

生物质固化燃料成型技术与关键设备分析

陶 雷^{1,2}, 郑加强^{1*}, 管 珣³, 吕文龙⁴

(1. 南京林业大学 机械电子工程学院, 江苏 南京 210037; 2. 江苏省农业机械试验站, 江苏 南京 210017;
3. 湖州师范学院 信息与工程学院, 江苏 湖州 313000; 4. 泰兴市鼎立科技有限公司, 江苏 泰兴 225400)

摘 要:通过系统地分析国内外生物质成型设备固化技术研究特点和存在的问题,提出生物质固化成型生产线中的固化成型原理和工艺、固化成型过程等关键技术研究,以及自动供料系统、水分监测与补偿系统和联控技术系统的固化成型关键设备开发建议。

关键词:生物质;成型燃料;固化设备;关键技术

中图分类号:S784

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2014)-02-0173-05

Analysis of Biomass Briquette Solidification Technologies and Key Equipment

TAO Lei^{1,2}, ZHENG Jia-qiang^{1*}, GUAN Xun³, LYU Wen-long⁴

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing, Jiangsu 210037, China;
2. Jiangsu Agricultural Machinery Testing Evaluation Station, Nanjing, Jiangsu 210017, China;
3. School of Information & Engineering, Huzhou Teachers College, Huzhou, Jiangsu 313000, China;
4. Taixing Dingli Technology co., Ltd., Taixing, Jiangsu 225400, China)

Abstract: Technological characteristics and existing problems in making biomass briquette at home and abroad were discussed. Design and development of the production line for making biomass briquette was proposed from the aspects of solidification principle and key technologies, and solidification process, etc. Development of the key units for the solidification of biomass was proposed, such as auto-feeding system, material moisture monitoring and making up system, and associative control system.

Key words: biomass; briquetting; solidification equipment; key technology

成型燃料是先进的工业技术与再生资源相结合制造出的产品,是一种新型的生物能源,可代替木柴^[1]、原煤、燃油、液化气等,可广泛用于取暖、生活炉灶、热水锅炉、工业锅炉、生物质发电等^[2]。在德国,对于其立法分类中不能用于物质循环利用的废弃木材,通常都是作为燃料使用,直接用废弃木质材料等作燃料^[3],因而可对废弃木材加工为成型燃料。

生物质固化成型设备是燃料成型的关键设备,通过将低密度、低热值、燃烧性能差的农林废弃物(秸秆^[4]、枝丫柴等)转化成高密度、高热值、耐燃烧和便于储存运输的可再生、清洁、无公害生物质成型燃料^[5]或饲料。

本文拟在系统地分析国内外生物质固化成型设备技术研究特点的基础上,归纳目前生物质固化成型

存在的问题,然后从固化成型关键技术及其固化成型关键设备开发等方面提出建议,以促进适应中国国情的生物质固化燃料成型关键技术及其设备研制推广应用,推进成型燃料项目,缓解能源紧张局面。

1 国内外燃料成型技术研究特点分析

日本、美国及欧洲一些国家生物质固化成型燃料设备已经定型,并形成产业,在加热、供暖、干燥、发电等领域普遍推广应用。我国研究起步较晚,各科研院所从成型机理、生产工艺等多方面进行了研究,取得了丰硕成果,随着市场需求的增加,也进行了成型燃料燃烧性能方面的探索性研究。但当前主要以实验室模拟机型进行成型机理和产品性能等深层次的研究为主。

