

低烟阻燃PVC复合材料的制备与性能研究

陈荣源¹, 雷雨¹, 刘欣¹, 张福鹏¹, 李志伟², 韩琳^{1*}, 张忠厚^{1,3*}, 白宝丰^{1,3}

(1. 郑州轻工业大学材料与化学工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 河南杰科新材料有限公司, 河南 鹤壁 458000;
3. 郑州轻大产业技术研究院有限公司, 河南 郑州 450001)

摘要: 用于线缆制造的聚氯乙烯(PVC)需要具备优良的低烟及阻燃性能, 并能够保持一定的拉伸强度和断裂伸长率。研究设计4因素3水平的正交实验, 优化低烟阻燃PVC的配方, 考察PVC改性复合材料的阻燃性能、抑烟性能和拉伸性能。结果表明: 低烟阻燃PVC复合材料体系中复合阻燃剂的最佳配方为磷酸甲苯二苯酯 25 phr、硼酸锌 10 phr、三氧化二锑 4 phr、氢氧化铝与氢氧化镁(总量控制在 60 phr)配比 2:1。最优配方条件下, PVC改性复合材料的拉伸强度为 13.0 MPa, 断裂伸长率为 183.3%, 极限氧指数为 51.7%, 最大烟密度为 71.4%, 烟密度等级为 49.6。制备的低烟阻燃PVC复合材料具有优异的低烟阻燃性能, 同时具有较优的拉伸性能, 能够满足高性能的线缆使用要求。

关键词: 聚氯乙烯; 抑烟; 阻燃; 复合材料

中图分类号: TQ325.1

文献标志码: A

文章编号: 1005-3360(2026)01-0027-05

DOI: 10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.01.005

Preparation and Performance Study of Low-smoke Flame-retardant PVC Composites

CHEN Rongyuan¹, LEI Yu¹, LIU Xin¹, ZHANG Fupeng¹, LI Zhiwei², HAN Lin^{1*}, ZHANG Zhonghou^{1,3*}, BAI Baofeng^{1,3}

(1. Department of Materials and Chemical Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001, China;
2. Henan Jieke New Materials Co., Ltd., Hebi 458000, China; 3. ZZULI Research Institute of Industrial Technology, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Polyvinyl chloride (PVC) used for cable manufacturing needed to have excellent low-smoke and flame-retardant properties, while maintaining a certain tensile strength and elongation at break. A four-factor three-level orthogonal experimental design was employed to optimize the formulation of low-smoke flame-retardant PVC and to evaluate the flame-retardant, smoke-suppression, and tensile properties of the modified PVC composites. The results showed that, within the low-smoke flame-retardant PVC system, the optimal formulation of the composite flame retardants was: Cresyl diphenyl phosphate 25 phr, zinc borate 10 phr, antimony trioxide 4 phr, and a 2 : 1 ratio of aluminum hydroxide to magnesium hydroxide with a total content of 60 phr. Under the optimal formulation conditions, the tensile strength of the PVC modified composite was 13.0 MPa, the elongation at break was 183.3%, the limiting oxygen index was 51.7%, the maximum smoke density was 71.4%, and the smoke density rating was 49.6. The low-smoke flame-retardant PVC composites prepared had excellent low-smoke and flame-retardant properties, as well as relatively good tensile properties, meeting the requirements for high-performance cable applications.

Keywords: PVC; Smoke-suppressing; Flame-retardant; Composites

聚氯乙烯(PVC)是一类用途广泛的热塑性塑料, 其凭借价格低、绝缘性优异、易加工、使用寿命长等优点, 被广泛应

用于电线电缆、包装、管材等领域^[1-3]。在电线电缆行业, PVC树脂因其独特的分子结构(氯元素含量高达56%)而具

收稿日期 Submitted date 2025-03-18; 修回日期 Revised date 2025-04-23; 录用日期 Accepted date 2025-05-27

基金项目: 河南省重点研发与推广专项(252102230149); 河南省重大科技专项(231100320200); 河南省中央引导地方科技发展资金项目(Z20231811009); 郑州轻工业大学重大项目成果培育项目(2022ZDPY0106)

*联系人, hanlin@zzuli.edu.cn; gxnc1272@163.com

引用本文: 陈荣源, 雷雨, 刘欣, 等. 低烟阻燃PVC复合材料的制备与性能研究[J]. 塑料科技, 2026, 54(1): 27-31.

