

生物质燃料在粮食烘干中的应用

王桂英¹，吴文福²，徐岩²

(1. 吉林大学超塑性与塑性研究所，吉林长春130025；2. 吉林大学生物与农业工程学院，吉林长春130025)

摘要：在全球节能减排、低碳环保的形势下，生物质燃料由于具有来源广、成本低、污染小、可再生等优点而被世界各国以新的形式开发利用。粮食烘干是高能耗的作业，而我国又是多煤贫油的国家，如果将生物质燃料作为粮食烘干的热源，将会更有助于降低粮食烘干成本和保护环境，而开发生物质燃料热风炉将是未来粮食烘干热源装置的趋势。我国自主研发的生物质燃料热风炉的典型代表是稻壳炉，液体和气体生物质燃料热风炉还处于研究阶段，但会随着液体和气体生物质燃料转化技术以及燃油炉、燃气炉制造技术的进步，逐步用于粮食烘干领域。

我国是世界上最大的粮食生产和消费的国家，最新报道显示，2013年我国粮食总产量已超过6亿t。目前我国广大地区的粮食干燥仍然以人工晾晒为主，每年机械化干燥的粮食约为3700万t。据不完全统计，我国干燥1t粮食消耗标准煤0.07t，所以仅粮食干燥一项每年就需耗用约260万t的标准煤^[1]

。我国是以煤作为主要能源的国家，粮食烘干机也多采用煤作为热源。若按照目前我国化石能源的污染物排放系数，消耗260万t标准煤会排放约700万tCO₂，1.9万tSO₂，2万tNO_x和0.72万t烟尘。我国粮食干燥系

统大多没有配备节能减排设备，燃料燃烧产生的CO₂、SO₂

、Na等气体排放物直接排入大气，会对环境造成严重污染。可见粮食烘干是高能耗、高污染的作业，而且随着粮食机械化烘干规模的扩大，需要的能源更多，污染物的排放量会更大。

在目前人类社会正面临着能源危机与环境污染的双重压力下，世界各国都提倡节能减排、低碳环保，如何开发利用清洁能源用于粮食烘干是农业生产的重要议题，生物质燃料是由此应用而生的具有成本低、污染小、可再生的新能源。

1 生物质燃料

生物质燃料是生物质能的载体，将太阳能转化为化学能的形式贮存^[2]

。所谓生物质能，就是太阳能以化学能形式储存在生物质中的能量形式，即以生物质为载体的能量。它直接或间接来源于绿色植物的光合作用，可转化为常规的固态、液态和气态燃料，取之不尽，用之不竭^[3]。

与传统化石燃料相比，生物质能源具有独特的优点：①生物质能源可以通过光合作用再生，与风能和太阳能一样同属可再生能源，资源丰富，可以循环利用。

②生物质在生长中需要的CO₂量相当于作为燃料时排放的CO₂量，CO₂

净排放量近似为0，是碳平衡燃料。③

生物质含硫、氮量低，燃烧时生成的SO₂和NO_x

较少，硫和灰分含量仅为中

质烟煤的1/10左右。研究发现，提供相同能量，煤炭的S

和NO_x

排放量分别是秸秆的7倍和1.15倍，用1万t秸秆替代煤炭能量，烟尘排放将减少100t。因此，在生态环境保护方面，生物质作为能源比煤炭等化石燃料具有更大的优越性。

2 粮食干燥

粮食干燥是指运用粮食干燥机械设备，采用相应的干燥工艺与技术手段，通过人工控制或自动控制粮食的温度、湿度等因素，在不损害粮食品质的前提下，降低粮食中的含水量，并使其达到国家制定的粮食安全贮藏标准^[4]。粮食干燥是粮食产后加工的一个重要环节，也是粮食安全储藏的重要条件之一。

