http://pmse.scu.edu.cn

含有液化残渣的芦苇基聚氨酯泡沫材料的制备及性能

舒杰轩[1], 吴松林[2,3], 赵金萍[1,3]

(1. 中南林业科技大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410004; 2. 中南林业科技大学 材料与能源学院, 湖南 长沙 410004;
3. 全寿命周期节能建筑与环境健康湖南省工程研究中心, 湖南 长沙 410004)

摘要: 为实现芦苇资源的高值化利用,文中以含液化残渣的芦苇基多元醇和多亚甲基多苯基多异氰酸酯(PAPI)为主要原料制备了芦苇基聚氨酯泡沫材料(B-PU),研究了异氰酸根指数、催化剂配比及用量、发泡剂用量和泡沫稳定剂用量等参数对泡沫性能的影响。结果表明,当异氰酸根指数为 1.2,催化剂质量比为 1.5∶1(P5∶P8),催化剂质量分数为 2%,发泡剂质量分数为 2%和泡沫稳定剂质量分数为 4%时,B-PU 的密度为 105.2 kg/m^3,压缩强度为 292.5 kPa,导热系数为 0.0578 W/(m·K)。在液化残渣和植硅体的协同作用下,B-PU 的热稳定性高于石油基聚氨酯泡沫材料。研究结果为高性能芦苇基聚氨酯泡沫材料的开发提供了理论基础。

关键词: 芦苇;液化残渣;聚氨酯泡沫;压缩强度;热稳定性
中图分类号: TQ328.3 **文献识别码:** A **文章编号:** 1000-7555(2026)04-0021-09

聚氨酯泡沫材料因其优异的保温性能已广泛应用于建筑、工业等领域[1,2]。为降低聚氨酯工业对石油资源的依赖,木质纤维素基聚氨酯材料的开发已成为国内外研究热点。Zhang 等[3]利用稻草(RS)、油菜秸秆(OS)、麦秸(WS)和玉米秸秆(CS)4 种典型农业废弃物制备得到的生物基多元醇成功用于制备聚氨酯泡沫材料,其热稳定性显著优于石油基对照组,在密度和压缩强度等性能参数方面表现出良好的应用潜力。Serrano 等[4]利用小麦秸秆基多元醇部分替代(50%)蓖麻油,与 2 种不同的异氰酸酯(亚甲基二苯基二异氰酸酯(MDI)和甲苯-2,4-二异氰酸酯(TDI))反应制备了聚氨酯泡沫,研究发现,泡沫的形态呈现为紧凑和有序的结构,物理、力学和热性能都有所改善,并且展现出良好的生物降解性。张文静[5]开发了一种芦苇基聚氨酯涂膜材料,发现来源于芦苇的 SiO_2 组分(植硅体)可显著增强涂膜的力学性能,但其增强机制仍有待进一步探究。除上述原料外,木材[6,7]、竹子[8]等生物质原料也引起了研究者的广泛关注。

我国拥有丰富的芦苇资源,其中洞庭湖区是全国 14 个芦苇主产区之一,年总产量达 100 万吨,占全国总产量的 30%以上。随着洞庭湖区造纸产业的全部退出,原用作造纸原料的芦苇资源大量过剩。芦苇作为一种具有碳中和特性的木质纤维素类生物质,在转化为高价值化学品方面具有天然优势,然而目前关于芦苇转化制备多元醇及聚氨酯泡沫材料的研究相对较少。此外,当前针对生物质基聚氨酯泡沫材料的研究多集中于采用经纯化处理的无残渣生物质多元醇,这类纯化过程涉及真空抽滤、旋转蒸发及有机溶剂(如乙醇或丙酮)使用等操作,不仅增加了原料与加工成本,也削弱了生物质利用的可持续性优势。研究表明,在聚氨酯泡沫材料制备过程中

doi: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2026.0051
收稿日期: 2025-04-29
基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目(52208137); 湖南省自然科学基金联合基金项目(2025JJ90158); 湖南省研究生创新基金(CX20220725); 湖南省教育厅科学研究重点项目(24A0188)
通讯联系人: 吴松林, 主要从事生物质基保温材料及相变复合材料研究, E-mail: songlinwu2021@163.com;
赵金萍, 主要从事建筑热湿环境节能控制材料与技术研究, E-mail: jpzhao2020@csuft.edu.cn

添加填料可以提升材料的力学性能[9]。因此,利用芦苇液化产物中自有的粒径较小的残渣和植硅体作为填料,不仅可以提高副产物的利用率,也有助于提升材料开发过程的绿色可持续及经济性。

本文利用含液化残渣的芦苇基多元醇制备聚氨酯泡沫材料,系统研究了催化剂配方、泡沫稳定剂含量及发泡剂用量对泡沫压缩强度、密度和导热系数等性能的影响,阐明了液化残渣与植硅体对泡沫材料热稳定性的作用机制,为高性能芦苇基聚氨酯泡沫材料的开发提供了理论基础。

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

基于笔者团队前期研究的制备工艺[10],所得芦苇基多元醇的得率为 89.15%,黏度为 509.67 mPa·s,羟值为 399.19 mg KOH/g。

多亚甲基多苯基多异氰酸酯(PAPI):烟台万华聚氨酯有限公司;硬泡硅油:市售;N,N,N,N,N-五甲基二乙烯三胺(P5):纯度 99%,阿拉丁试剂(上海)有限公司;N,N-二甲基环己胺(P8):纯度 99%,阿拉丁试剂(上海)有限公司;蒸馏水:实验室自制。

