生物质成型燃料压缩机理的国内外研究现状

李伟振[1,2,3]，姜洋[1,2,3]，阴秀丽[1,2,3]

（1.中国科学院广州能源研究所，广州510640；2.中国科学院可再生能源重点实验室，广州510640；3.广东省新能源和可再生能源研究开发与应用重点实验室，广州510640）

摘要：生物质成型燃料因具有清洁、可再生等特点，近年来发展迅速，对其成型机理的研究也日趋深入。本文主要介绍成型过程中粒子间“固体桥”结合方式、木质素热转变特性及黏结作用、原料组分、成型参数等方面的研究现状，提出混配成型技术、原料热转变特性、木质素结构及种类的影响、“固体桥”结构的构建条件及微观形貌、官能团和化学键的变化规律应是成型机理研究的主要方向，为生物质成型机理的深入研究提供参考。

0前言

生物质成型技术是生物质能的有效利用技术之一，是指在一定的温度与压力作用下，将各类分散的、无一定形状的农林剩余物经加工制成有一定形状、密度较大的
各种燃料产品的技术[1]
。成型过程中粒子经历重新排列、机械变形、塑性流变和密度增大等阶段，燃料品质同时受到内在原料化学组成和外在成型参数的影响[2]
，作用力和粒子结合机制见图1。本文主要介绍成型过程中粒子结合方式、木质素黏结作用、原料组分和成型参数等方面的研究现状，提出未来研究方向，为生物质成型机理发展提供参考。

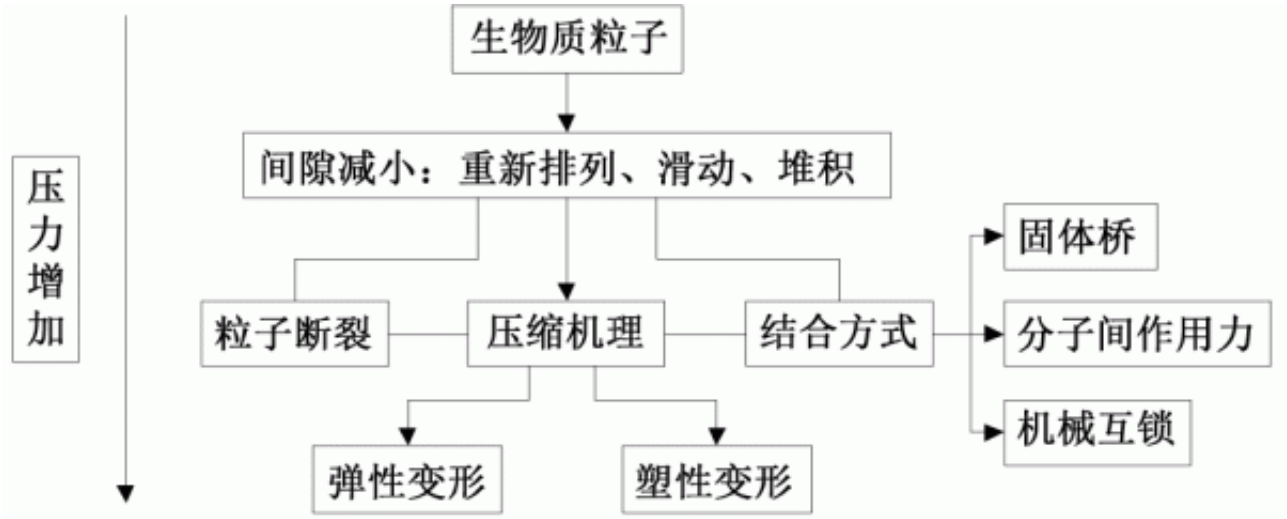

图 1　成型过程中作用力和粒子结合机制[2]

Fig. 1　Force and particle combination mechanism in the molding process

1成型过程

成型过程中，根据原料变形原因，可分四个阶段 [3-5]
，见图2。a为松散阶段，以克服原料间空隙为主，原料中空气在一定程度上被排除，压力与变形呈线性关系，较小的压力增大可获得较大的变形增量。b为过渡阶段，压力增大，大颗粒破裂成小粒子，发生弹性变形并占主导地位，粒子内部空隙被填补，压力与变形呈指数关系。c为压紧阶段，原料主要发生塑性变形，粒子在变形中断裂或发生滑移：垂直主应力方向，粒子充分延展，靠啮合方式紧密结合；平行主应力方向，粒子变薄，靠贴合方式紧密结合。燃料基本成型，压力与原料塑性变形有关。d为推移阶段，原料发生塑性和弹黏性变形，以弹黏性变形为主。原料发生应力松弛和蠕变等现象，压力会显著下降。

