

# 生物质压缩成型机理研究进展

李伟振<sup>1</sup>, 姜洋<sup>1,2</sup>, 王功亮<sup>1</sup>, 阴秀丽<sup>1</sup>

(1. 中国科学院广州能源研究所, 中国科学院可再生能源重点实验室, 广东省新能源和可再生能源研究开发与应用重点实验室, 广东 广州 510640; 2. 华南农业大学 材料与能源学院, 广东 广州 510642)

**摘要:** 生物质成型燃料以其能量密度和质量密度较大、颗粒均匀、含水率稳定等特点, 在城镇和农村家庭炊事、取暖、工业锅炉或窑炉的燃料替代等方面得到了广泛的应用。文章主要介绍了生物质成型过程中原料预处理、成型参数、成型模型、原料成分、粒子结合方式等方面的研究进展。针对几个方面的研究现状, 提出从木质素热转变特性的角度揭示成型机理、混配原料粒子间结合方式的研究等应为成型机理研究的主要方向。

**关键词:** 成型燃料; 原料成分; 影响参数; 成型模型; 热转变特性

中图分类号: TK6; S216.2 文献标志码: A 文章编号: 1671-5292(2016)10-1525-08

DOI:10.13941/j.cnki.21-1469/tk.2016.10.016

## 0 前言

生物质成型燃料是以草本生物质或木本生物质为主要原料, 经过机械加工成型, 具有规则形状或尺寸的产品<sup>[1],[2]</sup>, 近年来, 生物质成型燃料的产量在世界范围内得到极大提高, 同时以其自身特点也得到了广泛的应用。生物质压缩成型过程中原料粒子主要经历重新排列位置关系、颗粒机械变形、塑性流变和密度显著增大等几个阶段。成型燃料品质主要受压力、水分、粒径、温度等成型参数的影响, 同时, 生物质原料的纤维素、半纤维素、木质素、淀粉、蛋白质、脂肪等化学成分对成型过程也有一定影响。目前, 在成型机理方面的研究重点集中在不同种类生物质原料的成型条件、原料成分对成型过程及成型燃料品质的影响、粒子间相互结合作用的方式机理等方面, 且国外的研究比国内较为深入和细化, 本文主要介绍这几个方面近年来的研究进展。

## 1 研究进展及讨论

### 1.1 原料预处理

预处理主要是破坏或分解原料原有的结构, 满足压缩成型时对原料的要求。生物质原料预处理方法大体上分为物理法、物理-化学法、化学法和生物法 4 大类, 如微波照射、蒸汽汽爆、化学药品或其他处理方法<sup>[3]-[5]</sup>。一些研究表明, 这些方法能够破坏原料的木质纤维素结构, 得到机械性更好的成型燃料<sup>[6],[7]</sup>。Shaw 和 Adapa 对比了蒸汽汽

爆处理和未经蒸汽汽爆处理原料压缩的差异性, 经蒸汽汽爆处理改变了原料的屈服强度, 原料更易于压缩, 颗粒的密度及强度有明显增加<sup>[3],[4]</sup>。Kashaninejad 采用微波-化学方法对小麦和大麦秸秆进行预处理, 分解了原料的木质素结构, 所制得的颗粒密度和抗张强度有所提高<sup>[5]</sup>。在生物质压缩成型工业生产中主要是对原料进行粉碎和干燥预处理, 将原料粉碎至工艺所要求的粒径范围和将原料干燥至成型所需的水分。

生物质粉碎是利用机械方法克服原料内部的凝聚力而将其分裂的一种工艺。影响生物质粉碎的主要因素有原料本身的物理结构、粉碎机的结构及参数、粉碎过程工艺参数等。针对生物质原料粉碎已经研制了各种形式的粉碎机<sup>[8],[9]</sup>, 如铡切式粉碎机主要用于切断谷草、稻草、麦秸、玉米秸秆等茎秆, 锤片式粉碎机用于大部分秸秆的粉碎, 揉碎机可将秸秆加工为柔软、蓬松的丝状段, 不仅适用于新鲜的秸秆, 同时对含水率较低的秸秆仍具有较好的揉碎效果。生物质粉碎技术已经比较成熟, 且粉碎机机型也比较多, 基本能满足不同生产的需要, 但是, 各类粉碎机一般都存在设备使用寿命较短、能耗较高的问题, 如何提高粉碎机核心部件使用寿命和降低能耗是生物质粉碎机优化的主要方向。中国科学院广州能源研究所依据速生林等原料长纤维的特性, 提出了针对长纤维生物质原料的粉碎技术, 如图 1 所示, 生物质原料由皮带

