

doi : 10.3969 / j.issn.1001-3539.2021.05.027

基于氮磷溴协效体系阻燃 ABS 材料性能

秦旺平,付锦锋,杨霄云,陈平绪

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

摘要:采用氮磷溴协效阻燃体系,利用多种阻燃机理的协同增效阻燃作用,设计开发了一种高等级阻燃丙烯腈-丁二烯-苯乙烯塑料(ABS)。通过傅立叶变换红外光谱、热重分析、仪器化冲击、锥形量热仪、扫描电子显微镜等表征手段,对高等级阻燃 ABS 材料的力学性能、燃烧性能等进行了综合分析和研究。研究结果表明,氮磷溴体系阻燃 ABS 的极限氧指数达到了 32%,灼热丝起燃温度达到了 850℃,相对溴系阻燃 ABS 提高了 17%,这种氮磷溴协效阻燃体系具有较高的阻燃效率,大大提高了 ABS 的阻燃等级,并且氮磷溴阻燃 ABS 在燃烧过程中具有较低的火灾危害性,不易发生轰然性,阻燃安全性较高,这种阻燃技术具有创新性和实践指导意义,为未来新型阻燃 ABS 材料的研究开发提供了新的技术思路。

关键词:阻燃丙烯腈-丁二烯-苯乙烯塑料;氮磷溴;协效阻燃;灼热丝起燃温度

中图分类号: TQ322.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2021)05-0143-06

Performance of Flame Retardant ABS based on Nitrogen Phosphorus and Bromine Synergy System

Qin Wangping, Fu Jinfeng, Yang Xiaoyun, Chen Pingxu

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

Abstract : A high grade flame retardant acrylonitrile butadiene styrene (ABS) material was designed and synthesized by using the synergistic effect of various flame retardant mechanisms based on nitrogen-phosphorus-bromine flame retardant system. This study aimed to analyze and investigate the properties of high grade flame retardant ABS material via mechanical properties, infrared spectroscopy, thermal analysis, instrumented impact tester, cone calorimeter, scanning electron microscopy and other characterization methods. The results show that the limited oxygen index of flame retardant ABS in nitrogen-phosphorus-bromine system reaches 32%, the ignition temperature of glow wire reaches 850℃, which is 17% higher than that in bromine ABS system. This nitrogen-phosphorus-bromine retardant system has a high flame retardant efficiency, which greatly improves the flame retardant grade of ABS. In addition, the nitrogen-phosphorus-bromine flame retardant ABS system is not easy to cause combustion explosion, and low fire hazard and high flame retardant safety. This kind of flame retardant technology has great technical innovation and practical significance, which may provide a new technical idea for the research and development of new flame retardant ABS materials in the future.

Keywords : flame retardant acrylonitrile butadiene styrene ; nitrogen-phosphorus-bromine ; synergistic effect ; glow wire ignition temperature

丙烯腈-丁二烯-苯乙烯塑料(ABS)常用作电子电器产品的外壳^[1],这些产品会因过热、漏电、老化等原因而引燃造成火灾^[2-4],对人们的生命和财产安全造成巨大危害,产品安全法规一般执行美国 UL94 标准来评价高分子材料因被动着火的阻燃性

能^[5]。电子电器产品内部的高分子材料部件在使用过程中因接触不良、过载、短路而过热的情况采用欧盟国际电工协会 IE C60695 的灼热丝标准来评估其阻燃性及安全性,UL94 和 IEC60695 是对材料防火性能评价的两个不同的标准^[6-8],相对而言,灼热丝

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFB0302005),广州市科技计划项目(201710010176)

通信作者:秦旺平,硕士,主要从事高分子材料阻燃性能研究 E-mail: qinwangping@kingfa.com.cn

收稿日期: 2021-02-14

引用格式:秦旺平,付锦锋,杨霄云,等.基于氮磷溴协效体系阻燃 ABS 材料性能[J].工程塑料应用,2021,49(5):143-148.

