

生物质致密成型技术研究进展

薛冬梅, 武佩*, 马彦华, 陈鹏宇, 王昊毅

(内蒙古农业大学机电工程学院, 内蒙古自治区草业与养殖业智能装备工程技术研究中心, 内蒙古呼和浩特 010018)

摘要 从生物质原料成分、含水率、粒径、成型压力、温度以及辅助工艺(添加黏结剂、振动辅助压缩、超声波辅助制粒、蒸气爆破预处理和焙烧预处理)等方面, 综述了国内外生物质致密成型技术的研究现状, 并进行了相应分析。指出应从成型影响因素交互作用的角度出发, 探索致密成型机理, 进一步改进成型工艺, 减小成型能耗, 提高成型产品品质。结合国情, 提出“因地制宜”发展各地区特色生物质成型技术; 通过建立典型生物质原料组分和成型工艺参数数据库的方式加快研究进展和行业发展。

关键词 生物质; 致密成型; 影响因素; 进展

中图分类号 S216.2 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2018)01-0032-05

Research Progress on Technologies of Biomass Densification

XUE Dong-mei, WU Pei, MA Yan-hua et al (College of Mechanical and Electrical Engineering of Inner Mongolia Agricultural University, Inner Mongolia Engineering Research Center for Intelligent Facilities in Grass and Livestock Breeding, Hohhot, Inner Mongolia 010018)

Abstract The present research situation of biomass compacting technology at home and abroad was reviewed and analyzed in terms of biomass composition moisture content, particle size, molding pressure, temperature as well as other auxiliary technology (using binder, vibration-assisted compaction, ultrasonic vibration-assisted pelleting, steam explosion pretreatment, torrefaction pretreatment). It was pointed out that the mechanism of densification should be explored from the perspective of the interaction of forming factors in order to further ameliorate the upgrading process, energy consumption reduction and product quality improvement. Combined with national conditions it put forward that to develop regional-characteristic biomass compressing technologies according to the local conditions. It was suggested that the research progress and industry development should be accelerated by establishing the database of typical biomass raw material components and upgrading process parameters.

Key words Biomass; Densification; Influencing factors; Progress

在世界能源日益匮乏的情况下, 生物质作为一种主要的可再生能源可以提供相当数量的能源支持。由于生物质密度小、体积大、松散不成型等特点, 在利用之前先进行致密成型尤为重要。生物质致密成型产品既可为生物质气化、液化产业提供相应的原料供应, 又可直接用作固体燃料。目前, 针对生物质致密成型技术的研究主要包括: 关注成型产品密度、耐久性等物理特性, 进一步提高成型产品品质; 在保证成型产品品质的前提下, 降低成型能耗, 提高成型技术的经济性。为达到以上 2 个目标, 国内外学者主要从影响生物质致密成型过程和效果的因素出发, 探究其本质上的作用机理, 不断改进和优化最佳工艺方法, 为生物质致密成型技术的发

展提供理论和技术支持。笔者从致密成型影响因素角度出发, 综述国内外近年来的研究进展, 并针对我国国情提出相应的改进建议。

1 致密成型影响因素

1.1 生物质成分 用于致密成型的原料主要是纤维素类生物质, 如农林废弃物(秸秆、树叶、木屑)、农产品加工废料(甘蔗渣、果壳)、草场资源和水生植物资源。纤维素类生物质的主要组成成分为纤维素、半纤维素、木质素及少量果胶、淀粉、蛋白质、脂肪。不同的生物质其成分含量有所不同, 表 1 为几种典型生物质的主要成分含量。

表 1 典型生物质原料主要成分含量

Table 1 The main ingredient content of typical biomass raw materials

序号 No.	生物质原料 Raw material	纤维素含量 Cellulose content // %	半纤维素含量 Hemicellulose content // %	木质素含量 Lignin content // %	参考文献 Reference
1	杉木	36.22	12.05	27.61	[1]
2	樟树	38.87	20.82	24.40	[1]
3	水稻秸秆	41.33	24.60	9.22	[1]
4	小麦秸秆	34.20	23.68	13.88	[2]
5	芦苇	46.60 ± 2.88	20.93 ± 1.28	18.30 ± 0.53	[3]
6	柳枝稷	47.23 ± 0.67	20.17 ± 0.87	19.30 ± 0.64	[3]
7	甘蔗渣	35.30 ± 1.80	24.20 ± 2.30	19.40 ± 1.10	[4]
8	菇头	14.20 ± 0.90	8.60 ± 0.90	10.90 ± 1.00	[4]
9	椰子壳	34.12 ± 0.20	22.36 ± 1.47	28.04 ± 0.57	[5]
10	板栗壳	21.47 ± 0.27	16.28 ± 0.35	36.58 ± 0.26	[5]

基金项目 国家自然科学基金项目(51165029); 教育部博士点基金项目(20111515110010); 内蒙古“草原英才”产业创新人才团队项目(内组通字[2014]27号)。

作者简介 薛冬梅(1991—), 女, 河北宣化人, 硕士研究生, 研究方向: 工程测试与技术。* 通讯作者, 教授, 博士, 博士生导师, 从事农业测试与工程技术研究。

