

doi:10.3969/j.issn.1674-7100.2016.02.001

# 复合增韧改性剂对废旧聚乙烯性能的影响研究

胡益兴<sup>1</sup>, 史军华<sup>1</sup>, 杜亚平<sup>2</sup>, 陈宪宏<sup>1</sup>

(1. 湖南工业大学 包装与材料工程学院, 湖南 株洲 412007;  
2. 湖南大学 材料科学与工程学院, 湖南 长沙 410082)

**摘要:** 以废旧高密度聚乙烯 (RHDPE) 为基材、自制复合增韧剂 (CTA) 为改性剂, 采用双螺杆挤出机制备了共混物, 研究了改性剂含量对 RHDPE 力学性能、熔融与结晶行为、热性能以及微观形貌等的影响。结果表明, 随着改性剂含量的增加, 共混物的拉伸强度和弯曲强度下降, 冲击强度明显增加; 当 CTA 的添加质量分数  $\geq 20\%$  时, 增韧幅度明显减缓。DSC 和 TGA 结果显示, 改性剂的加入对 RHDPE 结晶度和耐热性能没有产生明显影响, 但使 PE 晶体结构的完整性降低。SEM 观察冲击断面结果表明, 共混物的韧性随改性剂的添加得到了显著改善, 但当 CTA 的添加质量分数超过 20% 后, 断面显示改性剂分散不均匀、发生团聚现象, 从而导致增韧作用减缓。

**关键词:** 废旧高密度聚乙烯; 复合增韧剂; 力学性能; 增韧改性

中图分类号: TB332

文献标志码: A

文章编号: 1674-7100(2016)02-0001-07

## Study on Effects of Toughening Modifier on Properties of Recycled Polyethylene

HU Yixing<sup>1</sup>, SHI Junhua<sup>1</sup>, DU Yaping<sup>2</sup>, CHEN Xianhong<sup>1</sup>

(1. School of Packaging and Materials Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;  
2. School of Materials Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** The blends of recycled high density polyethylene (RHDPE)/home-made complex toughening agent (CTA) were prepared by a twin-screw extruder. The effects of CTA contents on mechanical properties, melting and crystallization behavior, thermal properties and microstructure of blends were studied. The results showed that the impact strength was significantly increased with the increasing content in CTA, while the elongation and tensile strength decreased. The toughening effect obviously slowed down when CTA content was over 20%. The results of DSC and TGA displayed that there was no obvious effect on the degree of crystallinity as well as thermal properties of RHDPE, but the integrity of PE crystal structure was lowered after CTA was added to RHDPE. The SEM results showed that the toughness of the blend was significantly improved, but the effect slowed down with poor dispersion and agglomerates when CTA content exceeded 20%.

**Key words:** recycled high density polyethylene; complex toughening agent; mechanical property; toughening modification

收稿日期: 2015-10-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51374102), 湖南省自然科学基金资助项目 (14JJ5020), 湖南省研究生科研创新基金资助项目 (CX2015B560)

作者简介: 胡益兴 (1990-), 男, 湖南益阳人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为高分子成型加工与改性,  
E-mail: yixinghu2015@163.com

通信作者: 陈宪宏 (1966-), 男, 湖南汨罗人, 湖南工业大学教授, 博士, 博士生导师, 主要从事高分子合成与改性及复合材料方面的教学与研究, E-mail: xianhongchen@hnu.edu.cn

## 0 引言

随着高新技术在塑料工业中的广泛应用,塑料制品的年消耗量不断增加,现已超过1亿t<sup>[1]</sup>。通常情况下,塑料的使用寿命为2~4a,且在自然环境条件下不易降解。因此,随着塑料消耗量的不断增大,废旧塑料的产生量猛增,塑料废弃物已对生态环境造成了严重的“白色污染”。近年来,随着人们生活水平的逐步提高和物流业的高速发展,我国私家车和货车的数量逐年增加,随之产生的废旧轮胎数量也逐年增加。据报道,目前全球每年约有80亿条废旧轮胎被丢弃,且其数量每年约以2%的速率增加,现已成为世界公认的“黑色污染”<sup>[2-3]</sup>。塑料与轮胎用橡胶的主要原料来源于不可再生的石油,而当今世界石油的贮存量日益减少,能源危机日趋显现。因此,如何消除或竭力降低“白色污染”和“黑色污染”对环境和生活的影响,同时将废旧塑料、废旧轮胎橡胶进行高效再利用,减少对现有资源的浪费,变废为宝,已成为科技界和产业界亟待解决的课题<sup>[4]</sup>。发达国家解决塑料发展与环境问题的重要策略是实施“3R”战略<sup>[2,5]</sup>,实践证明,其中最为适用的是回收再利用技术。