Qin Wangping, Fu Jinfeng, Yang Xiaoyun, et al. Performance of flame retardant ABS based on nitrogen phosphorus and bromine synergy system[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(5): 143-148.

性能的技术难度更高,需要较高的阻燃性能才能够达到。

ABS 中含有聚丁二烯橡胶组分,易燃^[9-10],相比工程材料,其在燃烧过程中又难以成炭,因此实现高等级阻燃性能技术难度较大,目前有卤阻燃 ABS 只能实现 UL 94 V-0 或者 5 VA 阻燃等级,阻燃 ABS 材料的力学性能较差^[11-14]。有卤阻燃 ABS 在技术层面主流的阻燃体系为溴锑体系,推广应用也非常成熟,易满足 UL94 相关的阻燃性能测试要求^[15-17]。但是由于溴锑阻燃体系气相凝聚相阻燃机理的局限性,灼热丝性能较低,难以满足 IEC60695 标准防火安全性的需要,影响了其在电工产品行业的推广应用。笔者采用氮磷溴协效复配阻燃体系,通过增强凝聚相阻燃作用,提高阻燃 ABS 的阻燃性能,以实现更高的阻燃等级,使阻燃 ABS 材料达到较高的阻燃性能,尤其是灼热丝性能,解决了目前阻燃 ABS 材料遇到的技术瓶颈问题,对此阻燃体系的各项性能进行了分析研究。

1 实验部分

1.1 原材料

ABS 树脂: ABS D-120A,台湾国乔石油化学股份有限公司;

溴代三嗪: FR-245,以色列化工集团;

三氧化二锑: S-05N,闪星锑业锑业有限公司;

三聚氰胺氰尿酸盐: MCA-01,四川精细化工研究院;

聚磷酸铵: APP101,寿光卫东化工有限公司;

受阻酚抗氧剂: SONOX 1010,临沂三丰化工有限公司;

亚磷酸酯抗氧剂: SONOX 168,临沂三丰化工有限公司;

抗滴落剂: SN80-SA7,广州熵能创新材料股份有限公司;

硬脂酸酰胺: EBS B50,广州润丰化工有限公司。

1.2 仪器与设备

高速混合机: SIMT 型,青岛森泰科机电科技有限公司;

双螺杆挤出机: SHJ-52 型,深圳市翰易机械有限公司;

注塑机: MA20 型,浙江海天机械有限公司;

傅立叶变换红外光谱 (FTIR) 仪: VERTEX 70 型,德国布鲁克公司;

万能试验机: CMT4000 型,美斯特 (中国) 有限公司;

冲击测试仪: ZBC8501 型,美斯特 (中国) 有限公司;

垂直燃烧仪: HVUL2 型,美国 ATLAS 公司;

极限氧指数 (LOI) 仪: PX-01-005,江苏费尔曼公司;

锥形量热仪: CCT 型,莫帝斯中国有限公司。

1.3 试样制备

阻燃 ABS 的组成是,质量分数为 17% 的溴代三嗪和质量分数为 5% 的三氧化二锑作为阻燃剂,其余是 ABS 树脂和加工助剂。高等级阻燃 ABS 使用与阻燃 ABS 相同比例的溴代三嗪和三氧化二锑,同时使用质量分数为 5% 的三聚氰胺氰尿酸盐和质量分数为 10% 的聚磷酸铵,其余为 ABS 树脂和加工助剂。加工助剂采用质量分数 0.1% 的受阻酚抗氧剂 1010,质量分数 0.2% 的亚磷酸酯抗氧剂 168,质量分数 0.2% 的抗滴落剂和质量分数 0.3% 的硬脂酸酰胺。

将材料配方中各组分按照一定比例加入高速混合机中进行混合均匀,然后通过双螺杆挤出机进行挤出造粒,得到阻燃 ABS 以及高级阻燃 ABS 材料,通过注塑机 (注射温度 200~210℃) 制备标准测试样条。

