

改性三聚氰胺脱硝剂制备及脱硝性能研究

张昭军¹, 吴雪莲¹, 刘俊², 王琪^{1*}, 张彬彬², 闫珍²

(1. 合肥工业大学化学与化工学院, 高值催化转化与反应工程安徽省重点实验室, 安徽合肥 230009;
2. 安徽中环环保科技股份有限公司, 安徽合肥 230001)

摘要:以三聚氰胺和六亚甲基二异氰酸酯进行聚合获得了含有链氨基的脱硝剂 PMH。采用红外光谱、元素分析仪、热重分析及程序升温质谱对 PMH 进行了表征,并考察其脱硝性能。结果表明,聚合时间越长,氮含量越接近支化产物,链氨基含量越多,热分解表观活化能越高。热解实验表明,PMH 会先释放出 $-(CH_2)_6NCO$, 然后内部链上酰胺键进一步发生断裂,释放氨及其他小分子产物,且随着聚合时间的延长,其分解速率逐渐降低。PMH 脱硝性能由大到小顺序为 $PMH(8\text{ h}) > PMH(6\text{ h}) > PMH(4\text{ h})$, 脱硝活性与 PMH 的热分解稳定性对应。

关键词:改性三聚氰胺树脂;热稳定性;脱硝性能;氨释放

中图分类号:X511

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2025)08-0209-05

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2025.08.037

Study on preparation and denitration performance of modified melamine denitration agent

ZHANG Zhao-jun¹, WU Xue-lian¹, LIU Jun², WANG Qi^{1*}, ZHANG Bin-bin², YAN Zhen²

(1. Anhui Provincial Key Laboratory of High Value Catalytic Conversion and Reaction Engineering, School of Chemistry and Chemical Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. Anhui Zhonghuan Environmental Protection Technology Co., Ltd., Hefei 230001, China)

Abstract: Poly(melamine-hexamethylene diisocyanate) resin (PMH), which containing chain amino groups, is synthesized through polymerizing melamine and hexamethylene diisocyanate. PMH is characterized by means of infrared spectroscopy, elemental analysis, thermogravimetric analysis (TGA), and temperature-programmed mass spectrometry (TP-MS), and its denitration performance is evaluated. Results show that the longer the polymerization time, the closer the nitrogen content in PMH is to that in the branched product, the higher the content of chain amino groups, and the higher the apparent activation energy of thermal decomposition. Thermal decomposition experiments show that PMH initially releases $-(CH_2)_6NCO$, and then the amide bonds on the chain undergo further cleavage, releasing ammonia and other small molecular products. As the polymerization time extends, the speeds of decomposition and release decline gradually. The denitration performance of PMH follows the following order: $PMH(8\text{ h}) > PMH(6\text{ h}) > PMH(4\text{ h})$. PMH's denitration activity corresponds to its thermal stability.

Key words: modified melamine resin; thermal stability; denitration performance; ammonia release

氮氧化物(NO_x)作为大气的主要产物之一,也是形成酸雨、酸雾的主要污染物,对环境的危害极大^[1-4]。关于 NO_x 的主流脱除方式有两种:选择性非催化还原技术(SNCR)和选择性催化还原技术(SCR)^[5]。SNCR技术使用较为成熟,脱硝剂采用氨水或尿素,但脱硝效率较低,难以满足日益严格的环保要求^[6-8]。SCR脱硝效率虽高,但是由于垃圾焚烧过程中产生的烟气成分复杂,容易导致催化剂中毒失活,限制了其应用^[9-10]。针对SNCR和SCR在垃圾焚烧领域的不足,近年来发展了高分子非催化还原脱硝技术(PNCR)。该技术工艺与SNCR类

似,即将高分子脱硝剂喷入焚烧炉内进行脱硝,具有脱硝效率高、工艺简单、设备改造投资少和脱硝能耗低等优点^[11-12],逐渐在垃圾焚烧等行业得到推广应用。

目前文献仅见少量关于高分子脱硝剂的报道。齐庆民^[13]以一定配比将尿素、三聚氰胺与氧化镁进行混合,再加入有机活性碳粉、碳酸钠、膨润土和生石灰,混合均匀后得到高分子干法脱硝剂,制备的高分子干法脱硝剂不仅在较宽的温度区间内具有较高的脱硝效率,且不存在氨逃逸等副作用及二次污染。姚建等^[14]将高吸水性树脂、尿素、高锰酸钾、三聚氰

