

发泡剂用量对聚氨酯吸水海绵性能的影响

张均¹, 李满霞², 姚明^{3*}, 姜志国¹

(1.北京化工大学高新技术研究院, 北京 100029; 2.金能化学(青岛)有限公司, 山东 青岛 266400;
3.北京化工大学材料科学与工程学院, 北京 100029)

摘要:以水为单一发泡剂制备了系列聚氨酯吸水海绵,研究了发泡剂用量对聚氨酯吸水海绵性能的影响。结果表明,随着发泡剂用量的增加,聚氨酯吸水海绵的软段玻璃化温度逐渐升高;相对于100份多元醇,发泡剂用量为1.05~1.20份时,聚氨酯吸水海绵泡孔结构均匀、无明显缺陷,密度为55.6~62.4 kg/m³;发泡剂用量为1.20份时,聚氨酯吸水海绵拉伸强度和断裂伸长率均最大,分别为351 kPa和372%;聚氨酯吸水海绵具有良好的吸水性能,平衡吸水率均大于500%。

关键词:聚氨酯;吸水海绵;发泡剂;用量;拉伸强度

中图分类号:TQ328.3

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2024)12-0188-04

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2024.12.034

Effect of foaming agent dosage on properties of polyurethane absorbent sponge

ZHANG Jun¹, LI Man-xia², YAO Ming^{3*}, JIANG Zhi-guo¹

(1.High-Tech Research Institute, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China;

2.JINNENG Chemical (Qingdao) Co., Ltd., Qingdao 266400, China;

3.College of Materials Science and Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract:A series of polyurethane (PU) absorbent sponge are prepared through using water as the sole foaming agent. The influence of foaming agent dosage on the properties of PU absorbent sponge is studied. It is shown that the glass transition temperature of the soft segment of the sponge increases gradually with the increasing dosage of foaming agent. As the ratio of polyol to foaming agent is 100:1.05-1.20, the prepared PU absorbent sponge has a uniform pore structure, without obvious defect and with a density of 55.6-62.4 kg·m⁻³. As the ratio is 100:1.20, the prepared PU absorbent sponge has the maximum tensile strength and elongation at break, which are 351 kPa and 372%, respectively. PU absorbent sponge exhibits a good water-absorbing property and its equilibrium water absorbing rate exceeds 500%.

Key words: polyurethane; absorbent sponge; foaming agent; dosage; tensile strength

聚氨酯吸水海绵在医用辅料^[1]、清洁用品^[2]、污水处理^[3]等领域受到广泛关注,可通过在分子结构中引入亲水基团的方式制备得到。叶丞等^[4]引入自制反应型亲水剂制备了拉伸强度为107~131 kPa、吸水率为51%~105%的聚氨酯吸水海绵。高宏飞^[5]引入自制亲水性聚醚多元醇制备了拉伸强度为147 kPa、吸水率为3500%的聚氨酯吸水海绵。谢贵堂等^[6]引入聚乙二醇制备了拉伸强度大于500 kPa、吸水率大于1000%的聚氨酯吸水海绵。

水作为环保化学发泡剂在聚氨酯海绵制备过程中广泛被使用,其用量对海绵泡孔形态和力学性能有着重要的影响^[7-8]。笔者以水为单一发泡剂、环氧乙烷质量分数大于70%的三官能度聚醚多元醇为主要软段结构制备了系列聚氨酯吸水海绵,考察了发泡剂用量对聚氨酯吸水海绵分子结构、玻璃化转变温度、微观结构、密度、力学性能和吸水性

能的影响。

1 实验部分

1.1 原料与设备

1.1.1 实验原料

异氰酸酯预聚物 YZ-M21(NCO%=21.1%),工业级,一臻(固安)新材料科技有限公司生产;聚醚多元醇 CHK-3602,工业级,长华化学科技股份有限公司生产;聚四氢呋喃聚醚 PTMG2000、聚合物多元醇 POP-3628,工业级,山东蓝星东大有限公司生产;亲水剂 GSY-2510,工业级,东莞市广思远聚氨酯材料有限公司生产;开孔剂 M9955,工业级,江苏美思德化学股份有限公司生产;二甲基甲苯二胺(E100),工业级,东营海瑞宝新材料有限公司生产;33%三乙烯二胺溶液(A33),工业级,北京北化工程技术有限公司生产;辛酸亚锡(T9),工业级,阿拉丁