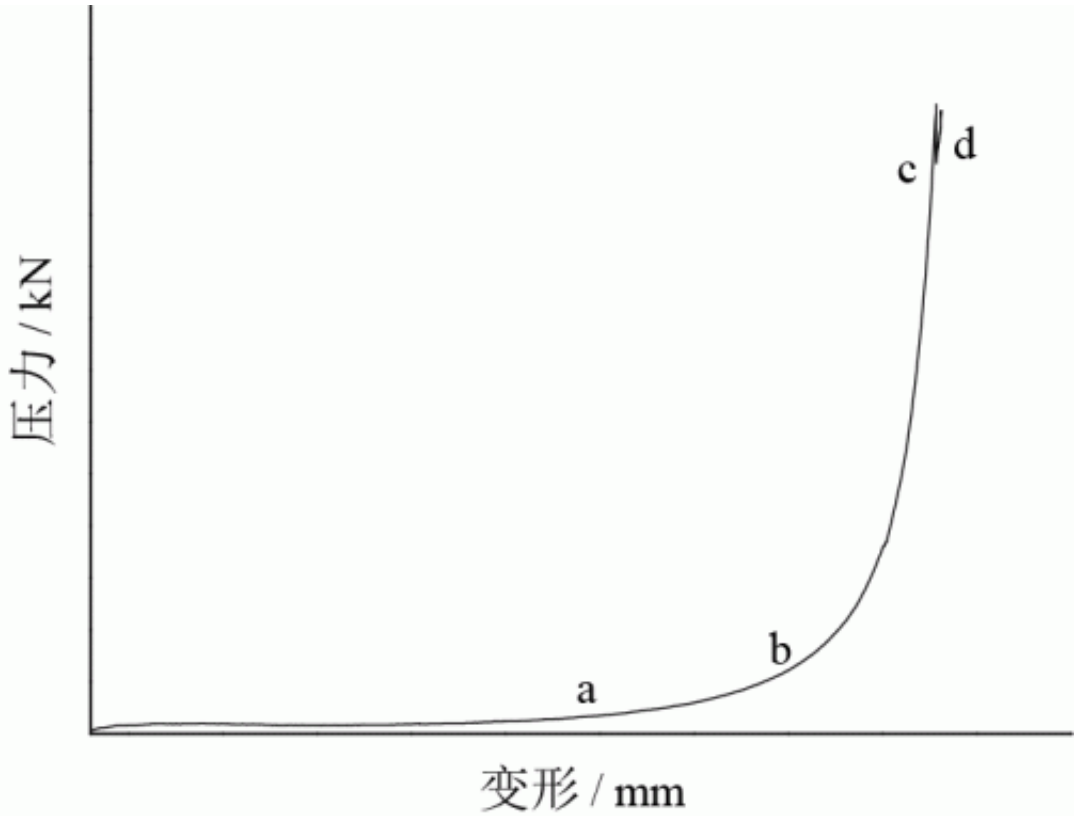

图 2　成型过程阶段划分[5]

Fig. 2　Stage division of biomass compression process

2粒子结合方式

KALIYAN等 [6]
对成型燃料粒子间结合方式进行了总结，提出两种理论：①粒子间距离足够近，靠吸引力结合。成型过程中，由于粒子间或内部摩擦而产生的静电吸引力，能够使粒子相互结合。当粒子间距离小于0.1μm时，范德华力成为粒子间结合的主要吸引力。②粒子间靠“固体桥”结构结合。

原料中的一些物质或添加剂，因化学反应、结晶或固化作用，粒子间接触时互相扩散形成交叉结合，从而形成“固体桥”结构，成为粒子间结合的主要方式。KALIYAN等的研究证实，玉米秸秆和柳枝稷本身中的木质素、碳水化合物、淀粉、蛋白质和脂肪等发生软化
或变形，能形成“固体桥”结构。KONG等[7]
经研究证实，锯末成型时加入废弃包装纸纤维可形成“固体桥”结构，具有更好的机械耐久性。

KONG等 [8]
进一步研究了添加水稻秸秆、小麦秸秆、橡胶树叶、尼龙四种纤维对锯末成型的影响，见图3，发现水稻秸秆、橡胶树叶对改善颗粒物理品质起到促进作用，因为水稻秸秆、橡胶树叶和锯末同属亲水性原料，粒子间能够有效互相缠绕，形成“固体桥”结构。小麦秸秆、尼龙属疏水性原料，对改善颗粒品质起消极作用。