与同种新材料相比,废旧回收塑料由于存在老化等原因常会导致其力学性能(尤其是抗冲击性能与拉伸性能)显著降低,也使其抗老化性能下降。本研究以废旧回收高密度聚乙烯(recycle high density polyethylene, RHDPE)为基材,采用废旧轮胎橡胶粉(ground tire rubber, GTR)、热塑性弹性体(polyolefin elastomer, POE)和线性低密度聚乙烯(linear low density polyethylene, LLDPE)为复合增韧剂(composite toughening agent, CTA),利用三者的协同效应,采用双螺杆挤出机制备增韧改性废旧聚乙烯复合材料,研究了CTA及其含量对复合材料力学性能、熔融与结晶行为、热稳定性以及断面微观形貌等的影响。与传统的弹性体增韧改性RHDPE方法相比,该方法利用复合增韧剂,以使回收料韧性大幅度提高的同时,尽可能保持其刚性,从而使材料的综合力学性能得到改善,因而有利于拓宽回收料的应用领域,提高其回收再利用价值。

## 1 实验部分

### 1.1 主要原料

回收高密度聚乙烯(RHDPE),湖南省映鸿科技有限公司生产;

线型低密度聚乙烯(LLDPE), DFDA 7042, 中石

化扬子石油化工股份有限公司生产;

废旧轮胎橡胶粉(GTR), 80目, 湖南合得利橡胶科技有限公司生产;

热塑性弹性体(POE), Engage 8150, 美国DOW化学公司生产;

白油(增溶剂), 赛帕汉牌, 26#, 苏州赛帕汉特种油品有限公司生产;

低分子聚乙烯蜡, PEW-10, 宁波嘉和新材料科技有限公司生产。

### 1.2 主要仪器及设备

双螺杆挤出机, CTE-35型, 科倍隆科亚(南京)机械有限公司生产;

注塑机, HD-1100型, 杭州华达塑料机械有限公司生产;

万能拉力机, CMT-6000型, 深圳三思纵横科技股份有限公司生产;

简支梁冲击试验机, XJC-2225型, 承德精密试验机有限公司生产;

差示扫描量热仪(differential scanning calorimetry, DSC), STA-409C, 德国NETZCH公司生产;

热重分析仪(thermal gravimetric analyzer, TGA): Q50, 美国TA公司生产;

扫描电子显微镜(scanning electronic microscopy, SEM), JSM-6510, 日本电子株式会社(Japan Electron Optics Laboratory Co., Ltd., JEOL)生产。

### 1.3 样品的制备

#### 1.3.1 原料的预处理

分别将RHDPE、LLDPE放入温度为90~100℃的鼓风干燥箱中干燥1~2h, 备用; 而分别将POE、GTR放入40~60℃的干燥箱中干燥1~2h, 备用。

#### 1.3.2 CTA的制备

在查阅大量相关文献和完成前期试验工作的基础上, 经总结分析, 确定本研究所采用的自制复合增韧剂(CTA)各组份最佳质量配比为:

$$w(\text{GTR}) : w(\text{POE}) : w(\text{LLDPE}) = 21 : 14 : 15。$$

1) 按设定配比, 将一定量烘干后GTR放入混合机中, 将增溶剂(按被处理物质质量的3%添加)喷雾到开启的混合机中混匀后出料, 放置3~5d后备用;

2) 按设定配比, 将烘干后的LLDPE放入混合机中, 将增溶剂(按待处理物质质量的0.5%添加)喷雾到开启的混合机中, 混匀后(混合3~5min), 备用;

3) 将步骤1)准备好的材料和设定配比量的POE添加到步骤2)的混合机中, 混合均匀后(混合3~5min)出料, 备用。

4) 将步骤3)中的物料加入到双螺杆挤出机中

熔融挤出造粒,并在设定温度为60~80℃的干燥箱中干燥10 h后,制备出CTA,备用。双螺杆挤出造粒的工艺条件如下:加热段各区温度依次为165,170,170,175,175,170,170℃,机头温度为175℃;主机螺杆转速为120 r/min;喂料速度为20 r/min。

### 1.3.3 CTA改性RHDPE复合材料样品的制备

1) 将干燥好的CTA、RHDPE及聚乙烯蜡按一定配比在混合机中混合均匀,然后利用双螺杆挤出机挤出造粒。且将粒料在鼓风干燥箱中于70~90℃温度下干燥10 h,备用。双螺杆挤出机加热段各区温度依次为175,175,180,180,185,180,180℃,机头温度为180℃。主机螺杆转速为140 r/min,喂料速度为30 r/min。

