



低阶煤流化床干燥技术研究

司崇殿^{1,2}, 武建军²

(1. 中国矿业大学 国家煤加工与洁净化工程技术中心, 江苏 徐州 221008; 2. 济宁学院 山东省无机化学重点实验室, 山东 济宁 273155)

摘要: 以空气、氮气和水蒸汽为干燥介质和流化介质, 围绕低阶煤的干燥特性、化学结构变化和干燥能耗等探讨最佳的低阶煤流化床干燥工艺参数; 结合微波干燥技术和微波流化床技术的开发与应用, 开展微波流化床干燥低阶煤理论研究。结果表明: 低阶煤的微波流化床干燥具有较好的工业化前景, 大型化的微波腔设计和流化床干燥设备是未来的研究热点。

关键词: 低阶煤; 干燥技术; 流化床

中图分类号: TK227.11 **文献标志码:** A

文章编号: 1008-5548(2015)01-0091-05

Fluidized Bed Technology in Low Rank Coal Drying Engineering

SI Chongdian^{1,2}, WU Jianjun²

(1. National Engineering Research Center of Coal Preparation and Purification, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China; 2. Key Laboratory of Inorganic Chemistry in Universities of Shandong, Jining University, Jining 273155, China)

Abstract: Taking applying air, nitrogen and steam as the fluidizing medium, the optimal drying process parameters of low rank coal fluidized bed were investigated on the basis of drying characteristics, chemical structure change and energy consumption of low rank coal. Combined with microwave drying technology and microwave-assisted fluidized bed technology, a microwave-assisted fluidized bed drying technology was proposed based the low rank coal large-scale upgrading technology. The results show that the microwave-assisted fluidized bed dryer will be available for industrial use. Large scale of microwave cavity design and fluidized bed drying equipment will be taken into account in the future.

Keywords: low rank coal; dry engineering; fluidized bed

中国褐煤资源保有储量达 1 300 亿 t, 约占全国煤炭总储量的 13%, 但是因其具有含水量大、热值低、易风化和自燃等特性, 使得褐煤利用效率低, 经济性

差, 因此在大规模利用褐煤资源之前必须对其进行干燥提质^[1]。褐煤的干燥技术包括蒸发干燥脱水工艺和非蒸发干燥脱水工艺。前者的代表工艺包括转筒式干燥工艺、流化床干燥工艺、气流床干燥工艺等, 其中干燥气体主要包括高温烟气、蒸汽和过热蒸汽; 后者的代表工艺主要包括热能脱水工艺(如太阳能、微波能和水热能等)、机械挤压脱水工艺(如热压)和有机溶剂脱水工艺(如二甲醚)等^[2]。

流态化技术可以改善流体与颗粒间的接触和传递, 提高过程的生产效率及物质和能源的利用率, 广泛应用于化工、冶金、生化、能源等过程工业的非均相过程。20 世纪 60 年代以来, 流化床干燥器广泛用于医药、化工、食品及建材工业等领域。在干燥过程中, 流化床干燥器内的固体湿颗粒悬浮于干燥介质中, 流体与固体颗粒接触面积较大, 传质传热系数大, 热效率可达 60%~80%^[3]。与其他干燥技术相比, 流化床干燥工艺具有干燥时间短、干燥温度较低、温度分布均匀、易于实现连续化等优点, 因此成为最有潜力的低阶煤大规模干燥提质技术之一。

本文中介绍国内外利用流化床干燥低阶煤的技术发展现状, 同时结合微波干燥技术和微波流化床技术研究现状, 开展微波流化床干燥低阶煤理论研究。

1 传统流化床干燥技术

流化床干燥反应器内流体与煤颗粒充分混合, 增大了 2 相间的传热和传质速率, 床层内温度比较均匀。与低阶煤回转干燥设备相比, 低阶煤的流化床干燥工艺具有物料停留时间短、干燥速率大的优点^[4]。对于低阶煤的大规模脱水提质, 流化床干燥反应器具有设备简单、便于制造、维修方便、易于放大的优点, 而且可以根据低阶煤的含水量, 调整低阶煤在流化床反应器内的停留时间。

