

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2024.05.025

铈红与钴蓝对聚乙烯棚膜红/蓝光质调控及性能影响

杨康^{1,2,3}, 曾舒^{1,2,3}, 张怡^{1,2,3}, 王聚恒^{1,2,3}, 麻玉龙^{1,2,3}, 黄晓泉^{1,2,3}

(1. 贵州省纳米材料工程中心, 贵阳 550014; 2. 贵州省冶金化工研究所, 贵阳 550014; 3. 贵州天润达科技有限公司, 贵阳 550014)

摘要: 红/蓝光质调控聚乙烯(PE)棚膜一直以来是农膜行业亟需解决的难题。在PE中引入铈红(CeS)和钴蓝($\text{CoO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$),通过吹塑工艺制备PE红/蓝光棚膜。光电雾度仪测试结果发现CeS和 $\text{CoO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 对PE棚膜的透光率影响较小,但雾度和散光度有所增加;光纤光谱仪和手持式光谱照度仪表征结果显示CeS和 $\text{CoO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 明显提升450~520 nm的蓝光和605~700 nm的红光透过率,且CeS与 $\text{CoO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 质量比为1:2时,红光透过率为39.2%,蓝光透过率为38.1%,红/蓝光透过比例为1.03;万能拉伸试验机测试结果发现CeS与 $\text{CoO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 可改善PE棚膜的力学性能,其中拉伸强度较空白样提升约5.5%,断裂伸长率提升约16.8%,直角撕裂强度提升约3%,穿刺强度提升约21.8%;差示扫描量热仪表征结果显示添加CeS与 $\text{CoO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 可提升PE氧化诱导期(Oit)达45 min以上,PE具有良好的耐热老化性能。上述测试表征结果表明:CeS与 $\text{CoO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 的引入可明显提升PE棚膜的散光性能、力学性能、耐热稳定性能、红/蓝光透过率及透过比例。此外,可通过调控CeS与 $\text{CoO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 的质量比获得不同红/蓝光质调控的PE功能棚膜。

关键词: 铈红; 钴蓝; 聚乙烯棚膜; 红/蓝光; 光质调控; 性能

中图分类号: TQ325.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2024)05-0166-05

Effects of CeS and $\text{CoO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ on regulation of red/blue light quality and performance of polyethylene shed film

YANG Kang^{1,2,3}, ZENG Shu^{1,2,3}, ZHANG Yi^{1,2,3}, WANG Juheng^{1,2,3}, MA Yulong^{1,2,3}, HUANG Xiaoxiao^{1,2,3}

(1. Guizhou Nanomaterials Engineering Center, Guiyang 550014, China; 2. Guizhou Institute of Metallurgy and Chemical Engineering, Guiyang 550014, China; 3. Guizhou Tianrun Technology Co., Ltd., Guiyang 550014, China)

Abstract : Red/blue light quality controlled polyethylene (PE) shed film has been an urgent problem in the agricultural film industry. Cerium red (CeS) and cobalt blue ($\text{CoO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) were introduced into PE to prepare PE red/blue light shed film by blow molding process. The testing results of photoelectric fog meter show that CeS and $\text{CoO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ have little effect on the light transmittance of PE shed film, but the haze and astigmatism increase. The testing results of fiber optic spectrometer and handheld spectral illumination meter show that CeS and $\text{CoO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ significantly improve the blue light transmittance of 450-520 nm and the red light transmittance of 605-700 nm, and when the mass ratio of CeS and $\text{CoO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ is 1:2, the red light transmittance is 39.2%, the blue light transmittance is 38.1%, and the red/blue light transmittance ratio is 1.03. The testing results of universal tensile testing machine show that CeS and $\text{CoO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ could improve the mechanical properties of PE shed film compared with blank samples, among which the tensile strength is increased by about 5.5%, the elongation at break is increased by about 16.8%, the right angle tearing strength is increased by about 3%, and the puncture strength is increased by about 21.8%. The testing results of differential scanning calorimeter show that the addition of CeS and $\text{CoO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ could improve the oxidation induction period of PE by more than 45 min, and PE has good heat stability. The above testing results show that the introduction of CeS and $\text{CoO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ can significantly improve the astigmatism performance, mechanical properties, thermal aging resistance, red/blue light transmittance and transmittance ratio of PE shed film. In addition, PE functional shed films with different red/blue quality regulation can be obtained by adjusting the mass ratio of CeS and $\text{CoO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$.

