

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2017.01.010

挤出工艺及螺杆组合对膨胀阻燃 PP 性能的影响

杨友强,姜向新,杨霄云,肖鹏

(金发科技股份有限公司产品研发中心,塑料改性与加工国家工程实验室,广州 510663)

摘要:利用无卤膨胀阻燃剂对聚丙烯(PP)进行改性,研究了不同挤出工艺参数(温度、螺杆转速、喂料量)及螺杆组合对无卤膨胀阻燃 PP 材料性能[熔体流动速率(MFR)、力学性能、阻燃性能、颜色等]的影响。结果表明,随着喂料量的增加,材料的 MFR、断裂伸长率和缺口冲击强度总体呈下降趋势,适宜的喂料量为 60 kg/h;随着螺杆转速的增加,材料的 MFR 逐渐提高,断裂伸长率、缺口冲击强度和极限氧指数呈现先增加后降低的趋势,材料颜色逐渐变黄;随着挤出温度升高,材料的断裂伸长率和缺口冲击强度呈现先升高后降低的趋势;使用弱剪切螺杆组合时阻燃剂分散性能较差,使用集中强剪切螺杆组合时容易导致材料降解,使用分散多段剪切的螺杆组合时,材料的断裂伸长率、缺口冲击强度提升显著,分别比弱剪切螺杆组合生产的材料提高了 80% 和 40.5%。当喂料量为 60 kg/h、螺杆转速为 500 r/min、挤出温度为 180~200℃并采用分散多段剪切的螺杆组合时,无卤膨胀阻燃 PP 材料的综合性能最优。

关键词:无卤膨胀阻燃剂;聚丙烯;螺杆组合;挤出工艺;温度;螺杆转速;力学性能;阻燃性能

中图分类号:TQ320.65 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-3539(2017)01-0049-06

Influence of Extrusion Process and Screw Configuration on Properties of Halogen-Free Intumescent Flame Retardant Polypropylene

Yang Youqiang, Jiang Xiangxin, Yang Xiaoyun, Xiao Peng

(Research and Development Center, National Engineering Laboratory for Plastic Modification and Processing, Kingfa Science and Technology Co. Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: Polypropylene (PP) was modified by halogen-free intumescent flame retardant (IFR) and the influences of the extrusion process parameters (extrusion temperature, screw speed, feeding quantity) and screw configuration on the properties [melt flow rate (MFR), mechanical properties, flame retardance, color] of halogen-free intumescent flame retardant PP materials were researched. The results show that with the increase of feeding quantity, the MFR, elongation at break and notched impact strength decrease in total, the proper feeding quantity is 60 kg/h. As the screw speed increases, the MFR increases, the elongation at break, notched impact strength and limiting oxygen index increase first and then decrease, the color of the material changes into yellow. With the increase of temperature, the elongation at break and notched impact strength of the materials also exhibit a trend of increasing firstly and decreasing lastly. The dispersion of the IFR in PP is poor while using weak shear screw configuration and the material degrades while using concentrate strong shear screw configuration, when using dispersed multi-stage shear screw configuration, the elongation at break and notched impact strength are improved obviously, which increase by 80% and 40.5% separately compared with those of weak shear screw configuration. The best performance of the material is received by using the following process conditions: the feeding quantity is set as 60 kg/h, the screw speed is set at 500 r/min, the extrusion temperature is set at 180~200℃, and the screw configuration is designed as dispersed multi-stage shear type.

Keywords: halogen-free intumescent flame retardant; polypropylene; screw configuration; extrusion process; temperature; screw speed; mechanical property; flame retardance

聚丙烯(PP)的极限氧指数(LOI)仅为18%,极易燃烧,当PP制件有阻燃要求时,必须对PP进行阻燃改性,PP阻燃主要通过添加阻燃剂来实现。用于PP的阻燃剂种类较多,包括溴-锑协效体系^[1-2]、磷-氮-溴协效阻燃体系^[3-4]、金属氢氧化物-红磷体系^[5]及膨胀阻燃体系。其中膨胀阻燃PP材

料具有燃烧时烟密度低,烟毒性小,热释放速率低等优点^[6-8],应用逐渐增多,是极具潜力的新型材料。但无卤膨胀阻燃剂存在阻燃效率较低(添加量达到25%~35%)、耐水耐高温性较差等明显不足,且与PP

