

文章编号: 1008-9357(2025)03-0237-08

DOI: 10.14133/j.cnki.1008-9357.20241220001

基于 TMI 型大分子分散稳定剂的聚合物多元醇

刘禄麒, 王新灵

(上海交通大学化学化工学院, 上海 200240)

摘要: 以聚醚多元醇和 3-异丙基-二甲基苄基异氰酸酯(TMI)为原料合成了一种大分子分散稳定剂,并通过分散聚合的方法将其与苯乙烯(ST)、丙烯腈(AN)共聚,最终制得一种高固含量、低黏度的聚合物多元醇(POP)。通过旋转式黏度计、扫描电镜等研究了该大分子分散稳定剂的封端比例(异氰酸酯基团与羟基的物质的量之比, $n(-NCO):n(-OH)$)、大分子分散稳定剂的质量分数及作为溶剂的聚醚的分子量对聚合物多元醇黏度和固含量的影响。结果表明:当大分子分散稳定剂的封端比例为 0.8:6~1:6、质量分数为 4% 时,采用较低分子量的聚醚作为溶剂,可制得高固含量(大于 40%)、低黏度(小于 4 500 mPa·s)的聚合物多元醇。

关键词: 大分子分散稳定剂; 聚合物多元醇; 分散聚合; 低黏度; 高固含量

中图分类号: O633.2

文献标志码: A

Polymer Polyol Based on TMI-Type Macromolecular Dispersion Stabilizer

LIU Luqi, WANG Xinling

(School of Chemistry and Chemical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: A series of TMI-type macromolecular dispersion stabilizers with unsaturated double bonds at the end of the chain were synthesized from polyether polyol and 3-isopropyl-dimethylbenzyl isocyanate (TMI) under suitable temperature and catalyst conditions. The homemade TMI-type macromolecular dispersion stabilizers were involved in the synthesis of polymer polyol (POP) by dispersion polymerization, during which a series of POPs with different viscosity and solid content were formed by co-polymerization with styrene and acrylonitrile. The effect of the reaction conditions on the viscosity and solid content of the POPs was investigated by varying the capping ratio ($n(-NCO):n(-OH)$), the mass fraction of the macromolecular dispersion stabilizer in the base synthesis formulation, and the molecular weight of the polyether used as a solvent. When the capping ratio of TMI-type macromolecular dispersion stabilizer was between 0.8:6 and 1:6, the mass fraction of macromolecular dispersion stabilizer in the basic synthesis formula was 4%, and the lower molecular weight polyether was used as the solvent in the basic synthesis formula, POPs with solid content higher than 40% and viscosity lower than 4 500 mPa·s could be synthesized.

Key words: macromolecular dispersion stabilizer; polymer polyol; dispersion polymerization; low viscosity; high solid content

收稿日期: 2024-12-20

作者简介: 刘禄麒(1999—),男,河南周口人,硕士,主要研究方向为聚合物多元醇的制备及应用研究。E-mail: liuluqi000@163.com

通信联系人: 王新灵, E-mail: xlwang@sjtu.edu.cn

引用格式: 刘禄麒,王新灵. 基于 TMI 型大分子分散稳定剂的聚合物多元醇 [J]. 功能高分子学报, 2025, 38(3): 237-244.

Citation: LIU Luqi, WANG Xinling. Polymer Polyol Based on TMI-Type Macromolecular Dispersion Stabilizer [J]. Journal of Functional Polymers, 2025, 38(3): 237-244.

聚合物多元醇(POP)是乙烯基单体在基础聚醚中经自由基聚合而得到的混合物体系,其中乙烯基单体聚合颗粒作为分散相分散在连续相基础聚醚中形成稳定的分散体^[1]。这种分散体能够赋予下游聚氨酯(PU)泡沫优异的物理性能,显著提高其硬度和加工性能,因此在高承载和高回弹的PU泡沫生产中得到广泛应用^[2]。近年来,随着PU泡沫工业的持续发展,传统的低固含量的聚合物多元醇已不能满足市场对PU泡沫承载和回弹性能的需要,人们对聚合物多元醇的固含量不断提出更高的要求^[3,4]。然而,聚合物多元醇固含量的提升往往伴随着稳定性下降、分散相粒子粒径增大和系统黏度上升等问题,如何在保持低黏度的同时提高固含量,已成为目前聚合物多元醇领域研究的重点^[5]。