收稿日期:2024-11-12;修回日期:2025-06-10

作者简介:张昭军(1996-),男,硕士生,研究方向为工业烟气污染物脱除,1776128249@qq.com;王琪(1978-),男,博士,副教授,研究方向为工业烟气污染物脱除及资源化技术与工业催化,通讯联系人,wangqi@hfut.edu.cn。

胺、氰尿酸、滑石粉作为第一混合物,然后加入一定量的二氧化硅和高岭土,混合均匀后,即可得到所需脱硝剂。该法所制备的脱硝剂成本较低、操作难度不高,并且在不使用催化剂的情况下,具有至少 80% 以上的脱硝效率。文献报道的高分子脱硝剂往往采用高分子材料与含有活泼氨基的物质(如尿素、三聚氰胺)混合而成,并未对氨基进行改性处理,在高温炉内氨基分解过快,产生的氨气易与氧气发生氧化反应,降低了氨基的利用率。

本课题组^[15-16]通过考察具有不同氨基基团的聚丙烯酰胺、琥珀酰亚胺和聚天冬氨酸钾的脱硝性能发现,具有链氨基结构的聚天冬氨酸钾脱硝活性优异,优于端氨基和环氨基的活性。因此对含有端氨基的活性物质进行接枝改性生成链氨基,将可能增加氨基利用率,进一步提升脱硝能力。

考虑到三聚氰胺具有丰富的端氨基基团,可以改性形成丰富的链氨基,有望实现很好的脱硝效果。因此本文以三聚氰胺作为活性氨基的来源,通过六亚甲基二异氰酸酯(HDI)进行改性处理,制备含有大量链氨基的高分子脱硝剂 PMH,并对其热分解过程进行分析,为获得性能优异的高分子脱硝剂提供思路。

1 实验部分

1.1 实验原料

三聚氰胺(Melamine,分析纯)和 HDI(分析纯),购自 Macklin 公司;三乙胺(TEA,分析纯)和 *N,N*-二甲基甲酰胺(DMF,分析纯),购自成都科隆化学品有限公司。

1.2 PMH 的制备

在 N_2 氛围下,向三颈烧瓶中加入适量的 HDI 和 DMF,搅拌并升温至 80°C ,保温 30 min。加入 2 mL 的 TEA 作为催化剂,称取一定量的 Melamine 和 DMF。通过超声使 Melamine 在 DMF 中均匀地分散,形成悬浊液。将分散后的 Melamine 悬浊液滴加到三颈烧瓶中,滴加完毕后反应 4~8 h,冷却至室温,使用热水进行洗涤,抽滤,最后将得到的固体于烘箱中干燥。根据反应时间,将样品分别命名为 PMH-4 h、PMH-6 h 和 PMH-8 h。

1.3 实验方法

1.3.1 红外光谱分析

采用美国 PerkinElmer 公司生产的 PE Spectrum II 型红外光谱仪对样品进行红外表征。将样品称重,与标准 KBr 以 1:200 质量比混合,在研磨均匀后

压片,测量。测量波数为 $4\,000\sim 400\text{ cm}^{-1}$ 。

1.3.2 元素分析仪

采用德国 Elementar Analysensysteme GmbH 生产的 Elementar vario EL cube 型元素分析仪测定脱硝剂的 C、N、O、S 元素含量。

1.3.3 热重分析

采用美国 PerkinElmer 公司生产的 TGA8000 的热重分析仪测定脱硝剂的热稳定性。取 10 mg 样品于坩埚中,实验温度区间 $25\sim 800^\circ\text{C}$,升温速率为 $10^\circ\text{C}/\text{min}$ 。实验中 N_2 作为吹扫气,气体流量为 50 mL/min。

通过热重分析仪测量脱硝剂在不同加热速率(β ,分别为 $5、7、10、15^\circ\text{C}/\text{min}$ 和 $20^\circ\text{C}/\text{min}$)时的热失重曲线,利用 Kissinger 方法来计算样品的热分解活化能^[17],如式(1)所示。

$$-\ln(\beta/T_{\max}^2) = E/(RT_{\max}) - \ln(AR/E) \quad (1)$$

式中: T_{\max} 为最大分解速率所对应的温度, $^\circ\text{C}$; E 为活化能, kJ/mol ; R 为气体常数, $8.314\text{ J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$; A 为指前因子。