收稿日期:2024-03-07;修回日期:2024-10-14

作者简介:张均(1982-),男,博士,副研究员,研究方向为聚氨酯材料应用,zhangjun413@buct.edu.cn;姚明(1996-),女,博士,副教授,研究方向为聚合物合成改性及特种聚氨酯的制备,通讯联系人,yaoming@buct.edu.cn。

试剂有限公司生产;纯净水,自制。

1.1.2 实验设备

万能材料试验机(CREE-8003A),东莞市科锐仪器科技有限公司生产;傅里叶红外光谱仪(Nicolet iS20),美国赛默飞世尔科技生产;差示扫描量热仪(DSC1),梅特勒托利多生产;生物显微镜(B1-223),Motic实业集团有限公司生产;电子天平(AL204),梅特勒托利多生产;电子天平(UTP-313),上海花潮实业有限公司生产;增力电动搅拌机(DJ1C-120),常州市金坛友联仪器研究所生产;电热鼓风干燥箱(DHG-9023A),上海一恒科学仪器有限公司生产;数显游标卡尺(0~150 mm),桂林广陆数字测控有限公司生产。

1.2 样品制备

聚氨酯吸水海绵由A组分与B组分快速混合发泡得到,其中,A组分为YZ-M21;B组分为多元醇、发泡剂、扩链剂、催化剂和发泡助剂的混合物。首先,在纸杯中加入80份CHK-3602、10份POP-3628和10份PTMG2000,然后继续加入5份GSY-2510、2.5份M9955、1.5份E100、0.4份A33、0.075份T9和一定量的水,在1000~1200 r/min条件下搅拌均匀。然后定量加入YZ-M21,控制异氰酸酯指数(R 值)为1.07~1.08,快速搅拌至开始起泡时停止搅拌,自由发泡完成后室温放置7 d进行测试。相对于100份多元醇,水加入量分别为0.9份、1.05份、1.2份和1.35份,对应聚氨酯吸水泡沫的编号分别为S1、S2、S3和S4。

1.3 性能测试

1.3.1 红外光谱分析

采用衰减全反射法进行XRD测试,扫描范围500~4000 cm^{-1} ,扫描次数32次,分辨率4 cm^{-1} 。

1.3.2 DSC测试

通过DSC1型差示扫描量热仪进行DSC测试, N_2 气氛,测试温度-70~150 $^{\circ}\text{C}$,升温速率20 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。玻璃化转变温度通过等距法处理得到。

1.3.3 密度

按照GB/T6343—2009中所述方法进行密度测试,测试5次取平均值。

1.3.4 微观形貌

将2 mm厚样品置于载玻片上,通过B1-223生物显微镜放大20倍观察样品的微观形貌。

1.3.5 力学性能

按照GB/T 6344—2008中所述方法进行力学性能测试,拉伸速度为50 mm/min。

1.3.6 吸水性能

按照GB/T 1034—2008中所述方法进行吸水性能测试,泡沫尺寸为20.0 mm×20.0 mm×2.0 mm。测试前在100 $^{\circ}\text{C}$ 烘干至恒重 m_0 ,在去离子水中浸泡时间 t 取出,吸干表面水分称重 m_t ,则吸水率 W_t 计算式为:

$$W_t = [(m_t - m_0)/m_0] \times 100\% \quad (1)$$

聚氨酯吸水海绵的吸水溶胀过程通过Schott动力学模型来描述^[7],其表达式为:

$$dW_t/dt = K(W_{\infty} - W_t)^2 \quad (2)$$

其中: K 为溶胀速率常数; W_{∞} 为理论平衡吸水率。将式(2)进行积分整理可得:

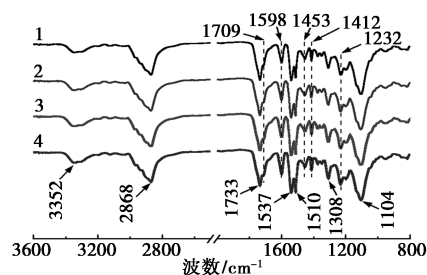
$$t/W_t = 1/(KW_{\infty}^2) + t/W_{\infty} \quad (3)$$

以 t/W_t 为纵坐标、 t 为横坐标作图,然后进行线性拟合,根据直线斜率和截距可以得到 W_{∞} 和 K 。

2 结果与讨论

2.1 红外光谱分析

聚氨酯吸水海绵的红外谱图如图1所示。



1—S1;2—S2;3—S3;4—S4

图1 聚氨酯吸水海绵的红外谱图

由图1中可以看出,不同发泡剂用量条件下制备的聚氨酯吸水海绵的红外谱图具有相同的吸收峰位置和基本的吸收峰强度,表现出了聚氨酯材料典型的红外吸收特征^[10-13],图中标注的主要吸收峰位置对应的红外吸收基团及其振动形式如表1所示。1709 cm^{-1} 处氢键化C=O吸收峰的出现,表明聚氨酯吸水海绵内部存在微相分离结构^[14]。

表1 聚氨酯吸水海绵特征吸收峰对应基团及其振动形式

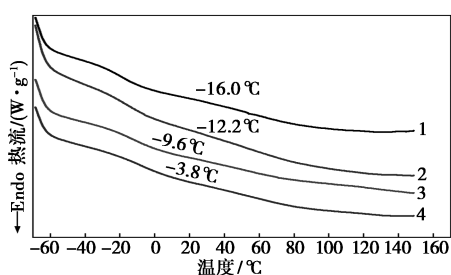
波数/ cm^{-1}	基团	振动形式
3352	N—H	伸缩振动
2868	C—H	对称伸缩振动
1733	自由C=O	伸缩振动
1709	氢键化C=O	伸缩振动
1598	C=C	伸缩振动
1537	N—H	弯曲振动

续表

波数/cm ⁻¹	基团	振动形式
1510	C—N—C	伸缩振动
1453	C—H	剪式振动
1412	C—H	非对称变形振动
1308	C—H	对称变形振动
1232	N—H/C—N	变形/伸缩振动
1104	C—O—C	非对称伸缩振动

2.2 发泡剂用量对玻璃化转变温度的影响

聚氨酯吸水海绵 DSC 曲线如图 2 所示。



1—S1; 2—S2; 3—S3; 4—S4

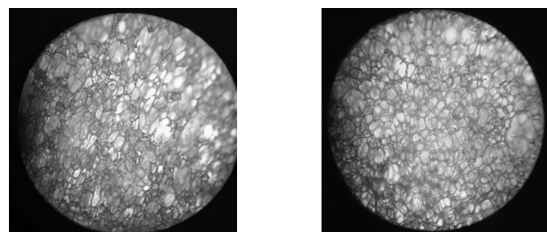
图 2 聚氨酯吸水海绵的 DSC 曲线

由图 2 可以看出,聚氨酯吸水海绵 DSC 曲线存在一个吸热方向的玻璃化转变台阶,对应聚氨酯吸水海绵软段玻璃化温度。随着发泡剂用量的增加,聚氨酯吸水海绵软段玻璃化转变温度逐渐升高;相对于 S1 的玻璃化转变温度,S4 的玻璃化转变温度升高了 12.2℃。当发泡剂用量由 0.90 份增加至 1.35 份时,聚氨酯吸水海绵的硬段含量由 25.8% 增加至 30.7%,脲键硬段微区体积增大,且易出现更多的缩二脲交联结构^[15]。硬段物理交联点和化学交联点的增加限制了软段分子链的运动,从而导致软段玻璃化转变温度升高。

