

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2020.11.029

PBT/有机蒙脱土纳米复合材料研究进展

徐定红^{1,2}, 郭建兵¹, 周颖¹, 伍宏明¹, 何玮顼¹, 高成涛¹, 秦舒浩¹

(1. 国家复合改性聚合物材料工程技术研究中心, 贵阳 550014; 2. 四川大学高分子材料研究所, 高分子材料与工程国家重点实验室, 成都 610065)

摘要: 聚焦聚对苯二甲酸丁二酯 (PBT)/蒙脱土 (OMMT) 复合材料研究领域, 系统性介绍了这类复合材料的原料配方、制备方法及与加工工艺对 PBT 及其纳米复合材料结构与性能的影响, 同时引用大量文章加以叙述。指出如能找到一种合适的方法使得 OMMT 在 PBT 熔融加工过程中使其有机官能团不分解或少分解, 将有利于 PBT/OMMT 纳米复合材料可以实现产业化。

关键词: 聚对苯二甲酸丁二酯; 有机蒙脱土; 纳米; 进展

中图分类号: TQ320.663 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2020)11-0154-05

A Review on PBT/Organo-Montmorillonite Nanocomposites

Xu Dinghong^{1,2}, Guo Jianbing¹, Zhou Ying¹, Wu Hongming¹, He Weidian¹, Gao Chengtao¹, Qin Shuhao¹

(1. National Engineering Research Center for Compounding and Modification of Polymeric Materials, Guiyang 550014, China; 2. Polymer Research Institute of Sichuan University, The State Key Laboratory of Polymer Materials Engineering, Chengdu 610065, China)

Abstract: The research field of polybutylene terephthalate (PBT)/montmorillonite (OMMT) composite materials was focused on, and the raw material formula, preparation method and processing technology of such composite materials were systematically introduced. The impact of its nanocomposite material structure and performance was described by a large number of articles. It is pointed out that if an appropriate method can be found to make the organic functional groups of OMMT not decompose or decompose little during PBT melting process, it will be beneficial to the industrialization of PBT/OMMT nanocomposites.

Keywords: poly(butylene terephthalate); organo-montmorillonite; nano; review

由于有机改性蒙脱土 (OMMT) 在聚合物基体中插层或剥离后具有一维纳米尺寸, 可使得添加少量 (质量分数 5% 以下) 即可制备出性能 (例如力学、阻燃、耐热性能) 优异的纳米复合材料, 因此其制备方法及性能被广泛研究^[1]。但针对聚对苯二甲酸丁二酯 (PBT) 为基体的纳米材料研究较少^[2]。PBT 是现今发展较为快速的工程材料, 人们一直寻找合适的方法改善其加工工艺、成型收缩率、缺口冲击强度^[3-4]以及阻燃性能^[5-8], 进而拓宽其使用领域, 或是提高其回收料使用性能^[6]。因此针对 PBT/OMMT 纳米复合材料研究逐渐增多, 研究主要集中在制备方法、原料配方及与加工工艺对材料结构与性能的影响几个方面。

1 制备方法

2001 年, Li Xiucuo 等^[9]首先采用熔融插层制得 PBT/

OMMT 纳米复合材料后, 学者们针对 PBT/OMMT 纳米复合材料的制备方法主要集中在原位插层聚合和熔融插层两种方法。前者制备的纳米复合材料中 OMMT 插层与剥离程度高, 但装置繁琐、工艺复杂。后者装置简易、工艺简单, 但制备出的复合材料中 OMMT 插层与剥离程度低。这些技术证明了纳米粒子的分散实际上在制备高性能 PBT 纳米复合材料中起着关键作用, 对此提出的策略需确保与当前的工业配混设备高度兼容, 并在聚合物纳米复合材料的制备中实现广泛的应用^[10]。

1.1 原位插层聚合

原位插层聚合制备的 PBT/OMMT 纳米复合材料, 其性能受制备工艺、原料配方等因素影响, 采用低牵引速率 (DR)、与 PBT 作用力强的 OMMT、高溶液浓度、OMMT 添

基金项目: 贵州省科技计划项目 (黔科合平台人才 [2019]5635 号), 贵州省高层次创新型人才培养项目 (黔科合人才 [2016]5667 号), 贵州省科技计划项目 (黔科合支撑 [2019]2026 号)

通信作者: 郭建兵, 研究员, 主要从事复合材料结构与性能的研究工作 E-mail: guojianbing_1015@126.com

收稿日期: 2020-09-03

引用格式: 徐定红, 郭建兵, 周颖, 等. PBT/有机蒙脱土纳米复合材料研究进展 [J]. 工程塑料应用, 2020, 48(11):154-158.