研究低阶煤在不同干燥气氛中水分随时间的变化规律, 考察流速、相对湿度、干燥温度、停留时间等参数对低阶煤干燥特性、化学结构和干燥能耗的影响, 可以为低阶煤干燥工艺中试和流化床干燥器的设计提供基础数据, 并为低阶煤流化床干燥器工业应用

收稿日期: 2014-03-13, 修回日期: 2014-04-01。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目, 编号 2012CB214902; 山东省科技发展计划项目, 编号: 2013G0021701; 山东省济宁市科技发展计划项目, 编号 KJ2013003。

第一作者简介: 司崇殿(1982—), 男, 博士, 研究方向为褐煤的流态化干燥技术。电话: 15265879916, E-mail: chongdiansi@126.com。

和低阶煤大规模脱水提质提供理论参考。

1.1 低阶煤的干燥特性

低阶煤的干燥特性与低阶煤的性质和干燥方法紧密相关。低阶煤流化床干燥工艺根据干燥介质不同分为蒸汽流化床干燥、烟气(热空气)流化床干燥和氮气流化床干燥,目前只有蒸汽流化床干燥工艺进入商业化规模的示范装置,而热空气和氮气流化床干燥工艺均处于实验室小试阶段。Zhang 等^[5]以氮气为流化介质研究了 2 种不同褐煤经流化床干燥的质量损失,研究表明,干燥温度越高,气体流量越大,干燥效果越好。Wang 等^[6]采用空气为流化介质研究了不同干燥温度时 3 种 Illinois 煤的干燥特性,流化床干燥器由不锈钢和有机玻璃 2 部分组成,2 部分的高度分别为 380、1 500 mm,直径为 150 mm,煤的干燥主要集中在不锈钢段进行,料层高度分别为 320、200、200 mm,流化气体速度为 1.25 m/s,结果表明,干燥速率随着干燥温度的升高而增大。Calban 等^[7]以空气为流化介质研究了土耳其褐煤在流化床干燥中的质量损失特性,结果表明,干燥温度越高,干燥效果越好,气体流量对褐煤干燥影响不大,褐煤粒径越小,比表面积越大,水分的传递距离越短,干燥效率越高。Calban^[8]还研究了空气为流化介质时低阶煤初始含水量和床层高度对干燥速率的影响,发现初始含水量越大,干燥速率越大,床层高度对褐煤干燥影响不大,但床层高度数值越大,干燥时间越长。

高温烟气(氮气和空气的混合气体)作为干燥介质和流化介质,其热源容易获得,成本较低,热效率高;但是由于低阶煤挥发分含量大,采用高温烟气进行直接干燥存在易着火和爆炸危险,有一定的安全隐患。王海峰等^[3]采用氮气和空气混合气体(模拟烟气)为流化介质,研究了不同粒径、温度和气体流速时通辽褐煤的干燥特性,结果表明,粒径越大,能耗越大,干燥速率越大,温度越高,干燥速率越大,但是温度过高,褐煤容易自燃。阮根健等^[9]发明了一种全自动高水分原煤流化床干燥设备,采用烟气作为干燥介质,同时流化床干燥器排出的细煤粉采用二级旋风分离循环进入干燥器,烟气部分回收预热煤粉,可将煤中含水质量分数由 30%减小为 7%。Tahmasebi 等^[10]以我国蒙东褐煤为研究对象,分别采用氮气和空气为流化介质,采用石英流化床反应器研究了干燥温度、颗粒粒径、流化速度和煤样质量对褐煤干燥速率的影响,结果表明,干燥气体的温度越高,煤粉颗粒越小,流化速度越大,越有利于褐煤干燥。

低阶煤的结构较疏松,煤化程度较低,煤结构的致密度与煤中芳香层片的排列定向度较小,相对于其他煤种,低阶煤在以热空气为干燥介质的流化床干燥

过程中更易氧化,甚至出现煤尘爆炸,因此采用湿空气(空气与水蒸汽混合)作为干燥介质可以有效预防干燥过程中煤尘的爆炸。Kim 等^[11]以 Loy Yang 褐煤为研究对象,以空气和水蒸汽为流化介质,采用微小流化床反应器研究了干燥气氛的温度、相对湿度和流化速度对褐煤干燥速率的影响,结果表明,干燥气氛的温度越高,湿度越小,流化速度越大,越有利于褐煤干燥。

