

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.05.023

赤泥-磷石膏填料对 ABS 性能的影响

黎春燕¹, 温咏兰¹, 郭建兵², 陈旭³, 冉全⁴

(1. 贵州工业职业技术学院, 贵阳 551400; 2. 贵州省材料产业技术研究院, 贵阳 550014;
3. 贵州民族大学, 贵阳 550025; 4. 六盘水市工业和信息化局, 贵州六盘水 553000)

摘要: 随着全球对环保和资源高效利用的关注日益增加, 固体废弃物的高值化应用成为科学研究的重要方向。以赤泥和磷石膏(RP)这两种典型的固体废弃物为主要原料, 通过优化配比、表面活化处理等技术手段, 制备中性填充粉体, 并将其应用于丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物(ABS)复合材料的改性研究。实验结果显示, 添加适量的 RP 填料能够显著提升 ABS 复合材料的力学性能、热稳定性和动态力学性能。通过扫描电子显微镜观察发现, RP 颗粒在 ABS 基体中分散均匀, 且随着 RP 填料含量的增加, 颗粒分布更加密集。力学性能测试表明, RP/ABS 复合材料的拉伸强度、弯曲强度和冲击强度均随 RP 填料含量的增加呈现下降趋势。热稳定性测试结果显示, 添加 RP 填料后, ABS 复合材料的热降解残余量随填料含量增加而上升, 并且热重分析曲线在快速降解阶段(400~450 °C)呈现向低温方向偏移的趋势, 复合材料的降解速率峰值温度随填料含量先下降后上升, 说明 RP 填料对 ABS 热分解具有一定的催化作用。动态力学性能测试中, 随着 RP 填料含量的增加, RP/ABS 复合材料的储能模量显著提高, 阻尼峰值强度在 RP 填料质量分数为 6% 时达到最大值, 表现出最优的能量耗散能力。

关键词: 赤泥; 磷石膏; 填料; 丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物; 力学性能

中图分类号: TQ320.663 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)05-0163-06

Effect of red mud and phosphogypsum fillers on ABS properties

LI Chunyan¹, WEN Yonglan¹, GUO Jianbing², CHEN Xu³, RAN Quan⁴

(1. Guizhou Industry Polytechnic College, Guiyang 551400, China;

2. Guizhou Institute of Materials Industry Technology, Guiyang 550014, China; 3. Guizhou Minzu University, Guiyang 550025, China;

4. Liupanshui Industrial and Information Technology Bureau, Liupanshui 553000, China)

Abstract : With the increasing global attention to environmental protection and efficient use of resources, the high-value application of solid waste has become an important direction of scientific research. Two typical solid wastes, red mud and phosphogypsum (RP) were used as the main raw materials, and neutral filled powder was prepared by means of optimization ratio and surface activation treatment, and it was applied to the modification of acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer(ABS) polymer composite. The experimental results show that the mechanical properties, thermal stability and dynamic mechanical properties of ABS composite can be significantly improved by adding appropriate amount of red mud and phosphogypsum(RP) filler. Scanning electron microscopy show that RP particles disperse uniformly in ABS matrix, and the particle distribution become more dense with the increase of filler content. The mechanical properties test show that the tensile strength, bending strength and impact strength of RP/ABS composites decrease with the increase of filler content. The thermal stability test results show that after the addition of RP fillers, the thermal degradation residual amount of ABS composite increase with the increase of filler content, and the thermogravimetric analysis curve show a tendency to shift towards low temperature during the rapid degradation stage (400-450 °C), and the temperature of peak degradation rate of the composite first decreases and then increases with the filler content. The results show that RP filler has a certain catalytic effect on ABS thermal decomposition. In the dynamic mechanical properties test, the energy storage

基金项目: 贵州省高校人文社会科学研究资助项目(2024RW306)

通信作者: 冉全, 教授, 硕士研究生, 研究方向为废物资源化利用

收稿日期: 2025-03-13

引用格式: 黎春燕, 温咏兰, 郭建兵, 等. 赤泥-磷石膏填料对 ABS 性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(5): 163-168.

LI Chunyan, WEN Yonglan, GUO Jianbing, et al. Effect of red mud and phosphogypsum fillers on ABS properties[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(5): 163-168.

modulus of RP/ABS composite increases significantly with the increase of RP filler content, and the damping peak strength reaches the maximum value at 6% content, showing the best energy dissipation ability. This study is an effective exploration for resource utilization of RP solid waste.

