

## 生物质固化成型技术研究进展\*

刘延春<sup>1</sup> 张英楠<sup>2</sup> 刘明<sup>1</sup> 张启昌<sup>2</sup> 董征<sup>3</sup>

(1 吉林省林业厅, 长春 132000; 2 北华大学, 吉林省吉林市 132013;

3 吉林大学环境与资源学院, 长春 132006)

**摘要:** 生物质固化成型技术是目前利用生物质能比较普遍且效果显著的技术之一。它是将生物质压制为便于运输和贮存的棒状或颗粒燃料, 可以提高燃烧效率。文中综述了国内外生物质固化成型技术的开发利用现状, 从成型工艺、成型设备、影响因素和燃料炉具 4 个方面进行了总结, 并针对我国生物质能源现状提出了合理、充分开发生物质固化成型技术的相关问题和建议。

**关键词:** 生物质, 固化成型, 颗粒燃料, 成型设备

中图分类号: S 727.4

文献标识码: A

文章编号: 1001-4241(2008)04-0041-07

### Reviews on Solidification Technology of Biomass

Liu Yanchun<sup>1</sup> Zhang Yingnan<sup>2</sup> Liu Ming<sup>1</sup> Zhang Qichang<sup>2</sup> Dong Zheng<sup>3</sup>

(1 Department of Forestry in Jilin Province, Changchun 132000, China

2 Forestry College of Beihua University, Jilin 132013, Jilin, China

3 College of Environment and Resources, Jilin University, Changchun 130026, China)

**Abstract** At present the biomass solidification technology is one of the more universal and effective technology for bioenergy utilization. In order to transport or reserve the biomass easily, the biomass are pressed into stick or pellet fuel, so the burning efficiency can be improved. The present situation of exploitation and utilization for the biomass solidification technology at home and abroad was summarized from four aspects: solidifying technics, solidifying equipment, influencing factor and fuel stove; the biomass solidification technology and its exploitation and utilization technology were summed up according to the present condition of bioenergy in China; some correlative problems and suggestions on reasonable and full development of the biomass solidification technology were put forward.

**Key words** biomass, solidification, pellet fuel, solidifying equipment

直到 20 世纪末, 生物质才作为一个专门概念提出, 并开始进行系统的产业化开发, 但在提出的角度、概念和内涵上不尽一致。一般认为, 生物质主要是指可再生或循环的有机物质, 包括农作物、树木和其他植物及其残体<sup>[1]</sup>; 也有从资源的高效利用和循环经济效益考虑, 提出生物质是非食物用木质纤维素类物质<sup>[2]</sup>。生物质资源种类繁多, 主要包括农业废弃物及农林产品加工

废弃物、薪柴、人畜粪便、城镇生活垃圾等几个方面<sup>[3]</sup>。生物质能以其可再生、资源丰富、对生态环境友好而逐渐成为一种重要的新能源。2004 年, 全球可再生能源利用总量的一半以上为生物质能, 占一次能源总量的 9.2%<sup>[5]</sup>。据估计, 地球上的植物每年通过光合作用固定的碳达  $2 \times 10^{11}$  t, 含能量达  $3 \times 10^{15}$  MJ, 可开发的能源约相当于全世界每年耗能量的 10 倍<sup>[6]</sup>。我国生物质能资

\* 收稿日期: 2008-03-07

基金项目: 吉林省重大科技发展计划项目 (20075012)

作者简介: 刘延春 (1953-), 男, 吉林省林业厅厅长, 北华大学林学院教授

源丰富,理论生物质能资源约有 50 亿 t 标准煤,是我国目前总能耗的 4 倍左右<sup>[7]</sup>。

生物质固化成型技术是将各类生物质原料经粉碎、干燥、高压成型等环节使原来分散的、没有一定形状的原料压缩成具有一定几何形状、密度较大的成型燃料<sup>[8]</sup>,是目前国内外利用生物质能比较普遍且效果显著的技术之一<sup>[9]</sup>。与普通薪材燃料相比,生物质固化成型燃料具有密度高、强度大、便于运输和装卸、形状和性质均一、燃烧性能好、热值高、适应性强、燃料操作控制方便等优点<sup>[10]</sup>,可用于锅炉和煤气发生炉,也可用于工业、家庭和农业、园林暖房的取暖<sup>[11]</sup>。对生物质资源丰富,贫油、贫煤的国家来说,生物质固化成型燃料将成为一种极具竞争力和发展前景非常可观的替代能源<sup>[12]</sup>。

