

水华蓝藻粉/低密度聚乙烯复合材料光谱特征与性能反馈研究

赵冰冰¹, 方 艳², 张发宇², 武 康², 汪家权^{1,2*}

1. 合肥工业大学土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009

2. 合肥工业大学资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009

摘 要 为了解决周期性爆发的巢湖水华蓝藻难以处置的问题, 同时改善低密度聚乙烯材料降解周期长的现状, 以低密度聚乙烯(LDPE)为基体, 以巢湖新鲜水华蓝藻制得的蓝藻粉为生物材料, 以马来酸酐接枝聚乙烯(PE-g-MAH)为增容剂, 以聚乙烯蜡和白油为润滑剂制备复合材料。设置蓝藻粉含量和增容剂含量2个因素作为实验因素, 实验材料按一定比例充分混合后, 双螺杆挤出制得了复合材料颗粒, 再经过注塑方式获得待测样条。通过紫外-可见光谱扫描(UV-VIS)联合傅里叶变换红外光谱扫描(FTIR)的光谱学方法了解水华蓝藻粉、增容剂和复合材料的光谱学特征, 分析复合材料制备过程中的结构变化, 能够先决性判断该种实验方法对制备新型生物材料的可行性。并以力学性能测试和扫描电镜(SEM)等方法作为辅助手段, 与光谱分析的结果相互反馈, 充分分析水华蓝藻粉、增容剂含量对复合材料结构与性能的影响。结果显示: 通过紫外可见光谱分析, 蓝藻初提液在260和620 nm处出现藻蛋白质的特征吸收峰, 表明了蓝藻细胞液中藻蛋白的存在, 具备作为生物反应材料的基本条件。红外光谱分析可知, 蓝藻粉在1 630, 1 540和1 440 cm^{-1} 附近出现特征吸收峰, 符合酰胺键的出峰规律, 在3 300 cm^{-1} 附近出现O—H的特征吸收峰, 进一步验证了蓝藻粉活性位点的存在; 马来酸酐的红外光谱图中, 酸酐在1 850和1 740 cm^{-1} 处出现C=O基的特征峰, 环状酸酐中C—O—C的伸缩振动特征峰出现在1 200 cm^{-1} 附近; 而经过反应所得的复合材料红外光谱中, 除聚乙烯的特征吸收峰以外, 蓝藻粉中的酰胺键和O—H, 以及马来酸酐对应得特征吸收峰都已减弱或消失了, 基本可以推测马来酸酐与—OH发生了开环酯化反应, 马来酸酐在生物复合材料的制备过程中起到了连接两个不同反应体系的作用。而且, 通过扫描电镜可直观的看出, 蓝藻粉含量增加将会导致复合体系中成团现象加剧, 增容剂的加入增强了复合体系界面的粘结性; 力学性能测试的结果为蓝藻粉含量的增加导致复合材料力学性能下降, 尤其冲击性能下降显著降幅达54.10%; 当蓝藻粉的添加量为15.00%时, 随着增容剂用量的增加, 材料的拉伸强度、弯曲性能和冲击性能均呈现先增大后减小的趋势。扫描电镜和力学性能的结果也从侧面验证了光谱分析结果的前瞻性和正确性, 避免了盲目实验带来的资源浪费等问题。综合考虑, 该生物复合材料可选取蓝藻粉含量15.00%, 增容剂含量3.00%, 聚乙烯蜡和白油用量3.00%和1.00%的配方, 此时的力学性能为: 拉伸强度为11.70 MPa, 冲击强度为20.00 $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2}$, 弯曲强度为8.80 MPa, 弯曲模量为220.00 MPa。

关键词 生物材料; 光谱分析; 性能反馈; 增容剂

中图分类号: X524 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2019)11-3446-06

引 言

近年来巢湖的富营养化问题爆发频繁, 给水体水质和生物健康带来严重的危害。水华主要为有毒的铜绿微囊藻, 藻体内会形成小分子肽的有毒物质^[1]。每年呈现爆发性增长的

水华蓝藻数量巨大、亟待妥善处理。目前, 针对巢湖水华蓝藻资源化的研究多集中于产沼气和用作低端肥料领域, 但是产品的附加值低, 经济效益不高, 规模化利用程度不高^[2]。

巢湖新鲜蓝藻中含有丰富的藻蛋白及多糖类物质, 可以在物理作用下改变蛋白质的高级结构和分子间聚集方式, 使得埋藏在分子内部的疏水基团暴露出来^[3-4]。同时含有丰富

