixed with sawdust, coal and rice hull.

Key words Biomass compound coal, Mixed compression, Modeling, Optimization

引言

生物质能是人类赖以生存的重要能源,仅次于煤炭、石油和天然气而居于世界能源消费总量第4位,在整个能源系统中占有重要地位^[1~2]。生物质型煤(biomass compound coal,简称BCC)是指将破碎成一定粒度和干燥到一定程度的煤和生物质原料,按一定比例掺混,在高温高压下压制而成的燃料。

实践表明,生物质型煤技术是一种洁净节能技术,不仅可以提高燃烧效率、减少资源浪费,而且可以减少SO₂、CO₂和NO_x等污染物对环境的污染,计入生物质资源的代煤作用和型煤的节煤作用,生物质型煤总节煤率可到20%~24%,总减硫率大于65%,减排碳的潜力可达当年总排量的10%^[3~4]。

我国拥有较丰富的木屑、稻壳资源,其中产稻量占世界总产量的1/3,木屑等林业废弃物年可获得

收稿日期: 2011-06-11 修回日期: 2011-06-19

* 河北省自然科学基金资助项目(F2011502001)

作者简介: 李大中,教授,主要从事生物质能发电及综合利用研究,E-mail: dzli21cn@126.com

量约 9 亿 t。生物质型煤压缩成型工艺过程对成型燃料的物理性能和燃烧特性会产生直接影响,但国内外目前对生物质型煤压缩成型过程建模及优化方面的研究非常缺乏。基于此,本文以木屑和煤、稻壳和煤两组物料混合压缩成型实验数据^[5]为研究对象,建立两种型煤压缩成型过程的模型,并对压缩成型工艺过程的运行工况进行优化研究。

1 生物质型煤压缩成型过程建模

1.1 模型参量确定

压缩成型过程中影响型煤特性的因素很多,包括成型压力、成型温度、生物质质量分数、含水率、粒径、固硫剂添加量等,型煤的评价指标有热值、挥发

分、固硫率、抗压强度、松弛密度、着火特性等^[6]。成型燃料的品质特性包括燃烧特性和物理特性,型煤的物理特性直接决定了它的使用要求、运输要求和贮藏条件。抗压强度决定了型煤的运输要求,型煤远距离运输需要较高的抗压强度。型煤的燃烧特性决定了其经济价值和环保价值,其中热值表示单位质量燃料完全燃烧时所放出的热量,热值越高越能体现燃料价值。固硫率决定了型煤固硫作用的大小以及 SO₂等硫化物的排放量。本文选用云南先锋褐煤、木材加工厂木屑及稻壳为型煤原料,在成型压力为 40 MPa 下,木屑与煤、稻壳与煤混合压缩成型实验数据如表 1 所示^[5]。实验条件可视为定温、定压工况。

表 1 木屑、稻壳与煤混合型煤压缩成型实验数据
Tab.1 Experimental data from compression process model of BCC mixed with sawdust, rice hull and coal

木屑与煤混合型煤压缩成型				稻壳与煤混合型煤压缩成型			
生物质质量 分数 $R/\%$	热值 Q $/\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$	抗压强度 C_s $/\text{N}\cdot\text{个}^{-1}$	固硫率 S $\%$	生物质质量 分数 $R/\%$	热值 Q $/\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$	抗压强度 C_s $/\text{N}\cdot\text{个}^{-1}$	固硫率 S $\%$
0	22.427	151.181	65.984	0	22.427	151.181	65.984
5	22.190	201.969	69.763	5	22.016	183.071	68.504
10	22.003	265.354	72.598	10	21.814	240.157	71.339
15	21.594	325.591	75.748	15	21.265	290.945	73.543
20	21.342	376.378	77.638	20	20.878	297.638	75.433
25	21.103	427.165	80.787	25	20.169	376.772	77.323
30	20.817	462.205	82.047	30	19.778	386.614	79.213
35	20.501	516.142	83.622	35	19.355	450.000	80.472
40	20.215	566.930	85.512	40	18.875	485.040	81.732
45	19.956	583.071	87.087	45	18.431	494.882	83.622
50	19.702	611.811	88.031	50	18.006	555.118	84.252
55	19.410	627.953	89.291	55	17.571	549.213	86.142
60	19.115	650.394	90.236	60	17.124	552.756	87.016
65	18.852	660.236	90.745	65	16.662	531.102	87.922
70	18.604	666.930	91.039	70	16.243	518.898	88.615
75	18.287	670.472	91.695	75	15.791	512.992	89.129
80	18.106	664.057	92.127	80	15.372	472.441	89.465

