

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.05.009

对苯二酚双(二苯基磷酸酯)/勃姆石复配阻燃PC/ABS合金

李湘, 谢桂容, 胡彩玲

(湖南化工职业技术学院, 湖南株洲 412000)

摘要: 以对苯二酚双(二苯基磷酸酯)(HDP)为阻燃剂, 勃姆石(BM)为阻燃协效剂, 通过熔融共混制备聚碳酸酯(PC)/丙烯腈-丁二烯-苯乙烯塑料(ABS)/HDP/BM复合材料, 利用水平垂直燃烧试验仪、锥形量热仪、热重分析仪、氧指数仪、热变形温度测定仪和万能材料试验机等, 对复合材料的阻燃性能、热性能和力学性能进行分析, 结果表明: HDP可以有效阻燃PC/ABS, 但会对PC/ABS的力学性能和负荷热变形温度(HDT)产生负面影响; 在PC/ABS加入10%的HDP, PC/ABS/10-HDP(HDP质量分数为10%)复合材料的极限氧指数(LOI)值为27.8%, 阻燃达到UL 94 V-0级(3.2 mm), 拉伸强度、弯曲强度、弯曲模量、悬臂梁缺口冲击强度和HDT相对PC/ABS分别下降了20.5%, 15.0%, 12.2%, 41.2%和15.9℃; 随着BM添加量的增大, PC/ABS/10-HDP/BM复合材料的阻燃性能先变好后变差, 热性能逐渐变好, 且BM可以改善复合材料的力学性能; 在PC/ABS/10-HDP中加入5%的BM, PC/ABS/10-HDP/5-BM复合材料的LOI值为32.1%, 阻燃达到UL 94 V-0级(1.6 mm), 相对PC/ABS/10-HDP, 其拉伸强度、弯曲强度、弯曲模量、HDT、点燃时间和火灾性能指数分别提高19.3%, 13.9%, 10.2%, 5℃, 6 s和50.0%, 热释放速率峰值、总热释放量和总烟释放量分别下降21.1%, 22.9%和35.0%; HDP在PC/ABS中有增塑效果, PC/ABS/10-HDP复合材料的熔体质量流动速率相对PC/ABS上升了10.67 g/10 min。

关键词: 对苯二酚双(二苯基磷酸酯); 勃姆石; 聚碳酸酯/丙烯腈-丁二烯-苯乙烯塑料; 阻燃性能; 力学性能

中图分类号: TQ322.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)05-0063-06

HDP/BM compound flame-retardant PC/ABS alloy

LI Xiang, XIE Guirong, HU Cailing

(Hunan Chemical Vocational Technology College, Zhuzhou 412000, China)

Abstract : Using hydroquinone bis(diphenyl phosphate)(HDP) as flame retardant and boehmite(BM) as flame-retardant synergist, polycarbonate/acrylonitrile-butadiene-styrene(PC/ABS)/HDP/BM composites were prepared via melt blending. The flame retardancy, thermal properties, and mechanical properties of the composites were analyzed using horizontal-vertical burning testers, cone calorimeters, thermogravimetric analyzers, oxygen index testers, heat deflection temperature testers, and universal material testing machines. The results indicate that HDP effectively improve the flame retardancy of PC/ABS but negatively impacts its mechanical properties and heat deflection temperature(HDT). For PC/ABS containing 10%HDP(PC/ABS/10-HDP), the LOI reaches 27.8%, flame retardant up to UL 94 V-0 grade(3.2 mm), while the tensile strength, flexural strength, flexural modulus, notched Izod impact strength, and HDT decreased by 20.5%, 15.0%, 12.2%, 41.2%, and 15.9℃, respectively, compared to pure PC/ABS. With increasing BM content, the flame retardancy of PC/ABS/10-HDP/BM composites initially is improved and then deteriorated, while thermal properties gradually enhanced, and BM improve the mechanical properties of composites. For PC/ABS/10-HDP with 5% BM (PC/ABS/10-HDP/5-BM), the LOI increase to 32.1%, flame retardant up to UL 94 V-0 grade(1.6 mm). Compared to PC/ABS/10-HDP, its tensile strength, flexural strength, flexural modulus, HDT, time to ignition, and fire performance index are increased by 19.3%, 13.9%, 10.2%, 5℃, 6 s, and 50.0%, respectively, while peak heat release rate, total heat release, and total smoke release decreased by 21.1%, 22.9%, and 35.0%, respectively. HDP exhibits plasticizing effect in PC/ABS, with the melt mass flow rate of PC/ABS/10-HDP increased by 10.67 g/10 min compared to pure PC/ABS.