收稿日期 2017-11-08

蒋恩臣等^[6] 试验发现, 纤维素单独成型的微观结构表现为物料纤维素间相互镶嵌和缠绕, 随温度和成型压力升高该现象更加明显, 成型颗粒的密度和强度也进一步提高。Sun 等^[7] 研究指出, 纤维素在成型时可以起到强化结构的作用, 但其含量越高, 需要的成型压力也相应增大。Lam 等^[8] 研究

发现,单糖成分可以起到黏结剂的作用,有助于增强成型颗粒的硬度和稳定性,但该种成分同时会导致成型颗粒的挤出能耗增加。Tumuluru 等^[9]研究指出,蛋白质在成型过程中受热变性并具有胶凝作用,可以增强成型颗粒的耐久性。Kaliyan 等^[10]研究表明,在成型过程中淀粉糊化,起到黏结剂的作用,可以提高成型颗粒的硬度和耐久性。Stelte 等^[11]提出,由于木质素在秸秆生物质中的含量低于在木质生物质中的含量,在相同条件下,前者制得的成型颗粒的抗压强度低于后者。Lee 等^[12]试验测得不同的生物质中木质素含量不同,导致在相同成型条件下成型颗粒的耐久性有所差别。Stelte 等^[13]研究发现,秸秆类生物质表面的蜡状角质层在成型过程中可以作为润滑剂,成型时减小摩擦,降低挤出能耗,但会影响到成型颗粒的机械性能。Kaliyan 等^[10]研究指出,脂肪在成型过程中起到润滑作用,可以降低原料与模具之间的摩擦,减小成型能耗,但是脂肪含量多会影响成型颗粒的耐久性。

以上研究说明,生物质的成分对其致密成型起一定的作

用,主要可以分为 3 类:强化结构、黏结作用、润滑作用。对于不同种类的生物质,各组成成分不同,在选择成型工艺时应区别对待。如,对于木质素含量高的木质生物质,在成型时不必额外添加黏结剂;而对于秸秆类生物质来说,由于其表面的蜡状角质层不利于黏结成型,则需要通过高温高压及添加黏结剂的方法成型,或者利用一定预处理方法分解该物质来提高成型产品的机械强度。因此,在探究致密成型工艺条件时应先了解生物质的各组成成分及其含量,恰当利用其性质,这对于降低成型能耗,生产密度高、耐久性好的成型产品具有关键作用。并且成分不同也决定了各类生物质适用的成型领域有所不同。如纤维素和半纤维素是制备生物质乙醇的主要成分,该类成分含量高的秸秆类生物质在致密成型后可为生产工业乙醇提供原料^[14-15]。

1.2 成型工艺参数 不同类型的生物质成分含量不同,决定了其致密成型时所需的工艺也有所区别,几种常见生物质的成型工艺参数见表 2。

表 2 常见生物质成型工艺参数

Table 2 Parameters of common biomass molding process

序号 No.	原料 Raw material	成型压力 Molding pressure MPa	温度 Temperature °C	含水率 Moisture content %	原料粒径 Particle size of raw material//mm	黏结剂添加比 Binder addition ratio	成型密度 Molding density g/cm ³	参考文献 Reference
1	稻秆	168	△	21	0~0.20	—	1.327 0	[16]
2	棉秆	8	130~150	8~23	0~2.00	—	>1.000 0	[17]
3	锯末	60	△	12~16	—	—	0.940 0	[18]
4	毛竹	20	125	15	0~0.38	—	1.110 0	[19]
5	柳枝稷	150	75.1	8.5	3.00	—	1.077 8	[20]
6	中药渣	100	△	8~12	2.00~5.00	—	>1.000 0	[21]
7	稻壳	10	100	16	—	3.5:1	0.945 0	[22]
8	花生壳	10	100	15	—	3.5:1	1.100 0	[23]
9	玉米秸秆	51	110.8	17	—	—	1.031 0	[24]

注:△表示冷压

Note:△ indicates cold pressure

1.2.1 原料含水率。从宏观角度上来说,水分可以促进生物质细胞中木质素、淀粉、果胶等物质的软化,同时水分具有润滑作用,在成型过程中,适宜的含水率可以减小原料与成型模具之间的摩擦,降低成型能耗。从微观方面考虑,适当的水分可以起到填充原料孔隙的作用,在成型产品体积不变的情况下质量得以增加,密度也相应变大;同时水分还可以使粒子间的结合面积增大,在黏结力不变的情况下,结合面积越大所制成的成型产品抗压强度越高^[25]。并且在成型过程中,适量的水分可以促进原料粒子滑动,增强成型过程中原料的流动性,有利于生物质进一步致密成型^[26]。

马培勇等^[9]研究发现,成型颗粒的密度和耐久性随着含水率的逐渐升高会出现 2 个不同的峰值点;Zafari 等^[27]试验发现,随着原料含水率的增加,成型产品的抗压强度和耐久性呈先增加后减小的趋势;Tumuluru 等^[28]研究发现,高比例的含水率在成型过程中由于温度的作用会出现水分闪蒸的情况,这将导致成型颗粒密度降低;Zafari 等^[29]指出,在一定范围内,水分的增加会导致生物质的流变特性由黏塑性转为黏弹性,使成型颗粒的耐久性变差。以上这些研究表明,