电子式万能试验机:CMT5105 型,深圳新三思试验设备有限公司;导热系数测试仪:DRE-Ⅲ型,湘潭市仪器仪表有限公司;扫描电子显微镜:MIRA LMS 型,捷克 TESCAN 公司;傅里叶变换红外光谱仪:Nicolet iS 20 型,美国 Thermo Electron 公司;X 射线光电子能谱仪:Nexsa 型,美国 Thermo Fisher Scientific 公司;热重分析仪:Q500 型,美国 TA 公司。

1.2 聚氨酯泡沫材料的制备

采用一步法制备聚氨酯泡沫材料,体系中仅使用未经进一步处理的芦苇基多元醇作为醇类原料,未添加其他石油基多元醇。将 20 g 芦苇基多元醇、按照配比称出的催化剂(P5、P8)、泡沫稳定剂(硬泡硅油)和发泡剂(蒸馏水)倒入烧杯中。用电动搅拌器搅拌 15 min,使得添加剂均匀分散在液化物中,并且具备较好的流动性,制得聚氨酯反应的白料(A 料)。

根据异氰酸酯指数计算 PAPI 用量,将 PAPI(B 料)加入 A 料,搅拌 30 s 左右,随后倒入模具中,室温自由发泡成型,等待泡沫成型。30 min 后脱模,放入真空干燥箱中熟化,制得芦苇基聚氨酯泡沫材料。熟化条件为(1)50 ℃,3 h;(2)105 ℃,1 h。

异氰酸酯指数(R)的计算方法如式(1)所示[11]

$$R=(W_{NCO}\times 1000\times m_{NCO}/42)/(M_{OH}\times m_{OH}/56.1+M_{H_2O}\times m_{H_2O}/56.1) \quad (1)$$

式中:W_{NCO}——异氰酸酯中 NCO 的质量分数;m_{NCO}——异氰酸酯的质量,g;M_{OH}——多元醇的羟值,mg KOH/g;m_{OH}——多元醇的质量,g;M_{H_2O}——水的羟值,mg KOH/g;m_{H_2O}——水的质量,g;1000——摩尔转换为毫摩尔的单位换算系数;42——NCO 的相对分子质量;56.1——KOH 的相对分子质量。

含液化残渣的芦苇基聚氨酯泡沫材料(B-PU)的制备过程如 Fig.1 所示。为了避免液化产物中存在的较大粒径的残渣破坏聚氨酯泡沫材料的泡孔结构,将液化产物过 12 目筛,得到过滤后的含细小残渣的多元醇,并以此为原料制备 B-PU。

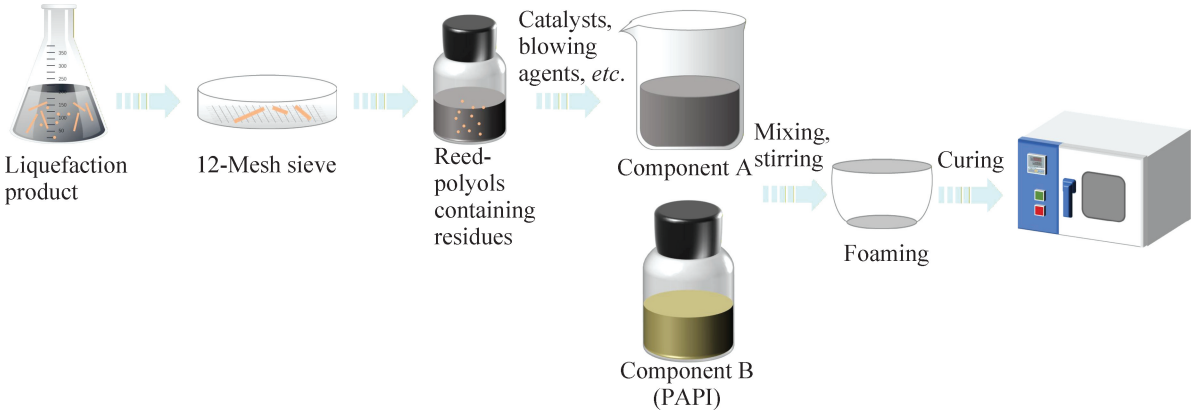


Fig. 1 Schematic diagram of the preparation process for polyurethane foam materials

1.3　测试与表征

1.3.1　力学性能测试:泡沫材料压缩强度测试方法参照国标 GB/T 8813—2020《硬质泡沫塑料 压缩性能的测定》;表观密度测试方法参照国标 GB/T 6343—2009《泡沫塑料及橡胶 表观密度的测定》。

1.3.2　导热系数测定:采用瞬态平面热源法测定泡沫材料的导热系数。

1.3.3　扫描电镜分析:利用扫描电子显微镜(SEM)观察聚氨酯泡沫的形貌。对样品表面进行喷金处理,然后在 1 kV 的电压下用扫描电镜观察材料的表面形貌。

1.3.4　傅里叶变换红外光谱分析:将泡沫材料研磨成粉末,采用溴化钾压片法对 B-PU 的化学结构进行分析。扫描波数范围为 400~4000 cm^{-1},扫描次数为 32 次,分辨率为 4 cm^{-1}。

1.3.5　X 射线光电子能谱分析:采用 X 射线光电子能谱仪(XPS)对聚氨酯泡沫材料的元素组成及价态情况进行分析。

1.3.6　热重分析:利用热重分析仪(TGA)对聚氨酯泡沫材料的热稳定性进行分析。以 N_2 作为保护气,升温速率为 10 ℃/min,将样品从室温升温至 800 ℃,得到样品的热重分析谱图。

