

# 市政污泥掺混半焦粉成型设备关键参数研究

林红,张旭辉,滕济林,屈万领,吴鹏,张云鹏  
(北京国电富通科技发展有限公司,北京 100070)

**摘要:**为设计出适合市政污泥掺混半焦粉成型的工业设备,在实验室条件下分别利用压力试验机和对辊成型机进行成型试验,研究成型物料的压缩特性和辊轮转速对市政污泥掺混半焦粉成型效果的影响。结果表明,成型压强为 17.5 MPa 时,污泥掺混半焦粉成型的压缩比最大,为 0.487 8;对辊成型机辊轮转速为 8 r/min 时,成型时间为 0.41 s,成型效果最好;确定了市政污泥掺混半焦粉与辊轮间的摩擦角  $\varphi$  为  $15.86^\circ$ ,摩擦系数  $\mu$  为 0.28。

**关键词:**半焦粉;成型设备;辊轮转速;摩擦角

中图分类号:X703 文献标志码:A 文章编号:1006-6772(2016)02-0014-04

## Key parameters of briquetting equipment for civil sludge mixed with semi-coke powder

LIN Hong, ZHANG Xuhui, TENG Jilin, QU Wanling, WU Peng, ZHANG Yunpeng  
(Beijing Guodian Futong Science and Technology Development Co., Ltd., Beijing 100070, China)

**Abstract:** In order to design a suitable industrial equipment which could realize large-scale production of civil sludge mixed with semi-coke powder, the briquetting test was conducted using a pressure testing machine and a roll-type forming machine under laboratory conditions. The influence of compression characteristics of material and roller speed on the strength of briquette was investigated. The results showed that when the briquetting pressure was 17.5 MPa, the compression ratio of civil sludge mixed with semi-coal powder molding reached the maximum of 0.487 8. When the roller wheel speed of briquetting machine was 8 r/min, and the rolling time was 0.41 s, the shaping effect was the best. The friction angle between the material and the roller was  $15.86^\circ$ , frictional factor was 0.28.

**Key words:** semi-coke powder; briquetting equipment; roller speed; frictional angle

## 0 引言

生物质型煤技术是开发利用煤和生物质能的新途径<sup>[1-2]</sup>,既保证了燃料热值,又充分发挥煤和生物质自身优势,利于克服常规型煤性能的不足。利用污水处理厂的脱水污泥(含水率为 80%左右)与煤、生物质或焦炭等助燃物质混合成型,再将成型燃料自然干化或热烘干即可制得生物质型煤燃料<sup>[3-6]</sup>。这种方法不仅可有效解决污泥处理难题,而且能够满足能源需求和减少对化石燃料的依赖,减少温室气体和 SO<sub>2</sub> 排放,达到保护环境的目的。成型燃料制备的关键设备是型煤成型机,其选型以成型原料

特性、成型压力及型煤用途等因素为基础。目前已在工业上应用的成型机械包括对辊成型机、冲压式成型机、环式成型机和螺旋式成型机等,其中应用最广泛的是对辊成型机<sup>[7]</sup>。近年来,我国对辊成型机经过不断研制和改造,各方面性能已有较大进展<sup>[8]</sup>,但现有成型技术在实际应用中也遇到了一些难题:①成型机对原料性质的适应性不强,很多设备,尤其从国外引进的设备只能适应单一性质的原料,入料性质改变,成型效果变差<sup>[9]</sup>;②多采用有黏结剂的低压成型工艺,成型过程中因使用大量黏结剂而使成型成本大为提高<sup>[10]</sup>;③能耗高,有些设备采用热压成型工艺,生产过程中消耗的二次能源甚

收稿日期:2015-09-15;责任编辑:白娅娜 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.2016.02.004

基金项目:国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2012AA063506)

作者简介:林红(1986—),女,河南商丘人,工程师,硕士,主要从事低阶煤综合利用的相关技术研究。E-mail:linhong@sgepri.sgcc.com.cn

引用格式:林红,张旭辉,滕济林,等.市政污泥掺混半焦粉成型设备关键参数研究[J].洁净煤技术,2016,22(2):14-17,22.

LIN Hong, ZHANG Xuhui, TENG Jilin, et al. Key parameters of briquetting equipment for civil sludge mixed with semi-coke powder[J]. Clean Coal Technology, 2016, 22(2): 14-17, 22.

