

青稞颗粒燃料燃烧特性及动力学分析

饶月 李静 罗红英*

(西藏农牧学院, 西藏 林芝 860000)

摘要 为进一步实现生物质致密成型燃料高效燃烧的合理利用, 本文以青稞致密成型燃料为研究对象, 用 DZ-STA 200 同步热分析仪对其燃烧特性及动力学进行分析, 考查了不同升温速率 (10、15、30°C/min) 对燃烧特性的影响, 求出了青稞致密成型颗粒燃料的燃烧特性参数和动力学参数。结果表明: (1) 从着火温度、燃尽温度、最大燃烧速率、平均燃烧速率、可燃特性指数和综合燃烧特性指数综合分析, 青稞颗粒燃料的最佳升温速率为 30°C/min; (2) 青稞颗粒燃料在升温速率为 10°C/min 时的活化能最低为 49.5 kJ·mol⁻¹。该研究为进一步探索青稞生物成型燃料的燃烧特性及相关燃烧设备提供理论依据。

关键词 青稞 致密颗粒燃料 热重试验 燃烧特性 动力学

中图分类号: TK16

文献标识码: A

文章编号: 1007-0745(2022)08-0064-04

西藏高寒地带环境污染日益严重, 大部分居民以直接燃烧秸秆获得能源, 由于秸秆直接燃烧对外部环境压力和氧气浓度依赖性较大, 长期性地燃烧不充分就会影响生态平衡, 因此人们越来越多地把目光放在生物质能的研究利用上。由于生物质具备形状不规则、能量密度和质量密度小、热效率低和燃烧性能差等特点, 所以将其压制成具有一定形状、密度较大的成型燃料, 可以提高其单位质量的燃烧发热量和燃烧时间。

近年来, 国内外大量研究学者对生物质颗粒燃料的燃烧特性进行了研究, 代莉^[1]对马尾松、湿地松和樟子松制备的颗粒燃料进行了热重分析, 结果表明: 樟子松的着火温度最高, 燃尽温度最低, 平均燃烧速率最大, 综合燃烧特性指数最高, 燃烧性能最好。任敏娜^[2]等研究了 8 种生物质颗粒燃料的燃烧特性, 结合傅一张着火指标和缪岩燃烧特性指标分别计算出 FZ 和 ZM 值, 结果表明: 装饰纸的着火温度最低, 稻壳的着火温度最高。彭好义^[3]等通过热重试验研究了木制颗粒和玉米秸秆颗粒的燃烧特性, 表明木制颗粒的可燃特性、燃尽特性和综合燃烧特性指数均优于玉米秸秆颗粒。王华山^[4]等通过热重分析法研究了生物质在不同条件下的燃烧特性。结果表明: 不同生物质燃烧特性明显不同。稻壳经不同温度水洗后综合燃烧特性指数增加, 最大燃烧速率提高 6.0%/min ~ 7.6%/min, 燃烧活化能高于原样, 且在一定范围内水洗温度越高,

焦炭燃烧阶段活化能越小; 提高升温速率, 生物质的着火温度、燃尽温度、残余率、最大燃烧速率及综合燃烧特性指数提高。赵璇^[5]利用热重试验对玉米秸秆生物质、聚乙烯塑料、无烟煤的混合燃烧展开实验研究, 结果表明: 随着升温速率的增大, 样品着火点升高, 最大反应速率增大, 燃尽温度升高。

可以看出, 现阶段对青稞颗粒燃料燃烧特性的研究较少。本研究以青稞为主要原料, 通过对可燃特性和综合燃烧特性对比分析了青稞颗粒燃料在不同升温速率 (10、15、30°C/min) 下的燃烧特性, 总结得出这三种燃料的燃烧特性。最后采用一级反应动力学模型计算 3 种升温速率下燃料的动力学参数。从以上多方面分析 3 种升温速率下燃料的燃烧特性, 为青稞生物质颗粒燃料开发利用提供参考和理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料处理

