固态发酵预处理木屑对其制备成型燃料的影响

郭晶晶 [1,3]，袁兴中[1,3]，李辉[2,4]，李昌珠[4]，肖志红[4]，肖智华[1,3]，蒋龙波[1,3]，曾光明[1,3]

1、湖南大学环境科学与工程学院，湖南长沙410082

2、中国科学院可再生能源重点实验室，广东广州510640

3、环境生物与控制教育部重点实验室(湖南大学)，湖南长沙410082

4、湖南省林业科学院，湖南长沙410004

摘要：为了解决生物质成型产业存在的成型燃料密度低、强度低、抗吸水能力弱、不耐存储等问题，采用黄孢原毛平革菌Phanerochaete chrysosporium BKMF21767对黧蒴栲木屑(Castanopsis fissa Rehd.et Wils)进行固态发酵预处理，固态发酵木屑在含水率15%和最大压强98MPa的条件下制备成型燃料。以成型能耗(挤压和推动能耗)、成型燃料密度、Meyer强度和吸水性等表征发酵时间对黧蒴栲木屑成型行为及成型燃料性能的影响。结果表明：与由新鲜黧蒴栲木屑制备的成型燃料相比，经固态发酵的黧蒴栲木屑成型燃料的燃烧热值几乎不变，虽然在成型过程中的挤压能耗最高升高6.98%，但推动能耗最高可降低32.19%。同时，固态发酵预处理能够提高成型燃料的密度、Meyer强度和抗吸水能力，有利于成型燃料在长时间储运中保持品质，其中由固态发酵48d左右的木屑制备的成型燃料品质最佳。

生物质成型是利用温度、压力和黏结剂等将各类原本松散细碎的生物质废物压制成具有规则形状的棒状、块状或颗粒状成型燃料的技术[1]
。目前，中国南方地区制备生物质成型燃料的主要原料主要是木屑。木屑中的纤维成分是实现成型过程的主要因素。

[2]
。物料微粒之间产生的氢键和“固体搭桥”作用促进了“钢筋混凝土”结构的构成，使成型燃料具有一定的形态和强度。缠绕的半纤维素也使成型燃料具有一定的韧性。成型燃料的储运成本是散装木屑的4－7倍，能够扩大成型燃料的时空应用范围[2]。同时，成型燃料
具有燃烧性能稳定、燃烧中的黑烟、飞灰、NO_x和SO_x
的排放量低等特点，是目前发展较为迅速的生物质利用方式之一[3-6]。

然而，生物质中的半纤维素富含亲水性的羟基，容易吸水而降低成型燃料的热值，并加速微生物反应。微生物活动会导致降解气体(CO_2、CO和CH_4
等)的生成和成型燃料的破碎，危害操作工人的身体健康，甚至引发自燃或爆炸事故[7]。同时，产业实践发现的规律是，采用放置4周以上的木屑原料更容易制备成型燃料。但是，上述规律尚未得到科学的验证，仅仅是生产中的经验。在前期的研究中，课题组考察了在无菌环境中，放置时间对新粉碎木屑成型行为和成型燃料品质的影不能明显改变木屑的成型行为和成型燃料品质。因此，微生物活动有可能是影响木屑成型行为和成型燃料品质的原因。目前，提高成型燃料的强度和抗吸水能力是国内外生物质
成型领域的研究热点之一[8-11]。然而，目前还没有关于微生物活动与木屑成型行为之间关联的研究。

固态发酵是指在没有或几乎没有自由水存在的条件下，在一定湿度的固态基质中，用一种或多种微生物进行发酵的生物反应过程，具有工艺成熟、操作简单、运
行安全和成本低廉的优点[12-14]
。通过固态发酵处理，微生物优先利用木屑中的半纤维素作为营养源来进行自身的生长和繁殖，主要产物有腐殖质(腐殖酸、富里酸和胡敏酸)、糖类、CO_2和其他一些小分子物质等[15-16]
。经过固态发酵处理的木屑仍保持木质纤维素的纤维结构，具备加工成型燃料的可行性。同时，固态发酵产物中含有的高分子的腐殖质和其他小分子物质较为松软，在发酵木屑成型过程中可能较容易被“挤进”木质纤维素结构间的空隙，并通过自身较
多的官能团与木屑构成氢键和静电引力，加强固体粒子桥接或架桥和填充或嵌合[17-24]，促进生物质成型。

但目前尚没有关于固态发酵对生物质成型影响的报道。因此，本研究通过白腐菌的典型菌种黄孢原毛平革菌Phanerochaete chrysosporium，BKMF21767对黧蒴栲木屑进行固态发酵预处理，并将发酵木屑制备成型燃料，研究不同成型温

度下发酵时间对黧蒴栲木屑成型行为及成型燃料性能的影响规律，揭示其中的影响机理，以期为固态发酵工艺用于生物质成型产业提供参考。

1材料与方法

1.1材料

白腐菌的典型种黄孢原毛平革菌Phanerochaete chrysosporium，于4°C下保藏在湖南大学实验室。

黧蒴栲：湖南省林业科学院天际岭实验林场的7年生黧蒴栲新鲜枝条(直径小于2cm)，洗净，40°C烘干48h后粉碎，过40目筛，装瓶密封，贮于4°C备用。黧蒴栲木屑的性质见表1。