收稿日期: 2015-04-29。

基金项目: 广东省中国科学院全面战略合作项目(2012B090400025); “十二五”农村领域国家科技计划课题(2012BAD30B02)。

作者简介: 李伟振(1983-), 男, 河南开封人, 助理研究员, 主要从事生物质成型及气化研究工作。E-mail: liwz@ms.giec.ac.cn

通讯作者: 姜洋(1969-), 男, 辽宁营口人, 副研究员, 主要从事生物质能利用技术研究工作。E-mail: jiangyang@ms.giec.ac.cn

送入粉碎机壳内,经转轮和碾压,较大粒径的生物  
质原料被粉碎成较小粒径,然后高速旋转的锤片  
对生物质原料进行打击和撕裂,被甩至揉搓板上,  
揉搓板的表面布置有凸起尖端,在尖端的作用下  
将长纤维生物质原料粉碎。同时,在筛网的空隙之  
间设有刀片,在锤片与刀片的共同作用下将长纤  
维生物质原料切割成丝状粉碎物,以达到长纤维  
生物质原料的粉碎效果。

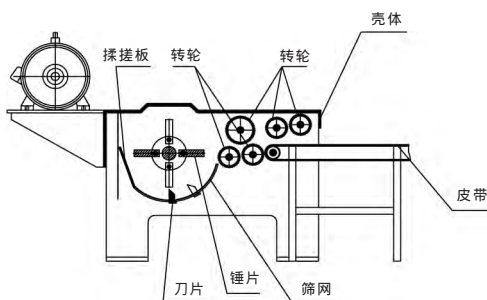


图 1 长纤维生物质原料粉碎机  
Fig.1 Pulverizer for long-fiber biomass

生物质原料干燥是采用一定的方法将原料中的  
水分蒸发,达到原料脱水的目的。影响生物质原  
料干燥的主要因素有原料本身特性、干燥介质特  
性及干燥设备结构等。在生物质压缩成型中原料  
的干燥以气流干燥形式为主。干燥设备主要为滚  
筒干燥设备,目前,通过原料运动理论的研究、滚  
筒内传热传质的研究及结构优化设计的研究等,  
对木质生物质原料的干燥已经开发出了满足生产  
要求的多形式滚筒干燥设备。由于在生物质压缩  
成型过程中原料的终态含水率较高,不需进行深  
入干燥,所以,研究重点应是如何进一步提高干燥  
速率。

### 1.2 成型参数

压力是生物质成型过程必不可少的条件,只  
有在适当的压力作用下,原料才能被压缩成型。压  
力太小,原料无法成型或燃料密度太小,压力达到  
一定数值后,密度随压力的增加并不明显<sup>[10],[11]</sup>。燃  
料的密度随着压力的增大先呈线性关系,再呈指  
数关系。武凯通过研究发现,在环模成型中环模扭  
矩与物料泊松比及摩擦系数呈指数曲线关系,同  
时,环模压缩比与环模扭矩也呈指数曲线关系<sup>[12]</sup>。  
吴劲锋以苜蓿为原料进行压缩实验,在密度要求  
一定时,原料的粒径越大,所需的压力越大,能耗  
也就越大<sup>[13]</sup>。

原料水分在成型过程中是需要控制的一个重  
要参数,适量的水分可以起到粘结剂和润滑剂的  
作用,有助于成型<sup>[14]</sup>。不同种类的原料在不同成  
型方式中所需的最佳水分也不相同<sup>[15]</sup>。Obemberger  
的研究表明,针对水稻秸秆原料,水分为 8%~12%  
时燃料质量最好,水分高于或低于这个范围燃料  
质量都会降低<sup>[16]</sup>。姜洋研究了玉米秸秆、豆秆、芦  
苇原料的成型特性,分析了水分与密度的关系,认  
为原料水分在 12%~18%较为适宜,最佳含水率为  
15%<sup>[17]</sup>。

原料粒径大小也是影响压缩成型的因素之  
一,对于确定的成型方式,在其他成型条件不变的  
情况下,原料粒径越小,越易被压缩,成型燃料的  
质量也越好<sup>[14]</sup>。原料粒径不均匀、形态差异性较大  
或原料粒径较大均会导致成型燃料密度、强度降  
低,表面和内部产生裂纹,易于破碎。Mani 的研究  
表明,成型燃料的密度随着原料粉碎筛网的尺寸  
由 3.2 mm 逐渐减小至 0.8 mm 时而变大<sup>[18]</sup>。姜洋  
认为粒度在 1~5 mm 适合玉米秸秆、芦苇颗粒生  
产<sup>[17]</sup>。

