

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2026.03.024

大孔氧化铝负载La催化剂的制备及尼龙6解聚性能

房晓东^{1,2}, 张继国², 沈健¹, 谢辉英¹

(1. 泉州职业技术大学能源学院, 福建泉州 362200; 2. 辽宁石油化工大学环境与安全工程学院, 辽宁抚顺 113001)

摘要: 针对尼龙化学回收方法中操作复杂、条件苛刻、腐蚀设备等问题, 本文以大孔氧化铝为载体, 通过饱和浸渍法制备La改性大孔氧化铝催化剂, 考察了负载La大孔氧化铝催化剂(La/Al₂O₃)催化尼龙6解聚的性能。系统研究了催化剂的制备条件以及对尼龙6解聚的性能影响, 采用多种方法对催化剂进行表征, X射线衍射图谱表明La组分在载体表面呈高度分散状态, 比表面积及孔隙度分析表明其介孔-大孔结构得以保持且负载La主要分布于孔道内壁, 未造成孔道堵塞, NH₃-TPD结果显示负载La有效增加了催化剂表面的酸性位点数量。实验结果显示, 在La负载量10%、焙烧温度500℃、焙烧时间5h条件下制备的催化剂, 用于催化尼龙6解聚时, 尼龙6转化率和己内酰胺的产率最高, 分别为70.24%和30.11%。La/Al₂O₃制备条件简单, 在微型反应釜中催化尼龙6解聚时, 不腐蚀设备且反应条件温和, 这为尼龙6化学回收提供了新的借鉴方法。

关键词: 大孔氧化铝; La改性大孔氧化铝; 催化剂; 尼龙6; 解聚

中图分类号: TQ426.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2026)03-0196-07

Preparation of a large-pore alumina catalyst loaded with lanthanum and its depolymerization performance for Nylon 6

FANG Xiaodong^{1,2}, ZHANG Jiguo², SHEN Jian¹, XIE Huiying¹

(1. Faculty of Energy, Quanzhou Vocational and Technical University, Quanzhou 362200, China;

2. Faculty of Environmental and Safety Engineering, Liaoning Petrochemical University, Fushun 113001, China)

Abstract: A large-pore alumina catalyst loaded with lanthanum (La/Al₂O₃) was prepared using macroporous alumina as the support via incipient-wetness impregnation, to address challenges such as operational complexity, harsh conditions, and equipment corrosion in chemical recycling methods for nylon. The preparation conditions of the catalyst and their depolymerization performance for nylon 6 were systematically investigated. The catalysts were characterized using various methods. X-ray diffraction patterns indicate that the La component is highly dispersed on the support surface. Specific surface area and porosity analysis reveals that the meso-macroporous structure is retained, with La primarily distributed on the inner walls of the pores without causing pore blockage. NH₃-TPD results show that the loaded La effectively increases the number of acidic sites on the catalyst surface. Experimental results demonstrate that the catalyst prepared with a La loading of 10%, calcination temperature of 500℃, and calcination time of 5 h achieves the highest nylon 6 conversion rate and caprolactam yield, reaching 70.24% and 30.11%, respectively. The preparation of La/Al₂O₃ is straightforward, and its use in catalyzing nylon 6 depolymerization in a micro-reactor does not cause equipment corrosion under mild reaction conditions, providing a novel reference approach for the chemical recycling of nylon 6.

Keywords: macroporous alumina; La-modified macroporous alumina; catalyst; nylon 6; depolymerization

尼龙6是在主链上含有酰胺键的高聚物, 具有良好的耐磨及抗腐蚀等性能, 在纺织、机械、汽车等领域得到了广泛的应用, 目前是世界上产量和消耗量最大的塑料之一^[1-3]。随着科技发展和经济的快

速增长, 尼龙6制品需求逐渐增加, 随之也会产生大量的废旧尼龙6, 如果不加以处理会影响生态环境^[4-6]。所以, 如何环保可持续的回收废旧尼龙6, 成为社会持续关注的热点问题。

通信作者: 沈健, 硕士, 教授, 研究方向为清洁燃料生产工艺与催化剂

收稿日期: 2026-01-19

引用格式: 房晓东, 张继国, 沈健, 等. 大孔氧化铝负载La催化剂的制备及尼龙6解聚性能[J]. 工程塑料应用, 2026, 54(3): 196-202.

FANG Xiaodong, ZHANG Jiguo, SHEN Jian, et al. Preparation of a large-pore alumina catalyst loaded with lanthanum and its depolymerization performance for Nylon 6[J]. Engineering Plastics Application, 2026, 54(3): 196-202.

