

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2023.10.025

回收PET力学性能的改性研究进展

赵恬娇,董亚鹏,王淑惠,赵佳乐,张岩丽,王克智,卢静琼,王波

(太原科技大学化学工程与技术学院,太原 030024)

摘要: 简述了回收聚对苯二甲酸乙二酯(rPET)在机械回收的二次加工过程中力学性能下降的主要原因。针对这一问题,介绍了近年来国内外针对rPET力学性能改性方面的研究进展,总结并归纳了目前国内外相关研究提出的与rPET进行共混改性以改善其力学性能的材料及方法,包括弹性体改性、合金化改性、无机材料改性、生物质材料改性、扩链剂改性、成核剂改性、多种材料复合改性等,分析了以上方法在改性rPET力学性能方面的优缺点,并对rPET专用力学性能改性助剂的发展方向进行了展望。

关键词: 回收聚对苯二甲酸乙二酯;力学性能;改性;研究进展

中图分类号: TQ325.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2023)10-0167-06

Research Progress of Mechanical Properties Modification of Recycled PET

Zhao Tianjiao, Dong Yapeng, Wang Shuhui, Zhao Jiale, Zhang Yanli, Wang Kezhi, Lu Jingqiong, Wang Bo

(School of Chemical Engineering and Technology, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract : The main reasons for the decrease in mechanical properties of the rPET during the secondary processing of mechanical recycling were briefly described. Therefore, the research progress of the modification of the mechanical properties of the rPET at home and abroad in recent years was reviewed. At the same time, the methods and the materials proposed in current domestic and international research which were blended with the rPET to improve the mechanical properties of the rPET composites were summarized, including the elastomers modification, the alloys modification, the inorganic materials modification, the biomass materials modification, the chain extender modification, the nucleating agent modification, the composite modification of various materials method, etc. The advantages and disadvantages of the above methods in modifying the mechanical properties of the rPET were also analyzed. Finally, the development direction of the mechanical properties modifier of the rPET was prospected.

Keywords : recycled polyethylene terephthalate ; mechanical property ; modification ; research progress

聚对苯二甲酸乙二酯(PET)是一种性能优异的工程塑料,具有透明、无毒、耐热等优点,主要应用于食品、饮料包装等方面^[1],在饮料包装领域,PET材质的饮料瓶占比高达70%以上^[2]。虽然人类环保意识持续提高,但大量PET饮料瓶仍不可避免地流向土壤和水体^[3]。同时,由于PET瓶极难被空气或微生物降解,其在自然环境中的不断积累对人类的生​​产生活以及健康造成了严重危害^[4-5]。因此,如何实现PET瓶的有效利用,减少甚至杜绝其造成的危害是回收PET(rPET)领域亟待解决的问题^[6]。

目前,国内外rPET的利用方式主要包括机械回收和化学回收等。相较化学回收,机械回收具有方法简便、成本较

低等优势。但是,由于rPET分子链中含有酯键,在机械回收的二次加工过程中,微量水分就能使其分子链在高温下发生断裂,致使其相对分子质量下降,黏度降低,结晶结构变化,从而带来力学性能的下降^[7-9]。因此,在二次加工过程中需要对rPET进行改性,以达到提升相对分子质量、优化结晶结构,进而获得力学性能优异的rPET材料的目的。近年来,国内外针对rPET力学性能改性的主要方法有共聚改性、共混改性等。其中共混改性由于操作简便,更适用于工业化生产。可以与rPET进行共混改性提升其力学性能的材料主要有弹性体、其它聚合物、无机材料、生物质材料、扩链剂、成核剂等^[10]。笔者首先对国内外使用共混改性方式改善rPET力

基金项目: 山西科技成果转化引导专项(202204021301061),山西省专利转化专项计划项目(202303010),山西省高等学校科技创新项目(2021L315),太原科技大学研究生联合培养示范基地项目(JD2022016)

通信作者: 王波,工学博士,副教授,研究方向为聚合物功能化改性

收稿日期: 2023-07-23

引用格式: 赵恬娇,董亚鹏,王淑惠,等.回收PET力学性能的改性研究进展[J].工程塑料应用,2023,51(10):167-172.

Zhao Tianjiao, Dong Yapeng, Wang Shuhui, et al. Research progress of mechanical properties modification of recycled PET[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(10): 167-172.