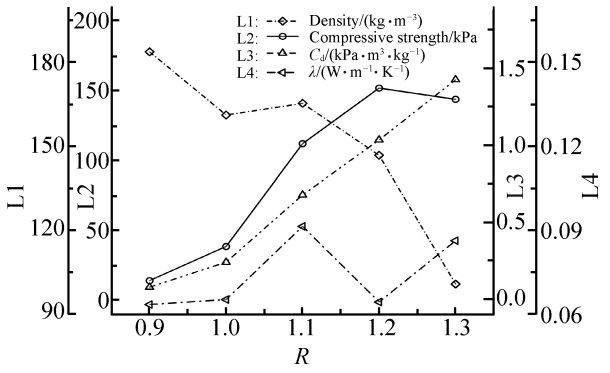


Fig. 2　Influence of isocyanate index (R) on the performance of foam materials

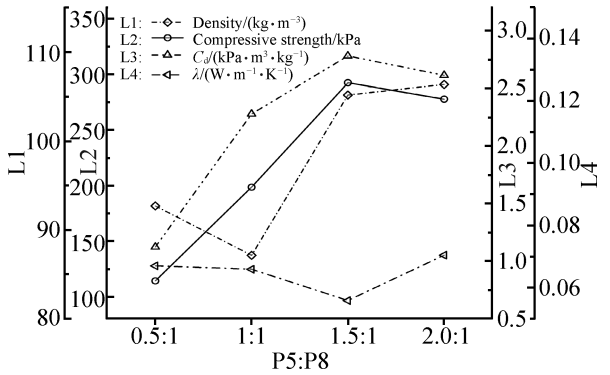


Fig. 3　Influence of catalyst mass ratio on the performance of foam materials

2　结果与讨论

2.1　芦苇基聚氨酯泡沫材料性能影响因素

2.1.1　异氰酸根指数对泡沫材料性能的影响:Fig.2 为在催化剂质量比(P5∶P8 = 1.5∶1)、催化剂(质量分数为 2%)、发泡剂(质量分数为 2%)和泡沫稳定剂(质量分数为 4%)质量固定条件下,不同异氰酸根指数对 B-PU 性能的影响。结果表明,随着 R 值增加,泡沫材料的压缩强度呈现逐渐增强的趋势。当 R = 1.3 时,压缩强度出现下降,同时泡孔尺寸显著增大,材料脆性增加。泡沫材料密度随 R 值的增大呈现逐渐减小的趋势。基于综合性能分析,确定最优异氰酸根指数为 R = 1.2,此时材料的密度为 146.9 kg/m^3,压缩强度达到了 151.8 kPa,比压缩强度为 1.03 kPa·m^3/kg。在 50 ℃,3 h 的熟化条件下,R 值为 0.9 和 1.0 的泡沫材料熟化后出现明显体积收缩,这一现象表明熟化温度会显著影响泡沫材料的熟化过程及最终性能。

2.1.2　催化剂质量比对泡沫材料性能的影响:Fig.3 为在异氰酸根指数(R = 1.2)、催化剂(质量分数为 2%)、发泡剂(质量分数为 2%)和泡沫稳定剂(质量分数为 4%)质量固定条件下,催化剂质量比(P5∶P8)对 B-PU 性能的影响。结果表明,随着 P5∶P8 比值增加,泡沫材料的压缩强度呈现先升高后降低的趋势。这一现象可归因于 2 类催化剂的协同作用机制,P5 作为高活性叔胺催化剂,主要促进水与异氰酸酯的发泡反应,而 P8 主要催化多元醇与异氰酸酯的凝胶反应,调控反应速率和交联网络的形成。当 P5∶P8 比值从 0.5∶1 增至 1.5∶1 时,P5 的气泡成核作用显著改善了泡孔均匀性,这可从导热系数的降低得以验证(从 0.067 W/(m·K)降至 0.056 W/(m·K))。然而,当 P5 过量(P5∶P8>1.5∶1)时,过度的发泡反应会消耗过多异氰酸酯,反而抑制交联反应,导致压缩强度下降。在 P5∶P8 = 1.5∶1 的优化配比下,泡沫材

料展现出最佳的综合性能,密度为 105.2 kg/m^3,压缩强度达 292.5 kPa,比压缩强度为 2.78 kPa·m^3/kg。

为探究熟化条件对 B-PU 的影响机制,将熟化工艺参数设定为 105 ℃,1 h。通过对比分析发现,本节最优样品的制备条件(R = 1.2、催化剂质量分数 2%、催化剂质量比 1.5∶1、发泡剂质量分数 2% 和泡沫稳定剂质量分数 4%)与 2.1.1 节最优样品的制备工艺一致,仅熟化条件存在差异,然而其压缩强度却实现了近 1 倍的显著提升(由 151.8 kPa 提高至 292.5 kPa)。这一显著差异源于聚氨酯泡沫形成过程中的 2 个关键阶段:(1)发泡阶段:异氰酸酯与水的快速反应产生大量 CO_2 气体,形成初始泡孔结构;(2)熟化阶段:多元醇与异氰酸酯持续交联反应使泡孔壁逐渐强化。在熟化过程中,随着反应放热速率降低,体系温度逐渐降至环境温度,导致泡孔内部气体压力降低,形成了显著的内外压差。当泡孔壁的储能模量尚未达到临界强度时,过大的压力差会使泡孔结构发生塑性变形,影响泡沫材料的强度。因此,优化熟化条件(105 ℃,1 h)可确保泡孔壁在压力松弛前形成足够的三维网络结构。

