

煤和生物质太阳能热解及气化研究进展

高凡翔 (中南大学能源科学与工程学院, 湖南 长沙 410006)

摘要: 随着我国工业化进程的不断深入, 环境保护和经济效益之间的矛盾日益突出。调整我国能源结构, 发展绿色、可持续的能源利用技术显得尤为重要。太阳能耦合热解及气化技术通过集中太阳能加热反应器和工质, 为固体原料的热化学转化提供热量, 将煤或生物质等固体原料迅速转化为有机碳材料、液态化学品、可燃合成气等产品, 实现了间歇性光热资源向稳定化学能的转化。与传统工艺相比, 太阳能热解或气化过程不需要消耗固体原料或电力加热来提供反应所需热量, 提高了燃料利用率和经济竞争力。此外, 高温太阳热或储热介质加热条件下, 固体燃料热化学转化路径会发生改变, 需要进一步探究。目前, 现有研究已经证明了利用太阳能驱动煤或生物质等固体燃料热解或气化的可行性, 并且已有部分系统应用于联产制氢、联产发电及制备液态燃料等领域, 但各系统组成不同, 运行参数差异较大。因此, 本文对当前太阳能热解及气化技术的集热器性能、应用情况等内容进行了总结, 分析了不同太阳能耦合方式的特点, 最后对该技术今后的工作重点进行了展望。

关键词: 太阳能; 煤; 生物质; 热解; 气化

0 引言

煤是我国最为丰富的化石能源, 2019年原煤占我国一次能源生产总量的比重为57.7%^[1], 且化工用煤消费量呈增加趋势, 煤气化行业发展态势持续向好。同时, 可再生能源由于其储量大、清洁无污染、多数可循环使用等优点, 吸引了全球众多研究者的关注。其中, 生物质能作为一种可再生能源有其独特的优势, 譬如原料来源广泛、属性稳定、生产规模灵活等^[2]。我国于2020年承诺争取2060年前实现“碳中和目标”^[3], 而生物质能作为唯一的“碳中和”能源, 在推进能源体系清洁低碳发展中具有重要作用。

煤和生物质等固体燃料的利用技术大致分为物理法、生物化学法、热化学转化法等类别, 其中热化学转化法包括燃烧、气化、热解、烘焙等技术, 与其他手段相比具有反应迅速、转化率高、功耗小、易工业化等优点^[4]。

在热化学转化技术中, 热解是指在隔绝空气或者是只有少量空气存在的条件下加热固体燃料产生焦炭、焦油和合成气的过程。

按照升温速率、反应时间等条件可将其分为慢速热解、常速热解和快速热解三种^[5]。

通常, 慢速热解一般用于制备碳基材料, 常速热解的主要产物是焦以及焦油, 快速热解的目标产物是生物油。与热解相比, 气化是指在氧化剂存在的条件下, 固体原料中的碳氢化合物通过反应生成可燃性气体的过程。生物质气化过程中可能发生的部分反应如下所示^[6]:

碳氧化反应:



水气反应:



焦炭溶损反应:



加氢气化反应:



甲烷化反应:



气化所得产物用途广泛, 既可用于制备甲醇等液体燃料^[6], 还可以与燃气-蒸汽联合循环系统结合组成多联产系统^[7], 从而实现固体燃料的高效清洁利用。

传统的热解和气化技术, 一部分依靠电力加热为反应提供所需能量, 存在高污染和高能耗等问题, 生产成本也较高, 不利于大规模工业化应用; 另一部分则依靠部分固体燃料的燃烧满足所需的热输入, 但会造成原料利用率下降, 还可能导致产物被过量的二氧化碳和氮气稀释, 降低了产物品质^[8]。

近来, 耦合太阳能驱动的热解及气化技术为解决上述问题提供了全新的思路。与传统工艺相比, 太阳能热解与气化通过集热器集中太阳辐射能, 并加热反应原料与储蓄热介质, 为固体燃料的热化学转化过程提供热量, 减少了电加热产生的能量消耗, 同时避免了燃烧副产物对热解及气化产品的污染^[9]。

