煤与生物质共热解工艺的研究进展

何玉远1，常春1,2，方书起1,2，陈俊英1,2，李洪亮1,2，马晓建1,2

(1.郑州大学化工与能源学院，河南郑州450001；2.生物质炼制技术与装备河南省工程实验室，河南郑州450001)

摘要：热解是将固态原料转化为液体燃料、可燃气和焦的重要途径，是实现生物质资源清洁、高效利用的重要技术。将生物质与煤混合共
热解是生物质资源利用的重要方法，两者混合
热解不仅有助于降低CO_2
的排放量，还能有效地解决能源短缺和环境污染带来的问题。文章综述了煤与生物质共热解技术的研究进展，系统地介绍了共热解过程中煤与生物质的相互作用以及热解温度、混合比例、滞留时间、升温速率、矿物质成分、物料粒径和热解反应器类型等因素对热解过程的影响，并对煤与生物质共热解技术的发展前景进行了展望。

0前言

工业革命以来，化石资源的过度开发带来了资源短缺、环境污染、温室效应和全球气候变化等一系列问题[1]。我们必须要加快能源结构体系的调整，加快可再生能源的开发、利用，以及实现资源的分级转化与梯级利用。生物质是一种重要的可再生资源，具有与化石燃料相似的一些特性，能够部分替代化石能源，维持环境碳平衡，并具有较低的硫含量[2]。生物质的利用不仅可以充分发挥农林废弃物等资源的价值、降低化石燃料的消耗，还可以降低燃料燃烧过程中污染物的排放量[3]。

与燃烧相比，热解能够实现生物质资源的高效、清洁利用，煤炭与生物质都可以通过热解的方式得到焦炭、热解气和焦油，并进一步合成化工原料，提取化工中间体[4]。目前，对于煤和生物质单独热解气化方面的研究比较多。Frau Caterina利用Sotacarrrbo型小规模气化炉对褐煤和木屑分别进行气化实验，当气化原料的进料速率同为24kwh时，获得的两种粗合成气的产率分别为79.67kg/h和23.32kg/h，热值分别为5.14MJ/kg和7.49MJ/kg[5]。Li利用新型热解反应器对废木屑进行热解试验，在填料速率为300kg/h，热解温度为500°C的工况下产物中焦油、合成气和焦炭的含量(质量分数)分别为52.5%，27%和20.5%[
6]。相比于单独热解.煤与生物质的共热解不仅可以减少C
O_2，SO_x和NOx的排放，减少因厌氧发酵而产生的NH_3，H_2
S、氨基化合物和挥发性有机酸等化学成分的释放.而且可以改善生物质资源自身水分含量高、热值低和密度低等不利于单独热解的问题。

由于煤与生物质混合热解的状况更加复杂.因此.通过煤与生物质混合热解来获取目标产品的技术仍处于研究阶段。本文对煤与生物质共热解的研究成果进行对比、分析，论述了热解因素对煤与生物质共热解过程的影响，并尝试对热解结果进行理论分析，以期为相关领域的研究提供参考。

1煤与生物质共热解的相互作用

一般来说，煤的含碳量较高、含氢量较低，反应活性较低；而生物质中挥发分和氢的含量较高，反应活性也较高.对环境有害的微量元素和固定碳的含量较低，燃点也较低。生物质与煤具有基本相同的元素组成，但是，它们的相对含量却不同(表1)[8]。正是由于煤与生物质之间存在差异与相似并存的情况。使得研究两者在不同条件下的作用机制具有较高的价值。

表1 煤与生物质共同参数的均值和范围

Table 1 Mean and range values for common parameters of coal and biomass

分类	工业分析/%				元素分析/%				
	挥发分	固定碳	水分	灰分	C_{ad}	O_{ad}	H_{ad}	N_{ad}	S_{ad}
煤	30.8 (12.2~44.5)	43.9 (17.9~70.4)	5.5 (0.4~20.2)	19.8 (5.0~48.9)	78.2 (62.9~86.9)	13.6 (4.4~29.9)	5.2 (3.5~6.3)	1.3 (0.5~2.9)	1.7 (0.2~9.8)
生物质	64.4 (30.4~79.7)	16.0 (6.5~35.3)	14.7 (2.5~62.9)	4.9 (0.1~34.3)	51.1 (42.2~60.5)	41.1 (20.8~49.0)	6.2 (3.2~10.2)	1.1 (0.1~12.2)	0.2 (0.01~1.69)

目前，煤与生物质共热解过程的机理尚处于研究阶段，研究者通过对煤与生物质的共热解过程的研究大致得到两种

结论，即煤与生物质共热解过程存在协同作用和非协同作用。在煤与生物质共热解的协同作用方面，研究者认为，产生协同作用的主要原因是自由基的相互作用和碱金属/碱土金属的催化作用。煤与生物质在热解过程中均会产生部分自由基，自由基之间又会重新聚合，生成焦油或者热解气。由于生物质的热解温度相对较低，能够首先产生H，OH等富氢活性自由基，并与煤炭表面形成的自由基相结合，促进了煤炭热解反应的发生。自由基反应机理如图1所示。同时，在煤与生物质共热解过程中，生物质所富含的K，Ca等元素内嵌于焦的颗粒内部和表面，形成较多的活性位点，促进了热解反应的进行和挥发物的生成，减少了焦炭的形成[9]。

