

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2022.06.021

冷聚合板状可发性 PMMA 制备及性能

李滨¹, 韩菁¹, 张潇萌¹, 范桦¹, 危若红¹, 冯羽婷¹, 袁新强^{1,2}

(1. 陕西理工大学材料科学与工程学院, 陕西汉中 723000;

2. 陕西理工大学矿渣综合利用环保技术国家地方联合工程实验室, 陕西汉中 723000)

摘要:以聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA) 模塑粉为基料, 甲基丙烯酸甲酯 (MMA) 为活性溶剂, 过氧化苯甲酰/*N*, *N*-二羟乙基对甲苯胺 (BPO/DEPT) 为引发剂, 偶氮二异丁腈 (AIBN) 为活性发泡剂, 通过冷聚合制备板状可发性 PMMA。研究了 PMMA 模塑粉浓度、BPO 用量、BPO 与 DEPT 质量比对板状可发性 PMMA 转化率、平均分子量及分布、表面硬度和透光率的影响。通过扫描电子显微镜观察了板状可发泡 PMMA 断面形貌, 同步热分析仪测试不同 PMMA 模塑粉浓度条件下, 板状可发性 PMMA 中 AIBN 高峰吸热分解温度。结果表明, 当 PMMA 模塑粉浓度为 30%, BPO 用量为 0.18%, BPO 与 DEPT 质量比为 1.5, 冷聚合制备板状可发性 PMMA 的综合性能优异, 可为后续负压微发泡 PMMA 提供了原料保障和技术支撑, 也可为热塑性废塑料高值化回收利用提供一条新的路径。

关键词: 甲基丙烯酸甲酯; BPO/DEPT 引发剂; 冷聚合; 板状可发性 PMMA

中图分类号: TQ323.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2022)06-0122-07

Preparation and Properties of Cold Polymeric Plate-Like Foamable PMMA

Li Bin¹, Han Jing¹, Zhang Xiaomeng¹, Fan Hua¹, Wei Ruohong¹, Feng Yuting¹, Yuan Xinqiang^{1,2}

(1. School of Materials Science and Engineering, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723000, China;

2. National and Local Joint Engineering Laboratory for Slag Comprehensive Utilization and Environmental Technology, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723000, China)

Abstract: Plate-like foamable poly methyl methacrylate (PMMA) was synthesized through cold polymerization by using PMMA molding powder as a matrix and methyl methacrylate (MMA), benzoyl peroxide/*N*, *N*-dihydroxyethyl *p*-toluidine (BPO/DEPT), and azodiisobutyronitrile (AIBN) acted as the active solvent, initiator, and foaming agent respectively. The effects of PMMA molding powder concentration, BPO dosage, quality ratio of BPO and DEPT on the conversion rate, average molecular weight and distribution, surface hardness and light transmittance of plate-like foamable PMMA were investigated. Scanning electron microscopy was used to evaluate the fracture morphology of PMMA, and synchronous thermal analyzer were used to test the peak endothermic decomposition temperature of AIBN in plate-like expandable PMMA under different PMMA molding powder concentrations. Results show that the plate-like foamable PMMA with optimal properties is obtained when the concentration of PMMA molding powder is 30%, and ratios of BPO to MMA and BPO to DEPT are 0.18% and 1.5 respectively. The technology for the synthesis of the plate-like foamable PMMA provide the raw materials and technical support necessary for the preparation of negative-pressure microfoaming PMMA, as well as a new avenue for the high-value recycling and utilization of thermoplastic waste plastics.

Keywords: methyl methacrylate; BPO/DEPT initiator; cold polymerization; plate-like foamable PMMA

可发性聚合物是一种在一定压力和温度条件下可膨胀的聚合物材料, 通常采用悬浮聚合法生产,

是一种以“发泡剂为核、热塑性聚合物为壳”的聚合物粒子, 亦称热膨胀微球。譬如, 以甲基丙烯酸甲酯

基金项目: 2021 年陕西省大学生创新创业训练计划项目 (S202110720047)

通信作者: 袁新强, 硕士生导师, 副教授, 主要研究方向为高分子材料改性及应用研究

收稿日期: 2022-04-07

引用格式: 李滨, 韩菁, 张潇萌, 等. 冷聚合板状可发性 PMMA 制备及性能 [J]. 工程塑料应用, 2022, 50(6):122-128.

Li Bin, Han Jing, Zhang Xiaomeng, et al. Preparation and properties of cold polymeric plate-like foamable PMMA[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(6):122-128.