更重要的是, 新疆地区是我国太阳辐射总量最高的地区之一, 而且煤炭资源丰富, 累计探获煤炭资源储量为4225.58亿t^[10], 但该地区太阳能利用方式较为单一, 且利用率较低; 另一方面, 我国农村地区农林废弃物来源广泛、产量巨大, 但上述生物质资源的利用仍然以直接燃烧为主, 并未实现高附加值转化^[11]。

上述现状为太阳能耦合热解及气化技术提供了广阔的应用场景。

基于此, 本文分析了太阳能耦合热解及气化技术的发展现状, 阐述了其技术特点, 最后对该技术的发展提

出了一定建议。

1 太阳能耦合热解及气化集热器

太阳能耦合集热器是实现高效热解和气化的关键, 现有研究已初步证明使用太阳能作为高温热源驱动固体燃料热化学转化的可行性^[12]。目前应用较多的集热器包括槽式、塔式、平板真空管结构等类型, 如表1所示。根据集热器运行温度的不同, 本文将主要运行温度超过1000K的集热器划分为高温集热器, 其余集热器划分为低温集热器。

1.1 高温集热器

1.1.1 中空圆柱形

中空圆柱集热器是一种内壁有耐火衬里、顶部为敞口的中空圆柱设备, 呈竖直布置, 周围装有定日镜, 顶部上方一定距离布置有聚焦镜。

太阳光经过定日镜反射至聚焦镜, 再由聚焦镜二次反射向下进入接受腔中。高忠乾^[13]利用中空圆柱形集热器加热熔渣颗粒, 再使其与气化剂(CO_2 或 H_2O , 或是两者的混合物)进行热交换, 可以实现连续的煤炭气化。

该集热器运行温度可达1600–1800K, 太阳能接收效率在61%–85%之间。竖直圆柱布置使温度较高的熔渣粒子聚集在底部, 辐射能可被由顶部进入的冷粒子吸收, 从而使得中空圆柱形集热器接收效率高于同等条件下的固态黑体接收效率; 但在光线传递路程中, 聚焦镜会造成反射损失, 可利用这部分损失来产生蒸汽或进行预热, 使聚焦镜效率接近100%。目前, 中空圆柱形集热器只见报道于太阳能耦合煤的连续气化中, 其他领域的应用有待扩展。

表1 太阳能热解及气化集热器主要参数

集热器类别	集热器结构	传/蓄热介质	应用范围	运行温度	应用情况	峰值热效率	参考文献
高温集热器	中空圆柱形	真空	煤气化	1500-1800K	-	-	[13]
	碟式	氢气/氦气	生物质气化 (模型化合物)	1023-1655K	实验阶段	29.4%	[16][15]
	塔式	空气/熔融盐/水	生物质气化 (棉花秸秆)	838-1322K	小规模商业化	23%	[7][15][17]
	双圆筒型	熔融碳酸盐	生物质气化 (饲料)	~1200K	实验阶段	~55%	[18][9]
低温集热器	槽式	真空	生物质热解 (秸秆/禽畜粪便)	663-1007K	大规模商业化	20%	[19][15]
	平板真空管式	真空	生物质热解 (苹果木)	平板< 333K 真空管< 473K	大规模商业化	~54%	[21][22]

表2 太阳能热解及气化实验参数

原料类别	反应物	反应类别	反应温度	催化剂	主要产物	参考文献
生物质	玉米秸秆、牛粪	热解	378-703K	-	生物炭	[19]
	棉花秸秆	H_2O 气化	1123K	-	合成气、甲醇	[7]
	玉米秸秆	热解-气化	热解: 643K 气化: 1150 K	-	合成气、甲醇/ 生物柴油	[35]
	葡萄糖	H_2O 气化	773-873K	氧化钙	H_2	[30]
煤	纽兰兹煤炭	CO_2 气化	1173K	碱金属盐	CO 、甲醇	[32]
	粉煤	H_2O 及 CO_2 气化	1600K	-	CO 、 H_2	[13]