至高于生物质压块中蕴藏的能量;④压辊环模磨损严重,严重制约了成型机的使用寿命。为开展污泥掺混半焦粉成型设备关键参数的研究,林红等<sup>[11]</sup>首先在实验室利用数显压力试验机进行了单个压球试验。结果表明,以成型原料中半焦粉的量为基准,在污泥(含水80%)添加比例为其20%,黏结剂添加比例为其2%,成型压力35 kN(换算为压强17.50 MPa)条件下,污泥掺混半焦粉成型效果最佳,此时成型物料的水分约为23%。笔者在上述研究的基础上,针对现有对辊成型机实际应用中的优点和不足,进一步探讨污泥掺混半焦粉的成型特性,并利用已有成型公式进行计算,得到了成型机设计

的关键参数,为成型机的设计提供了依据。

## 1 物料理化特性分析

对市政污泥和褐煤半焦粉进行工业分析、元素分析及发热量分析,结果见表1。

由表1可知,市政污泥的水分较高,为74.84%,而褐煤半焦粉的水分只有7.02%,在保证原料总水分的条件下,应尽量提高污泥添加比例,从而加大污泥处理量。市政污泥的发热量在8.50 MJ/kg以上,具有利用价值。半焦粉热值高和水分低的特点,在保证成型物料总水分和热值的前提下,能够增加污泥的添加量和处理量。

表1 市政污泥和半焦粉的工业分析、元素分析及发热量

Table 1 The industry analysis, element analysis and calorific value analysis of civil sludge and semi-coke powder

样品	工业分析/%				元素分析/%					$Q_{gr,ad}/$ (MJ·kg <sup>-1</sup> )	$Q_{net,ad}/$ (MJ·kg <sup>-1</sup> )
	$M_{ar}$	$V_{ar}$	$A_{ar}$	$FC_{ar}$	$w(C_d)$	$w(H_d)$	$w(O_d)$	$w(N_d)$	$w(S_{t,d})$		
市政污泥	78.84	8.95	10.74	1.47	27.38	3.16	13.75	2.10	0.84	9.28	8.52
半焦粉	7.02	8.45	16.48	68.05	76.74	1.32	2.19	0.66	2.61	25.28	24.87

## 2 物料压缩特性研究

物料压缩特性是利用物料的相对体积压缩比来衡量,是评价对辊机成型过程性能的主要指标。

物料的压缩过程可分为4个阶段<sup>[12]</sup>,即松散阶段、过渡阶段、压紧阶段和推移阶段。松散阶段是指在压缩初始时期,物料中的空气和水分在一定程度上被排除,空隙慢慢减小,是以克服物料间空隙为主的压缩成型过程;过渡阶段是大颗粒发生破裂变成小粒子,并填补物料内部空隙的过程;压紧阶段是物料发生塑性变形并基本成型的过程;在推移阶段,物料颗粒的静摩擦力转变为动摩擦力,同时发生应力松弛,使压力急剧下降<sup>[13]</sup>。

相对体积压缩比是指物料在压缩前后的容积差(即被压缩了的容积)与压缩前的容积之比值<sup>[14]</sup>,即

$$\varepsilon = \frac{V_1 - V_2}{V_1} = 1 - \frac{V_2}{V_1} = 1 - \frac{\rho_1}{\rho_2} \quad (1)$$

式中, $V_1$ 为物料被压缩之前的体积,cm<sup>3</sup>;  $V_2$ 为物料被压缩之后的体积,cm<sup>3</sup>(不考虑膨胀); $\rho_1$ 为物料被压缩之前的密度,g/cm<sup>3</sup>;  $\rho_2$ 为物料被压缩之后的密度,g/cm<sup>3</sup>(不考虑膨胀)。

实验室的压球试验设备是数显式压力试验机,模具自制,置于压力试验机上下压板之间,压出的型

煤为扁球形,球重约60 g,最大直径50 mm。利用市政污泥掺混半焦粉开展一系列压力/压强下的成型试验,研究成型压力/压强与物料相对体积压缩比之间的关系。

试验步骤为:在成型物料的最佳配比(以半焦粉为基准,黏结剂添加比例为其2%、含水80%的污泥添加比例为其20%)条件下,通过将压力试验机设定一系列压力值并换算为压强值进行压球,分别测定成型物料的质量以及压缩前后的体积,从而计算出各种压力/压强下型煤的密度和体积压缩比,并绘制出物料体积压缩比随成型压强的变化关系曲线。试验中的成型压力依次设定为:0、10、20、30、40和50 kN,成型压力作用面积为20.00 cm<sup>2</sup>,以此作为压力/压强换算的依据。不同成型压力/压强下测得的物料特性见表2。