在生物质成型过程中,通过提高成型温度可  
以使原料中的木质素软化,起到粘结剂的作用,同  
时也可以使原料本身变软,易于压缩,在内部范德  
华力、氢键等的作用下相邻的粒子之间互相扩散  
形成机械互锁结构,从而增强成型燃料的机械  
性<sup>[19]</sup>。但成型温度不宜过高,过高会造成模具退  
火、寿命缩短,且使原料炭化严重、阻力减小、成  
型失败。不同种类的原料成型时最佳的温度相差不  
大,一般为 80~150 °C。陈树人以水稻秸秆为原料,  
在环模成型机中进行压缩实验,发现燃料的松  
弛密度和抗破碎性在成型温度为 75~85 °C时增  
加,在 85~95 °C时下降<sup>[20]</sup>。

在对成型参数的研究中,普遍采用的研究方  
法是单因素试验或正交试验,研究单个参数对成  
型的影响,如研究压力的影响时,固定其他参数,  
得到最佳压力,以此得到各个参数的最佳组合。成  
型过程中参数间不是独立的,而是互相影响和制  
约,目前的研究方法很难反应参数之间的互相影  
响关系,这种参数间的互相影响使得到的各种最  
佳参数组合存在一定的局限性。在成型参数的影  
响研究中,应采用一些非线性模型的方法,如响应  
面实验设计等,不仅揭示单因素的影响,而且更加

深入的揭示参数之间的互相影响关系,得到更加合理的参数组合。

### 1.3 成型过程模型

生物质成型过程的相关模型主要分为两类,一类是应力与应变模型,另一类是应力与密度模型。应力与应变模型主要用于生物质成型压缩过程,一般将生物质成型过程分为预压、成型和保压松弛 3 个阶段,预压阶段原料受到挤压,原料粒子间发生相对运动,距离逐渐缩小,但原料基本上还未变形,原料粒子做不规则的运动,通常不在此阶段建立模型。成型阶段主要是压力增加,原料互相靠近和镶嵌,成为成型燃料,原料发生弹塑性变形,通常用粘弹性的模型表示。保压松弛阶段主要是已经被压实的原料在不断被新压入原料的作用下向出口移动,此时会产生应力松弛现象,即应力在达到最大值后出现缓慢下降,可以参照伯格斯模型进行建模。应力与密度模型主要采用 Heckel 模型,反映成型过程中密度和所受压力间的关系。

白炜对 3 种秸秆颗粒进行冷态压缩成型的开式实验研究表明:原料在松散阶段发生局部弹性变形,数学模型为线性方程;在过渡阶段,发生弹性变形,数学模型为指数方程;在压紧阶段,发生塑性变形,数学模型为线性方程<sup>[21]</sup>。霍丽丽用黏弹性本构模型描述生物质颗粒燃料的压缩过程,建立了致密成型阶段的应力与应变本构模型、保压松弛阶段的应力与时间本构模型<sup>[22]</sup>。Nalladurai Kaliyan 构建了秸秆和柳枝稷的一维线性黏弹塑性模型,表明颗粒的抗压强度和耐久性受弹性模量和黏性系数的影响<sup>[23]</sup>。李大中分析了稻壳成型过程中松弛密度与含水率、成型温度之间的关系,并建立了成型过程的 LS-SVM 模型<sup>[24]</sup>。胡建军以小麦秸秆为例,采用二次回归通用旋转组合设计,建立了压缩速度、物料含水率两个因素与比能耗的数学模型<sup>[25]</sup>。

在现有生物质成型模型中,应力与应变模型对生物质压缩过程进行分段建模,而在实际压缩过程中,各个阶段间很难有明显的界限,这给模型的应用带来困难。应力与密度模型参数较为单一,一般只适用于建模时所采用的原料,对其他压缩过程或原料适用效果较差,造成应用的局限性。因此,针对原料整个压缩过程的通用模型和针对多

种原料的应力与密度模型的建立应是未来建模的关注方向。

### 1.4 原料成分影响

纤维素是一种有机多糖化合物( $C_6H_{10}O_5$ ),由几百至上万个线性链链接至 D-葡萄糖单体而组成,葡萄糖单体间经氢键结合组成完整的纤维素结构。在植物细胞内部,纤维素形成晶体状的微纤维,微纤维被无定形纤维所包围。纤维素是生物质内碳资源最为丰富的一种物质,其晶体状结构和丰富的氢键使得纤维素在压缩成型过程中不适合作为粘剂,但是可以通过加热的方式使纤维素变得较为柔软。

