

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2022.10.026

聚对苯二甲酸乙二酯反应挤出改性研究进展

白晓康,何继敏,王胜于,周麒,张禹

(北京化工大学塑料机械及塑料工程研究所,北京 100029)

摘要: 针对聚对苯二甲酸乙二酯(PET)在常用加工工艺中普遍存在的熔体强度低的缺陷,简述了三种提高PET熔体强度方法(熔融缩聚、固相缩聚、反应挤出扩链改性)的优缺点。重点介绍了PET反应挤出扩链改性的国内外研究进展,包括端羧基加成型扩链剂改性、端羟基加成型扩链剂改性、羧羟基同时加成型扩链剂改性和扩链剂联用改性,介绍了PET反应挤出扩链改性的应用,最后对改性PET的发展前景进行了展望。

关键词: 聚对苯二甲酸乙二酯;熔体强度;反应挤出;扩链;进展

中图分类号: TQ323.4+1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2022)10-0149-05

Research Progress on Modification of Polyethylene Terephthalate by Reactive Extrusion

Bai Xiaokang, He Jimin, Wang Shengyu, Zhou Qi, Zhang Yu

(Institute of Plastic Machinery and Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract : The advantages and disadvantages of three methods to improve the melt strength of polyethylene terephthalate (PET)(melt polycondensation, solid state polycondensation, reactive extrusion chain extension modification) were briefly described in view of the defects of low melt strength in common processing processes. The research progress of chain extension modification by reactive extrusion of PET were mainly introduced, including carboxyl addition molding chain extender modification, hydroxyl addition molding chain extender modification, the carboxyl hydroxyl group at the same time molding chain extender modification and chain extender combined modification. The application of chain extension modified PET by reactive extrusion were introduced. Finally, the development prospect of modified PET was prospected.

Keywords : polyethylene terephthalate ; melt strength ; reactive extrusion ; chain extension ; progress

聚对苯二甲酸乙二酯(PET)可由缩聚反应和酯交换反应制备,是重要的热塑性树脂。在较宽温度范围内具有优良的物理力学性能,如优异的耐蠕变性、耐化学性、耐磨性和尺寸稳定性等^[1]。PET凭借其优异的综合性能和较高性价比广泛应用于纤维、瓶用切片、薄膜和机械等领域^[2-3]。

虽然PET树脂性能优异,但其在加工时也存在较多问题。例如,在注塑时易氧化降解,同时会出现脱模困难;在涉及拉伸流动的挤出加工工艺中,较低的熔体强度和黏度导致PET不易成型等,这大大限制了其应用^[4]。为了改善其可加工性,拓宽其应用范围,应针对其熔体强度低的加工缺陷进行改性处理。笔者将主要总结介绍三种提高PET熔体强度方法的优缺点,阐述反应挤出扩链改性PET的研究进展和应用,并对改性PET发展进行展望。

1 提高PET熔体强度的方法

在PET的加工工艺中,由于水解和热降解等反应的存

在,使PET分子链断裂,分子量降低,特性下降,从而对其性能产生影响^[5]。PET在某些方面的使用与其分子量有关,因此想要提高PET的熔体强度和熔体黏弹性,需要从增加其分子量^[6]、分子量分布^[7]和长支链化结构^[8-9]三方面入手。国内外学者做了大量研究,目前用于提高PET熔体强度的方法主要有熔融缩聚、固相缩聚和反应挤出扩链改性。具体的工艺特点比较见表1。

熔融缩聚对设备要求较高,随着反应体系黏度的增加,反应后期副产物处理不及时会限制PET分子量增加,同时由于产物量较大且反应迟缓,不易于搅拌和扩散,出现的局部过热导致降解反应强化,不利于分子量提高^[10];固相缩聚改善了前者出现的搅拌困难的情况,较低的反应温度降低了PET热降解过程中副作用的影响^[11],但其缺点也比较突出,反应时间过长(一般为15~20 h),步骤繁琐,设备投入和生产成本过高,用于实验室研究方面较少,以工业研究为主更适

通信作者: 何继敏,博士,副教授,硕士生导师,主要研究方向为超高分子量聚乙烯注塑成型及聚丙烯、聚乳酸、PET等挤出发泡、注塑发泡等

收稿日期: 2022-08-02

引用格式: 白晓康,何继敏,王胜于,等.聚对苯二甲酸乙二酯反应挤出改性研究进展[J].工程塑料应用,2022,50(10):149-153.