联系人:杨友强,博士,主要从事聚合物的阻燃改性研究

收稿日期:2016-11-04

相容性较差,导致膨胀阻燃 PP 材料的力学性能较差、加工难度较大^[9-11]。

已有大量学者对无卤膨胀阻燃剂的协效阻燃机理^[12-14]、偶联剂处理改性^[15-16]及耐水耐热性能^[17-18]等进行了研究。由于无卤膨胀阻燃剂耐热性差且难于分散,加工工艺对膨胀阻燃 PP 材料性能的影响也显得尤为重要,不合理的加工工艺可能导致材料阻燃性能波动、物理力学性能下降、成型外观变差等,但鲜有文章对膨胀阻燃 PP 材料的挤出加工工艺进行探讨。

在高分子材料的挤出加工工艺中,螺杆组合对材料性能的影响至关重要,但在生产过程中一旦确定即成为固定参数,基本不再变化;而温度、转速、喂料量等参数虽然属于研究的基础内容,但这些工艺参数较易发生改变,而膨胀阻燃 PP 材料由于其阻燃剂的难分散性和高添加量,极易因工艺条件的改变而发生性能的波动。为此,笔者系统评估了不同挤出温度、螺杆转速、喂料量及螺杆组合等对膨胀阻燃 PP 材料的流动性能、力学性能、燃烧性能、颜色及成型外观的影响,通过对研究结果进行分析,提供系统、准确的膨胀阻燃 PP 材料挤出加工基础数据,为同类阻燃聚合物的应用开发和加工研究提供参考。

1 实验部分

1.1 主要原料

PP: EP300M, 中海壳牌石油化工有限公司;

磷-氮系无卤膨胀阻燃剂: 德国 Budenheim 化学公司;

聚四氟乙烯 (PTFE): 广州嫡能创新材料股份有限公司。

1.2 主要仪器与设备

高速混合机: SHR-100A 型, 江苏张家港市科达机械有限公司;

双螺杆挤出机: SHJ-40 型, 直径为 52 mm、长径比为 40/1, 南京瑞亚高聚物装备有限公司;

卧式注塑机: B-920 型, 浙江海天注塑机有限公司;

熔体流动速率 (MFR) 仪: ZR21452 型, 美斯特工业系统 (中国) 有限公司;

万能试验机: H10K-S 型, Hounsfield 公司;

冲击试验机: T92 型, 美国 Tinius Olsen 公司;

色差测试仪: Color Eye 7000A 型, 美国 Gretag Macbeth 公司;

扫描电子显微镜 (SEM): S-3400N 型, 株式会社日立制作所;

UL 94 垂直燃烧仪: HVUL-2 型, 美国 ATLAS 公司;

LOI 仪: HC-2 型, 宁波市鄞州瑾瑞仪器设备有限公司。

1.3 试样制备

将无卤膨胀阻燃剂 (质量分数为 25%)、PP、抗滴落剂 PTFE (质量分数为 0.2%) 及加工助剂按一定比例加入高速混合机中预混, 然后使用双螺杆挤出机在温度 170~220℃、螺杆转速 300~600 r/min 的工艺条件下挤出造粒, 喂料量设定为 40~100 kg/h。将制得的粒子放入 80℃干燥箱中干燥 1 h, 然后在注塑机上于 200℃条件下注射成型标准试样。

1.4 测试及表征

拉伸性能按 ISO 527-2012 测试, 拉伸速度 50 mm/min;

弯曲强度按 ISO 17-2010 测试, 弯曲速度 2 mm/min;

Izod 缺口冲击强度按 ISO 180-2006 测试;

垂直燃烧性能按照 ASTM UL94-2015 测试, 试样厚度为 1.6 mm;

MFR 按 ISO 1133-2011 测试, 测试条件为 230℃, 2.16 kg;

LOI 按 ISO 4589-2 1996 测试;

材料的表面颜色采用 Color Eye 7000A 色差测试仪表征, 测试其 L 值和 b 值;