1.2菌种活化和固态发酵方法

菌种活化和固态发酵方法 [7]具体如下：

1.2.1菌种活化

将菌种接种在
马铃薯(PDA)琼脂培养基上，待培养5－7d长满孢子后，刮取孢子制成浓度为2.0×10^{6}个/mL的孢子悬液。

表 1　新鲜黧蒴栲木屑的性质

Table 1　Properties of untreated *Castanopsis fissa* sawdust

Analysis	Untreated sample
Chemical composition (wt. %)	
Lignin	15.54±0.34
Cellulose	37.78±0.59
Hemicellulose	24.77±0.66
Humus	7.27±0.17
Fulvic acid	5.68±0.06
Humicacid	1.59±0.13
Elemental composition (wt. %)	
C	46.55
H	5.45
O	46.58
N	1.42
S	Undetectable
Proximate analysis (wt. %)	
Volatile	81.07
Fixed carbon	16.66
Ash	2.27
High heating values (MJ/kg)	16.70

1.2.2黧蒴栲固态发酵

称取30g预处理后的黧蒴栲木屑为固体基质，装于500mL锥形瓶中，分别加入164mL液体基质和0.6g吐温80配成含水率为85%的固态培养基，灭菌。将浓度为2.0×10^6个/mL的菌悬液以0.8%的质量比接种入已灭菌的发酵瓶中，于37°C培养。将满足发酵时间(0、16、32、48、64d)的黧蒴栲在40°C烘干，并测其含水率，当含水率在5%左右时，向其中加入13%的水，装袋密封，于4°C稳定48h。其中所用液

体基质的组成成分为：KH_2PO_4 2.0g/L，$MgSO_4 \cdot 7H_2O$ 0.5g/L，酒石酸铵0.2g/L，微量元素液70mL/L。其中，微量元素液(g/L)：NaCl 1.0，$CoCl_2 \cdot 6H_2O$ 0.18，$Na_2MoO_4 \cdot 2H_2O$ 0.01，$ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ 0.1，$CaCl_2$ 0.1，$CuSO_4 \cdot 5H_2O$ 0.01，$MnSO_4 \cdot H_2O$ 0.5，$FeSO_4 \cdot 7H_2O$ 0.1，$KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$ 0.01，$MgSO_4 \cdot 7H_2O$ 3，H_3BO_3 0.01，氮三乙酸1.5。

1.3黧蒴栲成型实验

1.3.1成型设备和过程

单颗粒成型实验机由WDW-10电子万能实验机改装，装置包括夹套(D=7mm，L=80mm)、压杆(D=6.80mm，L=120mm)以及2个不锈钢垫片(厚2mm和20mm)。成型过程具体如下，打开单颗粒成型实验机的温度控制器，使夹套内壁温度升至设定成型温度(70－150°C)，保持120min，待内壁温度稳定后在压制槽底部放入不锈钢垫片，称取1g左右调配好的含水率为15%的样品放入夹套中。采用程序控制压杆，设定压杆下行速度为8mm/min，当压杆受力达到初级设定值(500MPa)时，下行速度变为4mm/min，当压杆受力达到98MPa后停留30s，停止压杆下行程序，取出不锈钢底板。随后，系统控制压杆以2mm/min由0MPa开始下行，将制成的成型燃料推出压制槽[2]。制成的成型燃料迅速用冷风冷却至室温。每次实验结束后，用丙酮清洗模具并擦拭干净。实验至少重复8次。

1.3.2生物质成型燃料能耗计算与特性分析

能耗计算：生物质成型过程中的能耗包括挤压和推动能耗，挤压能耗(Compression energy consumption)表示成型燃料成型过程中压杆所做的功。推动能耗(Extrusion energy consumption)表示成型燃料成型之后，压杆在对成型燃料施力到开始推动成型燃料的过程中所做的功，单位为kJ/kg，计算公式如下[2]：

$$W = \sum_{i=1}^{n} F_i * S_i / M \qquad (1)$$

式中，W—挤压能耗或推动能耗，J/g；F_i—压力，N；S_i—位移，m；M—物料质量，g。

成型燃料 Meyer 强度测定：Meyer 强度定义为压碎成型燃料时，单位压痕面积上的作用力，单位为 N/mm^2，计算公式(2)如下[25]：

$$H_m = F / \pi (D * h - h^2) \qquad (2)$$

式中 H_m—Meyer 强度，N/mm^2；h—压杆运行距离，mm；D—压杆的半圆球端直径，mm；F—压杆的最大压力，N。

1.4黧蒴栲木屑发酵前后的化学成分定量分析

采用范式纤维素测定法测定原料木质纤维素各成分含量；采用0.1mol/L焦磷酸钠与0.1mol/L氢氧化钠混合提取剂提取原料中的腐殖质并测定各成分含量；采用元素分析仪(VarioELIII)进行原料元素分析，根据GB/T 28731-2012进行原料工业分析[26]，采用湖南林业科学院热值测定仪(SUNDY)SDACM5000进行原料热值测定[16]。

