

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.08.014

转矩流变仪在阻燃PPE复合材料润滑体系筛选中的应用

戴韩潇¹, 刘兆真¹, 王家欣¹, 贾义军^{1,2}, 陈国军¹

(1. 宁波华腾首研新材料有限公司, 浙江宁波 315400; 2. 北京市化学工业研究院有限责任公司, 北京 100084)

摘要: 利用转矩流变仪的密炼机模块与双螺杆挤出模块, 对阻燃聚苯醚(PPE)复合材料的润滑体系进行了系统评估。深入探讨了不同种类的润滑剂及其添加量对复合材料加工性能、力学性能及阻燃性能的影响。研究表明, 转矩流变仪在配方设计中可快速且高效地筛选润滑体系; 在阻燃PPE复合材料配方体系所选择的5种润滑剂[季戊四醇硬脂酸酯(PETs)、褐煤酸钙盐、硬脂酸钙、褐煤酸钠盐、聚乙烯蜡]中, 热稳定性较高的润滑剂PETs效果最佳。当复合材料体系中PETs的添加量为0.9份时, 复合材料的综合性能最佳, 拉伸强度为71 MPa、弯曲强度为105 MPa、缺口冲击强度为24.6 kJ/m²、UL 94阻燃性能在0.8 mm下达到V-0级、灼热丝起燃温度达到775 °C, 可满足电子电器元件的安全应用要求。此外, 采用润滑剂PETs可显著改善复合材料的加工性能, 当PETs添加量为0.9份时, 挤出加工过程中的扭矩降低了6%, 能耗节省约4.2%。试验验证了转矩流变仪在PPE复合材料配方设计体系中, 润滑体系筛选的快速有效性, 并通过润滑剂添加量与加工能耗之间的关系, 确定PPE复合材料加工过程中能耗最低的润滑剂添加量。

关键词: 转矩流变仪; 聚苯醚; 润滑剂; 季戊四醇硬脂酸酯; 阻燃; 加工性能

中图分类号: TQ322.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)08-0107-07

Application of torque rheometer in screening lubrication systems for flame-retardant PPE composites

DAI Hanxiao¹, LIU Zhaozhen¹, WANG Jiaxin¹, JIA Yijun^{1,2}, CHEN Guojun¹

(1. Ningbo Huateng Shouyan New Material Co., Ltd., Ningbo 315400, China;

2. Beijing Institute of Chemical Industry Co., Ltd., Beijing 100084, China)

Abstract : The lubrication system of flame retardant polyphenylene ether (PPE) composites was systematically evaluated by using the mixer module and twin screw extrusion module of torque rheometer. The influence of various types of lubricants and their dosages on the processing performance, mechanical properties, and flame-retardant characteristics of the composites were thoroughly investigated. Results demonstrate that the torque rheometer can be screened quickly and efficiently lubrication systems in formulation design. Among the five lubricants including pentaerythrityl tetrastearate (PETs), calcium di(octacosanoate), calcium stearate, sodium octacosanoate, polyethylene wax in the flame-retardant PPE composite formulation system, PETs exhibits higher thermal stability performs optimally. When the addition level of PETs is 0.9 phr in the PPE composite system, the overall performance of the composite reaches its peak, with tensile strength of 71 MPa, flexural strength of 105 MPa, notched impact strength of 24.6 kJ/m², and flame-retardant properties meeting UL 94 V-0 at 0.8 mm thickness and the glow-wire ignition temperature of 775 °C, fulfilling the safety requirements for electronic and electrical components. Additionally, incorporating PETs significantly enhances the processability of the PPE composite. The torque during extrusion processing decreases by 6%, and energy consumption is reduced by approximately 4.2%. This experiment confirms the efficacy of the torque rheometer in rapidly screening lubrication systems for composite material formulation and determines the optimal dosage of the lubricant that minimizes energy consumption during processing based on the relationship between dosage and processing energy consumption.

Keywords : torque rheometer ; polyphenylene oxide ; lubricant ; pentaerythrityl tetrastearate ; flame-retardant ; processing performance

通信作者: 戴韩潇, 硕士研究生, 工程师, 研究方向为工程塑料改性与加工应用

收稿日期: 2025-06-06

引用格式: 戴韩潇, 刘兆真, 王家欣, 等. 转矩流变仪在阻燃PPE复合材料润滑体系筛选中的应用[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(8): 107-113.

DAI Hanxiao, LIU Zhaozhen, WANG Jiaxin, et al. Application of torque rheometer in screening lubrication systems for flame-retardant PPE composites[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(8): 107-113.