## 1 生物质成型工艺研究

生物质压缩成型技术发展至今,已开发了多种成型工艺。根据主要工艺特征的差别,可分为“热压缩”成型技术、“冷压缩”成型技术和炭化成型技术。

### 1.1 “热压缩”颗粒成型技术

“热压缩”颗粒成型技术是把粉碎后的生物质在 170~220℃ 高温及高压下压缩成 625 kg/m<sup>3</sup> 的高密度成型燃料,极大地降低了生物质的储运成本,提高了燃烧效率<sup>[13]</sup>。其成型机理是在 200℃ 左右的温度下,使木质素中的胶性物质释放出来,起一种粘结剂的作用,同时通过高压将粉碎的生物质材料挤压成颗粒。“热压缩”技术的工艺由粉碎、干燥、加热、压缩、冷却过程组成,对成型前粉料含水率有严格要求,必须控制在 6%~12%。但这种颗粒燃料成本过高,欧洲市场售价为 110~150 欧元/t 在我国生产时售价高达 1 000 元/t 以上,只能供给对燃料环保、清洁性能要求很高的炭炉、壁炉等使用<sup>[14]</sup>。

### 1.2 “冷压缩”颗粒成型技术

“冷压缩”颗粒成型技术对原料含水率要求不高,因此也称湿压成型工艺技术,其成型机理是在常温下,通过特殊的挤压方式,使粉碎的生物质纤维结构互相镶嵌包裹而形成颗粒。因为颗粒成型机理的不同,“冷压缩”技术的工艺只需粉碎和压缩 2 个环节。“冷压缩”技术成型前粉

料含水率范围可扩大到 6%~25%。因此,与“热压缩”技术相比,具有原料适用性广,设备系统简单、体积小、重量轻、价格低、可移动性强,颗粒成型能耗低、成本低等优点<sup>[15]</sup>。

#### 1.2.1 生物质常温固化成型技术

北京惠众实科技有限公司开发的生物质常温固化成型技术,简称 Highzones 技术,把秸秆、杂草、灌木枝条乃至果壳果皮等农林废弃物在常温下压缩成热值达 11.9~18.8 MJ 的高密度燃料棒或颗粒,比传统的燃烧效率高 4 倍,成为燃烧方式、热值均接近煤炭却基本无污染物排放的高品位清洁能源。Highzones 技术通过独创的纤维碾切搭接技术,在常温下把粉碎后的生物质材料压缩成高密度成型燃料。因不需在加热条件下生产,能耗比国外同类产品降低 50%,成型设备体积减少 70%,综合生产成本降低 60% 以上。去掉购买秸秆的原料成本,每生产 1 t 燃料的加工成本仅 100 多元,市场售价 385 元/t<sup>[16]</sup>。在北京怀柔区利用秸秆进行的试点表明<sup>[17]</sup>,用 7 台造粒设备,可以达到 4 000 t 的年产量。

#### 1.2.2 秸秆成型燃料技术

秸秆成型燃料技术(SDBF 技术)是近年来发展迅速、大量处理农作物秸秆的高效转换技术之一<sup>[18]</sup>。SDBF 技术是在一定温度和压力作用下,将各类分散的、没有一定形状的秸秆经干燥、粉碎后压制成规则的、密度较大的棒状、块状或颗粒状等成型燃料,从而提高其运输和贮存能力,改善秸秆燃烧性能,提高利用效率,扩大应用范围。SDBF 可以取代煤、燃气等作为民用燃料进行炊事、取暖等,也可用作工业锅炉(生物质燃炉、壁炉、茶水炉、发电炉)的燃料<sup>[30]</sup>。