1.3.4 程序升温-质谱分析

程序升温-质谱(TP-MS)分析在自制实验装置进行,该装置由微型固定床热解装置、光电离-垂直引入飞行时间质谱仪以及产物传输管道组成。在实验过程中利用热解反应炉对样品进行程序升温加热,温度范围是 $35\sim 700^\circ\text{C}$,升温速率 $10^\circ\text{C}/\text{min}$ 。在打开反应炉的同时,通过光电质谱,对样品分解产生的气态产物进行实时检测。

1.3.5 脱硝性能评价

图 1 为脱硝评价装置示意图。石英管中装有石棉和石英砂,在一定温度下,通入 N_2 和 NO,设定气体总流量 $1\text{ L}/\text{min}$,NO 浓度为 $500\text{ mg}/\text{Nm}^3$,采用德国 MRU 公司 OPTIMA7 烟气分析仪分析 NO 浓度。待烟气分析仪中 NO 含量的读数稳定后,称取 100 mg 脱硝剂加入石英管中与模拟烟气反应,记录 NO 含量的变化。

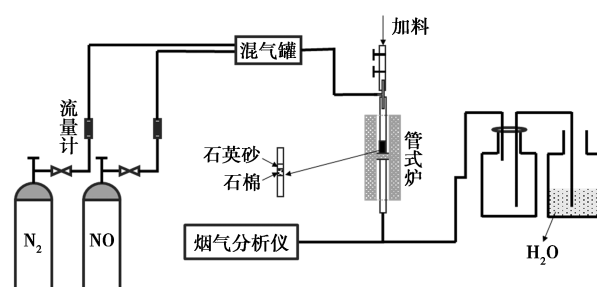


图 1 脱硝性能评价装置示意图

NO 转化率用式(2)计算。

$$\eta = [(\varphi_1 - \varphi_i) / \varphi_1] \times 100\% \quad (2)$$

式中: η 为 NO 转化率,%; φ_1 为 NO 的初始浓度,mg/Nm³; φ_i 为第 i 时刻 NO 浓度,mg/Nm³。

2 结果与讨论

2.1 不同聚合时间 PMH 红外光谱分析

图2为 Melamine 和 HDI 的聚合反应式。可以看到,反应过程中 Melamine 的端氨基(—NH₂)和 HDI 中的异氰酸酯基(—NCO)发生反应,生成脲基(—NH—CO—NH—)。反应中哌嗪的3个氨基分别与 HDI 反应形成如图中结构1、2和3所示的基团。随着反应不断进行,结构3基团增多,PMH 形成超支化结构,且具有大量的链氨基。

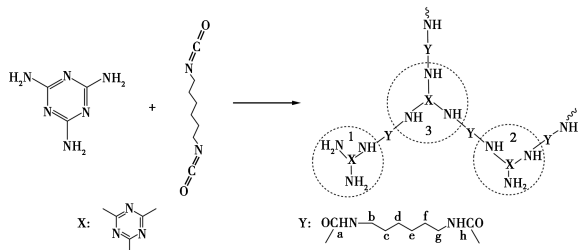
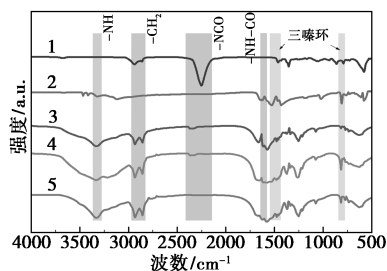


图2 Melamine 和 HDI 聚合生成 PMH 的反应式

对原料和反应产物进行了红外表征,结果如图3所示。在 HDI 的谱图中,2 937 cm⁻¹和 2 858 cm⁻¹处为—CH₂ 的吸收峰,2 278 cm⁻¹处为—NCO 的吸收峰^[18]。对于 Melamine,在 815、1 467、1 529 cm⁻¹出现三嗪环的特征峰,在 3 306 cm⁻¹处出现—NH 特征峰^[19]。在 PMH 的谱图中可以看到,2 278 cm⁻¹处归属于—NCO 的吸收峰明显减弱,在 PMH-4 h 和 PMH-6 h 还能发现微弱的吸收峰,且位移到 2 333 cm⁻¹处,PMH-8 h 谱图中基本未发现—NCO 的吸收峰,说明结构中的—NCO 基本反应完全。同时在 1 650 cm⁻¹出现了新的—NH—CO—的特征峰^[20],进一步证明 Melamine 的—NH₂ 和 HDI 中的—NCO 发