Xu Dinghong, Guo Jianbing, Zhou Ying, et al. A review on PBT/organo-montmorillonite nanocomposites[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(11):154-158.

加含量适中时,纳米复合材料的性能较好。Jin-Hae Chang 等^[11-12]用苯二甲酸丁二酯(DMT)、丁二醇(BD)与蒙脱土(MMT)原位插层聚合纺丝法制得PBT/MMT纳米复合材料,发现纺丝的DR对材料的拉伸强度与初始弹性模量影响较大,选用DR=1时,复合材料的拉伸屈服应力达到60 MPa,拉伸弹性模量达到1760 MPa,提高DR会使得上述性能降低。相同DR时,MMT的添加含量也会影响材料拉伸性能,MMT的添加含量最佳值为3%。Jin-Hae Chang 等^[13]则主要考察了苯氢醌和2-溴对苯二甲酸制备的热致液晶聚合物溶液溶度对原位插层聚合法制备的纳米复合材料性能的影响,发现当溶液溶度在8%以内,提高溶液溶度可增加纳米复合材料的拉伸强度。Li Xicuo 等^[14]则考察了OMMT官能团种类对材料性能影响,发现羟基化官能团可使PBT与OMMT间相互作用加强,材料抗冲击性能提升明显。D. Acierno 等^[15]采用双(羟乙基对苯二甲酸乙二醇酯)(BHET)原位插层制备OMMT,与常用的两种OMMT(Cloisite 25A与Somasisf MEE)比较,发现前者效果较好。C.Berti 等^[16]采用阴离子改性剂(4-磺酸苯甲酸钾盐、十二烷基硫酸钠与5-磺基间苯二甲酸钠盐)原位聚合制备PBT/OMMT纳米复合材料,比较后发现第三种阴离子改性剂效果最好。S. Hwang 等^[17]比较未改性MMT、氨基甲酸乙酯表面处理的MMT(30BM)与烷基表面处理的OMMT(30B)原位插层制备的纳米复合材料,30BM与PBT间作用力较强,其力学性能提高最多,结晶速率最快。N. Heidarzadeh 等^[18]将商业化蒙脱土(Cloisite 30B)用3-氨基丙基三乙氧基硅烷化处理,后原位聚合制备出PBT/OMMT纳米复合材料,发现硅烷化后的有机蒙脱土制备的复合材料综合性能得到提高。

1.2 熔融插层

相比原位插层聚合,熔融插层工艺简单,纳米复合材料性能主要受原料配方与制备工艺等因素影响。可通过选用作用力强的OMMT、添加第三反应体(如环氧树脂)、选用合适剪切强度、选用高特性黏度的PBT、增加挤出次数提高蒙脱土的剥离与分散。Li Xiucuo 等^[9]比较了三种季铵盐有机化蒙脱土(牌号:Cloisite 6A, Cloisite 10A, Cloisite 30B)熔融插层制得的PBT/OMMT纳米复合材料,由于三种改性粉体的疏水性不同,以Cloisite 10A剥离效果最好, Cloisite 6A效果最差。添加环氧树脂后,OMMT在PBT中插层与剥离效果得到进一步改善。P. Scarfato 等^[19]同样比较研究四种不同牌号蒙脱土,与PBT分子作用力强的OMMT(Nanofil 919)在基体中剥离效果较好。J. S. Narkhede 等^[20]用三种有机化试剂(癸基三苯基溴化磷、十六烷基三苯基溴

