doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.17.034

组分调控协同挤压对稻秸纤维分离及材料性能影响机理分析

艾文可[1]　孙超然[1]　李玉成[2]　张利峰[2]　蒋　蘋[1]　孙松林[1]　高崇风[1]
(1. 湖南农业大学机电工程学院, 长沙 410128; 2. 湖南省农机事务中心, 长沙 410035)

摘要: 为探究组分调控协同挤压处理对农作物秸秆纤维分离及材料性能的影响,本研究以水稻秸秆为原料,考察挤压前组分调控对稻秸纤维解构行为的影响,并进一步解析挤压后组分调控对材料性能的作用机制。挤压前组分调控结果表明,与对照组相比,半纤维素的选择性去除促进了纤维细化,平均粒径降低 32.0%,材料抗张指数提升 162.3%;木质素的选择性去除有利于高长径比纤维的温和解构,长径比大于 20 的纤维比例增加 65.9%,平均粒径增加 54.9%,材料抗张指数提升 720.8%。同时去除半纤维素和木质素的样品在挤压过程中结构破坏更加显著,平均粒径较对照组降低 45.3%,材料抗张指数提升 306.9%。挤压后组分调控结果表明,半纤维素的去除导致材料孔体积和平均孔径分别增加 100.2% 和 65.2%,并降低纤维素链间氢键比例,材料抗张指数较对照组降低 48.5%。此外,木质素的回填比例为 10% 时,经热压处理的纤维材料抗张指数较自然风干组提升 24.3%。因此,通过组分调控协同挤压处理可实现纤维的定向解构,并形成“物理纠缠-界面互锁-热塑包裹”的三重交联机制,从而显著提升材料性能。研究结果可为农作物秸秆预处理工艺开发及材料化利用提供依据与支持。

关键词: 水稻秸秆; 组分调控; 双螺杆挤出; 纤维解构; 材料性能
中图分类号: S216.2　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2026)17-0368-12　　**OSID**:

Effects of Component Regulation and Synergistic Extrusion on Rice Straw Fiber Separation and Material Properties

Ai Wenke[1]　Sun Chaoran[1]　Li Yucheng[2]　Zhang Lifeng[2]　Jiang Pin[1]　Sun Songlin[1]　Gao Chongfeng[1]
(1. *School of Mechanical and Electrical Engineering*, *Hunan Agricultural University*, *Changsha* 410128, *China*
2. *Hunan Agricultural Machinery Affairs Center*, *Changsha* 410035, *China*)

Abstract: Aiming to investigate the effects of compositional regulation combined with extrusion treatment on the deconstruction of crop straw fibers and the enhancement of material properties, rice straw was used as the raw material. The influence of pre-extrusion compositional regulation on the fiber deconstruction behavior of rice straw was examined and the reinforcing effects of post-extrusion compositional regulation on material performance were further analyzed. Results of pre-extrusion regulation showed that compared with the control group, selective removal of hemicellulose promoted fiber refinement, reducing the average particle size by 32.0% and increasing the tensile index by 162.3%. Selective removal of lignin facilitated mild deconstruction of fibers with high aspect ratios increased the proportion of fibers with aspect ratio greater than 20 by 65.9%, enlarged the average particle size by 54.9%, and enhanced the tensile index by 720.8%. Simultaneous removal of hemicellulose and lignin led to more pronounced structural disruption during extrusion, reducing the average particle size by 45.3% and increasing the tensile index by 306.9%. Results of post-extrusion regulation indicated that hemicellulose removal increased pore volume and average pore size by 100.2% and 65.2%, respectively, while reducing the proportion of hydrogen bonds between cellulose chains, thereby decreasing the tensile index by 48.5% compared with the control. Moreover, when lignin was refilled at a proportion of 10%, the tensile index of hot-pressed fiber materials was increased by 24.3% compared with the air-dried group. Therefore, compositional regulation combined with extrusion treatment enabled directional fiber deconstruction and

收稿日期: 2026-03-12　修回日期: 2026-03-20
基金项目: 湖南省教育厅科学研究项目(23B0197)和湖南省科技重大专项项目(2023NK1020)
作者简介: 艾文可(1998—),男,博士生,主要从事农作物秸秆高值化利用技术与装备研究,E-mail: awk@stu.hunau.edu.cn
通信作者: 高崇风(1992—),男,讲师,博士,主要从事农作物秸秆高值化利用技术与装备研究,E-mail: gordongaocf@163.com

established a triple cross-linking mechanism of "physical entanglement - interfacial interlocking - thermoplastic encapsulation," which significantly improved material performance. The findings can provide important experimental evidence and theoretical support for the development of crop straw pretreatment processes and material utilization.

Key words: rice straw; component regulation; twin-screw extrusion; fiber deconstruction; material properties

0　引言

在全球减碳与减塑的背景下,绿色纤维材料的开发已成为当前研究热点[1]。绿色纤维材料的制备主要依赖于绿色粘合剂或纤维自粘结两种途径[2]。相较于绿色粘合剂存在成本高、可回收性差等问题,利用纤维间的物理纠缠或热压工艺直接成型的纤维自粘结技术具有更好的经济性和环境友好性[3-4]。天然纤维作为绿色可再生的高分子材料,因储量丰富、机械性能优异及环境相容性好等特点在绿色纤维材料领域具有重要潜力,其中水稻秸秆作为常见的农业废弃物,是天然纤维原料的重要来源[5]。然而,稻秸细胞壁中纤维素链通过分子内/间氢键形成高度结晶区,并与半纤维素、木质素通过多种强弱键构筑成致密的三维异质网络,这种复杂的组分和结构特性导致传统的预处理方法难以实现高长径比纤维的定向解构,从而限制了纤维原料自粘结性能的提升[6-7]。

双螺杆挤压作为一种物理预处理手段,因具有能量利用率高、连续加工能力强及多组分协同处理等优势,在秸秆预处理领域展现出良好的工业应用潜力。Cavailles 等[8]对甘蔗渣进行预处理时,发现经挤压处理的样品发生明显的纤维解构,得到更细且独立的纤维以及由纤维交织形成的聚集体。Lu 等[9]对小麦秸秆进行甘油溶胀与挤压处理,破坏其细胞壁的致密结构,并分离出少量的纤维素微纤维。Theng 等[10]比较了双螺杆挤压与蒸煮加机械解纤两种方法对水稻秸秆的处理效果,发现挤压处理所得纤维具有更高的长度和长径比,且能耗更低。然而,受限于细胞壁中纤维素、半纤维素与木质素交联网络所赋予的固有抗性,单一挤压处理难以实现纤维的充分解构,导致所得纤维原料的自粘结性能较差。

通过化学或生物方法调节秸秆细胞壁化学组分,有助于降低机械能耗并改善纤维质量[11]。Neudecker 等[12]采用温和的半化学制浆工艺及生物酶法对麦秸进行预处理,然后在热压条件下制备了无粘合剂纤维板。杨向菩[13]通过碱处理软化牛粪纤维结构,然后经过打浆抄纸制备全生物可降解纤维地膜。Guan 等[14]通过生物酶解结合温和碱处理去除了竹渣部分纤维组分,然后利用打浆抄纸技术制备了竹纤维可降解地膜。然而,半纤维素和木质素的去除虽有利于提高纤维素的可及性,但也会降低秸秆资源利用率及其材料综合性能[15-16]。此外,现有研究多集中于比较不同化学或生物预处理联合机械处理对秸秆纤维物理特性及其材料性能的宏观差异,对于不同组分变化在机械作用下对纤维解构行为以及材料性能的影响尚缺乏系统阐明,导致秸秆纤维原料制备工艺的开发仍缺乏理论与数据支撑。

因此,本研究以水稻秸秆为原料,系统比较不同组分条件下挤压处理对稻秸微观形貌、化学结构及其材料性能的影响,并进一步探讨挤压后组分调控对稻秸纤维材料性能的作用机制,以期为绿色高效的秸秆纤维原料制备工艺开发提供参考。

1　材料与方法

1.1　材料与试剂

水稻秸秆采集自江苏省宿迁市某农场,去除根部后切割成 2 ~ 3 cm 段,在 65℃下烘干至恒质量备用。乙二胺四乙酸二钠(EDTA, $C_{10}H_{14}O_8N_2Na_2\cdot 2H_2O$, ≥99%)、十水合四硼酸钠($Na_2B_4O_7\cdot 10H_2O$, ≥99%)、十二烷基硫酸钠(SDS, $C_{12}H_{25}NaO_4S$, ≥99%)、乙二醇乙醚($C_4H_{10}O_2$, ≥99%)、无水磷酸氢二钠(Na_2HPO_4, ≥99%)、浓硫酸(H_2SO_4, 比重 1.84, 98%)、十六烷三甲基溴化铵(CTAB, ≥99%)、无水乙醇(C_2H_5OH, ≥99.7%)、亚氯酸钠($NaClO_2$, ≥80%)、冰醋酸(CH_3COOH, ≥99.5%)和碱木质素购自上海麦克林生化科技股份有限公司。