(MMA) 为单体,惰性碳氢化合物(正丁烷、正己烷、异戊烷等)为发泡剂,悬浮聚合法制备核壳结构热膨胀微球(TEMs)^[1-5],通过质量负载,在 TEMs 表面强力覆盖 1.5% 聚吡咯制备可在印刷电子和抗静电材料领域应用的导电可膨胀微球^[5]。这种热膨胀微球可用于生产具有三维图案效果纸张、墙纸,提升印染、油墨、打印等行业品质,生产具有减震、装饰、保温作用的发泡制品^[6-8]。譬如,Andersson 等^[9]提出了一种由聚乳酸(PLA)和 TEMs 组成的新型复合长丝,可用于融丝制造(3D 打印技术),可减少 PLA 用量,还可通过改变喷嘴温度实现同一物体在打印和制造过程中直接调整产生不同密度层。Cuevas 等^[10]将 TEMs 引入 3D 打印水泥基复合材料中,开发一种 3D 打印轻量化混凝土混合物,既减轻了建筑物结构自重,提高其保温性能,又可改善 3D 打印水泥基复合材料的形状保持率、流动性、凝固时间和早期硬化混合物性能等,TEMs 能提升水泥粘合剂的强度和韧性^[11]。Piazza 等^[12]采用 TEMs 对结构环氧胶粘剂进行改性,探讨 TEMs 对环氧负载单搭接接头力学性能和可逆性。Lua 等^[13]采用 EPS 成功制备了阻燃型膨胀聚苯乙烯轻质刨花板,可作为建筑填充材料应用于工程墙板。除悬浮法制备可发性聚合物外,还可采用溶胀法^[14]、浸渍法^[7]、乳液聚合法^[15]制备,可发性聚合物种类越来越多,功能越来越强。

可发性聚合物发泡得到制品,通常会失去原有聚合物力学性能,也很难有效防止制品在成型过程中出现的各种缺陷问题。早在 20 世纪 50 年代,McIntire 和 Lamos 就发现了聚合物的微孔尺寸,20 世纪 80 年代,麻省理工学院提出聚合物微发泡概念,逐渐发展了间歇成型、热致相分离、连续挤出和注塑成型等一系列聚合物微发泡成型技术,其发泡制品可有效避免现有可发性聚合物制品的不足^[16]。然而,这种聚合物微发泡成型过程中普遍采用很高的压力(几十、上百甚至几百个大气压),对设备要求苛刻,且存在表面质量、能耗和环境污染等问题。

鉴于聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)具有优异光泽性,逐渐在建筑装饰装潢领域应用。然而,PMMA 价格昂贵,其在建筑装饰装潢领域应用还聚焦在 KTV、酒店、商场等一些高档商业场所。建筑装饰装潢用 PMMA 板材轻量化研究具有很重要的工程价值。为了 PMMA 板材轻量化,降低生产 PMMA 板材的成本,结合可发性聚合物和聚合物微

发泡各自特点,笔者采用过氧化苯甲酰/*N,N*-二羟乙基对甲苯胺(BPO/DEPT)组成的有机氧化还原引发剂,冷聚合制备板状可发性 PMMA,研究 PMMA 模塑粉浓度、BPO 用量、BPO 与 DEPT 质量比对板状可发性 PMMA 转化率、平均分子量及分布、表面硬度和透光率的影响。进一步,以优化 PMMA 模塑粉浓度、BPO 用量、BPO 与 DEPT 质量比制备的板状可发性 PMMA 进行负压微发泡实验与分析。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PMMA 模塑粉:工业级,韩国 LG 集团;

MMA:分析纯,成都市科隆化学品有限公司;

偶氮二异丁腈(AIBN):分析纯,天津市光复精细化工研究所;

过氧化二苯甲酰(BPO):分析纯,天津市致远化学试剂有限公司;

N,N-二羟乙基对甲苯胺(DEPT):分析纯,山东西亚化学工业公司。

1.2 主要设备及仪器

扫描电子显微镜(SEM):JSM-6390LV 型,日本电子株式会社;

凝胶渗透色谱仪:LC-20 型,日本岛津公司;

同步热分析仪:TGA/DSC1 型,瑞士梅特勒-托利多公司;

针式邵氏硬度计:LX-D-1 型,韦度电子有限公司;

透光率仪:WTM-100 型,上海精密仪器仪表有限公司。

1.3 实验方法与过程

采用冷聚合制备板状可发性 PMMA,具体包括图 1 所示的溶解、混合、脱气、静态浇铸、锁模和冷聚合等工序,研究不同的冷聚合配方条件下,具体包括 PMMA 模塑粉浓度(20%,25%,30%,35%,40%,以 MMA 的质量为计量基准)、BPO 用量(0.12%,0.15%,0.18%,0.21%,0.24%,以 MMA 的质量为计量基准)、BPO 与 DEPT 质量比(0.6,0.75,1,1.5),制备板状可发性 PMMA。

