



王金棒,池哲翔,李源源,等. 烟草在燃料制备领域的研究现状与展望[J]. 轻工学报,2023,38(6):118-126.

WANG J B,CHI Z X,LI Y Y,et al. Research status and prospects of tobacco in the field of fuel preparation[J]. Journal of Light Industry,2023,38(6):118-126. DOI:10.12187/2023.06.015

# 烟草在燃料制备领域的研究现状与展望

王金棒<sup>1</sup>,池哲翔<sup>2</sup>,李源源<sup>3</sup>,邱纪青<sup>1</sup>,汪志波<sup>1</sup>,张渝婕<sup>4</sup>,王永胜<sup>1</sup>,周雅宁<sup>1</sup>

1. 中国烟草总公司郑州烟草研究院,河南 郑州 450001;
2. 国家烟草专卖局,北京 100045;
3. 中国烟草总公司职工进修学院,河南 郑州 450008;
4. 河北中烟工业有限责任公司 技术中心,河北 石家庄 050051

**摘要:**针对烟草生产及加工过程中产生的大量烟草废弃物所带来的环境污染和资源浪费的问解,从燃料存在形态的视角对烟草及其废弃物的燃料化利用现状进行梳理,指出:固体燃料制备简单、使用方便,但对设备的要求较高,其中烟草原料炭化成型燃料更易于运输存储、清洁环保,且燃烧残渣可进行二次利用。液体燃料制备技术较为成熟,直接提取法操作简单,但收率取决于烟草原料中油脂的固有含量,对烟草品种要求较高;热化学转化法耗能高,但创新空间较大,液态燃料的化学组成可调,发展潜力较大;发酵法产品单一,主要是乙醇,效率不高,整个技术链条中可规模应用的原料预处理技术尚未取得突破。气体燃料尚处于探索研发阶段,能耗高、收率偏低,技术经济性欠佳。未来可在烟草炭化成型、烟草发酵制备燃料乙醇、烟草催化热解,以及靶向能源用途烟草新品种的培育等方面进行深入系统研究,以进一步推动烟草多用途的产业化发展。

**关键词:**烟草废弃物;能源;燃料;生物炼制

**中图分类号:**TS49 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-1553(2023)06-0118-09

## 0 引言

我国是烟草种植大国,在烟叶生产及加工过程中,每年都会产生大量的烟草废弃物,主要包括烟草工业和烟草农业两类废弃物。其中烟草工业类废弃物主要包括工业低次烟叶、霉变烟叶,以及烟叶复烤和卷烟制造过程中产生的短烟梗、梗签、烟末、烟尘等;烟草农业类废弃物主要包括烟花、烟芽、烟杈、不

适用烟叶(为优化结构在田间打掉的鲜烟叶)、烟秆、级外烟叶(烤坏烟叶、分级和收购中的残破烟叶等不符合收购标准的烟叶)等。在农业领域,目前70%以上的烟草废弃物未得到合理利用,通常被丢弃、掩埋或焚烧,不仅造成了资源浪费,还会产生严重的环境污染问题。在烟草农业类废弃物中,烟秆平均占比较大<sup>[1]</sup>,据中国统计年鉴(2021年)显示,当年我国生产烟叶 $2.1 \times 10^6$  t,按30%的比例计算,

收稿日期:2023-04-15;修回日期:2023-07-05;出版日期:2023-12-15

基金项目:国家烟草专卖局、中国烟草总公司首席科学家创新专项项目(602022CK0550);国家烟草专卖局重点研发项目(110202102048;110202102051)

作者简介:王金棒(1987—),男,河南省周口市人,中国烟草总公司郑州烟草研究院高级工程师,博士,主要研究方向为烟草产业技术预见、科技政策、创新管理。E-mail:wangjinbangok@126.com

通信作者:周雅宁(1980—),女,河南省南阳市人,中国烟草总公司郑州烟草研究院副编审,主要研究方向为期刊编辑学。E-mail:zyn0626@126.com

可伴随产生的烟秆就达  $6.4 \times 10^5 \text{ t}^{[2]}$ 。前期研究<sup>[3]</sup>显示,烟秆的化学成分中纤维素含量约 38.0%~45.0%,与玉米秸秆、稻草秸秆、高粱秆等禾本科植物相似。可见,从木质纤维素来源看,烟秆可作为农作物秸秆较好的替代原料。若能实现烟草废弃物的资源化利用,尤其是烟草特色成分含量极低的烟秆类生物质的利用,将会产生巨大的经济效益,以及良好的社会效益和生态效益。

在烟草废弃物燃料化开发利用方面,国内外学者已进行了诸多研究,并取得了显著的成果。鉴于此,本文着重从燃料产品的形态视角对国内外烟草资源燃料化利用的研究现状进行梳理和总结,旨在为我国烟草行业科研人员在烟草多用途的技术创新、产品研发和技术推广方面提供参考。

## 1 烟草源固体燃料

生物质固体燃料是指由生物质未经加工或经简单加工后以固态形式燃烧的一种燃料,如简单粉碎后直接用作燃料、生物质成型燃料、生物质炭化燃料等。根据原料的组成特性,烟草源固态燃料可分为直接固体燃料和耦合固体燃料两种,前者以烟草为单一原料,包括固体成型燃料、生物质炭化燃料两种;后者制备原料除烟草外,还掺配有其他原料,如煤或其他生物质等,共混燃烧时具有一定的协同作用,可以提高燃料的利用效率。

