

生物质高温无焰燃烧技术的研究与探讨

马培勇¹，唐志国^{1,2}，林其钊¹

(1.中国科学技术大学热科学和能源工程系，安徽合肥 230026；2.合肥工业大学机械与汽车工程学院，安徽合肥 230009)

摘要：阐述了生物质(秸秆)利用技术现状，分析了生物质气化技术、液化技术、直接燃烧技术存在的问题和不足。基于超焓燃烧思想提出生物质能利用新技术——无焰燃烧，采用了液态排渣技术、分级燃烧技术和烟气再循环等技术实现生物质(秸秆)的高效、低污染、经济、安全、大规模的高品位开发利用。

0引言

随着全球工业化的快速发展，一次性能源(如石油、煤炭、天然气等)的消耗量不断增加，根据国际能源机构统计，地球上石油、天然气、煤炭3种

能源可供人类开采的年限分别只有40年、50年和240年^[1]

。因此，人类为了自身的生存和发展，世界各国都在积极进行可再生能源的开发和利用，以减少或替代一次性能源的消耗。生物质能是仅次于煤、石油、天然气的第4大能源，在世界能源消耗中占有一定的比例。由于生物质燃烧实现了CO₂

零排放，消除了产生温室效应的根源，有关专家认为生物质能源将成为未来可再生能源的重要组成部分。到2050年，生物质能用量将占全球燃料直接用

量的38%，生物质发电量占全球总发电量的17%^[2]

。因此，对生物质能源进行研究开发利用具有重要的经济意义、生态环境意义和社会意义。

1生物质能源利用技术现状

与化石燃料能源相比，生物质能具有可再生性、低污染性、广泛分布性以及总量丰富等独特的优点。近年来，国内外学者对生物质能源的利用进行了广泛深入的研究，主要有生物质气化燃烧技术、生物质液化燃烧技术和生物质直接燃烧技术，并取得了可喜的成绩^[3-6]

。但由于生物质能的研究还处于起步阶段，技术手段还不够成熟，在其利用过程中还存在着缺陷和不足，仍需作进一步研究。

1.1生物质气化技术

气化技术是将秸秆在缺氧状态下燃烧，发生化学反应，生成高品位、易输送、利用效率高的气体。目前，我国使用的秸秆气化技术，主要以固定床为主。固定床工艺一般采用空气为气化剂，这类工艺(不论是上吸式、下吸式或是平吸式的气流方式)，都具有设备结构简单、投资少、易于操作、可实现多种生物质原料的热解气化等特点。但是，得到的生物质燃气热值低，一般只有5000kJ/m³

左右，且生物质气中焦油含量高，燃料利用率低，生产、输送、配给的成本较高。分析其原因，主要有2个方面：一是由于工艺路线局限，多采用空气为气化剂，使得到的燃气中氮气含量高，通常在50%左右，影响了燃气的热值；二是由于秸秆原料有些不利于气化的因素，使得燃料得不到完全气化，仅能利用燃料中的挥发成分，固定碳得不到充分利用。因此，用生物质燃气作内燃机发电燃料将会存在如下问题^[7]。

(1)由于生物质气化产生的燃气热值低，它的燃烧温度、发电效率与天然气相比明显偏低，而且由于生物质燃气体积较大，压缩困难，进而降低了系统的发电效率。为了保证相同的出力，必须对内燃机的进料系统、燃烧系统、压缩比等做较大改动。

(2)由于H₂的着火速度比其他燃气快，在H₂含量过高时，容易造成点火不稳定而引起爆燃。据研究资料表明，生物质燃气的氢气含量差别很大，流化床一般在10%左右，而固定床有时高达15%。

(3)焦油、灰分杂质的影响。虽然生物质燃气经过了严格的净化，但仍含有一定量的焦油和灰分。焦油会引起点火系统失灵，燃烧后积炭会增加磨损，而含灰量太高也会增加设备磨损，严重时会引起拉缸。所以，一般生物质燃气内燃机机组的配件损耗率和润滑油消耗量与其他燃气内燃机相比都会成倍增加。

(4)排烟温度过高及效率过低问题。由于低热值燃气燃烧速度比其他燃料慢,低热值燃气内燃机的排烟温度比其他内燃机明显偏高。这就造成设备材料容易老化且系统效率明显降低。

