http://pmse.scu.edu.cn

椰棕基硬质聚氨酯泡沫的制备及其性能

张童通[1,2]，李英教[1,2]，黎吉辉[1,2]，林 常[1,2]，宋 辉[1,2]，许文茸[1,2]，张玉苍[3]，徐树英[1,2]

（1.海南大学 化学化工学院，海南 海口 570228；2. 海南大学 海口市固废物资源利用及环境保护重点实验室，海南 海口 570228；
3. 集美大学 海洋食品与生物工程学院，福建 厦门 361021）

摘要：利用微波辅助液化技术将椰棕粉末进行液化制得液化物，以液化物为原料、三乙烯二胺（TEDA）和异辛酸锡（TECH）为复合催化剂、水为发泡剂，与多苯基甲烷多异氰酸酯反应通过一步法制备了硬质聚氨酯泡沫（PURF）。对水发泡制备PURF的条件进行优化，较优的制备条件为催化剂中TEDA和TECH的质量比为4:5、催化剂质量分数为5%、泡沫稳定剂M-8818质量分数为2.5%、发泡剂质量分数为2%，该条件下制备的PURF的压缩强度为223 kPa，超过了大部分生物基PURF。采用傅里叶变换红外光谱对液化物、液化剂和PURF进行表征，通过扫描电镜对泡沫泡孔进行观察。结果显示，所合成的PURF大部分为闭孔，体系中基本没有异氰酸根剩余。使用锥形量热仪对最优PURF进行燃烧行为分析，最大热释放速率（HRR）为250.6 kW/m^2。

关键词：椰棕；液化；聚氨酯泡沫；压缩强度
中图分类号：TQ328.3 **文献标识码：**A **文章编号：**1000-7555（2024）07-0010-08

硬质聚氨酯泡沫（PURF）是一种分子链中含有氨基甲酸酯的高分子聚合物，其具有质量轻、热导率低及绝热隔音效果好等特性，作为隔热和隔音材料在造船、建筑、汽车、电子、制鞋、体育用品等诸多行业发挥着重要作用[1]。此外，PURF还可以与诸如碳黑、碳纳米管[2]、石墨烯[3]及其杂化填料合成聚合物泡沫复合材料[4]，广泛应用于电磁干扰屏蔽、传感器和生物医用材料等[5]。据2019年统计，PURF塑料行业以超过65%的份额主导了聚氨酯市场。目前，硬质PURF已成为建筑行业的高需求材料，并且这种需求在未来会进一步增加。预计到2025年，由于绝缘材料的需求增加，PURF将大幅增长[6]。

聚氨酯由二异氰酸酯或多异氰酸酯与多元醇反应制备，后经发泡反应得到PURF。目前用于生产PURF的多元醇主要来自石油基产品。随着环境问题和石油资源的短缺问题日益突出，开发绿色可再生生物质多元醇生产PURF逐渐受到重视[7,8]。诸如废松木[9]、玉米秸秆[10]、甘蔗渣[11]和咖啡渣[12]等多种生物质在制备生物基多元醇方面取得了较大进展，但目前获得的转化率和生物质利用率仍较低，且由生物基多元醇合成的PURF性能有待提高，仍有巨大的研究开发空间。

椰棕作为一种重要的农林副产物，富含纤维素，广泛存在于自然界中。据估计，椰子的全球种植面积约1200万公顷[13]，中国每年的椰子产量约2亿个，在食用椰肉和椰子水后将产生大量的椰棕，其质量约占椰子质量的35%，是一种极为丰富的生物质资源。但目前对椰棕的利用仍然停留在低附加值加工阶段，大部分的椰棕被直接丢弃或焚烧，这不仅浪费资源，更会对环境造成污染。因此，合理有效转化椰棕具有显著的环境和经济效益。

溶剂催化液化技术是一种将生物质转化为多元醇的典型方法，其具有反应条件较温和、成本低和污染小的特点，且可通过调控反应条件如催化剂用量、

doi: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2024.0126
收稿日期：2023-09-21
基金项目：海南省降解塑料技术创新中心开放课题（ZDYF2019192）
通讯联系人：徐树英，主要从事农业废弃物资源化利用研究，E-mail: xushuying1980@163.com

发泡剂用量、时间和温度等优化产品性能。因此,本文采用溶剂催化液化法,在微波辅助下以椰棕为原料制备多元醇,再采用一步法发泡制备PURF,并对合成的PURF进行性能测试,以确定最佳的发泡工艺条件。

