

列车用复合材料阻燃性能研究*

蒋彩¹,肖加余¹,刘钧¹,曾竟成¹,谭艳^{1,2}

(1. 国防科技大学 航天与材料工程学院,湖南长沙 410073;
2. 株洲电力机车广缘科技有限责任公司,湖南株洲 412001)

摘要:不同类别的阻燃剂配合使用能产生协同作用,大大提高阻燃效果。在甲基丙烯酸类不饱和聚酯树脂 9001 基体中,添加微囊化红磷/氢氧化铝/三氧化二锑/甲基膦酸二甲酯(MRP/Al(OH)₃/Sb₂O₃/DMMP)阻燃剂体系,对其树脂体系固化物及玻璃纤维织物复合材料的力学性能和阻燃性能进行了实验研究,提出了一种有望用于列车复合材料大尺寸构件制造的性能优异、价格低廉的新体系。结果表明,当质量添加比例分别为 12% MRP、50% Al(OH)₃、2% Sb₂O₃ 时,树脂体系室温粘度 100mPa·s 左右,凝胶时间超过 80min,适用于 RTM 和 VIMP 等大尺寸构件成型工艺;复合材料拉伸强度 215.4MPa,弯曲强度 177.15MPa,拉伸模量 13.85GPa,弯曲模量 13.36GPa,氧指数 39.7。

关键词:高速列车;不饱和聚酯;复合材料;阻燃;力学性能

中图分类号: TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2012)05-0040-05

The flame retardants of composites in carriage of train

JIANG Cai¹, XIAO Jiayu¹, LIU Jun¹, ZENG Jingcheng¹, TAN Yan^{1,2}

(1. College of Aerospace and Materials Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;
2. Zhuzhou Electric Locomotive Guangyuan Technology Co. Ltd, Zhuzhou 412001, China)

Abstract: Various kinds of flame retardants mixed together will improve the flame retardation significantly. Effects of a mixture of microencapsulated red phosphorus/aluminum hydroxides/stibium oxides/methyl phosphoric dimethyl on flame retardant performance and mechanical properties of the matrix resin 9001 were investigated, and a new price-advantages resin system which showed excellent mechanical and flame retardant performance was determined. The test results showed that the properties of resin 9001 with flame retardant system 12% MRP, 50% Al(OH)₃, 2% Sb₂O₃ is the best of all. Viscosity of the resin system at room temperature is about 100mPa·s, and the gel time of the resin is beyond 80 min, which satisfies the requirement of RTM and VIMP process for large composite parts. The tensile strength and modulus of the glass fabric reinforced the resin composites are 215.4MPa and 13.85GPa, respectively. The bending strength and modulus are 177.15MPa and 13.36GPa, respectively. And the LOI of the composites is 39.7.

Key words: high-speed train; unsaturated polyester; composite material; flame retardant; mechanical properties

列车的高速化、轻量化,催生了复合材料在车体上的广泛应用^[1-4]。高速列车作为一种运输工具,长期暴露在户外,承担运输任务,必须保障乘客的生命和财产安全,因此列车车体材料必须在结构、抗撞击、动力学、环境以及阻燃等方面满足使用要求^[5]。为满足列车车体材料阻燃性能的要求,复合材料车体结构一般采用阻燃型树脂基体,但目前国内使用的阻燃型树脂主要依靠进口,价格昂贵且受制于人,不利于推进车体的复合材料化(即车辆轻量化)进程。因此,自主研发综合性能优异的阻燃型树脂体系,应用于列车车体的生产,是聚合物基复合材料结构产业发展的迫切

需要。

物质的燃烧需要有高温、可燃物、氧化剂和未受抑制的链式反应四个必要条件^[6]。阻燃正是通过冷却、稀释、形成绝热层或隔离膜等物理途径和终止自由基链反应的化学途径来达到阻止或减缓燃烧的目的^[7-10]。不饱和聚酯树脂的阻燃方法^[11]主要有三种:①添加型阻燃,即在树脂基体中添加阻燃剂,使之以物理分散状态与树脂进行共混而发挥阻燃作用^[12];②反应型阻燃,即先使参加反应的原料带上阻燃元素,然后在聚合或缩聚反应过程中参加反应,从而结合到高聚物分子中去,起到阻燃作用^[13];③制成树脂后再进行卤