2.1 粮食干燥工艺

按粮食干燥机的工作原理，即谷物与气流运动方向的不同，粮食干燥工艺可分为横流干燥工艺、顺流干燥工艺、逆

流干燥工艺、混流干燥工艺,以及两种工艺的联合。相应的粮食干燥机也有横流式干燥机、顺流式干燥机、逆流式干燥机、混流式干燥机以及顺逆流、混逆流和顺混流干燥机等。无论采用哪种干燥工艺,使用哪种干燥机,都需要供热设备,热源装置是粮食干燥机的关键部件;而且热耗是评定粮食干燥机性能的重要指标之一。我国粮食干燥机单位能耗在 $6700\text{kJ}/(\text{kgH}_2\text{O})$ 左右,而国外发达国家单位能耗约为 $4600\text{kJ}/(\text{kgH}_2\text{O})$,降低干燥机能耗,减少粮食干燥成本,是粮食干燥机设计者和干燥机用户一致的目标。改变能源结构,采用价廉的生物质燃料热源是降低粮食干燥成本行之有效的方法之一。

2.2 粮食干燥的供热装置——热风炉

从热源上分析,我国粮食机械化干燥绝大部分采用热风式干燥。热风干燥属于对流干燥,即使用热空气或洁净烟气作为介质,与粮食直接接触,同时向粮食供热并带走气化的水分。热风炉是粮食干燥设备的主要供热系统。热风炉按供热方式可分为直接供热和间接供热两种。间接加热式热风炉,主要由燃烧室和烟气-空气热交换器组成,即由燃烧室产生高温烟气,通过热交换器间接加热空气,将得到的洁净热风作为热媒,用于干燥工艺过程。间接加热由于经过了换热器环节,不但影响热效率而且增加了庞大的换热装置。相比较而言,直接加热式热风炉,以高温烟气与室外空气混合气体作为热媒,省却换热设备而提高了热效率。粮食作为一种食品,对干燥品质要求较高,需要热媒具有较高洁净度。

一般而言,以煤、稻壳、秸秆等燃料作为热源的干燥系统,由于不易完全燃烧,烟气含有污染物,通常需要配备换热器,间接干燥粮食;以柴油、天然气、煤气等作为燃料的干燥系统,则因燃烧器技术完善,燃烧烟气相对洁净,不需要配备换热设备,可直接干燥粮食。

评价粮食干燥工艺是否完善、合理,应符合高效、节能、无污染的原则,采用生物质燃料热风炉就符合节能和污染小的原则。

3 生物质燃料在粮食干燥中的应用

生物质燃料是一种可再生的新型清洁能源,具有环保节能、低碳减排等特点,用于粮食干燥的热源有广阔的发展前景。

目前用于粮食干燥的生物质燃料主要有3类:①固体燃料,如秸秆、稻壳、成型生物质燃料等;②液体燃料,如生物柴油;③生物质燃气,如沼气、稻壳煤气、生物质发酵制取氢气等气体燃料。

3.1 生物质固体燃料在粮食干燥中的应用

3.1.1 生物质固体燃料的燃烧特性及经济性 生物质固体燃料基本上由有机物组成,其主要组成是粗纤维(包括纤维素、半纤维素、木质素),还有少量的蛋白质、糖类和脂类物质^[5]

,因此燃烧着火点低,如稻壳的燃点为 350°C 。和煤炭相比较,生物质固体燃料的挥发分含量要高的多,材料中焦炭的燃烧着火很大程度上是依靠挥发分燃烧放出的热量来实现的,这与煤粒的着火有很大区别。研究表明,生物质材料的挥发分析出迅速猛烈,而且在挥发分几乎完全燃烧后焦炭才开始燃烧。