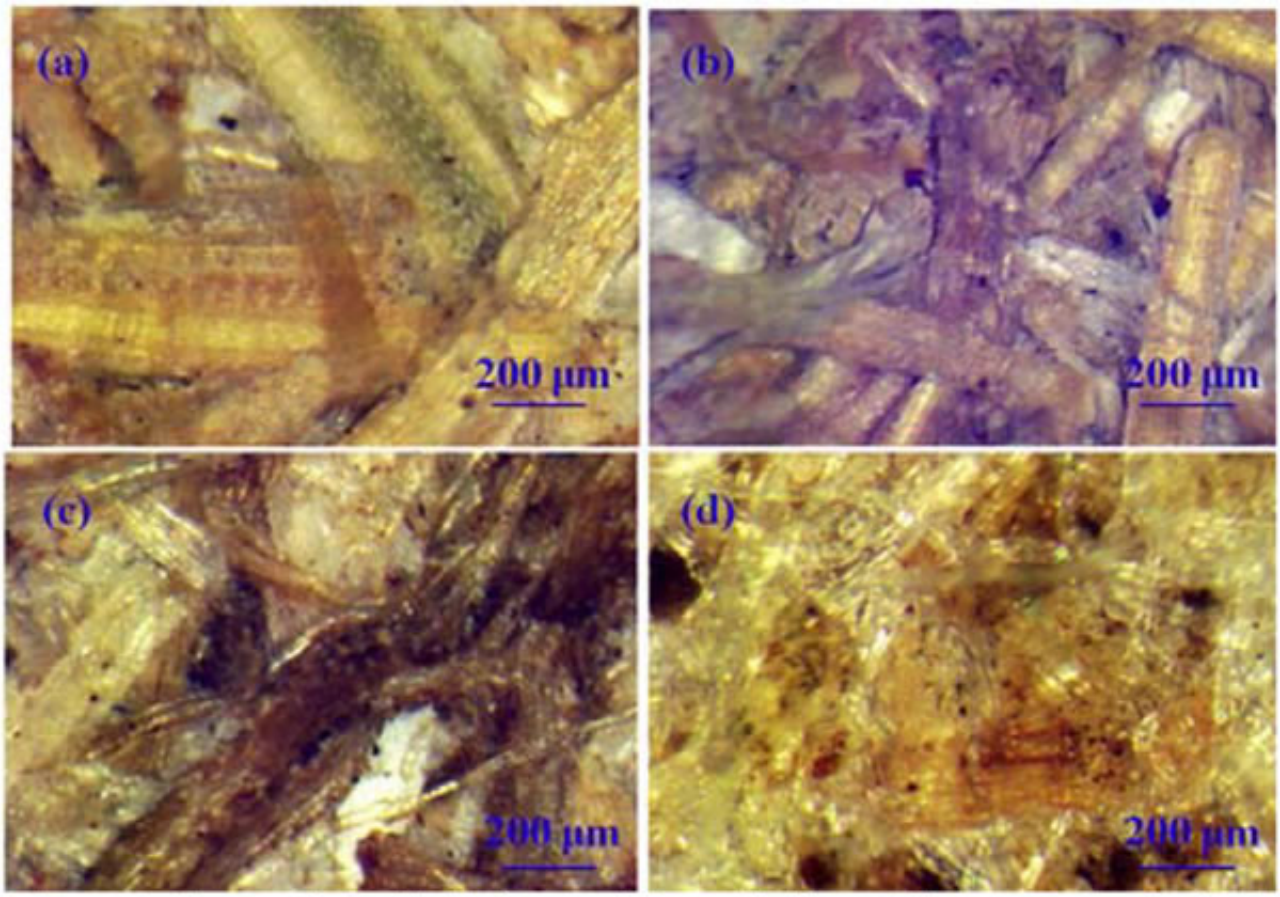

图 3　添加四种纤维的成型颗粒显微镜照片[8]：（a）小麦秸秆，（b）水稻秸秆，（c）橡胶树叶，（d）尼龙

Fig. 3　Optical microscope images of biomass pellets with different fiber intertwining actions: (a) wheat straw, (b) rice straw, (c) rubber leaf and (d) nylon

3木质素黏结作用

3.1热转变特性

生物质是一种天然高分子聚合物，其热转变特性指玻璃态转变温度（Tg）和熔融温度。玻璃态转变温度是指聚合物软化，从玻璃态向塑性态转变的温度。聚合物由分子量和链长不同的结构单体组成，玻璃态转变发生在一个温度区间内，是聚合物的一种重要特性。熔融温度是指聚合物由固态向液态转变的温度。木质素的热转变特性在成型过程中起关键作用。在玻璃态转变温度以下，由于价键和次价键所形成的内聚力，表现出较高的力学强度，有较大的弹性模量
；在
玻璃态转
变温度以上，木质
素分子部分转动或位移逐渐变成分子
的热膨胀运动，流动性增强，有较大的黏度[9]
。木质素的玻璃态转变温度取决于其来
源，与种类、水分含量、提取过程有关[10-11]。STELTE等[12]
的研究表明
，硬木木质素存在较多
乙酰基、甲氧基结构和少量的酚羟基结构，其

玻璃态转变温度低于软木[12]。STELTE等[13]
研究了小麦秸秆玻璃态转变温度对成型颗粒的影响。水分含量为8%时，小麦秸秆和经正己烷提取后的小麦秸秆的玻璃态转变温度分别为53°C和63°C，在玻璃态转变温度以下（30°C）与以上（100°C）比较时，颗粒密度和强度较低，轴向延伸较大。

KALIYAN等 [14]
采用差示扫描量热法（DSC）测定了不同水分下玉米秸秆和柳枝稷的玻璃态转变温度，结果见表1，发现水分增加会使玻璃态转变温度降低，因为水分能充当塑性剂，木质素－木质素分子间的氢键联结部分被木质素－水联接所代替。
LI等[15]
采用DSC、调制温度差示扫描量热法（TMDSC）、热机械法（TMA）和流变仪法（Rheology）测试了三种工业木质素的玻璃态转变温度。采用DSC测试时，发现直接对样品进行程序升温，DSC曲线会因水分的蒸发而出现较宽的吸热峰，造成较大误差，如图4所示。因此，必须对样品进行预热处理以蒸发掉水分同时消除预热历史，而木质素组分对温度较为敏感，进行预热处理时温
度达到120°C时会带来热分解，造成结构的改变[16]
。故将预热处理的终止温度设定为90°C，结果如表2所示。发现相比于原始木质素和甲醇不溶性成分（MI），甲醇可溶性木质素（MS）中含有较少的缩合结构，具有较低的玻璃态转变温度。