过热蒸汽干燥低阶煤的优势如下:1)安全性高,可减少自燃和爆炸的风险;2)粉尘排放量减少;3)干燥速率大,能效和热效率较高,能耗较小^[2]。Potte^[12]提出的内部热循环的流化床蒸汽干燥低阶煤工艺(WTA),采用过热蒸汽为流化介质,蒸发出的煤中水分经旋风除尘,绝大部分经加压变成压缩蒸汽进入流化床内置换热器,其余部分作为流化介质。采用过热蒸汽进行低阶煤干燥,存在高能耗、高水耗的问题,不适宜我国内蒙古等严重缺水地区。同时,蒸汽直接干燥过程中会有酚、氨等污染物的产生,带来干燥废水的处理问题。

1.2 低阶煤的化学结构变化

低阶煤的结构特征是 H、O 含量大,孔结构发达,表面亲水性强,经干燥后的褐煤置于潮湿的环境中二次吸水现象比较严重。吴戈峰等^[13]利用化学分析法、傅里叶红外光谱(FTIR)法、BET(Brunauer-Emmett-Teller)法,研究了褐煤干燥前后含氧官能团、比表面积和孔容积的变化。结果表明,煤样中含氧官能团含量随干燥温度的升高而减小,在 280 °C 之前主要脱除羧基,280 °C 之后主要脱除酚羟基,孔容积与比表面积随着温度的升高先逐渐减小后增大。周国莉等^[14]对不同干燥方式下的褐煤孔结构和复吸进行研究,结果表明,褐煤的比表面积与孔容积在热风干燥条件下增大,在热压条件下减小,热压条件下的复吸速率和复吸平衡时的含水量均小于热风条件下的。低阶煤流化床干燥前后的孔隙结构与含氧官能团的变化,对研究低阶煤脱水后自燃倾向性以及二次吸水具有参考意义,同时可为低阶煤流化床干燥参数和工艺指标的选择提供参考。

低阶煤干燥提质后的二次吸水取决于褐煤表面结构的变化,含氧官能团对低阶煤干燥后复吸的贡献由大到小的顺序是羧基、酚羟基和羟基、羰基和醚氧基^[15]。Tahmasebi 等^[16]以我国蒙东褐煤为研究对象,研究了氮气和空气气氛下流化床干燥前后褐煤化学结构的变化,煤分子结构中脂肪侧链随着干燥温度的升高而逐渐脱落。在空气干燥条件下,煤中的羧基、羰基和羧酸盐基随着干燥温度的升高而不断分解为 CO 和 CO₂,整个干燥过程没有破坏煤中芳香结构的碳碳双

键。在氮气干燥条件下,煤中的芳香结构的碳碳双键、羰基和羧酸盐基随着干燥温度的升高而不断分解,但是干燥过程中的分解温度为 250 °C,略高于空气气氛下的 200 °C。Tahmasebi 等^[17]研究了过热蒸汽作为流化介质条件下的维多利亚褐煤干燥后的化学结构变化,结果表明,过热蒸汽条件下煤中含氧官能团羧基、酚羟基、羰基和羧酸盐基随着干燥温度的升高而快速分解,而芳香结构的碳碳双键却没有明显的变化。

1.3 低阶煤的流化床干燥能耗

干燥本身是一个重要的耗能过程。流化床干燥过程中,以热风为干燥介质会导致大量的热量随尾气排出,造成流化床干燥设备热能损耗较大,因此低阶煤的流化床干燥必须考虑能量的消耗问题。根据低阶煤流化床干燥过程中恒速干燥阶段和降速干燥阶段的特性,需要进一步研究进气风量、进风温度、物料初始含水量、出风温度等工艺参数对低阶煤流化床干燥能耗的影响。