### 1.1 直接固体燃料

与煤炭相比,生物质固体成型燃料的燃烧速度更快,硫化物、氮化物、灰尘等排放量也相对较低,更有利于环境保护<sup>[4]</sup>。生物质固体成型燃料规模化生产和消费主要集中在北美和欧盟,其中,美国是生物质固体成型燃料最大的生产国和出口国,其次是加拿大和拉脱维亚<sup>[5]</sup>。烟草原料产地分散、体积大、质量轻,其收储运成本较高,目前主要是将烟草原料粉碎后进行机械加压,制成一定形状且密度较大的固体成型燃料,以在解决收集、储存、运输困难问题的同时,提高原料的燃烧效率<sup>[4,6]</sup>。宋春宇等<sup>[7]</sup>研究发现,在密集烤房中,烟秆压块作为燃煤替代在技术上是可行的,能够满足烤烟烘烤工艺要求,可节约一定的成本,且烤后烟叶的外观质量及常

规化学成分等指标与燃煤烘烤相当。为减少烟秆成型燃料燃烧时的结渣率,L. Wang 等<sup>[8]</sup>研究发现,在烟秆成型燃料中添加质量分数 2%的碳酸钙(抗结渣剂)可将耐渣性控制在 15%以内。我国对烟草废弃物成型工艺研究相对较晚,由于烟秆的形状较粗、体积较大且富含木质纤维素,采用螺杆机挤压成型的过程中普遍存在螺杆等成型零件磨损严重、设备维护费用高等工程问题。

生物质炭化燃料,是生物质在无氧密闭条件下经高温热解得到的一种固体燃料,制备技术包括热解炭化、闪蒸炭化和水热炭化 3 种<sup>[9]</sup>。将烟秆制备成炭化燃料可以明显提升其燃点和能量密度<sup>[10]</sup>,在应用场景方面,不仅可以用作高档民用燃料,还可替代木炭应用于合金等行业<sup>[9]</sup>。从制备工艺流程看,烟草源成型炭主要有两种制备方法:一种是先将烟草原料粉碎、机械挤压成型,再进行炭化,该方法与固体成型燃料面临的问题类似,依然是设备磨损较为严重,且能耗较大<sup>[4]</sup>;另一种是先将烟草原料炭化,再依次进行粉碎(得炭粉)、炭粉与黏结剂混合和挤压成型,该方法设备投入成本低、设备磨损小且能耗较低<sup>[4]</sup>,已成为国内外成型炭工艺的研究热点。

### 1.2 耦合固体燃料

生物质与其他燃料耦合的典型案例应属生物质煤。生物质煤通常是先将生物质和煤经粉碎、充分干燥后,加入一定量的脱硫剂,再采用成型机进行高压制备得到。生物质煤燃烧时,生物质首先燃烧,有利于将  $\text{CaSO}_3$  转化为  $\text{CaSO}_4$ ,进而减少烟气中硫化物的排放,如硫化物和氮氧化物的排放分别降低了 10%~17%和 2%~33%<sup>[11]</sup>。相比单一燃料,耦合燃料除了能缓解空气污染外,其燃烧特性也得到显著提升。X. F. Wang 等<sup>[12]</sup>以烟梗与煤为原料制备烟梗型煤,发现烟梗型煤的燃烧效率明显优于传统的蜂窝煤,且成本较低。廖稷邦等<sup>[13]</sup>采用热分析仪研究了富源烟煤、小龙潭褐煤、宜良烟秆及 3 种燃料的耦合燃料,发现烟秆可大幅度提升煤粉的着火性能,耦合后煤粉的燃点和最大失重率温度向低温区移动,且当烟秆掺混比高于 30%时的影响最为显著。K. L. Cong 等<sup>[14]</sup>利用定制的宏观热重分析系统研究

了烟秆、低价煤及其共混物的宏观燃烧特性,发现对于共混燃料,提高烟秆占比更有利于降低其燃尽温度,且共混燃料的协同作用随燃烧温度的升高而增强,烟秆掺配70%时的协同效果最显著。

烟草原料除了与煤耦合外,也可与其他类型生物质耦合以提升其燃烧性能。苟文涛等<sup>[11,15-16]</sup>研究发现,木屑与烟秆混合共燃烧时,挥发分和热值更高,点火时间更短,底灰结渣率更低,燃烧持续时间更长,且以掺配比为50%的燃烧效果最优。温丽娜等<sup>[17]</sup>研究发现,秸秆类原料中烟秆、玉米秆、麦秸的干质量热值相对较高,且烟秆与玉米秸秆以7:3质量比混合共燃烧时的热值最高(17 866 J/g),相当于标准原煤的61%。

综上所述,在固体燃料制备方面,生物质炭化燃料、生物质煤、与其他种类生物质的耦合燃料是未来烟草原料燃料化利用的重点方向。但烟草原料中含有烟碱等烟草特色成分,在具体实践中并不能简单当作常规农业类生物质处理,需要进行必要的预处理或后处理工序。烟草原料炭化成型具有运输存储方便、CO<sub>2</sub>零排放、SO<sub>2</sub>等有毒气体释放量低等特点,是一种清洁环保的可再生能源<sup>[18]</sup>。同时,固体成型燃料的燃烧灰分富含K、Ca、Mg等矿质元素,也可作为肥料用于农业生产。可见,烟草原料的燃料化利用在多联产规模化利用方面具有一定的技术优势。

## 2 烟草源液体燃料

生物质液体燃料是指由生物质资源制成的液态燃料,如生物柴油、燃料乙醇等,是一种可再生的清洁能源。根据制备过程,其制备方法包括直接提取法、热化学转化法和发酵法3种。不同制备方法所得液态燃料的组成有较大差异,以烟草为原料,直接提取法所得液体燃料主要是烟草固有的油脂;热化学转化法所得燃料主要是生物质大分子裂解产物,产物收率、组成分布等受热解工艺条件、是否添加催化剂等因素影响较大;发酵法所得燃料主要是乙醇。

