

文章编号:2095-7386(2022)01-0009-07

DOI:10.3969/j.issn.2095-7386.2022.01.002

# 玉米秸秆燃料化利用技术研究进展

刘秋兰,易阳,胥伟,张燕鹏

(武汉轻工大学 食品科学与工程学院,湖北 武汉 430023)

**摘 要:**我国具有丰富的玉米秸秆资源,燃料化是其综合利用的主要方式之一,它对缓解能源紧缺、减少环境污染和增加农业生产效益有重要意义。目前,玉米秸秆燃料化的主要技术涉及直燃、固化、炭化、液化和气化,而打捆是保障各项燃料化技术高效化和规模化应用的前提。本文对玉米秸秆打捆和燃料化技术及装备的研究现状进行综述,旨在为资源综合利用开发和应用推广提供参考。

**关键词:**秸秆;打捆;燃料化;综合利用

**中图分类号:**S 14-31

**文献标识码:**A

## Research progress of fueling utilization technology of corn straw

LIU Qiu-lan, YI Yang, XU Wei, ZHANG Yan-peng

(School of Food Science and Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China)

**Abstract:** China is rich in corn straw resources, and fueling is one of the main ways of its comprehensive utilization, which is of great significance for alleviating energy shortage, reducing environmental pollution and increasing agricultural production benefits. At present, the main technologies of corn straw fueling involve direct combustion, curing, carbonization, liquefaction and gasification, While bundling is the premise to ensure the high efficiency and large-scale application of various fueling technologies. In this paper, the research status of corn straw bundling and fuel processing technology and equipment was summarized, aiming to provide reference for comprehensive development and application of the resources.

**Key words:** straw; bundling; fuelization; comprehensive utilization

## 1 引言

秸秆是农业生产的木质纤维素废弃物,具有产量大、种类多、来源广、可持续性强等特点<sup>[1]</sup>。随着能源短缺和环境污染问题的日益凸显,基于政府的引导管理和农户认识的提高,秸秆焚烧现象得到有效控制,但大量秸秆的离田和出路成为困扰农户和

政府的难题<sup>[2,3]</sup>。因而,作为农业生产物质资源的重要组成,秸秆的综合利用备受关注。据测算,目前秸秆资源的可收集总量约 8.76 亿 t,主要通过“五化”利用,其中肥料化 4.76 亿 t、饲料化 2.2 亿 t、燃料化 1.2 亿 t、基料化和原料化共 0.6 亿 t,综合利用率达 86.5%<sup>[4]</sup>。

按玉米草谷比 1.04<sup>[5]</sup>,参考 2020 年《中国统计

收稿日期:2022-01-10.

作者简介:刘秋兰(1997-),女,硕士研究生,E-mail:1473186004@qq.com.

通信作者:易阳(1986-),男,博士,教授,E-mail:yiy86@whpu.edu.cn.

基金项目:国家创新方法工作专项课题(编号:2020IM020904).

年鉴》公布的主要农产品产量,估算 2005—2020 年我国玉米秸秆产量及 2020 年的产量分布情况,如图 1 所示。近 5 年的玉米秸秆产量较为稳定,其变异系数仅 0.9%。2020 年我国玉米秸秆产量约 2.71 亿 t,主要分布在黑龙江、吉林、内蒙古、山东、河南、河北和辽宁等省份,以肥料化和饲料化方式利用,其利用率分别为 35% 和 29.2%<sup>[4,6]</sup>。燃料化是玉米秸秆的另一重要利用途径,在缓解我国传统能源紧缺、优化能源结构、改善环境质量、降低农业生

产负担等方面具有重要意义。相比于秸秆的其它利用方式,燃料化的链条短且效率高,主要技术涉及直燃、固化、炭化、液化、气化等,而打捆贮运是实现其高效化和规模化利用的先决条件(见图 2),玉米秸秆的基本组成、结构特征和燃烧特性与其他秸秆利用方式存在显著差异,其打捆和燃料化技术可能存在一定的特异性,本文通过综述相关技术和装备的研究现状,以期对玉米秸秆燃料化开发和应用提供参考。