Keywords : hydroquinone bis(diphenyl phosphate) ; boehmite ; PC/ABS ; flame retardant property ; mechanical property

基金项目: 湖南省教育厅资助科研项目(23B0965)

通信作者: 李湘, 副教授, 研究方向为废塑料的循环利用、改性塑料、木塑复合材料

收稿日期: 2025-03-07

引用格式: 李湘, 谢桂容, 胡彩玲. 对苯二酚双(二苯基磷酸酯)/勃姆石复配阻燃PC/ABS合金[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(5): 63-68.

LI Xiang, XIE Guirong, HU Cailing. HDP/BM compound flame-retardant PC/ABS alloy[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(5): 63-68.

聚碳酸酯/丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物(PC/ABS)合金因其高光泽、高刚性、高韧性、易加工性和易染色性等优良特性,被广泛应用于玩具、电子电器、家电以及汽车工业等领域^[1-2]。然而,PC/ABS的阻燃性能较差,限制了其在某些对防火性能有更高要求的场景中的应用。因此,如何提升PC/ABS的阻燃性能,以进一步拓展其应用范围,一直是材料科学领域的研究热点,也取得了一些成果^[3],如:李湘等^[4]将蛭石和倍半硅氧烷添加到PC/ABS中,发现倍半硅氧烷可以有效阻燃PC/ABS,蛭石和倍半硅氧烷在PC/ABS中有协同阻燃效果;刘海路等^[5]将梯形倍半硅氧烷和海泡石添加到PC/ABS中,有效提高了PC/ABS的阻燃性。

卤素类阻燃物质在热解过程中可能产生次生污染物,对生态系统和公共卫生构成威胁,其使用逐渐受到限制。相比之下,无卤阻燃剂因其环保性和低毒性,成为研究和应用的主流方向。对于PC/ABS,常用的无卤阻燃剂包括硅系^[6]、有机磷系^[7]、硼系^[8]等。其中,有机磷系阻燃剂在PC/ABS中的阻燃效果最为显著,能够实现薄壁阻燃,但其缺点在于会降低复合材料的力学性能^[9],尤其是强度和刚性。对苯二酚双(二苯基磷酸酯)(HDP)是一种含磷量高于磷酸三苯酯(TPP)的有机磷系阻燃剂,如果能降低HDP对PC/ABS力学性能的负面影响,其将是有效的PC/ABS无卤阻燃剂。作为铝矾土矿床中典型存在的 γ 相羟基氧化铝,勃姆石(BM)在矿物学领域被界定为具有特殊短棒状结构的铝质氢氧化物,经常用作阻燃剂使用^[10-11],既可以提高聚合物的阻燃性还能改善聚合物的力学性能^[12],如:LI^[13]通过熔融共混把BM和三聚氰胺氰尿酸盐(MCA)添加到PA6中,发现在保持BM分散性好的情况下,BM可以有效提高PA6/MCA的阻燃性、强度和刚性。因此,笔者通过熔融共混在PC/ABS中添加HDP和BM,制备了系列PC/ABS/HDP/BM复合材料,探讨HDP对PC/ABS、BM对PC/ABS/HDP复合材料阻燃性、热性能和力学性能的影响。

1 实验部分

1.1 主要原材料和助剂

PC:1609T,鲁西化工集团股份有限公司;

ABS:PA757,中国台湾奇美实业股份有限公司;

BM:有效物质质量分数为99.5%,上海亚国化

工有限责任公司;

抗滴落剂:SN 3300,广州熵能聚合物技术有限公司;

甲基丙烯酸甲酯-丁二烯-苯乙烯三元共聚物(MBS):EM500,韩国LG化学有限公司;

对苯二酚双(二苯基磷酸酯)(HDP):PX 220,浙江万盛股份有限公司;