#### 1.2.3 EcoTre System 技术

EcoTre System 技术(ETS 技术)是意大利研究开发的新型木质颗粒制粒生产系统。其对原料湿度的适应性强,湿度为 10%~35% 时就可以成粒,所以大部分原料不需干燥即可直接用于制粒;成粒以后的温升只有 10~15℃,压制出来的颗粒温度一般只有 55~60℃,无须冷却即可直接进行包装,通常可以去掉干燥和冷却 2 道工序。这种制粒方法能耗很低(比传统的工艺方法减少 60%~70%),而且机器磨损也大大减小,总成本降低很多。对于不同原料,ETS 系统在整个

生产制粒过程的单位能量消耗为 25~60 kWh/t, 生产成本为 68~128 美元/t 而传统工艺的单位能耗为 80~180 kWh/t, 降低整个制粒生产过程的成本, 是生物质颗粒燃料推广应用的关键, 而引进 ETS 制粒生产技术可以有效解决这一关键问题。木质颗粒生产成本降低以后, 颗粒成品的当量价格与煤相当, 可望从根本上取代燃煤<sup>[19]</sup>。

### 1.3 炭化成型技术

炭化成型技术是将生物质成型燃料经干燥后, 置于炭化设备中, 在缺氧条件下闷烧, 即可得到机制木炭的技术。由于原料的纤维结构在炭化过程中受到破坏, 高分子组分受热裂解转化成炭, 并释放出挥发分(包括可燃气体、木醋液和焦油等), 因而其性能得到改善, 功率消耗也明显下降。但是, 炭化后的原料在挤压成型后维持既定形状的能力较差, 储存、运输和使用时容易开裂或破碎, 所以采用炭化成型技术时, 一般都要加入一定量的粘结剂, 如果不使用粘结剂, 就需要较高的成型压力, 这将明显提高成型机的造价<sup>[20]</sup>。但王文兵等认为, 我国木炭的需求量随着经济发展正逐年增加, 根据生物质固化成型技术原理, 并在调查研究我国当前机制木炭生产工艺过程及设备现状的基础上提出, 在我国发展机制木炭具有良好的经济、社会和生态效益<sup>[21]</sup>。

在原料配方方面, Bansal 等研究发现, 粘结剂与消烟助燃剂的研制大多采用水解纤维素作粘结剂, 而我国采用植物纤维和碱法草浆原生黑液、腐殖酸钠渣等作复合粘结剂。在消烟助燃剂方面, 研究最多的是钡剂。钡剂不仅是作为消烟助燃, 同时还有降低 SO<sub>2</sub> 等有害气体的作用<sup>[22]</sup>。Lavrov 认为, 固体燃料的气化和燃烧机理主要有以下几个过程: 首先反应的气体扩散到碳的表面发生吸附, 然后形成过渡化合物, 最后产物发生解吸<sup>[23]</sup>。

## 2 生物质成型设备研究

上世纪 30 年代, 美国就开始研究压缩燃料成型技术, 并研制了螺旋式成型机。在温度为 80~350 °C 和压力 10 MPa 条件下, 能把木屑和刨花压缩成固体成型燃料。日本于 50 年代从国外引进成型技术并进行了改进, 研制出棒状燃料成型机及相关的燃烧设备, 并发展成日本压缩成型燃

料的工业体系。从 80 年代开始, 日本对生物质压缩成型燃料进行了探讨, 对压缩过程中的动力消耗、压模的结构与尺寸、压缩燃料的含水率、压缩时的温度、压力以及原料的颗粒大小等进行了实验研究, 进一步改进了压缩成型燃料设备, 使成型燃料更为实用化。1984 年日本的生产厂家达 172 家, 生产总量达 2.6 万 t<sup>[24]</sup>。