2) 将烘干后的改性RHDPE复合材料注塑成测试样条,注塑工艺条件如下:料筒各段温度依次控制为185,190,190,185,180℃,模温为45℃,注射压力为45 MPa。

### 1.4 性能测试及表征

1) 拉伸强度的测定。按照GB/T 1040.5—2008中的要求进行测试,拉伸速度为20 mm/min。

2) 弯曲强度的测定。按照GB/T 9341—2008中的要求进行测试。

3) 冲击强度的测定。按照GB/T 1843—2008中的要求进行测试,V型缺口,深度为0.8 mm,摆锤冲击能量为15 J,环境温度为25℃。

4) DSC测试。取试样10 mg,升降温速率为±10℃/min,扫描范围为25~280℃,N<sub>2</sub>气氛。

5) TGA分析。取试样10 mg,升温速率为10℃/min,扫描范围为25~500℃,N<sub>2</sub>气氛。

6) SEM表征。加速电压为15 kV,测试样品为经喷金后的冲击断面。

7) 结晶度测试。结晶度按DSC法测定,其计算公式<sup>[6]</sup>为

$$X_c = \frac{\Delta H_m}{\Delta H_m^0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $X_c$ 为PE的结晶度,%;

$\Delta H_m$ 为聚合物试样的熔融热,J/g;

$\Delta H_m^0$ 为PE完全结晶试样的熔融热,参照已有文献<sup>[7-8]</sup>,取293 J/g。

## 2 结果与讨论

### 2.1 CTA含量对复合材料力学性能的影响

#### 2.1.1 缺口冲击强度

图1所示为CTA含量对RHDPE冲击强度(缺口)的影响曲线。由图可以得知,所得复合材料的冲击强度随着CTA添加质量分数的增加而增大,当CTA

的添加质量分数≤10%时,材料的冲击强度增大的幅度较为明显;当CTA的添加质量分数>10%后,其增加的幅度减缓;当CTA的添加质量分数为20%时,复合材料的冲击强度为59.4 kJ/m<sup>2</sup>,相比未添加CTA的材料增大了51.4%;随着CTA添加质量分数的继续增加(>20%后),复合材料的冲击强度增加幅度很小,表明此时材料体系中加入的CTA含量对其冲击强度基本没有影响。

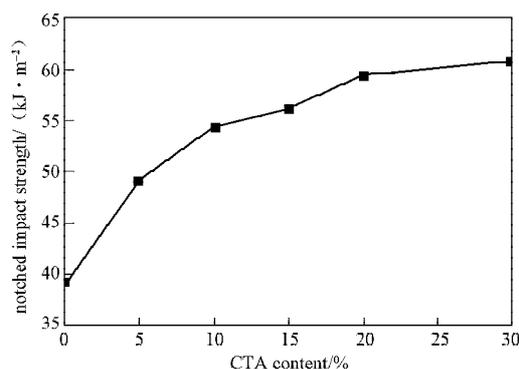


图1 CTA含量对RHDPE体系缺口冲击强度的影响  
Fig. 1 Effect of CTA content on notched impact strength of RHDPE composites

由于CTA中的POE属于聚烯烃类弹性体,主要呈现为橡胶的弹性,且与聚烯烃具有较好的相容性<sup>[9]</sup>;CTA中的GTR在该体系中主要起填充作用,经过预处理后(产生溶胀),会恢复部分弹性,与POE形成协同效应,因此,CTA本身具有优良的抗冲击性能,同时具有良好的性价比。在复合材料体系中,CTA的添加质量分数≤10%范围内,CTA在复合材料体系中分散得比较均匀,当体系受到外力作用时,能诱导产生大量的小银纹或剪切带,在这一过程中消耗了大量能量,从而使材料的抗冲击性能得到改善<sup>[10-11]</sup>;同时,CTA中POE又能抑制银纹的发展,并使银纹及时终止而不致发展成破坏性的裂纹,进一步吸收能量<sup>[12]</sup>;另外,CTA中的GTR颗粒还起到了应力集中点的分散作用,使所承受的冲击能量在体系中进一步得到分散,在三者的协同作用下,随着CTA添加量的增加,体系的冲击强度显著提高。随着CTA含量的进一步增大(添加质量分数>10%),复合材料体系的黏度增大,导致CTA在RHDPE中的分散均匀性降低,团聚程度增大;同时,CTA粒子的粒间距减小,粒间基体带变薄,致使银纹容易形成贯穿性的微裂纹,进而导致冲击强度增大的幅度减缓。随着CTA含量的进一步增加(添加质量分数>20%后),复合材料体系的黏度进一步增大,CTA在RHDPE中的分散均匀性进一步降低;另外,CTA粒子的粒间距急剧减小,粒间基体带愈发变薄,银纹更容易形

