基于富氧条件的生物质颗粒燃烧特性实验研究

朱艳艳[1]，张林华[1,2,3]，崔永章[1,2,3]，李凯[1]，吕文超[4]

(1.山东建筑大学热能工程学院，山东济南250101；2.山东建筑大学可再生能源建筑利用技术省部共建教育部重点实验室，山东济南250101；3.山东建筑大学山东省建筑节能技术重点实验室，山东济南250101；4.西安建筑科技大学环境与市政工程学院，陕西西安710055)

摘要：富氧燃烧是解决生物质能源直接燃烧温度低问题的重要方法。文章采用热重分析法分别对玉米、棉秆以及木屑进行燃烧特性试验，通过分析不同氧气浓度下三种秸秆的TG—DTG曲线，研究富氧条件对三种典型生物质颗粒燃料燃烧特性指数的影响。结果表明：富氧条件下三种生物质颗粒燃料燃尽温度区间比空气中减少近100℃，挥发分最大析出速率是空气中的2～2.75倍；富氧条件下，燃料的燃烧特性指数迅速上升，且玉米杆的上升幅度最大，表明富氧对玉米杆促进作用最强。

0引言

生物质能占世界一次能源消耗的14%，具有清洁可再生及CO2近零排放的优点。我国生物质能分部广泛，资源丰富，每年生物质资源总量可以折合成6.5亿t标煤。目前生物质能主要以直燃的方式为居民提供生活用能，这种燃烧方式具有操作简单，取材方便，成本低的优点，但是利用效率很低，造成了很严重的能源浪费及环境污染。另外，生物质成型燃料的燃烧火焰温度一般不高于1000%，如果能解决生物质直接燃烧温度低的问题，将可广泛应用于工业能源领域。富氧燃烧可以明显提高生物质直接燃烧温度，是解决生物质能源直接燃烧温度低问题的重要方法。

近十多年来，富氧助燃在国内外都有很大的发展。许多发达国家都投入了大量人力物力来研究富氧技术，特别是日本，曾在以气、油及煤为燃料的不同场合进行了富氧应用试验，得出如下结论：用23%的富氧助燃可节能10%一25%，用25%的富氧助燃可节能20%～40%，用27%的富氧助燃则节能高达30%一50%等。罗思义对生物质微米燃料富氧燃烧特性进行了分析，并认为富氧能够改善生物质微米燃料的燃烧特性，指出当富氧率为40%时，炉膛温度可达1600℃。生物质颗粒燃料经过了高压作用，质地比较密实，燃烧时与空气接触面积较小，因此，其点火及燃烧特性与生物质微米燃料存在很大的差异。测量挥发分的析出量是最为传统的判断生物质燃料燃烧性能的方法，这种方法简单易行，但是不能显示不同生物质燃料挥发分析出的温度水平、最大析出速率及生物质的失重状况。因此，采用美国TA公司生产的Q50热重分析仪对三种典型生物质颗粒燃料进行试验，通过三种燃料燃烧的TG—DTG曲线，分析富氧条件对生物质的挥发分析出特性指数、燃烧稳定性判别指数及燃烧特性指数，为生物质颗粒原料的选择及大型生物质燃烧炉的设计提供理论依据，另外对改善中国能源结构，保护环境，促进农村经济发展也具有重要的现实意义。

1生物质颗粒燃烧特性判别指数

1.1挥发分析出特性指数

挥发分析出特性指数 R_h 表征燃烧过程中挥发分的析出性能，是判断生物质颗粒燃料燃烧特性的一个重要指标[8]。

$$R_h = \frac{(dw/dt)_{max}}{T_{max}\Delta T} \quad (1)$$

式中，$(dw/dt)_{max}$ 为挥发分最大析出质量速率，mg/min；T_{max} 为最大析出速率对应温度值，K；ΔT 为开始析出到析出最大时的温度差，K。

不同生物质颗粒由于内部结构及化学成分不同会表现出不用的燃烧特性，挥发分析出特性指数代表生物质颗粒燃烧过程挥发份析出的快慢，R_h 值越大表示挥发分析出越快，燃尽所需的时间越短，挥发段 TG – DTG 曲线越陡峭。

1.2燃烧稳定性判别指数

燃烧稳定性判别指数表征生物质颗粒燃料的稳定性，以纯碳作为测试的基准，则

$$R_w = \frac{928}{T_c} \times \frac{1036}{T_{max}} \times \frac{(dm/dt)_{max}}{0.00582} \quad (2)$$