Keywords : cerium red ; cobalt blue ; polyethylene shed film ; red/blue light ; light quality regulation ; performance

基金项目: 黔科合基础[2020]1Z043, 筑科合同[2020]37-4号, 黔科合支撑[2020]4Y224号, 筑科合同[2021]43-21号, 黔科院科专合字[2021]04号

通信作者: 黄晓泉, 高级工程师, 主要研究方向为无机非金属材料制备及应用

收稿日期: 2024-02-28

引用格式: 杨康, 曾舒, 张怡, 等. 铈红与钴蓝对聚乙烯棚膜红/蓝光质调控及性能影响[J]. 工程塑料应用, 2024, 52(5): 166-170.

YANG Kang, ZENG Shu, ZHANG Yi, et al. Effects of CeS and $\text{CoO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ on regulation of red/blue light quality and performance of polyethylene shed film[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(5): 166-170.

近年来,随着我国农业的现代化发展,聚乙烯(PE)棚膜作为现代化农业主要覆盖材料之一获得爆发式增长。长期以来,具有保温、散光、红/蓝光质调控及流滴消雾等多功能的PE棚膜一直是农膜的发展方向,其中,红/蓝光质调控PE棚膜已成为农膜行业亟待攻关的研究热点^[1-6]。为实现PE棚膜的红/蓝光质调控功能化改性,诸多科技工作者进行了大量研究。通常在PE中引入转光剂将紫外线或植物利用较少的黄绿光转换为对光合作用有利的蓝紫光和红橙光,实现红/蓝光质调控的目的。常用的转光剂包括稀土有机配体转光剂、稀土无机转光剂和荧光染料等,常用的转光剂包括典型的Eu(III)-TTA(α -噻吩甲酰三氟丙酮)-TOPO(三正辛基氧化膦)二配体稀土有机配体转光剂、硫化镓(CaS)稀土无机转光剂及酞青蓝、荧光黄、还原红等荧光染料^[7-10]。在稀土有机配体转光剂方面,李承志等^[11]利用发蓝光的转光剂和发红光的转光剂复配制成主要吸收420 nm的紫外光和550 nm的绿光,发射出分别为430 nm和650 nm的蓝光和红光的红/蓝光质调控膜,与叶绿素的吸收光谱基本一致;在稀土无机转光剂方面,廉世勋等^[12]研制的新型紫转远红外(VTFR)转光剂引入PE棚膜中,转光剂的激发光谱与日光光谱基本一致,能够明显提升棚膜的转光效率,有效推动功能与寿命同步的转光农膜的开发及应用;邵毛妮等^[13]通过熔融插层法制备了具有光转换功能的纳米PE薄膜,结果表明该转光膜能有效吸收对植物有害、对温室棚膜有破坏作用的206~360 nm的紫外光,发射360~500 nm的蓝紫光,且具有良好的抗荧光衰减性能。

上述研究引入的转光剂受到长时间光照容易分解、使用寿命短、转光效率低、棚膜透光率低且与树脂相容性差等问题。在此基础上,笔者利用铈红/钴蓝改性PE制备红/蓝光质调控功能棚膜。以无机荧光染料铈红和钴蓝作为红/蓝光质调控剂,引入PE中通过吹塑获得具有红/蓝光质调控功能的PE棚膜,研究棚膜的力学、光学及转光特性等综合性能,为红/蓝光质调控PE功能棚膜的产业化提供借鉴。