回收废旧尼龙6的方法有物理回收和化学回收^[7-9]。化学回收是将废旧尼龙6解聚为单体己内酰胺(CPL),再合成新的尼龙6,是减少环境污染,实现资源循环利用的有效途径^[10-12]。

徐千惠等^[13]使用磷钨酸作为催化剂解聚废旧尼龙6,在温度为280℃时,废旧尼龙6完全解聚,其转化率为100%,CPL收率为84.6%。但是磷钨酸会腐蚀设备,不易于大规模使用。Nemadé等^[14]使用NaOH作为尼龙6解聚催化剂,反应温度250℃,反应时间300 min,体系自生压力4.14 MPa,此时,尼龙6的转化率为59.2%。但是NaOH会腐蚀设备,且解聚处理液相产物较为困难。黄梅等^[15]以离子液体[Bmim][Br]为催化剂,在尼龙6与[Bmim][Br]质量比1:6、水相比1:3、反应温度175℃、反应时间9 h时,尼龙6的转化率为46%,CPL回收率可达24.56%。但离子液体成本较高,具有潜在毒性且难以降解。Huczowski等^[16]选用乙醇酸钠作为催化剂解聚尼龙6,实验结果表明,在反应温度250℃,反应时间16 h,催化剂用量为PA6质量的1%,此时低聚物的总收率可达80.6%。醇解法在反应和分离过程会消耗较多能量,产物处理较为复杂,不易于工业上大规模使用。Mckinney等^[17]对尼龙6与氨气反应进行了研究,以磷酸铵为催化剂,在反应温度350℃,压力6.8 MPa环境下,尼龙6的转化率为51%,最终得到单体CPL及一些低聚物。但氨解法对设备要求较高,大部分反应都伴随着高温高压,实验室操作具有一定的危险性。

通过以上对研究现状的综述可知,目前尼龙6的酸催化解聚、碱催化解聚、醇催化解聚、氨催化解聚和离子液体虽然都能够实现一定的解聚转化率和单体产率,但存在着腐蚀、产物与催化剂分离困难、反应条件苛刻等问题,需要进一步开发更好性能的尼龙6解聚催化剂。本文依据解聚的反应原理,设计了大孔氧化铝负载La解聚催化剂,大孔氧化铝拥有孔径大、渗透性好、物质传输阻力小的特点,作为尼龙解聚的催化剂能够解决反应过程中的扩散问题。由于大孔氧化铝本身的酸性较弱,催化活性较低,因此选择La作为活性组分负载到大孔氧化铝上,增强其活性和选择性,提高尼龙的转化率和CPL的收率,同时能够解决回收尼龙方法中操作复杂、条件苛刻、腐蚀设备等问题,为回收废旧尼龙的工业化应用提供了参考。

1 实验部分

1.1 主要原材料

尼龙6:纯度>99.9%,东莞市君信塑胶有限公司;

大孔氧化铝:纯度>99.9%,天津南化催化剂有限公司;

活性炭、HY分子筛:青岛元科催化剂有限公司;

二氧化硅:青岛融汇吸附材料有限公司;

醋酸铈:分析纯,上海麦克林生化科技股份有限公司;

氧化铝、硝酸铜、硝酸镍、硝酸锌、氯化铁:分析纯,西陇科学股份有限公司。

1.2 主要仪器及设备

微型反应釜:ZN-KC,上海霍桐仪器有限公司;

电子天平:HZK-FA210,华志(福建)电子科技有限公司;

集热式恒温磁力搅拌器:DF-101S,巩义市予华仪器有限责任公司;

马弗炉: SX2-5-12NP,上海一恒科学仪器有限公司;

X射线衍射(XRD)仪: D/Max-2550,日本Rigaku公司;

比表面及孔径分析(BET)仪: 3H-2000PS1,北京贝士德仪器科技公司;

扫描电子显微镜(SEM): SU-8000,日本日立公司;

傅里叶变换红外光谱(FTIR)仪: Nexus 670,美国NICOLET公司;

NH₃程序升温脱附(NH₃-TPD)分析仪: FINESORB-3010,上海复纳科学仪器有限公司。

1.3 样品制备

称取0.45 g醋酸铈溶于20 mL的去离子水中,将所得溶液与2 g大孔氧化铝粉末混合,40℃下搅拌5 h后升温至80℃蒸干,在110℃干燥箱中干燥过夜。使用马弗炉在不同焙烧温度、不同焙烧时间下制备La负载量为10%的La/Al₂O₃,通过分析尼龙6解聚效果得出最佳焙烧温度和焙烧时间。