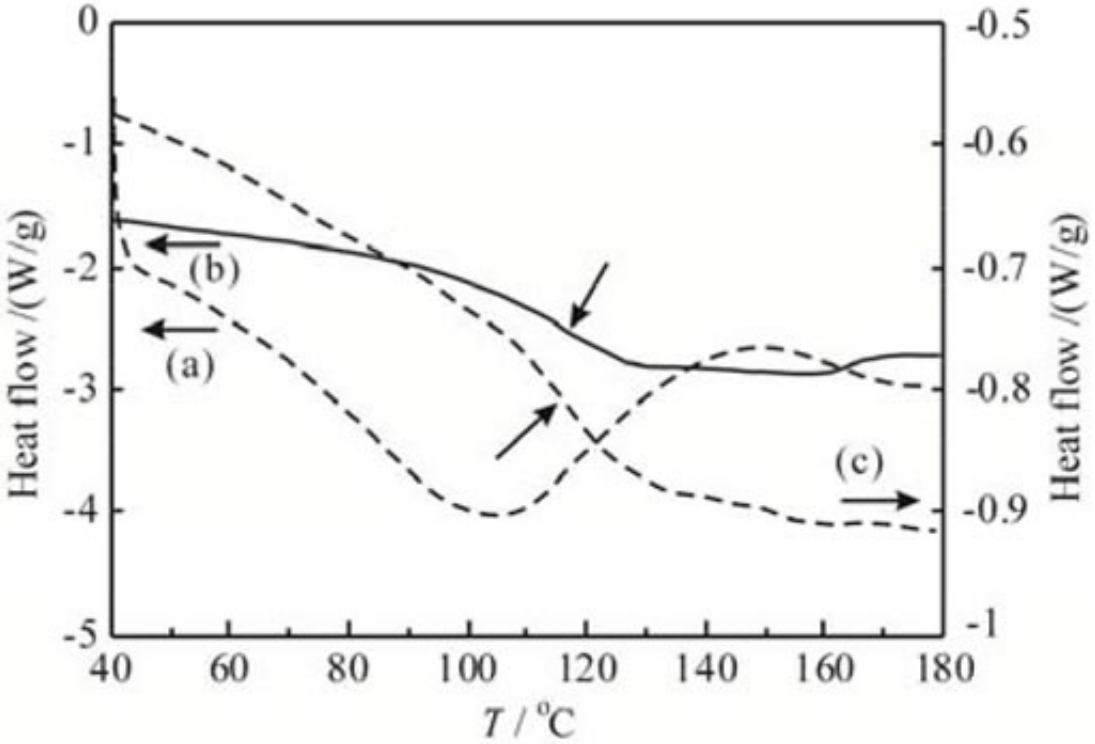

图 4　IN-MS 木质素 DSC 曲线[15]：（a）无预热处理，（b）有预热处理，（c）调制温度差示扫描量热法热流

Fig. 4　DSC thermograms of IN-MS lignin: (a) conventional DSC without annealing, (b) conventional DSC with annealing, (c) reversible heat flow from MTDSC

表 1　玉米秸秆、柳枝稷、木质素的玻璃态转变温度[14]
Table 1　Glass transition temperature of corn stover, switchgrass and lignin

样品	水分含量 / %	玻璃态转变区		
		起始温度/℃	中点温度 T_g /℃	终止温度/℃
玉米秸秆	7.9	51.4	79.6	102.1
	14.1	55.0	77.5	101.2
	19.8	54.0	74.7	100.0
柳枝稷	10.9	57.8	78.7	113.2
	14.5	54.6	75.3	100.7
	20.2	50.2	63.4	91.6
木质素	9.7	61.5	81.7	100.7

表 2　木质素的玻璃态转变温度[16]
Table 2　T_g of the various lignin samples determined by DSC, MTDSC, TMA and rheometry

木质素样品	带预热处理的 DSC			T /℃		
	T_g / ℃	ΔT / ℃	C_P / (J·g^{-1}·K^{-1})	TMDSC	TMA	Rheology
IN	147	13	0.35	143	157	180
IN-MS	117	14	0.56	118	123	143
IN-MI	200	18	0.21	202	203	nd
PB	162	14	0.39	163	164	179
PB-MS	132	13	0.54	138	143	161
PB-MI	186	20	0.22	210	205	nd
CS	nd	nd	nd	199	218	nd
CS-MS	131	8	0.51	133	137	160
CS-MI	nd	nd	nd	200	219	nd

注：nd—未检出；ΔT = 玻璃态转变过程终止温度−起始温度。

3.2木质素黏结作用

成型过程中，木质素发生热转变后起黏结固化和填充作用，是生物质自身起黏结作用的主要成分[17-18]。在70~110°C时，木质素开始软化，具有一定黏度，在200~300°C时，呈现熔融状态，黏度变大。此时，在一定压力下，与原料中的纤维素、半纤维素等通过分子间互相吸引和缠绕黏结成型[19-20]。

3.3木质素结构

STELTE等[9]认为，羟基特别是酚羟基易形成丰富的氢键结构，有利于促进黏结成型，增大颗粒机械强度。桉木屑和硬杂木屑木质素含量相差不大（依美国可再生能源实验室数据库，桉木屑含木质素26.91%~28.16%，硬杂木屑含木质素23.87%~28.55%），但实际桉木屑成型能耗高、成型后密度和强度低。这可能是因为桉木屑木质素以紫丁香基结构单元为主，硬杂木屑木质素以愈创木基结构单元为主[21]，紫丁香基结构单元木质素黏结指数低于愈创木基结构单元，成型效果有较大差异[13]。

4原料化学组分

生物质结构复杂，包含纤维素、半纤维素和木质素，还有抽提物和和灰分等[22-23]。不同组分在成型过程中的作用不同，见图5。不同类型生物质组分和结构不同，成型难易及效果有较大差异[24]。

