

引用格式:刘洋,王美燕,赵素素,等.改性超支化聚酯抑尘剂的合成及其性能[J].山东科技大学学报(自然科学版),2018,37(3):26-34.

LIU Yang, WANG Meiyuan, ZHAO Susu, et al. Synthesis and modification of hyperbranched polyester dust suppressant[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2018, 37(3):26-34.

改性超支化聚酯抑尘剂的合成及其性能

刘 洋,王美燕,赵素素,刘洋洋,杨 静

(山东科技大学 化学与环境工程学院,山东 青岛 266590)

摘要:以N,N-二羟乙基-3-胺丙酸甲酯为单体,利用硬脂酸对其进行改性,制得含长链烷基的改性单体;以季戊四醇为核合成了二代超支化聚酯,向二代超支化聚酯中加入一定比例的单体和改性单体,合成了改性超支化聚酯抑尘剂。结果表明,单体改性的最佳条件为:反应温度130℃,催化剂用量1.00%,反应时间2.5 h;改性超支化聚酯抑尘剂的最佳合成工艺为:改性比1:6,催化剂用量1.00%,反应温度130℃,反应时间2.5 h。通过对其抑尘性能的研究发现,该抑尘剂易于溶解,保水性好,抑尘效率高,无腐蚀性,在抑尘领域有着广阔的应用前景。

关键词:超支化聚酯;季戊四醇;改性单体;硬脂酸;抑尘剂

中图分类号:X513

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2018)03-0026-09

DOI: 10.16452/j.cnki.sdkjzk.2018.03.004

Synthesis and Modification of Hyperbranched Polyester Dust Suppressant

LIU Yang, WANG Meiyuan, ZHAO Susu, LIU Yangyang, YANG Jing

(College of Chemical and Environmental Engineering, Shandong University of
Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

Abstract: Based upon N,N-diethylo-3-amine methylpropionate as monomer and stearic acid as modifier, the modified monomer with long alkyl group was synthesized. Second generation hyperbranched polyester (HBPE2) was synthesized using pentaerythritol as core, the modified hyperbranched polyester (modified HBPE3) dust suppressant was synthesized from HBPE2, monomer and modified monomer. The results show that optimal technological conditions of modified monomer are temperature 130℃, catalyst dosage 1.00%, and reaction time 2.5 h. The best technological condition of modified HBPE3 dust suppressant are modification ratio is 1:6, catalyst dosage 1.00%, temperature 130℃, and reaction time 2.5 h. Study on the dust suppression performance, the results show that the prepared dust suppression is noncorrosive and it has good solubility, good water retention and high dust suppression rate, and it has a bright prospect in the field of dust suppression.

Key words: hyperbranched polyester; pentaerythritol; modified monomer; stearic acid; dust suppressant

开放性尘源,如裸露地面、露天料场、建筑工地等引起的扬尘是导致城市空气污染的重要因素,开放性尘

收稿日期:2017-04-21

基金项目:国家自然科学基金-煤炭联合基金重点支持项目(U1261205);青岛经济技术开发区重点科技发展计划项目(2013-1-66);青岛市建设事业科技发展项目(JK2013-9)

作者简介:刘 洋(1992—),女,山东济宁人,硕士研究生,主要从事抑尘剂的制备及应用研究。

杨 静(1969—),女,山东泰安人,教授,博士,主要从事抑尘剂和降尘剂的制备及应用研究,本文通信作者。

E-mail:kdyangjing@163.com

源的防治对策主要有洒水抑尘、苫盖抑尘、设置挡风墙防尘等^[1]。洒水抑尘因成本低廉、施工方便而被广泛使用,但其抑尘能力有限、有效抑尘时间短^[2],还存在水资源浪费、冬季易结冰等问题。为了提高抑尘效率,上世纪60年代,前苏联科学家首次将氯化钙应用于矿山道路抑尘,使抑尘效率大大提高,防尘有效期大大延长^[3-4],但是氯化钙等无机盐的金属腐蚀性较强,会损害汽车轮毂等金属部件,同时也会对周边的生态环境造成一定的危害。本世纪初,羧甲基纤维素钠、聚乙烯醇、淀粉接枝共聚物等高分子材料开始在抑尘方面展现出优势^[1],然而高分子材料溶解困难、溶解时间长等问题给抑尘剂的现场应用带来了很大的不便。因此,开发易于溶解、使用方便、保水性好、抑尘效率高、无腐蚀性的新型抑尘剂是非常迫切的。