Aziz 等^[18]以未经任何处理的褐煤为研究对象,采用空气为流化介质,采用流化床反应器研究了不同流化速度和流化床高径比对褐煤干燥能量消耗的影响,相比传统热空气干燥,外部热循环干燥器的能耗减小到 75%,内部换热式流化床干燥器的能耗可以减小到 15%。同时,由于能量需求较少,进入干燥器的空气流速较小,温度较低,因此可以有效地防止高温空气接触带来的褐煤自燃或爆炸的危险。Aziz 等^[19]对内部换热式流化床干燥器的进一步改进,充分利用流化床干燥器气、固分离后的气体,主要包括热空气和褐煤中水分脱除后变成的水蒸汽,提高了流化床褐煤干燥器的能量效率。

WTA 干燥工艺充分利用蒸汽潜热,有效提高了热能利用率。Hoehne 等^[20]研究了加压蒸汽流化床干燥工艺,其原理类似 WTA 工艺。在流化床内部增加了一组通入汽轮机中压蒸汽的管束,研究了蒸汽压力、速率和颗粒大小等因素对流化床中内部换热器与煤样换热系数的影响,结果表明,总传热效率随着压力的增大而提高。苗帅等^[21]发明了一种内加热流化床干燥工艺,采用高温烟气为流化介质,同时采用氮气部分循环,可以避免煤粉的自燃,流化床内置换热器采用导热油提供热量,将煤粉的水分质量分数由 40%减小到 3%。低阶煤流化床干燥过程工艺参数的选择对保证干燥工艺的稳定性、产品质量和成本至关重要。

2 微波流化床干燥技术

2.1 低阶煤的微波干燥

微波干燥的原理如下:微波辐射至煤颗粒内部与水分子相互作用,使水分子进行电场极性运动,水分

子间频繁碰撞产生大量的摩擦热,达到干燥的目的。微波技术具有能量利用高效性、整体性、即时性、选择性以及卫生、安全、无污染的优点,已经应用于低阶煤的改性提质领域^[22]。微波干燥技术利用低阶煤内外部的温度梯度作为传热推动力,利用低阶煤内部迅速产生蒸汽所形成的压力梯度作为传质推动力。崔平等^[23]研究了不同煤种的微波干燥特性,发现微波对煤中的水分内外同时加热,内加热主要通过偶极分子旋转和离子传导机理实现,提高了分子的碰撞频率,有效缩短了煤种脱水的干燥时间。目前,微波干燥改性低阶煤还处于试验阶段。

物料初始含水量、粒径、微波功率和干燥时间等因素决定低阶煤干燥速率的大小。初始含水量越大,低阶煤内部迅速产生蒸汽所形成的压力梯度越大,产生一种“泵”效应,干燥速率越大。Tahmasebi 等^[24]研究了 3 种不同初始含水量低阶煤的微波干燥,在微波功率、干燥时间和煤样质量相同时,初始含水量越大,干燥速率越大。煤中固定碳含量越大,越有利于低阶煤的微波干燥^[23]。低阶煤的粒径越小,微波干燥速率越大,当粒径较小时,干燥速率随着灰分含量的增大而增大^[24]。原因是灰分比煤质更容易吸热,煤灰分经过微波作用后其中部分物质磁化,煤的表面形态趋向平滑化^[25-26]。

低阶煤传统干燥提质后,孔结构经热应力和表面张力的共同作用而发生变形,出现了孔的闭合、崩塌、重组和联通,导致比表面积减小,微孔比例减小,中孔与大孔的比例增大,平均孔径增大。Ge 等^[27]对低阶煤微波干燥后的孔结构进行分析,发现低阶煤的孔容积和比表面积增大,孔隙结构向微孔方向发展,这与低阶煤传统热干燥的结果截然相反。由此可知,传统干燥提质后的低阶煤堆放在空气中极易二次吸水,严重影响低阶煤的脱水效果和提质利用,而微波干燥技术可以有效地抑制低阶煤干燥后的二次吸水^[28]。原因可能是微波辐射后低阶煤的含氧基团数量发生了较明显的变化,亲水性的羧基、酚羟基含量减小,煤表面束缚水、亲水能力减弱^[29]。Zhao 等^[30]在氢气和甲烷气氛下对神府煤进行微波干燥,发现神府煤表面羟基、羧基含量减小,煤表面接触角变大,zeta 电位增大,表面润湿性减小。