聚苯醚(PPE)是五大工程塑料之一,因具有良好的力学性能、电气性能、阻燃性、耐热性以及优异的尺寸稳定性和化学惰性,在汽车工业和电子电器领域得到广泛应用^[1-3]。然而,PPE分子链中大量苯环组成的刚性结构导致其具有缺口敏感性、抗冲击性能缺陷,并且纯PPE树脂还存在熔体黏度过高、不易加工成型的难题,显著限制了其工业化应用^[4-5]。为了改善PPE的加工与抗冲击性能,工业界普遍采用高抗冲聚苯乙烯(HIPS)与其进行共混改性^[6-7]。有研究发现,随着HIPS添加比例的提升,共混体系的力学强度呈现明显的下降趋势,并且由于PPE与聚苯乙烯(PS)热力学互溶,HIPS的加入还会导致共混体系的玻璃化转变温度降低,从而使材料耐热性下降^[8]。

Li等^[9]采用4,4'-二羟基二苯砜改善PPE的流动性,4,4'-二羟基二苯砜比聚苯乙烯更有效地降低了PPE熔体的黏度,但不降低PPE材料的刚度和耐热性。Wang等^[10]研究了邻苯二甲酸二烯丙酯(DAOP)预聚体作为反应型增塑剂对PPE加工性能的改善作用,研究发现,随着DAOP预聚物用量的增加,共混物的黏度逐渐降低,表明DAOP预聚物的加入有效地改善了共混物的加工性能。

关于润滑体系,特别是采用转矩流变仪评价PPE复合材料加工流动性改善的研究报道较少。笔者采用转矩流变仪作为核心表征手段,该设备通过实时监测加工过程中物料对转子或螺杆产生的反扭矩信号及熔体温度,可精确模拟实际加工条件并解析材料的流变特性^[11-12]。基于此实验设备,系统考察了不同润滑剂种类及其添加量对阻燃PPE复合材料共混体系的加工性能、力学性能及阻燃性能的影响,并探讨了其机理。最终通过转矩流变仪构建了快速进行润滑剂选择与用量优化的评价体系。本研究提出的实验方法,可为工程塑料改性领域的研究者提供一种快速筛选润滑剂的技术路径选择。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PPE树脂:LXR 040,南通星辰合成材料有限公司;

HIPS:PH-88,中国台湾奇美实业股份有限公司;

磷酸酯阻燃剂:PX-220,浙江万盛股份有限公司;

抗氧剂:1010,圣莱科特精细化工(上海)有限公司;

季戊四醇硬脂酸酯(PETs):发基化学品(张家港)有限公司;

褐煤酸钙盐:P12,德国布吕格曼化工有限公司;

硬脂酸钙(CaSt₂):一级品,市售;

褐煤酸钠盐:NAV 101,科莱恩化工(中国)有限公司;

聚乙烯蜡(PE-WAX):市售。

1.2 主要仪器及设备

同向平行双螺杆挤出机:ZSK-30,长径比为44,南京瑞亚挤出机械制造有限公司;

注塑机:UN90A5S-V,广东伊之密精密机械股份有限公司;

转矩流变仪-密炼机:HAAKE Rheomix OS,赛默飞世尔科技(中国)有限公司;

转矩流变仪-微型双螺杆挤出机:HAAKE Rheomex PTW16,赛默飞世尔科技(中国)有限公司;

熔体流动速率(MFR)仪:XNR-400AM,承德世鹏检测设备有限公司;

电子万能试验机:WDT-W-20A1,承德精密试验机有限公司;

电子式简支梁冲击试验机:JC-25D,承德精密试验机有限公司;

水平垂直燃烧试验仪:ZZZ-RS-HL,深圳市中子测控仪器有限公司;

灼热丝试验仪:ZRS-JT,上海竞田测试设备有限公司;

差示扫描量热(DSC)分析仪:DSC-60 Plus,日本岛津株式会社;

热重(TG)分析仪:TG-50,日本岛津株式会社。

1.3 试样制备

1.3.1 密炼样料的制备

根据表1所示配方比例称取物料,其中PPE与HIPS共100份,每组物料的总质量均为50 g,其中,0#为空白对照组,未添加润滑剂;1#至5#样品为添加不同种类润滑剂的复合材料。将6组干混料分别放入转矩流变仪进行密炼,观察转矩随时间的变化。密炼温度选定为280 °C,转子类型为Roller-Rotors R600,转子转速设定为40 r/min。

表1 添加不同润滑剂的阻燃PPE复合材料实验配方
Tab. 1 Experimental formula of flame-retardant PPE composites with different lubricants added