收稿日期:2013-08-15 修回日期:2013-11-18

作者简介:陶雷,男,工程师,博士,研究方向:农业机械化与农村废弃物能源综合利用。E-mail:yutiant@126.com

* 通信作者:郑加强,男,教授,博士生导师,研究方向:智能测控与现代农村机械设计理论与方法。E-mail:jgzheng@nifu.edu.cn

1.1 成型机理研究

物料特征如物料类型、粉碎粒度、含水率和添加剂是影响固化成型的关键因素,同时固化成型设备的固有特征如成型温度、工作压力、作业速度或预加热等特性又要求物料具备相应的特性,从而对成型产品机械性能如成型密度、强度、耐久性、伸长率和孔隙率等,以及作业能耗构成影响。Varun Panwar^[6]等研究指出成型密度与物料粒度、含水率、成型速度成反比,与成型压力成正比。Razuan^[7]等在实验室用液压活塞冲压成型机压制棕榈仁饼,试验表明:成型压力、温度、含水率和粘合剂是影响成型燃料密度和拉伸强度的关键因素,在成型压力64.38 MPa、温度80~100℃和含水率7.9%条件下,成型密度可达1 184~1 226 kg/m³、拉伸强度930~1 007 kPa,添加1.0%~2.0%苛性钠添加剂可以增加拉伸强度,而淀粉添加剂则无效。Hasan Yumak^[8]等用液压成型设备开展了风滚草粉碎后(长度≤10 mm)在4种成型模具下的成型试验,成型条件是含水率7%~10%、压力15.7~31.4 MPa和温度85~105℃。Chuen-Shii Chou^[9]等指出热压成型温度是影响成型块密度和耐压强度的关键因素,稻壳作为添加剂在热压过程中可以促进致密化。黄明权^[10]等在螺杆成型机理基础上研究了原料含水率、成型温度、原料种类和螺杆装配尺寸等对生物质成型的影响。闫文刚^[11]等在液压驱动活塞开模成型实验台进行了草坪修剪剩余物不同含水率不同锥度模具的成型试验,研究表明:随着生物质原料含水率增加,常温成型块密度和压缩力的变化趋势都是由小变大再变小。

由于固化成型过程比较复杂,高温、高压伴随着物理和化学变化,且受空间限制,无法直接观测成型过程。因此采用建立数学模型和显微观察的方式也是一种有效的研究方法。

Nalladurai Kaliyan^[12]等通过建立本构模型研究了弹性模数、强度系数、应变硬化指数、粘滞系数、摩擦损耗因子与成型压力、物料粒度、含水率、预热温度的关系。孙清^[13]等建立力学模型,利用ANSYS软件分析提出分段填料压缩可提高成型物的耐久性,采用缓慢压缩和提高物料的软化程度等方法可以防止成型物出现裂纹。杜红光^[14]等建立生物质成型模具的摩擦热分析模型,试验验证成型模具内表面温度在工作运转60 min后达到木质素软化温度,240 min后温度稳定在115~125℃,通过控制原料、模具材料与结构、生产率等因素,可缩短达到木质素软化点时间,提高成型质量。孙亮^[15]等采用四元二次回归正交旋转试验和响应面分析方法,

并利用SPSS和Matlab研究了成型压力、加热温度、含水率和粘结剂添加量对稻壳成型块松弛密度的影响次序及最优成型特征。

霍丽丽^[16]等采用显微形貌观察指出环模式成型机成型机理为间断性分层压缩。田潇瑜^[17]等利用电子立体显微镜观察玉米秸秆固化成型后的颗粒间的结合方式和显微形貌,指出在成型压力60~90 MPa、物料温度75~100℃、含水率8%~16%下成型块内部颗粒结合紧密,机械镶嵌作用明显,成型块物理品质和力学性能较好。吴云玉^[18]等建立生物质固化成型的微观接触几何模型,确定了压辊对原料的正压力与生物质颗粒表面斜角之间的数学关系。

1.2 成型燃料燃烧特性研究

影响成型燃料燃烧特性(热值、排放和灰分等指标)的因素主要有秸秆自身的物理特征、成型密度、成型直径,以及燃烧过程中的通风效果等。Varun Panwar^[6]等用液压成型机压制芒果树叶、桉树叶、麦秆和木屑成型试验和燃烧特性试验表明:这4种成型燃料热值均高于印度燃煤热值的1/2,可用于替代煤和木材。Chuen-Shii Chou^[19]等研究发现粉碎的稻秸秆成型块热值与稻壳含量和热压温度成正比。Stefan^[20]等推荐的成型燃料为900 kgf/cm²压力下压制的热值为12.72 MJ/kg(含水率15%)和弯曲强度可达150 kgf/cm²的成型块。A. Debdoubi^[21]等研究指出细茎茅部分热解后在较大压力下致密化能够获得较高的热值。马孝琴^[22]等研究表明:秸秆成型燃料燃烧初期挥发份析出速度随温度升高而加快,但燃烧平稳性越差;增大通风量可以降低炉膛内温度,挥发份析出速度相对平稳;增大成型密度对成型燃料挥发份的析出速度起到了一定抑制作用,燃烧初期的平均燃烧速度随成型直径和成型质量的增加而增大,但在燃烧中后期挥发份的析出速度相对稳定。罗娟^[23]等研究了8种生物质颗粒燃料的燃烧特性及污染物排放特性指出:挥发份含量与含水率、生物质颗粒燃料所需的点火时间成反比,SO₂、NO_x等污染物排放质量浓度远低于国家标准,但存在着部分生物质颗粒燃料灰分含量过大、结渣严重等问题。王民^[24]等采用烧水试验对成型块和松木块的燃烧特性参数进行了测试分析,成型块除蒸发速度外其余指标都优于或等于松木块。