1—HDI;2—Melamine;3—PMH-4 h;4—PMH-6 h;5—PMH-8 h

图3 红外谱图

生了反应,同时 PMH 谱图中还出现—CH₂ 和三嗪环的特征峰,表明成功合成了 PMH。

2.2 不同聚合时间 PMH 元素含量分析

根据图2所示的反应式,聚合后 PMH 可能出现两种极端情况:第1种, Melamine 中只有两个氨基参与聚合反应,在聚合物中间段形成结构2的基团,在聚合物末端形成结构1的基团,在此结构下 PMH 的理论氮元素含量约在 40.62%;第2种, Melamine 中3个氨基全部发生聚合反应,聚合物中间段形成结构3的基团,末端形成结构1的基团,此时理论氮元素含量约在 31.34%。为此,对 PMH 中的元素含量进行了分析,结果如表1所示。

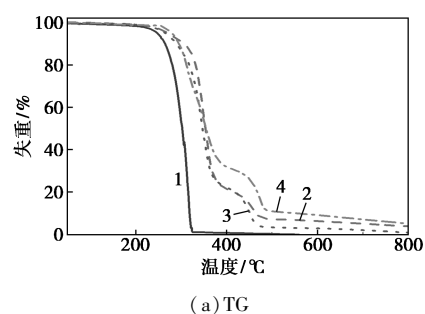
表1 PMH 的元素分析结果

样品	N/%	C/%	H/%
PMH-4 h	33.54	44.97	7.66
PMH-6 h	32.87	45.63	7.65
PMH-8 h	31.27	48.31	7.65

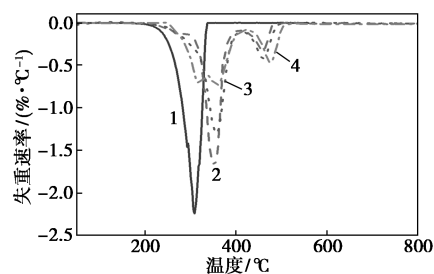
可以看到,随着反应时间的延长,聚合物中的含氮量逐渐减小。当反应时间为 4 h 时,聚合物中的含氮量已经达到 33.54%,此时聚合物中有大量的结构3基团,还有部分结构2的基团,当反应时间进一步延长到 8 h 时,聚合物的含氮量接近第2种情况,说明此时反应比较彻底,聚合物中基本都是结构3基团,此时聚合物中的链氨基含量达到最大。

2.3 不同聚合时间 PMH 热失重分析

图4是 Melamine 和 PMH 的 TG 和 DTG 曲线。



(a) TG



(b) DTG

1—Melamine;2—PMH-4 h;3—PMH-6 h;4—PMH-8 h

图4 Melamine 和 PMH 的 TG 和 DTG 图

从图 4(a)可以看出, Melamide 在 310℃ 左右发生升华, 其热重谱图仅有一个失重过程, 对应其升华过程, 因此 Melamide 难以得到充分的利用。相对于 Melamide, PMH 的热失重温度明显升高, 说明其热稳定性得到提升。从图 4(b)可以看出, PMH 在 300、360℃ 和 460℃ 出现 3 个失重峰。随着反应时间的延长, 300℃ 和 460℃ 的失重峰呈现逐渐增大的趋势, 而 360℃ 的失重峰出现下降趋势。

