

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2023.11.024

KH550 改性稀土类水滑石的制备及对 PVC 性能的影响

李先铭¹, 张宁²

(1. 唐山师范学院物理科学与技术学院, 河北唐山 063000; 2. 河北省可降解聚合物重点实验室, 河北唐山 063000)

摘要: 制备了碳酸根插层的镁铝镧稀土类水滑石(MgAlLa-LDHs), 然后采用硅烷偶联剂 γ -氨丙基三乙氧基硅烷(KH550)进行有机表面改性。傅里叶变换红外光谱、X射线衍射、场发射扫描电子显微镜分析表明, KH550 未破坏 MgAlLa-LDHs 的晶体结构, 通过化学键合作用覆盖在表面。将 KH550 改性 MgAlLa-LDHs 添加到聚氯乙烯(PVC)树脂中, 探讨了改性温度、改性溶剂、改性剂用量及体系 pH 值对 PVC 热稳定性能的影响。以 PVC 静态热稳定时间为评价依据, 得到最佳工艺条件为 KH550 质量分数为 2.5%, 10% 乙二醇为溶剂, 体系 pH 值=9, 改性温度为 70 °C。刚果红试纸法、烘箱变色法、转矩流变仪等试验结果表明, 相比市售镁铝水滑石, MgAlLa-LDHs 中镧元素的少量加入可增强 PVC 的热稳定性能, 但对加工性能和力学性能影响不大; KH550 改性后的 MgAlLa-LDHs 能够延长 PVC 的静态热稳定时间至 52 min, 较好地抑制样品着色; 能够降低加工扭矩和能耗, 缩短塑化时间; PVC 的拉伸强度、断裂伸长率、缺口冲击强度分别提高 46%, 30%, 32%, 表明 KH550 改性 MgAlLa-LDHs 可显著提高 PVC 的热稳定性能、加工性能及力学性能。

关键词: 聚氯乙烯; 水滑石; 表面改性; 偶联剂; 热稳定性

中图分类号: TQ325.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2023)11-0149-06

Preparation of KH550 Modified Rare Earth Hydrotalcite and Its Effect on PVC Properties

Li Xianming¹, Zhang Ning²

(1. School of Physical Science and Technology, Tangshan Normal University, Tangshan 063000, China;

2. Hebei Key Laboratory of Degradable Polymers, Tangshan 063000, China)

Abstract : Carbonate intercalated magnesium aluminum lanthanum rare earth hydrotalcites (MgAlLa-LDHs) was prepared and then modified by organic surface modification silane coupling agent (KH550). The results show that the KH550 does not damage the crystal structure of MgAlLa-LDHs and covers on the surface through chemical bonding by Fourier transform infrared spectroscopy, X-ray diffraction, and field emission scanning electron microscopy analysis. The effects of modification temperature, modification solvent, modifier dosage, and system pH on the thermal stability of polyvinyl chloride (PVC) resin were investigated. Based on the evaluation of PVC static thermal stability time, the optimal process conditions are obtained as follows: KH550 dosage of 2.5wt%, 10% ethylene glycol as solvent, system pH=9, and modification temperature of 70 °C. The results of experiments show that the small addition of lanthanum element in MgAlLa-LDHs can enhance the thermal stability of PVC, but has little effect on processing and mechanical properties, compared to commercially available magnesium aluminum hydrotalcite by Congo red test paper method, oven discoloration method, and torque rheometer, etc. The MgAlLa-LDHs modified with KH550 can extend the static thermal stability time of PVC to 52 minutes and effectively inhibit sample coloring. The processing torque and energy consumption is reduced and the plasticizing time is shortened. The tensile strength, elongation at break, and notch impact strength of the PVC are increased by 46%, 30%, and 32%, respectively. MgAlLa-LDHs modified with KH550 can significantly improve the thermal stability, processing performance, and mechanical properties of PVC.

Keywords : poly(vinyl chloride) ; hydrotalcite ; surface modification ; coupling agent; thermal stability

基金项目: 唐山市人才资助项目(A202203029)

通信作者: 张宁, 教授, 主要从事高分子材料性能的研究

收稿日期: 2023-10-16

引用格式: 李先铭, 张宁. KH550 改性稀土类水滑石的制备及对 PVC 性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2023, 51(11): 149-154.

