

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2017.11.010

BPS/有机氮磷复合阻燃增强增韧 PA66 材料的性能

李辉¹,王旭华¹,刘萍²,李斌¹,孙国华¹,杨春兵¹

(1. 中国兵器工业集团第五三研究所, 济南 250031; 2. 山东北方现代化学工业有限公司, 济南 250031)

摘要:以溴化聚苯乙烯(BPS)和自制的有机氮磷阻燃剂(NPR)为尼龙(PA)66的阻燃剂,以短切玻璃纤维为增强剂,加入增韧剂三元乙丙橡胶,制备了阻燃增强增韧 PA66 材料,研究了阻燃剂的加入及复配对材料力学性能、极限氧指数(LOI)、垂直燃烧性能、最大烟密度、热稳定性等性能的影响。结果表明,相对于 BPS, NPR 对材料力学性能的不利影响更大,单独使用 BPS 时材料的阻燃效果较差,而单独使用 NPR 可明显提升材料的阻燃性能,当 NPR 质量分数为 15% 时,材料的 LOI 为 34%,垂直燃烧等级达到 V-0 级,拉伸强度、弯曲强度和缺口冲击强度分别为 161, 224 MPa 和 12 kJ/m²。在阻燃剂总质量分数为 15% 的条件下,与单独使用 NPR 相比, BPS 与 NPR 的复配进一步降低了材料的拉伸与弯曲强度,但在保持阻燃性能的同时降低了材料成本。NPR 的加入导致材料最大烟密度有所增大,热降解提前,而 BPS 与 NPR 的复配进一步增大了材料的最大烟密度,使热降解有所延后。

关键词: 尼龙 66; 溴化聚苯乙烯; 阻燃; 增强; 增韧; 氧指数; 垂直燃烧等级; 烟密度; 热稳定性

中图分类号: TQ323.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2017)11-0051-04

Properties of BPS/Organic Nitrogen Phosphorus Flame Retardant Reinforced Toughening PA66 Composites

Li Hui¹, Wang Xuhua¹, Liu Ping², Li Bin¹, Sun Guohua¹, Yang Chunbing¹

(1. Institute 53, China North Industries Group Corporation, Jinan 250031, China;

2. Shandong North Modern Chemical Industry Co. Ltd., Jinan 250031, China)

Abstract : The flame retardant reinforced toughening nylon (PA) 66 composites were prepared with brominated polystyrene (BPS) and organic nitrogen phosphorus flame retardant (NPR) prepared by self as flame retardants, short glass fiber as reinforcement, and ethylene propylene diene monomer rubber as toughening agent. The effects of addition and compound of flame retardants on mechanical properties, limiting oxygen index (LOI), vertical burning performance, maximum smoke density and thermal stability of the composites were studied. The results indicate that, compared with BPS, NPR has more adverse effect on the mechanical properties, the flame retardancy of the composite is worse when only BPS is adopted, but is improved obviously when only NPR is adopted. When the mass fraction of NPR is 15%, the LOI of the composite is 34% and vertical burning level reaches V-0, the tensile strength, bending strength and notched impact strength is 161, 224 MPa and 12 kJ/m² separately. Under the total mass fraction of flame retardant is 15%, compared with using NPR alone, the compound of BPS and NPR decreases the tensile and bending strength further, but maintains the flame retardancy and reduces the cost. The addition of NPR increases the maximum smoke density and advances the thermal degradation, the compound of BPS and NPR increases the maximum smoke density further but postpones the thermal degradation.