目前,聚合物多元醇主要通过分散聚合的方法制备。在分散聚合中,分散稳定剂对体系稳定性、粒径有着重要影响^[6-8]。为制得性能优异分散稳定剂,Pizzini等^[9]将马来酸酐接枝到聚醚多元醇中,并将其作为分散稳定剂用于生产聚合物多元醇,获得了黏度约为5000 mPa·s、固含量约为30%的聚合物多元醇。孙霞等^[10]将不同分子量的聚醚胺通过亚胺法接枝到苯乙烯-马来酸酐共聚物侧链上,获得两亲性的接枝型共聚物。该接枝型共聚物可作为分散稳定剂应用于不同分散体系中,防止颗粒团聚并降低体系黏度。这些由马来酸酐制备的分散稳定剂虽然可以有效提高体系空间稳定性,但其在开环生成半酯之后,还需在较高温度下对残余羧基进行酯化或中和反应,以减少最终产物的酸性。该过程容易导致体系内发生氧化反应等副反应,从而使得聚合物多元醇发生黄变,不仅影响产品的外观,而且可能对其性能产生不利影响,因此需要通过技术创新和工艺优化来克服现有的局限性^[11,12]。

本文采用聚醚多元醇与3-异丙基-二甲基苄基异氰酸酯(TMI)反应,制备了一系列链末端含有不饱和双键的TMI型大分子分散稳定剂,并将其通过分散聚合的方法与苯乙烯(ST)、丙烯腈(AN)共聚,制备了聚合物多元醇。系统研究了TMI型大分子分散稳定剂的封端比例(异氰酸酯基团(—NCO)与羟基(—OH)的物质的量之比, $n(\text{—NCO}):n(\text{—OH})$)、大分子分散稳定剂的质量分数及聚醚溶剂分子量对聚合物多元醇黏度和固含量的影响。得益于TMI中苯环结构,合成的TMI型大分子分散稳定剂显示出与苯乙烯良好的相容性。与马来酸酐型大分子分散稳定剂相比,得到的聚合物多元醇在相同固含量下表现出更低的黏度,且在合成过程中无需高温处理未反应的羧基,降低了温度对聚合物多元醇性能的影响。

1 实验部分

1.1 原料和试剂

TMI($w \geq 95\%$)、二月桂酸二丁基锡(T12, $w \geq 95\%$)、ST($w \geq 99\%$)、AN($w \geq 99\%$)、偶氮二异丁腈(AIBN, $w \geq 98\%$):上海阿拉丁生化科技股份有限公司;异丙醇(IPA, $w \geq 99.7\%$)、苯乙酸乙酯(EA, $w \geq 99.5\%$):上海泰坦科技股份有限公司;聚醚330(分子量3000):工业级,隆华科技有限公司;聚醚330N(分子量5000)、六官聚醚多元醇:工业级,山东蓝星东大化工有限公司。

1.2 测试与表征

核磁共振氢谱(¹H-NMR):以氘代氯仿(CDCl₃)为溶剂、四甲基硅烷(TMS)为内标,在25℃条件下,使用核磁共振谱仪(瑞士Bruker公司AVANCEIII400型)进行测定。

傅里叶变换红外光谱(FT-IR):取200 mg纯KBr研细均匀,置于红外压片模具中,用压力压成透明薄片,取适量样品涂覆后,用傅里叶变换红外光谱仪(美国PerkinElmer公司Paragon 1000型)进行测定。

黏度:根据待测样品的黏度范围选择适当的转子和转速,在23~25℃条件下,用旋转式黏度计(中国邦西仪器NDJ-1型)进行测定。

扫描电子显微镜(SEM):先将待观察的样品涂覆在导电胶上然后固定在样品台上,用场发射扫描电子显微镜(美国FEI公司Nova NanoSEM 450型)观察样品中聚合物颗粒的表面形貌和均匀性。

透射电镜(TEM):取适量样品于碳膜上,用加速电压为200 kV的场发射透射电镜(美国Thermo Scientific公司FEI Talos F200X G2型)拍摄。

异氰酸酯基团的含量:采用二正丁胺法进行测定,取一定量的样品和25 mL的二正丁胺-甲苯溶液,以溴甲酚绿为指示剂,用已标定的盐酸溶液将其标定至微黄色,平行进行3组空白试验。

固含量:称取聚合物多元醇(m_1 , g)于离心管中并加入无水乙醇,依次进行超声、离心、倒出上清液,之后

再次用无水乙醇分散,重复以上操作4次。然后,取一个干净小烧杯(m_2, g),将离心管中残留物用乙醇溶解并倒入小烧杯中,将小烧杯放置于115℃的烘箱中烘干8h以上,烘干后的剩余质量记为 $m_3(\text{g})$,则固含量为 $(m_3-m_2)/m_1 \times 100\%$ 。