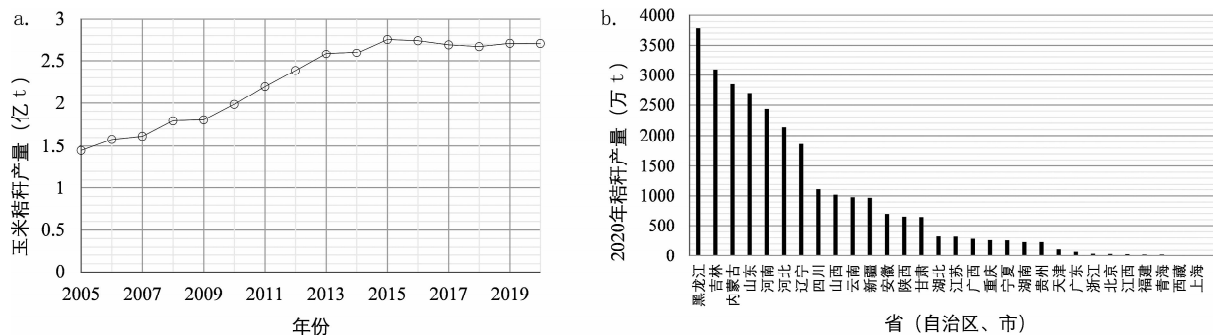


图 1 2005—2020 年玉米秸秆产量以及 2020 年玉米秸秆产量的分布情况

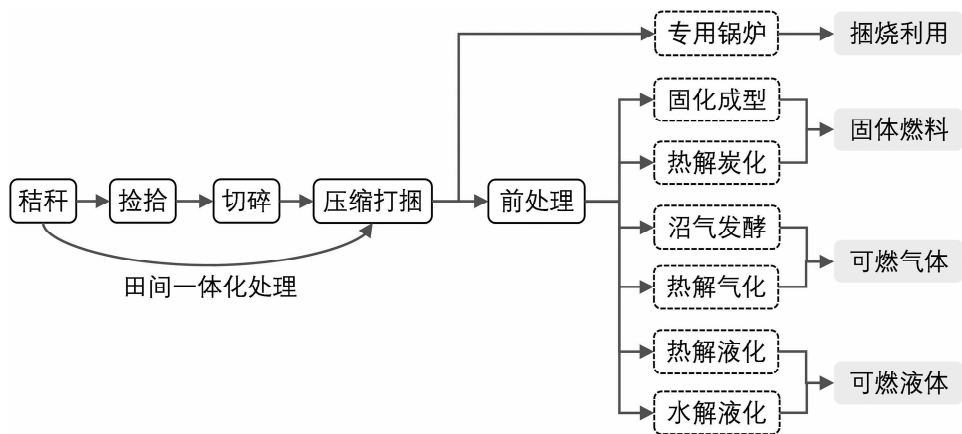


图 2 玉米秸秆燃料化利用途径

## 2 玉米秸秆打捆技术

玉米秸秆具有分布分散、季节性强、收获时间短等特点,而秸秆的燃料化利用需要集中、持续和大量的原料供应。打捆是玉米秸秆离田利用的关键,也是贮存运输的前提<sup>[2]</sup>。打捆相比整株秸秆更易储存,而相较于粉碎秸秆具有更高的发热量和挥发分含量,有利于提高玉米秸秆的利用效率<sup>[7]</sup>。

我国早期的秸秆打捆机及关键部件研发大多借鉴了国外纽荷兰、约翰迪尔等厂家的设计思路,对我国农业生产现状和秸秆资源特点的考虑不足,存在整机布局不够合理、结构不够紧凑、能耗大、作业质量不高等缺点<sup>[8]</sup>。目前,我国玉米秸秆打捆机的研

发取得显著成效,整体呈现多元化、自主化、自动化和智能化的特点。

为替代山区玉米秸秆的手工打捆方式,马清艳等<sup>[9]</sup>基于踏板传动束缚研究设计了一种适合小规模家庭作业的简易打捆机。针对玉米秸秆打捆的特点,徐鹏云等<sup>[10]</sup>结合长胶带和钢辊设计了圆捆构件。为提高玉米秸秆青贮质量,崔力韦等<sup>[11]</sup>研发打捆包膜机整机,通过后端的包膜单元将压缩成型的圆捆进行包膜。徐鹏云等<sup>[12]</sup>设计开发的固定式电机拖动打捆机,集成玉米秸秆喂入、打捆压缩、计数和放线包膜等功能,可满足固定场所粉碎玉米秸秆的圆捆工作。邢蕾等<sup>[13]</sup>采用逐级分解压力(压扁+机械预压+液压主压)方案,设计玉米秸秆大方捆

(1.5 m × 1.3 m × 1.2 m) 打捆机, 其生产率为 4 ~ 7 t/h, 方捆重达 350 ~ 450 kg, 可用于发电等规模化工业。

多功能田间作业一体机的研发进一步提升了玉米秸秆的采收效率。由山东理工大学研究设计的 4YZPDK-4 玉米收获-秸秆打捆一体机<sup>[14,15]</sup>, 前台进行果穗收获, 中部通过甩刀式切碎装置和打捆装置对秸秆进行切碎打捆, 使机器同时完成果穗收获与秸秆打捆 (600 mm × 450 mm × 300 mm 小型方捆), 方捆密度 (~180 kg/m<sup>3</sup>) 满足相关标准要求。为提高自走式秸秆青贮打捆玉米收获机的作业效率, 包伟等<sup>[16]</sup>依据打捆作业流程, 采用机电液一体化技术, 实现了对喂料、送绳以及液压开闭仓门过程的自动控制。此外, 山东省农业机械科学研究院设计的 9YFM-1900 型玉米秸秆打捆灭茬一体机, 能够实现秸秆切碎、绞龙输送、拨叉喂入、活塞推压、穿针打结和灭茬还田等一系列功能, 样机田间试验的草捆密度、规则草捆率、成捆率、根茬粉碎合格率以及秸秆捡拾损失率分别为 119.3 kg/m<sup>3</sup>、96.5%、100%、90% 及 6%<sup>[17,18]</sup>。

### 3 玉米秸秆捆烧技术

秸秆捆烧技术是以打捆秸秆为原料, 直接投入专用锅炉内进行半气化燃烧的能源化利用技术, 具有运行成本低、操作方便、清洁环保等特点, 是北方地区生物质清洁取暖的主要技术之一<sup>[3,19]</sup>。基于 3E (Economic, Energy and Environment) 评价模型研究发现, 相较于玉米秸秆成型燃料、秸秆炭气联合和煤炭, 捆烧供暖技术的能源和经济效益最好、温室气体排放最少 (仅为煤炭的 1/10), 用于农业和工业园区等区域供热的前景良好<sup>[20]</sup>。国内外捆烧技术的相关研究主要集中在燃烧特性、配风设计、锅炉结构设计等方面。

