

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2022.06.025

超细氢氧化镁在硬质 PVC 阻燃板材中的应用

邓克文¹, 彭鹤松¹, 吴维冰¹, 邱文福¹, 李晓丹^{1,2}

(1. 江西广源化工有限责任公司, 江西吉安 331500; 2. 井冈山大学, 江西吉安 343000)

摘要: 利用物理研磨法制备了 3 000 目的氢氧化镁 (MH) (GY-3000)、6 000 目的 MH (GY-6000), 通过硅烷偶联剂 R-903 对 GY-3000 进行改性, 得到活性 MH GY-3000, 并对它们的物理性能进行对比。用这三种不同牌号的 MH 来替代 Sb_2O_3 , 可以大幅降低成本, 提高抑烟性能。将三种粉体按照 4 份 MH 代替 1 份 Sb_2O_3 的比例, 制备了一系列的聚氯乙烯 (PVC)/MH 复合材料, 并对其热性能、极限氧指数、烟密度、拉伸性能、冲击性能进行了研究。研究表明, 当用 12 份 GY-6000 代替 3 份 Sb_2O_3 制备的 PVC 复合材料表现出最佳的综合性能, 该种 MH 具备可替代部分 Sb_2O_3 的潜力, 其复合材料的极限氧指数上升明显, 可达到 47.0%, 烟密度下降显著, 其复合材料的最大烟密度为 74.64%, 还可以有效改善复合材料的热稳定性和最终残炭率, 其 800℃ 残炭率最高达到 37.3%, 没有对复合材料力学性能造成不良影响, 反而具有最佳拉伸强度和缺口冲击强度, 分别为 28.9 MPa 和 5.42 kJ/m²。

关键词: 氢氧化镁; 硬质 PVC; 热稳定性; 阻燃抑烟; 协同效应

中图分类号: TQ325.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2022)06-0149-05

Application of Superfine Magnesium Hydroxide in Rigid PVC Flame Retardant Board

Deng Kewen¹, Peng Hesong¹, Wu Weibing¹, Qiu Wenfu¹, Li Xiaodan^{1,2}

(1. Jiangxi Guangyuan Chemical Co., Ltd., Ji'an 331500, China; 2. Jinggangshan University, Ji'an 343000, China)

Abstract: The 3 000 mesh magnesium hydroxide (GY-3000) and 6 000 mesh magnesium hydroxide (GY-6000) were prepared by physical grinding method. GY-3000 was modified by silane coupling agent (R-903) to obtain active GY3000 magnesium hydroxide, and their physical properties were compared. Using these three different brands of magnesium hydroxide to replace Sb_2O_3 can greatly reduce the cost and improve the smoke suppression performance. A series of polyethylene (PVC) magnesium/hydroxide (MH) composites were prepared with four parts of magnesium hydroxide instead of one part of Sb_2O_3 . Their thermal properties, oxygen index, smoke density, tensile properties and impact properties were studied. The results show that when PVC composite prepared with 12 parts GY-6000 instead of 3 parts Sb_2O_3 shows the best comprehensive properties, this kind of magnesium hydroxide has the potential to replace part of Sb_2O_3 . The limiting oxygen index of the composite increases significantly, reaching 47%, and the smoke density decreases significantly. The maximum smoke density of the composite is 74.64%, which can also effectively improve the thermal stability and final carbon residue rate of the composite. The highest residual carbon rate at 800℃ is 37.3%, which has no adverse effect on the mechanical properties of the composites. On the contrary, it has the best tensile properties and impact properties, which are 28.9 MPa and 5.4 kJ/m² respectively.