1.3 成型燃料储存特性研究

不同物料的粉碎特征、含水率,以及作业条件对成型燃料的存储性能影响较大。但由于不同固化成型设备适应不同的物料特征,当压制物料含水率超过固化成型机的适应范围时,物料不宜固化成型,当

含水率较高时,成型燃料直接分散。Lucy wamukonya^[25]等在20℃和50%湿度条件下,测试了贮存2周后的成型秸秆块的含水率和耐久性,锯屑与刨屑的成型块耐久性最好、长度方向膨胀率最小;麦秸秆成型块的耐久性最差和长度方向膨胀率最大,而和锯屑的混合料成型块耐久性得到了提高。R. N. Singh^[26]在40%~85%环境湿度条件下研究指出在高湿度环境下存储生物质成型燃料不会产生任何问题。K. Theerarattananoon^[27]等研究指出由于成型颗粒脱模后膨胀,含水率与堆积密度、真比重成反比,应根据物料类型确定一个最佳的水分含量,以满足生物质颗粒稳定生产、耐久性和合适的储存环境的需要。

1.4 成型生产工艺研究

张百良^[28]介绍了HPB-I型生物质成型机的结构、成型原理与应用。该成型机采用液压驱动往复活塞双向挤压成型机构,通过双出杆油缸两端的冲杆挤压成型套筒中的生物质,在外力作用下,生物质颗粒开始重新排列位置关系,并发生机械变形和塑性流变;最后在冲杆的推挤作用下,生物质成为棒状从两端成型套筒中交替挤出,成为既定形状。

液压驱动往复活塞套筒双向挤压成型机构能投比低,效率高,工作平稳,设计合理,结构新颖;它为开发和利用以秸秆为主的生物质能提供了有效途径,减轻直接燃烧作物秸秆造成的环境污染,具有显著的经济效益和环保效益。

姜洋^[29]等利用BIO-C37生物质颗粒成型机通过试验研究了环模压缩比、原料种类和原料含水率等因素对颗粒燃料密度的影响,总结高密度颗粒燃料在较低能耗情况下的成型条件,得出在常温条件下,生物质原料在压缩成型过程中,粒子发生变形后以相互啮合的形式结合,而粒子层之间以相互贴合的形式结合。发现原料中纤维素含量决定了成型的难易程度,纤维素含量越高,成型越容易。原料粒度和含水率对成型条件有明显影响,粒径为1~5 mm、含水率为12%~18%时,生产的颗粒燃料密度最大。

姚宗路^[30]等采用模辊式成型原理,设计了一种生物质固体成型燃料加工生产线及相关的配套设备,该设备采用二次粉碎、连续喂料与调节喂料相结合的原料混配预处理工艺,并研究设计了带有强制喂料器的生物质固体成型燃料模辊式成型机,建立了生物质固体成型燃料生产线;指出采用生物质固体成型燃料生产线每小时生产率比单机状态下提高17.3%,经济效益提高13.3%,成型率达到98%,堆积密度和颗

粒密度也明显高于单机,但检测结果没有给出最能影响该工艺路线推广应用的功耗指标。

侯振东^[31]等通过自制秸秆固化成型设备的试验研究,表明引入轴向位移、径向峰值位移、峰值压力和名义应力等概念衡量成型块的力学性能是可行的。研究发现成型压力、温度及物料含水率对成型块的松弛密度、抗变形性和抗渗水性影响显著,性能优良且便于储运的玉米秸秆成型块的成型机理当压力60~90 MPa、加热温度75~100℃、物料含水率8%~12%时,可以生产出性能优良且便于储运的成型块。

