

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2020.10.025

POE 黏度和含量对 PP 及其填充体系性能的影响

李伟, 陈嘉杰, 胡佳旭, 赖昂, 雷亮, 吴国峰, 俞飞, 杨波, 罗忠富

(金发科技股份有限公司企业技术中心, 塑料改性加工国家工程实验室, 广州 510663)

摘要: 针对汽车应用范围较广的无填充聚丙烯和滑石粉填充聚丙烯体系, 研究了乙烯-辛烯共聚物 (POE) 含量和黏度对两种体系熔体流动性能、力学性能、光泽度、摩擦系数以及表面硬度的影响。结果表明, 当 POE 质量分数低于 25% 时, POE 黏度越大, 填充体系的缺口冲击强度越低, 当 POE 质量分数达到 25% 后, 两种体系的冲击强度变化趋势相同, POE 黏度最高的体系缺口冲击强度也最高。此外, POE 含量增加、黏度降低, 两种体系的表面硬度降低、摩擦系数增加, 但是材料光泽度的变化趋势和 POE 黏度差异有关: 对于无填充高黏度 POE 改性体系来说, POE 含量增加, 光泽度下降; 对于无填充低黏度 POE 改性体系, POE 含量增加, 光泽度上升; 填充体系的光泽度随 POE 含量增加和黏度降低而升高。总之, 如果通过增加 POE 含量来实现聚丙烯及其填充体系的低硬度, 为了保持低光泽度和低摩擦系数等效应, 通常要选择黏度较高的 POE。

关键词: 聚丙烯; 乙烯-辛烯共聚物; 黏度; 光泽度; 摩擦系数; 硬度

中图分类号: TQ325.14, TQ327.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2020)10-0140-07

Effects of POE Viscosity and Content on Properties of Polypropylene and Its Filled System

Li Wei, Chen Jiajie, Hu Jiaxu, Lai Ang, Lei Liang, Wu Guofeng, Yu Fei, Yang Bo, Luo Zhongfu

(National-certified Enterprise Technology Center, Kingfa Science and Technology Co. Ltd.,

National Engineering Laboratory for Plastic Modification and Processing, Guangzhou 510663, China)

Abstract : Regarding the non-filled and talc-filled polypropylene systems in a wide range of automotive applications, the effects of ethylene-octene copolymer (POE) content and viscosity on the melt flowing performance, mechanical properties, gloss, friction coefficient and surface hardness of the two systems were studied. The results show that, when the content of POE is less than 25wt%, the notched impact strength of the filling system reduces with the viscosity of POE increasing, after the content of POE reaches 25wt%, the notched impact strengths of the two systems have the same changing trend, the system with the highest POE viscosity also has the highest notched impact strength. Meanwhile, with the content of POE increasing and the viscosity decreasing, the surface hardness of the two systems decrease and the friction coefficients increase, but the change trend of the gloss is related to the difference in the viscosity of POE. For an unfilled high-viscosity POE modified system, the gloss decreases with POE content increasing, for a low-viscosity POE modified system, the gloss increases with POE content increasing. The gloss of the filling system increases with the content of POE increasing and the viscosity decreasing. In short, if the low hardness of polypropylene and its filled system are achieved through increasing POE content, in order to maintain the effects of low gloss and low friction coefficient, it is usually necessary to choose POE with high viscosity.

Keywords : polypropylene ; ethylene-octene copolymer ; viscosity ; gloss ; friction coefficient ; hardness

聚丙烯 (PP) 是商业化通用塑料中发展最为迅速的品种之一, 其具有较好的综合性能, 在家电、汽车以及包装等领域得到广泛的应用。其中, 在对塑料有耐热性、光泽度和一定硬度要求的家电领域, 高

光泽 PP 获得了广泛应用。高光泽 PP 主要通过 PP 中加入无机填料和成核剂进行改性而成, 成核剂可提高 PP 树脂的结晶度, 从而提高产品的光泽度, 目前国内有很多学者在高光泽 PP 方面做了大量的

通信作者: 李伟, 博士, 主要从事车用改性塑料的开发和研究 E-mail: liwei@kingfa.com.cn

收稿日期: 2020-09-10

引用格式: 李伟, 陈嘉杰, 胡佳旭, 等. POE 黏度和含量对 PP 及其填充体系性能的影响 [J]. 工程塑料应用, 2020, 48(10): 140-146.

Li Wei, Chen Jiajie, Hu Jiaxu, et al. Effects of POE viscosity and content on properties of polypropylene and its filled system[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(10): 140-146.

