

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2020.05.027

极性润滑剂对滑石粉填充 PP 性能的影响

刘乐文^{1,2},程书文³,姜向新³

(1. 上海金发科技发展有限公司, 上海 201714; 2. 上海工程塑料功能化工程技术研究中心, 上海 201714;

3. 金发科技股份有限公司企业技术中心, 广州 510520)

摘要:以滑石粉(Talc)填充聚丙烯(PP)为研究对象,引入了两种不同结构的酰胺类极性润滑剂,其结构分别为AB(A代表极性锚固基团;B代表长支链或直链烷烃)型和BAB型,考察了两者对PP/Talc复合材料力学性能和流变行为的影响,同时借助仪器化冲击,着重研究了极性润滑剂对材料冲击过程中裂纹产生功和裂纹扩展功的影响。结果表明,润滑剂的引入对流变行为影响较小,随着润滑剂添加量的增加,复合材料的熔体流动速率有所提高,加工性能改善,弯曲弹性模量和断裂伸长率有小幅提高。BAB型润滑剂对PP/Talc复合材料具有更优异的增韧作用,实验范围内低温(0℃)缺口冲击强度最高提高了35%,冲击韧性提升主要得益于裂纹扩展功的增加。此外,扫描电子显微镜结果显示,BAB润滑剂的引入有利于改善Talc在PP基体中的分散均匀性,从而提高复合材料的冲击韧性。

关键词:聚丙烯;滑石粉;极性润滑剂;仪器化冲击;冲击强度

中图分类号: TQ327.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2020)05-0149-07

Influences of Polar Lubricants on Properties of PP Filled with Talcum Powder

Liu Lewen^{1,2}, Cheng Shuwen³, Jiang Xiangxin³

(1. Shanghai Kingfa Science & Technology Co. Ltd., Shanghai 201714, China; 2. Shanghai Engineering Research Center of Functionalizing Engineering Plastics, Shanghai 201714, China; 3. Technical Center of Kingfa Science & Technology Co. Ltd., Guangzhou 510520, China)

Abstract: Two different amide polar lubricants were introduced in talcum (Talc) filled polypropylene (PP) system, the structures of the two lubricants are AB (A: polar groups; B: long-branched or straight chain alkanes) and BAB type, individually. The influences of the two lubricants on mechanical properties and rheological behaviors of PP/Talc composite were investigated. In the meantime, the instrumented impact testing was employed to study the effects of BAB and AB lubricants on crack generation and propagation energy of the composite in the process of impacting. The results prove that the introduction of lubricants has little effect on the rheological behavior of PP/Talc composite, the melt flow rate increases with increasing lubricant content, showing better processability, flexural modulus and elongation at break are slightly improved. BAB lubricant shows better toughening effect for PP/Talc composite, the notched impact strength at 0℃ increases by 35% maximally within the experimental range, and the improvement of toughness is mainly attributed to the increase of crack propagation energy. Besides, scanning electron microscope result shows that the dispersion uniformity of Talc in PP matrix is improved by introducing BAB lubricant, thus the toughness of the composite is improved.

Keywords: polypropylene; talcum; polar lubricant; instrumented impact; impact strength

聚丙烯(PP)具有质轻、加工性能良好、耐化学性能优异、耐热稳定性良好等优点,广泛应用于家用电器、交通运输、电动工具等行业中,但是,PP存在收缩形变大、抗蠕变性能较差以及冲击韧性尤其是低温韧性较差等问题,限制了其进一步的应用拓

展。滑石粉(Talc)为层状硅酸盐晶体,常用于改善PP材料的刚性、尺寸稳定性、表面硬度以及耐热稳定性等,其应用非常广泛,可用于制造多种汽车零部件,因而对于PP/Talc复合材料的各种改性研究日益增多^[1-8]。近年来,汽车行业逐步向节能、环保、轻

通讯作者: 刘乐文,高级工程师,硕士,主要研究方向为聚烯烃高性能功能化改性 E-mail: liulewen@kingfa.com.cn

收稿日期: 2020-02-26

引用格式: 刘乐文,程书文,姜向新. 极性润滑剂对滑石粉填充 PP 性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2020, 48(5): 149-155.

Liu Lewen, Cheng Shuwen, Jiang Xiangxin. Influences of polar lubricants on properties of PP filled with talcum powder[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(5): 149-155.

