

稻秆含水率对燃池供热的影响实验研究^①

罗 秋, 鲍安红, 杨俊英, 宋 飞, 徐 显, 罗书伟

西南大学 工程技术学院, 重庆 400715

摘要: 燃池是一种利用生物质阴燃的新型加温方式. 为探究不同含水率的水稻秸秆对燃池供热的影响, 利用自主设计的实验台(600 mm×560 mm×300 mm)进行含水率对水稻秸秆阴燃时内部特性影响实验. 结果表明: 不同含水率的稻秆均近似呈现整体阴燃传播形式; 不同含水率对稻秆阴燃前期干燥过程以及持续 300 ℃以上高温的时间影响显著; 对稻秆内部的最高温、内部炭氧化过程以及失质量特性等影响均较小.

关 键 词: 燃池; 阴燃; 含水率; 温度; 传播速率

中图分类号: TQ91

文献标志码: A

文章编号: 1000-5471(2019)02-0097-05

我国农业生产每年都有近 6 亿 t 的水稻秸秆产生, 而大量秸秆被原地焚烧, 严重污染着环境并造成能源的浪费^[1]. 近年来在我国能源紧缺的情况下, 利用燃池阴燃技术解决温室供暖用能问题是秸秆资源化利用的一个重要方向. 主要原理是以燃池内的生物质燃烧释放出热能, 加热与之相连的池壁、顶板以及燃池内的空气, 通过顶板辐射到温室内^[2-3]. 生物质内部燃烧决定着燃池供热的时间、温度等, 是应用技术设计的关键. 其中生物质燃料的含水率随着原料种类、气候和环境等因素会显著地影响热值、物料内部热量和质量传递, 进而影响燃烧持续时间和物料内部温度等^[4]. 目前, 何芳等^[4-5]对不同含水率的玉米秸秆粉阴燃进行了规律的探讨, 发现阴燃过程近似为一维传播; 马增益等^[6]对木屑不同含水率进行探究, 得出含水率的增大会降低阴燃传播速度. 而对燃池供热来说, 物料含水率的大小是保证供热是否能够达到实际供热量的前提之一. 现关于水稻秸秆含水率对燃池供热影响的研究资料很少, 为推动水稻秸秆燃池的应用, 本文将研究不同含水率水稻秸秆对燃池供热时阴燃内部燃烧特性的影响, 为水稻秸秆燃池设计提供参考以及建立水稻秸秆阴燃燃烧特性分析提供参考依据.

1 设计与方法

由于阴燃传播的方式比较复杂^[7], 为探究水稻秸秆含水率对燃池供热的影响, 因此自主将供暖温室燃池缩尺设计成自然向下的阴燃实验台, 实验台的尺寸为长方形 600×560×300 mm 模型^[8], 主要包括阴燃部分和数据收集部分. 阴燃部分采用 2 mm 厚的钢板做主体, 实验的水稻秸秆装入到模型中, 外围由厚为 300 mm 的高密度硅酸铝纤维保温棉围成; 在装置的一侧留置 9 个 Φ5 mm 的小孔, 用于安放不同长度直径为 1 mm 的 WRNK-191K 型铠装热电偶进行温度的检测, 热电偶等距离分布于实验台的上、中、下 3 层, 每层布置 3 根不同径长的热电偶, 每层采用 3 个热电偶的平均温度作为衡量标准, 其热电偶分布见图 1. 装置右侧设置 9 个进气口, 通过控制进气口的数量以致控制相同供氧量达到阴燃反应的顺利进行. 在装置下方放置 TCS-60 Kg 型电子秤进行水稻秸秆在燃烧时质量的变化, 精度为 5 g. 在阴燃过程中, 温度变化均

① 收稿日期: 2018-04-21

基金项目: 重庆市社会事业与民生保障科技创新专项(cstc2017shms-zdyfX0001).

作者简介: 罗 秋(1993-), 男, 硕士研究生, 主要从事生物质开发利用的研究.

通信作者: 鲍安红, 教授, 博士.