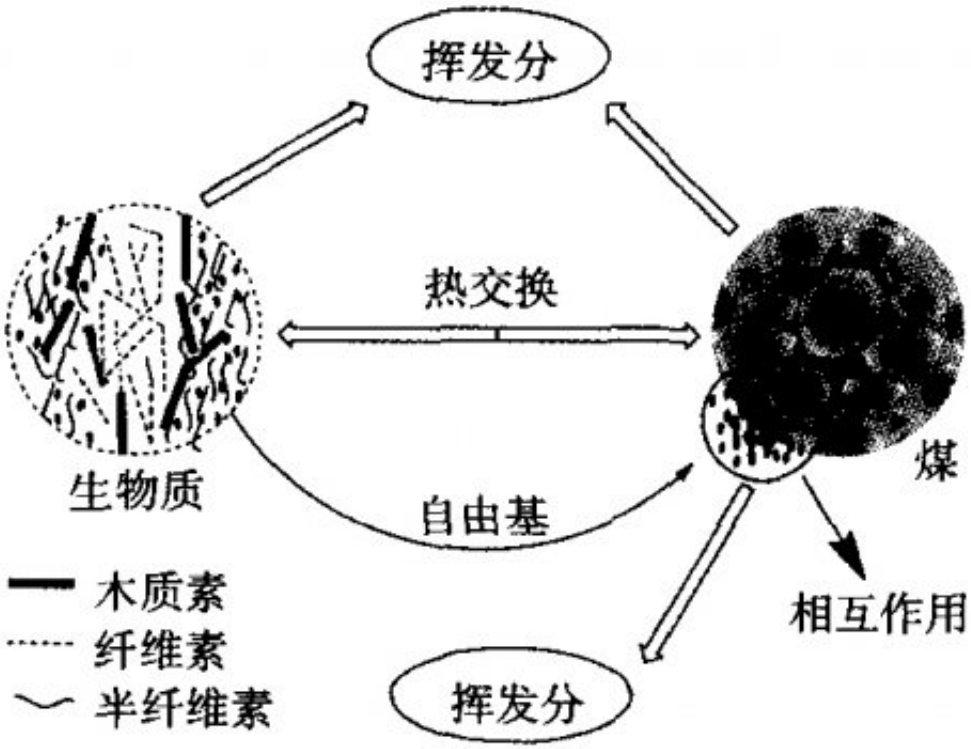

图 1　煤与生物质共热解自由基协同作用机理

Fig.1 Synergistic mechanism of the co-pyrolysis for biomass and coal by free radical

由于煤与生物质的理化性质差别很大，因此，两者的热解过程也有所不同。部分学者认为，煤与生物质共热解过程中交互作用较少，在产品产率、组成成分等方面均呈现出线性关系。不存在协同作用。虽然煤与生物质在热解方面有许多相同的特性，但是煤与生物质单独热解的温度范围并不重叠[10]。生物质中多为低温下就可以断裂的醚键(R-O-R)，醚键的键能为380～420kJ/mol，而煤中多为键能较高的多环芳烃键，其键能高达1000kJ/mol[11]。因此，一般情况下，煤热解过程很难利用生物质热解所产生的挥发分。Vuthaluru以次烟煤、木材废料和麦秆为原料。将煤与生物质以不同的混合比例进行共热解实验，通过对焦的产率与混合比例的数据进行拟合，发现焦炭的产率与混合比例呈直线关系，从而得到两者在生成焦炭的过程中缺乏协同作用的结论[12]。

2不同因素对共热解的影响

煤与生物质共热解过程是一个非常复杂的热解过程，受很多因素的影响，如热解温度的高低、混合比例的大小、挥发分滞留时间的长短、升温速率的快慢、矿物质的成分、粒径的大小以及热解反应器的类型等。

2.1热解温度

煤与生物质共热解是一种复杂的热化学反应过程，包括质量和能量的传递转化，其过程如图2所示。一般情况下，热解过程中的化学反应分为3个部分：①样品液化，固体样品分解为不可冷凝气体、可冷凝气体(焦油)和固体残渣(半

焦)；②释放的气体和部分焦油进行二次气相反应；③同体和气体之间的非均相反应[13]。在热解过程中.温度的高低能够对气体组成、气体产率、碳转化率、焦的孔隙率、焦油和焦炭的产率等造成影响，因此，热解温度是热解过程中最重要的操作参数之一[14]。