工作^[1-8]。但是,与家电用PP材料相比,汽车内饰件对PP材料性能的要求反而是低光泽、低硬度,这是因为PP材料的光泽度和硬度太高会导致汽车内饰件的塑料感太强,从而影响用户的感官体验,同时若内饰件的摩擦系数太高,用户接触内饰件时会感受到一定的摩擦阻力,这也会影响用户的感官评价。因此为了提高用户对汽车内饰件的满意度,研究开发低光泽、低硬度以及低摩擦系数的PP材料具有重要意义。国内有很多学者在低光泽PP上也做了大量的工作^[9-12],这些降低材料光泽度的方法为后续开发低光泽、低硬度、低摩擦系数的PP材料奠定了基础。

一般情况下,汽车用PP材料中都会加入一定含量的乙烯-辛烯共聚物(POE)用于增韧,POE对于降低材料的硬度是有益的,但是POE含量过高时会导致材料表层橡胶相含量较高,从而使表面摩擦系数提高,同时,POE含量的差异会导致橡胶相分散形态的差异,进而导致材料光泽度发生变化。此外,POE的黏度对材料的光泽度、摩擦系数和硬度也会产生不同的影响,因此选择合适的POE黏度以及优化POE含量十分重要。为此,笔者选择在汽车领域中应用范围较广的无填充和滑石粉填充PP体系,研究了POE含量及其黏度对这两种体系基本性能、光泽度、摩擦系数以及硬度的影响,为低光泽、低硬度以及低摩擦系数的PP材料的制备和应用提供参考。

1 实验部分

1.1 主要原料

PP:熔体流动速率(MFR)100 g/10 min,韩国SK公司;

高黏度POE(HPOE):MFR 0.5 g/10 min,美国陶氏化学公司;

中黏度POE(MPOE):MFR 5.0 g/10 min,美国陶氏化学公司;

低黏度POE(LPOE):MFR 13.0 g/10 min,美国陶氏化学公司;

滑石粉:3000目(粒径约5 μm),辽宁海城添源化工有限公司;

硬脂酸盐润滑剂:中山华明泰化工股份有限公司;

黑色母粒:2772,美国卡博特公司;

抗氧剂1010,168:山东省临沂市三丰化工有限公司。

1.2 主要仪器与设备

双螺杆挤出机:TST30型,科倍隆(南京)机械有限公司;

注塑机:EM80-V型,震德注塑机有限公司;

MFR测试仪:BMF-003型,德国Zwick公司;

万能材料试验机:Z020型,德国Zwick公司;

数字显示冲击仪:HIT5.5P型,德国Zwick公司;

光泽度仪:1147104型,德国BYK公司;

摩擦系数仪:Roell T0.5型,德国Zwick公司;

D型邵氏硬度计:LX-D型,上海六菱仪器厂;

扫描透射电子显微镜(STEM):SU8010型,日本日立公司。

1.3 试样制备

(1) 配方设计。

无填充PP和滑石粉填充PP体系中,三种黏度的POE质量分数分别设定为15%、20%、25%、30%和35%,润滑剂质量分数为0.2%,抗氧剂1010和抗氧剂168的质量分数分别为0.2%,黑色母粒质量分数为0.8%。滑石粉填充PP体系中,滑石粉质量分数固定为20%。

(2) 挤出造粒与注塑。

按照上述配方将各原料混匀后在双螺杆挤出机中挤出造粒,挤出温度设定为230℃,螺杆转速设定为600 r/min,喂料速度设定为30 kg/h。将挤出制备的粒料加入注塑机中,注塑成ISO标准试样、皮纹板、厚度为2 mm的方板,注塑温度设定为200℃,注塑压力设定为40~45 MPa,注塑速度设定为40%~45%,保压时间设定为15~20 s,冷却时间设定为15~20 s。

1.4 测试与表征

(1) 基本性能测试。

MFR按ISO 1133-1-2011测试,测试条件为2.16 kg,230℃;拉伸性能按ISO 527-1/2-2012测试,拉伸速率50 mm/min;弯曲性能按ISO 178-2019测试,加载速率2 mm/min;悬臂梁缺口冲击强度按ISO 180-2013测试。