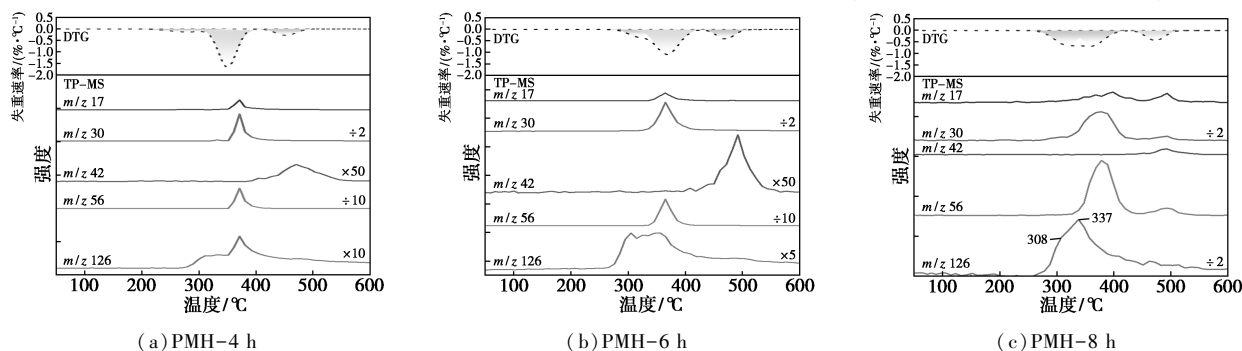


图 5 PMH 的 DTG 曲线以及热解产物随温度的变化趋势

表 2 PMH 的热解基团的释放量

样品	17/ NH ₃	30/ —CH ₂ NH ₂	42/ —NCO	56/ —CH ₂ NCO	126/ —(CH ₂) ₆ NCO
PMH-4 h	370582	2049660	24837	6242410	371516
PMH-6 h	100367	831550	22140	2186500	306922
PMH-8 h	7229	67239	4394	39700	108848

明聚合物热分解过程。

从图 5 可知, 不同聚合时间的 PMH 均是 m/z 为 126 的峰最先分解出来, 这是 PMH 处于末端的 $-(CH_2)_6NCO$ 断链而成, 且随着聚合时间的延长, 相应峰面积减小, 说明端基 $-(CH_2)_6NCO$ 量逐渐减少, 聚合物的聚合度逐渐提高。同时可以看到, m/z 为 126 分解温度范围为 280~420℃, 随着聚合时间的延长, 低温分解信号逐渐增强。这可能是因为前两者的聚合程度相对较差, 在较宽的温度范围内出现 $-(CH_2)_6NCO$ 信号。而 PMH-8 h 的聚合程度好, 高温下断裂时间基本一致, 因此分解温度较为集中。随着温度的进一步提高, 化学键断裂更加容易, m/z 为 17 (NH₃)、30 (CH₂NH₂) 和 56 (CH₂NCO) 的基团开始分解出来。PMH-4 h 和 PMH-6 h 中 m/z 为 17、30 及 56 的峰只在 380℃ 出现, 而 PMH-8 h 除了在 380℃ 有一段分解峰外, 还在 490℃ 处有一段小的分解峰, 这是链氨基含量不同导致的, 因为链氨基相对于端氨基释放会更加缓慢且稳定, 故聚合时间越长分解峰越缓慢而稳定。

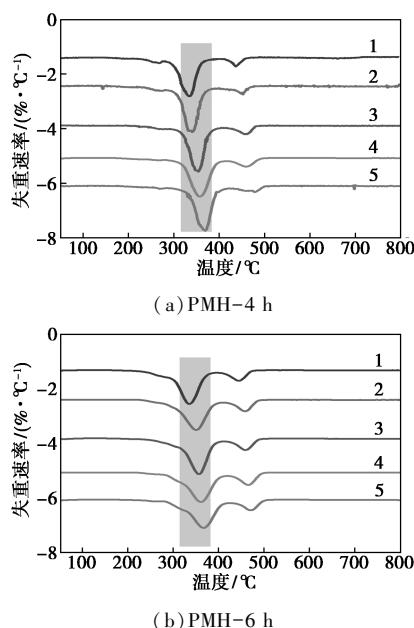
2.4 不同聚合时间 PMH 的 TP-MS 分析

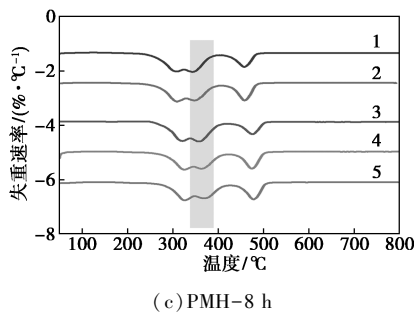
为了进一步明晰失重过程, 对 PMH 进行了 TP-MS 检测。SCR 和 SNCR 常用的脱硝剂在高温下进行脱硝的热解产物主要是含有 $-NH_2$ 和 $-NCO$ 基团的相关产物^[21-24]。图 5 为 TP-MS 检测的不同质荷比 (m/z) 的热解产物随温度的变化趋势图。选取 m/z 为 17、30、42、56 和 126 的热解产物, 对其进行积分处理 (表 2) 并与 DTG 曲线进行对比, 进一步阐