### 2.1 直接提取法

烟草原料富含油脂,烟叶和烟草种子中油脂含量分别占其干重的1.7%~4.0%和40%~50%<sup>[19]</sup>,

可以通过直接提取技术得到生物油。S. Alagic等<sup>[20]</sup>采用超临界CO<sub>2</sub>技术对3种烟草进行了提取,均得到富含C<sub>25</sub>~C<sub>33</sub>正构烷烃的提取物,收率为0.4%~1.0%。为进一步提升生物油的提取量,V. Andrianov等<sup>[21]</sup>采用生物技术对烟草DGAT基因和LEC2基因进行了改造,烟叶中油分含量提高了20倍,单位干重(即细胞除去水分的质量)烟叶含油量由1.7%~4.0%提升至5.8%~6.8%。A. Fatica等<sup>[22]</sup>培育出一种非转基因的能源烟草品种Solaris,尽管长势矮小,但花序较多,种子富含油脂,每100g干物质植株中可产油脂7.92g,远高于同等条件下的草类(2.88g)和豆科植物(2.64g)。

### 2.2 热化学转化法

热解技术是指在隔绝空气或通入少量空气条件下,利用热能切断生物质大分子的化学键,使之转变为低分子物质的过程,也是制备生物质液体燃料的重要技术,主要包括快速热解、慢速热解和反应性热解3种工艺<sup>[23]</sup>。早在2007年,A. E. Pütün等<sup>[24]</sup>在固定床反应器中分别采用慢速热解(7℃/min)和快速热解(300℃/min)工艺系统研究了烟草热解产物的组成和收率情况,发现两种工艺条件下的最佳热解温度均为550℃,相应生物油的最大收率分别为27%和30%,但快速热解法得到的生物油具有更高的热值(29.59 MJ/kg)和氢碳比(1.53),且氮和硫含量低,富含C<sub>12</sub>~C<sub>17</sub>直链烷烃,与标准柴油类似。为推进热解技术的产业化,相关学者还研究了流化床工艺,如C. J. Booker等<sup>[25-26]</sup>采用流化床中试装置研究发现,在500℃保留5s得到的生物油收率最高,为43.4%。B. C. Yan等<sup>[27]</sup>采用流化床反应器分别对烟叶和烟秆进行了热解处理,发现生物油的最佳反应温度为400℃,且烟秆源生物油的收率高于烟叶,最高为67.47%;两种生物油的主要成分均为杂环化合物和酸,几乎不含类似卷烟烟气的有害成分,且烟叶生物油还含有更多种类的香味成分。

从技术经济性考虑,联产技术相比单纯生物油的制备技术更具优势。在生物炭和热解油联产技术开发方面,V. Strezov等<sup>[28]</sup>采用慢速热解(5℃/min)技术制备烟草生物炭,并对500℃副产的生物油进行了成分分析,发现生物油中烟碱的峰面积占比最

大(占 13.5%),且富含酸性物质(峰面积占 72%),主要是酚类和脂肪酸,并不适合直接用作燃料,使用前还需要作相应的提质处理。B. Onorevoli 等<sup>[29]</sup>以烟草种子提取后的残渣为原料,先将其在 700 °C 短时间内进行炭化,再制备成生物炭,整个过程副产生物油的收率为 37.6%,高于同等条件下稻壳、桃核、海葵种子等其他生物质原料。B. C. Yan 等<sup>[27]</sup>以烟秆和烟叶为原料,采用固定床反应器在 350~650 °C 研究了其热解产物的燃料特性,发现 400~500 °C 热解温度较为适宜,且所制备烟草源焦炭的热值优于煤炭,热解得到的生物油在闪点、密度、黏度等指标与煤油、柴油、变压器油类似。在烟碱与生物油联产技术开发方面,对于植物中高附加值化工成分的提取,相比传统溶剂法,热解技术的成本更低,且更加简便、安全<sup>[30]</sup>。2015—2018 年, M. M. Hossain 等<sup>[30-33]</sup>开发了系列机械流化床工艺技术,烟草生物油的收率为 44.8%~49.0%,烟碱的回收率为 104%~109%;当反应器温度为 275 °C 时,生物油中烟碱的质量分数为 25%,且烟碱的回收率为 92%。

在其他热化学技术开发方面,2016 年, F. G. Barla 等<sup>[19]</sup>研发了一种水热液化技术,可在几秒内将烟草纤维素转化为葡萄糖、纤维二糖、低聚糖等水解产物,结合发酵技术可同时制备得到生物柴油和燃料乙醇。

相比单一的热化学直接转化过程,研究者们也开始关注热化学条件下添加剂或催化剂的协同促进作用。催化剂可以改变烟草的热解过程,降低其热解温度,进而调整生物油的化学组成,相关添加剂主要包括金属氧化物和金属氯化物两种。M. K. Akalin 等<sup>[34]</sup>研究了金属氧化物( $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )和金属氯化物( $\text{AlCl}_3$ 、 $\text{SnCl}_4$ )对烟草热解行为的影响,发现添加剂的用量和热解温度是影响热解产物分布的重要因素,在低温(300 °C)条件下,添加剂的催化效应占主导,热解温度更低,降低至 100 °C,且得到的生物油沸点也相对较低,生物油中酚类、醛类、酮类和醇类化合物明显增多,并新产生了丙二醇、3-呋喃甲醇等一些常规热化学直接处理条件下不存在的成分。C. R. Cardoso 等<sup>[35]</sup>采用裂解分析仪结合气相色谱仪研究了  $\text{ZnCl}_2$  和  $\text{MgCl}_2$  对烟草废弃物热解油组