Li Xianming, Zhang Ning. Preparation of KH550 modified rare earth hydrotalcite and its effect on PVC properties[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(11): 149-154.

水滑石类化合物是一类结构可调控的层状阴离子黏土,片层为复合金属氢氧化物,层间为阴离子,在吸附、催化、阻燃等方面有着较高的应用价值^[1-3]。经典的镁铝水滑石呈弱碱性,能吸附、中和聚氯乙烯(PVC)热降解释放出的HCl,层间的碳酸根可以和不安定的氯离子进行交换,可作为无毒环保型PVC稳定助剂使用^[4]。但是水滑石颗粒表面存在着大量的非架桥羟基,易通过氢键作用而结合引起团聚,导致粒子大小不均,在PVC树脂中分散性和相容性较差^[5-6]。目前,可通过有机阴离子插层改性、表面活性剂/偶联剂等表面改性来克服这一缺点。其中,硅烷偶联剂结构中含有不同性质的两种基团,一种是亲无机物的基团如烷氧基,水解后可与水滑石表面的羟基键合,覆盖于其表面;另一种是亲有机物的基团如长链烷基,与聚合物有一定的相容性,可改善无机物与有机物之间的界面作用,从而提高复合材料的性能^[7]。Dinari等^[8]使用硅烷偶联剂对水滑石进行表面改性,能使水晶石均匀地分散在聚合物基底中,未出现团聚现象。黄昱臻等^[9]研究证明硅烷偶联剂表面改性水滑石可有效增强PVC弹性体的拉伸强度和极限氧指数。房友友等^[10]利用硅烷偶联剂对水镁石进行表面改性,改善了乙烯-乙酸乙烯酯橡胶的阻燃性能和力学性能。倪哲明^[11]等利用 γ -氨丙基三乙氧基硅烷(KH550)等对锌铝水滑石进行有机改性,能使复合材料的表面能减小。

笔者前期研究表明将稀土离子引入类水滑石层板结构中,稀土离子可利用自身的空轨道与PVC上的活泼氯发生配位反应,有效地防止HCl脱除,能够提升PVC的热稳定性能^[12-13]。基于以上研究,笔者尝试采用KH550对镁铝镧稀土类水滑石(MgAlLa-LDHs)进行表面改性,将两者优势结合起来。探索了KH550对MgAlLa-LDHs的最优改性工艺,并研究对PVC的热稳定性能、加工性能及力学性能的影响,以期得到效果更好的热稳定加工助剂。

1 实验部分

1.1 原材料

PVC树脂:SG-5,唐山三友氯碱有限责任公司;

KH550:化学纯,南京辰工有机硅材料有限公司;

环己酮、邻苯二甲酸二辛酯(DOP)、镁铝水滑

石:化学纯,天津市光复精细化工研究所;

硝酸镧、硝酸镁、硝酸铝、氢氧化钠、无水乙醇、乙二醇:分析纯,天津市大茂化学试剂厂。

1.2 仪器与设备

X射线衍射(XRD)仪:Ultima VI型,日本理学公司;

傅里叶变换红外光谱(FTIR)仪:TENSOR37型,德国BRUKER光谱仪器有限公司;

场发射扫描电子显微镜(FESEM):Sigma300 VP型,德国卡尔蔡司公司;

转矩流变仪:RM-200A型,哈尔滨哈普电气技术有限公司;

开放式混炼机:SK-16型,苏州科晟泰机械设备有限公司;

万能制样机:WZY-240型,苏州科晟泰机械设备有限公司;

悬臂梁冲击试验机:XJU-22型,苏州科晟泰机械设备有限公司;