2.3 发泡剂用量对微观形貌的影响

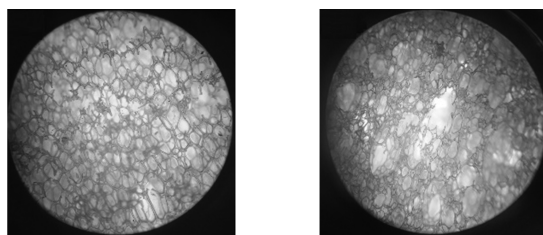
不同发泡剂用量情况下所得聚氨酯吸水海绵的微观形貌如图 3 所示。

由图 3 中可以看出,S2 和 S3 泡孔完整、经络清晰,没有明显的塌泡并泡现象;S1 泡孔存在少量缺



(a) S1

(b) S2



(c) S3

(d) S4

图 3 聚氨酯吸水海绵微观形貌

陷,且经络走向不清晰;S4 泡孔缺陷多于 S1,塌泡并泡明显。聚氨酯泡沫制备过程中涉及发气反应和凝胶反应,在其他原料用量和发泡工艺相同的条件下,发泡剂用量的变化影响发气反应和凝胶反应的平衡^[16],从聚氨酯吸水海绵微观结构可知,在本实验条件下,发泡剂用量为 1.05~1.2 份时,发气反应和凝胶反应平衡较好。

2.4 发泡剂用量对密度的影响

不同发泡剂用量所得聚氨酯吸水海绵的密度如表 2 所示。

表 2 聚氨酯吸水海绵的密度

发泡剂用量/份	密度/(kg·m ⁻³)	发泡剂用量/份	密度/(kg·m ⁻³)
0.90	66.0±3.8	1.20	62.4±1.8
1.05	55.6±4.6	1.35	72.9±3.5

由表 2 中可以看出,随着发泡剂用量的增加,聚氨酯吸水海绵的密度先减小后增大,发泡剂用量由 1.05 份增大至 1.35 份时,泡沫密度增大了 31.1%。发气反应速率与凝胶反应速率共同影响泡孔的形成。在 R 值相同的条件下,随着发泡剂用量的增加,异氰酸酯用量也相应增加,导致反应体系中产生的 CO₂ 气体量增多,同时物料黏度增长速度变缓^[7],当包裹 CO₂ 气体的聚合物膜不能束缚住 CO₂ 气体时,CO₂ 气体逸出形成开孔,若此时泡孔经络强度足够,可以承受物料所受重力,则可以形成稳定的泡孔结构,否则会发生塌泡,导致泡沫密度增加。

2.5 发泡剂用量对力学性能的影响

聚氨酯吸水海绵的力学性能和密度如表 3 所示。

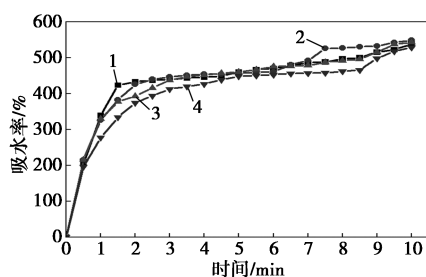
表 3 聚氨酯吸水海绵的力学性能和密度

发泡剂用量/份	拉伸强度/kPa	断裂伸长率/%
0.90	327±13	305±6
1.05	314±11	366±8
1.20	351±12	372±7
1.35	294±9	336±8

由表 3 可知,随着发泡剂用量的增加,聚氨酯吸水海绵拉伸强度和断裂伸长率整体呈现先增加后减小的变化趋势,当发泡剂用量为 1.20 份时,聚氨酯吸水海绵的拉伸强度和断裂伸长率均为最大值。聚氨酯泡沫力学性能受多方面因素的影响^[6,17],在本实验条件下,发泡剂用量增加导致硬段含量增加,增大了聚氨酯分子链间的氢键强度和交联程度,有利于提高聚氨酯吸水海绵的力学性能。然而,当发泡剂用量由 1.20 份增加至 1.35 份时,聚氨酯吸水海绵内部可以观察到明显塌泡现象,内部缺陷导致泡沫拉伸强度和断裂伸长率分别下降了 16.2% 和 9.7%。