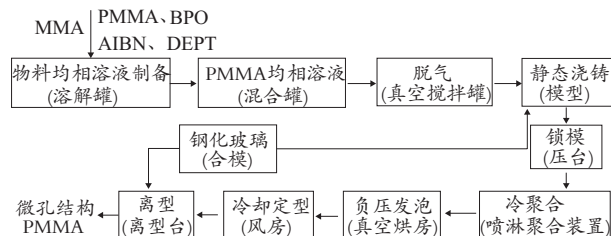


图1 冷聚合-负压微发泡 PMMA 工艺流程图

1.4 性能测试

采用 SEM 观察板状可发性 PMMA 和微孔结构 PMMA 断面形貌。

采用丙酮-乙醇溶解析出实验以测量板状可发性 PMMA 的转化率,丙酮为溶剂、乙醇为沉淀剂,计算沉淀析出的 PMMA 占待测 PMMA 的质量百分比。

采用凝胶渗透色谱仪测试板状可发性 PMMA 的平均分子量及分布,聚苯乙烯标准样,Shodex KF-805 色素柱,柱温 40℃,NMP 流动相,流速 1 mL/min。

采用针式邵氏硬度计测量可发泡块状 PMMA 的表面硬度。

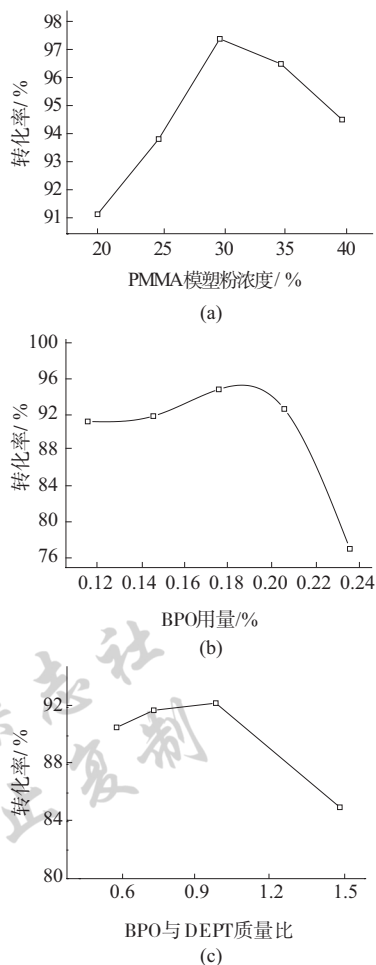
采用同步热分析仪中的热失重 (TG) 仪,20℃/min 升温速率下测试 AIBN 高峰吸热分解温度。

采用透光率仪测量板状可发性 PMMA 的透光率。

2 结果与分析

2.1 转化率

图 2 为板状可发性 PMMA 转化率随 PMMA 模塑粉浓度、BPO 用量、BPO 与 DEPT 质量比的变化曲线。由图 2 可看出,随着 PMMA 模塑粉浓度、BPO 用量、BPO 与 DEPT 质量比增大,板状可发性 PMMA 转化率呈先增大后减小趋势,当 PMMA 模塑粉浓度为 30%、BPO 用量为 0.18%、BPO 与 DEPT 质量比为 1 时,板状可发性 PMMA 转化率都能达到峰值。原因是,PMMA 模塑粉浓度增加,相当于 PMMA 预聚料转化率变高,冷聚合程度(转化率)增大,但随 PMMA 模塑粉浓度增加,体系黏度太大,不利于 BPO 与 DEPT 引发体系形成,DEPT 促进 BPO 分解效应差,BPO 分解速率降低,体系中苯甲酰自由基浓度降低。根据自由基聚合反应动力学原理可知,体系聚合反应速度降低,即转化率降低。随 BPO 用量或 BPO 与 DEPT 质量比增加,DEPT 促进 BPO 分解形成苯甲酰自由基浓度增加,聚合反应速度大大提升,转化率会提高,但 BPO 用量过多或 BPO 与 DEPT 质量比太大,DEPT 促进 BPO 分解形成苯甲酰自由基浓度太高,聚合反应速度太快,反应放热太集中,局部温度会过高,导致 BPO 过度分解,BPO 引发效率大大降低,进而影响转化率。局部温度过高会激发体系中 AIBN 分解形成自由基,引发 MMA 聚合,提高转化率,但贡献不大。