* 收稿日期:2011-10-10

基金项目:湖南省科技重大专项支持项目(2011FJ1001-1)

作者简介:蒋彩(1987—),女,四川南充人,博士研究生,E-mail:736178363@qq.com;

肖加余(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail:jiayuxiao@tom.com

化(或溴化)或导入磷、氮等阻燃元素。方法②制造工艺较复杂、成本较高,国内应用很少,方法③目前应用还不普遍,方法①以其工艺简便、成本低廉、阻燃效果良好等优点得到广泛应用,目前已发展了一个包括卤系、氮系、磷系、无机物等多种传统阻燃剂以及膨胀型阻燃剂、纳米材料^[14]等新型阻燃剂在内的阻燃剂大家族,但考虑到环境污染,卤系阻燃剂已被禁止^[15]。

根据阻燃剂的协效作用机理,即两种阻燃剂配合使用总效果大于两者之和,本文选择各类阻燃剂体系的代表物质,在复合材料列车构件用 9001 基体树脂中,添加微囊化红磷/氢氧化铝/三氧化二锑/甲基膦酸二甲酯(MRP/Al(OH)₃/Sb₂O₃/DMMP)阻燃剂体系,考察在多种阻燃剂同时作用下,树脂体系及其复合材料的力学性能和阻燃性能变化,优选体系,期望用于高速列车车体制造。

1 实验部分

1.1 实验材料

以下原材料由株洲电力机车广缘科技有限责任公司提供:9001 基体树脂,黄色黏稠胶状液体;M-50 固化剂,无色透明黏稠液体;C₁₄H₂₂CoO₄(工业纯),环烷酸钴促进剂,紫色黏稠液体;Al(OH)₃,氢氧化铝,阻燃剂,白色粉末;MRP,微囊化红磷阻燃剂,浅紫色流动性粉末,连云港海水化工有限公司产;Sb₂O₃,三氧化二锑阻燃剂,白色细粒粉末,济南泰星精细化工有限公司产;DMMP(C₃H₉O₃P),甲基膦酸二甲酯阻燃剂,无色透明低黏度液体,青岛联美化工有限公司产。

1.2 试样制备

树脂浇铸体制备:将各阻燃剂组分按正交试验安排表 1 添加到 9001 基体树脂中,并加入环烷酸钴促进剂 1.5 份,M-50 固化剂 2 份,制备成树脂体系,浇注到准备好的模具中,于 35℃ 下固化 2 小时脱模,后处理得到浇铸体试样。

树脂体系制备:按表 2 配比,将各组分混合后搅拌均匀;静置 1min,以去除气泡,得到阻燃型树脂体系。

复合材料试样制备:按表 2 配比如配制树脂体系,制备玻璃纤维增强复合材料平板(树脂质量含量为 55%),后处理得到复合材料试样。

表 1 阻燃型树脂体系阻燃剂配比

Tab. 1 Weight ratios of constitutes in the resin systems

No.	1	2	3	4	5	6	7	8
MRP/phr	4	4	4	4	8	8	8	8
Al(OH) ₃ /phr	20	30	40	50	20	30	40	50
Sb ₂ O ₃ /phr	1	2	3	4	2	1	4	3
DMMP/phr	0	5	10	15	10	15	0	5
No.	9	10	11	12	13	14	15	16
MRP/phr	12	12	12	12	16	16	16	16
Al(OH) ₃ /phr	20	30	40	50	20	30	40	50
Sb ₂ O ₃ /phr	3	4	1	2	4	3	2	1
DMMP/phr	15	10	5	0	5	0	15	10

Note: Additional group without any flame retardant.
phr - parts per hundreds of resin