半纤维素是一种杂聚物,半纤维素和纤维素共同存在于大多数生物质原料的细胞内,纤维素呈晶体状,不易水解,半纤维素为无定形结构,易于水解,这主要是由于半纤维素的分支结构造成的,半纤维素的强度要低于纤维素。在生物质压缩成型过程中降解的半纤维素会形成天然的粘剂。

木质素具有复杂的三维立体高分子结构,是带有各种分支的苯丙烷无定形网状聚合物。在生物质压缩成型过程中,木质素起到黏结固化和填充的作用。木质素为非晶体,常温下不溶于有机溶剂,无熔点但有软化点,在 70~110 °C 时,木质素开始软化,并出现一定的黏度,当温度升高到 200~300 °C 时,呈现熔融状态,黏度变大。此时,对生物质原料施加适当外力,就能与原料中的纤维素进行黏结,使原料的体积大幅减小,密度显著增加。在纤维素进行黏结时,其分子间互相吸引和缠绕,在取消对原料施加的外力后,仍能保持黏结的状态,冷却后其强度会进一步增强,从而形成成型燃料。不同种类生物质原料的纤维素、半纤维素及木质素含量和结构并不完全相同,其成型难易及成型效果亦不尽相同<sup>[17]</sup>。由于木质素的热值比纤维素高以及木质素的黏结作用,因此,普遍认为木质素含量高的成型燃料机械耐久性要好,而 Lehtikangas 的研究认为,成型燃料的机械耐久性和原料木质素含量之间并没有密切的联系<sup>[26]</sup>。

淀粉是 D-葡萄糖聚合物,可分为带分支的支链淀粉和不带分支的直链淀粉。生物质压缩过程中,在一定的温度、水分、压力和时间共同作用下,淀粉呈现凝胶化的过程,该过程不可逆,可以起到

粘结剂和润滑剂的作用,有利于成型燃料从模具中排出<sup>[27]</sup>。

在一定的温度和水分作用下,原料中的蛋白质呈现变性的过程,在该过程中蛋白质、脂肪和淀粉等形成新结构的物质,有助于提高蛋白质的粘结性能。根据 Briggs 的研究,增加原料中蛋白质的含量,可以提高成型燃料的机械耐久性,且未变性的蛋白质比变性的蛋白质更能改善成型燃料的物理品质<sup>[28]</sup>。Tabil 的研究表明,在成型过程中原料中含有足够的天然蛋白质时,能够提高其作为粘结剂的作用<sup>[29]</sup>。Sokhansanj 发现,较高淀粉和蛋白质含量的原料比只含有纤维素原料制得的成型燃料机械耐久性等物理品质要好,对于只含有纤维素的原料最佳水分含量为 8%~12%,而淀粉和蛋白质含量较高的原料最佳水分含量可达到 20%<sup>[30]</sup>。

原料中的脂肪在生物质成型过程中主要起到润滑剂的作用,可以降低成型压力和提高产量<sup>[29]</sup>,但是较多的脂肪会阻碍原料粒子间的结合作用。Briggs 发现,原料中油脂含量的增加会降低成型燃料的品质,主要是因为脂肪的疏水性和对原料粒子结合的阻碍性<sup>[28]</sup>。

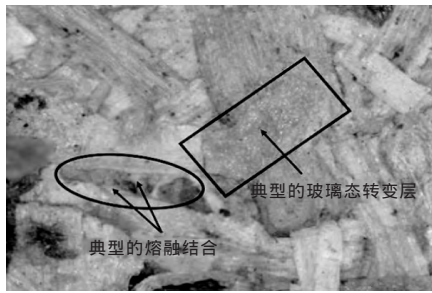
目前,在生物质压缩成型黏结机理方面主要是利用木质素在一定温度下的软化黏结作用,而关于木质素的热转化特性研究还比较少。为了更深入的进行压缩成型机理研究和探索,对木质素的热转化特性有必要进行深入研究。如采用光显微、差示扫描量热法(DSC)或调制示差扫描量热法(MDSC)、核磁共振等手段对不同种类木质素、不同水分含量木质素以及不同种类原料的软化及熔融特性等进行研究,为成型参数的选取提供理论基础。