70 年代后期, 由于出现世界能源危机, 石油价格上涨。西欧许多国家如芬兰、比利时、法国、德国、意大利等也开始重视压缩成型燃料设备的研究。法国开始时使用秸秆压缩粒作为奶牛饲料, 近年来也开始研究压缩块燃料, 而且由多种林业废弃物生产的压缩料已达到了实用阶段。由比利时研制成功的 T117 型螺旋压块机, 其设备的主要性能为: 压块燃料的出模温度 180 °C, 轴向压缩力大于 686 kN, 压块的移动速度 1 700~2 500 mm/min, 耗能量 45~55 kWh/t, 压块燃料的低位热值 18~19.7 MJ/kg, 燃料外表面有一层自然纤维保护膜。在芬兰, 许多科研和生产单位的专家认为, 经压缩成型后, 压缩粒的热效率可达 70%。压缩粒既可在固定的生产厂生产, 也可在移动式的生产设备中生产, 移动式生产可以在生产秸秆等生物质的产地进行, 使生产成本大大降低。德国研制的 KAH I 系列压粒机可生产直径为 3~40 mm 的压缩颗粒, 所用电机的功率为 20~400 kW, 能耗为 15~40 kWh/t<sup>[25]</sup>。

亚洲除日本外, 泰国、印度、菲律宾等国从 80 年代开始也先后研制成了加粘结剂的生物质压缩成型机, 到 1995 年印度已有大约 70 套成型机投入了使用。

我国的生物质固化技术开始于“七五”期间<sup>[26]</sup>, 目前已研制成功的成型设备主要有螺旋挤压式成型机、活塞冲压式成型机和辊模挤压式颗粒成型机。由于辊模挤压式颗粒成型机具有效率高特点, 所以应用较普遍。目前, 辊模挤压式颗粒成型机的生产有环模和平模 2 种工艺方式<sup>[27]</sup>。国际上许多国家均生产大功率环模制粒机, 但仅德国、日本等少数国家生产大功率平模制粒机。德国卡尔公司对平模制粒机进行了近百年的研究, 并生产各种系列的平模制粒机, 广泛用于饲料生产和其他领域<sup>[28]</sup>。

我国的平模制粒机一般采用拉丝直辊平模

制粒方式,这种方式具有结构简单、成本低廉等特点,但当产量超过 300 kg/h 时,由于压辊两端与压模相对线速度的差异,物料较难在压模上均匀分布,使辊轮的磨损不均匀。另外,平模方式很难产生 40 MPa 以上的压力,所以多用于生产颗粒密度较低的饲料。在适当设计下,环模生产方式可产生巨大的挤压力,能满足生产高密度颗粒燃料的要求<sup>[29]</sup>。为此,作者所在项目组从国外引进环模技术,在吉林省辉南县建立了国内首家木质生物质颗粒燃料生产线,产量可以达到 1.5~2 t/h。

### 3 生物质成型影响因素的研究

到目前为止,我国在生物质成型影响因素方面的研究主要集中在原料种类、原料含水率、原料颗粒度、成型压力和加热温度<sup>[14]</sup>。这些影响因素在不同压缩成型方式上的表现形式不尽相同。我国对农作物秸秆成型影响因素的研究相对较多,对林木的成型影响因素研究却较少<sup>[31-33]</sup>。

#### 3.1 原料种类

不同种类原料的压缩成型特性差异很大。原料的种类不但影响成型质量,如成型块的密

度、强度、热值等,而且影响成型机的产量及动力消耗<sup>[33]</sup>。在大量的农林废弃物中,有的植物体粉碎后容易压缩成型,有的就比较困难。木材废料一般较难压缩,即在压力作用下变形较小;而纤维状植物秸秆和树皮等容易压缩,即在压力作用下变形较大。在不加热条件下进行压缩成型时,较难压缩的原料不易成型,但在加热条件下,如棒状燃料成型机,木材废料虽难于压缩,但因其木质素含量高,在高温下软化能起粘结作用,反而容易成型。而植物秸秆和树皮等粘结能力弱,因此不易成型<sup>[14]</sup>。

#### 3.2 原料含水率

原料含水率是生物质压缩成型过程中需要控制的一个重要参数。适当的生物质原料含水率可以使压缩成型效果达到最佳,过高或过低都不利于压缩成型<sup>[14]</sup>。如对于颗粒成型燃料,一般要求原料的含水率在 15%~25%。对于棒状成型燃料,则要求原料的含水率不大于 10%,当原料水分过高时,加热过程中产生的蒸汽不能顺利地由燃料中心孔排出,造成表面开裂,严重时伴有爆鸣。但含水率若过低,成型也很困难,因为微量水分对木质素的软化、塑化有促进作用(见表 1)<sup>[33]</sup>。