收稿日期: 2018-10-29, 修订日期: 2019-02-20

基金项目: 国家“十二五”科技重大专项(2012ZX07103-004)资助

作者简介: 赵冰冰, 1991年生, 合肥工业大学博士研究生 e-mail: 814486119@qq.com

* 通讯联系人 e-mail: jiaquan.wang@163.com

的羟基可以与增容剂发生反应,将生物大分子引入树脂分子链中^[5]。其中,蛋白质分子含有的酪氨酸、苯丙氨酸和色氨酸残基的苯环含有共轭双键,使蛋白质具有紫外吸收的性质,蓝藻中的藻蓝蛋白、藻红蛋白和别藻蓝蛋白除在 280 nm 处有吸收峰外,还分别在 610~620, 540~570 和 650~655 nm 之间有最大特征吸收峰^[6-7],而反应材料的特征官能团在红外光谱中也会出现对应的特征吸收峰^[8],因此,本文以低密度聚乙烯为基体,以水华蓝藻粉为生物供体,以马来酸酐接枝聚乙烯为增容剂,研究蓝藻粉的使用量及增容剂的使用对复合体系的力学性能及结构性能的影响。通过此种处理方式既能够有效缓解树脂材料降解周期长所引发的环境问题,又可以机械捕捞后大量难以处置的水华蓝藻提供更具广度的处置办法。目前以水华蓝藻粉制备生物塑料的研究尚属稀缺,因此所开展的蓝藻基生物塑料的实验将会为今后开发和研究新型生物可降解材料提供一定的思路和参考。

1 实验部分

1.1 材料

巢湖藻泥,采自巢湖西湖区水体距表层 15 cm,打捞经纱布滤去部分水后带回实验室冷冻保存;低密度聚乙烯树脂(LDPE),牌号 2102TX00,伊朗石化;聚乙烯接枝马来酸酐(PE-g-MAH),牌号 9902,购自合肥优硕科学仪器有限责任公司;聚乙烯蜡,购自安徽九一化工有限公司;白油,购自广州特韵贸易有限公司。

1.2 仪器

紫外-可见分光光度计(UV/VIS-1950),北京普析通用;傅里叶红外光谱仪(Nicolet 67),美国 Thermo Nicolet;场发射扫描电子显微镜(SU8020),日本日立(Hitachi);差热示差扫描量热仪(Q2000),TA 公司微波干燥箱(RWBZ-08S),南京苏恩瑞干燥设备公司;粉碎机(BJ-150),德清拜杰电器公司;电热鼓风干燥箱(DGT-G),合肥华德利科学器材;高速混匀机(SHR-5L),南京金吉机械;双螺杆挤出机(SHJ-20)南京金吉机械;注塑成型机(HTF120W1),宁波海天塑机集团;万能力学试验机(QJ210),上海倾技仪器仪表科技有限公司。

1.3 方法

1.3.1 原材料的制备

将巢湖藻泥自冻库内取出室温下解冻,解冻后混匀平铺于托盘内铺设厚度小于 2 mm,置于微波干燥箱内干燥,干燥条件为设定温度 40 °C,功率 700 W·h⁻¹,真空度 0.08,干燥 60 min 后经粉碎机粉碎成粉末,过 100 目筛后密封备用。

1.3.2 蓝藻粉含量对复合材料性能的影响

设计了 6 组平行实验制备蓝藻粉/低密度聚乙烯复合材料。其中蓝藻粉的添加量分别为 0, 5.00%, 10.00%, 15.00%, 20.00% 和 25.00%。增容剂的添加量为 0;聚乙烯(PE)蜡粉和白油的添加量分别为 3.00% 和 1.00%。材料经高速混匀机 110~115 °C 共混 5~10 min 出料,经双螺杆 125~145 °C 挤出造粒,经注塑机 160 °C 制备样条,样条保存于

干燥器中平衡 24 h,待测。每组实验重复 3 次,实验结果取平均值。

1.3.3 增容剂含量对复合材料性能的影响

设计了 6 组平行实验制备蓝藻粉/低密度聚乙烯复合材料。其中蓝藻粉的添加量为 15.00%;增容剂的添加量分别为 0, 1.00%, 2.00%, 3.00%, 4.00% 和 5.00%;聚乙烯(PE)蜡粉和白油的添加量分别为 3.00% 和 1.00%。材料经高速混匀机 110~115 °C 共混 5~10 min 出料,经双螺杆 125~145 °C 挤出造粒,经注塑机 160 °C 制备样条,样条保存于干燥器中平衡 24 h,待测。每组实验重复 3 次,实验结果取平均值。