Wolfgang Stelte^[32]研究了生物质燃料造粒生产过程中,颗粒长度、模具温度、生物质含水率和粒度对造粒压力的影响。研究结果表明,制粒压力随着颗粒增长而增大。比率的增大是依赖于生物物种、温度、水分含量和颗粒大小。建立了一个预测压力的数学模型,模拟结果与试验数据相符合。结果表明,温度的增加导致造粒压力减少。造粒压力对含水率的影响依赖于原材料的种类。对不同粒径(直径从0.5 mm至2.8 mm)进行了测试,结果表明,造粒压力随粒径减小而增加。确定了造粒压力对颗粒密度的影响,结果表明,造粒压力在200 MPa以上时只导致颗粒密度微量增加。

分析上述研究表明:影响生物质固化成型的关键因素是成型压力、含水率和物料粒度^[22];提高主轴转速和增加模孔直径^[23]是提高设备生产能力和降低能耗的主要措施^[33];相同成型压力下,原料粒度越小,成型后的燃料密度越大,成型效果越好^[34]。

2 生物质成型燃料固化设备存在问题分析

目前我国成型燃料加工以粗放型为主,自动化程度低和生产稳定性差。操作人员暴露在粉尘中,尤其是粉碎环节,工作环境恶劣。以1 t/h的固化成型生产线为例,连续生产时需要2名操作人员供料,采用叉或锹将粉碎/切碎的物料连续抛至输送装置。当物料含水率低于成型要求时,依靠经验采用喷雾或直接泼洒的方式进行水分补偿作业,物料含水率控制较难。由于粉尘和噪声造成环境恶劣,难以确保操作人员连续、稳定工作。因此,生产过程不稳定、连续性差、生产率低、能耗高和设备寿命短,以及维护费用高。平均生产率仅能达到60%。

国外在固化成型技术方面比较成熟,配套的生物质物料前处理技术也较完善,但价格高,且由于各地生物质物料及其前处理技术的不同,也存在物料供料散料技术的适应性问题。

3 成型关键技术及其研究建议

针对目前在技术方面仍局限于固化成型设备成型机理的研究,且以实验室模拟为主,与生产实际差异较大,而企业主更关注固化成型设备的经济效益,即生产能力和产品质量,缺乏理论支持,因此需要从成型技术和成型工艺及设备开展综合研究。

3.1 固化成型原理和工艺研究

生物质固化成型原理主要有冷压致密成型、热压致密成型和碳化致密成型。碳化致密成型由于工艺复杂、能耗高等问题,目前使用较少。热压致密成型主要有螺杆致密成型、活塞致密成型和冲压致密成型,螺杆成型机要解决螺杆和成型套筒磨损严重^[6]、使用寿命短的技术问题;活塞/冲压成型特点是要求原料含水率较小,要解决成型燃料膨胀、松散、甚至出现危险的“放炮”现象和前段工序粉碎消耗功率大等问题。

冷压致密成型包括水平轴式环模、垂直轴式环模和平模 3 种结构。水平轴式环模结构要解决物料容易在模腔中分布不均、下部物料多及上部无物料而造成模具受力不均和压辊、模具磨损不均、生产率低、相对能耗高等问题。而垂直轴式环模结构通过环模平放,解决了水平轴式环模结构的物料分布不均等问题,与平模结构机型成为当前市场主流产品。因此,实际生产中应加强环模平放和平模结构固化成型设备固化成型原理和工艺研究,针对不同物料类型、粉碎特征、物料含水率和对应主轴转速等确定

固化成型设备的适应性。

3.2 固化成型过程分析

固化成型过程比较复杂,高温、高压伴随着物理和化学变化,且受空间限制,无法直接观测成型过程。针对目前以实验室模拟机型、计算机软件模拟、成型后显微观察等方式为主,研究物料种类、物料粒度、含水率、成型压力和成型温度等对成型产品的影响,虽对实际生产起到一定指导作用,但还存在很大差异,如实际生产存在物料粒度和含水率不均匀、成型压力和温度不宜测量等因素。因此,很有必要开展固化成型过程分析,针对不同原料,分别试验粉碎/切碎后不同粒度、不同含水率条件下,监测主轴转速、电流和模孔温度,并取成型样品,测成型密度和采用显微观测成型样品结构等方法,分析实际生产情况下的固化成型过程。