1.1.2 碟式

碟式聚光器通常是由支架、连接杆、反射镜和 U 形固定块等组成^[14]。抛物面型镜面可以将太阳光聚焦反射到位于焦点位置的吸热器上，从而对传热工质进行加热^[15]。西安交通大学的廖波等人^[16]以生物质模型化合物为原料，采用多碟聚光器聚焦高温来进行气化产氢实验。该聚光器太阳能接收效率接近 90%，可加热反应器温度至 1023–1655K。碟式聚光器聚焦比大，聚焦效率高，但由于该技术起步相对较晚，仍存在聚光不稳定、产品寿命短等问题，再加上较高的成本，目前仍处于实验阶段^[14]。

1.1.3 塔式

塔式集热器主要由聚光子系统和集热子系统组成，其中聚光子系统包括塔式定日镜厂和太阳能跟踪控制装置，集热子系统包括竖塔和太阳能接收器。太阳能跟踪控制系统可以控制定日镜跟踪接收并反射太阳光进入位于接收塔顶部的接收器内，接收器受聚焦光斑照射后壁温升高，载热工质在其中流动时，热量以对流和传导的方式由壁面向工质传输，从而为反应提供所需能量^[17]。中国科学院工程热物理研究所的白章等人^[7]以棉花秸秆为原料，在塔式气化反应器中进行生物质气化实验。该集热器运行温度为 838–1322K，太阳能吸收效率可达 45%。相比其他类型的集热器，塔式集热器聚光比大，工质吸热温度较高，可应用于大规模气化热电-联产系统，但也存在占地面积大，单位成本高等问题。

1.1.4 双圆筒型

双圆筒型集热器由内外同心圆筒组成，其中内筒为开放式的太阳能腔体接收器，外筒是装载熔盐等蓄热介质的气化反应区。具体而言，太阳光通过前端开口进入空腔，经过多次的反射与辐射后热量被内壁吸收，而后经内壁传导至封闭式外筒，并储存在蓄热介质中。生物质等固体原料由进料口进入外筒，在蓄热介质的加热下与气化剂发生气化反应，而后合成气、副产品及未反应的原料由出口排出^[9, 18]。

美国明尼苏达大学的 Hathaway 等人^[18]，以三元碳酸盐同时作为蓄热介质和催化剂，在双圆筒内进行了生物质催化气化实验。该集热器运行温度为 1200K 左右，太阳能表面吸收率可达 98%。为保证较高的耐腐蚀及抗蠕变性，同时考虑具有良好的导热能力，研究者选用 Inconel X-750 合金作为主体材料。双圆筒型集热器效率与之前出现的间歇性反应器（Wieckert 等人，2013）的最高值相当，并高于连续式反应器（ZGraggen 等人，2007），但碳转化率低于前述反应器。由于双圆筒型集热器占地面积小、装置操作简便、原料适应性广，有潜力应用于我国农村地区的农林废弃资源的就地资源化利用中。

1.2 低温集热器

1.2.1 槽式

槽式集热器主要由槽式聚光系统（抛物面型反射镜）、直通式集热管、储液罐等组成。该集热器利用槽型抛物面反射镜将入射太阳光聚焦于一条线上，并在这条焦线上布置有集热管吸收经过聚焦反射后的太阳能。中国海洋大学的常全超等人^[19]以秸秆及禽畜粪便为原料，采用槽式集热器为生物质热解提供热量。该集热器运行温度为 663–1007K，太阳能反射率为 0.93。槽式集热器成本较低，目前已实现大规模商业化应用，但集热效率还有很大改进空间^[20]。