超文化聚合物具有高度支化的三维球状立体结构,分子间缠绕少^[5],分子之间的相互作用较小,因而具有溶解性良好的特点^[6]。超文化聚酯中大量的端羟基可以与水分子之间形成氢键,使其具有良好的保水效果^[7]。另外,其分子内的大量空腔^[8-11]可在一定程度上将水分子或粉尘包裹在其中,尤其是端基含长碳链的超文化聚酯,由于碳链的伸展缠绕,形成立体的网状结构,在分子间形成包裹水分子或粉尘的空间^[12],进一步提高了超文化聚酯的保湿固尘能力。因此,对端羟基适当改性的超文化聚酯在抑尘剂领域有良好的发展前景。本研究以N,N-二羟乙基-3-胺丙酸甲酯为单体,对甲苯磺酸为催化剂,利用硬脂酸对其进行改性,制得端基含长链烷基结构的改性单体;以季戊四醇为核,在对甲苯磺酸催化下合成了二代超文化聚酯,向二代超文化聚酯中加入一定比例的单体和改性单体,以保水率和风蚀率为指标,合成了性能良好的改性超文化聚酯抑尘剂,并系统的研究了其溶解时间、保水性、金属腐蚀性和抗风蚀性等抑尘性能。

1 实验部分

1.1 主要试剂

N,N-二羟乙基-3-胺丙酸甲酯(N,N-diethylol-3-amine methylpropionate),实验室自制;季戊四醇(pentaerythritol, PE),对甲苯磺酸(*p*-toluenesulfonic acid, *p*-TSA),硬脂酸(stearic acid),乙酸乙酯(ethyl acetate),乙酸酐(acetic anhydride),均为分析纯,天津市博迪化工股份有限公司生产。

1.2 实验过程

1.2.1 改性单体的合成

将0.010 0 mol的硬脂酸和一定量的催化剂*p*-TSA加入三口烧瓶中,在N₂保护下,升温至100℃,磁力搅拌至硬脂酸完全熔融;加入0.010 0 mol的单体,升温至一定温度,反应一段时间后,减压蒸馏,制得改性单体。反应式如图1所示。

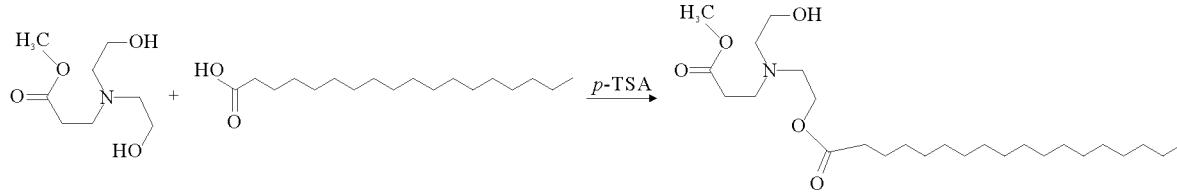


图1 改性单体的合成

Fig. 1 Synthesis of modified monomer

1.2.2 改性超文化聚酯的合成

将0.010 0 mol PE和0.076 0 g *p*-TSA加入三口烧瓶中,磁力搅拌,在N₂保护下,升温至130℃,将0.040 0 mol的单体缓慢滴加至反应体系中,反应2.5 h,抽真空至不再有气泡鼓出,得到一代超文化聚酯(hyperbranched polymer, HBPE1);追加2倍量的单体和*p*-TSA,重复上述过程,得到二代超文化聚酯(HBPE2);加入一定量的改性单体,并补加一定量的单体,使单体和改性单体总物质的量为0.160 0 mol,加入一定量的*p*-TSA,在一定温度下继续反应一段时间,得到改性超文化聚酯(modified HBPE3)粗产品。加入适量乙醇溶解粗产品,用石油醚使其沉淀,抽真空除去乙醇和石油醚,重复3次,40℃下真空干燥,得到Modi-

fied HBPE3(图 2)。

1.3 分析与测试

1.3.1 红外测试(Fourier transform infrared, FT-IR)

采用 KBr 压片法,利用 Nicolet-380 型傅立叶变换红外光谱仪,红外测定扫描范围 $700\sim4\,000\text{ cm}^{-1}$ 。

1.3.2 差式扫描量热测试(differential scanning calorimetry, DSC)

利用瑞士 METTLER DSC1 差示扫描量热仪,在 N_2 气氛下测定玻璃化转变温度,设置升温速率为 $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$,温度范围为 $-80\sim100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

1.3.3 硬脂酸转化率的测定

重复不同条件下合成改性单体的实验过程至减压蒸馏之前的操作,加入适量乙醇溶解改性产物,以酚酞为指示剂,用 0.5 mol/L 的氢氧化钾乙醇溶液滴定至等当点后,抽滤,干燥,得到硬脂酸钾粉末,称重,记为 m_2 。硬脂酸的转化率按式(1)计算。

$$W=1-\frac{284.48}{322.57}\frac{m_2}{m_1}\times 100\% \quad (1)$$

式中: W 为硬脂酸的转化率,%; m_1 为实验过程中加入的硬脂酸的质量,g; m_2 为硬脂酸钾的质量,g; 322.57 为硬脂酸钾的相对分子质量,g/mol; 284.48 为硬脂酸的相对分子质量,g/mol。