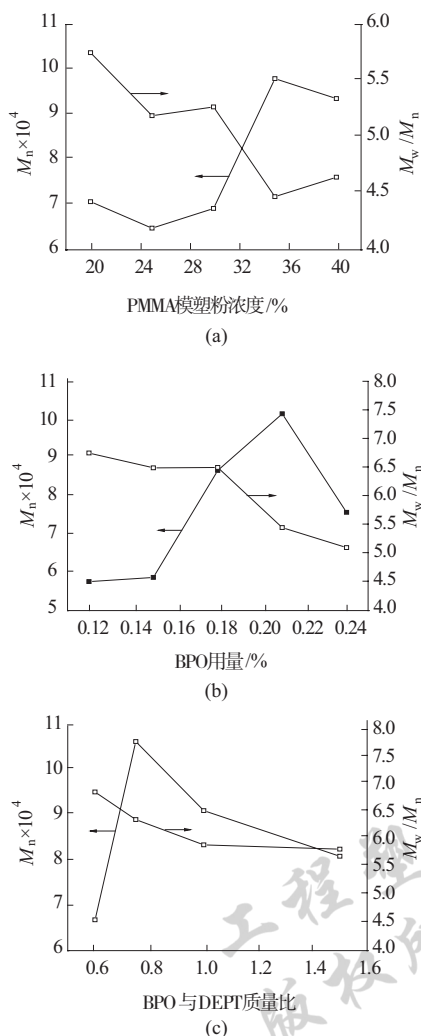


a—PMMA 模塑粉浓度;b—BPO 用量;c—BPO 与 DEPT 质量比

图 2 板状可发性 PMMA 转化率变化曲线

2.2 平均分子量及分布

图 3 为板状可发性 PMMA 平均分子量 (M_n) 及其分布 (M_w/M_n) 随 PMMA 模塑粉浓度、BPO 用量、BPO 与 DEPT 质量比的变化曲线。由图 3 可看出,随着 PMMA 模塑粉浓度、BPO 用量、BPO 与 DEPT 质量比增大,板状可发性 PMMA 平均分子量呈先增大后减小趋势,分子量分布都会变窄,上述现象完全与自由基聚合反应动力学原理吻合。究其根源在于 PMMA 模塑粉浓度增加,相当于 PMMA 预聚料转化率变高,体系黏度变大,PMMA 链自由终止困难,只能激发周围的 MMA 分子进行增长反应,分子量升高,分子量分布变窄(称“黏度效应”),随着 BPO 用量或 BPO 与 DEPT 质量比增加,DEPT 促进 BPO 分解形成苯甲酰自由基浓度增加,PMMA 链增长的活性中心增多,PMMA 链增长速度加快,而 PMMA 链终止速度还受体系黏度的约束,PMMA 链不易终止,分子量会升高,分子量分布变窄,且转化率升高,最终表现为:板状可发性 PMMA 平均分子