1.4 性能测试

缺口冲击强度按照 ISO 180:2000 测试;

拉伸强度按照 ISO 527-2:2012 测试,拉伸速度为 50 mm/min;

FTIR 测试: 将分析样品在 200℃ 压制成薄片,扫描频率为 4 Hz,波数范围 400~4000 cm⁻¹;

弯曲强度按照 ISO 178:2010 测试,弯曲速度为 2 mm/min;

仪器化冲击按照 ASTM E2298-2015 测试,4 mm 厚度,缺口冲击强度的样条;

锥形量热按 ISO 5660-1-2016 测试,采用 2.0 mm 厚度方板,热流量是 50 kW/m²,热能是 13.1 MJ/kg;

LOI 按照 GB/T 2406.2-2009 测试,2.0 mm 厚度样条;

灼热丝性能按照 IEC60695.2-2012 测试,厚度为 2.0 mm,边长为 100 mm 的方板;

SEM 分析: 对粉末样品表面进行喷金,电压为 10 kV,用 SEM 观察并拍照。

2 结果与讨论

2.1 FTIR

图1是ABS及阻燃ABS的FTIR曲线。阻燃ABS都是以ABS树脂为基体,在图1的FTIR结果中,2243 cm^{-1} 处都可以看到丙烯腈 $\text{C} \equiv \text{N}$ 的伸缩振动峰,442 cm^{-1} 处为 $-\text{NH}_2$ 的扭曲伸缩振动峰,3229 cm^{-1} 和3393 cm^{-1} 处是 $-\text{NH}-$ 的伸缩振动峰,这些吸收峰都是氮系阻燃剂的化学官能团特征峰,850~1100 cm^{-1} 处对应于 $\text{P}-\text{O}-\text{P}$ 伸缩振动峰,说明了磷系阻燃剂的存在^[18]。与阻燃ABS的FTIR谱图相比,高等级阻燃ABS的组分中存在氮系和磷系阻燃剂的成分。

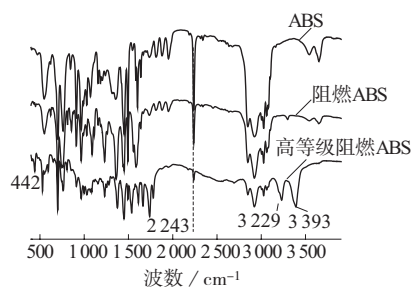


图1 ABS及阻燃ABS的FTIR曲线

2.2 力学性能

ABS及阻燃ABS的力学性能结果如图2所示。ABS树脂具有较好的韧性和刚性,缺口冲击强度达到了25 kJ/m^2 ,阻燃ABS各方面的性能都有不同程度的下降,这是由于阻燃剂属于小分子有机物或者无机物,存在相容性缺陷问题,对ABS的性能存在一定负面劣化影响。高等级阻燃ABS的阻燃剂添加量较多,材料的性能下降幅度也最明显,尤其是韧性方面,主要由于氮磷阻燃剂的极性较强,与ABS基体的相容性欠佳,造成力学性能的衰减比较明显。