2结果与讨论

2.1固态发酵过程对黧蒴栲木屑中木质纤维素和腐殖质含量的影响

通过对不同发酵时间的黧蒴栲木屑中纤维成分(纤维素、半纤维素和木质素)和腐殖质(腐殖酸、富里酸和胡敏酸)含量的测定，并与新鲜黧蒴栲木屑进行对比发现，半纤维素降解率显著高于纤维素和木质素，如图1A所示。这主要是由木屑中木质纤维素组成结构的特殊性造成的[16]，木质纤维素由木质素、纤维素和半纤维素组成：通过碳-碳键将苯基丙烷结构单元连接而成的具有空间网状结构的木质素具有完整坚硬的“外壳”，不易被微生物降解，无法形成可发酵性糖类；以聚集态存在的纤维素则是由大量葡萄糖基构成的链状高分子化合物，其晶体结构阻碍纤维素的降解；由较短且高度分枝的杂多糖链组成的半纤维素的结构单元主要有木糖、甘露糖、葡萄糖、阿拉伯糖和半乳糖等，聚合度较低，比较容易被微生物降解。因此，在固态发酵过程中，P.chrysosporium优先利用黧蒴栲木屑中的半纤维素及其他易利用的营养物质作为营养源来进行自身的繁殖和生长[15-16]，使得黧蒴栲木屑变得“疏松”，空隙增大。木屑中的大粒径微粒数量减少，且木屑表面由光滑变粗糙，正如扫描电镜图2A和图2B所示。随着发酵时间的延长，微生物开始分解纤维素和木质素，并生成腐殖质(腐殖酸、富里酸、胡敏酸)、糖类、CO_2、水和其他中间小分子产物[16]。图1B表示随着发酵时间的延长，木屑中腐殖质主要成分的变化规律。在图1中，当发酵时间超过48d时，木质纤维素降解率和腐殖质产生率开始降低。这可能是因为在固态发酵后期，微生物死亡率升高，其产酶能力下降，从而抑制了木质纤维素的降解，同时碳源极度缺乏，微生物开始利用腐殖质碳[16]。

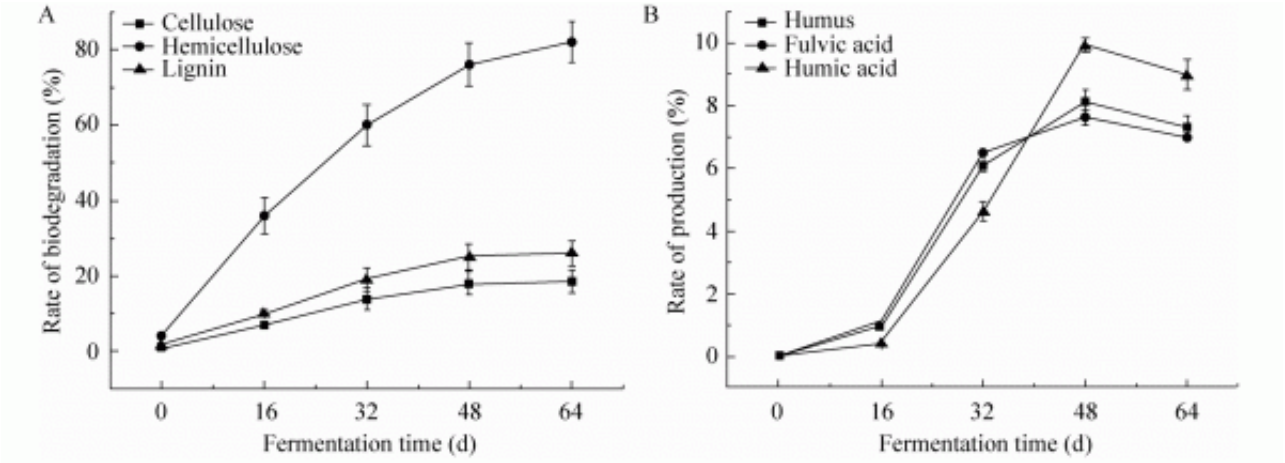

图 1　发酵时间对黧蒴栲木屑纤维成分的影响

Fig. 1　Effect of fermentation time on fiber component of *Castanopsis fissa* sawdust. (A) Rate of biodegradation. (B) Rate of production.