原料含水率并不是越高越好。Lee 等^[12]通过试验证明不同的生物质最佳含水率均有一定的范围,在该范围中成型后的颗粒耐久性良好。Huang 等^[25]强调,原料水分对于成型颗粒密度和抗压强度的影响程度远大于温度和成型压力,并发现最佳含水率可能与生物质本身细胞壁的含水率有一定关系。Kaliyan 等^[10]研究指出,提高原料含水率可以降低木质素玻璃化转变的温度,使生物质在较低温度下黏结成型,可以降低成型能耗。

上述研究证明,原料含水率对于生物质成型产品的密度、耐久性以及成型能耗有着重要影响。对于不同种类的生物质而言,原料的最佳含水率不同,甚至在其他工艺参数改变时,最佳含水率有所变化。因此,在探究原料含水率对致密成型的影响时要着重关注其他影响因素与其交互作用。并且应该透过现象深入研究含水率这一影响因素在成型过程中对生物质本身成分、性质的影响,这将有利于在今后的研究中总结不同生物质的成型规律,为成型工艺的改进提供条件。

1.2.2 成型压力。成型压力是致密成型的必要参数。足够的压力使生物质细胞中的木质素、蛋白质、淀粉等成分分离,

起到黏结剂的作用;同时原有的生物质结构在一定的压力作用下被破坏,微观粒子间的范德华力增强,氢键形成,形成新的组织结构,促进成型过程的进行。合适的压力可以制得密度大、机械性能好的高品质成型产品,但是压力并不是越大越好,压力过大会带来能耗高、模具磨损等负面效应^[30]。

张霞等^[31]建立了压力对水葫芦成型颗粒燃料密度和径向抗压力的一元二次函数模型,分别为 $y = -0.0271x^2 + 6.8543x + 933.8200$ 和 $y = -0.00004x^2 + 0.7477$ 。姬爱民等^[32]研究发现,最初逐渐增大压力,成型产品的密度随之增加,产品外观趋于光滑;当压力大于15 MPa后,产品密度随压力增加的幅度变小;当压力大于25 MPa后,成型块与模具摩擦生热,表面出现碳化现象。Huang等^[25]试验证明,成型颗粒的强度和密度随着成型压力的增加而增加。Zafari等^[29]研究指出,过度加压会在颗粒内部引起残余应力,降低颗粒出模后的耐久性。Stelte等^[13]试验表明,在一定压力范围内,成型颗粒的密度随着压力的增加而显著增加,当压力达到某一值时,密度随压力增加的趋势不再显著。Poddar等^[33]通过试验证明,成型压力对成型颗粒的密度影响显著,而对于成型产品的热值没有明显影响。

综上所述可以发现,成型压力对于成型能耗、产品密度和耐久性的影响是互相制约的。高压可以生产出密度高、耐久性好的产品,但不可避免会加大能耗。因此,对于生物质致密成型而言,在保证成型产品质量的前提下,寻求最低能耗的成型压力则尤为重要。并且以上研究均是在实验室条件下进行的,未考虑实际成型机结构的影响。而不同的成型机压缩形式不同,如柱塞式成型机和压辊式成型机,前者是活塞对被压缩生物质在垂直方向上施压;而后者则是压辊滚过压模,此时压力作用到被压缩生物质上的力是有一定角度的。并且由于成型模具尺寸不同,克服生物质与模具的摩擦所需的压力也不同。因此,在实验室得出的最适宜成型压力并不完全适用于不同成型机的设计。建议学者可以通过实际的成型机结构设计试验台,最大程度地模拟实际成型过程,从而使试验数据更接近实际生产需求。

1.2.3 原料粒径。多数成型试验证明,在其他条件不变的前提下,原料的粒径越小,越易成型,且成型产品品质越好。因为当原料粒径较小时,成型过程中原料间相互接触的面积变大,有利于粒子间的相互结合;并且粒径小的原料孔隙率也较小,粒子的填充性和流动性较好,对于提高成型产品的松弛密度和耐久性是有帮助的。

Zafari等^[27]研究发现,大粒径原料压缩后得到的成型颗粒外观上有裂缝并且耐久性不佳。Mat等^[34]试验证明,在相同压力作用下原料的粒径越小,成型块的密度越大。Balamurugan等^[35]研究提出,在其他条件一定的情况下,原料粒径越小,压实成型越易。张霞等^[31]则建立了原料粒径与成型颗粒密度和径向抗压力的对数函数关系式,分别为 $y = -43.1490\ln(x) + 1336.6000$ 和 $y = -0.2393\ln(x) + 1.2872$ 。Lee等^[12]研究表明,不同种类的生物质在成型时需要的最佳粒径不同,但总体状态表现为原料粒径越小,成型

后颗粒的耐久性越高,使用混合粒径的原料成型可以生产出质量更佳的成型颗粒。柳恒饶等^[36]提出,粒径对成型密度的影响本质上是影响原料粒子的流动性。Harun等^[37]研究发现,混合生物质的孔隙率受到原料粒径影响,平均粒径较小的原料孔隙率也相应较小,而小孔隙率有利于致密成型。