1.2　试验方法

1.2.1　不同组分稻秸样品的制备

参照 Zhang 等[16]方法对水稻秸秆分别进行水洗和醇洗处理后,获得初始样品 CK。随后在参考文献[17-18]的基础上对预处理工艺进行调整,通过添加不同浓度的酸性洗涤剂和 $NaClO_2$ 溶液,对 CK 的组分进行不同程度的选择性去除。处理后的样品经大量去离子水冲洗至中性后,于 65℃烘箱中烘至恒质量,具体操作条件及样品编号如表 1 所示。

表 1 水稻秸秆预处理条件与参数

Tab. 1 Conditions and parameters for rice straw pretreatment

样品编号	制备步骤
CK	水热预处理(80℃,2 h) + 乙醇预处理(60℃,2 h)
CH - l	CK + 0.5% 酸性洗涤剂处理(100℃,1 h)
CH - h	CK + 2.0% 酸性洗涤剂处理(100℃,1 h)
CL - l	CK + 2.0% $NaClO_2$ 处理(75℃,2 h,pH 值 3.6 ~ 3.8)
CL - h	CK + 6.0% $NaClO_2$ 处理(75℃,2 h,pH 值 3.6 ~ 3.8)
CD - l	CH - l + 2.0% $NaClO_2$ 处理(75℃,2 h,pH 值 3.6 ~ 3.8)
CD - h	CH - h + 6.0% $NaClO_2$ 处理(75℃,2 h,pH 值 3.6 ~ 3.8)

1.2.2 双螺杆挤压处理

采用湖南农业大学自制的 20 型同向捏合双螺杆挤出机处理水稻秸秆样品。该挤出机的筒体由 5 个模块组成,每个模块长 20 cm;螺杆直径为 21.7 mm,长径比(L/D)为 32.3,螺杆构型如图 1 所示(C28 × 3 表示 3 个长度为 28 cm 的输送元件;K90 × 5 表示 5 个捏合盘错列角为 90°的捏合元件;K135 × 1 表示 1 个捏合盘错列角为 135°的捏合元件)。所有样品在 105℃下烘干至恒质量后,以固液比 1∶9 与去离子水进行充分混合,在密封袋中静置 12 h 以达到平衡[19]。所有挤出试验均在常温下进行,在预试验的基础上,设置挤出试验条件为:螺杆转速 120 r/min、加载量 15 g 和挤出时间 10 min。挤出结束后,将不同样品分别记为 CKE、CHE - l、CHE - h、CLE - l、CLE - h、CDE - l 和 CDE - h,其中 l 表示低去除程度,h 表示高去除程度。

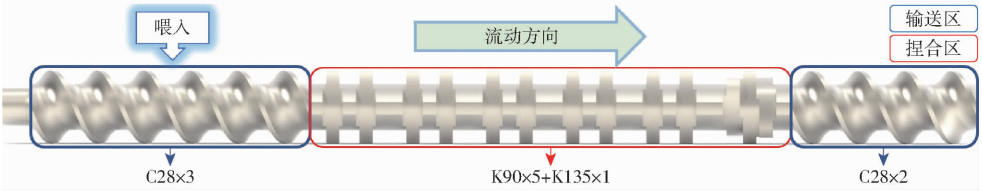

图 1 螺杆配置[20]

Fig. 1 Screw configuration[20]

1.2.3 稻秸纤维材料的制备

采用高速搅拌分散器(10 000 r/min,1min)将挤压后的样品均匀分散在水中。随后,利用由孔径 0.45 μm 的醋酸纤维素微孔滤膜、玻璃漏斗、过滤瓶和压力泵组成的抽滤装置,在 0.1 MPa 下对分散体进行抽滤。最终,将所得滤饼分别进行自然风干和热压处理(0.1 MPa、130℃、10 min),获得稻秸纤维材料。

1.3 挤压后组分调控对稻秸纤维材料性能的影响

为进一步探究挤压后组分调控对稻秸纤维材料性能的影响,根据 1.2 节的试验结果,以 CLE - h 为试验对象,分别进行不同程度去半纤维素与木质素回填处理。首先,按照前述步骤分别用 0%、0.5% 和 2.0% 的酸性洗涤剂对 CLE - h 进行不同程度去半纤维素处理,然后将处理后的纤维样品在 0.1 MPa 条件下抽滤成型,得到含不同半纤维素含量的纤维材料,并分别记为 CLEH - 0、CLEH - 1 和 CLEH - 2;通过在抽滤过程中添加数滴乙醇去除纤维表面游离水分作为对照组,并记为 CLEHa - 0、CLEHa - 1 和 CLEHa - 2。

碱木质素经 0.1 mol/L 稀盐酸中和后,以不同质量分数(10%、20% 和 30%)与 CLE - h 进行充分混匀,然后在 0.1 MPa 下经真空抽滤制成纤维湿片。将纤维湿片在自然条件下进行风干成型,分别记为 CLEL - 1c、CLEL - 2c、CLEL - 3c;进一步对自然风干样品进行热压处理(0.1 MPa、130℃、10 min),将得到的样品记为 CLEL - 1h、CLEL - 2h 和 CLEL - 3h。

1.4 样品表征

1.4.1 扫描电镜(Scanning electron microscopy, SEM)

为获取样品微观形貌并开展尺寸结构的定量分析,采用场发射扫描电镜(TESCAN,捷克)对稻秸纤维样品进行形貌观察,并利用 Image J 软件(1.8.0)对纤维样品的长径比进行定量分析。样品制备分为两种方式:①将纤维悬浮液质量分数稀释至 0.05%,经冷冻干燥后用于观察纤维的整体结构与表面形貌。②将纤维悬浮液质量分数稀释至 0.001%,滴加于碳基胶带上并在室温下自然干燥 48 h,以获得分散良好的单纤维样品,用于测定纤维长度、直径及长径比分布。所有样品在真空条件下以 20 mA 电流进行金溅射 2 min,再进行显微观察与成像。

1.4.2 粒径分布(Particle size distribution, PSD)测量

采用 MASTERSIZER3000 激光粒度仪(Malvern,英国)对样品的粒径分布进行测定。测试前,样品经去离子水稀释后加入至分散池,并通过搅拌与超声处理实现充分分散。粒径分布的特征参数以体积分布中位径 D_{50} 表示,样品累积体积占总体积 10%、50% 和 90% 对应的粒径分别记为 D_{10}、D_{50} 和 D_{90}。

1.4.3 红外光谱分析(Fourier transform infrared spectroscopy,FTIR)

使用 NicoletiS50 光谱仪(赛默飞世尔,美国)在 4 000 ~ 500 cm^{-1}波长范围内测定样品红外光谱。为增强分辨率并放大隐藏的谱峰差异,使用 Omnic 8.2.0.387 软件获取样品在 3 000 ~ 3 800 cm^{-1}波段的二阶导数光谱,然后对光谱进行去卷积拟合分析,所有数据拟合的决定系数 R^2大于 0.99[21]。

1.4.4 比表面积(Brunauer-emmett-teller surface area, BET)及孔隙结构测定

通过 ASAP 2460 全自动比表面积及孔隙度分析仪(Micromeritics, 美国)在 77 K 下对稻秸纤维样品的氮气吸附-脱附等温线进行测定。样品的比表面积由 BET 模型计算,总孔体积通过多点吸附法计算,平均孔径依据 Barrett - Joyner - Halenda(BJH)脱附模型计算,孔径分布则采用密度泛函理论(Density functional theory, DFT)模型进行分析。

1.4.5 水稻秸秆纤维材料力学性能测定

根据 GB/T 12914—2018《纸和纸板抗张指数的测定》,对稻秸纤维材料的抗张指数进行测定。测试参数为:加载速率 20 mm/min,传感器载荷量程 0 ~ 1 kN。所有样品平行测试 3 次,取平均值。抗张指数 σ 计算式为

$$\sigma = \frac{1\,000F_{max}}{bw}$$

式中　F_{max}——试样破坏时的最大载荷,N

b——试样宽度,mm　w——试样定量,g/m^2

2 结果与分析

2.1 挤压前组分调控对稻秸纤维分离及材料性能的影响

2.1.1 化学组分分析

不同预处理条件下稻秸样品的固体得率及主要化学成分变化如图 2 所示。初始样品中纤维素、半纤维素和木质素质量分数分别为 43.6%、22.7% 和 17.7%。随着半纤维素去除程度的增加,样品固体得率下降至 71.6%,纤维素和木质素的质量分数分别升至 49.5% 和 21.3%。随着木质素去除程度的增加,固体得率降低至 75.2%,纤维素和半纤维素质量分数分别增加至 50.0% 和 18.2%。当半纤维素与木质素同步去除时,固体得率最低,仅为 50.7%,而纤维素质量分数最高,达到 64.7%。因此,需要进一步探究不同组分条件对稻秸纤维机械解构行为及其材料性能的影响。