在同样制备流程和最佳焙烧温度、焙烧时间下,改变制备过程中醋酸铈添加量,使用0.23、0.45、0.68、0.91 g醋酸铈制备负载量分别为5%、10%、15%、20%的La/Al₂O₃,记为5%La/Al₂O₃、10%La/Al₂O₃、15%La/Al₂O₃、20%La/Al₂O₃。在同样制备流

程和焙烧条件下,改变载体,制备La改性的活性炭、HY分子筛、二氧化硅、普通氧化铝;改变活性组分,使用0.76 g硝酸铜、0.99 g硝酸镍、0.91 g硝酸锌、1.44 g氯化铁,分别制备负载量为10%的Cu、Ni、Zn、Fe改性的大孔氧化铝。

1.4 尼龙解聚的操作方法

将10 g尼龙6、30 mL去离子水和0.1 g催化剂放入反应釜中,氮气置换后,开始升温反应,240 °C加热搅拌400 min后,迅速将反应釜放入凉水中冷却至70 °C左右,用0.45 μm的微孔滤膜过滤,滤饼放在80 °C干燥箱中干燥8 h后称重,并计算转化率,高效液相色谱绘制CPL标准液的标准曲线,并计算CPL的产率。尼龙6水解结果可用转化率(D_h)和CPL产率(Y_{CPL})表示,计算公式见式(1)、式(2)。

$$D_h = [(m_0 - m_i) / m_0] \times 100\% \quad (1)$$

$$Y_{CPL} = (m_{CPL} / m_0) \times 100\% \quad (2)$$

式中: m_0 为反应前加入尼龙6的质量; m_i 为尼龙6水解后固相残余物的质量; m_{CPL} 为尼龙6水解后液相产物中CPL的质量。

1.5 实验分析方法

XRD测试:使用XRD仪表征La/Al₂O₃的晶体结构,扫描范围1°~80°,步长为0.02°。

BET测试:将La/Al₂O₃放在150 °C下进行真空脱气处理2 h,之后在液氮保护下进行吸附-脱附性能测试。

NH₃-TPD表征:将La/Al₂O₃预处理1 h(Ar, 550 °C),冷却至30 °C后,在5%的氨气中吸附1 h,之后用氩气在30 mL/min下吹扫2 h以除去物理吸附的氨气,最后以5 °C/min的速率升温至600 °C。

FTIR测试:尼龙6、La/Al₂O₃与KBr质量比为1:100,扫描范围400~4 000 cm⁻¹。

SEM表征:用牙签蘸取少量La/Al₂O₃粉末撒在导电胶上,吹去多余粉末,通过SEM观察催化剂的形貌特征。

EDS表征:将探头插入La/Al₂O₃粉末,设置与待测元素匹配的加速电压后开始采集信号。

2 结果与讨论

2.1 催化剂制备条件的研究

2.1.1 焙烧温度的影响

在La负载量10%、焙烧时间5 h的条件下,改变焙烧温度制备La/Al₂O₃催化剂,研究不同焙烧温度对催化剂的催化尼龙6水解性能的影响,图1为测试结果。

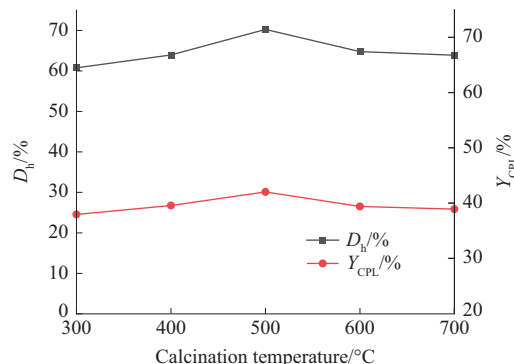


图1 焙烧温度对尼龙6解聚的影响

Fig. 1 Influence of calcination temperature on depolymerization of nylon 6

随着焙烧温度增加, D_h 和 Y_{CPL} 先上升后下降,焙烧温度在500 °C时, D_h 和 Y_{CPL} 最高,分别为70.24%和30.11%。因为在较低的焙烧温度下,醋酸铜没有转化为具有催化活性的氧化物,催化剂上的活性中心少,因此 D_h 和 Y_{CPL} 较低。随着焙烧温度增加, D_h 和 Y_{CPL} 逐渐上升,当焙烧温度为500 °C时, D_h 和 Y_{CPL} 达到最高,因为醋酸铜完全分解为氧化铜,催化剂上的活性中心最多。焙烧温度继续增加, D_h 和 Y_{CPL} 下降,因为较高焙烧温度使得催化剂的骨架结构破坏,催化剂的活性降低。因此,最佳大孔氧化铝的焙烧温度为500 °C。