Keywords : red mud ; phosphogypsum ; fillers ; acrylonitrile butadiene styrene copolymer ; mechanical property

丙烯腈-丁二烯-苯乙烯塑料(ABS)作为三元共聚物,具备“韧、硬、刚”三相均衡的优异力学性能。在众多聚合物中,它产量极高且应用极为广泛,在汽车、电子电器以及建材等多个领域均有重要应用^[1-2]。为进一步提升ABS的性能,并拓展其应用范围,共混改性方法常被采用。该方法通过添加无机填料,可有效实现产品性价比的提高^[3-5]。像滑石粉、碳酸钙这类常见的无机填料,能够显著提升ABS的力学性能。有研究报道指出,当填料改性比例达到10%时,可获得较为理想的性价比^[6]。此外,另有研究发现,较小粒径的碳酸钙不仅能降低ABS打印件的翘曲率,还能在一定程度上保障打印件的力学性能^[7]。

赤泥(RM)和磷石膏(PG)(RP)分别是氧化铝和磷酸生产过程中产生的固体废弃物。它们产出量巨大,但利用率却相对较低。现阶段,堆存成为主要的处理方式,这不仅造成了大量土地资源的浪费,还对环境产生了严重破坏。为推动RP的高值化利用,科研人员在建材^[8-9]、土壤改良剂^[10-11]、元素提取^[12-13]、吸附材料^[14-15]等多个领域开展了大量深入研究。然而,目前这两种固体废弃物的实际消减量并不显著。近年来,将RP应用于聚合物改性取得了一定的进展。例如,把RP填充到高密度聚乙烯中制备复合材料,研究结果显示,合适粒径和含量的RP无机填料能够增强复合材料的力学性能。同时,RM和PG二元协同粉体对高密度聚乙烯具有异相成核作用,小粒径的粉体有助于提高复合材料的结晶峰温度和结晶度^[16-17]。

笔者首先通过优化RM和PG的配比,制备出RP中性填充粉体;随后利用偶联剂对粉体表面进行活化处理,以此增强RP粉体与ABS树脂基体之间的界面结合。在此基础上,系统地探究了不同含量的RP粉体对ABS复合材料性能的影响。笔者尝试利用RP协同改性ABS,期望借助ABS的高用量来推动RP的高值化应用以及存量削减。但目前,关于这方面的相关报道相对较少。本研究成果旨在为RM和PG这两种固体废弃物在ABS聚合物填充改性领域的应用提供理论依据。

1 实验部分

1.1 主要原料

ABS:1221H,韩国LG公司;

PG:贵州瓮福集团有限责任公司;

RM:贵州华锦铝业股份有限公司;

γ -氨丙基三乙氧基硅烷偶联剂:KH550,江苏晨光偶联剂有限公司。

1.2 主要仪器及设备

称量天平:PR224ZH/E,奥豪斯仪器上海有限公司;

微量水分测定仪:MC-2000,德卡精密量仪(深圳)有限公司;

真空干燥箱:DZ-1A,天津市泰斯特仪器有限公司;

高速混合机:SHR-25A,张家港云帆机械有限公司;

电子万能试验机:CMT6104,美特斯工业系统(中国)有限公司;

同向双螺杆挤出机:GTE35,科倍隆科亚(南京)机械有限公司;

注塑机:130SE II,东华机械集团有限公司;

场发射扫描电子显微镜(FESEM):Quanta FEG250,美国FEI公司;

缺口型制样机:QYJ1251,美特斯工业系统(中国)有限公司;

摆锤式冲击试验机:ZBC8400-B,美特斯工业系统(中国)有限公司;

旋转流变仪:HAAKE MAR S60,赛默飞世尔科技(中国)有限公司。

1.3 试样制备

RM和PG按质量比4:6进行复配后粉碎,研磨成粒径约为30 μm 的RP复合粉体,然后加入粉体质量5%的KH550偶联剂对RP复合粉体进行表面处理。再将处理好的RP复合粉末按照0%,3%,6%,9%,12%,15%的质量分数添加到ABS中,混合均匀后,采用双螺杆挤出机熔融共混造粒,得到RP/ABS复合材料。挤出机从加料区到机头温度分别为210,230,240,240,230,230 $^{\circ}\text{C}$,螺杆转速为300 r/

min。然后将RP/ABS复合材料放入注塑机中制备样条,注塑温度分别为240,240,240,230℃,注塑压力为60~70 MPa。复合材料样条在室温下放置48 h后进行性能测试。