化磷与西吡氯铵)处理的OMMT制备PBT/OMMT纳米复合材料,用磷化合物比铵化合物处理的OMMT制备出的材料热稳定好。Wan Chaoying 等^[21]采用3-氨基丙基三乙氧基硅烷改性OMMT(Cloisite 30B)后与PBT熔融共混挤出,OMMT层间距经硅烷处理后从1.01 nm提高至1.41 nm。A. McLauchlin 等^[22]采用氨基化丙基接枝异辛基笼形低聚硅倍半氧烷(AP-POSS)(见图1所示)、二富马酸二甲酯氯化物与MMT通过离子交换反应,制备出双亲表面活性OMMT,再开环聚合制得含双亲OMMT 40%的母粒,制备的PBT/OMMT纳米复合材料中OMMT插层和剥离效果较好(见图2所示),同时解决OMMT在PBT熔融挤出温度下(230℃)易分解的问题。

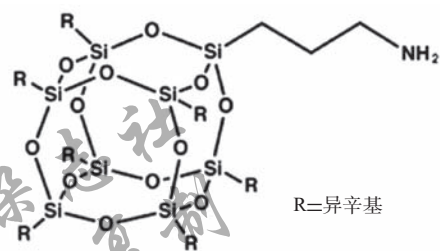
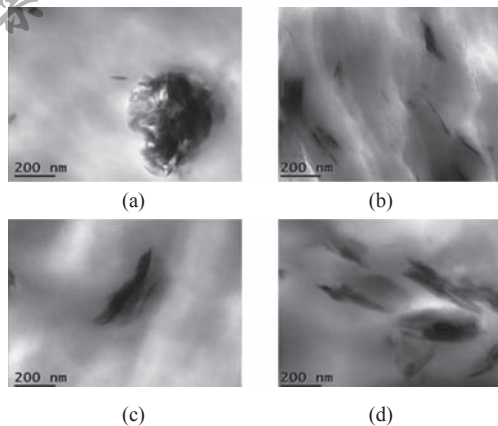


图1 AP-POSS分子结构式



a—PBT/OMMT; b—母粒法PBT/OMMT; c—母粒法APMt 化PBT/OMMT; d—母粒法双亲有机化法PBT/OMMT

图2 PBT/MMT透射电镜图

Xiao Junfeng 等^[23]采用PBT、MMT与甲基氯化吡啶(CPC)直接熔融挤出,发现MMT与CPC质量添加比例为3:1时,MMT在基体中有较好分散,并且纳米复合材料的热稳定性与阻燃性较好。M. Colonna 等^[24]发现添加含磺化官能团的PBT后,其与OMMT作用力更强,制备出的PBT/OMMT纳米复合材料中OMMT剥离效果更好,并且热变形温度下的储能模量更高,耐热性更好。姚勇等^[25]采用简便方法,选用硅烷偶联剂(KH560)对钠基蒙脱土进行改性,后熔融制备PBT纳米复合材料,发现材料中蒙脱土层间距从1.26 nm增加到1.42 nm。与未改性蒙脱土和商品化有

机改性蒙脱土相比,材料的拉伸强度和缺口冲击强度提高。Wu Defeng 等^[26-29]解释是因为环氧树脂对体系的网络密度渗透性有提高作用,同时可使得 PBT 扩链,同时指出环氧树脂的最佳添加质量分数为 4%。并发现原料添加顺序(第一种:直接将 PBT, OMMT、环氧树脂混合挤出;第二种:将环氧树脂与 OMMT 后,再与 PBT 共混挤出;第三种将 PBT 与 OMMT 共混挤出后,再与环氧树脂共混挤出)会对材料产生影响,其中第二种方法效果较好。D. Acierno 等^[30]考察加工工艺对 OMMT 的分散状态的影响,发现高剪切条件可提高 OMMT 在基体中的分散。Young-Wook Chang 等^[31]发现特性黏度高的 PBT 有利于 OMMT 的插层与剥离。W. S. Chow 等^[32]研究熔融挤出次数的影响规律,发现两次挤出后 XRD 图谱中 2.8° 的峰高较一次挤出有所降低,说明增加挤出次数,有利于 OMMT 进一步插层与剥离。