物料体积压缩比与成型压力之间的关系如图1所示。

由表2可知,物料的体积压缩比呈现先增大后减小的趋势,成型压强为17.50 MPa时达到最大,说明随着成型压强增大,型煤密度先增大后减小。出现这种现象的原因是成型压强太大时会导致型煤出现压溃现象,体积膨胀导致密度变小。所以,成型压强为17.50 MPa时,型煤内部结构最为致密,型煤密

表2 物料压缩特性试验结果

Table 2 Test results of the material compression feature

成型压力/kN	成型压强/MPa	物料质量/g	型煤体积/cm <sup>3</sup>	型煤密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	体积压缩比
0	0	63.00	100.00	0.63	0
10	5.00	58.46	50.40	1.16	0.456 9
15	7.50	59.94	50.80	1.18	0.466 1
20	10.00	61.20	51.00	1.20	0.475 0
25	12.50	60.96	50.80	1.20	0.475 0
30	15.00	60.80	50.40	1.21	0.479 3
35	17.50	59.90	48.70	1.23	0.487 8
40	20.00	58.13	48.85	1.19	0.470 6
45	22.50	61.25	52.80	1.16	0.456 9
50	25.00	61.82	55.20	1.12	0.437 5

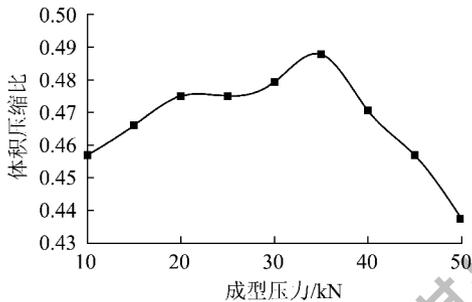


图1 物料体积压缩比与成型压力之间的关系

Fig. 1 Relationship between the material volume compression ratio and molding pressure

度最大,为污泥掺混半焦粉成型的最佳压强,这是成型机成型压力设计的重要依据。

### 3 连续成型过程的计算及分析

进行连续成型试验的设备是市售对辊成型机,最大处理量为1 t/h,可通过辊轮转速实现处理量可调,对辊成型机转速的可调范围为0~17 r/min;辊间压力约为0.2 t/cm,为一定值。成型原料及配比与压球试验相同。连续成型试验主要通过调节对辊轮的转速检验成型效果,其中,成型机转速选取3、5、8、12和17 r/min五个水平,成型效果用湿球落下强度和干球冷压强度2个指标来衡量。不同辊轮转速下型煤的性能测试结果见表3。

由表3可知,随着成型机辊轮转速变大,湿球密度和干球密度均呈减小趋势。湿球落下强度和干球冷压强度随辊轮转速的变化如图2所示。

由图2可知,辊转速为8 r/min时,湿球落下强度和干球冷压强度均出现了峰值,且随着转速增加,

表3 不同辊轮转速下型煤性能测试结果

Table 3 The test results of briquette performance under different roller wheel speeds

转速/(r·min <sup>-1</sup> )	湿球落下强度/%	湿球密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	干球冷压强度/N	干球密度/(g·cm <sup>-3</sup> )
3	62.84	1.25	221.6	0.95
5	67.05	1.23	224.3	0.91
8	70.27	1.23	244.8	0.91
12	53.68	1.22	214.5	0.91
17	69.21	1.21	200.7	0.90

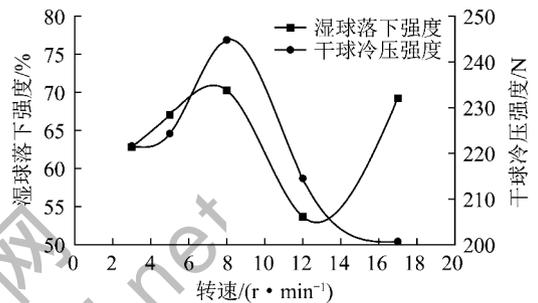


图2 辊轮转速对湿球落下强度和干球冷压强度的影响

Fig. 2 The influence of roller speed on shatter strength of green pellet and compression strength of dry coal