1.4 测试及表征

(1)形貌观察。

采用FESEM对样品形态进行表征。样品置于样品盘,表面喷金处理,加速电压设定为20 kV。

(2)流变性能分析。

样品置于上、下平行板之间,在240℃下恒温5 min。随后进行刮边处理,待温度回升至240℃后开始测试。频率扫描范围为0.1~100 Hz,固定应变为1%。

(3)力学性能测试。

弯曲性能:参照GB/T 9314-2008进行测试,位移控制速度为2 mm/min;

拉伸性能:参照GB/T 1040.2-2006进行测试,测试速率为50 mm/min;

冲击性能:参照GB/T 1843-2008进行测试,缺口底部半径为 (0.25 ± 0.05) mm,摆锤选择2.75 J,缺口距冲击刃的距离为 (22 ± 0.2) mm。

2 结果与讨论

2.1 RP/ABS复合材料的力学性能

不同含量RP填充的ABS复合材料的拉伸强度、弯曲强度以及缺口冲击强度数据列于表1。与多数无机填料加入聚合物基体的情况相似,随着RP添加量的逐步增加,复合材料的拉伸、冲击及弯曲强度均呈现出不同程度的下降趋势。具体地,在这三种强度指标中,拉伸强度受RP添加量变化的影响相对最小。由表1可知,当RP填料添加质量分数达到15%时,拉伸强度仅从初始的46.3 MPa降至40.3 MPa。相比之下,弯曲强度的降幅较为明显,最大降幅约为30%。而缺口冲击强度的降低幅度最为显著,仅添加少量(3%)的RP填料,复合材料的冲击强度便下降了63.5%。随着RP填料含量的增加,

表1 RP/ABS复合材料的力学性能

Tab. 1 Mechanical properties of RP/ABS composites

Sample	Tensile strength/MPa	Bending strength/MPa	Notched impact strength/(kJ·m ⁻²)
Pure ABS	46.3±0.7	62.8±1.6	25.5±1.3
3%RP/ABS	45.2±0.6	58.7±0.9	9.3±0.6
6%RP/ABS	44.3±0.7	54.6±1.0	8.6±0.4
9%RP/ABS	43.7±0.5	51.3±1.3	7.2±0.6
12%RP/ABS	42.3±0.7	47.1±1.5	6.2±0.9
15%RP/ABS	40.3±0.8	41.9±2.1	5.4±0.3

复合材料呈现出拉伸强度与冲击强度比值升高的趋势,这一现象表明复合材料逐渐出现脆化特征。究其原因,RP作为刚性粒子,在聚合物基复合材料体系中,其有效传递和松弛界面应力以及耗散外界冲击能量的能力相对有限。因此,相较于拉伸强度和弯曲强度,冲击强度更容易受到刚性填料的影响。

2.2 RP/ABS复合材料形貌分析

针对添加RP后复合材料出现的脆化现象,借助FESEM对缺口冲击试样的断面形貌展开分析。图1为RP/ABS复合材料断面形貌的SEM照片。由图1可见,纯ABS的缺口冲击断面较为平整,仅存在部分较长的断面纹路,此时材料具有最高的冲击强度。引入RP填料后,各试样的冲击断面均呈现出不同程度的起伏,这意味着试样在断裂过程中应力分布不均匀。在断面上可观察到尺寸约5 μm的填料颗粒,并且随着RP含量的增加,颗粒分布更为密集。据此可以判定RP填料颗粒在挤出注塑过程中能够相对均匀地分散在ABS基体内。而影响复合材料力学性能的主要因素在于,RP填料颗粒与ABS基底之间的界面强度相对不足。当试样受到冲击时,RP颗粒与ABS基底间较弱的界面处更易产生缺陷,进而引发裂纹扩展,导致试样迅速失效,最终使得冲击强度显著下降^[18]。