式中：928 为碳着火温度，K；0.00582 为三种秸秆燃烧峰下的失重速率，mg/min；1036 为烧速率最大时对应的温度，K。

不同生物质燃料由于水分、挥发分及灰分含量的差异，其固定碳的燃烧也会受到不同程度的影响。R_w 值越大，说明生物质点火后温度上升越快，生物质颗粒燃料燃烧越稳定[10]。

1.3燃烧特性指数

燃烧特性指数 P_1 是一个新的判别生物质点火、燃烧及燃尽特性的综合指标。

$$P_1 = \frac{(DM/DT)_{max} \times (dm/dt)_{mean}}{T_e^{02} \times T_h} \quad (3)$$

式中，$(dm/dt)_{max}$ 为燃烧峰值时的着火速率，mg/min；$(dm/dt)_{mean}/T_h$ 为生物质平均燃烧温度与燃尽温度之比，其值越大表明燃尽所需时间越短。

P_1 值越大，预示生物质颗粒燃料点火越容易，燃尽所需的时间越短，燃烧性能越好[11]。如果两种生物质的 P_1 相差不大，那么其燃烧性能也就比较相近。

2实验装置及方法

2.1实验装置

本实验采用美国TA公司生产的Q50热重分析仪，该装置由吹扫气体系统、热天平、炉体、温度控制和测量系统五部分组成。吹扫气体系统在加热炉中，一部分吹扫气体经数字式质量流量控制后水平流过样品，另一部分为保护气体，气体经过天平室后与水平吹扫气体合并从加热炉侧口流出；热天平安置在天平室内，提供室温～1000°C温度范围内优异的测量准确度和精确度；炉体是热重分析仪的一个关键部件，可以以最迅速、精确的方式在室温一1000°C温度范围进行温度控制；数字式质量流量控制器采用自动气体切换装置，不仅可以有效改善数据的稳定性，还能进行惰性气体和氧化气氛间的快速切换。

2.2实验方法

为了分析生物质颗粒燃料富氧条件下的燃烧特性，采用Q50热重分析仪对玉米秸秆、棉秆及木屑三种典型生物质颗粒燃料进行多种不同条件下的实验。首先采用程序控温法在40%O2、21%O2、14%O2和热解条件下对20mg左右样品进行的燃烧试验，升温速率为2O°C／min，载气流量为60mL／min，得到玉米秸秆、棉秆及木屑的TG—DTG曲线图；其次在氧浓度及载气流量分别为14%和60mL／min、21%和60mL／min、40%和60mL／min、min21%和50mL／min及21%和70mL／min五种条件下进行热重实验，进而分析富氧条件对三种秸秆的挥发分析出特性指数Rh、燃烧稳定性的判别指数Rw燃烧特性指数P1的影响。