Keywords : nylon66 ; brominated polystyrene ; flame retardant ; reinforced ; toughening ; oxygen index ; vertical burning level ; smoke density ; thermal stability

尼龙(PA)66具有熔点高、强度大、耐磨性好等优点^[1],自1939年实现工业化生产以来,已成为产量最大的工程塑料^[2]。按照美国材料试验学会(ASTM)标准,PA66的极限氧指数(LOI)为24%,属于自熄型聚合物;而按照美国保险商实验所的标准,PA66的垂直燃烧等级达到了UL 94 V-2级,具有一定的阻燃性能^[3]。通过增强、增韧、阻燃等方法对PA66进行改性,可进一步提高其各项性能、扩大

其应用范围,其改性材料被广泛应用于汽车、军工、机械等领域^[4]。

溴化聚苯乙烯(BPS)与三氧化二锑复配阻燃PA66材料时具有良好的阻燃效果。当PA66复合材料中的玻璃纤维(GF)质量分数为30%,三元乙

联系人:李辉,工程师,硕士,主要从事阻尼材料的结构设计、性能测试和仿真计算研究

收稿日期:2017-09-08

丙橡胶 (EPDM) 质量分数为 8% 时,总质量分数为 20%~24% 的 BPS 和三氧化二锑复配阻燃增强增韧 PA66 材料的垂直燃烧等级达到 UL 94 V-0 级,并保持了良好的力学性能,拉伸强度 109 MPa (ASTM D638 M-91a),弯曲强度 215 MPa (ASTM D790-92),缺口冲击强度 5.7 kJ/m^2 (ASTM D256-92)^[5]。但是溴系阻燃剂在提高 PA66 材料阻燃性能的同时也增加了 PA66 材料在燃烧过程中的烟释放量,三氧化二锑的加入进一步加剧了燃烧生成的有毒有害气体,增加了火灾的危险性^[6]。

氮系、磷系阻燃剂是近年来研究较多的一种阻燃剂,氮系、磷系阻燃剂的毒性、生烟性及腐蚀性较卤系阻燃剂的低,随着环保要求越来越高,其应用研究也越来越多^[7-8]。陈先敏等^[9]采用红磷阻燃母料和三聚氰胺氰尿酸盐 (MCA)、有机纳米蒙脱土复配阻燃 PA66,与单独使用红磷阻燃母料相比,阻燃 PA66 材料的 LOI 由 27.2% 提高到 28% 以上。刘鹏举等^[10]研究了高分散型 MCA 阻燃 PA66 的力学性能和阻燃性能,与普通 MCA 相比,缺口冲击强度由 4.7 kJ/m^2 提高到 7.9 kJ/m^2 ,垂直燃烧等级由 UL 94 V-2 级提高到 V-0 级。吕文涛等^[11]以自制氮磷复配物阻燃 PA66 并研究了其力学性能和阻燃性能,结果表明,阻燃剂的加入使得 PA66 材料的拉伸强度、冲击强度、弯曲强度及弯曲弹性模量均有所下降,但阻燃性能提高,LOI 和垂直燃烧等级分别达到 28.7% 和 UL 94 V-0 级。

笔者曾利用十溴二苯醚 (DBDPO) 和氮磷复合物阻燃剂复配阻燃增强增韧 PA66 复合材料,主要研究了挤出机螺杆构型、挤出工艺和注塑工艺等对材料力学性能的影响^[3],但未深入研究复配阻燃剂的烟密度、热稳定性等性能。相对于 DBDPO, BPS 具有低毒、环保的特点,因此笔者将 BPS 阻燃剂和自制有机氮磷阻燃剂 (NPR) 复配,以 PA66 为基体、短切 GF 为增强剂、EPDM 为增韧剂,制备了 BPS/NPR 复合阻燃增强增韧 PA66 材料,研究了阻燃剂用量及复配对材料力学性能、阻燃性能、烟密度、热稳定性的影响,为同类材料的研制提供参考。

1 实验部分

1.1 原材料

PA66: 熔体流动速率 $2.5 \sim 2.7 \text{ g/10 min}$, 神马集团有限责任公司;

BPS: 工业级, 寿光卫东化工有限公司;

NPR: 自制;

EPDM: 市售;

短切 GF: 工业级, 巨石集团有限公司。

1.2 主要设备及仪器

双螺杆挤出机: ZSE27 型, 德国 Leistritz 公司;