2.1.2 焙烧时间的影响

固定La负载量为10%、焙烧温度为500 °C,考察焙烧时间对 D_h 和 Y_{CPL} 的影响,结果如图2所示。随着焙烧时间的增加, D_h 和 Y_{CPL} 先增加后保持稳定,当焙烧时间为5 h时, D_h 和 Y_{CPL} 最大,分别为70.24%和30.11%。因为焙烧时间较低,醋酸铜不能完全分解为氧化铜,催化剂的活性中心较少。延长焙烧时间,醋酸铜完全分解为氧化铜,再增加焙烧时间,活性中心不再增加, D_h 和 Y_{CPL} 几乎不变。所以,大孔氧化铝的最佳焙烧时间为5 h。

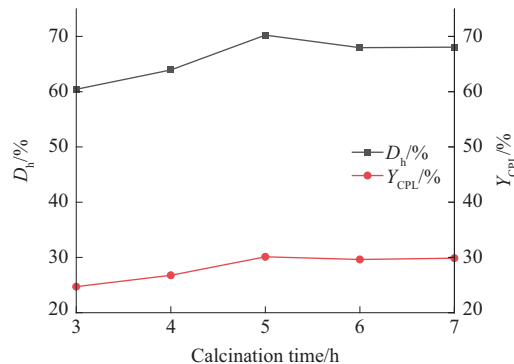


图2 焙烧时间对尼龙6解聚的影响

Fig. 2 Influence of calcination time on the depolymerization of nylon 6

2.2 负载La的大孔氧化铝催化剂的评价

2.2.1 XRD 表征

图3为La/Al₂O₃的小角度XRD图,由图3可知,曲线在 2θ 为 46.24° 、 66.48° 处出现衍射峰,与大孔氧化铝的标准卡片JCPDS No.29-0063一致^[18],是大孔氧化铝的特征峰, $39^\circ\sim 40^\circ$ 之间存在小的肩峰结构,可能是镧在载体表面局部结晶形成的微弱衍射信号。随着La负载量的增加,样品的特征衍射峰强度有不同程度的下降,这是因为La负载量过多,对骨架造成一定程度的破坏。当La负载量为10%时,La特征衍射峰不明显,说明La在大孔氧化铝表面高度分散。La负载量提高到15%时,在 $2\theta=29.46^\circ$ 附近出现了La的特征衍射峰。这是La负载量过大,导致La在大孔氧化铝表面分散不均匀,发生聚集形成金属团簇。

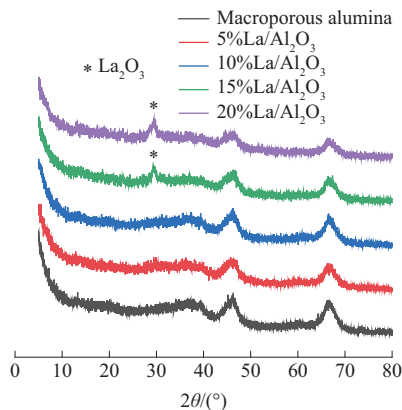


图3 La/Al₂O₃的小角度XRD图

Fig. 3 Small-angle XRD pattern of La/Al₂O₃

2.2.2 N₂吸附-脱附表征

图4为La/Al₂O₃的氮气吸附-脱附等温线,从图4可见,大孔氧化铝在相对压力较低时,吸附等温线缓慢上升,不符合I型等温特征,说明各样品中微孔数量很少。在相对压力为0.02~0.55之间等温线缓

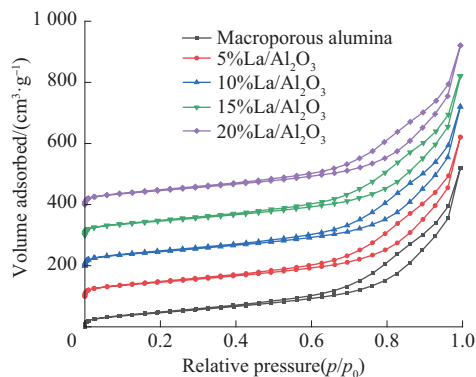


图4 La/Al₂O₃的氮气吸附-脱附等温线

Fig. 4 Nitrogen adsorption-desorption isotherms of La/Al₂O₃

慢增加,N₂在样品孔道表面的吸附从单分子层吸附逐渐向多分子层吸附过渡的过程,在相对压力0.8左右,吸、脱附曲线分离,出现迟滞环,这是样品孔道出现毛细聚集现象,以上现象符合IV型等温线特征^[19],说明各样品有介孔结构。在相对压力大于0.9时,大孔氧化铝、5%La/Al₂O₃、10%La/Al₂O₃样品的等温线持续地上翘,大孔在开阔表面上的吸附层增加,符合II型等温特征,说明存在大孔结构,15%La/Al₂O₃、20%La/Al₂O₃等温线在高压区上翘的幅度明显减弱,说明负载La过多形成团簇将大孔堵塞,与上述XRD分析一致。