质和低成本方向发展,例如制备薄壁化的保险杠等,以减少原料使用与缩短生产时间等,这对 PP 材料性能提出了更高的要求,需要在保证刚性与尺寸稳定性的基础上,进一步提高冲击韧性^[9-15]。Talc 表面存在较多的羟基,极性较强,PP 为非极性树脂,两者极性差异较大,因此,在复合体系中引入润滑剂与偶联剂,以改善 Talc 在 PP 树脂基体的分散均匀性具有重要意义。王少会^[15]在 PP/Talc 体系中引入自制的 YB 超分散剂,复合材料流动性能有很大提高,复合材料加工性能改善,冲击强度也有所提高。叶南飏等^[16]等的研究表明,在 PP/Talc 体系中引入润滑剂后,材料加工过程中的扭矩减小,且白度有不同程度的提高。王霞等^[17]利用转矩流变仪和旋转流变仪研究了偶联剂、润滑剂对 PP/木粉流动性能与动态流变特性的影响,结果表明,硬脂酸的添加可显著降低复合体系的平衡转矩和剪切热,改善复合材料的加工性能。目前大部分研究均基于 AB (A 代表极性锚固基团;B 代表长支链或直链烷烃)型润滑剂与硬脂酸盐等常规润滑体系^[7-11],而对 BAB 型润滑剂的相关研究较少。BAB 型润滑剂结构为极性锚固基团处于中央,长支链或直链烷烃处于两端的嵌段共聚物,锚固基团可与填料颗粒相互作用,形成一定的吸附层,在填料之间形成空间障碍,避免团聚,实现填料在树脂基体中的均匀分散,由于 BAB 两端有较长的烷烃链,可与 PP 基体相互缠绕,改善填料与树脂基体之间的相互作用,从而实现性能的提高。

笔者基于 PP/Talc 复合材料,分别引入了 AB 型和 BAB 型两种不同的酰胺类极性润滑剂,分析了其对 PP/Talc 复合材料力学性能和流变行为的影响,并借助仪器化冲击着重分析了冲击韧性的变化和影响机制,为后续指导配方升级优化 PP/Talc 复合材料的综合性能,尤其是冲击韧性方面,提供有益信息。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PP: EP300M, 中海壳牌石油化工有限公司;

聚烯烃热塑性弹性体 (POE): DF610, 美国陶氏化学有限公司;

Talc: AH-1250N6, 广西龙胜华美滑石开发有限公司;

酰胺类极性润滑剂: AB 型与 BAB 型, 其中, A 表示具有酰胺基团的极性基团, B 表示二十碳以上

的直链/支链烷烃, 市售。

1.2 主要仪器及设备

双螺杆挤出机: TSE-35A 型, 南京瑞亚高聚物装备有限公司;

单螺杆注塑机: CJ80M3V 型, 广东佛山震德塑机有限公司;

万能试验机: CMT40204 型, 深圳新三思材料检测有限公司;

数显摆锤冲击仪: Zwick-5113 型, 德国 Zwick 材料实验机公司;

数字仪器化冲击仪: BPI-25COMM 型, 德国 Zwick 材料实验机公司;

毛细管流变仪: Rheograph 20 型, 德国 Goettfert 公司;

扫描电子显微镜 (SEM): S-3400N 型, 日本 Hitachi 公司;

熔体流动速率 (MFR) 测试仪: 4100 型, 德国 Zwick/Roell 公司。

1.3 试样制备

PP, POE, Talc 含量分别固定为 73 份、7 份和 20 份, 改变酰胺类极性润滑剂的种类和添加量, 其中极性润滑剂添加量均设置为 PP, POE, Talc 总质量的 0.5%, 1%, 1.5%, 将按比例配好的物料混合均匀后, 通过双螺杆挤出机挤出成型, 挤出温度 180~210℃, 喂料量 30 kg/h, 螺杆转速 350 r/min, 再经水槽冷却后切粒, 通过注塑机注塑成标准试样, 注塑温度 200℃。

1.4 性能测试

拉伸强度按 GB/T 1040.1-2006 测试, 拉伸速率 50 mm/min;

弯曲强度按 GB/T 9341-2000 测试, 测试速率 2 mm/min, 挠度 10 mm;

常低温悬臂梁缺口冲击强度按 GB/T 1843-2008 测试, 其中低温测试前先将试样在 0℃ 冷冻 6 h;

MFR 按 GB/T 3682-2018 测试, 载荷 2.16 kg, 温度 230℃;

仪器化冲击试验参照 ASTM D256-2006 进行;

毛细管流变性能按 ASTM D3835-2016 测试, 剪切速率范围为 50~3000 s⁻¹;