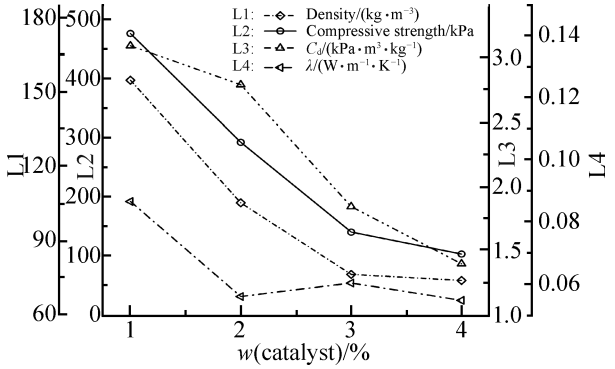


Fig. 4 Influence of catalyst amount on the performance of foam materials

2.1.3 催化剂用量对泡沫材料性能的影响:Fig.4 为在异氰酸根指数(R = 1.2)、催化剂质量比(P5∶P8 = 1.5∶1)、发泡剂(质量分数 2%)和泡沫稳定剂(质量分数 4%)质量固定条件下,催化剂用量对 B-PU 性能的影响。结果表明,催化剂用量与比压缩强度呈现负相关关系。当催化剂含量较低时(质量分数 1%),反应体系活性不足导致聚合反应不完全,难以形成规整的泡孔结构。这些现象主要归因于反应活性不足导致的分子链交联程度不足。随着催化剂质量分数增加至 2%,反应活性达到平衡状态,适度的反应速率有利于气泡成核和稳定生长,泡沫材料密度(105.2 kg/m^3)和导热系数(0.056 W/(m·K))显著降低。然而,当催化剂过量(质量分数 3% 和 4%)时,过快的反应速率导致交联网络有序性下降,使泡沫材料力学性能劣化。通过综合评估材料密度、压缩强度和导热系数等参数,选取最优催化剂质量分数为 2%,此时泡沫材料展现出最佳的综合性能。

2.1.4 发泡剂用量对泡沫材料性能的影响:Fig.5 为在异氰酸根指数(R = 1.2)、催化剂质量比(P5∶P8 = 1.5∶1)、催化剂(质量分数为 2%)和泡沫稳定剂(质量分数为 4%)质量固定条件下,发泡剂用量对 B-PU 性能的影响。结果表明,作为化学发泡剂的水与异氰酸酯反应生成 CO_2 气体和脲基,这一反应过程直接影响泡沫材料的孔结构形成。随着发泡剂质量分数从 1% 增加至 2%,反应产生的 CO_2 气体量逐渐增多,促使材料形成更均匀的闭孔结构,材料密度从 215.4 kg/m^3 显著降低至 105.2 kg/m^3。然而,当发泡剂质量分数超过 2% 时,气泡过度膨胀导致泡孔壁厚度减小,泡孔合并现象加剧,使泡沫材料的比压缩强度降低。通过综合分析,确定最佳发泡剂质量分数为 2%。在此条件下,泡沫材料展现出最优的力学和保温性能。

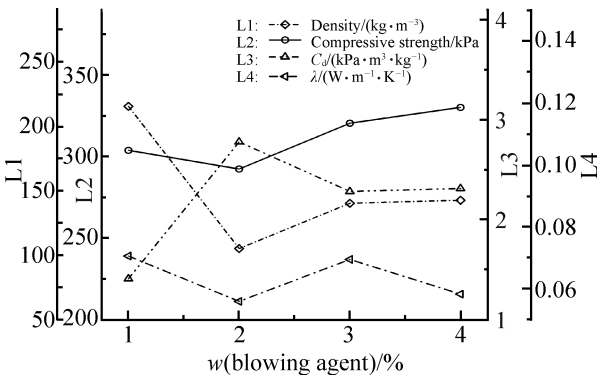


Fig. 5 Influence of blowing agent amount on the performance of foam materials

2.1.5 泡沫稳定剂用量对泡沫材料性能的影响:Fig.6 为在异氰酸根指数(R = 1.2)、催化剂质量比(P5∶P8 = 1.5∶1)、催化剂(质量分数为 2%)和发泡剂(质量分数为 2%)质量固定条件下,泡沫稳定剂用量

对 B-PU 性能的影响。实验结果表明,泡沫稳定剂在体系中主要发挥乳化作用和稳泡作用,促进原料均匀混合并维持泡孔结构稳定性。当泡沫稳定剂质量分数不足(2%)时,易导致泡孔破碎、坍缩。随着质量分数增加至 4%,体系达到最佳平衡状态,材料密度显著降低的同时保持良好力学性能(比压缩强度 2.78 kPa·m^3/kg)。然而,当质量分数过高(5%)时,反应体系黏度增大,泡孔壁强度下降。综合考虑材料密度和压缩强度,最终确定最佳泡沫稳定剂质量分数为 4%,该优化条件特别适用于建筑外墙保温等对材料密度和保温性能要求较高的应用场景。