表 2 复合材料平板树脂体系质量配比

Tab. 2 Weight ratios of constitutes in the composites

Group	Resin	Weight ratios of flame retardants			C ₁₄ H ₂₂ CoO ₄ M-50	
A	100%	8%	50%	3%	1.5%	2%
	9001	MRP	Al(OH) ₃	Sb ₂ O ₃		
B	100%	12%	50%	2%	1.5%	2%
	9001	MRP	Al(OH) ₃	Sb ₂ O ₃		
C	100%	50% Al(OH) ₃			0	1.5%
	8175					

1.3 测试与表征

多传感器电子万能试验机(WDW-100):按照 GB/T 2568-1995 测试树脂浇铸体的拉伸性能,按照 GB/T 2570-1995 测试树脂浇铸体的弯曲性能;按照 GB/T 1446-2005 测试复合材料的拉伸性能,按照 GB/T 1449-2005 测试复合材料的弯曲性能。

氧指数测定仪(JF-3):按照 GB/T 2406-93 分别测试树脂浇铸体和复合材料的氧指数。

数字旋转粘度计(SNB-2):参照 GB 7193.1-87,测定阻燃型树脂体系的室温粘度。

凝胶时间测定:参照 GB7193.6-87,采用手动法测定室温下阻燃型树脂体系的凝胶时间。

2 结果分析与讨论

2.1 树脂浇铸体的性能研究

2.1.1 力学性能

表 3 为阻燃型树脂体系的拉伸强度和弯曲强度数据。

实验测得,阻燃剂改性前 9001 基体树脂浇铸体的拉伸强度为 52.15MPa,弯曲强度为 66.03MPa。改性前后的实验数据(表 3)表明,由于阻燃剂的

加入,阻燃型树脂体系浇铸体的拉伸强度和弯曲强度都有明显下降。这是因为阻燃剂的加入破坏了树脂体系的连续性和粘接力,降低了树脂浇铸体的力学性能^[6]。

表 3 阻燃型树脂体系浇铸体拉伸和弯曲强度数据

Tab.3 The tensile and bend strength of the flame retardants systems

No.	1	2	3	4	5	6	7	8
TS/MPa	36.1	28.4	21.0	14.7	15.4	13.7	24.0	24.2
BS/MPa	29.1	29.9	36.3	21.3	28.7	13.2	37.0	37.8
No.	9	10	11	12	13	14	15	16
TS/MPa	10.1	18.1	17.8	27.9	16.4	23.1	6.8	13.0
BS/MPa	14.7	28.0	28.6	37.5	26.6	35.8	13.9	19.5
MPa	4	7	3	2	5	6	6	9

Note; The No. corresponding to Tab. 1. TS represents tensile strength, BS represents bend strength.

分别以拉伸强度和弯曲强度为指标,采用正交试验直观分析法对各阻燃剂及其添加水平数据进行分析优化,如表 4 所示。

表 4 阻燃型树脂体系强度数据分析表

Tab.4 Tensile and bend strength analysis of the flame retardants systems;

(a) tensile strength; (b) bend strength

Weight ratios of flame retardants				
	MRP	Al(OH) ₃	Sb ₂ O ₃	DMMP
κ ₁	25.09	19.56	20.18	27.81
κ ₂	19.39	20.88	19.69	21.75
κ ₃	18.51	17.44	19.63	16.92
κ ₄	14.87	19.98	18.36	11.38
R	10.21	3.44	1.82	16.43
Best ratios	4% MRP	30% Al(OH) ₃	1% Sb ₂ O ₃	0% DMMP

(a)

Weight ratios of flame retardants				
	MRP	Al(OH) ₃	Sb ₂ O ₃	DMMP
κ ₁	29.21	24.83	22.66	34.89
κ ₂	29.23	26.79	27.56	30.79
κ ₃	27.24	28.99	31.22	28.20
κ ₄	24.02	29.08	28.26	15.81
R	5.21	4.25	8.56	19.08
Best ratios	8% MRP	50% Al(OH) ₃	3% Sb ₂ O ₃	0% DMMP

Note: The κ₁, κ₂, κ₃, κ₄ corresponding to the average tensile strength of each accessional level of corresponding flame retardant in Tab. 1.