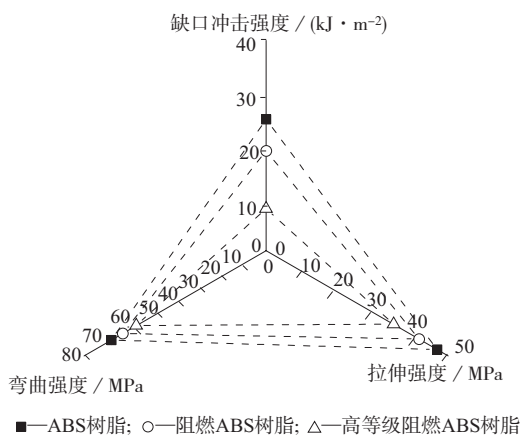


图2 ABS及阻燃ABS的力学性能

2.3 仪器化冲击

在仪器化冲击过程中,每一个波峰表示材料所受到的冲击能量,一般材料受到多次冲击能量后才会发生断裂,因此会出现多个波峰,波峰越多,说明材料的韧性也越好。图3是阻燃ABS冲击力与位移的关系曲线。试样受到冲击力后迅速变形,在缺口位置造成应力集中使裂纹开始扩展^[19],经过短暂的塑性拉伸后快速屈服,在最大冲击力(F_m)处裂纹快速发展,后进行撕裂性破坏(裂纹扩展阶段)^[20],冲击力下降至0,材料断裂。阻燃ABS和高等级阻燃ABS发生断裂需要的总能量逐渐减小,裂纹扩展功降低,韧性较差,呈现典型的脆性断裂特征。

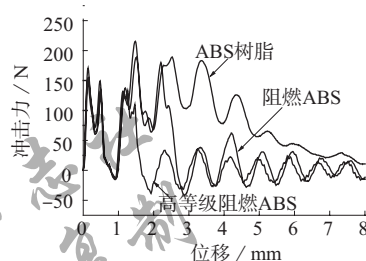


图3 ABS及阻燃ABS冲击力与位移的关系曲线

图4是ABS及阻燃ABS的冲击力-时间曲线。按照ABS树脂、阻燃ABS和高等级阻燃ABS的顺序,材料的裂纹的扩展速度逐渐加快,出现最大冲击力的时间提前,说明阻燃剂促进了材料的裂纹形成和发展,波谷与波峰的宽度均有所增大。

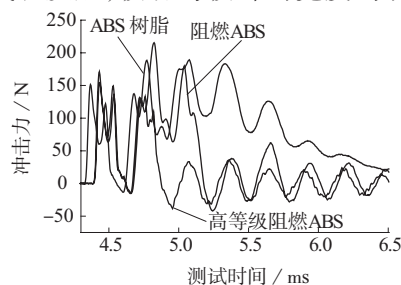


图4 ABS及阻燃ABS的冲击力-时间曲线

图5是ABS及阻燃ABS的加速度-时间曲线,摆锤与样条发生作用力后,随着阻燃等级的提高,材料的加速度依次增大,裂纹容易形成,材料韧性更差。高等级阻燃ABS受力后会形成大裂纹,导致快速开裂,在短时间内加速度出现最大值,而ABS树脂和阻燃ABS在多次受力后加速度达到最大值,出现最大加速度的时间也较晚,说明具有较好的韧性。

表1是ABS及阻燃ABS仪器化冲击所得到的相关结果。冲击过程中试样受到的 F_m ,从摆锤接触到断裂试样所发生的位移(S_m),试样受到的最大能

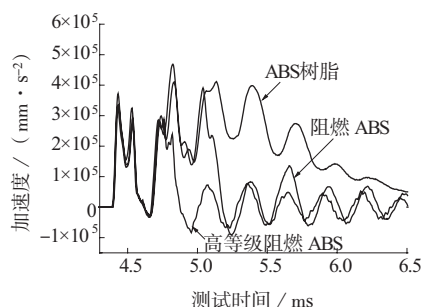


图5 ABS及阻燃ABS的加速度-时间曲线

量(W_b)及冲击强度均与材料韧性呈正相关,这些项目的测试值越高,材料的韧性越好。通过材料冲击曲线中样品发生断裂时的峰的对称性,可以判断材料的断裂类型,只有ABS树脂为韧性断裂,冲击曲线呈明显的正态对称分布,其余两个材料都是典型的脆性断裂。

表1 阻燃ABS的仪器化冲击结果

样品	F_m/N	S_m/mm	W_b/J	断裂类型
ABS树脂	189.4	2.5	0.7	韧性
阻燃ABS	215.5	1.5	0.35	脆性
高等级阻燃ABS	171.1	0.1	0.1	脆性