Citation: CHEN R Y, LEI Y, LIU X, et al. Preparation and performance study of low-smoke flame-retardant PVC composites[J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(1): 27-31.

有优异的耐电压性、耐化学品腐蚀性以及本征阻燃特性,其极限氧指数(LOI)可达45%,成为该领域应用最广泛的基体材料^[4-5]。然而,在电线电缆加工过程中,为改善PVC树脂的加工流动性而引入的高比例增塑剂会显著削弱其阻燃特性^[6-7]。为重建阻燃屏障,通常需要额外添加阻燃剂,以补偿因增塑剂而降低的阻燃性能^[8-9]。此外,PVC树脂燃烧时会产生大量烟气,并伴有氯化氢和氯气等有毒气体的生成^[10-11]。因此,在提高PVC阻燃性的同时有效减少其产烟量,也是改性研究的重点。PVC树脂在改性过程中,既要提高其阻燃性,降低产烟量,又要保持材料良好的强度和韧性,这是PVC用于电线电缆领域的关键技术要点。

目前,PVC树脂中添加的阻燃剂可分为有机类和无机类两种^[12-15]。有机阻燃剂主要包括磷酸酯、聚磷酸铵、三聚氰胺等,其与PVC基材相容性好且阻燃效率高。RAJPUT等^[16]以决明子油合成高效含磷阻燃增塑剂(ECFSO-P),将其掺入PVC中后,LOI和烟密度等级(SDR)分别提高6.70%和17.40%,断裂伸长率提升至508.83%,兼顾了阻燃性能与柔韧性。无机阻燃剂则具有热稳定性好、环保、生产成本低等优点,常用的有氢氧化铝、氢氧化镁、三氧化二锑、羟基锡酸锌等。ZHANG等^[17]采用硼酸锌改性三氧化二锑,将其加入PVC。阻燃和抑烟测试结果显示,复合材料的LOI最大值达37.5%,并通过UL94 V-0评级。王文娟等^[18]在PVC中掺杂适量氢氧化镁(颗粒状MHP和片状MHW),研究其对阻燃性能的影响。结果表明,PVC/10% MHP试样的总放热量为11.6 MJ/m²,下降72.1%,总产烟量为0.06 m³/kg,下降92.9%,在600 °C时质量保留率为28.6%,热稳定性得到提升。两类阻燃剂凭借自身特性,均在PVC阻燃领域发挥重要作用。

本实验以低烟阻燃PVC复合材料为研究对象,使用有机无机阻燃剂协同阻燃构建磷酸甲苯二苯酯^[19]、硼酸锌^[20]、三氧化二锑^[21]和氢氧化铝/氢氧化镁^[22-24]抑烟阻燃复配体系,通过正交实验设计,优化低烟阻燃PVC配方,实现提高PVC阻燃性的同时降低其产烟量,并保持一定的强度和韧性的研究目标。

1 实验部分

1.1 主要原料

PVC, HG-2500, 韩华化学(宁波)有限公司; 偏苯三酸三辛酯, 3319-31-1, 山东优索化工科技有限公司; 葵二酸二辛酯, HG 3502-2008, 天元航材(营口)科技股份有限公司; 钙锌稳定剂, CZ-8012, 东莞市鼎海塑胶化工有限公司; 增韧剂, ACR-401, 青岛佳百特新材料科技有限公司; 钼酸锌, 工业级, 中升化学(杭州)有限公司; 铝酸酯, DL-411, 东莞市山一塑化有限公司; 抗氧化剂, B215, 德国巴斯夫; 氢氧化铝, H-WF-1, 中铝山东有限公司; 氢氧化镁, A7, 奇克(上海)实业有限公司; 磷酸甲苯二苯酯, DPK, 德国朗盛化学有限公司; 硼酸锌, ZB2335, 山东优索化工科技有限公司; 三氧化二锑, ZB, 江苏济麦阻燃材料科技有限公司。

