

针叶木硫酸盐木质素 (SKL) 制备木材用胶黏剂研究

庄军平*, 李腾飞

(华南理工大学轻工科学与工程学院, 广东 广州 510641)

摘要: 针叶木硫酸盐木质素 (SKL) 因含有较多的愈创木酚而具有较高的化学活性, 使其具有部分替代苯酚制备木质素基酚醛树脂 (LPF) 的潜力。通过单因素实验, 优化了 SKL 部分替代苯酚制备 LPF 的工艺, 并通过 FT-IR 对 LPF 的结构进行表征。研究表明在 SKL 替代率 60%、酚醛摩尔比 1:1、碱用量 20%、反应时间 60 min 的条件下, 制备的 LPF 粘度为 230 mPa·s, 胶合强度为 1.32 MPa, 游离苯酚和甲醛含量分别为 0.34% 和 0.27%, 达到国家标准 GB/T 14732—2017 的要求。红外光谱分析表明 LPF 具有与酚醛树脂 (PF) 相似的结构。该研究为利用 SKL 部分替代苯酚生产木材用胶黏剂提供了新的思路, 有助于推动 SKL 的规模化和高值化工业应用。

关键词: 针叶木硫酸盐木质素; 木材胶黏剂; 酚醛树脂; 胶合强度

中图分类号: TQ430.4

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2025)S2-0170-04

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2025.S2.031

Preparation of wood adhesives from softwood kraft lignin (SKL)

ZHUANG Jun-ping*, LI Teng-fei

(School of Light Industry and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510601, China)

Abstract: Softwood kraft lignin (SKL) exhibits higher chemical activity due to its high content of guaiacol, which gives it the potential to partially replace petroleum-based phenol in the preparation of lignin-based phenolic resin (LPF). In this study, the process for using SKL to partially replace phenol to prepare LPF is optimized through single factor experiments, and the structure of LPF is also characterized by means of FT-IR. Experimental results indicate that under the conditions that the substitution degree of SKL to phenol is 60%, the dosage of caustic soda is 20%, the molar ratio of phenol to formaldehyde is 1:1, and the reaction time is 60 min, the initial viscosity of LPF prepared is 230 mPa/s, the bonding strength is 1.32 MPa, and the contents of free phenol and formaldehyde in LPF are 0.34% and 0.27%, respectively, all meeting the requirements of China's GB/T 14732—2017 standard. It is indicated by FT-IR analysis that LPF has similar structure with phenolic resin. This study provides a new idea for producing wood adhesives with cheap SKL to partially replace phenol, and is helpful to promote the large scale industrial and high-value application of SKL.

Key words: softwood kraft lignin; wood adhesive; phenolic resin; binding strength

酚醛树脂 (PF) 因具备优异的耐水性、耐候性和力学性能而广泛用作胶黏剂, 用于室外人造板材等木材行业^[1]。传统的酚醛树脂生产是通过化石来源的苯酚和甲醛在碱性条件下交联完成的, 原料不可再生, 成本偏高, 且生产过程中未能参与反应而游离出来的苯酚和甲醛会危害人体健康, 污染环境。因此, 利用可再生资源生产无毒、可再生的酚醛树脂, 以推动木材用胶黏剂绿色转型已成为行业共识。

木质素是一种来源广、可再生的芳香族聚合物, 因其结构中存在酚羟基等多种活性基团, 其多功能、可改性和可再生性使其成为传统化石基聚合物的理想替代原料。植物木质素主要含愈创木基苯丙烷 (G)、紫丁香基苯丙烷 (S) 和对羟基苯丙烷 (H) 三种基本结构单元。研究表明, 不同植物木质素中这三