Keywords: magnesium hydroxide; rigid PVC; thermal stability; flame retardant and smoke suppression; synergistic effect

聚氯乙烯 (PVC) 是常用的一种热塑性通用塑料^[1-3], 由于其具有优良的力学性能、耐腐蚀性能、抗老化和阻燃性能, 被广泛应用于建筑材料中。硬质 PVC 主要用于硬质管材、管件或各种型材^[4-6], 比如给水 (非饮用水)、排水管、雨水管、废水管、塑钢门

窗等。虽然硬质 PVC 由于添加增塑剂的量少, 阻燃性能优于软质 PVC 材料, 但是在阻燃抑烟方面仍然需要改善, 因为 PVC 中含有氯, 很容易在燃烧过程中产生大量有害酸性气体。目前 PVC 常用阻燃剂有磷系阻燃剂^[7-9], 如磷酸三戊酯、三 (氯丙基)、二

通信作者: 李晓丹, 博士, 主要研究方向为高分子及其复合材料

收稿日期: 2022-04-06

引用格式: 邓克文, 彭鹤松, 吴维冰, 等. 超细氢氧化镁在硬质 PVC 阻燃板材中的应用 [J]. 工程塑料应用, 2022, 50(6):149-153, 158.

Deng Kewen, Peng Hesong, Wu Weibing, et al. Application of superfine magnesium hydroxide in rigid PVC flame retardant board[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(6):149-153, 158.

正辛基苯基磷酸酯等磷酸酯类阻燃剂,硅酸盐类阻燃剂^[10]和无机阻燃剂^[11],如:氢氧化镁(MH)^[12-13]、石墨烯^[14-15]、羟基锡酸锌包覆碳酸钙^[16]等。结构复杂的有机阻燃剂价格昂贵,导致配方成本居高不下。大多数阻燃剂都受到价格昂贵限制,再加上制备工艺复杂,无法大规模批量生产,能真正工业化应用的非常少。无机阻燃剂以MH为代表,不仅可以起到增强的作用,还具有良好的抑烟性能,其分解产生的水气和氧化镁分别在气相和凝聚相起到阻燃抑烟作用,而且成本低廉。

笔者比较了物理法制备牌号为GY3000(3 000目)、活性GY3000(3 000目)和GY6000(6 000目)的超细MH,利用MH与Sb₂O₃较好的协同效应,并在此方面做了大量的研究工作,研究发现,将其与Sb₂O₃进行复配,用4份MH替代1份Sb₂O₃,既可以达到阻燃效果又可以有效降低成本。通过对PVC复合材料的热稳定性能、阻燃抑烟性能和力学性能的研究,优化出了性价比最高的配方体系,为超细MH的应用推广提供技术支持。

1 实验部分

1.1 主要原材料

MH:GY3000, GY6000, 硅烷偶联剂(R-903)处理的活性GY3000,江西广源化工有限责任公司;

PVC:SG5,甘肃银达化工有限公司;

Sb₂O₃:分析纯,天津市科密欧化学试剂有限公司;

钙锌复合稳定剂:工业级,武汉鑫动益化工有限公司;

硬脂酸:工业级,武汉鑫动益化工有限公司;

聚乙烯(PE)蜡:工业级,武汉鑫动益化工有限公司;

氯化聚乙烯(CPE):工业级,山东庆亿鑫化工科技有限公司;

邻苯二甲酸二辛酯(DOP):化学纯,保定市铁思达包装材料有限公司;

超细碳酸钙:GY-616,工业级,江西广源化工有限责任公司;

硅烷偶联剂:R-903,化学纯,信越化学工业株式会社。

1.2 主要设备及仪器

极限氧指数测定仪:JF-5型,扬州昌哲试验机械有限公司;

万能力学测试机:UTM-1422型,承德金健检测

仪器有限公司;

烟密度测试仪:ATS-JCY-03型,上海埃提森仪器科技有限公司;

垂直燃烧试验机:CZ9040型,扬州昌哲试验机械有限公司;

锥型双螺杆挤出机:ECPT型,哈尔滨哈普电气技术有限公司热失重分析仪;

同步热分析仪:TGA/DSC3+型,瑞士梅特勒-托利多集团;

比表面(BET)仪:NOVE2000e型,美国康塔仪器有限公司;

激光粒度仪:MS-3000E型,英国马尔文仪器有限公司;

白度测试仪:SBDY型,上海悦丰仪器仪表有限公司。

1.3 试样制备

GY-3000制备方法:通过机械研磨制备;

GY-6000制备方法:通过水磨法制备;