由表 4 可知:在 4 因素 4 水平正交试验中,对 MRP 阻燃型树脂体系拉伸强度的影响因素由大到小依次为 DMMP、MRP、Al(OH)₃、Sb₂O₃,对弯曲强度的影响因素由大到小依次为 DMMP、Sb₂O₃、MRP、Al(OH)₃。DMMP 为低粘度液体添加剂,虽然能与树脂互溶,但影响了树脂基体固化结构的连续性,使体系力学性能下降;而颗粒型阻燃剂在树脂体系中的分散部分破坏树脂基体连续性,降低相界面粘结强度,使力学性能下降;实验选用的 MRP 是用合适的壳体材料对红磷粉末阻燃剂进行微囊化处理得到,可增大阻燃剂与基体树脂的相容性及其在树脂中的分散性,从而减少大量填充阻燃剂对树脂体系物理性能的不良影响,提高阻燃效果^[16-17]。

2.1.2 阻燃性能

表 5 为阻燃型树脂体系各组的实测氧指数值。

表 5 阻燃型树脂体系氧指数

Tab.5 The Limit Oxygen Index (LOI) of the flame retardants systems

No.	1	2	3	4	5	6	7	8
LOI /%	23.3	26.9	30.9	35.7	27.8	30.8	27.2	29.6
No.	9	10	11	12	13	14	15	16
LOI /%	30.4	29.3	29.6	30.5	28.2	26.5	35.0	34.5

Note: The No. corresponding to Tab. 1.

实验测得,阻燃剂改性前 9001 基体树脂的氧指数在 20% 以下,由表 5 可知,阻燃型树脂体系的氧指数较之有显著提高,这表明,阻燃剂体系能显著提高基体树脂的阻燃效果。其中,MRP 为无机磷阻燃剂,DMMP 为有机磷阻燃剂,故此体系为磷-磷协效体系。其作用机理为:红磷在 400℃ ~ 500℃ 下解聚成白磷,白磷在水汽存在下被氧化成粘性的偏磷酸、聚偏磷酸,这类磷酸既覆盖在材料的表面,又在材料表面加速脱水炭化,形成的炭层可将外部的氧、挥发可燃物和热与内部的聚合物隔开,使燃烧中断;而 DMMP 为易挥发、低粘度的有机磷化物,由于分子中 P-C 键的存在,化学稳定性强,具有耐水、耐溶剂性,阻燃性能持久,它能在适宜温度下挥发,产生高密度蒸汽,覆盖住聚合物分解出的可燃性气体,隔断它们与空气和氧的接触,从而使燃烧窒息。在此体系中,固相阻燃与气相阻燃协效进行,提高了阻燃效果^[16-17]。Al(OH)₃热容很高,在 250℃ 以上受热分解时能生成氧化铝和水,既起到吸热冷却的作用,水蒸气

又稀释了火焰区气体浓度,Al(OH)₃ 还有利于形成炭化层,起到阻挡热量和氧气进入的作用而阻燃。此外,Al(OH)₃ 还有利于抑制燃烧过程中烟雾的产生,对保护人员生命也具有重要意义,在阻燃剂行业得到广泛运用^[18]。

采用直观分析方法,以氧指数为指标对实验数据进行分析优化,结果如表 6 所示。由表可知,4 个因素对氧指数的影响由大到小依次为:DMMP、Al(OH)₃、MRP、Sb₂O₃,可见,DMMP 阻燃效率较高,而 Sb₂O₃ 仅起协效的作用,添加量对树脂体系氧指数影响不大^[13]。且氧指数随各阻燃剂添加比例的增加而升高,各因素间呈正协效作用。