表 1 原料含水率对棒状燃料成型的影响

原 料	含水率 (%)					
	4	6	8	10	12	14
木屑	不成型	成型	成型	成型	成型	不成型
秸秆	不成型	成型	成型	成型	成型	不成型

张百良等认为,热压成型中含水量过高会影响热量传递,并增大物料与模子的摩擦力,在高温时由于蒸汽量大,会发生气堵或“放炮”现象;含水量过低会影响木质素的软化点,原料内摩擦和抗压强度加大,造成太多的压缩能消耗<sup>[35]</sup>。

W amukonya 等研究表明,当压力不变且含水量在要求范围时,随着含水量升高,压缩密度可达到最大值。而松弛密度一定时,随着含水量的升高,所需压力变大,最大压力值正好对应着含水量的上限。在其建立的恒定压力下松弛密度与含水量的指数关系式中,认为压块的松弛密度随含水量的升高以指数级下降<sup>[36]</sup>。

据林维纪等研究,不同原料的木质素含量不

同,但成型所需的适宜含水量基本一致。从目前国内外文文献来看,研究确定的含水量范围还存在较大的差别,这是因为压缩方式、成型模具、成型手段、生物质原料的处理方式有较大差异,如活塞冲压比螺旋挤压对含水量要求的范围宽<sup>[37]</sup>。

#### 3.3 颗粒度

原料颗粒度的大小也是影响压缩成型的重要因素。对于某一确定的成型方式,原料的粒度大小应不大于某一尺寸。例如,对于直径为 6 mm 的颗粒成型燃料,通常要求原料的粒度不大于 5 mm。一般来说,粒度小的原料容易压缩,粒度大的原料较难压缩。有关学者在对不同粒径原料进行压缩试验时发现,在相同的压力及实验

条件下, 原料的粒径越小, 其延伸率或变形率越大, 即粒径越小, 越容易成型。这种倾向在要求原料粒度较小的成型方式条件下较为明显<sup>[33]</sup>。

原料的粒度同样影响成型机的效率及成型物的质量。如原料粒度较大时, 成型机将不能有效地工作, 能耗大, 产量小。原料粒度不均匀, 特别是形态差异较大时, 成型物表面将产生裂纹, 密度和强度降低。但对有些成型方式, 如冲压成型时, 要求原料有较大的尺寸或较长的纤维, 原料粒度小反而容易产生脱落<sup>[14]</sup>。

李美华研究了同一种原料在不同颗粒状态下成型效果的优劣, 选取锯末、小刨花 (10 mm 左右)、大刨花 (15 mm × 40 mm) 3 种颗粒进行实验, 比较其在某一压力下不同颗粒的压块密度, 总结颗粒度对成型效果的影响。结果证明, 锯末到小刨花 (10 mm 左右) 大小的颗粒都可以成型。由常温高压成型原理可知, 压缩成型主要是靠颗粒填充物料间的空隙完成, 大刨花的粒度大, 其充填特性变差, 因此粒子间彼此的嵌入不好, 导致成型效果差。并且原料的粒度也影响成型机效率及压块的成型质量, 原料粒度较大时, 成型机将不能有效工作, 能耗大, 产量小; 原料粒度不均匀时, 成型物表面将产生裂纹, 密度和强度降低。10 mm 左右的颗粒适于进行致密成型<sup>[38]</sup>。

### 3.4 成型压力

成型压力是植物材料压缩成型最基本的条件。只有施加足够的压力, 原材料才能被压缩成

型。试验说明: 当压力较小时, 密度随压力增加而增加的幅度较大, 当压力增加到一定值以后, 成型物密度的增加就变得缓慢。李美华选取玉米秆、豆秆、芝麻秆、小刨花和灌木 5 种原料开展致密成型实验, 将预压缸压力设为 50 bar 主油缸压力在 100~600 bar 每隔 25 bar 做一次实验, 观察成型效果, 测量压块体积与质量, 计算出成型后压块的密度。结果发现, 成型时所受的压力多数情况下跟成型后燃料的密度呈线性关系, 压力太小, 将导致不能成型或成型燃料密度小, 但压力达到一定值时, 密度增加得不明显。实验中发现, 200~400 bar 范围内能满足多数原料的成型, 并且表面光滑, 密度适中<sup>[38]</sup>。