(2) 光泽度测试。

采用光泽度仪在60°下对皮纹板进行光泽度测试,选择Stucco皮纹面。

(3) 摩擦系数测试。

采用摩擦系数仪对厚度为2 mm的方板进行摩擦系数测试,砝码质量为200 g,为了平行对比,选择测试白纸和方板之间的摩擦系数,每组测试完

后更换白纸。

(4) 硬度测试。

采用 D 型邵氏硬度计对厚度 2 mm 的方板进行硬度测试,为了确保数据的准确性和稳定性,将 3 片方板叠加后进行测试。

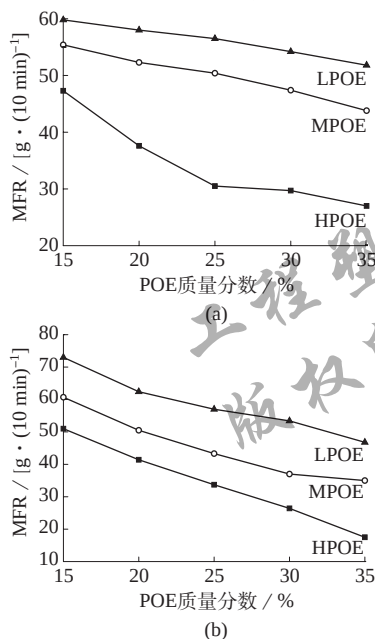
(5) 微观形貌观察。

采用 STEM 观察弯曲性能测试用试样的表面形貌;将弯曲性能测试用试样冷冻超薄切片,并用四氧化钨将橡胶相染成黑色,然后采用 STEM 观察皮层部分的橡胶相形态和分散情况。

2 结果与讨论

2.1 基本性能分析

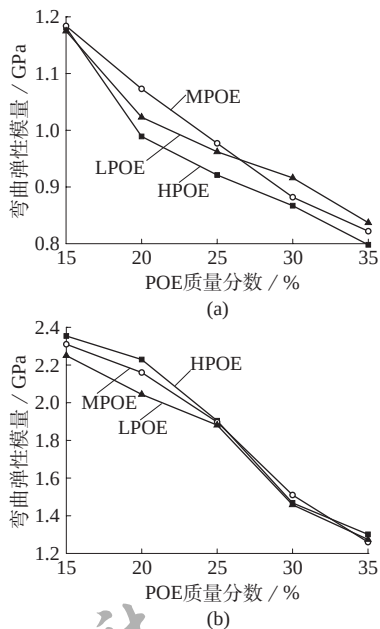
不同 POE 含量和黏度下无填充 PP 和滑石粉填充 PP 体系的 MFR 及力学性能如图 1~图 4 所示。



a—无填充 PP 体系; b—滑石粉填充 PP 体系

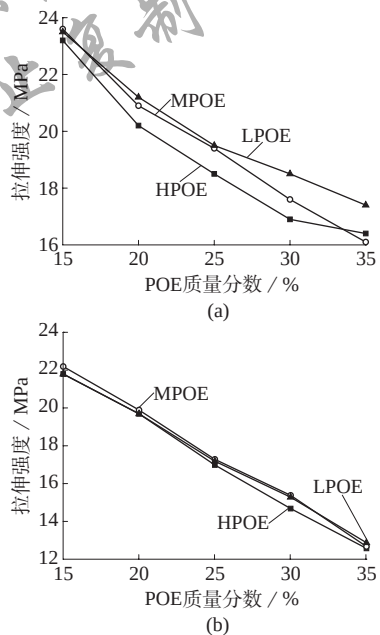
图 1 不同 POE 含量和黏度下两种体系的 MFR

从图 1~图 4 可以看出,无论是无填充体系还是滑石粉填充体系,随着 POE 含量增加, MFR、弯曲弹性模量和拉伸强度下降,缺口冲击强度上升,符合弹性体增韧 PP 的一般规律。另外, POE 黏度越大, MFR 越低,但对拉伸强度和弯曲弹性模量的影响程度较小。此外,当 POE 质量分数低于 25% 时,对于无填充体系, POE 黏度对缺口冲击强度的影响较小;而对于滑石粉填充体系, POE 黏度越大,缺口冲击强度越小;当 POE 质量分数达到 25% 后,两种体系下 POE 黏度对缺口冲击强度的影响相同,缺口冲击强度均随着 POE 黏度的增加先降低后升高, POE 黏度最高的冲击性能也最高。这可能是因为材料的