通过系统的工艺优化研究,最终确定 B-PU 的最佳制备工艺为:异氰酸根指数为 1.2;催化剂质量比为(P5∶P8)1.5∶1;催化剂质量分数为 2%;发泡剂质量分数为 2%;泡沫稳定剂质量分数为 4%。在此优化条件下分别制备了含残渣与不含残渣的芦苇基聚氨酯泡沫材料,其性能参数对比见 Tab.1。结果表明,不含残渣的泡沫材料虽然密度较低,但是压缩强度和保温性能均有所下降。这主要是由于该材料中存在较多孔径较大的开孔结构,在降低材料密度的同时,增大了气体的热传导和对流效应,从而导致导热系数升高。相比之下,含残渣的芦苇基聚氨酯泡沫表现出了更优的综合性能。

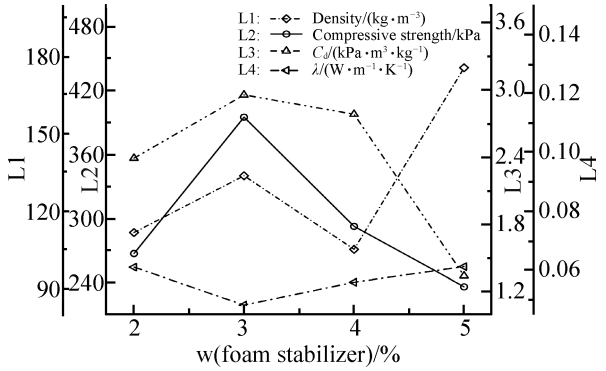


Fig. 6　Influence of foam stabilizer amount on the performance of foam materials

2.2　表面形貌分析

Fig.7 为 B-PU 的表面形貌特征。结果表明,材料呈现出以闭孔为主的规整泡孔形貌,其主要泡孔直径分布在 500~800 μm 范围内,泡孔壁平均厚度约为 50 μm。同时,部分泡孔壁表面存在明显的开放微孔通道结构,且在局部区域可观察到泡孔塌陷和断裂现象。这些形貌特征的形成机制可归因于芦苇基多元醇中残渣组分的双重作用,一方面,残渣增加了反应体系黏度,并通过异相成核作用促进了气泡的均匀分布;另一方面,残渣颗粒的不均匀分布导致局部应力集中,从而形成少量微孔通道和泡孔塌陷缺

Tab. 1　Performance comparison of polyurethane foam materials with and without residues

	Density /(kg·m^{-3})	Compressive strength /kPa	Specific compressive strength /(kPa·m^3·kg^{-1})	Thermal conductivity /(W·m^{-1}·K^{-1})
B-PU	105.2	292.5	2.78	0.056
B-PU (no residue)	94.1	177.28	1.88	0.073

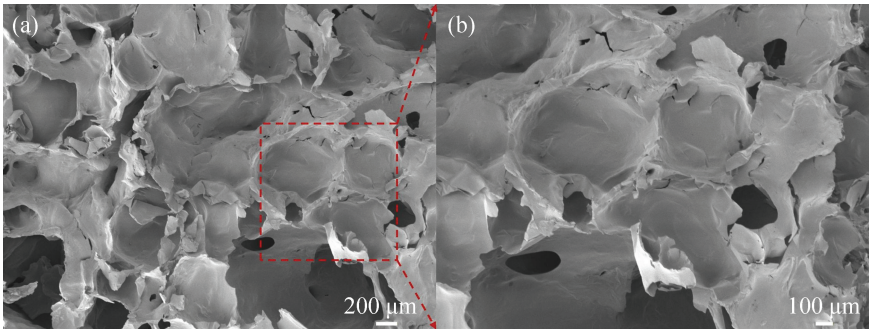


Fig. 7　(a) SEM images of B-PU and (b) the corresponding magnified view

陷。虽然残渣的存在会在一定程度上影响泡沫结构的规整性,但作为功能性填料,其显著提升了泡沫材料的热稳定性(Fig.8)。

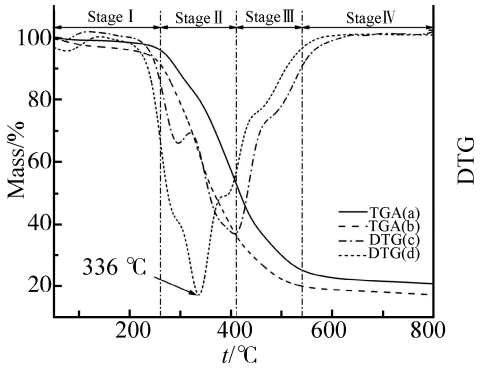


Fig. 8 TGA-DTG curves of polyurethane foam materials (a, c) with and (b, d) without residues