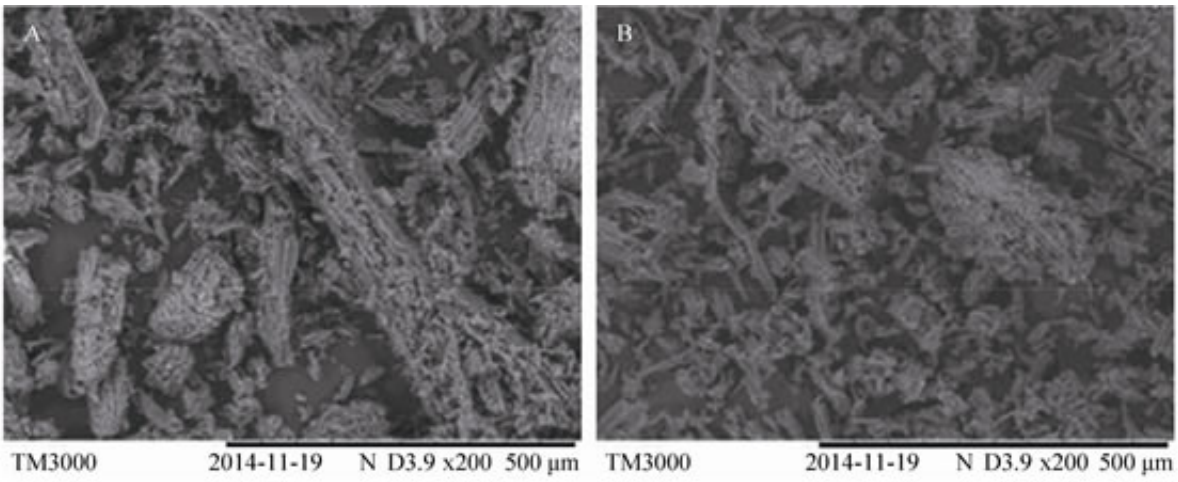

图 2　黧蒴栲木屑固态发酵预处理前后原料及其成型燃料的扫描电镜图

Fig. 2　SEM pictures of *Castanopsis fissa* sawdust and pellet. (A) Untreated sawdust. (B) Sawdust of fermentation for 48 d.

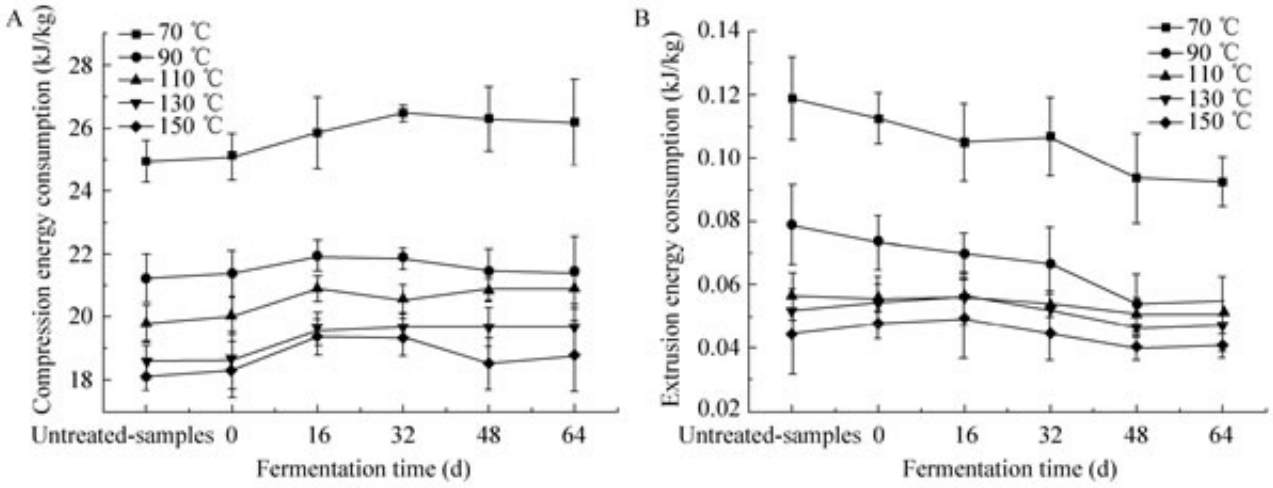

图 3　不同成型温度下发酵时间对黧蒴栲木屑成型过程中挤压和推动能耗的影响

Fig. 3　Effect of fermentation time on energy consumptions associated with compression and extrusion for pelletization of *Castanopsis fissa*sawdust under different compaction temperatures. (A) Compression energy consumptions. (B) Extrusion energy consumptions.

2.2不同成型温度下发酵时间对黧蒴栲木屑成型过程中挤压和推动能耗的影响

如图3所示，在同一成型温度下，经固态发酵的黧蒴栲木屑在成型中的挤压能耗高于新鲜黧蒴栲木屑。例如，在70 °C下成型的新鲜黧蒴栲木屑的挤压能耗为24.95kJ/kg，而发酵48d的木屑的挤压能耗为26.29kJ/kg，挤压能耗升高了5.37 %，而推动能耗则呈相反的趋势。同时，当成型温度固定时，随着发酵时间延长，挤压能耗呈先增加后降低的趋势。当发酵时间短于16d，挤压能耗呈升高趋势，最高可升高7%。

当发酵时间长于16d时，挤压能耗开始降低，而推动能耗则总体呈现降低的趋势。这是因为固态发酵过程中，P.chrysosporium优先利用黧蒴栲木屑中的半纤维素，使得半纤维素的降解速率高于纤维素和木质素的降解速率(图3A)，从而相对降低了半纤维素的含量，提高了纤维素和木质素的含量，并生成腐殖质和其他一些小分子物质。同时，固态发酵过程在一定程度上破坏木质纤维素的天然结构，并使黧蒴栲木屑表面产生一些“分枝”。半纤维素相对含量的降低，导致木屑的韧性降低[3]。木屑微粒表面产生的这些“分枝”在挤压成型过程中，互相搭接和阻碍，提高了压杆所受的阻力。这种降低的韧性和提高的阻力导致发酵木屑的挤压能耗升高。