SEM 表征: 取冲击试样, 在液氮中冷冻淬断, 喷金处理, 采用 SEM 观察断面, 测试电压 15 V, 电流 40 μA。

2 结果与讨论

2.1 极性润滑剂类型与添加量对 PP/Talc 复合材料拉伸与弯曲性能的影响

图1为AB型和BAB型极性润滑剂的添加量对PP/Talc复合材料拉伸性能的影响。由图1可知,随着AB型润滑剂添加量从0%增加至1.5%,拉伸强度出现了小幅度下降,从23.2 MPa降低至22.7 MPa,断裂伸长率先大幅度增加至65% (添加量为0.5%时),之后又降低至47%;与之类似,随着BAB型润滑剂添加量的增加,拉伸强度几乎未发生变化,断裂伸长率从添加量为0%时的35%上升至添加量为1.5%时的46%。综合来看,极性润滑剂的加入会导致PP/Talc复合材料的拉伸强度轻微下降,断裂伸长率则有一定程度的提升。AB型润滑剂和BAB型润滑剂作为酰胺类极性润滑剂,在树脂基体中主要发挥内润滑作用,降低分子链段间的相互作用力,并减少链段发生位移的摩擦力,因而随润滑剂添加量的增加,复合材料拉伸强度有轻微下降的现象^[12]。

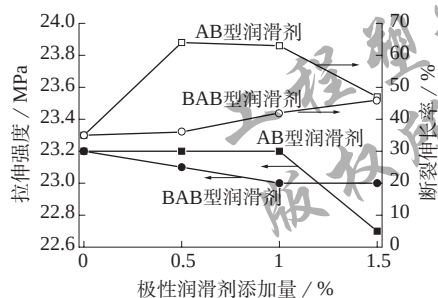


图1 两种极性润滑剂不同添加量的PP/Talc复合材料的拉伸性能

图2为两种极性润滑剂的添加量对PP/Talc复合材料弯曲性能的影响。综合图2来看,随着极性润滑剂添加量的增加,复合材料弯曲强度整体上未发生明显变化,仅略微下降,弯曲弹性模量有小幅度的上升,总体上增加了150~190 MPa,这可能是由于极性润滑剂改善了填料在基体中的分散均匀性。同样,与拉伸性能表现一致,两种酰胺类润滑剂没有展示出明显的差异,均发挥内润滑作用。

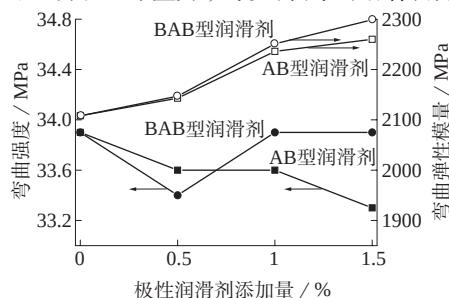
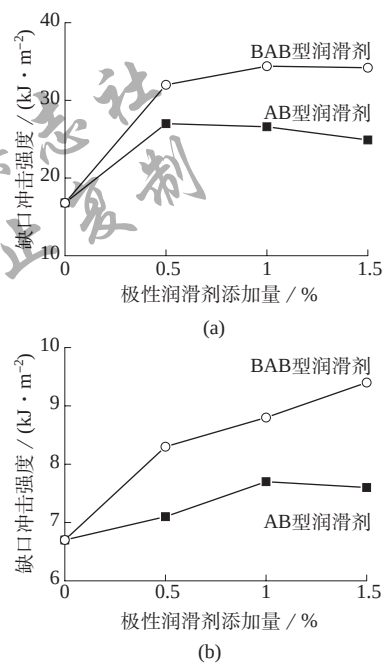


图2 两种极性润滑剂不同添加量的PP/Talc复合材料的弯曲性能

2.2 极性润滑剂类型与添加量对 PP/Talc 复合材料冲击韧性的影响

极性润滑剂对PP/Talc复合材料缺口冲击强度的影响如图3所示,其中,图3a为常温测试结果,图3b为0℃测试结果。由图3可知,极性润滑剂的加入对常温和低温缺口冲击强度均有明显提升作用。一方面,润滑剂在PP/Talc中发挥了内润滑作用,使分子链运动能力增强,材料冲击强度有所增加;另一方面,润滑剂的极性端——酰胺基团覆盖在无机填料Talc的表面,非极性的烷烃链段与PP基体相互缠结,既改善了Talc与基体的界面相容性,增强了填料与基体之间的相互作用,有利于应力传导,以实现增韧改善。



a—常温; b—低温(0℃)

图3 两种极性润滑剂不同添加量的PP/Talc复合材料常低温缺口冲击强度

其中,随着AB型润滑剂添加量的增加,缺口冲击强度先增加,之后略有降低;随着BAB型润滑剂添加量的增加,常温缺口冲击强度先增加之后保持平稳,低温缺口冲击强度持续上升(润滑剂添加量为1.5%时,较未加润滑剂时增加了35%),均高于同等条件下添加AB型润滑剂的材料,尤其表现在低温(0℃)缺口冲击性能。作为酰胺类极性润滑剂,与AB型润滑剂相比,BAB型润滑剂分子结构中具有更长的烷烃链段,且极性相对较低,与非极性基体PP/POE亲合性更好,减少了无机填料Talc填充时产生的应力集中点,改变了粒子周围的应力状态,有