电子万能试验机:KT877S型,苏州科晟泰机械设备有限公司。

1.3 试样制备

(1) MgAlLa-LDHs的制备。

分别称取硝酸铝(22.5 g, 0.06mol)、硝酸镁(24.4 g, 0.12mol)、硝酸镧(0.9 g, 0.002mol)溶解在100 mL去离子水中得到碱溶液A。另外称取碳酸钠(12.6 g, 0.15 mol)和氢氧化钠(16 g, 0.4mol),溶于100 mL蒸馏水中得到混合碱液B。再将碱液A和碱液B分别放入两个恒压滴液漏斗中,水浴80℃下,同时缓慢滴到三颈烧瓶中,通过稀硝酸和氢氧化钠溶液调节反应溶液的pH值为11~12。滴加完毕后搅拌1 h,转移至水热釜中,120℃下进行6 h的晶化处理,然后冷却、抽滤、洗涤滤液至中性,干燥,得到白色粉末,记为MgAlLa-LDHs。

(2) KH550-MgAlLa-LDHs的制备。

固定MgAlLa-LDHs的质量为3.0 g,加入KH550的质量分别为MgAlLa-LDHs质量的1.0%, 1.5%, 2.0%, 2.5%, 3.0%, 3.5%,分别选用100 mL纯水、10%乙醇、20%乙醇、10%乙二醇、20%乙二醇作为溶剂,分散均匀。控制体系pH值为4, 7, 9, 11, 13,在恒定的改性温度分别为40, 50, 60, 70, 80℃下搅拌3 h,对所得悬浊液体进行抽滤、洗涤、干燥,研磨得白色粉末,记为KH550-MgAlLa-LDHs。

(3) PVC/KH550-MgAlLa-LDHs 复合材料的制备。

按PVC树脂与KH550-MgAlLa-LDHs的质量比为100:3称取,在高速搅拌混合机中以900 r/min的速率混合10 min,冷却直接用于刚果红试验和流变性能试验。在冷却的试样中继续加入40质量份的DOP混合均匀。一部分加入适量环己酮,在洁净的平板上铺成1 mm厚的PVC薄片,烘箱中120 °C塑化20 min,待环己酮挥发完全后,裁剪成2 cm × 2 cm样片,用于烘箱变色法试验;另一部分在开放式混炼机上160 ~ 165 °C混炼10 min,平板压机上190 °C压成4 mm的板材,制备所需的样条,用于拉伸性能和冲击性能试验。

1.4 测试与表征

FTIR表征:采用KBr压片法,在4 000 ~ 400 cm^{-1} 范围内测定样品结构。

XRD表征:Cu靶 $\text{K}\alpha$ 射线,扫描范围 $5^\circ \sim 80^\circ$,扫描速度 $6^\circ/\text{min}$ 。

FESEM分析:在FESEM下观察类水滑石的表面形貌结构。

刚果红法试验:依据GB/T 2917-2002,采用刚果红试纸法,记录180 °C油浴下刚果红试纸开始变蓝的时间。

烘箱变色法试验:将样片放在铝箔上,置于185 °C热老化烘箱中,每隔10 min取出一片,拍照记录颜色。

动态热稳定性能测试:利用转矩流变仪,每次进样63 ~ 64 g,设定转速35 r/min,混炼器三区温度均为185 °C,记录流变曲线。

力学性能测试:依据GB/T 1041-2006,在电子万能试验机测定PVC试样的拉伸性能,拉伸速率为3 m/s;依据GB/T 1843-2008,在悬臂梁冲击试验机上测定PVC试样的缺口冲击强度,摆锤速度为3.5 m/s,V型缺口深度为2 mm。

2 结果与讨论

2.1 改性前后MgAlLa-LDHs的结构表征

(1) FTIR表征。

图1为KH550改性MgAlLa-LDHs前后的FTIR谱图。两者在424, 526, 783 cm^{-1} 出现了Al—O, La—O, Mg—O, Al—O—La, Mg—O—La的点阵振动峰,1 360 cm^{-1} 附近出现了 CO_3^{2-} 的不对称伸缩振动峰,3 400 cm^{-1} 附近出现了—OH伸缩振动峰。同时