生物质固体燃料多数是工农业生产中产生的有机废料,价格低廉,稻壳的价格仅为煤的 $1/6$,柴油的 $1/20$,而稻壳的热值则为煤的 $1/2$,柴

油的 $1/3$ 。即 1kg 的秸秆或稻壳的发热量相当

于 0.5kg 的煤,计算表明, 1hm^2 土地上的玉米秸秆能量能供约 10hm^2

土地上玉米的干燥。可见,燃烧生物质热风炉不仅环境污染程度低,而且由于设备投资小,燃料费用较低,具有很好的经济性。我国现有不同热源热风炉主要指标的比较见表1。

由表1可见,生物质热风炉跟燃煤、燃油热风炉相比,具有污染程度低、设备投资小、热源费用小等特点;虽然电加热装置具有无污染、热效率高等优点,但是电加热使用的是二次能源,热源费用极大。

表 1 不同热源热风炉主要指标比较表

项目	生物质热风炉	燃煤热风炉	燃油热风炉	电加热装置
热源	稻壳、秸秆等	煤	煤油、柴油	电
换热次数	一次换热	一次换热	直接加热	直接加热
热效率	65%~70%	50%~75%	90%左右	95%左右
污染程度	较低	高	较高	无污染
设备投资	较小	较大	小	小
热源费用	很小	小	很大	极大
使用寿命	较短	较短	较长	长

3.1.2 生物质固体燃料在粮食干燥中的应用

燃烧生物质固体燃料的热风炉主要是秸秆燃烧炉和稻壳炉。由于秸秆、稻壳等燃料含水率大，而且成分复杂，变化大，随机性大，不同品种、不同地区、不同季节的秸秆成分不会完全一致，这要求热风炉具有更高的适应性。另外生物废料在燃烧过程中，可能发生烧结现象，影响热风炉的正常运行，烧结与温度、风速和气氛有关，温度是最主要因素，每种生物质燃料都有一定的烧结温度。在设计热风炉时这些因素均应考虑在内。

燃烧技术一般分为固定床、流化床和悬浮燃烧三种形式，相应的生物质燃料燃烧装置主要有层状燃烧装置、流化燃烧装置和扩散燃烧装置三类。生物质层状燃烧控制比较困难，但与其他热风炉相比较，具有造价低、燃料费用低等特点。粉碎后的生物质燃料形状各异，在流化床中不能单独进行流化，通常加入廉价惰性物料如沙子、白云石等来改善流

化性能。采用扩散燃烧方式的炉子，由于在燃烧室中生物质燃料和空气接触较为充分，燃烧完全，温度也较稳定^[6]。

生物质热风炉设计必须采用适合于生物质燃料的结构和措施。在设计中采用逆流燃烧方式，即燃烧火焰方向与进料方向相反，这种燃烧方式使热烟气流经过湿燃料表面，促进了燃料的干燥和水蒸气输送，使燃料易于着火。在配风方面，由于热风炉后部配有引风机，炉膛燃烧方式为微负压燃烧，一次空气通过炉排下的炉渣室吸入，二次空气通过高压鼓风机沿两侧风管切向喷入炉膛。这样既可有效地控制强风将炉排上的飞灰和未燃尽的碳粒吹走，又保证了生物质燃料完全燃烧所必需的大量空气^[7]。目前正在研究和使用的固体生物质燃料热风炉有以下几种。

3.1.2.1 采用传统燃烧方式的层状燃烧热风炉

层燃炉具有多种形式，包括固定床、活动炉排、链条炉排、旋转炉排和振动炉排等，层燃炉适用于含水率高、燃料尺寸变化大和灰分含量高的生物质燃料。设计炉排时需要保证燃料均匀分布，并且保证一次空气在炉排不同区域的均匀供给，灰层能覆盖整个炉排面。层燃炉的另一项重要技术是分阶段燃烧，它将燃烧区域分为初级燃烧室和二次燃烧室，分离了气化和氧化阶段，避免了二次空气过早混合。

黑龙江农垦学院农业工程研究所主持研制的CL-40秸秆燃烧炉，可作为通风干燥仓和干燥机的配套能源设备，该炉单位热量燃料费低，仅相当于煤的1/3，柴油的1/7^[8]。