注塑机: BA/950/500 型, 德国 Battenfeld 公司;

电热鼓风干燥箱: WMK-08 型, 山东淄博仪表厂;

材料万能试验机: Instron65 型, 英国 Instron 公司;

微控冲击试验仪: XUJ-5.5A 型, 承德试验机有限责任公司;

LOI 仪: FTT-OI 型, 英国 FTT 公司;

烟密度测试仪: FTT-SDC 型, 英国 FTT 公司;

同步热分析仪: STA449C 型, 德国 Netzsch 公司。

1.3 试样制备

将 PA66、短切 GF、BPS、NPR、EPDM 及其它助剂按表 1 的配方混合均匀, 利用双螺杆挤出机通过挤出、造粒等工序制备阻燃增强增韧 PA66 改性材料, 挤出工艺为: 挤出温度 $250 \sim 275^\circ\text{C}$ 、螺杆转速 $190 \sim 210 \text{ r/min}$ 。将制得的阻燃增强增韧 PA66 改性材料粒子在注塑机上制成标准试样用于性能测试, 注塑工艺为: 注塑温度 $250 \sim 275^\circ\text{C}$ 、注塑压力、保压压力 $5 \sim 9 \text{ MPa}$ 、冷却时间 $15 \sim 25 \text{ s}$ 。

表 1 阻燃增强增韧 PA66 材料各组分质量分数 %

试样代号	PA66	短切 GF	EPDM	BPS	NPR
0 [#]	62	30	8		
1 [#]	52	30	8	10	
2 [#]	47	30	8	15	
3 [#]	42	30	8	20	
4 [#]	52	30	8		10
5 [#]	47	30	8		15
6 [#]	47	30	8	5	10
7 [#]	47	30	8	10	5

1.4 性能测试

拉伸性能按 GB/T 1040.2-2006 测试, 试样类型 1A 型, 试验速度 10 mm/min ;

弯曲性能按 GB/T 9341-2008 测试, 试样尺寸 $80 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$, 试验速度 2 mm/min ;

缺口冲击强度按 GB/T 1043.1-2008 测试, 试样类型 1A 型, 缺口底部半径为 $(0.25 \pm 0.05) \text{ mm}$;

LOI 按 GB/T 2406.2-2009 测试, 试样类型 I 型, 试样尺寸 $80 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$;

垂直燃烧性能按 GB/T 2408-2008 测试, 试样

尺寸 127 mm×12 mm×3 mm,试验方法 B;

最大烟密度按 GB/T 10671-2008 测试,试样为直接模塑样,尺寸 75 mm×75 mm×1 mm;

热重 (TG) 分析:参照 ASTM E1131-2003 进行 TG 分析,氮气气氛,升温速度 10℃/min。

2 结果与讨论

2.1 力学性能

表 2 为试样 0[#]~7[#] 的拉伸、弯曲强度及缺口冲击强度。

表 2 试样 0[#]~7[#] 的力学性能

试样代号	拉伸强度 /MPa	弯曲强度 /MPa	缺口冲击强度 / (kJ·m ⁻²)
0 [#]	167	247	21
1 [#]	169	233	20
2 [#]	169	240	17
3 [#]	165	225	15
4 [#]	156	228	13
5 [#]	161	224	12
6 [#]	147	217	12
7 [#]	138	211	13

从表 2 可以看出,当 BPS 用量较低时,PA66 改性材料的力学性能变化很小,BPS 用量较高时,改性材料的力学性能均有所下降,但拉伸及弯曲强度下降幅度较小,缺口冲击强度下降幅度较大。与 BPS 相比,相同阻燃剂含量下加入 NPR 的改性材料力学性能下降幅度相对较大,表明相对于 BPS,NPR 对 PA66 改性材料力学性能的不利影响较大。当 BPS 和 NPR 复配使用时,与单独使用 NPR 的相比,改性材料的拉伸与弯曲强度进一步降低,但缺口冲击强度相对稳定。表明 BPS 和 NPR 的复配对改性材料的拉伸与弯曲强度有不利影响。