2 PBT/粘土纳米复合材料性能研究

OMMT 在 PBT 基体中插层或剥离形成一维纳米尺寸,添加少量即可对材料的流变性能、阻燃性能、耐热性能、结晶性能与力学性能产生影响。

2.1 流变性能

PBT/OMMT 纳米复合材料的流变性能与 OMMT 添加量密切相关^[33]。J. S. Narkhede 等^[34]采用挤出速率为 90 r/min 或 150 r/min,考察 OMMT 添加质量分数为 3%, 6%, 9% 时 PBT/OMMT 纳米复合材料的流变性能。在高频剪切模式下,添加 OMMT 6% 的复合材料假塑性流变状态维持时间较长。Wu Defeng 等^[26]用平板流变仪测试 PBT/OMMT 纳米复合材料流变性能后发现,其线性粘流区间较纯 PBT 较窄,当 OMMT 添加 3% 时,纳米复合材料达到渗流临界点,但不稳定。

2.2 阻燃性能

添加少量 OMMT 就可使材料的阻燃性能得到明显提升^[35-36]。W. Gianelli 等^[37]用锥形量热仪研究发现,OMMT 的添加使得 PBT/共聚酯弹性体/OMMT 纳米复合材料的阻燃性能明显得到提升。F. Samyn 等^[38]发现 OMMT 与阻燃剂 Exolit OP1240 协效阻燃 PBT,即使 OMMT 在 PBT 基体中未能很好剥离,但阻燃性能依然得到提升。Wei Yang 等^[39-40]采用 OMMT、聚(1,4-丁二醇对苯二甲酸乙二酯)、铝磷酸钠与玻纤制备出环境友好增强型 PBT/OMMT 纳米复合材料,其热释放速率可下降 51%,阻燃极限氧指数得到明显提高,发现 OMMT 的剥离与分散对其阻燃性能影响巨大。Fei Xin 等^[36]通过原位聚合将蒙脱石(MMT)与聚(2,4,6-三烯丙基氧基-1,3,5-三嗪)(TAC)包裹,制备了新型阻燃剂(PTAC-MMT),后将 PTAC-MMT 和二乙基次磷酸铝(AlPi)掺入 PBT 中以提高其阻燃性。包含 1.67% PTAC-MMT 和

8.33% AlPi 的样品的极限氧指数(LOI)值为 36.4%,并达到 UL94 V-0 级,具有优异的抗滴落性能,可用作包装阻燃剂。

2.3 耐热性能

添加 OMMT 可使材料的耐热性能得到明显提升。Ke Yangchuan^[41]通过研究 PBT/OMMT 纳米复合材料发现,当 OMMT 添加质量分数从 1.0% 到 10% 时,材料的热变形温度可提高 30~50℃。Xiao Junfeng 等^[42]通过 TG 测试对比研究添加甲基氯化吡啶(CPC)与十六烷基三甲基氯化铵有机化的 OMMT 的纳米复合材料,发现当温度低于 450℃ 时,前者的失重较小,热稳定性较好,当温度高于 600℃ 时,后者的失重较小,热稳定性较好。Jin-Hae Chang 等^[43]发现原位插层聚合的 PBT/OMMT 纳米复合材料热稳定性能与 OMMT 添加量有关,当 OMMT 添加量为 2% 以下时,纳米复合材料的玻璃化转变温度(T_g),熔融温度(T_m),分解温度(T_d)较纯 PBT 提高显著,OMMT 添加量超过 2% 时没有变化;改变复合材料纺丝速率(DR 从 1.0 到 18)不会影响上述温度变化。Wan Chaoying 等^[21]采用 3-氨基丙基三乙氧基硅烷改性 OMMT(Closite 30B)后与 PBT 熔融共混挤出的纳米复合材料,其 5% 的热失重温度由 250℃ 提高至 270℃。