学性能的研究进行了综述,最后对rPET共混改性剂的发展方向进行了展望,以期开发高效的rPET共混改性剂提供参考。

1 弹性体改性

弹性体是一种聚合物材料,其拥有优异的韧性,在较小应力作用下即可发生较大形变,且在应力去除后仍可以恢复到原有状态。因此,弹性体广泛应用于增韧热塑型聚合物领域。目前,常用于rPET增韧改性的弹性体有动态硫化热塑性弹性体(TPV)、热塑性弹性体氢化苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物(SEBS)、三元乙丙橡胶(EPDM)、乙烯-辛烯共聚物(POE)、丁苯橡胶(SBR)等^[11-12]。

张华集等^[13]考察了TPV和马来酸酐接枝聚丙烯(PP-g-MAH)对rPET的增韧和增容作用。研究发现,当TPV的质量分数为9.95%时,共混物的缺口冲击强度较纯rPET提高了36.90%,结晶温度提高了2.82℃。同时,由于PP-g-MAH的加入提高了共混体系的相容性,当PP-g-MAH的质量分数为1.8%时,共混体系的缺口冲击强度提高了47.02%,断裂伸长率提高了129.06%。Zander等^[14]考察了SEBS对rPET的增韧作用。力学分析测试结果表明,添加量为5%的SEBS使rPET的韧性提高了350%。将马来酸酐接枝到SEBS上,制备得到SEBS-MA,在添加量保持不变的前提下,由于SEBS-MA能够有效提高SEBS和rPET之间的相容性,使得rPET的韧性提高了550%。曹渊^[15]研究了甲基丙烯酸缩水甘油酯(GMA)接枝EPDM(EPDM-g-GMA)对rPET力学性能的影响,结果表明,EPDM-g-GMA添加量为15%时,共混体系的冲击强度较rPET提高了7倍。甘晓平^[16]研究了POE添加量对rPET力学性能的影响。结果表明,当POE添加量为12%时,共混材料的断裂伸长率提高了25.26%。但是,POE与rPET之间存在相容性较差的问题,为了解决这一问题,Liu等^[17]使用茂金属POE(mPOE)增加rPET.POE共混体系的相容性。结果表明,加入含量为2%的mPOE后,共混物的断裂伸长率增加到130%。当mPOE含量达到5%时,共混物的断裂伸长率提高了近3倍。以下研究虽然是针对POE增韧原生PET(VPET)进行,但所用增容剂为聚合物常用增容剂,对改性rPET也具有一定参考价值。王展等^[18]采用GMA接枝POE,考察了GMA接枝率对vPET改性效果的影响。结果表明,在弹性体含量相同时,随着GMA接枝率的增加,vPET与POE间的相容性有所提高,当GMA接枝率为3%时,共混体系的相容性达到最佳,此时共混体系的缺口冲击强度是纯vPET的21倍。Jazani等^[19]采用马来酸酐接枝SBR(SBR-g-MAH)对vPET进行增韧改性,研究SBR-g-MAH的添加量对vPET/SBR-g-MAH共混材料性能的影响。结果表明,当SBR-g-MAH添加量为15%时,增韧效果达到最佳,共混材料的缺口冲击强度较纯vPET提高了201.39%。

虽然使用弹性体改性rPET可以提高其冲击强度、断裂伸长率等,但是会对rPET的拉伸强度产生一定的不利影响^[20]。此外,弹性体与rPET的相容性差也会严重影响改性

效果^[21]。同时,弹性体改性rPET工业化成本高以及与rPET基体相容性较好的弹性体种类较少等问题限制了弹性体在rPET改性领域的大规模应用。

2 合金化改性

合金化改性是指采用两种及以上具有特定属性的聚合物进行共混,从而得到相对于单一组分而言综合性能更加优异的共混体系的方法。该方法可以在提高rPET冲击强度的同时保证其它力学性能不降低^[22]。目前,常用于与rPET合金化改性的材料有聚酰胺11(PA11)、聚苯乙烯(PS)、聚乙烯(PE)、聚碳酸酯(PC)、尼龙66(PA66)等。