Samples	phr								
	PPE	HIPS	PX-220	1010	PETs	P12	CaSt ₂	NAV 101	PE-WAX
0 [#]	85	15	10	0.3					
1 [#]	85	15	10	0.3	1				
2 [#]	85	15	10	0.3		1			
3 [#]	85	15	10	0.3			1		
4 [#]	85	15	10	0.3				1	
5 [#]	85	15	10	0.3					1

1.3.2 转矩流变仪-微型双螺杆挤出机样料的制备

根据表2所示配方比例称取总质量3 kg的物料,其中0[#]为空白对照组,未添加润滑剂;6[#]至12[#]为添加不同种类润滑剂的复合材料。将8组干混料混合均匀后加到转矩流变仪-微型挤出机配备的失重称中,挤出机各温段设置为285℃,螺杆转速设置为250 r/min。

表2 不同PETs添加量的阻燃PPE复合材料实验配方
Tab. 2 Experimental formulations of flame-retardant PPE composites with different PETs addition amounts

Samples	phr				
	PPE	HIPS	PX-220	1010	PETs
0 [#]	85	15	10	0.3	
6 [#]	85	15	10	0.3	0.3
7 [#]	85	15	10	0.3	0.6
8 [#]	85	15	10	0.3	0.9
9 [#]	85	15	10	0.3	1.2
10 [#]	85	15	10	0.3	1.5
11 [#]	85	15	10	0.3	1.8
12 [#]	85	15	10	0.3	2.1

1.3.3 测试样条的制备

根据表1及表2的配方称取原料,混合均匀后加到双螺杆挤出机配备的失重称中,挤出机温度设置在285℃左右,螺杆转速设置为300 r/min。挤出料条经水冷、吹干和切粒后制得阻燃PPE复合材料。将阻燃PPE复合材料在120℃干燥箱中干燥4 h用于注塑。注塑机各温段设置在300℃,注塑压力5 MPa,注射速度50%,保压时间3 s。测试样条采用标准样条,状态调节和试验环境按GB/T 2918-2018进行测试,拉伸强度样条为GB/T 1040.2-2022的1A型试样(试样长度170 mm,窄部宽度10 mm,厚度4 mm),弯曲强度和缺口冲击强度测试的样条尺寸为80 mm×10 mm×4 mm,垂直燃烧测试的样条尺寸为125 mm×13 mm×(0.8~3.2) mm,灼热丝测试的样

条尺寸为60 mm×60 mm×2 mm,相对漏电起痕指数的样条为直径为80 mm、厚度为3 mm的圆片。

1.4 测试与表征

(1) TG测试。在氮气氛围中,以10℃/min的升温速率从室温(23℃)升至550℃,记录各润滑剂初始分解温度(T_d),即质量损失5%对应的温度。

(2) DSC测试。在氮气氛围中,以20℃/min的升温速率从室温升至300℃,停留5 min,再以10℃/min的降温速率降至30℃,最后以10℃/min的升温速率再次升至30℃。

(3)力学性能测试。拉伸强度按GB/T 1040.1-2022测试,拉伸速率为10 mm/min;弯曲强度按GB/T 9341-2008测试,加载速率为2 mm/min;缺口冲击强度按GB/T 1043.1-2008测试,摆锤能量为1 J;MFR按GB/T 3682.1-2018测试;垂直燃烧按GB/T 2408-2021测试;灼热丝试验按GB/T 5169.13-2024测试。

2 结果与讨论

2.1 润滑剂种类对阻燃PPE复合材料加工流变性能的影响

将配好的0[#]至5[#]复合材料加入密炼型转矩流变仪中,测试原料投入密炼机后,随着混炼时间的延长,物料经历塑化熔融过程。测试结果如图1所示。

由图1可见,流变曲线表现为扭矩值在加料阶段迅速形成峰值,随后进入动态塑化阶段扭矩呈指数衰减,最终趋于稳定,稳定阶段的扭矩可称为平衡扭矩。空白对照组0[#]的平衡扭矩为5.3 N·m,而添加不同润滑剂的1[#]至5[#]试样的平衡扭矩分别为3.6,2.4,3.2,4.2,1.4 N·m。根据流变学原理,平衡扭矩与熔体表观黏度呈正相关^[13],其中,以PE-WAX为润滑剂的5[#]试样的平衡扭矩最低,与对照组相比,降低了73.6%。说明PE-WAX的添加显著降低了熔体黏度;以NAV 101为润滑剂的3[#]试样的熔体流动性改善效果最弱。