1.4 表征方法

蓝藻提取液进行紫外-可见光谱扫描,波段为 240~700 nm;对水华蓝藻粉、LDPE、PE-g-MAH 及制得复合材料分别进行红外光谱扫描,扫描波段为 500~4 000 cm⁻¹;使用场发射电子显微镜观察复合材料的表面特征;通过差示热扫描获得复合材料熔融曲线,10~180 °C 升温,速率为 10 °C·min⁻¹。制备蓝藻粉/低密度聚乙烯复合材料拉伸性能的测试按 GB/T1040.2—2006^[9]进行;弯曲性能按 GB/T9341—2000^[10]进行;简支梁缺口冲击实验按 GB/T1043.1—2008^[11]进行。

2 结果与讨论

2.1 水华蓝藻粉的光谱表征

图 1 为巢湖水华蓝藻经冻融破壁后,离心过滤所得溶液的紫外可见全波段扫描图。如图 1 在 260 和 620 nm 左右出现吸收峰,分析吸收峰出现在 260 nm 左右的可能原因,溶液中含有嘌呤、嘧啶等核酸类物质,该类物质在 260 nm 处有强吸收峰,可能导致吸收峰的重叠中线位移^[4]。由于藻红蛋白含量极低,所以在 540~570 nm 处未出现明显的吸收峰,而别藻蓝蛋白与藻蓝蛋白含量接近时会发生峰的重叠向中线右侧偏移,如图 1 所示在 620 nm 附近出峰。

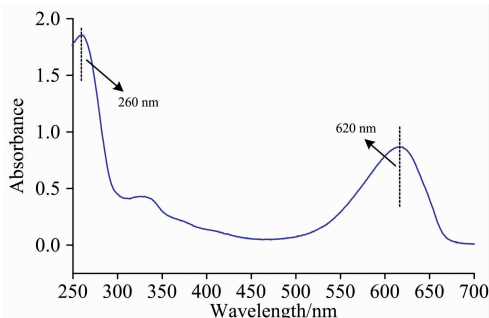


图 1 蓝藻提取液的紫外-可见光谱图

Fig. 1 UV-Visible absorption spectrum of algae extract

图 2 为巢湖蓝藻粉的傅里叶变换红外光谱图,如图 2 所示在 1 630 cm⁻¹ 附近出现 C=O 的伸缩振动峰,在 1 540 cm⁻¹ 附近出现 N-H 的弯曲振动峰,在 1 440 cm⁻¹ 附近出现 C-N 的特征吸收峰,符合酰胺键出峰规律;同时在 3 300 cm⁻¹ 附近出现 O-H 的特征吸收峰,在 2 700~2 500 cm⁻¹

处出现几个小峰,此峰由羧酸中的 O—H 的伸缩振动和变形振动的倍频及组合频引起,且此区域很少会出现其他峰,可作为判断氨基酸残基中羧酸存在的依据;因此,分析蓝藻粉中可能存在氨基酸残基,判断所得的水华蓝藻粉中可能含有氨基酸类物质,具备参与反应的活性位点。

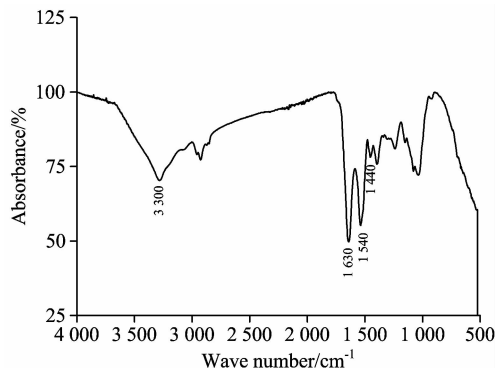


图 2 蓝藻粉的傅里叶变换红外光谱图

Fig. 2 FTIR spectra of algae powder

2.2 复合材料的红外光谱表征

实验使用 PE-g-MAH 作为增容剂,马来酸酐接枝物兼具烯烃的非极性链段和马来酸酐的极性基团。在复合材料实验过程中,高温熔融状态下非极性链段可以与 LDPE 很好的融合,同时酸酐基团在高温和螺杆剪切的作用下,能够与极性基团—OH 反应形成化学键^[12],可以明显改善不相容聚合物之间的相容性^[13]。图 3 为制备复合材料过程中 PE-g-MAH 与水华蓝藻粉中羟基的反应机理。如图 3 所示,LDPE-g-MAH 中的环状酸酐与蓝藻粉中的羟基发生开环酯化反应。