青稞取自西藏林芝, 晾晒后打碎成 2mm 左右的粉末装袋备用。根据 GB/T28730-2012、GB/T28731-2012、GB/T28732-2012、GB/T3--0733-2014、GB/T30727-2014、GB/T28733-2012 等国家标准对青稞原料主要进行了工业分析、收到基恒容低位发热量和碳、氢、氮、氧元素的测定, 其工业分析和元素分析见表 1 所示。将打碎的青稞粉末加工成致密成型燃料, 用密封袋封

★基金项目: 农业资源与环境学科(藏财预指 2020-001 号)、农林废弃物综合再利用技术研究与示范(XDHZ--2020--02)资助。

*本文通讯作者, E-mail: ttqikan@163.com。

表1 原料的工业分析和元素分析

样品	元素分析 Proximate analysis/%					工业分析 Ultimate analysis/%				热值 / (MJ · Kg ⁻¹)
	C	N	O	H	S	MC	V	FC	A	
青稞	37.83	1.37	30.52	5.25	0.13	1.85	62.11	12.99	23.05	12.76

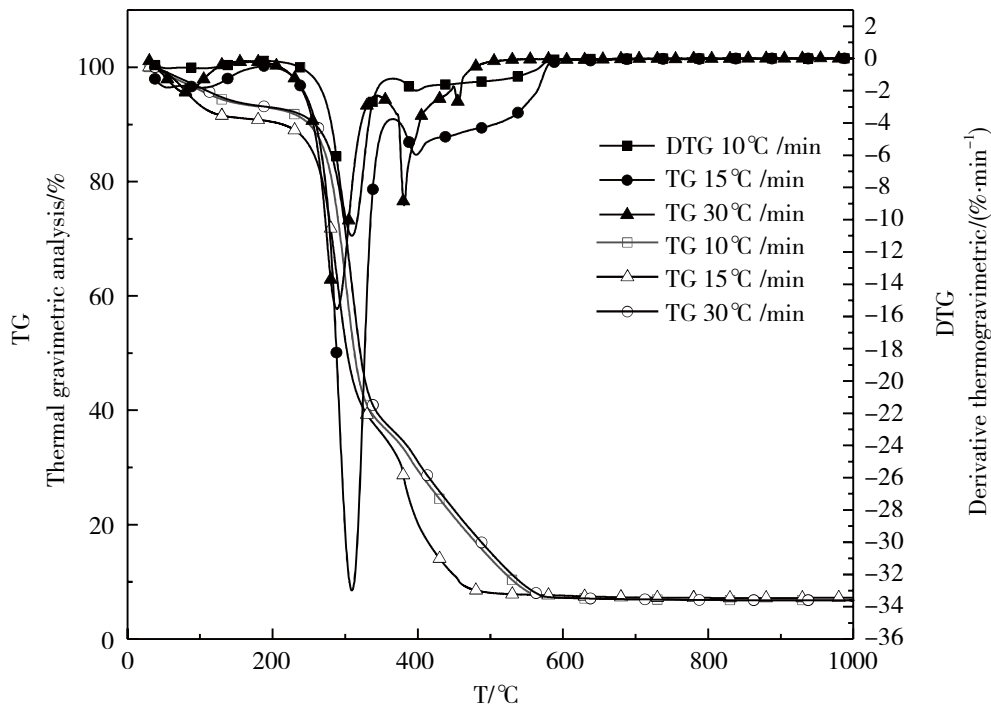


图1 燃料在不同升温速率下的TG与DTG曲线

装保存, 置于干燥器内备用。

1.2 仪器及方法

试验仪器: 本试验在DZ-STA 200同步热分析仪上进行, 该仪器的主要性能指标为温度范围在室温至1200℃; 测量范围为0-2000mg; 加热速率的范围在1-80℃/min之间; 温度分辨率为0.1℃; 温控方式为升温、恒温、降温。

试验方法: 把做好的青稞颗粒燃料切成每份样品质量为6mg左右, 试验时反应气为空气, 流量为60ml/min, 燃烧温度范围为室温到1000℃。为保证本试验数据的可靠性, 每种样品均做三组重复试验。