### 3.5 温度

温度也是影响压缩成型的一个重要因素。通过加热, 一方面可使原料中含有的木质素软化, 起到粘结剂的作用; 另一方面还可以使原料本身变软, 变得容易压缩。温度不但影响原料成型, 而且影响成型机的工作效率<sup>[14]</sup>。

对于棒状燃料成型机, 当机器的结构尺寸确定以后, 加热温度就应调整到一个合理的范围。温度过低, 不但原料不能成型, 而且功耗增加; 温度过高, 电机功耗减小, 但成型压力变小, 颗粒挤压不实, 密度变小, 容易断裂破损。且燃料表面过热, 容易烧焦, 烟气较大。因此, 加热温度一般调整在 150~300 °C, 使用者可根据原料形态进行调整 (见表 2)<sup>[33]</sup>。

表 2 温度对不同原料成型的影响

原料	温度 (°C)					
	180	200	220	240	260	280
木屑	不成型	不成型	成型较慢	成型较快	成型快	不成型
秸秆	不成型	不成型	成型较快	成型快	成型快	表面碳化严重

## 4 生物质燃料炉具的研究

高效燃烧器具 (锅炉或灶具) 的利用可以明显提高燃烧效率, 是有效利用生物质燃料的关键。瑞典、挪威、新西兰、澳大利亚、德国等较早开展了有关高效燃烧器具的研究。截至 1998 年, 研制出一种家庭式燃烧生物质颗粒燃料的供热锅炉, 其热效率可达 80% 以上; 另一种为住宅小区、学校大面积供热, 可进行二次燃烧的节能高效锅炉, 其燃烧热效率可高达 90% 以上<sup>[39]</sup>。

我国在改进燃烧器具、提高热能方面也做了一定的研究, 一种新型节能炉灶燃烧新材的热效率达 20%~30%, 与旧式传统炉灶相比可节省燃料 40%~50%, 同时具有使用方便、卫生、安全等优点。截至 1998 年, 全国已有 1.77 亿用户在使用这种节能灶, 占总农户的 76%<sup>[40]</sup>。中国林业科学研究院林产化学工业研究所开发的专用颗粒成型燃料民用炉灶, 为小型木煤气发生炉和燃烧灶具 2 部分的组合。在这种专用炉灶中燃烧木片及颗粒成型燃料, 其燃烧的热效率显著提

高,超过 40% (专用炉灶使用颗粒成型燃料的热效率为 30 3%)。实验证明,颗粒成型燃料在民用炉灶上应用完全可行,燃烧稳定,热效率高,具有在广大农村、林区居民中应用推广的前景<sup>[41]</sup>。北京万发炉业中心从 2000 年开始研发农作物秸秆类生物质颗粒燃料及其燃烧供暖设备。通过燃料的最佳配方和科学的压制方法,将其加工成一种颗粒状 ( $\Phi 8$  mm,长 2.5~3 cm) 燃料,并成功研制出能够连续自动和高效洁净燃烧普通农作物秸秆颗粒燃料的 SWN-1 型生物质自动燃烧器,以其为核心,还制成了暖风壁炉、水暖炉、炊事炉等系列炉具<sup>[42-43]</sup>。吉林省华光生态工程技术研究所先后对秸秆、木屑等农林废弃物高致密颗粒成型技术和设备进行了研究,设计出暖风壁炉和炊事采暖两用炉<sup>[44-45]</sup>。目前国内生产以秸秆类颗粒为主的炉具较多,但这类炉具由于结渣等问题,燃烧效率不高,与以木屑颗粒为燃料的炉具相比要耗费更多的人力,并且由于成本高、原料供应等原因,以上炉具还没有大面积推广应用。

## 5 小结

目前尚存在的一些问题:

1) 国内的技术虽然已经有了长足进步,但相对国外已经达到产业化的程度还有一定差距,仍需要不断学习先进经验,引进先进技术。

2) 国内对秸秆类颗粒燃料的工艺技术、生产设备、影响因素和炉具基本成熟,但对木质类颗粒燃料的研究还不够深入。而我国现有 180 多亿 t 林木生物质资源总量、8 亿~10 亿 t 可获得量和 3 亿 t 可作为能源的利用量,通过正常的抚育间伐、灌木平茬复壮和大力发展能源林等措施,到 2020 年,全国可利用林木资源将突破 10 亿 t<sup>[46-47]</sup>。如此丰富的林木资源可为发展木质颗粒燃料产业提供充足的原料保障。

3) 由于传统制粒过程中能耗大、产量低,加之成型过程中对机器的磨损比较大,造成颗粒燃料产品成本较高。通过引进 ETS 制粒新技术,大部分原料不需干燥即可直接用于制粒,通常可以去掉干燥和冷却 2 道工序,能耗很低,降低了制粒成本。

## 参考文献

- [1] Biomass Research and Development Technical Advisory Committee Vision for bioenergy & biobased products in the United States [R]. Arlington, U. S. Department of energy and U. S. Department of Agriculture, 2002.
- [2] Mielenz J R. Ethanol production from biomass technology and commercialization status [J]. Current Opinion in Microbiology, 2001(4): 324-329.
- [3] 陈益华,李志红,沈彤. 我国生物质能利用的现状与发展对策 [J]. 农机化学研究, 2006(1): 25-28.
- [4] 肖军. 生物质利用现状 [J]. 安全与环境工程, 2003(1): 11-14.
- [5] Renewable Energy Policy Network for the 21st Century Renewables 2005 Global Status Report [R]. Washington D. C.: World Watch Institute, 2005.
- [6] 朱清时, 阎立峰, 郭庆祥. 生物质洁净能源 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- [7] 周凤起, 周大地. 中国长期能源战略 [M]. 北京: 中国计划出版社, 1999.
- [8] 邱凌. 生物质致密成型研究进展 [J]. 能源技术, 1998(3): 57-61.
- [9] 朱清时. 我国生物质能源开发展望 [J]. 太阳能杂志, 2006(1): 24-26.
- [10] 马孝琴. 生物质压缩成型技术的研究现状及评价 [J]. 资源节约与综合利用, 1998(3): 39-42.
- [11] 盛奎川, 蒋成球, 钟建立. 生物质压缩成型燃料技术研究综述 [J]. 能源工程, 1996(6): 8-11.
- [12] 刘俊红, 王革华, 张百良. 生物质成型燃料产业化的理性思考 [J]. 农业工程学报, 2006, 10(22): 138-141.
- [13] 冯志艳. 生物质燃料成型设备的设计 [D]. 北京: 北京林业大学, 2001.
- [14] 何元斌. 生物质压缩成型燃料及成型技术(一) [J]. 农村能源, 1995(5): 12-14.
- [15] 李在峰, 雷廷宙, 何晓峰, 等. 生物质颗粒冷态致密成型技术 [J]. 太阳能, 2005(6): 42-43.
- [16] 车站斌. 生物质就地及时压缩成型技术 - Highzones 技术 [J]. 中国能源, 2005, 27(1): 28-31.
- [17] 李禾. 清华大学开发出生物质颗粒燃料冷成型技术 [J]. 中小企业科技, 2006(1): 42.
- [18] 崔玉洁. 秸秆螺旋挤压成形颗粒饲料的试验研究 [D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2001.
- [19] 陈喜龙, 谭跃辉, 王义强, 等. 我国生物质颗粒燃料推广应用中的问题与发展对策 [J]. 可再生能源, 2005(1): 41-43.
- [20] 刘荣厚, 牛卫生, 张大雷. 生物质热化学转换技术 [M]. 北京: 中国计划出版社, 2005.
- [21] 王文兵, 高永林, 张若琼. 利用机械设备取代人工烧制木炭的应用分析 [J]. 试验研究, 2006(6): 23-25.
- [22] Bansal N K, Klemann M and Melissa M. Renewable energy sources and conversion technology [M]. New Delhi: Tata

M:Graw Hill, 1990.