在KH550-MgAlLa-LDHs的FTIR谱图出现了2 926, 2 851 cm^{-1} 处— CH_3 —和— CH_2 —的伸缩振动吸收峰,3 497, 721 cm^{-1} 处C—N的伸缩振动吸收峰,1058, 870 cm^{-1} 处Si—O, Si—O—C的特征吸收峰,表明加入KH550先水解为 $\text{R}'\text{—Si—OH}$,然后与MgAlLa-LDHs层板上—OH发生偶联,实现了表面改性的目的。

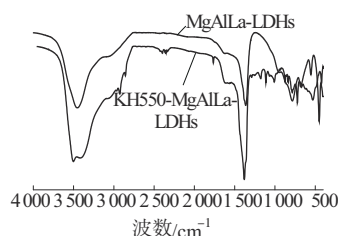


图1 KH550改性MgAlLa-LDHs前后的FTIR谱图

(2) XRD分析。

图2是KH550改性前后MgAlLa-LDHs的XRD谱图。谱线中都出现了相对衍射强度较大的(003), (006), (009), (110)面的水滑石层状结构的特征衍射峰。改性后的MgAlLa-LDHs谱图的基线较改性前平稳性稍差,说明结晶度降低,可能是KH550包裹在表面所致。两者的(003)晶面衍射峰位置接近,且相对强度最大,说明都具有较好的层间规整度,对应的 2θ 约为 11.45° ,与文献镁铝水滑石一致^[14],表明 CO_3^{2-} 为MgAlLa-LDHs层间阴离子,KH550未进入层间,而是覆盖在MgAlLa-LDHs表面。

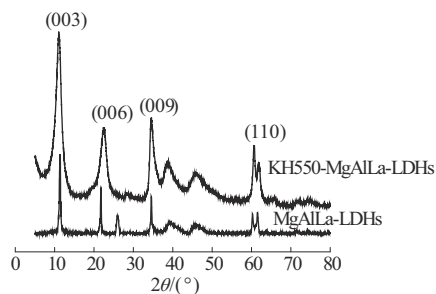
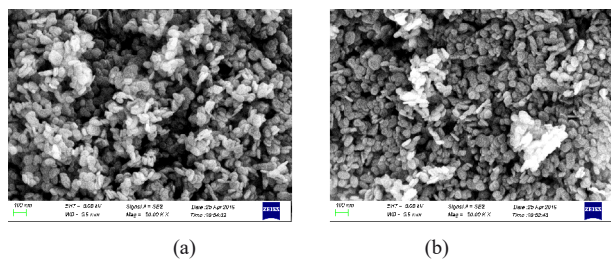


图2 KH550改性MgAlLa-LDHs前后的XRD谱图

(3) FESEM分析。

图3为KH550改性MgAlLa-LDHs前后的FESEM图。分析图3中FESEM照片可知,KH550改性前后MgAlLa-LDHs均具有较规则的片状六边形结构,结构并没有发生明显改变。但改性后MgAlLa-LDHs的表面光滑且轮廓清晰,分散性更好,团聚程度降低,可能是MgAlLa-LDHs表面与KH550之间发生偶联缩合后,由亲水性变为疏水性,更利于分散。



a—MgAlLa-LDHs; b—KH550-MgAlLa-LDHs

图3 KH550改性MgAlLa-LDHs前后的FESEM图

2.2 改性工艺条件的探讨

(1) 改性温度的影响。

在其他反应条件不变的情况下,通过刚果红试纸法(下同)测定不同改性温度制备的PVC/KH550-MgAlLa-LDHs试样的静态热稳定时间为28~38 min,如图4所示,在70℃出现最大值,之后略有降低。KH-550水解后的醇氧基与水滑石表面的羟基官能团缩合脱水是一个吸热反应,升高温度有利于正反应的进行,提高改性效率。但温度过高可能会导致水滑石粒子发生团聚,粒径变大,降低在PVC中的分散性^[15],致使PVC样品的热稳定时间缩短。