由表 1 可以看出,当成型压力一定时,随着木屑和稻壳质量分数的增加,两种不同的型煤固硫率呈上升趋势,而型煤热值呈下降趋势,抗压强度随着生物质质量分数的增加而增加,当添加量达到一定量

1.2 LS-SVM 建模

的时候基本趋于稳定。为此,本文以成型压力和生物质添加量为输入,以型煤热值、抗压强度、固硫率为输出建立模型。

质(木屑、稻壳)和煤混合压缩成型过程最小二乘支持向量机 LS-SVM 模型^[7-8],如图 1 所示。函数估

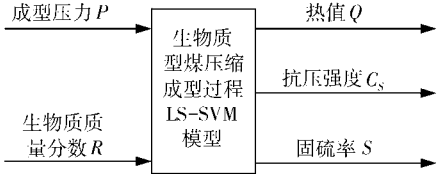


图 1 木屑型煤、稻壳型煤混合压缩成型过程模型
Fig.1 Compression process model of BCC mixed with sawdust, rice hull and coal

计模型为

$$y(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^d a_i K(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) + b \tag{1}$$

其中 $\mathbf{x} = (P, R)$ $\mathbf{y} = (Q, C_s, S)$
式中 P ——成型压力, MPa
 R ——生物质质量分数, %
 Q ——热值, MJ/kg
 C_s ——抗压强度, N/个
 S ——固硫率/% d ——训练样本数
 $K(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j)$ ——RBF 核函数
 a_i ——权值向量 b ——偏差, $b \in \mathbf{R}$
最小二乘支持向量机建模主要是选择核函数 $K(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j)$ 和惩罚度参数 C , 通常径向基核函数

(radial basis function, 简称 RBF) 具有较好的拟合和泛化能力^[4], 因此本文选择径向基核函数为

$$K(\mathbf{x}, \mathbf{x}^T) = \exp(-\|\mathbf{x} - \mathbf{x}^T\|^2 / (2\sigma^2)) \tag{2}$$

式中 σ 表示核宽度, 它影响数据在高维特征空间中分布的复杂度, 最终需要确定的参数为 σ^2 和 C 。

1.3 模型验证

由表 1 两种型煤实验数据中分别任意选 15 组数据作为模型训练样本, 用遗传算法对模型参数 C 和 σ^2 进行寻优^[9], 结果为木屑型煤 $C = 81.503\ 5$, $\sigma^2 = 0.986\ 1$; 稻壳型煤 $C = 48.533\ 1$, $\sigma^2 = 0.605\ 1$, 以其余两组数据作为测试样本验证模型的准确性, 本文选取生物质质量分数为 30%、50% 的两组数据作为模型测试样本。模型测试结果如表 2 所示。