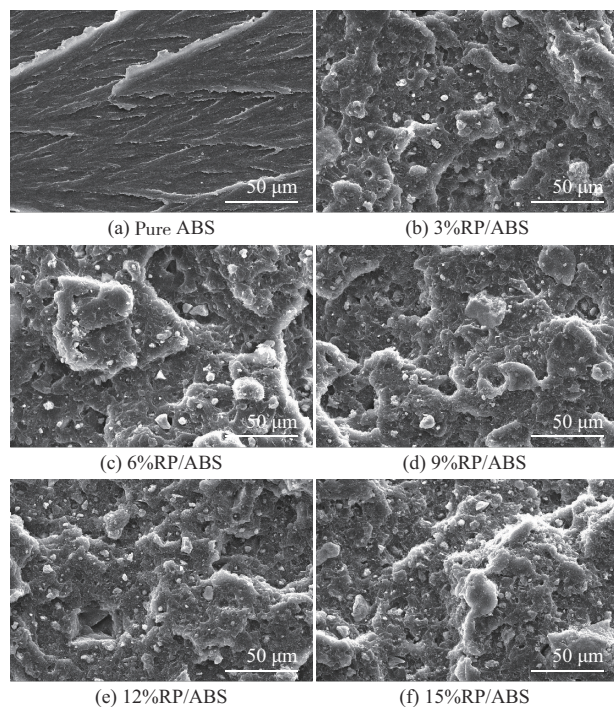


图1 RP/ABS复合材料冲击断面的SEM照片

Fig. 1 SEM photos of impact section of RP/ABS composites

2.3 热稳定性分析

不同RP含量的RP/ABS复合材料的TG曲线与DTG曲线见图2所示。由图2可知,随着RP含量的增加,所有试样热降解后的残余量呈上升趋势。在快速降解阶段(400~450 °C),热降解曲线随RP含量变化呈现特定规律。RP质量分数增至6%时,曲线先向低温方向偏移;此后,随着RP含量继续增加,曲线又向高温方向偏移。进一步观察DTG曲线可知,复合材料降解速率最大时的温度 $T_{\max}$,随RP含量增加呈先降后升态势。发生这一现象的原因可能是由于中和至中性的RP中,碳酸盐和残余磷酸盐先于ABS分解,发挥了部分热催化作用。此外,尽管 $T_{\max}$ 略有下降,但DTG降解速率峰值及整体降解速率(以DTG峰面积衡量)随RP含量增加显著降低。由此推断,RP在ABS基体中形成的含磷相界面在一定程度上抑制了热传递,进而提升了复合材料的热稳定性。

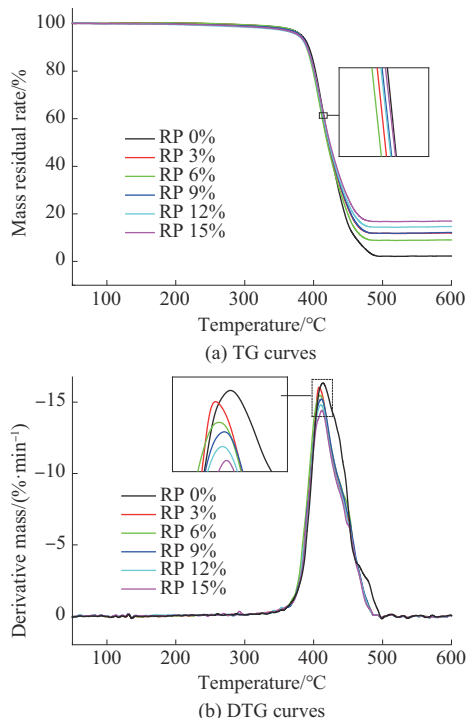


图2 不同RP质量分数时RP/ABS复合材料的热稳定性
Fig. 2 Thermal stability of RP/ABS composites with different RP mass fractions

2.4 动态力学性能分析

在频率为10 Hz的条件下,室温至150 °C温度区间内,RP/ABS复合材料的储能模量、损耗模量以及阻尼($\tan\delta$)曲线如图3所示。由图3观察发现,随

着RP含量的上升,复合材料的初始储能模量相应提高。这主要归因于刚性粒子RP的引入,增强了材料整体的刚性。在室温至150 °C范围内,所有试样的阻尼曲线仅呈现出单一的过渡峰。此峰对应着聚合物分子链段运动的弛豫过程^[19],即复合材料的玻璃化转变温度(T_g)。值得注意的是, $\tan\delta$ 的峰值强度不仅反映了大分子链段的迁移程度,还与填料和基体之间的界面结合强度密切相关。从阻尼曲线可以看出,所有试样的 T_g 均保持在相对稳定的水平(112~113 °C),未出现明显波动。并且,添加6%和9% RP的试样,其 $\tan\delta$ 峰值略高于其他试样。这一现象表明,在该RP添加量下,复合材料具备更为优异的能量耗散能力。