通过以上研究可知,原料粒径越小,越易成型,且在其他条件相同的情况下成型产品的密度越大,耐久性越好。但在实际生产时原料粉碎和筛分的过程都会带来相应的能耗和资金投入,因此,兼顾经济效益,实际生产时并不能无限地降低原料粒径,必须找到保证成型产品质量和经济性兼得的平衡点,为致密成型产业的发展提供支持。

1.2.4 温度。温度在成型过程中不仅会影响到生物质含水率的变化,更会引起生物质成分的变化:一定温度下,生物质中的纤维素、半纤维素、木质素、蛋白质、果胶等物质会出现软化甚至变性等现象,这将对成型过程产生影响,且会改变成型产品的品质特性。常用的成型工艺可以分为2种:冷压成型和热压成型。冷压成型工艺是在成型的整个过程中不需要对生物质进行额外加热的工艺;而热压成型工艺则会对生物质进行预热或者在成型时对其进行加热。而无论选用哪种成型工艺,温度对于致密成型的影响都是不可避免的。

对于冷压成型工艺而言,由于原料之间、原料与模具间的摩擦都会产生相应的热量,使成型温度发生变化。如颗粒燃料成型机在成型过程中原料和模具之间会产生较大的摩擦,其温度可达100℃,即使没有额外加热,摩擦生热造成的温度变化亦是不可忽略的。涂德浴等^[16]在优化水稻秸秆冷压成型工艺时提到其忽略了摩擦产生的热量,因此得出的成型压力值较高。齐天等^[38]研究指出,生物质原料因为摩擦热而产生的热效应会影响生物质本身的物化特性尤其是热特性。

对于热压成型工艺而言,则要合理控制成型温度。适当的成型温度可以起到软化生物质成分的作用,并使具有黏结功能的成分发挥其黏结作用,提高成型产品的耐久性。但当温度超出这个合适的范围后,则会造成成型产品炭化;当生物质含水率较高时,高温还会引发模具内原料“放炮”现象的发生;并且高温会引起成型模具退火,缩短成型机的使用寿命。Balamurugan等^[35]提出当压力一定时,温度越高成型块的密度越大。Lee等^[12]研究指出,在一定的温度范围内,升温可以提高成型颗粒的耐久性。Huang等^[25]研究表明,在一定温度范围内,升温可以提高成型颗粒强度。Stelte等^[11]试验证明,在100℃制粒比30℃制粒粒子间的黏附性更强,成型产品回弹现象不明显,抗压强度更高,密度更大。张霞等^[39]研究发现,当其他条件固定时,成型产品的密度和径向抗压力随温度的升高呈现先上升后下降的趋势。张得政等^[40]试验证明,不同种类的生物质成型颗粒的密度和径向抗压力峰值所对应的温度不同。Zafari等^[29]研究发现,在一定的范围内温度越高,原料分子的运动加剧而黏结性减弱,成型颗粒的耐久性降低。Larsson等^[41]研究指出,在成型温度范围一定时,将模具温度控制到较低水平,对于生产较高

密度和耐久性的成型颗粒是有利的。

由以上研究可知,将温度控制在合理范围,对于致密成型是有利的。在工艺选择时需要综合整体的技术路线来确定实施冷压成型还是热压成型。冷压成型工艺虽不需额外耗能加热,但成型时所需的压力要比热压成型大,用于成型的原料粒径也需粉碎的更小,因此其能耗也是非常可观的。然而,在成型领域中关于冷压成型和热压成型整套工艺流程所造成的能耗比较研究较少,研究人员可以对此进行探索,为寻求耗能少、经济效益高的成型工艺提供依据。

1.3 辅助工艺 研究人员还尝试通过一些辅助成型工艺方法来减小成型过程中的能耗,提高成型产品品质。

1.3.1 添加黏结剂。 Muazu 等^[42-43] 研究发现,额外添加淀粉、水胶等黏结剂可以提高成型块的抗压强度,但是会降低其密度;将生物质污泥作为黏结剂可以提高成型颗粒密度,微藻作为黏结剂则可以提高成型颗粒密度、耐久性和热值。Jiang 等^[44] 通过试验证明,将污泥作为黏结剂,可以降低成型压缩和挤出能耗,提高成型颗粒硬度,减少吸湿性,改善其燃烧特性。Ahn 等^[45] 研究指出,菜籽粉、咖啡粉和木质素作为黏结剂可以提高生物质成型颗粒的耐久性,且添加咖啡粉和木质素还可以提高成型颗粒的热值。

以上研究说明,学者除了使用传统的木质素、淀粉等黏结剂外,为了促进资源、废料的循环利用,还在不断寻求新型黏结剂。污泥、微藻、菜籽粉等原料作为黏结剂用于生物质致密成型不仅有利于提高成型产品品质,对于环保、节能也有一定贡献,可以大大提高经济效益。

1.3.2 振动辅助压缩。 Wu 等^[46] 通过试验证明,振动辅助制粒可以降低生物质原料与模具之间的摩擦,减小生物质回弹,降低成型能耗。Ma 等^[47] 研究发现,振动辅助制粒可以提高成型块密度,减小其回弹现象,提高成型块品质。