对比图1各曲线发现,除了平衡扭矩的差异,各体系的扭矩波动幅度也存在显著差异。对照组0[#]的波动深度为0.5 N·m,而1[#]至5[#]试样的波动深度依次为0.2,1.2,0.6,0.6,0.4 N·m。波动深度与润滑剂和聚合物基体相容性呈密切相关,当润滑剂分子与树脂极性匹配时,可有效渗入高分子链间形成稳定润滑界面;反之,极性差异较大时,则会析出产生相分离导致扭矩剧烈振荡。从分子结构角度上分

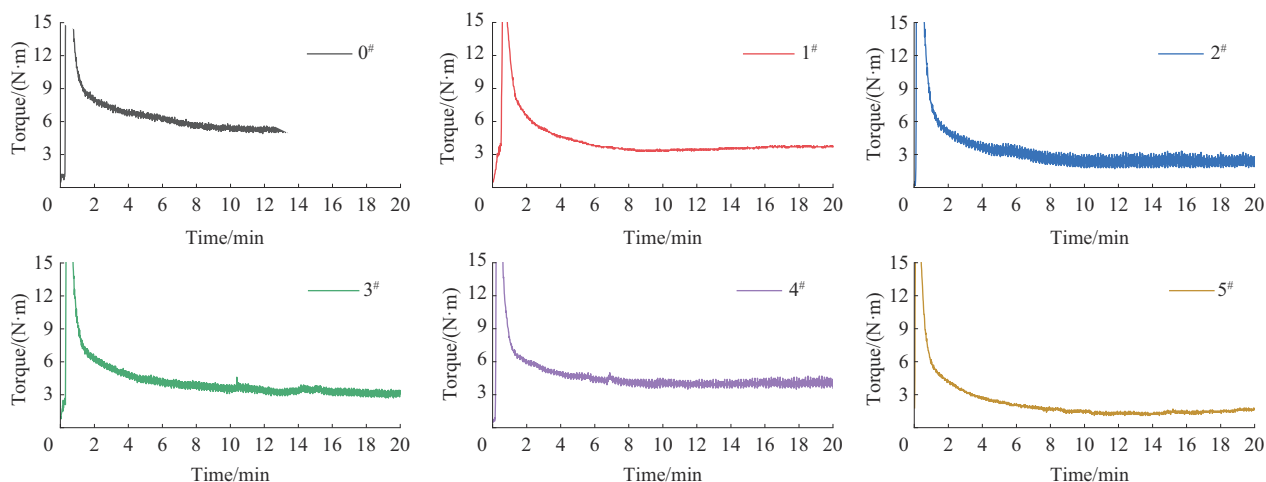


图1 不同润滑剂样品密炼过程中的时间-扭矩图

Fig. 1 Time-torque graphs of compounding process for different lubricant samples

析,PPE链结构对称,属弱极性聚合物,其溶解度参数 δ 为 $8.9 \text{ cal}^{1/2}/\text{cm}^{3/2}$ 。由Hildebrand溶度公式可算得,具有长烷基链结构PETs的 δ 为 $8.3 \text{ cal}^{1/2}/\text{cm}^{3/2}$,PE-WAX的 δ 为 $8.0 \text{ cal}^{1/2}/\text{cm}^{3/2}$,因它们的 δ 与PPE相近,所以与PPE基体产生良好相容性^[14]。相反,含金属离子的CaSt₂及磺酸盐类的NAV 101由于极性显著偏高,在非极性体系中易形成微区聚集,导致界面应力集中,从而导致发生扭矩波动异常的现象。该现象与Hansen溶解度理论预测结果一致,证实润滑剂选择需遵循极性相近原则^[15]。

此外,用TG分析仪对润滑剂的耐温性进行同步分析,探究不同润滑剂的热稳定性差异及其对加工过程的影响。TG分析结果如图2所示。

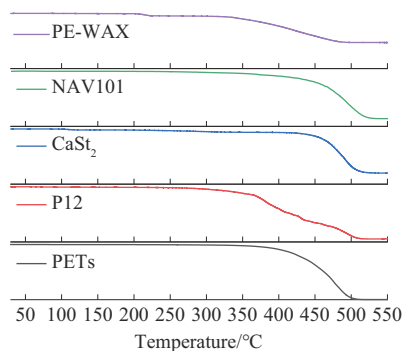


图2 五种润滑剂的TG曲线

Fig. 2 TG curves of five types of lubricants

从图2可看出,PETs,P12,CaSt₂,NAV 101和PE-WAX的 T_d 分别为383.3,308.1,310.2,365.8,305.1℃。密炼温度设定在280℃,但在密炼和双螺杆挤出加工中,内部熔体在不断剪切中温度会进一步升高,最高温度超过300℃。在此条件下,由于PE-WAX,P12和CaSt₂的 T_d 与熔体温度差值过小,易