Bai Xiaokang, He Jimin, Wang Shengyu, et al. Research progress on modification of polyethylene terephthalate by reactive extrusion[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(10): 149-153.

表1 三种增强PET熔体强度方法工艺特点比较

改性方式	加工设备	工艺介绍	特点
熔融缩聚	圆盘反应器(包括单轴和双轴)和笼式反应器(包括内笼式和外笼式)等	在一般聚酯生产装置的终缩聚釜后增加一台反应器,通过延长聚酯熔融缩聚反应时间来提高产品黏度	反应温度高、缩合速率快、无粉尘,产品质量的不均匀性明显改善,分子量分布窄,产物为熔融体可直接进行加工
固相缩聚	工业上多为专用生产线,实验室多用旋转蒸发仪等	将分子量较低的预聚物加热,待温度介于熔点和玻璃化转变温度之间时,通过抽真空或通过保护气来增加PET聚合度	解决了高温熔融时黏稠熔体的搅拌问题;温度和真空度要求相较于熔融聚合物较低,降低了能耗和操作成本

合大规模生产;反应挤出扩链改性的关键在于扩链剂种类的选择,相较于前两种方法,其便于操作和控制,更适用于实验室研究,且扩链效果好生产效率高,是提高PET的熔体强度和熔体黏弹性的理想方法。

2 PET反应挤出扩链改性研究进展

扩链剂的选择通常为双或多官能团化合物,在满足PET加工工艺要求的同时可与PET的端羟基或端羧基在短时间内发生反应,从而达到扩链的效果。根据反应方式的不同,扩链剂分为缩合型和加成型两种,由于缩合型扩链剂与PET反应会生成副产物,影响产品质量,因此大部分研究中使用多为加成型扩链剂。根据与PET端基的反应类型不同,加成型扩链剂分为端羧基加成型、端羟基加成型和羧羟基同时加成型三种^[12]。此外,国内外的许多学者将两种扩链剂进行联用,发挥各自的优势以达到更好的扩链效果。

2.1 端羧基加成型扩链剂改性

常用的端羧基加成型扩链剂主要是双噁唑啉类和环氧类化合物等^[13]。五元杂环化合物双噁唑啉扩链剂活性很强,可以与羧酸发生较为活泼的化学反应;环氧类化合物优先与PET的端羧基发生反应,是较为常见的PET扩链剂种类之一。

(1) 噁唑啉类扩链剂。

刘波等^[14]研究了噁唑啉类扩链剂2,2-双(2-噁唑啉)(BOZ)和2,2-(1,3-苯撑)-双(2-噁唑啉)(PBO)对回收PET的扩链效果。当添加理论量3倍用量的BOZ或PBO,反应时间为4~6 min时,产物的特性黏度达到最高,分别为0.80 dL/g和0.76 dL/g。实验结果表明,在适当的添加量和反应时间下,两种双噁唑啉类扩链剂都能较大程度提升PET的相对分子质量,其中BOZ的活性更强,扩链效果更好。

张素文等^[15]通过反应挤出研究了噁唑啉扩链剂BOZ对PET挤出改性的影响,并和酸酐类扩链剂均苯四甲酸酐(PMDA)做对比,以反应挤出前后PET特性黏度和羧基含量变化来表征改性结果。实验表明:PMDA对PET特性影响更大(0.85 dL/g),但挤出产品羧基含量较高(31 mol/t);BOZ扩链效果不明显,最高只能使PET特性达到0.68 dL/g,但其能大大降低产品羧基含量(14 mol/t)。