### 1.5 粒子结合方式

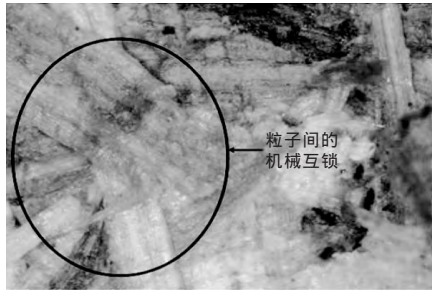
对粒子间结合方式的研究主要分为两个层次,第一个层次是通过扫描电子显微镜对成型燃料不同的断面进行微观结构观察,以判断粒子的变形和结合情况。不同的研究者对不同的原料和压缩成型方式得出了不同的结论。徐广印研究了秸秆冷态压缩成型的微观结合方式,发现不同类型的秸秆存在相同的压缩规律,维管束和基本薄壁组织在横截面方向破坏严重,各组织结构以贴合形式结合;在纵截面方向破坏程度较小,各组织

结构以互相嵌合形式结合<sup>[31]</sup>。齐菁对稻壳和木质生物质颗粒进行了观察和对比,认为成型机理分为化学结合和物理结合两部分,由于稻壳中含有硅质层,其化学结合能力低于木质原料;物理结合以“片搭”形式存在着,结合效果也低于木质原料<sup>[32]</sup>。霍丽丽研究了玉米秸秆、木屑原料环模式成型机压缩颗粒燃料的微观成型机理,将生物质成型燃料的横截面分为中心层、过渡层和表层 3 部分,各层散粒体的状态分别为“平铺”、“严重变形”和“直立”<sup>[33]</sup>。刘圣勇通过对玉米秸秆成型颗粒进行微观结构的观察,发现组织结构间结合紧密,空隙较小,但混乱无序,无明显界限,断面的形成有相互牵拉的迹象<sup>[34]</sup>。田潇瑜研究了玉米秸秆块状燃料的微观结构,表明粒子间以机械镶嵌、天然粘结剂粘结的形式结合。粒子结合紧密的成型条件为压力 60~90 MPa,物料温度 75~100 °C,含水率 8%~16%<sup>[35]</sup>。

第二个层次是对粒子间结合方式的研究,主要有两种理论:①在生物质压缩过程中,当压力使粒子间距离足够近时,粒子间就会产生吸引力,如范德华力、静电力、氢键力等,粒子间靠吸引力结合在一起。当粒子间距离小于 0.1 μm 时,范德华力是所有吸引力中最大的力,原料粒子被压缩时也主要靠该力结合在一起。在粒子压缩过程中,粒子间或粒子内部会产生摩擦,产生的静电力也能使粒子间结合在一起。②粒子间靠“固体桥”结构的作用结合,“固体桥”结构可由原料本身物质形成也可由添加剂的加入形成。原料中的一些物质或添加剂的加入,因化学反应、结晶化或固化而产生“固体桥”的作用,粒子间在相互接触时互相扩散而形成交叉结合,交叉结合的方式成为粒子结合的主要作用。Nalladurai Kaliyan 经过研究证实,玉米秸秆和柳枝稷原料本身中的碳水化合物、木质素、蛋白质、淀粉和脂肪等物质在一定的温度和压力条件下会软化或变形,当施加的压力和温度取消后,粒子间形成“固体桥”结构而互相结合在一起,形成具有一定硬度的成型燃料<sup>[36]</sup>(图 2)。Lingjun Kong 经过研究证实,锯末原料中加入废弃包装纸纤维可形成“固体桥”结构的锯末颗粒,如图 3 所示,由于“固体桥”结构的存在,减少了粒子间距,增加了粒子间接触面积,因此,成型颗粒的弹性回复被有效抵消,具有更好的机械耐久性,利于颗粒燃料的存储和运输<sup>[37]</sup>。