在密炼过程中发生热降解。这也与密炼实验结果相对应。PE-WAX体系平衡扭矩异常偏低,推测这可能是其烷烃链段断裂生成低分子量组分所致;CaSt₂,P12和NAV 101同属金属皂类润滑剂,因CaSt₂和P12的 T_d 远低于NAV 101,其热分解程度较NAV 101显著增强,热分解产生的小分子起到了降低熔体黏度的作用,导致平衡扭矩低于预期。结合复合材料制造的加工工况,阻燃PPE复合材料在共挤出过程中,各温段的加工温度均在285℃左右,且螺杆转速较密炼更高,内部剪切更强,导致熔体温度最高会超过310℃,热分解温度较低的润滑剂易在加工过程中发生分解。经综合比较,PETs的 T_d 远高于加工时的熔体温度,热稳定性最佳,且改善熔体流动性的效果较好,是最适合阻燃PPE复合材料体系的润滑剂。

2.2 润滑剂种类对阻燃PPE复合材料力学和阻燃性能的影响

在评价转矩流变加工性能的影响后,进一步考察了润滑剂对阻燃PPE复合材料力学和阻燃性能的影响,结果见表3。

根据表3所呈现的实验数据可见,在力学性能方面,相较于未添加润滑剂的空白对照组0#,引入PETs的材料在拉伸强度和弯曲强度上变化不显著,而缺口冲击强度却有显著提升,从 19.8 kJ/m^2 增至 22.7 kJ/m^2 。推测此现象可能归因于PETs的分子间润滑作用促进了HIPS在基体树脂中的均匀分散。而其他润滑剂的引入则导致了不同程度的性能降低,这可能是因为润滑剂与树脂的相容性不佳,以及在加工过程中润滑剂的分解引起样条内部形成

表3 不同润滑剂对阻燃PPE复合材料性能的影响

Tab. 3 Effects of different lubricants on properties of flame-retardant PPE composites

Samples	Tensile strength/ MPa	Bending strength/ MPa	Notched impact strength/ (kJ·m ⁻²)	MFR/ [g·(10 min) ⁻¹]	UL 94	GWIT/°C
0 [#]	71	103	19.8	19.6	0.8 mm V-0	775
1 [#]	71	103	22.7	24.9	0.8 mm V-0	775
2 [#]	68	101	21.2	25.9	0.8 mm V-0	775
3 [#]	68	101	17.5	26.1	0.8 mm V-0	775
4 [#]	69	101	17.7	22.3	0.8 mm V-0	775
5 [#]	68	100	17.2	36.2	1.6 mm V-0	750

Note: GWIT is glow-wire ignition temperature.

缺陷所致。试样2[#],4[#]和5[#]的MFR相对较高,间接证实了材料内部的润滑剂发生了部分分解。

在阻燃性能方面,除添加PE-WAX的5[#]试样外,UL 94垂直燃烧等级和灼热丝起燃温度(GWIT)均未受到其他润滑剂添加的影响。PE-WAX导致UL 94垂直燃烧等级下降,这可能是由于样条燃烧时产生的高温导致样条熔化,而PE-WAX较低的分解温度,进一步降低了熔体强度,导致样条发生燃烧滴落。PE-WAX导致材料GWIT下降的原因,推测是其热解产生的小分子烷烃类气体降低了分解产物混合体系的点燃阈值。综合考量后,具有高热稳定性并且与PPE树脂基体有良好相容性,对材料综合性能无负面影响的PETs,对于阻燃PPE复合材料而言,是最佳的润滑剂选择。

2.3 PETs添加量对阻燃PPE复合材料加工性能的影响

在确定将润滑剂PETs应用于阻燃PPE复合材料体系后,进一步探讨了润滑剂PETs添加量对阻燃PPE复合材料加工流变特性的影响规律。首先利用转矩流变仪的双螺杆挤出模块进行实验室规模的双螺杆挤出实验,通过实时监测系统采集加工过程中的扭矩动态数据,结果如图3所示。