Khan等^[23]使用熔融共混法制备了rPET/PA11合金并研究了共混体系的力学性能,结果表明,在PA11添加量为20%时,共混体系的冲击强度从110.53 J/m提高到147.12 J/m,拉伸强度提高了50%以上。而作者所在课题组将相容剂苯丙树脂Joncryl引入到上述体系后^[24],由于rPET与PA11相容性的改善,共混体系的拉伸强度从26.8 MPa提高到46.24 MPa,冲击强度从110.53 J/m提高到667.68 J/m。Tahmasebi等^[25]使用PS合金化改性rPET,并用GMA接枝PS嵌段共聚物(SbB-g-GMA)作为增容剂。结果表明,PS的加入显著提升了共混体系的热稳定性,当PS的添加量为30%时,较纯rPET而言,体系初始降解温度提高了5%,失重率降低了10%。加入7% SbB-g-GMA后,共混体系的冲击强度达到最佳,较未加入前提高了50%。Chen等^[26]采用回收高密度聚乙烯(rPE-HD)对rPET进行合金化改性,并添加乙烯-GMA共聚物(E-GMA)作为增容剂。研究了E-GMA含量对共混物力学性能的影响。力学测试结果表明,当E-GMA添加量为5%时,共混物的力学性能达到最佳,拉伸强度、断裂应变和弯曲强度比rPET/rPE-HD共混料提高了28%,85%和29%。曾以仁^[2]将rPET与PC共混制备合金体系,并用PP-g-MAH进行增容。结果表明,PP-g-MAH的加入使得rPET/PC共混合金的冲击断面变得均匀,相容性变好,当PP-g-MAH添加量为20%时,共混合金的拉伸强度和断裂伸长率达到最佳,较未添加时分别提高了70%和25%。张华集等^[27]采用POE-g-MAH为增容剂改性rPET/茂金属线型低密度聚乙烯(mPE-LLD)共混合金体系,并研究了POE-g-MAH对共混体系力学性能的影响。结果表明,当POE-g-MAH添加量为5%时,共混合金的缺口冲击强度比纯rPET的缺口冲击强度提高了217%,断裂伸长率提高了14.5倍。

PA,PS,PE等合金材料与rPET之间由于存在结构差异大、分散相与基体之间的界面黏附性能较差等问题导致相容性较差^[28]。PC虽然与rPET结构类似,但是其在熔融共混阶段会与rPET发生酯交换反应,该反应的不可控性可能会对改性效果带来不利影响^[29]。

3 无机材料改性

无机材料可以作为rPET基体异相成核点,实现物理成核,使rPET晶体在其表面扩散生长,从而减小rPET的球晶尺寸,减少其折叠链表面的自由能,提高其结晶速率,进而使

其强度、刚性、韧性等力学性能得到明显改善^[30]。目前,常用于rPET改性的无机材料主要有碳酸钙(CaCO_3)、二氧化硅(SiO_2)、蒙脱土(MMT)、碳纳米管(CNT)、粉煤灰、滑石等。