秸秆捆在燃烧过程初期发生烘干脱水, 随后半纤维素、纤维素和木质素热分解产生 CO、CH<sub>4</sub>、H<sub>2</sub> 等挥发分快速燃烧, 并形成秸秆炭继续燃烧 (占燃烧时间的 90%) 成灰渣<sup>[3]</sup>。挥发分燃烧所释放的热量占整个燃烧过程热量的 67% 以上, 是提高秸秆捆烧效能的关键, 与燃烧室的过量空气系数、气体流速和温度等因素有关<sup>[19]</sup>。玉米秸秆灰分含量高且熔点较低, 过高的炉膛温度会造成较为严重的颗粒物排放、锅炉结渣、结焦等问题, 而温度过低易因燃烧不充分而产生热损失<sup>[3]</sup>。故而, 合理的炉膛结构设计和配风工艺, 对实现燃烧过程控制尤为重要。刘恩

海等<sup>[21]</sup>分析燃烧温度和供风量对玉米秸秆捆燃烧速度的影响发现: 合理配风下的控温燃烧, 挥发份的析出速度均匀适中, 燃烧相对平稳。此外, 烟气回膛燃烧和烟尘脱除系统是降低烟尘颗粒物、NO<sub>x</sub> 及 CO 等排放的有效措施<sup>[3,19]</sup>。

基于原料分级和配风分级技术原理, 贾吉秀等<sup>[22]</sup>设计研发了集成分级燃烧、多级配风、组合式烟气净化除尘和智能控制的秸秆捆烧锅炉, 解决了燃烧效率低、烟尘和 NO<sub>x</sub> 等污染物排放高以及自动化程度低的问题。燃烧试验结果发现: 玉米秸秆捆烧的热效率达 84.6%, 烟尘排放平均质量浓度 19.8 mg/m<sup>3</sup>, NO<sub>x</sub> 质量浓度 133.6 mg/m<sup>3</sup>, SO<sub>2</sub> 质量浓度小于 3 mg/m<sup>3</sup>。由农业部规划设计研究院设计的秸秆捆烧锅炉清洁供暖系统, 集成了进料、换热、配风、燃烧、灰尘处理、炉渣处理和污水净化共 7 大系统<sup>[23]</sup>; 多级配风使烟气燃烧更充分, 并基于循环水流换热维持炉膛温度约 800 °C, 结合旋风分离、静电和淋洒的共同作用解决灰尘污染。

### 4 玉米秸秆固化生产技术

秸秆固化成型技术是通过粉碎、干燥、机械加压等过程将秸秆压成形状规则且能量密度大的固体燃料<sup>[24]</sup>, 多为 8 mm 颗粒、30 mm 方块和 35 mm 圆棒<sup>[25]</sup>。成型燃料具有体积小、密度高、热值高和贮运便利的优势, 是扩大玉米秸秆销售应用半径以及提升其使用性能的关键手段之一。经测算, 北方大部分省份若将露天焚烧的秸秆加工为成型燃料来替代农村采暖散煤, 各省总计能够减少散煤使用量 860 3.6 万 t, 分别减少 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、CO、PM<sub>2.5</sub>、CO<sub>2</sub> 排放量 32.3 万 t、27.47 万 t、613.76 万 t、3.30 万 t、25 195.29 万 t, 对我国能源短缺、农村废物处理、大气环境污染等问题能起到积极的改善作用<sup>[26]</sup>。

原料组分、含水量、粒度、成型温度、成型压力和保压时间等因素均可能影响玉米秸秆成型燃料的加工能耗、物性指标 (密度、强度、耐久性、破碎率、渗水性等) 和燃烧性能<sup>[27-30]</sup>。王功亮等<sup>[29]</sup>基于响应面法优化玉米秸秆成型工艺, 获得松弛密度 (103.1 kg/m<sup>3</sup>) 满足成型燃料标准且比能耗 (10.03 kJ/kg) 最小的条件为: 压力 51 MPa、温度 110.8 °C 和含水量 17%。此外, 玉米秸秆成型燃料本身孔隙中所含空气也对燃烧有一定的影响, 在 10 ~ 20 MPa 压力下的燃料相对孔隙率介于 1.5% ~ 5.0%, 其压缩成型性能和燃烧性能满足使用要求<sup>[30]</sup>。

挤压过程中产生的热量使秸秆中木质素产生塑化粘结作用,即使不添加粘结剂也能稳定成型<sup>[24]</sup>。当然,加工过程中也常添加粘结剂或抗结渣剂,提升成型燃料的应用效益。添加剂( $\text{MgCO}_3$ 、 $\text{CaCO}_3$ 和 $\text{Al}_2\text{O}_3$ )通过与玉米秸秆颗粒燃料中的Si、K等碱金属元素反应生成了新的化合物抗结渣,改变其燃烧后的灰渣形貌,即尺寸减小、表面变粗糙和孔洞增加<sup>[31]</sup>,添加3%  $\text{MgCO}_3$ ,结渣率近零,且对燃料的燃烧性能无明显影响<sup>[32]</sup>。文博等<sup>[28]</sup>通过添加高钙粉煤灰复合粘结剂,以压力(32~50 MPa)、温度(85℃)、粒度(2 mm)和含水率(<12%)的条件制备玉米秸秆成型燃料,在保证其密度和强度的前提下实现低成本和环境友好生产。此外,玉米秸秆可与油泥(5%~10%)或污泥水混合制备,具有良好稳定性和燃烧特性的成型燃料<sup>[33,34]</sup>,为环境治理和其他废弃资源利用提供了思路。