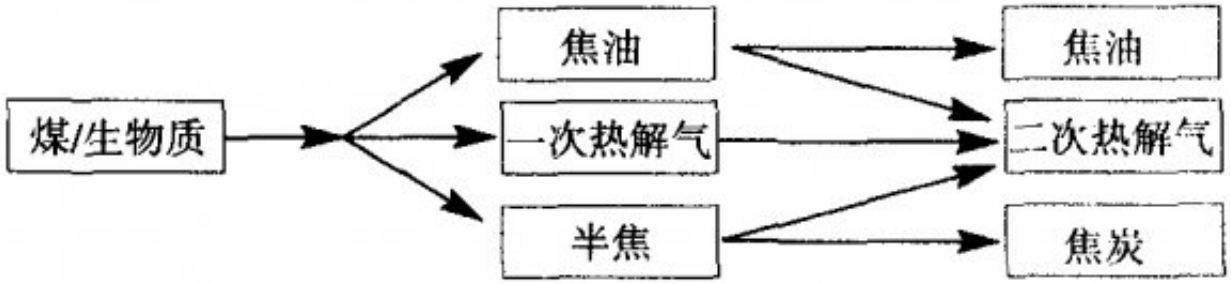

图 2　热解过程

Fig.2 Process of pyrolysis

煤的热解包括3种类型，即低温热解(<600°C)，中温热解(600～800°C)和高温热解(>800°C)。热解产生的挥发分主要包含可快速冷凝形成焦油的可凝气和不可冷凝气两部分。在低温热解时，生物质中的半纤维素和纤维素首先进行分解，在煤何玉远。等煤与生物质共热解工艺的研究进展的周围形成较高浓度的挥发分，挥发分中的自由基与煤中大分子解聚生成的小分子相结合，从而释放出更多的挥发分，且这些挥发分容易凝结成焦油。当热解温度继续升高，挥发分中越来越多的焦油大分子通过二次裂解生成小分子的气体烃.且混合物中大分子的碳氢化合物会随着热解温度的升高而发生脱氢和氢化反应，导致CH_4，C_2H_4和C_2H_6的含量增加[15]。热解温度超过800°C时，生物质半焦热缩聚生成的焦炭富集在煤颗粒表面。使得煤内部挥发分的释放变得困难，而已经释放出的挥发分发生了更加彻底的二次裂解反应，生成较多的小分子可燃气。煤颗粒继续热缩聚，使得焦炭产率降低，最终形成富碳的混合固体残渣。

Park以落日松的木屑和次烟煤为原料，采用固定床反应器进行共热解实验。实验结果表明：在低温条件下，纤维素和半纤维素分解产生的羧基基团形成了CO_2(占气体总量的55%～61%)；当热解温度超过600°C后，随着热解温度的上升，越来越多的挥发分发生二次裂解反应，使CO_2的产率下降到25%～34%：随着热解温度的持续上升。CO和CH_4的产率增加了3倍.当热解温度为800°C时，CO和CH_4的产量占总产气量的60%以上[16]。在低温下选择挥发分、H/C比、氧含量比较高，并具有较多羧基、羰基和氧桥的低阶煤与生物质共热解，不仅能够提高煤的转化率，还能够增加焦油中轻质组分的质量，从而改善焦油品质，并实现某些附加值高的化工产品的富集[17]。由于生物质种类的多种多样，因此，可以选择能量密度较大的生物质在中、高温条件下与煤进行混合热解。从而制取高品质的燃气和焦炭。

2.2混合比例

生物质的挥发分含量较高，挥发分裂解产生的自由基相互结合，有利于合成较多种类的烷烃。煤与生物质共热解过程中，当生物质的比例较低时，生物质颗粒被煤颗粒所包围，生物质热解产生的挥发分需要穿过层层煤粒，从而起到辅助煤热解的作用。何选明将内蒙古长焰煤与浮萍按不同的质量比混合并进行共热解实验。实验结果表明，随着生物质比例的增加，焦油的产率从8.74%递增至18.58%，烷烃类的含量由40.62%增加至43.26%[18]。Soncini以次烟煤、褐煤和和黄松木为原料，采用自由落下床为热解反应器进行混合热解实验。实验结果表明：生物质释放的氢基自由基能够与煤中较为稳定的芳香族化合物相互作用；在快速热解过程中增加生物质的比例，能够使煤焦结构的空隙率增加，在煤热解初级阶段形成较为稳定的自由基，从而促进焦油的产生[19]。煤与生物质共热解过程中。当生物质的比例较高时，煤颗粒被生物质颗粒所包围，两者发生协同作用的概率也就越高。

2.3滞留时间

在热解过程中，滞留时间分为固相滞留时间和气相滞留时间。随着固相滞留时间的延长，固态产物所占的比例增大，气相产物相对减少。在热解反应器中，气相滞留时间越长越容易发生二次裂解.从而导致液态产物的减少，但是较