La/Al₂O₃的结构参数见表1,可以看出,随着La负载量的增加,La覆盖或堵塞大孔氧化铝的孔道表面,占据了孔内的空间,使得比表面积和孔体积逐渐减小,平均孔径先增大后减少,这是因为负载金属后,部分小孔被堵塞,小孔减少,随负载量的继续增大,金属占据了孔道表面,平均孔径减少。La氧化物聚集在大孔氧化铝表面形成团簇(与XRD表征结果一致)。

表1 La/Al₂O₃的结构参数

Tab. 1 Structural parameters of La/Al₂O₃

Samples	Specific surface area/(m ² ·g ⁻¹)	Pore volume/(cm ³ ·g ⁻¹)	Pore diameter/nm
Macroporous alumina	149.8	0.67	92.83
5%La/Al ₂ O ₃	139.3	0.61	111.63
10%La/Al ₂ O ₃	123.1	0.33	113.06
15%La/Al ₂ O ₃	105.5	0.27	106.84
20%La/Al ₂ O ₃	92.3	0.21	96.32

图5为10%La/Al₂O₃的孔径分布测试结果,由图可知,从孔径分布看,主要为大于50 nm和小于200 nm的大孔,也有部分介孔,与大孔氧化铝相比,负载La后的大孔氧化铝孔分布变化不大,仍具有较多的大孔。

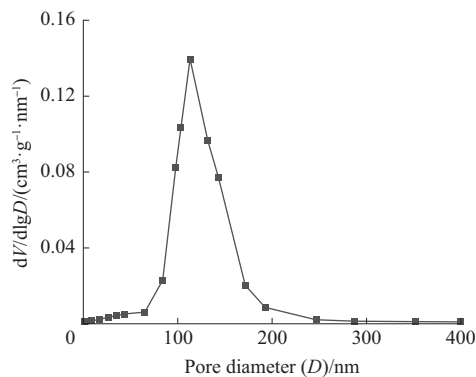


图5 10%La/Al₂O₃的孔径分布曲线

Fig. 5 Pore size distribution curves of 10%La/Al₂O₃

2.2.3 NH_3 -TPD 表征

图6为 $\text{La}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 的 NH_3 -TPD谱图,由图6可知,大孔氧化铝在142℃和406℃处有两个 NH_3 特征峰,表明其具有两种不同的酸中心。小于200℃为弱酸,大于400℃为强酸^[20]。随着La负载量的增加,5% $\text{La}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 、10% $\text{La}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 曲线和大孔氧化铝曲线相比弱酸降低,中强酸增加,总酸量增加,说明La负载到大孔氧化铝上,增加了表面的活性位。继续增加负载量,15% $\text{La}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 、20% $\text{La}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 曲线弱酸增加强酸降低,因为负载量过多La在大孔氧化铝表面聚集形成团簇,覆盖部分酸中心。

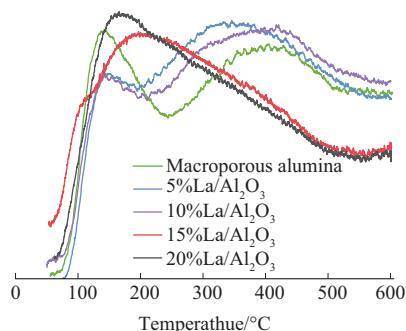


图6 $\text{La}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 的 NH_3 -TPD谱图

Fig. 6 NH_3 -TPD spectra of $\text{La}/\text{Al}_2\text{O}_3$

2.2.4 FTIR 表征

图7为大孔氧化铝和10% $\text{La}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 样品的FTIR谱图,由图可以看出,3 394.1 cm^{-1} 处特征峰为物理吸附水分子之间形成的O—H伸缩振动,1 633.7、1 392.4 cm^{-1} 处特征峰为吸附水分子中O—H的弯曲振动,1 072.9 cm^{-1} 处特征峰为Al—O—H基团的面内弯曲振动,540~790 cm^{-1} 处特征峰为Al—O的弯曲振动^[21]。10% $\text{La}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 样品曲线在400~500 cm^{-1} 处特征峰为La—O振动,说明La已经负载到大孔氧化铝上。