目前,生物质成型燃料主要用于民用锅炉及小型热电厂,刘圣勇等<sup>[35]</sup>结合农村的主要生活炊事习惯和玉米秸秆成型燃料的燃烧特性研制家用单锅灶,其热效率达41.3%。玉米秸秆成型燃料还可以通过热解制取高附加值的固、液、气产品,进一步提升能源转化率和拓展工业化应用。在250~950℃温度范围内,玉米秸秆棒状燃料随着热解温度的升高,固体炭产量减少,生物油产量在450℃时达到最大值35.61%,气体(含 $\text{CO}_2$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{H}_2$ 及少量 $\text{C}_2\text{H}_6$ 化合物)产量逐渐增加至54.80%,在650℃下气体产品的热值达13.05  $\text{MJ}/\text{m}^3$ <sup>[24]</sup>。

## 5 玉米秸秆炭化生产技术

炭化技术一般指采用厌氧或缺氧干馏等热解炭化,在亚高温条件下将秸秆等农业废弃物制备为富碳产物,通常具有良好的燃烧性、吸附性和低电阻性等,作为燃料、土壤改良剂、电磁防护屏填充材料等应用前景广泛。通过轻度催化炭化技术将玉米秸秆制成生物质炭(燃烧点303.89℃,活化能35.45 kJ/mol),可以提高秸秆燃烧值,降低运输和储存成本<sup>[36]</sup>。采用间歇式反应釜制备玉米秸秆水热炭化固体产物,其能量密度显著提高,且高位热值随反应温度的升高和时间的延长而增加,可用作固体燃料(高位热值达29.79  $\text{MJ}/\text{kg}$ )单独或与煤混合燃烧<sup>[37,38]</sup>。Kang等<sup>[39]</sup>研究玉米秸秆的微波辅助水热炭化工艺,秸秆以料液比76 g/L在181.9℃下处理39.7 min,能量得率高达80.55%。而以料液比40 g/L在230℃下处理45 min,高位热值可达22.82  $\text{MJ}/\text{kg}$ ,该工艺显

著缩短了秸秆炭化时间。

炭化玉米秸秆的燃烧反应活性显著高于无烟煤和烟煤,在气化燃烧反应过程中具有更为迅速的燃烧速率,在高炉冶炼过程中替代无烟煤与烟煤进行喷吹具有理论可行性<sup>[40]</sup>。考虑玉米秸秆炭的高值利用,牛明芬等研究其理化特性(pH、电导率、元素含量)与炭化温度和时间关系,确定经350℃炭化2.5 h或450℃炭化2.0 h具有较好的土壤改良潜力<sup>[41]</sup>。此外,玉米秸秆炭还能与沼渣、菌渣和苹果枝等农业废弃物混合制备,具有良好稳定性和燃烧特性的成型燃料,其能量密度相比原料可提高14.93  $\text{GJ}/\text{m}^3$ <sup>[42]</sup>。

## 6 玉米秸秆气化生产技术

秸秆气化技术涉及秸秆沼气发酵和热解气化,主要应用于生物质气化站进行居民集中供气。李伟等<sup>[43]</sup>基于技术集成方法构建满足实际生产需要的玉米秸秆气化供给集成模式,通过模式的决策分析确定最优技术方案是“投料式+固定床气化炉”和“两相式+一体化两相式发酵装置”。沼气(生物燃气)是微生物发酵产生的一种可燃性混合气体,其主要成分是 $\text{CH}_4$ 与 $\text{CO}_2$ 。沼气发酵不能大规模应用的瓶颈是管理困难以及预处理成本高,原料容易酸化使产气量少、甲烷含量低<sup>[1]</sup>。玉米秸秆经双频超声协同碱预处理后,厌氧发酵53 d后的沼气产量提升了56.6%<sup>[44]</sup>;而经蒸汽爆破处理后,厌氧发酵的最大产气量提高了1.6倍<sup>[45]</sup>。

玉米秸秆可直接热解气化产生可燃气体。李斌等<sup>[46]</sup>采用两段式装置热解气化玉米秸秆,添加石灰石、碳酸钙和白云石均能有效吸收气化过程中产生的 $\text{CO}_2$ ,通过促进水气变换反应增加 $\text{H}_2$ 生成。而白云石中含镁组分能增强热解气化及 $\text{CO}_2$ 吸收,以获得更高的 $\text{H}_2$ 体积分数(71.8%)和产率(224.5  $\text{mL}/\text{g}$ )。而当以 $\text{CaO}$ 吸收气化产生的 $\text{CO}_2$ 时,添加10%的 $\text{NiO}$ 可提升 $\text{H}_2$ 产率至341.3  $\text{mL}/\text{g}$ ,产气中 $\text{H}_2$ 体积分数达63.7%<sup>[47]</sup>。于杰等<sup>[48]</sup>采用循环流化床气化中试装置对玉米秸秆进行气化,根据气化炉额定进料量设计值,在进料负荷66%~120%和空气当量比0.26~0.3范围,运行工况良好,燃气热值为4.8~5.1  $\text{MJ}/\text{m}^3$ ,气化效率为69%~72%。通过附加二级返料系统,以空气为主气化介质,辅助以水蒸气气化,可以有效提升气化效率和燃气品质。当空气当量比为0.26且水蒸气配比为0.2时,玉米秸秆呈现较好的气化特性,燃气热值(5.89  $\text{MJ}/\text{m}^3$ )与气化效率(81.45%)达最大值<sup>[49]</sup>。为促进秸秆气化在