1　实验部分

1.1　材料与试剂

椰棕:产自海南;多苯基甲烷多异氰酸酯(PAPI):济宁华凯聚氨酯有限公司;三乙烯二胺(TEDA)、异辛酸锡(TECH):纯度≥99%,产自上海麦克林生化科技有限公司;泡沫稳定剂M-8818、聚乙二醇-400(PEG)、浓硫酸(98%)、丙三醇(CG):均为市售化学纯。

1.2　椰棕的液化

首先利用粉碎机将干燥的椰壳粉碎分离出椰棕,再将椰棕洗涤干燥后进行粉碎,用筛分器筛出粒径为60目的粉末。将PEG和CG混合(PEG与CG质量比为4:1,)作为液化剂和6 g椰棕粉末加入250 mL两口烧瓶中,使用搅拌器不断搅拌,待搅拌均匀后,用移液枪将质量分数为9%的催化剂浓硫酸注入两口烧瓶内,加完后将两口烧瓶的口分别用微波仪的温度传感器和冷凝管堵住,放置于微波仪中,温度设定为160 ℃,并开始记录液化时间。当液化时间达到20 min后,停止反应,待温度冷却后,使用乙醇冲洗抽滤并进行旋蒸,最终得到椰棕液化物。

1.3　PURF的制备

采用一步法[14]制备PURF材料,首先将10 g液化物、3.5%~5.5%(以液化物质量计,下同)催化剂(TEDA与TECH按一定质量比混合),2%~5%泡沫稳定剂M-8818倒入烧杯中,再使用机械搅拌机进行搅拌,转速为400 r/min,时间为10 min。随后向混合物中加入2%发泡剂(水)与155%异氰酸酯PAPI,进行起泡实验,搅拌转速为800 r/min,时间为15 s,随后转移到模具中,等待泡沫成型后,放入烘箱中干燥6 h,最后脱模,制得PURF。Tab.3为不同条件下所得PURF缩写。

1.4　测定与表征

1.4.1　PURF的表征:采用德国TENSOR27傅里叶变换红外光谱仪(FT-IR)对PURF的化学结构进行表征;采用PhenomProX扫描电子显微镜(SEM)对PURF泡孔形态进行表征;采用德国NETZSCH热重分析仪(TG)对PURF的热稳定性进行分析,温度范围为35~700 ℃,加热速率为10 ℃/min,氮气流量为30 mL/min;使用英国FTT锥形量热仪对PURF燃烧行为进行分析,热通量为25 kW/m^2;根据国标GB/T6343-2009测定PURF的表观密度;根据国标GB/T8813-2008测量PURF的压缩强度;根据国标GB/T12008.3-2009测定液化物的羟值。

1.4.2　椰棕液化率的测定:使用无水乙醇冲洗两口烧瓶中的液化物,再进行抽滤,之后将过滤获得的残渣放入鼓风干燥箱中进行干燥,待水分完全干燥后进行称量,即为残渣质量。液化率计算如式(1)所示

$$\eta = 1 - m_1/m_2 \tag{1}$$

式中:η——液化率,%;m_1——残渣质量,g;m_2——椰棕粉末的质量,g。

1.4.3　液化物羟值与酸值的测定:液化物羟值由邻苯二甲酸酐法进行测定,由式(2)进行计算

$$L = (V_1 - V_2) \times c \times 56.1/m_0 \tag{2}$$

式中:L——液化物的羟值,mg/g;V_1——空白组消耗氢氧化钠标准溶液的体积,mL;V_2——实验组消耗的氢氧化钠标准溶液的体积,mL;c——氢氧化钠标准溶液的浓度,mol/L;m_0——试样的质量,g;56.1——氢氧化钾的相对分子质量,g/mol。

液化物酸值参考孙戈亮等的酸值方法[15],由式(3)计算

$$a = (V_3 - V_4) \times c \times 56.1/m \tag{3}$$

式中:a——液化物的酸值,mg/g;V_3——实验组所消耗的氢氧化钠标准溶液的体积,mL;V_4——空白组中消耗氢氧化钠标准溶液的体积,mL;c——氢氧化钠标准溶液的浓度,mol/L;m——试样的质量,g。