活性GY-3000制备方法:将一定量的硅烷偶联剂(R-903)加入反应器中,再将MH GY-3000加入其中,搅拌,并加热至40℃,反应2 h,再经过离心、洗涤2~3次、100℃干燥24 h,即得活性GY-3000。

为考察GY-3000、活性GY-3000和GY-6000 MH粉体与Sb₂O₃的协同阻燃体系对硬质PVC材料的力学性能、阻燃性能和热性能的影响,设计配方见表1。配方中另加钙锌复合稳定剂5.5份,硬脂酸0.6份,PE蜡0.8份,CPE6份,DOP4份。

表1 MH和Sb₂O₃协同阻燃PVC体系配方表

组分	0 [#]	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]	5 [#]	6 [#]	7 [#]	8 [#]	9 [#]	10 [#]
PVC	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
GY-616	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
GY-3000	0	0	4	8	12	/	/	/	/	/	/
活性GY-3000	/	/	/	/	/	4	8	12	/	/	/
GY-6000	/	/	/	/	/	/	/	/	4	8	12
Sb ₂ O ₃	0	5	4	3	2	4	3	2	4	3	2

按照配方表比例混合原材料,放入挤出机料筒,在挤出机上180~195℃挤出5 mm的薄片,然后制作成相应尺寸,分别用于极限氧指数、烟密度、垂直燃烧、拉伸强度、缺口冲击强度测试试样。

1.4 性能表征

粒径分布:使用激光颗粒分布测量仪测量粉体的粒径及其分布。

比表面积:采用BET仪进行测试。

白度:按照GB/T 5950-2008标准进行测试。

吸油量:按照 DB/T 5211.15-2014 进行测试。

极限氧指数:按照 GB/T 2406.2-2009 进行试样切割,尺寸为 80 mm×10 mm×5 mm,并进行测试。

烟密度:按照 GB/T 8627-2007 进行试样切割,尺寸为:25 mm×25 mm×3 mm,并进行测试。

垂直燃烧:按照 GB/T 2408-2008 进行试样切割,尺寸为 150 mm×10 mm×5 mm,并进行测试。

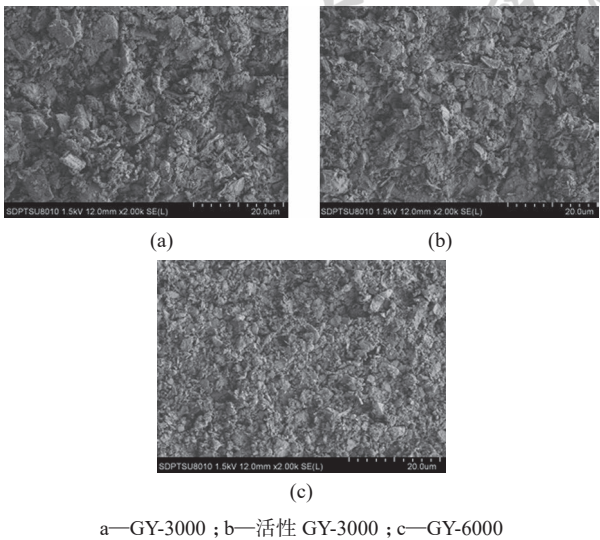
力学性能:按照 GB/T 1040.1-2006 和 GB/T 1843-2008 进行试样切割,拉伸试样尺寸为 150 mm×10 mm×5 mm,缺口冲击试样尺寸为 80 mm×10 mm×5 mm,A 型缺口,分别进行塑料拉伸性能测试和悬臂梁缺口冲击强度测试。