1.2 生物质液化燃烧技术

生物质热解液化是将难处理的固体生物质及其他废弃物比较容易地转化为液体生物质油,以便于运输、贮存、燃烧和改性。这样,能更好地利用生物质及其他废弃物,并减少直接燃烧引起的环境污染。

生物质原油可直接用作各种工业燃油锅炉透平的燃料,也可通过对现有内燃机供油系统进行简单改装,直接作为内燃机引擎的燃料,并且生物质油不含硫,不会造成酸雨,其他排放物也均在可接受的范围内。对生物质原油进行催化和品位升级处理,可获得高品质的汽油或柴油。生物质液化可能是最有前途的方法之一,但其存在的问题是:

(1)生物质液化之后,液体燃料的成分非常复杂,其中许多组分仍然是未知的,还需要对其分解加工技术进一步进行研究。

(2)生物质油成本通常比矿物油高10%~100%,且生物质油与传统燃料不相容,需要专用的燃料处理设备^[8]。

(3)广大用户不熟悉这种产品,且不同生物质油品质相差很大,生物质油的使用和销售也缺少统一标准,阻碍了其广泛应用。

目前,将生物质油代替石油作为各种发动机的燃料,仍需要一定的时间。

1.3 生物质直接燃烧技术

生物质的直接燃烧技术是将生物质(如木材)直接送入燃烧室内燃烧,燃烧过程中放出的热量用以加热工质以产生蒸汽或利用蒸汽发电。生物质直接燃烧主要分为炉灶燃烧和锅炉燃烧。炉灶燃烧操作简便、投资较少,但燃烧效率普遍偏低(如农用柴灶炉热效率一般为10%~20%,先进的省柴灶炉热效率也仅在30%左右),从而造成生物质资源的严重浪费;从国内外生物质直接燃烧技术的发展状况来看,用于生物质燃烧的锅炉主要有层燃锅炉和流化床锅炉。层燃锅炉属层状燃烧,燃烧效率较低,炉排易烧损。其产生的原因是:

(1)生物质燃料密度低,在其通过给料斗送到炉排上时容易在炉排上形成厚薄不均分布。大量空气从厚度薄、阻力小的地方进入炉膛而将薄层吹空,以致空气短路进入炉膛,不能用来充分燃烧;而料层厚的地方,需要大量空气维持燃烧,由于空气进入阻力较大,因而空气量较燃烧所需的空气量少,这种布风不均将不利于燃烧和燃尽。生物质的特点是挥发分很高,在燃烧的开始阶段,挥发分大量析出,需要大量空气用于燃烧,如果这时空气不足,可燃气体与空气混合不好将会造成燃气不完全燃烧导致损失急剧增加。同时,由于生物质比较轻,容易被空气吹离床层而带出炉膛,这样造成固体不完全燃烧,损失很大,因而燃烧效率很低。

(2)当生物质燃料含水率很高时,水分蒸发需要大量热量,干燥及预热过程需时较长,所以,生物质燃料在床层表面很难着火,或着火推迟,不能及时燃尽,造成固体不完全燃烧损失很高,导致锅炉燃烧效率、热效率很低。一旦燃尽后,由于灰分很少,不能保护后部的炉排不被过热而导致炉排烧坏^[9]。

流化床锅炉对生物质燃料的适应性较好,负荷调节范围较大。床内工质颗粒扰动剧烈,传热和传质工况十分优越,有利于高温烟气、空气与燃料的充分混合,为高水分、低热值的生物质燃料提供极佳的着火条件,同时由于燃料在床内停留的时间较长,可以确保生物质燃料的完全燃烧,从而提高了生物质燃烧锅炉的效率。但是,流化床锅炉存在如下缺点:

(1)对入炉的燃料颗粒尺寸要求较为严格,必须对生物质进行筛选、干燥、粉碎等一系列预处理,使其尺寸、状况均一化,以保证生物质燃料的正常流化。该过程增加了设备投资和能耗。