成贯穿性裂纹, 导致材料的冲击强度增加受阻。

### 2.1.2 拉伸强度和弯曲强度

不同 CTA 含量对 RHDPE 体系拉伸强度和弯曲强度的影响结果如图 2 所示。

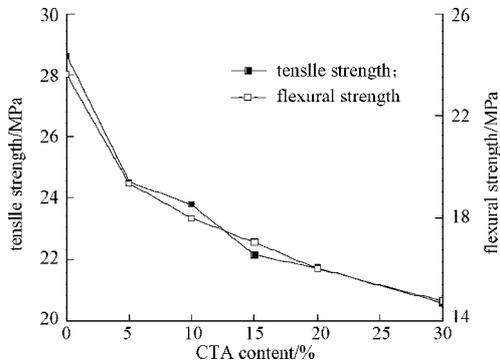


图 2 CTA 含量对 RHDPE 体系拉伸强度和弯曲强度的影响

Fig. 2 Effect of CTA content on tensile strength and flexural strength of RHDPE composites

由图 2 可知, 复合材料的拉伸强度和弯曲强度均随着 CTA 添加量的增加而降低, 其中, 在 CTA 的添加质量分数  $\leq 5\%$  范围内, 复合材料的拉伸强度和弯曲强度均下降较快; 而当 CTA 的添加质量分数  $> 5\%$  后, 其下降幅度减缓。这是由于 CTA 中含有 POE 及胶粉中被溶胀橡胶组分, 其强度和弹性模量均比 RHDPE 基体树脂低很多, 因此, 随着 CTA 在材料体系中含量的增加, 体系的拉伸强度和弯曲强度降低。在其添加质量分数较少时 (添加质量分数  $\leq 5\%$ ), CTA 在体系中起到异相成核作用, 晶核数量迅速增加, 由于 CTA 的添加对复合材料体系的结晶度影响很小 (参见后面 DSC 部分), 同时加工条件相同, 致使材料体系的晶体变小 (即出现晶体细化现象)<sup>[13]</sup>, 晶粒间的空间增大, 在外力作用下容易产生滑移, 使复合材料的拉伸强度和弯曲强度降低。随着 CTA 的加入 (添加质量分数  $> 10\%$ ) 使得体系黏度增大, 因而结晶过程中 PE 分子链进行有序排列的阻力增大, 从而阻碍了晶粒的生长, 进而导致晶体内部缺陷增加、完整性和规整性降低<sup>[14-15]</sup>, 晶粒细化现象强化。综合作用的结果, 使得制备出的复合材料的拉伸强度和弯曲强度继续下降。当 CTA 的添加质量分数为 20% 时, 复合材料的拉伸强度和弯曲强度分别下降了 20.6% 和 16.1%。随着 CTA 添加量的进一步增加 (添加质量分数  $> 20\%$  后), 体系黏度显著增大, CTA 在复合材料体系中的分散均匀性降低, 有效异相成核作用明显下降, 导致结晶过程中 PE 分子链进行有序排列的阻力进一步增大, 进而导致晶体内部缺陷完整性和规整性进一步降低, 使得制备出的复合材料

的拉伸强度和弯曲强度进一步降低。

### 2.2 DSC 分析

图 3 所示为实验所得 RHDPE 及其共混物样品的 DSC 图谱, 由图 3 所示曲线计算得到的 RHDPE 和添加不同 CTA 含量的 RHDPE 混合体系的熔融和结晶过程的热性能数据列于表 1。