2.4 结晶性能

由于异相成核作用,添加 OMMT 后, PBT/OMMT 纳米复合材料的结晶速率变快、结晶晶粒变小。另外,材料的结晶性能与 PBT 的特性黏度、OMMT 有机官能团添加含量、剥落水平密切相关^[27-29,44-49]。Wu Defeng 等^[29]发现通过改变剪切速率可控制纳米复合材料的相形态,不同的结晶温度下,纳米复合材料的相形态与晶体结构也不同。Ke Yangchuan^[41]发现 PBT/OMMT 纳米复合材料的非等温结晶速率较纯 PBT 快 50%。Chang Young-Wook^[31]研究 PBT 的特性黏度对熔融插层制备 PBT/OMMT 纳米复合材料影响后,发现采用特性粘度较高 PBT 的复合材料非等温结晶温度提高更为明显。Wu Defeng 等^[27]研究 PBT/OMMT 纳米复合材料等温结晶过程,发现复合材料的晶粒较纯 PBT 减小[例如(010), (111), (100)晶面],在较低温度下,少量的 OMMT 会使得纳米复合材料结晶速率变快,而过多的 OMMT 使得纳米复合材料结晶速率减慢。研究材料非等温结晶过程,发现 PBT 复合材料的结晶峰较纯 PBT 向高温方向移动,并且随着 OMMT 添加量的加大趋势更为显著,研究结晶动力学后发现,只需添加少量(1.0%)无机粉体,就可降低复合材料表面活化能,加快其结晶过程,但是继续加大添加量,复合材料的表面活化能升高,结晶速率反而降低。潘士斌等^[47]同样对材料的非等温结晶性能进行研究,发现同样规律,同时发现结晶峰变得狭窄且半结晶时间变得更短,但随着冷却速率的增加,材料的结晶峰温度向低温移动且半

结晶时间变得更短。利用热台偏光显微镜球晶形态, PBT/OMMT 复合材料球晶相比纯 PBT 变得更小,且边界更不清晰。A. Al-Mulla 等^[48] 同样研究发现等温结晶速率随着结晶温度的升高而减小。但 Mu Bo 等^[49] 研究了 PBT/MMT 纳米复合材料结晶性能,发现 MMT 不能提高材料的结晶度,也不能改变其晶体结构。

2.5 力学性能

PBT/OMMT 纳米复合材料的力学性能与加工工艺、OMMT 添加量密切相关。Chang Jin-Hae 等^[43] 发现原位插层聚合的 PBT/OMMT 纳米复合材料拉伸性能与纺丝速率(DR 从 1.0 到 18) 相关,当纺丝 DR 为 1.0 时,材料拉伸性能最优,继续提高拉伸速率会降低材料的拉伸性能。W. S. Chow 等^[32] 研究熔融挤出次数对纯 PBT, PBT/OMMT 纳米复合材料的影响后,发现两次挤出后纯 PBT 拉伸性能略有下降,而纳米复合材料变化不大;两种材料经再次挤出后屈服强度都略有下降。N. Heidarzadeh 等^[18] 研究发现, PBT/OMMT 纳米复合材料的抗压缩强度会降低,其解释为复合材料的自由体积由于 OMMT 的添加而减少。王小君^[50] 发现 OMMT 含量较少时,复合材料的熔体黏度和拉伸弹性模量均降低,但拉伸强度和弯曲弹性模量均提高。当 OMMT 含量为 0.5% 时,材料的结晶温度最高,半结晶时间最小,且缺口冲击强度最大。R. Sharma 等^[51] 通过添加 OMMT 改善超低密度聚乙烯接枝的甲基丙烯酸缩水甘油酯弹性体(ULDPE-g-GMA) 增韧的 PBT 的拉伸性能,发现添加 3% 的有机粘土,纳米复合材料的拉伸弹性模量提高最佳。B. H. Soudmand 等^[3] 观测到 PBT/OMMT 纳米复合材料在拉伸断裂时裂纹萌生区均表现出原纤化形态,表面粗糙化,增加了韧性,应力强度因子增加高达 57%。

2.6 其他性能

添加 OMMT 的 PBT/OMMT 纳米复合材料的阻隔性能与耐磨性能明显得到提升,同时发泡的 PBT/OMMT 纳米复合材料受 OMMT 添加量影响。Yu Dehong 等^[52] 研究了添加不同氨基阳离子改性 MMT 的 PBT/OMMT 纳米复合材料的阻隔性能,发现添加 OMMT 的复合材料阻隔性能得到提升。Mu Bo 等^[49] 研究了 PBT/OMMT 纳米复合材料的耐磨性能,发现添加有机化处理蒙脱土的复合材料摩擦系数与磨损阻力较纯 PBT 变小,加未有机化处理蒙脱土的复合材料则相反,这与材料的相形态与界面粘附作用相关。S. S. Hwang 等^[53] 采不同螺杆转速(80 r/min 与 100 r/min) 制备了不同添加百分比(0,0.5%,1.0%,2.0%,3.0%,4.0%) 与不同粒径大小(8 μm 与 35 μm) 的 OMMT,用氮气作为气源将 PBT/OMMT 纳米复合材料注塑发泡后,发现添加 OMMT 为 1.0% 时,材料的拉伸强度、抗磨损性能与