种结构单元含量有所差异, 针叶木木质素与阔叶木木质素相比, 含有更高比例的 G 型结构 (针叶木 > 95%, 阔叶木 20%~60%)。因 G 型结构中的芳香环在 C5 反应位点, 故可在合成过程中与甲醛进行反应, 得到羟甲基木质素, 进而与苯酚-甲醛进行共聚反应, 反应过程与传统酚醛树脂合成过程类似。因为具有和醛类化合物或酚类化合物反应的能力, 故针叶木木质素更具有替代苯酚合成木质素基酚醛树脂 (LPF) 的潜力^[2-3]。针叶木硫酸盐木质素 (SKL) 作为硫酸盐针叶木制浆的一种重要产物, 主要通过碱法制浆过程从木材原料中提取。其产量巨大, 且易得可再生, 因此其部分替代苯酚合成 LPF, 可减少高产量 PF 对化石资源的依赖。

天然、可再生木质素结构中的酚羟基, 在酚醛树

收稿日期: 2025-02-27; 修回日期: 2025-07-18

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFC2805104)

作者简介: 庄军平 (1971-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为植物资源化学和生物质基化学品, 通讯联系人, zhuangjp@scut.edu.cn。

脂生产中具有巨大的潜在价值。但由于木质素中能和甲醛发生反应的活性位点数量与实际工艺条件下甲醛的添加量之间的关系不合理,且木质素大分子结构复杂,导致以木质素部分替代苯酚制备的LPF的性能远不及纯PF^[4];同时木质素较高的分子量和不同来源木质素的复杂结构也使得制备的LPF存在不易透胶、胶合强度低、粘度大和稳定性差等缺点,严重制约其大规模生产应用^[5-6]。

硫酸盐浆是目前世界上使用最普遍的一种化学浆生产工艺,也是目前我国造纸厂最主要的一种制浆方法,每年产生的造纸黑液量巨大,急需处理利用。

本研究以针叶木造纸黑液为原料,通过酸析法获得SKL,制备高木质素替代率的针叶木硫酸盐木质素酚醛树脂(LPFF);系统地研究木质素替代率、酚醛比、碱用量和反应时间等关键工艺条件对LPFF的固含量、黏度、胶合强度、游离甲醛含量和游离苯酚等主要性能指标的影响,确定最佳合成工艺条件。研究成果有助于减少日益增长的人造板行业对传统“三醛胶”的依赖以及甲醛释放,利用造纸废弃物生产生物基胶黏剂,可以实现木质素的高值化利用,为促进绿色胶黏剂的发展提供理论和技术支持。

1 材料与试剂

1.1 材料

造纸黑液由山东华泰纸业股份有限公司提供,其原料为针叶木,经膜过滤处理的硫酸盐法制浆黑液,其中固形物含量为26.48%,pH为12.2。

1.2 仪器及试剂

DF101S 恒温油浴锅;LDN-1 涂-4 杯;PHS-3C pH;H2050R 离心机(湖南湘仪);Nicolet S 50 傅里叶变换红外光谱仪(Thermo Scientific);BD8820BE30T 平板硫化机(东莞宝鼎);GC-2014 气相色谱仪(日本岛津);TG 209F3 热重分析仪(德国 NETZSCH);WDW-2M 万能试验机(济南中路)。

苯酚、甲醛溶液(37%~40%)、氢氧化钠、硫酸、尿素、无水乙醇等,广州化学试剂厂生产;纤维素酶,上海诺维信生物有限公司生产。

2 实验方法

2.1 SKL 的制备

采用酸析沉淀法提取粗针叶木硫酸盐木质素(粗SKL),并经纤维素酶预处理去除糖分后获得SKL,用于后续实验。

2.2 LPF 制备

采用分批加料法共聚合成木质素基酚醛树脂(LPFF)。首先将SKL、苯酚、一半质量的甲醛以及一半质量的氢氧化钠溶液添加至三颈烧瓶中,搅拌加热至85℃计时反应,剩余的甲醛以及氢氧化钠碱溶液分时分两次加入,根据实验安排,反应至相应的时间停止加热,将三颈烧瓶放入冰水冷却至40℃即可出料。