2.4 锥形量热结果分析

(1) 燃烧特点分析。

图6是ABS及阻燃ABS的热释放速率(HRR)曲线。由图6可知,ABS树脂点燃后经过很短的时间就达到了最大热释放速率,阻燃ABS和高等级阻燃ABS的热释放速率比ABS树脂降低很多,其最大热释放速率相当于ABS树脂的43%左右,下降幅度达57%,热释放过程很平缓,没有非常尖锐的热释放峰出现,这说明阻燃ABS和高等级阻燃ABS中的阻燃剂具有很好的阻燃作用,对ABS树脂的热释放发挥了很好的抑制作用。阻燃ABS和高等级阻燃ABS的热释放速率曲线略有差别,阻燃ABS材料的热释放速率达到最大值后迅速下降,而不会继续维持最大热释放速率快速燃烧,平台期变得不那么明显,而高等级阻燃ABS在70~170 s之间出现了明显的平台期,没有出现最大热释放速

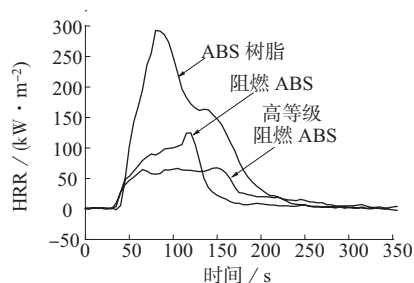


图6 ABS及阻燃ABS的HRR曲线

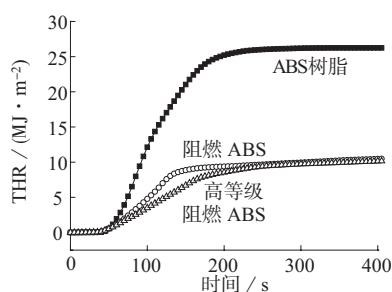
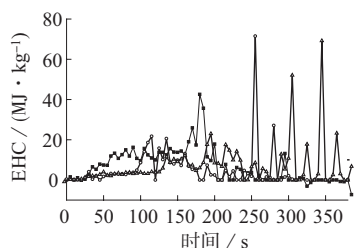


图7 ABS及阻燃ABS的THR曲线



—ABS树脂; ·—阻燃ABS; ▲—高等级阻燃ABS

图8 ABS及阻燃ABS的EHC曲线

率,燃烧过程比较平缓,说明在ABS中溴锑与氮磷溴体系的阻燃机理不尽相同。高等级阻燃ABS的热释放速率比阻燃ABS小,说明通过磷氮溴的协同阻燃作用,发挥了更高的阻燃效率,具有明显的抑制ABS燃烧的作用。

图7是ABS及阻燃ABS的总释放热(THR)曲线,两种阻燃ABS的总热释放明显降低。图8是三种材料的有效燃烧热(EHC)曲线,ABS树脂的热释放较快,其次是阻燃ABS,热释放最慢的是高等级阻燃ABS,说明了它具有最好的阻燃性能。从最大热释放出现的时间来看,ABS树脂出现在175 s左右,阻燃ABS出现在255 s左右,高等级阻燃ABS出现在310 s左右,最大热释放出现的时间越早,说明阻燃性能较差,高等级阻燃ABS具有最好的阻燃性能,氮磷溴体系比溴锑体系具有更好的阻燃效果。

表2是阻燃ABS的锥形量热测试结果。由表2可见,按照ABS树脂、阻燃ABS、高等级阻燃ABS的顺序,它们的平均热释放速率(HRR^*)、最大热释放速率($pkHRR$)、THR、平均有效燃烧热(EHC^*)依次降低,说明阻燃剂有效地抑制了材料的热释放,阻止了材料的燃烧,发挥了很好的阻燃作用。阻燃ABS与高等级阻燃ABS相比,后者表现出更佳的