1.3 实验步骤

1.3.1 TMI型大分子分散稳定剂的制备 室温下,将六官聚醚多元醇和TMI按一定的物质的量之比加入三颈烧瓶中,同时加入适量催化剂T12,开启搅拌并升温至指定温度,保温反应一段时间至体系内无—NCO时,结束反应,并转移产物至样品瓶中氮封保存。

1.3.2 聚合物多元醇的制备 称取苯乙烯($w=26.50\%$)、丙烯腈($w=13.25\%$)、自制分散稳定剂($w=3.00\%$)、AIBN引发剂($w=0.41\%$)、异丙醇($w=7.00\%$)及作为溶剂的聚醚($w=33.23\%$),搅拌均匀,制备混合液待用;由于混合液易发生自聚反应,应保持10℃以下,且配制后尽快使用;另取聚醚($w=16.61\%$)置于反应器内,升温至120℃,在0.40~0.45 MPa条件下,开启搅拌,并在60 min内将混合液滴加完毕;单体混合液加注完毕后,保持0.40~0.45 MPa、120℃条件下继续反应45~60 min,得到聚合物多元醇粗品;将制得的聚合物多元醇粗品在真空环境中脱除未反应的单体,得到最终聚合物多元醇成品。TMI型大分子分散稳定剂参与聚合物多元醇合成的示意图如图1所示。

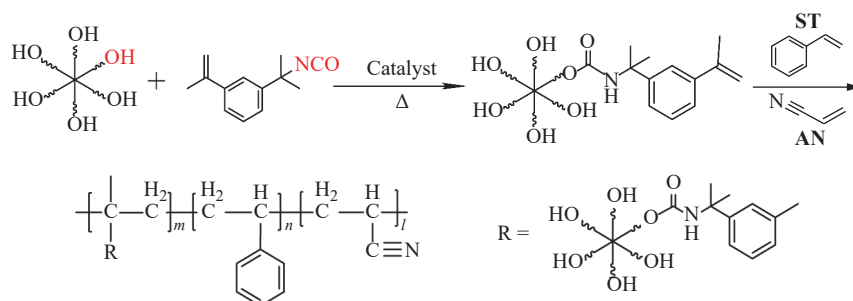


图1 TMI型大分子分散稳定剂参与聚合物多元醇合成的示意图

Fig. 1 Schematic diagram of TMI-type macromolecular dispersion stabilizers involved in the synthesis of polymer polyols

2 结果与讨论

2.1 TMI型大分子分散稳定剂的制备及其结构表征

按 $n(-\text{NCO}):n(-\text{OH})=1:6$ 投料六官聚醚多元醇和TMI,考察温度和催化剂对TMI型大分子分散稳定剂反应速率的影响,结果如表1所示。由表1可知,在无催化剂条件下,反应温度升至90℃,反应在12h后仍未进行完全。相比之下,在加入催化剂(质量分数为0.04%~0.1%)的条件下,温度升至80℃,反应在2h内进行完全。说明催化剂的引入显著加快了反应速率,降低了温度升高可能带来的双键破坏风险,使反应在适宜温度条件下能够快速高效地进行。

采用FT-IR对反应12h后获得的TMI型大分子分散稳定剂进行表征,结果如图2所示。2260~2280 cm^{-1} 处对应TMI分子结构中—NCO的伸缩振动峰;1730~1740 cm^{-1} 处对应分散稳定剂的酯基中C=O的伸缩振动峰。在相同反应时间、90℃、无催化剂条件下,TMI型大分子分散稳定剂的FT-IR谱图中,2260~2280 cm^{-1} 处有非常强的—NCO特征峰,说明体系中的—NCO未反应完全;而在使用了催化剂后的TMI型大分子分散稳定剂样品中,2260~2280 cm^{-1} 处的—NCO特征峰消失,表明反应已经进行完全,该结果与合成结束时的—NCO含量滴定结果保持一致。

对90℃、有催化剂条件下合成的TMI型大分子分散稳定剂和六官聚醚多元醇进一步进行核磁表征,结果如图3所示,TMI型大分子分散稳定剂的核磁谱图中多出的5.34、5.07处的信号峰归属于原TMI中—C=CH₂的H(图中蓝色虚线方框),结合红外测试中—NCO表征结果,表明双键顺利接枝在聚醚主链上。

根据以上结果,为了保证反应充分进行并将反应时间控制在2h内,后续实验中在制备新的大分子分散稳定剂时,选择反应温度为90℃,并添加质量分数为0.04%~0.1%的催化剂作为合成过程的基本条件,以获得可应用于制备聚合物多元醇的大分子分散稳定剂。