1.2.2 平板-真空管集热器

平板集热器由吸热板、透明盖板和外壳等部件组成，当集热器工作时，太阳辐射会穿过透明盖板照射至吸热板上，吸热板吸收辐射能并将其转化为热能，加热内部的载热工质使其温度升高。与平板集热器类似，真空管集热器是由若干支真空管按一定规则组成阵列，与尾架、反射器等装置共同构成的集热器模块，核心部件还是真空管。具体而言，真空管外侧为透明玻璃管，内侧为吸热体，吸热体靠外侧涂有选择性吸收涂层，可以有效地降低辐射损失^[21]。西北农林科技大学的陈佳等人^[22]以苹果木为原料，采用平板-真空管集热器集中太阳能驱动生物质热解。一般而言，平板集热器运行温度在 333K 以下，而真空管集热器不会超过 473K。平板-真空管集热器成本低，集热效率较高，同时也是家用太阳能集热器市场的主导产品。但平板集热器对工作温度有严格要求，在部分寒冷地区无法全年运行，而真空管集热器也存在破碎后介质易泄露、无法承压运行等问题。

2 太阳能热解及气化实验

基于不同类型的集热器，国内外学者对太阳能耦合热解及气化技术开展了一定研究，如制备生物炭（焦）、生物油、联产制氢等，这些研究主要集中在以煤或生物质为代表的固体燃料的清洁、高效转化上。现已将部分典型的太阳能驱动下煤或生物质的热解及气化实验参数总结于表 2 中。

2.1 太阳能热解

生物炭由于较多的孔隙结构、较大的比表面积和较小的污染等特点是理想的环保吸附剂，也是热解的主要目标产物之一。但在光热条件下，固体燃料颗粒内部温度梯度与传统加热方式下明显不同，同时还会影响孔隙结构、固体密度等与传热特性有关的参数，从而改变生物炭的微观结构^[23]。

Pozzobon 等人^[24]针对太阳能辐射加热工况，基于传统建模方法，通过移动网络和介质内部的辐射穿透建模策略，建立了用于描述高太阳能通量下的生物量行为的模型。经验证得出，该模型预测值与实验观测值之间具

有良好的一致性,可以用于预测生物质的太阳能热解过程,有助于了解并提高整体反应效率。在实际太阳能热解反应器内部,由于堆积效应固体燃料颗粒的热解反应具有先后顺序,先热解产生的焦将与未反应的颗粒发生交互作用。

Zhu 等人^[25]采用红外加热模拟实际太阳能热解工况,以松木屑作为原料,在石英反应器中进行热解反应,而后对热解得到的焦进行水洗浸渍处理,并按一定比例添加至压制成型的原料中以模拟生物质的积累特性,总结了焦对快速反应热解产物的影响。结果表明,较高的温度可使松木屑热解过程释放更多的挥发分;高温速率有助于焦中 O 元素的释放和 C 元素的富集,并将改变挥发分的二次反应路径;热解先产生的焦由于钾等碱金属和碱土金属含量较高,将促进未反应颗粒挥发分的释放和焦油的二次裂解。该研究为太阳能驱动的快速热解技术的规模应用提供了实验依据。

太阳能热解制备生物炭技术较好地解决了传统电加热工艺中能耗高、污染大等问题。为了确保太阳能热解制得的生物炭具有良好的重金属吸附能力,常全超等人^[19]在真空吸热管内利用槽式聚光器集热,对玉米秸秆和牛粪进行热解制备生物炭。由静态吸附实验可知,在 378–703K 的条件下制备的太阳能活性炭吸附能力与传统热解工艺制备的相当。此外,水体中的重金属还将通过生化过程富集于植物的根、茎、叶中,耦合太阳能对这些植物进行热解转化,能有效避免污染物向环境中扩散,同时可获得合成气等高价值产品。郭增等人^[26]使用平板-抛物面镜集中太阳辐射,在不同的温度(873、1073、1273、1473 和 1673K)下进行铜和镍浸渍的柳木热解实验。结果表明,受重金属污染的柳木热解产气量相比柳木原样有了很大提高,其中,提供浸渍负载的铜和镍可能由于催化作用使柳木在 1473K 下热解的产气量分别增加了 14.76% 和 34.47%。