表2 ABS及阻燃ABS的锥形量热测试结果

样品	$HRR^*/(kW \cdot m^{-2})$	$pkHRR/(kW \cdot m^{-2})$	$THR/(MJ \cdot m^{-2})$	$EHC^*/(MJ \cdot kg^{-1})$
ABS树脂	96.89	292.67	26.17	10.51
阻燃ABS	33.54	124.76	11.2	3.98
高等级阻燃ABS	25.17	67.43	9.3	3.59

阻燃效果,具有更高效的抑制 ABS 燃烧的作用。

(2) 火灾危害性分析。

点燃时间 (TTI) 越长,说明材料越不易燃,阻燃性能越好。表 3 为 ABS 及阻燃 ABS 的火灾危险数据。根据表 3 的结果可知,按照点燃需要的时间长短依次为 ABS 树脂 < 阻燃 ABS < 高等级阻燃 ABS,阻燃性能越来越好。最大热释放速率与点燃时间的比值说明了材料的轰燃性,随着阻燃等级的提高,材料的轰燃性越低,火灾危害性降低。

表 3 ABS 及阻燃 ABS 的火灾危险数据

样品	TTI/s	pkHRR/TTI	MLR ¹⁾ /(g·s ⁻¹)
ABS 树脂	12	24.39	0.12
阻燃 ABS	19	6.57	0.08
高等级阻燃 ABS	24	2.81	0.06

注: 1) MLR——质量损失速率,材料在燃烧时质量损失变化的速率, g/s。

2.5 其它阻燃性能

ABS 树脂及阻燃 ABS 材料的 LOI, 灼热丝起燃温度和相对漏电起痕指数结果如图 9 所示。ABS 树脂的 LOI 只有 18%, 属于易燃材料, 阻燃 ABS 的 LOI 达到了 25%, 在较高的氧浓度下才会易燃, 通过磷氮溴的协效阻燃作用, 高等级阻燃 ABS 的 LOI 达到了 32%, 可满足安防产品的最高技术要求。漏电起痕指数也有了较大的提高, 由 ABS 树脂原来的 250 V 提高到 600 V, 在较高的电压下不易燃烧和炭化, 具有较高的阻燃性能。