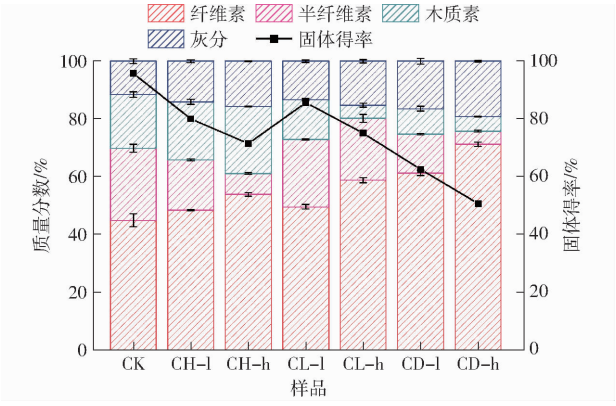

图 2　不同处理条件下水稻秸秆化学组分变化

Fig. 2　Changes in chemical composition of rice straw under different treatment conditions

2.1.2 微观形貌分析

图 3、4 分别展示了不同组分稻秸样品经挤压处理后纤维微观形貌及长径比分布。CKE 样品表现为粗大纤维束与纤维丝共存的非均匀结构,其长径比在 0 ~ 20 区间的纤维比例高达 90.6%,说明半纤维素-木质素复合网络对纤维素微纤丝束具有显著的结构约束作用,从而限制了高长径比纤维的定向解构[9]。随着半纤维素去除程度的增加,CHE 组中粗大纤维束明显减少,其中 CHE - h 的纤维形态进

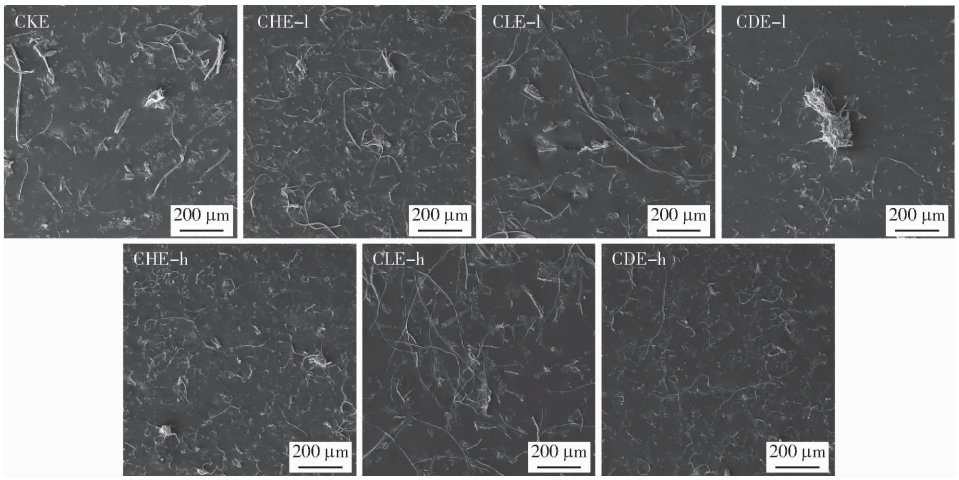

图 3　不同组分条件下稻秸经挤压处理后的微观形貌

Fig. 3　Microstructural morphology of extruded rice straw under different compositional conditions

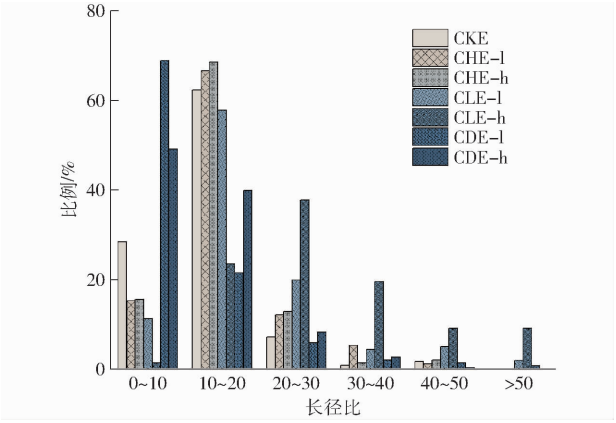

图 4 不同组分稻秸样品经挤压处理后的纤维长径比分布

Fig. 4 Fiber aspect ratio distribution of extruded rice straw under different compositional conditions

一步细化并呈现短纤维化特征,长径比在 0 ~ 20 之间的纤维比例为 83.9%,表明半纤维素的去除增强了挤压剪切力对纤维素纤维的直接作用,从而促进纤维的断裂与进一步细化[22]。相比之下,CLE 组中木质素的选择性去除降低了纤维间结合强度,使纤维在半纤维素缓冲作用下发生定向解构。样品 CLE - l 和CLE - h 在长径比大于 20 区间的纤维比例较 CKE 分别增加了 21.6% 和 65.9%,进一步验证了木质素去除在促进纤维定向解构方面的作用。在双组分同时去除条件下,CDE - l 出现纤维团聚现象及大量粉状颗粒,其在 0 ~ 10 长径比区间的纤维比例高达 68.8%,表明组分部分去除可能导致样品在机械力作用下同时出现局部解构与残余聚集。CDE - h 则呈现高度碎裂的结构特征,细小颗粒与短纤维交织分布,其长径比主要集中在 0 ~ 20 (88.8%),说明半纤维素与木质素的同步大量脱除使细胞壁同时失去柔性缓冲与结构约束,导致挤压剪切力直接作用于纤维素微纤丝,解构过程纤维呈现无序破裂,从而形成碎片化与短纤维共存的结构形态。综上所述,通过调控样品中半纤维素与木质素的质量分数,可实现对挤压后稻秸纤维微观形貌与物理结构特征的定向调控[23]。

2.1.3 粒径分布分析

图 5 展示了不同组分条件下稻秸样品经双螺杆挤压处理后的粒径分布特征。与 CKE 相比,CHE 组的粒径分布峰位随半纤维素去除程度增加向左偏移,粒径大于 100 μm 的颗粒体积分数明显下降,CHE - h 的平均粒径较 CKE 降低了 32.0%,说明半纤维素的去除削弱了纤维间的润滑与缓冲作用,导致纤维在挤压过程中更易发生脆性断裂,从而促进纤维的细化与颗粒化[24]。与此相反,CLE 组的粒径分布峰位随木质素去除程度增加而逐渐右移,CLE - h 的平均粒径较 CKE 增加 54.9%。结合 SEM 分析可知,木质素的去除削弱了其对纤维的刚性约束,促使纤维在挤压过程中更易沿轴向发生定向解构,促进高长径比纤维的分离,从而导致平均粒径增大。

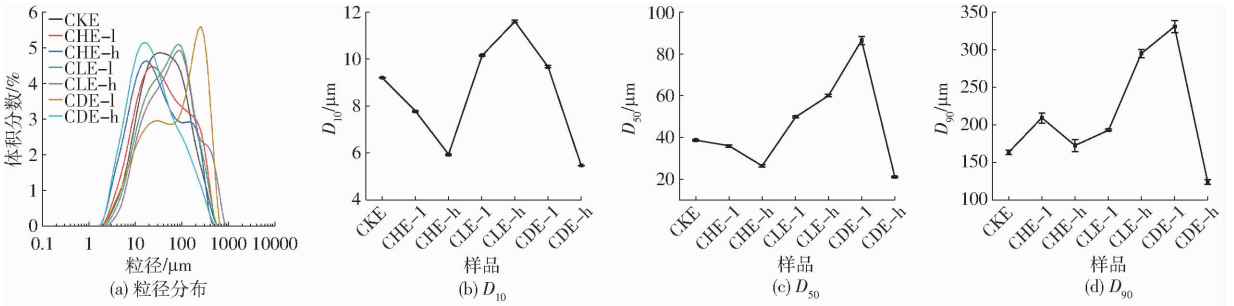

图 5 不同组分条件下挤压处理对稻秸纤维粒径分布及 D_{10}、D_{50}和 D_{90}的影响

Fig. 5 Effects of extrusion under different compositional conditions on particle size distribution of rice straw fibers and corresponding D_{10}, D_{50}, and D_{90} values