TG 分析:测试条件:30~800℃,N₂ 氛围,加热速度 10℃/min。

2 结果与讨论

2.1 超细 MH 的性能

GY-3000、活性 GY-3000 及 GY-6000 的 SEM 图如图 1 所示。由图 1 可知,三张 SEM 照片均呈现无规则颗粒状,活性 GY-3000 与 GY-3000 相比,粒径没有明显减小,表观形态相近,并未有效提高粉体分散性。GY-6000 颗粒明显变小,粒径分布更均匀。



a—GY-3000 ; b—活性 GY-3000 ; c—GY-6000

图 1 不同种类 MH 的 SEM 图

表 2 给出了 MH GY-3000、活性 GY-3000 及 GY-6000 的粒径、比表面积、白度和吸油值。对比 GY-3000 和活性 GY-3000 可以发现,改性后活性 GY-3000 的粒径改变不大,体现在 D_{50} 和 D_{97} 相近,比表面积也相近,白度一样,但是吸油值明显下降,说明表面处理剂能有效降低 MH 吸油值,提高粉体在 PVC 复合材料的流动性能。GY-6000 的粒径明

显减少,比表面积增加幅度较大,白度提升到 95,但是吸油值略增大,比 GY-3000 的吸油值略高。如果从白度、比表面积和吸油值的角度综合比较,GY-6000 的比表面积更突出,白度和吸油值方面表现较均衡。

表 2 GY-3000、活性 GY-3000、GY-6000 的基本物理参数

牌号	$D_{50}/\mu\text{m}$	$D_{97}/\mu\text{m}$	比表面积/ ($\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$)	白度/ 度	吸油值/ [$\text{mL}\cdot(100\text{g})^{-1}$]
GY-3000	3.538	11.16	12.566	92	34
活性 GY-3000	3.564	11.25	11.864	92	28
GY-6000	1.370	3.596	20.877	95	36

注:① D_{50} 表示一个样品的累计粒度分布百分数达到 50% 时所对应的粒径。物理意义是粒径大于它的颗粒占 50%,粒径小于它的颗粒也占 50%。

② D_{97} 表示一个样品的累计粒度分布百分数达到 97% 时所对应的粒径。物理意义是粒径小于它的颗粒占 97%。

2.2 PVC/MH 复合材料的热稳定性

表 3 为 PVC/MH 复合材料热分析数据。从表 3 数据来看,加入阻燃剂后,虽然每个阶段的失重温度降低了,但是失重率明显下降,因为 MH 分解产生的氧化镁把聚合物包覆并保护起来,阻止了聚合物的进一步分解失重,所以体现出失重量明显下降。

表 3 PVC/MH 复合材料热分析数据

试样 编号	$T_{5\%}/$ ℃	第一阶段		第二阶段		第三阶段		800℃残 炭率/%
		$T_{\text{max}}/$ ℃	失重 率/ %	$T_{\text{max}}/$ ℃	失重 率/ %	$T_{\text{max}}/$ ℃	失重 率/%	
0 [#]	278	313	20	471	51.5	733	67	30.7
1 [#]	277	305	20	471	52	719	67	30.1
2 [#]	274	296	17.5	466	48.8	695	65	32.5
3 [#]	270	298	20	468	50	704	64	32.8
4 [#]	275	299	18.3	469	44.4	683	60	37.6
5 [#]	272	293	14.9	466	48.9	701	64.3	32.8
6 [#]	274	296	16.6	469	47.4	694	63.5	34.5
7 [#]	274	298	20	472	49	682	61.2	35.6
8 [#]	274	295	15.8	468	49.5	692	65.3	32.3
9 [#]	273	301	22	471	48	688	63.6	34.4
10 [#]	276	299	17.5	468	44.3	695	60.6	37.3

注: $T_{5\%}$ 为失重 5% 时的温度, T_{max} 为最大失重温度。

图 2 为 PVC/MH 复合材料的 TG 和 DTG 曲线,硬质 PVC 的分解分为三个阶段的失重,第一阶段发生在 293~313℃,对应于分子链中的一些稳定性差的键断裂和 MH 的分解,第二阶段发生在 466~471℃,对应于聚合物的分解。第三阶段是 682~733℃,对应于成炭或者配方内的一些无机物的分解。第一阶段的失重量最大,失重速度也最大,尤其是加入阻燃剂后,失重量明显增加,说明 MH 发生了分解,产生了水汽,导致失重量的增加,同时水汽