- [ 23 ] Lavrov N V. The mechanism of reactions taking place combustion of a solid fuel [ J ]. CA, 1965, 1(2): 61-64.
- [ 24 ] 刘石彩, 蒋剑春, 陶渊博, 等. 生物质致密制造成型炭技术研究 [ J ]. 林产化工通讯, 2000, 36(2): 3-5.
- [ 25 ] 钱湘群. 秸秆切碎及压缩成型特性及设备研究 [ D ]. 杭州: 浙江大学, 2003: 42-43.
- [ 26 ] 王宏立, 梁春英, 杨天维, 等. SP-25 型秸秆膨化机的研制 [ J ]. 农机化研究, 2004 (1): 168-169.
- [ 27 ] 肖宏儒, 陈永生, 宋卫东. 秸秆成型燃料加工技术发展趋势 [ J ]. 农业装备技术, 2006, 32(4): 11-13.
- [ 28 ] 姜洋, 郭军, 王忠诚. 生物质致密成型设备生产颗粒燃料技术及经济分析 [ J ]. 可再生能源, 2006(4): 81-83.
- [ 29 ] 何元斌. 生物质压缩成型燃料及成型技术 (二) [ J ]. 农村能源, 1995 (6): 19-21.
- [ 30 ] 杨继涛, 翁伟, 冯彩娟. 秸秆成型燃料技术规模化推广的政策建议 [ J ]. 中国资源综合利用, 2006(8): 30-33.
- [ 31 ] 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(5): 16-18.
- [ 32 ] 回彩娟, 俞国胜. 影响生物质块状燃料常温高压致密成型因素的研究 [ J ]. 林业机械与木工设备, 2005(11): 10-14.
- [ 33 ] 袁振宏, 吴创之, 马隆龙, 等. 生物质能利用原理与技术 [ M ]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [ 34 ] 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(1): 99-104.
- [ 35 ] 张百良, 李保谦. HPB-1 型生物质成型机的应用研究 [ J ]. 太阳能学报, 1999, 20(3): 234-238.
- [ 36 ] Wanukonya L, Jenkins B. Durability and relaxation of sawdust and wheat-straw briquettes as possible fuels for Kenya [ J ]. Biomass & Bioenergy, 1995, 8(3): 175-179.
- [ 37 ] 林维纪, 张大雷. 生物质固化成型技术及其展望 [ J ]. 新能源, 1999, 2(4): 39-42.
- [ 38 ] 李美华. 生物质燃料致密成型参数的研究 [ D ]. 北京: 北京林业大学, 2005.
- [ 39 ] 林维纪, 张大雷. 生物质致密成型技术的几个问题 [ J ]. 农村能源, 1998(6): 16-17.
- [ 40 ] 孙军. 木质燃料转化利用途径与方法探讨 [ J ]. 能源研究与利用, 2004(5): 26-28.
- [ 41 ] 张无敌, 宋洪川, 钱卫芳, 等. 我国生物质能源转换技术开发利用现状 [ J ]. 能源研究与利用, 2000(2): 3-6.
- [ 42 ] 岳峰, 雷廷宙, 朱金陵, 等. 家用生物质颗粒燃料炉的研制 [ J ]. 可再生能源, 2005(6): 42-46.
- [ 43 ] 秋林. 老万炉业别样红 [ J ]. 经营管理, 2002(3): 56-57.
- [ 44 ] 张殿军, 陈之航. 生物质燃烧技术的应用 [ J ]. 能源研究与信息, 1999, 15(3): 15-21.
- [ 45 ] 吉林省华光生态工程技术研究所. 农村经济新亮点 - 吉林省华光所生物质能开发纪实 [ J ]. 科技成果纵横, 2006(6): 22-23.
- [ 46 ] 吕文, 王春峰, 王国胜. 中国林木生物质能源发展潜力研究 (1) [ J ]. 中国能源, 2005, 27(11): 21-26.
- [ 47 ] 吕文, 王春峰, 王国胜. 中国林木生物质能源发展潜力研究 (2) [ J ]. 中国能源, 2005, 27(12): 29-33.