农村的推广应用, 鲍振博等<sup>[50]</sup>设计一种小型家用的多体式秸秆气化炉, 降低了气化过程中的焦油和灰尘杂质, 并提高了气化系统的热转化效率。相似地, 孙友谊等<sup>[51]</sup>改进设计一种户用型上吸式玉米秸秆气化炉, 实现进料量、压料程度、通气量和点火时间的精准控制, 有效提升了产气量和产气率。

## 7 玉米秸秆液化生产技术

秸秆液化包括热解液化和水解液化两种, 而主要产物包括生物油类和醇类。秸秆在无氧或缺氧条件下, 添加或不添加催化剂, 以高加热速率、超短产物停留时间和适当裂解温度进行快速热解, 生成的热解气经快速冷凝后得到液体产物, 即为生物油<sup>[1]</sup>。不同热解技术的生物油得率及成分有所差异: 李晓婷<sup>[52]</sup>采用热化学处理法(380 °C, 20 min)制取玉米秸秆, 生物油产率可达 56%; 王丽红等<sup>[53]</sup>采用等离子体流化床热解(477 °C, 喂料速率 700 g/min)玉米秸秆制取生物油的最高得率为 37%, 其主要成分为乙酸、羟基丙酮、水、乙醛、呋喃等; 李润东等<sup>[54]</sup>在高温高压反应釜中添加催化剂 Fe HZSM-5 液化制备玉米秸秆生物油(主要成分为酚类和长链酯类), 在优化条件(340 °C, 30min)下的生物油产率和热值分别为 28.03% 和 30.08 MJ/kg, 催化液化整体转化率达 81.73%。此外, Chu 等<sup>[55]</sup>开发一种玉米秸秆纤维的连续水相氢解工艺, 包括纤维素绿色溶剂提取、Ni-WO<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>催化水热氢解和 Cu/Au<sup>3+</sup>催化水热氢解, 制取生物乙醇的浓度高达 6.1% (wt), 且无腐殖质生成。

*Clostridium saccharobutylicum*、*C. beijerinckii*、*C. acetobutylicum*、*Pichia stipitis* 和 *Kluyveromyces marxianus* 等菌株被广泛用于玉米秸秆液态或固态发酵生产丁醇、丙酮或乙醇。采用 *C. saccharobutylicum* 菌株连续发酵玉米秸秆水解液, 总溶剂(丁醇、丙酮和乙醇)的发酵强度可达 1.23 g/(L·h)<sup>[56]</sup>, 较单批次发酵的产量(6.72 g/L)高<sup>[57]</sup>。田磊等<sup>[58]</sup>通过 20 轮的紫外诱变获得了 *C. beijerinckii* 突变株 CM20, 其糖利用率提高达 14%, 总溶剂产量可达 19 g/L, 其中丁醇产量为 10.8 g/L。利用 *P. stipitis* 酵母对湿热预处理(195 °C, 15 min)的玉米秸秆水解液同步糖化发酵 192 h, 酒精浓度可达 12.12 g/L, 对应的酒精产量和生产效率分别为 0.34 g/g (葡萄糖 + 木糖) 和 65 mg/(L·h)<sup>[59]</sup>。李婷婷等<sup>[60]</sup>优化玉米秸秆糠的 *K. marxianus* 酵母固态发酵工艺, 燃料乙醇的得率达 0.238 g/g, 乙醇转化率达 95.44%。而结合玉米秸

秆酶解液液态发酵和酶解渣固态发酵, 制备乙醇的总得率可达 20.85% (相对于秸秆)<sup>[61]</sup>。此外, 姜庆宏等<sup>[62]</sup>利用绿色木霉和黑曲霉混合培养降解玉米秸秆, 优化生物降解液的发酵工艺后, 乙醇含量和得率最高值分别达 11.85 g/L 和 66.67%。

纤维素降解(糖化率)是影响玉米秸秆发酵生产醇类燃料的效率和成本的关键因素<sup>[63,64]</sup>, 秸秆的预处理(高温或酸碱)显得尤为重要: 蒸汽爆破处理后, 酶解发酵的乙醇得率提高了 4.47 倍<sup>[45]</sup>; 结合蒸汽爆破(190 °C, 10 min)和  $\gamma$ -戊内酯的溶解水去木质作用, 糖化率得到显著提升<sup>[65]</sup>; 150 °C 高温稀酸(0.8% 硫酸)预处理 1 h 后, 还原糖的酶解得率显著提升<sup>[66]</sup>; 蒸汽辅助碱处理(0.8% NaOH + 1.2% CaO)能破坏玉米秸秆的晶体结构, 增加半纤维素的降解, 提升总还原糖的酶解制备得率达 493.74 mg/g<sup>[67]</sup>。此外, 陈胜杰等<sup>[68]</sup>改进传统的分段水解与发酵工艺流程, 通过五次快速循环提高玉米秸秆发酵液的酶解和发酵效率, 主循环的平均乙醇质量浓度(25.3 g/L)提升了 29.1%, 酶解和发酵时间分别缩短了 28.7% 和 10.7%, 而单位质量秸秆的酶和酵母使用量降低超过 30%。