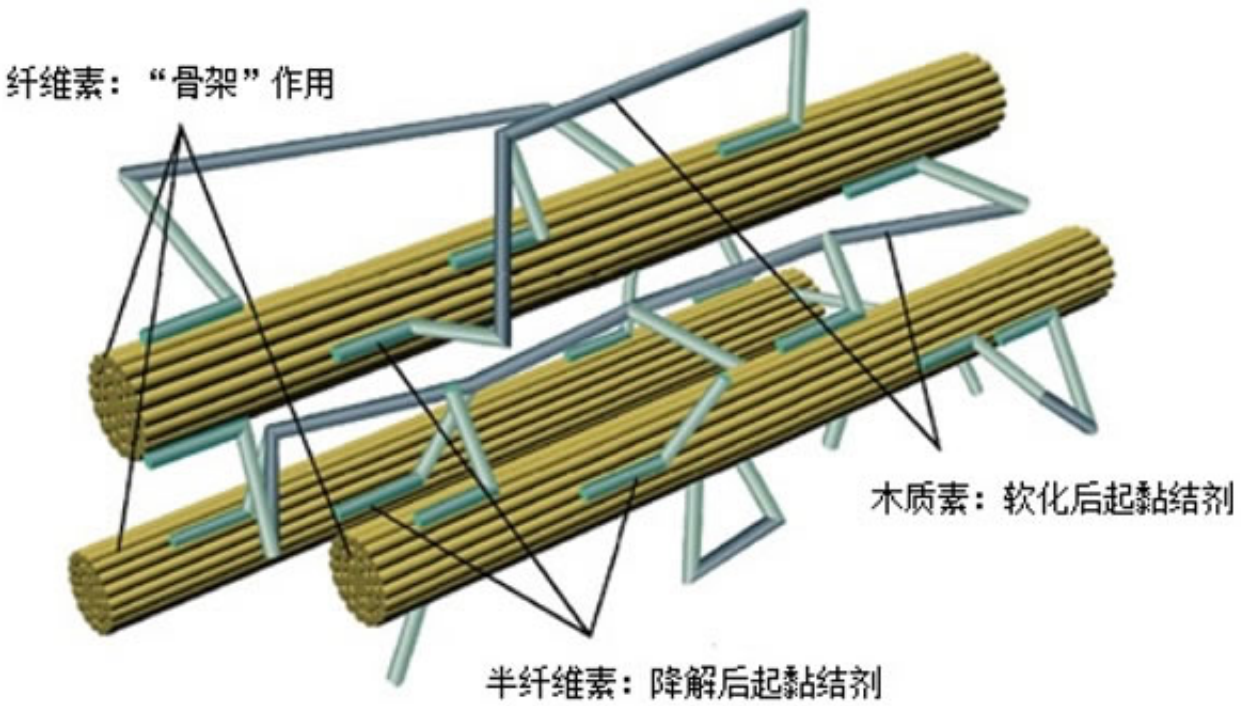

图 5　原料组分在成型过程的作用

Fig. 5　Roles of the chemical composition in molding process

4.1纤维素

纤维素是由β-1,4糖苷键联结数百至上千个D-葡萄糖形成的高度有序的线状高分子聚合物，最小重复单元是纤维二糖$(C_6H_{10}O_5)_n$。植物细胞内，纤维素形成晶体状的微纤维，微纤维被无定形纤维包围，纤维素分子有结晶区和非结晶区[25]。纤维素晶体状结构和丰富的氢键使得其在成型中不能作为黏结剂，但加热后会变得较为柔软。由氢键连接成的纤丝在燃料内起了类似"钢筋"的作用，成为燃料的"骨架"。蒋恩臣等[26]研究了纤维素粉末单独成型的特性，发现一定范围内增加含水率、压力和温度，可提高颗粒品质，含水率为14%~29%、压力为3~4kN、温度为100°C时成型效果最好。

4.2半纤维素

半纤维素是由不同种类的单糖体聚合而成的多糖，其聚合链呈无定型状且有短链存在。在硬木中，半纤维素主链由木糖单元通过β-1,4糖苷键连接而成，支链由β-1,2糖苷键和4-O-甲基葡糖醛酸基连接组成。软木的半纤维素主链中含有的乙酰基较少，但是有连接在主链上的阿拉伯呋喃糖侧链。成型过程中，在压力和水解共同作用下半纤维素可降解为木质素，起到黏结剂作用。

4.3木质素

木质素是由愈创木基、紫丁香基、对羟基苯的类苯基丙烷单体聚合而成的具有三维多酚网络结构的芳香类化合物。原料不同，三种单体含量也不同。

软木中以愈创木基结构单元为主，硬木中以紫

丁香基结构单元为主。木质素含量对成型的影响已有一定研究[27]。VANDAM等[28]发现温度高于140℃能增大木质素的黏结强度；CASTELLANO等[29]发现原料组分是影响颗粒品质的关键因素，木质素含量高、抽提物含量低的原料成型后的颗粒具有更好的物理品质；LEHTIKANGAS[30]发现针对新鲜的和储存后的树皮、锯末、采伐剩余物原料，木质素含量高的颗粒具有较好的耐久性；HOLM等[31]认为木质素含量越高，颗粒内部结合得越好，温度高于玻璃态转变温度，颗粒机械强度增大；但BRADFIELD等[32]认为木质素是内部强度较差的黏胶状物质，一定范围内可在晶体结构的木质聚合物间起黏结作用，但其含量超过临界值，过量的黏胶状物质堆积在晶体间，降低了颗粒的强度与耐久性；WILSON[33]发现，对于硬木和软木，木质素含量和颗粒的耐久性关系不明显。

4.4淀粉

淀粉是D-葡萄糖聚合物，分为带分支的支链淀粉和不带分支的直链淀粉，常温下不溶于水。成型过程中，一定温度、水分、压力和压缩时间作用下，出现淀粉糊化现象（不可逆），起到黏结剂和润滑剂作用[34]，利于燃料从模具中排出。淀粉糊化机理有两种：①在水分与温度的作用下，晶体结构受破坏；②在受压过程中，剪切与挤压作用使淀粉粒破碎。淀粉糊化程度越高，黏结作用越明显，燃料的机械强度越大[35]。

