

绿色植被近红外光谱模拟材料的设计及应用

王 晶, 李 澄, 刘 朗, 郑顺利, 项腾飞, 杨 玲

南京航空航天大学材料科学与技术学院, 江苏 南京 211106

摘要 通过对绿色植被近红外区反射光谱的系统分析,充分证明 O—H 决定植被在 1450 nm 和 1940 nm 附近的光谱特征,在此基础上,设计并制备了 4 种层间含 O—H 的新型光谱模拟材料 Mg-Al-X-LDH (X 为 NO_3^- 、 Cl^- 、 CO_3^{2-} 、 SO_4^{2-}),并对其进行了 X 射线衍射、红外光谱、热重分析及拉曼光谱表征。依据光谱相关系数和光谱角度匹配模型计算,4 种层状双金属氢氧化物(LDH)与植物叶片近红外反射光谱两种计算模型的相似度分别超过 0.9600 和 0.9700;以 Mg-Al-Cl-LDH 为模拟材料,初步与聚氨酯复合,制备了与植被在近红外区光谱高度相似的涂层,两种计算模型的相似度分别达到 0.9702 和 0.9924;Mg-Al-Cl-LDH 在紫外可见光区的高度透明性,有利于各个波段光谱材料的复合;经 180 °C 高温处理前后的 Mg-Al-Cl-LDH,两种计算模型的相似度依然能达到 0.9888 和 0.9959,说明 Mg-Al-LDH 有良好的热稳定性,不易失水。

关键词 光谱学;近红外区;层状双金属氢氧化物;反射光谱;涂层

中图分类号 O433.4; O611.64; TN213 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0230004

Design and Application of Simulation Material of Green Vegetation Spectrum in NIR Interval

Wang Jing, Li Cheng, Liu Lang, Zheng Shunli, Xiang Tengfei, Yang Ling

College of Materials Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 211106, China

Abstract The reflectance spectrum of fresh plant leaves in the near infrared has been systematically analyzed. It is verified that presence of O—H is the key to those vegetation's spectral characteristics at about 1450 nm and 1940 nm. Based on the knowledge, Mg-Al-X-LDH (X represents NO_3^- , Cl^- , CO_3^{2-} , SO_4^{2-}), four types of novel spectral simulation materials containing interlayered O—H, were designed and prepared, and their X-ray diffraction patterns, infrared spectra, thermogravimetric curves and Raman spectra were characterized. The model calculation results of spectral correlation mapper and spectral angle mapper show similarities more than 0.9600 and 0.9700 between four types of layered double hydroxides (LDHs) and plant leaves in near infrared reflectance spectrum. The polyurethane coating with Mg-Al-Cl-LDHs as a simulation material exhibits a highly coincided spectrum with that of plant leaves, and similarities of two calculation models are up to 0.9702 and 0.9924, respectively. The similarities calculation of reflectance spectra for Mg-Al-Cl-LDHs before and after calcining at 180 °C are still up to 0.9888 and 0.9959, indicating high thermo stability of Mg-Al-LDHs.

Key words spectroscopy; near infrared region; layered double hydroxides; reflectance spectrum; coating

OCIS codes 300.6340; 300.6450; 160.4670

1 引 言

可见近红外光谱的波长范围在 400~2500 nm,近年来,由于其高效、快速及无损的特点被广泛应用在农业、军事、医学等领域^[1-3]。绿色植被是指主要生长在地表的所有绿色植物的总称,能够反映出—个区域总体

收稿日期: 2016-08-24; 收到修改稿日期: 2016-10-13

基金项目: 中联科技新材料联合实验室资助项目(2013-B-03)、江苏高校优势学科建设工程资助项目

作者简介: 王 晶(1990—),女,硕士研究生,主要从事特征光谱材料方面的研究。E-mail: dezhouwangjing211@126.com

导师简介: 李 澄(1959—),男,博士,教授,主要从事特征光谱材料及其功能涂层方面的研究。

E-mail: licheng@nuaa.edu.cn(通信联系人)

的环境状态。就地面军事目标而言,绿色植被则是非常重要的背景基础,因而模拟绿色植被光谱对提高目标的隐蔽性意义重大。绿色植被在可见近红外光区具有非常典型的光谱特征,因此植物的光谱模拟是在可见近红外区,传统的模拟在可见光区可以达到“同色”的效果,但在近红外光区很难实现精确的光谱匹配,无法对抗高光谱遥感探测侦察^[4-6],而高光谱遥感探测技术的基础就是目标在近红外区的光谱解析。为此,一些学者对材料进行了改善,但模拟 1300~2500 nm 波长区间的材料时仍存在缺陷,如文献^[6-7]采用高吸水材料作为水的载体,但是这些材料在吸水后,体积发生剧烈膨胀,颗粒变得很大;杨玉杰等^[8]采用聚偏二氯乙烯袋封装液体水,然而聚偏二氯乙烯的光、热稳定性差;秦锐等^[9]采用一种新型含水脲醛树脂微胶囊,含水脲醛树脂微胶囊久置后,微乳液会产生不同程度的破坏,水从胶囊中渗出;郭利等^[10]直接以液态水为填料;蒋晓军等^[11]采用聚乙烯醇薄膜,但是这种材料易被分解产生 CO₂ 和水,且耐候性差^[12]。上述材料中的水都是以吸附水或自由水的形式存在,而吸附水和自由水在光照或受热情况下很容易失水,使光谱受到很大的影响,对于高光谱伪装涂料的应用具有一定的限制。