2　结果与讨论

2.1　制备条件对PURF的影响

2.1.1　催化剂中TEDA与TECA的质量比:在发泡过程中,不同的催化剂比例对反应的催化效率各不相同,导致生成气体和形成稳定泡沫结构的速率不同,从而使制备的PURF的性能不相同[10]。以压缩强度来考察催化剂中TEDA和TECH质量比对PURF性能的影响。

Tab. 1 PURF apparent density and compression strength under different conditions

		Apparent density/(kg·m^{-3})	Compressive strength/kPa
m(TEDA):*m*(TECH)	2:3	62±2	149±7
	4:5	63±1	166±10
	1:1	66±2	159±5
	5:4	63±2	92±4
	3:2	59±1	115±8
Catalyst content	3.5%	71±3	76±3
	4%	69±2	168±7
	4.5%	67±1	162±11
	5%	63±3	166±9
	5.5%	65±2	156±6
Amount of foam stabilizer	2%	79±3	210±8
	2.5%	83±2	223±12
	3%	79±1	202±7
	3.5%	82±1	182±10
	4%	63±3	166±9
	4.5%	66±2	126±5

为了研究催化剂中TEDA和TECH质量比(2:3，4:5，1:1，5:4和3:2)对PURF压缩强度的影响，仅改变催化剂比例，其他条件保持不变。异氰酸酯指数选择1.2(异氰酸酯指数是指异氰酸酯与多元醇当量之比，异氰酸酯指数为1.2时，PAPI的质量为液化物质量的155%)，泡沫稳定剂质量分数、催化剂质量分数和发泡剂质量分数分别为4%，5%和2%。由Tab.1可以看出，随着催化剂中TECH占比下降和TEDA占比上升，泡沫的压缩强度先上升后下降，然后小幅回升。表观密度先上升的原因是凝胶反应大于发泡反应，随着TEDA占比增大，发泡反应过大导致泡沫密度下降，从而得到压缩强度的趋势也是先上升后下降，之后有所回升。当*m*(TEDA):*m*(TECH) = 4:5时，泡沫的压缩强度达到最大。TEDA既能促进异氰酸酯和水反应(发泡反应)，也可以促进羟基和异氰酸酯反应(凝胶反应)。TECH只能影响凝胶反应。TEDA比例过大会导致反应时间过短，黏度增加太快，泡沫开裂，发泡时会冒烟，原因是TEDA加速了发泡反应，产生大量CO_2，发泡反应速率远大于凝胶反应速率，从而导致泡沫开裂。制备性能良好的泡沫需要调节发泡反应和凝胶反应速率使其处于良好的平衡。综合考虑，较优的TEDA和TECH质量比为4:5。

2.1.2 催化剂用量：在催化剂比例为4:5、异氰酸酯指数为1.2、泡沫稳定剂质量分数和发泡剂质量分数分别为4%和2%条件下研究催化剂用量对PURF压缩性能的影响。实验结果表明，当催化剂质量分数大于5.5%时，反应时间短，气体生成速率过快，导致泡孔过大并出现开裂现象，性能差。当催化剂质量分数小于3.5%时，气体生成速率慢导致发泡速度慢，发泡高度低，最终制备的PURF密度大、易破碎，不能作为试验样品。所以在催化剂质量分数为3.5%~5.5%区间内研究催化剂用量对PURF性能的影响。由Tab.1可以看出，催化剂质量分数为3.5%时，压缩强度最低；催化剂质量分数为5%时，压缩强度最高。催化剂用量较高时，反应过快，CO_2迅速生成，导致泡孔较大；催化剂用量较少时，反应较慢，气体释放较慢，泡沫结构形成较快，导致泡沫密度比较大。催化剂质量分数为5%时，凝胶反应与发泡反应速率达到平衡，泡沫性能最佳。

2.1.3 泡沫稳定剂用量：在催化剂比例为4:5、异氰酸酯指数为1.2、催化剂质量分数和发泡剂质量分数

分别为5%和2%的条件下研究泡沫稳定剂用量对PURF压缩性能的影响。从Tab.1中可以看出,压缩强度在泡沫稳定剂质量分数为2.5%时达到最大。随着泡沫稳定剂用量的增加,压缩强度趋势为先上升后下降,在泡沫稳定剂质量分数为2.5%时达到最大。泡沫稳定剂的作用机理是表面活性剂起乳化、成核和稳定的作用。泡沫稳定剂添加过多会导致气泡不容易破裂,气泡数量增加,没有形成稳定的支撑结构,从而导致压缩强度下降。