由表 2 可知, 各基团分解峰面积大小顺序为 PMH-4 h > PMH-6 h > PMH-8 h。说明聚合时间较短时, PMH 更易分解。

2.5 不同聚合时间 PMH 热分解活化能研究

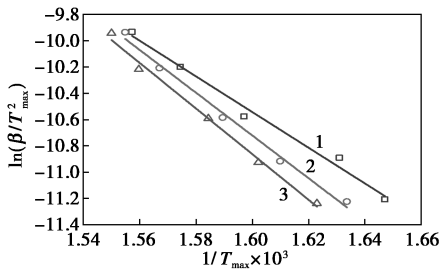
图 6 为 PMH 在 5 种升温速率下的 DTG 曲线。结果表明, 随着升温速率的增加, T_{max} 提高。由 $-\ln(\beta/T_{max}^2)$ 与 $1/T_{max}$ 的线性关系进行相关数据拟合, 结果如图 7 所示, 相关数据见表 3。可以看到, 随着反应时间的延长, 热分解活化能增大, 表明此时聚合物的结构更加完善, 热稳定性更好, 分解的基团释放速度也越慢。





1—5°C/min; 2—7°C/min; 3—10°C/min; 4—15°C/min; 5—20°C/min

图 6 PMH 在不同升温速率下的 DTG 曲线



1—PMH-4 h; 2—PMH-6 h; 3—PMH-8 h

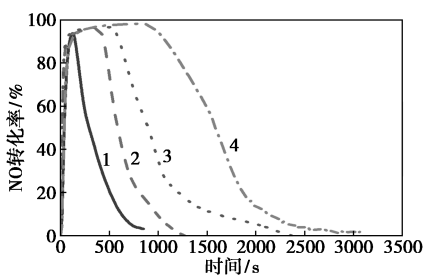
图 7 PMH 热分解活化能拟合曲线

表 3 PMH 的活化能

聚合时间	拟合方程	活化能/(kJ·mol ⁻¹)
4 h	$y = -13.5683x + 11.1656$	112.81
6 h	$y = -16.2627x + 19.2985$	135.21
8 h	$y = -17.0917x + 16.5149$	142.10

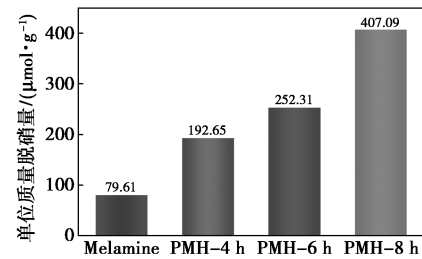
2.6 不同聚合时间 PMH 脱硝性能分析

图 8 为 Melamide 和 PMH 的脱硝效率和脱硝量对比,可以看出 Melamide 的最大脱硝效率约为 93.23%,保持在脱硝效率 80%的时间约为 110 s, PMH-4 h、PMH-6 h 和 PMH-8 h 最大脱硝效率分别在 98.36%、96.65%和 98.21%,保持在脱硝效率 80%的时间约为 613、636 s 和 1 161 s。可以看出 PMH 在高温下的稳定脱硝能力和单位质量脱硝剂的脱硝量都优于 Melamide,因为 Melamide 经过接枝



1—Melamine; 2—PMH-4 h; 3—PMH-6 h; 4—PMH-8 h

(a) 脱硝效率



(b) 单位质量脱硝量

图 8 脱硝性能

改性后,端氨基转化为链氨基,催化剂的热稳定性能得到提升。此外聚合时间的延长会使 PMH 的热稳定性进一步提高,促进了一NCO 与 —NH₂ 的反应,转化为—NHCONH—,使 PMH 高温下缓慢稳定释放脱硝基团,从而增加了活性氨基的相对释放量,故脱硝性能明显提升。