采用 SEM 表征材料的表面形貌, 扫描电压为 15 kV, 放大倍数 2000 倍。

2 结果与讨论

2.1 挤出工艺对膨胀阻燃 PP 材料性能的影响

膨胀阻燃 PP 材料采用的阻燃剂为磷-氮系膨胀阻燃剂, 其添加量可为 25%~35%, 由于磷-氮类阻燃剂的极性较强, 与 PP 的相容性较差, 因而其分散性能较差。同时由于无卤膨胀阻燃剂本身耐热性较差, 加工温度一般都较低, 通常为 170~200℃。较低的加工温度, 势必造成分散效果较差, 因此挤出生产工艺条件对阻燃剂的分散效果及综合性能影响较大。在生产过程中, 最容易出现波动的工艺参数包括挤出温度、转速和喂料量。故以这 3 种工艺参数为变量, 研究不同转速 (300~600 r/min)、喂料量 (40~100 kg/h)、挤出温度 (170~220℃) 对膨胀阻燃 PP 材料综合性能的影响。

(1) 转速、喂料量对性能的影响。

首先,考察了当挤出温度为 180°C 时,不同转速和喂料量对材料性能的影响。图 1 是不同转速和不同喂料量下主机电流的变化情况。从图 1 可知,喂料量相同的条件下,随着挤出转速的增加,主机电流逐渐减小。这主要是由于 PP 是一种剪切变稀的材料,随着转速增加,剪切速率的增加导致 PP 的剪切黏度变小,因而主机旋转阻力和电流相应减小。在相同的转速条件下,喂料量增加导致主机电流逐渐变大,这是由于喂料量的增加,导致机台的填充度增大,机器相同时间需要挤出的物料量增加,能耗及主机电流也相应增加。由此可知,转速和喂料量都会对主机电流有主导作用,因此在实际生产过程中,不能根据主机电流负荷情况来判断机台运行状况,仅依靠主机电流无法真实反应生产过程是否稳定。

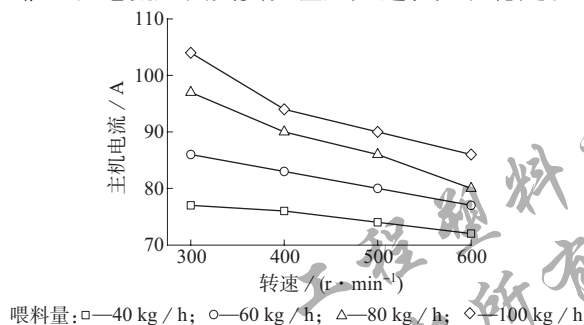


图 1 不同转速、喂料量下主机电流的变化情况

图 2 是不同转速和喂料量下材料 MFR 的变化情况。

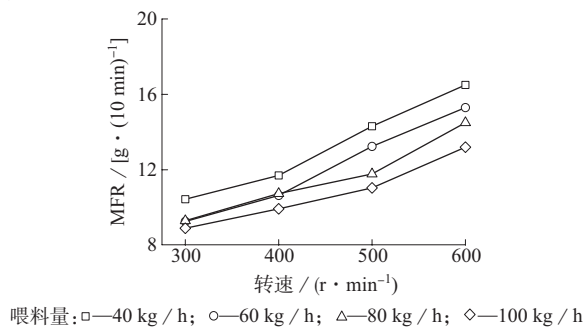


图 2 不同转速、喂料量下材料 MFR 的变化情况

由图 2 看出,在相同的转速条件下,随着喂料量的增加,材料的 MFR 基本呈现下降趋势。这主要是因为,喂料量的增加,导致了材料在机器中的停留时间变短,一方面可能引起材料混合不够均匀导致流动性下降,另一方面停留时间变短也降低了材料发生降解的机率,因此 MFR 相对更低。喂料量相同时,随着转速增加, MFR 逐渐增加,其原因与喂料量的影响类似,转速增加导致剪切作用增强,阻燃剂的分散更加均匀使得材料的流动阻力变小;同时

过强的剪切作用也会导致材料发生轻微降解从而使得流动性变大。当转速提高到 600 r/min 时, MFR 出现较大幅度的增加,说明材料开始发生降解。在实际生产过程中,必须选择合适的转速和喂料量,既保证材料分散比较均匀,又避免材料降解导致性能下降。