a—无填充 PP 体系; b—滑石粉填充 PP 体系

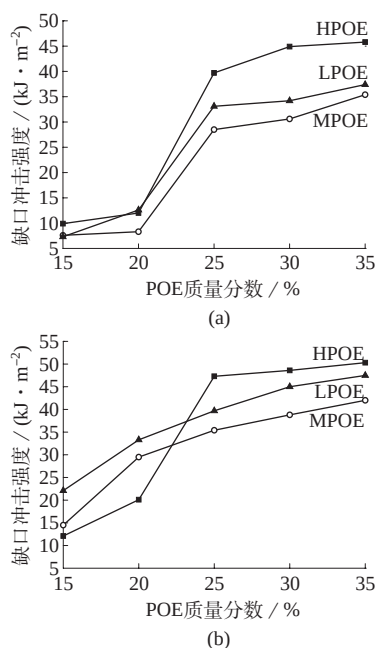
图 2 不同 POE 含量和黏度下两种体系的弯曲弹性模量



a—无填充 PP 体系; b—滑石粉填充 PP 体系

图 3 不同 POE 含量和黏度下两种体系的拉伸强度

冲击性能受 POE 黏度和 POE 分散性两方面因素的共同影响。当 POE 含量较低时, POE 的分散性为主要因素, POE 黏度增大,即 POE 分子量变大,由此会导致 POE 的分散性变差;当 POE 含量增加到一定程度时,橡胶相的分散已不再成为影响材料冲击性能的主要因素,而 POE 的分子量直接影响材料的冲击性能,故 POE 黏度最高的材料冲击性能也最好。对于滑石粉填充体系,由于滑石粉有助于橡胶相的分散,其整体冲击性能要高于无填充体系。

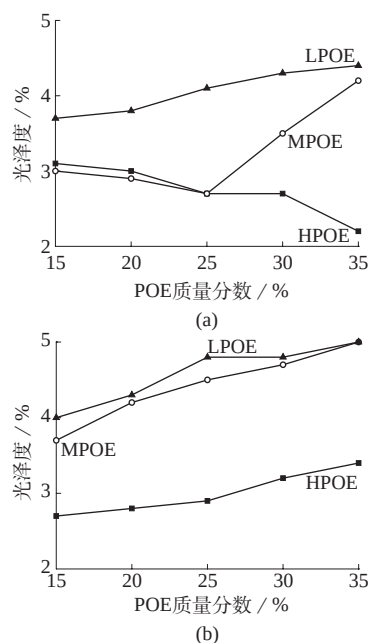


a—无填充 PP 体系; b—滑石粉填充 PP 体系

图 4 不同 POE 含量和黏度下两种体系的缺口冲击强度

2.2 光泽度分析

不同 POE 含量和黏度下无填充 PP 和滑石粉填充 PP 体系的光泽度如图 5 所示。从图 5 可以看出,无论填充与否, POE 黏度越低,总体上材料光泽度越大。但是不同 POE 黏度的体系其光泽度随着 POE 含量的增加表现的趋势不同。对于无填充体系, HPOE 改性 PP 的光泽度随着 POE 含量的增加 (高结晶 PP 的含量降低) 而降低,这可能是因为



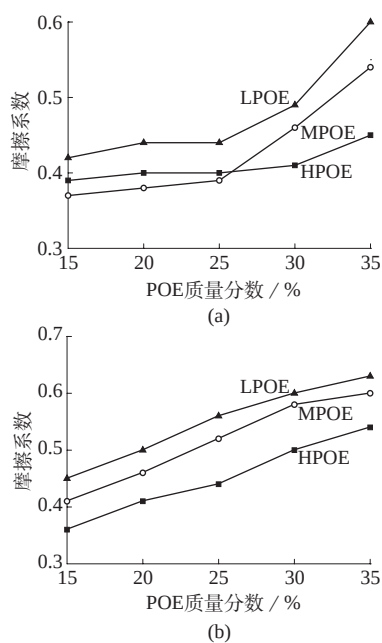
a—无填充 PP 体系; b—滑石粉填充 PP 体系

图 5 不同 POE 含量和黏度下两种体系的光泽度

POE 黏度高,材料中橡胶相 / 树脂相黏度比增加,材料中的橡胶相在高 POE 含量下不易被拉伸发生变形,故光泽度有所降低; MPOE 改性 PP 的光泽度随着 POE 含量增加先降低而后明显升高,这可能是因为当 POE 含量增加到一定程度时,其橡胶相被显著拉伸,造成材料的光泽度显著提高; LPOE 改性 PP 的光泽度随着 POE 含量增加而升高,这可能是因为材料中橡胶相 / 树脂相黏度比相对最低,橡胶相被显著拉伸,且 POE 含量增加,被拉伸的橡胶相互贯通连接,造成材料的光泽度提高。对于滑石粉填充体系,由于填料的加入促进了橡胶相的分散,橡胶相易被拉伸,与无填充体系不同,不同黏度 POE 改性 PP 的光泽度均随着 POE 含量的增加表现出升高的趋势,其中 HPOE 改性 PP 的光泽度明显低于其它两种黏度的 POE 改性 PP。