短的滞留时间使得生物质颗粒表面的热传递过程受到抑制，最终导致热解效率的降低，因此，可以通过优化滞留时间来得到高品质的生物油[20]。由于二次反应的发生。热解气的滞留时间也是影响煤最终热解产物的一个重要因素。考虑到传热与传质的影响，在实际热解过程中，适当延长气体滞留时间可以促进二次反应的进行。朱廷钰通过自制的鼓泡流化床反应器研究了气体滞留时间对热解过程的影响.发现在气体滞留时间为18.2S时，神木煤热解的焦油产率最高，随着气体滞留时间的延长，焦油产率呈现出先增加后降低的变化趋势[21]。这是因为气体滞留时间较短时，发生二次反应的焦油较少，随着气体滞留时间的延长，越来越多的焦油分子发生了二次反应，生成了较多的热解气。

2.4升温速率

升温速率主要通过影响煤与生物质颗粒达到热解所需温度的时间和颗粒内外的温差.从而对热解过程产生影响。一方面，随着升温速率的增加，煤与生物质颗粒达到某一温度的响应时间变短，有利于热解；另一方面，升温速率的增加加大了煤与生物质颗粒表面与内部的温差.使得传热滞后，从而影响煤与生物质颗粒内部的热解过程。随着煤与生物质颗粒内部温度的上升。颗粒内部的挥发分穿过颗粒表面得到释放。而外部的热量继续穿过颗粒表面进入内部，所以，在热解反应器中，煤与生物质颗粒的传热、传质方向相反。升温速率主要分为慢速升温、快速升温和瞬时升温，对应的升温速率分别0.1-1，1-200，1000-5000°C/s，其中，快速升温和瞬时升温之间没有明确的界限[22]。

Marcilla对微藻分别进行慢速、快速和瞬时热解实验，发现慢速热解获得的热解产品分别为35%的生物炭、30%的生物油和35%的合成气：快速热解获得的热解产品分别为20%的生物炭、50%的生物油和30%的合成气；瞬时热解获得的热解产品分别为2%的生物炭、75%的生物油和13%的合成气[23]。所以，升温速率越高，越有利于焦油的生成。生物油腐蚀性强、热值低、粘度大且化学性质不稳定，而且生物油中酚类、苯类等物质的含量较高。有研究表明，酚类、苯氧自由基等物质具有打开煤中较弱的化学键。促进煤解聚的功能[24]。同时，升温速率越高，煤受到的冲击越强烈，煤中的单元桥键、脂肪侧链和含氧官能团迅速裂解，产生大量自由基碎片，而这些碎片易与生物质的挥发分相结合[25]。因此，快速和瞬时升温能够很好地解决生物质与煤热解温度区间不一致的问题。目前，国内外多采用自由落下床反应器实现煤与生物质的快速热解。原料在下落的过程中吸收辐射热，从而在短时间内升至终温并迅速热解[26]。

2.5矿物质成分

在煤热解过程中可加入催化剂以达到提高煤热解转化速率、调控热解产物的分布、促进热解产物的定向转化和提高产品品质的目的[27]。生物质和煤灰分中所含的矿物质成分(以空气干燥基为基准)如表2所示。从表2可以看出，生物质灰分中一些碱金属、碱土金属的含量比煤灰分约高出3倍以上。

表 2　煤与生物质灰分中部分矿物质的均值和范围

Table 2 Mean and range values for mineral substances of ash from coal and biomass

矿物质成分	煤灰分/%	生物质灰分/%
CaO	6.57(0.43~27.78)	25.99(0.97~83.46)
K_2O	1.6(0.29~4.15)	19.40(2.19~63.90)
Al_2O_3	23.18(11.32~35.23)	4.49(0.10~15.12)
MgO	1.83(0.31~3.98)	5.60(0.19~16.21)
Fe_2O_3	6.85(0.79~16.44)	3.41(0.22~36.27)
Na_2O	0.82(0.09~2.90)	2.54(0.09~29.82)
TiO_2	1.05(0.62~1.61)	0.24(0.01~2.02)

煤热解过程中产生的碱金属和碱土金属会与煤自身的-OH和-COOH结合，并与煤焦混合在一起形成交联结构，阻碍了焦油分子的逸出并促使焦油发生缩聚反应，增加焦炭的产率。碱土金属氧化物CaO不仅能够提高煤热解转换率.还可以催化秸秆类热解挥发分的裂解，提高产气中H_2的体积分数与产率[28]。在快速热解条件下，钙基催化剂对焦油的催化裂解作用也十分明显。使得气体和焦炭的产率略有增加；而在慢速热解条件下，钙基催化剂对焦油二次裂解和焦的分解有明显的催化作用[29]。此外，通过碱金属与碱土金属的催化作用能够增加煤/焦反应界面的活性位点.烃类碳链上的H易与活性位点结合，使其带负电。随后带负电的氢离子(H^-)与相邻的碳原子上的H^+发生脱氢反应，生成H_2。碱金属碳酸盐与煤焦以CO_2和H_2O进行共气化时，反应活性为$Cs_2CO_3>K_2CO_3>Na_2CO_3>Li_2CO_3$，碱金属碳酸盐的反应机理如下所示(M代表碱金属元素)[30]。