2.3 热稳定性分析

Fig.8 为含残渣与不含残渣的 B-PU 的 TGA-DTG 曲线。对于 B-PU(Fig.8(a, c)),其分解过程可以分为 4 个阶段,每个阶段相应的质量损失分别为 4.1%,43.07%,27.76% 和 4.31%。第Ⅰ阶段(<260 ℃)的质量损失较小,这可能主要是由于水分的蒸发和挥发释放造成的[12]。第Ⅱ阶段(260~410 ℃)是 B-PU 分解的主要阶段,410 ℃的峰值温度高于普通聚氨酯的热解温度(320~350 ℃)[12]。这可能是因为残渣的产碳量和峰值温度高于 PU。此外,芦苇植硅体中的 SiO_2 主要以非晶态硅酸盐胶体形式存在[13],由疏水性的 SiO_2 分子内核和表面亲水性羟基(—OH)官能团共同构成。B-PU 的热稳定性的提高可能与残渣或者植硅体中存在的羟基等官能基团与异氰酸酯相互作用形成的高度交联的热稳定性区段有关[14]。此阶段显著的质量损失是由于聚氨酯中的 C—O 键断裂,形成异氰酸酯和多元醇片段。分解产物中的异氰酸酯片段不能挥发,被困在残留物区。第Ⅲ阶段(410~540 ℃)质量损失较小,这一阶段主要是异氰酸酯片段通过脱羧进一步分解成胺[15]。多元醇分子链和异氰酸酯的降解温度分别为 300~400 ℃和 350~650 ℃[12]。硬质 PU 的多元醇的分解产物主要为脂肪醚和醇[16]。在 350~500 ℃时,胺和乙烯醚成为主要产物。第Ⅳ阶段(>540 ℃)显示出较小的质量损失,这表明 B-PU 在达到高温之前几乎完全分解,并留下了以固定碳结构为主的焦炭。Fig.8(b, d)的热重分析结果表明,与含残渣样品相比,不含残渣的芦苇基聚氨酯泡沫材料表现出显著降低的热稳定性。该材料在热解过程中表现出更快的质量损失速率,且热解峰值温度仅为 336 ℃,较含残渣样品(410 ℃)降低了约 75 ℃。这一显著差异证实了液化残渣作为功能性填料在提升聚氨酯泡沫热稳定性方面的重要作用。

2.4 化学结构分析

Fig.9(a)为最佳液化条件下的残渣(SR)、芦苇基多元醇(BP)和芦苇基聚氨酯泡沫材料(B-PU)的红外光谱图。SR 在 3400 cm^{-1} 附近显示出明显的—OH 特征吸收峰,表明液化残渣中含有丰富的含羟基化合物,如纤维素和半纤维素。1104 cm^{-1} 处的吸收峰对应于 C—O—C 键的振动,进一步证实残渣中存在未完全溶解的纤维素组分。这些未溶解的纤维素组分也是导致 SR 光谱中—OH 特征吸收峰较宽的主要原因。BP 在 3400 cm^{-1} 附近处出现较宽的—OH 特征吸收峰,表明液化产物中含有大量的醇羟基,2900 cm^{-1} 附近的吸收波段归属于甲基(—CH_3)基团中 C—H 键的伸缩振动。1300 cm^{-1} 和 1000 cm^{-1} 范围内出现的强吸收峰归属于 C—O 的伸缩振动,表明 BP 中存在丰富的伯醇、仲醇、叔醇及醚键和酯基等多种含氧官能团。氨酯键“—NH—CO—”是聚氨酯是否生成的主要判断依据。氨酯键中羰基 C═O 的吸收峰在 1726 cm^{-1} 处,1408 cm^{-1} 和 1100 cm^{-1}(C—N 偶联,C—O 伸缩)处的吸收峰也证实了氨基甲酸酯基团的存在[17],而 PU 硬段区域中的氨基 N—H 的伸缩和弯曲引起的特征峰一般出现在 3407 cm^{-1} 和 1540 cm^{-1} 处附近[18]。2880 cm^{-1} 处的吸收波段归属于甲基(—CH_3)基团中 C—H 键的伸缩振动。2280 cm^{-1} 处是异氰酸酯中—N═C═O 的伸缩振动峰,说明 B-PU 中含有未反应完全的 PAPI[19]。1065 cm^{-1} 处的峰与 Si—O 键的振动有关[20],这说明 B-PU 中存在 SiO_2,而 770 cm^{-1} 处的特征峰对应于 Si—O—C 基团[21],这表明,植硅体因表面硅羟基(Si—OH)的存在与异氰酸酯发生了反应,XPS 分析结果也证实了这一推测。共轭 C—O 伸缩振动吸收峰出现在 1220 cm^{-1} 处。芳香环内的 C═C 伸缩振动吸收峰出现在 1600 cm^{-1} 处。