SKL 替代率确定:按照酚、醛比为1:1(摩尔比),计算出所需苯酚质量,实验时将原料中苯酚所用质量分别用相应百分比的木质素替代,即为SKL替代率。替代率为50%、60%、70%、80%的LPFF产品分别记为LPFF-50、LPFF-60、LPFF-70、LPFF-80。

2.3 检测分析

采用顶空-气相色谱法(HS-GC)测定LPFF中游离甲醛含量^[7]。利用外标法建立标准曲线,使用气相色谱法测定LPFF样品中游离苯酚的含量^[7]。

参考GB/T 17657—2013中4.17.5.2.3煮-干-煮的测试方法^[8]。

将制备的酚醛树脂胶黏剂放入60℃真空干燥箱中烘干不少于12h,将干燥后的固体研磨得到未固化的胶黏剂粉末。将胶黏剂粉末与KBr粉末按照质量比为100:1均匀混合,压片,以4cm⁻¹的分辨率在波数为4000~500cm⁻¹范围内扫描32次,测定树脂样品红外光谱图^[7]。

3 结果与分析

3.1 木质素组成分析

造纸黑液经酸析沉淀,所得粗SKL的组成如表1所示。由表可知,粗SKL中木质素总含量83.27%,糖分含量为6.53%。为减少糖分对后续制备的影响,采用纤维素酶对其预处理去除糖分后用于后续实验。利用GPC测定SKL分子量,得知其 M_n 为4951g/mol, M_w 为9520g/mol,表明分子量大小相对合适,有利于基团的暴露,表现高的反应活性,有利于与甲醛之间的交联,可作为原料用于部分替代苯酚制备LPFF。

表1 粗针叶木硫酸盐木质素组成

水分/ %	灰分/ %	糖分/ %	酸不溶 木质素/%	酸溶 木质素/%	木质素 总量/%
2.63	6.19	6.53	79.42	3.85	83.27

3.2 木质素化学结构分析

采用³¹P-NMR分析方法表征SKL基团含量,

其谱图及归属见图 1 和表 2。分析可知,SKL 总羟基含量为 3.74 mmol/g,由醇羟基和酚羟基(包括愈创木酚、对羟基苯、脂肪醇)两部分组成,因此 SKL 具有苯酚的部分特性。由于羟基能够活化邻对位,使得 SKL 具备活性,进一步表明 SKL 可替代苯酚制备 LPF。

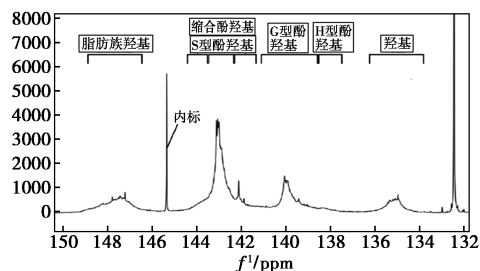


图 1 SKL 的 ³¹P-NMR 谱图及其峰归属

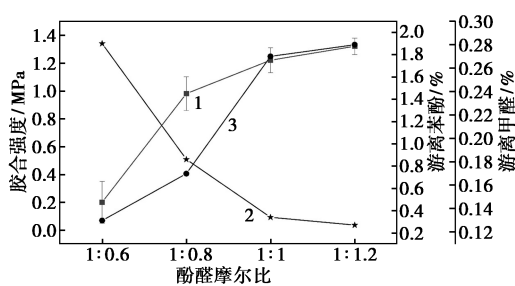
表 2 SKL 官能团定量分析

化学位移	152.4~152.0	149.0~146.1	143.1~142.2	140.5~138.9	138.9~138	136.1~134.1
官能团归属 (羟基)	内标物	脂肪族醇	缩合型	愈创木酚	对羟基苯	羧基
化学积分面积	1.00	5.92	2.09	10.19	1.16	3.77
SKL 官能团含量/ (mmol·g ⁻¹)	—	1.28	0.45	2.21	0.25	0.82