其它助剂:自行配制。

1.2 主要仪器和设备

双螺杆挤出机:AK36,南京科亚化工成套装备有限公司;

注塑机:UN90SK,广东伊之密机械股份有限公司;

极限氧指数(LOI)测定仪:HC-2C,南京上元分析仪器有限公司;

水平垂直燃烧试验仪:HVR-4,广州市新纳电子设备有限公司;

热重(TG)分析仪:TAQ50,美国TA仪器公司;

双柜型锥形量热仪:4100,英国Testing Technology Limited公司;

热变形(维卡软化点)温度(HDT)测定仪:HDT/V-3116,承德市金建检测仪器有限公司;

液晶式塑料摆锤冲击试验机:ZBC1400B,上海美特斯工业系统有限公司;

万能材料试验机:CT-TCS-2000,中国台湾高铁科技股份有限公司;

熔体流动速率(MFR)试验机:ZRZ1452,上海美特斯工业系统有限公司。

1.3 PC/ABS/HDP/BM复合材料的制备

按表1中的质量比把材料置于混合搅拌机中进行混合,然后在双螺杆挤出机上进行熔融共混、冷却切粒,挤出温度为:220~240℃,主机转速400 r/min。造粒后的粒子经注塑机制备成测试样条,注塑温度为:230~245℃。

1.4 性能测试

按ISO 11358-1:2014分析材料的热失重情况,升温速率10℃/min,空气氛围;

按UL 94-2008测试样品的燃烧性能,样品尺寸为128 mm×12.8 mm×3.2 mm、128 mm×12.8 mm×2.0 mm、128 mm×12.8 mm×1.6 mm;

按ISO 5660-1:2015进行锥形量热仪测试,热辐射功率为50 kw/m²,样品尺寸为100 mm×100 mm×

表1 不同试样的组成
Tab. 1 Formulation of different samples

Sample	phr						
	PC	ABS	HDP	BM	EM500	SN3300	Others
PC/ABS	84.2	12				0.3	1.5
PC/ABS/10-HDP	74.2	12	10		2	0.3	1.5
PC/ABS/10-HDP/2-BM	72.2	12	10	2	2	0.3	1.5
PC/ABS/10-HDP/4-BM	70.2	12	10	4	2	0.3	1.5
PC/ABS/10-HDP/5-BM	69.2	12	10	5	2	0.3	1.5
PC/ABS/10-HDP/7-BM	67.2	12	10	7	2	0.3	1.5

3.0 mm;

按 GB/T2406-2008 测定 LOI,样品尺寸为 150 mm×12.8 mm×3.0 mm;

按 GB/T 1040.1-2018 测试复合材料的拉伸性能,试样为 1A 型,拉伸速率 5 mm/min;

按 GB/T 9341-2008 测试复合材料的弯曲性能,试样尺寸为 80 mm×10 mm×4.0 mm,弯曲速率 2 mm/min;

按 GB/T 1843-2008 测试复合材料的缺口冲击性能,摆锤能量 5.5 J,缺口为 A 型,冲击速度 3.5 m/s;

按 GB/T 1634.2-2019 测试复合材料的 HDT,负荷为 1.80 MPa;

按 GB/T 3682.1-2018 测试复合材料的 MFR,温度为 260 ℃,负荷为 2.16 kg。

2 结果与讨论

2.1 HDP 和 BM 对 PC/ABS 阻燃性能的影响

表 2 为 PC/ABS/HDP/BM 复合材料的 LOI 值和 UL94 测试结果。由表 2 可知,在 PC/ABS 中加入 10% 的 HDP,PC/ABS/10-HDP 的阻燃达到 UL 94 V-0(3.2 mm)级,LOI 值为 27.8%,相对 PC/ABS (22.5%)提高了 5.3%,这是因为 HDP 作为一种有机磷系阻燃剂,其阻燃机制主要源于其热分解特性。一方面,在受热过程中,HDP 能够生成一种酸性极强的磷含氧酸。这种黏稠状液体本身不具可燃性,可在材料表面形成液态膜,有效隔绝热量、氧气及可燃性气体,同时促使含羟基有机物脱水生成炭化层,从而增强材料在凝聚相中的阻燃性能^[14-15]。另一方面,HDP 分解产生的 PO·自由基可捕捉聚合物燃烧过程中生成的活性 H·和 HO·自由基,抑制自由基链式反应的传播^[7,9],进而降低燃烧速率。