断裂伸长率和冲击强度是衡量阻燃高分子材料中阻燃剂是否分散均匀的非常重要的指标,阻燃剂分散良好,材料的缺陷点较少,断裂伸长率和冲击强度更高。图 3 为不同转速和喂料量下材料断裂伸长率和缺口冲击强度的变化情况。从图 3 可以看到,转速相同的情况下,随着喂料量的增加,断裂伸长率和缺口冲击强度总体呈现下降趋势。而在喂料量相同的情况下,随着转速的增加,断裂伸长率和缺口冲击强度均呈先升高后降低的趋势,这是由于转速升高使阻燃剂的分散更均匀,材料的韧性得到提高。但过高的转速会造成阻燃剂及树脂的降解,导致韧性下降。

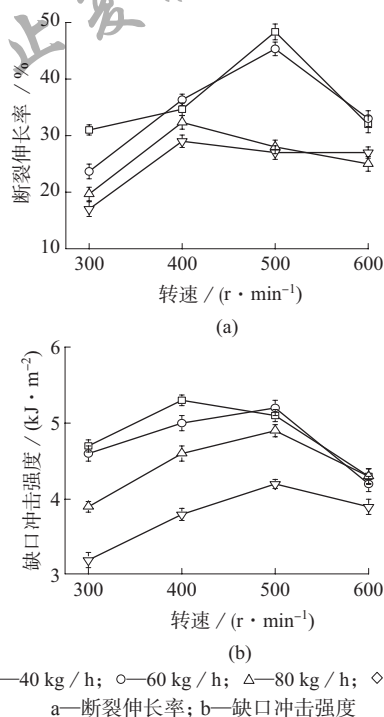


图 3 不同转速、喂料量下材料断裂伸长率和缺口冲击强度的变化情况

通过上述结果可以看到,当喂料量为 $40, 60\text{ kg/h}$ 时,膨胀阻燃 PP 材料的 MFR、断裂伸长率和缺口冲击强度总体上处于比较高的水平,考虑到生产效率问题,固定喂料量为 60 kg/h ,研究了转速对其它性能的影响。图 4 对比了喂料量为 60 kg/h 时不同转速对材料拉伸和弯曲强度的影响情况。由图 4 可以发现,当转速从 300 r/min 增至 500 r/min

时,拉伸和弯曲强度变化不大,由于拉伸和弯曲强度主要代表了材料的宏观性能,所以只要材料不发生明显的降解或其它致命缺陷,拉伸和弯曲强度不会发生较明显的变化。而当转速升高至 600 r/min 时拉伸强度和弯曲强度均出现了下降,表明此时材料发生了一定的降解。

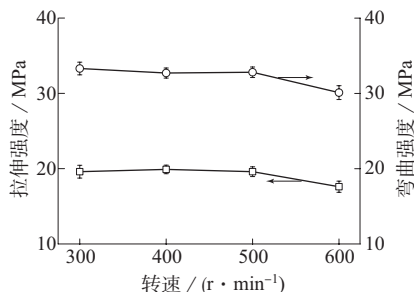


图4 不同转速下材料的拉伸强度和弯曲强度

图5对比了喂料量为 60 kg/h 时不同转速对无卤膨胀阻燃 PP 材料颜色的影响情况。从图5可以看出,当转速从 300 r/min 升高至 500 r/min 时, L 值和 b 值仅有轻微的变化,说明材料没有明显的降解情况出现,但当转速提高至 600 r/min 时, L 值急剧下降, b 值急剧上升,材料出现非常严重的发黄现象,说明阻燃剂和树脂都发生了一定降解,因此,必须避免使用高螺杆转速生产无卤膨胀阻燃剂阻燃 PP 材料。

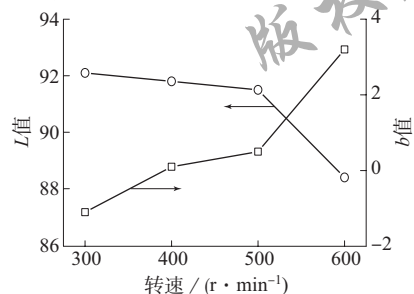


图5 不同转速下材料 L 值和 b 值的变化情况

表1对比了喂料量为 60 kg/h 时不同转速对膨胀阻燃 PP 材料阻燃性能的影响。从表1可以看出,转速为 300~600 r/min 时,材料都能达到 UL 94 V-0 阻燃等级,但总燃烧时间和 LOI 有所区别。转速较低 (300 r/min) 时,材料的总燃烧时间略长, LOI 也略低,其主要原因可能是低转速下材料的分散效果不佳;提高转速至 400,500 r/min 时,材料总燃烧时间减小, LOI 增加并趋于稳定,其主要原因可能是阻燃剂分散更加均匀,阻燃稳定性提高;继续提高转速至 600 r/min,阻燃剂出现轻微分解情况,阻燃效率下降,总燃烧时间有较大幅度增加, LOI 也有明显降低。