(2)对于类似稻壳、木屑等比重较小、结构松散、蓄热能力比较差的生物质,必须不断地添加石英砂等以维持正常燃烧所需的蓄热床料,燃烧后产生的生物质飞灰较硬,容易磨损锅炉受热面,并且灰渣混入了石英砂等床料致使难以综合利用^[9]。

(3)为了维持一定的流化床温度,锅炉的耗电量较大,其运行费用也相对较高。

2 生物质高温燃烧的新设想

目前，针对生物质燃烧发电的高品位开发技术主要有气化发电和直燃发电。气化发电技术是将生物质经过多次转换和净化之后再行燃烧，中间环节不但提高了投资运行成本，也降低了生物质能的总利用效率。气化燃气热值低，在稳定运行、焦油清除、气体净化等技术方面还需提高；而直燃发电技术效率较高，且没有焦油带来的二次污染问题，相对而言，直燃发电的优势是明显的。目前的直燃方式由于其燃烧温度低、低熔点飞灰造成的积灰和结渣以及燃烧过程中会产生对人体健康有害的颗粒排放物等一系列的问题，限制了这种粗放的应用方式。另外，由于生物质含水率大，燃烧产生的热量很多浪费在水分的蒸发上，使得生物质在固定床和流化床的燃烧热量利用率较低，所以，研究开发高效燃烧富含水分的生物质技术是直燃技术的一个难点。

2.1 无焰燃烧技术

针对生物质能利用的一系列问题，中国科技大学热科学和能源工程系燃烧研究室将高温低氧无焰燃烧技术应用于生物质的直接燃烧，并采用液态排渣技术、分级燃烧技术和烟气再循环等技术，提高生物质(秸秆)的燃烧效率，使炉内温度场均匀，提高容积热负荷，降低锅炉制造成本，提高锅炉热效率，解决飞灰引起的积灰与结渣问题，减少污染物的排放，实现了生物质(秸秆)的高效、低污染、经济、安全以及大规模高品位开发利用。目前，已成功研制出天然气在常温空气进气条件下实现无焰燃烧的技术方案，并对蒸汽锅炉进行了试验研究。结果表明，燃烧室温度在1300~1400℃，热效率达到92%以上，比目前国内外最好的同吨位(2t/h)的燃气锅炉的热效率还高3%以上；烟气中NO_x的体积分数小于1×10⁻⁴，CO的体积分数小于0.1×10⁻⁴，无可见火焰(如图1试验照片所示)。以上指标都是由安徽省环境监测中心站和苏州热工研究院现场测量所得，并出具了测试报告。该技术简化了无焰燃烧的实现条件，减少了设备的改造费用，避免了燃烧过程的脉动，实现了连续稳定燃烧，同时保留了高温空气燃烧的能耗低、容积热负荷高、污染排放低等优点^[11, 12]。