层状双氢氧化物(LDH)是由带正电荷的类水镁石层和包含阴离子和溶剂分子的层内空间组成的阴离子型粘土化合物。通式为 $[M_1^{2+}M_2^{3+}(\text{OH})_2][A^{n-}]_{x/n} \cdot y\text{H}_2\text{O}$,其中,M 是层板金属阳离子,Aⁿ⁻ 为层间阴离子,y 为层间水的个数,x 是 M²⁺ 物质的量与 M²⁺ 与 M³⁺ 的物质的量和之比,一般认为 0.20 < x < 0.33,可得到纯相 LDH^[13]。LDH 具有可交换的阴离子、特殊的层状结构和结构记忆功能等特点,近年来日益受到研究者的关注,如作为吸附剂^[14]、电极^[15]、紫外阻隔材料^[16];且在催化^[17]和医学科学^[18]等领域有广泛应用。由于其特殊的层状结构,层间结晶水的含量可控,结构稳定,是一类很有希望的待选材料类型。

本文制备了含 NO₃⁻、Cl⁻、CO₃²⁻、SO₄²⁻ 4 种不同层间阴离子的 Mg-Al-LDH 材料,并研究了这 4 种 LDH 的光谱特性及热稳定性。以 Mg-Al-Cl-LDH 为模拟材料,以聚氨酯为成膜树脂,制成涂层,并初步探究其光谱性能,将涂层与绿色植被的近红外反射光谱作相似度分析。

2 实验方法和材料制备

2.1 绿色植被近红外光谱模拟材料的设计

绿色植被由多种植物品种混合而成,为全面系统了解绿色健康植被的反射光谱特性,于南京地区采集比较了银杏、竹、梧桐等 13 种裸、被子植物,对其叶片进行可见-近红外(Vis-NIR)漫反射光谱测定,结果如图 1(a)所示。从图 1(a)看出,绿色健康植被光谱具有以下共同特征:在可见光区,因叶绿素对 492~577 nm 的绿光吸收少,在 550 nm 处形成反射峰,称为“绿峰”;在 680~750 nm 区间,反射率迅速上升的斜坡为“红边”,其位置与植被叶绿素含量有关^[19];进入近红外区域后,在 780~1300 nm 区间,反射率整体相对较高,称为“近红外高原”,这与叶片内部结构有关^[20];在 1450 nm 和 1940 nm 左右有明显水吸收谷。这与文献^[21]中绿色植被典型的光谱特征一致。

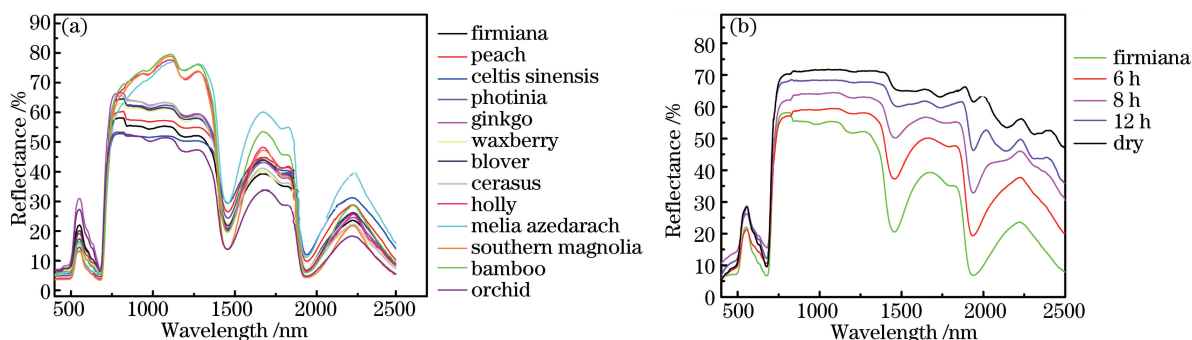


图 1 (a)绿色植被和(b)梧桐不同干燥时间的可见近红外反射光谱

Fig. 1 Vis-NIR reflectance spectra of (a) green vegetations and (b) firmiana dried for different time

由上述结论可知,新鲜绿色植被在 1300~2500 nm 光区主要是由水控制,对在 40 °C 下经过不同干燥时间后的梧桐叶做反射光谱测试,见图 1(b),可以明显看出,随干燥时间的延长,在 1450 nm 和 1940 nm 处的吸收逐渐变弱,并显现出 C-H、N-H 的小吸收谷。近红外光区(NIR)通常被定义为 780~2500 nm 的波