在压缩过程中引入振动因素,使生物质粒子间的摩擦力减小,增强粒子的流动性,使塑性变形充分、成型块微观结构中空隙变小、分布减少,粒子间填充更加紧密,从而可以生产出密度高、耐久性好的高品质成型产品。

1.3.3 超声波辅助制粒。 Zhang 等^[48-49] 研究发现,超声波辅助制粒可以提高成型颗粒的糖产量。Song 等^[50] 通过试验证明,随着超声功率和造粒压力的增加,成型颗粒密度相应增加。Zhang 等^[51] 研究指出,超声波辅助制粒可以提高成型颗粒的耐久性。Zhang 等^[52] 研究证明,超声波辅助制粒可以降低生物质成型过程中所需的压力。

将超声波的振动特性、热效应及穿透性运用于辅助制粒中可以提高成型产品的品质,降低成型能耗;同时超声波辅助制粒可以提高生物质的产糖量,这一作用可以被用于为工业制乙醇提供成型原料,从而降低生产成本,提高经济效益。

1.3.4 蒸气爆破预处理。 Lam 等^[53] 通过试验证明,蒸气爆破可以提高成型颗粒的密度、机械强度和尺寸稳定性,但是需要更高的成型压力,同时挤出能耗也大大增加。Adapa 等^[54-55] 研究指出,蒸气爆破预处理对于成型颗粒耐久性、密度、比能耗的影响比例明显高于其他影响因素;他还发现^[56]

经蒸气爆破后的成型颗粒密度、松弛密度、耐久性均明显高于未经蒸气爆破的。Lam 等^[8,53] 研究发现,经过蒸气爆破的生物质生产出的成型产品疏水性明显增加,吸湿性降低,且机械强度也有所提高,有助于运输储存。

蒸气爆破预处理工艺主要通过改变生物质本身成分的含量与性质来影响致密成型。相关研究表明,一些生物质经蒸气爆破后,用于增强结构强度的纤维素、半纤维素的含量比例明显提高;而木质素、脂肪、淀粉、果胶等可起到黏结、润滑作用的成分含量降低,从而会影响成型颗粒的密度和耐久性。同时,经蒸气爆破后的生物质原料纤维变得疏松且空隙增大,灰分降低,更易于用作燃料燃烧。

1.3.5 焙烧预处理。 Chen 等^[57] 研究发现,与常规成型颗粒相比,经焙烧预处理后的成型颗粒可以减少温室气体的排放。Arteaga-Pérez 等^[58] 提出,焙烧可以降低生物质中半纤维素的含量,提高成型颗粒的能量密度,增加致密成型的经济性。Benavente 等^[59] 试验证明,焙烧预处理有助于减少致密成型过程中的比能耗。Ara 等^[60] 研究发现,焙烧处理可以提高成型颗粒的尺寸稳定性,减小其吸湿性。

焙烧温度可以分解生物质中的纤维素和半纤维素,使其在质量降到原始质量 70% 的情况下仍能保持 90% 的能量,从而提高生物质的能量密度。通过焙烧预处理后的生物质能量密度高、疏水性强,研磨性能提高,经过制粒后得到的成型颗粒不易分解,可以较大程度地减少储存和运输成本^[61-64]。

2 展望

综述国内外的研究现状,针对生物质致密成型技术在我国的发展,建议今后从以下几方面进行探索:

(1) 由于每种生物质成分不同,成型工艺参数的选择会有差别,今后的研究工作可以针对典型生物质组分和成型工艺参数进行数据库的建立,为致密成型技术的发展提供相应的基础支持。

(2) 在实际成型中各因素对致密成型的影响并不是相互独立的,而是彼此影响的,建议加强对成型影响因素间交互作用对成型机理影响的研究。

(3) 由于我国国土辽阔,各地区气候差异显著,不同地方的生物质种类有着极大差别。结合 2017 年中国国际生物质能源与生物质利用高峰论坛会议的主题“结合国情,走中国特色的生物质发展之路”,我国在发展生物质致密成型产业时,要着重强调“因地制宜”。研究人员应针对本地区可用于致密成型的原料种类开展成型机理、成型工艺等方面的探索,并研制、开发特色生物质的成型设备。

(4) 辅助工艺的实施主要是为了减小成型能耗,提高产品品质,前述 5 种辅助成型工艺从各自的作用机理出发对于成型技术的研究与发展起到了一定的作用。但是截至目前,不同工艺均有利弊,因此,在今后的研究中,在寻求新型成型工艺的同时,更要加强对现有工艺的优化和改进,在发现已有问题的基础上进行提高,促进生物质致密成型技术进一步的发展。