表1 不同螺杆转速下材料的阻燃性能

螺杆转速 / (r · min ⁻¹)	阻燃等级	总燃烧时间 / s	LOI / %
300	V-0	25	31
400	V-0	16	34
500	V-0	17	34
600	V-0	33	28

由以上分析可以看出,当喂料量为 60 kg/h, 螺杆转速为 500 r/min 时,材料的综合性能较好,特别是断裂伸长率较高,因此可将这两个工艺参数值视为喂料量与螺杆转速的最佳值。

(2) 挤出温度对性能的影响。

由于无卤膨胀型阻燃剂的耐高温性能有限,挤出温度对膨胀阻燃 PP 材料性能的影响不可忽视,固定喂料量为 60 kg/h,螺杆转速为 500 r/min,考察了不同挤出温度对材料各项性能的影响,结果见表2。从表2可以看到,温度较低时,由于 PP 的黏度较高,阻燃剂分散效果较差,材料的综合性能较差,尤其断裂伸长率和 MFR 较低;升高挤出温度至 180,200℃,材料的断裂伸长率和 MFR 提升明显,缺口冲击强度和 LOI 也有所提升,两种温度下的材料综合性能基本相差不大;但当温度为 220℃时,材料综合性能又出现一定幅度下降,其中断裂伸长率和缺口冲击强度下降明显, MFR 有所上升,但这可能是 PP 的降解造成的。综合上述分析结果,可以认为膨胀阻燃 PP 材料较好的挤出温度为 180~200℃。

表2 不同挤出温度下无卤膨胀阻燃 PP 的性能

项 目	挤出温度 / °C			
	170	180	200	220
拉伸强度 / MPa	19.5 ± 0.2	19.6 ± 0.2	19.1 ± 0.3	18.6 ± 0.3
断裂伸长率 / %	35 ± 2	45 ± 2	41 ± 1	26 ± 3
弯曲强度 / MPa	31.7 ± 0.3	32.8 ± 0.5	31.5 ± 0.3	29.4 ± 0.4
缺口冲击强度 / (kJ · m ⁻²)	4.1 ± 0.2	5.2 ± 0.1	4.8 ± 0.1	3.6 ± 0.3
MFR / [g · (10 min) ⁻¹]	9.2	13.2	14.0	16.1
阻燃等级	V-0	V-0	V-0	V-0
LOI / %	32	34	34	31

2.2 螺杆组合对膨胀阻燃 PP 材料性能的影响

螺杆组合对材料的性能影响至关重要,但螺杆组合的设计和验证需要花费研究者大量的精力和时间,为了给无卤膨胀阻燃 PP 材料的加工研究提供参考,笔者基于长期的生产加工经验设计了3种不同的螺杆组合,这3种螺杆组合均能提供一定的剪切和分散能力,其结构示意图如图6所示。其中1[#]螺杆为弱剪切,只有数量较少的剪切捏合块和反向螺纹元件;2[#]螺杆的捏合块和反向螺纹元件较多,但采用了分散剪切的方式,弱化了局部强剪切效果;3[#]螺杆的捏合块和反向螺纹元件数量同2[#]接近,但采用了集中强剪切的方式,局部的剪切力较强。