长范围,此区域主要是含氢基团(C-H、N-H 和 O-H)的和频与各级倍频振动产生的吸收^[22],图2是香樟叶的红外谱图,在 3370 cm^{-1} 附近宽且强的吸收带是植物中O-H伸缩振动产生的,约 1630 cm^{-1} 处的吸收峰是水的弯曲振动峰。这充分说明O-H决定绿色植被在 1450 nm 和 1940 nm 附近的光谱特征,所以合格的近红外模拟材料必须显现出O-H的特征峰。

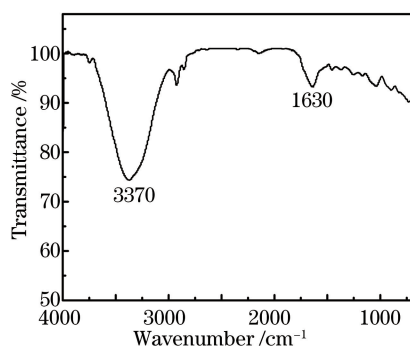


图2 香樟叶的红外谱图

Fig. 2 Infrared spectrum of *Cinnamomum camphora* leaf

选用LDH作为绿色植被近红外光谱模拟材料,LDH是由金属离子和6个羟基配位构成的八面体层状结构,其结构与水镁石 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 类似。在一定比例范围内,二价金属离子 M^{2+} 可被半径大小相似的 M^{3+} 所取代,使层板带正电,层板所带正电荷被层间阴离子 A^{n-} 抵消,整个LDH表现为电中性^[23]。层间区域还存在一些溶剂分子,制备的Mg-Al-X-LDH是以水为溶剂,水分子通过大量的氢键与金属氢氧化物和层间阴离子相连接。层状双金属氢氧化物的理想化结构如图3所示。

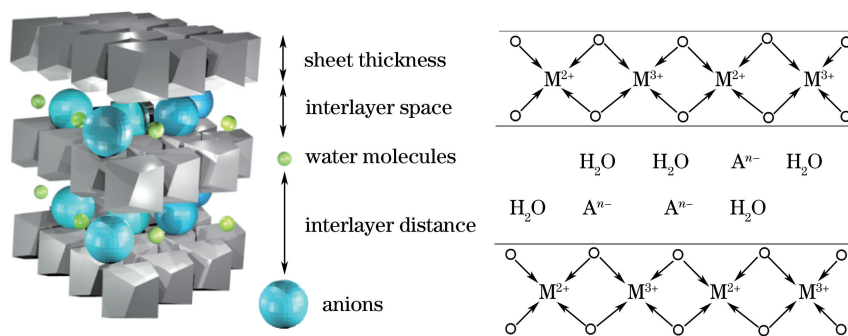


图3 层状双金属氢氧化物的理想化结构示意图

Fig. 3 Idealized structural diagram of layered double hydroxides

2.2 绿色植被近红外光谱模拟材料的制备

2.2.1 实验原料

实验使用的硝酸镁、硝酸钠、氯化镁、氯化钠、硫酸钠、碳酸钠、氢氧化钠购于南京化学试剂有限公司,硝酸铝是由中国上海新宝精细化工厂提供,氯化铝购于国药集团化学试剂有限公司,所有试剂均为分析纯,实验所用水为新制的去离子水,使用前经再次煮沸以除去溶于其中的二氧化碳。

2.2.2 Mg-Al-X-LDH(X为 NO_3^- 、 Cl^- 、 CO_3^{2-} 、 SO_4^{2-})的合成

将 $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (0.015 mol)和 $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ (0.005 mol)溶于100 mL水中配制成盐溶液,并逐滴加入到装有100 mL的 NaNO_3 (0.05 mol/L)溶液的圆底烧瓶中,并用 NaOH (2 mol/L)溶液调节pH至9~10。于室温下剧烈搅拌24 h,然后升温至 $80\text{ }^\circ\text{C}$ 搅拌10 h,抽滤、洗涤并于 $50\text{ }^\circ\text{C}$ 下真空干燥12 h,得到白色粉末Mg-Al- NO_3 -LDH。合成Mg-Al- CO_3 -LDH和Mg-Al- SO_4 -LDH时,仅将 NaNO_3 替换为 Na_2CO_3 或 Na_2SO_4 ,其他条件不变。而Mg-Al- Cl -LDH样品以 AlCl_3 、 $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、 NaCl 和 NaOH 为原料。

2.3 模拟材料涂层的制备

铝合金基板(ALY120,30 mm×30 mm×0.2 mm)按照以下程序进行预处理:砂纸打磨→水洗→碱洗→水洗→酸洗→水洗→乙醇洗→吹干。以聚氨酯为成膜树脂,加入适当比例的模拟材料,用细胞粉碎机振荡分