在 PC/ABS/10-HDP 中加入 BM,随着 BM 添加量的增大,PC/ABS/10-HDP/BM 的阻燃性能呈现出先上升后下降的现象,当 BM 的添加质量分数为 5% 时,PC/ABS/10-HDP/5-BM 的 LOI 值为 32.1%,阻燃

表2 PC/ABS/HDP/BM复合材料的LOI和UL 94测试结果
Tab. 2 LOI and UL 94 test results of PC/ABS/HDP/BM composites

Sample	UL 94			LOI/%
	3.2 mm	2.0 mm	1.6 mm	
PC/ABS	—	—	—	22.5
PC/ABS/10-HDP	V-0	—	—	27.8
PC/ABS/10-HDP/2-BM	V-0	V-1	—	29.1
PC/ABS/10-HDP/4-BM	V-0	V-0	V-0	31.5
PC/ABS/10-HDP/5-BM	V-0	V-0	V-0	32.1
PC/ABS/10-HDP/7-BM	V-0	V-0	V-2	30.6

Note: "—" indicates that the minimum level of this test has not been reached.

满足 UL 94 标准中 1.6 mm 厚度 V-0 级要求,这是因为 BM 在受热过程中分解生成 Al₂O₃ 和水,一方面,Al₂O₃ 能够在材料表面形成覆盖层,增强液态膜和炭层的硬度与致密性,从而更有效地阻隔热量、氧气和可燃性气体;另一方面,生成的水在吸热后蒸发为水蒸气,可稀释氧气和可燃性气体浓度;低添加量的 BM 可以均匀分散在复合材料中,生成的 Al₂O₃ 覆盖面大,上述效果(隔热、氧和可燃性气体)好,复合材料阻燃性提高,而高添加量的 BM 在复合材料中团聚,Al₂O₃ 的覆盖面相对减小,上述效果相对下降,复合材料阻燃性相对降低。

由图1、图2和表3可以看出,相对PC/ABS,PC/ABS/10-HDP的热释放速率峰值(PHRR)为362.7 kW/m²、总热释放量(THR)为62.9 MJ/m²和总烟释放量(TSR)为1 427.7 m³/m²,分别降低了29.8%,28.3%和26.9%,火灾性能指数(FPI)为0.12 (s·m²)/kW,提高了33.3%,这说明HDP分解所形成的酸性液态膜和PO·自由基,能够有效阻隔热、氧及可燃性气体的传递,并显著抑制自由基链式反应的进行,从而对复合材料的燃烧激烈强度、燃烧放热量以及生烟量表现出良好的抑制效果。

随着 BM 添加量的增大,PC/ABS/10-HDP/BM 复合材料的 PHRR 和 THR 先减小后增大,点燃时间(TTI)和 FPI 先增大后减小,这是因为当 BM 添加量较低时,其在复合材料中分散均匀,受热分解生成