两者均呈现先增大后减小的趋势,说明市政污泥掺混半焦粉成型有合适的成型时间,成型时间太长或太短都不利于提高型煤强度,而且成型时间与成型机辊轮转速对应。因此,市政污泥掺混半焦粉的最佳成型时间可由成型机辊轮转速为8 r/min计算得到。

根据上述最佳工况可以确定湿/干球的密度分别为: $\rho_2=1.23\text{ g/cm}^3$ , $\rho_3=0.91\text{ g/cm}^3$ ;通过表2又可得物料压缩前的密度 $\rho_1=0.63\text{ g/cm}^3$ ,代入式(1)即可计算物料的最佳相对压缩比 $\varepsilon=0.48$ 。

#### 3.1 最佳成球时间的计算

连续成型试验确定了市政污泥掺混半焦粉的最佳成型时间为辊轮转速8 r/min时对应的成型时间,此时成型效果最佳。根据辊轮转速利用式(2)计算型煤的最佳成型时间

$$t = \frac{60}{n} \times \frac{b}{\pi D} \quad (2)$$

式中, $n$ 为成型机辊轮转速,为8 r/min; $b$ 为成型机模窝宽度,为5.00 cm; $D$ 为成型机辊轮直径,为28.80 cm。

将相关数据代入式(2)可得到物料的最佳成型时间为0.41 s。

### 3.2 摩擦角的计算

带状材料的压制过程为连续压制,而对辊成型机咬合物料是逐个进行的。由于成型机的每个辊轮面上都是半模窝,每对相对应的模窝在辊面上咬入物料的过程中,由于球模上边沿距离比下边沿大很多,所以模窝上边沿要比模窝下边沿晚到达咬入角的对应点,当模窝下边沿到达咬入角的对应点时,模窝中下部的物料仍然被推向上部,物料还没有被完全咬合。只有当相对应的2只半模窝完全重合组成一副完整的球模时,才能使咬入的松散物料受压成球。

假定模窝底面中心径向线与两辊轮中心连线成角 $\varphi$ ( $\varphi$ 为摩擦角)时开始对物料加压(图3),则在成型过程中压缩比 $\varepsilon$ 满足下式

$$\varepsilon = \frac{V_1 - V_2}{V_1} = \frac{2RF(1 - \cos \varphi) \cos \varphi - \Delta F(1 - \cos \varphi)}{V_0 + 2RF(1 - \cos \varphi) \cos \varphi + \Delta F \cos \varphi} \quad (3)$$

式中, $R$ 为对辊成型机辊轮半径,为14.40 cm; $F$ 为对辊模窝开口处面积,为24.63 cm<sup>2</sup>; $V_0$ 为两对应模窝合起来的容积,为52.00 cm<sup>3</sup>; $\Delta$ 为两个辊轮的间隙,为0.10 cm。

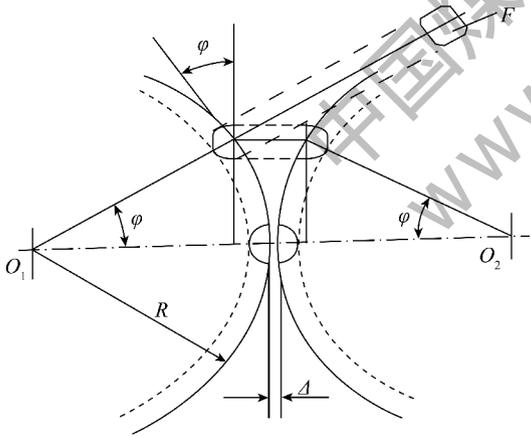


图3 压缩比计算简图

Fig. 3 The calculation diagram of compression ratio

利用最佳成型条件下计算得到的相对体积压缩比值及式(3),计算得到摩擦角 $\varphi$ 为15.86°,摩擦系数 $\mu(\tan \varphi)$ 为0.28。