散 2 min, 静置数秒, 待气泡消除后, 采用刮涂法制备涂层, 于室温下固化 48 h。

2.4 分析与表征

采用日本岛津 UV-3600 型 UV-Vis-NIR 分光光度计配合 ISR-3100 积分球测定样品的漫反射曲线, 平滑硫酸钡为基准, 粉末压样, 测试波长范围为 400~2500 nm; 采用美国珀金埃尔默公司 Spectrum GX-III 型傅里叶变换红外光谱仪测定样品的中红外光谱, 采用 KBr 压片法, 波数范围为 400~4000 cm^{-1} ; 采用日本 HORIBA LabRAM HR Evolution 型激光共聚焦显微拉曼光谱仪测定样品的拉曼光谱, 光谱范围为 200~2000 cm^{-1} ; 采用德国耐驰 STA 409 PC 型热重分析 (TGA) 仪对样品进行热重分析; 采用日本岛津 XRD-6100 型 X 射线粉末衍射仪表征 Mg-Al-LDH 的晶体结构。

3 结果与讨论

3.1 LDH 和绿色植被近红外反射光谱的相似性

图 4(a) 为 Mg-Al-X-LDH 的吸收光谱, 在 1440 nm 左右的吸收带是 O-H 的一级倍频产生, 在 1960 nm 左右的吸收带归因于 O-H 和水的组合^[22]。从图 4(b) Mg-Al-X-LDH 与石楠叶的反射光谱图中明显看出, 4 种 LDH 均在 780~1300 nm 有高且平稳的近红外高原, 且 1300~2500 nm 有吸收谷, 即 LDH 在近红外光区内能较好地模拟绿色植被的反射光谱。分别采用以下两种光谱匹配模型计算 Mg-Al-X-LDHs 模拟材料与植被近红外反射光谱相似程度。

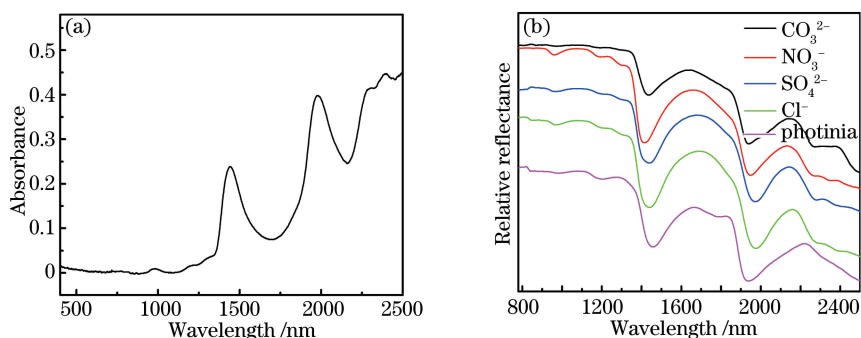


图 4 (a) Mg-Al-Cl-LDH 吸收光谱; (b) LDH 和石楠叶的反射光谱对比图

Fig. 4 (a) Absorption spectrum of Mg-Al-Cl-LDH; (b) comparison of reflectance spectra between LDHs and photinia leaf

被测物与参照物反射光谱相关系数 γ_{xy} 定义为^[6, 24-25]

$$\gamma_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x}_I)(y_i - \bar{y}_I)}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x}_I)^2 \sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y}_I)^2}}, \quad (1)$$

式中 x_i 和 y_i 分别为被测物与参照物在光谱曲线中第 i 点处的光谱值, $\bar{x}_I = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_i$ 和 $\bar{y}_I = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m y_i$ 分别为被测物与参照物的光谱均值。如果两谱线形状完全相同, $\gamma_{xy} = 1$, 否则 $\gamma_{xy} < 1$, 侧重于评估两光谱在整个测量波长范围内光谱相似的程度。

光谱角度匹配是将高光谱影像中每个像元 m 个波段的光谱响应作为 m 维空间的矢量, 夹角的余弦定义为^[9, 24-25]

$$\cos \theta = \frac{(\mathbf{X}, \mathbf{Y})}{|\mathbf{X}| |\mathbf{Y}|} = \frac{\sum_{i=1}^m X_i Y_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^m X_i^2} \sqrt{\sum_{i=1}^m Y_i^2}}, \quad (2)$$

式中向量 \mathbf{X} 为被测光谱, \mathbf{Y} 为参考光谱, m 为光谱维数, θ 是被测光谱与参考光谱矢量之间的夹角, θ 越小, 相似度越高, 夹角的余弦反映两光谱在几何上的相似。均以石楠为参照标准, 依据光谱匹配模型计算, 结果如表 1 所示, 4 种 LDH 与叶片反射光谱相关系数均超过 0.9600, 夹角余弦值均超过 0.9700, 表明 LDH 能很

好地模拟植被的近红外光谱。

表 1 反射光谱相似度计算结果

Table 1 Similarity calculation of reflectance spectrum

Parameter	NO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	CO_3^{2-}
γ_{xy}	0.9703	0.9731	0.9667	0.9610
$\cos \theta$	0.9882	0.9813	0.9908	0.9722