稻壳热风炉在粮食干燥方面有很好的应用价值，按照降水5.5个百分点计算，使用稻壳热风炉的干燥机与使用燃油炉相比，干燥1t稻谷可以节省6/7左右的能耗成本^[9]。

佳木斯科佳干燥设备厂开发出了适应燃烧稻壳的5LWI-240型燃稻壳热风炉^[10]。

河南科技大学食品与生物工程学院的史艳珍等设计的小型移动式粮食干燥机，是以秸秆、稻壳为燃料的生物质热风炉提供热源的粮食干燥机，经性能试验，可满足粮食干燥要求^[11]。

2006年安徽金锡公司自主研制出了以砻糠、柴、秸秆等农作物废弃物为热源的节能环保型热风炉，为干燥机提供热源，温度可任意设定，热效率高达85%，配置自动恒温通风装置，能瞬间降低干燥层内温度，确保谷物品质，降低破碎率和使用成本，受到用户欢迎。

安徽省近年来粮食干燥机械化发展速度位居全国前列，尤以中联重科股份有限公司为代表，该公司2014年并购奇瑞重工，于2016年推出的5LLS-60生物质热风炉，可使用秸秆、稻壳、木屑等加工而成的生物质燃料。该产品采用全自动恒温干燥技术，可同时连接多台干燥机，独创的配风设计，使热值效率达到95%以上^[12]。

3.1.2.2 改进燃烧方式的旋浮式稻壳热风炉

佛冈县求实机械有限公司于2011年开发了5LXZR旋浮式稻壳热风炉，该热风炉利用稻壳等生物质作燃料，燃料在炉

膛内旋浮燃烧, 电脑自动控制给料, 使稻壳燃烧充分, 热效率>65%。该热风炉稻壳耗量: 30~400kg/h, 发热量: 1256~6699MJ/h, 可产生热风温度: 45~160 °C, 而且粉尘浓度<10mg/m³。因此, 该炉进一步降低了干燥成本, 可代替依赖煤和油为燃料的高能耗传统热风炉, 实现节能降耗, 降低环境污染, 提高综合经济效益, 对粮食等农产品的干燥有着重要意义^[13]。

2003-12-19在由农业部农机化技术开发推广总站与上海三久机械有限公司共同主办的“三久谷物干燥中心应用(稻壳燃烧炉)热能示范发表会上, 推出了粗粮炉干燥系统^[14], 该干燥系统的热源是稻壳炉, 该炉通过电脑自动控制从顶部上料, 底部点火的逆向燃烧方式, 配风从圆柱形炉体的炉墙切向喷入, 旋风保证烟气与空气的良好混和, 燃料燃烧充分。

能实现根据干燥机设定的温度自动调整热风温度和自动控制热风进风量。烘后粮食品质符合标准要求, 干燥成本只有燃油燃烧机的1/10, 也远低于人工晒干干燥方式。通过低温快速干燥, 干燥出的稻谷碎米少, 食味值高。实践证明, 1t稻谷产生的稻壳可干燥3t湿谷, 生产出的稻壳灰还能做有机废料出售, 大幅降低干燥成本^[15]。

吉林大学热能工程系的苏俊林

等研制出用于粮食及其他农副产品干燥的新型热风炉^[16]

。该热风炉采用了气力送料和悬浮燃烧系统, 即生物质燃料(如稻壳)通过二次风机经调节阀和喷嘴喷射到高温炉膛内, 立即着火并且悬浮燃烧, 这种送料方式易调节且完全机械化。炉拱与炉膛及炉排配合形成良好的燃烧区域, 而未燃尽的稻壳连续在倾斜炉排上实现滚动燃烧。喷射、炉拱和倾斜炉排三者有机结合使得此炉实现连续式燃烧, 使生物质燃料——稻壳燃烧完全, 不必人工加料和播火, 节省燃料, 污染小。此炉还采用高强度传热管组成的换热器, 其传热能力比光管强化2~3倍。