(2) 环氧类扩链剂。

Wu等^[16]研究了自制的环氧扩链剂(PGMS)和其他两种市售环氧扩链剂(EPOX和ADR-4468)对回收PET的改性影

响。结果表明:三种扩链剂均可使PET获得更高的特性和更好的热性能;经EXOP改性的PET分子呈线性结构,流变性能得到改善;ADR-4468的加入使PET获得较长的支链结构和较好的结晶性;ADR-4468和PGMS与PET的反应速率比EPOX快,表明ADR-4468和PGMS在工厂实际生产过程中具有更好的前景。

成晓燕等^[17]使用同向双螺杆挤出机研究了六种扩链剂对回收PET的扩链改性效果,其中包含环氧类扩链剂:苯乙烯-甲基丙烯酸甲酯与甲基丙烯酸缩水甘油酯共聚物(KL-E4370)、ADR-4468和端基环氧基硅油。结果表明:六种扩链剂中ADR-4468扩链效果最优,当其添加量从0增加到1.0%,PET挤出产物特性黏度由0.44 dL/g增至0.69 dL/g,提高了43.75%;黏均分子量(M_v)从14 983 g/mol增至25 864 g/mol,端羧基含量显著降低,在挤出造粒过程中成条性优异。

Yang等^[18]以多功能环氧低聚物ADR-4368为改性剂,通过反应挤出法制备了可发泡的PET,并与PMDA作对照。与未改性的样品相比,添加了ADR和PMDA的PET具有更高的复合,其中PMDA的增黏效果更好;两种扩链剂都会引起模具压力的增加。但在高浓度下,与PMDA相比,ADR引起的模具压力更大,扭矩变化亦表明ADR的反应活性高于PMDA,说明添加ADR的PET比添加PMDA的PET更具弹性,在CO₂作为发泡剂的间歇发泡过程中表现出较好的发泡性能。

李辰昊等^[19]研究了ADR-4368对PET改性效果,实验在同向双螺杆挤出机中进行,结果表明:扩链剂的加入显著改善了PET的特性,ADR的质量添加量为0.7%,PET的特性黏度由纯PET的0.71 dL/g增至0.94 dL/g,提高了32.4%。

2.2 端羟基加成型扩链剂改性

端羟基加成型扩链剂主要有氰酸酯类和酸酐类化合物。其中,氰酸酯类既可以与PET端羟基发生反应,亦可以与端羧基发生反应,但与前者的反应活性更高,因此被认定为端羟基加成型扩链剂^[20];酸酐类主要与PET端羟基发生支化反应,其中PMDA以其优异的改性效果越来越受到国内外学者的关注。

(1) 氰酸酯类扩链剂。

Zhao等^[21]以异氰酸酯三聚体(C-HK)为扩链剂,采用反应挤出法制备了不同分子量的PET扩链产物。研究了扩链剂C-HK对PET的特征、结晶行为和力学性能的影响。结果

表明,当扩链剂的含量由0.6%提高到1.4%时,PET的 M_n 由 2.36×10^4 g/mol有效提高到 5.46×10^4 g/mol;改性后的PET结晶度和半结晶时间明显降低,同时表现出更优异的弯曲和冲击性能,虽然伸强度略有下降,但弯曲强度最高提高了56.8%,冲击强度最高提高了5倍。

Zhang等^[22]研究了氰酸酯类扩链剂双酚A型氰酸酯(BADCy)及其环化三聚体Tri-mer-17对PET的改性效果。实验表明:BADCy和Tri-mer-17均能有效提高PET熔体强度,且环化效果可提高扩链剂反应活性,添加少量Tri-mer-17后,改性PET的熔体扭矩、特性黏度和熔体强度均高于单独添加BADCy单体的改性PET。当Tri-mer-17质量添加量由0.5份增至2份时,PET特性黏度从0.98 dL/g增至1.36 dL/g。