3实验结果及分析

3.1富氧条件对生物质颗粒燃料燃烧失重特性的影响

3.1.1玉米秆TG—DTG曲线图

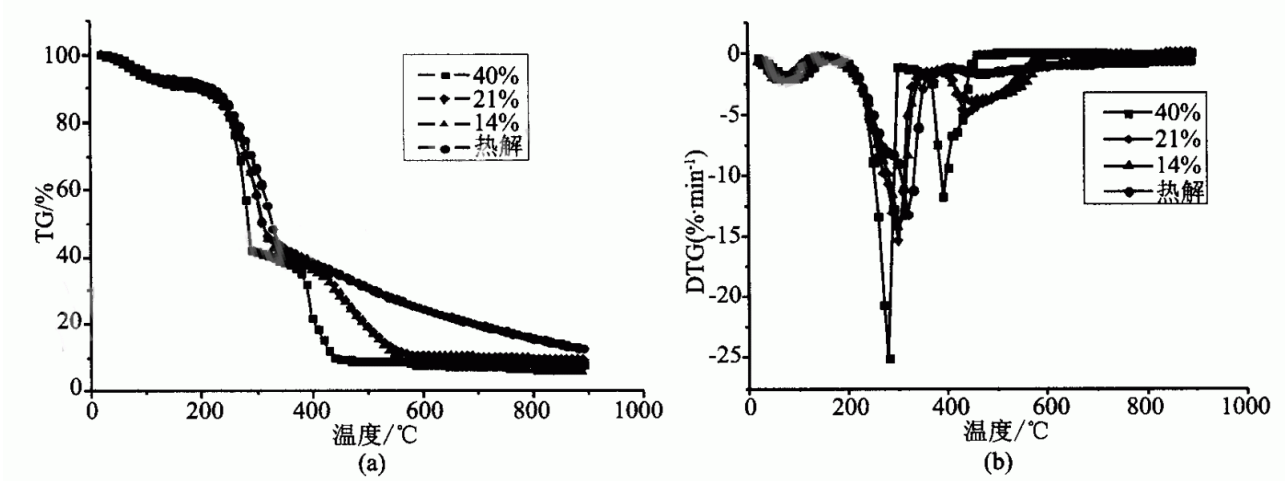

图 1　玉米秸秆在不同氧气浓度气氛下的 TG－DTG 曲线

由图1可以看出，以21%O2曲线为基准TG及DTG曲线均可以划分为三个阶段：第一阶段为水分的析出阶段，温度区间为20～220°C。四条曲线基本一致，说明氧气浓度的变化对玉米秸秆的水分析出过程影响不大；第二阶段为挥发分燃烧阶段。从TG曲线可以看出，40%O2的富氧条件下燃烧区间较短，挥发分燃烧温度区间为220～29O°C，21%O2、14%O2及热解曲线差别不大，温度区间为220～330°C。从DTG曲线可以看出，四条曲线均出现了挥发分析出速率峰值。40%O2的富氧条件下最大析出速率为23%／min，21%O2、14%O2及热解条件下最大析出速率分别为14%／min、13%／min及12%／min；第三阶段为固定碳燃烧阶段，从TG曲线可以看出，40%O2富氧条件下玉米的燃烧区间明显缩短，燃烧温度区间为390—440°C，21%O2及14%O2曲线差别不大，温度区间为220～330°C。

热解曲线与其他三种相比，挥发分燃烧阶段与固定碳燃烧阶段之间没有明显的过渡段，固定碳的燃烧区间较长，温度区间为330—900°C。从DTG曲线可以看出，除热解曲线没有出现失重速率峰值外，其他三条均出现了失重速率峰值。40%O2的富氧条件下玉米秆的最大析出速率为11%／ain，21%O2最大析出速率为4%／min，40%O2富氧条件下最大析出速率是空气中的2.75倍。说明富氧可以缩短木屑挥发分及固定碳的燃烧区间，增大挥发分析出速率，使玉米的燃烧性能更好。