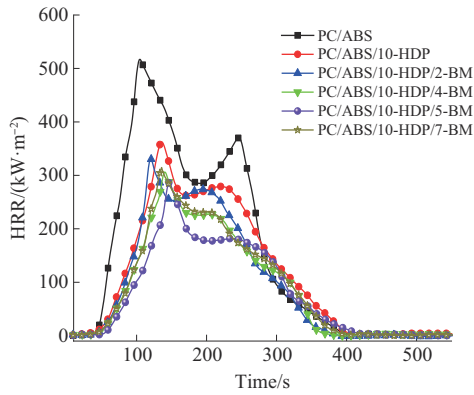


图1 PC/ABS/HDP/BM复合材料的HRR曲线

Fig. 1 Heat release rate curves of PC/ABS/HDP/BM composites

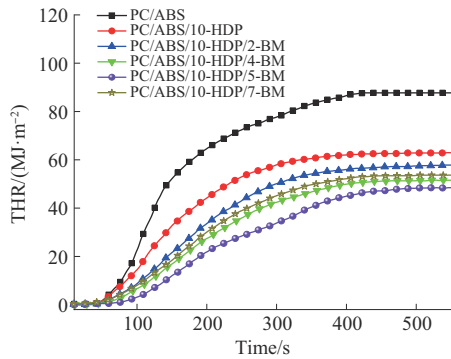


图2 PC/ABS/HDP/BM复合材料的THR曲线

Fig. 2 Total heat release curves of PC/ABS/HDP/BMcomposites

表3 PC/ABS/HDP/BM复合材料的锥形量热特征数据

Tab. 3 Cone calorimeter characteristic data of PC/ABS/HDP/BM composites

Sample	TTI/ s	PHRR/ (kW·m ⁻²)	TSR/ (m ² ·m ⁻²)	THR/ (MJ·m ⁻²)	FPI/ [(s·m ²)·kW ⁻¹]
PC/ABS	45	517.0	1 953.6	87.7	0.09
PC/ABS/10-HDP	45	362.7	1 427.7	62.9	0.12
PC/ABS/10-HDP/2-BM	47	330.3	1 258.5	57.8	0.14
PC/ABS/10-HDP/4-BM	50	306.2	1 024.3	51.6	0.16
PC/ABS/10-HDP/5-BM	51	286.1	927.9	48.5	0.18
PC/ABS/10-HDP/7-BM	48	314.7	904.5	53.6	0.15

Notes: TTI indicates time to ignition; PHRR indicates peak heat release rate; TSR indicates total smoke release; THR indicates total heat release; FPI indicates fire performance index.

的Al₂O₃能够广泛覆盖材料表面,显著增强酸性液态膜和炭层的硬度与致密性,从而有效阻隔热、氧及可燃性气体的传递,阻燃性能提高,当BM在复合材料中团聚时,对应效果变差,阻燃性能相对下降。PC/ABS/10-HDP/BM的TSR随着BM添加量的增大,逐渐降低,这主要是BM受热分解产生的水在吸

热后形成水蒸气,水蒸气可以使漂浮在气体中的微小颗粒凝聚、降落,气体中微小颗粒减少,而这些漂浮的颗粒是烟的重要组成部分,所以TSR降低。相对PC/ABS/10-HDP,PC/ABS/10-HDP/5-BM的TTI(51 s)和FPI[0.18 (s·m²)/kW]分别提高6 s和50.0%,PHRR(286.1 kW/m²),THR(48.5 MJ/m²)和TSR(927.9 m²/m²)分别下降21.1%,22.9%和35.0%。

2.2 HDP和BM对PC/ABS热性能的影响

表4为PC/ABS复合材料的TG特征数据,图3为PC/ABS复合材料的TG曲线。由表4和图3可以看出,相对PC/ABS,PC/ABS/10-HDP的起始失重温度($T_{5\%}$)为375.7℃,降低了,最大失重温度(T_{max})为444.3℃,750℃残炭量为18.5%,均上升,这是因为HDP的分解温度低于PC/ABS,其先于PC/ABS分解,所以复合材料的 $T_{5\%}$ 降低,而HDP分解产生的酸性液态膜可以隔离热量和促使PC/ABS脱水成炭,所以复合材料的 T_{max} 和高温残炭量升高。PC/ABS/10-HDP/BM复合材料的 $T_{5\%}$ 和 T_{max} 随着BM含量的增大逐渐提高,这主要是BM在热解过程中释放的结晶水通过相态转化形成水蒸气,该相变过程的吸热效应显著耗散体系热能,致使复合材料表面温度降低^[16],与此同时,热分解产物中的Al₂O₃在材料表面形成覆盖层,提高了酸性液态膜和炭层的密实度和坚硬度,隔热能力提高,所以 $T_{5\%}$ 和 T_{max} 提高。与 $T_{5\%}$ 和 T_{max} 不同的是,PC/ABS/10-HDP/

表4 PC/ABS/HDP/BM复合材料的TG特征数据

Tab. 4 TG characteristic data of PC/ABS/HDP/BM composites

Sample	$T_{5\%}$ /°C	T_{max} /°C	Carbon residual rate(750 °C)/%
PC/ABS	397.2	441.5	16.3
PC/ABS/10-HDP	375.7	444.3	18.5
PC/ABS/10-HDP/2-BM	382.1	448.5	20.4
PC/ABS/10-HDP/4-BM	386.3	451.3	23.3
PC/ABS/10-HDP/5-BM	391.5	453.4	25.1
PC/ABS/10-HDP/7-BM	393.0	457.2	22.3

Notes: $T_{5\%}$ is initial weight loss temperature; T_{max} is the maximum weight loss temperature.