2.2 微波流化床干燥技术

如果物料粒径小于微波的穿透深度,物料内部水分迅速汽化不能及时排出,蒸汽在物料内部形成高温、高压的空腔,使物料“膨化”和过热,热能在物料内部积累,导致内部温度急速升高^[29-30],因此微波干燥时常需要辅以对流,对流气体可以带出物料表面的水分,有效缩短干燥时间。

结合流化床干燥技术温度分布均匀、传热传质效率高等优点,耦合微波干燥的流化床干燥设备已应用于医药、食品和化工领域。纪红兵等^[31]发明了一种用于固体颗粒干燥的微波流化床设备,适用于空气为流化介质干燥低熔点、热敏和易氧化的颗粒物料。Emel等^[32]采用空气为流化介质,研究了空气温度和微波功率对面粉微波流化床干燥特性,结果表明,空气温度越高,并且微波功率越大时,干燥时间越短,微波辐射条件下比传统流化床干燥的时间缩短 50%。Ranjbaran等^[33]研究了大豆的微波流化床干燥特性,发现入口空气温度越高,微波能量和入口气体速度越大,干燥速率越大。Sourakia等^[34-35]以玻璃珠为辅助原料,采用间接干燥的方式对大蒜和胡萝卜进行微波流化床干燥,并建立数学模型对反应器内的温度分布和含水量进行了预测。

国内外研究者在对微波流化床进行数值模拟时,均假设干燥过程中物料的变形很小,物料内部的水分全部以液态水的形式扩散到物料表面,而且物料各向同性^[36-38]。Ranjbaran等^[33]基于非平衡动力学理论建立了数学模型,对微波流化床干燥传热传质进行分析,结果表明,增大微波场的功率和入口空气速度,提高干燥空气温度会使实验物料大豆的干燥速率增大,干燥时间缩短。Momenzadeh等^[39]基于人工神经网络对微波流化床干燥进行了数值模拟,研究对象采用玉米粒,数值计算得到的干燥速率与实验结果吻合较好。Sizgek等^[40]研究了水和硝酸盐溶液不同介电常数下多孔陶瓷微球的微波干燥特性,硝酸盐溶液条件下流化床内的升温速率更大,原因是物料单位时间内吸收的微波能量与介电常数成正比。

微波流化床干燥过程是一个非常复杂的传热传质过程。微波流化床干燥技术具有热能利用率高、干燥快、干燥均匀、不易产生局部过热和易于控制的优点。由于微波场由电场和磁场组成,微波场内各点的微波能量密度大小不同,因此会影响流化床干燥反应器内微波场的均匀性。实现严格意义上的均匀微波场流化床干燥技术,需要对微波发生器的谐振腔结构设计进行大量的实验和数值模拟。

3 展望

目前国内外低阶煤的流化床干燥技术大多仍处于实验研究或示范性工程化阶段,要实现低阶煤的大规模高效提质干燥,应在以下几个方面开展相应的工作:

1) 低阶煤的流化床干燥特性主要集中于干燥操作参数和物料含水量变化的研究,关于干燥过程理论的研究较少,特别是不同干燥阶段干燥速率的研究。低阶煤微观结构对干燥传递现象的影响,以及流化床干燥

理论和干燥模型化的结合也需要开展相应的研究。

2) 微波流化床干燥低阶煤的研究。在低阶煤传统流化床干燥技术的基础上,耦合能量密度均匀的微波场使微波能量激发低阶煤内部水分子的振荡,增大低阶煤内外的温度梯度,增大低阶煤干燥的传热速率。同时,大型化的微波发生器谐振腔结构设计和工业化的微波流化床干燥设备制造仍需要大量的基础实验数据。

3) 针对低阶煤微波流化床干燥过程的能耗和产品质量(如复吸)研究,开展低阶煤的热风耦合微波流化床干燥工艺、微波流化床干燥-热解-汽化耦合等工艺,为实现低阶煤的大规模资源化利用提供数据参考。

参考文献(References):