3.1.2棉秆TG—DTG曲线图

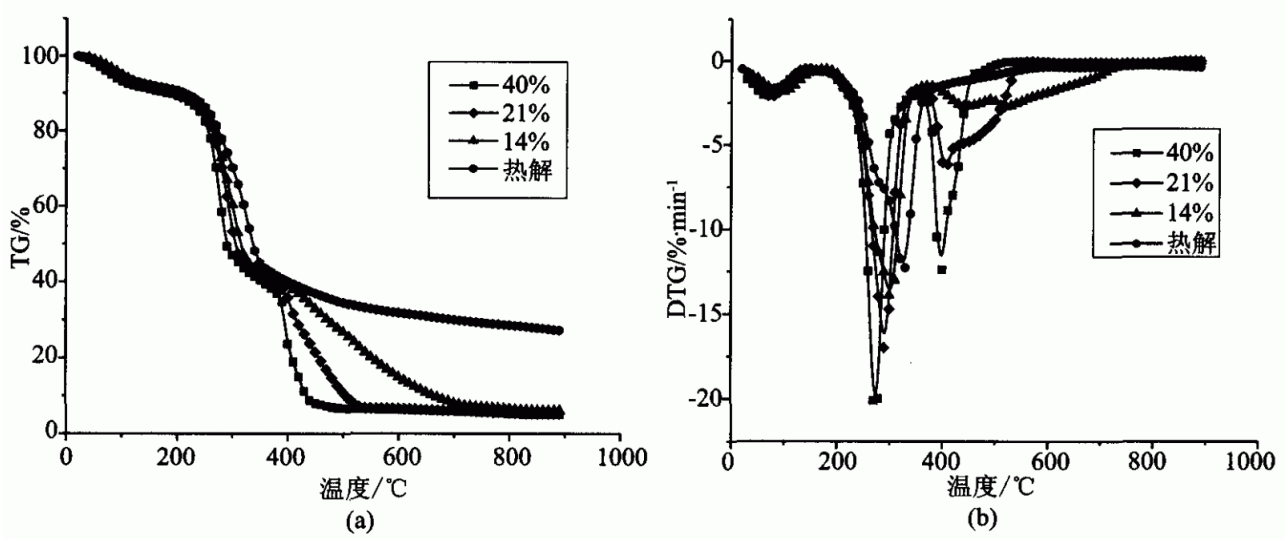

图 2　棉秆在不同氧气浓度气氛下的 TG－DTG 曲线

由图2可以看出，棉秆TG及DTG曲线与玉米秆基本一致，划分为三个阶段。第一阶段温度区间为20～250°C。这一阶段四条曲线基本一致，说明水分析出阶段氧气浓度的变化对棉杆的影响不大；第二阶段为挥发分燃烧阶段，温度区间为250～3o0°C。从TG曲线可以看出，40%O2的富氧条件下棉秆挥发分燃烧温度区间为250～29O°C，21%O2、14%O2及热解曲线差别不大，温度区间为220—350°C。从DTG曲线可以看出，四条曲线也均出现了挥发分析速率峰值，且富氧条件下峰值出现的最早。40%O2的富氧条件下棉杆的最大析出速率为19%／min，明显高于其余三条曲线；第三阶段为固定碳燃烧阶段，从TG曲线可以看出，40%O2富氧条件下棉杆燃烧温度区间为390～440°C，比21%O2条件下燃烧区间减少100°C。