$$M_2CO_3(s,l)+2C(s,l) \rightleftharpoons 2M(s,l)+3CO(s,l) \quad (1)$$

$$2M(g)+CO_2(s,l) \rightleftharpoons M_2O(s,l)+CO(g) \quad (2)$$

$$M_2O_3(s,l)+CO_2(g) \rightleftharpoons M_2CO_3(s,l) \quad (3)$$

随着共气化的进行，固体焦失去碳元素，M能够使焦的凹凸点和边缘成为活性位点，从而促进较深通道的形成.并加快气化的进程。

热解产品的分布在一定程度上取决于催化剂本身的组织构造，包括粒径、比表面积和孔径分布。当催化剂的孔径为7.8～8.1A时，能够阻止焦中大分子物质的扩散，抑制芳香烃化合物的形成，从而降低焦的含量[11]。生物质中富含的

碱金属和碱土金属元素在生物质与煤共热解过程中能够起到一定的催化作用.但是生物质中富含催化活性的矿物质的含量有限，因此，可以在充分利用生物质本身所含有的催化矿物质的基础上，添加或改善特定的催化剂，从而达到催化热解的目的。

2.6粒径大小

生物质的导热性较差，不同的物料粒径可以改变热解过程中的传热和传质，因此，物料粒径的大小对热解产品的产率和特性具有重要的影响。一般认为，物料粒径较小时，在加热过程中受热更加均匀，更容易快速热解；而物料粒径较大时，热量从物料表面到内部的传递效果相对较差，会限制物料的热解。不同的热解系统所采用的粒径大小也不相同，流化床系统采用的样品粒径小于2mm，循环流化床系统采用的样品粒径小于6mm。采用旋转锥反应器热解时，样品的粒径小于200mm[31]。煤粒径的大小对煤热解的影响，主要表现在内部传热和气相流动方面。粒径越大传热阻力就越大，加热需要的时间也就越长，初级热解产物的溢出速度也就越慢，越容易在颗粒内部发生二次反应，析炭沉积在煤粒内部和表面，导致热解产物析出量减少。当粒径小于一定值(0.5～2.8mm)时，粒径大小对热解的影响变小，这是因为粒径较小时，煤岩组分的富集对于热解的影响大于传热传质[32]。

颗粒形状也是影响热解温度传递的一个因素，粉末状颗粒达到充分热解所需的时间最短，圆柱状次之，片状所需的时间最长。由于粉末状颗粒的粒径相对较小，析出的挥发分在穿越物料层时所遇到阻力相对较大，从而延长了二次反应的时间.影响了裂解气的产率[33]。

2.7热解反应器

热解过程的升温速率、滞留时间、产品分布在很大程度上取决于反应器的类型、反应器的加热方式以及物料在反应器内的状态。目前，国内外对于热解反应器类型的研究比较多，表3列出了部分反应器的优缺点。

表 3　不同类型反应器的优缺点

Table 3 The advantages and disadvantages of different type pyrolysis reactors

反应器类型	优点	缺点
固定床	技术相对简单,混合颗粒接触较好。	应用的规模较小,升温速率受到限制,样品散热较慢。
流化床	可以实现快速升温,结构简单,运行寿命长,传热、传质效果较好,易于放大。	混合颗粒较为分散,接触性较差,运行成本较高,颗粒滞留时间分布广,操作弹性低。
自由落下床	设计简单,尾气含量较低,升温速率较高,可有效控制滞留时间。	耗电量大,需要维持整个床柱的温度,外部需要较高性能的保温材料。
旋转锥	操作简单,成本低,不需要载气,滞留时间短,加热效率高,适合快速热解。	对设备材料耐热、隔热要求甚高,高温下运行易出故障,难以大规模工业生产。
微波反应器	可有效降低颗粒内外温度梯度,加热更均匀,对颗粒粒径没有特别要求。	耗电量大,需要根据物料处理量选择微波功率,滞留时间不易监测。
滴管炉	反应条件易控制,可模拟实际反应器的升温速率、压力和气氛等条件,可稳态连续给料与收集。	颗粒较为分散,高温区较长,难以排除高温区的二次反应,设备较贵。
丝网反应器	升温速率可达 500 ℃/s,升温速率和滞留时间可控,可有效降低二次热解。	用量较小,气体流速高,结果重复性较低。
等离子体反应器	适合低温、低升温速率的热解。	需要提供较高的初始能量。
居里点反应器	控温精确,载气流速低,利于产物成分分析。	样品用量少,挥发分的释放容易在内部形成高压。