4.5蛋白质

在一定的温度和水分条件作用下，原料中的蛋白质会呈现变性过程，蛋白质、脂肪和淀粉等会转变成新的物质，有助于提高蛋白质的黏结性。根据BRIGGS等[36]的研究，增加原料中的蛋白质含量，可以提高产品机械耐久性，且未变性的蛋白质比变性的蛋白质更能改善产品物理品质。TABIL[37]认为原料中含有足够的天然蛋白质时，能够提高其作为黏结剂的作用。SOKHANSANJ等[38]发现，较高淀粉和蛋白质含量的原料比只含有纤维素的原料制得的产品机械耐久性要好，对于只含有纤维素的原料最佳水分为8%~12%，而淀粉和蛋白质含量较高的原料，其最佳水分可达到20%，从大豆、小麦、黑麦及大麦等提取的蛋白质对成型有促进作用，从玉米中提取的蛋白质则相反。WOOD[39]研究了蛋白质与淀粉对成型的促进作用，认为粗蛋白较变性蛋白更利于促进成型，与添加淀粉相比，不论是生淀粉还是糊化淀粉，粗蛋白的促进作用更好。

4.6脂肪

原料中的脂肪在成型过程中主要起润滑剂作用，少量脂肪促进成型，因为细胞壁中的天然脂肪在受压过程中被挤出，起“固体桥”的作用，提高耐久性。但过多的脂肪会阻碍粒子间的结合，因为脂肪分布于粒子间，其疏水性能够抑制其他水溶性成分（如木质素、淀粉、蛋白质等）的黏结作用，降低粒子间的结合强度[30]。CAVALCANTI[40]对淀粉、蛋白质及脂肪在13种原料中的黏结性能进行了研究，结果表明脂肪含量大于6.5%，产品耐久性较差，也不利于改善淀粉及蛋白质的黏结效果。

5成型参数

5.1压力

压力是成型的必需条件，施以一定的压力作用，原料才能被压缩成型。在一定的初始压力范围内，压力和产品密度

[41]。武凯等[42]研究发现，在环模成型设备中，环模扭矩与物料泊松比呈指数关系，同时，环模压缩比与扭矩也呈指数关系。STELT

E等[43]研究发现，压力与颗粒长度成指数关系，温度的升高可降低所需压力。

5.2水分

水分是成型过程中需控制的一个重要参数。TUMULURU[17]的研究结果表明，水分能降低玻璃态转变温度、促进“固体桥”结构形成、增加粒子间的接触面积。水分是天然的黏结剂和润滑剂，一定量的水分可在粒子间形成薄膜，增大粒子间接触面积和相互作用力（范德华力），薄膜还可减小原料和模具间及原料粒子间的摩擦力，减少能耗[44-45]。

但过多的水分会降低产品品质，因为过多的水分不能被粒子吸收而附着在表面上，使粒子不易压紧。不同原料所需的最佳水分含量也不相同[46]，大于或小于最佳值，产品品质都会降低。LI等[47]对树皮、木屑、苜蓿进行压块，发现最佳水分含量为8%左右。

MANI [44]指出，纤维类原料成型时最佳水分含量为8%~12%。OBEMBERGER等[48]的研究表明，稻秆水分含量为8%~12%时产品品质最好。姜洋等[24]研究了玉米秸秆、豆秆、芦苇等的水分含量与密度的关系，认为水分含量为12%~18%较为适宜。

5.3粒径

粒径也是影响成型的因素之一，粒径越小，越易被压缩，产品品质越好[49]。粒径不均匀、形态差异较大或粒径较大均会导致产品密度、强度降低，表面和内部产生裂纹。HARUNA等[50]针对农业、木质原料的成型实验，发现粒径越小，成型颗粒密度越大。MANI研究发现，粉碎筛网由3.2mm逐渐减小至0.8mm时，产品密度随之变大。事实上，将粒径不一的原料混合成型，产品品质会更好，因为粒子中的纤维或扭曲的薄片具有弯曲和缠绕性，聚集时互相缠绕，形成“固体桥”结构[6]，从而改善产品品质[44]。

5.4温度

成型过程中，提高温度可使木质素软化，起到黏结作用，同时也可使原料本身变软，易于压缩。但温度不宜过高，否则原料炭化严重，成型失败。不同原料成型时的最佳温度一般为80~150°C[51-53]。王功亮等[54]采用响应面法研究玉米秸秆成型特性，发现水分和温度间存在交互作用，温度低于100°C时降低水分含量，温度高于100°C时提高水分含量，能够保持比能耗不变，在100°C时存在能耗最低点。

6讨论及建议

（1）混配成型技术是利用不同原料的理化特性差异，按一定比例调配成型，实现原料组分互补、提高粒子间机械互锁性能，改善成型效果，是解决单一原料无法满足标准要求的有效技术手段，应是未来研究的主要方向之一。

（2）不同学者采用不同研究方法，针对不同原料的热转变特性，得到的研究结果也不完全一致。因此，有必要对原料的热转变特性进行深入研究，可为成型燃料生产保持合理温度区间、降低生产能耗提供理论依据。

（3）木质素在成型过程中起主要黏结作用，但只有在发生热转变后才具有软化黏结作用。木质素在不同原料成型过程中所起作用不完全一致，木质素含量对成型的影响还未有统一认识，木质素结构对成型的影响研究还很少，因此，有必要在研究其热转变特性的基础上，就其结构特征及含量对不同原料成型的影响进行分类研究，这可为生产原料的调配、成型参数的合理设置提供理论指导。

（4）“固体桥”结构的构建能够明显改善产品的品质，但是针对其构建条件和构建过程中的微观形貌特征研究还不够深入，此方面的研究可为阐明粒子间的结合方式和改善燃料品质指明方向。

（5）成型燃料品质改善的根本原因是成型过程中官能团和化学键的变化。而目前对该方面的研究还不够，深入认识成型过程中官能团和化学键结合方式及其活化与断裂途径，可以从更微观的角度揭示木质素的黏结作用，是研究成型机理的基础。

参考文献：

[1]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.