表 1 温度和催化剂对 TMI 型大分子分散稳定剂反应速率的影响

Table 1 Effect of temperature and catalyst on the reaction rate of TMI-type macromolecular dispersion stabilizers

Sample	Catalyzer	$T/^\circ\text{C}$	Reaction end time
D-TMI _{t50c1}	T12(w=0.04%~0.1%)	50	>10 h
D-TMI _{t80c1}	T12(w=0.04%~0.1%)	80	1~2 h
D-TMI _{t90c1}	T12(w=0.04%~0.1%)	90	1~2 h
D-TMI _{t100c1}	T12(w=0.04%~0.1%)	100	1~2 h
D-TMI _{t70c0}	None	70	12 h (Incomplete reaction)
D-TMI _{t80c0}	None	80	12 h (Incomplete reaction)
D-TMI _{t90c0}	None	90	12 h (Incomplete reaction)

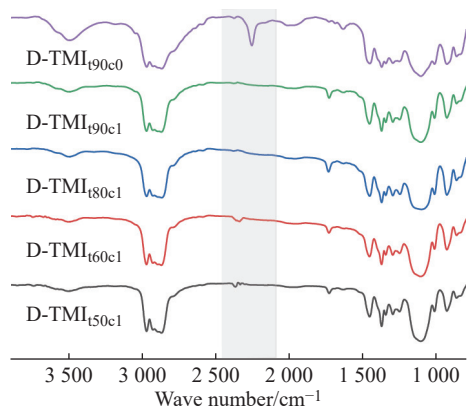
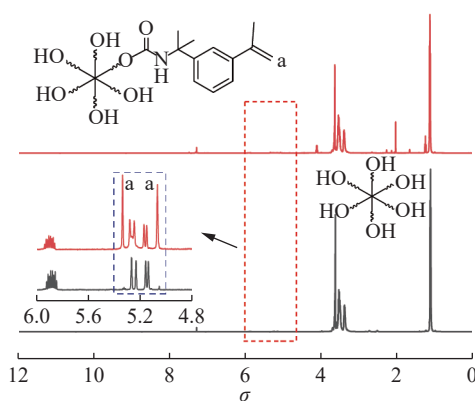


图 2 TMI 型大分子分散稳定剂的红外光谱图

Fig. 2 FT-IR spectra of TMI-type macromolecular dispersion stabilizers

图 3 D-TMI_{t90c1} 和六官聚醚多元醇的¹H-NMR 谱图Fig. 3 ¹H-NMR of D-TMI_{t90c1} and hexafunctional polyether polyol

2.2 TMI 型大分子分散稳定剂封端比例对聚合物多元醇性能的影响

在 90 °C、加入质量分数 0.04%~0.1% 催化剂的条件下,调节 TMI 单体与六官聚醚多元醇的投料比例,制得一系列不同封端比例的 TMI 型大分子分散稳定剂。随后将所制备大分子分散稳定剂用于合成聚合物多元醇,对脱除挥发组分后的聚合物多元醇进行黏度、固含量和颗粒形态的表征,研究封端比例对聚合物多元醇的性能影响,结果如表 2 所示,相应的 SEM 观察结果如图 4 所示。由表 2 可知,随着 $n(\text{—NCO}):n(\text{—OH})$ 的增加,聚合物多元醇的黏度显著增加。当 $n(\text{—NCO}):n(\text{—OH})=3:6$ 时,表观黏度已经超过 20000 mPa·s,并出现明显的絮凝沉淀。这主要是因为高封端比例引入了更多的双键,使得初期聚合和交联反应加快,进而形成了高度交联的核,体系中的苯乙烯及丙烯腈单体难以在核内部聚合增长,相反更容易在核表面的活性末端发生聚合,这使得其空间稳定性大幅下降,黏度增加。

由图 4 可知,随着封端比例的提升,高度交联的核使得更多的单体在核表面的活性末端聚合增长,这使得聚合物颗粒表面呈现不规则形状。此外,核表面增长的聚合物链削弱了空间稳定效果,增加了链缠结的可能,导致体系黏度显著增加。