参考文献

- [1] JIANG L B, YUAN X Z, XIAO Z H, et al. A comparative study of biomass pellet and biomass-sludge mixed pellet; Energy input and pellet properties [J]. *Energy conversion and management*, 2016, 126: 509–515.
- [2] ADAPA P K, TABIL L G, SCHOENAU G J. Compression characteristics of selected ground agricultural biomass [J]. *Agricultural engineering international; the CIGRE journal*, 2009, 6: 1–9.
- [3] 宗俊勤, 郭爱桂, 陈静波, 等. 7种多年生禾草作为能源植物潜力的研究 [J]. *草业科学*, 2012, 29(5): 809–813.
- [4] 林满红, 肖正, 赵超, 等. 6种农林剩余物化学成分及沼气高温发酵效果 [J]. *福建农林大学学报(自然科学版)*, 2017, 46(2): 206–210.
- [5] 蒋新元, 廖媛媛, 郭忠, 等. 7种果壳的热解特性及与主要组分相关性分析 [J]. *林业科学*, 2015, 51(12): 79–86.
- [6] 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.
- [7] SUN Y, XING Y S, DING N, et al. Analysis on microstructure of cold-area corn stover briquette densification fuel [J]. *Journal of biobased materials and bioenergy*, 2015, 9(4): 426–432.
- [8] LAM P S, LAM P Y, SOKHANSANJ S, et al. Mechanical and compositional characteristics of steam-treated Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii* L.) during pelletization [J]. *Biomass and bioenergy*, 2013, 56: 116–126.
- [9] 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(4): 44–57.
- [10] KALIYAN N, MOREY R V. Factors affecting strength and durability of densified biomass products [J]. *Biomass and bioenergy*, 2009, 33(3): 337–359.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 闫智培, 李纪红, 李十中, 等. 木质素对木质纤维素降解性能的影响 [J]. *农业工程学报*, 2014, 30(19): 265–272.
- [15] 张爱萍, 谢君. 生物质制乙醇预处理方法的研究进展 [J]. *华南农业大学学报*, 2014(4): 77–84.
- [16] 涂德谷, 李安心, 何贵生. 水稻秸秆冷压成型工艺参数优化 [J]. *中国农业科技导报*, 2015, 17(3): 56–62.
- [17] 陈正宇, 陆辛, 徐德民. 生物质压缩成型工艺参数 [J]. *塑性工程学报*, 2012, 19(3): 98–104.
- [18] 李强, 陈铁军, 饶发明, 等. 锯末制备生物质成型燃料的试验研究 [J]. *可再生能源*, 2012, 30(9): 85–89.
- [19] 马培勇, 施苏薇, 邢献军, 等. 毛竹颗粒燃料成型工艺研究 [J]. *可再生能源*, 2016, 34(11): 1714–1719.
- [20] KALIYAN N, MOREY R V. Constitutive model for densification of corn stover and switchgrass [J]. *Biosystems engineering*, 2009, 104(1): 47–63.
- [21] 范鹏飞, 董玉平, 常加富, 等. 中药渣类生物质液压成型影响因素分析 [J]. *农机化研究*, 2014(6): 219–223.
- [22] 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.
- [23] 孙亮, 孙清, 佟玲, 等. 花生壳热压成型工艺参数的试验研究 [J]. *中国农业大学学报*, 2011, 16(5): 127–132.
- [24] 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.
- [25] HUANG Y, FINELL M, LARSSON S, et al. Biofuel pellets made at low moisture content; Influence of water in the binding mechanism of densified biomass [J]. *Biomass and bioenergy*, 2017, 98: 8–14.
- [26] 宁延州, 刘鹏, 侯书林. 生物质固化成型设备及其成型影响因素分析 [J]. *可再生能源*, 2017(1): 135–140.
- [27] ZAFARI A, KIANMEHR M H. Factors affecting mechanical properties of biomass pellet from compost [J]. *Environmental technology*, 2014, 35(1/2/3/4): 478–486.
- [28] 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(4): 44–57.
- [29] ZAFARI A, KIANMEHR M H. Effect of temperature, pressure and moisture content on durability of cattle manure pellet in open-end die method [J]. *Journal of agricultural science*, 2012, 4(5): 203.
- [30] 回彩娟. 生物质燃料常温高压致密成型技术及成型机理研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2006.
- [31] 张霞, 蔡宗寿, 陈丽红, 等. 压力和粒径对水葫芦颗粒燃料成型品质的影响 [J]. *可再生能源*, 2015, 33(10): 1541–1547.
- [32] 姬爱民, 赵荣煊, 李海英, 等. 秸秆类生物质压力成型过程影响因素研究 [J]. *农机化研究*, 2017, 39(2): 220–225.
- [33] PODDAR S, KAMRUZZAMAN M, SUJAN S M A, et al. Effect of compression pressure on lignocellulosic biomass pellet to improve fuel properties; Higher heating value [J]. *Fuel*, 2014, 131(3): 43–48.
- [34] MAT UŠ M, KRIŽAN P, KOVACOVA M, et al. The influence of size fraction on the compressibility of pine sawdust and the effectiveness criterion for densification [J]. *Acta polytechnica*, 2014, 54(1): 52–58.
- [35] BALAMURUGAN K, SARAVANAN M, NAVINESAN K, et al. Water hyacinth briquette making and energy evaluation [J]. *Journal of biofuels*, 2014, 5(1): 24–31.
- [36] 柳恒饶, 刘光斌, 李林检, 等. 响应面法分析优化晚松生物质成型燃料制备工艺 [J]. *林业工程学报*, 2016(1): 93–99.
- [37] HARUN N Y, AFZAL M T. Chemical and mechanical properties of pellets made from agricultural and woody biomass blends [J]. *Transactions of the ASABE*, 2015, 58(4): 2151–20032.
- [38] 齐天, 王志伟, 雷廷宙, 等. 农林废弃物冷压成型过程热特性分析 [J]. *河南科学*, 2017, 35(1): 101–104.
- [39] 张霞, 蔡宗寿, 张得政, 等. 水葫芦颗粒燃料成型工艺优化 [J]. *农业工程学报*, 2016(5): 239–244.
- [40] 张得政, 张霞, 杨飞, 等. 菌苞、木屑和烟秆颗粒燃料成型特性研究 [J]. *农机化研究*, 2017, 39(10): 241–245.
- [41] LARSSON S H, RUDOLFSSON M. Temperature control in energy grass pellet production; Effects on process stability and pellet quality [J]. *Applied energy*, 2012, 97(9): 24–29.
- [42] MUAZU R I, STEGEMANN J A. Effects of operating variables on durability of fuel briquettes from rice husks and corn cobs [J]. *Fuel processing technology*, 2015, 133: 137–145.
- [43] MUAZU R I, STEGEMANN J A. Biosolids and microalgae as alternative binders for biomass fuel briquetting [J]. *Fuel*, 2017, 194: 339–347.
- [44] JIANG L B, YUAN X Z, XIAO Z H, et al. A comparative study of biomass pellet and biomass-sludge mixed pellet; Energy input and pellet properties [J]. *Energy conversion and management*, 2016, 126: 509–515.
- [45] AHN B J, CHANG H S, LEE S M, et al. Effect of binders on the durability of wood pellets fabricated from *Larix kaempferi* C. and *Liriodendron tulipifera* L. sawdust [J]. *Renewable energy*, 2014, 62: 18–23.
- [46] WU P, MA Y H, CHEN Y H, et al. Vibration-assisted compaction of biomass [J]. *Bioresources*, 2014, 9(3): 3857–3868.
- [47] MA Y H, WU P, ZHANG Y, et al. Effect of vibration during compression on the process of making biomass briquettes [J]. *Bioresources*, 2016, 11(1): 2597–2606.
- [48] ZHANG Q, ZHANG P F, PEI Z J, et al. Investigation on characteristics of corn stover and sorghum stalk processed by ultrasonic vibration-assisted pelleting [J]. *Renewable energy*, 2017, 101: 1075–1086.
- [49] ZHANG Q, ZHANG P F, PEI Z J, et al. Effects of ultrasonic vibration-assisted pelleting on chemical composition and sugar yield of corn stover and sorghum stalk [J]. *Renewable energy*, 2015, 76: 160–166.
- [50] SONG X, ZHANG M, PEI Z J, et al. Ultrasonic vibration-assisted (UV-A) pelleting of wheat straw: A constitutive model for pellet density [J]. *Ultrasonics*, 2015, 60: 117–125.
- [51] ZHANG M, SONG X X, PEI Z J, et al. Ultrasonic Vibration-Assisted Pelleting of Cellulosic Biomass for Biofuel Production [M]// *Production of Biofuels and Chemicals with Ultrasound*. Springer: Springer Netherlands, 2015: 243–267.
- [52] ZHANG P F, PEI Z J, WANG D H, et al. Ultrasonic vibration-assisted pelleting of cellulose biomass for biofuel manufacturing [J]. *Journal of manufacturing science and engineering*, 2011, 133(1): 11–12.
- [53] LAM P S, LAM P Y, SOKHANSANJ S, et al. Steam explosion of oil palm residues for the production of durable pellets [J]. *Applied energy*, 2015, 141: 160–166.
- [54] ADAPA P, TABIL L, SCHOENAU G, et al. Pelleting characteristics of selected biomass with and without steam explosion pretreatment [J]. *International journal of agricultural and biological engineering*, 2010, 3(3): 62–79.