2.6 发泡剂用量对吸水性能的影响

聚氨酯吸水海绵吸水率曲线如图 4 所示。



1—S1; 2—S2; 3—S3; 4—S4

图 4 聚氨酯吸水海绵吸水率曲线

由图 4 中可以看出,不同发泡剂用量所得聚氨酯吸水海绵的吸水率在浸水时间为 1~2 min 时迅速增大;浸水时间大于 2 min 时,吸水率增长缓慢,曲线进入平台区;当浸水时间大于 7~8 min 时,吸水率又略微增大。在浸水时间为 10 min 时,发泡剂用量为 0.90、1.05、1.20 份和 1.35 份时对应的吸水率分别为 537.9%、548.6%、542.5% 和 528.7%。可见,随着发泡剂用量的增加,聚氨酯吸水海绵吸水率呈现先增加后减小的变化规律,最小值为最大值的 96.4%,表明所制备的聚氨酯吸水海绵具有良好的吸水性能,且吸水率受发泡剂用量的影响相对较小。

Schott 溶胀动力学参数如表 4 所示。

表 4 亲水聚氨酯泡沫 Schott 溶胀动力学参数

编号	$W_{\infty}/\%$	K/min^{-1}	R^2
S1	552.5	2.26×10^{-3}	0.9943
S2	581.4	1.71×10^{-3}	0.9941
S3	561.8	1.94×10^{-3}	0.9935
S4	546.4	1.74×10^{-3}	0.9904

从表 4 中可以看出,线性拟合相关系数 R^2 均大

于 0.99,表明 Schott 动力学模型可以描述聚氨酯吸水海绵吸水溶胀过程;随发泡剂用量的增加,溶胀速率常数整体呈减小趋势,理论平衡吸水率与实测最大吸水率的变化趋势相同,且实测最大吸水率分别为对应理论平衡吸水率的 97.4%、94.4%、96.6% 和 96.8%。

3 结论

(1) 在本实验条件下,所制备的聚氨酯吸水海绵具有典型的聚氨酯材料的红外吸收特征;其软段玻璃化转变温度随着发泡剂用量的增加,由 -16.0°C 升高至 -3.8°C 。

(2) 当发泡剂用量为 1.05~1.20 份时,所得聚氨酯吸水海绵泡孔结构均匀、完整、经络清晰、无明显缺陷,泡沫密度为 $55.6\sim 62.4\text{ kg/m}^3$ 。

(3) 当发泡剂用量为 1.20 份时,聚氨酯吸水海绵拉伸强度和断裂伸长率均为最大值,分别为 351 kPa 和 372%;聚氨酯吸水海绵具有良好的吸水性能,浸水 10 min 时的吸水率均大于 500%。

参考文献

- [1] Chen Shangliang, Li Shuangyang, Ye Zhanpeng, *et al.* Superhydrophobic and superhydrophilic polyurethane sponge for wound healing [J]. 2022, 446: 136985.
- [2] 俞绿绿, 吴亚清, 陈和根, 等. 一种聚氨酯化妆海绵的合成 [J]. 化学推进剂与高分子材料, 2020, 18(5): 59-62.
- [3] Thays Franca Afonso, Carolina Faccio Demarco, Guilherme Pereira Schoeler, *et al.* Polyurethane foams incorporated with different fillers to remove SARS-CoV-2 from water [J]. Journal of Water Process Engineering, 2023, 54: 104000.
- [4] 叶丞, 汤振英, 张聪丽. 亲水聚氨酯海绵的制备研究 [J]. 聚氨酯工业, 2021, 36(4): 32-34.
- [5] 高宏飞. 亲水性聚醚的合成及其在亲水聚氨酯软泡中的应用 [J]. 聚氨酯工业, 2022, 37(3): 30-32.
- [6] 谢贵堂, 范开元, 张化哲, 等. 异氰酸酯指数对聚乙二醇基聚氨酯泡沫性能的影响 [J]. 化工新型材料, 2022, 50(3): 185-188.
- [7] 陈涛, 杜海晶, 米岩, 等. 水用量对全水发泡聚氨酯泡沫形态和力学性能的影响 [J]. 高分子材料科学与工程, 2012, 28(7): 67-71.
- [8] 李帅, 张均, 何成汉, 等. 发泡剂对形状记忆聚氨酯泡沫性能的影响 [J]. 化工新型材料, 2019, 47(9): 249-252.
- [9] Mihaela Mandru, Maria Bercea, Luiza Madalina Gradinaru, *et al.* Polyurethane/poly(vinyl alcohol) hydrogels: Preparation, characterization and drug delivery [J]. European Polymer Journal, 2019, 118: 137-145.