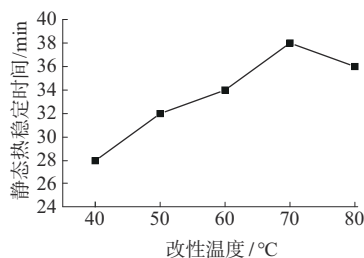


图4 不同改性温度下制备的PVC/KH-550-MgAlLa-LDHs的静态热稳定时间

(2) 体系pH值的影响。

图5为不同改性pH值下制备的PVC/KH550-MgAlLa-LDHs试样的静态热稳定时间。随着pH值的逐渐增大,静态热稳定时间呈现先增加后减小的趋势,pH值为9时热稳定性能最佳。这可能是因为MgAlLa-LDHs呈弱碱性,KH550含有氨基官能团也

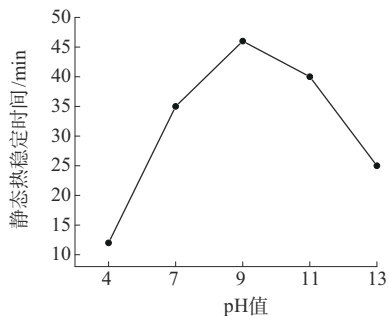


图5 不同改性pH值下制备的PVC/KH550-MgAlLa-LDHs的静态热稳定时间

显碱性。在酸性环境下,两者键合会降低改性效果。但在强碱性环境下金属离子又易形成氢氧化物沉淀,所以适当的弱碱性条件更有利于改性MgAlLa-LDHs的形成。

(3) 改性剂用量的影响。

图6为添加不同含量KH550的PVC/KH550-MgAlLa-LDHs试样的静态热稳定时间。随着KH550用量的增加,其热稳定时间同样呈现先增加后逐渐减少的现象,当KH550质量分数为2.5%时达到最大值。这可能是KH550用量偏低时(<2.0%),无法全面地包裹在MgAlLa-LDHs的表面,热稳定时间偏短。但当KH550用量过大(>3.0%)时,容易在PVC粉体表面形成多层物理吸附的界面薄层,从而影响粉体的表面性能,降低热稳定性^[16]。

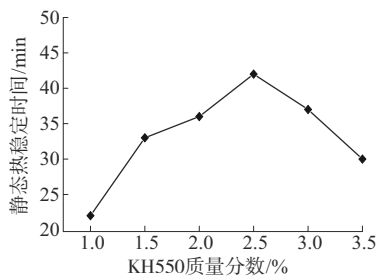


图6 添加不同KH-550含量的PVC/KH550-MgAlLa-LDHs试样的热稳定时间

(4) 溶剂的影响。

表1为在不同溶剂下制备的PVC/KH550-MgAlLa-LDHs试样的静态热稳定时间。当溶剂为纯水时,热稳定时间最短为24 min。KH550结构中的烷氧基水解生成硅醇,进而与水滑石层板的活性羟基发生键合反应。其在纯水中水解完全所用时间极短,且硅醇之间易发生缩聚导致改性效果变差^[17]。当纯水中加入乙醇或乙二醇时,会抑制KH550的水解产生硅醇,降低水解速率,另外KH550在醇中有更好的溶解性。当10%乙二醇为溶剂时,热稳定时间最长,改性效果明显,可能是因为KH550在乙二醇中的溶解性更大,10%乙二醇中水醇比例适中。

表1 不同溶剂下的静态热稳定时间

项目	纯水	10%乙醇	20%乙醇	10%乙二醇	20%乙二醇
静态热稳定时间/min	24	36	32	44	37

综上所述,KH550改性MgAlLa-LDHs的最佳工艺条件是10%乙二醇为溶剂,KH550质量分数为2.5%,体系pH=9,改性温度70℃。

2.3 热稳定性分析

利用刚果红试纸法和烘箱变色法测定市售的碳酸根插层 MgAl-LDHs 及最佳工艺条件下的 KH550 改性前后 MgAlLa-LDHs 的静态热稳定性,见表2。市售的 MgAl-LDHs 的热稳定性最差,热稳定时间仅为 9 min,到 10 min 即着色为砖红色。MgAlLa-LDHs 添加到 PVC 中静态热稳定时间为 27 min,样片 20 min 开始着色为黄,60 min 变为砖红,120 min 黑化。其热稳定性明显优于 MgAl-LDHs,是水滑石层板中引入了镧元素,可与 PVC 热解中不稳定的氯形成配位键,减缓 HCl 的脱出,抑制