a—PMMA 模塑粉浓度; b—BPO 用量; c—BPO 与 DEPT 质量比

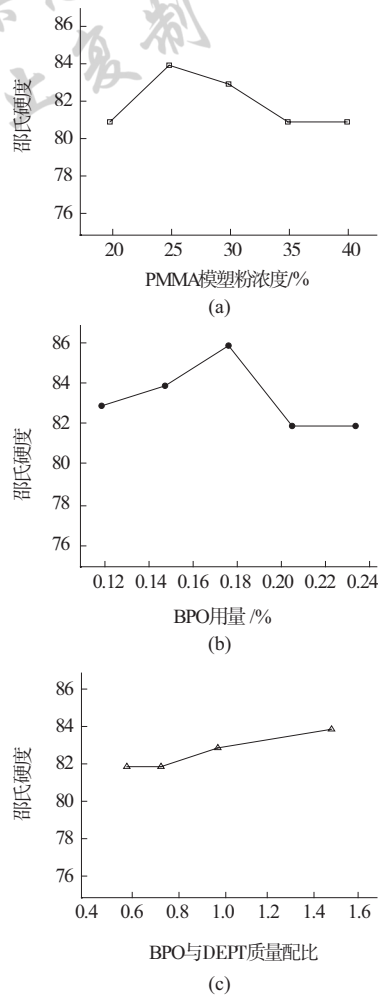
图3 板状可发性 PMMA 平均分子量及分布变化曲线

量随着 PMMA 模塑粉浓度、BPO 用量、BPO 与 DEPT 质量比增大先增大,分子量分布变窄。当 PMMA 模塑粉浓度进一步增加时,体系的黏度效应依然存在。同时,体系中聚合反应速度会降低,即终止速度都降低,且 PMMA 链终止速度还受体系黏度的约束,分子量分布变窄,当 BPO 用量过多或 BPO 与 DEPT 质量比太大,DEPT 促进 BPO 分解形成苯甲酰自由基浓度太高,聚合反应速度太快,反应放热太集中,局部温度会过高,会导致 BPO 过度分解,形成过多低活性苯自由基,苯甲酰自由基浓度会大大降低,PMMA 链增长速度和链终止速度都会随之降低,且 PMMA 链终止速度还受体系黏度的约束,分子量下降,分子量分布变窄,虽然会激发体系中 AIBN 分解形成自由基,引发 MMA 聚合,但引发活化能高,引发速度慢,对分子量及分布的贡献不明显,体系转化率还会降低,最终表现为:板状可发性

PMMA 平均分子量随着 PMMA 模塑粉浓度、BPO 用量、BPO 与 DEPT 质量比进一步增大有所降低,分子量分布继续变窄。

2.3 表面硬度

图4为板状可发性 PMMA 表面硬度随 PMMA 模塑粉浓度、BPO 用量、BPO 与 DEPT 质量比的变化曲线。表面硬度与板状可发性 PMMA 平均分子量有关,平均分子量越高,表面硬度越大。所以,板状可发性 PMMA 表面硬度应随着 PMMA 模塑粉浓度和 BPO 用量增大,呈先增大后减小趋势,这点与图4非常吻合。板状可发性 PMMA 表面硬度应随着 BPO 与 DEPT 质量比增大呈先增加后减小趋势,这点与图4不吻合。原因在于,表面硬度还与板状可发性 PMMA 分子量分布有关,分子量分布越窄,表面硬度越高,发现图4c所示变化趋势与此理论较吻合。仅考虑单因素的话,PMMA 模塑粉质量浓度为25%、BPO 用量为0.18%、BPO 与 DEPT 质



a—PMMA 模塑粉浓度; b—BPO 用量; c—BPO 与 DEPT 质量比

图4 板状可发性 PMMA 表面硬度变化曲线

量比为 1.5,制备板状可发性 PMMA 表面硬度都能达到最高值。

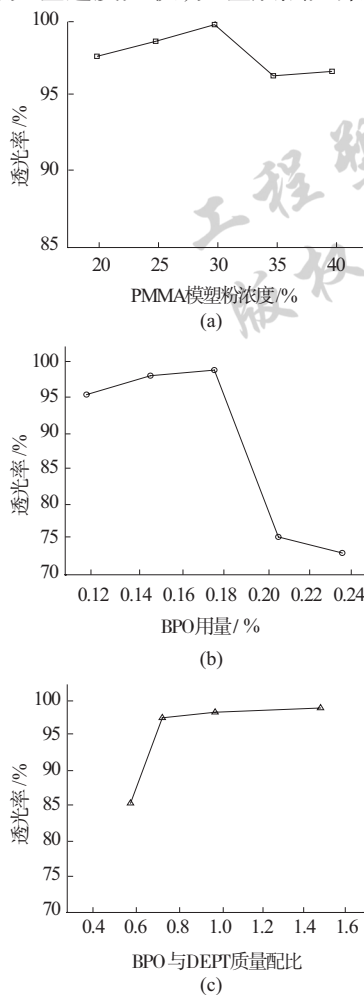
2.4 透光率

图 5 为板状可发性 PMMA 透光率随 PMMA 模塑粉浓度、BPO 用量、BPO 与 DEPT 质量比的变化曲线。由图 5a 可见,PMMA 模塑粉浓度对板状可发性 PMMA 透光率影响不大,透光率都能达到 96% 及其以上。图 5b 显示,板状可发性 PMMA 透光率随着 BPO 用量增加先增大后降低,在 BPO 用量为 0.18% 处存在明显的降低突变现象,突变前透光率很高,突变后透光率也能保持在 75% 以下。从图 5c 明显看出,板状可发性 PMMA 透光率随着 BPO 与 DEPT 质量比增加而增大,在 0.75 处存在明显的增大突变现象,透光率都在 95% 以上。板状可发性 PMMA 透光率突变原因在于, BPO 用量太多, DEPT 促进 BPO 分解形成苯甲酰自由基浓度太高,聚合反应速度太快,反应放热太集中,局部温