## 4 结 论

1)成型压强为17.5 MPa时,污泥掺混半焦粉成型的压缩比最大,为0.487 8;对辊成型机辊轮转速为8 r/min时,成型时间为0.41 s,成型效果最好。

成型时间是保证型煤强度的重要因素,是设计成型机辊轮直径和转速的重要依据。

2)确定了市政污泥掺混半焦粉与辊轮间的摩擦角 $\varphi$ 为15.86°,摩擦系数 $\mu$ 为0.28。

### 参考文献:

- [1] Hein K R G, Bemtgen J M. EU clean coal technology: co-combustion of coal and biomass[J]. Fuel Processing Technology, 1998, 54(1/2/3): 159-169.
- [2] 徐康富, 龙 兴. 浅谈生物质型煤利用生物质能的意义及环境效益[J]. 能源研究与利用, 1996(3): 3-6.  
Xu Kangfu, Long Xing. Introduction to the significance and environmental benefits of biomass briquette coal using biomass energy[J]. Energy Research & Utilization, 1996(3): 3-6.
- [3] 李 辉, 吴晓芙, 蒋龙波, 等. 城市污泥制备成型衍生燃料技术综述[J]. 新能源进展, 2014, 2(1): 1-6.  
Li Hui, Wu Xiaofu, Jiang Longbo, et al. A review of municipal sludge manufacture pelletization derived fuel[J]. Advances in New and Renewable Energy, 2014, 2(1): 1-6.
- [4] Wzorek M. Characterisation of the properties of alternative fuels containing sewage sludge[J]. Fuel Processing Technology, 2012, 104: 80-89.
- [5] 张长飞, 葛仕福, 赵培涛, 等. 污泥合成燃料的研制及燃烧特性研究[J]. 环境科学学报, 2011, 31(1): 130-135.  
Zhang Changfei, Ge Shifu, Zhao Peitao, et al. Development of synthetic sludge fuel and measurement of its combustion properties[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2011, 31(1): 130-135.
- [6] 葛仕福, 赵培涛, 李 杨, 等. 污泥-秸秆衍生固体燃料燃烧特性[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(17): 110-116.  
Ge Shifu, Zhao Peitao, Li Yang, et al. Study on the combustion characteristics of sewage sludge-straw derived fuel[J]. Proceedings of The Chinese Society for Electrical Engineering, 2012, 32(17): 110-116.
- [7] 高玉杰. 型煤成型影响因素分析及型煤成型机的设计[D]. 太原: 山西大学, 2009: 9-11.  
Gao Yujie. Type coal forming factors analysis and the design of the coal machine[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2009: 9-11.
- [8] 栾秋承, 詹家钧. 工业型煤成型机的研究[J]. 煤炭加工与综合利用, 1994(2): 33-36.  
Luan Qiucheng, Zhan Jiajun. Research of industrial coal forming machine[J]. Coal Processing and Comprehensive Utilization, 1994(2): 33-36.
- [9] 王维振. 生物质压块成型影响因素及成型机动态分析[D]. 济南: 山东大学, 2012: 2-3.  
Wang Weizhen. Biomass briquetting characters and briquetting machine dynamic analysis[D]. Jinan: Shandong University, 2012: 2-3.
- [10] 刘龙保, 吴宏志, 周卫平. 高压对辊工业型煤成型机的设计研究[J]. 煤矿机械, 1999(3): 3-5.

(下转第22页)