2.3 TMI 型大分子分散稳定剂用量对聚合物多元醇性能的影响

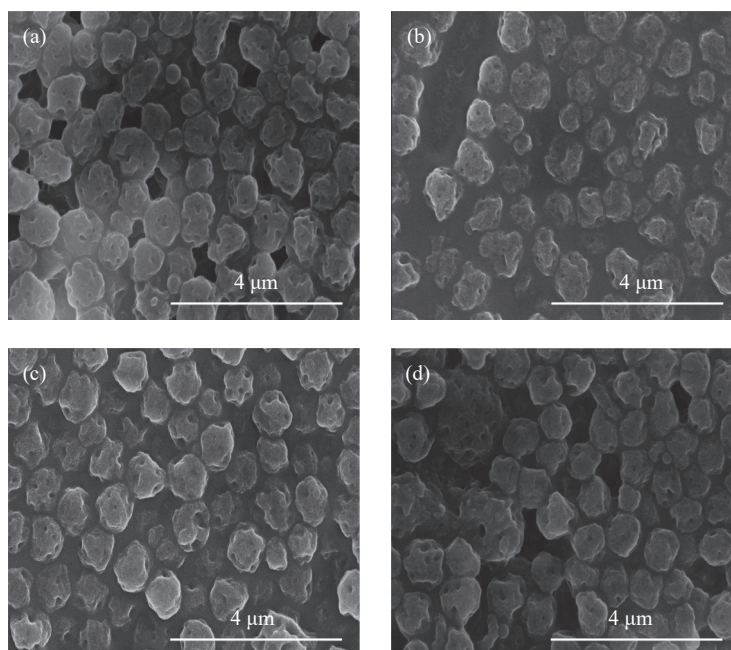
以聚醚 330 N 作为合成聚合物多元醇时的溶剂,考察基础配方中大分子分散稳定剂(固定 $n(\text{—NCO}):n(\text{—OH})=0.9:6$)的质量分数对聚合物多元醇性能的影响,所得聚合物多元醇的黏度和固含量结果如表 3 所示,相应的扫描电镜照片如图 5 所示。由表 3 可知,当 TMI 型大分子分散稳定剂的质量分数由 1% 增加至 8% 时,聚合物多元醇的黏度呈现先下降后上升的趋势,最佳质量分数约为 4%。较低分散稳定剂用量下,体系内单体接枝聚合速率较低,活性聚合物链意外失活可能性较高,且由于分散稳定剂用量不足,部分颗粒表面无法被完全覆盖,使得颗粒间很容易相互作用形成凝聚体^[13,14]。随着分散稳定剂用量的提升,体系内单体

聚合速率加快,空间稳定性加强,黏度下降。当分散稳定剂用量过大时,前期大分子分散稳定剂所形成的活性核的数量提升,使得单体聚合形成的乙烯基链段变短,大分子分散稳定剂易于从吸附的聚合物颗粒上解吸,同时过多的分散稳定剂会导致胶束间的链状缠结,短程空间稳定机制失效,使黏度增加甚至形成凝胶^[15]。

表2 TMI型大分子分散稳定剂的封端比例聚合物多元醇黏度和固含量的影响

Table 2 Effect of capping ratio of TMI-type macromolecular dispersion stabilizers on the viscosity and solid content of polymer polyols

$n(-\text{NCO}):n(-\text{OH})$	Viscosity/(mPa·s)	Solid content/%
3:6	>20000	41.10
2:6	16600	41.50
1:6	12200	41.80
0.9:6	11000	41.21
0.8:6	10000	42.08
0.7:6	10000	41.99
0.6:6	8800	40.98