利于形成大量有效的空穴化,与 POE 的应力场发挥协同作用,吸收并传递大量冲击能量。

为进一步探讨分析 AB 型润滑剂和 BAB 型润滑剂对冲击韧性的影响机制,借助仪器化冲击,可以获得 PP/Talc 复合材料冲击性能相关的更多信息。图 4 和图 5 分别为 AB 型润滑剂和 BAB 型润滑剂改性 PP/Talc 复合材料仪器化冲击过程的力-时间 ($F-t$) 曲线。图 4 和图 5 中各箭头所指分别为最

大力 F_m 和相应的时间, F_m 代表材料在冲击过程中能够承受的最大破坏力, F_b 代表材料被完全破坏时的力。一般认为,材料的破坏包括裂纹引发和裂纹扩展两个过程,图 4 和图 5 中 F_m 的两侧分别为裂纹产生区和裂纹扩展区^[7],其中, W_m 为裂纹产生功, W_b 为裂纹扩展功。综合图 4 和图 5 来看,添加了极性润滑剂后,PP/Talc 复合材料在冲击破坏过程中,裂纹产生区几乎未发生变化,裂纹扩展区明显增大,

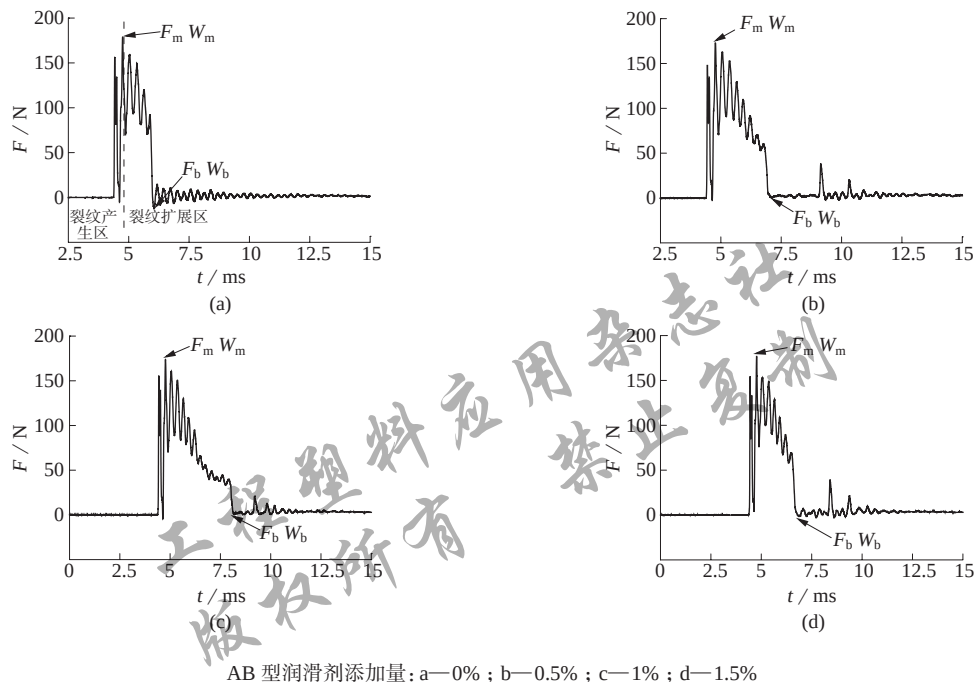


图 4 不同 AB 型润滑剂添加量的 PP/Talc 复合材料仪器化冲击 $F-t$ 曲线

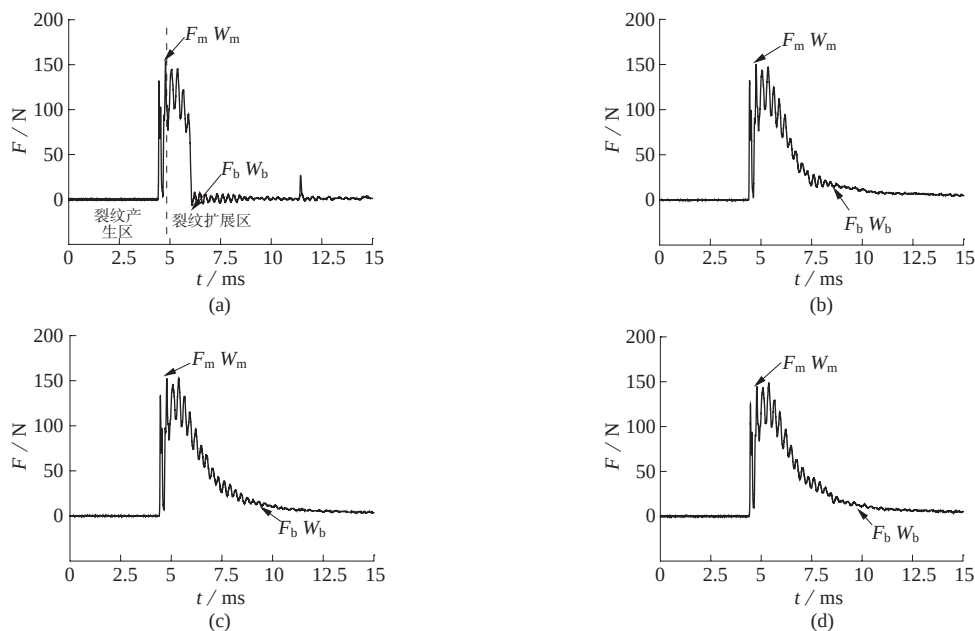


图 5 不同 BAB 型润滑剂添加量的 PP/Talc 复合材料仪器化冲击 $F-t$ 曲线

即 W_b 的增加是实现其冲击韧性得到明显提升的来源。再进一步对比 AB 型润滑剂和 BAB 型润滑剂的冲击 $F-t$ 曲线可以发现, BAB 型润滑剂改性的复合材料呈现出了韧性破坏的特征,即冲击曲线达到最大力 F_m 后呈现缓慢下降的趋势,而非断崖式的下降,这也是 BAB 型润滑剂对冲击韧性的提升要优于 AB 型润滑剂的原因所在。

对上述 $F-t$ 曲线进行积分和计算,可以得到与材料破坏过程相关的多种能量和力值等数据,具体如表 1 所示。最大力 F_m 对应的位移值计为 S_m ,材料完全破坏时对应的位移值计为 S_b ,自冲击开始到最大力 F_m 的区间峰面积为 W_m ,最大力值 F_m 到试样完全被破坏时的区间峰面积为 W_b 。由表 1 可知,在 PP/Talc 复合材料中引入极性润滑剂, F_0 , W_m , S_m 均没有发生明显改变, F_m 略有增加。众所周知,材料本身的刚性或硬度越大,材料在冲击过程中的 W_m 也就越大,故表 1 结果说明 AB 型润滑剂或 BAB 型润滑剂对 PP/Talc 复合材料体系的刚性没有产生显著的影响,而且 W_m 相比于 W_b 几乎可以忽略不计,对冲击能量耗散的贡献很小。