3.3 LPF 制备工艺优化

3.3.1 酚醛摩尔比对 LPF 性能的影响

不同酚醛摩尔比下 LPF 胶黏剂的理化性能如图 2 所示。从图 2 可知随着酚醛摩尔比减小,甲醛用量增加,LPF 的胶合强度上升,由 0.20 MPa 增加至 1.32 MPa,LPF 中游离甲醛含量增加,游离苯酚含量降低。这说明增加甲醛用量有利于酚醛之间的加成和交联反应,从而使得 LPF 分子量增大,粘度增加。LPF 对胶合板的胶合强度随酚醛摩尔比减小而增大是由于体系中甲醛含量充足,交联形成了紧密的连接结构。当酚醛摩尔比为 1:0.6 时,反应体系甲醛含量少,未反应苯酚量增多,难以形成三维网状结构交联物从而影响胶合强度,不能形成热固性树脂,几乎没有胶合强度;随着酚醛摩尔比减小到 1:0.8,足够的甲醛使得 LPF 胶黏剂表现出胶合强度,达到 0.98 MPa,此时 LPF 中游离苯酚大幅度降低;酚醛摩尔比为 1:1 时,LPF 中游离苯酚含量已经处于较低水平,游离甲醛含量增加至 0.27%,LPF 胶合强度达 1.32 MPa。为了保证游离甲醛含量低于 0.30%,以酚醛摩尔比为 1:1 进行后续实验。



1—胶合强度;2—游离苯酚;3—游离甲醛

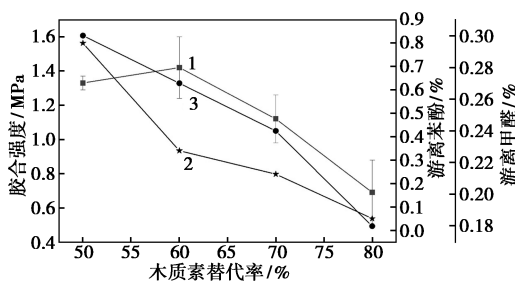
图 2 酚醛摩尔比对 LPF 性能的影响

3.3.2 木质素替代率对 LPF 性能的影响

不同的 SKL 替代率下 LPF 的理化性能如表 3 和图 3 所示。从表 3 和图 3 可知,随着 SKL 替代率的升高,胶合强度在 60% 替代率时达到最高,为 1.32 MPa,然后下降;游离苯酚和游离甲醛的含量均随着替代率的增加而减小。造成这种现象的原因是:①虽然木质素与苯酚化学结构相似,但其苯环上只有两个或者更少的活性位点与甲醛反应,苯酚结构简单且苯环上有 3 个活性位点;另一方面,木质素结构复杂,空间位阻大,活性受影响。与苯酚相比,木质素与甲醛的反应活性低^[10]。②木质素分子量较大,制备的 LPF 胶黏剂分子量较大,粘度高,因而胶合强度低。但实验发现,SKL 替代率达到 70% 时 LPF 胶合强度仍能达到 1.12 MPa,符合国家标准要求。综合考量,取 60% 为最佳 SKL 替代率。

表 3 SKL 替代率对 LPF 性能的影响

不同 SKL 替代率的 LPF	固体含量/%	pH	粘度/(mPa·s)	胶合强度/MPa	游离苯酚/%	游离甲醛/%
LPF-50	55.50	11.10	220	1.33±0.04	0.80	0.30
LPF-60	51.58	11.10	230	1.42±0.18	0.34	0.27
LPF-70	52.00	10.90	260	1.12±0.14	0.24	0.24
LPF-80	51.34	11.40	275	0.69±0.19	0.05	0.18
GB/T 14732—2017	≥35	≥7	≥60	≥0.7	≤1	≤0.3



1—胶合强度;2—游离苯酚;3—游离甲醛

图 3 SKL 替代率对 LPF 性能的影响

3.3.3 碱用量对LPF性能的影响

不同碱用量下LPF的理化性能如图4所示。由图4可知,随碱用量增大,溶液pH升高,LPF胶合强度呈现先增后降趋势;游离甲醛含量先平稳,碱用量达到20%之后增加;游离苯酚含量不断降低。当碱用量为10%时,LPF中游离苯酚含量高且胶合强度仅为0.58 MPa,达不到胶合板的使用要求,当碱用量为20%时,游离苯酚含量大幅降低,仅为0.31%,游离甲醛含量为0.26%,胶合强度达到1.36 MPa,因此选用碱用量为20%进行后续实验。