生物油是热解的另一重要产物之一,太阳能加热将改变热解反应器内部的温度场,形成“热井”。挥发分在流经“热井”时将被迅速加热,而后在流出时迅速降温,这将显著改变焦油的二次反应路径,最终影响生物油的产品组成。已有研究证明焦和挥发分的相互作用会使焦油产率在 773–1073K 区间内呈现先增后降的趋势,因此研究二次反应路径及其在最小抑制条件下对一次反应的影响具有重要意义。基于此,马金凤等人^[27]对红外快速升温下微薄煤层的热解行为展开研究,作者通过压片法将山西大同煤压制微薄样品,并使用红外光辐射将原料加热至 873–1273K。相比自然堆积状态下煤颗粒的热解,该实验在同等温度下焦油产量明显增加,且热解气和焦油产率均随温度升高而上升。

Weldekidan 等人^[28]为探究不同温度下集中式太阳辐

射对热解产物性质的影响,以稻壳为原料,对其进行干燥研磨后放入石英玻璃反应器中,并使用抛物面形碟集中太阳能分别在 773、873、973 和 1073K 的条件下进行热解反应。实验发现,与传统热解相比,在较低的加热速率下太阳能热解液相产率相对较高。且生物油组分对热解温度较为敏感,具体而言:773K 和 973K 下异丁醇的收率分别为 7.2vol% 和 5.73vol%,是极好的有机溶剂生产前体;873K 下五乙二醇含量为 6.8vol%,可用作生产洗涤剂;而 1073K 下的生物油一般用于生产脱水天然气。因此,太阳能驱动的稻壳热解技术是具有较好潜力的燃料或化学品生产方式。

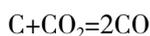
2.2 太阳能气化

为制取富氢合成气,传统气化常以水蒸气为气化剂(水煤浆气化),并选用天然矿石或过渡金属作为催化剂^[29]。在太阳能光热条件下,太阳能既可加热气化剂和储蓄热介质,也可对原料进行干燥预热,从而提高了系统的整体能量效率。

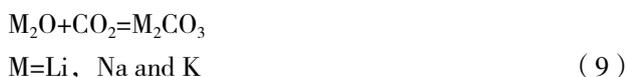
秀春珍等人^[30]采用小型密闭容器作为反应器,以葡萄糖作为纤维素模型化合物,通过太阳灶将反应器加热至 773–873K 进行水蒸气气化,得到的气体产物中氢气和甲烷含量高达 54.80%、35.51%。该实验验证了太阳能光热条件下,生物质通过 H₂O 气化制备富氢合成气的可行性。值得注意的是,在太阳能气化中,常采用熔渣、熔融盐(硝酸盐、碳酸盐)等作为传热及蓄热介质,以实现阴雨天及夜间的连续运行。高忠乾^[31]设计了一种中空型太阳能集热器,取消了常规的玻璃通孔,利用液态熔渣预热气化剂,再将气化剂通入气化反应器中与粉煤发生高温气化反应。该装置提高了运行温度和气化效率,降低了成本,并实现了光照条件不佳时煤的连续气化。与熔渣相比,熔融碳酸盐导热系数更大,能够更迅速的传递热量,避免额外的热损失;并且比热容较高,可作为储热介质提高反应器内部温度场的均匀性,从而提升气化反应的稳定性;更重要的是,熔融碱金属盐对含碳的燃料的热化学转化过程具有催化作用,能够有效地减少焦油的裂解减小副产品的生成。加拿大西部氢气有限公司开发出一种熔融盐催化气化制氢技术^[31],在相应的操作条件下,该技术可将大部分含碳物质在高压高温(1073–1173K)环境下与水发生气化反应制成氢气或合成气等产品,与常规产氢过程相比减少了温室气体的排放,同时也降低了设备成本。