成的影响,发现烟草单独热解得到的生物油中烟碱和 4-戊-1-醇的含量较高,600 °C 和 700 °C 的峰面积分别占 36%和 16%;向烟草原料中添加质量分数 10%的  $\text{MgCl}_2$ ,可明显提高热解油中含氧、酮类和醛类化合物的含量,而添加质量分数 10%的  $\text{ZnCl}_2$  则可显著提高热解油的十六烷含量。C. R. Cardoso 等<sup>[36]</sup>还进一步研究了这两种金属氯化物的添加量对烟粉高温(500 °C)热解油组成的影响,发现当  $\text{MgCl}_2$  添加量为 5%时,所得产品富含乙酸和酚类化合物,当添加量提升至 20%时,产品富含糠醛;当  $\text{ZnCl}_2$  添加量为 10%时,所得生物油的燃烧性能最佳。可见,添加剂是影响烟草热解油组成的重要因素,进而影响热解油后续的应用场景,其中,  $\text{MgCl}_2$  催化条件下得到的热解油后续更适用于高附加值化工产品的生产,而  $\text{ZnCl}_2$  催化条件下的热解油更适合用作运输燃料等<sup>[36]</sup>。

## 2.3 发酵法

目前,国内生物质乙醇的发酵原料主要为粮食作物,如甘蔗、甜菜、陈化粮等,成本相对较高,且粮食是人类赖以生存的重要战略资源,因此,基于粮食的燃料乙醇在规模上受到一定程度的限制。以烟草及其废弃物为原料制备燃料乙醇不仅有利于环保,还能变废为宝,实现资源的重复利用。

烟草源燃料乙醇主要是由烟草原料中的木质纤维素通过生物化学法转化而来,包括预处理、酶解和发酵 3 个环节<sup>[37]</sup>。预处理是最初也是最为关键的环节,目的主要是破坏烟草原料中的天然木质素,还可部分分解木质素和半纤维素,以提升后续酶解和发酵的效果。预处理方法众多,根据方法原理可分为物理法、化学法、物理化学法和生物法 4 种,其中物理法中应用较多的有研磨、切屑等,化学法中有酸、碱或氧化剂催化分解等<sup>[38-39]</sup>。酶解环节主要是将纤维素和半纤维素水解成可被发酵菌种利用的单糖。发酵环节主要是酿酒酵母发酵,可将酶解得到的单糖进一步转化为乙醇。

烟草源燃料乙醇的研究主要聚焦在如何提高整个生物炼制过程中乙醇的产量方面,其中,预处理方法类研究最多。2002 年, C. Martín 等<sup>[39]</sup>依次将烟秆碎片经 205 °C 蒸气处理、酶解和面包酵母发酵,得到

燃料乙醇,收率为 0.38 ~ 0.39 g/g。为进一步提高烟秆中纤维素的酶解性(可及性和可酶解量),2008年,C. Martín 等<sup>[40]</sup>开发了湿法氧化预处理技术,发现预处理结合酶解技术可将烟秆水解物中的总葡萄糖含量由 2.5% 提升至 56.1%,但在预处理环节也同时会产生抑制酵母发酵的有害成分,如乙酸、甲酸、酚类化合物等,如何消除这些有害物质是后续在发酵环节提升乙醇产量的关键。谢兆钟等<sup>[41]</sup>基于制糖发酵法,分别采用溶剂萃取、酸性螯合剂将烟草废弃物中抑制乙醇发酵的油溶性成分(茄尼醇和烟草净油)和水溶性成分(果胶和单宁)去除,再进行常压发酵,经蒸馏得到质量浓度高达 96% 的乙醇,但并未明确乙醇的具体收率。在酸性预处理方法开发方面,谢丽萍等<sup>[42]</sup>开发了酸催化水解预处理技术,以烟草下脚料为原料,采用质量分数为 50% 的硫酸作为催化剂处理 100 min,而后分别对过滤液和非过滤液进行酿酒酵母发酵,两种条件下乙醇的质量浓度分别达到 1.09 g/L 和 1.23 g/L,产量分别为 54.5 g/kg 和 61.5 g/kg。在碱性预处理方法开发方面,研究<sup>[43]</sup>显示,浓碱可解构烟草原料的结构,进而提高纤维素的生物可转化性。S. Sarbishei 等<sup>[43]</sup>将烟草废弃物通过氨水浸泡去除烟碱,干燥后依次进行浓碱预处理、酶解和冻土毛霉菌丝状真菌发酵,乙醇收率由 44.4% 提升至约 97.0% (基于理论收率计算),这也是目前文献报道的最高值。但由于该过程中使用了大量的化学试剂,会产生大量废液,尽管研究者在工艺上使用了酶固定化技术,但增加了废液回收利用工序,未来能否产业化利用仍需技术经济性测算。相比于单一的预处理方法,2022年,K. Sophanodom 等<sup>[37]</sup>联合采用了物理和化学两种预处理方法,以烟秆为原料,依次经水热处理、CaO 碱处理进行脱木质素预处理,然后再进行酶解和酵母发酵,发酵 48 h 的乙醇收率最高,为 75.74 g/L。

另外,随着生物技术的发展与成熟,研究者也开始尝试采用生物技术调整烟草植株的物质基础,进而提升发酵环节乙醇的产量。2013年,研究<sup>[44]</sup>表明通过生物技术调整烟草中的特定蛋白质(硫氧还蛋白),调整后烟叶中的淀粉和可发酵糖量分别增加了 700% 和 500%,认为烟草有望取代小麦、玉米

等粮食作物成为燃料乙醇的理想原料。2014年,I. Farran 等<sup>[45]</sup>采用叶绿体表达系统在商业烟草品种(Virginia Gold 和 Havana 503B)中高效表达了硫氧还蛋白,相比野生型烟草,烟叶中淀粉、可溶性糖含量和烟秆中可发酵糖含量显著提高,烟株水解物依次经热预处理、酶解和酵母发酵,乙醇产量可提升 20% ~ 40%。