在热解制备焦油方面.煤与生物质快速共热解能够获得较好的效果，而要实现工业化放大的目标，还要综合考虑进料系统、功能系统和快速冷凝系统等模块的整合。以流化床反应器为例，可以将热解副产物焦炭作为热源，不可冷凝热解气作为流化气，从而降低能耗，实现自热[34]。图3所示的复合式流化床就是将热解、气化合为一体，通过螺旋进料槽连续加入原料，原料在流化床上部发生热解，产生的热解半焦进人下部催化气化段发生气化反应，气化后的焦炭进人下部进行燃烧。并为上部提供能量实现自热：产品气、部分轻质焦油和部分半焦进人旋风分离器，最终可冷凝气生成焦油，不可冷凝气回到流化床中。不可冷凝气的回用(作为气化剂)对于提高焦油的品质具有重要意义。

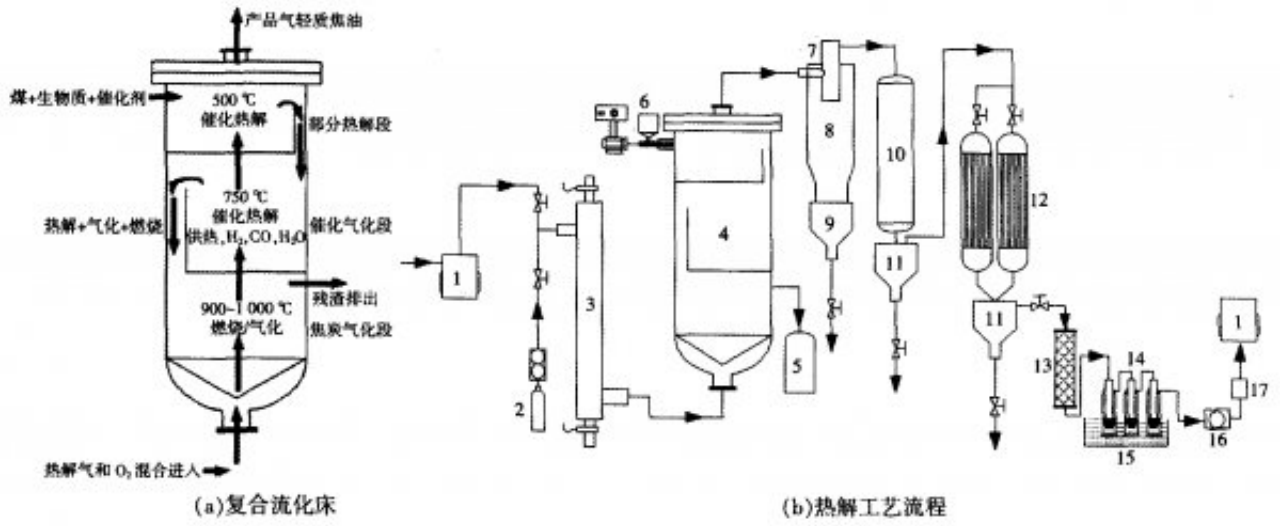

图 3　复合流化床流程图

Fig.3 Schematic diagram the experimental apparatus for fluidized bed

1-不可冷凝气;2-氧气瓶;3-混合加热器;4-热解气化炉;5-废渣收集槽;6-螺旋加料槽;7-金属过滤网;8-旋风分离器;9-收集器;10-冷却器;11-焦油收集器;12-冷凝器;13-过滤棉;14-丙酮吸收器;15-冰水冷却槽;16-湿式气体流量计;17-收集袋

热解装置的未来研究方向应该是在保证产品品质的前提下，实现流程的低能耗、易放大、维护简单、安全稳定运行等。在煤与生物质共热解过程中如何提高热解效率获得目标产品一直是人们的研究重点，除了上面这些影响热解的因素以外，还可以通过对原料进行预处理、选择合适的生物质和煤的种类等来提高热解效率。由于煤与生物质共热解过程的复杂性。应根据煤和生物质各自的特性开发出新的工艺技术与其他系统相结合，实现向分级转化多联产方向发展。结合热解、气化、燃烧和合成等工艺将反应活化差异较大的物质进行分级转化。实现资源的优化配置、降低环境污染以保障国家的能源安全。

3结论与展望

煤与生物质共热解技术能够在现有热解设备的基础上最大限度地利用可再生资源.对减少化石燃料的使用、提高碳转化率具有重要作用。本文综述了热解温度、混合比例、滞留时间、升温速率、矿物质的催化作用、物料的粒径大小和热解反应器的类型对煤与生物质共热解过程的影响。并提出了以下研究方向：①根据目标产物的不同，通过调控不同的热解条件，改善和开发新的催化剂来提高热解效率、降低能耗；②在生物质与低阶煤共热解对焦油进行提质深加工的研究中。应充分利用生物质挥发分、氢元素、碱金属和碱土金属元素含量高的特点，采用快速热解的循环流化床，实现自热式的多系统整合；③根据不同原材料的物理、化学特征，获得相关的热解数据，构建理论框架、完善热解机理，为今后工艺路线的设计和热解设备的开发提供数据支撑；④实现技术流程和功能单元的合理化、模块化，实现资源的优化配置，达到热解及联产工艺的有效结合。

参考文献：

[1] 李玉航，苏醒，宋波.村镇秸秆废弃物资源化环境评价模型及案例分析[J].可再生能源，2017，35(3)：317-322.