BM复合材料的750℃残炭量随BM含量的增大,先增大后减小,这与BM在复合材料中的分散性有关,BM含量小,分散性好,酸性液态膜的密实度和坚硬度高,复合材料的高温残炭量高,反之则降低。

表5为PC/ABS/HDP/BM复合材料的HDT和MFR数据。由表5可以看出,相对PC/ABS,PC/ABS/10-HDP的HDT(82.5℃)下降了15.9℃,这可能是因为HDP是低聚物,加入后提高了复合材料

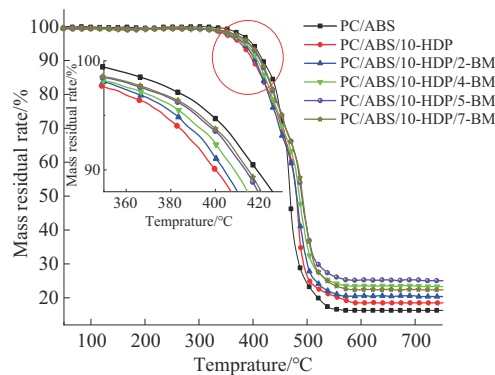


图3 PC/ABS/HDP/BM复合材料的TG曲线
Fig. 3 TG curves of PC/ABS/HDP/BM composites

的塑性,材料刚性下降^[9],在升温速度和加载应力保持不变的情况下,刚性小的材料在加热介质中的变形速度快,HDT低。在PC/ABS/10-HDP/BM复合体系中,随着BM含量的增加,HDT呈上升趋势。这主要归因于BM具有短棒状结构,能够对聚合物分子链的运动产生限制作用,从而增强材料的刚性,进而导致HDT的升高。PC/ABS/10-HDP的MFR(14.52 g/10 min)相对PC/ABS(3.85 g/10 min)上升了10.67 g/10 min,说明HDP在PC/ABS中有增塑作用,而BM对PC/ABS分子链的运动有抑制作用,所以随着BM添加量的增加,PC/ABS/10-HDP/BM复合体系的MFR逐渐降低,这与复合材料HDT逐渐升高的原因是一致的。

2.3 HDP和BM对PC/ABS力学性能的影响

由表6可以看出,相比PC/ABS,PC/ABS/10-

表5 PC/ABS/HDP/BM复合材料的HDT和MFR数据
Tab. 5 HDT and MFR data of PC/ABS/HDP/BM composites

Sample	HDT/°C	MFR/[g·(10 min) ⁻¹]
PC/ABS	98.4	3.85
PC/ABS/10-HDP	82.5	14.52
PC/ABS/10-HDP/2-BM	84.1	13.75
PC/ABS/10-HDP/4-BM	86.4	12.23
PC/ABS/10-HDP/5-BM	87.5	11.84
PC/ABS/10-HDP/7-BM	89.1	11.08

HDP的拉伸强度(45.7 MPa)、弯曲强度(74.2 MPa)、弯曲模量(2 126 MPa)和缺口冲击强度(44.3 kJ/m²)分别下降了20.5%,15.0%,12.2%和41.2%,这可能是由于HDP添加量较多,且与PC/ABS基体相容性不佳,导致复合材料的力学性能下降。此外,HDP作为低聚物,使复合材料的塑性增加,刚性减弱,进而导致弯曲模量降低。PC/ABS/10-HDP/BM复合材料的拉伸和弯曲强度随着BM含量的增大,先增大后减少,这是因为低含量的BM可以分散在复合材料中有效传递应力^[13],而高含量的BM在复合材料中团聚,应力传递效率下降。另外,BM在复合材料中对PC/ABS分子链的移动有束缚作用,材料的延展性下降,刚性增大^[12],所以随着BM含量的增大,PC/ABS/10-HDP/BM复合材料的弯曲模量逐渐上升,缺口冲击强度逐渐下降。PC/ABS/10-HDP/5-BM的拉伸强度(54.5 MPa)、弯曲强度(84.5 MPa)和弯曲模量(2 342 MPa)相对PC/ABS/10-HDP分别提高19.3%,13.9%和10.2%。