综上所述,在传统烟草资源利用方面,热化学转化制生物油是其研发的重点,包括直接热解、催化热解两种,其中,后者在液体燃料组成调控方面具有一定优势。发酵法燃料乙醇的制备技术主要聚焦在预处理环节,浓碱预处理在提升乙醇收率方面效果显著,但经济性还有待评估。未来,基于生物技术的烟草能源新品种的开发是烟草燃料化利用的重要研究方向。

### 3 烟草源气体燃料

生物质气化是生物质热解制备燃料的另一种表现形式。为了提高燃气的产量,在热解过程中通常添加空气、 $H_2$ 、水等气化剂,生物质在高温(700 °C 以上)环境中能够与气化剂发生不完全氧化反应,进而生成高能量密度的气体燃料,包括  $CO$ 、 $CH_4$ 、 $H_2$  及其他小分子碳氢化合物等<sup>[46]</sup>。燃料的组成与气化剂种类密切相关,当气化剂为空气时,产物为  $CO$  等低热值气体<sup>[46-47]</sup>;当气化剂为  $H_2$  和氢化物时,产物为高热值气体;当气化剂为  $O_2$  和水蒸气时,产物主要为  $CH_4$  和  $H_2$ <sup>[46-47]</sup>。所得气体产物经处理后除直接燃烧应用外,还可作为平台化合物进行深加工生产各类化工原料。目前,烟草源气体燃料主要是  $H_2$  和沼气两种。

#### 3.1 制备 $H_2$

早在 1999年,J. M. Encinar 等<sup>[48]</sup>采用热解技术对比研究了玉米、向日葵、葡萄、烟草废弃物转化为燃料的可行性,发现 4 种原料热解产生的焦炭热值均较低,但在低温条件下,采用烟草废弃物制氢具有一定的原料优势。为提升燃气中  $H_2$  的占比,N. Ayas 等<sup>[49]</sup>开发了直接催化热解制氢技术,装置为上升气流气化炉,催化剂为  $Na_2CO_3$ ,在最优条件(温度 650 °C、40% 催化剂添加量)下单位质量(kg)烟草废

弃物可产  $H_2$  6.06 mol。在蒸气重整热解制氢方面, M. Klaas 等<sup>[50]</sup>开发了基于烟秆热解炭的水蒸气重整制氢技术,装置为鼓泡流化床,综合考虑重整气中  $H_2$  的占比、 $H_2$  相对于生物质和相应焦炭质量的收率,烟草原料经热解炭制备  $H_2$  的产率相对较高,在 650 °C 时  $H_2$  (以焦炭质量计) 的收率最高,为 14.9%。田甜等<sup>[51]</sup>采用固定床反应器研究了 617~1435 °C 范围内烟秆的水蒸气重整制氢性能,发现温度是影响气化过程的重要因素,且重整过程主要发生了均相反应和非均相反应,低于 917 °C 时,温度的升高可以同时促进两种反应的进行, $H_2$  产率快速升高;917 °C 时,非均相反应进行充分,潜在产氢率达到极大值;当温度高于 917 °C 时,升温主要促进均相反应进行, $H_2$  产率升高缓慢;当温度达到 1327 °C 时,均相反应速率加快,反应进行完全,不再受温度影响, $H_2$  产率最大为 0.97  $m^3/kg$ 。在催化辅助制氢方面, T. G. Madenoglu 等<sup>[52]</sup>采用亚临界和超临界水气化技术对比研究了烟秆和棉秆的催化制氢性能,催化剂分别为天然矿物催化材料 Trona、Dolomite 和 Borax,发现在 600 °C 条件下 Trona 的催化效果最好,烟秆的  $H_2$  收率比对照组增加了 42.9%,且由于烟秆中较低的木质素含量(13.4%),故在同等条件下烟秆产  $H_2$  的收率普遍高于棉秆。

### 3.2 制备沼气

沼气技术(厌氧消化技术)是一种通过生物化学转化法对生物质资源加以利用的技术,旨在通过厌氧消化制备  $CH_4$ , 技术较为成熟。资料显示,烟草废弃物厌氧消化技术最早可追溯到 1986 年,单位质量(kg)烟秆可产生物气(Bio-gas) 270~300  $L^{[53]}$ 。其中,生物气是发酵产生气体的总称,含有  $CH_4$ 。1995 年, K. K. Meher 等<sup>[53]</sup>采用 10  $m^3$  的中试设备研究了水力保留时间(HRT)对烟秆室温厌氧发酵的影响,当 HRT 为 15 d 时,单位质量(kg)烟秆可产生物气 169~282 L。除常规厌氧消化外,陈智远等<sup>[54]</sup>还探索了烟秆的干法产  $CH_4$  技术,在 38 °C 条件下对烟秆进行批量发酵, $CH_4$  的产率为 333  $mL/g$ ,与稻草的发酵结果相近。另外, A. González-González 等<sup>[55]</sup>探索了新鲜烟叶沼气化的可行性,采用活性污泥在中温条件对其进行半连续厌氧消化,

每吨鲜烟叶的  $CH_4$  收率仅为(53.84±15.48)  $Nm^3$ , 尚未达到经济性标准。

在能源烟草新品种开发方面,2019 年, A. Fatica 等<sup>[22]</sup>基于开发的能源烟草新品种 Solaris 进行厌氧发酵,每吨生物质可产生物气(290.0±75.0)  $Nm^3$ , 其中  $CH_4$  的产量为(168.0±47.0)  $Nm^3$ , 占生物气总量的 58%, 相比其他作物,该烟草品种的  $CH_4$  产量处于中等偏上水平,具有一定商业应用价值。