随着半纤维素和木质素同步去除程度的提高,CDE 组样品的粒径分布变化更为复杂。其中,CDE - l 中残留的半纤维素与木质素仍具有一定粘结作用,使纤维在挤压过程中易发生局部团聚,其平均粒径较 CKE 提高 123.3%。而在 CDE - h 中,细胞壁失去半纤维素的柔性缓冲与木质素的结构约束,挤压产生的剪切力直接作用于纤维素微纤丝,导致纤维显著细化,其平均粒径较 CKE 降低 45.3%。这表明半纤维素和木质素的同时去除可能导致细胞壁解构缺乏稳定的主导路径,从而产生团聚与细化并存的非均一解构行为[25]。

2.1.4 稻秸纤维材料化学结构分析

图 6 展示了不同组分处理条件下稻秸纤维的 FTIR 光谱。所有样品均在 1 060 cm^{-1}(C—O 伸缩)、2 900 cm^{-1}(C—H 振动)和 3 330 cm^{-1}(O—H 振动)处呈现典型纤维素特征峰,表明纤维素主链结构在处理过程中未发生显著破坏[21]。此外,在 1 735 cm^{-1}(半纤维素乙酰基/酯键)和 1 510 ~ 1 600 cm^{-1}(木质素芳环 C ═C)处均出现相应特征吸收峰。随着半纤维素去除程度增加,1 735 cm^{-1}和

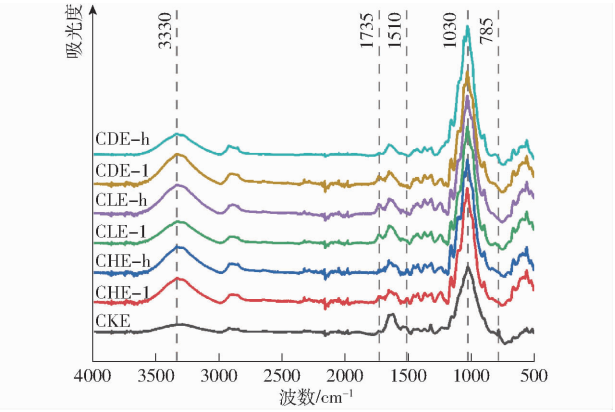

图 6　不同处理条件下水稻秸秆的红外光谱

Fig. 6　FTIR spectra rice straw under different component conditions

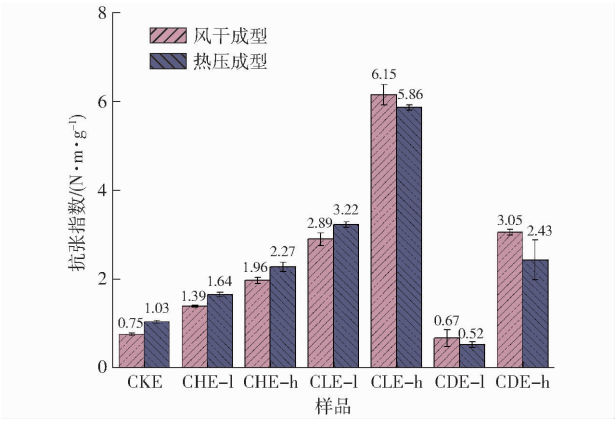

图 7　不同组分条件下挤压对稻秸纤维材料性能的影响

Fig. 7　Effects of extrusion on properties of rice straw fiber materials under different component conditions

1 245 cm^{-1}处的酯键相关吸收峰逐渐减弱，表明半纤维素被有效脱除；而 1 510 cm^{-1}处的木质素芳环峰仍然存在，说明木质素结构基本保留[26]。相比之下，CLE－l 与 CLE－h 在 1 510 cm^{-1}和 1 600 cm^{-1}处的芳环峰显著减弱直至消失，表明木质素被有效去除，而 1 735 cm^{-1}峰保持相对稳定，与其较高的半纤维素保留程度相一致。CDE－l 与 CDE－h 中，1 735、1 510 cm^{-1}两类峰均显著下降，说明半纤维素与木质素同步减少；同时 3 400 cm^{-1}处 O—H 伸缩峰发生轻微展宽，说明双组分去除后纤维素氢键环境发生一定扰动[27]。与 CKE 相比，所有处理组在 3 330 cm^{-1}处的纤维素特征峰均明显增强，1 030 ~ 1 050 cm^{-1}区域出现肩峰或分峰，尤其在 CDE－h 中最为明显，表明挤压处理可能引发微纤丝束的部分解聚[28]。经不同组分调控后的样品在 785 cm^{-1}处的 Si—O—Si 峰强度较 CKE 均有所降低，这与有机组分减少导致无机灰分的相对比例升高有关[29]。

2.1.5　稻秸纤维材料力学性能分析

图 7 显示了不同组分条件下挤压处理对稻秸纤维材料抗张指数的影响。在自然风干条件下，CKE 的抗张指数为 0.75 N·m/g，其较低的力学性能主要归因于挤压后纤维帚化程度不足，难以形成有效的物理纠缠结构。随着半纤维素去除程度的增加，CHE－l 和 CHE－h 的抗张指数较 CKE 分别提高 85.4% 和 162.3%，这一趋势与粒径分布及 SEM 分析结果一致，表明半纤维素去除导致纤维细化（平均粒径降低）及比表面积增加，为纤维间形成更紧密的物理缠结及潜在的分子间作用提供了有利条件，从而增强纤维间的结合强度[30]。相比之下，CLE 组的抗张指数提升更为明显，CLE－l 和 CLE－h 较 CKE 分别提高约 286.5% 和 720.8%。结合前述分析可知，木质素的去除降低了其对纤维的刚性约束，使纤维在挤压过程中更易发生柔性分离并沿轴向解构，从而促进更多高长径比纤维的生成，并构建更为连续的物理纠缠网络，显著提升材料的力学性能。CDE－l 样品表现出明显的纤维团聚，细化不均且局部残留较大纤维束，导致有效结合界面减少并阻碍应力传递，其抗张指数较 CKE 降低 11.1%。而 CDE－h 样品则因过度碎裂而呈现均匀且高度细化的纤维结构，平均粒径最低，整体结构更为致密，使其抗张指数较 CKE 提升约 306.9%。

对比自然风干与热压两种成型方式可知，在含木质素的样品中，热压均能提高材料抗张指数。这主要归因于热压过程中木质素的热塑流动、半纤维素的柔性填充以及纤维素链的热重排共同作用，促进了界面致密化[31]。相比之下，在 CLE－h、CDE－l 和 CDE－h 样品中，热压因缺乏可热塑化的木质素相而无法形成致密界面，同时高温可能削弱氢键作用，导致抗张指数降低[32]。值得注意的是，CDE－h 虽保留部分木质素，但其纤维团聚严重且分布不均，使热压过程中难以形成连续均匀的粘结相，局部应力集中与氢键破坏进一步削弱了材料的整体结合强度[33]。

2.2　挤压后组分调控对稻秸纤维材料性能的影响

2.2.1　材料力学性能分析

图 8a 展示了半纤维素含量及成型条件对材料力学性能的影响。随着半纤维素的去除，CLEH－0 的抗张指数由 6.19 N·m/g 降至 CLEH－2的 3.19 N·m/g，整体下降幅度达 48.5%，说明半纤维素含量对纤维材料抗张指数具有显著影响。较多研究认为，半纤维素对纤维材料力学性能的增强主要归因于氢键作用[34－36]。在本研究中，酒精处理使 CLEH－0 的抗张指数降低 36.3%，表明水分在干燥过程中通过塑化作用及蒸发诱导的毛细管力调控纤维间界面结构，对材料力学性能具有重要贡献[36]。相比之下，在低半纤维素组（CLEH－1 与 CLEH－2）中，经过酒

精处理的纤维材料抗张指数仅下降 6.7% 与 3.8%，说明水分在纤维间界面结构的软化和重构作用对高长径比纤维形成的物理纠缠强度影响较小，半纤维素在水分干燥过程与纤维表面发生的界面重组可能是提高纤维材料抗张指数的关键因素，而并非完全依赖氢键[37]。

图 8b 展示了木质素回填条件下风干成型与热压成型材料的抗张指数变化。在风干成型组中，抗张指数随木质素含量增加而持续下降，表明木质素回填引入的空间位阻效应削弱了纤维间的物理纠缠以及半纤维素-纤维素之间的界面结合能力[38]。相比之下，木质素在热压条件下发生热塑流动，促进界面重排与致密化，使抗张指数高于未回填样品。当木质素回填含量达到 10% 时，热压材料性能较风干成型增加 24.3%。随着木质素回填比例的进一步增加，过量木质素在纤维间形成显著的空间位阻，削弱了界面结合效率，从而引起材料力学性能下降[33]。