表 6 阻燃型树脂体系氧指数数据分析表

Tab. 6 The LOI analysis of the flame retardants systems

	Weight ratios of flame retardants			
	MRP	Al(OH) ₃	Sb ₂ O ₃	DMMP
κ ₁	29.2	27.4	29.6	26.9
κ ₂	28.9	28.4	30.0	28.6
κ ₃	30.0	30.7	29.4	30.6
κ ₄	31.1	32.6	30.1	33.0
R	2.2	5.2	0.7	6.1
Best ratios	16% MRP	50% Al(OH) ₃	4% Sb ₂ O ₃	15% DMMP

Note: The κ₁, κ₂, κ₃, κ₄ corresponding to the average LOI of each accessional level of corresponding flame retardant in Tab. 1.

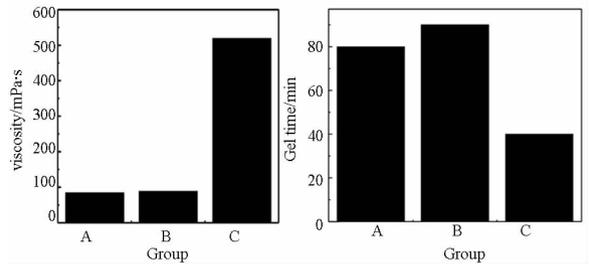
2.1.3 性能总结

通过树脂浇铸体的性能测试,以表现材料综合力学性能的弯曲强度为指标优选出阻燃型树脂体系组 A:8% MRP、50% Al(OH)₃、3% Sb₂O₃,制成树脂浇铸体试样。测得其拉伸强度为 29.30MPa,拉伸模量为 3.94GPa,弯曲强度为 38.92MPa,弯曲模量为 3.66GPa,氧指数为 25.1%,性能良好,而以氧指数为指标优选出的体系阻燃剂添加量较多,导致实测力学性能太差,不满足使用要求。

由于复合材料与树脂浇铸体的阻燃性能通常一致,选取树脂综合性能最优的组 B:12% MRP、50% Al(OH)₃、2% Sb₂O₃ 制备复合材料,并与目前广泛使用的 C:反应型阻燃树脂 8175 比较,进一步考察复合材料的力学性能和阻燃性能。

2.2 树脂体系工艺性能

对上述三组优选出的树脂体系 A、B、C 进行室温粘度和凝胶时间测定,实验结果如图 1 所示。



(a) Room temperature viscosity (b) Gel time

图 1 优选树脂体系的室温粘度和凝胶时间

Fig. 1 The room temperature viscosity and gel time of the selected resin systems

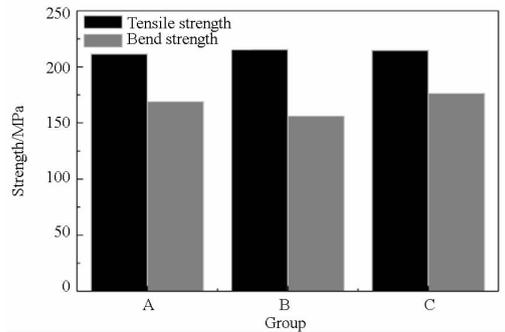
Note: The group A, B, C corresponding to Tab. 2.

由图 1 可知:A、B 两组阻燃型树脂体系粘度小,室温粘度值都在 100mPa·s 左右,大大低于 C 的粘度 550mPa·s;由于经微囊化处理的红磷在树脂体系中分散性好,整个阻燃体系稳定性较好,固化慢;凝胶时间比 C 长,超过 80min,满足 VIMP、RTM 等列车车体大尺寸复合材料部件制备工艺性能要求:粘度低于 500mPa·s,凝胶时间 60min 以上。