- [1] 董爱霞, 张守玉, 郭熙, 等. 单颗粒褐煤高温烟气干燥过程研究[J]. 煤炭转化, 2013, 36 (1): 59-64.
- [2] 沈望俊, 刘建忠, 虞育杰, 等. 低品位热源干燥低阶煤技术研究进展[J]. 热力发电, 2013, 42 (5): 1-7.
- [3] 王海峰, 朱书全, 任红星, 等. 通辽褐煤在流化床干燥器中的干燥特性研究[J]. 选煤技术, 2007, 4 (4): 43-47.
- [4] HASSAN K, RAJENDER G. Low-grade coals: a review of some prospective upgrading technologies [J]. Energy Fuels, 2009, 23 (7): 3392-3405.
- [5] ZHANG K, YOU C F. Experimental and modeling investigation of lignite drying in a fluidized bed dryer [C] // Proceedings of the 20th international conference on fluidized bed combustion, 2009: 361-366.
- [6] WANG W C. Laboratory investigation of drying process of Illinois coals[J]. Powder Technology, 2012, 225 (7): 72-85.
- [7] CALBAN T, ERSAHAN H. Drying of a Turkish lignite in a batch fluidized bed[J]. Energy Sources, 2003, 25 (12): 1129-1135.
- [8] CALBAN T. The effects of bed height and initial moisture concentration on drying lignite in a batch fluidized bed [J]. Energy Sources: A: Recovery Utilization and Environmental Effects, 2006, 28 (5): 479-485.
- [9] 阮根健, 谢圣言, 王明文, 等. 全自动高水分原煤流化床干燥设备: 中国, 01249079.2[P]. 2002-06-12.
- [10] TAHMASEBIA, YU J L, HAN Y, et al. A study of chemical structure changes of Chinese lignite during fluidized-bed drying in nitrogen and air[J]. Fuel Processing Technology, 2012, 101: 85-93.
- [11] KIM H S, MATSUSHITA Y, OOMORI M, et al. Fluidized bed drying of Loy Yang brown coal with variation of temperature, relative humidity, fluidization velocity and formulation of its drying rate[J]. Fuel, 2013, 105: 415-424.
- [12] POTTER O E, KEOGH A J. Drying high-moisture coals before liquefaction or gasification[J]. Fuel Processing Technology, 1981, 4 (2/3): 217-227.
- [13] 吴弋峰, 初莱, 畅志兵, 等. 干燥提质对褐煤表面结构的影响[J]. 煤炭工程, 2012, 13 (2): 99-101.
- [14] 周国莉, 武建军, 李国宁, 等. 不同干燥方式对褐煤孔结构及复吸特性的影响[J]. 煤炭科学技术, 2012, 40 (10): 100-103.
- [15] 王娜, 朱书全, 杨玉立, 等. 含氧官能团对褐煤热态提质型煤防水