2.2 阻燃性能

试样 0[#]~7[#] 的 LOI 及垂直燃烧等级如表 3 所示。

表 3 试样 0[#]~7[#] 的 LOI 及垂直燃烧等级

试样代号	LOI /%	垂直燃烧等级
0 [#]	26	未通过
1 [#]	25	未通过
2 [#]	26	未通过
3 [#]	27	未通过
4 [#]	31	未通过
5 [#]	34	V-0
6 [#]	33	V-0
7 [#]	33	V-0

从表 3 可以看出,试样 0[#] 的 LOI 为 26%,与纯 PA66 相比稍有提高,这也许是因为 GF 的加入,使 PA66 改性材料在燃烧时形成了凝聚炭层,起到了隔绝氧气的作用。但是其垂直燃烧性能由纯 PA66 的 V-2 下降为不能分级,这是因为,在纯 PA66 燃烧过

程中会有熔融滴落现象,熔融滴落带走了部分热量,从而起到阻燃的作用,加入 GF 之后,燃烧过程中没有熔融滴落现象,不能通过熔融滴落的方式将燃烧产生的热量及时转移,并且因为加入 GF 后,PA66 改性材料在燃烧过程中的“烛芯效应”,使材料更容易燃烧^[12]。

试样 1[#]~3[#] 的 LOI 与试样 0[#] 基本持平,且均未通过垂直燃烧实验。BPS 单独阻燃 PA66 时,在其质量分数为 20% 时依然起不到阻燃的作用,实验结果表明,BPS 不适合单独阻燃增强增韧 PA66 改性材料。

试样 4[#] 的 LOI 为 31%,垂直燃烧实验没有通过;试样 5[#] 的 LOI 达到了 34%,垂直燃烧等级达到了 V-0 级。质量分数为 15% 的 NPR 的加入显著提高了 PA66 改性材料的 LOI,且使材料垂直燃烧等级达到 V-0 级,表现出很好的阻燃性能。试验结果表明,NPR 单独阻燃增强增韧 PA66 改性材料时表现出了良好的阻燃效果。

对于试样 6[#] 和 7[#],可以发现其 LOI 均为 33%,略低于相同阻燃剂用量的试样 5[#],且其垂直燃烧等级均达到了 V-0 级。这表明在阻燃剂用量相同的情况下,以部分 BPS 代替 NPR 基本保持了 PA66 改性材料良好的阻燃性能,由于 BPS 的价格较为便宜,因此以部分 BPS 代替成本较高的 NPR,可在保持阻燃性能的基础上降低 PA66 改成材料的成本,提高材料的应用性能。

2.3 最大烟密度

火灾中死亡人数的 85% 是由于烟气导致的,阻燃剂的加入在提高可燃物的阻燃性能的同时,在材料燃烧过程中,往往导致阻燃材料烟释放量的增加,增加火灾危险性。为了研究阻燃剂的加入对阻燃增强增韧 PA66 改性材料燃烧过程中烟释放量的影响,将试样 0[#] 及垂直燃烧等级达到 V-0 级的试样 5[#],6[#],7[#] 进行了比光密度试验,其最大比光密度即最大烟密度,结果如表 4 所示。

表 4 试样 0[#],5[#],6[#],7[#] 的最大烟密度

项 目	试样代号			
	0 [#]	5 [#]	6 [#]	7 [#]
无焰模式	129	185	214	222
火焰模式	135	130	303	359

由表 4 可知,试样 0[#] 在无焰模式和火焰模式下的最大烟密度分别为 129 和 135;相对于试样 0[#],试样 5[#] (即添加质量分数为 15% 的 NPR) 在无焰模式时的最大烟密度增加了 43%,在火焰模式下略有降