Thumsorn等^[31]研究了 CaCO_3 对rPET力学性能的影响。结果表明,当 CaCO_3 的添加量为5%时,与纯rPET材料相比,复合材料的缺口冲击强度提高了18%。Yang等^[32]采用经硅烷偶联剂A-187修饰后的 SiO_2 作为成核剂。研究结果表明,A-187有效改善了复合材料的相容性,在 SiO_2 添加量为0.1%时即可使复合材料的拉伸强度达到20%。当 SiO_2 添加量为2.5%时,结晶温度提高45℃,结晶性能达到最佳。Kerboua等^[33]使用MMT改性rPET,制备了rPET/MMT复合材料。研究发现,添加MMT能够加快rPET结晶速度,当MNT添加量为2%时,复合材料的拉伸强度较未添加时提高了17.9%。Josephs等^[34]研究了粉煤灰的粒径、含量对rPET力学性能的影响。结果表明,粉煤灰粒径越小、含量越高,共混物的拉伸强度越高,当粉煤灰粒径为45 μm 、含量为15%时,材料的拉伸强度达到最佳,当粉煤灰含量大于15%时会发生团聚现象,降低共混物的拉伸性能。Thumsorn等^[35]制备了rPET/滑石复合材料。研究发现,当滑石添加量为5%~10%时,复合材料的拉伸和弯曲强度随着滑石添加量的增加而增加,其中,拉伸强度的增加与滑石的板状结构有关,弯曲强度的增加与滑石的刚度有关。Afgan等^[36]首先将rPET与原生PET(vPET)熔融共混以增强结晶性能,然后使用滑石粉对复合材料进行力学性能改性。结果表明,与原复合材料相比,添加滑石后的复合材料表现出更好的热稳定性。当滑石粒径为45 μm 时,复合材料的力学性能达到最佳,其弹性模量提高了50%。Katalagarianakis等^[37]采用回收碳纤维与rPET进行共混,通过熔融挤出法制备复合材料。结果表明,碳纤维可以作为成核剂提高复合材料的结晶温度。当碳纤维添加量达到40%时,复合材料的拉伸弹性模量达到最大,提高了390%。徐伏等^[38]使用CNT对vPET进行改性,研究了CNT含量对vPET/CNT复合材料结晶性能和力学性能的影响。结果表明,CNT对vPET基体具有明显的异相成核作用,能够显著提高vPET的熔融温度和相对结晶度。CNT用量为1%时,复合材料的断裂伸长率和弯曲强度均达到最大值,较vPET而言分别提高了29.4%和9.89%。随着CNT使用的日趋广泛,这一研究对于rPET改性同样具有重要意义。

使用无机材料改性rPET存在的最大问题是其具有较强的表面极性,因此与非极性的rPET共混不可避免带来相容性问题,导致其很难在基体中均匀分散,这种较差的分散导致的团聚现象可以直接对改性rPET的力学性能带来不利影响^[39]。

4 生物质材料改性

生物质材料来源广泛,价格低廉,其与rPET共混改性可以提高复合材料力学性能、结晶性能,成为目前聚合物改性领域的研究热点^[40]。目前,常用于改性的生物质材料包括椰枣树叶纤维(DPLF)、再生报纸纤维(NPF)、大麻纤维、红麻纤

维、咖啡渣、稻粉等。

Dehghari等^[41]利用DPLF增韧改性rPET,制备得到rPET/DPLF复合材料,研究DPLF含量与材料力学性能的影响。结果表明,与纯rPET相比,DPLF使复合材料的拉伸强度提高了42%,且还具有提升rPET结晶温度和结晶度的效果。Ardekani等^[42]使用NPF增强rPET的力学性能。研究发现,NPF的加入提高了复合材料的结晶温度,当NPF的添加量为5%时,复合材料的拉伸强度和弯曲强度均达到最高。此时,复合材料的热稳定性也有所提升,主要分解温度可达到350℃。Stelea等^[43]采用大麻纤维增强rPET制备复合材料,研究了大麻纤维含量对rPET拉伸性能的影响。结果表明,当纤维含量小于50%时,rPET的拉伸强度随纤维含量的增大而增大,当纤维含量为50%时,拉伸强度达到最大值26.2 MPa。继续增加纤维含量,由于大麻纤维与rPET基体的相容性变差导致复合材料的拉伸强度降低。Owen等^[44]使用红麻纤维改性rPET,研究了纤维含量与纤维前处理对rPET力学性能的影响。结果表明,由于界面相容性差,添加10%红麻纤维rPET的拉伸强度从34.3 MPa下降到28.9 MPa,然而,在使用碱处理和环氧树脂浸渍法改性红麻纤维后,红麻纤维与rPET的界面相容性得到改善后,拉伸强度增加到86.5 MPa。Cecon等^[45]使用咖啡渣和稻壳粉与rPET共混制备复合材料。研究结果表明,不同生物质材料的加入均提高了rPET的拉伸弹性模量,其中添加10%咖啡渣的复合材料表现出最优的拉伸弹性模量。但是由于两种生物质材料与rPET界面相容性较差,其最大应力和应变呈现下降的趋势。

使用生物质材料改性rPET的效果主要取决于其在rPET基质中的分散性,生物质材料与rPET之间同样存在相容性问题,导致生物质材料在rPET基体中难以均匀分散,对增强复合材料力学性能产生一定的不利影响。此外,添加生物质材料的rPET复合材料易吸水,不利于其在饮料包装领域的使用^[46]。