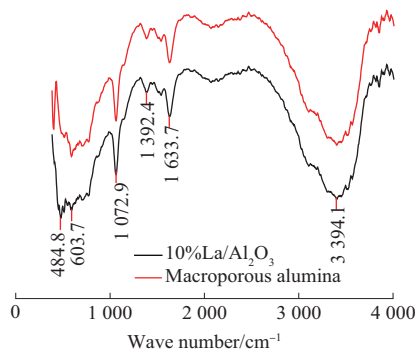


图7 样品的FTIR谱图

Fig. 7 FTIR spectra of samples

2.2.5 SEM 表征

图8a和图8b分别为大孔氧化铝和10% $\text{La}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 的SEM照片。由图可知,氧化镧晶体成小颗粒状负载到大孔氧化铝孔道和表面,且表面形貌几乎没有变化,说明负载La后对大孔氧化铝的形貌和孔结构影响不大。

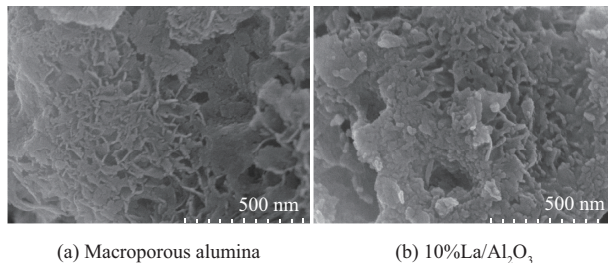


图8 样品的SEM照片

Fig. 8 SEM photos of samples

2.2.6 EDS 表征

图9为EDS获取的10% $\text{La}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 元素面分布图。由图可知在10% $\text{La}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 催化剂中检测到La元素均匀分布,证明La成功负载到大孔氧化铝上。

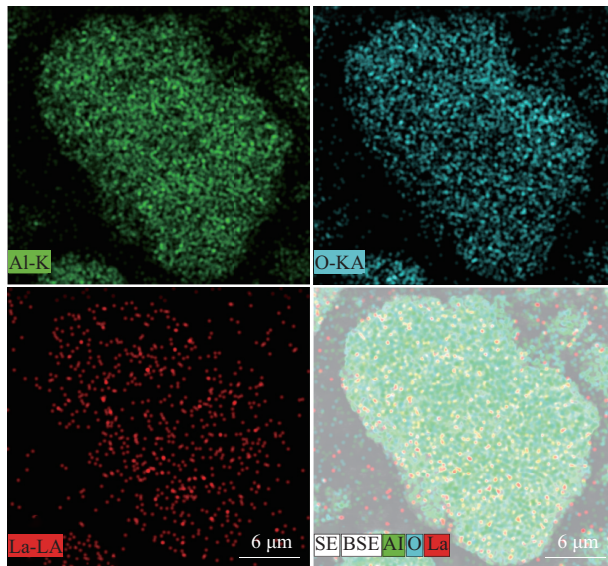


图9 $\text{La}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 的EDS面分布

Fig. 9 EDS mapping of elements in $\text{La}/\text{Al}_2\text{O}_3$

2.3 催化剂解聚性能评价

2.3.1 La负载量对解聚性能的影响

固定焙烧温度为500℃、焙烧时间为5h,考察La负载量对尼龙6转化率及CPL产率的影响,结果如图10所示。

随着La负载量增加,尼龙6的 D_h 和 Y_{CPL} 先增加后减小,当La负载量为10%时, D_h 和 Y_{CPL} 最大,分别为70.24%和30.11%。当La负载量小于10%时,催

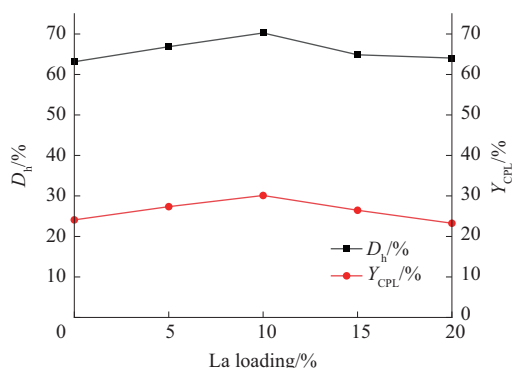


图10 La负载量对尼龙6解聚的影响

Fig. 10 Influence of lanthanum loading on the depolymerization of nylon 6

化剂表面活性位较少,反应速度慢,导致 D_h 和 Y_{CPL} 较低。当La负载量大于10%时,根据表征结果,La在大孔氧化铝表面聚集,堵住了大孔氧化铝的部分孔道,参与催化解聚的活性组分减少,导致 D_h 和 Y_{CPL} 较低。所以,La的最佳负载量为10%。