HCl 的自催化作用,延长热稳定时间及改善了初期着色。KH550-MgAlLa-LDHs 添加到 PVC 中静态热稳定时间为 52 min,样片 30 min 开始着色为浅黄,80 min 变为砖红,120 min 变为棕红。较未改性前,其稳定时间提高近 2 倍,前期着色延长 10 min,到 120 min 仍未黑化,后期着色速率减慢。KH550 与 MgAlLa-LDHs 表面的羟基发生化学键合,提高表面疏水性,减少颗粒间的团聚,增强与 PVC 的相容性;同时偶联剂的加入也增强复合材料的界面层,需要更高的分解温度才能有效破坏^[18]。所以,KH550-MgAlLa-LDHs 可进一步提升 PVC 的热稳定性。

表2 添加不同类水滑石的 PVC 样品的静态热稳定时间及颜色变化情况

样品	静态热 稳定时 间/min	加热时间/min								
		10	20	30	40	50	60	80	100	120
PVC/MgAl-LDHs	9									
PVC/MgAlLa-LDHs	27									
PVC/KH550-MgAlLa-LDHs	52									

2.4 加工性能分析

利用转矩流变仪测定市售的 MgAl-LDHs 填充 PVC 及 KH550 改性前后 PVC/MgAlLa-LDHs 复合材料的流变曲线,如图 7 所示,MgAl-LDHs 的动态热稳定时间仅为 8.6 min,塑化时间偏短,塑化扭矩值偏高,单独使用不能满足工业加工的要求。PVC/MgAlLa-LDHs 复合材料的塑化时间为 178 s,平衡扭矩为 36.1 N·m,动态热稳定时间为 1 090 s。MgAlLa-LDHs 仍为无机物,与 PVC 相容性差,且粒子易发生团聚黏连,流动时互相剪切,使物料黏度增大,加工性能较差。PVC/KH550-MgAlLa-LDHs 材料加工性能明显优于前两者,塑化时间为 105 s,平衡扭矩为 27.7 N·m,动态热稳定时间为 1 770 s。KH550-MgAlLa-LDHs 在 PVC 中的分散度和相容性更好,降低熔体黏度,减少 PVC 分子链之间的摩擦

力,降低了加工能耗,提高 PVC 的动态热稳定性能。

2.5 力学性能分析

表 3 为添加不同类水滑石的 PVC 的力学性能。

表3 添加不同类水滑石的 PVC 的力学性能

水滑石种类	拉伸强度 /MPa	断裂伸长率/%	缺口冲击强度/(kJ·m ⁻²)
MgAl-LDHs	3.6	73.9	2.7
MgAlLa-LDHs	3.7	75.6	2.8
KH550-MgAlLa-LDHs	5.4	98.0	3.7

由表 3 可知,相较市售的 MgAl-LDHs, PVC/MgAlLa-LDHs 的力学性能几乎没有提升,说明在层板引入少量的镧元素,无法改善水滑石在 PVC 中的相容性以及材料的韧性和弹性。添加 KH550 改性的 PVC/KH550-MgAlLa-LDHs 复合材料的拉伸强度、断裂伸长率、缺口冲击强度分别提高了 46%, 30%, 32%, 表明 KH550 可以在无机基材和高分子聚合物之间形成“分子桥”,一端为亲水基团(烷氧基)经水解与 MgAlLa-LDHs 表面键合,改善了水滑石在 PVC 中的分散性,减少团聚;另一端为亲有机物基团与 PVC 分子链相互缠结或形成弱氢键作用,增加了界面黏合力及强度。当材料受力时,减少了应力集中点,能够更好地分散和传递,增强了复合材料的载荷强度^[18-19],提高了力学性能。