低;试样 6[#] (即添加质量分数为 5% 的 BPS 和 10% 的 NPR) 无焰模式时的最大烟密度增加了 66%, 在火焰模式下增加了 124%; 试样 7[#] (即添加质量分数为 10% 的 BPS 和 5% 的 NPR) 在无焰模式时的最大烟密度增加了 72%, 在火焰模式下增加了 166%。上述实验结果表明, NPR 的加入会加大改性材料燃烧时的最大烟密度, 在 BPS/NPR 复合阻燃体系中, 用部分 BPS 代替 NPR 会进一步加大改性材料的最大烟密度, 且 BPS 用量越高, 最大烟密度越大。

2.4 热稳定性

图 1 为试样 0[#] 的 TG 和 DTG 曲线, 试样 5[#], 6[#], 7[#] 的 TG 和 DTG 曲线趋势与此大致相同, 由 TG 和 DTG 曲线上获得的 4 种试样失重 5%, 10% 和失重速率最大时的温度以及 400℃ 质量保持率如表 5 所示。

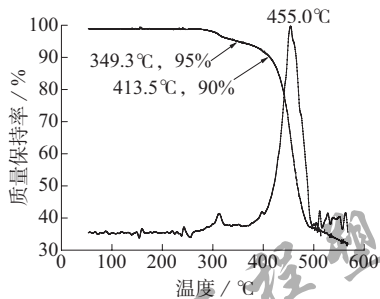


图 1 试样 0[#] 的 TG 和 DTG 曲线

表 5 试样 0[#], 5[#], 6[#], 7[#] 的 TG 测试结果

试样代号	失重 5% 时的温度 / °C	失重 10% 时的温度 / °C	失重速率最大时的温度 / °C	400℃ 质量保持率 / %
0 [#]	349.3	413.5	455.0	92.1
5 [#]	302.0	329.8	356.1	65.0
6 [#]	311.4	334.8	358.7	61.5
7 [#]	322.9	350.5	383.4	62.0

由表 5 可以看出, 相对于试样 0[#], 试样 5[#], 6[#] 和 7[#] 的失重 5%, 10% 及最大失重速率时的温度和 400℃ 质量保持率均显著下降。和未阻燃增强增韧 PA66 改性材料相比, 阻燃增强增韧 PA66 改性材料的热分解均提前, 这说明在降解过程中阻燃剂与 PA66 树脂及 EPDM 发生了相互作用, 改变了 PA66 改性材料的降解过程, 使之成炭化学反应提前, 从而提高了材料的阻燃性能。相对于单独使用 NPR, BPS 与 NPR 复配后, 材料的热降解温度有所提高, 热降解延后, 表明成炭化学反应有所延迟, 这可能是 BPS 与 NPR 复配后并未显著提升改性材料阻燃性能的一个原因。

3 结论

(1) BPS 在单独阻燃增强增韧 PA66 时的阻燃效果差, 而 NPR 在单独阻燃增强增韧 PA66 时表现

出良好的阻燃效果, 在其质量分数为 15% 时, PA66 改性材料的垂直燃烧等级达到了 V-0 级, LOI 达到了 34%。相对于 BPS, NPR 的加入进一步降低了改性材料的力学性能, 当 NPR 质量分数为 15% 时, 改性材料拉伸强度、弯曲强度、缺口冲击强度分别为 161, 224 MPa 和 12 kJ/m²。

(2) BPS 与 NPR 复配使用, 对材料的拉伸与弯曲强度有一定的不利影响, 但可使改性材料的阻燃性能与单独使用 NPR 的相差不大, 故可在保持阻燃性能不下降的同时, 降低材料的成本。

(3) NPR 的加入导致阻燃增强增韧 PA66 改性材料的最大烟密度增大, BPS 与 NPR 的复配使用加剧了这样现象, 且 BPS 的用量越大, 这些现象越明显。