综上所述,在催化剂TEDA与TECH质量比为4:5,催化剂质量分数、发泡剂质量分数和泡沫稳定剂质量分数分别为5%,2%和2.5%时,制备的椰棕PURF的性能较优,其密度为83 kg/m^3,压缩强度为223 kPa。

Tab.2展示的是文献中给出的一些生物质制备的PURF的压缩强度[16~20],花生壳PURF的压缩强度达到了190 kPa,橙皮PURF的压缩强度最低为86 kPa,相比较之下,本文制备的椰棕PURF拥有更高密度和压缩强度。

Tab. 2 PURF density and compression strength of different biomass

Biomass PURF	Compressive strength/kPa
Coir	223
Rice straw	181[16]
Peanut shell	190[17]
Citric acid residue	149[18]
Orange peel	86[19]
Corn stalk	137[20]

2.2　结构表征

2.2.1　FT-IR分析:从Fig.1中可以看出,液化物在3446 cm^{-1}和2921 cm^{-1}附近都有吸收峰,3446 cm^{-1}为O—H的伸缩振动峰,2921 cm^{-1}是C—H的伸缩振动峰,2个峰的强度都很高,说明液化物中富含羟基和碳链[16]。这主要有两方面的原因:一方面液化试剂本身富含羟基,另一方面由木质素分解产生的富含羟基的小分子进入液化试剂中。液化物的FT-IR曲线在1105 cm^{-1}处出现了C—O的伸缩振动峰。O—H的伸缩振动峰和C=O的伸缩振动峰,说明液化物中含有聚醚多元醇,可以替代石油基多元醇。对比液化剂和液化物的FT-IR曲线可以看出,液化物的C=O和O—H的吸收峰比液化剂更强,并且液化物在1730 cm^{-1}左右出现了2个吸收峰,说明液化剂是液化物的组成部分。

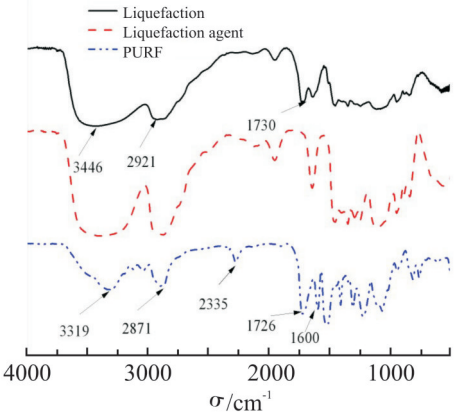


Fig. 1 FT-IR spectra of liquefactionproduct, liquefaction agent and PURF

在椰棕PURF中,3319 cm^{-1}处的吸收峰是O—H伸缩振动峰,2871 cm^{-1}处归属于C—H伸缩振动峰,3000~3200 cm^{-1}区间为N—H伸缩振动峰[21],1600 cm^{-1}与1456 cm^{-1}处是苯环的特征吸收峰,1726 cm^{-1}处为C=O的伸缩振动峰,1409 cm^{-1}的峰是羟基平面内伸缩振动峰,1500~1600 cm^{-1}处是氨基甲酸酯的N—H弯曲振动峰,1226 cm^{-1}是胺酯键中的C—O伸缩振动峰,1311 cm^{-1}处的吸收峰胺中C—N伸缩振动[22]。—NH—和—COO—的2个特征峰表明O—H与—NCO之间发生了交联反应,说明液化物和异氰酸酯进行了反应。1311 cm^{-1}和1226 cm^{-1}处的峰说明分子链中出现了氨基甲酸酯结构。2335 cm^{-1}处出现了1个弱尖峰,为取代脲键的特征峰。在2200 cm^{-1}处未出现异氰酸根(—NCO)的特征峰,说明发泡过程中,没有异氰酸根剩余,这是因为水与异氰酸根发生反应生成CO_2从而达到起泡作用,降低了体系的异氰酸根浓度。

2.2.2　SEM分析:从Fig.2可以看出,不同催化剂比例下获得的PURF都能形成完整的泡孔结构。随着TEDA占比的增加,有部分泡孔破裂,主要是因为TEDA在发泡过程中控制发泡反应,TEDA含量过高会导致发泡反应剧烈放出大量的热,从而使气泡合并过多以及气体逸出,泡孔大量破碎,泡沫体产生中空乃至塌陷,甚至出现烧芯现象,泡沫结构破坏,导致硬质泡沫的力学性能急剧下降。TECH在发泡过