(下转第 198 页)

- 剂的制备与性能[J].现代化工,2019,39(12):72-75.
- [8] Shi Z, Su Q, Ying T, *et al.* Ionic liquids with multiple active sites supported by SBA-15 for catalyzing conversion of CO₂ into cyclic carbonates[J]. *Journal of CO₂ Utilization*, 2020, 39: 101162.
- [9] Xiong B, Yang Y, Liu J, *et al.* Electrochemical conversion of CO₂ to syngas over Cu-M (M=Cd, Zn, Ni, Ag, and Pd) bimetal catalysts[J]. *Fuel*, 2021, 304: 121341.
- [10] Deng D, Qian J, Liu X, *et al.* Non-Covalent interaction of atomically dispersed Cu and Zn pair sites for efficient oxygen reduction reaction [J]. *Advanced Functional Materials*, 2022, 32 (32): 2203471.
- [11] Dai C, Zhu Q, Pang H, *et al.* Rapid copolymerization of carbon dioxide and propylene oxide catalyzed by double metal cyanide complexes in an ultrasonic field[J]. *Materials Letters*, 2016, 180: 89-92.
- [12] Liu N, Du J, Xu J, *et al.* Efficient synthesis of cyclic carbonate via transformation of CO₂ catalyzed by solid-base bifunctional graphitic carbon nitride materials[J]. *Research on Chemical Intermediates*, 2022, 48(12):4883-4900.
- [13] Gao J, Yue C, Wang H, *et al.* CeO₂-ZrO₂ solid solution catalyzed and moderate acidic-basic sites dominated cycloaddition of CO₂ with epoxides: Halogen-free synthesis of cyclic carbonates[J]. *Catalysts*, 2022, 12(6):632.
- [14] Zhong S, Liang L, Liu M, *et al.* DMF and mesoporous Zn/SBA-15 as synergistic catalysts for the cycloaddition of CO₂ to propylene oxide [J]. *Journal of CO₂ Utilization*, 2015, 9:58-65.
- [15] Kunal N, Vasista V, Shanbhag G V. Identification and tuning of active sites in selected mixed metal oxide catalysts for cyclic carbonate synthesis from epoxides and CO₂[J]. *Journal of CO₂ Utilization*, 2019, 33:434-444.
- [16] Liu N, Wu F, Xu J, *et al.* ZrO₂ supported on graphitic carbon nitride based on metal-nitrogen interaction for enhanced catalytic cycloaddition of CO₂ to cyclic carbonates[J]. *Catalysis Letters*, 2023, 153(5):1483-1494.
- [17] 张斌,陈晓亚,罗聪颖,等.磁性氧化镁催化尿素与1,2-丙二醇合成碳酸丙烯酯的研究[J].现代化工,2017,37(7):91-95.
- [18] Guo B, Liu J, Tang S, *et al.* Hydrolysis of dimethyl terephthalate to terephthalic acid on Nb-modified HZSM-5 zeolite catalysts [J]. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 2022, 97(7): 1695-1704.
- [19] 马北冰,李晓雪,牛晓坡,等.多级孔 ZSM-5 负载 PtNi 催化木质素衍生物选择性加氢脱氧制备环烷烃的研究[J].现代化工,2022,42(7):213-218,223.
- [20] Pei F, Wang Z, Lv J, *et al.* Efficient catalytic transfer hydrogenation of acetophenone to 1-phenylethanol over Cu-Zn-Al catalysts[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2022, 61(16):5419-5428.
- [21] Shao X, He J, Su Q, *et al.* Synergy effect of CuO on CuCo₂O₄ for methane catalytic combustion[J]. *RSC Advances*, 2022, 12(27):17490-17497.