Liu等^[23]研究了多苯基多亚甲基多异氰酸酯(PMDI)对PET的改性效果,并添加乙烯-甲基丙烯酸钠离聚物(Surlyn)作为成核剂。实验测试表明:添加1.4%质量分数的PMDI时,产物特性由纯PET的0.60 dL/g增至1.12 dL/g,提高了86.7%;PMDI还改善了PET和Surlyn之间的相容性,进一步提升了Surlyn促进PET结晶的效果,两者协同作用显著增强了改性后PET的力学性能,将冲击强度提升了54.8%。

(2) 酸酐类扩链剂。

Pandey等^[24]对比研究了PMDA、环氧扩链剂(ADR-4368C)和碳酸乙烯酯(EC)对回收PET的改性效果,实验在双螺杆挤出机上进行。经毛细管流变仪测定了拉伸黏度和熔体强度,结果表明:EC的改性效果不明显,经PMDA改性的PET特性黏度最高(0.60 dL/g);PMDA和ADR-4368C均可提高回收PET的特性黏度,且在较高的添加量下,可使低特性黏度回收PET的挤出性能与纯PET相当。

马静等^[25]研究了PMDA对PET饮料瓶片的改性影响。实验在反应挤出机中进行,利用其研制的在线熔体强度仪对实验结果进行表征。实验表明:较高的机筒温度和瓶片含水量都会造成PET熔体强度降低,保持真空度和加入扩链剂PMDA可有效提高PET熔体强度,当真空度为0.08 MPa,添加0.3%的PMDA时,得到的挤出PET熔体强度是纯PET料的7倍。

Forsythe等^[26]在反应挤出工艺中,研究了不同浓度的PMDA和季戊四醇对瓶级PET的改性效果。通过测定熔体强度、表观黏度等来确定改性程度。随PMDA增加,改性聚酯在较低剪切速率下表现出较高的黏度,熔体流动速率显著下降。与单独添加PMDA相比,在低浓度的PMDA和季戊四醇共同添加时,PET熔体强度提高较小。当添加浓度较高时,其熔体强度和黏度均有显著提高。实验表明,PMDA可显著提升改性PET熔体结构的稳定性。

2.3 羧基同时加成型扩链剂改性

吕云伟等^[27]研究了羧基加成型扩链剂亚磷酸三苯酯(TPP)对回收PET的改性作用,以反应挤出后PET的特性黏度、羧基含量的变化表征改性效果。实验表明:TPP的扩链改性效果明显,加入环氧树脂(E20)可以有效改善扩链产物

后期稳定性差的问题。与纯PET挤出相比,加入质量分数1%的TPP和0.2%E20时,产物特性黏度由0.45 dL/g增至0.80 dL/g,羧基含量由92.12 mol/t降至24.05 mol/t,TPP和E20的加入对PET的热性能、加工性能影响较小。

Qin等^[28]以TPP为扩链剂,使用哈克转矩流变仪对回收PET进行了反应挤出实验,通过磷元素分析实验探究了反应机理,同时探索了TPP的最佳添加方式。结果表明:改性后样品中磷含量随混合时间的增加而增加,说明磷与聚合物链发生化学反应,验证了其反应机理;TPP改性效果显著,最佳质量添加量为4%,在实验前将TPP与PET混合均匀,改性后试样特性黏度最高为0.857 dL/g;而在实验开始5 min后加入TPP,试样特性黏度最高为1.077 dL/g,提高了25.7%。

2.4 扩链剂联用改性

单一使用某种扩链剂有时无法满足生产需求,羧基加成型扩链剂和羟基加成型扩链剂复配在一定程度上可以进一步改善PET的扩链效果;此外也有学者研究了同种类型的两种扩链剂对PET的改性效果。