1 实验部分

1.1 主要原材料

线性低密度聚乙烯(PE-LLD):7042,MFR为2.0 g/10 min,中国石油化工股份有限公司茂名分公司;

铈红(CeS):R265,6 000目(2.5 μm),湖南科莱新材料有限公司;

钴蓝($\text{CoO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$):B2805,6000目(2.5 μm),湖南巨发颜料有限公司;

抗氧剂168:三[2,4-二叔丁基苯基]亚磷酸酯,北京极易化工有限公司;

抗氧剂1010:四[β -(3,5-二叔丁基-4-羟基苯基)丙酸]季戊四醇酯,北京极易化工有限公司;

PE蜡:WX2400,工业级,科赛成功新材料科技有限公司;

铝酸酯偶联剂:UP801,工业级,南京优普化工有限公司;

硬脂酸钙(CaSt):分析纯,廊坊乾耀科技有限公司。

1.2 仪器及设备

双螺杆挤出造粒机:LSHJ-65,南京杰恩特机电有限公司;

上吹膜机: SJX3-700,浙江铸信机械有限公司;

高速混合机:456-5,莱州龙洋化工机械有限公司;

光电雾度仪:SGW-810,上海仪电物理光学仪器有限公司;

万能拉伸试验机:WDW-5E,济南全力测试技术有限公司;

手持式光谱照度仪:HPCS320,杭州虹谱光色科技有限公司;

光纤光谱仪:BSHCE,东莞百思光电科技有限公司;

差示扫描量热(DSC)仪:DSC600,日立分析仪器(上海)有限公司。

1.3 试样制备

CeS和 $\text{CoO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 属于无机颜料,为使其在PE棚膜中实现较好均匀分散,采用2%铝酸酯偶联剂分别对铈红和钴蓝进行表面改性获得改性CeS和改性 $\text{CoO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$,并按不同质量配比添加在PE树脂中,添加其他加工助剂搅拌混合均匀,通过上吹工艺获得具有红/蓝光质调控功能的PE棚膜样品,厚度为0.045 mm,样品制备工艺温度为140~180 $^{\circ}\text{C}$ 。样品制备方案见表1。

1.4 测试与表征

光学性能:按GB/T 2410-2008进行测试,采用C光源对PE棚膜样品进行测试。

表1 PE 红/蓝光质调控功能薄膜制备配方(质量分数比)
Tab. 1 Preparation formula of PE red/blue light quality regulation functional film (mass fraction ratio)

Material	I	II	III	IV	V	VI
CeS	—	0	0.1	0.15	0.2	0.3
CoO·Al ₂ O ₃	—	0.3	0.2	0.15	0.1	0
PE wax	1	1	1	1	1	1
Antioxidants	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
CaSt	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
PE	98.7	98.4	98.4	98.4	98.4	98.4

红/蓝光透过率:采用光纤光谱仪测试。设置合适积分时间,一般设置光源曲线接近饱和80%处的积分时间为合适积分时间;测量背景光谱,在积分球入口处遮挡光源,软件默认处于计数模式,按下Continue按钮开始连续测量,测量完成点击Dark按钮,软件将自动保存背景光谱;测量光源光谱,透射测量时,一般选择样品台上不放置任何物品时的状态为参比状态;测量样品透射光谱时,换上PE棚膜样品,点击透射按钮进行透射率测量。

红/蓝光透过比例:采用手持式光谱照度仪,将PE棚膜样品固定于测试样品架上,置于室外阳光照射充足处,保持相同测试距离进行试验,读取红色比、绿色比及蓝色比数值。

力学性能:按GB/T 1040.3-2006测试拉伸强度和断裂伸长率,速度为200 mm/min;按GB/T 37841-2019测试穿刺强度,速度为200 mm/min;按QB/T1130-1991测试直角撕裂强度,速度为200 mm/min。