表 1 两种极性润滑剂不同添加量的 PP/Talc 复合材料的

仪器化冲击结果数据

润滑剂类型	润滑剂添加量/%	F_m/N	S_m/mm	W_m/J	S_b/mm	W_b/J
AB 型润滑剂	0	155	1.2	0.087	5.8	0.52
	0.5	163	1.2	0.094	8.1	0.73
	1.0	164	1.2	0.094	8.1	0.73
	1.5	164	1.2	0.097	7.3	0.69
BAB 型润滑剂	0	155	1.2	0.087	5.8	0.52
	0.5	159	1.2	0.088	9.2	0.89
	1.0	164	1.2	0.091	10.8	0.96
	1.5	162	1.2	0.092	11.4	0.98

进一步考察两者的 W_b ,发现相同润滑剂添加量时,添加 BAB 型润滑剂的 PP/Talc 复合材料的 W_b 值明显高于添加 AB 型润滑剂的复合材料,而且随润滑剂添加量的增加,前者的增幅更大,使 W_b 得到有效增加,是其冲击韧性提升更加快速的来源。

2.3 极性润滑剂类型与添加量对 PP/Talc 复合材料流变性能的影响

鉴于毛细管流变分析是研究聚合物材料流变性能的一种有效手段^[18],采用毛细管流变仪,在剪切速率为 $50 \sim 3000 \text{ s}^{-1}$ 条件下研究了两种极性润滑剂在不同添加量时的 PP/Talc 复合材料复数黏度随剪切速率变化情况,结果如图 6 所示。为清晰地阐述润滑剂对材料流变行为的影响,以未添加润滑剂的 PP/Talc 复合材料的流变曲线为基线,对各

曲线进行了平移。由图 6 可知,随着剪切速率的增加,黏度逐渐下降,而且两种体系在不同剪切速率下,黏度的变化基本保持一致。在 PP/Talc 复合材料中,添加或未添加润滑剂,黏度曲线重合性非常好,即 AB 型润滑剂或 BAB 型润滑剂对复合材料的流变行为没有显著影响。AB 型润滑剂和 BAB 型润滑剂作为酰胺类极性润滑剂,属于小分子范畴,在 $50 \sim 3000 \text{ s}^{-1}$ 剪切速率范围内,对 PP/Talc 复合材料的流变行为影响较小。