- [15] Lee D G, Bonner J S, Garton L S, *et al.* Modeling coagulation kinetics incorporating fractal theories: a fractal rectilinear approach [J]. *Water Research*, 2000, 34(7): 1987-2000.
- [16] 杨 朕. 新型两性型壳聚糖基絮凝剂的絮凝性能研究及分形理论对絮凝动力学模型的修正[D]. 南京: 南京大学, 2014: 44-68.  
Yang Zhen. Flocculation performance of novel kinds of amphoteric chitosan-based flocculants and modification of flocculation kinetics model using fractal theory[D]. Nanjing: Nanjing University, 2014: 44-68.
- [17] 周倩倩. 不同变质程度煤的微生物絮凝研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2014: 55-86.  
Zhou Qianqian. Different metamorphic degree of coal microbial flocculation research[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2014: 55-86.
- [18] 陈剑虹. 环境工程微生物学[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2009: 51-57.  
Chen Jianhong. Environmental engineering microbiology [M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2009: 51-57.
- [19] 范 平, 宋天顺, 覃 彪, 等. 不同驯化方式对以苯酚为基质的微生物燃料电池产电性能的影响[J]. *环境工程学报*, 2012, 6(11): 3866-3872.  
Fan Ping, Song Tianshun, Qin Biao, *et al.* Effect of different acclimation on performance of microbial fuel cells using phenol as substrate[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2012, 6(11): 3866-3872.
- [20] Anastasios I Zouboulis, Chai Xiaoli, Ioannis A Katsoyianis. The application of bioflocculant for the removal of humic acids from stabilized landfill leachates[J]. *Journal of Environmental Management*, 2004, 70(4): 35-41.
- [21] 张 芳. 南极低温酵母 *Guehomyces pullulans* 17-1 菌株海藻糖的合成和控制[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013: 74-87.  
Zhang Fang. Synthesis and regulation of trehalose in the psychrotolerant yeast *Guehomyces pullulans* 17-1 [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013: 74-87.
- [22] Ma K, Wakisaka M, Sakai K, *et al.* Flocculation characteristics of an isolated mutant flocculant *Saccharomyces cerevisiae* strain and its application for fuel ethanol production from kitchen refuse[J]. *Bioresource Technology*, 2009, 100(7): 2289-2292.
- [23] Veelders M, Brückner S, Ott D, *et al.* Structural basis of flocculin-mediated social behavior in yeast[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2010, 107(52): 22511-22516.
- [24] Li E, Yue F, Chang Q, *et al.* Deletion of intragenic tandem repeats in unit C of FLO1 of *Saccharomyces cerevisiae* increases the conformational stability of flocculin under acidic and alkaline conditions[J]. *The Public Library of Science*, 2013, 8(1): 432-437.
- [25] 杜昭励, 程艳飞, 朱 卉, 等. 絮凝基因 FLO1 及 FLO1c 高表达提高工业酿酒酵母乙酸耐受性及发酵性能[J]. *生物工程学报*, 2015, 31(2): 231-241.  
Du Zhaoli, Cheng Yanfei, Zhu Hui, *et al.* Improvement of acetic acid tolerance and fermentation performance of industrial *Saccharomyces cerevisiae* by over expression of flocculant gene FLO1 and FLO1c[J]. *Chinese Journal of Biotechnology*, 2015, 31(2): 231-241.
- [26] 贺雷雨. 絮凝酵母 SPSC01 絮凝基因的分离及功能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2010: 78-90.  
He Leiuyu. Isolation and functional analysis of flocculation genes from the flocculating yeast SPSC01 [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010: 78-90.
- [27] 李 政, 吴伟林, 张云波, 等. 复合型微生物絮凝剂产生菌的培养及对炼化废水处理的研究[J]. *环境污染与防治*, 2011, 33(3): 74-77.  
Li Zheng, Wu Weiling, Zhang Yunbo, *et al.* Cultivation of compound bioflocculant-producing bacterium and its application in refinery wastewater treatment [J]. *Environmental Pollution and Control*, 2011, 33(3): 74-77.
- [28] 苏晓梅, 张慧芳, 申秀英, 等. 复合菌群产絮凝剂 MAC37 的特征及其在黏合剂废水中的应用[J]. *环境科学研究*, 2012, 25(3): 340-345.  
Su Xiaomei, Zhang Hui Fang, Shen Xiuying, *et al.* Characteristics of MAC37 produced by multiple bioflocculant-producing microorganisms and its application in adhesive wastewater [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2012, 25(3): 340-345.

(上接第 17 页)

- Liu Longbao, Wu Hongzhi, Zhou Weiping. Design study of high pressure roller industrial coal briquetting machine[J]. *Coal Mine Machinery*, 1999(3): 3-5.
- [11] 林 红, 滕济林, 张旭辉, 等. 市政污泥掺混半焦粉成型影响因素的实验研究[J]. *洁净煤技术*, 2015, 21(4): 87-90.  
Lin Hong, Teng Jilin, Zhang Xuhui, *et al.* Briquetting factors of municipal sludge mixed with semi-coke powder[J]. *Clean Coal Technology*, 2015, 21(4): 87-90.
- [12] 胡建军. 秸秆颗粒燃料冷态压缩成型实验研究及数值模拟[D]. 大连: 大连理工大学, 2008: 49-59.  
Hu Jianjun. Experimental study and numerical simulation of straw pellet fuel cold molding[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008: 49-59.
- [13] 闫国宏. 新鲜草物料压缩过程应力松弛试验研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2004: 4-5.  
Yan Guohong. Experimental study on stress relaxation during fresh grass material compression [D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2004: 4-5.
- [14] 尹玉婷. 生物质成型影响因素及对辊式成型机设计研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2011: 41-42.  
Yin Yuting. Study on influence factors to the biomass briquette and the design of bi-roller briquetting machine [D]. Shenyang: Northeastern University, 2011: 41-42.