从DTG曲线可以看出，除热解曲线没有出现失重速率峰值外，其他三条均出现了失重速率峰值，且富氧条件下峰值出现的最早。40%O2的富氧条件下玉米秆的最大析出速率为12%／min，21%O2最大析出速率为5%／min，40%O2富氧条件下最大析出速率是空气中的2.4倍。说明富氧可以缩短棉杆挥发分及固定碳的燃烧区间，增大挥发分析出速率，改善棉杆的燃烧性能。

3.1.3木屑TG—DTG曲线图

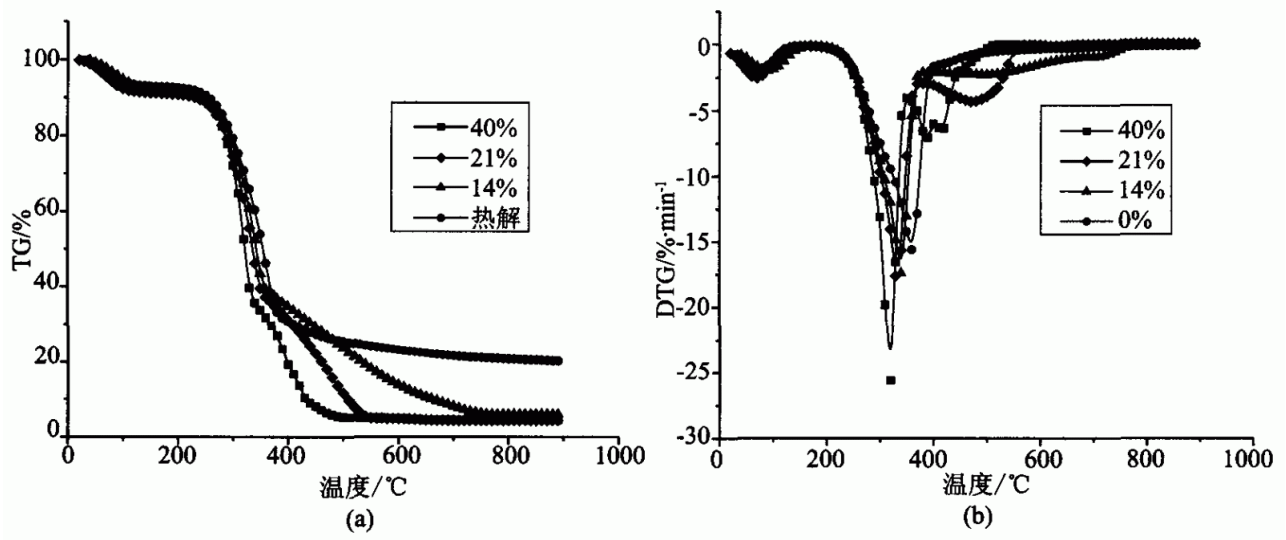

图 3　木屑在不同氧气浓度气氛下的 TG－DTG 曲线

由图3可以看出，木屑TG及DTG曲线与棉秆更为相似，但是挥发分及固定碳燃烧分界处没有玉米秆和棉秆明显。第一阶段为水分析出阶段，四条曲线基本一致，说明氧气浓度的变化对木屑的水分析出过程影响也不大；第二阶段为挥发分燃烧阶段。