堆肥产品与蛭石、珍珠岩按照2:1:0.5进行混配后的屋顶绿化基质的基本理化性质见表7。由表7可知,基质的容重、总孔隙度、持水孔隙度均与市场销售的屋顶绿化营养基质相差不大,满足屋顶绿化营养土质轻、透水、疏松透气的要

求。有机质、总氮、总磷的含量高于NPK₁、NPK₂,为后期佛甲草的生长提供充足的营养。

由表8可知,栽培基质中佛甲草的分枝数、枝长、叶长和鲜重均高于NPK₁、NPK₂,说明栽培基质可以满足佛甲草的生长。

表7 不同基质的理化指标

Table 7 Main physical properties of different substrate

处理 Treatments	pH	容重 Bulk density g/mL	总孔隙度 Total porosity//%	持水孔隙度 Water holding pore//%	通气孔隙度 Ventilation pore//%	有机质含量 Organic matter content//%	总氮含量 Total nitrogen content//%	总磷含量 Total phosphorus content//%
栽培基质 Culture substrate	6.97	0.30	65.02	34.36	30.66	45.99	3.20	0.80
NPK ₁	6.82	0.28	61.28	31.85	29.43	42.35	2.10	0.40
NPK ₂	6.56	0.34	60.03	27.29	32.74	36.07	2.20	0.30