表 2 木屑、稻壳型煤混合压缩成型实验值与模型预测值比较

Tab.2 Comparison of experimental value and predictive value of BCC mixed with sawdust, rice hull and coal										
型煤 类型	生物质质量 分数 $R/\%$	热值 $Q/\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$		相对误差 / $\%$	抗压强度 $C_s/\text{N}\cdot\text{个}^{-1}$		相对误差 / $\%$	固硫率 $S/\%$		相对误差 / $\%$
		实验值	预测值		实验值	预测值		实验值	预测值	
木屑	30	20.817	20.738	0.38	462.205	478.201	3.46	82.047	82.201	0.19
	50	19.702	19.720	0.09	611.811	611.257	0.09	88.031	88.266	0.27
稻壳	30	19.778	19.776	0.01	386.614	409.156	5.83	79.213	78.782	0.54
	50	18.006	17.999	0.04	555.118	527.666	4.95	84.252	84.911	0.78

由表 2 可知, 木屑型煤模型预测值与实验值相对误差最大值为 3.46%, 稻壳型煤模型预测值与实验值相对误差最大值为 5.83%。两个模型具有较好的泛化能力和拟合效果, 能够较好地模拟木屑和煤、稻壳和煤混合压缩成型过程的特性。

2 木屑、稻壳型煤压缩成型工况优化

2.1 优化方案确立

基于上述两种型煤的 LS-SVM 模型, 对木屑和煤、稻壳和煤混合压缩成型过程进行优化, 寻求当型煤的热值、抗压强度、固硫率分别达到最优值时, 木屑、稻壳分别在型煤中所占比例的优化目标值。该优化过程的优化本质上是一个多目标优化问题 (multi objective optimization problems, 简称 MOP)^[10]。多目标优化的解通常不是唯一的, 而是存在一个 Pareto 最优解集, 其中每个解之间彼此不可比较, 都是非劣最优解, 所以求解多目标优化问题的关键就是求出 Pareto 最优解集。本文采用并列遗传算法求解 Pareto 最优解集, 在满足生物质型煤工程标准的前提下, 使得解集中的每个解能够适应不同的工况要求^[11-12]。

2.2 约束条件

(1) 成型压力

由于实验是在 40 MPa 压力进行压缩成型的, 可

视为定压成型。在此压力下, 型煤已能较好成型, 暂不考虑压力变化对型煤指标的影响。因此将成型压力设定为 40 MPa。

(2) 型煤中木屑、稻壳质量分数

在型煤压缩过程中, 木屑、稻壳质量分数直接影响型煤评价指标, 且质量分数的增加有助于型煤的着火, 且可以减少 SO_x 等的排放, 然而随着木屑、稻壳质量分数的增加型煤热值会降低, 从而会降低型煤的经济价值。同时, 过高的木屑、稻壳质量分数会降低型煤的抗压强度, 不利于远距离输送。实验数据^[5]表明, 当木屑、稻壳在型煤中质量分数分别在 75%、50% 左右时, 型煤抗压强度最高。为了较好地比较两种型煤, 选取木屑、稻壳在型煤中质量分数优化范围为 0~80%。

2.3 多目标优化目标函数建立

较高的热值体现型煤的使用价值, 较高的抗压强度有利于型煤的远距离运输和保存, 较高的固硫率可以减少 SO_x 等的排放。本文所讨论的优化问题, 即寻找型煤热值、抗压强度、固硫率都达到最大值时, 成型压力和生物质质量分数应满足的优化目标值。基于此, 建立多目标优化模型为

$$\begin{aligned} \max M = \{ & y_1(\mathbf{X}), y_2(\mathbf{X}), y_3(\mathbf{X}) \} \tag{3} \\ \text{s. t.} \quad & x_1 = 40 \quad 0 \leq x_2 \leq 80 \end{aligned}$$