氧化诱导期:采用DSC仪测试,取10~20 mg样品置于坩埚中,通入氮气预热升温至200℃,升温速率为20℃/min,然后氮气自动切换成氧气恒温200 min,当DSC曲线达极大放热速率(即DSC曲线的拐点)后至少再持续几分钟,直到出现明显的放热效应,停止实验,在DSC曲线拐点处做切线,切线与水平线交点对应的时间则为样品的氧化诱导期。

2 结果与讨论

2.1 光学性能分析

CeS和CoO·Al₂O₃对PE棚膜光学性能影响见表2。由表2可知,添加CeS和CoO·Al₂O₃的PE棚膜透光率较空白膜略有增加,雾度提升9.8%以上,散光度(散光度=透光率×雾度)提升6.5%以上。分析原因,CeS折射率为2.5,CoO·Al₂O₃折射率为2.04,PE折射率为1.50,由于CeS和CoO·Al₂O₃与PE折射率不同导致光线穿过薄膜会发生偏折现象,薄

膜雾度增加^[14];另外,光线透过薄膜内部时,无机粒子CeS和CoO·Al₂O₃粒径与PE球晶尺寸不同会引发散射效果从而增加薄膜的透光率^[15]。因此,CeS和CoO·Al₂O₃的引入提高PE棚膜的透光率和雾度,提升棚膜的散光功能。铈红和钴蓝的引入提高PE棚膜的透光率和雾度,提升棚膜的散光功能。

表2 PE棚膜样品的光学性能
Tab. 2 Optical properties of PE shed film samples

Sample	Transmittance/%	Haze/%	Astigmatism/%
I	92.1±0.1	18.3±0.1	17.45
II	92.5±0.2	20.1±0.1	18.58
III	92.2±0.1	20.7±0.1	19.09
IV	92.3±0.1	20.2±0.1	18.64
V	92.2±0.1	20.7±0.1	19.09
VI	92.4±0.2	20.3±0.1	18.76

2.2 CeS和CoO·Al₂O₃对PE棚膜红/蓝透过率影响

采用光纤光谱仪测试PE棚膜的红/蓝光透过率,获得CeS和CoO·Al₂O₃对PE棚膜红/蓝光质调控影响见图1。由图1可知,引入CeS和CoO·Al₂O₃后,PE棚膜在450~520 nm蓝光和在605~700 nm红光透过率明显增加。随着CeS含量逐渐增加,红光透过率逐渐增加,表明CeS具有将其他光波转变成红光的功能,随着CoO·Al₂O₃含量逐渐增加,蓝光透过率逐渐增加,表明CoO·Al₂O₃具有将其他光波转变成蓝光的功能。

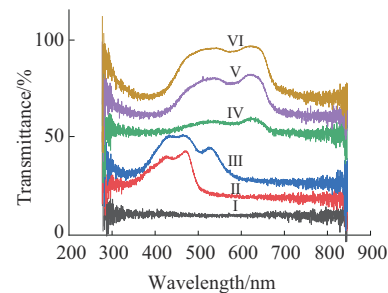


图1 PE棚膜样品光纤光谱图

Fig. 1 Fiber spectrum of polyethylene shed film sample

借助手持式光谱照度仪表征PE棚膜的红/蓝光透过比例,结果见表3。由表3可知,随着CeS含量逐渐增加,PE棚膜红光透过比例逐渐增加;随着CoO·Al₂O₃含量逐渐增加,PE棚膜蓝光透过比例逐渐增加。其中,在II号配方中,PE棚膜的红/蓝光透过比例为0.83,蓝光透过比例较空白25.1%提升为42.4%,呈现较好的蓝光调控功能。在III号配方中,PE棚膜的红/蓝光透过比例为1.03,红光透过比例较空白34.6%提升为39.2%,蓝光透过比例较空白25.1%提升为38.1%,呈现较好的红/蓝光质调控功

能;在Ⅵ号配方中,PE棚膜的红光与蓝光透过比例为1.97,红光透过比例较空白34.6%提升为50.9%,呈现较好的红光调控功能。由此可知,CeS和 $\text{CoO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 对PE棚膜具有较好的红/蓝光质调控功能。