表8 不同基质中佛甲草的生长情况

Table 8 Effect of different substrate on growth of sedum lineare

处理 Treatments	分枝数 Branch number//个	枝长 Branch length//mm	单分枝叶数 Single branch leaf number//个	叶长 Leaf length mm	叶宽 Leaf width mm	鲜重 Fresh weight//g
栽培基质 Culture substrate	1.62 a	55.42 a	17.25 a	16.38 a	4.70 c	34.69 a
NPK ₁	1.43 b	42.76 b	13.08 b	12.94 b	4.23 b	27.92 c
NPK ₂	1.48 b	46.85 c	10.56 c	12.75 b	5.38 a	29.56 b

注:同列不同小写字母表示不同处理在0.05水平差异显著

Note: Different lowercase letters in the same column indicates significant differences in 0.05 levels between different treatments

3 结论

(1)该研究结果表明,采用透气性控根容器与生物炭土配比的基质可有效促进桂花、枇杷的生长,缩短其生长周期。当生物炭土比例为40%~50%时,桂花、枇杷的各项生长指标最优,最有利于其生长。

(2)生物炭土对于花卉生长有促进作用。对于三色堇等室外盆栽花卉,生物炭土的最佳添加比例为50%;对于广东万年青、吊兰等室内盆栽花卉,生物炭土的最佳添加比例为10%。

(3)园林绿化废弃物堆肥产品与蛭石、珍珠岩按照2:1:0.5的比例进行混配后形成的基质可以有效促进佛甲草的生长,能替代市场销售的屋顶绿化营养土基质。

参考文献

[1] 葛振,魏源送,刘建伟,等.沼渣特性及其资源化利用探究[J].中国沼

气,2014,32(3):74-82.

- [2] 王新,周启新,陈涛,等.污泥土地利用对草坪草及土壤的影响[J].环境科学,2003,24(2):50-53.
- [3] 刘洪涛,张悦.国情背景下我国城镇污水处理厂污泥土地利用的瓶颈[J].中国给水排水,2013,29(20):2-4.
- [4] 陈祥,徐福银,包兵,等.污泥处理产物和产品园林利用的分析[J].积水排水,2017,43(6):41-44.
- [5] 黄宏伟,许烽.镇江市试点餐厨垃圾和污泥协同处理[J].环境卫生工程,2015,23(1):7-12.
- [6] 青岛市城市排水监测站.城市污水处理厂污泥检测方法:CJ/T 221—2005[S].北京:中国标准出版社,2006.
- [7] 丛晓峰,刘立成,王宇超,等.不同干扰对城市绿化用地土壤物理性质的影响[J].中国农学通报,2015,31(28):166-172.
- [8] MAKSYMIEC W. Effects of copper on cellular processes in higher plants[J]. Photosynthetica,1997,34(3):321-343.
- [9] 赵广琦,沈烈英,王智勇,等.城市污泥堆肥对12种花灌木生长的影响[J].西北林学院学报,2011,26(5):87-90.
- [10] 刘强,陈玲,邱家洲,等.泥堆肥对园林植物生长及重金属积累的影响[J].同济大学学报(自然科学版),2009,38(6):870-875.

mass and bioenergy,2015,73:186-194.

(上接第36页)

- [55] ADAPA P K,TABIL L G,SCHOENAU G J. Compression characteristics of non-treated and steam exploded barley, canola, oat and wheat straw grinds[J]. ASABE journal of applied engineering in agriculture,2010,26(4):1-16.
- [56] ADAPA P,TABIL L,SCHOENAU G,et al. Pelleting characteristics of selected biomass with and without steam explosion pretreatment[J]. International journal of agricultural and biological engineering,2010,3(3):62-79.
- [57] CHEN W H,KUO P C. Torrefaction and co-torrefaction characterization of hemicellulose,cellulose and lignin as well as torrefaction of some basic constituents in biomass[J]. Energy,2011,36(2):803-811.
- [58] ARTEAGA-PÉREZ L E,GRANDÓN H,FLORES M,et al. Steam torrefaction of Eucalyptus globulus for producing black pellets:A pilot-scale experience[J]. Bioresource technology,2017,238:194-204.
- [59] BENAVENTE V,FULLANA A. Torrefaction of olive mill waste[J]. Bio-

- [60] ARA ÚJO S,BOAS M A V,NEIVA D M,et al. Effect of a mild torrefaction for production of eucalypt wood briquettes under different compression pressures[J]. Biomass and bioenergy,2016,90:181-186.
- [61] ARA ÚJO S,BOAS M A V,NEIVA D M,et al. Effect of a mild torrefaction for production of eucalypt wood briquettes under different compression pressures[J]. Biomass and bioenergy,2016,90:181-186.
- [62] 梁广元,张芊,孙毅,等.毛竹焙烧炭成型工艺优化及其燃烧特性研究[J].林业工程学报,2016,1(6):75-81.
- [63] CHEN W H,PENG J H,BI X T. A state-of-the-art review of biomass torrefaction,densification and applications[J]. Renewable and sustainable energy reviews,2015,44:847-866.
- [64] ADAMS P W R,SHIRLEY J E J,MCMANUS M C. Comparative cradle-to-gate life cycle assessment of wood pellet production with torrefaction[J]. Applied energy,2015,138:367-380.