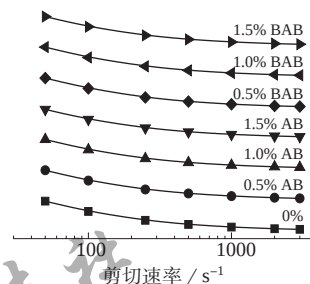


图 6 两种极性润滑剂不同添加量的 PP/Talc 复合材料

复数黏度随剪切速率的变化情况

表 2 为添加不同含量的 AB 型润滑剂或 BAB 型润滑剂时, PP/Talc 复合材料的 MFR 变化情况。由表 2 可以看出,随着润滑剂的引入和添加量的增加, PP/Talc 复合材料 MFR 呈现小幅度的上升趋势,而且 BAB 型润滑剂的增幅略大于 AB 型润滑剂。这两种酰胺类极性润滑剂发挥了内润滑和增塑的作用,减少了分子链段运动的摩擦力,在一定程度上提升了复合材料的加工流动性。

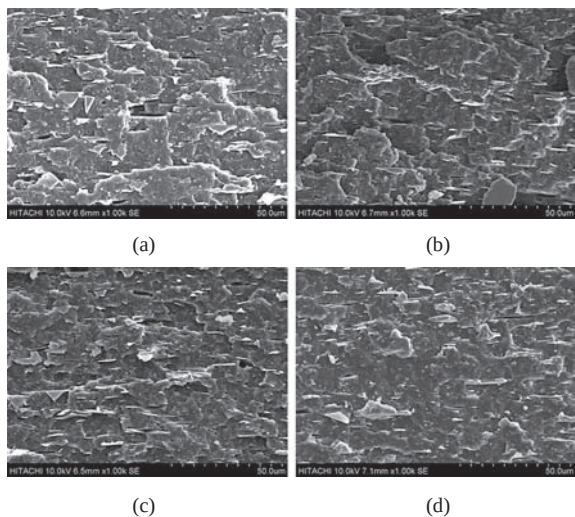
表 2 两种极性润滑剂不同添加量的

PP/Talc 复合材料的 MFR g/(10 min)

极性润滑剂类型	极性润滑剂添加量/%			
	0	0.5	1	1.5
AB 型润滑剂	6.7	7.2	7.8	7.7
BAB 型润滑剂	6.7	8.0	8.3	8.5

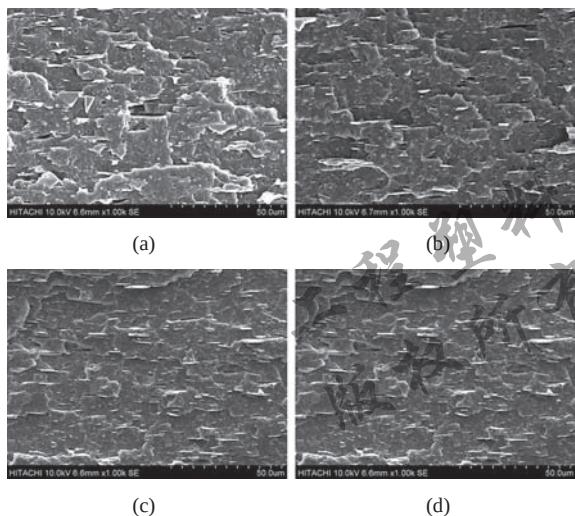
2.4 极性润滑剂类型与添加量对 PP/Talc 复合材料微观形貌的影响

从微观结构方面进一步探究不同结构极性润滑剂对 PP/Talc 复合材料冲击韧性的影响机理,图 7 和图 8 分别展示了添加 AB 型润滑剂和 BAB 型润滑剂的 PP/Talc 复合材料的断面微观形貌。图 7a 为未添加润滑剂的 PP/Talc 复合材料,由断面看出,材料在断裂时有较多 Talc 拔出,产生大量的孔穴,片状 Talc 堆积在断面上,表面轮廓清晰。当 AB 型润滑剂添加量从 0.5% 增加至 1.5% 时,如图 7b~图 7d 所示,一方面,片状 Talc 拔出后留下的孔穴数量减少,说明 Talc 与基体相互作用增强;另一方