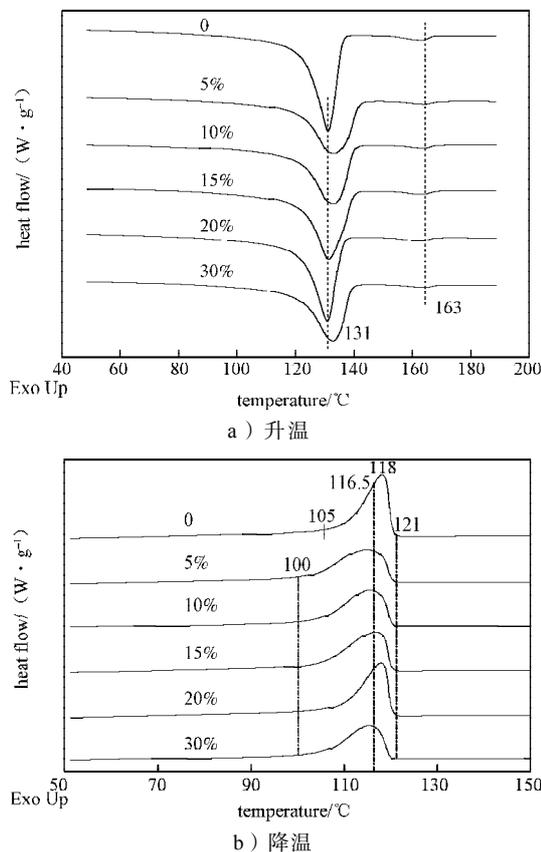


图 3 CTA 含量对 RHDPE 体系熔融与结晶行为影响的 DSC 曲线

Fig. 3 DSC under the effect of CTA content on melting and crystallization behavior of RHDPE composites

表 1 不同 CTA 含量 RHDPE 体系的热性能参数

Table 1 Thermal analysis data of RHDPE composites with different CTA contents

CTA 添加质量分数 / %	$T_m / ^\circ\text{C}$	$\Delta H_m (\text{J} \cdot \text{g}^{-1})$	$T_c / ^\circ\text{C}$	$X_c / \%$
0	131.2	152.9	118.2	52.2
5	133.2	142.8	114.7	48.7
10	133.3	145.6	115.5	49.7
15	131.4	151.3	116.8	51.6
20	130.9	150.4	117.9	51.3
30	132.8	143.1	115.4	48.8

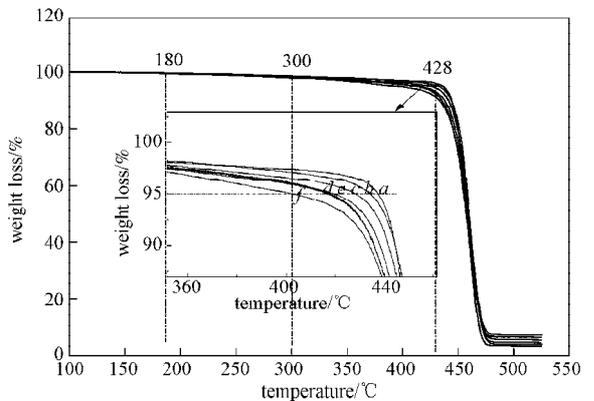
注:  $T_m$  为熔融温度,  $T_c$  为结晶温度。

从图 3a 所示升温曲线可以看出, RHDPE 在 131 °C 和 163 °C 附近出现了 2 个熔融峰, 分别对应 HDPE 和 PP 的熔融温度 ( $T_m$ ), 说明回收料中含有 HDPE 和 PP 组分<sup>[16-17]</sup>, 且前者的峰面积较大, 后者的峰面积较

小,表明回收料中的主要成分为HDPE,同时掺杂有少量的PP。由升温曲线还可以看出,随着体系中CTA添加量的增加,2个熔融峰的位置均没有发生明显偏移,说明CTA对共混体系的 $T_m$ 基本上没有影响。由图3b所示结晶图谱可以发现,在118℃( $T_c$ )附近出现了HDPE的结晶峰,而混杂在RHDPE中的PP的结晶峰未能观察到,预示HDPE与PP可能在同一温区形成了结晶<sup>[16]</sup>。共混物的 $T_c$ 比RHDPE的稍低,约为116.5℃,但变化不大,表明CTA的加入对RHDPE的 $T_p$ 影响很小。从结晶温度区间(范围)角度看,对RHDPE而言,在121~105℃温区内,结晶过程基本完成,对共混物体系来说,结晶过程基本完成的温区为121~100℃,相比较可知,共混体系的结晶温度区间宽度约增加了5℃,而二者的结晶度又基本相同(见表1),这一结果说明,CTA的加入会使RHDPE体系的结晶速率减缓。这主要是因为:随着CTA的添加,共混物体系的黏度增大,分子链迁移和规整排列受阻,从而影响了晶体的生长<sup>[18]</sup>,导致结晶速率降低。

### 2.3 TGA分析

图4所示为RHDPE和添加不同含量CTA的RHDPE共混物的TGA图谱。



a—0%; b—5%; c—10%; d—15%; e—20%; f—30%

图4 CTA含量对RHDPE体系热稳定性影响的TGA曲线

Fig. 4 TGA under the effect of CTA content on thermal stability of RHDPE composites