2.3 摩擦系数分析

不同 POE 含量和黏度下无填充 PP 和滑石粉填充 PP 体系的摩擦系数如图 6 所示。由图 6 可以看出, POE 黏度对材料的摩擦系数也有一定程度的影响,无论填充与否, POE 黏度降低,材料摩擦系数总体上提高,主要原因是 POE 黏度降低,材料表层的橡胶相含量就会增大,一般情况下会导致摩擦系数变大。此外,如图 6 所示,无论填充与否,不同 POE 黏度体系的摩擦系数均随着 POE 含量的增加表现出增加的趋势,尤其对于无填充体系,可以看出,随



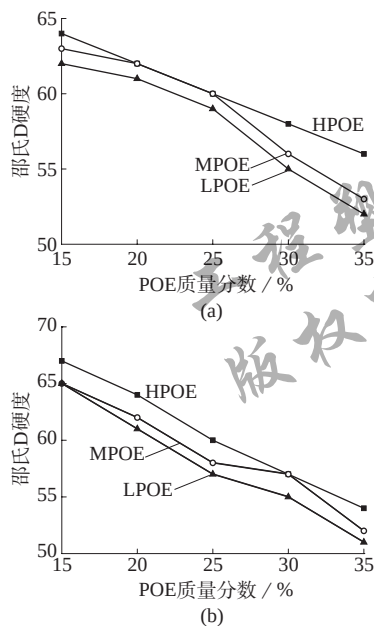
a—无填充 PP 体系; b—滑石粉填充 PP 体系

图 6 不同 POE 含量和黏度下两种体系的摩擦系数

POE 含量增加,中低 POE 黏度体系的摩擦系数升高趋势更为明显,这也表明 PP 材料中橡胶相含量是影响材料摩擦系数的一个重要因素,橡胶相含量越高,材料摩擦系数越大。

2.4 硬度分析

不同 POE 含量和黏度下无填充 PP 和滑石粉填充 PP 体系的硬度如图 7 所示。一般情况下,POE 含量越高,其改性的 PP 材料表层橡胶相含量相对较高,导致材料表面硬度相对较低。由图 7 可以看出,无论填充与否,不同 POE 黏度体系的硬度均随着 POE 含量的增加而明显下降。另外,无论填充与否,POE 黏度越大,表层橡胶相含量越低,材料表面硬度总体上越大。对于无填充体系,可以看出,随 POE 含量增加,中低 POE 黏度体系的硬度下降趋势更为明显。