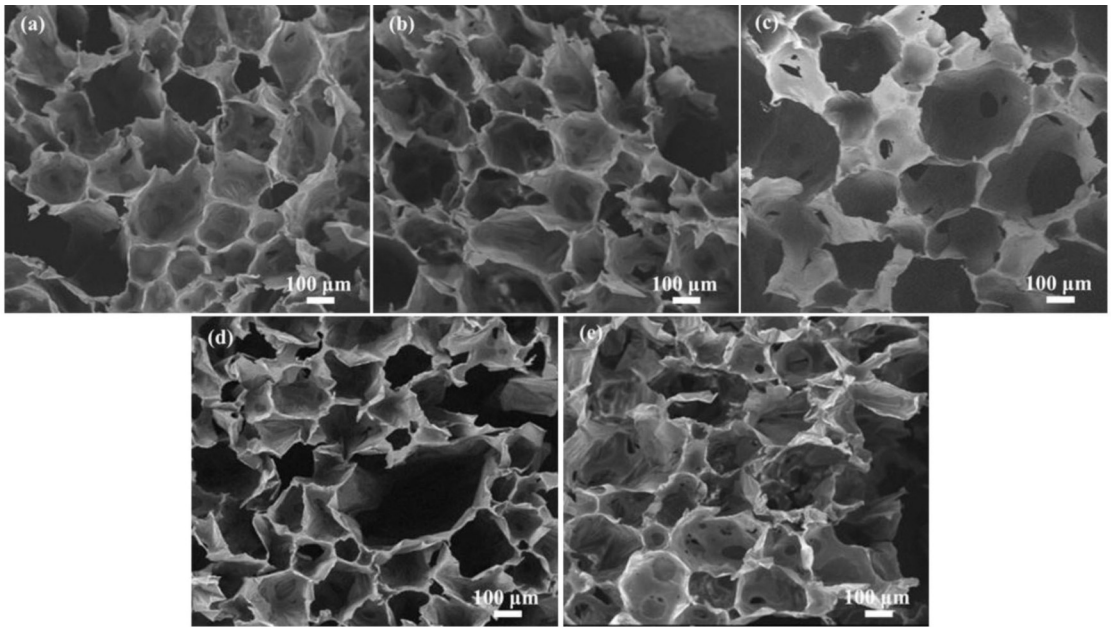


Fig. 2 SEM images of PURF obtained at different catalyst ratios (*m*(TEDA):*m*(TECH))
(a): 2:3; (b): 4:5; (c): 1:1; (d): 5:4; (e): 3:2

Tab. 3 Abbreviated representation

Abbreviations	Description
PU1	Catalyst ratio of 4:5, catalyst content of 5%, foam stabilizer content of 2.5%
PU2	Catalyst ratio of 4:5, catalyst content of 3.5%, foam stabilizer content of 4%
PU3	Catalyst ratio of 4:5, catalyst content of 5%, foam stabilizer content of 4%
PU4	Catalyst ratio of 1:1, catalyst content of 5%, foam stabilizer content of 4%