沈阳常久机械销售服务有限公司出售的太阳全自动稻壳炉, 是三升农机科技股份有限公司生产的, 该稻壳炉采用固定床及沸腾床相结合, 在燃烧过程中, 稻壳呈浮动状态, 配有二级助燃风, 压缩气体打散, 加强稻壳及烟气的扰动, 促进其挥发成分及细小颗粒的燃尽, 稻壳灰烬呈灰色粉末状, 整机热效率高, 可达80%, 平均稻壳燃烧量仅在100~150kg/h左右, 而且炉膛采用高温耐火泥(包括高纯度重烧镁砂, 以及碳素、石墨)整体浇注而成, 炉膛外框架为优质耐高温合金钢, 配有“8段变频”稻壳输送系统, 全自动精准调控热风温度, 电脑调风装置, 保证干燥温度自动恒温, 作为热源装置, 用于粮食干燥机, 烘后粮食品质符合标准要求。常久公司还自行研发了稻壳炉, 采用双拱炉膛, 用一级粘土砖发碓式砌筑, 用在粮食干燥机上也有一定的优势。

浙江如雷和安徽松志达等粮食干燥机生产厂家也已经应用了稻壳等生物质能热风炉, 尤其是安徽中联重科于2016年推出的DA130旋浮式热风炉, 该机型克服了燃烧稻壳产生黑烟、污染环境的缺点, 是旋浮式稻壳热风炉的典型代表。可见我国直接燃烧生物质固体燃料的热风炉尤其是稻壳炉用于粮食干燥机的技术已经基本成熟。

3.1.2.3使用成型生物质燃料的热风炉

秸秆热值低、密度小、体积大, 将具有一定粒度的生物质原料, 在一定压力作用下(加热或不加热), 可以制成棒状、粒状和块状等各种成型燃料。原料经

挤压成形后, 密度可达1.1~1.4t/m³

, 能量密度与中质煤相当, 燃烧特性明显改善, 火力持久, 黑烟少, 炉膛温度高, 燃烧速度均匀适中, 燃烧所需的氧量与外界渗透扩散的氧量能够较好地匹配, 燃烧波浪减小, 燃烧相对稳定, 而且便于运输和储存。

国外生物质成型燃料的生产制造技术已商品化和规模化, 设备制造规范性强, 但普遍价格昂贵, 能耗较高, 生物质成型燃料也转向了生产应用。而我国从20世纪80年代引进螺旋推进式秸秆成型机开始, 对固体生物质燃料成型技术和成型设备进行研究和开发已有近30年的历史。虽然对生物质固体成型燃料有一定的研究, 而且成功开发出挤压式、液压冲击式、螺杆式等成型燃料生产设备, 但目前企业具备的生物质成型燃料和成型机的生产制造能力比较弱, 技术不成熟, 缺乏行业标准。我国生物质成型燃料和成型机的研究开发能力有待进一步提高, 对使用成型生物质燃料的热风炉, 并将其用于粮食干燥, 有学者进行了初步的研究。

江苏省无锡市惠山区农机化技术推广服务中心的顾靖峰等对间接式秸秆热风炉的设计进行了比较详细的研究和计算分析^[17]

, 为间接式秸秆热风炉的开发提供了理论依据。而且该农机化技术推广服务中心和久川机械设备有限公司共同研究开发的“间接式秸秆热风炉”, 获得江苏省农业机械局颁发的农业机械推广鉴定证书, 目前该产品已投入批量生产, 进入产业化应用阶段。该热风炉采用成型秸秆块(颗粒)燃料, 燃烧室设计结构合理, 燃烧充分; 采用超导热管技术制作

间接式秸秆热风炉的换热器,既提高了换热效率,又延长了热风炉的使用寿命;采用供风风温传感器和送料控制器实现供风风温和风量的缓变控制,自动化程度高,具有国内领先水平。将该热风炉用在粮食烘干机,烘干的粮食品质高,节能环保。该产品与原有燃油热风炉相比,为用户节省使用成本一半以上,减轻环境污染,具有明显的经济效益和社会效益^[18]。