表6 PC/ABS/HDP/BM复合材料的力学性能数据
Tab. 6 Mechanical properties data of PC/ABS/HDP/BM composites

Sample	Tensile strength/MPa	Flexural strength/MPa	Flexural modules/MPa	Notched izod impact strength/(kJ·m ⁻²)
PC/ABS	57.5	87.3	2 421	75.4
PC/ABS/10-HDP	45.7	74.2	2 126	44.3
PC/ABS/10-HDP/2-BM	47.2	77.5	2 189	43.5
PC/ABS/10-HDP/4-BM	52.1	82.1	2 276	41.2
PC/ABS/10-HDP/5-BM	54.5	84.5	2 342	40.4
PC/ABS/10-HDP/7-BM	52.7	81.7	2 394	37.1

3 结论

- (1) 添加10% HDP使PC/ABS的LOI提升至27.8%并通过UL 94 V-0(3.2 mm)级。在PC/ABS/10-HDP中加入5%的BM,复合材料的LOI值进一步提升至32.1%且达到UL 94 V-0(1.6 mm)级,HDP和BM的协同作用使PHRR,THR及TSR分别降低21.1%,22.9%和35.0%,TTI与FPI显著提高。
- (2) HDP导致PC/ABS的T_{5%}降低,高温残炭量提升至18.5%,归因于其优先分解形成的黏稠状液态膜

- 促进PC/ABS脱水成炭。BM的加入,使PC/ABS/10-HDP/BM复合材料的T_{5%}和T_{max}随添加量增加逐步升高,同时残炭量受BM分散性调控,低含量BM通过均匀分散优化炭层结构,而团聚现象导致高含量BM体系残炭量下降。
- (3) HDP的增塑作用使PC/ABS/10-HDP的HDT降低,拉伸、弯曲强度及缺口冲击强度分别下降20.5%,15.0%和41.2%。BM的短棒状结构限制分子链运动,提升材料刚性,添加5%的BM使HDT