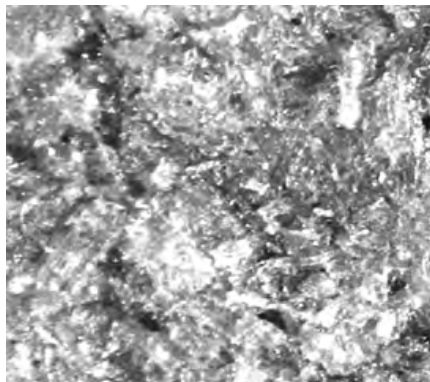
(a)玉米秸秆块状燃料的交叉结合



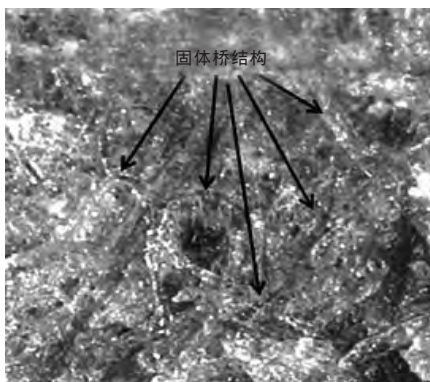
(b)柳枝稷块状燃料的交叉结合

图2 玉米秸秆和柳枝稷块状燃料的横截面放大图像

Fig.2 Cross-section images of corn stover and switchgrass briquettes



(a)锯末(S)颗粒



(b)废弃包装纸纤维和锯末(P/S)混合颗粒

图3 6 MPa成型的颗粒燃料放大图像

Fig.3 Light microscopy images of pellets fuel compressed at 6 MPa

对单一原料粒子间结合方式的研究已经有一定深度,但是由于单一原料资源量或指标方面无法满足标准或使用要求,发展混配原料成型已经是未来发展的方向,混配原料成型不仅能够改善单一原料的缺陷,而且由于生物质原料的多样性,不同长度纤维之间的原料进行混配成型时能够产生不同形式的粒子间结合。目前关于混配原料粒子间结合方式的研究还比较少,对混配原料粒子间结合方式的研究是未来研究方向之一。

## 2 结语

目前,国内外在生物质压缩成型机理方面已经有了一定深度的研究。在原料预处理方面已经开发了适应各类原料的预处理技术,基本能够满足生产需要,并在不断探索新的原料预处理方法,以期压缩成型提供更为适宜的原料;在成型参数方面进行了大量的试验研究,针对不同的原料和不同的成型方式得到了最佳的成型参数;在成型模型方面,从不同方面建立了各种模型来描述成型过程;在原料成分方面,已经开始关注和研究除木质素、纤维素和半纤维素外的其他成分对成型的影响,并得出了基础的研究结果;在粒子结合方式方面,通过研究已经初步揭示了粒子间的结合力和结合方式。但是,由于生物质成型燃料已经初步形成规模化生产和产业化应用,因此,多数研究者对生物质压缩成型机理的研究不够重视,导致成型机理的研究深度不够,研究的重点多为成型参数对燃料品质的影响。结合成型燃料发展趋势,在生物质压缩成型机理方面应更多的关注从木质素热转变特性的角度揭示成型机理、建立压缩过程应力与应变的通用模型、揭示成型参数间互相依存和影响关系、混配原料粒子间结合方式的研究等。

## 参考文献:

- [1] SZDB/Z 109-2014, 生物质成型燃料及燃烧设备技术规范[S].
- [1] SZDB/Z 109-2014, Technical Specification for Molded-Chips Biomass Fuel and Combustion Equipment[S].
- [2] 贾敬敦,马隆龙,蒋丹平,等.生物质能源产业科技创新发展战略 [M]. 北京: 化学工业出版社,2014.103-122.
- [2] Jia Jingdun, Ma Longlong, Jiang Danping, et al. Development Strategy for the Science and Technology