式中 $\mathbf{X} = (x_1, x_2)$, x_1 为成型压力 P , x_2 为木屑、

稻壳质量分数 R ; $y_1(X)$ 为热值 Q , $y_2(X)$ 为抗压强度 C_s , $y_3(X)$ 为固硫率 S 。

2.4 型煤压缩成型过程优化

选用并列遗传算法进行优化^[12], 基于该算法的木屑、稻壳型煤混合压缩成型过程优化流程如图 2 所示。

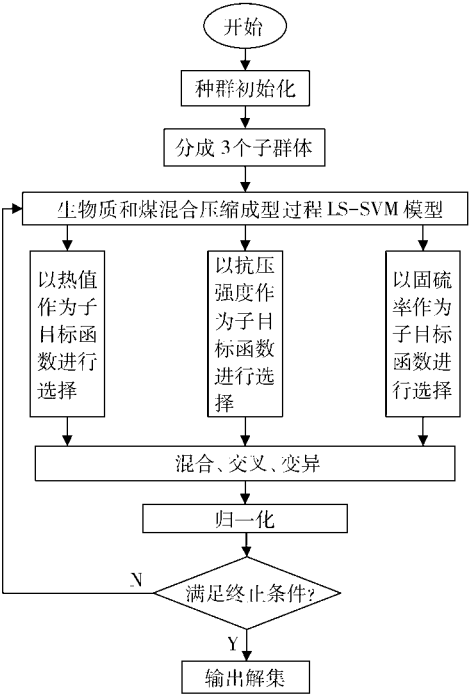


图 2 木屑、稻壳型煤混合压缩成型过程优化流程图
Fig.2 Optimization flow of mixed-compression molding process of BCC mixed sawdust, rice hull and coal

寻优计算得到 Pareto 最优解集, 如图 3 所示。仅从多目标优化的角度看, 图 3 中的每个解都是非劣最优解。而在实际工程中则需要综合考虑两类型煤的有关主要指标, 因此要从 Pareto 最优解集中选取能够满足两类型煤工程要求的有效解子集。

3 结果分析

基于表 1 实验数据的木屑、稻壳混合型煤指标随成型工况变化趋势如图 4 所示, 两种型煤的抗压强度大于单纯褐煤的抗压强度, 表明型煤压缩成型过程中, 木屑、稻壳起到粘结剂的作用, 随着木屑、稻壳质量分数的增加, 两种型煤抗压强度变化趋势有所不同, 在同样质量分数时木屑型煤的抗压强度要大于稻壳型煤。对于木屑型煤而言, 木屑质量分数为 40% 之前, 随着木屑质量分数增加, 其抗压强度增加速率较快, 但 40% 以后增加速率趋缓, 当质量分数达到 60% 以上, 抗压强度几乎趋于恒定。而对于稻壳型煤, 稻壳质量分数为 50% 以下, 抗压强度随稻壳质量分数增加而增大, 当稻壳质量分数超过 50% 时, 抗压强度则随着稻壳质量分数的增加而呈