AB 型润滑剂添加量: a—0%; b—0.5%; c—1%; d—1.5%

图 7 添加 AB 型润滑剂的 PP/Talc 复合材料断面微观形貌



BAB 型润滑剂添加量: a—0%; b—0.5%; c—1%; d—1.5%

图 8 添加 BAB 型润滑剂的 PP/Talc 复合材料断面微观形貌

面,填料与基体界面逐渐变得模糊,但有大量裸露的 Talc 团聚。整体来看,添加 AB 型润滑剂有助于改善 Talc 与 PP 的相容性,所以添加 AB 型润滑剂的 PP/Talc 复合材料冲击韧性有一定程度的提升,但效果有限,随着 AB 型润滑剂添加量的增加,缺口冲击强度先增加,之后有轻微下降的趋势。与之类似,如图 8b~图 8d 所示, BAB 型润滑剂添加量由 0.5% 增加至 1.5% 时,断面上裸露的 Talc 逐渐减少,同时 Talc 与基体界面逐渐变得模糊,甚至有部分区域已无法清晰地分辨出基体中分布的填料,这表明 BAB 型润滑剂提升了 Talc 与 PP 基体的相容性,减少了大量的应力集中和缺陷点。此外,添加 BAB 型润滑剂的 PP/Talc 复合材料中 Talc 分散分布较为均匀,相应地体现在冲击韧性方面,随着 BAB 型润滑

剂添加量的增加,缺口冲击强度先增加之后保持平稳,优于同等条件下的 AB 型润滑剂体系。

基于两种润滑剂分子结构,以及其与填料的相互作用,具体展开论述两者作用机理。AB 型润滑剂作为普通型酰胺类极性润滑剂,由酰胺极性基团和烷烃链构成,两性 AB 结构在一定程度上改善了填料与 PP 的相容性,但在 Talc 表面的吸附形态是无规的,对 Talc 的分散没有帮助,综合表现在添加 AB 型润滑剂的 PP/Talc 复合材料冲击韧性有一定程度的提升,但效果有限。对于 BAB 型润滑剂,同样作为酰胺类极性改性剂,一方面,改善了填料与 PP 的相容性,另一方面,在 Talc 表面形成大量的环形和尾形吸附形态,实现了 Talc/BAB 型润滑剂均匀分散在基体中,相应的复合材料冲击韧性得到明显的优化和提升,尤其体现在低温 (0℃) 缺口冲击性能方面。

3 结论

(1) 对于 PP/Talc 复合材料体系,引入酰胺类极性润滑剂,无论 AB 型润滑剂或 BAB 型润滑剂,材料的拉伸和弯曲强度均出现了小幅度下降,断裂伸长率和弯曲弹性模量略有提升,常温缺口冲击强度显著提升,添加 BAB 型润滑剂的增加幅度高于添加 AB 型润滑剂的材料,而且当 BAB 型润滑剂添加量为 1.5% 时,材料低温 (0℃) 缺口冲击强度较未加润滑剂时增加幅度达 35%。

(2) AB 型润滑剂或 BAB 型润滑剂的引入使冲击过程中的裂纹扩展功显著增加,是冲击韧性得到提升的主要贡献因素。

(3) 剪切速率在 50~3000 s⁻¹ 范围内,两种酰胺类极性润滑剂对 PP/Talc 复合材料的流变行为均没有明显影响, MFR 略有提升。

(4) SEM 分析结果表明, BAB 型润滑剂在提升了 Talc 与基体相互作用的同时,实现了 Talc 在基体中的均匀分散,相应的复合材料冲击韧性得到明显的优化和提升。

参考文献

- [1] 王怡博,邵景昌,邵琦. 矿粉填充聚丙烯的耐刮擦性能影响因素[J]. 工程塑料应用, 2019, 47(12):106-109.
Wang Yibo, Shao Jingchang, Shao Qi. Influence factors of scratch resistance of mineral powders filled polypropylene[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(12):106-109.
- [2] 边亚微,陈峥,杨树娥,等. 汽车专用改性聚丙烯复合材料的研发[J]. 化学工程, 2018, 32(7):86-87.