与 H₂O 的气化相比,CO₂ 气化速率明显较低,且仅利用 CO₂ 作为气化剂可能导致煤或生物质的气化过程产生结渣或焦油等副产物,降低了合成气的品质,并可能造成设备腐蚀。但熔融碳酸盐能够催化固体燃料的 CO₂ 气化过程,提升反应速率,且部分灰分可溶解于熔盐中,从而减缓了结渣问题。熔盐碳酸盐体系中 CO₂ 气化过程

如下所示:



$$\Delta H_{1023K}^0 = 169.88KJ/mol \quad (6)$$



M=Li, Na and K

东京工业大学的 Matsunami 等人^[32]基于此研究了 $Na_2CO_3-K_2CO_3$ 二元熔盐中煤的 CO_2 气化特性, 该体系利用熔融碱金属盐作为储热介质和催化剂, 为气化反应提供热量, 保证了反应器的连续稳定运行。研究表明, 在熔盐存在的条件下反应速率相比未使用熔盐时提高了 3.3 倍, 但 CO_2 的转化率较低。为了能有效地将该技术应用于太阳能热化工厂中, 研究者采用小孔圆柱形不锈钢反应器来增强 CO_2 和煤的接触, 并在其中加入纽兰兹煤和熔盐, 利用红外加热炉模拟太阳光, 在 1173K 的条件下进行煤炭气化, 并考察了不同 CO_2 流量、熔盐质量及 Na_2CO_3 和 K_2CO_3 的比例对反应的影响。

结果表明: CO_2 气体消耗率会随 CO_2 流量的增加而增加, 但 CO_2 的转化率会随 CO_2 流量的增加而减少; 在 Na_2CO_3 与 K_2CO_3 摩尔为 1:1 的条件下, CO_2 的消耗率随熔盐添加量的减少而增加。通过熔盐环境中的 CO_2 气化, 间歇的太阳能可转化为合成气中稳定的化学能, 但反应体系的转化效率有待进一步提升。此外, 焦、焦油等产物可能与熔融碳酸盐发生交互作用, 影响固体燃料的气化产物分布。华中科技大学的 Mian 等人^[33]深入研究了三元碳酸盐中的焦油转化机理。作者采用甲苯作为焦油模型化合物, 在 923、1073 和 1173K 的条件下进行焦油裂解和 CO_2 重整实验。结果表明熔融盐的引入将抑制甲苯转化为气态产物, 这可能是由于熔融碳酸盐会消耗焦油裂解产生的 H 自由基导致的; 焦油中的醇、乙酸等含 H 或 OH 的物质可以促进芳烃的开环反应。另一方面, Mian 等人^[34]通过分析三元共晶碳酸盐中准东煤的 CO_2 气化焦得知, 焦可以与熔盐发生直接反应, 从而可以获得较快的气化反应速率, 而 CO_2 的引入将起到对熔盐再生的作用。熔盐中, 较高的升温速率将促进缩聚反应的进行, 从而导致焦中的有序结构增多; 同时, 熔盐可能作为氧元素供体, 促进焦表面含氧官能团的增加。

3 结论与展望

煤是我国最主要的化石能源之一, 占据一次能源消费量的 57.7%; 同时生物质能作为一种具备碳中性的可再生能源, 可转化制备为与化石能源具有互补性的燃料、化学品。调整我国能源结构不仅在于开发新型可再生能源, 也需要发展传统能源的清洁利用方式。太阳能耦合热解/气化技术通过特定的太阳能集热器加热反应器和物料, 为煤和生物质等固体燃料的热化学转化提供所需

热量, 并生成碳材料、液态化学品及合成气等高附加值产品, 同时将间歇的光能转化为稳定的化学能, 是一种环境友好、反应迅速且具有良好经济效益的固体燃料利用技术。

目前, 各国研究者在太阳能热解/气化技术上已取得一定成果, 部分反应系统经试验验证展现出较高的系统效率。所有的太阳能热解/气化系统都包括集热器和反应器两个主要部分。在集热器方面, 大多数装置采用平板-真空管结构, 但集热效率远低于塔式定日镜场与槽式集热器相结合的方式。另一方面, 反应器内形成的“热井”将显著影响生物油的二次反应路径。为了满足阴雨天气装置的连续运行, 可使用熔盐或熔渣作为储热介质吸收过量的太阳辐射。针对该技术目前存在的问题, 本文提出如下建议:

根据目前主流集热器的特性参数, 在太阳能欠丰富地区集中并转化光热具有较大的难度, 且系统效率与经济效益偏低。我国西北地区日照充足, 适合发展太阳能热化学工厂, 并可通过定日镜厂和槽式集热器相结合的方式提高反应温度, 获得更高的转化效率;

针对单独的可再生能源系统能量利用效率不足、经济效益较低等特点, 可因地制宜地开发多联产系统, 集成发电、供暖(冷)、制气等多种用途, 以获得更高的经济效益;

目前已投产的多数太阳能热解/气化系统前期投资高、占地面积大。针对我国农村地区生物质来源广泛但资源化利用程度低等特点, 可重点发展适用于农村地区就地处理农林废弃物等固体原料的小型热解或气化系统, 既有助于解决环境问题, 同时可实现废弃生物质资源的高附加值利用;

由于太阳能具有间歇性、随机性等特点, 并且不同种类的原料性质差异较大。除适当选址外, 还要注重新型熔融盐等储能系统或反应介质的研发, 保证反应系统的高水平稳定产出。

参考文献:

- [1] 2020 中国统计年鉴 [J]. 统计理论与实践, 2021(01):2.
- [2] Congguang Zhang, Jiaming Sun, Martin Lubell, et al. Design and simulation of a novel hybrid solar-biomass energy supply system in northwest China. 2019(233):1221-1239.
- [3] 王鑫. 中国争取 2060 年前实现碳中和 [J]. 生态经济, 2020, 36(12):9-12.
- [4] 王丰华, 陈庆辉. 生物质能利用技术研究进展 [J]. 化学工业与工程技术, 2009, 30(03):32-35.
- [5] 关海滨, 张卫杰, 范晓旭, 赵保峰, 孙荣峰, 姜建国, 董红海, 薛旭方. 生物质气化技术研究进展 [J]. 山东科学, 2017, 30(04):58-66.
- [6] Zhang Bai, Qibin Liu, Liang Gong, et al. Investigation of a