4 固化成型关键设备开发分析

供料是固化成型设备作业过程中不可或缺的一环,直接影响设备的自动化程度、稳定性、可靠性和工作效率,以及工作环境安全。因此,需要开发自动供料系统,以及水分监测与补偿系统和联控技术系统等,图 1 为本文建议的自动化控制系统框图。通过自动化供料、水分补偿和监测主轴转速(压辊转速)或电流变化,调整供料速度等,实现固化成型设备的自动化生产,减少劳动强度,降低生产成本,确保稳定、连续生产。

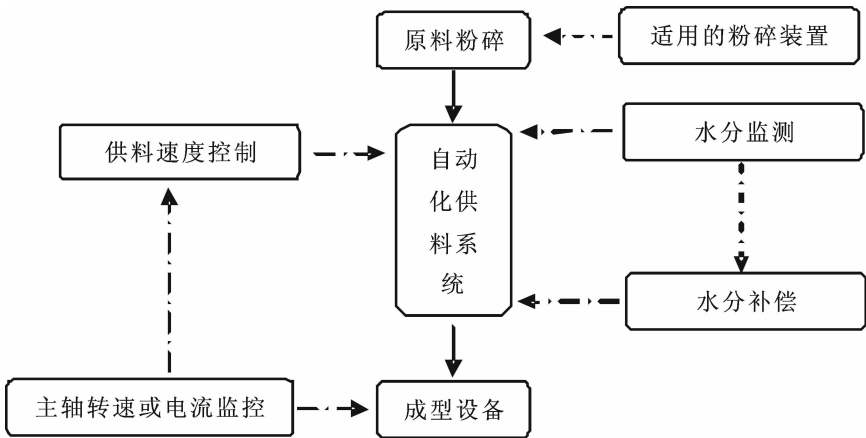


图 1 自动化控制系统框图

Fig. 1 Diagram of automatic control system

5 结论

分析国内外生物质固化成型设备及燃料成型技术的研究特点,以及目前生物质成型燃料固化生产

存在的生产环境安全、供料自动化程度低和制品质量等一些问题,在分析生物质燃料成型系统工程的基础上,提出如下建议:

1)在实际生产中,研究针对物料类型、粉碎粒

度、物料含水率 and 对应主轴转速等确定固化成型设备适应性的生物质燃料固化成型原理和工艺。

2)开展为生物质固化成型生产线开发自动供料系统,以及水分监测与补偿系统和联控技术系统。

3)逐步将各系统应用于生物质固化成型生产线,试验比较应用前后的固化成型设备工作的稳定性、连续性,以及工作环境和经济效益等。

参考文献:

[1] 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.

[2] 刘延春,张英楠,刘明,等. 生物质固化成型技术研究进展[J]. 世界林业研究, 2008, 21(4):41-47.

[3] 王珊珊,孙芳利,段新芳,等. 废弃木质材料的循环利用技术及我国未来的研究重点[J]. 西北林学院学报, 2005, 20(2): 183-185.

[4] 余雕,耿增超. 农业秸秆生物质转化利用的研究进展[J]. 西北林学院学报, 2010 (1): 157-161.

[5] 王庆和,孙勇. 我国生物质燃料固化成型设备研究现状[J]. 农机化研究, 2011, 33(03):211-214.

[6] PANWAR V, PRASAD B, WASEWAR K L. Biomass residue briquetting and characterization[J]. Journal of Energy Engineering, 2010, 137(2): 108-114.

[7] RAZUAN R, CHEN Q, ZHANG X, *et al.* Pyrolysis and combustion of oil palm stone and palm kernel cake in fixed-bed reactors[J]. Bioresource Technology, 2010, 101(12): 4622-4629.

[8] YUMAK H, UCAR T, Seyidbekiroglu N. Briquetting soda weed (*Salsola tragus*) to be used as a rural fuel source[J]. Biomass and Bioenergy, 2010, 34(5): 630-636.

[9] CHOU C S, LIN S H, LU W C. Preparation and characterization of solid biomass fuel made from rice straw and rice bran[J]. Fuel Processing Technology, 2009, 90(7): 980-987.

[10] 黄明权,张大雷. 影响生物质固化成型因素的研究[J]. 农业工程学报, 1999, 83(1):17-18.