也起到了稀释作用,减弱了燃烧的剧烈程度,产生的氧化镁对聚合物有包覆作用,阻止了烟气的产生。

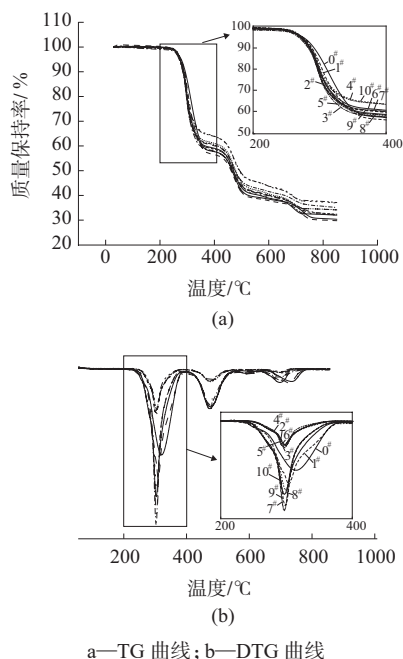


图2 PVC/MH 复合材料热分析曲线

从图 2a 的 TG 曲线可以看出,790℃以后曲线变得平稳,没有大幅度的失重,加入 MH 的材料保留率明显提高,从表 3 的 800℃残炭率来看,未添加的 PVC 的残炭率在 30.7%,单独加入 Sb_2O_3 的材料残炭率反而略下降至 30.1%,加入 MH 的复合材料,残炭率明显提高,随着 MH 加入量的提高,残炭率逐渐升高,加入 GY3000 复合材料的残炭率最高达到 37.6%,加入活性 GY3000 的残炭率最高达到 35.6%,而加入 GY6000 的复合材料残炭率则达到 37.3%。说明 MH 的加入,阻止了聚合物的分解,促进聚合物成炭,其阻燃作用主要发生在气相和凝聚相中,在气相中,产生的水汽可以稀释、降温并抑制燃烧作用,生成的氧化镁在凝聚相中的作用是阻隔,阻止聚合物的进一步分解,增加了残炭率。

2.3 PVC/MH 复合材料的力学性能

图 3 为 PVC 和添加不同牌号的 MH 和 Sb_2O_3 的 PVC 复合材料的拉伸强度。从图 3 可以看出,未添加阻燃剂的拉伸强度为 27.3 MPa,单独添加 Sb_2O_3 的 PVC 的拉伸强度略有提高,为 28.3 MPa。添加 GY3000 的 MH 会使 PVC 制品的拉伸强度有一定的下降;添加活性 GY3000 的 PVC 拉伸强度略微下降,其中 5# 配方 (4 份 MH 代替 1 份 Sb_2O_3) 拉伸强度略有提高,为 27.8 MPa,说明活性 GY3000 经过表面处理后与 PVC 的相容性提高,从而改善了

力学性能。加入 4 份 GY6000 的 PVC 复合材料,拉伸强度会降低,但随着 MH 加入量的提高,拉伸强度随其加入量的增加逐渐越大,最高达到 28.9 MPa,明显高于其他配方,说明 MH 的粒径变小,与 PVC 的接触面积增加,拉伸性能的增强效果明显。

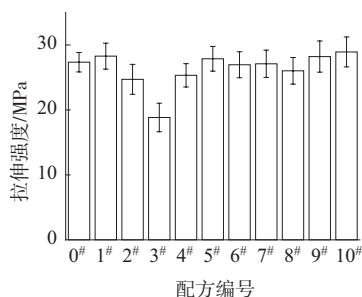


图3 PVC/MH 复合材料的拉伸强度

图 4 为 PVC 和添加不同牌号的 MH 和 Sb_2O_3 的 PVC 复合材料的缺口冲击强度。从图 4 可看出,未添加阻燃剂的缺口冲击强度为 3.27 kJ/m²,单独添加 Sb_2O_3 的 PVC 的缺口冲击强度明显提高,达到 4.55 kJ/m²。当添加 4 份 GY3000 的 PVC 复合材料缺口冲击强度大幅提高到 4 kJ/m²,但是随着 GY3000 含量继续增加,复合材料的缺口冲击强度反而下降。加入活性 GY3000 的 PVC 材料缺口冲击强度提高幅度较大,最高可以提高到 4.13 kJ/m²,说明表面处理可以有效改善力学性能。加入 GY6000 的 PVC 材料的缺口冲击强度提高幅度最大,随着 MH 加入量的提高,缺口冲击强度随着 GY6000 加入量的增加迅速上升,最高达到 5.42 kJ/m²,明显高于其它配方,说明粒径变细,微球增韧效果明显,缺口冲击强度会大幅提高。