另外，木质素和腐殖质被普遍认为是生物质天然的黏结

剂[8]
，富含形成“氢键”的官能团，能够在压力和温度的共同作用下被“挤入”木屑纤维“搭接”而成的“网格”中，通过“氢键”和“固体搭桥”作用，限制木屑微粒在“网格”中的相对移动。因此，在推动过程中，成型燃料对模具内壁的摩擦力降低，使得推动能耗降低。

成型温度也是影响木屑成型行为的主要因素之一。由图3可知，当同一固态发酵时间时，木屑的挤压和推动能耗均随着成型温度的升高而降低。其中，当温度在70－90°C范围内，挤压和推动能耗随温度升高明显降低；当温度高于130°C时，温度的进
一步升高不能使挤压和推动能耗发
生明显的变化。这是因为木质素是热塑性的物质[6]
。当发酵时间固定时，随着温度的升高，木质素一般在70°C开始软化，90°C以后发生玻璃化转化，流动态加强，木屑的粒子二向平均径变大[18]
。当成型温度超过130°C
时，玻璃化转化完全，进一步地升高成型温度不
能使流动态继续加强[2]
。在压力的作用下，玻璃化的木质素被挤入木屑纤维构成的框架结构中，木屑微粒开始重新排列位置关系，并发生机械变形和塑性流变[23]
，使得粒子更紧密地黏结在一起，减少成型燃料膨胀对压槽壁面的挤压作用，降低推动能耗。另外，微粒之间以及微粒与壁面之间的摩擦力也是影响推动能耗的一个主要因素[8]
，成型温度越高，成型燃料表面越光滑，与壁面的摩擦力越小，成型过程中推动能耗越低。

2.3不同成型温度下发酵时间对成型燃料密度的影响

单个成型燃料的密度与大量成型燃料的堆积密度呈正相关关系，并影响成型燃料的能量密度和储运成本，是成型燃料的重要参数[8]
。如图4所示，当成型温度固定时，随着发酵时间延长，成型燃料密度增加。例如，在成型温度150°C时，以新鲜黧蒴栲和发酵16、32、48以及64d的黧蒴栲木屑制备的成型燃料的密度分别为1063.90、1078.01、1087.85、1091.11、1091.00kg/m^3
。这是因为固态发酵处理使黧蒴栲木屑变得疏松，空隙变大，呈纤维束状。与新鲜木屑紧密的抗压缩结构相比，这种纤维束状结构在成型过程中易被压缩而降低成型燃料体积。同时，如图2B所示，固态发酵后的木屑表面更加粗糙，木质素和部分固态发酵产物(腐殖质和低分子糖类等)在压力和温度的作用下，“填充”木屑粗糙的表面及其孔洞，有利于木屑成型燃料密度的提高。此外，在同一发酵时间条件下，成型燃料的密度随着成型温度的升高而提高。当温度从70°C升高到90°C时，成型燃料密度最大可增加4%，而当温度升到150°C时密度最大可增加8%。这是因为在较高成型温度下，木质素软化程度提高，流动性增强。在受压条件下，木质素较易流动扩散，使生物质微粒更加紧密胶结，空隙减小，提高成型燃料的密度[23]。