(1) 不同类型扩链剂联用改性。

Yao等^[29]使用双螺杆挤出机研究了环氧扩链剂(ADR-4368C)和酸酐类扩链剂PMDA的不同配比回收PET发泡性能的影响,实验中加入抗氧剂1010。实验显示:当质量分数为100/0.6/0.5/1的配比制备回收PET/ADR-4368C/PMDA/抗氧剂1010共混物时,产物特性黏度由纯回收料的0.67 dL/g提升至1.02 dL/g,改性PET具有更好的长链支化结构,熔体黏弹性的增强使其在以超临界CO₂为发泡剂的熔融态发泡过程中具有优异的发泡性。

刘少峰等^[30]研究了氰酸酯类扩链剂六亚甲基二异氰酸酯(HDI)和环氧类扩链剂异氰尿酸三缩水甘油酯(TGIC)联用对PET反应挤出改性的影响。实验中对比了扩链剂联用和单独使用对PET改性的影响,同时探索了联用最佳配比。结果表明:与使用一种扩链剂相比,合适的扩链剂联用配比和添加量的改性效果更好,当联用添加量为1.0%, $m(\text{HDI}):m(\text{TGIC})=6:4$ 时,改性PET熔体流动速率最低(8.50 g/10 min),较PET纯料比下降89.3%,产物去除凝胶后,特性黏度为1.18 dL/g,比PET纯料挤出提升63.8%。

李强等^[31]使用双螺杆挤出机研究了双酚A型环氧树脂(E44)和六亚甲基二异氰酸酯的三聚体(N3300)两种扩链剂联用条件下PET的改性效果,同时探索了扩链剂联用的反应机理。实验表明:两种扩链剂复配比单独使用时改性效果更好,联用时产物特性黏度与黏均分子量最高且无凝胶结构,力学性能优异,特性黏度较PET纯料提升97.2%,达到1.42 dL/g,缺口冲击强度比PET纯料提升了25%,通过对流变数据的分析推测出了主要的反应机理。

刘少峰等^[32]采用氰酸酯类扩链剂六亚甲基二异氰酸酯(HDI-90SB)与环氧类化合物(ADR-4400F)两种扩链剂并用体系对PET进行反应挤出扩链改性,以产物的特性黏度和力学性能等表征改性效果。结果表明:较单独使用相比,HDI

与ADI联用扩链效果更佳,PET熔体弹性提升,扩链剂联用添加量为1.6%,PET的特性黏度达到最高(1.19 dL/g),同时拉伸强度和弯曲强度达到最高,分别为63.3 MPa和79.2 MPa。

(2) 同类型扩链剂联用。

Wang等^[33]以带有支链环氧基团的化合物SAG-008和带有四官能环氧基团的4,4'-二氨基二苯甲烷四缩水甘油醚(TGDDM)为扩链剂,采用两步扩链工艺对回收PET进行了改性。第一步加入SAG-008形成支链聚合物,第二步加入TGDDM进一步增加PET的分子量。结果表明:两步扩链工艺可显著提高PET的熔体强度和熔体黏弹性,TGDDM含量较高时产物会出现凝胶,当添加1.0%的SAG-008和0.6% TGDDM时,产物特性黏度由纯PET的0.66 dL/g增至1.18 dL/g。力学分析表明,由于分子量和结晶的增加,退火后改性PET获得了更好弯曲强度、弯曲弹性模量和冲击强度。

3 PET反应挤出扩链改性的应用

3.1 PET共混改性的研究

PET凭借其优异综合性能和较高性价比常用于与其他聚合物共混的研究,但PET和与其共混的聚酯多为不相容体。相关研究表明,扩链剂的引入有利于酯交换反应的进行,改善共混体系的相容性,提高共混物的性能^[34]。

Santos等^[35]研究了环氧扩链剂(Polyad PR002)和增容剂马来酸酐接枝聚乙烯(PE-g-MA)对回收PET和高密度聚乙烯(PE-HD)共混体系流变性和热性能的影响。实验结果表明发展PET/PE-HD共混体系是可行的:1%(质量分数,下同)的Polyad PR002和10%的PE-g-MA可显著提升PET的熔体强度,两种添加剂的相互作用提升了PET/PE-HD体系的扭矩且不会影响共混物的热稳定性。