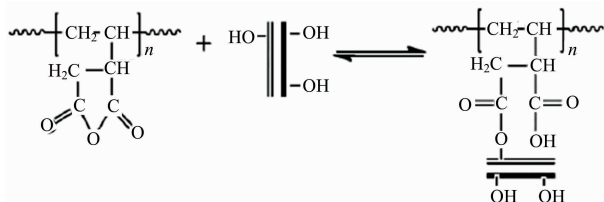


图 3 PE-g-MAH 和蓝藻粉的反应机理

Fig. 3 Reaction mechanism of PE-g-MAH and algae powder

图 4 为原料 LDPE 和 PE-g-MAH 及制得复合材料的红外光谱。低密度聚乙烯的红外光谱在 2 915 和 2 850 cm^{-1} 处附近存在两个较强的吸收峰,分别对应亚甲基上 C—H 的不对称伸缩振动和对称伸缩振动;在 1 460 cm^{-1} 处附近存在 C—H 的弯曲振动峰;在 720 cm^{-1} 处附近存在 $(\text{CH}_2)_n, n > 4$ 的面内摇摆振动峰。如图 4 所示,所得的 LDPE 红外光谱都有其对应的特征吸收峰。

由图 4 可以看出,在 PE-g-MAH 的红外光谱中,除了聚乙烯的特征吸收峰以外,还存在马来酸酐的特征吸收峰。酸酐中 C=O 基的反对称和对称的伸缩振动峰出现在 1 850 和 1 740 cm^{-1} 处,环状酸酐中 C—O—C 的伸缩振动特征峰出现在 1 200 cm^{-1} 附近。在图 4 中位于最底层的复合材料的

红外光谱中,除了聚乙烯的特征吸收峰以外,蓝藻粉中的酰胺键和 O—H,以及马来酸酐对应得特征吸收峰都已减弱或消失了,由此可以推测在复合材料的制备过程中,在高温和螺杆剪切的作用下,马来酸酐与—OH 发生了开环酯化反应。

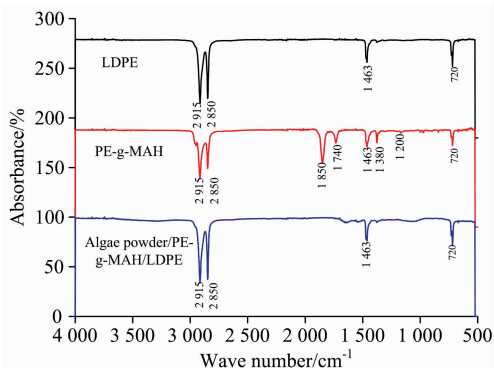


图 4 LDPE, PE-g-MAH 和蓝藻粉/PE-g-MAH/LDPE 的红外光谱

Fig. 4 FTIR spectra of LDPE, PE-g-MAH and algae powder/PE-g-MAH/LDPE

2.3 复合材料的形貌分析

图 5 为复合材料的扫描电子显微镜成像图,其中(a),(b)和(c)分别表示蓝藻粉含量为 5.00%, 15.00% 和 25.00% 时蓝藻粉/LDPE 复合材料的表面形貌图,(d)表示蓝藻粉含量为 15.00% 时,增容剂 PE-g-MAH 含量为 3.00% 时蓝藻粉/PE-g-MAH/LDPE 复合材料的表面形貌图。通过比较图 5(a),(b)和(c)可以看出,当蓝藻粉/LDPE 体系中蓝藻粉的含量较低为 5.00% 时,蓝藻粉在体系中分散较为均匀且颗粒较小,但随着蓝藻粉含量的增多,由于藻粉颗粒易成团的特