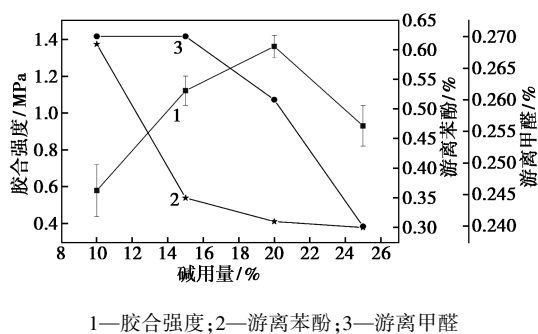


图4 碱用量对LPF性能的影响

3.3.4 反应时间对LPF性能的影响

反应时间对LPF性能影响如图5所示。由图可知,随反应时间延长,LPF胶合强度呈先增后降趋势,反应60 min时LPF具有最高胶合强度,达1.32 MPa。随后LPF胶合强度小幅度降低,但仍保持较高值。随反应时间延长,LPF中游离甲醛和游离苯酚含量均呈现下降的趋势,而粘度不断增加。这是由于适当地延长聚合时间能够促使酚醛之间交联程度的加深,苯酚和甲醛相互反应使得产品中游离的苯酚与甲醛含量均降低,胶合强度提高。反应时间过长导致反应和交联过度,产品的分子量和粘度过高,在用于压制胶合板时难以形成均匀的胶层,不利于胶合强度的提高,且粘度过高也不利于储存,故选用反应时间60 min为宜。

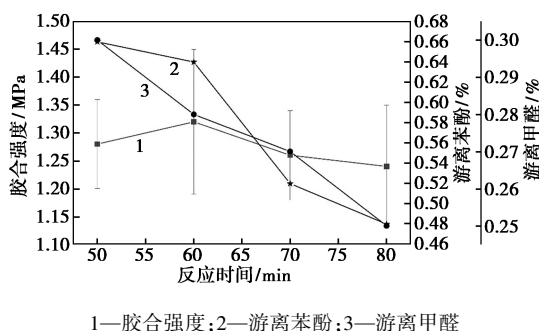


图5 反应时间对LPF性能的影响

3.3.5 LPF的FT-IR分析

对最优工艺条件下制备所得LPF与相同条件下制备的PF进行FT-IR分析对比,结果如图6。在 3500 cm^{-1} 处的吸收峰归属于羟基振动; 2927 cm^{-1} 处的吸收峰归属亚甲基桥键; 1668 cm^{-1} 处的吸收峰与树脂中非共轭羰基有关;酚醛树脂芳香环的特征峰出现在 1479 cm^{-1} 处;酚羟基的C—O伸缩振动出现在 1270 cm^{-1} 处; 1018 cm^{-1} 峰为脂肪族C—O(Ar)、脂肪族C—OH和羟甲基C—OH中的C—O伸缩振动峰。与PF的红外光谱相比,LPF在 1270 cm^{-1} 处的吸收峰较弱,说明PF中酚羟基C—O伸缩振动峰比LPF强,这是由于LPF中木质素取代部分苯酚导致酚羟基含量的降低。整体来看,PF和LPF二者具有相似的特征基团分子结构峰,表明具有相似的分子结构,这也进一步为将SKL部分替代化石基苯酚制备高性能木材用胶黏剂提供了理论依据。