5 扩链剂改性

向rPET基体中引入一定量的扩链剂,利用双官能团或多官能团分子材料与rPET分子链的末端羧基或羟基反应,把不同长度的rPET分子链相接,可以起到增加相对分子质量,进而增强力学性能的作用^[47]。根据与rPET端基的反应类型不同,扩链剂分为端羧基加成型和端羟基加成型两种,常用的端羧基加成型扩链剂主要是双恶唑啉类和环氧类化合物,端羟基加成型扩链剂主要有氰酸酯类和酸酐类化合物。

Makkam等^[48]使用牌号为ADR-4380的环氧扩链剂对rPET进行扩链改性,研究了其对rPET的分子结构和拉伸性能的影响。结果表明,扩链剂的添加起到了提高rPET分子量和提高其分子量分布的作用。当扩链剂含量为0.6%时,拉伸强度由16 MPa提升至28 MPa,拉伸性能最佳。刘宝玉等^[49]使用牌号为CE051的环氧扩链剂改性rPET,结果表明,

添加量为1%的CE051使rPET缺口冲击强度由3.0 kJ/m²提高到6.3 kJ/m²。吴波等^[50]采用均苯四甲酸二酐(PMDA)对rPET进行扩链改性,考察了PMDA用量对rPET力学性能的影响。结果表明,当PMDA添加量为0.75%时,扩链后rPET材料的拉伸强度最大,可达到60 MPa。Zhang等^[51]使用二苯甲烷二异氰酸酯(PMDI)对rPET/线型低密度聚乙烯(PE-LLD)/马来酸酐接枝SEBS (SEBS-g-MAH)共混物进行改性,PMDI的加入提高了共混物的分子量,当PMDI含量为1.1%时,共混物的冲击强度提高了120%。Wang等^[52]使用扩链剂SAG-008和4,4'-二氨基二苯甲烷四缩水甘油醚(TGDDM)对rPET进行改性。SAG-008带有支链环氧集团,能够使rPET形成支链聚合物,TGDDM带有四官能环氧基团,能够使rPET的分子量进一步提高。力学分析表明,由于分子量的增加,改性后的rPET获得了更高的弯曲强度、弯曲弹性模量和冲击强度。然而目前针对扩链剂改性rPET的研究有限,因此,使用扩链剂提高vPET力学性能的研究也对rPET具有一定的参考作用。Zhao等^[53]使用异氰酸酯三聚体(C-HK)为扩链剂对vPET进行改性,研究了C-HK的添加量对vPET的分子量和力学性能的影响。结果表明,当C-HK添加量由0.6%提高到1.4%时,vPET的数均分子量由 2.36×10^4 提高到 5.46×10^4 ,vPET弯曲强度提高了56.8%,冲击强度提高了5倍。刘少峰等^[54]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)两种扩链剂联用改性vPET。结果表明,扩链剂联用添加量为1.6%时,vPET的拉伸强度和弯曲强度达到最高,分别为63.3 MPa和79.2 MPa,较单独使用时改性效果更好。

端羟基加成型扩链剂具有较大毒性,对人体健康存在危害,无法应用于食品接触级材料,大大限制了改性后的rPET在饮料包装领域的应用。而端羧基加成型扩链剂会使rPET的羧基含量增高,从而影响力学性能^[55]。

6 成核剂改性

rPET结晶结构的变化与其力学性能息息相关。因此,通过改变rPET结晶行为,从而获得力学性能优异的rPET材料一直是其改性领域的重要课题。由于成核剂改性热塑性聚合物效果良好,且自身无毒无害,可用于饮料包装领域,因此工程塑料行业主要通过加入成核剂的方式来优化塑料的结晶结构^[56]。

Garcia^[57]最早提出了PET与第一代聚丙烯商用成核剂苯甲酸钠之间会发生化学反应,反应过程中PET末端会形成阴离子端基,这种基团可以起到很好的成核作用,从而提高PET的结晶速率,进而提高其力学性能。随后,Legras等^[58]发现含有羧酸盐基团的成核剂能够显著提高PET的结晶速率,但是这类成核剂会造成PET分子量的下降,进而对PET的力学性能产生不利影响。梁伟成^[56]将尼龙(PA)专用的长链线性羧酸钙盐NAV101成核剂与vPET熔融共混,考察NAV101对vPET结晶能力和分子量的影响。结果表明,当NAV101添加量为2.5%时,vPET的结晶温度提高了