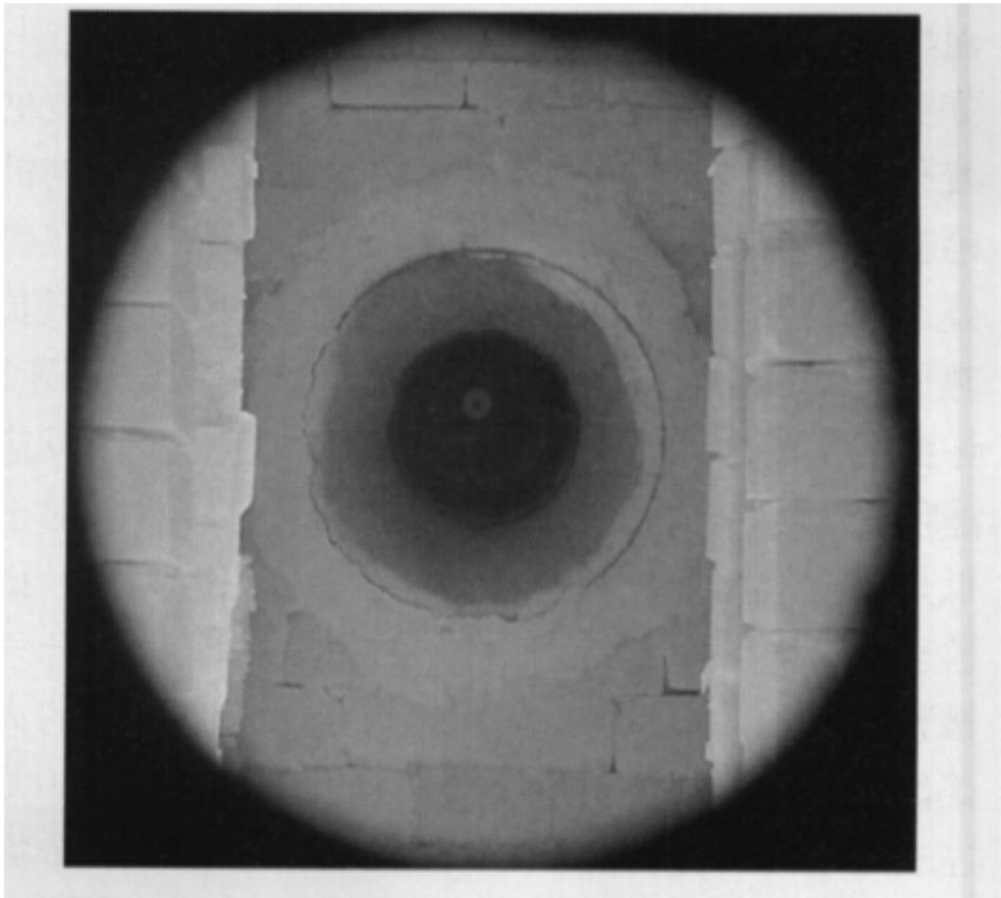


图 1 天然气燃烧试验照片

2.2 超焓燃烧技术

对生物质(秸秆)实现无焰燃烧、液态排渣是基于Weinberg于1971年提出了超焓燃烧的思想。超焓燃烧是一种将燃烧所产生的热能(或排放的高温废热)，通过热交换器其他方式将部分的热能回收再利用，用以预热反应物、对水加热利用或作其他用途的燃烧方式，如图2所示。