由图4可知,RHDPE及其共混物具有相同或非常近似的热稳定性特征。这一结果说明,CTA添加量

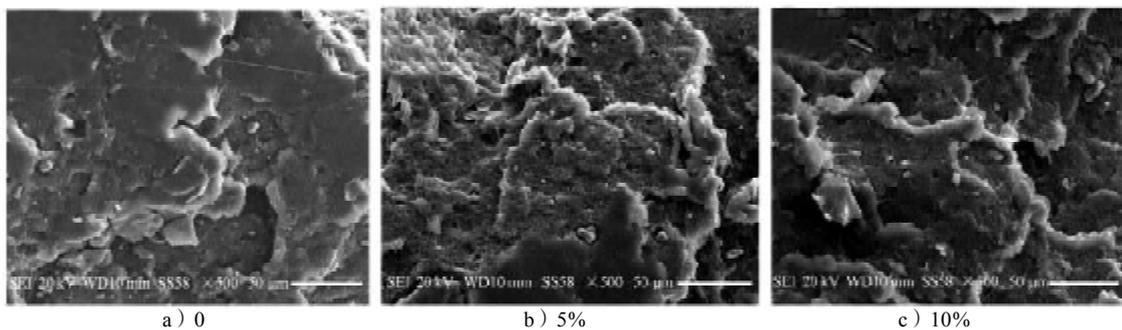
的多寡对共混物体系的热稳定性没有产生明显的影响。具体来说大致可以分为3个阶段:第一阶段为180℃以前,RHDPE及其共混物均比较稳定,说明其具有非常强的憎水性;第二阶段为180~428℃温区,可以观察到轻微的热失重(约1.0%~1.5%)现象,表明材料体系中含低分子或挥发性物质较少;第三阶段是温度高于428℃,所有样品均出现了明显的热分解现象。仔细观察各TGA曲线可得知,在300~428℃温区内,CTA含量对共混物的热稳定性的影响存在一定的差异(见图4中的放大图)。假如以热失重5%为衡量基准,此时,测试样品所对应的温度从高到低的顺序为: $a > b > c > e \geq d > f$ ,亦即混合物的热稳定性随CTA在共混体系中含量的增加而降低。究其原因,一方面可能是由于CTA的加入使得复合材料体系的黏度增大,添加量越大,黏度增大愈明显,使PE分子链在结晶过程中进行有序排列的难度增大,导致晶体结构中不规整部位(缺陷)增加,规整性下降;另一方面,是因为CTA的加入起到了异相成核作用,使晶体出现晶粒细化现象<sup>[16]</sup>,两者共同作用下,使得共混物的热稳定性下降<sup>[19]</sup>。

### 2.4 SEM分析

材料的性能是由其最终微观形态决定的,为此,对RHDPE及其共混物的微观形貌进行观察,图5所示为不同样品冲击断面的SEM图片。

由图5可知,RHDPE的冲击断面(图5a)整体比较光滑、平整,以块状结构为主形成连续相(即HDPE树脂),中间夹杂一些大小不一、与基体存在明显间隙的颗粒状物质(杂质),这些颗粒状物质可能是RHDPE在运输、清洗等过程中带来的细小沙砾等杂质。此外,还可观察到大的缝隙和孔洞的存在。

添加质量分数为5%的CTA后(图5b),体系的冲击断面以块状为主的面积大幅度减少,主要以凹凸不平、大小不尽相同的连续小块状夹杂着丝状结构的形式出现,具有较明显的韧性结构特征<sup>[12]</sup>。此外,除了RHDPE本身带来的杂质颗粒外,没有明显观察到新增颗粒状物质的存在,说明在此含量下的废旧胶粉颗粒塑化较好,分散性较佳。