11.07 °C,结晶效果最佳。然而此时vPET的特性黏度损失过大,严重影响其力学性能,因此综合考虑结晶效果和特性黏度,NAV101的添加量不宜超过1.5%。袁飞虎等^[59]使用商用成核剂乙烯-甲基丙烯酸钠离聚物(Surlyn)对rPET进行改性,结果表明,Surlyn添加量为1%时能够明显提高rPET的结晶速率,此时rPET的拉伸强度提高5%,力学性能达到最佳。

由于成核剂分子量较小,因此其与rPET相容性较差,导致其改性效果受限。此外,成核剂改性rPET的研究仅仅局限于使用现有商品化聚合物成核剂改性,目前,尚未出现专用于rPET改性的成核剂。

7 多种材料复合改性

由于单一使用某种改性材料有时在rPET改性领域无法满足实际生产需求^[60]。因此,多种材料复合改性rPET受到越来越多的关注。

Tang^[61]等使用扩链剂二苯基甲烷二异氰酸酯(MDI)与PC协同改性rPET。结果表明,PC的加入可以提高rPET的冲击强度且MDI的加入在提高rPET分子量的同时改善了共混物的相容性。当MDI添加量为0.9%时,共混物的缺口冲击强度相比纯rPET提高了307.5%。Peng等^[62]使用PC与乙烯-丙烯酸丁酯-GMA共聚物(PTW)改性rPET。研究表明,PC的加入可以提高rPET的冲击强度。同时,加入PTW后rPET/PC共混体系的冲击强度从8.3 kJ/m²增长为23.11 kJ/m²。扩链剂和成核剂复合改性rPET的研究较少,但在vPET中的研究较多,这同样可以为rPET的改性研究提供参考。Liu等^[63]研究了PMDI作为扩链剂、乙烯-甲基丙烯酸钠离聚物(Surlyn)作为成核剂两者复合对vPET的改性效果。结果表明,Surlyn促进了vPET结晶的效果,PMDI的添加进一步增强了改性后vPET的力学性能,将冲击强度提升了54.8%。聂鑫等^[64]首先采用扩链剂PMDA对vPET进行改性,然后研究了成核剂AClyn对vPET/PMDA共混体系性能的影响。结果表明,与未添加AClyn的PET/PMDA体系相比,添加AClyn可以加快vPET/PMDA体系的扩链反应速率,AClyn对vPET具有一定的降黏增塑作用,并且AClyn含量越高,增塑作用越大。相较于未添加AClyn的vPET/PMDA体系,添加0.5% AClyn可以显著细化vPET晶粒,减小晶粒尺寸。

目前,多种材料复合改性rPET研究较少,复合改性剂各组分对rPET性能的影响规律与机制尚不明确。因此,暂不具备工业化应用条件。

8 结语

针对rPET二次加工带来的相对分子质量和力学性能下降等缺点,国内外已经开展了大量的研究并取得了一定的进展。但是目前针对rPET力学性能的改性方法和改性剂仍然存在生产成本低、改性剂选择范围小且与rPET相容性差、rPET专用助剂空白等问题。因此,从rPET的分子结构特点以及结晶行为规律出发,开发兼具扩链、成核作用且与rPET基体具有良好相容性的专用成核剂或成核剂复合体系,并通过适合工业化生产的共混方式改性,获得性能优异的rPET