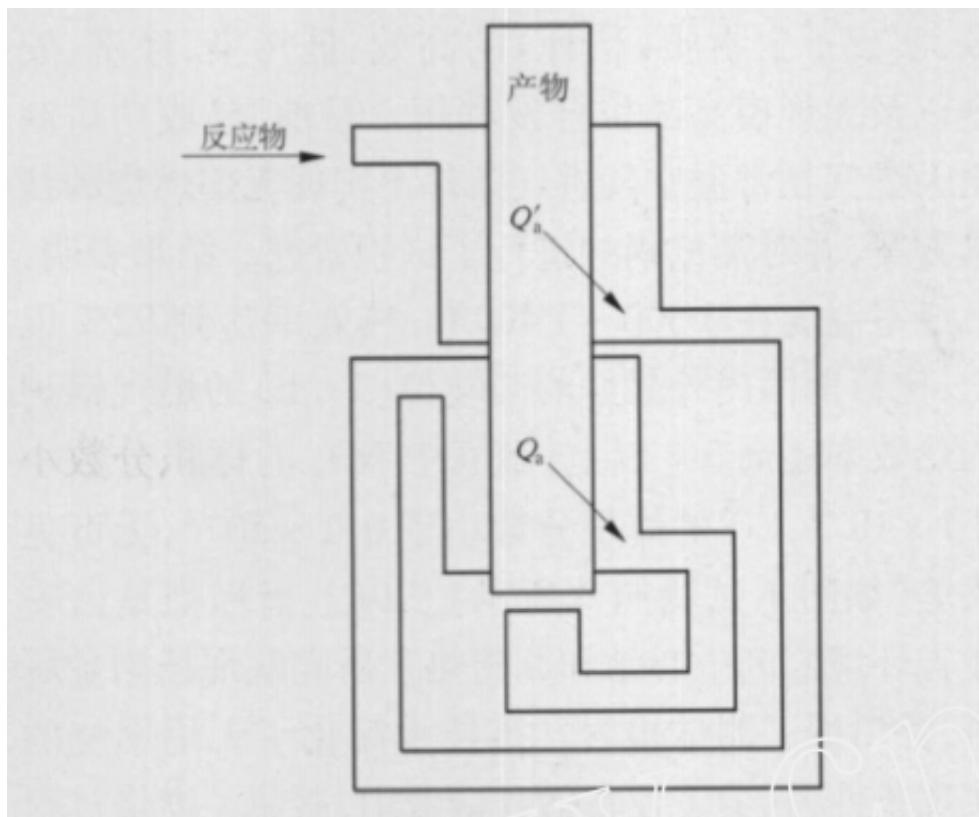


图 2 超焓燃烧示意图

因质量一定混合物的最终绝热火焰温度 T_f 可由下式给出

$$\int_{T_0}^{T_f} c_p dT = Q_c + Q_a + Q_a' = H_f - H_0,$$

- 式中：
- c_p —— 产物的定压热容；
 - Q_c —— 燃烧热；
 - Q_a' —— 反应物与产物的多级换热；
 - H_0 —— 燃烧前焓值；
 - H_f —— 火焰焓值。

根据上式，反应物与产物换热 Q_a 可以提高火焰温度，而温度是影响化学反应速度的重要因素之一，如图3所示。曲线1表示常压下反应速度随温度的变化。曲线2与曲线1一样，但是考虑了反应物的消耗和稀释，温度升高是由于化学反应和/或与热燃烧产物混合。图2的传热方式反应物和生成物只传热而不传质，反应速度与温度之间的关系符合图3中曲线1的规律。因此此类燃烧方式可以提高反应速度，拓宽稳定燃烧范围，增加燃烧的稳定性，对于低热值或低浓度燃料燃烧，具有一定的适用性。试验表明，当体积分数仅为1%的甲烷-空气混合气被预热不到1000 时，就可以产生一个自维持的火焰，尽管它自己的放热对燃烧温度产出仅有250 左右。焓的再循环相当于“在热流中建立了一个堤坝”，使反应物在最高点释放化学能的额外潜能，利用该燃烧方式，可以实现高温燃烧。因此，将超焓燃烧技术应用于低热值的生物质(秸秆)高温燃烧发电技术，可提高系统热效率，目前该项目正在研究过程中。