[2]李伟振，姜洋，王功亮，等.生物质压缩成型机理研究进展[J].可再生能源，2016，34(10)：1525-1532.

[3]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)：29-32，35.DOI：10.13941/j.cnki.21-1469/tk.2010.01.007.

[4]KALIYAN N，MOREY R V.Constitutive model for densification of corn stover and switchgrass[J].Biosystems engineering，2009，104(1)：47-63.DOI：10.1016/j.biosystemseng.2009.05.006.

[5]焦安勇.基于有限元模拟分析的生物质压缩成型机的研发[D].长春：吉林大学，2009.

[6]KALIYAN N，MOREY R V.Natural binders and solid bridge type binding mechanisms in briquettes and pellets made from corn stover and switchgrass[J].Bioresource technology，2010，101(3)：1082-1090.DOI：10.1016/j.biortech.2009.08.064.

[7]KONG L J，TIAN S H，HE C，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.DOI：10.1016/j.apenergy.2012.02.068.

[8]KONG L J，XIONG Y，LIU T，et al.Effect of fiber natures on the formation of“solid bridge”for preparing wood sawdust derived biomass pellet fuel[J].Fuel processing technology，2016，144：79-84.DOI：10.1016/j.fuproc.2015.12.001.

[9]STELTE W，HOLM J K，SANADI A R，et al.A study of bonding and failure mechanisms in fuel pellets from different biomass resources[J].Biomass and bioenergy，2011，35(2)：910-918.DOI：10.1016/j.biombioe.2010.11.003.

[10]LISPERGUER J，PEREZ P，URIZAR S.Structure and thermal properties of lignins：characterization by infrared spectroscopy and differential scanning calorimetry[J].Journal of the chilean chemical society，2009，54(4)：460-463.DOI：10.4067/S0717-97072009000400030.

[11]LIU Z J，JIANG Z H，CAI Z Y，et al.Dynamic mechanical thermal analysis of moso bamboo(phyllostachys heterocycla) at different moisture content[J].Bioresources，2012，7(2)：1548-1557.DOI：10.15376/biores.7.2.1548-1557.

[12]STELTE W，CLEMONS C，HOLM J K，et al.Thermal transitions of the amorphous polymers in wheat straw[J].Industrial crops and products，2011，34(1)：1053-1056.DOI：10.1016/j.indcrop.2011.03.014.

[13]STELTE W，CLEMONS C，HOLM J K，et al.Fuel pellets from wheat straw：the effect of lignin glass transition and surface waxes on pelletizing properties[J].Bioenergy research，2012，5(2)：450-458.

[14]KALIYAN N，MOREY R V.Densification Characteristics of Corn Stover and Switchgrass[J].Transactions of the ASABE，2009，52(3)：907-920.DOI：10.13031/2013.27380.

[15]LI H，MCDONALD A G. Fractionation and characterization of industrial lignins[J].Industrial crops and products，2014，62：67-76.DOI：10.1016/j.indcrop.2014.08.013.

[16]POURSORKHABI V，MISRA M，MOHANTY A K.Extraction of lignin from a coproduct of the cellulosic ethanol industry and its thermal characterization[J].BioResources，2013，8(4)：5083-5101.DOI：10.15376/biores.8.4.5083-5101.

[17]TUMULURU J S.Effect of process variables on the density and durability of the pellets made from high moisture corn stover[J].Biosystems engineering，2014，119：44-57.DOI：10.1016/j.biosystemseng.2013.11.012.

[18]LEE S M，AHN B J，CHOI D H，et al.Effects of densification variables on the durability of wood pellets fabricated with Larix kaempferi C.and Liriodendron tulipifera L.sawdust[J].Biomass and bioenergy，2013，48：1-9.DOI：10.1016/j.biombioe.2012.10.015.

[19]袁振宏.生物质能高效利用技术[M].北京：化学工业出版社，2015.

[20]袁振宏，吴创之，马隆龙.生物质能利用原理与技术[M].北京：化学工业出版社，2016.

[21]陶用珍，管映亭.木质素的化学结构及其应用[J].纤维素科学与技术，2003，11(1)：42-55.DOI：10.3969/j.issn.1004-8405.2003.01.009.

[22]MENON V，RAO M.Trends in bioconversion of lignocellulose：Biofuels，platform chemicals & biorefinery concept[J].Progress in energy and combustion science，2012，38(4)：522-550.DOI：10.1016/j.pecs.2012.02.002.

[23]GUERRIERO G，HAUSMAN J F，STRAUSS J，et al.Lignocellulosic biomass：Biosynthesis，degradation，and industrial utilization[J].Engineering in life sciences，2016，16(1)：1-16.DOI：10.1002/elsc.201400196.

[24]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.DOI：10.3969/j.issn.1671-5292.2006.05.006.

[25]MATTOS B D，LOUREN Ç ON T V，SERRANO L，et al.Chemical modification of fast-growing eucalyptus wood[J].Wood science and technology，2015，49(2)：273-288.DOI：10.1007/s00226-014-0690-8.