表3 PE棚膜样品红/蓝光透过比

Sample	Redness ratio/ %	Green ratio/ %	Blue ratio/ %	Red-blue ratio/ %
I	34.6	40.3	25.1	1.38
II	35.2	22.4	42.4	0.83
III	39.2	22.7	38.1	1.03
IV	42.3	22.2	35.5	1.19
V	46.2	23.7	30.1	1.53
VI	50.9	23.3	25.8	1.97

2.3 CeS和 $\text{CoO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 对PE棚膜力学性能的影响

CeS和 $\text{CoO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 对PE棚膜力学性能的影响见表4。由表4可知,PE棚膜引入铈红与钴蓝后,棚膜的拉伸强度、断裂伸长率、直角撕裂强度及穿刺强度均获提升。 CeS 和 $\text{CoO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 总质量含量为0.3%时,对比空白样I号,Ⅱ~Ⅵ号试样拉伸强度提升3.66%以上,断裂伸长率提升16.58%以上,直角撕裂强度提升2.61%以上,穿刺强度提升20.51%以上。因为无机粉体粒子CeS和 $\text{CoO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 均匀分散在PE分子结构中,受外力作用时充当应力集中中心,产生大量银文、剪切带,同时阻碍裂纹的扩展或钝化、终止裂纹,从而增强增韧PE,提升PE棚膜的力学性能^[16-18]。

表4 PE棚膜样品的力学性能

Sample	Tensile strength/ MPa	Elongation break/%	Right angle tear strength/ ($\text{N} \cdot \text{mm}^{-1}$)	Puncture strength/ ($\text{N} \cdot \text{mm}^{-1}$)
I	24.6±0.2	856.3±0.5	115.1±0.4	7.8±0.2
II	25.5±0.2	999.1±0.6	118.4±0.3	9.5±0.2
III	26.2±0.3	998.7±0.5	119.1±0.4	9.5±0.3
IV	26.3±0.2	1010.2±0.6	118.5±0.4	9.6±0.2
V	26.2±0.2	999.7±0.4	118.1±0.3	9.6±0.3
VI	25.9±0.2	998.3±0.5	118.8±0.4	9.4±0.2

2.4 CeS和 $\text{CoO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 对PE棚膜耐热老化性能的影响

为研究PE棚膜的耐热老化性能,采用DSC仪测试表征PE棚膜的氧化诱导期(Oit),见图2所示,DSC曲线出现极大放热拐点即样品开始发生分解对应的时间则为Oit,其时间长短代表样品耐热老化性能的优异程度。图2中虚线对应的DSC曲线开始出现拐点,其对应的横坐标代表样品的Oit,由此可知,引入CeS和 $\text{CoO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 后,PE棚膜的氧化诱导

期明显增加,有利于提高棚膜的耐热老化性能。

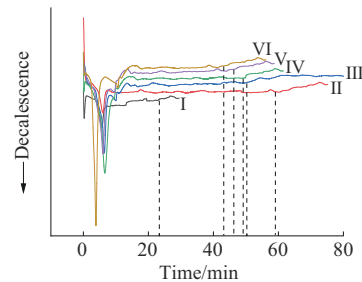


图2 PE棚膜氧化诱导期

Fig. 2 Oxidation induction period of polyethylene shed film

具体氧化诱导时间见表5。由表5可知,添加CeS和 $\text{CoO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 使PE棚膜Oit提升至45 min以上,较空白样的24.6 min增加20 min。采用配方Ⅱ时,棚膜的Oit最大为58.2 min,较空白样24.6 min增加33.9 min,采用配方Ⅵ时,棚膜的Oit为45.9 min,较空白样24.6 min增加21.3 min。由此可知CeS和 $\text{CoO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 的引入明显提升了PE棚膜的耐热老化性能。因为CeS和 $\text{CoO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 在PE中呈均匀分散状态,与PE分子链形成较好的界面融合架成一定的三堆结构,抑制PE分子链的热运动,从而提高棚膜的耐热老化性能^[19-21]。此外,随着CeS含量增加,PE棚膜的Oit提升幅度逐渐减小,随着 $\text{CoO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 逐渐增加,PE棚膜的Oit提升幅度逐渐增加,由此可见 $\text{CoO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 比CeS更有利于提升PE棚膜的耐热老化性能。