1.4 抑尘性能测试

将 Modified HBPE3 配制成质量浓度为 4.00% 的抑尘剂溶液,研究其保水性、金属腐蚀性和抗风蚀性等抑尘性能。

1.4.1 溶解时间的测定

量取 492.5 mL 蒸馏水于烧杯中,将烧杯置于 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 恒温水浴中加热 15 min ,打开搅拌电机,将 7.5 g 抑尘剂缓慢加入水中,开始计时,搅拌至无肉眼可见悬浮物,停止计时,记录溶解时间。

1.4.2 保水性的测定

取适量粒径小于 0.15 mm 的干燥土样置于培养皿(直径为 90 mm)中,将抑尘剂溶液按 2.5 L/m^2 的喷洒量均匀喷洒到土样表面,待其慢慢渗入土样中后,将尘皿放入 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的恒温干燥箱中干燥,每隔 1 h 称量 1 次尘皿的质量,根据公式(2)计算保水率。

$$\eta=\frac{w_0-w_i}{w}\times 100\% \quad (2)$$

式中: η 为保水率,%; w_0 为喷洒抑尘剂后尘皿的初始质量,g; w_i 为不同时刻尘皿的质量,g; w 为所喷洒抑尘剂溶液的质量,g。

1.4.3 金属腐蚀性的测定

用电化学工作站分别测定碳钢片在蒸馏水和抑尘剂溶液中的塔菲尔曲线,以此判断抑尘剂溶液的金属

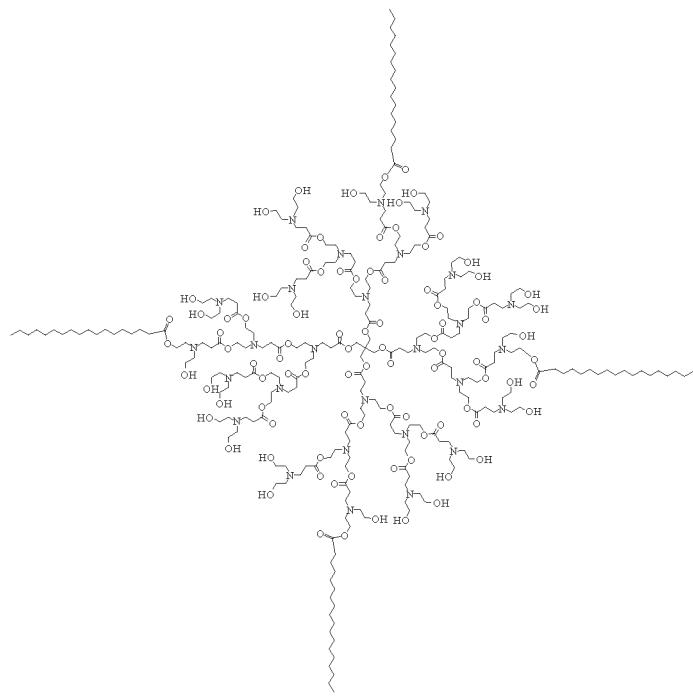


图 2 Modified HBPE3 的理想分子式

Fig. 2 The idealized formulas of modified HBPE3

腐蚀性。

1.4.4 抗风蚀性的测试

取适量粒径小于0.15 mm的干燥土样置于培养皿(直径为90 mm)中,将抑尘剂溶液按2.5 L/m²的喷洒量均匀喷洒到土样表面,待其慢慢渗入土样中后,将土皿放入50℃的恒温干燥箱中干燥2 h,称重,在表面风速为30 m/s的风洞中吹蚀一定时间后,称重,并按照式(3)计算风蚀率。

$$F = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\% \quad (3)$$

式中: F 为风蚀率,%; m_1 为吹蚀前土样质量,g; m_2 为吹蚀后土样质量,g。

2 结果与讨论

2.1 改性单体合成条件的选择

利用硬脂酸对单体进行改性的过程中,硬脂酸的转化率越高,单体改性程度越高。通过单因素分析法,探索反应温度、催化剂用量和反应时间等三个条件对硬脂酸转化率的影响,以得到单体改性的最佳工艺。

2.1.1 反应温度对硬脂酸转化率的影响

固定催化剂用量为单体质量的1.00%,反应时间为40 min,测定了不同反应温度下硬脂酸的转化率。从图3可以看出,随着反应温度的升高,硬脂酸的转化率不断升高。这是由于:一方面,随着温度升高,反应物分子的运动不断加剧,分子间接触几率增大,反应速率加快;另一方面,温度的升高使催化剂的活性增强,进一步提高反应速率,使一定反应时间内硬脂酸的转化率迅速升高。在反应温度不断上升的过程中,催化剂的损失加剧,故温度过高时硬脂酸转化率升高减缓,因此反应温度不宜过高,以130℃为佳。