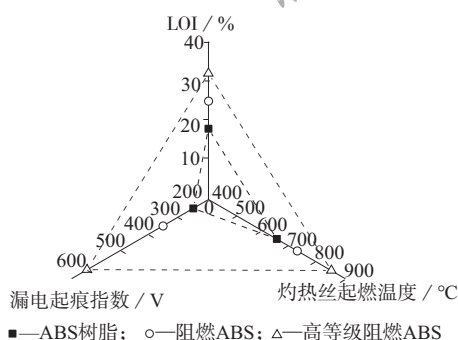


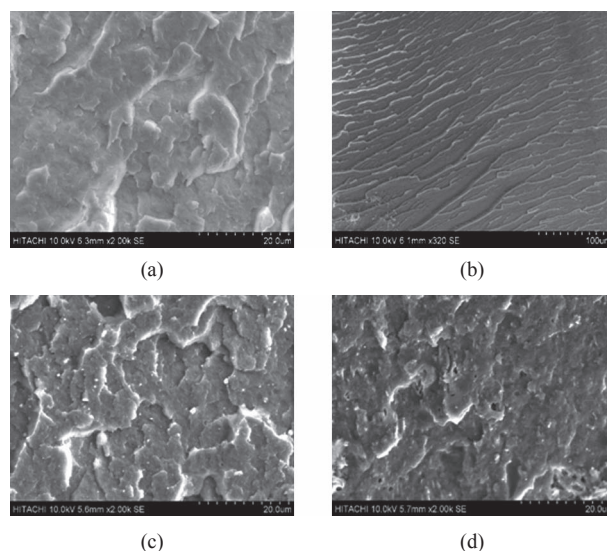
图 9 ABS 及阻燃 ABS 的其它阻燃特性

在阻燃材料中,灼热丝性能一直是阻燃 ABS 的痛点,由于其化学结构的不易成炭性,导致其灼热丝性能较差,ABS 树脂的灼热丝起燃温度只有 650℃,阻燃 ABS 的灼热丝起燃温度最高也只能达到 725℃,说明在溴锑体系下通过不断添加阻燃剂,当灼热丝性能达到一定值后其正向提升作用减弱,这可能与阻燃机理有关。磷氮溴系阻燃剂主要通过气相阻燃和凝聚相阻燃发挥阻燃作用,具有更强的凝聚相隔热隔氧作用,阻燃效率较高,能够有效地抑

制阻燃 ABS 的有焰燃烧。通过这种阻燃机理的叠加增效作用,阻燃 ABS 的灼热丝起燃温度得到了极大提高,高等级阻燃 ABS 的灼热丝起燃温度达到了 850℃,可满足电工产品的最高技术要求。

2.6 SEM 分析

阻燃剂在基体中的分散状态会直接影响到复合材料的各项性能,所以利用 SEM 观察阻燃 ABS 材料的断面形貌,其 SEM 照片如图 10 所示。从图 10a 和图 10b 可看出,ABS 树脂的冲击断面比较粗糙,界面模糊,可明显地看出拉伸变形的情况,具有较好的韧性。从图 10c 可以看出,阻燃 ABS 的横断面有很多孔洞和裂隙,孔洞是由于锑白脱落后留下的,裂隙是由于阻燃剂与 ABS 树脂的极性和相容性不同造成的。由图 10d 看出,高等级阻燃 ABS 的横断面有更多的孔洞和裂隙,断面比较平整,界面清晰,层与层之间比较尖锐,没有形变,是典型的脆性断裂形貌,说明阻燃剂与 ABS 树脂之间的结合力较弱,是由于氮磷阻燃剂与 ABS 基体的界面相容性变差的缘故。复合材料中的裂隙使得其在拉伸时容易产生应力点集中,造成局部应力过大易导致材料断裂,这就解释了阻燃 ABS 的力学性能不断下降,尤其是冲击强度,符合力学性能的测试结果。



a—ABS 树脂 (放大 2000 倍); b—ABS 树脂 (放大 320 倍); c—阻燃 ABS (放大 2000 倍); d—高等级阻燃 ABS (放大 2000 倍)

图 10 ABS 及阻燃 ABS 的 SEM 照片

3 结论

溴锑凝聚相与氮磷凝聚相的叠加协效阻燃作用,氮系的气相阻燃增强作用,共同有效地抑制了 ABS 的有焰燃烧,大大提高了阻燃 ABS 的灼热丝等级,灼热丝起燃温度达到了 850℃;氮磷溴体系

阻燃 ABS 在燃烧过程中 CO 释放量低,烟生成量低,不易发生轰然性,阻燃安全性较高;氮磷溴阻燃 ABS 在仪器化冲击过程中容易产生裂纹,并且具有较快的裂纹扩展速度,断裂需要的能量较小,属于典型的脆性断裂。可满足电工产品的最高技术要求。