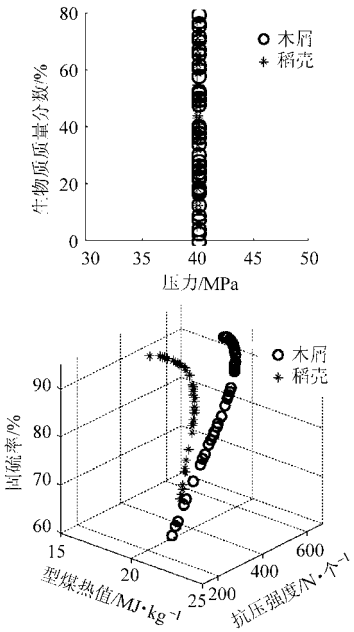


图 3 Pareto 最优解集
Fig.3 Pareto optimal solutions

减小趋势。由图 4 可知, 两种型煤的热值和固硫率变化趋势基本一致。

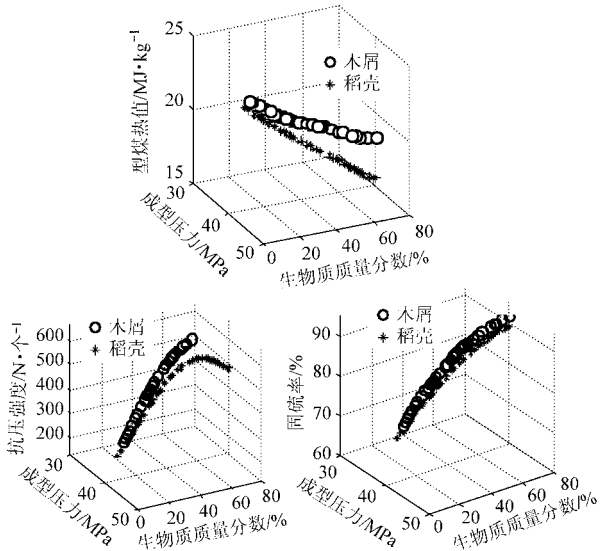


图 4 木屑、稻壳混合型煤指标随成型工况变化趋势
Fig.4 Profile of BCC mixed sawdust, rice hull and coal under different molding conditions

依据生物质固体成型燃料相关工程标准, 热值应达到 16.9 MJ/kg 及以上^[13], 即以 $Q > 16.9 \text{ MJ/kg}$ 作为限定 Pareto 最优解集的输出条件, 即在满足该条件的同时寻求较高的抗压强度和固硫率。由于成型燃料性能指标量纲不同, 所以需要对各指标量纲进行归一化处理。本文采用标幺化归一处理方法: 标幺值为实际值与基值的比值, 基值为各指标最大值^[14]。基于式 (1) 的 LS-SVM 模型, 可求得在木屑、稻壳质量分数 0 ~ 80% 范围内两类型煤所对应的木屑型煤热值、抗压强度、固硫率最大值为

22.427 MJ/kg、671.0 N/个、92.127%；稻壳型煤热值、抗压强度、固硫率最大值分别为 22.427 MJ/kg、555.5 N/个、89.465%。从而得到两类型煤评价指标的标幺值之和,即 C_v 值。

木屑型煤

$$C_v = Q/22.427 + C_s/671 + S/92.127 \tag{4}$$

稻壳型煤

$$C_v = Q/22.427 + C_s/555.5 + S/89.465 \tag{5}$$

式(4)~(5)中, C_v 表示型煤各评价指标的综合性能, C_v 越大表明各评价指标效果越好。各评价指标能够同时达到最优值。

综上分析,以热值 $Q > 16.9$ MJ/kg 为条件,从 Pareto 最优解集中选取 C_v 值较大的子集作为有效解,如表 3 所示,每组解均是非劣最优解,均能满足工程要求,只是对各评价指标的权重不同。工程应用中木屑、稻壳质量分数的取值可根据成型燃料对各评价指标的具体要求进行选取。例如,远距离运输时可以选取抗压强度较大的子集为有效解;若对抗压强度、固硫率要求不高的情况下,可选取热值较大的子集为有效解。因此,表 3 子集中的每一组解,可作为对木屑、稻壳与煤混合型煤不同指标要求下的压缩成型运行工况的优化目标值。

4 结论

(1) 建立了木屑和煤、稻壳和煤混合型煤压缩成型过程 LS-SVM 模型。验证结果表明,两种模型预测值与实验值相对误差最大值分别为 3.46%、

表 3 木屑、稻壳和煤混合压缩成型过程优化解子集
Tab.3 Subsets of optimal solutions for compression molding process of BCC mixed sawdust, rice hull and coal

型煤 类型	成型 压力 P /MPa	生物质 质量分数 $R/\%$	热值 Q / $\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$	抗压强度 $C_s/\text{N}\cdot\text{个}^{-1}$	固硫 率 $S/\%$	C_v
木屑	40	30.48	20.705	482.400	82.364	2.536
		35.56	20.405	524.254	84.052	2.604
		40.63	20.165	560.453	85.668	2.664
		60.95	19.082	649.825	90.228	2.799
		67.30	18.699	664.437	90.990	2.812
稻壳	40	32.38	19.557	427.979	79.503	2.531
		37.14	19.131	461.731	81.009	2.590
		46.67	18.289	513.866	84.005	2.680
		50.24	17.979	528.543	84.972	2.703
		56.19	17.473	544.120	86.306	2.723