## 8 展望

我国玉米秸秆资源非常丰富, 直接燃烧是资源利用和消化的传统方式, 主要是用作薪柴和焚烧还田, 造成严重的资源浪费和环境污染。玉米秸秆的燃料化保留了居民的燃料使用习惯, 增加了农业生产的效益, 提升了资源利用效率, 并减少了环境的污染。同时, 燃料化利用能促进秸秆的离田, 保障了正常的农业生产秩序。玉米秸秆的燃料化对经济社会和生态环境的协调发展有重要意义, 而燃料化技术及装备的研发至关重要。

玉米秸秆的燃料化利用包括复杂的技术和工程体系。以燃料乙醇生产为例, 技术体系涉及秸秆打捆、秸秆预处理、原料水解、水解液脱毒、生物发酵、产品分离、污染及废弃物处理等, 而工程体系涵盖机械工程、化学工程、发酵工程、分离工程、环境工程和信息工程等。秸秆燃料化技术集成需要各个学科和专业领域共同发力, 形成技术体系的有机衔接和整体耦合, 避免出现某一短板而制约产业化应用。其间, 装备的规模化、自动化和智能化以及对先进工艺的高度匹配尤为关键, 是实验室研究优异指标在规模化示范中重现的重要支撑。随着玉米秸秆燃料化技术及装备的不断创新, 其衍生能源有望应用于生

活、农业和工业的不同领域。

#### 参考文献:

- [1] 陈雪芳,郭海军,熊莲,等. 秸秆高值化综合利用研究现状[J]. 新能源进展,2018,6(5):422-431.
- [2] 毕于运,高春雨,王红彦,等. 我国农作物秸秆离田多元化利用现状与策略[J]. 中国农业资源与区划,2019,40(9):1-11.
- [3] 贾吉秀,赵立欣,姚宗路,等. 秸秆捆烧技术及其排放特性研究进展[J]. 农业工程学报,2020,36(16):222-230.
- [4] 霍丽丽,赵立欣,孟海波,等. 中国农作物秸秆综合利用潜力研究[J]. 农业工程学报,2019,35(13):218-224.
- [5] 张晓庆,王梓凡,参木友,等. 中国农作物秸秆产量及综合利用现状分析[J]. 中国农业大学学报,2021,26(09):30-41.
- [6] 高忠坡,倪嘉波,李宁宁. 我国农作物秸秆资源量及利用问题研究[J]. 农机化研究,2022,44(4):1-6,25.
- [7] 田宜水,徐亚云,侯书林,等. 储存方式对生物质燃料玉米秸秆储存特性的影响[J]. 农业工程学报,2015,31(9):223-229.
- [8] 相姝楠. 秸秆打捆机生产现状分析[J]. 中国奶牛,2018,(10):48-50.
- [9] 马清艳,王彪,刘永姜,等. 玉米秸秆打捆机的设计[J]. 安徽农业科学,2011,39(30):19031-19033.
- [10] 徐鹏云,张秀花,王泽河. 玉米秸秆打捆机打捆关键部件的参数化设计与仿真[J]. 河北农业大学学报,2012,35(5):123-128.
- [11] 崔力韦,王家忠,邢雅周,等. 玉米秸秆圆捆打捆包膜机控制系统设计[J]. 河北农业大学学报,2011,34(5):98-102.
- [12] 徐鹏云,王家忠,张秀花. 电机拖动玉米秸秆打捆机设计研究[J]. 农机化研究,2012,34(10):107-109,113.
- [13] 邢蕾,王慧,姜文龙,等. 生物质能发电储运设备玉米秸秆大方捆打捆机的设计分析[J]. 中国设备工程,2018,(8):120-121.
- [14] 高琪珉,刁培松,张银平,等. 4YZPDK-4 玉米收获秸秆打捆一体机的设计和试验[J]. 农机化研究,2019,41(11):68-73.
- [15] 贾春阳,张道林,康云有,等. 穗茎兼收秸秆打捆型玉米收获机的设计与试验[J]. 农机化研究,2018,40(4):133-137,241.
- [16] 包伟,陈希,李汝莘. 玉米收获机秸秆青贮打捆过程自动控制系统[J]. 山东农业大学学报(自然科学版),2013,44(3):443-446.
- [17] 姜伟,卜令昕,周进,等. 9YFM-1900 型玉米秸秆打捆灭茬一体机的设计与仿真[J]. 农机化研究,2017,39(5):140-143,149.
- [18] 位国建,姜伟,蒋世春,等. 玉米秸秆打捆灭茬一体机设计与试验[J]. 中国农机化学报,2019,40(6):16-20.
- [19] 邓云,姚宗路,梁栋,等. 秸秆捆烧技术研究现状与展望[J]. 现代化工,2020,40(7):55-59+64.
- [20] 霍丽丽,赵立欣,姚宗路,等. 秸秆捆烧清洁供暖技术评价[J]. 农业工程学报,2020,36(24):218-226.
- [21] 刘恩海,刘圣勇,白冰,等. 玉米秸秆打捆燃料燃烧动力学模型[J]. 农业工程学报,2013,29(24):218-226.
- [22] 贾吉秀,姚宗路,赵立欣,等. 秸秆捆烧锅炉设计及其排放特性研究[J]. 农业工程学报,2019,35(22):148-153.
- [23] 赵立欣,孟海波,姚宗路,等. 一种秸秆捆烧锅炉清洁供暖系统:CN109405276B[P]. 2021-07-27.
- [24] 杨华,黄丽,刘石彩,等. 玉米秸秆棒状燃料热解过程和产物特征研究[J]. 生物质化学工程,2016,50(3):13-20.
- [25] 张财,王文,刘昱英男,等. 黑龙江省秸秆资源燃料化利用现状分析与思考[J]. 可再生能源,2020,38(10):1307-1310.
- [26] 张双奇,邓梦思,单明,等. 基于秸秆露天焚烧量的北方农村地区秸秆成型燃料替代采暖散煤节能减排研究[J]. 农业环境科学学报,2017,36(12):2506-2514.
- [27] 李慧媛,周定国. 影响玉米秸秆颗粒状燃料性能的因素分析[J]. 林产工业,2012,39(1):27-30.
- [28] 文博,范高潮,孙长青,等. 成型参数对有粘结剂成型玉米秸秆燃料密度与强度的影响[J]. 沈阳农业大学学报,2012,43(1):114-116.
- [29] 王功亮,姜洋,李伟振,等. 基于响应面法的