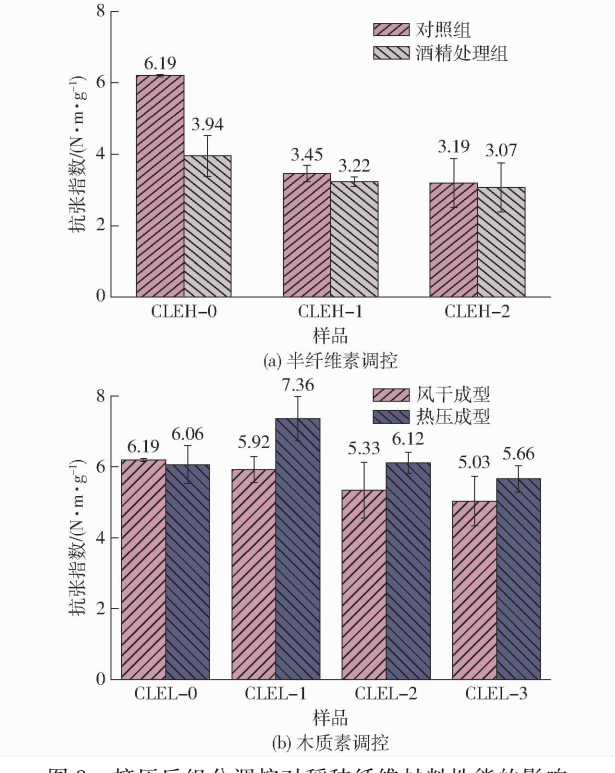

图 8 挤压后组分调控对稻秸纤维材料性能的影响

Fig. 8 Effects of component-regulated extrusion on properties of rice straw fiber materials

2.2.2 微观形貌分析

对不同样品的微观形貌进行分析，如图 9 所示。所有样品均呈现由高长径比纤维构成的网状纠缠结构。CLEH-0 由于半纤维素含量较高，纤维间隙中存在大量无定形附着物，使纤维结构更为致密。随着半纤维素逐步去除，CLEH-1 和 CLEH-2 纤维表面附着物显著减少，纤维轮廓更加清晰，纤维间孔隙

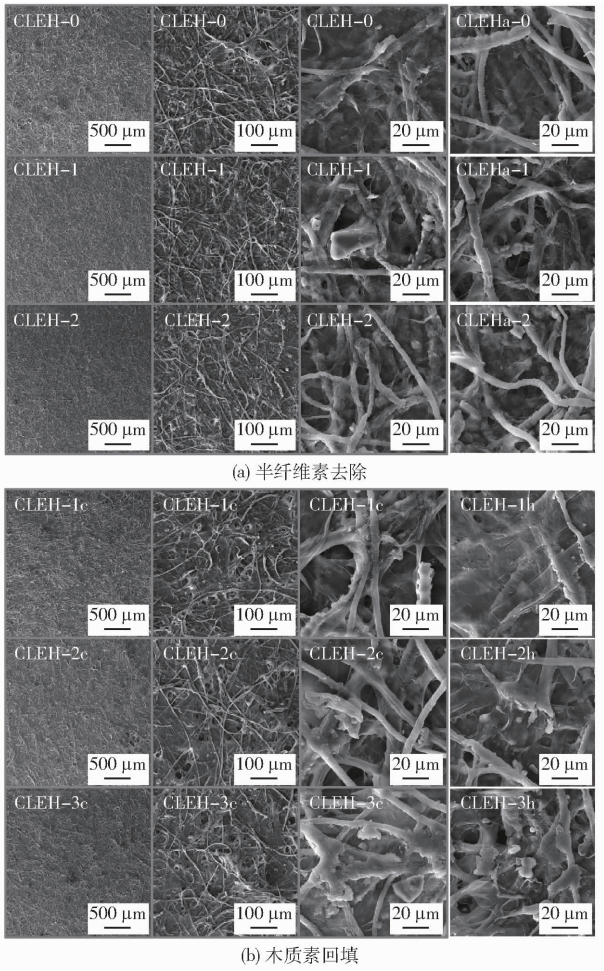

图 9 挤压后组分调控的稻秸纤维材料微观形貌

Fig. 9 Microstructure of rice-straw fiber materials after extrusion with component regulation

增大，表明半纤维素的去除削弱了其在纤维间的填充与粘附作用，从而影响材料的宏观力学性能。此外，与酒精处理组对比可见，对照组纤维表面存在更多细微褶皱结构，这可能与干燥介质性质差异导致的界面作用不同有关：乙醇挥发速率较快，对纤维表面的塑化作用有限；而水分作为干燥介质时，蒸发过程中产生的毛细管压力可能诱导纤维表面收缩重构，从而出现表面褶皱的现象[39]。

由图 9b 可知，在 CLEL 组中，木质素以颗粒状或片状附着于纤维表面并填充纤维间隙。木质素的回填引入空间位阻效应，削弱纤维间的物理纠缠与有效界面作用，纤维网络结构趋于松散，导致 CLEL 组的抗张指数随木质素含量增加而持续下降。热压后样品的表面结构明显更加致密。在热压过程中的温度与压力促使木质素发生热塑性流动，形成连续且均匀的涂覆层，有效桥联相邻纤维并填充孔隙，从而构建致密的纤维-木质素复合网络[40]。然而，当木质素含量进一步升高时，过量木质素在热压后易形成局部团聚体，导致应力集中并阻碍纤维间的应力传递，使材料性能呈现典型的先增后降

的非线性变化趋势。Jiang 等[33]同样发现当木质素含量超过一定阈值时，其团聚效应会削弱材料的整体性能。

2.2.3　比表面积及孔隙分析

不同样品的氮气吸脱附等温线及孔径分布如图 10 所示，相关比表面积（S_{BET}）与孔结构参数如表 2 所示。所有样品均呈现典型的 IV 型等温线，表明纤维材料以介孔结构为主[41]。CLEH－0 的 S_{BET} 为 2.401 m^2/g、孔体积为 0.002 82 cm^3/g、平均孔径为 4.445 nm，说明半纤维素填充纤维间隙，导致孔隙数量有限、体积较小，孔结构整体较封闭且以小介孔为主；随着半纤维素去除，CLEH－2 的 S_{BET} 升至 2.813 m^2/g，孔体积和平均孔径分别增加 100.2% 和 65.2%。结合扫描电镜观察可知，这是由于半纤维素填充作用的减弱，导致高长径比纤维间隙增大并形成更为开放的孔道结构。