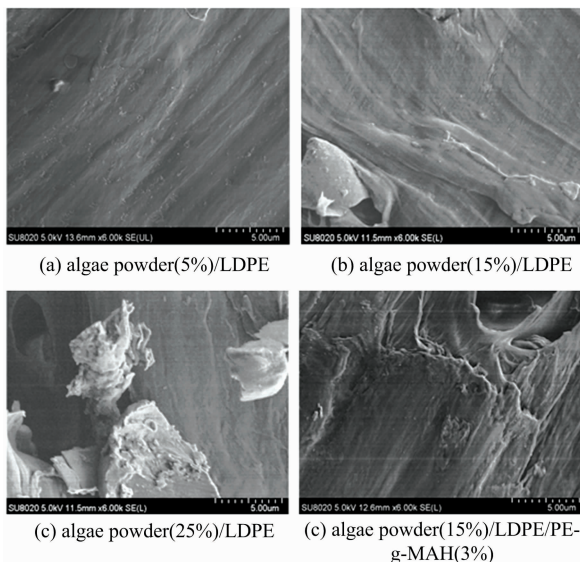


图 5 蓝藻粉/LDPE 和蓝藻粉/PE-g-MAH/LDPE 复合材料的 SEM 图

Fig. 5 SEM images of algae powder/LDPE and algae powder/PE-g-MAH/LDPE composites

性和两相间相容性差的原因,导致体系中蓝藻粉的颗粒尺寸不断增大,体系中颗粒的尺寸较大且在两相的相交处出现空洞。为了使材料中尽量多的加入藻粉同时不发生断裂,选用了蓝藻粉含量 15% 和蓝藻粉含量 15%、加入增容剂进行对比,即图 5(b)和(d)可以看出,当蓝藻粉的含量为 15.00% 时,加入增容剂 PE-g-MAH 后两相界面仍粗糙,但是蓝藻粉颗粒的分散性增强且将其包覆于材料中,可以看出两相的结合性增强,符合图 3 所反映出的反应机理。

2.4 复合材料的力学性能

2.4.1 蓝藻粉用量实验中复合材料的力学性能分析

当复合体系中蓝藻粉的含量作为单一变量时,由 0 增至 25.00% 时,蓝藻粉/LDPE 复合材料的力学性能变化如图 6 所示。随着蓝藻粉含量的增加,此复合材料的拉伸强度呈下降的趋势,弯曲强度基本保持稳定,弯曲模量有所提升,冲击强度下降幅度最大。至蓝藻粉含量由 0 增至 25.00% 时冲击强度为由 61.00 到 28.00 $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 下降了 54.10%, 拉伸强度由 13.40 MPa 降至 8.80 MPa, 下降幅度为 34.81%。这是因为当蓝藻粉的含量较低时,在体系中的分散性较好,随着含量的增加蓝藻粉颗粒会由于氢键作用力凝聚成团如图 5(c)所示,分散性下降导致复合体系中出现裂纹,拉伸性能和冲击性能下降明显。同时复合材料的刚性增强了,导致复合材料的弹性模量显著增强。

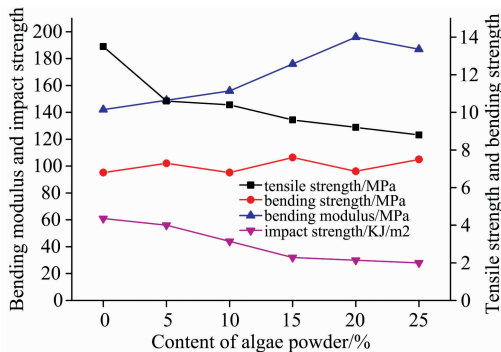


图 6 蓝藻粉/LDPE 复合材料的力学性能

Fig. 6 Mechanical properties of algae powder/LDPE composites

2.4.2 PE-g-MAH 用量实验中复合材料的力学性能分析

当复合材料中的蓝藻粉含量为 15.00% 时,以增容剂 PE-g-MAH 使用量作为单一变量。如图 7 所示,随着增容剂含量的增加,复合材料的拉伸强度先增大后趋于平稳,弯曲性能呈现先增大后下降的趋势冲击强度也出现先增大后下降的趋势。当增容剂的含量为 3.00% 时,拉伸强度和弯曲强度均接近最大值,分别为 11.70 和 8.80 MPa, 此时弯曲模量最