- 玉米秸秆成型工艺优化[J]. 农业工程学报, 2016, 32(13): 223-227.
- [30] 刘圣勇, 王晓东, 王智展, 等. 玉米秸秆成型燃料孔隙率对燃烧效果的影响[J]. 河南农业大学学报, 2008(6): 686-688, 698.
- [31] 袁艳文田, 赵立欣, 孟海波. 添加剂对玉米秸秆颗粒燃料结渣特性的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(S2): 99-103.
- [32] 袁艳文, 赵立欣, 孟海波, 等. 玉米秸秆颗粒燃料抗结渣剂效果的比较[J]. 农业工程学报, 2010, 26(11): 251-255.
- [33] 王凤莹, 王黎明, 孙文杨, 等. 油泥与玉米秸秆混合成型燃料工艺参数优化[J]. 可再生能源, 2015, 33(10): 1548-1552.
- [34] SIYAL A A, LIU Y, MAO X, et al. Co-pelletization of sewage sludge, furfural residue and corn stalk: Characteristics and quality analysis of pellets [J]. Biomass and Bioenergy, 2021, 150: 106121.
- [35] 刘圣勇, 张飞, 刘小二, 等. 玉米秸秆成型燃料单锅灶的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2009, 25(2): 101-103.
- [36] 高亚冰, 史风梅, 裴占江, 等. 轻度炭化的玉米秸秆生物炭的燃烧行为研究[J]. 黑龙江农业科学, 2016(7): 32-35.
- [37] 马富芹, 王树中, 高新杰, 等. 反应时间对玉米秸秆水热炭化固体产物特性的影响[J]. 中原工学院学报, 2018, 29(4): 18-23.
- [38] 郭淑青, 董向元, 范晓伟, 等. 玉米秸秆水热炭化产物特性演变分析[J]. 农业机械学报, 2016, 47(4): 180-185.
- [39] KANG K, NANDA S, SUN G, et al. Microwave-assisted hydrothermal carbonization of corn stalk for solid biofuel production: Optimization of process parameters and characterization of hydrochar [J]. Energy, 2019, 186: 115795.
- [40] 仇爽, 庞清海, 武云飞, 等. 碳化玉米秸秆燃烧过程的动力学[J]. 辽宁科技大学学报, 2019, 42(1): 5-12, 21.
- [41] 牛明芬, 刘欢, 张玉兰, 等. 玉米秸秆炭与炭化温度和时间的关系[J]. 安徽农业科学, 2016, 44(12): 25-27.
- [42] 谢腾王, 丛宏斌, 赵立欣, 等. 玉米秸秆炭和典型农业废弃物混合成型与燃烧特性试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(15): 227-234.
- [43] 李伟, 刘新萍, 潘鹏飞, 等. 玉米秸秆气化集中供气集成模式的研究[J]. 河南农业大学学报, 2015, 49(2): 213-218.
- [44] DONG C, CHEN J, GUAN R, et al. Dual-frequency ultrasound combined with alkali pretreatment of corn stalk for enhanced biogas production [J]. Renewable Energy, 2018, 127: 444-451.
- [45] 王许涛, 李玲. 蒸汽爆破玉米秸秆制取沼气与燃料乙醇的研究[J]. 河南农业大学学报, 2013, 47(4): 425-429.
- [46] 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.
- [47] 李斌韩, 陈义龙, 魏良元, 等. 钙基催化吸收剂对玉米秸秆热解气化制氢特性的影响[J]. 农业机械学报, 2016, 47(8): 216-220.
- [48] 于杰, 董玉平, 常加富, 等. 玉米秸秆循环流化床气化中试试验[J]. 化工进展, 2018, 37(8): 2970-2975.
- [49] 常加富, 徐鹏举, 刘兆远, 等. 玉米秸秆循环流化床气化炉气化工序参数优化[J]. 农业工程学报, 2019, 35(5): 226-233.
- [50] 鲍振博, 解光传, 彭锦星, 等. 多体式秸秆生物质气化炉的设计[J]. 农机化研究, 2017, 39(3): 253-257, 263.
- [51] 孙友谊, 赵永亮, 李艳洁, 等. 户用型上吸式秸秆气化炉的试验研究[J]. 甘肃农业大学学报, 2015, 50(2): 177-180.
- [52] 李晓婷. 玉米秸秆制取生物油的工艺条件优化[J]. 安徽农业科学, 2008(13): 5685-5686.
- [53] 王丽红, 柏雪源, 易维明, 等. 玉米秸秆热解生物油特性的研究[J]. 农业工程学报, 2006(3): 108-111.
- [54] 李润东, 张杨, 李秉硕, 等. 玉米秸秆催化液化制备生物油实验研究[J]. 燃料化学学报, 2016, 44(1): 69-75.
- [55] CHU D, XIN Y, ZHAO C. Production of bio-ethanol by consecutive hydrogenolysis of corn-stalk cellulose [J]. Chinese Journal of Catalysis, 2021, 42(5): 844-854.