3 结论

通过探讨不同聚合时间 PMH 的热稳定性、热分解活化能及其 TP-MS 与脱硝性能之间的联系,发现延长聚合时间可以增加 PMH 的热稳定性及热分解活化能,热稳定性和热分解活化能的增加可以降低活性氨基的释放速率,TP-MS 实验表明,延长聚合时间可以增加含氨基团的释放量,从而大幅增加脱硝剂的脱硝能力,脱硝效率较好的 PMH-8 h 最大脱硝率达到 98.21%,脱硝量为 0.41 mmol NO/g 脱硝剂,因此优异高分子脱硝剂需要较好的热稳定性和丰富的链氨基含量。

参考文献

- [1] Cai P T, Chen T, Chen B, *et al.* The impact of pollutant emissions from co-incineration of industrial waste in municipal solid waste incinerators[J]. *Fuel*, 2023, 352: 129027.
- [2] 徐梦蝶, 王建芳, 葛璟麟, 等. 生物法烟气脱硝工艺研究进展[J]. *环境工程技术学报*, 2022, 12(6): 2049-2056.
- [3] 刘颖帅, 胡广地, 齐宝华. 固态 SCR 技术降低柴油机尾气 NO_x 的排放[J]. *环境工程学报*, 2021, 15(2): 626-634.
- [4] 张超, 郝敏彤, 孙维, 等. 碳基材料脱硝催化剂的研究进展[J]. *现代化工*, 2022, 42(8): 70-74.
- [5] Yuan B, Qian Z, Zhang Z, *et al.* A critical review on the technique and mechanism of microwave-based denitrification in flue gas[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2022, 120: 144-157.
- [6] Bae S W, Roh S A, Kim S D. NO removal by reducing agents and additives in the selective non-catalytic reduction (SNCR) process[J]. *Chemosphere*, 2006, 65(1): 170-175.
- [7] Chen H, Chen D Z, Fan S, *et al.* SNCR De-NO_x within a moderate temperature range using urea-spiked hydrazine hydrate as reductant[J]. *Chemosphere*, 2016, 161: 208-218.

(下转第 222 页)