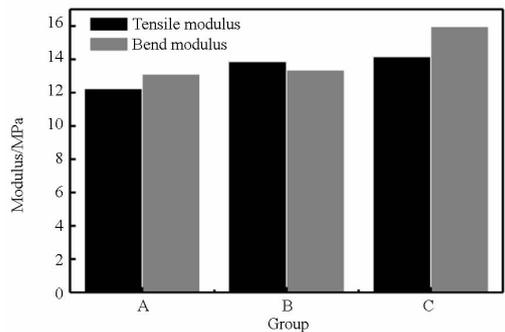
2.3 复合材料性能研究

2.3.1 力学性能

加入玻璃纤维后,由于纤维的增强作用,复合材料的力学性能大大提高。在优选的阻燃型树脂体系基础上制备的复合材料力学性能如图 2 所示。



(a) Strength of the composites



(b) Modulus of the composites

图 2 复合材料力学性能

Fig. 2 The mechanical properties of the composites

Note: The group A, B, C corresponding to Tab. 2.

由图 2 可知,采用优选的阻燃型树脂体系 A、B 制备的玻璃纤维增强复合材料的力学性能数据与 C 制备的复合材料力学性能基本相当。其中, B 的力学性能更优。这是因为经过微囊化处理的 MRP,与树脂相容性和分散性好,有利于改善相界面粘结强度而提高力学性能,故添加量大,力学性能更好^[16]。

2.3.2 阻燃性能

玻璃纤维的加入能明显改善材料的力学性能,对阻燃性能的影响却十分复杂:一方面,玻璃纤维不燃,能阻止材料的燃烧;另一方面,玻纤的“灯芯”作用,又有助于材料燃烧。此外,纤维增强复合材料的燃烧性能还与树脂含量密切相关。图 3 为各优选阻燃型树脂体系浇铸体及树脂质量含量为 55% 的玻璃纤维增强复合材料的氧指数情况。

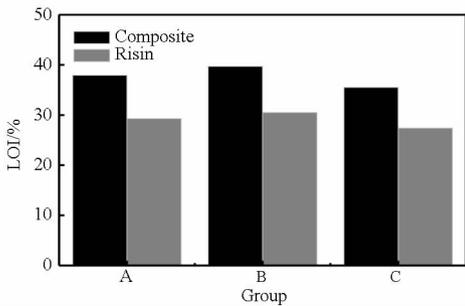


图 3 复合材料与树脂浇铸体的氧指数

Fig. 3 The limit oxygen index of the composites and corresponded resin systems

Note: The group A, B, C corresponding to Tab. 2.

由图 3 可知,复合材料试样与树脂浇铸体的氧指数大小变化趋势基本一致,且优选的体系 A、B 比参考体系 C 氧指数高,阻燃性能更佳,更不易燃烧。

综合复合材料试样的力学性能、阻燃性能和树脂体系的工艺性能,阻燃型树脂体系 B: 12% MRP、50% $\text{Al}(\text{OH})_3$ 、2% Sb_2O_3 ,无论在固化物的力学性能、阻燃性能,还是在树脂体系的工艺性能上均表现最好,可作为高速列车车体材料的预备选择。

3 结论

通过本文实验研究分析,得出以下结论:

(1) 在基体树脂中添加阻燃剂能显著提高树脂体系的阻燃性能,但使力学性能下降。

(2) 在基体树脂中加入 MRP 阻燃剂体系,当添加比例为 12% MRP、50% $\text{Al}(\text{OH})_3$ 、2% Sb_2O_3 时,阻燃型树脂体系的综合使用性能最佳。

(3) 工艺性能研究结果表明,MRP 阻燃型树脂体系的工艺性能好:室温粘度为 $100\text{mPa} \cdot \text{s}$ 左

右,凝胶时间 80min 以上,适合制造高速列车车体大尺寸复合材料部件。

(4) 综合研究结果表明,性能最优的阻燃型树脂体系配比为 12% MRP、50% $\text{Al}(\text{OH})_3$ 、2% Sb_2O_3 ,其玻璃纤维增强复合材料的拉伸强度为 215.4MPa,弯曲强度为 177.15MPa,拉伸模量为 13.85GPa,弯曲模量为 13.36GPa,氧指数为 39.7。