Nofar等^[36]使用双螺杆挤出机制备了聚对苯二甲酸丁二酯(PBT)和回收PET的共混物,并研究了环氧扩链剂(ADR-4468)对共混体系的影响。结果表明:ADR-4468的加入提升了PET的特性黏度,在低含量时提高了PET的结晶速率;ADR-4468对PET/PBT共混体系的力学性能影响不大,但其增加了共混物的熔体强度,进而提高了其挤出过程中的加工性能。

Lago等^[37]采用反应挤出法对回收的聚碳酸酯/PET共混材料进行改性研究。以苯乙烯-丙烯酸环氧低聚物(ESAO)和亚甲基二苯基二异氰酸酯(MDI)为扩链剂,乙烯共聚物(EMAcO)为增容剂。实验表明:扩链剂ESAO和MDI的加入具有双重功能,既增加了材料的黏度,又改善了混合体系的相容性,使改性后材料的特性黏度提高到与纯共混物相当的值;EMAcO对材料的黏度影响不大,但能促进结晶成核,提高了结晶温度,使材料冲击强度提升了260%,有效改善了共混材料的力学性能。

何光建等^[38]公开了一种PET和聚乙烯(PE)共混合金的制备方法及应用。以PET回收料和PE回收料为原料,扩链剂是三羟甲基丙烷三丙烯酸酯(TMPTA)和甲基丙烯酸缩水

甘油酯(GMA)的复配产物。所用的扩链剂可抑制PET在二次加工过程中的热降解及水解,有效提升合金材料的熔体强度,此外扩链剂还可以提高PET和PE间的相容性,制备的PET/PE合金材料综合性能优异,具有较好二次加工性能。

3.2 PET发泡成型的研究

Ge等^[39]研究反应挤出扩链改性对PET发泡性能的影响。以PMDA和TGIC两种扩链剂对PET进行改性,制备了长支链化PET,用尺寸排阻色谱法分析了纯PET和改性PET的摩尔质量和摩尔质量分布,以CO₂为发泡剂进行了发泡实验。结果表明:添加0.1%(质量分数)PMDA和0.5%TGIC的改性PET支化程度最高,特性黏度值较低,不存在交联结构,更适合挤压发泡工艺;高分子量和长链支化结构,特别是后者,可以有效地导致强烈的分子缠结,并显著改善聚合物的熔融发泡性能。

Li等^[40]采用带有环氧基团的甲基丙烯酸缩水甘油酯-苯乙烯共聚物(GS)和聚对苯二甲酸丁二酯-GS(PBT-GS)两种扩链剂对PET的支化和交联进行了研究,并以超临界CO₂为发泡剂进行了发泡实验。结果表明,PBT-GS扩链效果更好,PET的特性黏度和流变性能得到明显改善,采用PBT-GS改性的PET得到了泡孔结构均匀、平均孔径61 μm的泡沫塑料。与GS结合的PBT分子链可以起到大分子相容剂的作用,在PET的高性能改性中具有潜在的应用前景。

Bocz等^[41]研究了环氧扩链剂(ADR-4468)和滑石粉对回收PET发泡性能的影响。实验表明:添加0.7%(质量分数)的ADR-4468,PET的特性黏度从0.62 dL/g提高到0.87 dL/g,较高的特性黏度值足以稳定和连续地生产表观密度低于0.15 g/cm³的高膨胀泡沫;加入1%(质量分数)的滑石粉对泡沫孔成核和PET结晶均有显著影响,在较宽的密度范围内,含滑石粉泡沫的泡状结构比不含滑石粉的泡沫更加均匀。