1.2 仪器与设备

高速混合机, SHR-10A, 张家港市华美有限公司; 两辊开炼机, ELB-KL-4, 青岛鑫程一鸣橡胶机械有限公司; 平板硫化机, 100T, 哈尔滨哈普电气技术公司; 氧指数测试仪, JL-JF-3, 南京炯雷仪器设备有限公司; 烟密度测定仪, KL-JCRS-1, 广州华创智造仪器有限公司; 电子万能试验机, CMT6104, 深圳市新三思计量技术有限公司; 简支梁冲击试验机, HG-066, 天津汉工仪器销售有限公司; 扫描电子显微镜(SEM), JSM-6490LV, 日本电子株式会社。

1.3 样品制备

PVC改性基础配方设计: PVC 100.0 phr, 偏苯三酸三辛酯 5.0 phr, 葵二酸二辛酯 15.0 phr, 钙锌稳定剂 6.5 phr, 增韧剂 3.0 phr, 钼酸锌 12.0 phr, 铝酸酯 2.0 phr, 抗氧化剂 0.5 phr, 氢氧化铝 30.0 phr, 氢氧化镁 30.0 phr, 磷酸甲苯二苯酯 25.0 phr, 硼酸锌 12.0 phr, 三氧化二锑 4.0 phr。

PVC复合材料制备: 将配方中固体粉末在高混机中预混5 min, 加入两辊开炼机中进行混炼, 混炼温度前辊175 °C, 后辊165 °C, 混炼8 min, 开炼后的物料进行模压成型。模压温度180 °C, 模压压力10 MPa, 模压时间5 min。

1.4 性能测试与表征

拉伸性能测试: 按照GB/T 1040.2—2022, 以50 mm/min的速率进行测试。样品尺寸为75 mm×4 mm×2 mm。

LOI测试: 按照GB/T 2406.2—2009进行测试。样品尺寸为130 mm×6.5 mm×3.2 mm。

烟密度测试: 按照GB/T 8627—2007对最大烟密度和烟密度等级进行测试。样品尺寸为25 mm×25 mm×4 mm。

SEM测试: 对试样断面进行喷金处理, 观察样品断面微观结构。

2 结果与讨论

2.1 实验设计

正交实验是一种可以对多因素实验进行有效研究的方法^[25-27], 利用正交实验结果可系统分析多因素对阻燃性能的影响。围绕PVC的低烟阻燃改性, 在基础配方的基础上, 设计4因素3水平的正交实验, 分别考察磷酸甲苯二苯酯添加量(A)、硼酸锌添加量(B)、三氧化二锑添加量(C)以及氢氧化铝与氢氧化镁的配比(D)(因素D总量控制在60 phr)4个因素对PVC复合材料的拉伸性能、LOI、烟密度的影响。表1为L₉(3⁴)正交实验因素水平设计。

表1 L₉(3⁴)正交实验因素水平设计

水平	A/phr	B/phr	C/phr	D
1	23	10	3	1:1
2	25	12	4	1:2
3	27	14	5	2:1

2.2 拉伸强度分析

表2为L₉(3⁴)正交实验拉伸强度结果。从表2可以看

出,各因素对复合体系的拉伸强度影响的 R 值排序为: $R_A > R_C > R_B > R_D$, A 因素最佳水平为1, B 因素最佳水平为2, C 因素最佳水平为3, D 因素最佳水平为2,故选取最佳水平组合为 $A_1B_2C_3D_2$ 。阻燃剂磷酸甲苯二苯酯的添加量对复合体系拉伸强度的影响最大,其他为次要影响因素。相较于另外3种阻燃剂,磷酸甲苯二苯酯不仅起到阻燃的作用,还对基体PVC有一定的增塑作用,增强了基体大分子链间的滑移,对拉伸强度会产生明显的影响。

对于拉伸强度,复合阻燃剂的最佳添加量为:磷酸甲苯二苯酯 23 phr、硼酸锌 12 phr、三氧化二锑 5 phr、氢氧化铝与氢氧化镁(总量控制 60 phr)的配比 1:2。

表2 $L_9(3^4)$ 正交实验拉伸强度结果Tab.2 Tensile strength result of $L_9(3^4)$ orthogonal experiment