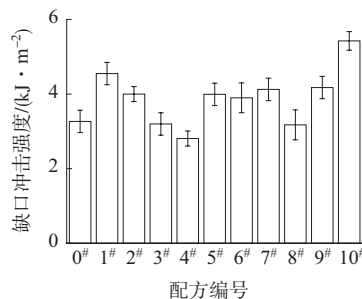


图4 PVC/MH 复合材料的冲击强度

2.4 PVC/MH 复合材料的阻燃性能

对 PVC 和添加不同牌号的 MH 和 Sb_2O_3 的 PVC 复合材料的极限氧指数和烟密度进行测试,测试数据见表 4。从表 4 中的极限氧指数数据可以看出,加入 MH 的 PVC 复合材料的极限氧指数都大幅提高,加入 8 份 GY3000 时极限氧指数最高达到 47.6%,活性 GY3000 极限氧指数略低,可能

是外表面的表面活性剂对极限氧指数有一定影响,但还是高于未添加阻燃的PVC。GY6000的加入量越多,极限氧指数越大,最高达到47.0%。抑烟数据表明,加入阻燃剂的PVC复合材料的烟密度等级明显降低。单独使用 Sb_2O_3 的PVC复合材料最大烟密度降至84.98%,GY3000的抑烟效果最好,随着加入量增加,抑烟效果不断提高,最低降至72.48%。活性GY3000和GY6000的抑烟效果略低于GY3000,PVC最大烟密度的最低值分别为75.48%和74.64%。

表4 PVC复合材料的极限氧指数和抑烟性能

试样编号	极限氧指数 /%	最大烟密度 /%	烟密度等级
0 [#]	36.8	93.61	68.25
1 [#]	43.8	84.98	64.75
2 [#]	46.8	82.45	63.52
3 [#]	47.6	75.75	61.97
4 [#]	46.6	72.48	55.31
5 [#]	46.2	80.69	62.78
6 [#]	46.4	84.29	65.48
7 [#]	45.6	75.48	61.92
8 [#]	45.8	84.14	67.24
9 [#]	46.8	89.23	64.41
10 [#]	47.0	74.64	61.74

3 结论

通过对不同种类和组分的PVC复合材料进行热性能、阻燃抑烟性能和力学性能进行研究,得出结论:

(1) 加入MH的PVC材料残炭率明显提高,其中GY3000和GY6000用12份代替3份 Sb_2O_3 复合材料在800℃的残炭率最高,分别达到37.6%和37.3%。MH在粒径控制和比表面积方面表现突出,并且可部分替代 Sb_2O_3 对于PVC复合材料的热稳定性能提升效果显著。

(2) 加入MH的PVC复合材料的极限氧指数都大幅提高,加入8份GY3000时极限氧指数最高达到47.6%,GY6000的加入量越多,极限氧指数越大,最高达到47.0%。

(3) GY3000的抑烟效果最好,随着加入量增加,抑烟效果不断提高,最低降至72.48%。活性GY3000和GY6000的抑烟效果略低于GY3000,PVC最大烟密度的最低值分别为75.48%和74.64%。