烟草的热解不仅能够产生生物油、 $H_2$ , 也能产生  $CH_4$ , C. H. Wang 等<sup>[56]</sup>采用 TG-MS 技术研究了水、HCl 和 NaOH 预处理对烟秆热解产  $CH_4$  性能的影响,发现 NaOH 预处理的效果最佳,可显著提高合成气中  $CH_4$  的产量,同时降低焦油的生成量,且研究还发现,燃料气体主要来源于木质素的热解,无机元素的存在可明显抑制热解过程中芳烃类化合物的形成。

综上所述,烟草源气体燃料主要是  $H_2$  和沼气( $CH_4$ )两种。 $H_2$  的制备技术有直接热解、催化热解、重整制氢(蒸气重整制氢、热解碳+重整制氢、催化重整制氢)等,以重整制氢研究最多,且相比其他农作物原料具有一定的原料优势。沼气( $CH_4$ )的制备主要采用传统的厌氧消化技术,技术较为成熟,从经济性上看,烟草及其废弃物(如烟秆等)的沼气化利用效果明显优于新鲜烟叶。此外,烟草经碱处理再热解也能得到富含  $CH_4$  的生物气,这为烟草源  $CH_4$  的制备提供了另一种途径。

## 4 结论与展望

本研究梳理和综述了烟草及烟草废弃物的燃料化利用研究进展,指出烟草源燃料包括固体燃料、液体燃料和气体燃料 3 种。固体燃料的制备,以固体成型燃料和生物质炭化燃料为主,烟草原料可与其他燃料进行协同耦合,通过各自优势互补来提高燃料整体利用效率,主要通过烟草原料与煤或其他生物质等进行耦合来制备固体燃料;烟草原料炭化成型也是极具发展潜力的一种清洁环保燃料,燃烧后的灰分可作为肥料用于农业生产。液体燃料的制备,以燃料乙醇和热化学法制备生物油为主,催化热解制备生物油是未来重点的发展方向,而燃料乙醇

的制备关键环节依旧是原料的预处理技术,在整个技术链上尚未取得根本性突破。气体燃料的制备,以  $H_2$  和  $CH_4$  为主,其中,重整制氢具有一定的原料优势;在  $CH_4$  制备方面,沼气化技术较为成熟,烟草原料热解产  $CH_4$  技术进一步拓宽了  $CH_4$  的来源途径。

烟草及烟草废弃物中含有烟碱等烟草特有活性成分,在燃料化利用过程中不能简单借鉴大农业领域相应的生产技术,还需增加相应的前处理或后处理工序,以保证能源产品的高效、安全生产。烟草原料的化学组成随种类有所差异,可根据不同来源原料的组成特点进行有机调控,进一步提高烟草废弃物燃料化利用的效率。在发酵法生物燃料制备过程中,鉴于部分生物活性物质的抑制作用,同时部分生物活性物质又兼具较高的利用价值,联产技术是今后烟草燃料化利用的重点方向,即对烟草原料进行提取得到高附加值的生物活性成分,而后根据提取残余物的物化特性进行原料的合理复配,再进行生物燃料的制备。此外,靶向能源用途,基于生物技术烟草新品种的开发也是未来烟草燃料化利用的重要研究和产业化利用方向。

## 参考文献:

[1] 王金棒,贾楠,汪志波,等.烟草主要废弃物在多孔材料领域的研究进展[J].烟草科技,2020,53(12):96-105.

[2] 王金棒,胡斌.烟草多用途技术与应用[M].郑州:郑州大学出版社,2021.

[3] 陈振国.典型烟草废弃物热转化的机理研究及应用[D].武汉:华中科技大学,2018.

[4] 林燕辉.烟秆生物质炭化与成型燃料制备及性能表征[D].杭州:浙江大学,2015.

[5] 侯家萍,王闻,张蕾欣,等.现代生物质能源技术体系及其产业化应用态势[J].现代化工,2022,42(5):7-13.

[6] 张得政,张霞,杨飞,等.菌苞、木屑和烟秆颗粒燃料成型特性研究[J].农机化研究,2017,39(10):241-245.

[7] 宋春宇,张体高,朱晋熙,等.烟秆秸秆压块在烟叶烘烤中的应用研究初报[J].湖南农业科学,2016(3):82-84.

[8] WANG L, FAN Y K, HE F, et al. Screening and testing of anti-slagging agents for tobacco-stalk-based biomass pellet fuel for tobacco curing [J]. Processes, 2022, 10(9):

1690.

[9] 莫静之.烟秆生物质燃料在烟叶烘烤中的应用研究[D].长沙:湖南农业大学,2019.

[10] CAI J X, LI B, CHEN C Y, et al. Hydrothermal carbonization of tobacco stalk for fuel application [J]. Bioresource Technology, 2016, 220:305-311.

[11] 苟文涛,王晓剑,钟俊周,等.不同配方生物质燃料物理特性与燃烧特性研究[J].安徽农业科学,2018,46(24):177-181,223.

[12] WANG X F, XU G Z, ZHANG B L, et al. Application of tobacco stems briquetting in tobacco flue-curing in rural area of China [J]. International Journal of Agricultural & Biological Engineering, 2015, 8(6):84-88.

[13] 廖稷邦,刘迎春,陈鹏飞,等.烟秆与配煤混燃特性及协同作用研究[J].煤炭技术,2021,40(9):200-203.

[14] CONG K L, HAN F, ZHANG Y G, et al. The investigation of co-combustion characteristics of tobacco stalk and low rank coal using a macro-TGA [J]. Fuel, 2019, 237:126-132.