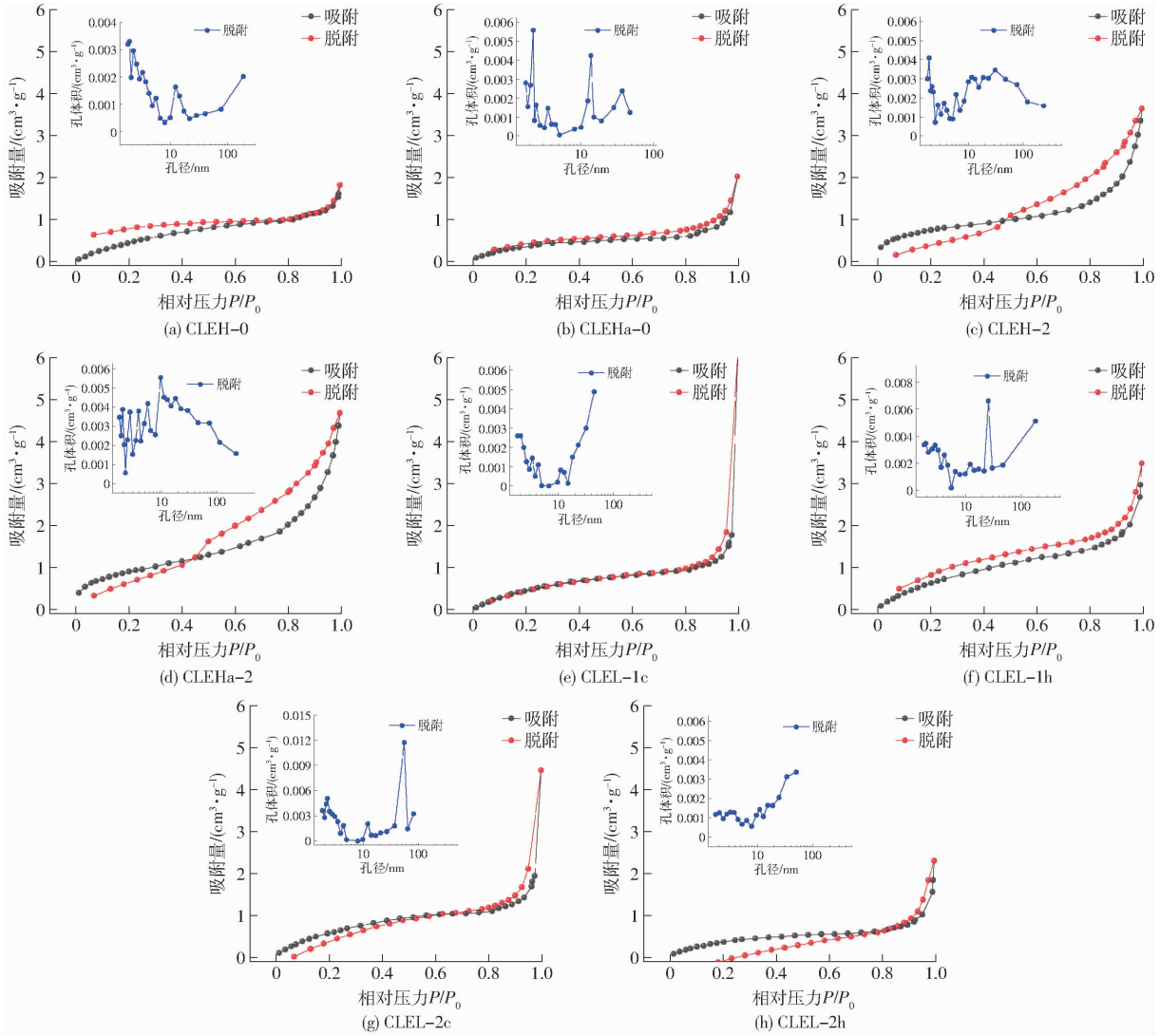

图 10　不同稻秸纤维材料的氮气吸脱附等温线及孔径分布

Fig. 10　Nitrogen adsorption-desorption isotherms and pore size distributions of different rice straw fiber materials

酒精处理对不同去除程度的样品表现出差异化影响：CLEHa－0 的 S_{BET} 下降至 1.655 m^2/g，而孔体积和平均孔径均有所增加，这是由于水分干燥过程产生的强毛细管力导致纤维结构收缩，这与 SEM 中观察到表面褶皱现象一致；相比之下，酒精挥发过程产生的毛细管力较小，对纤维骨架结构影响有限[36]。CLEHa－2 的 S_{BET} 和孔体积分别升至 3.415 m^2/g 和 0.007 25 cm^3/g，而平均孔径有所降低，这是由于酒精处理消除了水分的液桥效应，释放出更多数量的中等介孔，导致平均孔径有所降低。

经过木质素回填后，CLEL－1c 的比表面积由 2.401 m^2/g 略增至 2.412 m^2/g，孔体积由 0.002 82 cm^3/g 显著提升至 0.009 46 cm^3/g，平均孔径由 4.445 nm 扩展至 18.578 nm。该结果表明，木质素在纤维间隙中形成支撑作用，并在自然风干过程中并未参与由毛细管力主导的界面结合机制，而是通过堆积与空间位阻效应抑制了孔道收缩，诱导大孔形成并维持其稳定性，从而显著增加了孔体积与孔径范围。而经热压处理后，CLEL－1h 的孔体积和平均孔径分别下降至 0.005 40 cm^3/g 和 4.821 nm，

表 2 不同稻秸纤维材料的比表面积与孔结构参数

Tab. 2 Specific surface area and pore structure parameters of different rice straw fiber materials

样品	S_{BET}/($m^2 \cdot g^{-1}$)	孔体积/($cm^3 \cdot g^{-1}$)	平均孔径/nm
CLEH－0	2.401	0.002 82	4.445
CLEHa－0	1.655	0.003 16	5.757
CLEH－2	2.813	0.005 65	7.345
CLEHa－2	3.415	0.007 25	6.784
CLEL－1c	2.412	0.009 46	18.578
CLEL－1h	3.285	0.005 40	4.821
CLEL－2c	2.774	0.006 91	11.804
CLEL－2h	1.670	0.003 57	8.801

但比表面积提升至 3.285 m^2/g，表明热压过程压缩并重排纤维结构，使大孔收缩为中等介孔，孔口趋于规整化，减少大孔体积的同时暴露更多有效吸附位点。

2.2.4 红外光谱分析

为进一步探究挤压后组分调控对纤维材料化学结构的影响，对不同处理条件下的样品进行红外光谱分析，如图 11 所示。可以看出，CLEH－2 在 3 330 cm^{-1}处的羟基伸缩振动吸收强度较 CLEH－0 明显下降，且位于 1 735 cm^{-1}附近归属于半纤维素乙酰基及羧酸酯的羰基信号显著减弱，说明半纤维素被有效脱除[11]。与 CLEH－2 相比，经酒精处理后的 CLEHa－2 在 3 330 cm^{-1}和 1 030 cm^{-1}处吸收峰强度均有所增强，说明酒精处理可能改变了纤维素和半纤维素之间的界面结合状态，使羟基和 C—O 相关振动的红外响应增强，这可能是由于水分挥发过程中较高毛细管力诱导纤维表面收缩变形，从而限制链段构象自由度并抑制氢键的有序重构；酒精干燥过程的毛细管力较小，使纤维链段在干燥过程中保持更高的构象可调性，有利于链内与链间氢键的重排与稳定[41]。

在 CLEL－1c 中，由于木质素的回填，其芳香结构及侧链相关峰（2 915、2 835、1 620、1 320 cm^{-1}）显著增强，表明木质素成功附着于纤维表面并参与界面结构构建。与自然风干相比，热压处理后 CLEL－1h 在羟基区（3 330 cm^{-1}）、芳香骨架区（1 620 cm^{-1}）以及 C—H/C—O 振动区（2 915、2 835、1 030 cm^{-1}）的吸收峰均进一步增强，说明热压促进了木质素的热软化与流动，使其由局部聚集状态向连续界面粘结相转变，从而增强芳香结构的红外响应并强化纤维素-木质素的界面结合[42]。

为进一步探究挤压后组分调控对纤维氢键结构的影响，对各样品在 3 000～3 800 cm^{-1}区域的氢键吸收峰进行反卷积拟合，如图 12 所示。随着半纤维素的去除，CLEH－2 中链间氢键 $O_6H\cdots O_3$和链内氢键 $O_2H\cdots O_6$的比例较 CLEH－0 分别降低 2.1% 和 8.9%，而链内氢键 $O_3H\cdots O_5$增加了 9.4%。结合 SEM 与 BET 分析结果可知，半纤维素填充于纤维间隙并通过柔性侧链羟基与纤维素表面形成氢键桥接，从而增强纤维链间接触并提高链间氢键比例[32]。随着半纤维素被去除，纤维间界面孔隙增大，链间氢键形成受限。此外，由于 $O_6H\cdots O_3$较 $O_3H\cdots O_5$和 $O_2H\cdots O_6$能量更高，其重组也更加困难[27]。因此，在链间氢键形成受限时，纤维素链会更依赖于链内氢键来维持局部稳定，导致 $O_3H\cdots O_5$的比例显著增加；此外，部分 O_6原子更容易与分子内 C_2位置的羟基形成 $O_2H—O_6$氢键，导致 $O_2H\cdots O_6$比例增加[21]。

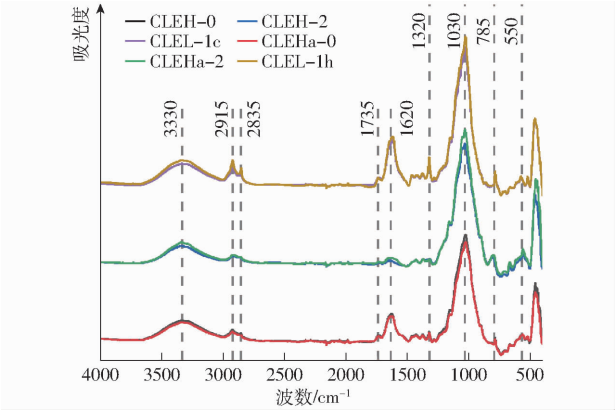

图 11 挤压后组分调控的纤维材料红外光谱

Fig. 11 FTIR spectra of composition-regulated fiber materials after extrusion

与 CLEH－0 相比，酒精处理后 CLEHa－0 中 $O_6H\cdots O_3$比例保持不变，链内氢键（$O_3H\cdots O_5$与 $O_2H\cdots O_6$）的变化也较小，说明在半纤维素存在时，其填充与桥接作用能够稳定纤维素氢键网络，使干燥介质对氢键结构的影响有限。当半纤维素被去除后，样品受到干燥介质的影响明显增强。具体来说，CLEH－2 在水分干燥过程中受到较高毛细管力的牵引作用，纤维表面由外向内发生塌缩，导致部分 $O_6H\cdots O_3$与 $O_2H\cdots O_6$在高应变下被破坏，并伴随着 $O_3H\cdots O_5$比例增加以维持局部结构稳定[43]。相比之下，乙醇处理在去除表面游离水后，由于其毛细管力极小，能够避免纤维表面塌陷，使链段在干燥过程中保持必要的构象自由度，从而有利于羟基重新对位并逐步形成稳定的链内与链间氢键。木质素回填对纤维素链间及链内氢键比例的影响并不显著。尽管热压处理提升了材料力学性能，但氢键结构变化有限，说明其强化主要源于木质素在热压过程中的熔融重排所形成的界面物理互锁增强，以及由此引发的孔隙结构调控，而非氢键网络的显著重构。