[1] Li Yuhang，Su Xing，Song Bo.A case study on environmental evaluation model for utilization of straw waste resources in the villages [J].Renewable Energy

Resources,2017,35(3):317-322.

[2] Li Kai,Zhang Liqiang,Zhu Liang,et al.Comparative study on pyrolysis of lignocellulosic and algal biomass using pyrolysis-gas chromatography/mass spectrometry [J].Bioresource Technology,2017,234:48-52.

[3] 张啸天,李诗媛,李伟.生物质与煤混合富氧燃烧过程中 NO 和 N_2O 的排放特性研究 [J]. 可再生能源,2017,35(2):159-165.

[3] Zhang Xiaotian,Li Shiyuan,Li Wei.Study on NO and N_2O emission characteristics during co-combustion of biomass and coal in oxy-fuel CFB combustor [J]. Renewable Energy Resources,2017,35(2):159-165.

[4] 李丽洁,赵立欣,孟海波,等.生物质热解炭化实验平台设计与实验[J].可再生能源,2016,34(2):305-310.

[4] Li Lijie,Zhao Lixin,Meng Haibo,et al.Design and experimental biomass pyrolysis carbonization experiment setup [J].Renewable Energy Resources, 2016,34(2):305-310.

[5] Frau C,Ferrara F,Orsini A,et al.Characterization of several kinds of coal and biomass for pyrolysis and gasfication[J].Fuel,2014,152:138-145.

[6] Li Zhihe,Li Ning,Yi Weiming,et al. Design and operation of a down-tube reactor demonstration plant for biomass fast pyrolysis [J].Fuel Processing Technology,2017,161:182-192.

[7] 寿恩广,李诗媛,任强强,等.生物质与煤富氧混合燃烧特性[J].可再生能源,2014,32(10):1551-1558.

[7] Shou Enguang,Li Shiyuan,Ren Qiangqiang,et al.Study

on oxy-fuel combustion characteristics of biomass and coal blending[J].Renewable Energy Resources,2014,32(10):1551-1558.

[8] Vassilev S V,Vassileva C G,Vassilev V S.Advantages and disadvantages of composition and properties of biomass in comparison with coal:An overview[J].Fuel,2015,158:330-350.

[9] Wei Juntao,Guo Qinghua,Gong Yan,et al.Synergistic effect on co-gasification reactivity of biomass-petroleum coke blended char[J].Bioresource Technology,2017,234:33-39.

[10] Masnadi M S,Habibi R,Kopyscinski J,et al.Fuel characterization and co-pyrolysis kinetics of biomass and fossil fuels[J].Fuel,2014,117(8):1204-1214.

[11] Hassan H,Lim J K,Hameed B H.Recent progress on biomass co-pyrolysis conversion into high-quality bio-oil[J].Bioresource Technology,2016,221:645-655.

[12] Vuthaluru H B. Investigations into the pyrolytic behaviour of coal/biomass blends using thermo-gravimetric analysis[J].Bioresource Technology,2004,92(2):187-195.

[13] Dupont Capucine, Chen Li, Cances Julien, et al. Biomass pyrolysis:Kinetic modeling and experimental validation under high temperature and flash heating rate conditions [J].Journal of Analytical and Applied Pyrolysis,2009,85(1-2):260-267.

[14] Vyas Ami,Chellappa Thigao,Goldfarb Jillian L.Porosity development and reactivity changes of coal-biomass blends during co-pyrolysis at various temperatures[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis,2017,124:79-88.

[15] 安杨,徐静,Arash Tahmasebi,等.花生壳和松木屑固定床低温热解特性的实验研究[J].可再生能源,2016,34(12):1886-1890.

[15] An Yang,Xu Jing,Arash Tahmasebi,et al.Experimental study on the pyrolysis characteristics of peanut shell and pine sawdust in fixed bed reactor[J].Renewable Energy Resources,2016,34(12):1886-1890.

[16] Park Dong Kyoo,Kim Sang Done,Lee See Hoon,et al. Co-pyrolysis characteristic of sawdust and coal blend in TGA and a fixed bed reactor [J].Bioresource Technology,2010,101(15): 6151-6156.

[17] 唐初阳，张德祥，鲁锡兰.煤的理化性质对生物质和煤共热解焦油性质的影响 [J]. 可再生能源,2016,34(10):1548-1553.

[17] Tang Chuyang,Zhang Dexiang,Lu Xilan.Effects of coal physicochemical on tar characteristics during co-pyrolysis of biomass and coal [J].Renewable Energy Resources,2016,34(10):1548-1553.