a) 0

b) 5%

c) 10%

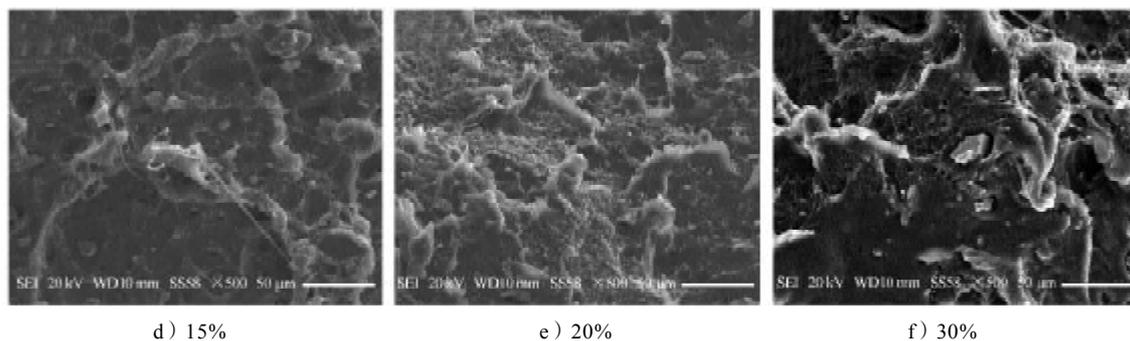


图5 不同CTA含量的RHDPE体系冲击断裂形貌SEM照片

Fig. 5 SEM micrographs of impact specimen fracture ends of RHDPE with different CTA contents

当CTA添加质量分数增加到10%时(图5c),可以观察到连续的小块状结构消失,层状结构与丝带状结构增加,预示材料的韧性得到了明显改善。随着CTA含量的进一步增加(图5d,e),层状结构相对减少,丝带状结构显著增加,说明其韧性获得了进一步改善,除了可以观察到杂质颗粒外,还能看到更小的圆形颗粒状物质(废旧胶粉颗粒)存在。当CTA的添加质量分数达30%时(图5f),可以发现其中的层状结构与丝带状结构减少,细小块状结构重新出现,小颗粒数目增加。这说明废旧胶粉颗粒塑化不好,分散性、均匀性降低,团聚现象增加,对增韧的作用减小:这与前述力学性能随CTA含量增加的变化规律基本吻合。

### 3 结论

本研究采用自制复合增韧剂CTA对RHDPE进行改性,研究了CTA含量对RHDPE性能的影响。研究表明:

1) 共混物的冲击强度随着CTA含量的增加而增大,在CTA添加质量分数 $\leq 10\%$ 范围内,冲击强度增大的幅度较明显;当CTA的添加质量分数 $> 10\%$ 后,增加的幅度减缓,其中,在CTA的添加质量分数为20%时,冲击强度增加了51.4%;而当CTA的添加质量分数 $> 20\%$ 时,增大的幅度减小。

2) 共混物的拉伸和弯曲强度的变化与冲击强度的变化正好相反,随着CTA含量的增加,共混物的拉伸和弯曲强度均有一定程度的降低,在CTA添加质量分数为20%时,共混物的拉伸和弯曲强度分别下降了20.6%和16.1%。

3) 综合力学性能测试结果表明,CTA的添加使RHDPE体系保持较高刚性和强度性能,同时具有显著的增韧改性效果,体系冲击强度明显提高。

4) DSC和TGA结果表明,CTA的加入对RHDPE

的结晶度和耐热性能没有产生明显的影响,但会使RHDPE晶体结构的完整性下降。

5) SEM观察结果表明,随着改性剂的添加,共混物的韧性得到显著改善,但当CTA的添加质量分数超过20%后,断面显示胶粉颗粒分散不均匀、发生团聚现象,从而导致增韧作用减缓。

### 参考文献:

- [1] 刘明华,李小娟.废旧塑料资源回收利用技术[M].北京:化学工业出版社,2012:8-10.  
LIU Minghua, LI Xiaojuan. Waste Plastic Recycling Utilization Technology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2012: 8-10.
- [2] RAMARAD S, KHALID M, RATNAM C T, et al. Waste Tire Rubber in Polymer Blends: A Review on the Evolution, Properties and Future[J]. Progress in Materials Science, 2015, 72: 100-140.
- [3] 方芳,周勇敏,张继.废轮胎回收制胶粉及其应用进展[J].材料科学与工程学报,2007,25(1):164-168.  
FANG Fang, ZHOU Yongmin, ZHANG Ji. Advances in Recycling of Waste Tyre for Preparation of Powdered Rubber and Its Applications[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2007, 25(1): 164-168.
- [4] 李莉,曾繁森,周彦豪,等.用废旧橡胶改性塑料技术的研究进展[J].合成橡胶工业,1998,21(5):314-318.  
LI Li, ZENG Fansen, ZHOU Yanhao, et al. Development of Waste Rubber Modified Plastics[J]. China Synthetic Rubber Industry, 1998, 21(5): 314-318.
- [5] 张玉龙,石磊.废旧塑料回收制备与配方[M].2版.北京:化学工业出版社,2012:1-5.  
ZHANG Yulong, SHI Lei. Preparation and Formulation of Waste Plastics Recycling[M]. 2nd ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2012: 1-5.
- [6] 赵华山,姜胶东,吴大诚.高分子物理学[M].北京:纺织工业出版社,1982:470.