图 5 是 Mg-Al-Cl-LDH 和不同温度焙烧产物的反射光谱图(升温速率 $2\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$,保温 2 h),由此图可知,经过 $180\text{ }^\circ\text{C}$ 煅烧后的 Mg-Al-180 与 Mg-Al-LDH 相比,反射光谱中水峰几乎未变小,且相关系数和夹角余弦值分别为 0.9888 和 0.9959,表明 Mg-Al-LDH 具有良好的热稳定性,不易丧失位于层间的结晶水,这是文献报道的包覆水手段或吸水材料所不具有的性质。因此证明 LDH 是模拟近红外反射光谱的优良材料。

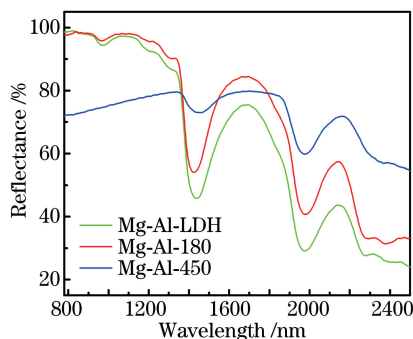


图 5 Mg-Al-LDH 和 $180\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $450\text{ }^\circ\text{C}$ 焙烧产物的反射光谱图

Fig. 5 Reflectance spectra of Mg-Al-LDH and calcined Mg-Al-LDH at $180\text{ }^\circ\text{C}$ and $450\text{ }^\circ\text{C}$

3.2 Mg-Al-X-LDH 的物理表征

图 6(a)为 4 种 Mg-Al-LDH 的 X 射线衍射(XRD)图,LDH 在低 2θ 角(003)、(006)、(012)晶面衍射峰尖锐,在 $60^\circ\sim 65^\circ$ 处有两个对称较好的衍射峰,对应(110)以及(113)晶面,表明采用共沉淀法合成的样品均形成了 LDH 特有的层状结构。

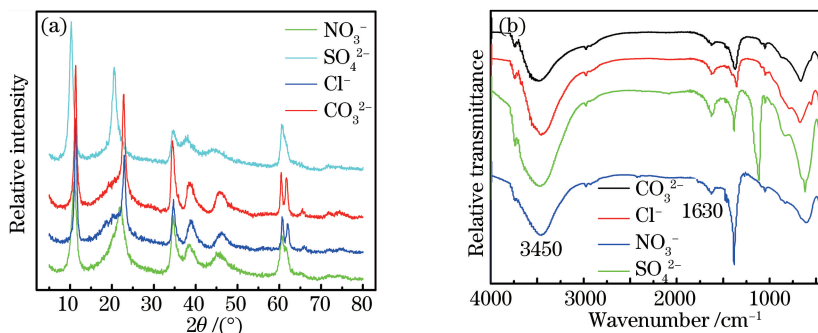
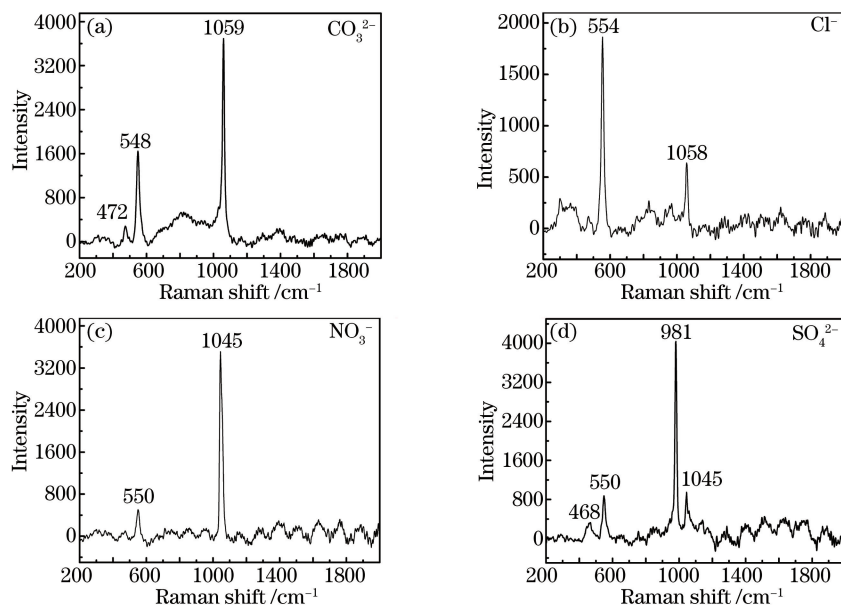


图 6 (a) Mg-Al-X-LDH 的 XRD 图;(b) Mg-Al-X-LDH 的红外光谱图

Fig. 6 (a) X-ray diffraction patterns of Mg-Al-X-LDH; (b) infrared spectra of synthesized Mg-Al-X-LDH