- Innovation of Biomass Energy Industry [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2014.103-122.
- [3] M D Shaw, C Karunakaran, L G Tabil. Physicochemical characteristics of densified untreated and steam exploded poplar wood and wheat straw grinds [J]. Biosystems Engineering, 2009, 103(2): 198-207.
- [4] Adapa P, Tabil L, Schoenau G, et al. Pelleting characteristics of selected biomass with and without steam explosion pretreatment [J]. International Journal of Agricultural & Biological Engineering, 2010, 3(3): 62-79.
- [5] Kashaninejad M, Tabil L G. Effect of microwave - chemical pre-treatment on compression characteristics of biomass grinds [J]. Biosystems Engineering, 2011, 108(1): 36-45.
- [6] Kumar P, Barrett D M, Delwiche M J, et al. Methods for pretreatment of lignocellulosic biomass for efficient hydrolysis and biofuel production [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2009, 48(8): 3713-3729.
- [7] Shaw M D, Karunakaran C, Tabil L G. Physicochemical characteristics of densified untreated and steam exploded poplar wood and wheat straw grinds [J]. Biosystems Engineering, 2009, 103(2): 198-207.
- [8] 祖宇, 郝玲, 董良杰. 我国秸秆粉碎机与研究现状与展望[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(3): 1753-1756, 1759.
- [8] Zu Yu, Hao Ling, Dong Liangjie. The research situation and prospect of straw-muller in China [J]. Journal of Anhui Agri. Sci., 2012, 40(3): 1753-1756, 1759.
- [9] 胡秋龙, 熊兴耀, 谭琳, 等. 木质纤维素生物质预处理技术的研究进展[J]. 中国农学通报, 2011, 27(10): 1-7.
- [9] Hu Qiulong, Xiong Xingyao, Tan Lin, et al. Advances in pretreatment technologies of lignocellulosic biomass [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(10): 1-7.
- [10] 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.
- [10] Li Meihua. The study on biofuel solidification parameter [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2005.
- [11] Wolfgang Stelte, Jens K Holm, Anand R Sanadi, 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.
- [12] 武凯, 施水娟, 彭斌彬, 等. 环模制粒挤压过程力学建模及影响因素分析[J]. 农业工程学报, 2010, 26(12): 142-147.
- [12] Wu Kai, Shi Shuijuan, Peng Binbin, et al. Modeling and analysis on extruding force in pelleting process [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(12): 142-147.
- [13] 吴劲锋, 黄建龙, 张维果, 等. 苜蓿草粉制粒密度与挤出力模拟试验[J]. 农业机械学报, 2007, 38(1): 68-71.
- [13] Wu Jinfeng, Huang Jianlong, Zhang Weiguo, et al. Simulated experiment and model of pelletizing density and extruding force for alfalfa powder [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(1): 68-71.
- [14] Kaliyan N, Vance Morey R. Factors affecting strength and durability of densified biomass products [J]. Biomass and Bioenergy, 2009, 33(3): 337-359.
- [15] 景元琢, 董玉平, 盖超, 等. 生物质固化成型技术进展与展望[J]. 中国工程科学, 2011, 13(2): 72-77.
- [15] Jing Yuanzhuo, Dong Yuping, Gai Chao, et al. Research development and prospects of biomass briquetting technology [J]. Engineering Sciences, 2011, 13(2): 72-77.
- [16] Obemberger I, Thek G. Physical characterisation and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their combustion behaviour [J]. Biomass and Bioenergy, 2004, 27(6): 653-669.
- [17] 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, 24(5): 16-18.
- [17] Jiang Yang, Qu Jingxia, Guo Jun, et al. Study on the formation conditions of biomass pellet [J]. Renewable Energy Resources, 2006, 24(5): 16-18.
- [18] Mani S, Tabil L G, Sokhansanj S. Evaluation of compaction equations applied to four biomass species [J]. Canadian Biosystems Engineering, 2004, 46(3): 55-61.
- [19] Kaliyan N, Morey R V. Natural binders and solid bridge type binding mechanisms in briquettes and pellets made from com stover and switchgrass [J]. Bioresource Technology, 2010, 101(3): 1082-1090.
- [20] 陈树人, 段建, 姚勇, 等. 环模式成型机压缩水稻秆成型工艺参数优化[J]. 农业工程学报, 2013, 29(22): 32-41.
- [20] Chen Shuren, Duan Jian, Yao Yong, et al. Optimization of technique parameters of annular mould briquetting machine for straw briquette compressing [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(22): 32-41.