吉林省农业机械研究院的张云硕对一种新型节能环保型热风炉进行了可行性研究。该热风炉使用秸秆致密成型颗粒作为燃料,无换热器,使高温烟气与被加热空气直接混合,热风经由静电除尘器除尘后直接烘干粮食。无换热器使用直混式热风直接烘干减少了热风炉的体积,减少了热损耗,提高了热效率,节省能源可达10%~15%。而且秸秆含硫、氮量低,燃烧后SO₂、NO_x排放量低,采用静电除尘,减少粉尘污染,起到节能环保的目的^[19]。

3.2 液体生物质燃料在粮食烘干中的应用

液态生物质燃料是指采用生物质原料生产的、用于替代汽油和柴油的燃料乙醇和生物柴油。生物柴油是指以油料作物、野生油料植物和工程微藻等水生植物的油脂以及动物脂肪、餐饮废油等为原料,通过酯交换工艺制成的,可代替柴油的一种清洁的可再生燃料。生物柴油环保性能突出,含硫量很低,可减少约30%(有催化剂时为70%)的二氧化硫及硫化物的排放。检测表明,与普通柴油相比,使用生物柴油可降低90%的空气毒性,可降低94%的患癌率。由于生物柴油含氧量高,使其燃烧时排烟少,一氧化碳的排放与柴油相比减少约10%(有催化剂时为95%),生物柴油的生物降解性高^[20]。

我国具有国际领先水平的生物柴油合成技术,2007年全国已建成20家万吨级生物柴油加工企业,年产量约为30万t,我国生物柴油进入了准备推广阶段;但是,用作燃料来烘干粮食最大的阻力是其价格较高,而随着科技的进步和产业化规模的扩大,生物柴油的价格将逐渐降低,使用普通柴油的谷物烘干机就可以改用生物柴油。一些发达国家如美国、日本、俄罗斯在燃油烘干机利用上有着多年的经验,其技术比较成熟先进,可以借鉴。

3.3 生物质燃气在粮食烘干中的应用

3.3.1 生物质气体燃料的特性分析及气化技术

生物质气体燃料主要有沼气和生物质气化燃气。沼气是利用人畜粪便、植物秸秆、野草、城市垃圾和某些工业有机废料等,经过厌氧菌发酵,在菌酵解下可获得一种可燃气,即人工沼气。沼气原料来源广泛、价廉,其低位发热量为20900J/m³,高于一般城市煤气,属于中等发热量煤气。

秸秆汽化燃气是利用农作物秸秆及木本生物质,如谷壳、花生壳、芦苇、树枝、木屑等做原料,经适当粉碎后,由螺旋式给料器加入到气化器,通过不完全燃烧产生粗煤气(发生炉煤气),再经过净化除尘和除焦油等操作得到的燃气,1kg秸秆可产气2m³,燃气的热值大约为5200kJ/m³。

气化技术是生物质能源高效利用的主要方式之一,气化可使低能量密度的生物质从固态转化为可燃气,相对直接燃烧具有燃烧稳定、热效率高、污染少等优点,尤其是PM2.5指数低^[21]。

气化炉原理是生物质在高温缺氧条件下,产生热化学反应的能量转化过程,物质中的碳、氢、氧等元素的原子,在反应条件下按照化学键的成键原理,生成一氧化碳、甲烷、氢气等可燃性气体。气体燃料高效、清洁、方便,生物质气化技术的研究和开发在国内外取得一定的进展,低热值秸秆汽化技术已初步实现了商品化和产业化,我国已生产出各种类型的气化炉。

3.3.2 生物质气体燃料在粮食烘干中的应用

生物质燃气来源广泛,我国目前农村建有大量的沼气工程,我国小型沼气技术及其利用,从技术水平到使用范围,乃至应用数量,在国际上都处于领先地位。因此,将沼气燃气作为烘干粮食的气源可以从农村现有沼气工程或略加改造直接获取,我国稻壳资源丰富,稻壳气化作为烘干能源是将劣质固体燃料转化为优质气体燃料的积极措施。我国以稻壳煤气作为能源用于发电的技术在国际上处于领先地位,将富余稻壳煤气用于粮食烘干也是一种有效的利用途径。用生物质燃气作为热源的粮食烘干装置主要有以下几种实现形式。