2 结果与分析

2.1 TG和DTG曲线分析

图1为青稞颗粒燃料在不同升温速率(10、15、30℃/min)下的失重(TG)曲线和失重速率(DTG)曲线。可以看出, 青稞颗粒在3种升温速率下燃烧时, 其质量损失的总体趋势相似, 均有3个较明显的峰值。分析其TG曲线的下降趋势和DTG曲线峰值的变化情况,

可以把青稞颗粒燃料的燃烧过程分为4个阶段, 即水分蒸发阶段、挥发分燃烧阶段、固定碳燃烧阶段和燃尽阶段。

从图1中可以看出, 在温度上升到250℃左右时, 青稞颗粒燃料已完成水分蒸发阶段的燃烧, 在这一阶段, 3种升温速率下的TG曲线均出现略微下降, 质量损失较小, 在相同温度范围的DTG曲线上对应第一个峰值。升温速率为15℃/min时, 青稞颗粒燃料在这一阶段的燃烧速率最大, 为3.1℃/min。170℃升高到350℃左右这个温度范围为青稞颗粒燃料的挥发分析出燃烧阶段, 这一阶段, TG曲线下降迅速且陡峭, 即这一阶段为最主要的质量损失阶段, 对应DTG曲线的第2个峰值。3种升温速率下的质量损失相差不大, 但质量损失速率相差较大。燃烧速率在升温速率为30℃/min时最大, 为33.3℃/min, 是升温速率为10℃/min时的3.3倍。第3个阶段为固定碳燃烧阶段, 对应DTG曲线上第3个峰值, 这一阶段在不同升温速率下的结束温度相差较大, 升温速率为30℃/min时, 固定碳燃烧阶段的结束温度最大, 为554.5℃, 最主要的原因是

表 2 3种升温速率下的燃烧特性参数

升温速率	Ti/°C	Tmax/°C	(dw/dt) max/ (%·min ⁻¹)	(dw/dt) mean/ (%·min ⁻¹)	Th/°C	Cr/10 ⁻⁴ mg·min ⁻¹ ·°C ⁻²	P/10 ⁻⁶ mg ² ·min ⁻¹ ·°C ⁻²
10°C/min	252.5	283.3	10.2	3.3	488.5	1.6	1.1
15°C/min	258.3	289	15.7	5.4	467.5	2.4	2.7
30°C/min	280.7	309.5	33.3	8.3	554.5	4.2	6.3