- 性的影响[J]. 煤炭科学技术, 2010, 38 (3): 125–128.
- [16] TAHMASEBI A, YU J L, HAN Y, et al. A study of chemical structure changes of Chinese lignite during fluidized-bed drying in nitrogen and air[J]. Fuel Processing Technology, 2012, 101: 85–93.
- [17] TAHMASEBI A, YU J L, BHATTACHARY S. Chemical structure changes accompanying fluidized-bed drying of Victorian brown coals in superheated steam, nitrogen, and hot air[J]. Energy Fuels, 2013, 27 (1): 154–166.
- [18] AZIZ M, KANSH Y, TSUTSUMI A. Self-heat recuperative fluidized bed drying of brown coal [J]. Chemical Engineering and Processing, 2011, 50 (9): 944–951.
- [19] AZIZ M, KANSH Y, KISHIMOTO A, et al. Advanced energy saving in low rank coal drying based on self-heat recuperation technology[J]. Fuel Processing Technology, 2012, 104: 16–22.
- [20] HOEHNE O, LECHNER S, SCHREIBER M, et al. Drying of lignite in a pressurized steam fluidized bed theory and experiments [J]. Drying Technology, 2010, 28 (1): 5–19.
- [21] 苗帅, 马训强, 邢召良, 等. 氮气循环煤粉气流内加热流化床干燥工艺: 中国, 200610045527.1[P]. 2007–01–03.
- [22] 郝瑛轩, 刘全润, 李国. 内蒙褐煤微波热解特性研究[J]. 煤炭转化, 2013, 36 (4): 1–5.
- [23] 崔平, 王知彩, 胡政平, 等. 微波作用下的细粉煤脱水研究[J]. 燃料化学学报, 2002, 30 (2): 178–181.
- [24] TAHMASEBI A, YU J L, LI X C, et al. Experimental study on microwave drying of Chinese and Indonesian low-rank coals[J]. Fuel Processing Technology, 2011, 92 (10): 1821–1829.
- [25] MEIKAP B C, PUROHIT N K, MAHADEVAN V E. Effect of microwave pretreatment of coal for improvement of rheological characteristics of coal-water slurries[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2005, 281 (1): 225–235.
- [26] DELIBALTA M S, TORAMAN O Y. The effect of microwave energy on grindability of a turkish high-ash coal [J]. Energy Science and Technology, 2012, 3 (2): 46–49.
- [27] GE L C, ZHANG Y W, WANG Z H, et al. Effects of microwave irradiation treatment on physicochemical characteristics of Chinese low-rank coals [J]. Energy Conversion and Management, 2013, 71: 84–91.
- [28] 王爱英, 程军, 刘建忠, 等. 微波加热对褐煤干燥及成浆特性的影响[J]. 能源工程, 2012, 13 (1): 1–6.
- [29] TAHMASEBI A, YU J L, HAN Y, et al. Study of chemical structure changes of Chinese lignite upon drying in superheated steam, microwave, and hot air [J]. Energy Fuels, 2012, 26 (6): 3651–3660.
- [30] ZHAO W, YANG F S, LI Y G, et al. Influence of microwave treatment under a hydrogen or methane atmosphere on the flotability of the macerals in Shenfu coals[J]. Mining Science and Technology (China), 2011, 21 (6): 761–766.
- [31] 纪红兵, 曾晖, 茹赛红. 一种用于固体颗粒干燥的微波流化床设备: 中国, 201220174418.0 [P]. 2012–11–07.
- [32] EMEL I G, GULUM S, ALI E. Effect of microwave on fluidized bed drying of macaroni beads [J]. Journal of Food Engineering, 2005, 66 (4): 463–468.
- [33] RANJBARAN M, ZARE D. Simulation of energetic- and exergetic performance of microwave-assisted fluidized bed drying of soybeans [J]. Energy, 2013, 59 (15): 484–493.
- [34] SOURAKI B A, MOWLA D. Experimental and theoretical investigation of drying behaviour of garlic in an inert medium fluidized bed assisted by microwave[J]. Journal of Food Engineering, 2008, 88 (4): 438–449.
- [35] SOURAKI B A, ANDRÉS A, MOWLA D. Mathematical modeling of microwave-assisted inert medium fluidized bed drying of cylindrical carrot samples[J]. Chemical Engineering and Processing, 2009, 48 (1): 296–305.
- [36] CHEN G H, WANG W, MUJUMDAR A S. Theoretical study of microwave heating patterns on batch fluidized bed drying of porous material[J]. Chemical Engineering Science, 2001, 56 (24): 6823–6835.
- [37] WANG Z H, CHEN G H. Theoretical study of fluidized-bed drying with microwave heating [J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 2000, 39 (3): 775–782.
- [38] FENG H. Analysis of microwave assisted fluidized-bed drying of particulate product with a simplified heat and mass transfer model [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2002, 29 (8): 1021–1028.
- [39] MOMENZADEH L, ZOMORODIAN A, MOWLA D. Experimental and theoretical investigation of shelled corn drying in a microwave-assisted fluidized bed dryer using artificial neural network [J]. Food and Bioproducts Processing, 2011, 89 (1): 15–21.
- [40] SIZGEK E, IZGEK G. Drying characteristic of porous ceramic microspheres in a microwave heated fluidised bed [J]. Chemical Engineering Technology, 2002, 25 (3): 287–292.