实验号	A/phr	B/phr	C/phr	D	拉伸强度/ MPa
1	23	10	3	1:1	12.54
2	23	12	4	1:2	13.93
3	23	14	5	2:1	13.48
4	25	10	4	2:1	13.00
5	25	12	5	1:1	13.96
6	25	14	3	1:2	12.04
7	27	10	5	1:2	12.38
8	27	12	3	2:1	11.66
9	27	14	4	1:1	11.72
k_1	13.317	12.640	12.080	12.740	
k_2	13.000	13.183	12.883	12.783	
k_3	11.920	12.413	13.273	12.713	
R	1.397	0.770	1.193	0.070	

2.3 断裂伸长率分析

表3为 $L_9(3^4)$ 正交实验断裂伸长率结果。从表3可以看出,各因素对复合体系断裂伸长率影响的 R 值排序为: $R_B > R_D > R_A > R_C$, A 因素最佳水平为2, B 因素最佳水平为2, C 因素最佳水平为3, D 因素最佳水平为1,故选取最佳水平组合为 $A_2B_2C_3D_1$ 。硼酸锌的添加量对复合体系的拉伸断裂伸长率影响最为显著,其次是氢氧化铝与氢氧化镁的配比。由于阻燃剂硼酸锌、氢氧化铝和氢氧化镁都属于无机粒子,加入PVC中后,由于无机粒子在基体中分散分布情况以及与基体的相容性不佳会降低PVC的断裂伸长率,而作为阻燃剂使用,硼酸锌、氢氧化铝和氢氧化镁的添加量较大,3种总添加量达到70 phr,当改变硼酸锌的添加量以及氢氧化铝和氢氧化镁的配比时,对无机粒子的分散、分布情况产生直接的影响,从而在受到拉伸应力时,对断裂伸长率造成影响。

对于断裂伸长率,复合阻燃剂的最佳添加量为:磷酸甲苯二苯酯 25 phr、硼酸锌 12 phr、三氧化二锑 5 phr、氢氧化铝与氢氧化镁(总量控制 60 phr)的配比 1:1。

2.4 LOI分析

表4为 $L_9(3^4)$ 正交实验LOI结果。从表4可以看出,各因素对复合体系LOI影响的 R 值排序为: $R_D > R_C > R_A > R_B$, A 因素最佳水平为1, B 因素最佳水平为3, C 因素最佳水平为2, D 因素最佳水平为1,故选取最佳水平组合为 $A_1B_3C_2D_1$ 。氢氧化铝与氢氧化镁的配比对复合体系的LOI影响相对较强。其原因是氢氧化铝和氢氧化镁复配后添加量较大,而二者的配比会影响二者在PVC基体中的分散分布情况,从而影响试样在燃烧过程中的LOI。

对于LOI,复合阻燃剂的最佳添加量为:磷酸甲苯二苯酯 23 phr、硼酸锌 14 phr、三氧化二锑 4 phr、氢氧化铝与氢氧化镁(总量控制 60 phr)的配比 1:1。

表3 $L_9(3^4)$ 正交实验断裂伸长率结果Tab.3 Elongation at break result of $L_9(3^4)$ orthogonal experiment

实验号	A/phr	B/phr	C/phr	D	断裂伸 长率/%
1	23	10	3	1:1	191.8
2	23	12	4	1:2	189.3
3	23	14	5	2:1	162.5
4	25	10	4	2:1	183.3
5	25	12	5	1:1	200.6
6	25	14	3	1:2	176.4
7	27	10	5	1:2	191.7
8	27	12	3	2:1	186.2
9	27	14	4	1:1	165.4
k_1	181.200	188.933	184.800	185.933	
k_2	186.767	192.033	179.333	185.800	
k_3	181.100	168.100	184.933	177.333	
R	5.667	23.933	5.600	8.600	

表4 $L_9(3^4)$ 正交实验LOI结果Tab.4 LOI result of $L_9(3^4)$ orthogonal experiment

实验号	A/phr	B/phr	C/phr	D	LOI/%
1	23	10	3	1:1	51.8
2	23	12	4	1:2	50.4
3	23	14	5	2:1	52.5
4	25	10	4	2:1	51.7
5	25	12	5	1:1	51.8
6	25	14	3	1:2	48.9
7	27	10	5	1:2	49.7
8	27	12	3	2:1	50.0
9	27	14	4	1:1	52.1
k_1	51.567	51.067	50.233	51.900	
k_2	50.800	50.733	51.400	49.667	
k_3	50.600	51.167	51.333	51.400	
R	0.967	0.434	1.167	2.233	