[15] 谭方利,樊士军,董艳辉,等.生物质压块燃料及煤炭燃料在烟叶烘烤中的应用效果对比研究[J].现代农业科技,2014(10):201,209.

[16] 饶月,刘芮,杨飞,等.烟秆和木屑生物质颗粒燃料成型工艺参数优化[J].可再生能源,2019,37(5):650-655.

[17] 温丽娜,陶琼,欧阳进,等.农林生物质原料热值比较及烟秆-玉米秆生物质燃料优化配方研究[J].湖南农业科学,2016(1):43-46.

[18] 陈晶铃.烟秆裂解及微波膨化的研究[D].淮南:安徽理工大学,2009.

[19] BARLA F G, KUMAR S. Tobacco biomass as a source of advanced biofuels [J]. Biofuels, 2019, 10(3):335-346.

[20] ALAGIC S, STANCIC I, PALIC R, et al. Chemical composition of the supercritical  $CO_2$  extracts of the *Yaka*, *Prilep* and *Otlja* tobaccos [J]. Journal of Essential Oil Research, 2006, 18(2):185-188.

[21] ANDRIANOV V, BORISJUK N, POGREBNYAK N, et al. Tobacco as a production platform for biofuel: Overexpression of *Arabidopsis* *DGAT* and *LEC2* genes increases accumulation and shifts the composition of lipids in green biomass [J]. Plant Biotechnology Journal, 2010, 8(3):277-287.

[22] FATICA A, DI LUCIA F, MARINO S, et al. Study on analytical characteristics of *Nicotiana tabacum* L., cv. Solaris biomass for potential uses in nutrition and biomethane production [J]. Scientific Reports, 2019, 9(1):16828.

[23] 陈冠益,马文超,颜蓓蓓,等.生物质废物资源综合利用技术[M].北京:化学工业出版社,2015.

[24] PÜTÜN A E, ÖNAL E, UZUN B B, et al. Comparison between the “slow” and “fast” pyrolysis of tobacco residue [J]. Industrial Crops and Products, 2007, 26(3):

- 307-314.
- [25] BOOKER C J, BEDMUTHA R, SCOTT I M, et al. Bioenergy II: Characterization of the pesticide properties of tobacco bio-oil [J]. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, 2010, 8: A26.
- [26] BOOKER C J, BEDMUTHA R, VOGEL T, et al. Experimental investigations into the insecticidal, fungicidal, and bactericidal properties of pyrolysis bio-oil from tobacco leaves using a fluidized bed pilot plant [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2010, 49 (20): 10074-10079.
- [27] YAN B C, ZHANG S P, CHEN W B, et al. Pyrolysis of tobacco wastes for bio-oil with aroma compounds [J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2018, 136: 248-254.
- [28] STREZOV V, POPOVIC E, FILKOSKI R V, et al. Assessment of the thermal processing behavior of tobacco waste [J]. *Energy & Fuels*, 2012, 26(9): 5930-5935.
- [29] ONOREVOLI B, DA SILVA MACIEL G P, MACHADO M E, et al. Characterization of feedstock and biochar from energetic tobacco seed waste pyrolysis and potential application of biochar as an adsorbent [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2018, 6(1): 1279-1287.
- [30] HOSSAIN M M, SCOTT I M, BERRUTI F, et al. A two-dimensional pyrolysis process to concentrate nicotine during tobacco leaf bio-oil production [J]. *Industrial Crops and Products*, 2018, 124: 136-141.
- [31] HOSSAIN M M, SCOTT I M, BERRUTI F, et al. Optimizing pyrolysis reactor operating conditions to increase nicotine recovery from tobacco leaves [J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2015, 112: 80-87.
- [32] HOSSAIN M M, SCOTT I M, BERRUTI F, et al. Application of 1D and 2D MFR reactor technology for the isolation of insecticidal and anti-microbial properties from pyrolysis bio-oils [J]. *Journal of Environmental Science and Health, Part B (Pesticides, Food Contaminants, and Agricultural Wastes)*, 2016, 51(12): 860-867.
- [33] HOSSAIN M M, SCOTT I M, BERRUTI F, et al. Application of novel pyrolysis reactor technology to concentrate bio-oil components with antioxidant activity from tobacco, tomato and coffee ground biomass [J]. *Waste and Biomass Valorization*, 2018, 9(9): 1607-1617.
- [34] AKALIN M K, KARAGÖZ S. Pyrolysis of tobacco residue. Part 2: Catalytic [J]. *BioResources*, 2011, 6(2): 1773-1805.
- [35] CARDOSO C R, ATAÍDE C H. Micropyrolysis of tobacco powder at 500 °C: Influence of ZnCl<sub>2</sub> and MgCl<sub>2</sub> contents on the generation of products [J]. *Chemical Engineering Communications*, 2015, 202(4): 484-492.
- [36] CARDOSO C R, ATAÍDE C H. Analytical pyrolysis of tobacco residue: Effect of temperature and inorganic additives [J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2013, 99: 49-57.
- [37] SOPHANODORN K, UNPAPROM Y, WHANGCHAI K, et al. Environmental management and valorization of cultivated tobacco stalks by combined pretreatment for potential bioethanol production [J]. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2022, 12(5): 1627-1637.
- [38] 吴创之, 马隆龙. 生物质能现代化利用技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- [39] MARTÍN C, FERNÁNDEZ T, GARCÍA R, et al. Preparation of hydrolysates from tobacco stalks and ethanolic fermentation by *Saccharomyces cerevisiae* [J]. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2002, 18(9): 857-862.
- [40] MARTÍN C, FERNÁNDEZ T, GARCÍA A, et al. Wet oxidation pretreatment of tobacco stalks and orange waste for bioethanol production. Preliminary results [J]. *Cellulose Chemistry and Technology*, 2008, 42(7/8): 429-434.
- [41] 谢兆钟, 李汉民, 吴进德. 利用烟草废弃物生产酒精的方法: 200810070873 [P]. 2008-02-05.
- [42] 谢丽萍, 赵晓祥, 杨虹蛟, 等. 烟草下脚料发酵制取乙醇 [J]. *环境工程学报*, 2010, 4: 1417-1420.
- [43] SARBISHEI S, GOSHADROU A, HATAMIPOUR M S. Mild sodium hydroxide pretreatment of tobacco product waste to enable efficient bioethanol production by separate hydrolysis and fermentation [J]. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2021, 11(6): 2963-2973.
- [44] SCIENCE DAILY. Genetically modified tobacco plants are viable for producing biofuels [EB/OL]. (2013-10-14) [2023-04-15]. <https://www.sciencedaily.com/releases/2013/10/131014094119.htm>.
- [45] FARRAN I, MILLAN A F S, ANCIN M, et al. Increased bioethanol production from commercial tobacco cultivars overexpressing thioredoxin f grown under field conditions [J]. *Molecular Breeding*, 2014, 34(2): 457-469.
- [46] 邱志丹, 连宇昌, 卢雨, 等. 烟秆与木屑配方生物质燃料在烟叶烘烤中的应用 [J]. *福建农林大学学报(自然科学版)*, 2021, 50: 10-15.
- [47] 杨益. 烟草废弃物热解和气化的实验及机理研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
- [48] ENCINAR J M, BELTRÁN F J, GONZÁLEZ J F, et al. Pyrolysis of maize, sunflower, grape and tobacco residues [J]. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 1997, 70(4): 400-410.
- [49] AYAS N, KARADENIZ S. Hydrogen from tobacco waste [C] // Proceedings of the 2nd International Conference Sustainable and Renewable Energy Engineering. Hiroshima: IEEE, 2017.
- [50] KLAAS M, GREENHALF C, FERRANTE L, et al. Optimisation of hydrogen production by steam reforming of chars derived from lumber and agricultural residues [J].