参考文献 (References)

- [1] Anthoine J, Gouriety J B, Rambaud P. Reduction of the sonic boom from a high-speed train entering a gallery [C] // AIAA, 2007.
- [2] 贾德民. 高速列车轻量化技术[J]. 机车电传动, 2004(4): 1-2. (in Chinese)
JIA Demin. The light weight technology of high speed train [J]. Electric Drive for Locomotives, 2004(4): 1-2. (in Chinese)
- [3] 邱桂杰, 杨洪忠, 高国强, 等. 高速列车用复合材料国内外现状与趋势[J]. 高科技纤维与应用, 2005(6): 26-30.
QIU Guijie, YANG Hongzhong, GAO Guoqiang, et al. The status quo and trend of the application of composites on high-speed train over the world [J]. Hi-tech Fiber and Application, 2005(6): 26-30. (in Chinese)
- [4] 肖加余, 刘钧, 曾竟成, 等. 复合材料在高速列车上的应用现状与趋势[J]. 机车电传动, 2003: 49-52.
XIAO Jiayu, LIU Jun, ZENG Jingcheng, et al. Application status quo and trend of composites for high-speed train [J]. Electric Drive for Locomotives, 2003: 49-52. (in Chinese)
- [5] 王泽华. 复合材料在高速列车上的应用[J]. 机械材料, 2001(10): 1-4.
WANG Zehua. Application of composite materials in high-speed train [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2001(10): 1-4. (in Chinese)
- [6] 张军, 纪奎江, 夏延致. 聚合物燃烧与阻燃技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 193-196.
ZHANG Jun, JI Kuijiang, XIA Yanjing. Polymer combustion and flame retardant technology [M]. Beijing: Chemical Industry press, 2005: 193-196. (in Chinese)
- [7] 汪关才, 卢忠远, 胡小平, 等. 无机物阻燃剂的作用机理及研究现状[J]. 材料导报, 2007, 21(2): 47-50.
WANG Guancai, LU Zhongyuan, HU Xiaoping, et al. Mechanism and research status of inorganic flame retardant. [J]. Materials Review, 2007, 21(2): 47-50. (in Chinese)
- [8] 潘健传, 陈松华, 兰芳. 阻燃剂的现状和发展[J]. 广东化工, 2007, 34(2): 46-50.
PAN Jianchuan, CHEN Guihua, LAN Fang. The current study and development of flame retardant [J]. Guangdong Chemical Industry, 2007, 34(2): 46-50. (in Chinese)
- [9] 薛恩钰, 曾敏修. 阻燃科学及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1988: 120-125.
XUE Enyu, ZENG Minxiu. Flame retardant science and applications [J]. Beijing: National Defence Industry Press, 1988: 120-125. (in Chinese)
- [10] Nishihara H, Tanji S, Kanatani R. Interactions between phosphorus and nitrogen-containing flame retardants [J]. Polymer Journal, 1998, 30(3): 163-167.

(下转第 62 页)