[11] 闫文刚,俞国胜,张海鹰,等. 含水率对草坪草常温开模成型的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(Supp. 1):162-165.

[12] KALIYAN N, MOREY R V. Constitutive model for densification of corn stover and switchgrass[J]. Biosystems engineering, 2009, 104(1): 47-63.

[13] 孙清,白红春,赵旭,等. 蜂窝状生物质燃料固化成型有限元分析[J]. 农业机械学报, 2009, 40(2): 107-109.

[14] 杜红光,董玉平,王慧,等. 生物质冷压成型模具摩擦热分析[J]. 农业工程学报, 2011, 27(9): 58-62.

[15] 孙亮,孙清,接鑫,等. 稻壳热压成型工艺参数试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(1): 96-100.

[16] 霍丽丽,田宜水,孟海波,等. 生物质颗粒燃料微观成型机理[J]. 农业工程学报, 2011, 27(Supp. 1):21-25.

[17] 田潇瑜,侯振东,徐杨. 玉米秸秆成型块微观结构研究[J]. 农业机械学报, 2011, 42(3): 105-108.

[18] 吴云玉,董玉平,吴云荣. 生物质固化成型的微观机理[J]. 太阳能学报, 2011, 32(2): 268-271.

[19] CHOU C S, LIN S H, PENG C C, *et al.* The optimum conditions for preparing solid fuel briquette of rice straw by a piston-mold process using the Taguchi method[J]. Fuel Processing Technology, 2009, 90(7): 1041-1046.

[20] STEFAN D S, PENU A I, STEFAN M. Treatment and management of distillery fermented fruit spent marc. I. Processing into compacted solid fuel[C]//ICEEM05 The Fifth International Conference on Environmental Engineering and Management. Department of Environmental Engineering and Management, Gh. Asachi Technical University, 2009:273-276.

[21] DEBDOUBI A, COLACIO E. Production of fuel briquettes from esparto partially pyrolyzed[J]. Energy conversion and management, 2005, 46(11): 1877-1884.

[22] 马孝琴,张百良. 秸秆成型燃料燃烧速度影响因素的研究[J]. 河南农业大学学报, 2006,40(1): 77-82.

[23] 罗娟,侯书林,赵立欣,等. 典型生物质颗粒燃料燃烧特性试验[J]. 农业工程学报, 2010 (5): 220-226.

[24] 王民,郭康权,朱文荣. 秸秆制作成型燃料的试验研究[J]. 农业工程学报, 1993, 9(1): 99-103.

[25] WAMUKONYA L, JENKINS B. Durability and relaxation of sawdust and wheat-straw briquettes as possible fuels for Kenya[J]. Biomass and Bioenergy, 1995, 8(3): 175-179.

[26] SINGH R N. Equilibrium moisture content of biomass briquettes[J]. Biomass and Bioenergy, 2004, 26(3): 251-253.

[27] THEERARATTANANOON K, XU F, WILSON J, *et al.* Physical properties of pellets made from sorghum stalk, corn stover, wheat straw, and big bluestem[J]. Industrial Crops and Products, 2011, 33(2): 325-332.

[28] 张百良,李保谦,赵朝会,等. HPB-I 型生物质成型机的应用研究[J]. 太阳能学报, 1999, 20(3): 234-238.

[29] 姜洋,曲静霞,郭军,等. 生物质颗粒燃料成型条件的研究[J]. 可再生能源, 2006, 129(5): 16-18.

[30] 姚宗路,田宜水,孟海波,等. 生物质固体成型燃料加工生产线及配套设备[J]. 农业工程学报, 2010, 26(9): 280-285.

[31] 侯振东,田潇瑜,徐杨. 秸秆固化成型工艺对成型块品质的影响[J]. 农业机械学报, 2010, 41(5): 86-89.

[32] STEITE W, HOIM J K, SANNADI A R, *et al.* Fuel pellets from biomass: the importance of the pelletizing pressure and its dependency on the processing conditions[J]. Fuel, 2011, 90(11): 3285-3290.

[33] 郝永俊,宋道,张曙光,等. 生物质燃料固化成型工艺研究[J]. 天津科技, 2011(4): 10-12.

[34] 张百良,樊峰鸣,李保谦,等. 生物质成型燃料技术及产业化前景分析[J]. 河南农业大学学报, 2005, 39(1): 111-115.