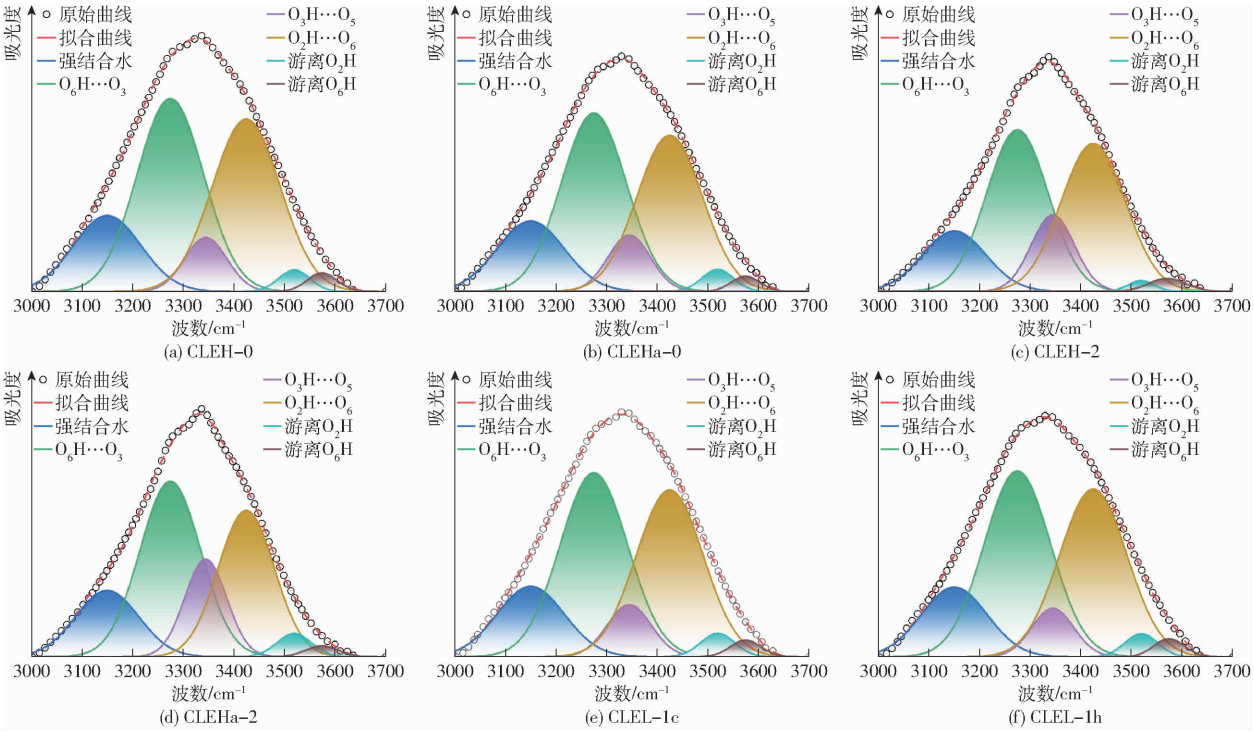

图 12　不同稻秸样品氢键 OH 伸缩振动区(3 000 ~ 3 800 cm^{-1})的 FTIR 峰拟合曲线

Fig. 12　FTIR peak fitting of hydrogen-bonded OH stretching region (3 000 ~ 3 800 cm^{-1}) in different rice straw samples

2.2.5　组分调控协同挤压处理对稻秸纤维解构及成膜机理分析

图 13 展示了组分调控协同挤压处理对稻秸纤维解构与材料成型的作用机制。在纤维解构阶段，木质素的选择性去除削弱了细胞壁各组分之间的结合强度，而半纤维素适度保留在剪切场中发挥润滑与缓冲作用，有助于避免纤维素微纤维在挤压过程发生过度碎裂，从而促进高长径比纤维的定向解构。在风干过程中，高长径比纤维相互交织形成三维骨架结构；半纤维素通过表面羟基与纤维素构建链间氢键网络，填充于骨架孔隙中，提升了材料整体致密度。水分蒸发产生的毛细管力进一步诱导纤维素-半纤维素界面发生收缩与重构，形成微纳米尺度的界面互锁结构，从而显著提升材料的自粘结性能。在此基础上，适量回填的木质素在热压条件下发生热塑性流动，并在纤维表面形成连续粘结层，从而构建“物理纠缠-界面互锁-热塑包裹”的三重交联机制，显著增强界面致密性并提升整体力学性能。

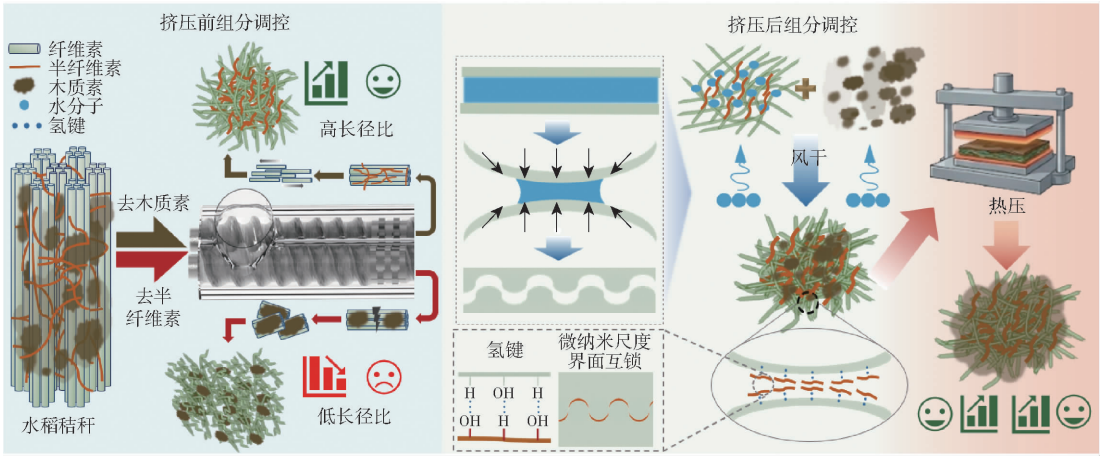

图 13　组分调控协同挤压处理下稻秸纤维解构与材料增强机理示意图

Fig. 13　Schematic illustration of component-regulated extrusion for rice straw fiber deconstruction and resulting material reinforcement mechanism

3　结束语

为探究不同木质纤维组分在稻秸纤维分离及材料成型过程中的作用，本研究以水稻秸秆为研究对象，系统探讨了组分调控协同挤压处理对纤维解构及材料性能的影响。结果表明，半纤维素的选择性

去除削弱了纤维间的填充与粘附作用,促进了挤压对纤维的无序破坏;而木质素的选择性去除则有助于高长径比纤维的温和解构,增强纤维间的物理纠缠,从而改善材料力学性能。同时去除半纤维素与木质素会导致纤维在挤压过程中发生严重解聚,引起材料性能降低。挤压后组分调控结果表明,半纤维素通过填充纤维间隙和干燥过程中的毛细管力作用,使结构更为致密并形成微纳米尺度的界面互锁;适量木质素回填则可改善孔隙结构,并在热压过程中发生热塑流动与包裹效应,促进界面重排与致密化,从而提升材料力学性能。

参 考 文 献

[1] Chen Y, Zhang Y, Cao Y, et al. High-performance self-bonding bio-composites from wood fibers[J]. Industrial Crops and Products, 2024, 209: 117944.

[2] Nguyen D L, Luedtke J, Nopens M, et al. Production of wood-based panel from recycled wood resource: a literature review [J]. European Journal of Wood and Wood Products, 2023, 81(3): 557 – 570.

[3] Liao Y, Koelewijn S-F, Van den Bossche G, et al. A sustainable wood biorefinery for low-carbon footprint chemicals production [J]. Science, 2020, 367(6484): 1385 – 1390.

[4] 侯守印,王升哲,竹筱歆,等. 纤维基地膜侧开式滑切破膜播种单体设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(10):155 – 165.
Hou Shouyin, Wang Shengzhe, Zhu Xiaoxin, et al. Design and experiment of side-open sliding cutting film broken seeding unit based on straw fiber film[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021,52(10):155 – 165. (in Chinese)

[5] El-Kassas A M, Elsheikh A H. A new eco-friendly mechanical technique for production of rice straw fibers for medium density fiberboards manufacturing[J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2021, 18(4): 979 – 988.