2.3.2 活性组分对解聚性能的影响

10 g 尼龙6, 30 mL 去离子水, 0.1 g 催化剂, 反应温度 240 °C、反应时间 400 min, 大孔氧化铝负载不同活性组分对 D_h 和 Y_{CPL} 的影响见表2。负载Fe、Ni、Cu的大孔氧化铝催化尼龙6解聚, D_h 和 Y_{CPL} 相差不大,负载La对尼龙6解聚的 D_h 和 Y_{CPL} 最高,说明负载La的大孔氧化铝具有更好的催化性能,充分与大孔氧化铝协同作用。

表2 大孔氧化铝负载不同活性组分对尼龙6解聚的影响

Tab. 2 Influence of different active components supported on macroporous alumina on the depolymerization of nylon 6

Items	La	Fe	Ni	Cu	Zn
D_h	70.24	65.04	64.81	59.54	58.94
Y_{CPL}	30.11	27.41	25.85	25.53	25.08

Notes: D_h is conversion rate; Y_{CPL} is caprolactam yield.

2.3.3 载体对解聚性能的影响

10 g 尼龙6, 30 mL 去离子水, 0.1 g 催化剂, 反应温度 240 °C、反应时间 400 min, 不同载体负载La对 D_h 和 Y_{CPL} 的影响见表3。由表可知,在反应条件下,对比活性炭、SiO₂、HY分子筛、普通Al₂O₃负载La,

表3 不同载体负载La对尼龙6解聚的影响

Tab. 3 Influence of La-loaded on different carriers on the depolymerization of nylon 6

Items	Macroporous alumina	Activated carbon	SiO ₂	HY molecular Sieve	Ordinary Al ₂ O ₃
D_h	70.24	66.74	65.94	65.44	65.04
Y_{CPL}	30.11	28.53	27.11	26.48	24.51

大孔氧化铝负载La对尼龙6解聚的 D_h 和 Y_{CPL} 最高,因为大孔氧化铝孔径大、渗透性好、物质传输阻力小,能够解决尼龙6解聚过程中的扩散问题。

3 结论

(1)以大孔氧化铝为载体,成功制备出La/Al₂O₃尼龙6催化剂,最佳制备条件为La负载量10%,焙烧温度500 °C,焙烧时间5 h。

(2) La/Al₂O₃保留了较好的孔隙结构,降低了扩散阻力,增加酸性,提高了催化活性,在尼龙6的解聚反应中具有较好的催化性能。尼龙6转化率为70.24%,己内酰胺的产率为30.11%,具有良好的应用前景。

参考文献

- [1] 杜祥瑞,丁恒,高彦征.塑料废弃物定向转化为高值化学品研究进展[J].农业环境科学学报,2025,44(3):641–653.
DU Xiangrui, DING Heng, GAO Yanzheng. Research progress on targeted conversion of waste plastic to high-value chemicals[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2025, 44(3):641–653.
- [2] 朱荣,姜立忠.废旧尼龙6回收技术的研究进展[J].工程塑料应用,2024,52(6):187–192.
ZHU Rong, JIANG Lizhong. Research progress in recycling technology of waste nylon 6[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(6):187–192.
- [3] 徐千惠,胡红梅,朱瑞淑,等.废旧尼龙再生技术的研究进展[J].中国材料进展,2022,41(1):14–21.
XU Qianhui, HU Hongmei, ZHU Ruishu, et al. Research progress of waste nylon recycling technology[J]. Materials China, 2022, 41(1):14–21.
- [4] 孙茂银,吴健,吴泽宏,等.选择性激光烧结用尼龙粉体的老化及回收研究进展[J].塑料工业,2021(4):16–20,26.
SUN Maoyin, WU Jian, WU Zehong, et al. Research progress on aging and recovery of nylon powder for selective laser sintering[J]. China Plastics Industry, 2021(4):16–20, 26.
- [5] 李建林,易勇,姜益波,等.聚酰胺树脂废料回收利用[J].塑料工业,2023,51(9):39–46.
LI Jianlin, YI Yong, LOU Yibo, et al. Recycling of polyamide resin waste[J]. China Plastics Industry, 2023, 51(9):39–46.
- [6] 赵微微,张勇,刘志,等.铁路废弃聚酰胺部件回收再生利用[J].中国塑料,2023,37(1):106–111.
ZHAO Weiwei, ZHANG Yong, LIU Zhi, et al. Recycling and reutilization of railway waste polyamide gauge baffles[J]. China Plastics, 2023, 37(1):106–111.
- [7] 吴滚滚,冯美平.废聚酰胺纤维回收利用的研究进展[J].合成纤维工业,2014,37(2):51–55.
WU Gungun, FENG Meiping. Research progress in recycling and utilizing polyamide fiber waste[J]. China Synthetic Fiber Industry, 2014, 37(2):51–55.