(4) 阻燃剂的加入改变了阻燃增强增韧 PA66 改性材料的热降解过程, 提高了热分解温度, 使之成炭化学反应提前, 而 BPS 与 NPR 复配使用延迟了该类反应。

参考文献

- [1] 吕文晏, 崔益华, 张绪杰, 等. 反应性 P-N 膨胀阻燃剂化学阻燃尼龙 66 的研究 [J]. 工程塑料应用, 2015, 43(7): 20-24.
Lyu Wenyan, Cui Yihua, Zhang Xujie, et al. Study of chemical flame retardancy PA66 with a reaction P-N intumescent flame retardant [J]. Engineering Plastics Application, 2015, 43(7): 20-24.
- [2] 金国珍. 工程塑料 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2001: 16-65.
Jin Guozhen. Engineering plastics [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2001: 16-65.
- [3] 李辉, 王旭华, 孙建军, 等. 阻燃增强增韧尼龙 66 材料的制备及工艺研究 [J]. 工程塑料应用, 2012, 40(6): 49-53.
Li Hui, Wang Xuhua, Sun Jianjun, et al. Preparation and technology of flame retardant reinforced toughening nylon 66 composites [J]. Engineering Plastics Application, 2012, 40(6): 49-53.
- [4] 马之庚, 陈开来. 工程塑料手册 (材料卷) [M]. 北京: 机械工业出版社, 2004: 55-65.
Ma Zhigeng, Chen Kailai. Engineering plastics manual (material volume) [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2004: 55-65.
- [5] 郭建鹏, 孟成铭, 杨涛, 等. 高灼热丝温度环保型阻燃增强 PA66 的研制 [J]. 工程塑料应用, 2010, 38(1): 46-48.
Guo Jianpeng, Meng Chengming, Yang Tao, et al. Development of environmental flame-retardant reinforced PA66 with high glow-wire property [J]. Engineering Plastics Application, 2010, 38(1): 46-48.
- [6] Rusu M, Ibanescu C, Murariu M, et al. Obtaining of fire-retardant polyamide 6 grades without halogens for injection moulding [J]. Iranian Polymer Journal, 2000, 9(1): 29-36.
- [7] 刘鹏, 王忠卫, 刘波, 等. 一种新型次膦酸盐阻燃 PA6 的制备及其阻燃性能 [J]. 塑料, 2010, 39(2): 111-112.

(下转第 65 页)