5.83%,两类型煤混合压缩成型过程具有较好的模拟效果。

(2) 基于所建模型,设计拟合了型煤混合压缩成型过程多目标优化目标函数,寻优分别得到木屑、稻壳与煤混合型煤压缩成型过程 Pareto 最优解集。

(3) 依据生物质固体成型燃料工程标准和生物质型煤综合性能 C_v 值,进一步从 Pareto 最优解集中选出了对木屑和煤、稻壳和煤混合型煤不同指标要求下的压缩成型工艺过程运行工况的优化目标值。

参 考 文 献

1 李大中. 生物质发电气化过程建模及优化研究[D]. 保定:华北电力大学,2009.
Li Dazhong. The research of modeling and optimizing of biomass power generation gasification process[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2009. (in Chinese)

2 俞国胜,侯孟. 生物质成型燃料加工装备发展现状及趋势[J]. 林业机械与木工设备,2009,37(2):4~8.
Yu Guosheng, Hou Meng. Development status and trend of biomass briquettes processing equipment[J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2009,37(2):4~8. (in Chinese)

3 韩磊. 牛粪混合煤渣压缩蜂窝煤燃烧的环境评价[D]. 北京:中国农业科学院,2008.
Han Lei. Environmental appraisal on the combustion of compressed honeycomb briquettes of mixed cattle manure and cinder [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2008. (in Chinese)

4 张鸿波,张增贵,董平. 生物质型煤燃烧特性的研究[J]. 洁净煤技术,2002,8(3):37~39,46.
Zhang Hongbo, Zhang Zengui, Dong Ping. Study on the combustion character of bio-briquette[J]. Clean Coal Technology, 2002,8(3):37~39, 46. (in Chinese)

5 何方. 生物质复合型煤的研制及其燃烧、污染特性研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2001.
He Fang. Preparation of biomass compound coal and investigation on its combustion and pollution characteristics [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2001. (in Chinese)

6 马爱玲,谌伦建. 生物质型煤技术综述[J]. 煤质技术,2008(4):47~50,53.
Ma Ailing, Chen Lunjian. Overview on research status of the bio-briquette[J]. Coal Quality Technology, 2008(4):47~50, 53. (in Chinese)

- 19 Prins M J, Ptasiński K J, Janssen F. Torrefaction of wood: part 2. Analysis of products[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2006, 77(1):35 ~ 40.
 - 20 Prins M J, Ptasiński K J, Janssen F. More efficient biomass gasification via torrefaction[J]. *Energy*, 2006, 31(15):3 458 ~ 3 470.
 - 21 Gera D, Mathur M P, Freeman M C, et al. Effect of large aspect ratio of biomass particles on carbon burnout in a utility boiler[J]. *Energy & Fuels*, 2002, 16(6):1 523 ~ 1 532.
 - 22 Zulfiqar M, Moghtaderi B, Wall T F. Flow properties of biomass and coal blends[J]. *Fuel Processing Technology*, 2006, 87(4):281 ~ 288.
 - 23 Müller-Hagedorn M, Bockhorn H, Krebs L, et al. A comparative kinetic study on the pyrolysis of three different wood species[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2003, 68(15):231 ~ 249.
 - 24 Strezov V, Patterson M, Zymła V, et al. Fundamental aspects of biomass carbonisation[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2007, 79(1 ~ 2):91 ~ 100.
 - 25 赵辉. 生物质高温气流床气化制取合成气的机理试验研究[D]. 杭州:浙江大学, 2007.
Zhao Hui. Experimental and mechanism research on entrained flow gasification of biomass for syn-gas[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007. (in Chinese)
 - 26 Felbli F F, Luengo C A, Suárez J A, et al. Wood briquette torrefaction[J]. *Energy for Sustainable Development*, 2005, 9(3):19 ~ 22.
 - 27 Demirba A. Mechanisms of liquefaction and pyrolysis reactions of biomass[J]. *Energy Conversion and Management*, 2000, 41(6):633 ~ 646.
 - 28 杨海平, 陈汉平, 晏蓉, 等. 油棕废弃物及生物质三组分的热解动力学研究[J]. *太阳能学报*, 2007, 28(6):626 ~ 631.
Yang Haiping, Chen Hanping, Yan Rong, et al. Thermodynamic analysis of pyrolysis of palm oil wastes and biomass components[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2007, 28(6):626 ~ 631. (in Chinese)
 - 29 姚燕, 王树荣, 郑赞, 等. 基于热红联用分析的木质素热裂解动力学研究[J]. *燃烧科学与技术*, 2007, 13(1):50 ~ 54.
Yao Yan, Wang Shurong, Zheng Yun, et al. Kinetic research of lignin pyrolysis by TGA-FTIR analysis[J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2007, 13(1):50 ~ 54. (in Chinese)
 - 30 Bergman P C A, Boersma A R, Kiel J H A, et al. Torrefaction for entrained-flow gasification of biomass[R]. ECN - C - 05 - 067, 2004.
-