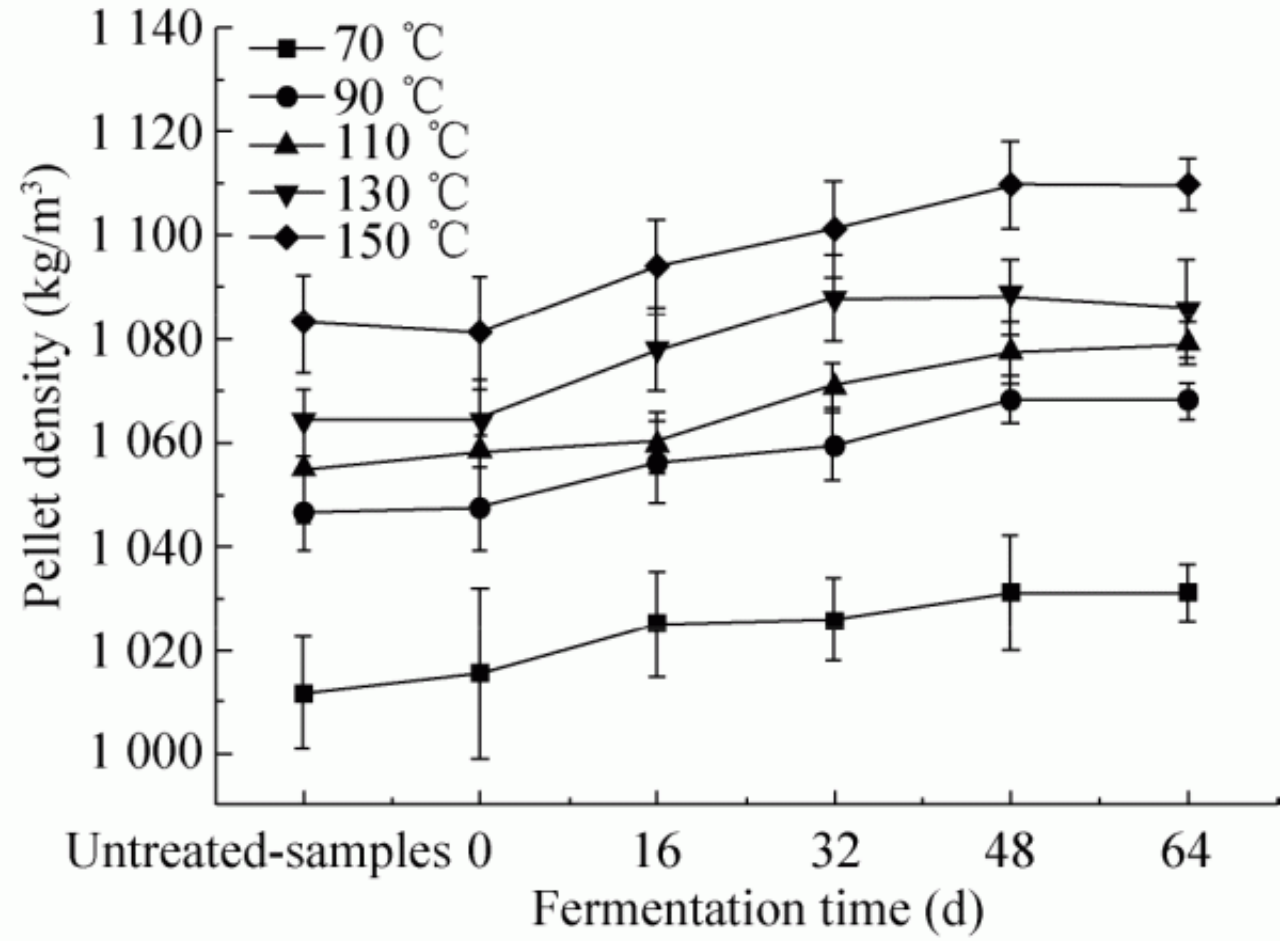

图 4　不同成型温度下发酵时间对成型燃料密度的影响

Fig. 4　Effect of fermentation time on Meyer hardness of pellet under different compaction temperatures.

2.4不同成型温度下发酵时间对成型燃料Meyer强度的影响

如图5所示，当发酵时间短于16d，温度和发酵时间对成型燃料Meyer强度的影响均不明显。这可能是因为发酵前期黧蒴栲木屑成分变化较小，特别是木质纤维素含量几乎没有变化(图1A)，而温度主要影响木质素的软化。当发酵时间超过16d，发酵时间和温度均对成型燃料的强度有明显的影响。在相同成型温度条件下，随着发酵时间的延长，成型燃料Meyer强度呈升高趋势。这主要是因为发酵16d后木屑木质纤维素结构被部分破坏，部分半纤维素被分解，使得木屑中木质素含量相对升高，而木质素是木屑中天然的黏结剂，在压缩成型过程中，木质素能够在温度与压力的共同作用下发挥黏结剂功能，粘附和
聚合生物质成型燃料，提高了成型物的结合强度和耐久性[24]
。然而，当成型温度低于90°C时，木质素没有充分软化，黏结作用不明显。当发酵时间超过32d时，成型温度对成型燃料Meyer强度的影响较大。