效分析方法在满足柔性管使用强度要求前提下,减少了柔性管截面厚度,对企业生产成本降低具有一定意义。

参考文献

- [1] Yang H Z, Zheng W. Metamodel approach for reliability-based design optimization of a steel catenary riser[J]. Journal of Marine Science and Technology, 2011, 16(2):202-213.
 - [2] Rodriguez D E, Ochoa O O. Flexural response of spoolable composite tubulars: An integrated experimental and computational assessment[J]. Composites Science and Technology, 2004, 64(13-14):2075-2088.
 - [3] Bakaiyan H, Hosseini H, Ameri E. Analysis of multi-layered filament-wound composites pipes under combined internal pressure and thermomechanical loading with thermal variations[J]. Composites Structures, 2009, 88(4):532-541.
 - [4] 潜凌, 李培江, 张文燕. 海洋复合柔性管发展及应用现状 [J]. 石油矿场机械, 2012, 41(2):90-92.
Qian Ling, Li Peijiang, Zhang Wenyan. Development and applications of marine composite flexible pipe[J]. Oil Field Equipment, 2012, 41(2):90-92.
 - [5] 陈海. 国产海底软管在海上油气田的应用 [J]. 石油机械, 2016, 44(5):61-65.
Chen Hai. The application of domestic flexible pipe in the offshore oil & gas field[J]. China Petroleum of Machinery, 2016, 44(5):61-65.
 - [6] 刘昊. 深海复合材料立管力学特性分析与优化设计研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2013.
Liu Hao. Mechanical performance analysis and optimization design study of deepwater composite riser[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013.
 - [7] 曾季芳. 深海复合材料柔性管的力学性能和优化设计 [D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
 - [8] 卢青针, 岳前进, 汤明刚, 等. 海洋柔性管的抗拉性能及加强设计 [C]// 第十四届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集(上册). 呼和浩特: 中国海洋学会, 2009:100-104.
Lu Qinzhen, Yue Qianjin, Tang Minggang, et al. Tensile properties and strengthening design of marine flexible pipe[C]//Proceedings of the 14th china ocean (shore) engineering symposium (first volume). Huhhot: China Ocean Society, 2009:100-104.
 - [9] Kruijer M P, Warnet L L, Akkerman R. Analysis of the mechanical properties of a reinforced thermoplastic pipe (RTP)[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2005, 36(2):291-300.
 - [10] 张洁. 复合材料铺层设计准则的一些理解 [J]. 科技创新导报, 2013(14):57-58.
Zhang Jie. Some understanding of the composite material layer design standards[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2013(14):57-58.
 - [11] 乔嵩潼. 纤维缠绕增强复合管在内压作用下的力学行为研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
Qiao Aitong. Investigation on mechanisms of filament-wound fiber-reinforced composite pipe under internal pressure[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
 - [12] 徐光磊. 含内衬纤维复合材料发射筒力学性能研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2013.
Xu Guanglei. Mechanical properties research for fiber reinforced composite launch canister with liner[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2013.
 - [13] 林秀峰. 钢丝缠绕增强塑料复合管强度分析与优化设计 [D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
Lin Xiufeng. Strength analysis and optimization design of plastic pipe reinforced by cross helically wound steel wires[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006.
- (上接第 54 页)
- Liu Peng, Wang Zhongwei, Liu Bo, et al. Prepare of novel phosphinate flame-retardant PA6 and study of the flame retardant property[J]. Plastics, 2010, 39(2):111-112.
 - [8] 阳葵, 刘渊, 王琪. 无卤阻燃尼龙 66 的研究 [J]. 塑料, 2011, 40(6):65-67.
Yang Yan, Liu Yuan, Wang Qi. Halogen-free flame retardancy of polyamide-6, 6[J]. Plastics, 2011, 40(6):65-67.
 - [9] 陈先敏, 兰修才, 李谦, 等. 无卤阻燃增强尼龙 66 提高氧指数的研究 [J]. 塑料工业, 2015, 43(8):95-98.
Chen Xianmin, Lan Xiucan, Li Qian, et al. Study on improving the oxygen index in non-halogen flame retardant reinforced nylon 66[J]. China Plastics Industry, 2015, 43(8):95-98.
 - [10] 刘鹏举, 阳葵, 刘渊, 等. 高分散型三聚氰胺氰尿酸阻燃尼龙 66 的研究 [J]. 工程塑料应用, 2013, 41(3):11-15.
 - Liu Pengju, Yang Yan, Liu Yuan, et al. Highly dispersing melamine cyanurate flame retardant nylon 66[J]. Engineering Plastics Application, 2013, 41(3):11-15.
 - [11] 吕文涛, 张京楠, 杨伏良, 等. 原位聚合法制备 N-P 复配型阻燃 PA66 树脂及性能 [J]. 塑料, 2017, 46(4):1-5.
Lyu Wentao, Zhang Jingnan, Yang Fuliang, et al. Synthesis and characterization of N-P compound type flame-retardant nylon66 resin by in-situ polymerization[J]. Plastics, 2017, 46(4):1-5.
 - [12] 代彦荣, 周岚, 冯新星. 玻纤增强阻燃共聚丙烯 66 复合材料的阻燃性能研究 [J]. 浙江理工大学学报: 自然科学版, 2017, 37(3):366-370.
Dai Yanrong, Zhou Lan, Feng Xinxing. Study on the flame retardancy of glass fiber reinforced flame retardant copolyamide 66 composites[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University: Natural Science Edition, 2017, 37(3):366-370.