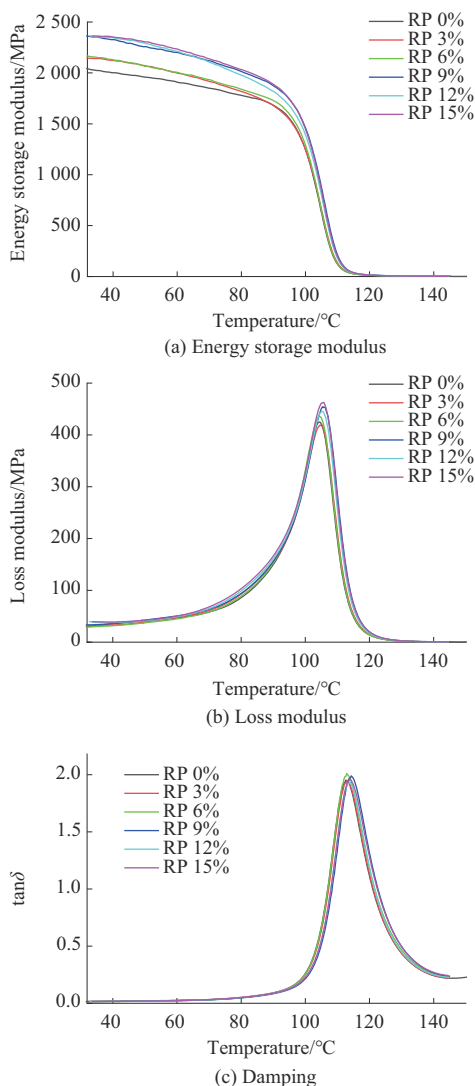


图3 RP/ABS复合材料的DMA谱图
Fig. 3 DMA diagram of RP/ABS composites

2.5 流变性能

不同RP含量的ABS复合材料黏度(η)-频率曲线如图4所示。由图4可以看出,所有试样均呈现出一个显著的规律:随着剪切频率的不断增加,复合材料的 η 均出现了明显下降的趋势,这一现象充分体现了典型的剪切变稀特性,同时也具备假塑性流体的特征^[20]。在中低频率区域(0.1~10 Hz),随着RP填料含量的逐步增加,复合材料流体的 η 并非单调递增或递减,而是呈现出先减小后增大的趋势。特别地,当RP质量分数为9%时,试样的 η 达到最低值。这与DMA结论相符,即在该含量下的试样表现出最为优异的能量耗散情况。

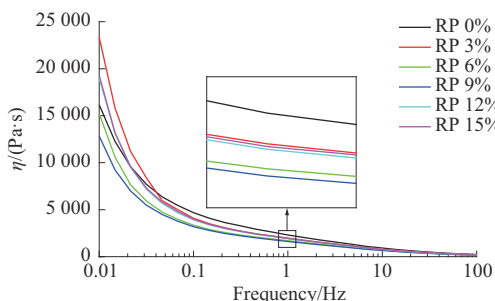


图4 RP/ABS复合材料在240 °C时 η -频率变化曲线

Fig. 4 Frequency-viscosity curve of RP/ABS composite at 240 °C

3 结论

通过优化RM和PG的配比,并对其进行表面处理,成功制备了中性的RP复合填料。在此基础上,系统研究了不同含量的RP填料对ABS复合材料性能的影响。结果表明:

(1) RP/ABS复合材料的拉伸强度、弯曲强度和冲击强度均随着RP含量的增加而下降,其中冲击强度的降幅最为显著。这主要是由于RP颗粒与ABS基体之间的界面结合相对较弱,在受到外界冲击时容易产生裂纹扩展。

(2) RP填料的加入显著提升了RP/ABS复合材料的热稳定性,残余量随RP含量增加而上升,并且在快速降解阶段(400~450 °C),TG曲线呈现出向低温方向偏移的趋势。DTG分析显示,复合材料的 $T_{\max}$ 随RP含量增加先下降后上升,表明RP填料对ABS的热分解具有一定的催化作用。