由图3可见,尽管由于物料输送的间歇性及组分分布的微观不均匀性导致扭矩曲线呈现随机波动,但依然可以观察到明显的变化趋势,当PETs添加量从0份逐步提升至2.1份时,体系扭矩值呈现单调递减趋势。为定量表征润滑剂添加量对加工性能的影响,对各配方体系的平均扭矩值进行统计分析。未添加润滑剂的0[#]试样的平均扭矩为129.9 N·m,而PETs添加量递增的6[#]至12[#]试样平均扭矩依次为128.3, 126.2, 124.4, 122.2, 120.1, 117.2, 114.8 N·m。经线性回归分析表明,每增加0.3份PETs,体系扭矩平均下降1.66%($R^2=0.99$),呈现出比较明显的线性关系。

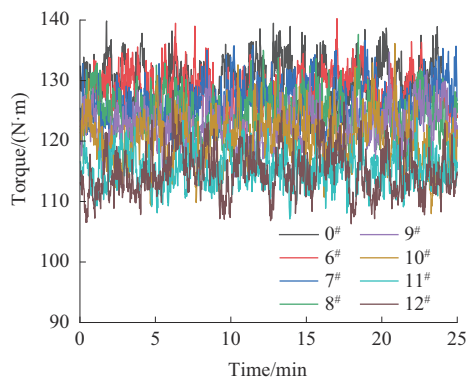


图3 不同PETs添加量下阻燃PPE复合材料挤出过程中的时间-扭矩图

Fig. 3 Time-torque diagrams of flame retardant PPE composites with different PETs content during extrusion process

为验证实验室尺度下实验结果的有效性,采用工业生产双螺杆挤出机进行中试放大试验。该设备扭矩数据通过主机电流的形式呈现且无法直接导出,故采用间隔采样法记录电流波动数据,采样间隔为1 min。不同PETs添加量下挤出过程中的电流数据如图4所示。由图4可见,工业级设备因下料控制不如实验设备精密,扭矩波动幅度进一步加剧,但整体变化趋势与实验室数据高度吻合。特别值得注意的是,PETs添加量每提升0.3份,工业设备

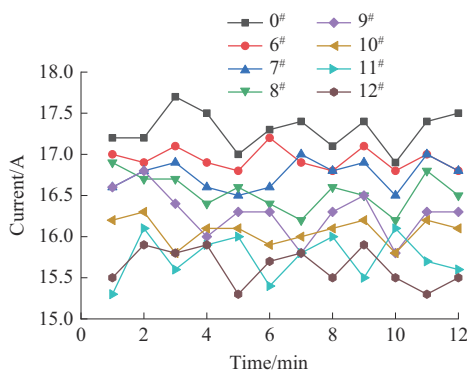


图4 不同PETs添加量下阻燃PPE复合材料挤出过程中挤出机的时间-电流图

Fig. 4 Time-current diagrams of extruder during extrusion process of flame retardant PPE composites with different PETs content

电流强度相应降低约 1.40%,与实验室 1.66%的降幅相比具有较好的一致性。

从能耗优化角度分析,在改性高分子材料加工过程中,挤出工序机械能耗占总能耗的 62%~75%^[16]。实验结果表明,当 PETs 添加量达到 2.1 份时,体系加工扭矩较基准组降低 10.5%,据此推算单位产量能耗可减少约 7.4%。这有助于控制生产成

本并对实现绿色制造目标具有重要工程实践价值。

2.4 PETs 添加量对阻燃 PPE 复合材料综合性能的影响

确定了 PETs 添加量对阻燃 PPE 复合材料加工性能的影响后,进一步考量了 PETs 添加量对于阻燃 PPE 复合材料力学以及阻燃性能的影响以筛选出合适的添加量。结果见表 4。

表 4 PETs 添加量对阻燃 PPE 复合材料性能的影响

Tab. 4 Effects of PETs addition on properties of flame-retardant PPE composites

Samples	Tensile strength/MPa	Bending strength/MPa	Notch impact strength/ (kJ·m ⁻²)	MFR/ [g·(10 min) ⁻¹]	UL 94	GWIT/°C
0 [#]	71	103	19.8	18.6	0.8 mm V-0	775
6 [#]	71	103	20.2	22.7	0.8 mm V-0	775
7 [#]	71	106	22.2	24.3	0.8 mm V-0	775
8 [#]	71	105	24.6	26.1	0.8 mm V-0	775
9 [#]	69	103	22.4	27.8	1.6 mm V-0	775
10 [#]	69	102	20.4	29.3	1.6 mm V-0	775
11 [#]	69	101	18.9	30.1	1.6 mm V-0	775
12 [#]	68	98	18.1	31.2	1.6 mm V-0	775