- intra-flow contention along multihop paths in wireless networks [C]//Proceedings of First International Conference on Broadband Networks (BroadNets), San Jose, CA, USA, 2004, 611-620.
- [5] Mao G. The maximum throughput of a wireless multi-hop path [J]. *Mobile Networks and Applications*, 2011, 16: 46-57.
- [6] Zhao H, Wang S, Xi Y, et al. Modeling intra-flow contention problem in IEEE 802.11 wireless multi-hop networks [J]. *IEEE Communications Letters*, 2010, 14(1): 18-20.
- [7] Xu K, Gerla M, Bae S. How effective is the IEEE 802.11 RTS/CTS handshake in Ad Hoc networks [C]//Proceedings of IEEE GLOBECOM, Taipei, Taiwan, 2002, 72-76.
- [8] Gupta P, Kumar P R. The capacity of wireless networks [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2000, 46(2): 388-404.
- [9] Medepalli K, Tobagi F A. Towards performance modeling of IEEE 802.11 based wireless networks: a unified framework and its applications [C]//Proceedings of 25th IEEE INFOCOM, Barcelona, Spain, 2006.
- [10] Wang K, Yang F, Zhang Q, et al. Modeling path capacity in multi-hop IEEE 802.11 networks for QoS services [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2007, 6(2): 738-749.
- [11] Kumar A, Altman E, Miorandi D, et al. New insights from a fixed-point analysis of single cell IEEE 802.11 WLANs [J]. *IEEE/ACM Transaction on Networking*, 2007, 15(3): 588-601.
- [12] Belch G, Greiner S, Meer H D, et al. Queueing networks and markov chains [M]. USA: John Wiley & Sons, Inc., 1998.
- [13] Sakurai T, Vu H L. MAC access delay of IEEE 802.11 DCF [J]. *IEEE Transaction on Wireless Communications*, 2007, 6(5): 1702-1710.
- [14] Wang K, Yang F, Zhang Q, et al. Modeling path capacity in multi-hop IEEE 802.11 networks for QoS services [J]. *IEEE Transactions Wireless Commun*, 2007, 6(2): 738-749.
- [11] Qin L Q, Huang Z X, Zhang L M, et al. Flame-retardant mechanism of magnesium oxy-chloride in epoxy resin [J]. *Journal of Wuhan University of Technology Master*, 2009(2).
- [12] Li Z Z, He W, Zhang W X, et al. Thermal, mechanical and flame retardant properties of crosslinked ethylenevinyl-acetate copolymer/magnesium hydroxide blends by ⁶⁰Co irradiation [J]. *J. Radiat. Res. Radiat. Process*, 2007(1): 37-42.
- [13] 马雅琳, 王标兵, 胡国胜. 阻燃剂及其阻燃机理的研究现状 [J]. *材料导报*, 2006, 20(z1): 392-395.
MA Yalin, WANG Biaobin, HU Guosheng. The current study on flame retardants and their flame retardant mechanism [J]. *Materials Review*, 2006, 20(z1): 392-395. (in Chinese)
- [14] 湛志鹏, 王新龙. 丙烯酸酯聚合物阻燃研究进展 [J]. *塑料助剂*, 2008(6): 9-13.
CHEN Zhipeng, WANG Xinlong. Research progress on flame retarded acrylate polymers [J]. *Plastic Assistants*, 2008(6): 9-13. (in Chinese)
- [15] 段旭光, 周崇文, 陈科. 无卤阻燃剂的应用与研究 [J]. *合成材料老化与应用*, 2009, 38(2): 34-37.
DUAN Xuguang, ZHOU Congwen, CHEN Ke. Study and application of non-halogen fire retardant [J]. *Synthetic Materials Aging and Application*, 2009, 38(2): 34-37. (in Chinese)
- [16] 王凤武, 方文彦. 包覆红磷在玻璃钢中的阻燃性能研究 [J]. *煤炭科学技术*, 2005(2): 59-61.
WANG Fengwu, FANG Wenyan. Research on flame retardant performances of red phosphorus in resin fiber [J]. *Coal Science and Technology*, 2005(2): 59-61. (in Chinese)
- [17] 周逸潇, 杨丽, 毕成良, 等. 磷系阻燃剂的现状与展望 [J]. *天津化工*, 2009, 23(1): 1-4.
ZHOU Yixiao, YANG Li, BI Chengliang, et al. The status quo and trend of phosphorus flame retardant [J]. *Tianjin Chemical Industry*, 2009, 23(1): 1-4. (in Chinese)
- [18] 安璐, 高庆, 徐祖顺, 等. 氢氧化铝及其复合体系在聚合物中的阻燃应用 [J]. *绝缘材料*, 2008, 41(1): 30-36.
AN Lu, GAO Qing, XU Zushun, et al. The flame retardant application of Al(OH)₃ and its composites in polymer [J]. *Insulating Materials*, 2008, 41(1): 30-36. (in Chinese)

(上接第 44 页)