$n(-\text{NCO}):n(-\text{OH})$: a—1:6; b—0.9:6; c—0.8:6; d—0.7:6

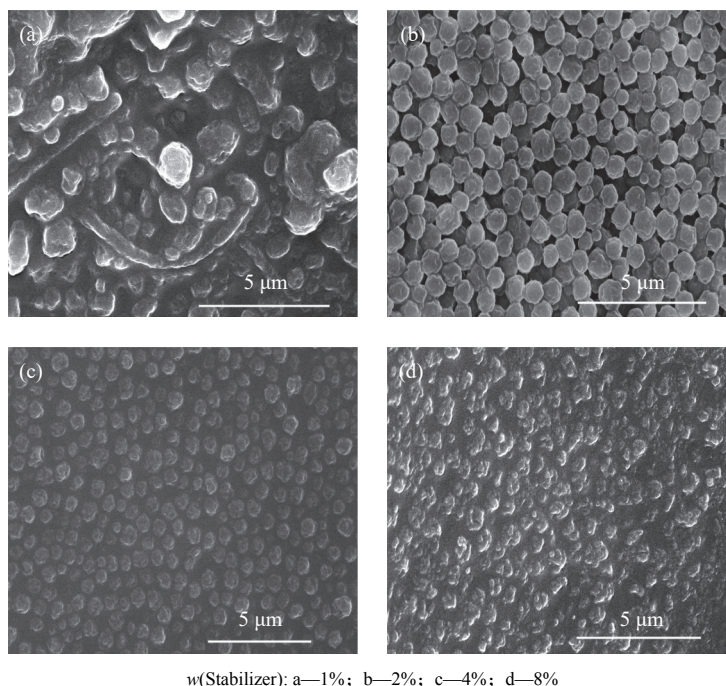
图4 不同封端比例下,聚合物多元醇的扫描电镜照片

Fig. 4 SEM images of polymer polyols at different end-capping ratios

表3 TMI型大分子分散稳定剂质量分数对聚合物多元醇黏度和固含量的影响

Table 3 Effect of mass fraction of TMI-type macromolecular dispersion stabilizer on viscosity and solid content of polymer polyols

$w(\text{Macromolecular dispersion stabilizer})/\%$	Viscosity/(mPa·s)	Solid content/%
1	57000	41.09
2	16600	41.14
3	11000	41.21
4	9500	41.10
5	9900	41.04
8	10600	40.78



w(Stabilizer): a—1%; b—2%; c—4%; d—8%

图 5 不同 TMI 型大分子分散稳定剂质量分数下, 聚合物多元醇的扫描电镜照片

Fig. 5 SEM images of polymer polyols at different mass fractions of TMI-type macromolecular dispersion stabilizer

由图 5 可知, 当大分子分散稳定剂用量较小时, 聚合物颗粒团聚黏连现象严重; 当大分子分散稳定剂用量较大时, 聚合物颗粒形貌不规则, 聚集现象明显。这主要是因为分散稳定剂用量较少时, 颗粒表面难以被稳定剂完全覆盖, 容易使得颗粒间结合形成凝聚体或胶束间形成链状缠结, 从而导致宏观凝胶。分散稳定剂用量过大的条件下, 苯乙烯及丙烯腈单体前期在各个大分子分散稳定剂末端聚合增长, 形成的微核多且硬链段短, 空间稳定效果不佳, 导致聚合物颗粒形貌不规则且容易聚集。

2.4 聚醚溶剂分子量对聚合物多元醇性能的影响

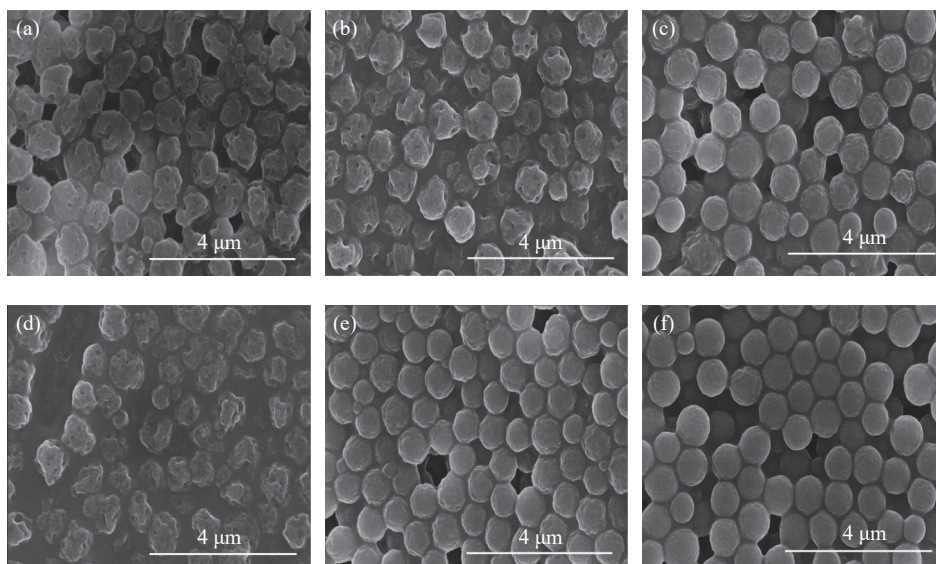
选取 4 组不同封端比例的大分子分散稳定剂并按 4% 的质量分数投料, 分别以聚醚 330 和聚醚 330 N 作为合成聚合物多元醇的溶剂, 制备一系列聚合物多元醇, 探究不同聚醚溶剂对聚合物多元醇性能的影响, 结果如表 4 所示, 相应的扫描电镜照片如图 6 所示。