3.3 PET纤维生产的研究

Berg等^[42]研究了羧基加成型扩链剂二恶唑啉(1,3-PBO)、羟基加成型扩链剂N,N'-羧基双己内酰胺(CBC)对回收PET性能的影响。结果表明:扩链剂对PET性能的影响与其化学组成和浓度有关,1,3-PBO和CBC是非常有效的扩链剂,通过较小浓度的添加,0.2%(质量分数)的1,3-PBO或0.3%的CBC,在不显著影响PET性能的情况下,以有效且经济的方法实现了所得化合物分子量的提高,使改性PET的特性黏度达到了用于纤维生产的要求。

陆烨邦等^[43]研究了BOZ和PMDA对回收PET的扩链改性效果,探究了实验条件对改性PET纺丝力学性能的影响。实验表明:BOZ和PMDA均能改善PET的挤出效果,当添加2.5%的BOZ或1.25%的PMDA时,PET特性黏度分别为0.77 dL/g和0.82 dL/g;两种扩链剂联用比各自单独使用时的最佳含量低,添加0.75%的PMDA和2% BOZ扩链效果最好,PET特性黏度可达0.88 dL/g,单丝断裂强度为5.8 cN/dtex,有效提升了纺丝的力学性能。

4 结语

针对PET在挤出等加工工艺中主要存在的低熔体强度、低黏度等缺陷,国内外在改性PET方面开展了大量的研究,相比于熔融缩聚和固相缩聚,反应挤出扩链改性因其较低成本和较优的改性效果更适用于PET性能提升的研究和工业化生产。通过反应挤出的扩链改性在一定程度上提高了PET的可加工性和PET产品的性能,满足生产工艺要求的改性PET在材料共混、泡沫塑料生产等领域的应用取得了一定的拓展;配方体系不同,改善PET的性能也不同。目前,国内较多的改性方法仍处于实验室研发阶段,与国外规模化生产相比仍有一定距离。因此,仍需要从配方、设备、加工工艺等方面进行创新和优化研究,进而实现工业化生产。