材料对优化我国rPET再生行业的结构,促进再生rPET行业的良性循环具有重要意义。

参考文献

- [1] Sousa A, et al. Green Chemistry, 2021, 23(22):8 795–8 820.
- [2] 曾以仁. 回收PET瓶片扩链及分别与PP和PC共混改性研究[D]. 南昌:华东交通大学, 2017.
- Zeng Yiren. Study of rPET chain extending and blending with PP and PC respectively[D]. NanChang: East China Jiaotong University, 2017.
- [3] 龙智. 废弃聚对苯二甲酸乙二醇酯的再资源化研究[D]. 重庆:重庆大学, 2008.
- Long Zhi. Study on recycling and reutilization of postconsumer poly(ethylene terephthalate) [D]. ChongQing: Chongqing University, 2008.
- [4] Koelmans A, et al. Water Research, 2019, 155:410–422.
- [5] Gao H, et al. Science of the Total Environment, 2019, 651:484–492.
- [6] Bach C, et al. Water Research, 2012, 46(3):571–583.
- [7] Geyer B, et al. Express Polymer Letters, 2016, 10(7):559–586.
- [8] Torres N, et al. Journal of Applied Polymer Science, 2001, 79(10): 1 816–1 824.
- [9] Zare Y. Waste Management, 2013, 33(3):598–604.
- [10] 邓娟, 等. 塑料助剂, 2018(2):6–8, 12.
- Deng Juan, et al. Plastics Additives, 2018(2):6–8, 12.
- [11] 韩吉彬, 等. 弹性体, 2020, 30(3):70–77.
- Han Jibin, et al. China Elastomerics, 2020, 30(3):70–77.
- [12] 徐忠亮. 石化技术, 2019, 26(6):377–380.
- Xu Zhongliang. Petrochemical Industry Technology, 2019, 26(6): 377–380.
- [13] 张华集, 等. 塑料科技, 2012, 40(1):60–64.
- Zhang Huaji, et al. Plastics Science and Technology, 2012, 40(1): 60–64.
- [14] Zander N, et al. Polymer International, 2021, 70(6):742–748.
- [15] 曹渊. 具有扩链功能的rPET增韧剂的制备及性能研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2015.
- Cao Yuan. Preparation and properties of touching & chain-extending additives of rPET[D]. HeFei: Hefei University of Technology, 2015.
- [16] 甘晓平. r-PET/TPV、r-PET/POE共混合金材料的制备及性能研究[D]. 福州:福建师范大学, 2012.
- Gan Xiaoping. Preparation and properties of r-PET/TPV and r-PET/POE blends[D]. FuZhou: Fujian Normal University, 2012.
- [17] Liu Y, et al. Journal of Macromolecular Science Part B-physics, 2010, 49(4):615–628.
- [18] 王展, 等. 化工新型材料, 2022, 50(2):150–154.
- Wang Zhan, et al. New Chemical Materials, 2022, 50(2): 150–154.
- [19] Jazani O, et al. Macromolecular Symposia, 2008, 263(1):67–69.
- [20] 冯凯, 等. 中国塑料, 2022, 36(7):157–164.
- Feng Kai, et al. China Plastics, 2022, 36(7):157–164.
- [21] 王展. 聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)的扩链增韧研究[D]. 长春: 长春工业大学, 2021.
- Wang Zhan. Research on chain extension and toughening of polyethylene terephthalate (PET)[D]. ChangChun: Changchun University of Technology, 2021.
- [22] 王美琳. ABS/PET合金体系改性研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2018.
- Wang Meilin. Study on modification of ABS/PET alloy system [D]. JiLin: Jilin University, 2018.
- [23] Khan Z I, et al. Progress in Rubber Plastics and Recycling Technology, 2021, 37(3):233–244.
- [24] Khan Z I, et al. Express Polymer Letters, 2021, 15(12): 1 206–1 215.
- [25] Tahmasebi F, et al. Journal of Polymers and the Environment, 2023, 31(7):3 106–3 119.
- [26] Chen R S, et al. Materials Sciences and Applications, 2015, 5(13): 943–952.
- [27] 张华集, 等. 工程塑料应用, 2010, 38(12):4–7.
- Zhang Huaji, et al. Engineering Plastics Application, 2010, 38(12): 4–7.
- [28] Cook W D, et al. Journal of Applied Polymer Science, 1996, 62 (10):1 699–1 708.
- [29] 汤先文, 等. 国外塑料, 2005(3):36–40.
- Tang Xianwen, et al. World Plastics, 2005(3):36–40.
- [30] 闫新华, 等. 化工进展, 2010, 29(9):1 687–1 692, 1 699.
- Yan Xinhua, et al. Chemical Industry and Engineering Progress, 2010, 29(9):1 687–1 692, 1 699.
- [31] Thumsorn S, et al. Journal of Applied Polymer Science, 2012, 127: 1 245–1 256.
- [32] Yang Y Z, et al. Journal of Applied Polymer Science, 2006, 102(1): 655–662.
- [33] Kerboua N, et al. Journal of Applied Polymer Science, 2010, 117: 129–137.
- [34] Josephs S, et al. Journal of Applied Polymer Science, 2011, 119 (1):201–208.
- [35] Thumsorn S, et al. Polymers for Advanced Technologies, 2017, 28 (8):979–985.
- [36] Afgan S, et al. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 21:3 579–3 593.
- [37] Katalagarianakis A, et al. Additive Manufacturing, 2022, 60. DOI: 10.1016/j.addma.2022.103246.
- [38] 徐伏, 等. 塑料科技, 2016, 44(11):21–25.
- Xu Fu, et al. Plastics Science and Technology, 2016, 44(11): 21–25.
- [39] 殷悦. PET诱导成核体系的构筑及其对结晶行为的影响[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2022.
- Yin Yue. Construction of induced nucleation system for PET and its effect on crystallization behavior[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022.
- [40] 童文瑄, 等. 塑料工业, 2020, 48(6):13–16, 42.