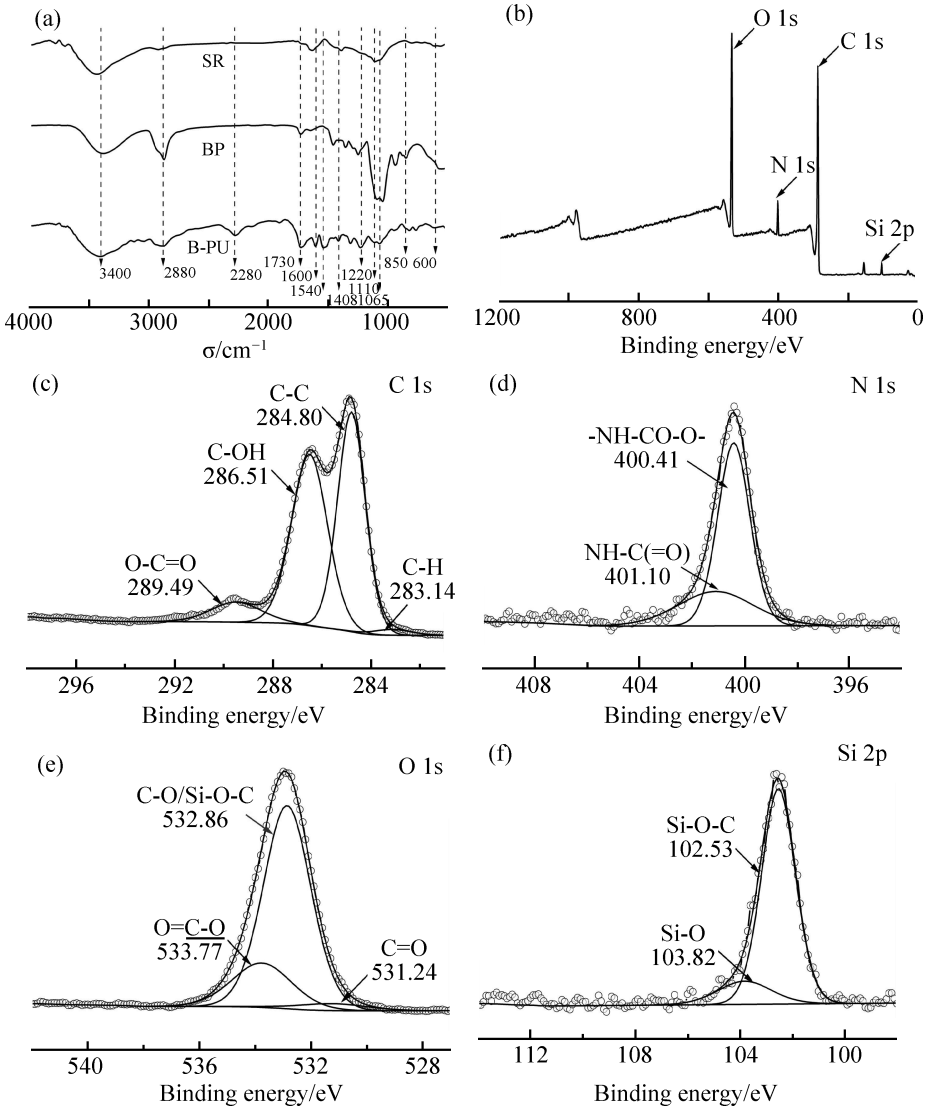


Fig. 9　(a) FT-IR spectra of SR, BP and B-PU; (b) full-scale XPS spectrum of B-PU; (c~f) XPS spectra of C 1s, N 1s, O 1s, and Si 2p

Fig.9(b~f)是 B-PU 的 XPS 谱图。元素光谱的分析结果证明了氨基甲酸酯基团的存在,这进一步证明了聚氨酯泡沫材料的成功制备。在 B-PU 的 C 1s 谱图中,286.51 eV 处的峰归因于 C—OH [22],这可能是因为聚氨酯中存在未反应完全的羟基。286.97 eV 处的峰归因于 C═O [22,23]。在 Si 2p 谱图中,102.59 eV 处 Si—O—C 键的存在表明在聚氨酯泡沫材料的制备过程中,植硅体也参与了反应。此外,由于泡沫材料的制备过程中使用了水作为发泡剂,在 N 1s 谱图中,401.10 eV 处出现了 1 个新峰,这归因于异氰酸酯与水反应生成的脲中的 C—NH 基团[24]。

3　结论

(1)异氰酸根指数、催化剂用量及配比对 B-PU 性能具有显著影响。最优制备条件为:异氰酸根指数为 1.2;催化剂质量比为 1.5∶1(P5∶P8);催化剂质量分数为 2%;发泡剂质量分数为 2% 和泡沫稳定剂质量分数为 4%。在此条件下制备的 B-PU 性能为密度 105.2 kg/m^3、压缩强度 292.5 kPa、比压缩强度 2.78 kPa·m^3/kg、导热系数 0.0578 W/m·K。

(2)FT-IR 和 XPS 表征结果证明了 B-PU 中植硅体的存在,且植硅体因其表面硅羟基(Si—OH)与异氰酸酯发生了反应。在液化残渣和植硅体的协同作用下,B-PU 的热稳定性较石油基聚氨酯泡沫材

料得到了显著提高。

本文以芦苇为原料成功制备了聚氨酯泡沫材料,为液化残渣及生物质衍生无机填料在功能复合材料领域的应用提供了新的研究思路。

参考文献:

[1] Naldzhiev D, Mumovic D, Strlic M. Polyurethane insulation and household products-a systematic review of their impact on indoor environmental quality[J]. Building and Environment, 2020, 169: 106559.

[2] Serrano J A, Díaz L C, Verichev K, *et al*. Providing a feasible energy retrofitting technique based on polyurethane foam injection to improve windows performance in the building stock[J]. Energy and Buildings, 2023, 278: 112595.

[3] Zhang J, Hori N, Takemura A. Optimization of agricultural wastes liquefaction process and preparing bio-based polyurethane foams by the obtained polyols[J]. Industrial Crops and Products, 2019, 138: 111455.

[4] Serrano L, Rincon E, Garcia A, *et al*. Bio-degradable polyurethane foams produced by liquefied polyol from wheat straw biomass[J]. Polymers, 2020, 12: 2646.

[5] 张文静. 芦苇基聚氨酯的合成及其性能研究[D]. 保定: 河北大学, 2023.
Zhang W J. Synthesis and properties of reed-based polyurethane[D]. Baoding: Hebei University, 2023.

[6] Kržan A, Žagar E. Microwave driven wood liquefaction with glycols[J]. Bioresource Technology, 2009, 100: 3143-3146.

[7] Sequeiros A, Serrano L, Briones R, *et al*. Lignin liquefaction under microwave heating[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2013, 130: 3292-3298.

[8] Li F, Qiu C P, Zhang X L, *et al*. Effect of biomass source on the physico-mechanical properties of polyurethane foam produced by microwave-assisted liquefaction[J]. BioResources, 2020, 15: 7034-7047.