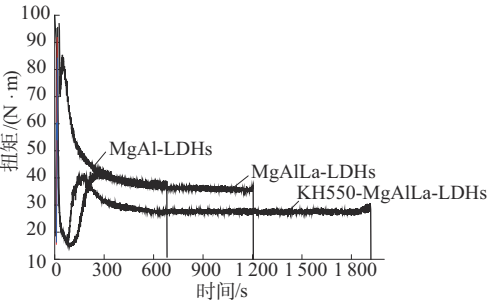


图7 添加不同类水滑石的 PVC 样品的流变曲线

3 结论

(1)以 MgAlLa-LDHs 为前驱体,采用 KH550 进行表面改性。经 FTIR, XRD 与 SEM 结构表征推测出 KH550 通过化学键合作用覆盖在 MgAlLa-LDHs 表面,提高了分散性,减少了颗粒间的团聚。

(2) KH550 改性 MgAlLa-LDHs 的最佳改性工艺条件为 10% 乙二醇为溶剂,体系 pH=9, KH550 质量分数为 2.5%,改性温度 70 °C。

(3)将在层板引入少量的稀土镧元素并经 KH550 表面改性后的 MgAlLa-LDHs 添加到 PVC 中,可以提高 PVC 的静态及动态稳定时间至 52 min, 1 770 s, 样品着色速率明显减缓, 30 min 开始着色, 120 min 仍未黑化;可以降低加工能耗,提高 PVC 板材的拉伸强度、断裂伸长率、缺口冲击强度。与市售镁铝水滑石相比,显著提高了 PVC 的热稳定性、加工性能及力学性能。