- view[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 187: 296–307.
- [6] Siddiqui S I, Allehyani E, Al-Harbi S, *et al.* Investigation of Congo red toxicity towards different living organisms: A review[J]. *Processes*, 2023, 11: 807.
- [7] Chatterjee S, Lee M W, Woo S H. Influence of impregnation of chitosan beads with cetyl trimethyl ammonium bromide on their structure and adsorption of congo red from aqueous solutions[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2009, 155(1): 254–259.
- [8] Moradihamedani P. Recent advances in dye removal from wastewater by membrane technology: A review[J]. *Polymer Bulletin*, 2022, 79(4): 2603–2631.
- [9] Gusain R, Gupta K, Joshi P, *et al.* Adsorptive removal and photocatalytic degradation of organic pollutants using metal oxides and their composites: A comprehensive review[J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2019, 272: 102009.
- [10] Solayman H M, Hossen M A, Aziz A A, *et al.* Performance evaluation of dye wastewater treatment technologies: A review[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2023, 11(3): 109610.
- [11] Liu Q, Xia N, Wan W, *et al.* Selective capture of toxic anionic dyes of a novel prepared DMDAAC-grafted chitosan/genipin/cellulose hydrogel beads with antibacterial activity[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, 189: 722–733.
- [12] 张艳艳, 马启敏, 江志华. 壳聚糖季铵盐的合成及性质研究[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2005(3): 459–462.
- [13] Gopalakrishnan S, Kannan P, Balasubramani K, *et al.* Sustainable remediation of toxic congo red dye pollution using bio based carbon nanocomposite: Modelling and performance evaluation[J]. *Chemosphere*, 2023, 343: 140206.
- [14] Kuang J, Cai T, Dai J, *et al.* High strength chitin/chitosan-based aerogel with 3D hierarchically macro-meso-microporous structure for high-efficiency adsorption of Cu(II) ions and Congo red[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 230: 123238.
- [15] Wang C, Feng X Z, Li W B, *et al.* Fabricating cationic lignin hydrogels for dye adsorption[J]. *Journal of Renewable Materials*, 2023, 11(4): 1793–1805.
- [16] Zhang L, Li Q, Bai X, *et al.* Double network self-healing hydrogels based on carboxyethyl chitosan/oxidized sodium alginate/Ca²⁺: Preparation, characterization and application in dye absorption[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 264: 130564.
- [17] Wu Z, Zhao C, Zeng W, *et al.* Ultra-high selective removal of CR and Cr(VI) from aqueous solutions using polyethyleneimine functionalized magnetic hydrochar: Application strategy and mechanisms insight[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 448: 137464.
- [18] Bhaumik M, Mccrindle R, Maity A. Efficient removal of Congo red from aqueous solutions by adsorption onto interconnected polypyrrole-polyaniline nanofibres[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2013, 228: 506–515.
- [19] Zahir A, Aslam Z, Kamal M S, *et al.* Development of novel cross-linked chitosan for the removal of anionic Congo red dye[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2017, 244: 211–218. ■
- (上接第 213 页)
- [8] 孔丝纺, 彭丹, 程学勤. 垃圾焚烧中 NO_x 的生成及控制技术进展[J]. *资源节约与环保*, 2020, (2): 8–10.
- [9] Zhao J, Wei X, Li T, *et al.* Effect of HCl and CO on nitrogen oxide formation mechanisms within the temperature window of SNCR[J]. *Fuel*, 2020, 267: 117231.
- [10] Javed M T, Irfan N, Gibbs B M. Control of combustion-generated nitrogen oxides by selective non-catalytic reduction[J]. *Journal of Environmental Management*, 2007, 83(3): 251–289.
- [11] 刘天璐, 刚杰, 刘超. 生活垃圾焚烧发电烟气中 NO_x 污染控制技术综述[J]. *资源节约与环保*, 2019, (9): 109–111.
- [12] 高劲豪, 高原. 生活垃圾焚烧烟气脱硝超低排放技术经济比较[J]. *硫酸工业*, 2020, (2): 35–37.
- [13] 齐庆民. 高分子干法脱硝剂及其制备方法及脱硝工艺与脱硝设备: CN 201810088085.1[P]. 2018-06-22.
- [14] 姚建, 姚羽思. 一种脱硝剂、制备方法及干法脱硝方法: CN 201910304326.6[P]. 2019-07-19.
- [15] 许战峰, 刘俊, 闫珍, 等. 酰胺类高分子有机胺热分解及脱硝性能研究[J]. *现代化工*, 2024, 44(6): 181–184, 190.
- [16] 刘俊, 张彬彬, 闫珍, 等. 聚丙烯酰胺热分解与脱硝性能研究[J]. *应用化工*, 2024, 53(5): 1104–1108.
- [17] Xiao H M, Ma X Q, Lai Z Y. Isoconversional kinetic analysis of co-combustion of sewage sludge with straw and coal[J]. *Applied Energy*, 2009, 86(9): 1741–1745.
- [18] Hu J, Chen Z, He Y, *et al.* Synthesis and structure investigation of hexamethylene diisocyanate (HDI)-based polyisocyanates[J]. *Research on Chemical Intermediates*, 2017, 43(5): 2799–2816.
- [19] Wang X, Cao L, Hu Y, *et al.* Highly transparent, hydrophobic, hard and flexible coatings based on a novel melamine-formaldehyde resin synthesized by hydrophobic melamine[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2023, 179: 107487.
- [20] Mariappan T, Zhou Y, Hao J, *et al.* Influence of oxidation state of phosphorus on the thermal and flammability of polyurea and epoxy resin[J]. *European Polymer Journal*, 2013, 49(10): 3171–3180.
- [21] Glarborg P, Miller J A, Ruscic B, *et al.* Modeling nitrogen chemistry in combustion[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2018, 67: 31–68.
- [22] 陈金宝, 罗俊伟, 杨文海, 等. 添加生物油对垃圾焚烧烟气选择性非催化还原脱硝的强化作用及其机理[J]. *环境工程学报*, 2021, 15(11): 3589–3597.
- [23] 李小芝, 张俊丰, 黄妍. 活性粉末脱硝剂制备及其催化还原 NO_x 性能[J]. *环境工程学报*, 2017, 11(8): 4641–4646.
- [24] Zhu Z, Xu B. Purification technologies for NO_x removal from flue gas: A review[J]. *Separations*, 2022, 9(10): 307–334. ■