参考文献

- [1] 董莉. 山东化工, 2021, 50(8):71-72, 75.
Dong Li. Shandong Chemical Industry, 2021, 50(8):71-72, 75.
- [2] Iskander M, et al. Key Engineering Materials, 2020, 869:394-399.
- [3] 杨晓铭. 中国包装, 2015, 35(11):58-60.
Yang Xiaoming. China Packaging, 2015, 35(11):58-60.
- [4] 戴剑峰, 等. 高分子材料科学与工程, 2009, 25(10):71-73, 77.
Dai Jianfeng, et al. Polymer Materials Science & Engineering, 2009, 25(10):71-73, 77.
- [5] Bikar D N, et al. Polymer Degradation and Stability, 1999, 63(2): 213-218.
- [6] Harth M, et al. Journal of Applied Polymer Science, 2020, 138(13). DOI.org/10.1002/app.50110.
- [7] Tapia J B, et al. Materials Chemistry and Physics, 2019, 229:474-481.
- [8] Arayesh H, et al. Journal of Applied Polymer Science, 2020, 137(41). DOI.org/10.1002/app.49243.
- [9] Harth M, et al. Macromolecules, 2014, 47(13):4 471-4 478.
- [10] 赵玲, 等. 聚酯工业, 2004(1):1-4.
Zhao Ling, et al. Polyester Industry, 2004(1):1-4.
- [11] Izabela S R, et al. Polimery, 2013, 58(1):3-13.
- [12] 王顶. PET的反应挤出扩链及扩链剂的合成研究[D]. 大连:大连理工大学, 2004.
Wang Ding. The study on the chain extension of PET during reactive extrusion and the synthesis of chain extender[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2004.
- [13] Tobias S, et al. Polymer Reviews, 2022, 62(2):296-350.
- [14] 刘波, 等. 上海塑料, 2012(4):25-30.
Liu Bo, et al. Shanghai Plastics, 2012(4):25-30.
- [15] 张素文, 等. 聚酯工业, 2007(4):15-18.
Zhang Suwen, et al. Polyester Industry, 2007(4):15-18.
- [16] Wu W J, et al. Polymers, 2022, 14(3). DOI.org/10.3390/polym14030510.
- [17] 成晓燕, 等. 化工新型材料, 2021, 49(2):244-248.
Cheng Xiaoyan, et al. New Chemical Materials, 2021, 49(2):244-248.
- [18] Yang Z P, et al. Journal of Applied Polymer Science, 2017, 135(8). DOI.org/10.1002/app.45805.
- [19] 李辰昊, 等. 工程塑料应用, 2017, 45(6):122-125.
Li Chenhao, et al. Engineering Plastics Application, 2017, 45(6):122-125.
- [20] Torres N, et al. Journal of Applied Polymer Science, 2001, 79(10): 1 816-1 824.
- [21] Zhao Z Y, et al. ACS omega, 2020, 5(30):19 247-19 254.
- [22] Zhang Y J, et al. Polymer Engineering & Science, 2011, 51(9):1 791-1 796.
- [23] Liu Y Y, et al. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2018, 133(3):1 447-1 454.
- [24] Pandey V, et al. Polymer Engineering & Science, 2020, 60(10):2 511-2 516.
- [25] 马静, 等. 塑料科技, 2018, 46(5):38-42.
Ma Jing, et al. Plastics Science and Technology, 2018, 46(5):38-42.
- [26] Forsythe J S, et al. Journal of Applied Polymer Science, 2006, 100(5):3 646-3 652.
- [27] 吕云伟, 等. 现代塑料加工应用, 2009, 21(2):17-19.
Lyu Yunwei, et al. Modern Plastics Processing and Applications, 2009, 21(2):17-19.
- [28] Qin D, et al. MATEC Web of Conferences, 2016, 67. DOI.org/10.1051/mateconf/20166706052.
- [29] Yao S, et al. Journal of Applied Polymer Science, 2020, 137(41). DOI.org/10.1002/app.49268.
- [30] 刘少峰, 等. 高分子材料科学与工程, 2019, 35(5):63-70.
Liu Shaofeng, et al. Polymer Materials Science & Engineering, 2019, 35(5):63-70.
- [31] 李强, 等. 高分子材料科学与工程, 2020, 36(9):15-21.
Li Qiang, et al. Polymer Materials Science & Engineering, 2020, 36(9):15-21.
- [32] 刘少峰, 等. 现代塑料加工应用, 2018, 30(6):17-20.
Liu Shaofeng, et al. Modern Plastics Processing and Applications, 2018, 30(6):17-20.
- [33] Wang K, et al. Polymer Bulletin, 2017, 74(7):2 479-2 496.
- [34] Inuwa I M, et al. Journal of Vinyl and Additive Technology, 2017, 23(1):45-54.
- [35] Santos R M, et al. Polymers, 2022, 14(6). DOI.org/10.3390/polym14061144.
- [36] Nofar M, et al. Journal of Polymers and the Environment, 2019, 27(7):1 404-1 417.
- [37] Lago E D, et al. Materials, 2018, 12(1). DOI.org/10.3390/ma12010049.
- [38] 何光建, 等. 一种PET/PE共混合金及其制备方法和应用: 110054872B[P]. 2020-11-24.
He Guangjian, et al. The invention relates to a PET/PE blend alloy and a preparation method and application thereof: 110054872B [P]. 2020-11-24.
- [39] Ge Y K, et al. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2019, 58(9):3 666-3 678.
- [40] Li J, et al. Polymer Science, Series B, 2017, 59(2):164-172.
- [41] Boczk K, et al. Advanced Industrial and Engineering Polymer Research, 2021(4):178-186.
- [42] Berg D, et al. Polymer Engineering & Science, 2019, 59(2):284-294.
- [43] 陆烨邦, 等. 工程塑料应用, 2017, 45(11):13-18.
Lu Yebang, et al. Engineering Plastics Application, 2017, 45(11):13-18.