2.1.2 催化剂用量对硬脂酸转化率的影响

固定反应时间为40 min,反应温度为130℃,选取催化剂用量分别为单体质量的0.50%、1.00%、1.50%、2.00%和2.50%,考察了催化剂用量对硬脂酸转化率的影响,实验结果见图4。随着催化剂用量的增加,硬脂酸的转化率不断升高,说明催化剂用量增加提高了单体与硬脂酸的反应速率;当催化剂用量达到1.00%之后,继续增大催化剂用量,硬脂酸的转化率变化不大,这可能是因为在130℃下反应40 min,硬脂酸的转化率已经接近上限。由于过多的催化剂会使反应物浓度降低,也会导致副反应加剧,进而使改性反应速率下降,故选择催化剂用量为1.00%为宜。

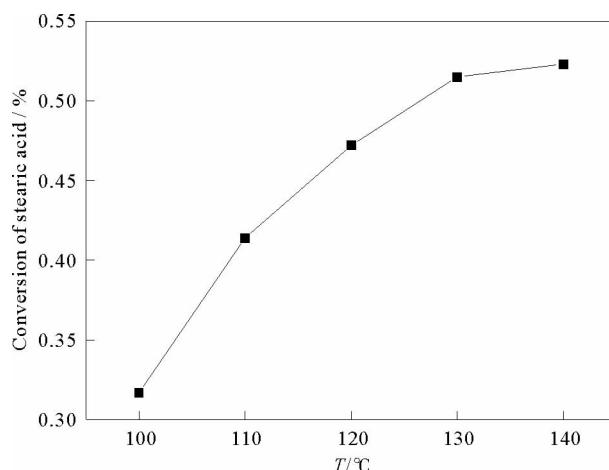


图3 反应温度对硬脂酸转化率的影响

Fig. 3 Effect of the reaction temperature on the conversion of stearic acid

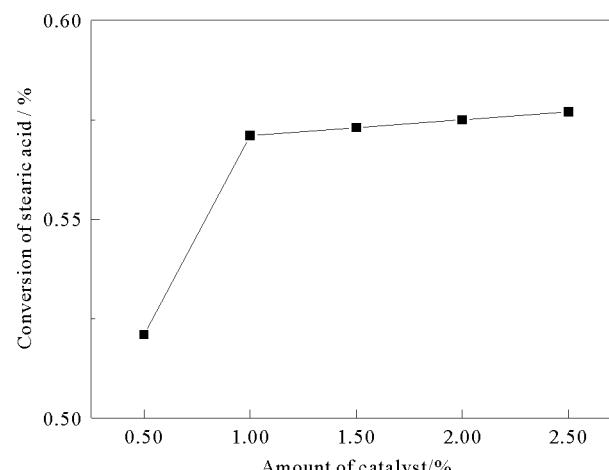


图4 催化剂用量对硬脂酸转化率的影响

Fig. 4 Effect of the amount of catalyst on the conversion of stearic acid

2.1.3 反应时间对硬脂酸转化率的影响

固定催化剂用量为单体质量的 1.00%，反应温度为 130 ℃，测定了不同反应时间下硬脂酸的转化率。从图 5 可以看出，反应时间由 1 h 延长至 2.5 h 的过程中，硬脂酸的转化率从 58.9% 迅速升高到了 97.9%，继续延长反应时间虽然可以进一步提高硬脂酸的转化率，但是提高的幅度是有限的，本着降低消耗的原则，选择反应时间为 2.5 h。

2.2 改性超支化聚酯抑尘剂的合成条件选择

制备改性超支化聚酯抑尘剂时，改性比(核与改性单体的摩尔比)、反应温度、催化剂用量(催化剂质量占单体和改性单体的总质量的比例)和反应时间对产物的保水性能、抗风蚀性能均有一定的影响，因此，采用 $L_9(3^4)$ 表设计正交实验。各影响因素选取的水平表如表 1 所示，实验方案及结果如表 2 所示，实验结果分析如表 3 所示。

表 1 正交实验因素水平表
Tab. 1 Factors and levels of orthogonal experiment

水平	因素			
	改性比(A)	温度(B)/℃	催化剂用量(C)/%	时间(D)/h
1	1 : 2	120	0.80	2.0
2	1 : 4	130	1.00	2.5
3	1 : 6	140	1.20	3.0