从TG曲线可以看出，40%O2的富氧条件下棉秆挥发分燃烧温度区间为250—310°C，比21%O2条件下减少30°C。从DTG曲线可以看出，40%O2的富氧条件下棉杆的最大析出速率为23%／min。21%O2、14%O2及热解条件下最大析

出速率分别为17%／min、16%／min和15%／min；第三阶段为固定碳燃烧阶段，从TG曲线可以看出，40%O2富氧条件下木屑燃烧温度区间为320～440%，比21%O2条件下燃烧区间减少100℃。从DTG曲线可以看出，14%O2及热解曲线没有出现明显的失重速率峰值，说明缺氧条件对木屑固定碳的燃烧阶段阻碍较大。

40%O2的富氧条件下玉米秆的最大析出速率为12%／min，21%O2最大析出速率为6%／min，40%O2富氧条件下最大析出速率是空气中的2倍。说明富氧可以缩短木屑挥发分及固定碳的燃烧区间，增大挥发分析出速率，使木屑的燃烧性能更好。

3.2富氧条件对生物质颗粒燃料特性的影响

3.2.1富氧条件对生物质颗粒挥发分析出特性的影响

不同载流理和氧气浓度条件下，三种典型生物质颗粒燃料的Rh值如图4所示。

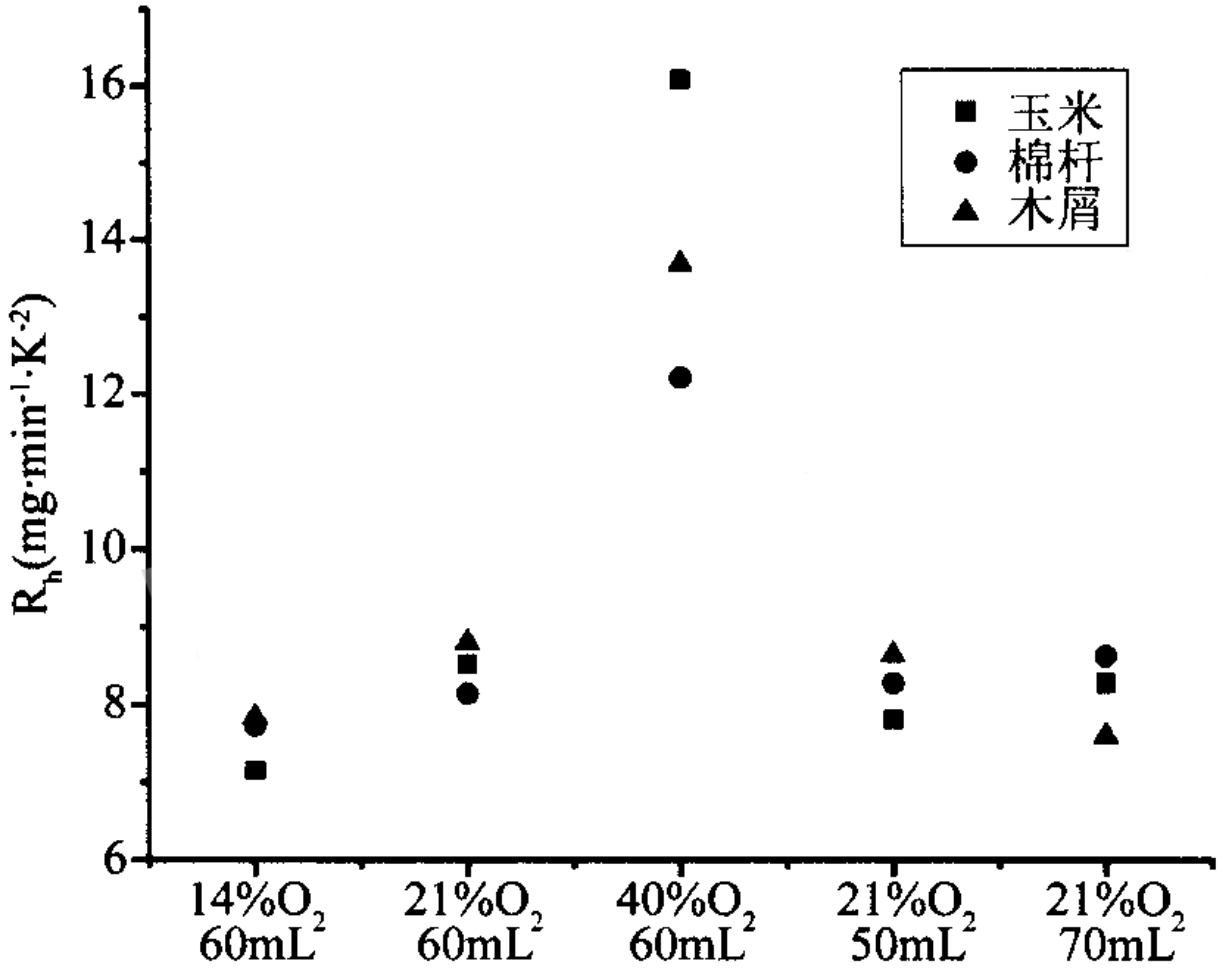

图 4　不同条件下的挥发分析出特性指数

图4表明，随着氧气含量的变化，三种典型生物质颗粒燃料的挥发分析出特性指数变化很大。在缺氧的状况下，玉米、棉杆及木屑的挥发分析出特性指数分别为7.1、7.8及7.90mg／(min · K)，这说明缺氧条件下木屑及棉杆挥发分最易析出，玉米挥发分析出最难。当达到21%O2条件时，玉米、棉杆及木屑的挥发分析出特性指数均呈上升趋势，这说明随着氧气含量升高，三种秸秆的燃烧稳定性有所增强。

40%O2的富氧条件下，玉米、棉杆及木屑的挥发分析出特性指数分别为16.3、12.2和13.7mg／(min · K)，表明富氧条件下，三种秸秆的燃烧稳定性明显改善。与空气中相比，富氧条件下玉米挥发分析出特性指数增加了7.6mg／(min