- al, Complementary, and Alternative Medicines, 2017, 14(3):274-279.
- [11] 黄庆德,姚娜,胡建萍,等. HPLC 法测定灯盏花素微乳凝胶剂中野黄芩苷的含量[J]. 福建中医药大学学报, 2013, 23(06):39-41.
- [12] 王景雁,马书伟,赵馨雨,等. 复方甘草微乳凝胶剂的制备与药效学评价[J]. 中国中药杂志, 2020, 45(21):5193-5199.
- [13] 丁乐,杨人泽,李小兰,等. 硝酸益康唑微乳凝胶的制备及其体外释放研究[J]. 中国药业, 2020, 29(13):35-38.
- [14] 魏元刚,易铭,杨永安. HPLC 法同时测定助产凝胶中黄芩苷、厚朴酚及和厚朴酚含量[J]. 实用妇科内分泌电子杂志, 2018, 5(33):17-19.
- [15] 杨昌云,林淑瑜,李玉堂. HPLC 法测定黄芩苷胶囊中黄芩苷的含量[J]. 中国药房, 2013, 24(23):2182-2184.
- [16] 冯鹏飞,叶晓娅,张磊. 黄芩苷分散片的制备及溶出度分析[J]. 河南医学高等专科学校学报, 2021, 33(02):196-199.
- [17] 黎春彤,段斯庭,李翔,等. HPLC 法同时测定化痰祛斑胶囊中芍药苷、黄芩苷和黄芩素的含量[J]. 中国药师, 2018, 21(07):1287-1289.
- [18] 王彬,章荣叶,汤赛飞,等. 清瘟解毒口服液质量控制试验[J]. 中国兽医杂志, 2020, 56(04):101-104.
- (上接第 15 页)
- [56] 王云,倪晔,孙志浩,等. *Clostridium saccharobutylicum* 利用玉米秸秆水解液发酵生产燃料丁醇[J]. 食品与生物技术学报, 2012, 31(9):904-911.
- [57] 王凤芹,原欢,楚乐然,等. 玉米秸秆水解液燃料丁醇发酵条件优化研究[J]. 食品与发酵工业, 2010, 36(10):79-83.
- [58] 田磊,刘自勇,张培玉,等. 拜氏梭菌发酵玉米秸秆水解液生产燃料丁醇[J]. 可再生能源, 2015, 33(4):618-624.
- [59] 张强,戈兴炜,THYGESEN A,等. 利用树干毕赤酵母发酵玉米秸秆制备燃料酒精[J]. 化工进展, 2010, 29(10):2270-2273.
- [60] 李婷婷,郭舒婷,薛天福,等. 响应面法优化玉米秸秆糠发酵燃料乙醇的研究[J]. 吉林农业大学学报, 2020, 42(2):229-236.
- [61] 储秋露,杨德良,马斌,等. 玉米秸秆制备燃料乙醇的集成技术研究[J]. 林产化学与工业, 2013, 33(5):20-24.
- [62] 姜庆宏,姜月,张铁军,等. 玉米秸秆真菌降解液生产燃料乙醇的发酵条件优化[J]. 可再生能源, 2015, 33(12):1872-1875.
- [63] 宋安东,任天宝,张百良. 玉米秸秆生产燃料乙醇的经济性分析[J]. 农业工程学报, 2010, 26(6):283-286.
- [64] 朱均均,陈尚钊,勇强,等. 玉米秸秆生物炼制燃料乙醇的研究[J]. 林产化学与工业, 2011, 31(6):35-40.
- [65] SUI W, LIU X, SUN H, et al. Improved high-solid loading enzymatic hydrolysis of steam exploded corn stalk using rapid room temperature  $\gamma$ -valerolactone delignification [J]. Industrial Crops and Products, 2021, 165:113389.
- [66] 汤斌,陈中碧,张庆庆,等. 玉米秸秆发酵燃料乙醇预处理条件的优化[J]. 食品与发酵工业, 2008, 34(6):65-67.
- [67] LIU C, LIU M, WANG P, et al. Effect of steam-assisted alkaline pretreatment plus enzymolysis on converting corn stalk into reducing sugar [J]. Renewable Energy, 2020, 159:982-990.
- [68] 陈胜杰,高翔,袁戎宇. 玉米秸秆生产燃料乙醇的 SHF 发酵工艺优化[J]. 发酵科技通讯, 2020, 49(1):32-36, 53.