采用通过 LX08H 型的 USB—RS485 数据转换器、DAM 系列的 PT100 温度采集模块以及配套的组态软件等进行采集和记录, 设定采样频率为 120 s 记录一次数据, 以便于更好地分析燃池阴燃时的内部温度变化。

实验燃料选用重庆市北碚区实验田所产的稻草秸秆。其中水稻秸秆的特性、元素分析和工业分析结果见表 1。选取 5 个不同湿基含水率(自然状态下, 15%, 20%, 25%, 30%)稻草秸秆进行实验, 分析水稻秸秆含水率对阴燃过程内部温度变化的规律。根据缩尺模型的大小将其质量控制在物料干质量为 2.25 ± 0.05 kg, 并在进行实验中, 通过控制堆积高度以及堆积方式一致的方式达到自然堆积密度近似一致。其中, 在制备含水率高于自然存储状态下的稻草秸秆含水率的物料时, 需要在物料中喷淋水, 搅拌, 放置 3 d, 待物料含水率均匀即可^[7]。该实验采用逆向阴燃^[5]。每个含水率重复 2 次实验, 每次实验持续 10~20 h, 观察实验现象, 并记录不同时刻温度、原料质量等情况。

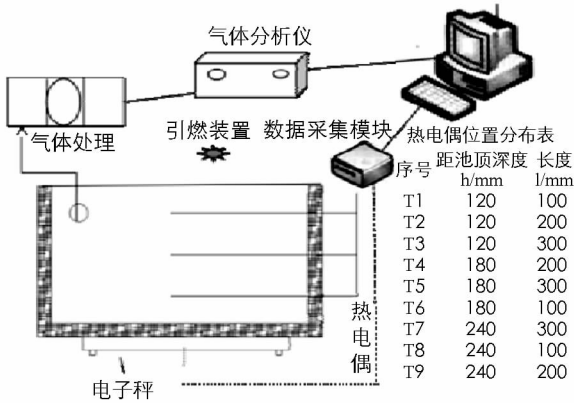


图 1 实验装置示意图

表 1 水稻秸秆特性参数

物理特性		工业分析/%			元素分析/%				热值/(kJ·kg ⁻¹)
堆积密度/(kg·m ⁻³)	含水率	灰分	挥发分	固定碳	[C]	[H]	[S]	[N]	高位发热量
31	10.01	5.9	78	16.1	41.79	7.65	0.486	1.12	18 803

2 结果与分析

2.1 稻秆阴燃时温度变化特性

图 2 为不同含水率稻草秸秆阴燃内部不同床层的温度(每层温度为该层径长 10, 20, 30 mm 热电偶所测温度的平均温度)从上至下(距池顶深度 0.12~0.24 m)的变化曲线。从图中可发现, 不同含水率水稻秸秆阴燃初期各个深度温度几乎同时升温, 没有呈现自上而下逐渐增大的趋势, 呈现的是整体传播的过程。在阴燃约 4~15 h 时间段内燃烧稳定, 最下层与中间层热电偶温度相当, 上层热电偶温度低些。含水率低的水稻秸秆最先达到最高温, 这主要由于含水率低的需要的干燥时间短。随着含水率的增大, 不同床层达到最高温度的时间也逐渐增大, 最高温度能达到 300~600 ℃左右, 但阴燃时床层最高温度差距较明显, 最小温度与最高温度相差 100 ℃, 导致这种现象出现的原因可能跟阴燃时的堆积密度、堆积方式以及外界其他因素有关, 还需进一步证实。

图 3 是含水率为 15.3% 和 24.6% 的稻草秸秆阴燃时中相同高度、不同径向位置的温度(图中温度为径长相热电偶的平均温度)变化曲线。从图 3 可知, 不同含水率水稻秸秆不同径向的温度与不同深度温度变化曲线近似, 不同含水率的水稻秸秆不同径向温度相差不大, 但随着含水率的增大, 不同径向维持高温的时间逐渐增大, 其中径长 200 mm 热电偶的温度维持时间最长, 但随着含水率的增大有下降的趋势。这可能跟实际中采用在实验台中间点火有关。