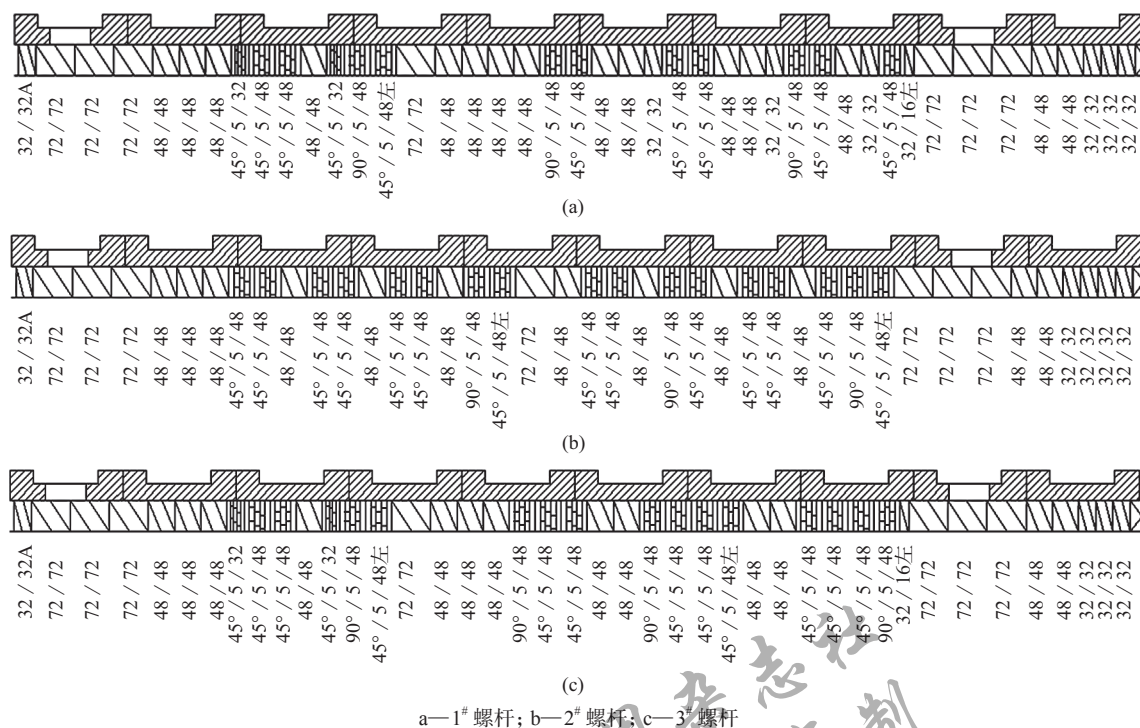


图6 螺杆组合结构示意图

在挤出温度 180℃、喂料量 60 kg/h,螺杆转速 500 r/min 条件下对比了上述 3 种螺杆组合加工生产的膨胀阻燃 PP 材料的综合性能,如表 3 所示。

表3 不同螺杆组合下膨胀阻燃PP材料的性能

项 目	螺杆组合		
	1 [#]	2 [#]	3 [#]
拉伸强度/MPa	18.6±0.1	19.6±0.1	18.5±0.2
断裂伸长率/%	25±2	45±2	5±3
弯曲强度/MPa	31.5±0.2	32.8±0.3	29.7±0.2
缺口冲击强度/(kJ·m ⁻²)	3.7±0.2	5.2±0.2	2.5±0.3
MFR/[g·(10 min) ⁻¹]	11.2	13.2	6.1
阻燃等级	V-0	V-0	
LOI/%	32	34	26

由表 3 可以发现,使用 2[#] 螺杆组合对材料进行加工时,膨胀阻燃 PP 材料的综合性能较另外两种螺杆组合更优,其中断裂伸长率和缺口冲击强度的提高幅度较为明显,分别比 1[#] 螺杆组合生产的材料提高了 80% 和 40.5%,而 MFR 和 LOI 也有所提升,说明与 1[#] 螺杆组合相比,2[#] 螺杆组合显著提升了膨胀阻燃剂在 PP 中的分散效果。使用 1[#] 弱剪切螺杆组合时,阻燃等级可以达到 UL 94 V-0 级,但其断裂伸长率和缺口冲击强度较低,说明其对阻燃剂的分散效果较差。使用 3[#] 集中强剪切螺杆生产时,由于剪切作用极强,而无卤膨胀阻燃剂的耐热性有限,易导致阻燃剂和 PP 的降解,生产时出现轻微发泡现象,因而材料的综合性能较差,尤其是断裂伸长率、缺口冲击强度及阻燃性能下降显著,可以得出结