大为 220.00 MPa。因此考虑复合材料的力学性能变化趋势,可选择 3.00% 的增容剂 PE-g-MAH 用量为最佳。

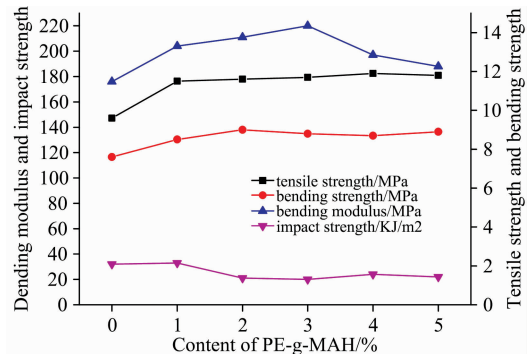


图 7 15% 蓝藻粉含量时,蓝藻粉/PE-g-MAH/LDPE 复合材料的力学性能

Fig. 7 Mechanical properties of algae powder/PE-g-MAH/LDPE composites containing 15% of algae powder

2.5 复合材料的热性能实验

复合材料熔融实验可知,纯 LDPE 的熔融温度为 107 °C 左右;加入 5.00%, 15.00% 和 25.00% 的蓝藻粉后,复合材料的熔融温度分别为 108, 108 和 107 °C 左右;当蓝藻粉含量为 15.00% 时,增容剂的加入熔融温度几乎没有变化,还是 108 °C 左右。说明复合材料的熔点随着蓝藻粉和增容剂的加入无显著差异,热稳定性较好。

3 结论

经复合材料的光谱测试表明,蓝藻粉可以与增容剂 PE-g-MAH 发生接枝反应,增强复合体系两相的相容性;在电子扫描图中随着蓝藻粉含量的增加,复合体系中成团现象显著,在增容剂的加入后体系的成团和断裂现象有所改善也进一步验证了光谱分析结果的正确性。

复合材料的力学性能测试结果表明,随着蓝藻粉含量的增加材料力学性能下降,随着增容剂用量的增加,拉伸强度、弯曲性能和冲击性能均呈现先增大后减小的趋势。综合考虑可选增容剂含量为 3.00%, 聚乙烯蜡和白油的用量为 3.00% 和 1.00% 时材料的力学性能最优秀。此时复合材料的拉伸强度、冲击强度、弯曲强度和弯曲模量分别为: 11.70 MPa, 20.00 $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2}$, 8.80 MPa 和 220.00 MPa, 熔融温度为 108 °C。

References

- [1] Rong Pji, Xi Wlu, Xian Nli, et al. *Ecological Engineering*, 2009, 35: 1584.
- [2] ZHAO Bing-bing, ZHANG Fa-yu, CHEN Yu, et al(赵冰冰, 张发宇, 陈 裕, 等). *Chinese Journal of Environmental Engineering(环境工程学报)*, 2016, 10(5): 2302.
- [3] HE Nai-pu, PAN Su-juan, WANG Rong-min(何乃普, 潘素娟, 王荣民). *Acta Polymerica Sinica(高分子学报)*, 2016, (1): 61.
- [4] MIAO Ni-na, ZHANG Min, XU Xiao-ling, et al(苗妮娜, 张 敏, 许小玲, 等). *Acta Polymerica Sinica(高分子学报)*, 2016, (4): 511.
- [5] Reddy N, Jiang Q, Yang Y. *Industrial Crops and Products*, 2012, 39: 26.
- [6] ZHANG Xiao-ling, YIN Gao-fang, ZHAO Nan-jing, et al(张小玲, 殷高方, 赵南京, 等). *Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析)*, 2017, 37(4): 1145.
- [7] Badrish Soni, Ujjval Trivedi, Datta Madamwar. *Bioresource Technology*, 2008, 99: 188.
- [8] NIU Na, LUO Xue-gang, LI Ji-wei, et al(牛 娜, 罗学刚, 李纪伟, 等). *Acta Materiae Compositae Sinica(复合材料学报)*, 2014, 31(4): 944.
- [9] Standardization Administration of the People's Republic of China(中国国家标准化管理委员会). GB/T 1040. 2—2006 Plastic the Measurement of Tensile Properties(GB/T 1040. 2—2006 塑料拉伸性能的测定). Beijing: Standards Press of China(北京: 中国标准出版社), 2006.
- [10] Standardization Administration of the People's Republic of China(中国国家标准化管理委员会). GB/T 9341—2000 Plastic Determination of Flexural Properties(GB/T 9341—2000 塑料弯曲性能试验方法). Beijing: Standards Press of China(北京: 中国标准出版社), 2000.
- [11] Standardization Administration of the People's Republic of China(中国国家标准化管理委员会). GB/T 1043. 1—2008 Plastic the Impact Properties of Simply Supported Beam (GB/T 1043. 1—2008 塑料简支梁冲击性能的测定). Beijing: Standards Press of China(北京: 中国标准出版社), 2008.
- [12] Reddy N, Chen L, Yang Y. *Industrial Crops and Products*, 2013, 43: 159.
- [13] Del Castillo-Castro T, Castillo-Ortega M M, Herrera-Franco P J, et al. *Journal of Applied Polymer Science*, 2011, 119(5): 2895.