3.3.2.1 生物质燃气自动燃烧机

生物质燃气自动燃烧机是针对低热值生物

质(低位热值大于等于4.6MJ/m³)

燃气设计的专用燃烧机。它将燃气的供给、供风、点火、火焰监察及运行调节控制等各部分集合为一个总体,具有

着火可靠、燃烧稳定、稳焰范围宽、燃烧完全无残留、火焰换热效率高等特点，能按程序自动工作，并有预吹风、自动点火、火焰监控、点火保护、熄火保护、燃气欠压保护、空气欠压保护等安全控制功能，可实现燃烧过程的全自动控制。

四川省农业机械研究设计院的熊昌国等自行研制的5HDX4-40型多仓移动循环式秸秆燃气粮食烘干机，采用生物质燃气自动燃烧机转换的热源，烘干介质温度稳定、清洁，卫生符合烘干设备要求^[22]。

3.3.2.2 燃气式红外辐射器

生物质燃气热值普遍较低，应用在燃气热风炉上比天然气困难。与传统的热传导和对流加热技术相比，红外辐射加热具有不需要任何媒介、热损失小、热流密度大、传热速度快、加热惯性小、可控性强等优点。

燃气式红外辐射器是一种低压引射式完全预混燃烧器，而火孔的设置，使得其同样适用于如低热值的生物质燃气。近年来，燃气红外辐射燃烧技术不断发展，李建设等采用全预混燃烧技术研制的大型金属纤维燃气红外辐射板、大功率燃气红外燃烧器等已突破沼气燃烧器稳定燃烧和安全自控问题的技术瓶颈，燃气辐射热效率达86%以上，烟气中CO和NO_x均达到国家有关规定要求的家用燃气燃烧器具排放标准。这就为使用生物质燃气烘干粮食规模发展奠定了坚实的基础。目前，燃气式红外辐射器已广泛应用于锅炉、陶瓷生产、茶叶杀青、纸张烘干等方面。国外学者Niamnuy对燃气式红外辐射联合热空气振动干燥大豆进行了研究，结果表明燃气式红外辐射联合热空气振动干燥比热空气流化床干燥和过热蒸汽流化床干燥能获得更快的干燥速率和更短的干燥时间，大豆的营养成分损失最少^[23]。

3.3.2.3 其他形式

中国林业科学研究院林产化学工业研究所的蒋剑春等利用锥形流化床生物质气化技术在安徽舒城粮食加工厂建立了4683.84×104kK/h稻壳流化床气化供热机组，代替原来利用柴油远红外粮食干燥设备。气化供热系统运行8个多月，替代原有燃油装置，累计节省80t以上的液体燃料，运行效果良好，取得了明显的经济效益^[24]。

4 结论

(1)随着粮食烘干机械化的发展，粮食烘干作业趋向于农村种粮大户的个体行为，热源的选择应该因地制宜；因此生物质燃料是农民比较便利、低成本的选择。

(2)我国在生物质燃料用于粮食烘干上的研究起步较晚，与发达国家相比有一定差距。虽然一些直接燃烧秸秆、稻壳的热风炉技术相对比较成熟，尤以安徽中联重科的旋浮式稻壳炉、三久公司的稻壳炉以及三升公司的太阳全自动稻壳炉为代表，但是由于技术的原因，使用燃油炉和燃气炉用于粮食烘干机的热源装置并不多见。

(3)生物质燃料低碳、环保、可再生，适应粮食干燥节能减排的发展要求，具有广阔的发展前景，随着生物质能转化技术的进步，生物质能源能更好的适应粮食干燥的热源需求。

(4)生物质燃料由固态、液态到气态，提高了能源生产的速度和效率，适应21世纪轻质、虚拟信息时代的工业形式，而且适应人类能源利用的“脱碳”趋势，即能源分子中氢和碳的比率减小；随着液体生物质燃料、气体生物质燃料及燃油炉、燃气炉生产技术的进步，液体、气体生物质燃料将能更广泛地应用在粮食烘干机上。

[参考文献]

[1]范立，吴家正，李晗.我国生物质能源在粮食干燥中的应用[J].粮食与饲料工业，2014(12)：18-22.