- [8] ARDOLINO F, PALLADINI A, ARENA U. Social life cycle assessment of innovative management schemes for challenging plastics waste[J]. *Sustainable Production and Consumption*, 2023, 37:344–355.
- [9] 王祥云.绿色建造过程中资源循环利用的影响因素与协同策略研究[D].北京:北京建筑大学,2017.
WANG Xiangyun. Study on influencing factors and collaborative strategies of resource recycling in the process of green construction [D]. Beijing:Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2017.
- [10] HE F Q, WANG R F, CHEN K. Investigations and prevention strategies on the fracturing water pollution triggering permeability and production decrease in underground gas reservoirs[J]. *Water*, 2022, 14(23). DOI:10.3390/w14233921.
- [11] TENG C Y, ZHOU K G, PENG C H, et al. Characterization and treatment of landfill leachate: A review[J]. *Water Research*, 2021, 203. DOI:https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117525.
- [12] 李汶穗,唐嘉怡,吴娟,等.透明聚酰胺的研究进展[J].上海塑料,2025,53(6):1–7.
LI Wensui, TANG Jiayi, WU Juan, et al. Research progress of transparent polyamide[J]. *Shanghai Plastics*, 2025, 53(6): 1–7. https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117525.
- [13] 徐千惠,胡红梅,朱瑞淑,等.废旧尼龙6纺织品的磷钨酸催化亚临界水解研究[J].东华大学学报(自然科学版),2023,49(4):44–52.
XU Qianhui, HU Hongmei, ZHU Ruishu, et al. Study on phosphotungstic acid catalyzed hydrolysis of waste nylon 6 textiles in subcritical water[J]. *Journal of Donghua University (Natural Science Edition)*, 2023, 49(4):44–52.
- [14] NEMADE A M, ZOPE V S, MISHRA S. Kinetics and thermodynamics of hydrolytic depolymerization of polyamide waste at various temperature and autogenous pressure by high-pressure autoclave[J]. *Journal of Polymers and the Environment*, 2010, 18 (4):459–463.
- [15] 黄梅,胡为阅,宋修艳,等.离子液体催化废旧尼龙6水解反应[J].工业催化,2018,26(9):79–84.
HUANG Mei, HU Weiyue, SONG Xiuyan, et al. Hydrolysis of waste nylon 6 catalyzed by ionic liquid[J]. *Industrial Catalysis*, 2018, 26(9):79–84.
- [16] HUCZKOWSKI P, KAPKO J, OLESIAK R. Degradation of nylon-6 in ethylene glycol[J]. *Polymer*, 1978, 19(1):77–80.
- [17] MCKINNEY RONALD J. AMMONOLYSIS OF NYLON. WO1993US11634[P], 1993-12-07.
- [18] 聂骥,杨彦鹏,李明哲,等.添加醇法制备高比表面积、大孔体积氧化铝[J].石油炼制与化工,2023,54(7):20–25.
NIE Ji, YANG Yanpeng, LI Mingzhe, et al. Preparation of alumina with high specific surface area and large pore volume via alcohol addition[J]. *Petroleum Processing and Petrochemicals*, 2023, 54(7):20–25.
- [19] 李晓春.负载NiMo的氧化铝催化剂在加氢裂化中的应用[J].化学工程,2018,46(6):63–67.
LI Xiaochun. Macroporous NiMo/alumina catalyst for the hydrocracking of vacuum residue[J]. *Chemical Engineering (China)*, 2018, 46(6):63–67.
- [20] 李艳歌,刘羽顺,沈健,等. La-HY-SBA-15催化烷基化催化剂制备[J].高分子通报,2018,31(12):46–54.
LI Yange, LIU Yushun, SHEN Jian, et al. Preparation of La-HY-SBA-15 zeolite for alkylation[J]. *Polymer Bulletin*, 2018, 31(12): 46–54.
- [21] 王巍.亚临界水中废弃铸型尼龙非均相催化降解的研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2017.
WANG Wei. Study on heterogeneous catalytic degradation of waste cast nylon in subcritical water[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.