泡孔密度最优;另外,OMMT 的片状尺度越大,高螺杆转速下,材料拉伸强度越高。

3 结语

虽然针对 PBT/OMMT 纳米复合材料的研究已近多年,复合材料的结晶性能和阻燃性能得到明显改善,但 OMMT 在 PBT 熔融加工过程中有机官能团的受热分解,造成其在基体中较难剥离,也造成 PBT/OMMT 纳米复合材料重复加工使用中 OMMT 再次团聚,使得材料某些性能下降。目前较常采用膦化合物或耐热性较好的双亲表面活性物处理 MMT 提高其耐热性能,但前者成本较高,后者工艺繁琐,如能找到一种合适的方法使得 OMMT 在 PBT 熔融加工过程中其有机官能团不分解或少分解, PBT/OMMT 纳米复合材料的综合性能将大幅得到提升,并增加材料反复回收使用次数,则 PBT/OMMT 纳米复合材料将离产业化与市场化不远。

参考文献

- [1] Okada A, et al. *Macromolecular Materials and Engineering*, 2010, 291(12):1 449–1 476.
- [2] 刘玲,等. *橡塑技术与装备*, 2020, 46(4):18–23.
Liu Ling, et al. *Rubber Plastics Technology and Equipment*, 2020, 46(4):18–23.
- [3] Soudmand B H, et al. *Journal of Applied Polymer Science*, 2020, 137(41):49 260–49 275.
- [4] Soudmand B H, et al. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2020, 108:1–16.
- [5] 温攀月. 新型成炭剂的设计及其阻燃聚合物材料的热稳定性和燃烧性能的研究[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2017.
Wen Panyue. The design of a new type of char-forming agent and the study of the thermal stability and combustion performance of flame-retardant polymer materials[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2017.
- [6] Gnatowski A, et al. Examinations of the effect of flame retardants on thermal and mechanical properties and the structure of polybutylene terephthalate[C]// American Institute of Physics Conference Series. American Institute of Physics Conference Series, 2018.
- [7] Ramani A, et al. *Polymer Degradation & Stability*, 2014, 104(6):71–86.
- [8] Gnatowski A, et al. Examinations of the effect of flame retardants on thermal and mechanical properties and the structure of polybutylene terephthalate[C]// American Institute of Physics Conference Series. American Institute of Physics Conference Series, 2018.
- [9] Li Xiucuo, et al. *Macromol. Rapid Commun*, 2001, 22(16):1 306–1 312.
- [10] Silvestri B, et al. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*,