- [22] Zhang D, Xu T, Li C, *et al.* Synthesis of carbon fibers support graphitic carbon nitride immobilize ZnBr₂ catalyst in the catalytic reaction between styrene oxide and CO₂[J]. *Journal of CO₂ Utilization*, 2019, 34:716-724.
- [23] Suib S L, Liu J, Wang F, *et al.* Aerobic oxidation of alcohols over Ru-Mn-Ce and Ru-Co-Ce catalysts; The effect of calcination temperature[J]. *Applied Catalysis A: General*, 2017, 535:77-84.
- [24] Tang S, Li F, Liu J, *et al.* MgO/NaY as modified mesoporous catalyst for methanolysis of polyethylene terephthalate wastes [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2022, 10(4):107927.
- [25] Jokar F, Alavi S M, Rezaei M. Investigating the hydroisomerization of n-pentane using Pt supported on ZSM-5, desilicated ZSM-5, and modified ZSM-5/MCM-41 [J]. *Fuel*, 2022, 324:124511.
- [26] Wang J Q, Kong D L, Chen J Y, *et al.* Synthesis of cyclic carbonates from epoxides and carbon dioxide over silica-supported quaternary ammonium salts under supercritical conditions[J]. *Journal of Molecular Catalysis A-Chemical*, 2006, 249(1):143-148.
- [27] Meunier F C, Domokos L, Seshan K, *et al.* In situ IR study of the nature and mobility of sorbed species on H-FER during But-1-ene isomerization[J]. *Journal of Catalysis*, 2002, 211(2):366-378.
- [28] 张广宇,赵健,孙峰,等.CO₂催化转化制碳酸丙烯酯研究进展:催化剂设计、性能与反应机理[J].化工进展,2022,41(S1):177-189.
- [29] Mihara M, Nakao S, Nakai T, *et al.* Zinc iodide-metal chloride-organic base; An efficient catalytic system for synthesis of cyclic carbonates from carbon dioxide and epoxides under ambient conditions[J]. *Catalysts*, 2023, 13(8):1214. ■
-
- (上接第191页)
- [10] Zhang Jun, Yao Ming, Chen Jianjun, *et al.* Synthesis and properties of polyurethane elastomers based on renewable castor oil polyols [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2019, 136(14):47309.
- [11] Zhang Jinlong, Wu Shanshan, Zhang Kaiting, *et al.* Novel polyurethane viscoelastic foam modified with discarded luffa seed oil in accordance with cleaner production [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 341:130795.
- [12] Przemysław Bartczak, Marcin Wysokowski, Kacper Szylińczuk, *et al.* Green synthesis of chitin/lignin based-polyurethane composites[J]. *Industrial Crops and Products*, 2023, 204:117237.
- [13] Ma Qiulin, Fu Kai, Zhang Jingyang, *et al.* New bio-based polyurethane (PU) foams synthesized using crude glycerol-based biopolyol and humin-based byproducts from biomass hydrolysis[J]. *Industrial Crops and Products*, 2023, 205:117548.
- [14] 赵志颖,江皓,李晓东,等.闭孔率及密度对聚氨酯弹性体泡沫力学性能及吸能性的影响[J].高分子材料科学与工程,2023,39(12):35-44.
- [15] 谢贵堂,李满霞,姚明,等.聚乙二醇基聚氨酯形状记忆泡沫的制备与性能研究[J].现代化工,2023,43(3):187-191.
- [16] 王松.聚氨酯泡沫孔结构控制研究[D].长沙:国防科学技术大学,2003.
- [17] 王维,王冬,东为富.新型疏水聚氨酯硬质泡沫的绿色制备及其性能研究[J].中国塑料,2021,35(4):23-29. ■