论,3[#] 螺杆组合不适用于膨胀阻燃 PP 材料的生产。

图 7 为使用 1[#] 和 2[#] 螺杆组合加工生产的膨胀阻燃 PP 材料的试样表面形貌,3[#] 螺杆组合加工生产的试样由于出现轻微发泡现象,注塑外观较差,不进行比较。从图 7 可以看到,1[#] 螺杆组合的剪切分散能力过低,阻燃剂团聚现象较严重,注塑流动时阻力较大,在试样表面形成滞流造成外观缺陷,而对于 2[#] 螺杆组合,虽然从局部看,其剪切能力一般,但整体的剪切作用较强,这种组合既不会使阻燃剂发生分解,又能确保阻燃剂的分散比较均匀,注塑流动时不会出现外观缺陷。这说明,针对膨胀阻燃 PP 材料的特点,使用多段分散剪切的螺杆组合是比较理想的选择。

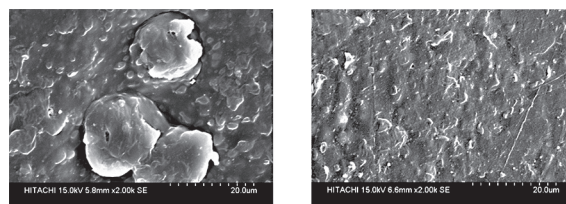


图7 不同螺杆组合下膨胀阻燃PP材料的表面形貌

3 结论

(1) 喂料量过大时会造成无卤膨胀阻燃剂在 PP 中的分散效果变差,使膨胀阻燃 PP 材料的性能下降,较理想的喂料量为 60 kg/h。

(2) 螺杆转速较低时阻燃剂分散不良,螺杆转速

过高时材料易发生降解,因此材料的断裂伸长率、缺口冲击强度和 LOI 随着转速提高呈现先增加后降低的趋势,适宜的螺杆转速为 500 r/min。

(3) 挤出温度过低或过高会造成材料性能尤其是韧性不佳,适宜的加工温度为 180~200℃。

(4) 使用弱剪切螺杆组合时阻燃剂在 PP 中的分散性较差,使用集中强剪切螺杆组合容易导致材料降解,采用多段分散剪切的螺杆组合时膨胀阻燃 PP 材料的综合性能较优。