·K)，而玉米与木屑分别增加了4.1及4.8mg／(min·K)，说明富氧条件下玉米挥发分析出的促进作用最强。

3.2.2富氧条件对生物质颗粒燃烧稳定性的影响

不同条件下，三种典型生物质颗粒燃料的尺值如图5所示。

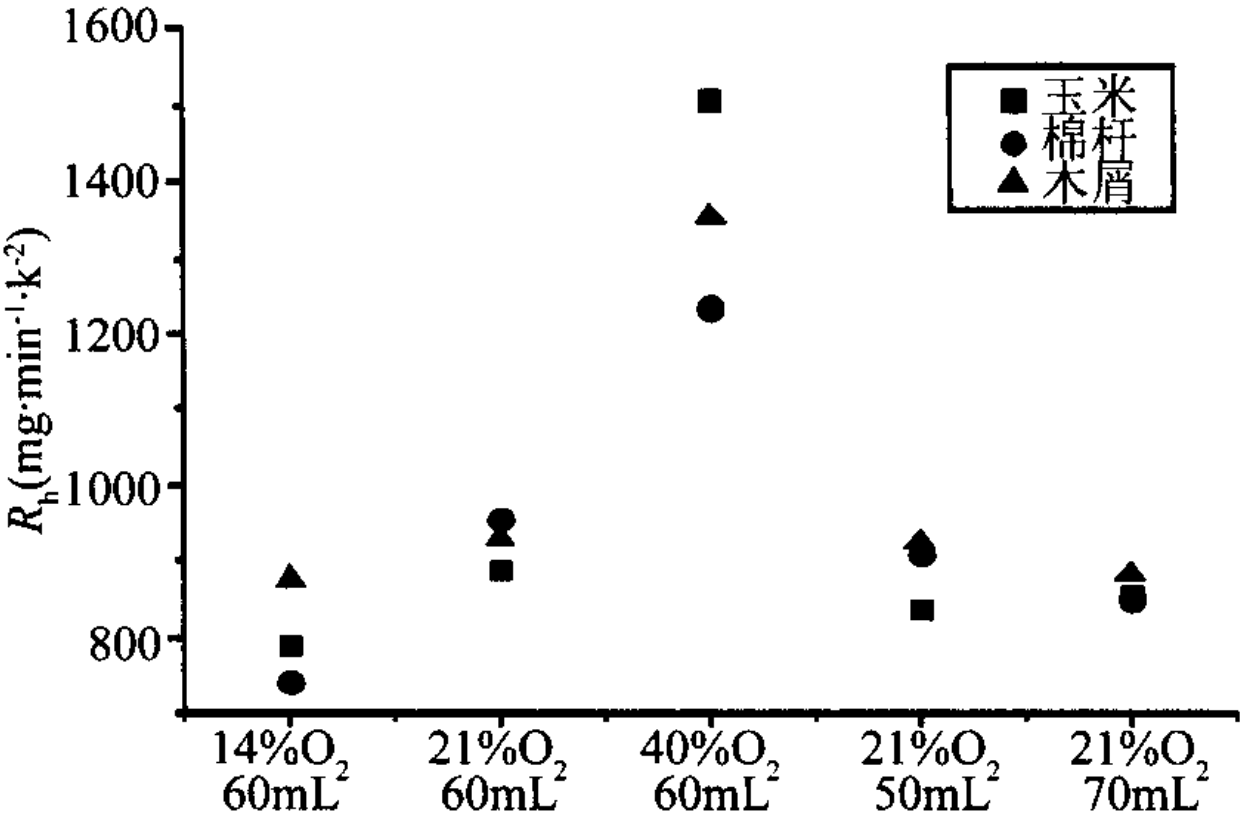

图5　不同条件下燃烧稳定性的判别指数

图5表明，随着氧气含量的变化，三种典型生物质颗粒燃料的燃烧稳定性也有很大变化。在缺氧的状况下，玉米、棉杆及木屑的燃烧稳定性指数分别为800、740和880，这说明缺氧条件下木屑燃烧稳定性最好，玉米稍次，棉杆最差；当达到21%O2条件时，玉米、棉杆及木屑的燃烧稳定性指数分别为900、960和930，这说明随着氧气含量升高，三种秸秆的燃烧稳定性有所增强，其中棉杆稳定性指数增加了220，玉米与木屑大约增加100，说明缺氧条件下增加氧气含量对棉杆的促进作用最强；与21%O2相比，40%O2的富氧条件下，玉米稳定性指数增加了640，玉米与木屑分别增加了260和430，说明富氧条件下增加氧气含量对玉米的促进作用最强，木屑次之，棉杆最差。另外，三种典型生物质颗粒燃料的燃烧稳定性随着载气流量的变化，呈开口向下的抛物线型变化。