2.5 最大烟密度和烟密度等级分析

表5和表6为 $L_9(3^4)$ 正交实验最大烟密度和烟密度等级结果。从表5和表6可以看出,各因素对复合体系最大烟密度影响的 R 值排序为: $R_D > R_B > R_C > R_A$, A 因素最佳水平为2, B 因素最佳水平为1, C 因素最佳水平为2, D 因素最佳水平为3,故选取最佳水平组合为 $A_2B_1C_2D_3$ 。各因素对复合体系烟密度等级影响的 R 值排序为: $R_C > R_D > R_A > R_B$, A 因素最佳水平为2, B 因素最佳水平为1, C 因素最佳水平为2, D 因素最佳水平为3,故选取最佳水平组合为 $A_2B_1C_2D_3$ 。

对于烟密度和烟密度等级,复合阻燃剂的最佳添加量为:磷酸甲苯二苯酯 25 phr、硼酸锌 10 phr、三氧化二锑 4 phr、氢氧化铝与氢氧化镁(总量控制 60 phr)的配比 2:1。

表5 $L_9(3^4)$ 正交实验最大烟密度结果

Tab.5 Maximum smoke density result of $L_9(3^4)$ orthogonal experiment

实验号	A/phr	B/phr	C/phr	D	最大烟密度/%
1	23	10	3	1:1	80.53
2	23	12	4	1:2	82.84
3	23	14	5	2:1	84.10
4	25	10	4	2:1	71.40
5	25	12	5	1:1	85.43
6	25	14	3	1:2	84.16
7	27	10	5	1:2	85.15
8	27	12	3	2:1	75.84
9	27	14	4	1:1	86.03
k_1	82.490	79.027	80.177	83.997	
k_2	80.330	81.370	80.090	84.050	
k_3	82.340	84.763	84.893	77.113	
R	2.160	5.736	4.803	6.937	

2.6 配方优化分析

正交实验分析了复合阻燃剂中4个因素对PVC复合材料的拉伸强度、断裂伸长率、LOI和最大烟密度及烟密度等级的影响,确定了影响拉伸强度的复合阻燃剂最佳水平组合为 $A_1B_2C_3D_2$ (记为1#),影响断裂伸长率的复合阻燃

剂最佳水平组合为 $A_2B_2C_3D_1$ (记为2#),影响LOI的复合阻燃剂最佳水平组合为 $A_1B_3C_2D_1$ (记为3#),影响最大烟密度和烟密度等级的复合阻燃剂最佳水平组合为 $A_2B_1C_2D_3$ (记为4#)。

表6 $L_9(3^4)$ 正交实验烟密度等级结果

Tab.6 Smoke density rank result of $L_9(3^4)$ orthogonal experiment

实验号	A/phr	B/phr	C/phr	D	烟密度等级
1	23	10	3	1:1	61.42
2	23	12	4	1:2	59.70
3	23	14	5	2:1	60.94
4	25	10	4	2:1	49.60
5	25	12	5	1:1	65.89
6	25	14	3	1:2	58.95
7	27	10	5	1:2	66.91
8	27	12	3	2:1	55.89
9	27	14	4	1:1	59.77
k_1	60.687	59.310	58.753	62.360	
k_2	58.147	60.493	56.357	61.853	
k_3	60.857	59.887	64.580	55.477	
R	2.710	1.183	8.223	6.883	

表7为低烟阻燃PVC复合材料优化配方性能。其中,2#和4#两组分别对应正交表中的5号组和4号组,1#和3#为补充验证组。针对拉伸强度,与表2结果对照,1#组未超过最优值5号组;针对LOI,与表4结果对照,3#组未超过最优值3号组。结合表7中4个优化组的性能可知,拉伸强度均可达到13.0 MPa,断裂伸长率可以达到150%以上,LOI可以达到50%,而最大烟密度和烟密度等级差别较大。综合考虑,在兼顾拉伸性能和LOI的较高水平下,4#组具有更好的抑烟性能,其拉伸强度为13.0 MPa,断裂伸长率为183.3%,LOI为51.7%,且最大烟密度和烟密度等级相对最低,分别为71.4%和49.6,具有更优的抑烟阻燃性能,同时具有较优的拉伸性能。本研究低烟阻燃PVC改性的最优配方为:磷酸甲苯二苯酯 25 phr、硼酸锌 10 phr、三氧化二锑 4 phr、氢氧化铝与氢氧化镁(总量控制 60 phr)配比 2:1。