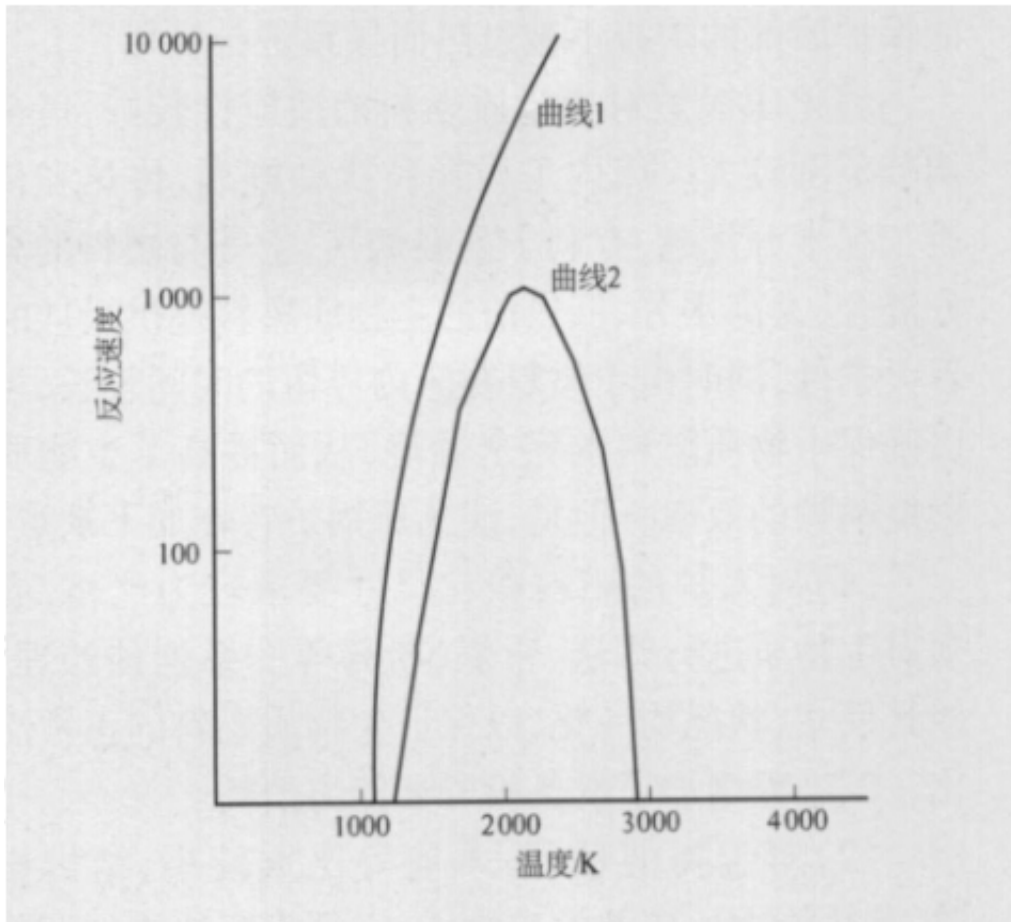


图 3 反应速率 (对数) 随温度的变化

2.3 高温无焰燃烧技术特点

- (1) 改变以往秸秆利用方式，直接进行高温燃烧热利用，从而大大提高燃料利用过程的系统热效率。
- (2) 燃烧过程的高温及无焰燃烧方式，可以使焦油有效裂解、氧化，实现高的燃烧效率和低的未燃可燃物排放。
- (3) 高温燃烧，可以提高燃烧温度(也就是提高了能量品位，增加系统可用能)。
- (4) 实现具有空间放热特征的无焰燃烧方式，炉膛容积热负荷高，温度分布均匀，可以实现非常低的NO_x排放。
- (5) 为生物质热利用提供了具有自主知识产权的工艺技术。生物质利用应该朝着低成本、大规模的趋势发展，因此，该项目具有良好的应用前景。

3 结论

我国是农业大国，生物质资源极其丰富。对生物质能利用技术的深入研究、开发和应用，不但可以充分利用我国现有的生物质资源，而且可以优化农村能源消费结构，减少温室气体排放，维持农村地区生态平衡，为我国经济快速可持续发展做出贡献。我们深信通过对该项目的进一步深入研究，生物质能将会得到更合理有效的利用，这对解决能源短缺和环境污染等问题具有重要意义。

参考文献：

- [1] 肖建民. 论能源过渡和新能源的开发前景[J]. 世界科技研究与发展, 1996, (5): 41~46.
- [2] 蒋剑春. 生物质能源应用研究现状与发展前景[J]. 林产化学与工业, 2002, (2): 75~80.

- [3]董宏林, P.F.Randerson, F.M.Slater.生物质能源转换新技术及其应用[J].宁夏农林科技, 1996, (6): 10 ~ 17.
- [4]吴正舜, 吴创之.4MW 级生物质气化发电示范工程的设计研究[J].能源工程, 2003, (3):14 ~ 17.
- [5]Gil J, CaballeroMA, Martin JA.Biomass gasificationwith air in a fluidized bed ; effect of theIn 2 bed use of dolomite under differentoperation conditions[J].Industrial EngineeringAnd Chemistry Research, 1999, (38): 26 ~ 35.
- [6]AyhanDemirbas.Biomass resource facilitiesandbiomass conversion process for fuel and chemical[J].Energy onversion andManagement, 2001, (42):1357 ~ 1378.
- [7]吴创之.生物质燃气发电技术[J].可再生能源, 2003, (5): 58 ~ 60.
- [8]李伍刚, 李瑞阳, 郁鸿凌.生物质热解技术研究现状及其进展[J].能源研究与信息, 2001, (4): 210 ~ 216.
- [9]别如山, 鲍亦令, 杨励丹.燃生物质流化床锅炉[J].节能技术, 1997, (2): 5 ~ 7.
- [10]张子栋, 别如山, 杨励丹.SZF4-1.25-D型稻壳流化床锅炉的研制[J].节能技术, 1995, (5): 8 ~ 12.
- [11]林其钊, 王宝源.一种采用稀薄-无焰燃烧方式的燃气或燃油锅炉[P].中国专利: 200520071611.1, 2006-08-16.
- [12]邢献军, 林其钊.常温空气无焰燃烧中CO生成的研究[J].热能动力工程, 2006, 21(6): 616 ~ 621.
- 原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/83497.html>