上升5℃,拉伸、弯曲强度及模量分别提高19.3%,13.9%和10.2%,但过量BM因团聚削弱应力传递效率,导致力学性能回落。

参考文献

- [1] KAPOOR S, GOYAL M, JINDAL P. Effect of functionalized multi-walled carbon nanotubes on thermal and mechanical properties of acrylonitrile butadiene styrene nanocomposite[J]. *Journal of Polymer Research*, 2020, 27. DOI:10.1007/s10965-020-2014-z.
- [2] 姜慧敏, 邓成, 郑艳春, 等. PC/ABS阻燃合金的开发及性能研究[J]. *塑料科技*, 2017, 45(1):51-55.
- JIANG Huimin, DENG Cheng, ZHENG Yanchun, et al. Study on development and performance of flame retarded PC/ABS alloy[J]. *Plastics Science and Technology*, 2017, 45(1):51-55.
- [3] 李湘. 螺杆组合对高刚无卤阻燃PC/ABS性能的影响[J]. *塑料*, 2021, 50(2):48-51, 57.
- LI Xiang. Effect of screw combinations on high rigidity halogen-free flame retardant PC/ABS performance[J]. *Plastics*, 2021, 50(2):48-51, 57.
- [4] 李湘, 殷洁, 方松刚, 等. PC/ABS/VMT/倍半硅氧烷阻燃性能研究[J]. *工程塑料应用*, 2021, 49(9):135-138.
- LI Xiang, YIN Jie, FANG Songgang, et al. Study on flame retardant properties of PC/ABS/VMT/sesquioxane[J]. *Engineering Plastics Application*, 2021, 49(9):135-138.
- [5] 刘海路, 刘小忠, 徐娟, 等. 梯形倍半硅氧烷/海泡石/PC/ABS复合材料的制备与性能[J]. *工程塑料应用*, 2024, 52(9):51-56.
- LIU Hailu, LIU Xiaozhong, XU Juan, et al. Preparation and properties of trapezoidal silsesquioxane/sepiolite/PC/ABS composites[J]. *Engineering Plastics Application*, 2024, 52(9):51-56.
- [6] 周文君, 王雪芹, 何伟壮. PC/ABS/聚硼硅氧烷阻燃合金的性能[J]. *化工进展*, 2016, 35(3):861-865.
- ZHOU Wenjun, WANG Xueqin, HE Weizhuang. Properties of flame retarded PC/ABS/polyborosiloxane[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2016, 35(3):861-865.
- [7] 李子骞, 漆飞, 陈谢仁, 等. 磷系阻燃剂对PC/ABS共混物燃烧性能的影响[J]. *塑料工业*, 2017, 45(6):93-97.
- LI Zijian, QI Fei, CHEN Xieren, et al. Effect of phosphorus flame retardant on combustion behaviors of PC/ABS blends[J]. *China Plastics Industry*, 2017, 45(6):93-97.
- [8] 刘晓亮, 杨波, 丁正亚, 等. 硼酸锌阻燃抑烟PC/ABS的研究[J]. *合成材料老化与应用*, 2016, 45(1):15-18, 90.
- LIU Xiaoliang, YANG Bo, DING Zhengya, et al. The effects of zinc borate on the smoke density and flame-retardant PC/ABS alloy[J]. *Synthetic Materials Aging and Application*, 2016, 45(1):15-18, 90.
- [9] 高顺, 郭正虹. PC/ABS合金的气相/凝聚相协同阻燃作用[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2020, 54(12):2 321-2 328.
- GAO Shun, GUO Zhenghong. Synergistic flame retardancy of gas phase and condensed phase of PC/ABS alloy[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2020, 54(12):2 321-2 328.
- [10] 吴长波, 张永, 易新, 等. 勃姆石/MPP二元协效AlPi阻燃PA66/GF复合材料研究[J]. *工程塑料应用*, 2019, 47(6):112-117.
- WU Changbo, ZHANG Yong, YI Xin, et al. Study on AlPi flame retarded PA66/GF composites with binary synergist of boehmite and MPP[J]. *Engineering Plastics Application*, 2019, 47(6):112-117.
- [11] 曹伟娜, 任昆仑, 李莉, 等. 勃姆石改性PET复合材料的阻燃和增强机理研究[J]. *中国塑料*, 2019, 33(7):32-37.
- CAO Weina, REN Kunlun, LI Li, et al. Flame retardancy and reinforcing mechanism of boehmite-modified PET composites[J]. *China Plastics*, 2019, 33(7):32-37.
- [12] LI X, FANG S G. Effect of boehmite and vermiculite on flame retardancy and mechanical properties of PET[J]. *Polymer Korea*, 2022, 46(4):463-469.
- [13] LI X. Influence of melamine cyanurate and boehmite on flame retardancy of PA6[J]. *Iranian Polymer Journal*, 2022, 31(8):975-981.
- [14] ZHAO D, WANG J, WANG X L, et al. Highly thermostable and durably flame-retardant unsaturated polyester modified by a novel polymeric flame retardant containing Schiff base and spirocyclic structures[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018, 344:419-430.
- [15] 刘小忠, 徐娟, 李湘. 叔丁基化芳基磷酸酯和碳微球对PC/ABS性能的影响[J]. *工程塑料应用*, 2024, 52(7):162-166, 185.
- LIU Xiaozhong, XU Juan, LI Xiang. Effect of tert-butylated aryl phosphate and carbon microspheres on performance of PC/ABS[J]. *Engineering Plastics Application*, 2024, 52(7):162-166, 185.
- [16] 李湘, 胡彩玲. 碳微球/勃姆石/PP复合材料的制备及性能分析[J]. *塑料*, 2023, 52(4):37-40, 86.
- LI Xiang, HU Cailing. Preparation and property analysis of CMS/BM/H-PP composite[J]. *Plastics*, 2023, 52(4):37-40, 86.