- 2016, 78(3):531-538.
- [11] Chang Jin-hae, et al. Polymer Bulletin, 2003, 51 (1):69-75.
- [12] Chang Jin-hae, et al. Polymer, 2003, 44 (19):5655-5661.
- [13] Chang Jin-hae, et al. Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics, 2004, 42(20):3667-3676.
- [14] Li Xicuo, et al. Compos. Interfaces, 2004, 11 (4):335-346.
- [15] Acierno D, et al. Macromolecular Symposia, 2007, 247:120-128.
- [16] Berti C, et al. European Polymer Journal, 2009, 45 (1):70-78.
- [17] Hwang S, et al. Macromol. Res. 2011, 19 (7):699-710.
- [18] Heidarzadeh N, et al. High Perform. Polym., 2012, 24(7):589-602.
- [19] Scarfato P, et al. Macromolecular Symposia, 2005, 228, 125-137.
- [20] Narkhede J S, et al. J. Polym. Mater., 2008, 25(1):1-14.
- [21] Wan Chaoying, et al. Journal of Applied Polymer Science, 2008, 110(1):550-557.
- [22] McLauchlin A, et al. Applied Clay Science, 2011, 53(4):749-753.
- [23] Xiao Junfeng, et al. Polymer Bulletin, 2005, 54(4-5):271-278.
- [24] Colonna M, et al. European Polymer Journal, 2010, 46(5):918-927.
- [25] 姚勇, 等. 塑料工业, 2013, 41(3):98-100, 112.
- Yao Yong, et al. China Plastics Industry, 2013, 41(3):98-100, 112.
- [26] Wu Defeng, et al. European Polymer Journal, 2005, 41(9):2199-2207.
- [27] Wu Defeng, et al. Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics, 2005, 43(19):2807-2818.
- [28] Wu Defeng, et al. Polymers & Polymer Composites, 2005, 13 (6):571-580.
- [29] Wu Defeng, et al. Journal of Applied Polymer Science, 2006, 99 (1):340-346.
- [30] Acierno D, et al. Polymer Engineering and Science, 2004, 44 (6):1012-1018.
- [31] Chang Young-Wook, et al. Polymer International, 2005, 54 (2):348-353.
- [32] Chow W S, et al. Journal of Applied Polymer Science, 2008, 110 (3):1642-1648.
- [33] Scatteia L, et al. Plastics Rubber and Composites, 2004, 33 (2-3):85-91.
- [34] Narkhede J S, et al. Journal of Polymer Materials, 2014, 31(2):185-197.
- [35] Khashkhozheva R R, et al. International Polymer Science and Technology, 2016, 43(9): .
- [36] Fei Xin, et al. Rsc Advances, 2017, 7(75):47324-47331.
- [37] Gianelli W, et al. Fire and Materials, 2006, 30(5):333-341.
- [38] Samyn F, et al. European Polymer Journal, 2008, 44(6):1631-1641.
- [39] Wei Yang, et al. Polymers for Advanced Technologies, 2011, 22(12):2564-2570.
- [40] Wei Yang, et al. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2011, 42(7):794-800.
- [41] Ke Yangchuan. Chin. J. Chem. Eng., 2003, 11(6):701-708.
- [42] Xiao Junfeng, et al. European Polymer Journal, 2005, 41 (5):1030-1035.
- [43] Chang Jin-Hae, et al. Journal of Applied Polymer Science, 2006, 100(2):1247-1254.
- [44] Lu Xiang, et al. Morphology and Mechanical Properties of Polypropylene / Poly (Butylene Terephthalate) / Organ-Montmorillonite Composites[C] / / 2016 International Conference on Mechanics and Materials Science (MMS2016), 2017.
- [45] Xu Guomin, et al. Journal of Macromolecular Science Part B Physics, 2016.
- [46] Kalkar A K, et al. Thermochimica Acta, 2013, 568:74-94.
- [47] 潘士斌, 等. 塑料, 2016, 45(4):8-10+80.
- Pan Shibin, et al. Plastics, 2016, 45(4):8-10+80.
- [48] Al-Mulla A, et al. Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics, 2007, 45(11):1344-1353.
- [49] Mu Bo, et al. Polymer Composites, 2009, 30 (5):619-628.
- [50] 王小君. ADR4370S 扩链改性 PBT 及其复合材料的性能研究[D]. 福州: 福建师范大学, 2015.
- Wang Xiaojun. Study on the properties of ADR4370S chain-extended modified PBT and its composite materials[D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2015.
- [51] Sharma R, et al. Journal of Polymer Engineering, 2013, 33(6):489-500.
- [52] Yu Dehong, et al. Abstracts of Papers of the American Chemical Society, 2006, 232.
- [53] Hwang S S, et al. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2010, 37(8):1036-1043.

欢迎订阅 2021 年《工程塑料应用》、《化学分析计量》杂志

邮发代号 24-42, 24-138 全国各地邮局均可订阅

欢迎广大读者到当地邮政局(所)订阅 2021 年《工程塑料应用》、《化学分析计量》杂志, 订阅杂志及合订本光盘及过期刊物的读者可直接向杂志社办理订阅。《工程塑料应用》为月刊, 大 16 开本, 每月 10 日出版, 2021 年定价 20 元 / 期, 全年 240 元。《化学分析计量》为月刊, 大 16 开本, 单月 20 日出版, 2021 年定价 20 元 / 期, 全年 240 元。

电话: (0531)85878223 85878057 传真: (0531)85947355