参考文献

- [1] Barthes M L, Mantaux O, Pedros M, et al. Recycling of aged ABS from real WEEE through ABS / PC blends in the ABS-rich compositions[J]. *Advances in Polymer Technology*, 2012, 31(4):343–353.
- [2] Ma Haiyun, Wang Jun, Fang Zhengping. Cross-linking of a novel reactive polymeric intumescent flame retardant to ABS copolymer and its flame retardancy properties[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2012, 97(9):1596–1605.
- [3] Liang Guilan, Lin Jun, Dai Peibang, et al. Synergistic flame retardant effect of fumed Silica and Zinc borate with magnesium hydroxide in ABS based flame retardant composites[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 599(2):132–135.
- [4] Carty P, Creighton J, White S. TG and flammability studies on polymer blends containing acrylonitrile–butadiene–styrene and chlorinated poly (vinyl chloride)[J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2001, 63(3):679–687.
- [5] Sullalti S, Colonna M, Berti C, et al. Effect of phosphorus based flame retardants on UL94 and comparative tracking index properties of poly (butylene terephthalate)[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2012, 97(4):566–572.
- [6] Casetta M, Michaux G, Ohl B, et al. Key role of magnesium hydroxide surface treatment in the flame retardancy of glass fiber reinforced polyamide 6[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2018, 148:95–103.
- [7] Peng H Q, Yan J H, Zhang S D, et al. Degradation of recycled flame-retardant GFPBT during extrusion:Effect of screw types on the extrudate properties[J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2017, 36(12):864–877.
- [8] Jimenez M, Gallou H, Duquesne S, et al. New routes to flame retard polyamide 6,6 for electrical applications[J]. *Journal of Fire Sciences*, 2012, 30(6):535–551.
- [9] Cao X, Yang Y, Luo H, et al. High efficiency intumescent flame retardancy between hexakis (4-nitrophenoxy) cyclotriphosphazene and ammonium polyphosphate on ABS[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2017, 143:259–265.
- [10] Braga N F, LaChance A M, Liu B, et al. Influence of compatibilizer and carbon nanotubes on mechanical, electrical, and barrier properties of PTT / ABS blends[J]. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 2019, 2(3):121–125.
- [11] Hoang D Q, Kim J, Jang B N. Synthesis and performance of cyclic phosphorus-containing flame retardants[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2008, 93(11):2042–2047.
- [12] Wang J, Liu Y, Cai X F. Effect of a novel charring agent on thermal degradation and flame retardancy of acrylonitrile–butadiene–styrene[J]. *J Therm Anal Calorim*, 2011, 103(2):767–772.
- [13] Shin Y J, Hamb Y R, Kim S H. Application of cyclophosphazene derivatives as flame retardants for ABS[J]. *J Ind Eng Chem*, 2010, 16(3):364–367.
- [14] Ma Haiyun, Tong Lifang, Xu Zhongbin, et al. Intumescent flame retardant–montmorillonite synergism in ABS nanocomposites[J]. *Appl Clay Sci*, 2008, 42(32):238–245.
- [15] Areeprasert C, Khaobang C. Pyrolysis and catalytic reforming of ABS / PC and PCB using biochar and e-waste char as alternative green catalysts for oil and metal recovery[J]. *Fuel Processing Technology*, 2018, 182:26–36.
- [16] Bai Bin, Jin Hui, Zhu Shixing, et al. Experimental investigation on in-situ hydrogenation induced gasification characteristics of acrylonitrile butadiene styrene (ABS) microplastics in supercritical water[J]. *Fuel Processing Technology*, 2019, 192:170–178.
- [17] Roma P, Camino G, Luda M P. Mechanistic studies on fire retardant action of fluorinated additives in ABS[J]. *Fire and Materials*, 1997, 21(5):199–204.
- [18] 陈文彦, 刘心纯, 刘够生, 等. 网状结构结晶 V 型聚磷酸铵的合成与表征 [J]. *高等学校化学学报*, 2010(31):2494–2499.
Chen Wenyan, Liu Xinchun, Liu Gousheng, et al. Synthesis and characterization of crystalline V-type ammonium phosphate polyphosphate with reticular structure[J]. *Chemical Journal of Chinese Universities*, 2010(31):2494–2499.
- [19] Chang L, Zhang Z, Breidt C. Impact resistance of short fibre / particle reinforced epoxy[J]. *Applied Composite Materials*, 2004, 11(1):1–15.
- [20] Arici A, Sinmazcelik T, Capan L, et al. Influence of annealing on the performance of short glass fiber-reinforced polyphenylene Sulfide(PS) composites[J]. *Journal of Composite Materials*, 2005, 39(1):21–33.