- [21] 白炜,胡建军,雷廷宙,等. 秸秆颗粒冷态压缩成型实验研究及回归分析[J]. 河南科学, 2009, 27(6): 703-706.
- [21] Bai Wei, Hu Jianjun, Lei Tingzhou, et al. Experimental study on straw cold molding by pressure and its regression analysis[J]. Henan Science, 2009, 27(6): 703-706.
- [22] 霍丽丽, 赵立欣, 田宜水, 等. 生物质颗粒燃料成型的黏弹性本构模型[J]. 农业工程学报, 2013, 29(9): 200-206.
- [22] Huo Lili, Zhao Lixin, Tian Yishui, et al. Viscoelastic constitutive model of biomass pellet [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(9): 200-206.
- [23] Nalladurai Kaliyan, Rance Morey. Constitutive model for densification of corn stover and switchgrass [J]. Biosystems Engineering, 2009, 104(1): 47-63.
- [24] 李大中, 李晓江. 木屑、稻壳和煤混合型煤压缩成型过程建模与工况优化 [J]. 农业机械学报, 2012, 43(4): 83-87.
- [24] Li Dazhong, Li Xiaojiang. Modeling and engineering optimization of compression process for biomass compound coal mixed with sawdust, rice hull and coal [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(4): 83-87.
- [25] 胡建军, 雷廷宙, 沈胜强, 等. 秸秆颗粒冷态压缩成型过程的比能耗回归分析[J]. 可再生能源, 2010, 28(1): 29-35.
- [25] Hu Jianjun, Lei Tingzhou, Shen Shengqiang, et al. Regression analysis on specific energy consumption in the pelletizing process of straw [J]. Renewable Energy Resources, 2010, 28(1): 29-35.
- [26] Päivi Lehtikangas. Quality properties of pelletised sawdust, logging residues and bark [J]. Biomass and Bioenergy, 2001, 20(5): 351-360.
- [27] Thomas M, Huijnen PTHJ, Van Vliet T, et al. Effects of process conditions during expander processing and pelleting on starch modification and pellet quality of tapioca [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 1999, 79(11): 1481-1494.
- [28] Briggs JL, Maier DE, Watkins BA, et al. Effects of ingredients and processing parameters on pellet quality [J]. Poultry Science, 1999, 78(10): 1464-1471.
- [29] Tabil LG. Binding and pelleting characteristics of alfalfa [D]. Saskatoon: Department of Agricultural and Bioresource Engineering University of Saskatchewan, 1996.
- [30] Sokhansanj S, Mani S, Bi X, et al. Binderless pelletization of biomass [A]. ASAE Annual International Meeting [C]. Tampa: An ASAE Meeting Presentation, 2005. 17-20.
- [31] 徐广印, 沈胜强, 胡建军, 等. 秸秆冷态压缩成型微观结构变化的实验研究 [J]. 太阳能学报, 2010, 31(3): 273-278.
- [31] Xu Guangyin, Shen Shengqiang, Hu Jianjun, et al. Experimental study on the microstructure changes in the process of cold molding with straw [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2010, 31(3): 273-278.
- [32] 齐菁, 于洪亮, 林海, 等. 稻壳生物质颗粒成型机理的显微观察[J]. 辽宁农业科学, 2009(6): 49-50.
- [32] Qi Jing, Yu Hongliang, Lin Hai, et al. Microscopic observation of rice husk pellets formation mechanism [J]. Liaoning Agricultural Sciences, 2009(6): 49-50.
- [33] 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(S1): 21-25.
- [33] Huo Lili, Tian Yishui, Meng Haibo, et al. Mechanism of surface morphology of biomass pellet [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(S1): 21-25.
- [34] 刘圣勇, 杨国峰, 苏超杰, 等. 玉米秸秆成型燃料的微观结构观察与分析 [J]. 热科学与技术, 2009, 8(3): 277-282.
- [34] Liu Shengyong, Yang Guofeng, Su Chaojie, et al. Observation and analysis on micro-structure of corn straw briquette fuels [J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2009, 8(3): 277-282.
- [35] 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.
- [35] Tian Xiaoyu, Hou Zhendong, Xu Yang. Microstructure of corn stover briquette [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2011, 42(3): 105-108.
- [36] Nalladurai Kaliyan, R Vance Morey. Natural binders and solid bridge type binding mechanisms in briquettes and pellets made from corn stover and switch grass [J]. Bioresource Technology, 2010, 101(3): 1082-1090.
- [37] Lingjun Kong, ShuangHong Tian, Chun He, et al. Effect of waste wrapping paper fiber as a "solid bridge" on physical characteristics of biomass pellets made from wood sawdust [J]. Applied Energy, 2012, 98: 33-39.

## Progress in research of biomass molding mechanism

Li Weizhen<sup>1</sup>, Jiang Yang<sup>1,2</sup>, Wang Gongliang<sup>1</sup>, Yin Xiuli<sup>1</sup>

(1. Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Key Laboratory of Renewable Energy, Chinese Academy of Sciences, Guangdong Provincial Key Laboratory of New and Renewable Energy Research and Development, Guangzhou 510640, China; 2. School of Materials and Energy, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

**Abstract:** Due to the features of relatively high energy density, uniform size and stable moisture content, biomass molding fuel has been widely used as fuel for household cooking, space heating, industrial boiler and kilns. This review summarizes the studies on biomass molding together with the analysis of influence factors, such as feedstock pretreatment, molding parameters, molding models, feedstock composition and particle combination. Study of thermal transformation of lignin and particle combination during mixed feedstock molding are important research directions.

**Key words:** biomass molding fuel; biomass composition; molding parameters; molding model; heat transformation characteristics