International Journal of Hydrogen Energy, 2015, 40 (9): 3642–3647.

- [51] 田甜, 李清海, 李文妮, 等. 温度和水蒸气流量对烟秆高温气化的影响[J]. 环境工程学报, 2016, 10 (4): 1973–1978.
- [52] MADENOGLU T G, KURT S, SAGLAM M, et al. Hydrogen production from some agricultural residues by catalytic subcritical and supercritical water gasification [J]. The Journal of Supercritical Fluids, 2012, 67: 22–28.
- [53] MEHER K K, PANCHWAGH A M, RANGRASS S, et al. Biomethanation of tobacco waste [J]. Environmental Pol-

lution, 1995, 90 (2): 199–202.

- [54] 陈智远, 姚建刚. 秸秆厌氧干发酵产沼气的研究[J]. 农业工程技术(新能源产业), 2009(10): 24–26.
- [55] GONZÁLEZ-GONZÁLEZ A, CUADROS F. Optimal and cost-effective industrial biomethanation of tobacco [J]. Renewable Energy, 2014, 63: 280–285.
- [56] WANG C H, LI L Q, CHEN R F, et al. Thermal conversion of tobacco stem into gaseous products [J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2019, 137 (3): 811–823.

## Research status and prospects of tobacco in the field of fuel preparation

WANG Jinbang<sup>1</sup>, CHI Zhexiang<sup>2</sup>, LI Yuanyuan<sup>3</sup>, QIU Jiqing<sup>1</sup>, WANG Zhibo<sup>1</sup>,  
ZHANG Yujie<sup>4</sup>, WANG Yongsheng<sup>1</sup>, ZHOU Yaning<sup>1</sup>

1. Zhengzhou Tobacco Research Institute of CNTC, Zhengzhou 450001, China;

2. State Tobacco Monopoly Bureau, Beijing 100045, China;

3. Staff Development Institute of CNTC, Zhengzhou 450008, China;

4. Technology center, China Tobacco Hebei Industrial Co., Ltd., Shijiazhuang 050051, China

**Abstract:** In order to avoid environmental pollution and resource waste produced during the production and processing of tobacco, this paper systematically reviewed the current status of fuel utilization of tobacco and its wastes and showed that: The preparation method of tobacco solid fuel was simple and convenient, but the requirements for equipment were high. Among them, tobacco briquette charcoal was more easily transported and stored, clean and environmentally friendly, furthermore, the combustion residue could also be used for secondary utilization in agriculture. The preparation method of liquid fuel preparation was relatively mature. The operation of the direct extraction technology was simple, but the bio-oil yield depended on the inherent fat content in tobacco raw materials. Therefore, it required higher requirements for tobacco varieties. The thermal chemical conversion method belonged to a chemical process with high energy consumption, but there is a large space for innovation with regard to the preparation method. The chemical composition of liquid fuels could be adjusted, having a huge development potential. The fermentation method produced a single product, mainly ethanol, with low efficiency at present. There has been no breakthrough in the pretreatment technology for scalable application of tobacco raw materials throughout the entire technical chain. The preparation method of gaseous fuel was still in the exploration stage, with high energy consumption and low yield. The tech-economic feasibility was poor. In the future, much more attention should be paid on tobacco briquette charcoal, tobacco fermentation for fuel ethanol production, tobacco catalytic pyrolysis for liquid fuel, as well as the cultivation of novel tobacco varieties targeted towards specific energy purpose. This will further promote the industrialized development of multiple purposes of tobacco.

**Key words:** tobacco waste; energy; fuel; biorefinery

(责任编辑:吴晓亭)