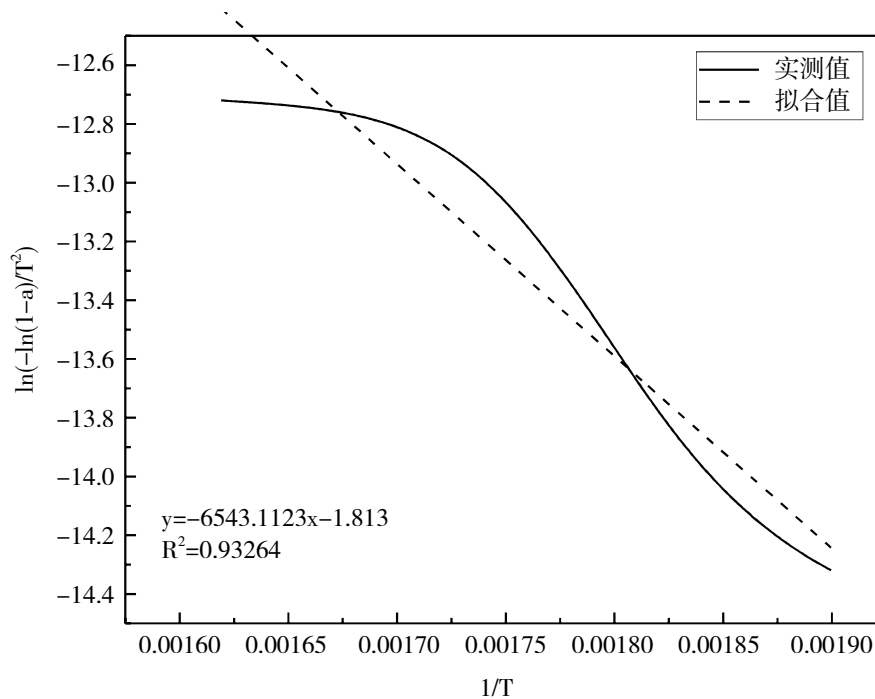


图 2 动力学参数拟合图

升温速率过大,燃料内部的挥发分还没燃烧完全,即在温度上呈现滞后现象。

2.2 可燃特性指数分析

可燃特性指数 Cr 可以用来描述燃料的易燃程度,其定义如下:

$$Cr = \frac{(dw/dt)_{\max}}{T_i^2} \quad (1)$$

式中, Cr 为可燃特性指数, (dw/dt)_{max} 为燃料的最大燃烧速率; Ti 为着火温度, 本文采用 TG-DTG 切线法确定。

2.3 综合燃烧特性指数分析

采用综合燃烧特性指数 P 来综合描述青稞颗粒燃料的燃烧特性, 其定义如下:

$$P = \frac{(dw/dt)_{\max} (dw/dt)_{\text{mean}}}{T_i^2 T_h} \quad (2)$$

式中, P 为综合燃烧特性指数, (dw/dt)_{mean} 为燃料

的平均燃烧速率; Th 为燃尽温度, 除了生物质到燃尽阶段燃烧的剩余灰渣外, 生物质颗粒燃料内部可燃物燃烧到 98% 时所对应的温度。

表 2 列出了 3 种升温速率下青稞颗粒燃料的着火与燃尽温度等特性参数、燃烧速率、可燃特性指数 Cr 和综合燃烧指数 P 的值。可以看出, 升温速率为 10°C/min 时, 着火温度最小, 为 252.5°C; 升温速率为 15°C/min 时, 燃尽温度最小, 为 467.5°C。升温速率为 30°C/min 时, 309.5°C 时的燃烧速率达到最大为 33.3%·min⁻¹, 是升温速率为 10°C/min 时的 3.26 倍, 是升温速率为 15°C/min 时的 2.12 倍, 平均燃烧速率也最大为 8.3°C·min⁻¹。

从表 2 中可以看出, 随着升温速率的增大, 青稞颗粒燃料的可燃特性指数 Cr 和综合燃烧指数 P 的值也随之增大。升温速率为 30°C/min 时, 青稞颗粒燃料的 Cr 和 P 值均最大, 分别为 4.2×10⁻⁴mg·min⁻¹·°C⁻² 和 6.3×10⁻⁶mg²·min⁻¹·°C⁻²。这两种燃烧特性指数能分

表3 3种升温速率下的动力学参数

升温速率	相关系数 R2	拟合方程	活化能 E/ (kJ · mol ⁻¹)
10℃ /min	0.91105	Y=-5954.39164x-2.86219	49.50
15℃ /min	0.93264	Y=-6543.1123x-1.813	54.40
30℃ /min	0.90603	Y=-7435.51304x-0.7332	61.82

别从燃料的可燃程度和燃烧过程的稳定性等方面综合分析燃料,其数值越大,燃烧的可燃程度和燃烧的稳定性能也越好。所以从表2中可以清晰地看出升温速率为30℃/min时,青稞颗粒燃料的燃烧特性最佳。

3 动力学参数分析

生物质颗粒的燃烧过程取反应级数为1,质量变化过程可以表示为:

$$f(\alpha) = (1 - \alpha)^n \quad (3)$$

式样重量变化率 α 由TG曲线求得:

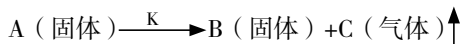
$$\alpha = \frac{\Delta W}{\Delta W_{\infty}} = \frac{W_T - W_0}{W_{\infty} - W_0} \quad (4)$$