由表 4 可见,在力学性能方面,随着 PETs 添加量的逐步增加,阻燃 PPE 复合材料整体性能表现出先提升后降低的趋势。当 PETs 添加量为 0.6 份时,阻燃 PPE 复合材料的弯曲强度达到峰值,为 106 MPa。然而,当 PETs 添加量增至 0.9 份时,阻燃 PPE 复合材料的弯曲强度略有下降,但缺口冲击强度达到最优值,为 24.6 kJ/m²。随后,随着 PETs 添加量的进一步增加,阻燃 PPE 复合材料的拉伸强度、弯曲强度以及缺口冲击强度均出现下降趋势。这可能是因为,在较低添加量时,PETs 能够在基体树脂分子链间均匀分散,发挥良好的内润滑作用,促进树脂基体与 HIPS 的混合均匀性。然而,当 PETs 过量添加后,分子链间过量的 PETs 小分子反而削弱了树脂分子链间的相互作用,导致阻燃 PPE 复合材料的结构变得松散,从而引起力学性能的下降^[17]。对 0[#],8[#]和 12[#]这三个样品进行了 DSC 表征,阻燃 PPE 复合材料的熔融吸热曲线如图 5 所示,未添加 PETs 的 0[#]试样的玻璃化温度(T_g)为 155.25 °C,添加 0.9 份 PETs 的 8[#]试样

的 T_g 为 154.35 °C,添加 2.1 份 PETs 的 12[#]试样的 T_g 为 151.24 °C。可以看出随着 PETs 添加量的增加,阻燃 PPE 复合材料的 T_g 发生了下降,而 T_g 反映了高分子链段的运动能力,这表明 PETs 确实起到了分子间润滑的作用,加强了链段的运动能力。

在阻燃性能方面,PETs 添加量较低时对阻燃 PPE 复合材料的阻燃性能基本无影响。当 PETs 添加量超过一定量后,阻燃 PPE 复合材料的阻燃性能出现下降,UL 94 垂直燃烧测试等级从 0.8 mm V-0 降至 1.6 mm V-0。这可能是由于样条燃烧时产生的高温导致材料熔融,而润滑剂的过量添加降低了熔体的黏度和强度,导致材料在垂直燃烧测试中发生滴落,无法满足 V-0 阻燃标准。在 GWIT 方面,随着 PETs 添加量的增加,样品的 GWIT 未出现下降,表明 PETs 的添加不会影响阻燃 PPE 复合材料在电子电器领域的应用。经综合考量,当 PETs 添加量为 0.9 份时,复合材料的综合性能最佳。在此添加量下,挤出加工过程中的扭矩下降 6%,大约可节省 4.2% 的能耗。

3 结论

(1)利用转矩流变仪的密炼机模块,可实现对润滑体系的高效筛选。通过分析密炼过程中扭矩的大小及其波动深度,可对润滑剂的润滑效能及其与基体树脂的相容性进行评估。

(2)在阻燃 PPE 复合材料的研究中,PETs 作为润滑剂表现出最优的综合性能。随着 PETs 添加量的

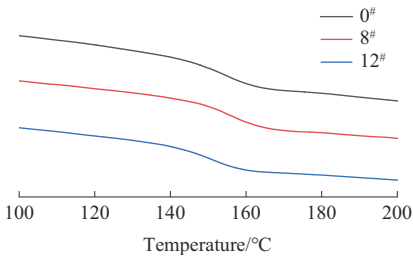


图 5 0[#],8[#]和 12[#]试样的 DSC 熔融吸热曲线

Fig. 5 DSC melting heat absorption curve of 0[#],8[#] and 12[#]

增加,阻燃PPE复合材料的力学性能呈现先上升后下降的趋势,而阻燃性能则基本保持不变。当PETs的添加量达到0.9份时,阻燃PPE复合材料在力学性能、阻燃性能及加工性方面均达到最佳平衡。

(3)转矩流变仪-微型双螺杆挤出模块的应用,为实际生产过程提供了指导。通过监测加工过程中的扭矩变化,可以迅速而准确地建立润滑剂添加量与加工能耗之间的相关性。研究结果表明,适量使用润滑剂能够在不损害材料综合性能的前提下,有效降低加工能耗,实现节能、环保以及降低生产成本的目标。