[18] 何选明,潘叶,陈康,等.生物质与低阶煤低温共热解转化研究[J].煤炭转化,2012,35(4):11-15.

[18] He Xuanming,Pan Ye,Chen Kang,et al.Study on low temperature co-pyrolysis of biomass and low rank coal [J].Coal Conversion,2012,35(4):11-15.

[19] Soncini Ryan M,Means Nicholas C,Weiland Nathan T. Co-pyrolysis of low rank coals and biomass:Product distributions[J].Fuel,2013,112(3):74-82.

[20] Sharma Abhishek,Pareek Vishnu,Zhang Dongke.Biomass pyrolysis-A review of modeling, process parameters and catalytic studies [J].Renewable and Sustainable Energy Reviews,2015,50:1081-1096.

[21] 朱廷钰,肖云汉,王洋.煤热解过程气体停留时间的影响[J].燃烧科学与技术,2001,7(3):307-310.

[21] Zhu Tingyu,Xiao Yunhan,Wang Yang.Effect of gas residence time on coal pyrolysis [J].Journal of Combustion Science and Technology,2001,7(3):307-310.

[22] Morgan H M Jr,Bu Q,Liang Jianghui,et al.A review of catalytic microwave pyrolysis of lignocellulosic biomass for value-added fuel and chemicals [J].Bioresource Technology,2017,230:112-121.

[23] Marcilla A,Catalá L,García-Quesada J C,et al.A review of thermochemical conversion of microalgae[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2013,27(6):11-19.

[24] 易霜,何选明,郑辉,等.甘蔗渣与褐煤共热解半焦的特性[J]. 化工进展,2016,35(10):3149-3154.

[24] Yi Shuang,He Xuanming,Zheng Hui,et al. Characteristics of co-pyrolysis char of sugarcane bagasse and lignite [J].Chemical Industry and Engineering Progress,2016,35(10):3149-3154.

[25] 常娜,甘艳萍,陈延信.升温速率及热解温度对煤热解过程的影响[J].煤炭转化,2012,35(3):1-5.

[25] Chang Na,Gan Yanping,Chen Yanxin.Study on the effects of heating rate and temperature to coal pyrolysis [J].Coal Conversion,2012,35(3):1-5.

[26] Zhang Junjie,Quan Cui,Qiu Yujie,et al.Effect of char on co-pyrolysis of biomass and coal in a free fall reactor [J].Fuel Processing Technology,2015,135(9):73-79.

[27] 方梦祥,厉文榜,岑建孟,等.煤催化气化技术的研究现状与展望[J].化工进展,2015,34(10):3656-3664.

[27] Fang Mengxiang,Li Wenbang,Cen Jianmeng.Progress and prospect of research on catalytic gasification of coal [J].Chemical Industry and Engineering Progress, 2015,34(10):3656-3664.

[28] 李斌,韩旭,陈义龙,等.不同钙基吸收剂对玉米秸秆热解气化制氢特性的影响 [J]. 可再生能源,2017,35(4):502-507.

[28] Li Bin,Han Xu,Chen Yilong,et al.Effects of different calcium-based absorbents on hydrogen production of corn stalk pyrolysis-gasification [J].Renewable Energy Resources,2017,35(4):502-507.

[29] 孙任晖,高鹏,刘爱国,等.低阶煤催化热解研究进展及展望[J].洁净煤技术,2016,22(1):54-59.

[29] Sun Renhui,Gao Peng,Liu Aiguo,et al.Research progress and prospect of low rank coal catalytic pyrolysis [J].Clean Coal Technology,2016,22(1):54-59.

[30] Masnadi Mohammad S,Grace John R,Bi Xiaotao,et al. From fossil fuels towards renewables:Inhibitory and catalytic effects on carbon thermochemical conversion during co-gasification of biomass [J].Applied Energy, 2015,140:196-209

[31] Bridgwater A V,Peacocke G V C. Fast pyrolysis processes for biomass [J].Renewable and Sustainable Energy Reviews,2000,4(1):1-73.

[32] Hanson S,Patrick J W,Walker A. The effect of coal particle size on pyrolysis and steam gasification [J]. Fuel,2002,81(5):531-537.

[33] 苏琼,肖波,汪莹莹.纤维素类生物质热解影响因素分析[J].能源研究与信息,2007,23(1):11-15.

[33] Su Qiong,Xiao Bo,Wang Yingying.Study on the effects of operating conditions on cellulosic-biomass pyrolysis [J].Energy Research and Information,2007,23(1):11-15.

[34] 高新源,徐庆,李占勇,等.生物质快速热解装置研究进展[J]. 化工进展,2016,35(10):3032-3041.

[34] Gao Xinyuan,Xu Qing,Li Zhanyong,et al.Progress in the study of biomass fast pyrolysis equipment [J]. Chemical Industry and Engineering Progress,2016,35(10):3032-3041.

原文地址：http://www.china-nengyuan.com/tech/176858.html