由表 4 可知, 使用更低分子量的聚醚 330 作为聚醚溶剂, 制备的聚合物多元醇黏度显著下降。这可能是由于聚醚 330 具有较低的本体黏度, 从而降低了整个反应体系的黏度; 同时, 低黏度的连续相有利于传质, 使得单体在体系中的扩散更加方便, 在大分子分散稳定剂末端的聚合增长更加充分, 有利于形成稳定的核-壳结构。这种情况下, 聚合物颗粒靠近时系统构象熵减少, 颗粒间的体积排斥力增加, 体系稳定性增加, 黏度显著

表 4 聚醚溶剂分子量对聚合物多元醇黏度和固含量的影响

Table 4 Effect of molecular weight of polyether solvents on viscosity and solid content of polymer polyols

$n(-\text{NCO}):n(-\text{OH})$	Initial polyether	Viscosity/(mPa·s)	Viscosity ratio	Solid content/%
2:6	Polyether 330 N	16600	2.37	41.50
	Polyether 330	7000		40.47
1:6	Polyether 330 N	12200	2.77	41.80
	Polyether 330	4400		42.07
0.9:6	Polyether 330 N	11000	2.50	41.21
	Polyether 330	4400		41.40
0.8:6	Polyether 330 N	10000	2.33	42.08
	Polyether 330	4300		41.01



(a) $n(-\text{NCO}):n(-\text{OH})=1:6$, Polyether 330N; (b) $n(-\text{NCO}):n(-\text{OH})=0.9:6$, Polyether 330N; (c) $n(-\text{NCO}):n(-\text{OH})=0.8:6$, Polyether 330N; (d) $n(-\text{NCO}):n(-\text{OH})=1:6$, Polyether 330; (e) $n(-\text{NCO}):n(-\text{OH})=0.9:6$, Polyether 330; (f) $n(-\text{NCO}):n(-\text{OH})=0.8:6$, Polyether 330

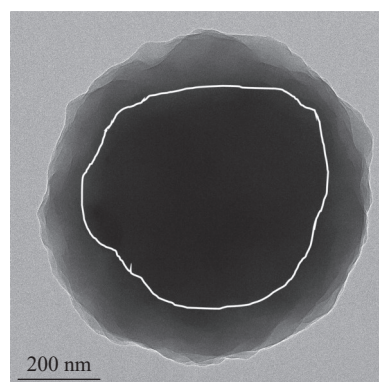
图6 不同聚醚溶剂分子量下, 聚合物多元醇的扫描电镜照片

Fig. 6 SEM images of polymer polyols at different molecular weights of polyether solvents

降低。由此可见, 采用低分子量聚醚作为聚醚溶剂有助于制备高固含量、低黏度的聚合物多元醇。

由图6可以看出, 分别使用聚醚330和聚醚330N作为聚醚溶剂时, 合成得到的聚合物颗粒的形貌存在显著差异。以聚醚330为聚醚溶剂时, 低分子量的聚醚多元醇使得体系中连续相的黏度降低, 单体在连续相中扩散更加便利, 有利于其在微核内的聚合物链末端增长, 这使得合成的聚合物颗粒表面更加光滑圆整。同时, 聚合物多元醇颗粒物近似球形, 具有明显的核-壳结构(图7), 可以推测分子链可能以卷曲的结构存在于体系中, 而不是以自由伸展的形态分散, 降低了互相缠绕的可能性, 这使得颗粒间的空间壁垒作用增强, 有助于黏度降低。

图7中的深色区域为核, 推测主要是由苯乙烯与丙烯腈的共聚物及大分子分散稳定剂与苯乙烯、丙烯腈的接枝共聚物聚集形成; 浅色区域为壳, 推测主要由大分子分散稳定剂聚醚链段部分构成。核-壳部分之间存在明显的界面, 聚醚链段主要分布在颗粒的外层, 在聚合过程中有效地阻止了颗粒之间的团聚, 发挥了有效的空间稳定作用。



Polyether solvent: Polyether 330; $n(-\text{NCO}):n(-\text{OH})=0.9:6$

图7 聚合物多元醇的透射电镜图

Fig. 7 TEM image of polymer polyol

3 结论

(1) 以TMI和六官聚醚多元醇为原料, 用一锅法成功制备了TMI型大分子分散稳定剂。

(2) 当TMI型大分子分散稳定剂的封端比例较高时, 制得的聚合物多元醇黏度显著增加; 而适当降低封端比例(0.8:6~1:6), 可以在维持聚合物多元醇高固含量的同时有效降低其黏度。

(3) 当大分子分散稳定剂的质量分数接近4%时, 可获得高固含量且黏度性能表现最佳的聚合物多元醇。

(4) 使用分子量较低的聚醚作为溶剂, 有利于制备黏度更低的聚合物多元醇。

参考文献:

- [1] ZHANG Y, SONG F, SUN L, SHE W, YUAN M, OUYANG F. Effect of ratio of styrene to acrylonitrile on synthesis and application of polymer polyols [J]. *Applied Chemical Industry*, 2023, 52(12): 3246-3251.
- [2] KAIKADE D S, SABNIS A S. Polyurethane foams from vegetable oil-based polyols: A review [J]. *Polymer Bulletin*, 2023, 80(3): 2239-2261.
- [3] VATANKHAH E, ABASNEZHAD M, NAZERIAN M, BARMAR M, PARTOVINIA A. Thermal energy storage and mechanical performance of composites of rigid polyurethane foam and phase change material prepared by one-shot synthesis method [J]. *Journal of Polymer Research*, 2022, 29(3): 81.
- [4] 刘磊, 郭琰, 段飞, 赵丹阳. 硬质聚氨酯泡沫材料制备与成型工艺的研究进展 [J]. *机械科学与技术*, 2023, 42(2): 267-281.
LIU L, GUO Y, DUAN F, ZHAO D Y. Advances in fabrication and moulding process of rigid polyurethane foam materials [J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2023, 42(2): 267-281.
- [5] SAIDE V G D P, DE OLIVEIRA B R, DO NASCIMENTO C S, BORGES R F D O, SCHEID C M, CALÇADA L A. Influence of solids concentration and solid/polymer interaction on the apparent viscosity of drilling fluids [J]. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 2021, 38(1): 47-60.
- [6] JEON Y Y, JEON E S, KIM Y S. Effect of flame-retardant melamine and dispersants on the mechanical, thermal, and foaming properties of flexible polyurethane foam [J]. *Fire and Materials*, 2024, 48(3): 311-323.
- [7] KANG Y F, ZHU A P. Synthesis of SMA-PEG hyperdispersant and its stabilization mechanism for carbon black [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2023, 140(26): e54001.
- [8] 张敏, 何健怡, 沈钦阳, 梁业如, 刘应亮, 徐飞, 熊开容. 三维多孔弹性体吸附剂的制备及其高效去除染料特性 [J]. *功能高分子学报*, 2022, 35(6): 540-547.
ZHANG M, HE J Y, SHEN Q Y, LIANG Y R, LIU Y L, XU F, XIONG K R. Synthesis of three-dimensional porous elastomer adsorbent and its properties of highly efficient dyes removal [J]. *Journal of Functional Polymers*, 2022, 35(6): 540-547.
- [9] PIZZINI L, LEVIS W, RAMLOW G, PATTON J. Highly-stable graft copolymer dispersions in polyols containing unsaturation and polyurethanes prepared therefrom: US, 3823201 [P]. 1974-7-9.
- [10] 孙霞, 薛韬, 余彩莉, 张发爱. 聚醚胺改性聚苯乙烯马来酸酐超分散剂的制备及其在分散 TiO₂ 中的应用 [J]. *涂料工业*, 2024, 54(5): 39-44.
SUN X, XUE T, YU C L, ZHANG F A. Preparation of polyetheramine modified styrene-maleic anhydride hyperdispersant and its application in TiO₂ dispersion [J]. *Paint & Coatings Industry*, 2024, 54(5): 39-44.
- [11] O. M. Musa, *Handbook of Maleic Anhydride Based Materials*[M], Switzerland: Springer International Publishing, 2016: 59-149.
- [12] IZARRA I, SIMÓN D, MOLINA M, RODRÍGUEZ J F, CARMONA M. Synthesis of trifunctional graft polymer polyether polyols employing a silica based gel as non-aqueous dispersant [J]. *European Polymer Journal*, 2019, 115: 298-312.
- [13] CORRIGAN N, JUNG K, MOAD G, HAWKER C J, MATYJASZEWSKI K, BOYER C. Reversible-deactivation radical polymerization (Controlled/living radical polymerization): From discovery to materials design and applications [J]. *Progress in Polymer Science*, 2020, 111: 101311.
- [14] KUTZ M. *Applied Plastics Engineering Handbook* [M]. Third Edition. Oxford: William Andrew Publishing, 2024: 559-575.
- [15] LI Z, SHAKIBA S, DENG N, CHEN J, LOUIE S M, HU Y. Natural organic matter (NOM) imparts molecular-weight-dependent steric stabilization or electrostatic destabilization to ferrihydrite nanoparticles [J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(11): 6761-6770.

(责任编辑: 王吉晶)