参考文献

- [1] 刘源,曹新鑫,霍国洋,等.聚丙烯阻燃改性技术研究进展[J].工程塑料应用,2012,40(8):108-111.
Liu Yuan, Cao Xinxin, Huo Guoyang, et al. Research progress on flame retardant modification of polypropylene[J]. Engineering Plastics Application, 2012, 40(8):108-111.
- [2] 姜向新,陶四平,陆湛泉.四溴双酚 A 双(2,3-二溴丙基)醚阻燃 V-2 聚丙烯材料光稳定化研究[J].塑料,2012,41(2):67-69.
Jiang Xiangxin, Tao Siping, Lu Zhanquan. Light stabilization of tetrabromobisphenol A bis(2,3-dibromopropyl) ether flame retardant V-2 polypropylene[J]. Plastics, 2012, 41(2):67-69.
- [3] 王良民,李建业,王德强,等.磷溴协效阻燃剂的制备及其阻燃共聚聚丙烯的研究[J].山东化工,2015,44(18):13-15.
Wang Liangmin, Li Jianye, Wang Deqiang, et al. Novel phosphorous-bromine flame retardant system and its effects on flame retardancy of copolymerization polypropylene[J]. Shandong Chemical Industry, 2015, 44(18):13-15.
- [4] 王小芬,高山俊,王柱,等.新型磷氮溴复合阻燃剂的制备及其阻燃聚丙烯的研究[J].中国塑料,2014,28(3):93-96.
Wang Xiaofen, Gao Shanjun, Wang Zhu, et al. Synthesis of a new type of phosphorus and nitrogen compound bromide flame retardants and study on its flame retarded polypropylene[J]. China Plastics, 2014, 28(3):93-96.
- [5] 王剑峰. PP/无机阻燃剂复合材料的阻燃性能[J].塑料,2014,43(1):19-21,66.
Wang Jianfeng. Flame retardant performance of PP inorganic composite[J]. Plastics, 2014, 43(1):19-21, 66.
- [6] Feng Caimin, Zhang Yi, Liu Siwei, et al. Synthesis of novel triazine charring agent and its effect in intumescent flame-retardant polypropylene[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2012, 123(6):3 208-3 216.
- [7] 贺芳,孟征,孙兆懿,等.聚丙烯用化学膨胀型阻燃剂研究进展[J].工程塑料应用,2014,42(11):127-132.
He Fang, Meng Zheng, Sun Zhaoyi, et al. Advance in research of chemical intumescent flame retardants for polypropylene[J]. Engineering Plastics Application, 2014, 42(11):127-132.
- [8] 夏建盟,杨友强,姜向新.高效耐水无卤膨胀阻燃聚丙烯材料研究[J].塑料工业,2015,43(10):108-112.
Xia Jianmeng, Yang Youqiang, Jiang Xiangxin. Research on the efficiency and water resistance of halogen-free flame retardant polypropylene[J]. China Plastics Industry, 2015, 43(10):108-112.
- [9] Feng Caimin, Li Zongwen, Liang Minyi, et al. Preparation and characterization of a novel oligomeric charring agent and its application in halogen-free flame retardant polypropylene[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2015, 111:238-246.
- [10] 冯坤豪,吴樊,陈美玲,等.无卤膨胀阻燃聚丙烯的研究进展[J].中国塑料,2015,29(6):7-12.
Feng Kunhao, Wu Fan, Chen Meiling, et al. Research advance in halogen-free flame retardant polypropylene[J]. China Plastics, 2015, 29(6):7-12.
- [11] 王昊,金静.膨胀阻燃聚丙烯及其协同力学改性的研究进展[J].高分子通报,2015(7):17-24.
Wang Hao, Jin Jing. Research progress of intumescent flame retardant polypropylene and its mechanical modification[J]. Polymer Bulletin, 2015(7):17-24.
- [12] Wu Na, Yang Rongjie. Effects of metal oxides on intumescent flame-retardant polypropylene[J]. Polymers for Advanced Technologies, 2011, 22(5):495-501.
- [13] 刘猛,张芳华,王海增,等.硅镁复合氧化物对膨胀阻燃聚丙烯体系的协效作用[J].塑料,2016,45(1):56-59.
Liu Meng, Zhang Fanghua, Wang Haizeng, et al. Synergistic effects of magnesia-silica mixed oxides on intumescent flame retardant polypropylene[J]. Plastics, 2016, 45(1):56-59.
- [14] 于守武,肖淑娟,韩艳丽,等.协效剂在膨胀阻燃体系中的应用进展[J].塑料科技,2015,43(7):99-104.
Yu Shouwu, Xiao Shujuan, Han Yanli, et al. Application progress of synergistic agent in IFR system[J]. Plastics Science and Technology, 2015, 43(7):99-104.
- [15] 肖鹏,杨友强,姜向新,等.偶联剂表面改性对膨胀阻燃聚丙烯性能的影响[J].中国塑料,2016,30(10):25-31.
Xiao Peng, Yang Youqiang, Jiang Xiangxin, et al. Effect of surface modification with coupling agents on the properties of intumescent flame retardant polypropylene[J]. China Plastics, 2016, 30(10):25-31.
- [16] 尹昌宇,赖学军,张海丽,等.含磷钛酸酯偶联剂改性膨胀型阻燃剂及其阻燃聚丙烯的研究[J].塑料科技,2011,39(7):99-102.
Yin Changyu, Lai Xuejun, Zhang Haili, et al. Modification of intumescent flame retardant by phosphorus containing titanate coupling agent and its application in polypropylene[J]. Plastics Science and Technology, 2011, 39(7):99-102.
- [17] 刘平平,李方舟,于晓璐,等.磷-氮系膨胀阻燃剂阻燃聚丙烯耐水性能研究[J].橡塑技术与装备,2015(12):50-51.
Liu Pingping, Li Fangzhou, Yu Xiaolu, et al. Study of water resistance of phosphorus-nitrogen based expansion flame retardant polypropylene[J]. Plastics Technology And Equipment, 2015(12):50-51.
- [18] 王静,许苗军,李斌,等.不同粒径成炭剂阻燃聚丙烯体系的性能研究[J].塑料科技,2012,40(3):92-95.
Wang Jing, Xu Miaojun, Li Bin, et al. Study on properties of flame retardant pp system containing char-forming agent with different sizes[J]. Plastics Science and Technology, 2012, 40(3):92-95.