参考文献

- [1] LEE S L, KIM B J, LEE S B. Physical properties of modified polyphenylene oxide as a composite material for hydrogen fuel cell stack enclosure suitable for injection molding[J]. *Machines*, 2022, 10(8). DOI:10.3390/machines10080625.
- [2] LIAO L Y, RUAN W H, ZHANG M Q, et al. Improving the dimensional stability of polyphenylene oxide without reducing its dielectric properties for high-frequency communication applications[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2023, 62(18):7 007–7 016.
- [3] 卢翔, 曾鸣, 谭登儒, 等. 面向超高频通信应用的低介电聚苯醚树脂的研究进展[J]. *绝缘材料*, 2022, 55(5):10–18.
LU Xiang, ZENG Ming, TAN Dengru, et al. Research progress in low dielectric polyphenylene oxide for super high-frequency communication applications[J]. *Insulating Materials*, 2022, 55(5): 10–18.
- [4] HADIMANI P, NARASIMHA MURTHY H N, MUDBIDRE R. Processing and characterization of polyphenylene ether/polystyrene/nylon-6 ternary blends[J]. *International Polymer Processing*, 2020, 35(2):169–183.
- [5] 曹国政, 周文英, 李婷, 等. 改性聚苯醚树脂研究进展[J]. *现代塑料加工应用*, 2021, 33(3):60–63.
CAO Guozheng, ZHOU Wenying, LI Ting, et al. Research progress on modified polyphenylene ether resin[J]. *Modern Plastics Processing and Applications*, 2021, 33(3):60–63.
- [6] 赵今, 李迎春, 王文生, 等. SBG增容rPS-HI/PPE共混体系结构与性能[J]. *工程塑料应用*, 2022, 50(2):39–44.
ZHAO Jin, LI Yingchun, WANG Wensheng, et al. Structure and properties of SBG compatibilized rPS-HI/PPE blended system[J]. *Engineering Plastics Application*, 2022, 50(2):39–44.
- [7] LI Y C, WANG F, REN J N, et al. Mechanical properties and deformation mechanism of bimodal-rubber-particle-toughened polyphenylene ether/polystyrene blends[J]. *ACS Applied Polymer Materials*, 2022, 4(12):9 085–9 094.
- [8] 何志帅, 郭墨林, 钟一平, 等. 聚苯乙烯对聚苯醚/聚丙烯合金性能影响研究[J]. *广州化工*, 2023, 51(15):47–49.
HE Zhishuai, GUO Molin, ZHONG Yiping, et al. Effects of polystyrene on dispersion and the properties of polyphenylene ether/polypropylene alloys[J]. *Guangzhou Chemical Industry*, 2023, 51(15):47–49.
- [9] LI J X, CHAN C M. Phase structure and mechanical properties of modified poly(phenylene oxide) with high fluidity[J]. *Polymers for Advanced Technologies*, 2012, 23(4):803–809.
- [10] WANG H H, MEI Q L, DING Y J, et al. Improved processing and properties for polyphenylene oxide modified by diallyl orthophthalate prepolymer[J]. *Polymers*, 2019, 11(12). DOI: 10.3390/polym11122016.
- [11] 李海敏, 霍燕. 哈克转矩流变仪及其应用[J]. *中国氯碱*, 2012(9): 26–27.
LI Haimin, HUO Yan. HAAKE torque rheometer and application [J]. *China Chlor-Alkali*, 2012(9):26–27.
- [12] SHUBBAR S D A, DHIAA A H, EGZAR H K. Investigating the role of different stabilizers of PVCs by using a torque rheometer [J]. *Open Engineering*, 2023, 13. DOI:10.1515/eng-2022-0423.
- [13] ABEYKOON C, PÉREZ P, KELLY A L. The effect of materials' rheology on process energy consumption and melt thermal quality in polymer extrusion[J]. *Polymer Engineering & Science*, 2020, 60(6):1 244–1 265.
- [14] SEYMOUR R B, SOSA J M. Estimation of solubility parameters of nonelectrolytes[J]. *Nature*, 1974, 248(5451):759–761.
- [15] 邓蕾, 张炜, 鲍桐, 等. PBT与含能增塑剂相互作用的分子动力学模拟[J]. *含能材料*, 2017, 25(1):32–38.
DENG Lei, ZHANG Wei, BAO Tong, et al. Molecular dynamics simulation of interaction between PBT and energetic plasticizer [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2017, 25(1):32–38.
- [16] 章建忠, 许升, 樊家谢, 等. 润滑剂对短切玻璃纤维及其增强PBT性能的影响[J]. *工程塑料应用*, 2022, 50(6):154–158.
ZHANG Jianzhong, XU Sheng, FAN Jiashu, et al. Study of lubricant on the properties of chopped glass fiber and its reinforced PBT composites[J]. *Engineering Plastics Application*, 2022, 50(6): 154–158.
- [17] ABEYKOON C, MCMILLAN A, NGUYEN B K. Energy efficiency in extrusion-related polymer processing: A review of state of the art and potential efficiency improvements[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 147. DOI: 10.1016/j.rser.2021.111219.