3.2.3富氧条件对生物质颗粒燃烧特性指数的影响

不同条件下，三种典型生物质颗粒燃料的P1值如图6所示。

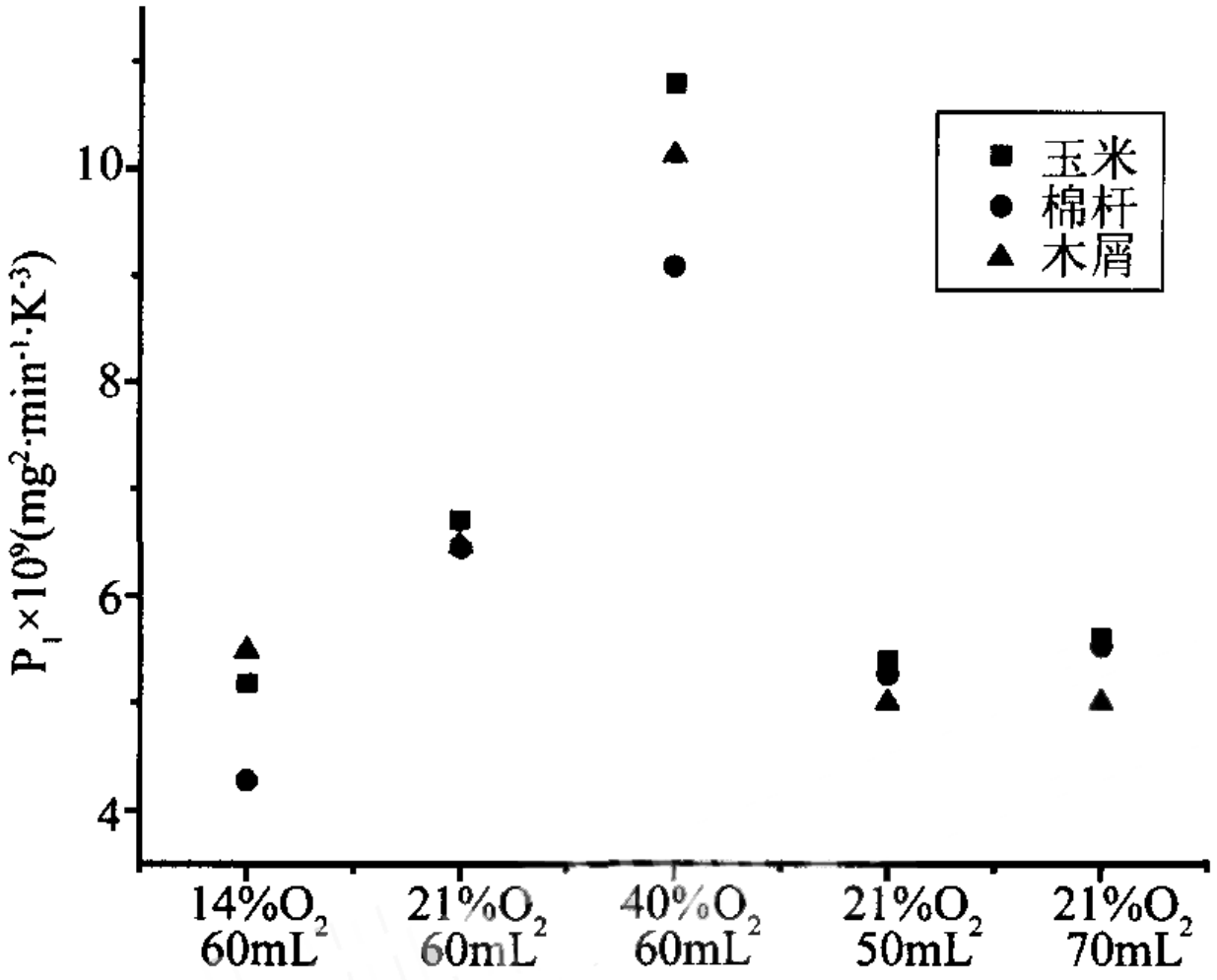

图 6　不同条件下的燃烧特性指数

P1值的变化趋势Rh与Rw及值的变化趋势基本相同，这表明生物质颗粒挥发分的析出有利于降低颗粒的点火温度，提高其燃烧稳定性及燃烧速率。在缺氧的状况下，玉米、棉杆及木屑的燃烧特性指数都比较低，这说明缺氧条件下三种生物质颗粒燃料的点火性能及燃尽性能较差；21%O2条件时，玉米、棉杆及木屑的燃烧稳定性指数呈现上升趋势，其中棉杆稳定性指数增加了2.2mg／(min · K。)，玉米

与木屑分别增加了1.5、0.9mg／(min · K)，这说明随着氧气含量升高，三种秸秆的燃烧稳定性有所增强，且增加氧气含量对棉杆的促进作用最强；与

21%O2相比，40%O2的富氧条件时，玉米稳定性指数增加了4.0mg／(min · K)，棉杆与木屑分别增加了2.4和3.6mg／(min · K)。表明富氧条件下，三种秸秆的燃烧特性明显改善，且增加氧气含量对玉米点火、燃烧及燃尽特性的促进作用最强，木屑次之，棉杆最差。另外，三种典型生物质颗粒燃料的燃烧稳定性随着载气流量的变化，也呈开口向下的抛物线型变化。

4结论

(1)TG—DTG曲线显示，40%O2富氧条件下生物质颗粒燃料挥发分燃烧区间比空气中缩短30℃，，固定碳的燃烧区间缩短近100℃。富氧条件下挥发分析出峰值是空气中的2—2.75倍，且峰值出现的比较早，表明生物质燃烧性能明显改善。

(2)随着氧气含量的增加，玉米、棉杆及木屑的挥发分析出特性指数、燃烧稳定性的判别指数及燃烧特性指数均呈

现上升趋势。在14%一21%O2浓度范围内，三种指数的增加量较小。21%～40%O2富氧条件下，三种指数均呈现明显的上升趋势。证明14%～21%O2浓度范围内增加氧气含量可以改善生物质的燃烧性能，但是效果不是很明显；21%～40%O2富氧条件能够大幅度改善生物质燃料的燃烧性能。

(3)21%O2条件下，玉米、棉杆及木屑的三种指标差别都不大，而40%O2富氧条件下，玉米颗粒的三种指标均明显高于棉杆及木屑，这说明富氧条件对玉米颗粒燃料的促进作用更强。

原文地址：http://www.china-nengyuan.com/news/114527.html