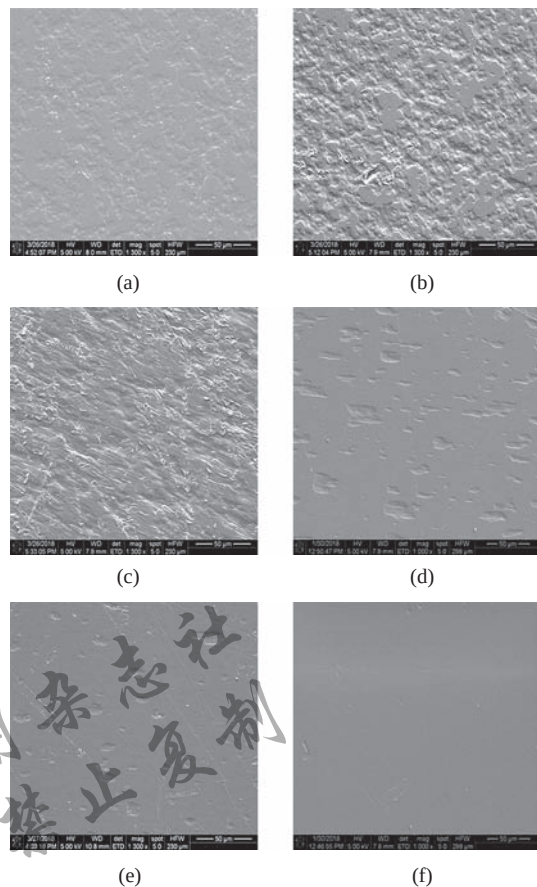


a—无填充 PP 体系; b—滑石粉填充 PP 体系

图 7 不同 POE 含量和黏度下两种体系的邵氏 D 硬度

2.5 微观形貌分析

由图 5~图 7 可知,滑石粉填充体系的光泽度,摩擦系数以及硬度随 POE 黏度及含量的变化趋势较为规律,但无填充体系中,光泽度随 POE 黏度和含量的变化趋势有所不同,且中低黏度 POE 体系的摩擦系数和硬度随 POE 含量增加而下降的幅度较为明显,为此选取无填充体系进行了表面形貌的表征,结果如图 8 所示。从图 8 可以看出,对于高 POE 黏度无填充体系 (HPOE 改性 PP),随着 POE 含量增加,其表面变得粗糙,考虑到光射到粗糙表面会加剧漫反射,而漫反射会降低光泽度,同时表面



HPOE 质量分数: a—15%; b—25%; c—35%

LPOE 质量分数: d—15%; e—25%; f—35%

图 8 无填充体系下不同含量 HPOE 及 LPOE 改性 PP 的表面形貌粗糙会使表面摩擦系数提高,因此这与实际的光泽度和摩擦系数测试结果相符合。另一方面,对于低 POE 黏度无填充体系 (LPOE 改性 PP) 来说,随着 POE 含量增加,其表面变得光滑,这有利于光泽度的提高,与实际的光泽度测试结果相符合;但表面变得光滑反而使材料的摩擦系数增加明显,推测可能的原因是表层橡胶相含量也是影响摩擦系数的关键因素。

图 9 为无填充体系下不同含量 HPOE 和 LPOE 改性 PP 的皮层形貌。在采用 STEM 表征前,采用四氧化钬染色,橡胶相会被染成黑色,PP 基体不会被染色而成灰色。如图 9 所示,对于高 POE 黏度无填充体系 (HPOE 改性 PP),由于体系橡胶相 / 树脂相黏度比大,使得橡胶相越不易分散,从而变形程度降低。随着 POE 含量增加,皮层橡胶相数量和粒径都同时增大。橡胶相数量增加对降低表面硬度是有利的,但是会导致表面摩擦系数提高;橡胶相粒径增加会导致表面粗糙,进而降低光泽度,同时粗糙的表面也会提高表面摩擦系数。另一方面,对于低

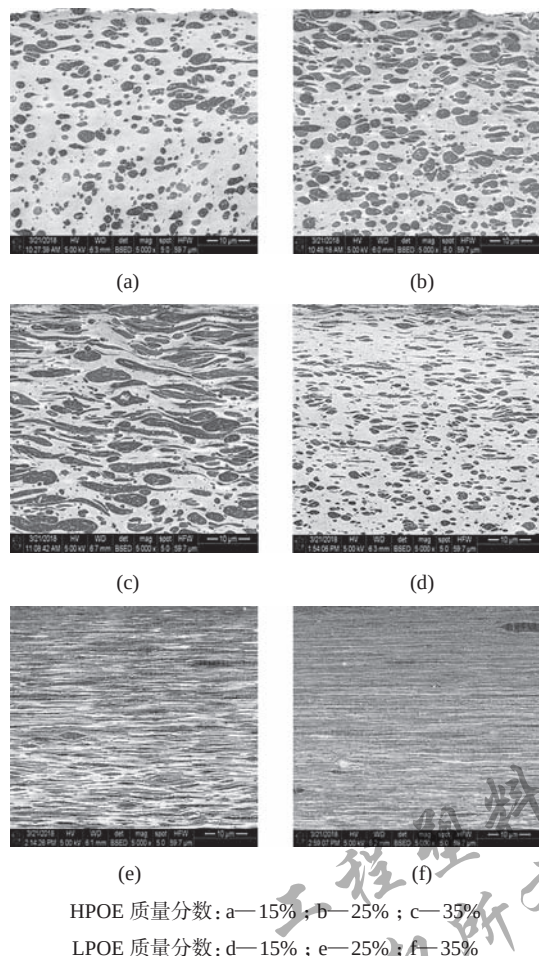


图9 无填充体系下不同含量 HPOE 及 LPOE 改性 PP 的皮层形貌

POE 黏度无填充体系 (LPOE 改性 PP), 由于体系橡胶相 / 树脂相黏度比小, 皮层的橡胶相被剪切拉伸得更加严重, 随着 POE 含量的增加, 被拉伸的橡胶相相互贯通连接, 如图 9e 所示; 当 POE 含量增加到一定量时, 整个皮层橡胶相全部以长条状形态分布, 如图 9f 所示, 造成材料的光泽度显著提高, 且整个皮层变厚, 皮层橡胶相含量显著增加, 导致 LPOE 改性 PP 硬度随 POE 含量增加而下降的趋势比 HPOE 改性 PP 更加明显, 同时摩擦系数也随 POE 含量的增加而迅速增加。