表5 PE棚膜的氧化诱导期

Sample	Oit/min
I	24.6
II	58.5
III	52.2
IV	50.3
V	48.2
VI	45.9

3 结论

以CeS和 $\text{CoO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 作为红/蓝光质调控剂引入PE棚膜中,研究CeS和 $\text{CoO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 不同质量比对PE棚膜红/蓝光质调控的影响,通过对棚膜力学、光学、耐热老化及红/蓝光透过率等性能测试表征,得出结论如下:

(1) CeS和 $\text{CoO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 可明显提升PE棚膜的力学性能和耐老化性能。

(2) CeS和 $\text{CoO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 的引入提升PE棚膜的透光率和雾度,有利于提升棚膜的散光性能。

(3) CeS 和 $\text{CoO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 的引入可增加 PE 棚膜的红光和蓝光透过率,在总含量不变的情况,不同 CeS 和 $\text{CoO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 的质量比可调控 PE 棚膜红/蓝光透过比例,为红/蓝质调控 PE 功能棚膜的制备提供借鉴。

参考文献

- [1] ZHANG G, YU R, XU J, et al. Study on transmittance of plastic shed films with bubble structure[J]. International Journal of New Developments in Engineering and Society, 2019, 3(2):309–314.
- [2] WEN Qingh, ZHEN L, CHANG Rongy, et al. Development and prospect of biodegradable mulch films in China[J]. Acta Horticulturae, 2019, 1252:47–50.
- [3] 高伟丽, 张牙润, 沈娜, 等. 棚膜专用树脂耐老化性能研究[J]. 化工设计通讯, 2020, 46(4):148, 222.
GAO Weili, ZHANG Yarun, SHEN Na, et al. Study on the aging resistance of greenhouse film special resin[J]. Chemical Design Communication, 2020, 46(4):148, 222.
- [4] 黄映东, 尹红艳, 张利超, 等. 紫外吸收剂 DPP 对 PE-LD 棚膜性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2020, 48(2):94–97.
HUANG Yingdong, YIN Hongyan, ZHANG Lichao, et al. The effect of UV absorbent DPP on the performance of PE-LD greenhouse film[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(2):94–97.
- [5] 汪晓鹏. 农用多功能聚乙烯棚膜的研究[J]. 上海塑料, 2015(2):46–49.
WANG Xiaopeng. Research on multifunctional polyethylene greenhouse film for agriculture[J]. Shanghai Plastics, 2015(2):46–49.
- [6] 戴亚杰, 秦久佳, 张文龙. 硅烷接枝聚乙烯功能棚膜专用料[J]. 塑料, 2016, 45(2):84–86.
DAI Yajie, QIN Jiujia, ZHANG Wenlong. Silane grafted polyethylene functional greenhouse film special material[J]. Plastics, 2016, 45(2):84–86.
- [7] 李维维, 刘念赐, 姜贵全, 等. 稀土有机配合物转光农膜研究进展[J]. 化工新型材料, 2023, 51(S2):569–573.
LI Weiwei, LIU Nianci, JIANG Guiquan, et al. Research progress on rare earth organic complexes for light conversion agricultural films[J]. New Chemical Materials, 2023, 51(S2):569–573.
- [8] 吕展衡, 陈品鸿, 许冰, 等. 巯基-双键点击反应制备光固化红光转光膜及其性能[J]. 材料导报, 2020, 34(S1):111–115.
LYU Zhanheng, CHEN Pinhong, XU Bing, et al. Preparation and properties of photo curable red light conversion films by thiol double bond click reaction[J]. Materials Review, 2020, 34(S1):111–115.
- [9] 周明明, 刘威, 杨成祥, 等. 多核稀土离子掺杂有机配合物转光剂的制备与应用[J]. 复合材料学报, 2023, 40(4):2 131–2 139.
ZHOU Mingming, LIU Wei, YANG Chengxiang, et al. Preparation and application of multi-core rare earth ion doped organic complex light conversion agents[J]. Journal of Composite Materials, 2023, 40(4):2 131–2 139.