- Tong Wenxuan, et al. China Plastics Industry, 2020, 48(6): 13–16, 42.
- [41] Dehghani A, et al. Materials & Design, 2013, 52: 841–848.
- [42] Ardekani S M, et al. Fibers and Polymers, 2014, 15(7): 1 531–1 538.
- [43] Stelea L, et al. Polymers, 2022, 14(3). DOI: 10.3390/polym14030481.
- [44] Owen M M, et al. Polymer Composites, 2022, 43(11): 7 724–7 738.
- [45] Cecon V S, et al. Polymers, 2022, 14(15). DOI: 10.3390/polym14153210.
- [46] Pegoretti A. Advanced Industrial and Engineering Polymer Research, 2021, 4(2): 93–104.
- [47] 郭杰. 改性回收聚酯PET瓶料吹塑薄膜成型工艺研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2016.
- Guo Jie. Research on modification of recycled PET and procission acts of blow molding films[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2016.
- [48] Makkam S, et al. Energy Procedia 2014, 56: 547–553.
- [49] 刘宝玉, 等. 塑料工业, 2013, 41(12): 111–114.
- Liu Baoyu, et al. China Plastics Industry, 2013, 41(12): 111–114.
- [50] 吴波, 等. 塑料工业, 2011, 39(10): 87–90, 108.
- Wu Bo, et al. China Plastics Industry, 2011, 39(10): 87–90, 108.
- [51] Zhang Y, et al. Polymer Degradation and Stability, 2009, 94(7): 1 135–1 141.
- [52] Wang K, et al. Polymer Bulletin, 2017, 74(7): 2 479–2 496.
- [53] Zhao Z Y, et al. Acs Omega, 2020, 5(30): 19 247–19 254.
- [54] 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.
- [55] 邢玉静. R-PET原料的品质分析及其改性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2022.
- Xing Yujing. Quality analysis and modification of R-PET raw materials[D]. GuangZhou: South China University of Technology, 2022.
- [56] 梁伟成. PET聚酯共混体系的结晶性能和机械性能研究[D]. 上海: 东华大学, 2018.
- Liang Weicheng. Reaearch on the crystalline and mechanical properties of PET polyester blends[D]. Shanghai: Donghua University, 2018.
- [57] Garcia D. Journal of Polymer Science, 1984, 22(12): 2 063–2 072.
- [58] Legras R, et al. Polymer, 1984, 25(6): 835–844.
- [59] 袁飞虎, 等. 材料研究与应用, 2010, 4(4): 699–704.
- Yuan Feihu, et al. Materials Research and Application, 2010, 4(4): 699–704.
- [60] 白晓康, 等. 工程塑料应用, 2022, 50(10): 149–153.
- Bai Xiaokang, et al. Engineering Plastics Application, 2022, 50(10): 149–153.
- [61] Tang X W, et al. Journal of Applied Polymer Science, 2007, 104(4): 2 602–2 607.
- [62] Peng Y, et al. Journal of Applied Polymer Science, 2008, 109(1): 483–491.
- [63] Liu Y Y, et al. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2018, 133(3): 1 447–1 454.
- [64] 聂鑫, 等. 北京化工大学学报(自然科学版), 2022, 49(6): 32–39.
- Nie Xin, et al. Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science Edition), 2022, 49(6): 32–39.