3 结论

(1) 随 POE 黏度升高, 两种体系的 MFR 均下降, 但弯曲弹性模量和拉伸强度变化不大。

(2) 当 POE 质量分数低于 25% 时, POE 黏度对无填充体系的缺口冲击强度影响较小, 填充体系的缺口冲击强度随 POE 黏度增大而降低; 当 POE 质量分数达到 25% 后, POE 黏度对两种体系的冲击强度影响趋势相同, POE 黏度最高的体系缺口冲击强度也最高。

(3) 对于填充体系, 随 POE 含量增加和黏度降低, 光泽度和摩擦系数升高, 硬度降低。

(4) 对于无填充体系, 摩擦系数和硬度随 POE 含量和黏度变化的趋势总体上与填充体系基本相同, 但高黏度 POE 改性 PP 的光泽度随 POE 含量增加而降低, 低黏度 POE 改性 PP 的光泽度随 POE 含量增加而升高, 且随 POE 含量增加, 相对于高黏度 POE 改性 PP, 其硬度下降更明显, 摩擦系数增加更显著。

(5) 如果通过增加 POE 的含量来实现 PP 及其填充体系的低硬度, 为了保证材料的低光泽度和低摩擦系数, 通常要选择黏度较高的 POE 对 PP 及其填充体系进行增韧。

参考文献

- [1] 黄达, 罗忠富, 宁凯军. 成核剂对高光泽聚丙烯性能的影响 [J]. 塑料工业, 2009, 37(21): 61-63.
Huang Da, Luo Zhongfu, Ning Kaijun. Effect of nucleating agent on the properties of high gloss polypropylene [J]. China Plastics Industry, 2009, 37(21): 61-63.
- [2] 刘宝玉, 肖鹏. 高光泽聚丙烯的研制 [J]. 上海塑料, 2007(2): 20-23.
Liu Baoyu, Xiao Peng. Study on the high gloss polypropylene [J]. Shanghai Plastics, 2007(2): 20-23.
- [3] 余进娟, 徐卫兵, 周正发. 高光泽聚丙烯的研制 [J]. 塑料制造, 2010(8): 64-66.
She Jinjuan, Xu Weibing, Zhou Zhengfa. Study on the high gloss polypropylene [J]. Plastics Manufacture, 2010(8): 64-66.
- [4] 单国荣, 陈根荣, 高道春, 等. 高光泽耐热型聚丙烯专用料研制 [J]. 石油化工技术经济, 2007, 23(2): 27-30.
Shan Guorong, Chen Genrong, Gao Daochun, et al. Preparation of PP special material with high luster and heat resistance [J]. Techno-Economics in Petrochemicals, 2007, 23(2): 27-30.
- [5] Wang Xin, Yuan Hongyue, Pan Yamin, et al. Creep behavior and mechanical properties of isotactic polypropylene composites via twice melt injection molding [J]. Advanced Industrial and Engineering Polymer Research, 2019, 2(3): 102-109.
- [6] 封水彬, 吴志军, 车有造, 等. 高光泽耐冲击聚丙烯树脂研究及工业化 [J]. 现代塑料加工应用, 2019, 31(5): 39-41.
Feng Shuibin, Wu Zhijun, Che Youzao, et al. Research and industrialization of high gloss & impact resistant polypropylene [J]. Modern Plastics Processing and Applications, 2019, 31(5): 39-41.
- [7] 张晓萌, 宋文波, 邹发生. 高光泽聚丙烯技术进展 [J]. 石油化工, 2018, 47(7): 758-762.
Zhang Xiaomeng, Song Wenbo, Zou Fasheng. Progress in high gloss polypropylene technology [J]. Petrochemical Technology,