由图 6(b)Mg-Al-X-LDH 的红外光谱图可知,4 种 LDH 在 3450 cm^{-1} 附近宽且强的吸收带归因于类水镁石层 O-H 和 H_2O 的伸缩振动^[26], 1630 cm^{-1} 处的小吸收峰由 H_2O 的弯曲振动产生,这与上述香樟叶红外谱图特征吸收峰一致。为进一步验证不同 Mg-Al-X-LDH 的层间阴离子,对样品进行拉曼光谱测试,结果示于图 7。在图 7(a)中 1059 cm^{-1} 处为 CO_3^{2-} 的强振动峰,其中 472 cm^{-1} 和 548 cm^{-1} 处弱的吸收峰为 Al-O-Al 和 Al-O-Mg 振动峰^[27];而 Cl^- 型 LDH 的拉曼光谱显示了弱的 CO_3^{2-} 峰,说明此样品含有极少量 CO_3^{2-} ,究其来源,可能是制备过程中溶液吸收的少量 CO_2 发生反应 $\text{CO}_2 + \text{OH}^- \rightarrow \text{HCO}_3^-$ 或 CO_3^{2-} ,这些离子会插入到 LDH 层间;图 7(c)中在 1045 cm^{-1} 为 NO_3^- 的振动峰; SO_4^{2-} 在拉曼谱图中 981 cm^{-1} 处有特征振动峰,同时还观察到弱的 NO_3^- 特征峰,可能是原料中极少数的硝酸根参与形成了 Mg-Al- NO_3 -LDH。

LDH 受热分解过程包括表面水的脱除、层间脱水、层板脱羟基、层间阴离子分解以及新相的形成等步

图 7 Mg-Al-X-LDH 在 200~2000 cm^{-1} 的拉曼光谱图Fig. 7 Raman spectra of Mg-Al-X-LDH in the 200-2000 cm^{-1} region

骤,随着温度的升高,这些步骤依次发生。图 8 可以明显看到 3 个主要的失重阶段:低于 200 $^{\circ}\text{C}$ 是表面水和层间水的脱除,100~250 $^{\circ}\text{C}$ 范围内的质量损失大部分是层间结晶水的脱除^[28];200~450 $^{\circ}\text{C}$ 为水镁石层羟基的脱除以及层间部分阴离子的分解;随着温度进一步升高,层间阴离子继续分解,镁铝氢氧化物转化为镁铝氧化物,使镁铝氢氧化物层板垮塌,导致结构瓦解。实验发现,层状结构破坏的温度不低于 450 $^{\circ}\text{C}$,说明 LDH 具有较高的热稳定性,这对于其作为模拟材料的应用是非常有利的。

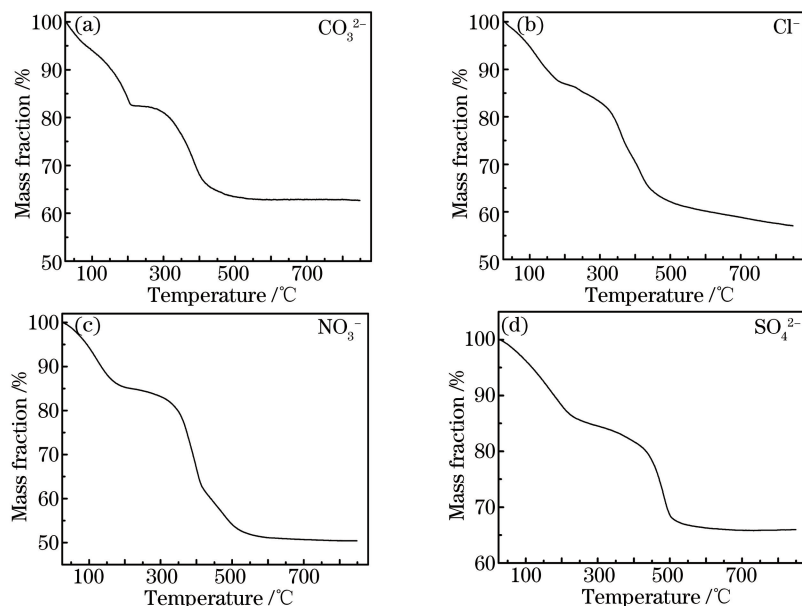


图 8 Mg-Al-X-LDH 的热重曲线

Fig. 8 Thermogravimetric curve of Mg-Al-X-LDH

3.3 用涂层形式对叶片近红外反射光谱的初步模拟

近红外隐身方式多以涂料为主,涂层技术具有施工成本低、工艺简单、且不受应用物体几何形状限制等优点^[29]。以 Mg-Al-Cl-LDH 为模拟材料,初步制备涂层并做反射光谱测试,如图 9 所示。由图可知,涂层在 780~2500 nm 光谱内能较好地模拟绿色植被近红外反射光谱,且相关系数和夹角余弦值分别为 0.9702 和 0.9924。模拟绿色植被在紫外可见近红外区域反射光谱的材料,是由各个光谱波段材料复合的,再依据反射

率的高低添加相应的光谱反射率调节剂,结合图 4(a)Mg-Al-LDH 吸收光谱可知,近红外光谱材料 Mg-Al-LDH 在紫外可见光区具有高透明性,不影响其他波段材料的光谱特性,为整个光谱材料复合提供有利条件。