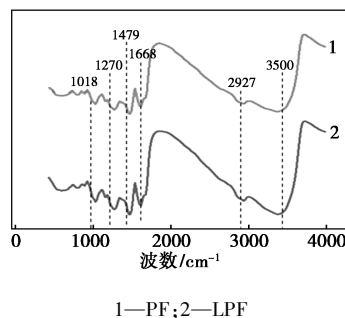


图6 PF及LPF的红外光谱谱图

4 结论

(1) 针叶木造纸黑液经酸析沉淀,其木质素含量达83.27%。经 $^{31}\text{P-NMR}$ 分析计算其总羟基含量为 3.74 mmol/g ,表明该木质素具有苯酚的部分特性,可部分替代化石基苯酚制备LPF。

(2) 在系统研究影响LPF性能的制备因素基础上,优化所得最优制备工艺条件为:SKL替代率为60%,酚醛摩尔比为1:1,碱用量为20%,在 85°C 条件下反应60 min。在此工艺条件下,LPF的黏度为 $230\text{ mPa}\cdot\text{s}$,固体含量为52.36%,pH为10.90,对胶合板的胶合强度为1.32 MPa,LPF中游离苯酚0.34%,游离甲醛0.27%,达到GB/T 14732—2017的要求。

(3) 对LPF与PF的红外光谱比较分析表明,二者红外谱图相似,具有相似的特征基团分子结构峰,为SKL部分替代苯酚制备高性能木材用胶黏剂提供了理论依据。

(下转第178页)

良好的化学性质和植物生长促进效果,且重金属含量远低于标准限值,表明其在土壤改良方面具有显著的应用潜力。

尽管煤矸石基土壤改良剂在短期内表现出良好的环境友好性和植物生长促进效果,但长期使用可能导致重金属积累,对土壤和作物安全构成潜在威胁。未来的研究应重点关注如何进一步优化煤矸石的微生物处理工艺,探索更高效的硫转化和重金属固定方法,以确保其在资源化利用过程中环境的安全性和农业利用的可持续性。

参考文献

- [1] Luo C, Li S H, Ren P Y, *et al.* Enhancing the carbon content of coal gangue for composting through sludge amendment: A feasibility study[J]. *Environmental Pollution*, 2024, 348: 123439.
- [2] Wang C G, Wang D M, Xin H H, *et al.* Study on secondary oxidation characteristics of coal gangue at different pyrolysis rank[J]. *Fuel*, 2023, 345: 128231.
- [3] Li J Y, Wang J M. Comprehensive utilization and environmental risks of coal gangue: A review[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 239: 117946.
- [4] 李悦, 伍林玲, 苏丹, 等. 一种煤矸石的成分分析与组分鉴定[J]. *分析化学进展*, 2021, 11(3): 117-122.
- [5] Mu X G, Liu J F, Gao F, *et al.* Microwave-assisted removal of sulfur in large particle size coal by bromine water[J]. *Fuel*, 2021, 289: 119838.
- [6] 刘帆俞, 宋慧平, 吴海滨, 等. 煤矸石土壤化利用与土壤改良剂研究进展[J]. *矿产保护与利用*, 2023, 43(6): 14-26.
- [7] 金韬. 铁/硫氧化微生物协同催化氧化煤矸石产酸作用研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.
- [8] Xu B H, Liu Q F, Ai B, *et al.* Thermal decomposition of selected coal gangue[J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2018, 131: 1413-1422.
- [9] 刘云奇. 微生物矿化和活化作用协同提高循环流化床粉煤灰胶凝性能研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2023.
- [10] 何环, 韩亚涛, 石开仪, 等. 嗜酸铁/硫氧化菌浸出煤矸石中硫的形态变化[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(5): 1304-1310.
- [11] Wang Q S, Long H J, Wang H Q, *et al.* Characterize the growth and metabolism of acidithiobacillus ferrooxidans under electroautotrophic and chemoautotrophic conditions[J]. *Microorganisms*, 2024, 12(3): 590.
- [12] Zheng R K, Wang C, Sun C M. Deep-sea in situ and laboratory multi-omics provide insights into the sulfur assimilation of a deep-sea Chloroflexota bacterium[J]. *mBio*, 2024, 15: e00004-e00024.
- [13] Ma Q X, Kuzyakov Y, Pan W K, *et al.* Substrate control of sulphur utilisation and microbial stoichiometry in soil: Results of ^{13}C , ^{15}N , ^{14}C , and ^{35}S quad labelling[J]. *The ISME Journal*, 2021, 15: 3148-3158.
- [14] Wang K, Mao H L, Wang Z, *et al.* Succession of organics metabolic function of bacterial community in swine manure composting[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2018, 360: 471-480.
- [15] Zhou Z C, Tran P Q, Cowley E S, *et al.* Diversity and ecology of microbial sulfur metabolism[J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2025, 23: 122-140.
- [16] 刘阳, 姜丽晶, 邵宗泽. 硫氧化细菌的种类及硫氧化途径的研究进展[J]. *微生物学报*, 2018, 58(2): 191-201.
- [17] Li J Y, Tian B H, Li X X, *et al.* Energy effective utilization of circulating fluidized bed fly ash to prepare silicon-aluminum composite aerogel and gypsum[J]. *Waste Management*, 2023, 172: 162-170.
- [18] 唐云, 杨强, 张覃. 氧化亚铁硫杆菌浸出高硫煤矸石中硫的试验研究[J]. *选煤技术*, 2010(2): 4-7.
- [19] Zhang H, Dou Z X, Bi W H, *et al.* Multi-omics study of sulfur metabolism affecting functional microbial community succession during aerobic solid-state fermentation[J]. *Bioresour Technol*, 2023, 387: 129664.
- [20] Duan D Y, Wang C Q, Bai D S, *et al.* Representative coal gangue in China: Physical and chemical properties, heavy metal coupling mechanism and risk assessment[J]. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 2024, 37: 101402.
- [21] Tang T, Wang Z, Chen L Z, *et al.* Opportunities, challenges and modification methods of coal gangue as a sustainable soil conditioner—A review[J]. *Environmental Science and Pollution*, 2024, 31: 58231-58251. ■