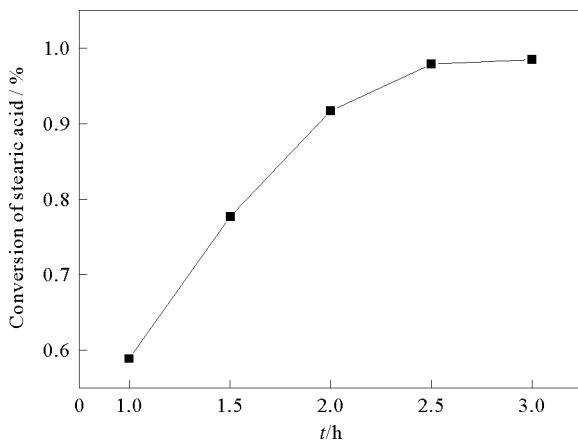


图 5 硬脂酸转化率与反应时间的关系

Fig. 5 Effect of the reaction time on the conversion of stearic acid

表 2 正交实验方案及结果

Tab. 2 Design and results of orthogonal experiment

试验号	A	B	C	D	保水率/%	风蚀率/%
1	1	1	1	1	0.307	0.063
2	1	2	2	2	0.550	0.074
3	1	3	3	3	0.527	0.064
4	2	1	2	3	0.537	0.068
5	2	2	3	1	0.595	0.075
6	2	3	1	2	0.637	0.066
7	3	1	3	2	0.568	0.062
8	3	2	1	3	0.659	0.071
9	3	3	2	1	0.699	0.064

由表 3 可知，对于保水率和风蚀率两个指标而言，不同因素的影响程度是不同的。对于因素 A，两个指标都取 A_3 最好；对于因素 B，以保水率为指标，选取 B_3 最好，以风蚀率为指标，选取 B_1 最好，从 k_i 值可以看出，B 取 B_1 、 B_3 时，风蚀率相差不大，而且从极差可以看出，B 对保水率来说为较重要因素，而对风蚀率来说为较次要因素，所以根据 B 因素对两个指标的重要程度，选取 B_3 ；对于因素 C 和因素 D，在各自的三个水平下，风蚀率差别不大，而当分别选取 C_2 、 D_2 时保水率最佳；综上所述，选择最佳工艺条件为 $A_3B_3C_2D_2$ ，即改性比 1 : 6，反应温度 130 ℃，催化剂用量 1.00%，反应时间 2.5 h。

表3 实验结果分析
Tab. 3 Analysis of experimental results

指标	A	B	C	D
保水率	K_1	1.383	1.413	1.602
	K_2	1.770	1.803	1.785
	K_3	1.926	1.863	1.689
	k_1	0.461	0.471	0.534
	k_2	0.590	0.601	0.595
	k_3	0.642	0.621	0.563
	极差 R	0.181	0.150	0.061
因素主次		A B C D		
优选方案		$A_3B_3C_2D_2$		
风蚀率	K_1	0.201	0.192	0.200
	K_2	0.208	0.220	0.205
	K_3	0.197	0.194	0.201
	k_1	0.067	0.064	0.067
	k_2	0.070	0.073	0.068
	k_3	0.066	0.065	0.067
	极差 R	0.004	0.009	0.002
因素主次		D C A B		
优选方案		$D_1C_1A_3B_1$ 或 $D_2C_1A_3B_1$ 或 $D_1C_3A_3B_1$ 或 $D_2C_1A_3B_1$		

2.3 产物性质的表征

2.3.1 红外光谱分析

等量 Monomer 和 Modified Monomer 的红外光谱如图 6 所示, 等量 HBPE2 和 Modified HBPE3 的红外光谱如图 7 所示。两图中, 3400 cm^{-1} 处是羟基的吸收峰, 2950 和 2880 cm^{-1} 处为甲基、亚甲基的伸缩振动峰, 在 Modified Monomer 和 Modified HBPE3 的过程中, 羟基的消耗使其吸收峰面积变小, 而长链烷基的引入使甲基、亚甲基的吸收峰明显增强。此外, 1733 cm^{-1} 处是酯羰基的吸收峰, 1178 cm^{-1} 处为碳氮键的振动吸收峰, 1035 cm^{-1} 处是酯基中碳氧键的不对称伸缩振动吸收峰。