Research on the Spectral Analysis of Algae Powder/Low Density Polyethylene Composites and Performance Feedback Mechanism

ZHAO Bing-bing¹, FANG Yan², ZHANG Fa-yu², WU Kang², WANG Jia-quan^{1,2*}

1. College of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China

2. School of Resources and Environment Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China

Abstract The project was started in order to solve the problem of periodic outbreaks of cyanobacteria in Chaohu Lake, and to improve the state of long degradation cycle of low-density polyethylene materials. In this study, the low density polyethylene (LDPE) was taken as matrix, and algae powder was taken as bio-material. Maleic anhydride grafted polyethylene (PE-g-MAH) was used as compatibilizer, and polyethylene wax and white oil were used as lubricant. The dosages of compatibilizer and algae powder were selected as the two factors in this paper. Mix the experimental materials in a certain proportion, then prepare the composite particles by double-screw extrusion method, obtain the samples by injection. By using ultraviolet-visible spectroscopy (UV-Vis) and fourier transform infrared spectrometer (FTIR Spectrometer), we can learn the spectral characteristics of materials, and analyze the structural changes of composite materials in the preparation, thus we can determine whether this method is feasible in preparing this composite in advance. Meanwhile, by using mechanical performance testing and scanning electron microscopy (SEM) as auxiliary means, comparing with the results of spectral analysis, we can adequately analyze the effects of algae powder and compatibilizer content on the structure and properties of the composite. Results showed that the absorption peaks appeared at 260nm and 620nm when using ultraviolet-visible absorption spectroscopy to analyze the separated liquid components obtained from the algae. It is proved that the algae contains phycobilliprotein and can be used as the bio-material in the preparation of composite materials. The characteristic peaks of amido bond has appeared respectively at 1 630, 1 540 and 1 440 cm^{-1} when using fourier transform infrared spectrometer to analyze the substances that participate in the reaction, which was in line with the peak law of amide bond; and the characteristic absorption peaks of O—H appeared near 3 300 cm^{-1} , which can further verify the existence of the active site of algae powder. It can be seen in the infrared spectrum of maleic anhydride, the characteristic peaks of C=O group appeared at 1 850 and 1 740 cm^{-1} , and the characteristic peak of stretching vibration of C—

O—C in cyclic anhydride appeared around $1\,200\text{ cm}^{-1}$. However, the characteristic peaks of amide bonds, H—O group and maleic anhydride except the characteristic absorption peak of polyethylene were weakened or disappeared when using Fourier transform infrared spectrometer to analyze the composite material obtained by reaction, and it can be speculated that the maleic anhydride has an open-loop esterification reaction with —OH, and the maleic anhydride plays a role in connecting two different reaction systems in the preparation of biological composites. In addition, it can be investigated intuitively by using scanning electron microscopy that the increase of algae powder content will lead to the aggravation of clumping in the composite system, and the addition of compatibilizer enhanced the adhesion of the interface of the composite system. The mechanical property test showed that the mechanical properties decreased with the increase of algae powder content, especially the decrease of impact properties with 54.10%. Results showed that when 15.00% of algae powder was added in the composite, the tensile strength, flexural property and impact property of the composite first increase and then decrease with increasing of compatibilizer content. Therefore, the results of scanning electron microscopy and mechanical properties verify the foresight and correctness of spectral analysis results from the side, avoiding the waste of resources caused by blind experiments and other issue. The optimized conditions for preparation of the bio-composite were determined with 15.00% of algae powder, 3.00% of PE-g-MAH, 3.00% of polyethylene wax and 1.00% of white oil. The mechanical properties of the bio-composite prepared under this condition were 11.70 MPa of tensile strength, $20.00\text{ kJ} \cdot \text{m}^{-2}$ of impact strength, 8.80 MPa of bending strength, and the bending modulus was 220.00 MPa.

Keywords Biomaterials; Spectral analysis; Performance feedback; Compatilizer

(Received Oct. 29, 2018; accepted Feb. 20, 2019)

* Corresponding author