表7 低烟阻燃PVC复合材料优化配方性能

Tab.7 Performance of optimized formula of low-smoke flame-retardant PVC composites

样品编号	拉伸强度/MPa	断裂伸长率/%	LOI/%	最大烟密度/%	烟密度等级
1#	13.2	180.7	50.7	83.2	59.1
2#	14.0	200.6	51.8	85.4	65.9
3#	13.1	186.4	51.2	82.8	60.3
4#	13.0	183.3	51.7	71.4	49.6

2.7 微观形貌分析

低烟阻燃PVC复合材料中加入大量的助剂,特别是抑

烟阻燃剂,这些助剂在基体中的分散性对材料的综合性能也有着重要的影响。图1为低烟阻燃PVC复合材料(4#的

断面SEM照片,从图1可以看出,复合材料中的助剂无机粒子能够较好地分散于基体中,而且与基体间展示出较好的界面特征,从而也反映出该体系下复合阻燃剂良好的分散性对PVC抑烟、阻燃性能的促进作用。

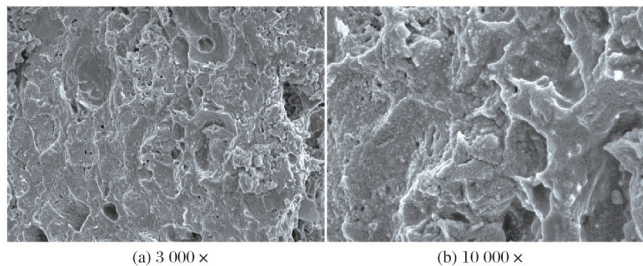


图1 低烟阻燃PVC复合材料(4#)的断面SEM照片
Fig.1 SEM images of cross-section of low-smoke flame-retardant PVC composite (4#)

3 结论

正交实验结果表明,低烟阻燃PVC复合材料体系中复合阻燃剂的最佳添加量为:磷酸甲苯二苯酯25 phr、硼酸锌10 phr、三氧化二锑4 phr、氢氧化铝与氢氧化镁(总量控制在60 phr)的配比2:1。最优配方下,复合材料的拉伸强度为13.0 MPa,断裂伸长率为183.3%,LOI为51.7%,最大烟密度为71.4%,烟密度等级为49.6,所制备的低烟阻燃PVC复合材料具有优异的低烟阻燃性能,同时具有较优的拉伸性能。