- solar-biomass gasification system with the production of methanol and electricity:Thermodynamic,economic and off-design operation.2019,243:91-101.
- [7] 白章,刘启斌,李洪强,金红光.基于生物质-太阳能气化的多联产系统模拟及分析[J].中国电机工程学报,2015,35(01):112-118.
- [8]Hathaway Brandon J.,Davidson Jane H.,Kittelson David B..Solar Gasification of Biomass:Kinetics of Pyrolysis and Steam Gasification in Molten Salt.2011,133(2).
- [9]B.J.Hathaway,D.B. Kittelson, J.H. Davidson. Development of a Molten Salt Reactor for Solar Gasification of Biomass.2014(49):1950-1959.
- [10] 霍超.新疆煤炭资源分布特征与勘查开发布局研究[J].中国煤炭,2020,46(10):16-21.
- [11] 罗国亮,张嘉昕,郭晓鹏,任博雅.我国农村能源发展状况与未来展望[J].中国能源,2019,41(02):37-43+24.
- [12]Hathaway Brandon J.,Davidson Jane H.,Kittelson David B..Solar Gasification of Biomass:Kinetics of Pyrolysis and Steam Gasification in Molten Salt.2011,133(2).
- [13] 高忠乾.熔渣换热式太阳能煤炭连续气化装置[J].煤化工,1988(03):53-59.
- [14] 王林军,罗彬,邓煜,张东,吕耀平,陈艳娟.碟式太阳能聚光器的研究现状及展望[J].中国农机化学报,2016,37(12):136-140+150.
- [15] 宋佳.碟式聚光太阳能集热器的性能分析及试验装置设计[D].武汉:华中科技大学,2012.
- [16] 廖波,郭烈锦,吕友军,张西民.多碟太阳能聚热与生物质超临界水气化耦合制氢[J].太阳能学报,2011,32(05):750-755.
- [17] 钟史明.塔式太阳能热发电综述[J].沈阳工程学院学报(自然科学版),2013,9(01):1-6.
- [18]Brandon J.Hathaway,Jane H.Davidson.Demonstration of a prototype molten salt solar gasification reactor.2017(142):224-230.
- [19] 常全超,杜玉凤,戴敏,林帝出,彭昌盛.太阳能热解制备生物炭及其对水中铜离子的吸附[J].环境工程学报,2020,14(11):2946-2958.
- [20] 钱裕,朱跃钊,王银峰,陈海军.双轴跟踪槽式太阳能集热器实验研究[J].热能动力工程,2015,30(04):623-627+656-657.
- [21] 王志.太阳能集热器及集热水箱的研究探讨[J].给水排水,2010,46(S2):164-168.
- [22]Jia Cheng,Congguang Zhang,Jiaming Sun,et al.Assessing the sustainable abilities of a pilot hybrid solar - pyrolysis energy system using emergy synthesis.2020.
- [23]Peng Fu,Song Hu,Jun Xiang,Weiming Yi,Xueyuan Bai,Lushi Sun,Sheng Su.Evolution of char structure during steam gasification of the chars produced from rapid pyrolysis of rice husk[J].Bioresource Technology,2012(114).
- [24]Victor Pozzobon,Sylvain Salvador,Jean Jacques Bézian. Biomass gasification under high solar heat flux:Advanced modelling[J].Fuel,2018(214).
- [25]Zhu Haodong,Yi Baojun,Hu Hongyun,Fan Qizhou,Wang Hao,Yao Hong.The effects of char and potassium on the fast pyrolysis behaviors of biomass in an infrared-heating condition[J].Energy,2021(214).
- [26]Kuo Zeng,Rui Li,Doan Pham Minh,Elsa Weiss-Hortala,Ange Nzihou,Xiao He,Gilles Flamant.Solar pyrolysis of heavy metal contaminated biomass for gas fuel production[J].Energy,2019(187).
- [27] 马金凤,曾玺,王芳,康国俊,武荣成,许光文.煤红外快速热解过程中床层对二次反应的影响[J].化工学报,2020,71(02):736-745.
- [28]Haftom Weldekidan,Vladimir Strezov,Graham Town,Tao Kan.Production and analysis of fuels and chemicals obtained from rice husk pyrolysis with concentrated solar radiation[J].Fuel,2018(233).
- [29] 肖志良,左宋林.生物质气化与催化剂的研究进展[J].生物质化学工程,2012,46(01):39-44.
- [30] 乔春珍,赵媛,罗贤吏,葛艾,李鹏,刘栋.太阳能热源生物质催化制氢研究[J].科技创新导报,2012(33):17.
- [31] 钱伯章.熔融盐催化气化用于制氢[J].石油与天然气化工,2013,42(02):153.
- [32]J Matsunami,S Yoshida,Y Oku,et al.Coal gasification with CO₂ in molten salt for solar thermal/chemical energy conversion.2000,25(1):71-79.
- [33]Benzene Derivatives-Toluene; Reports on Toluene Findings from Huazhong University of Science and Technology Provide New Insights (Novel findings in conversion mechanism of toluene as model compound of biomass waste tar in molten salt)[J].Chemicals & Chemistry,2018.
- [34]Mian Xu,Hongyun Hu,Yuhan Yang,Yongda Huang,Kang Xie,Huan Liu,Xian Li,Hong Yao,Ichiro Naruse. A deep insight into carbon conversion during Zhundong coal molten salt gasification[J].Fuel,2018(220).
- [35]Zhang Bai, Qibin Liu, Jing Lei, et al. New solar-biomass power generation system integrated a two-stage gasifier.2016.

作者简介:

高凡翔(2000-),男,汉族,山西代县人,中南大学,新能源科学与工程专业,本科。