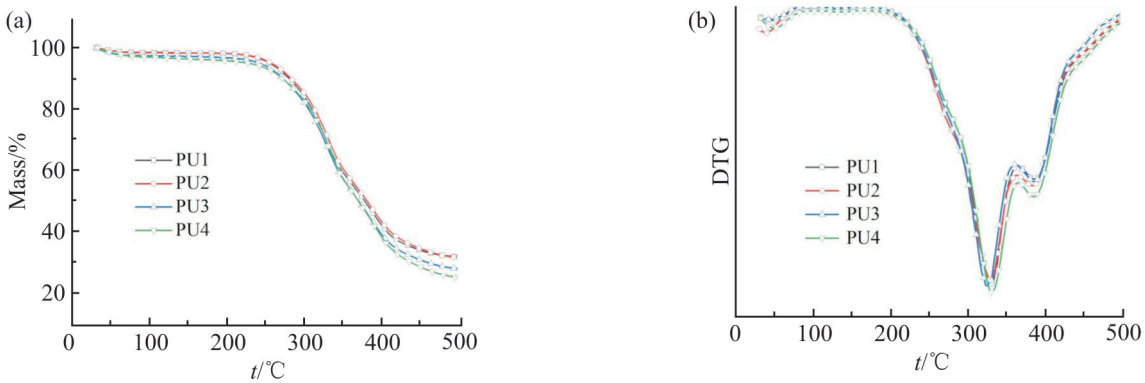


Fig. 3 (a) TG and (b) DTG curves of the prepared PURF

程中主要控制凝胶反应，占比过大会导致气泡还没有充分生长，泡沫就固化了，使得泡沫塑料密度增加、压缩性能下降。

2.2.3 TG和DTG分析：为了研究生物质PURF的热稳定性进行了热重分析。Tab.3展示了不同条件下所得的PURF的缩写名称。从Fig.3(b)可以观察到，所制备的PURF热解过程主要包括2个热分解阶段[23]。第1阶段发生在250~370 ℃之间，在该阶段，PURF快速分解，归因于PURF材料中脲键和氨基甲酸酯分解。第2阶段发生在370~500 ℃之间，原因主

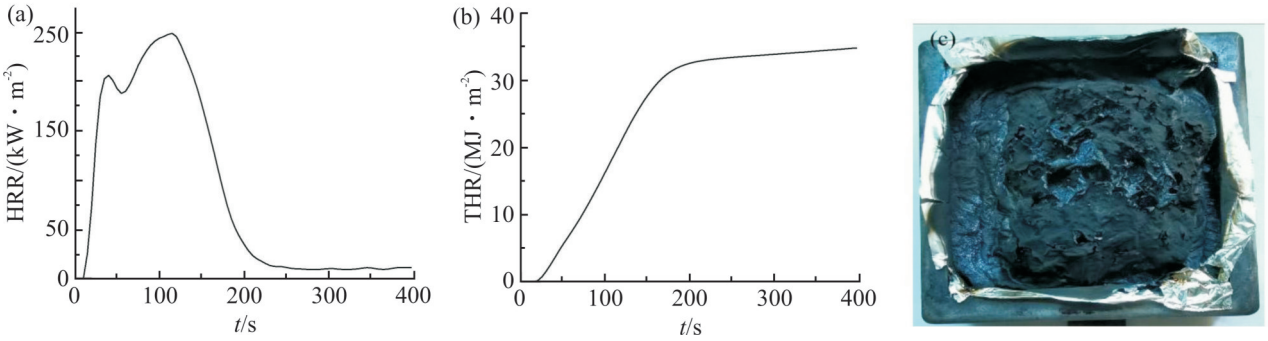


Fig. 4 (a) HRR and (b) THR curves of the prepared PURF; (c) photo of carbon residues

Tab. 4 Cone calorimetric data of PURF

Materials	Ignition time/s	First peak		Second peak		Carbon residue content/%	Total heat release/ (MJ·m^{-2})
		Heat release rate /(kW·m^{-2})	Time/s	Heat release rate /(kW·m^{-2})	Time/s		
PURF	4	206.6	40	250.6	115	22.8	34.8

要是生物质多元醇骨架的分解,交联网状结构、炭层和木质素及其衍生物的氧化分解[24]。不同条件下制备的PURF的热分解过程比较相似,说明制备泡沫过程中,所添加的添加剂对生物质PURF的热稳定性影响比较小。

2.2.4 燃烧性能分析:为了研究性能最佳泡沫的燃烧行为,使用锥形量热仪对其进行探究,Fig.4为PURF的热释放速率(HRR)和总热释放量(THR)的曲线及残炭照片,Tab.4为锥形量热的测试数结果数据。由Fig.4(a)可以看出,PURF在整个燃烧过程中出现了2个峰值。在40 s出现了第1个峰,峰值为206.6 kW/m^2;在115 s出现了第2个峰,峰值为250.6 kW/m^2。出现2个峰的原因是燃烧进行一段时间后,在PURF表面会形成炭层,阻碍热量的释放以及空气向PURF内部扩散,抑制燃烧,但是随着燃烧的进行,炭层破碎,PURF内部燃烧,释放热量,HRR出现比第1个峰更高的峰。残炭图片(Fig.4(c))验证了这一原因。由Tab.4可知,燃烧完全过后残炭量为22.8%,THR为34.8 MJ/m^2。