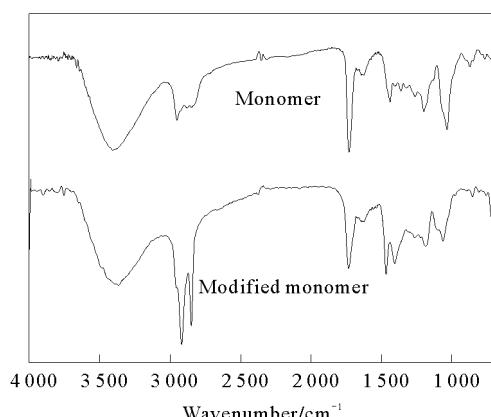


图6 改性前和改性后单体的红外光谱图

Fig. 6 FT-IR spectra of monomer before modified and after modified

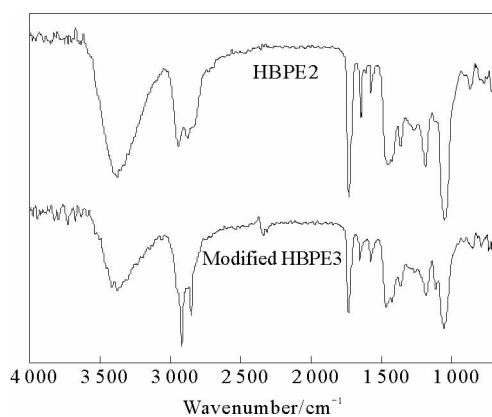


图7 改性前和改性后超支化聚合物的红外光谱图

Fig. 7 FT-IR spectra of HBPE2 and Modified HBPE3

2.3.2 DSC 分析

差式扫描量热测试结果如图 8 所示。HBPE2 和 Modified HBPE3 的玻璃化转变温度分别为 -55°C 和 -48°C 。HBPE2 中端羟基之间的氢键作用使分子链之间能够形成规则紧密的排列, 因而在升温过程中, 除了发生玻璃化转变外, 还存在一个较小的结晶放热峰^[13-14] (-45°C 左右); Modified HBPE3 中, 由于长链烷基的引入, 末端所占质量分数增大, 且由于长链烷基对聚合物的热性能影响也较大, 导致聚合物玻璃化转变温度明显升高^[15], 40°C 左右处的吸热峰归属于该长链烷基的结晶熔融。若抑尘剂的使用温度低于其玻璃化转变温度, 其用于分子热运动的能量将大大减少, 链段和整链运动均被冻结, 仅有链节、侧基及主链的键长和键角有微小的形变, 使得抑尘剂不能充分地与粉尘及其孔隙结构结合, 固化层的柔韧性和强度变差, 很容易被外力破坏, 造成二次扬尘。因此抑尘剂的使用温度通常高于其玻璃化转变温度, 鉴于制备的改性超支化聚酯玻璃化转变温度较低, 适于用作抑尘剂。

2.4 抑尘剂的抑尘性能

2.4.1 抑尘剂的溶解时间

现有的市售抑尘剂多为粉状, 粉状抑尘剂在溶解时极易出现团聚现象, 一旦团聚就需要耗费较长的时间来溶解。因此现场使用的抑尘剂绝大多数需要预溶 24 h 后使用, 耗费大量人力物力, 工作效率低。故选用 3 种市售抑尘剂作对比, 对 Modified HBPE3 抑尘剂的溶解时间进行了测试, 结果如表 4 所示。Modified HBPE3 高度支化的结构使其溶解性良好, 在 1 min 内即可溶解完成, 而 3 种市售抑尘剂溶解时间均在 1 h 以上。由此可见, Modified HBPE3 抑尘剂在溶解时间上表现出极大的优势, 现场应用中可以现配现用, 使用方便, 节约时间, 提高工作效率。

2.4.2 抑尘剂的保水性

抑尘剂保水性主要体现在减缓粉尘中的水分蒸发以增加粉尘自重, 使其不易在外力作用下扬起, 理论上, 当粉尘含水率大于 4% 时可保持粉尘湿润, 起到抑尘的作用^[16]。 CaCl_2 具有很强的吸水性, 常被用作保水型抑尘剂的添加剂^[17]。以质量浓度为 4.00% 的 CaCl_2 溶液作对比, 考察了 Modified HBPE3 抑尘剂的保水性能。由图 9 可知, 在 35°C 下干燥 8 h 后, 喷洒蒸馏水的尘样保水率低于 4%, 已无抑尘作用; CaCl_2 溶液保水率为 25%, 仍有一定的抑尘作用; 而 Modified HBPE3 抑尘剂的保水率高达 58%, 抑尘作用明显。由此可见, 改性超支化聚酯的保水性能远远优于传统保水剂 CaCl_2 , 具有较好的保水性, 在现场应用中可以减少抑尘剂的喷洒频率, 节约使用成本。