度会过高,导致 BPO 过度分解成苯自由基,苯自由基又会耦合终止形成联苯,致使板状可发性 PMMA 发黄,透光率自然会大大降低。BPO 与 DEPT 质量比太低时,板状可发性 PMMA 分子量分布较宽,对光的散射作用越明显,透光率也会受影响。虽然,板状可发性 PMMA 透光率不同程度上受到 PMMA 模塑粉浓度、BPO 用量、BPO 与 DEPT 质量比的影响,但是不影响其形成均相体系,这是后续负压微发泡成功与否的关键。仅考虑单因素,PMMA 模塑粉可为任意浓度、BPO 用量不大于 0.18%、BPO 与 DEPT 质量比不低于 0.75,板状可发性 PMMA 透光率基本不受影响,且能保证制备板状可发性 PMMA 为均相体系。

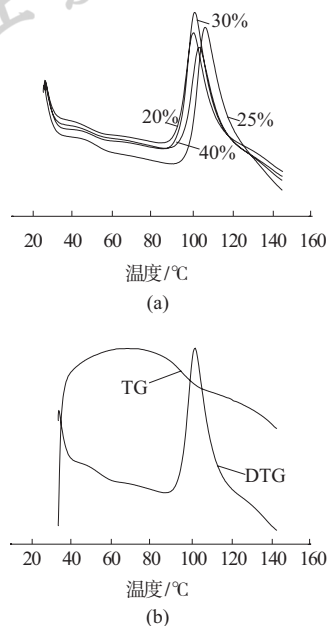
2.5 TG 和 DTG 分析

为验证后续负压微发泡思路的可行性和系统研究负压微发泡工艺、泡孔形态、发泡机理等,还通过 TG 测试不同 PMMA 模塑粉浓度条件下制备板状可发性 PMMA 中 AIBN 高峰吸热分解的温度,如图 6 所示。



a—PMMA 模塑粉浓度; b—BPO 用量; c—BPO 与 DEPT 质量比

图 5 板状可发性 PMMA 透光率



a—不同模塑粉浓度时 PMMA 的 DTG ;

b—模塑粉浓度 30% 时 PMMA 的 TG 和 DTG

图 6 板状可发性 PMMA 的 TG 及 DTG 曲线

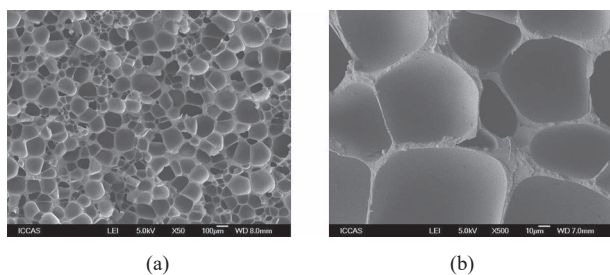
由图 6a 可看出,板状可发性 PMMA 在 100℃ 左右出现吸热峰,这是板状可发性 PMMA 中 AIBN 急剧吸热分解产生 N_2 , PMMA 发生膨胀所致。随着 PMMA 模塑粉浓度增加,出现吸热峰对应的温度呈增大后减小趋势,这与板状可发性 PMMA 平均分子量有关,这点可在图 3a 中得到证实,平均分子

量越高,板状可发性 PMMA 分子链段运动越困难,对应板状可发性 PMMA 中 AIBN 热分解也越困难。由图 6b 还可得知, AIBN 在吸热峰值的分解速率最高, AIBN 分解速率最高时分解温度可建议作为板状可发性 PMMA 负压微发泡温度。由此可见,板状可发性 PMMA 负压微发泡温度应控制在 110℃ 以上。

2.6 负压微发泡实验

综合考虑 PMMA 模塑粉浓度、BPO 用量、BPO 与 DEPT 质量比对板状可发性 PMMA 转化率、平均分子量及分布、表面硬度和透光率的影响,认为 PMMA 模塑粉浓度为 30%、BPO 用量为 0.18%、BPO 与 DEPT 质量比为 1.5 的配方条件下,冷聚合制备的板状可发性 PMMA 综合性能优异。按照图 1 所示冷聚合-负压微发泡 PMMA 工艺流程,以 45℃ 预聚 60 min、28℃ 后聚 4 h、40℃ 后处理 2 h 冷聚合工艺,优化的冷聚合配方制备板状可发性 PMMA。宏观上,肉眼观察冷聚合制备板状可发性 PMMA 无气泡,外观上可等同市场化的透明 PMMA。

这说明,在冷聚合制备板状可发性 PMMA 过程中, AIBN 没有提前分解产生 N_2 , BPO 没有过度分解产生 CO_2 。或者说, AIBN 提前分解产生 N_2 和 BPO 过度分解产生 CO_2 ,不足以产生气泡。按照 2.5 给出的建议负压微发泡温度,将冷聚合制备板状可发性 PMMA 连同模型一起置于 140℃ 真空烘箱中,0.05 MPa 发泡 2 h 得到微孔结构 PMMA,其断面形貌如图 7 所示。