(4) 加入12份GY6000PVC复合材料的拉伸强度和缺口冲击强度最高,分别达到28.9 MPa和5.42 kJ/m²。

(5) 用12份GY-6000代替3份 Sb_2O_3 制备的

PVC复合材料表现出最佳的综合性能。

参考文献

- [1] Michel M A, Bernardo F T, Vinicius O, et al. Fire resistance performance of concrete-PVC panels with polyvinyl chloride (PVC) stay in place (SIP) formwork[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2019, 8(5):4 094–4 107.
- [2] Borukaev T A, Uzhakhova L Y, Sultigova Z K. Modification of the recipe of industrial PVC plastic for increasing its fire resistance[J]. Key Engineering Materials, 2020, 869:224–228.
- [3] Borukaev T A, Kharaev A M, Shaov A K, et al. Improving the fire resistance of PVC plastic the introduction ammonium octamolybdate [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 709(2). DOI:10.1088/1757-899X/709/2/022039.
- [4] 张启卫,章永化,周文富,等. 改性凹凸棒土填充硬质PVC的制备与性能研究[J]. 中国塑料, 2002, 16(9):49–53.
Zhang Qiwei, Zhang Yonghua, Zhou Wenfu, et al. Studies on the preparation and properties of rigid poly(vinyl chloride) filled by surface grafting polymerized-attapulgite[J]. China Plastics, 2002, 16(9):49–53.
- [5] 权英,杨明山,严庆,等. 纳米刚性粒子对硬质PVC的增韧增强效果[J]. 北京化工大学学报, 2002, 29(6):23–26.
Quan Ying, Yang Mingshan, Yan Qing, et al. Effect of the reinforcing and toughening of rigid nano-particle on RPVC[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology, 2002, 29(6):23–26.
- [6] 彭鹤松,邱文福,罗明华,等. 不同型号氢氧化镁在软质PVC中的性能对比[J]. 塑料工业, 2021, 49(12):137–142.
Peng Hesong, Qiu Wenfu, Luo Minghua, et al. Performance comparison of different types of magnesium hydroxide in soft PVC[J]. China Plastics Industry, 2021, 49(12):137–142.
- [7] Huo Siqi, Song Pingan, Yu Bin, et al. Phosphorus-containing flame retardant epoxy thermosets: Recent advances and future perspectives[J]. Elsevier Progress in Polymer Science, 2021, 114. DOI:10.1016/J.PROGPOLYMSCI.2021.101366.
- [8] Jia P Y, Zhang M, Hu L H, et al. Synthesis, application, and flame-retardant mechanism of a novel phosphorus-containing plasticizer based on castor oil for polyvinyl chloride[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2015, 120:1 731–1 740.
- [9] Jia P Y, Zhang M, Hu L H, et al. Thermal degradation behavior and flame retardant mechanism of poly (vinyl chloride) plasticized with a soybean-oil-based plasticizer containing phosphaphenanthrene groups[J]. Polymer Degradation and Stability, 2015, 121:292–302.
- [10] Daeseung Jung, Debes Bhattacharyya. Combined effect of silicate coating and phosphate loading on the performance improvement of a keratinous fiber-based flame retardant[J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 424. DOI: 10.1016/J.CEJ.2021.130484.

(下转第158页)