(上接第 87 页)

- 7 李大中, 王臻. 基于最小二乘支持向量机的生物质气化过程模型建立[J]. *系统仿真学报*, 2009, 21(3):629 ~ 633.
Li Dazhong, Wang Zhen. Modeling of biomass gasification process based on least squares SVM[J]. *Journal of System Simulation*, 2009, 21(3):629 ~ 633. (in Chinese)
- 8 李大中, 王卉. 稻秆气化焦油催化裂解脱除过程模型改进与优化[J]. *农业机械学报*, 2010, 41(3):109 ~ 112.
Li Dazhong, Wang Hui. Improving and optimizing the LS - SVM model of the rice straw gasification tar removal process by catalytic cracking[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(3):109 ~ 112. (in Chinese)
- 9 王小平, 曹立明. 遗传算法理论、应用与软件实现[M]. 西安:西安交通大学出版社, 2002.
- 10 林铨云, 董加礼. 多目标优化的方法与理论[M]. 长春:吉林教育出版社, 1992.
- 11 de Toro F, Ortega J, Fernández J, et al. PSFGA: a parallel genetic algorithm for multiobjective optimization[C] // *Proceedings 10th Euromicro Workshop on Parallel, Distributed and Network-based Processing*, 2002:384 ~ 391.
- 12 姜健, 赵杰, 臧希喆. 基于并列选择遗传算法的多机器人协作探测[J]. *计算机工程与设计*, 2008, 29(5):1 218 ~ 1 221.
Jiang Jian, Zhao Jie, Zang Xizhe. Coordinated multi-robot exploration based on parallelism selection genetic algorithm[J]. *Computer Engineering and Design*, 2008, 29(5):1 218 ~ 1 221. (in Chinese)
- 13 刘军利, 蒋剑春. 论生物质能源标准体系(Ⅲ)——生物质固体燃料标准化研究进展[J]. *生物质化学工程*, 2006, 40(6):54 ~ 58.
Liu Junli, Jiang Jianchun. Statement of biomass energy standard system (Ⅲ)—biomass solid fuel standardization progress[J]. *Biomass Chemical Engineering*, 2006, 40(6):54 ~ 58. (in Chinese)
- 14 李昂. 电力系统标幺制与归算[J]. *电气电子教学学报*, 2004, 26(4):53 ~ 54, 56.
Li Ang. Per-unit system and conversion in power system[J]. *Journal of Electrical & Electronic Education*, 2004, 26(4):53 ~ 54, 56. (in Chinese)