(3)动态力学性能测试结果表明,随着RP含量的增加,RP/ABS复合材料的储能模量显著提高,阻尼峰值强度在RP质量分数为6%时达到最大值,表现出最优的能量耗散能力。同时,流变性能测试显示,复合材料在中低频率区域的 η 随剪切频率的变

化呈现出先减小后增大的趋势,在RP质量分数为9%时 η 达到最低值。

参考文献

- [1] 庞亚男,李江华,祁会军. CF增强PC/ABS复合材料力学性能和热学性能研究[J]. 塑料科技, 2024, 52(11):68-72.
PANG Yanan, LI Jianghua, QI Huijun. Study on mechanical and thermal properties of CF reinforced PC/ABS composites[J]. *Plastics Science and Technology*, 2024, 52(11):68-72.
- [2] DONG H Y, GAO S L, YU C, et al. Design and performance of 3D-Printed ABS@rGO/CF/CeO₂ composites for microwave absorption and mechanical strength[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 499. DOI:10.1016/j.ccej.2024.156696.
- [3] 李明昆,林荣涛. PC/ABS高温下耐疲劳性能的影响因素研究[J]. 中国塑料, 2024, 38(12):77-80.
LI Mingkun, LIN Rongtao. Study on influence factors on high-temperature fatigue resistance PC/ABS alloy[J]. *China Plastics*, 2024, 38(12):77-80.
- [4] 陈婷,曹长林,汪扬涛,等. PLA/ABS增容改性研究[J]. 塑料科技, 2024, 52(11):37-42.
CHEN Ting, CAO Changlin, WANG Yangtao, et al. Research on toughening modification of PLA/ABS[J]. *Plastics Science and Technology*, 2024, 52(11):37-42.
- [5] 唐玉梅,叶有明,马皓皓. PBS协同纳米CaCO₃/BF增强ABS复合材料的制备及性能研究[J]. 塑料科技, 2024, 52(10):19-24.
TANG Yumei, YE Youming, MA Haohao. Study on preparation and properties of PBS synergistic nano CaCO₃/BF reinforced ABS composites[J]. *Plastics Science and Technology*, 2024, 52(10):19-24.
- [6] 雷祖碧,王飞,马玫. 填料对ABS性能影响的研究[J]. 合成材料老化与应用, 2024, 53(1):47-49.
LEI Zubi, WANG Fei, MA Mei. Study on the effect of fillers on properties of ABS[J]. *Synthetic Materials Aging and Application*, 2024, 53(1):47-49.
- [7] 王晓,李昭勋,张永超,等. 基于FDM的碳酸钙改性ABS粒料的制备与性能[J]. 塑料工业, 2023, 51(1):61-66.
WANG Xiao, LI Zhaoxun, ZHANG Yongchao, et al. Preparation and properties of calcium carbonate modified ABS pellets based on FDM[J]. *China Plastics Industry*, 2023, 51(1):61-66.
- [8] WANG H J, SHI M L, TIAN X T, et al. Experimental study on phosphogypsum-amended red mud as road base material[J]. *Sustainability*, 2023, 15(2). DOI:10.2139/ssrn.4203133.
- [9] DONG S K, ZHUO Q, CHEN L L, et al. Reuse of pretreated red mud and phosphogypsum as supplementary cementitious material [J]. *Sustainability*, 2023, 15(4). DOI:10.3390/su15042856.
- [10] LI Z F, ZHANG J, LI S C, et al. Effect of different gypsums on the workability and mechanical properties of red mud-slag based grouting materials[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 245. DOI:10.1016/j.jclepro.2019.118759.
- [11] LACATUSU R, KISELEV A, STROE V M, et al. Plant growth