(上接第 173 页)

参考文献

- [1] 曾美婷, 何龙, 黄雪莉, 等. 生物质基酚醛树脂的研究进展[J]. *现代化工*, 2021, 41(4): 63-66.
- [2] Dorieh A, Farajollah P M, Ghafari M S, *et al.* A review of recent progress in melamine-formaldehyde resin based nanocomposites as coating materials[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2022, 165: 106768.
- [3] Siahkamari M, Emmanuel S, Hodge, D B, *et al.* Lignin-glyoxal: A fully biobased formaldehyde-free wood adhesive for interior engineered wood products[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2022, 10(11): 3430-3441.
- [4] Wang L, Lagerquist L, Zhang Y, *et al.* Tailored thermosetting wood adhesive based on well-defined hardwood lignin fractions[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2020, 8(35): 13517-13526.
- [5] Qin S, Li B, Luo Z, *et al.* The conversion of a high concentration of lignin to cyclic alkanes by introducing Pt/HAP into a Ni/ASA catalyst[J]. *Green Chemistry*, 2020, 22(9): 2901-2908.
- [6] Aziz N A, Latip A F A, Peng L C, *et al.* Reinforced lignin-phenolglyoxal (LPG) wood adhesives from coconut husk[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 141: 185-196.
- [7] 刘宇旗, 武书彬, 庄军平, 等. 酶预处理针叶木硫酸盐碱木质素制备酚醛树脂胶黏剂的研究[J]. *应用化工*, 2023, 52(8): 2342-2345.
- [8] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. GB/T 17657—2013 人造板及饰面人造板理化性能试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
- [9] Mansfield S D, Kim H, Lu F, *et al.* Whole plant cell wall characterization using solution-state 2D NMR[J]. *Nature Protocols*, 2012, 7(9): 1579-1589.
- [10] Watumlawar E C, Park B D, A novel method of self-cross-linking of syringaldehyde with activated methoxy groups via cross-coupling for lignin-based wood adhesives[J]. *ACS Omega*, 2024, 9(26): 28167-28175. ■