[26]蒋恩臣，高忠志，秦丽元，等.纤维素单独成型及燃烧特性研究[J].东北农业大学学报，2016，47(5)：106-112.DOI：10.3969/j.issn.1005-9369.2016.05.015.

[27]陈正宇.生物质成型工艺参数研究[D].北京：机械科学研究总院，2013.

[28]VAN DAM J E G，VAN DEN OEVER M J A，TEUNISSEN W，et al.Process for production of high density/high performance binderless boards from whole coconut husk：Part 1：Lignin as intrinsic thermosetting binder resin[J].Industrial crops and products，2004，19(3)：207-216.DOI：10.1016/j.indcrop.2003.10.003.

[29]CASTELLANO J M，GÓMEZ M，FERN Á NDEZ M，et al.Study on the effects of raw materials composition and pelletization conditions on the quality and properties of pellets obtained from different woody and non woody biomasses[J].Fuel，2015，139：629-636.DOI：10.1016/j.fuel.2014.09.033.

[30]LEHTIKANGAS P I.Quality properties of pelletised sawdust，logging residues and bark[J].Biomass and bioenergy，2001，20(5)：351-360.DOI：10.1016/S0961-9534(00)00092-1.

[31]HOLM J K，STELTE W，POSSEL D，et al.Optimization of a multiparameter model for biomass pelletization to investigate temperature dependence and to facilitate fast testing of pelletization behavior[J].Energy and fuels，2011，25(8)：3706-3711.DOI：10.1021/ef2005628.

[32]BRADFIELD J，LEVI M P.Effect of species and wood to bark Ratio on pelleting of southern woods[J].Forest products journal，1984，34(1)：61-63.

[33]WILSON T O.Factors affecting wood pellet durability[D].Pennsylvania：Pennsylvania State University，2010.

[34]王慧.基于生物质碾压成型机理的成型能耗影响因素研究[D].济南：山东大学，2011.

[35]THOMAS M，HUIJNEN P T H J，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.DOI：10.1002/(SICI)1097-0010(199908)79：11<1481：：AID-JSFA390>3.0.CO;2-0.

[36]BRIGGS J L，MAIER D E，WATKINS B A，et al.Effect of ingredients and processing parameters on pellet quality[J].Poultry science，1999，78(10)：1464-1471.DOI：10.1093/ps/78.10.1464.

[37]TABIL L G.Binding and pelleting characteristics of alfalfa[D].Saskatoon：University of Saskatchewan，1996.

[38]S S，S M，X B，et al.Binderless pelletization of biomass[Z].Tampa：2005：17-20.

[39]WOOD J F.The functional properties of feed raw materials and their effect on the production and quality of feed pellets[J].Animal feed science and technology，1987，18(1)：1-17.DOI：10.1016/0377-8401(87)90025-3.

[40]Cavalcanti W.The effect of ingredient composition on the physical quality of pelleted feeds：a mixture experimental approach[D].Manhattan：Kansas State University，2004.

[41]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.

[42]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.DOI：10.3969/j.issn.1002-6819.2010.12.024.

[43]STELTE W，HOLM J K，SANADI 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.DOI：10.1016/j.fuel.2011.05.011.

[44]MANI S，TABIL L G，SOKHANSANJ S.Effects of compressive force，particle size and moisture content on mechanical properties of biomass pellets from grasses[J].Biomass and bioenergy，2006，30(7)：648-654.DOI：10.1016/j.biombioe.2005.01.004.

[45]张静，郭玉明，贠慧星.原料含水率对生物质固体燃料成型效果的影响[J].山西农业科学，2012，40(1)：65-67，71.

[46]景元琢，董玉平，盖超，等.生物质固化成型技术研究进展与展望[J].中国工程科学，2011，13(2)：72-77.DOI：10.3969/j.issn.1009-1742.2011.02.013.

[47]LI Y D，LIU H.High-pressure densification of wood residues to form an upgraded fuel[J].Biomass and bioenergy，2000，19(3)：177-186.DOI：10.1016/S0961-9534(00)00026-X.

[48]OBERNBERGER 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.DOI：10.1016/j.biombioe.2003.07.006.

[49]KALIYAN N，MOREY R V.Factors affecting strength and durability of densified biomass products[J].Biomass and bioenergy，2009，33(3)：337-359.DOI：10.1016/j.biombioe.2008.08.005.

[50]HARUNA N Y，AFZALB M T.Effect of particle size on mechanical properties of pellets made from biomass blends[J].Procedia engineering，2016，148：93-99.DOI：10.1016/j.proeng.2016.06.445.

[51]TUMULURU J S，WRIGHT C T，HESS J R，et al.A review of biomass densification systems to develop uniform feedstock commodities for bioenergy application[J].Biofuels，bioproducts and biorefining，2011，5(6)：683-707.DOI：10.1002/bbb.324.

[52]TUMULURU J S，TABIL L G，SONG Y，et al.Impact of process conditions on the density and durability of wheat，oat canola and barley straw briquettes[J].Bioenergy research，2015，8(1)：388-401.DOI：10.1007/s12155-014-9527-4.

[53]LAM P Y，LAM P S，SOKHANSANJ S，et al.Effects of pelletization conditions on breaking strength and dimensional stability of Douglas fir pellet[J].Fuel，2014，117：1085-1092.DOI：10.1016/j.fuel.2013.10.033.

[54]王功亮，姜洋，李伟振，等.基于响应面法的玉米秸秆成型工艺优化[J].农业工程学报，2016，32(13)：223-227.DOI：10.11975/j.issn.1002-6819.2016.13.032.

原文地址：http://www.china-nengyuan.com/tech/119159.html