[6] 高崇风,韩鲁佳. 超微粉碎/NaOH 同步处理麦秸纤维素分离特性研究[J]. 农业机械学报, 2024, 55(2): 346 – 352, 371.
Gao Chongfeng, Han Lujia. Effect of ultrafine-grinding/NaOH synchronous treatment on the separation of wheat straw cellulose [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(2): 346 – 352,371. (in Chinese)

[7] Copenhaver K, Li K, Wang L, et al. Pretreatment of lignocellulosic feedstocks for cellulose nanofibril production[J]. Cellulose, 2022, 29(9): 4835 – 4876.

[8] Cavailles J, Vaca-Medina G, Wu-Tiu-Yen J, et al. Impact of thermomechanical pretreatment by twin-screw extrusion on the properties of bio-based materials from sugarcane bagasse obtained by thermocompression[J]. Bioresource Technology, 2024, 414: 131642.

[9] Lu H, Zhang L, Yan M, et al. Screw extrusion pretreatment for high-yield lignocellulose nanofibrils (LCNF) production from wood biomass and non-wood biomass[J]. Carbohydrate Polymers, 2022, 277: 118897.

[10] Theng D, Arbat G, Delgado-aguilar M, et al. Comparison between two different pretreatment technologies of rice straw fibers prior to fiberboard manufacturing: twin-screw extrusion and digestion plus defibration[J]. Industrial Crops and Products, 2017, 107: 184 – 197.

[11] Zhang H, Xu X, Shi Z, et al. Lignocellulose deconstruction and mechanistic insights into wheat straw using extrusion-ammoniation synergistic pretreatment[J]. Industrial Crops and Products, 2025, 228: 120820.

[12] Neudecker F, Veigel S, Puhr C, et al. A biotechnological approach to upgrade wheat straw into high-performance binderless boards[J]. Materials Today Sustainability, 2024, 26: 100744.

[13] 杨向君. 牛粪基全生物可降解地膜的制备及应用研究[D]. 兰州:甘肃农业大学, 2023.
Yang Xiangjun. Preparation and application of cow manure-based fully biodegradable mulch film[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2023. (in Chinese)

[14] Guan M, Liu X, Wu M, et al. Preparation, performance and degradation mechanism of a green bamboo fiber mulch by microbial fermentation/low alkali pretreatment[J]. Industrial Crops and Products, 2025, 235: 121720.

[15] Wang Y. Selective removal of lignin with sodium chlorite to improve the quality and antioxidant activity of xylo-oligosaccharides from lignocellulosic biomass[J]. Bioresource Technology, 2021, 337: 125506.

[16] Zhang J, Wang Y, Du X, et al. Selective removal of lignin to enhance the process of preparing fermentable sugars and platform chemicals from lignocellulosic biomass[J]. Bioresource Technology, 2020, 303: 122846.

[17] Kapdi D, Bhavsar N, Rudakiya D. Developing sustainable and energy efficient process to obtain high purity cellulose and its value-added chemicals from rice straw[J]. Bioresource Technology Reports, 2024, 25: 101732.

[18] Liao G, Sun E, Kana E B G, et al. Renewable hemicellulose-based materials for value-added applications[J]. Carbohydrate Polymers, 2024, 341: 122351.

[19] Fu C, Li Y, Lin Y, et al. Crucial role of fiber swelling in microfibrillated cellulose extraction via ball milling[J]. Industrial Crops and Products, 2024, 218: 118899.

[20] 艾文可,高崇风,蒋蘋,等. NMMO 溶胀-挤压处理对稻秸纤维解构及其材料性能的影响[J]. 农业工程学报,2026,

42(5):330 – 340.
Ai Wenke, Gao Chongfeng, Jiang Pin, et al. Effects of NMMO swelling-extrusion treatment on the structural deconstruction and material properties of rice straw fibers[J]. Transactions of the CSAE, 2026,42(5):330 – 340. (in Chinese)
[21] Zhang S, Lin Q, Wang X, et al. Bamboo cellulose fibers prepared by different drying methods: structure-property relationships [J]. Carbohydrate Polymers, 2022, 296: 119926.
[22] Jiang Y, Wang X, Meng Z, et al. Weakening fibri-fibril interactions via an on-demand regulation of hemicellulose phase towards the facile disassembly of lignocellulose heterostructure into approaching native-state elementary fibrils[J]. Green Chemistry, 2024, 26: 879 – 894.
[23] Wang Q, Xiao S, Shi S Q, et al. Mechanical property enhancement of self-bonded natural fiber material via controlling cell wall plasticity and structure[J]. Materials & Design, 2019, 172: 107763.
[24] Liu R, Sun Y, Meng F, et al. The effect of hemicellulose pre-extraction on the wood viscoelasticity and its implications on the fiber separation mechanism in chemi-mechanical pulping[J]. Biomass and Bioenergy, 2023, 177: 106949.
[25] Trigui K, De Loubens C, Magnin A, et al. Cellulose nanofibrils prepared by twin-screw extrusion: effect of the fiber pretreatment on the fibrillation efficiency[J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 240: 116342.
[26] Feng Z, Xu D, Shao Z, et al. Rice straw cellulose microfiber reinforcing PVA composite film of ultraviolet blocking through pre-cross-linking[J]. Carbohydrate Polymers, 2022, 296: 119886.
[27] Wei J, Long Y, Li T, et al. Exploring hydrogen-bond structures in cellulose during regeneration with anti-solvent through two-dimensional correlation infrared spectroscopy[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 267: 131204.
[28] Ahmima S, Naar N, Jędrzejczak P, et al. Isolation and characterization of novel cellulose micro/nanofibers from lygeum spartum through a chemo-mechanical process[J]. Polymers, 2024, 16(21): 3001.
[29] Rai R, Ranjan R, Kant C, et al. Microplastic and adhesive free, multifunctional, circular economy approach-based biomass-derived drinking straws[J]. iScience, 2024, 27(5): 109630.
[30] Wang J, Feng Z, Zuo J, et al. Preparation of hot-pressed wheat straw board by self-adhesive process: effects of raw material sizes and acid/alkali pretreatment[J]. Materials, 2024, 17(23): 5845.
[31] Marbun S D, Dwianto W, Meliala S B P S, et al. Dimensional stability mechanisms of binderless boards by heat or steam treatment: a review[J]. Cellulose, 2023, 30(14): 8571 – 8593.
[32] Su Z, Yu L, Cui L, et al. Reconstruction of cellulose intermolecular interactions from hydrogen bonds to dynamic covalent networks enables a thermo-processable cellulosic plastic with tunable strength and toughness[J]. ACS Nano, 2023, 17(21): 21420 – 21431.
[33] Jiang B, Chen C, Liang Z, et al. Lignin as a wood-inspired binder enabled strong, water stable, and biodegradable paper for plastic replacement[J]. Advanced Functional Materials, 2020, 30(4): 1906307.
[34] Przybysz P, Dubowik M, Kucner M A, et al. Contribution of hydrogen bonds to paper strength properties[J]. PLOS ONE, 2016, 11(5): e0155809.
[35] Zhang T, Hu Y, Dong Y, et al. The influence of hydrogen bonding in wood and its modification methods: a review[J]. Polymers, 2025, 17(15): 2064.
[36] Ji D, Zhang M, Sun H, et al. Enhanced mechanical and dielectric properties of lignocellulosic composite papers with biomimetic multilayered structure and multiple hydrogen-bonding interactions[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 281: 136247.
[37] Wohlert M, Benselfelt T, Wågberg L, et al. Cellulose and the role of hydrogen bonds: not in charge of everything[J]. Cellulose, 2022, 29(1): 1 – 23.
[38] Jiang B, Jiao H, Guo X, et al. Lignin-based materials for additive manufacturing: chemistry, processing, structures, properties, and applications[J]. Advanced Science, 2023, 10(9): 2206055.
[39] Salem K S, Naithani V, Jameel H, et al. A systematic examination of the dynamics of water-cellulose interactions on capillary force-induced fiber collapse[J]. Carbohydrate Polymers, 2022, 295: 119856.
[40] Ura D P, Stachewicz U. Direct electrospinning of short polymer fibers: factors affecting size and quality[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2024, 181: 108138.
[41] Gao Y, Huo Y, Chen M, et al. Phenolic based porous carbon fibers with superior surface area and adsorption efficiency for radioactive protection[J]. Advanced Fiber Materials, 2023, 5(4): 1431 – 1446.
[42] Theng D, Arbat G, Delgado-Aguilar M, et al. Production of fiberboard from rice straw thermomechanical extrudates by thermopressing: influence of fiber morphology, water and lignin content[J]. European Journal of Wood and Wood Products, 2019, 77(1): 15 – 32.
[43] Xu J, Li J, Wan C, et al. Water variation and its induced structural changes in cellulose extracted from wood[J]. Cellulose, 2025, 32(8): 4689 – 4703.