[9] Kuźnia M, Magiera A, Pielichowska K, *et al*. Fluidized bed combustion fly ash as filler in composite polyurethane materials[J]. Waste Management, 2019, 92: 115-123.

[10] Wu S, Zhao J, Li C, *et al*. Optimization of reed-based polyol production driven by response surface methodology and machine learning: process modeling and hydroxyl value prediction[J]. Industrial Crops and Products, 2024, 222: 119752.

[11] Li H, Mahmood N, Ma Z, *et al*. Preparation and characterization of bio-polyol and bio-based flexible polyurethane foams from fast pyrolysis of wheat straw[J]. Industrial Crops and Products, 2017, 103: 64-72.

[12] Chen X, Cai D, Yang Y, *et al*. Pyrolysis kinetics of bio-based polyurethane: evaluating the kinetic parameters, thermodynamic parameters, and complementary product gas analysis using TG/FT-IR and TG/GC-MS[J]. Renewable Energy, 2023, 205: 490-498.

[13] Hodson M J. The development of phytoliths in plants and its influence on their chemistry and isotopic composition. Implications for palaeoecology and archaeology[J]. Journal of Archaeological Science, 2016, 68: 62-69.

[14] Zhang X, Kim Y, Eberhardt T L, *et al*. Lab-scale structural insulated panels with lignin-incorporated rigid polyurethane foams as core[J]. Industrial Crops and Products, 2019, 132: 292-300.

[15] Tang X, Chen Z, Liu J, *et al*. Dynamic pyrolysis behaviors, products, and mechanisms of waste rubber and polyurethane bicycle tires[J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 402: 123516.

[16] Reinerte S, Avotina L, Zarins A, *et al*. TG/DTA-FT-IR as a method for analysis of tall oil based rigid polyurethane foam decomposition gaseous products in a low oxygen environment[J]. Polymer Degradation and Stability, 2020, 180: 109313.

[17] Aminuddin R N H, Lau K S, Winie T, *et al*. Microwave-assisted reduction of graphene oxide for an electrochemical supercapacitor: structural and capacitance behavior[J]. Materials Chemistry and Physics, 2021, 262: 124274.

[18] Septevani A A, Evans D A C, Chaleat C, *et al*. A systematic study substituting polyether polyol with palm kernel oil based polyester polyol in rigid polyurethane foam[J]. Industrial Crops and Products, 2015, 66: 16-26.

[19] Mahmood N, Yuan Z, Schmidt J, *et al*. Hydrolytic liquefaction of hydrolysis lignin for the preparation of bio-based rigid polyurethane foam[J]. Green Chemistry, 2016, 18: 2385-2398.

[20] Benning L G, Phoenix V R, Yee N, *et al*. Molecular characterization of cyanobacterial silicification using synchrotron infrared micro-spectroscopy[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2004, 68: 729-741.

[21] Dong T, Ye H, Wang W, *et al*. A sustainable layered nanofiber/sheet aerogels enabling repeated life cycles for effective oil/water separation[J]. Journal of Hazardous Materials, 2023, 454: 131474.

[22] Putjuso T, Putjuso S, Karaphun A, *et al*. β-Ni(OH)$_2$ nanoparticles@activated sugarcane bagasse carbon nanocomposites as an advanced hybrid electrode material for asymmetric supercapacitors[J]. Surfaces and Interfaces, 2024, 51: 104584.

[23] Wang Y, Wang R, Kong X Z, *et al*. Eu-doped polyurethane with efficient multicolor fluorescence, self-healing, stimuli-responsiveness and its diverse applications[J]. Advanced Functional Materials, 2025, 35: 2418965.

[24] Balakumar V, Selvarajan S, Baishnisha A, *et al*. In-situ growth of TiO_2@B-doped g-C_3N_4 core-shell nanospheres for boosts the photocatalytic detoxification of emerging pollutants with mechanistic insight[J]. Applied Surface Science, 2022, 577: 151924.

Preparation and Properties of Reed-Based Polyurethane Foam Materials Containing Liquefaction Residues

Jiexuan Shu[1], Songlin Wu[2,3], Jinping Zhao[1,3]

(*1. School of Civil Engineering, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China; 2. School of Materials and Energy, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China; 3. Hunan Engineering Research Center of Full Life-Cycle Energy-Efficient Buildings and Environmental Health, Changsha 410004, China*)

ABSTRACT: To achieve high-value utilization of reed resources, reed-based polyurethane foam (B-PU) was prepared using reed-based polyols containing liquefaction residues and polymeric methylene diphenyl diisocyanate (PAPI) as main raw materials. The effects of isocyanate index, catalyst ratio and dosage, blowing agent content, and foam stabilizer content on the foam properties were investigated. The results show that when the isocyanate index is 1.2, the catalyst mass ratio is 1.5∶1 (P5∶P8), the catalyst mass fraction is 2%, the blowing agent mass fraction is 2%, and the foam stabilizer mass fraction is 4%, the B-PU exhibits a density of 105.2 kg/m^3, a compressive strength of 292.5 kPa, and a thermal conductivity of 0.0578 W/(m·K). Due to the synergistic effect of liquefaction residues and phytoliths, the thermal stability of B-PU is superior to that of petroleum-based polyurethane foam. This study provides a theoretical basis for the development of high-performance reed-based polyurethane foam materials.

Keywords: reed; liquefaction residues; polyurethane foams; compressive strength; thermal stability