- ZHAO Huashan, JIANG Jiaodong, WU Dacheng. Polymer Physics[M]. Beijing: Textile Industry Press, 1982: 470.
- [7] DIOP M F, BURGHARDT W R, TORKELSON J M. Well-Mixed Blends of HDPE and Ultrahigh Molecular Weight Polyethylene with Major Improvements in Impact Strength Achieved via Solid-State Shear Pulverization[J]. Polymer, 2014, 55(19): 4948-4958.
- [8] MANDELKERN L, FATOU J G, DENISON R, et al. A Calorimetric Study of the Fusion of Molecular Weight Fractions of Linear Polyethylene(1)[J]. Journal of Polymer Science Part B Polymer Letters, 1965, 3(10): 803-807.
- [9] 白玉光, 关颖, 李树丰. 新型弹性体POE及其应用技术进展[J]. 弹性体, 2011, 21(2): 85-90.
- BAI Yuguang, GUAN Ying, LI Shufeng. New Elastomer POE and Its Application Technology Progress[J]. China Elastomeric, 2011, 21(2): 85-90.
- [10] WU Jingshen, GUO Baohua, CHAN Chiming, et al. Synergistic Toughening Effect of SBS and HDPE on the Fracture of the PS/HDPE/SBS Blends[J]. Polymer, 2001, 42(21): 8857-8865.
- [11] 吴培熙, 张留诚. 聚合物共混改性[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 1996: 178-181.
- WU Peixi, ZHANG Liucheng. Polymer Blending Modification[M]. Beijing: China Light Industry Press, 1996: 178-181.
- [12] 贺拓, 胡益兴, 赵晓霞, 等. 废旧轮胎胶粉/POE-g-MAH复合改性PA6的制备与性能研究[J]. 包装学报, 2015, 7(2): 21-27.
- HE Tuo, HU Yixing, ZHAO Xiaoxia, et al. Preparation and Properties of Wasted Tire Powder/POE-g-MAH Compound Modification PA6[J]. Packaging Journal, 2015, 7(2): 21-27.
- [13] 樊卫华, 白娟, 陈金周, 等. 母料中弹性体不同配比对HDPE/E-TMB共混物热性能及结晶形态的影响[J]. 高分子材料科学与工程, 2006, 22(4): 176-179.
- FAN Weihua, BAI Juan, CHEN Jinzhou, et al. Influence of Elastomer Ratios on the Thermal Property and Crystalline Morphology of HDPE/E-TMB Blends[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2006, 22(4): 176-179.
- [14] 石恒冲, 李斌. 马来酸酐接枝HDPE/SEBS非等温结晶动力学[J]. 高分子材料科学与工程, 2008, 24(4): 121-124.
- SHI Hengchong, LI Bin. Nonisothermal Crystallization Kinetics of HDPE/SEBS-g-MAH[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2008, 24(4): 121-124.
- [15] 郭峰, 应继儒, 彭少贤, 等. PP/POE共混物的热行为与晶态结构[J]. 高分子材料科学与工程, 2007, 23(6): 156-159.
- GUO Feng, YING Jiru, PENG Shaoxian, et al. Thermal Behaviors and Crystalline Structure of PP/POE Blends[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2007, 23(6): 156-159.
- [16] CHIU Fangchyou, YEN Hongzhi, LEE Chengen. Characterization of PP/HDPE Blend-Based Nanocomposites Using Different Maleated Polyolefins as Compatibilizers[J]. Polymer Testing, 2010, 29(3): 397-406.
- [17] 邱玉超, 徐东军, 王丰, 等. 废旧聚乙烯复合材料的制备与性能研究[J]. 再生资源与循环经济, 2011, 4(7): 32-36.
- QIU Yuchao, XU Dongjun, WANG Feng, et al. Study on Preparation and Property of Recycling Polyethylene Composites[J]. Recyclable Resources and Circular Economy, 2011, 4(7): 32-36.
- [18] 何曼君, 张红东, 陈维孝, 等. 高分子物理[M]. 3版. 上海: 复旦大学出版社, 2007: 168-171.
- HE Manjun, ZHANG Hongdong, CHEN Weixiao, et al. Polymer Physics[M]. 3rd ed. Shanghai: Fudan University Press, 2007: 168-171.
- [19] HASSAN M M, ALY R O, AAL S E A, et al. Mechanochemical Devulcanization and Gamma Irradiation of Devulcanized Waste Rubber/High Density Polyethylene Thermoplastic Elastomer[J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2013, 19(5): 1722-1729.

(责任编辑: 廖友媛)