- suitable nutritive red mud composite materials from the romanian dry landfilled red mud II. Formulation nutritive composite materials and plant growth tests at laboratory and glasshouse scale[J]. *Revista de Chimie*, 2014, 65(11):1 294–1 305.
- [12] 王尚杰夫,金会心,雷二帅,等.赤泥、粉煤灰和磷石膏配碳碱性调控共烧回收铁铝[J]. *中国冶金*, 2023, (11-3729/TF):1–11.
WANG Shangjiefu, JIN Huixin, LEI Ershuai, et al. Recovery of iron and aluminum from red mud, fly ash and phosphogypsum by co-sintering under alkaline controls of carbon addition[J]. *China Metallurgy*, 2023, 33(4):119–126.
- [13] GLADYSHEV S V, AKCIL A, ABDULVALIYEV R A, et al. Recovery of vanadium and gallium from solid waste by-products of Bayer process[J]. *Minerals Engineering*, 2015, 74:91–98.
- [14] LOPES G, GUILHERME L R G, COSTA E T S, et al. Increasing arsenic sorption on red mud by phosphogypsum addition[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, 262:1 196–1 203.
- [15] WANG F, PAN H, XU J. Evaluation of red mud based binder for the immobilization of copper, lead and zinc[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 263. DOI:10.1016/j.envpol.2020.114416.
- [16] 程舒雅,雷阳,张凯,等.磷石膏/赤泥对高密度聚乙烯结晶的影响[J]. *塑料工业*, 2022, 50(6):170–174.
- CHENG Shuya, LEI Yang, ZHANG Kai, et al. Effect of phosphogypsum/red mud on crystallization of high-density polyethylene [J]. *China Plastics Industry*, 2022, 50(6):170–174.
- [17] 吴良喜,雷阳,邹笑雨,等.赤泥/磷石膏对PE-HD性能影响[J]. *工程塑料应用*, 2022, 50(8):17–23.
WU Liangxi, LEI Yang, ZOU Xiaoyu, et al. Effects of red mud/phosphogypsum on properties of PE-HD[J]. *Engineering Plastics Application*, 2022, 50(8):17–23.
- [18] ZUO X L, ZHANG K Z, LEI Y, et al. Influence of thermooxidative aging on the static and dynamic mechanical properties of long-glass-fiber-reinforced polyamide 6 composites[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2014, 131(3). DOI:10.1002/app.39594.
- [19] CHEN N, WAN C Y, ZHANG Y, et al. Effect of nano- CaCO_3 on mechanical properties of PVC and PVC/Blendex blend[J]. *Polymer Testing*, 2004, 23(2):169–174.
- [20] 闵成勇. 铝粉填充改性ABS树脂复合材料的研究[D]. 广州:广东工业大学, 2013.
MIN Chengyong. Research on modified ABS composites with aluminum powder filling[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2013.

(上接第162页)

- [18] 徐建林,周生刚,牛磊,等.不同表面活性剂处理的 Sb_2O_3 对PVC复合材料阻燃性能的影响[J]. *材料工程*, 2016, 44(8):64–69.
XU Jianlin, ZHOU Shenggang, NIU Lei, et al. Effect of Sb_2O_3 modified by various surface active agents on flame retardant properties of PVC composite[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2016, 44(8):64–69.
- [19] 张育歌. 阻燃环氧树脂道路材料的制备与性能研究[D]. 南京:南京大学, 2015.
ZHANG Yuge. Studies on preparation and characterization of flame retarded epoxy road materials[D]. Nanjing: Nanjing University, 2015.
- [20] 卢红,陆桂焕,谢襄漓,等.蒙脱石部分取代十溴二苯乙烷体系对聚丙烯的阻燃性能[J]. *材料导报*, 2016, 30(2):71–75, 80.
LU Hong, LU Guihuan, XIE Xiangli, et al. Flame retardancy of OMMT-DBDPE/ Sb_2O_3 on polypropylene[J]. *Materials Review*, 2016, 30(2):71–75, 80.
- [21] 李森,王雪,李洪成,等.十溴二苯乙烷阻燃SBR热失重行为研究[J]. *世界橡胶工业*, 2014, 41(3):24–28.
LI Sen, WANG Xue, LI Hongcheng, et al. Study on thermal degradation of flame-retardant SBR by DBDPE[J]. *World Rubber Industry*, 2014, 41(3):24–28.
- [22] 鲍中村,宗成中.十溴二苯乙烷/三氧化二锑复合阻燃丁苯橡胶的协同效应[J]. *橡胶工业*, 2014, 61(8):458–462.
BAO Zhongcun, ZONG Chengzhong. Synergistic flame retardant effect of DBDPE and Sb_2O_3 on SBR[J]. *China Rubber Industry*, 2014, 61(8):458–462.
- [23] LU J Y, TU H Y, GU G X. Synthesis of brominated flame retardants with different brominated structures and study on flame retardancy of polystyrene resin[J]. *Reactive and Functional Polymers*, 2023, 193. DOI:10.1016/j.reactfunctpolym.2023.105769.