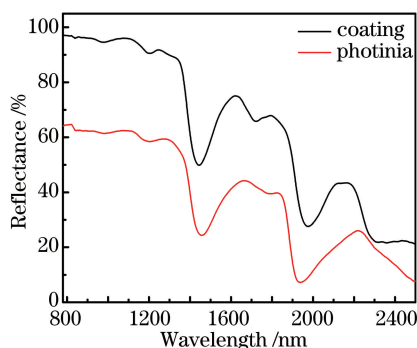


图 9 涂层与石榴叶的反射光谱对比图

Fig. 9 Comparison of reflectance spectra between coating and photinia leaf

4 结 论

设计了 4 种层间有 O-H 的新型光谱模拟材料 Mg-Al-LDH,4 种 LDH 在近红外光区均表现出近红外高原、1450 nm 和 1940 nm 附近有吸收谷,且 4 种 LDH 与叶片近红外反射光谱相关系数和夹角余弦值分别超过 0.9600 和 0.9700;经 180 °C 热处理前后的 Mg-Al-LDH,彼此反射光谱的两种计算模型的相似度也能达到 0.9888 和 0.9959,表明 Mg-Al-LDH 有良好的热稳定性,不易失结晶水;以 Mg-Al-LDH 为模拟材料,聚氨酯为成膜树脂初步制备涂层,涂层与叶片光谱在近红外区的两种相似度分别为 0.9702 和 0.9924。Mg-Al-LDH 与植被反射光谱在近红外区光谱的高度相似性、紫外可见光区的高透明性、良好热稳定性及不易失水等优点,使其在隐身材料方面具有潜在的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Sun Tong, Wu Yiqing, Li Xiaozhen, *et al.* Discrimination of camellia oil adulteration by NIR spectra and subwindow permutation analysis[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(6): 0630005.
孙 通, 吴宜青, 李晓珍, 等. 基于近红外光谱和子窗口重排分析的山茶油掺假检测[J]. *光学学报*, 2015, 35(6): 0630005.
- [2] Liu Bing. Research on miniature visible/near-infrared wide range real-time imaging spectrum technology [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2015.
刘 兵. 小型化可见/近红外宽波段实时成像光谱技术研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2015.
- [3] Pan Jinjin, Jiao Xuejun, Jiang Guohua, *et al.* Extracting cardiac and respiratory features from optical signal of functional near-infrared spectroscopy[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(9): 0917001.
潘津津, 焦学军, 姜国华, 等. 从功能性近红外光谱法的光学信号中提取心动和呼吸特征[J]. *光学学报*, 2015, 35(9): 0917001.
- [4] Yang Yujie, Hu Biru, Wu Wenjian. Design and preparation of bionic camouflage materials by simulating plant leaves [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2011, 33(5): 50-53.
杨玉杰, 胡碧茹, 吴文健. 植物叶片仿生伪装材料的设计与制备[J]. *国防科技大学学报*, 2011, 33(5): 50-53.
- [5] Guo Jiaqi, Zhang Zhigang, Hu Zebin, *et al.* Advance and trend of near infrared camouflage technology[J]. *Infrared Technology*, 2016, 38(2): 96-101.
郭家齐, 张志刚, 胡泽斌, 等. 浅谈近红外伪装技术的发展现状及趋势[J]. *红外技术*, 2016, 38(2): 96-101.
- [6] Li Min, Li Cheng, Zheng Shunli, *et al.* Research on filler design and coating preparation of simulating green vegetation [J]. *Infrared Technology*, 2015, 37(9): 788-792.
李 敏, 李 澄, 郑顺丽, 等. 模拟绿色植物光谱的填料设计与涂层制备研究[J]. *红外技术*, 2015, 37(9): 788-792.
- [7] Liu Z M, Wu W J, Hu B R. Design of biomimetic camouflage materials based on angiosperm leaf organs[J]. *Science in China Series E: Technological Sciences*, 2008, 51(11): 1902-1910.