2.2 含水率对干燥和炭氧化反应的影响

在水稻秸秆的阴燃过程中, 需要干燥、热解、炭氧化 3 个阶段^[9]。图 4 表示不同的含水率水稻秸秆阴燃整体到达各阶段温度的平均时间。其中干燥时间是指不同床层热电偶达到 100 ℃以上所用的平均时间; 炭氧化时间是指不同床层热电偶到达最高温的平均时间^[9]; 维持 300 ℃以上高温的时间是指不同含水率水稻秸秆阴燃过程中整体维持在 300 ℃以上高温的平均时间。

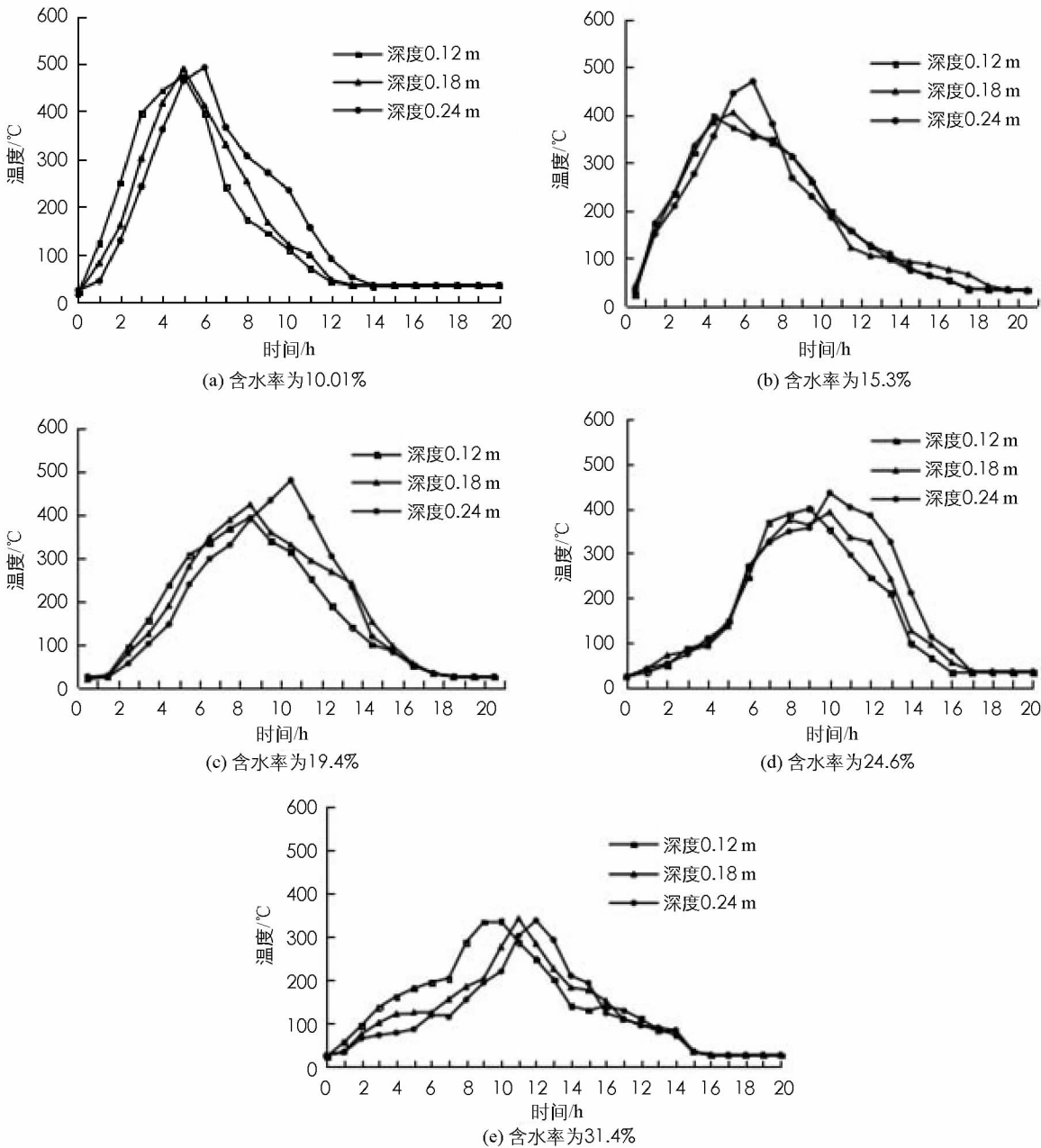


图 2 不同含水率稻秆阴燃过程温度变化曲线

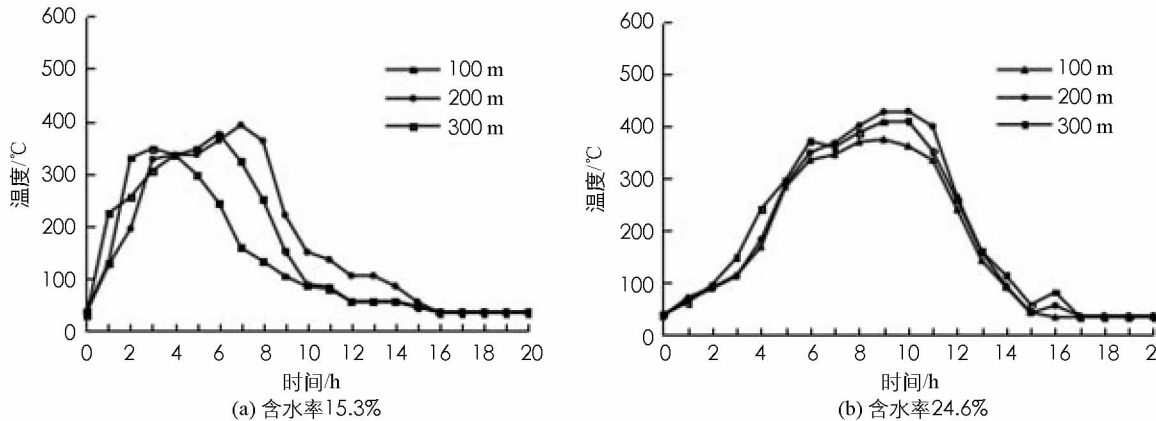


图 3 两种不同湿基含水率稻秆阴燃不同径向温度变化曲线

图 5 中的 a,b 速度曲线表示燃池模型内部各个热电偶分别到达干燥反应、炭氧化反应的蔓延速率,由热电偶距离燃料顶层距离除以各热电偶到达相应温度所用的时间计算得到。

从图 4,图 5a 中可发现,随着含水率的增大,阴燃反应整体干燥的时间逐渐增大,不同湿基含水率的水稻秸秆干燥前锋蔓延速率呈逐渐减小趋势,可能是含水率越大,水分过大导致阴燃传播困难以及需要吸收大量的热量等;但同一含水率不同位置的干燥蔓延速率呈逐渐增大的趋势,这主要是随着反应的进行,温度增大,水分蒸发越快,秸秆到达干燥的时间越短。类似的,从图 4,图 5b 中可知,秸秆炭氧化时间随着含水率的增大而增大,不同含水率对水稻秸秆炭氧化前锋蔓延速率影响不显著,说明秸秆炭氧化速率受含水率的影响不明显。但同一湿基含水率的秸秆不同位置的炭氧化速率呈现增大的趋势,主要是由于阴燃反应的进行,秸秆燃烧,质量减少,收缩较大,使得物料与氧气接触面增大,因此氧化速度逐渐的增大。