参考文献

- [1] EDO G I, NDUDI W, ALI A B M, et al. Poly(vinyl chloride)(PVC): An updated review of its properties, polymerization, modification, recycling, and applications[J]. Journal of Materials Science, 2024, 59(47): 21605-21648.
- [2] 何津,汪振武,罗琼林,等. 聚氯乙烯/锡酸锌复合材料的制备及性能研究[J]. 塑料科技, 2024, 52(12): 85-88.
- [3] 陈立全,洪建婷,宁立新,等. 磷-锡环保复合协效阻燃剂制备及其在PVC中的应用[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2024, 30(3): 373-389.
- [4] CHEN S, WANG Y T, AN Z H, et al. Stability, antibacterial ability, and inhibition of "zinc burning" of amitrole as thermal stabilizer for transparent poly(vinyl chloride) [J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2019, 137(2): 437-446.
- [5] 张玲,陈婷婷,张军. 增塑聚氯乙烯阻燃抑烟研究进展[J]. 现代塑料加工应用, 2024, 36(4): 48-51.
- [6] 谢雯,曾笑. 聚氯乙烯(PVC)阻燃抑烟的研究进展[J]. 塑料助剂, 2017(6): 5-9, 24.
- [7] 曹新鑫,罗四海,张崇,等. 聚氯乙烯树脂阻燃抑烟性能的研究进展[J]. 材料导报, 2012, 26(19): 78-80.
- [8] 李佳宇. 电线电缆用聚氯乙烯复合材料的阻燃性能和力学性能研究[J]. 塑料科技, 2023, 51(11): 65-68.
- [9] GONG T, XIE Q Y, HUANG X Y. Fire behaviors of flame-retardant cables part I: Decomposition, swelling and spontaneous ignition[J]. Fire Safety Journal, 2018, 95: 113-121.
- [10] LI B. Influence of polymer additives on thermal decomposition and smoke emission of poly(vinyl chloride)[J]. Polymer Degradation and Stability, 2003, 82(3): 467-476.
- [11] XIAO H B, HUANG X, HUANG W Y, et al. Synthesis of phosphorus-nitrogen synergistic flame retardant containing pyrimidine ring/vanillin for improving flame retardancy, smoke suppressing, and mechanical properties of epoxy resin[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2025, 142(14): e56678.
- [12] CHEUNG S J, MASUD N, ROBISON-SMITH C, et al. Assessing the chemical interactions and biological effects of a petrochemical and bio-based plastic with a common plastic flame retardant and solvent[J]. Science of The Total Environment, 2025, 958: 177958.
- [13] LI Y, QI L J, LIU Y F, et al. Recent advances in halogen-free flame retardants for polyolefin cable sheath materials[J]. Polymers, 2022, 14(14): 2876.
- [14] CHEN Y N, WU Q S, LI N, et al. The flame retardancy and smoke suppression performance of polyvinyl chloride composites with an efficient flame retardant system[J]. Coatings, 2023, 13(10): 1814.
- [15] FEUCHTER H, POUTCH F, BEARD A. The impact of halogen free phosphorus, inorganic and nitrogen flame retardants on the toxicity and density of smoke from 10 common polymers[J]. Fire and Materials, 2023, 47(8): 1003-1023.
- [16] RAJPUT C V, SASTRY N V, CHIKHALIYA N P. Phosphorus-containing flame retardant plasticizer based on Cassia fistula seed oil and their application in poly(vinyl chloride) films[J]. Industrial Crops and Products, 2023, 203: 117120.
- [17] ZHANG B, ZENG S H. Improving the flame retardancy and smoke suppression of flexible PVC by incorporating zinc borate-modified diantimony trioxide[J]. Fire and Materials, 2024, 48(6): 657-667.
- [18] 王文娟,陈静静,陈峙. 片状和颗粒状氢氧化镁对聚氯乙烯力学性能和阻燃性能的影响[J]. 塑料科技, 2024, 52(9): 111-115.
- [19] 李刚,尤飞,李丹,等. 磷酸甲苯二苯酯杂化硅溶胶后整理棉织物的阻燃特性及机制分析[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2021, 43(2): 189-196.
- [20] 尹国杰,陈平绪,叶南飏,等. 聚氯乙烯/埃洛石纳米弹性体材料的结构与性能[J]. 弹性体, 2024, 34(5): 26-31.
- [21] XU J L, LI C S, REN S B, et al. Influence of ammonium octamolybdate on flame retardancy and smoke suppression of PVC matrix flame retardant composites[J]. International Polymer Processing, 2022, 37(3): 316-328.
- [22] 四季春,郑水林,路迈西. 无机复合阻燃填料在软质聚氯乙烯中的应用研究[J]. 机械工程材料, 2004(12): 26-28.
- [23] JIANG Y N, YANG Z H, SU Q S, et al. Preparation of magnesium-aluminum hydrotalcite by mechanochemical method and its application as heat stabilizer in poly(vinyl chloride) [J]. Materials, 2020, 13(22): 5223.
- [24] 刘晓媛,鲍鑫伊,刘文慧,等. 纳米氧化钼杂化氢氧化镁及其对软质PVC阻燃抑烟性能的影响[J]. 复合材料学报, 2025(8): 4579-4593.
- [25] 王宇,赵兴龙,张瑞,等. 中模量聚丙烯镀铝膜芯层专用料性能研究[J]. 塑料科技, 2024, 52(4): 65-69.
- [26] 曾书航,王泽艳,李智力,等. 基于BP神经网络的聚丙烯/氢氧化镁复合材料阻燃性能预测模型[J]. 塑料科技, 2024, 52(5): 18-22.
- [27] FANG Z P, GUO Z H, MA H Y, et al. Study of a halogen-free flame-retarded polypropylene composition with balanced strength and toughness[J]. International Journal of Materials and Product Technology, 2010, 37(3/4): 350-357.