3 结论

利用生物质生产多元醇进而制备生物基PURF对于实现"碳达峰"和"碳中和"具有重要意义。本文利用微波辅助液化椰棕,液化率可达到80%以上,羟值为300.5 mg/g,酸值为22.8 mg/g,达到了制备PURF的要求。采用所得的椰棕液化物作为原料替代石油基聚醚多元醇生产生物基PURF,并考察了TEDA/TECH质量比、发泡剂用量和泡沫稳定剂用量的影响。研究发现,TEDA过量会导致泡孔破裂,TECH过量会导致难以形成泡孔结构。当TEDA与TECH质量比为4:5,添加量为5%,泡沫稳定剂质量分数和发泡剂质量分数分别为2.5%和2%时,发泡反应与凝胶反应达到平衡,所制备的PURF泡孔分布均匀,闭孔率较高,性能好,且压缩强度最大,为223 kPa。与其他生物基PURF相比,本文所制备的椰棕基PURF具有更高的压缩强度,在作为保温墙、隔音墙的填充材料有很好的应用前景。本文的研究结果可为高压缩强度生物基PURF的制备提供一条新颖的合成路线。

参考文献:

[1] 叶建民, 张军华. 阻尼性半硬质聚氨酯泡沫的制备与性能[J]. 高分子材料科学与工程, 2017, 33(7): 94-98.

Ye J M, Zhang J H. Synthesis of damping semi-rigid polyurethane foam and its properties[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2017, 33(7): 94-98.

[2] Yan Q, Xie W, Zhou M, *et al.* An ultrasensitive and highly compressive piezoresistive sensor based on a biopolyol-reinforced polyurethane sponge coated with silver nanoparticles and carbon nanotubes/cellulose nanocrystals[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2020, 8: 16603-16614.

[3] Kucki L G. Classification framework for graphene-based materials [J]. Angewandte Chemie International Edition, 2014, 53: 7714-7718.

[4] Sarmad P M, Noroozi M, Abrisham M, *et al.* A comprehensive review on carbon- based polymer nanocomposite foams as electromagnetic interference shields and piezoresistive sensors[J]. ACS Applied Electronic Materials, 2020, 2: 2318-2350.

[5] Kausar A. Polyurethane composite foams in high- performance applications: a review[J]. Polymer- Plastics Technology and Engineering, 2018, 57: 346-369.

[6] Ates M, Karadag S, Eker A A. Polyurethane foam materials and their industrial applications[J]. Polymer International, 2022, 71: 1157-1163.

[7] Campanella A, Bonnaillie L M, Wool R P. Polyurethane foams from soyoil- based polyols [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2009, 112: 2567-2578.

[8] 张伟, 储富祥, 王春鹏. 生物质泡沫材料的研究进展[J]. 高分子材料科学与工程, 2010, 26(8): 157-160.

Zhang W, Chu F X, Wang C P. The progress in study of bio-based foam[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2010, 26(8): 157-160.

[9] Yue D Z, Oribayo O, Rempel G L, *et al.* Liquefaction of waste pine wood and its application in the synthesis of a flame retardant polyurethane foam[J]. RSC Advances, 2017, 7: 30334-30344.

[10] 王体朋, 毛志怀. 催化剂对玉米秸秆基聚氨酯泡沫力学性能影响的研究[J]. 可再生能源, 2009, 27(6): 50-57.

Wang T P, Mao Z H. Effects of catalysts on mechanical properties of polyuerthane foams based on corn stalk[J]. Renewable Energy Resources, 2009, 27(6): 50-57.

[11] Hakim A A A, Nassar M, Emam A, *et al.* Preparation and characterization of rigid polyurethane foam prepared from sugar-cane bagasse polyol[J]. Materials Chemistry and Physics, 2011, 129: 301-307.

[12] Gama N, Silva R, Carvalho A P O, *et al.* Sound absorption properties of polyurethane foams derived from crude glycerol and liquefied coffee grounds polyol[J]. Polymer Testing, 2017, 62: 13-22.

[13] Oliveira D M D, Benini K C C D C, Monticeli F M, *et al.* Permeability of untreated and atmospheric plasma treated coconut fiber mats[J]. Materials Research Express, 2019, 6: 095323.

[14] Pierre F, Avérous L. Renewable polyols for advanced polyurethane foams from diverse biomass resources[J]. Polymer Chemistry, 2018, 9: 4258-4287.

[15] 孙戈亮, 万平玉, 赵磊, 等. 木质素样品的羟值测定方法[J]. 林产化学与工业, 2012, 32(3): 51-55.