- [10] 黄绮颖. 新型农膜用铬酸盐红光转光剂的制备和表征[D]. 广州: 华南农业大学, 2018.
- [11] HUANG Qiying. Preparation and characterization of a new type of germanate red light conversion agent for agricultural films[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2018.
- [12] 李承志, 廉世勋, 吴振国, 等. 棚室作物吸收光谱的测定及其生态膜的研制光谱实验室[J]. 光谱实验室, 2001, 18(5):588–590.
LI Chengzhi, LIAN Shixun, WU Zhenguo, et al. Determination of plants absorption spectra and development of photo ecological film[J]. Chinese Journal of Spectroscopy Laboratory, 2001, 18(5):588–590.
- [13] 廉世勋, 李承志, 张华京, 等. 单基双能转光剂光谱性质的调控[J]. 湖南师范大学: 自然科学版, 2001, 24(4):66–70.
LIAN Shixun, LI Chengzhi, ZHANG Huajing, et al. Regulation of spectral properties of single base dual energy conversion agents[J]. Hunan Normal University: Natural Science Edition, 2001, 24(4):66–70.
- [14] 邵毛妮, 周宁琳, 李文秀, 等. 一种新型纳米转光膜的制备及增温效应[J]. 功能材料, 2017, 48(4):4 013–4 017.
SHAO Maoni, ZHOU Ninglin, LI Wenxiu, et al. Preparation and warming effect of a novel nano light conversion film[J]. Functional Materials, 2017, 48(4): 4 013–4 017.
- [15] HUA Y Q, ZHANG Y Q, WU L B, et al. Mechanical and optical properties of polyethylene filled with nano - SiO_2 [J]. Journal of Macromolecular Science, Part B:Physics, 2005, 44(2):149–159.
- [16] ALTHUES H, HENLE J, KASKEL S. Functional inorganic nanofillers for transparent polymers[J]. Chemical Society Reviews, 2007, 36(9):1 454–1 465.
- [17] SHOKRIEH M M, MOSALMANI R, OMIDI M J. Strain rate dependent micromechanical modeling of reinforced polymers with carbon nanotubes[J]. Journal of Composite Materials, 2014, 48(27):3 381–3 393.
- [18] PEDRAZZOLI D. Viscoelastic behaviour and fracture toughness of linear-low-density polyethylene reinforced with synthetic boehmite alumina nanoparticles[J]. Express Polymer Letters, 2013, 7(8):652–666.
- [19] LIAO C Z, BAO S P, TJONG S C. Effect of silicon carbide nanoparticle additions on microstructure and mechanical behavior of maleic anhydride compatibilized high density polyethylene composites[J]. Composite Interfaces, 2011, 18(2):107–120.
- [20] ALOTHMAN O Y, ALMAJHDI F N, FOUAD H. Effect of gamma radiation and accelerated aging on the mechanical and thermal behavior of HDPE/HA nano-composites for bone tissue regeneration[J]. Biomedical Engineering Online, 2013, 12:1–15.
- [21] XUE Y, GAO H M, YU L, et al. Physisorption of poly (ethylene glycol) on inorganic nanoparticles[J]. ACS Nano, 2022, 16(4): 6 634–6 645.
- [22] NAZARI H, NADERI K, NEJAD F M. Improving aging resistance and fatigue performance of asphalt binders using inorganic nanoparticles[J]. Construction and Building Materials, 2018, 170: 591–602.