- [8] Yang Yujie, Liu Zhiming, Hu Biru, *et al.* Design of plant leaf bionic camouflage materials based on spectral analysis [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2011, 31(6): 1668-1672.
杨玉杰, 刘志明, 胡碧茹, 等. 基于光谱分析的植物叶片仿生伪装材料设计 [J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(6): 1668-1672.
- [9] Qin R, Xu G, Guo L, *et al.* Preparation and characterization of a novel poly(urea-formaldehyde) microcapsules with similar reflectance spectrum to leaves in the UV-Vis-NIR region of 300-2500 nm [J]. Materials Chemistry and Physics, 2012, 136(2-3): 737-743.
- [10] Gou Li, Xu Guoyue, Li Cheng, *et al.* Research on preparation and spectral properties of a new near-infrared camouflage coating [J]. Infrared Technology, 2012, 34(10): 588-592.
郭利, 徐国跃, 李澄, 等. 一种新型近红外伪装涂层的制备及光谱性能研究 [J]. 红外技术, 2012, 34(10): 588-592.
- [11] Jiang Xiaojun, Lü Xuliang, Pan Jialiang, *et al.* Design and preparation of plant bionic materials based on optical and infrared features simulation [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2015, 35(7): 1835-1839.
蒋晓军, 吕绪良, 潘家亮, 等. 基于光学和红外特征模拟的植物仿生材料设计制备 [J]. 光谱学与光谱分析, 2015, 35(7): 1835-1839.
- [12] Wang Jing, Yuan Huilin, Ma Peilan, *et al.* Production, application and development of PVA film [J]. Plastics, 2005, 34(2): 12-17.
王婧, 苑会林, 马沛岚, 等. 聚乙烯醇薄膜的生产及应用现状与展望 [J]. 塑料, 2005, 34(2): 12-17.
- [13] Khan A I, O'Hare D. Intercalation chemistry of layered double hydroxides: recent developments and applications [J]. ChemInform, 2003, 34(20): 483-505.
- [14] Li S, Ribeiro A M, Shi Y, *et al.* Synthesis, pelleting, and performance evaluation of a novel K-promoted γ -alumina/MgAl-layered double oxide composite adsorbent for warm gas H_2/CO_2 separation [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2015, 54(28): 7154-7163.
- [15] Zhao J, Chen J, Xu S, *et al.* CoMn-layered double hydroxide nanowalls supported on carbon fibers for high-performance flexible energy storage devices [J]. Journal of Materials Chemistry A, 2013, 1(31): 8836-8843.
- [16] Wu H, Li L, Yu J, *et al.* Effect of layered double hydroxides on ultraviolet aging properties of different bitumens [J]. Construction and Building Materials, 2016, 111(15): 565-570.
- [17] Buffet J C, Wanna N, Arnold T A Q, *et al.* Highly tunable catalyst supports for single-site ethylene polymerization [J]. Chemistry of Materials, 2015, 27(5): 1495-1501.
- [18] Zhu R, Wang Q, Zhu Y, *et al.* pH sensitive nano layered double hydroxides reduce the hematotoxicity and enhance the anticancer efficacy of etoposide on non-small cell lung cancer [J]. Acta Biomaterialia, 2016, 29: 320-332.
- [19] Mohd Shafri H Z, Mohd Salleh M A, Ghiyamat A. Hyperspectral remote sensing of vegetation using red edge position techniques [J]. American Journal of Applied Sciences, 2006, 3(6): 1864-1871.
- [20] 王纪华, 赵春江, 黄文江, 等. 农业定量遥感基础与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [21] Jacquemoud S, Ustin S L, Verdebout J, *et al.* Estimating leaf biochemistry using the PROSPECT leaf optical properties model [J]. Remote Sensing of Environment, 1996, 56(3): 194-202.
- [22] Weyer L G. Near-infrared spectroscopy of organic substances [J]. Applied Spectroscopy Reviews, 1985, 21(1-2): 1-43.
- [23] Theiss F L, Ayoko G A, Frost R L. Synthesis of layered double hydroxides containing Mg^{2+} , Zn^{2+} , Ca^{2+} and Al^{3+} layer cations by co-precipitation methods - a review [J]. ChemInform, 2016, 47(33): 200-213.
- [24] Xu Weidong, Yin Qiu, Kuang Dingbo. Comparison of different spectral match models [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2005, 24(4): 296-300.
许卫东, 尹球, 匡定波. 地物光谱匹配模型比较研究 [J]. 红外与毫米波学报, 2005, 24(4): 296-300.
- [25] Wen Binggong, Feng Wufa, Liu Wei, *et al.* Matching and classification based on the whole comparability measure of spectral curve [J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2009, 26(2): 128-131.
闻兵工, 冯伍法, 刘伟, 等. 基于光谱曲线整体相似性测度的匹配分类 [J]. 测绘科学技术学报, 2009, 26(2): 128-131.
- [26] Ahmed A A A, Talib Z A, Hussein M Z B. Thermal, optical and dielectric properties of Zn-Al layered double hydroxide [J]. Applied Clay Science, 2012, 56: 68-76.
- [27] Palmer S J, Frost R L, Ayoko G, *et al.* Synthesis and Raman spectroscopic characterisation of hydrotalcite with CO_3^{2-} and $(MoO_4)^{2-}$ anions in the interlayer [J]. Journal of Raman Spectroscopy, 2008, 39(3): 395-401.

- [28] Radha S, Navrotsky A. Energetics of CO₂ adsorption on Mg-Al layered double hydroxides and related mixed metal oxides[J]. *Journal of Physical Chemistry C*, 2014, 118(51): 29836-29844.
- [29] Liu Jiangwei, Shi Jiaming, Dang Kezheng, *et al.* Simulation and experiment research on emissivity of infrared stealth coating[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(1): 012001.
刘姜伟, 时家明, 党可征, 等. 红外隐身涂层发射率的仿真计算[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(1): 012001.