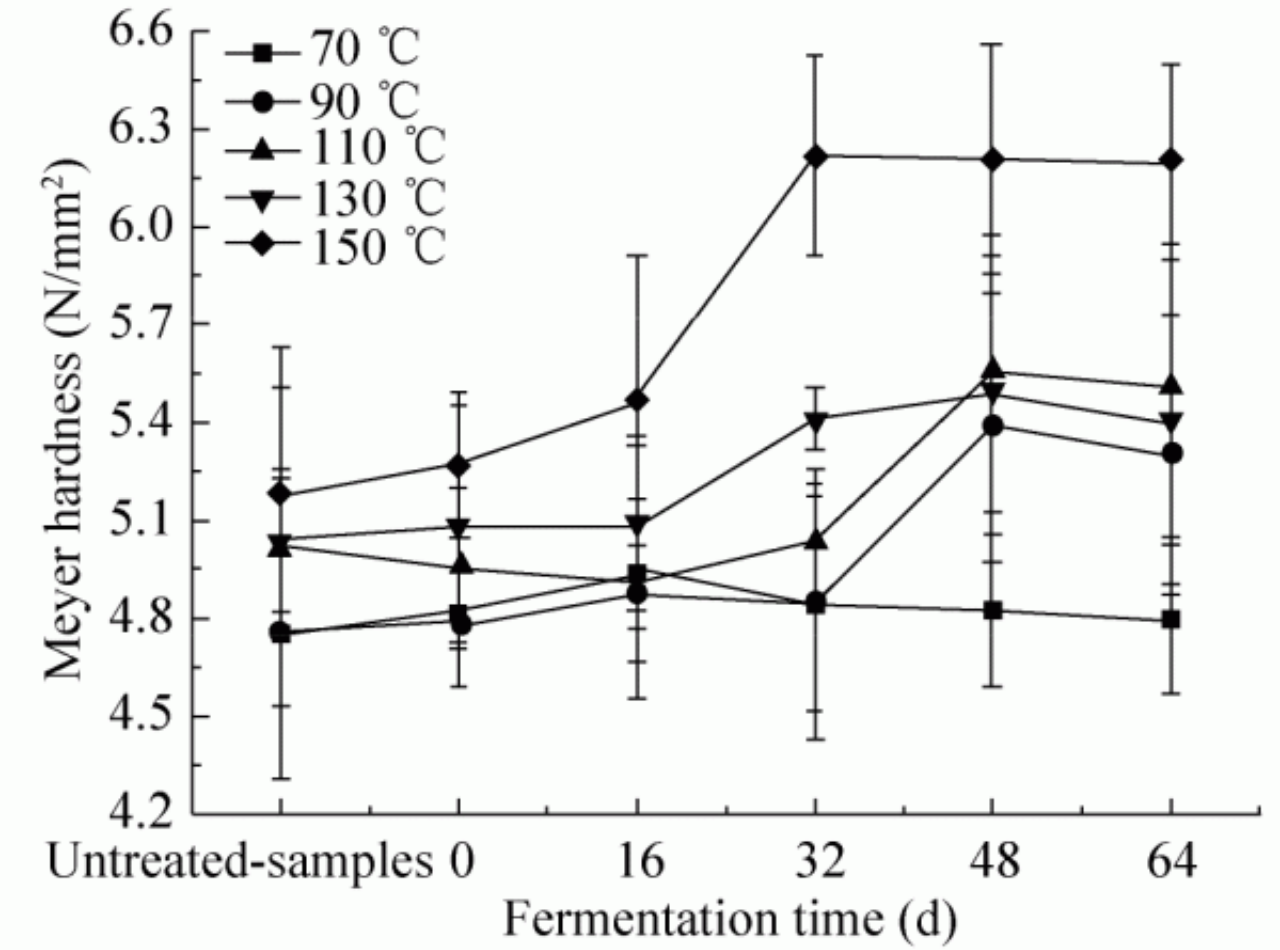

图 5 不同成型温度下发酵时间对成型燃料 Meyer 强度的影响

Fig. 5 Effect of fermentation time on Meyer hardness of pellet under different compaction temperatures.

当温度从70°C升到90°C时，成型燃料Meyer强度最大可增加12%，90°C升到130°C时成型燃料强度变化不明显，继续增加到150°C时成型燃料强度又明显增大，最大可增加30%。这主要是因为木质素一般在70°C开始软化，90°C以后木质素发生玻璃化转化，流动态加强，130°C时转化完全，其后流动态不会得到加强，而木质素的软化程度和流动态强度影响成型燃料的Meyer强度。

2.5发酵时间对成型燃料吸水性的影响

以在130°C下成型的成型燃料为例，发酵时间对成型燃料吸水性的影响如表2所示，随发酵时间延长，成型燃料吸水性降低，48d时基本达到稳定。对吸水实验前后成型燃料的密度、Meyer强度进行对比可知，固态发酵有利于黧蒴栲木屑成型燃料的储藏。这是因为通过固态发酵过程可以降解生物质中最具有化学活性的成分——半纤维素，以降低生物质中吸水基团羟基的含量，从而降低生物质成型燃料的吸水性。同时，固态发酵使木屑中木质素的相对含

量升高并生成腐殖质和糖类等物质，能够在成型过程中，被“挤进”木质纤维素结构间的空隙，并通过自身较多的官能团与木屑构成氢键和静电引力，加强固体粒子桥接或架桥和填充或嵌合，成型燃料微粒之间结合得更加紧密，空隙减小，使得水分难以渗入。

表 2　发酵时间对成型燃料吸水性的影响

Table 2　Effect of fermentation time on the moisture uptake of pellet

Fermentation time (d)	Water adsorption (%)	Density (kg/cm³)			Meyer hardness (N/mm²)		
		Before	After	Percent decrease (%)	Before	After	Percent decrease (%)
Untreated	14.70	1 032.12	938.21	9.10	4.65	3.75	19.35
0	14.59	1 035.27	945.88	8.63	5.04	4.09	18.85
16	14.28	1 049.38	968.91	7.67	5.19	4.34	16.29
32	13.80	1 068.33	989.24	7.40	5.75	4.68	18.54
48	13.25	1 071.32	1 003.10	6.37	6.19	5.23	15.41
64	13.35	1 070.88	997.39	6.86	6.10	4.99	18.11