(a) (b)
放大倍数: a— $\times 50$; b— $\times 500$

图 7 微孔结构 PMMA 断面形貌

从图 7 可明显看出,冷聚合制备板状可发性 PMMA 在负压条件下,可以进行发泡,泡孔较均匀,孔径在 50~200 μm ,孔壁厚为 0.5 μm 左右。虽然离理想状态的微发泡 PMMA(一般不超过 10 μm)还存在一定差距,后续在实现微孔 PMMA 泡孔结构可控,改善泡孔形态和成型制品表面质量等方面仍需进一步研究探讨。但是,这种冷聚合-负压微

发泡聚合物的研究思路可提供发泡条件温和的聚合物微发泡路径,也可作为热塑性废塑料高值化回收利用提供一条新的路径。

3 结论

(1) 以 PMMA 模塑粉为基料, MMA 为活性溶剂, BPO/DEPT 为引发剂, AIBN 为活性发泡剂,通过 45℃ 预聚 60 min、28℃ 后聚 4 h、40℃ 后处理 2 h 的冷聚合工艺成功制备出板状可发性 PMMA。

(2) 当 PMMA 模塑粉浓度为 30%, BPO 用量为 0.18%, BPO 与 DEPT 质量比为 1.5,冷聚合制备板状可发性 PMMA 无气泡且呈透明状,表面硬度高,平均分子量大和分布窄,在 110℃ 存在明显热分解平台和吸热峰。

(3) 负压微发泡实验表明,冷聚合制备的板状可发性 PMMA 是在负压条件下进行均匀发泡的,可为聚合物微发泡提供一条发泡条件温和的实现路径,特别适合热塑性废塑料的高值化利用。

参考文献

- [1] Jonsson M, Nordin O, Malmström E, et al. Suspension polymerization of thermally expandable core/shell particles[J]. *Polymer*, 2006, 47(10):3 315–3 324.
- [2] Hou ZhaoSheng, Kan ChengYou. Preparation and properties of thermoexpandable polymeric microspheres[J]. *Chinese Chemical Letters*, 2014, 25(9):1 279–1 281.
- [3] Hou Zhaosheng, Xia Yiran, Qu Wenqiang, et al. Preparation and properties of thermoplastic expandable microspheres with P(VDC-AN-MMA) shell by suspension polymerization[J]. *International Journal of Polymeric Materials*, 2015, 64(8):427–431.
- [4] 谢贵明,包永忠.发泡剂存在下甲基丙烯酸甲酯悬浮聚合制备热膨胀微球[J]. *高校化学工程学报*, 2016, 30(5):1 171–1 177.
- [5] Xie Guiming, Bao Yongzhong. Preparation of thermally expandable microspheres by methyl methacrylate suspension polymerization assisted with a foaming agent[J]. *Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities*, 2016, 30(5):1 171–1 177.
- [6] Chen Shuying, Sun Zhicheng, Li Luhai, et al. Preparation and characterization of conducting polymer-coated thermally expandable microspheres[J]. *Chinese Chemical Letters*, 2017, 28(3):658–662.
- [7] Kawaguchi Y, Oishi T. Synthesis and properties of thermoplastic expandable microspheres:the relation between crosslinking density and expandable property[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2004, 93:505–512.
- [8] 陆庆章.可发性聚烯烃的初步研究[D].北京:北京化工大学, 2011.
- [9] Lu Qingzhang. Study on the expandable polyolefins[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2011.
- [10] Maghfouri M, Alimohammadi V, Gupta R, et al. Drying shrinkage