[2]雅克·范鲁，耶普·克佩那.生物质燃烧与混合燃烧技术手册[M].田宜水，姚向君，译.北京：化学工业出版社，2008.

[3]梁柏强.生物质能产业与生物质能源发展战略[M].北京：北京工业大学出版社，2013.

[4]王士军，毛志怀，石怀志.粮食干燥工艺分析与探讨[J].农机化研究，2009，31(1)：66-70.

[5]朱文学.热风炉原理与技术[M].北京：化学工业出版社，2005.

- [6]朱文学, 张仲欣, 刘建学, 等.我国干燥用热源的研究和应用现状分析[J].粮食储藏, 2005(4): 40-46.
- [7]刘巍.生物质热风炉的设计与应用[J].工业锅炉, 2010(6): 6-8.
- [8]刘相东, 于才渊, 周德仁.常用工业干燥设备及应用[M].北京: 化学工业出版社, 2005.
- [9]毛海敏.稻壳热风炉的应用价值[J].粮食流通技术, 2005(2): 15-17.
- [10]刘振友, 尹思万, 韩志伟, 等.5LWT-240型燃稻壳热风炉[J].现代化农业, 2005(7): 37-38.
- [11]史艳珍, 任广跃, 段续, 等.小型移动式粮食干燥机的设计[J].干燥技术与设备, 2013, 11(6): 3-7.
- [12]李翼南.粮食烘干机成为中联重科新亮点[N].中国农机化导报, 2016-01-18(4).
- [13]毕顺林, 路少昆.5LXZR旋浮式稻壳热风炉[J].现代化农业, 2011(12): 46-47,
- [14]李慧祥.三久粗粮炉干燥机[J].农业机械化与电气化, 2004(1): 62-62,
- [15]郝瑞.生物质能干燥中心: 科技成就好大米[N].粮油市场报, 2015-04-14(B03).
- [16]苏俊林, 王震坤, 王巍.强化传热生物质燃料热风炉研究[J].节能技术, 2007, 25(2): 160-163.
- [17]顾靖峰, 包锡忠.间接式秸秆热风炉的设计研究与开发[J].农机科技推广, 2013(3): 55-58.
- [18]建农.间接式秸秆热风炉研究开发获国家专利[J].农业装备技术, 2013(3): 13.
- [19]张云硕.一种新型节能环保热风炉的可行性研究[C]//吉林省科学技术协会.低碳经济与科学发展——吉林省第六届科学技术学术年会论文集.长春: 吉林省科学技术协会学会学术部, 2010.
- [20]吴方卫.液态生物质燃料发展的社会经济影响分析[M].上海: 上海财经大学出版社, 2010.
- [21]田原宇, 乔英云.生物质气化技术面临的挑战及技术选择[J].中外能源, 2013, 18(8): 27-32.
- [22]熊昌国, 虞洪章, 张芸.生物质燃气烘干粮食的试验和应用研究[J].四川农业与农机, 2005(2): 28-30.
- [23]NIAMNUY C.NACHAISN M, LAOHAVANICH J, et al.Evaluation of bioactive compounds and bioactivities of soybean dried by different methods and conditions[J].Food Chemistry, 2011, 129(3): 899-906.
- [24]蒋剑春, 应浩, 戴伟娣, 等.锥形流化床生物质气化技术和工程[J].农业工程学报, 2006(sl): 219-224.

原文地址: <http://www.china-nengyuan.com/tech/135811.html>