式中 W_0 为样品的初始质量。

W_T 为温度为T时的质量。

W_{∞} 为反应终止时样品残余质量。

热失重过程是固体中的可分解产物转化为气体的过程,采用微分方程法可以表示为:



热失重速率K用阿伦尼乌斯方程表示:

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{A}{\beta} \exp(-Ea/RT)(1-\alpha) \quad (5)$$

式中, Ea 为活化能; A 为指前因子; R 为摩尔气体常数; β 为升温速率,K/min; T 为热力学温度,K。

等式两边取对数

$$\ln\left[-\frac{\ln(1-\alpha)}{T^2}\right] = \ln\left[\frac{AR}{\beta E}\left(1-\frac{2RT}{E}\right)\right] - \frac{Ea}{RT} \quad (6)$$

由于 $1 - \frac{2RT}{E} \approx 1$,所以 $\ln\left[\frac{AR}{\beta E}\left(1-\frac{2RT}{E}\right)\right] \approx \ln\frac{AR}{\beta E}$ 为常数,

即 $\ln\left[-\frac{\ln(1-\alpha)}{T^2}\right]$ 与 $\frac{1}{T}$ 为线性关系,斜率为 $\frac{Ea}{R}$,截距为

$\ln\frac{AR}{\beta E}$,令 $\ln\left[-\frac{\ln(1-\alpha)}{T^2}\right]$ 为 y , $\frac{1}{T}$ 为 x , $\ln\frac{AR}{\beta E}$ 为 a , $\frac{Ea}{R}$ 为 b ;

代入(6)得:

$$y = a + bx \quad (7)$$

在3种升温速率下,青稞颗粒燃料的燃烧速率均有3个明显峰值,由于燃料第1个峰值为燃料的水分蒸发阶段,这一阶段质量损失较小,内部分子间活跃不明显。而第2个峰值质量损失最大,内部分子间活

跃程度最明显,所以选择第2个峰值区间做动力学分析,拟合结果见图2,其中线性拟合相关系数R2均在0.9以上,拟合程度较好。

表3为计算得出的青稞颗粒燃料在3种升温速率下的燃烧反应活化能,从表3中可以看出,升温速率为30℃/min时的活化能最高为61.82kJ·mol⁻¹,升温速率为10℃/min时的活化能最低为49.5kJ·mol⁻¹,此时燃料在燃烧时维持燃烧所需能量较少,燃烧较容易。

4 结论

1.从3种升温速率下青稞颗粒燃料的着火、燃尽温度和燃烧速率等方面分析,可知,升温速率为30℃/min时,燃料的最大燃烧速率和平均燃烧速率均最大,分别为33.3℃·min⁻¹和8.3℃·min⁻¹。

2.从两种特性指数分析可得,升温速率为30℃/min时,可燃特性指数Gr和综合燃烧指数P均最大,分别为 $4.2 \times 10^4 \text{ mg} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{C}^{-2}$ 和 $6.3 \times 10^6 \text{ mg}^2 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{C}^{-2}$ 。

3.采用一级反应动力学模型计算3种升温速率下燃料的活化能,计算的相关系数均在0.9以上,说明模型可行。计算结果得出3种升温速率下,燃料的活化能分别为49.5kJ·mol⁻¹、54.4kJ·mol⁻¹和61.82kJ·mol⁻¹。

参考文献:

- [1] 代莉.林业废弃物颗粒燃料燃烧特性研究[D].长沙:中南林业科技大学,2021.
- [2] 任敏娜,崔永章,李晓,等.八种生物质颗粒燃烧特征分析[J].山东建筑大学学报,2012,27(03):298-301.
- [3] 彭好义,姚昆,曹小玲.两种不同生物质成型燃料燃烧特性试验研究[J].太阳能学报,2016,37(04):1003-1008.
- [4] 王华山,房瑀人,成玥祯,等.生物质燃烧特性与动力学分析[J].科学技术与工程,2020,20(24):9886-9892.
- [5] 赵璇.生物质、塑料与煤混合燃烧的机理研究[D].天津:河北工业大学,2018.