- Application, 2019, 47(1):8–14.
- [6] Arslan C, Dogan M. The effects of silane coupling agents on the mechanical properties of basalt fiber reinforced poly (butylene terephthalate) composites[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2018, 146:145–154.
- [7] 张志坚, 费振宇, 章建忠, 等. 短切玻璃纤维改性 PBT 的研究 [J]. *工程塑料应用*, 2011, 39(7):12–14.
- Zhang Zhijian, Fei Zhenyu, Zhang Jianzhong, et al. Study on fiberglass chopped strands reinforced PBT composite[J]. *Engineering Plastics Application*, 2011, 39(7):12–14.
- [8] 张志坚, 樊家澍, 章建忠, 等. 中国巨石热塑用玻璃纤维在汽车领域的应用 [J]. *上海塑料*, 2017(4):49–54.
- Zhang Zhijian, Fan Jiashu, Zhang Jianzhong, et al. Application of China Jushi fiberglass for thermoplastics in automobile[J]. *Shanghai Plastics*, 2017(4):49–54.
- [9] Thomason J L. Glass fibre sizing: A review[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2019, 127. DOI.org/10.1016/j.compositesa.2019.105619.
- [10] 张志坚, 谢孝勋, 章建忠. 浅析浸润剂及成形工艺对玻璃纤维性能的影响 [J]. *玻璃纤维*, 2011(4):18–22.
- Zhang Zhijian, Xie Xiaoxun, Zhang Jianzhong. Influences of sizing and fiberizing technologies on glass fiber properties[J]. *Fiber Glass*, 2011(4):18–22.
- [11] Pegoretti A. Towards sustainable structural composites: A review on the recycling of continuous-fiber-reinforced thermoplastics[J]. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 2021, 4(2):105–115.
- [12] Thomason J. A review of the analysis and characterisation of polymeric glass fibre sizings[J]. *Polymer Testing*, 2020, 85. DOI.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106421.
- [13] 祝学城. 高效润滑剂阳离子 X 的性能和应用 [J]. *玻璃钢 / 复合材料*, 2012 (A1):221–223.
- Zhu Xuecheng. The property and application of efficient lubricant cation X[J]. *Fiber Reinforced Plastics/Composites*, 2012 (A1):221–223.
- [14] 张志坚, 陆琦, 章建忠, 等. 玻纤成膜剂种类对 SMC 制品力学性能的影响 [J]. *玻璃纤维*, 2021(6):5–7.
- Zhang Zhijian, Lu Qi, Zhang Jianzhong, et al. Influence of film former in fiberglass sizing on mechanical properties of SMC composite[J]. *Fiber Glass*, 2021(6):5–7.
- [15] Pereira G C, Rzatki F D, Mazzaferro L, et al. Mechanical and thermo-physical properties of short glass fiber reinforced polybutylene terephthalate upon aging in lubricant/refrigerant mixture[J]. *Materials Research*, 2016, 19:1 310–1 318.
- [16] 聂景辉, 戚嵘嵘, 周持兴, 等. 润滑剂 TAF 对玻璃纤维增强 PBT 复合材料性能的影响 [J]. *中国塑料*, 2004(5):75–78.
- Nie Jinghui, Qi Rongrong, Zhou Chixing, et al. Effects of lubricant TAF on properties of glass-fiber-reinforced PBT blends [J]. *China Plastics*, 2004(5):75–78.
-
- (上接第 153 页)
- [11] Richard A V, Vasudevan S, Wlodzimierz K, et al. New polymer electrolyte nanocomposites: melt intercalation of poly(ethylene oxide) in mica-type silicates[J]. *Adv Mater*, 1995, 7(2):154–156.
- [12] Chen H, Wen X, Guan Y Y, et al. Effect of particle size on the flame retardancy of poly (butylene succinate)/Mg(OH)₂ composites[J]. *Fire and Materials*, 2016, 40(8):1 090–1 096.
- [13] Liu X W, Wu W H, Qu H Q, et al. Flame-retarding and mechanical properties of flexible polyvinyl chloride with surface-treated lamellar magnesium hydroxide[J]. *Journal of Macromolecular Science, Part B*, 2016, 55:115–127.
- [14] Zhang Z F, Wu W H, Zhang M J, et al. Hydrothermal synthesis of 4ZnO · B₂O₃ · H₂O/RGO hybrid material and its flame retardant behavior in flexible PVC and magnesium hydroxide composites[J]. *Applied Surface Science*, 2017, 425:896–904.
- [15] 赵秋萍, 杨柳, 赵胜斌, 等. 氮掺杂石墨烯的制备及阻燃性能研究 [J]. *化工新型材料*, 2021, 49(4):92–98.
- Zhao Qiuping, Yangliu, Zhao Shengbin, et al. Preparation of nitrogen-doped graphene and its flame retardant property[J]. *New Chemical Materials*, 2021, 49(4):92–98.
- [16] 厉娇蕊, 武晓惠, 于晓阳, 等. 羟基锡酸三聚氰胺盐及羟基锡酸金属盐复合物阻燃 PVC 的阻燃性能及热性能研究 [J]. *塑料科技*, 2015, 43(12):91–95.
- Li Jiaorui, Wu Xiaohui, Yu Xiaoyang, et al. Study on flame retardancy and thermal properties of flexible PVC treated with melamine hydroxystannate and metal hydroxy stannate composites[J]. *Plastics Science and Technology*, 2015, 43(12):91–95.