- properties of expanded polystyrene (EPS) lightweight aggregate concrete: A review[J]. Case Studies in Construction Materials, 2022, 16. DOI.org/10.1016/j.cscm.2022.e00919.
- [9] Andersson H, Örtengren J, Zhang Renyun, et al. Variable low-density polylactic acid and microsphere composite material for additive manufacturing[J]. Additive Manufacturing, 2021, 40. DOI.10.1016/j.addma.2021.101925.
- [10] Cuevas K, Chougan M, Martin F, et al. 3D printable lightweight cementitious composites with incorporated waste glass aggregates and expanded microspheres-Rheological, thermal and mechanical properties[J]. Journal of Building Engineering, 2021, 44. DOI.10.1016/j.jobe.2021.102718.
- [11] Aglan H, Shebl S, Morsy M, et al. Strength and toughness improvement of cement binders using expandable thermoplastic microspheres[J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(8):2 856–2 861.
- [12] Piazza G, Burczyk M, Gerini-Romagnoli M, et al. Effect of thermally expandable particle additives on the mechanical and reversibility performance of adhesive joints[J]. Journal of Advanced Joining Processes, 2022, 5. DOI.10.1016/j.jajp.2021.100088.
- [13] Lua Jinhan, Wang Di, Jiang Peng, et al. Design of fire resistant, sound-absorbing and thermal-insulated expandable polystyrene based lightweight particleboard composites[J]. Construction and Building Materials, 2021, 305. DOI.10.1016/j.conbuildmat.2021.124773.
- [14] Yan Juntao, Wang Chunlei, Gao Yan, et al. Anchoring conductive polyaniline on the surface of expandable polystyrene beads by swelling-based and in situ polymerization of aniline method[J]. Chemical Engineering Journal, 2011, 172(1):564–571.
- [15] 李守平,周琼,顾瑞军,等.种子乳液聚合制备可发气 P(St/BVA-PS) 核壳微球 [J]. 合成橡胶工业, 2003(2):88–90.
- Li Shouping, Zhou Qiong, Gu Ruijun, et al. Preparation of foamable P(St/BVA)-PS core-shell microparticles by seeding emulsion polymerization[J]. China Synthetic Rubber Industry, 2003(2):88–90.
- [16] Okolieocha C, Raps D, Subramaniam K, et al. Microcellular to nanocellular polymer foams: Progress (2004–2015) and future directions—A review[J]. European Polymer Journal, 2015, 73 (11):500–519.

投稿须知

1 稿件内容

稿件应注重科学性、实用性及时效性,要求技术新颖,论点明确,论据可靠,数据准确,文字通顺、简练。稿件内容必须真实,避免抄袭,请作者文责自负。引用他人成果时,请按《著作权法》有关规定说明出处。内容应未曾发表过或被其他出版物刊载过,且无一稿多投。

2 稿件要求

凡属于重大科技获奖的论文和重点项目资助的论文,请在来稿第一页注明名称及批准号,本刊将优先刊登。

(1) 题目、作者署名及单位。题目力求简明、醒目,反映出文章的主题,一般不超过 20 个汉字。作者姓名在题目下按序排列,不同工作单位的作者,应在姓名右上角加注阿拉伯数字序号。作者单位须写全称并注明省份、城市和邮政编码。联系人信息(包括姓名,学历或职称,主要研究方向)注在第一页下方。

(2) 摘要及关键词。论文需要同时提供中文和英文摘要,摘要以提供论文的内容梗概为目的,不加评论和补充解释,应简明、确切地论述研究目的、原理和结论,具有相对独立性。中文和英文摘要均要求采用报道性摘要类型。具体要求:中英文摘要均为一段式,内容比较具体,一般需要列举关键数据。中英文摘要内容基本一致,中文摘要以 200~300 字为宜,英文摘要可略详。关键词要求 3~8 个。

(3) 正文。正文各部分都应简洁明了。层次标题一律用阿拉伯数字连续编号,尽量减少层次;不同层次的数字之间用小圆点相隔,末位数字不加标点符号。如“1”,“1.1”等。文中量、单位及符号的使用应符合国际标准和国家标准。

(4) 图表。图表要设计合理,简单自明。每一幅图都应有图序和简短确切的图名,横纵坐标均要注明物理量及其单位,线条图要用矢量格式的图,或将*.opg, *.dwg, *.eps 等格式的图打包压缩随投稿一起上传。表格请使用三线表,每一表格都应有表序和简短确切的表题。图表标题一律用中文表达。

(5) 参考文献。以作者亲自阅读过的主要原始文献为限,不可引用非公开出版或发表的文献,不能引用其他文章中引用的但未经核对原文的文献,要注意引用最新的文献。参考文献要有一定的数量,研究性论文至少 15 篇。参考文献的著录按文章中引用的顺序依次排列,中文参考文献要有对照英文部分(英文部分不编号)。无论中外文的作者,一律采用姓前名后的形式著录;作者不超过 3 人时可全部著录,超过 3 人时,只著录前 3 位,其后加“等”或“et al”。综述类论文的参考文献著录项目适当简化,可参见本刊相关栏目文章样式。作者对所引文献的准确性和完整性负责。

3 投稿方式

请作者登陆“工程塑料网”(http://www.epa1973.net),进入杂志社之页,点击“网上投稿”后投稿。来稿请注明详细地址、电话、邮箱等信息,便于通知联系。一般一个月左右可以查询稿件审理意见,超过 3 个月未收到修改意见或回复的可自行处理。

4 注意事项

稿件一经录用,将同时被国内外著名数据库收录,作者著作权使用费与本刊稿酬一次性给付。如作者不同意收录,请在投稿时声明,否则将视为同意。