参考文献

- [1] Zhang Hongmei, Zhang Shuhua, Stewart P, et al. Thermal stability and thermal aging of poly (vinyl chloride)/Mg Al layered double hydroxides composites[J]. Chinese Journal of Polymer Science, 2016, 34(5):542-551.
- [2] 沈冠华, 罗业荣, 赵闰华, 等. 改性工艺对水滑石性能的影响研究[J]. 塑料助剂, 2022(6):5-9, 25.
Shen Guanhua, Luo Yeshen, Zhao Yanhua, et al. Effect of modification process on the properties of hydrotalcites[J]. Plastics Additives, 2022(6):5-9, 25.
- [3] Bhavani A G, Wani T A, Ma'aruf A, et al. Effect of ageing process on crystal morphology of Co-Mg-Al hydrotalcite[J]. Materials Today: Proceedings, 2021(44):2 277-2 282.
- [4] 王佳翰, 郎春燕, 陈小平. 锌-铝-铈三元类水滑石的合成及对 PVC 的热稳定效果测试[J]. 塑料, 2015, 44(1):66-68.
Wang Jiahua, Lang Chunyan, Chen Xiaoping. Synthesis of ZnAlCe-CO₃-LDHs and its heat stability effect on PVC[J]. Plastics, 2015, 44(1):66-68.
- [5] 梁坤, 李荣勋, 刘光烨. Ca/Zn 复合热稳定剂的作用机理与研究进展[J]. 塑料科技, 2009, 37(8):76-79.
Liang Kun, Li Rongxun, Liu Guangye. Mechanism and research progress of Ca/Zn compound heat stabilizer[J]. Plastics Science and Technology, 2009, 37(8):76-79.
- [6] 杨文虎, 刘斌, 马占峰, 等. 水滑石的表面改性研究[J]. 化学工业与工程, 2004, 21(5):331-333
Yang Wenhua, Liu Bin, Ma Zhanfeng, et al. Study on surface modification of hydrotalcite[J]. Chemical Industry and Engineering, 2004, 21(5):331-333.
- [7] 张稳平, 梁武侠. 硅烷偶联剂在聚合物改性中的应用及研究进展[J]. 当代化工研究, 2022(4):162-164.
Zhang Wenping, Liang Wuxia. Application and research progress of silane coupling agent in polymer modification[J]. Modern Chemical Research, 2022(4):162-164.
- [8] Dinari M, Neamati S. Surface modified layered double hydroxide/polyaniline nanocomposites: Synthesis, characterization and Pb²⁺ removal[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2020(589).10.1016/j.colsurfa.2020.124438.
- [9] 黄昱臻, 董银春, 沈帆, 等. 水滑石表面改性对聚氯乙烯弹性性能的影响[J]. 现代塑料加工应用, 2018, 30(3):42-45.
Huang Yuzhen, Dong Yinchun, Shen Fan, et al. Effect of modified hydrotalcite on soft polyvinyl chloride[J]. Modern Plastics Processing and Applications, 2018, 30(3):42-45.
- [10] 房友友, 王靖宇, 杨谱, 等. 硅烷偶联剂改性水镁石及其在 EVM 中的应用[J]. 塑料工业, 2015, 43(11):111-114.
Fang Youyou, Wang Jingyu, Yang Pu, et al. Modification of brucite by silane coupling agent and its application in EVM [J]. China Plastics Industry, 2015, 43(11):111-114.
- [11] 倪哲明, 付晓微, 薛继龙, 等. 表面活性剂和硅烷偶联剂复合改性水滑石的表面性质[J]. 无机化学学报, 2012, 28 (3):471-476.
Ni Zheming, Fu Xiaowei, Xue Jilong, et al. Surface characterization of layered double hydroxides by compounding modification with surfactant and silane coupling agent[J]. Chinese Journal of Inorganic Chemistry, 2012, 28 (3):471-476.
- [12] 李先铭. PVC 月桂酸柱撑铝铈类水滑石热稳定剂的制备与性能研究[J]. 工程塑料应用, 2015, 43(4):119-123.
Li Xianming. Preparation and properties of lauric acid pillared Zn-Al-Ce hydrotalcite-like as thermal stabilizer for PVC[J]. Engineering Plastics Application, 2015, 43(4):119-123.
- [13] 张宁. 硬脂酸插层钙/铈稀土类水滑石 PVC 的热稳定作用[J]. 中国塑料, 2017, 31(10):99-104.
Zhang Ning. Study on thermal Stability of stearic acid Intercalated Ca/Zn Rare-earth hydrotalcite-like in PVC[J]. China Plastics, 2017, 31(10):99-104.
- [14] Joseph W B, Paul S B, Brian D B, et al. Physical and chemical Interactions between Mg: Al layered double hydroxide and hexacyanoferrate[J]. Journal of Solid State Chemistry, 2001(161): 249-258.
- [15] 唐书宏, 韦妹成, 周喜, 等. 制备方法对改性 Mg-Al 水滑石基 PVC 热稳定剂的影响[J]. 塑料, 2021, 50(1):140-144.
Tang Shuhong, Wei Meicheng, Zhou Xi, et al. Effect of preparation method on modified Mg-Al hydrotalcite based PVC heat stabilizer[J]. Plastics, 2021, 50(1):140-144.
- [16] 童梦良, 王罗强. 改性镁铝水滑石对 PVC 力学性能的影响[J]. 塑料, 2016(3):18-20.
Tong Mengliang, Wang Luoqiang. Effect of modified Mg-Al-hydrotalcite on mechanical property of PVC [J]. Plastics, 2016(3): 18-20.
- [17] 高正楠, 江小波, 郭谐. KH550 的水解工艺及其对 SiO₂ 表面改性的研究[J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 2012, 39(2):7-12.
Gao Zhengnan, Jiang Xiaobo, Guo Xie. Study of the hydrolysis of 3-aminopropyltriethoxysilane (KH550) and the surface modification of silica[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science), 2012, 39(2):7-12.
- [18] 孙锋, 苗伟, 马健, 等. 偶联剂改性对 PVC/碳酸钙复合材料性能的影响[J]. 塑料工业, 2021, 49(5):128-133.
Sun Feng, Miao Wei, Ma Jian, et al. The effect of titanate coupling agent on the performance of PVC/calcium carbonate composites[J]. China Plastics Industry, 2021, 49(5):128-133.
- [19] 王菲, 王雀, 邓亚楠, 等. 不同种类偶联剂对 PVC 木塑复合材料抗冲击性能的影响[J]. 塑料助剂, 2018(2):28-31.
Wang Fei, Wang Que, Deng Yanan, et al. Anti-impact strength properties of PVC wood plastic composite materials affected by different kinds of coupling agents[J]. Plastics Additives, 2018(2): 28-31.