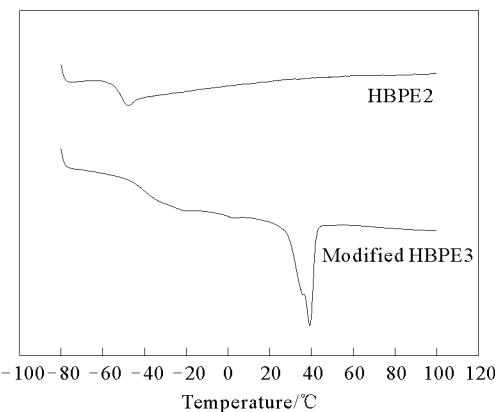


图 8 HBPE2 和 Modified HBPE3 的 DSC 谱图

Fig. 8 DSC spectra of HBPE2 and Modified HBPE3

表 4 各抑尘剂的溶解时间

Tab. 4 The dissolution time of dust suppressants

序号	抑尘剂名称	溶解时间/min
1	ZD	132
2	CR	65
3	SD	70
4	Modified HBPE3	< 1

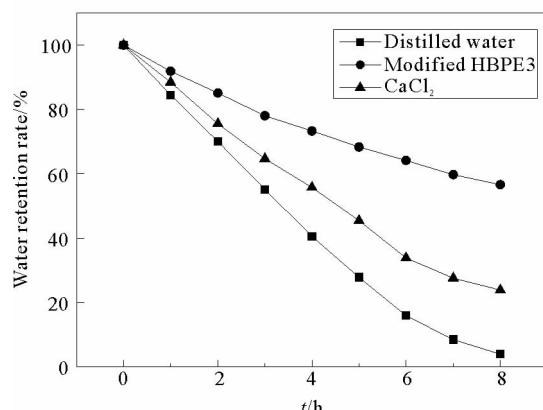


图 9 保水率与时间的关系

Fig. 9 The relation between water retention and time

2.4.3 抑尘剂的金属腐蚀性

抑尘剂的溶解、运输、喷洒设备多为金属制品,因此传统保水型抑尘剂(常含有 CaCl_2 等无机盐)对金属的腐蚀问题一直是制约其应用的重大缺陷。由图10可以看出,Modified HBPE3抑尘剂的腐蚀电位约为 -0.41 V ,与蒸馏水的腐蚀电位(-0.36 V)相近,都远高于质量浓度为4.00%的 CaCl_2 溶液的腐蚀电位(-0.90 V),说明Modified HBPE3的金属腐蚀倾向与蒸馏水相当,不易对抑尘剂的溶解、运输、喷洒设备(如洒水车的不锈钢水箱、金属喷头、汽车轮毂等)造成腐蚀,适宜现场应用。

2.4.4 抑尘剂的抗风蚀性

固结层的抗风蚀性能是抑尘剂性能的关键指标,以风蚀率为指标,考察Modified HBPE3抑尘剂的抵抗风蚀的能力,结果如图11所示。只喷洒水的样品由于表面尘样松散而没有凝聚力,无法抵抗风力的吹蚀,因而风蚀率较大,且随吹蚀时间延长呈现快速增长的趋势;使用抑尘剂后,尘样表面固结效果增强,样品的抗风蚀能力显著提高,在风洞中吹蚀5 min后,风蚀率仅为0.072%,远远低于铁道部行业标准TB/T 3210.1—2009中规定的抑尘剂风蚀率小于1%的要求。

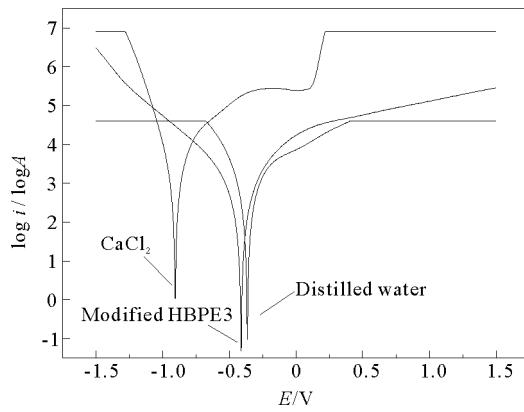


图10 不同溶液中碳钢片的塔菲尔曲线

Fig. 10 The Tafel curve of carbon steel in different solutions

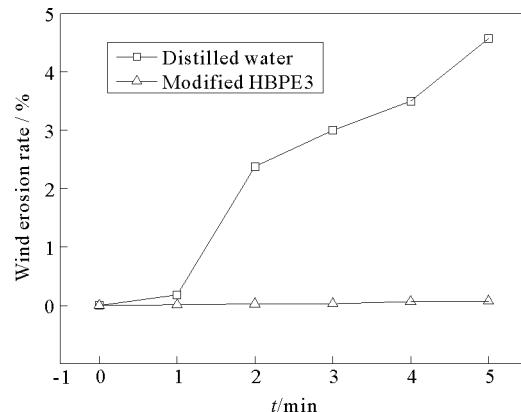


图11 风蚀率与时间的关系

Fig. 11 The relation between wind erosion rate and time

3 结论

1) 以硬脂酸为改性剂、对甲苯磺酸为催化剂,对单体N,N-二羟乙基-3-胺丙酸甲酯进行改性,制得了改性单体;向二代超支化聚酯中加入一定比例的单体和改性单体,在对甲苯磺酸催化下,成功合成了改性超支化聚酯。

2) 改性超支化聚酯的溶解速度较快,35℃下8 h保水率高达58%,无腐蚀性,在30 m/s的风洞中吹蚀5 min,风蚀率仅为0.072%,远远低于TB/T3210.1-2009标准小于1%的要求,表明合成的改性超支化聚酯在抑尘剂领域有着良好的应用前景。

参考文献:

- [1] 杨静,刘丹丹,祝秀林,等.化学抑尘剂的研究进展[J].化学通报,2013,76(4):346-353.
YANG Jing, LIU Dandan, ZHU Xiulin, et al. Progress of chemical dust suppressant[J]. Chemistry, 2013, 76(4): 346-353.
- [2] YANG J, LIU D D, LIU B J, et al. Research on mine dustfall agents based on the mechanism of wetting and coagulation[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials, 2014, 21(3):205-209.
JIANG Yaodong, ZHANG Xue, ZHANG Lei, et al. Research application status and development of dust suppression agent [J]. Chemical Enterprise Management, 2017(10):145-148.
- [3] 蒋耀东,张雪,张雷,等.抑尘剂的研究应用现状及发展趋势[J].化工管理,2017(10):145-148.
JIANG Yaodong, ZHANG Xue, ZHANG Lei, et al. Research application status and development of dust suppression agent [J]. Chemical Enterprise Management, 2017(10):145-148.
- [4] 彭小兰,吴超.化学抑尘剂新进展研究[J].中国安全生产科学技术,2005,1(5):44-47.

- PENG Xiaolan, WU Chao. Progress of chemical dust suppressants and their applications[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2005, 1(5): 44-47.
- [5] HE C, JIN B K, HE W D, et al. Solvent replacement to thermo-responsive nanoparticles from long-subchain hyperbranched PSt grafted with PNIPAM for encapsulation[J]. Journal of Polymer Science Part A Polymer Chemistry, 2013, 51(10): 2142-2149.
- [6] 罗运军, 夏敏, 王兴元. 超支化聚酯[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009: 11-12.
- [7] 贾杰, 刘洋, 杨坤, 等. 利用二次回归正交组合设计优化超支化聚酯的改性工艺[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2016, 35(5): 75-81.
- JIA Jie, LIU Yang, YANG Kun, et al. Optimal modification technology of hyperbranched polyester by quadric regression orthogonal combination test[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2016, 35(5): 75-81.
- [8] 王金荣. 超支化聚酯在靶向药物释放系统中的应用[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2009: 1-2.
- [9] 张颖, 彭健, 林勇, 等. 长链超支化聚酯改性纳米 SiO₂ 及其在丁苯橡胶中的应用[J]. 高分子学报, 2016(6): 706-714.
- ZHANG Ying, PENG Jian, LIN Yong, et al. Preparation of hyperbranched polyester modified Nano-SiO₂ and its application in SBR[J]. Acta Polymerica Sinica, 2016(6): 706-714.
- [10] SANSTRA S, KAITTANIS C, PEREZ J M. Aliphatic hyperbranched polyester: A new building block in the construction of multifunctional nanoparticles and nanocomposites[J]. Langmuir: The ACS Journal of Surfaces & Colloids, 2010, 26(8): 5364-5373.
- [11] ZHANG H, PATEL A, GAHARWAR A K, et al. Hyperbranched polyester hydrogels with controlled drug release and cell adhesion properties[J]. Biomacromolecules, 2013, 14(5): 1299-1310.
- [12] 杜英英. 超支化聚合物的改性及其在纺织印染中的应用研究[D]. 上海: 东华大学, 2011: 113-117.
- [13] 刘晶如, 张建勋, 巢玲玲, 等. 端基对脂肪族超支化聚酯性能的影响[J]. 高校化学工程学报, 2011, 25(6): 1051-1056.
- LIU Jingru, ZHANG Jianxun, CHAO Lingling, et al. Effect of terminal groups on the properties of aliphatic hyperbranched polyester[J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 2011, 25(6): 1051-1056.
- [14] MAHDAVI H, SHAHALIZADE T. Preparation, characterization and performance study of cellulose acetate membranes modified by aliphatic hyperbranched polyester[J]. Journal of Membrane Science, 2015, 473: 256-266.
- [15] 蔡黎明, 杨卫民, 吕亚非. 端羟基超支化聚酯的改性及性能研究[J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 2011, 38(6): 39-43.
- CAI Liming, YANG Weimin, LÜ Yafei. Study on modification and properties of a hydroxyl-terminated hyperbranched polyester[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology(Natural Science), 2011, 38(6): 39-43.
- [16] 谭卓英, 刘文静, 赵星光, 等. 生态型抑尘剂的选择与实验模拟研究[J]. 环境科学学报, 2005, 25(5): 675-680.
- TAN Zhuoying, LIU Wenjing, ZHAO Xingguang, et al. Selection principle and experimental simulation of ecotype dust suppressor[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2005, 25(5): 675-680.
- [17] 吴超, 欧家才, 周勃, 等. 湿润剂溶液在硫化矿矿尘中的反向湿润行为研究[J]. 安全与环境学报, 2005, 5(4): 65-68.
- WU Chao, OU Jiacai, ZHOU Bo, et al. Investigation on wetting behavior of wetting agents to dust of sulfide ores by upward capillary seepage method[J]. Journal of Safety and Environment, 2005, 5(4): 65-68.

(责任编辑: 吕海亮)