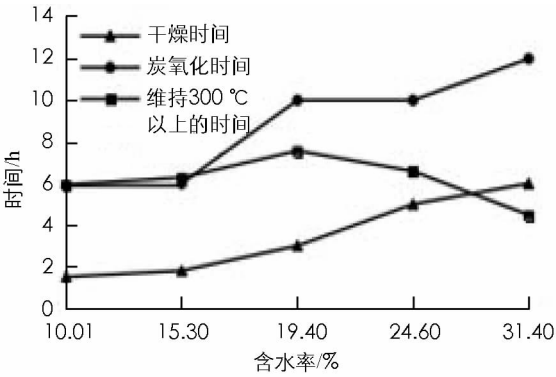
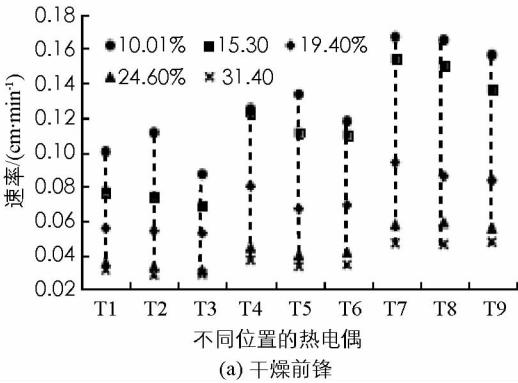


图 4 不同的含水率秸秆整体阴燃到达各阶段温度的平均时间

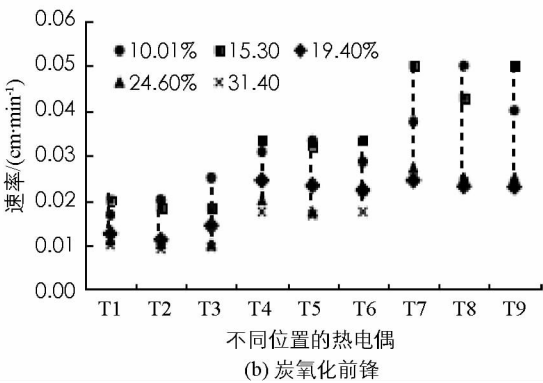


图 5 含水率对秸秆内部阴燃传播的影响

另外,从图 4 可知:含水率的增大,维持300℃以上高温的时间逐渐增大,但含水率为 24.6%以后呈现下降的趋势,说明阴燃时高温时间受含水率的影响较大。可能是前期干燥反应消耗大量的秸秆,在后期高温阶段由于物料少而导致温度下降速度增大,以至维持高温的时间大小不明显。

2.3 含水率对秸秆失质量过程的影响

图 6 是不同含水率水稻秸秆阴燃时总质量的变化曲线,质量分数为剩余物料量与初始总质量之比。从图中可发现,秸秆质量在阴燃的初始阶段斜率最大,之后比较平缓,说明秸秆质量在前期迅速减少,之后基本保持不变,这是由于前期燃烧的是秸秆中的有机成分,而秸秆中 SiO₂等无机成分不能燃烧,剩余质量分数会趋近于无机成分的含量^[10]。水稻秸秆在阴燃前期温度上升快,因此物料的燃烧以及水分的蒸发速率加快,但含水率的大小对物料质量的变化影响较小。

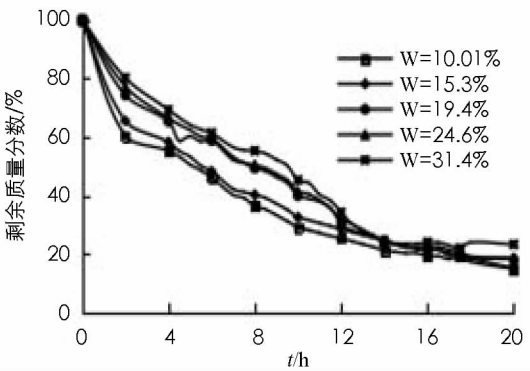


图 6 不同湿基含水率阴燃过程的质量变化曲线

3 结果与讨论

3.1 结 果

本文研究了 10%~30%范围内含水率对水稻秸秆阴燃供暖燃池的影响,结果如下:

- 1) 在阴燃过程中, 安装在不同床层的热电偶同时升温, 没有自上而下逐渐增大, 秸秆质量在 0~6 h 内失质量速率较大, 后期呈缓慢下降趋势, 其原因是稻秆水分的蒸发, 同时是上下层稻秆同时阴燃, 呈现整体传播过程, 这时燃池内部传热速度大于阴燃前锋的传播速度, 区别于其他生物质粉阴燃时温度呈现自上而下变化的一维传播过程^[11].
- 2) 含水率对水稻秸秆阴燃干燥前锋蔓延速率以及整体维持 300 ℃ 高温以上的平均时间有明显的影响: 含水率为 31.4% 的平均干燥时间比 10% 下长 4h 左右, 干燥蔓延速率逐渐减小; 随着含水率的增大秸秆维持高温的时间呈先增大后减小趋势, 其中, 含水率为 19.4% 维持高温的时间最长, 约为 7h.
- 3) 含水率对炭氧化前沿移动速率以及失质量特性影响不明显.

3.2 讨 论

对于利用导热形式进行供热的燃池来讲, 水稻秸秆阴燃释放的热量能够迅速地传递到燃池的池壁以及池顶并有足够的能量进行加热, 达到供暖的要求. 可在实际工程中调节供氧量、堆积密度等因素进行阴燃反应的进行, 进而控制燃池供暖时间. 同时可通过自动喷淋控制含水率的大小进而控制阴燃反应的速率, 达到现代农业温室内环境自动化控制的选择.

参考文献:

[1] 朱 靛. 我国农作物秸秆焚烧屡禁不止的原因探究及对策分析 [D]. 南京: 南京林业大学, 2016.

[2] 王铁良, 白义奎, 刘文合. 燃池在日光温室加热的应用试验 [J]. 农业工程学报, 2002, 18(4): 98—100.

[3] 白义奎, 迟道才, 王铁良, 等. 日光温室燃池——地中热交换系统加热效果的初步研究 [J]. 农业工程学报, 2006, 22(10): 178—181.

[4] 何 芳, 唐秋霞, 李永军, 等. 含水率对玉米秸秆粉阴燃过程的影响 [J]. 燃烧科学与技术, 2012, 18(5): 415—420.

[5] HE F, YI W M, LI Y J, et al. Effects of Fuel Properties on the Natural Downward Smoldering of Piled Biomass Powder: Experimental Investigation [J]. Biomass & Bioenergy, 2014, 67(9): 288—296.

[6] 马增益, 李月宁, 黄群星, 等. 水平强迫气流下木屑逆向阴燃过程的实验研究 [J]. 燃烧科学与技术, 2004, 10(6): 497—500.

[7] 刘文合, 许 封. 日光温室燃池形状和深度的模拟研究 [J]. 北方园艺, 2015(4): 44—49.

[8] 李月宁. 强迫气流下阴燃的形成和传播机理及其产物特性的试验研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2004.

[9] 孙文策, 解茂昭, 郭晓平, 等. 燃池内的阴燃过程的实验分析研究 [J]. 工程热物理学报, 2000, 21(3): 393—396.

[10] KUROKOCHI Y, SATO M. Effect of Surface Structure, Wax and Silica on the Properties of Binderless Board Made from Rice Straw [J]. Industrial Crops & Products, 2015, 77: 949—953.

[11] 陈艳辉. 北方高寒地区秸秆阴燃特性及应用研究 [D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2014.

Experimental Study on Influence of Water Content of Rice Straw on Burning Pool Heat Supply

LUO Qiu¹, BAO An-hong¹, YANG Jun-ying¹,
SONG Fei¹, XU Xian¹, LUO Shu-wei¹

School of Engineering and Technology, Southwest University, Chongqing 400715

Abstract: Burning pool is a new type of heating method that uses biomass smoldering. In order to explore the effect of rice straw with different water content on the heating of the combustion pool, an experimental platform (600mm×560mm×300mm) designed by ourselves has been used to test the effect of moisture content on the internal characteristics of rice straw smoldering. The results show that the rice straws with different moisture content all showed the overall smoldering propagation pattern; different moisture contents had significant influence on the drying process of rice straw and the duration of high temperature above 300℃; the highest temperature inside the rice straw, internal carbon. The effects of oxidation process and weight loss characteristics are small.

Key words: burning pool; Smolder; moisture content; temperature; propagation rate

责任编辑 周仁惠