- 2018,47(7):758-762.
- [8] 董莉,李丽,王帆,等.高光泽透明聚丙烯的研究进展[J].合成树脂及塑料,2018,35(3):90-95.
- Dong Li, Li Li, Wang Fan, et al. Research progress in high gloss and transparent PP[J]. China Synthetic Resin and Plastics, 2018, 35(3):90-95.
- [9] 俞飞,陈嘉杰,李振华,等.汽车内饰用聚丙烯复合材料的制备与性能[J].工程塑料应用,2019,47(12):37-43.
- Yu Fei, Chen Jiajie, Li Zhenhua, et al. Preparation and properties of polypropylene composites for automotive interiors[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(12):37-43.
- [10] 李伟,何海龙,吴国峰,等.增韧剂含量和黏度对聚丙烯复合材料光泽度的影响[J].塑料工业,2018,46(4):33-36.
- Li Wei, He Hailong, Wu Guofeng, et al. Effect of the content and the melt viscosity of toughening agent on the gloss of PP composites[J]. China Plastics Industry, 2018, 46(4):33-36.
- [11] 贺丽丽,高翔,盛超,等.低光泽度聚丙烯材料的研究[J].汽车工艺与材料,2019(10):68-72.
- He Lili, Gao Xiang, Sheng Chao, et al. Research in low gloss polypropylene material[J]. Automobile Technology & Material, 2019(10):68-72.
- [12] 李丽,刘敏,慕蕊娟,等.共聚聚丙烯结构对光泽度的影响[J].广州化工,2015,43(3):90-91.
- Li Li, Liu Min, Mu Ruijuan, et al. Effect of the structure on gloss of copolymer polypropylene[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2015, 43(3):90-91.

(上接第139页)

- [5] Gao Feng, Tong Lifang, Fang Zhengping. Effect of a novel phosphorous-nitrogencontaining intumescent flame retardant on the fire retardancy and the thermal behaviour of poly(butylene terephthalate)[J]. Polymer Degradation and Stability, 2006, 91(6):1295-1299.
- [6] Tao Zhaozeng, Wang Yatao, Li Jianhua, et al. Fabrication of long glass fiber reinforced polyacetal composites: Mechanical performance, microstructures, and isothermal crystallization kinetics[J]. Polymer Composites, 2015, 36(10):1826-1839.
- [7] 罗园,胡志,林公澎,等.苯基次膦酸铝用于玻纤增强PBT的无卤阻燃[J].高分子材料科学与工程,2011,27(10):109-112.
- Luo Yuan, Hu Zhi, Lin Gongpeng, et al. Flame retardancy of glass-fibre reinforced PBT composites with aluminum phenylphosphinate[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2011, 27(10):109-112.
- [8] 罗琴琴,孙玉林. DOPO基膦酸铝盐的制备及其阻燃环氧树脂的性能研究[J].高分子通报,2020(5):31-39.
- Luo Qinqin, Sun Yulin. Preparation of DOPO-based aluminum phosphinate and its flame retarding epoxy resin[J]. Polymer Bulletin, 2020(5):31-39.
- [9] 黄邹松,龙丽娟,黄伟江,等.一种DOPO衍生物合成及其对PLA阻燃性能的影响[J].工程塑料应用,2019,47(5):127-130,136.
- Huang Zousong, Long Lijuan, Huang Weijiang, et al. Synthesis of a DOPO derivative and its effect on flammability retardancy of polylactic acid[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(5):127-130, 136.
- [10] 黄健光,姜佳丽,农彦彦,等. DOPO和含磷固化剂协同阻燃EP性能[J].工程塑料应用,2020,48(7):116-120,131.
- Huang Jianguang, Jiang Jiali, Nong Yanyan, et al. The properties of flame retardant EP synergized by DOPO and curing agent containing phosphorus[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(7):116-120, 131.
- [11] Artner J, Ciesielski M, Walter O, et al. A novel DOPO-based diamine hardener and flame retardant for epoxy resin systems[J]. Macromolecular Materials and Engineering, 2008, 293(6):503-514.
- [12] 陈松,黄胜超,田路,等.含磷阻燃剂DOPO-HQ的合成、表征及应用[J].化学与生物工程,2020,37(2):28-31,41.
- Chen Song, Huang Shengchao, Tian Lu, et al. Synthesis, characterization, and application of phosphorus-containing flame retardant DOPO-HQ[J]. Chemistry & Bioengineering, 2020, 37(2):28-31, 41.
- [13] 魏柯.磷杂菲类阻燃剂的制备及其在聚乳酸中的应用研究[D].贵阳:贵州大学,2019.
- Wei Ke. Preparation of phosphorus phenanthrene flame retardant and its application in polylactic acid[D]. Guiyang: Guizhou University, 2019.
- [14] Long Lijuan, Yin Jingbo, He Wentao, et al. Influence of a phenethyl-bridged DOPO derivative on the flame retardancy, thermal properties, and mechanical properties of poly(lactic acid)[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2016, 55(40):10803-10812.