Sun G L, Wang P Y, Zhao L, *et al.* The improvement in the determination method of hydroxyl value for lignin[J]. Chemistry and Industry of Forest Products, 2012, 32(3): 51-55.

[16] 袁东方, 张玉苍. 物理发泡水稻秸秆基聚氨酯泡沫研究[J]. 生物质化学工程, 2020, 54(2): 33-39.

Yuan D F, Zhang Y C. Research on mechanical blowing rice straw polyurethane foam[J]. Biomass Chemical Engineering, 2020, 54(2): 33-39.

[17] 张广宇. 生物基硬质聚氨酯泡沫的制备与性能研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2017.

Zhang G Y. Preparation and characterization of bio- based rigid polyurethane foams[D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology, 2017.

[18] 孙赵楠. 生物质基硬质聚氨酯泡沫的制备及改性研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2023.

Sun Z N. Preparation and properties of biomass- based rigid polyurethane foam[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2023.

[19] Domingos I J, Fernandes A P, José F. Polyurethane foams from liquefied eucalyptus globulus branches[J]. BioResources, 2019, 115: 223-229.

[20] 韦冰, 谌凡更, 张晓婷. 玉米秸秆发酵残渣基聚氨酯硬泡的性能研究[J]. 造纸科学与技术, 2014, 33(2): 34-38.

Wei B, Chen F G, Zhang X T. Preparation of rigid polyurethane foam based on fermentation residue of corn stover[J]. Paper Science & Technology, 2014,33(2):34-38.

[21] 侯明月, 李昂, 邹威, 等. 氨基改性碳纳米管的制备及对聚氨酯

泡沫材料的影响[J]. 高分子材料科学与工程, 2016, 32(1): 179-183.

Hou M Y, Li A, Zou W, *et al.* Effect of amino-modified carbon nanotubes on the pore structure of polyurethane foams[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2016, 32(1): 179-183.

[22] Chen F F, Wang C Y, Liu X Y, *et al.* Flame-retardant properties of chitin liquefaction- based polyurethane foam[J]. Journal of Polymer Research,2023, 30: 143.

[23] 王新轲, 陈亚洪, 王贵友. 阻燃多元醇的合成及在聚氨酯泡沫中的应用[J]. 高分子材料科学与工程, 2015, 31(6): 27-33.

Wang X K, Chen Y H, Wang G Y. Synthesis of flame retardant polyol and its application in polyurethane foam[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2015, 31(6): 27-33.

[24] Jerzak W. Fly ash as an eco-friendly filler for rigid polyurethane foams modification[J]. Materials, 2021, 14: 6604.

Preparation and Optimization of Coconut-Based Polyurethane Foam

Tongtong Zhang[1,2], Yingjiao Li [1,2], Jihui Li[1,2], Chang Lin[1,2], Hui Song [1,2], Wenrong Xu[1,2], Yucang Zhang[3], Shuying Xu[1,2]

(*1.School of Chemistry and Chemical Engineering, Hainan University, Haikou 570228, China; 2. Key Laboratory of Solid Waste Resource Utilization and Environmental Protection of Haikou City, Hainan University, Haikou 570228, China; 3. College of Ocean Food and Biological Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China)*

ABSRTACT: Microwave-assisted liquefaction technology was used to liquefy coconut fiber to obtain liquefied substance. Using liquefied substance as raw material, triethylene diamine (TEDA) and tin isocrylate (TECH) as composite catalyst, water as foaming agent, and polyphenylmethanepolyisocyanate were used to synthesize rigid polyurethane foam (PURF) by one-step reaction. The optimum preparation conditions are as follows, the mass ratio of TEDA and TECH as catalyst is 4:5, catalyst mass fraction is 5%, foam stabilizer M-8818 mass fraction is 2.5%, foaming agent mass fraction is 2%. The compression strength of PURF prepared under these conditions is 223 kPa, which is superior to most biobased PURF. The liquefaction, liquefaction agent and PURF were characterized by Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR), and the foam pores were observed by scanning electron microscopy (SEM). The results show that most of foam pores are obturator, and no isocyanate group is left in the system. A cone calorimeter was used to analyze the combustion behavior of the optimal PURF, and the maximum heat release rate (HRR) is 250.6 kW/m^2.

Keywords: coconut fiber; liquefy; polyurethane foam; compressive strength