3结论

本文以白腐菌的典型菌P.chrysosporium为例，考察固态发酵过程对木屑成型行为和成型燃料性质的影响。研究表明，固态发酵后，黧蒴栲木屑微粒降低的韧性和呈现的纤维束状结构提高了成型过程中的挤压能耗。但是，发酵木屑的纤维束状结构和发酵产物(腐殖质、低分子糖类和其他小分子物质)的共同作用可以改善推动能耗、成型燃料密度和Meyer强度。同时，发酵木屑中半纤维素的降解和成型燃料更加致密的结构降低了成型燃料的吸水性。因此，通过进一步的研究，固态发酵处理与成型的联用技术有可能成为解决目前生物质成型产业中成型产品质量不佳问题的有效途径之一。

REFERENCES

[1]Chau J，Sowlati T，Sokhansanj S，et al.Techno-economic analysis of wood biomass boilers for the greenhouse industry.Appl Energ，2009，86(3)：364 – 371.

[2]Li H，Liu XH，Robert L，et al.Pelletization of torrefied sawdust and properties of torrefied pellets.Appl Energ，2012，93(5)：680 – 685.

[3]Erlich C，Fransson TH.Downdraft gasification of pellets made of wood，palm-oil residues respective bagasse：experimental study.Appl Energ，2011，88(3)：899 – 908.

[4]Fierro V，Torne-Fernandez V，Montane D，et al.Study of the decomposition of kraft lignin impregnated with orthophosphoric acid.Thermochim Acta，2005，433(1/2)：142 – 148.

[5]Gilbert P，Ryu C，Sharifi V，et al.Effect of process parameters on pelletisation of herbaceous crops.Fuel，2009，88(8)：1491 – 1497.

[6]Kaliyan N，Morey RV.Natural binders and solid bridge type binding mechanisms in briquettes and pellets made from corn stover and switchgrass.Bioresour Technol，2010，101(3)：1082 – 1090.

[7]Hiroshi K.Safety evaluation and cause investigation of the fire in various solid biomass fuels and organic rubble pile using high sensitivity calorimeters.Energ Fuel，2012，26(9)：5962 – 5967.

[8]Nielsen NPK，Holm JK，Felby C，et al.Effect of fiber orientation on compression and frictional properties of sawdust particles in fuel pellet production.Energ Fuel，2009，23(6)：3211 – 3216.

[9]Chew JJ，Doshi V.Recent advances in biomass pretreatment-torrefaction fundamentals and technology.Renew.Sust Energ Rev，2011，5(18)：4212 – 4222.

[10]Nielsen NPK，Gardner DJ，Felby C.Effect of extractives and storage on the pelletizing process of sawdust.Fuel，2010，89(1)：94 – 98.

[11]Nielsen NPK，Norgaard L，Strobel BW，et al.Effect of storage on extractives from particle surfaces of softwood and hardwood raw materials for woodpellets.Eur J Wood Prod，2009，67(1)：19 – 26.

[12]韩冰，王莉，李十中，等.先进固体发酵技术(ASSF) 生产甜高粱乙醇.生物工程学报，2010，26(7)：966 – 973.

[13]阮奇城，祁建民，胡开辉，等.白腐真菌Pleurotus sajor-caju预处理对红麻秸秆发酵乙醇的影响.生物工程学报，2011，27(10)：1464－1471.

[14]周钥，杨兵，杨荣，等.利用农业废弃物固态发酵裂褶菌F17产锰过氧化物酶的基质优化.生物工程学报，2014，30(3)：524－528.

[15]黄丹莲，曾光明，黄国和，等.白腐菌固态发酵条件最优化及其降解植物生物质的研究.环境科学学报，2005，25(2)：232－237.

[16]黄红丽.木质素降解微生物特性及其对农业废物堆肥腐殖化的影响研究[D].长沙：湖南大学，2009.

[17]盛奎川，吴杰.生物质成型燃料的物理品质和成型机理的研究进展.农业工程学报，2004，20(2)：242－245.

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

[19]Tumuluru JS，Wright CT，Hess JR，et al.A review of biomass densification systems to develop uniform feedstock commodities for bioenergy application.Biofuels Bioprod Bioref，2011，5(6)：683－707.

[20]Mozaffar AK，Sayed MA，Ved PM.Development and characterization of a wood adhesiveusing bagasse lignin.Int J Adhes Adhes，2004，24(6)：485－493.

[21]Paivi L.Storage effects on pelletized sawdust，logging residues and bark.Biomass Bioenergy，2000，19(5)：287－293.

[22]Zacchi L，Burla G，Zuolong D，et al.Metabolism of cellulose by P.chrysosporium in continuously agitated culture is associated with enhanced production of lignin peroxidase.J Biotechnol，2000，78(2)：185－192.

[23]Wolfgang S，Jens KH，Anand RS，et al.A study of bonding and failure mechanisms in fuel pellets from different biomass resources.Biomass Bioenergy，2011，35(2)：910－918.

[24]Nalladurai K，Morey VM.Factors affecting strength and durability of densified biomass products.Biomass Bioenergy，2009，33(3)：337－359.

[25]GB/T 28731－2012.固体生物质燃料工业分析方法.北京：中国标准出版社，2012.

原文地址：http://www.china-nengyuan.com/tech/116876.html