- Bian Yawei, Chen Zheng, Yang Shue, et al. Research and development of the specially modified PP composite materials in automobile[J]. Chemical Engineer, 2018, 32(7):86–87.
- [3] 陈秀宇, 陈国奋, 林谦. POE/POE-g-MAH/PP-g-MAH 增韧 PP / 滑石粉研究[J]. 广东化工, 2019, 46(24):11–13.
- Chen Xiuyu, Chen Guofen, Lin Qian. Study on toughening of PP / talc by POE / POE-g-MAH / PP-g-MAH[J]. Guangdong Chemical Industry, 2019, 46(24):11–13.
- [4] 王琪, 卢朝亮, 李振华, 等. 滑石粉填充聚丙烯材料注塑微发泡性能[J]. 工程塑料应用, 2018, 46(10):17–23.
- Wang Qi, Lu Zhaoliang, Li zhenhua, et al. Microcellular foaming behavior of PP / talc composites by injection[J]. Engineering Plastics Application, 2018, 46(10):17–23.
- [5] 胡建华, 陈俊, 魏俊峰, 等. 滑石粉-玻纤增强聚丙烯复合材料[J]. 广东化工, 2018, 45(19):54–55.
- Hu Jianhua, Chen Jun, Wei Junfeng, et al. Study on reinforced PP composites filled with talc and glass fiber[J]. Guangdong Chemical Industry, 2018, 45(19):54–55.
- [6] 杨秀琴, 宋子豪, 陈兰芳, 等. 聚丙烯 / 滑石粉复合材料的制备与性能研究[J]. 塑料科技, 2019, 47(5):6–9.
- Yang Xiuqin, Song Zihao, Chen Lanfang, et al. Study on preparation and properties of PP / talc powder composites[J]. Plastics Science and Technology, 2019, 47(5):6–9.
- [7] 尹朝清, 刘乐文, 张爽爽. 刚性粒子 / POE 对聚丙烯的协同增韧机制[J]. 塑料, 2019, 48(1):53–57.
- Yin Chaoqing, Liu Lewen, Zhang Shuangshuang. Synergistic toughening mechanism of PP by blending rigid particles and POE[J]. Plastics, 2019, 48(1):53–57.
- [8] 杨波, 孙玲. 滑石粉 (Talc) 填充聚丙烯复合材料收缩率的研究[J]. 机械设计与制造, 2016(12):257–259.
- Yang Bo, Sun Ling. Research of shrinkage filled polypropylene composites with talc filled[J]. Machinery Design & Manufacture, 2016(12):257–259.
- [9] 叶淑英. 润滑剂对 PP / IFR 复合材料性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2017, 45(4):113–117.
- Ye Shuying. Effect of lubricants on properties of PP / IFR composites[J]. Engineering Plastics Application, 2017, 45(4):113–117.
- [10] Haque M M, Goda K, Ito H, et al. Melt-viscosity and mechanical behavior of polypropylene (PP) / wood flour composites: Effect of pulverization of wood flour with and without water[J]. Advanced Industrial and Engineering Polymer Research, 2019, 2(1):42–50.
- [11] 柴月娥, 龚福忠, 张国利. 超分散剂及其应用前景[J]. 化工技术与开发, 2006, 35(12):5–9.
- Chai Yuee, Gong Fuzhong, Zhang Guoli. Hyperdispersant and its application progress[J]. Technology & Development of Chemical Industry, 2006, 35(12):5–9.
- [12] Ding Qian, Zhang Zishou, Dai Xin, et al. Effect of hybrid wollastonite with different nucleation and morphology on the crystallization and mechanical properties of polypropylene[J]. Polymer Composites, 2019, 40(S1):E638–E646.
- [13] Ghanbari A, Behzadfar E, Arjmand M. Properties of talc filled reactor-made thermoplastic polyolefin composites[J]. Journal of Polymer Research, 2019, 26(10).doi:10.1007/s10965-019-1902-6.
- [14] Ajorloo M, Ghodrat M, Moghbeli M R. A statistical approach to investigate the effects of multicomponent fractions on the mechanical properties of PP / PPMA / Talc / POE composites[J]. Journal of Polymer Research, 2020, 27(3).doi:10.1007/s10965-020-2042-8.
- [15] 王少会. 超分散剂结构设计、合成及其在塑料改性中的应用[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2008.
- Wang Shaohui. Structural design and synthesis of hyperdispersant[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2008.
- [16] 叶南彪, 唐磊, 李成. 不同润滑剂对滑石粉填充聚丙烯材料颜色的影响[J]. 塑料工业, 2018, 46(12):124–127.
- Ye Nanbiao, Tang Lei, Li Cheng. Effect of different lubricants on the color of talc-filled polypropylene composites[J]. China Plastics Industry, 2018, 46(12):124–127.
- [17] 王霞, 李浩, 宋永明, 等. 木粉 / 聚丙烯复合材料的流变性能研究[J]. 西南林业大学学报, 2016, 36(4):145–151.
- Wang Xia, Li Hao, Song Yongming, et al. Research on rheological properties of wood flour / polypropylene composites[J]. Journal of Southwest Forestry University, 2016, 36(4):145–151.
- [18] 李树白, 孙毓韬, 姚培, 等. PP / POE 共混物的流变行为分析[J]. 塑料科技, 2018, 46(4):34–38.
- Li Shubai, Sun Yutao, Yao Pei, et al. Rheological analysis of PP / POE blends[J]. Plastics Science and Technology, 2018, 46(4):34–38.