

# PDMS 改性环氧树脂/ $\text{Sm}_2\text{O}_3$ 复合涂层的近红外光谱及疏水性研究

吕丹丹, 韦惠如, 张伟钢\*

滁州学院材料与化学工程学院, 安徽 滁州 239000

**摘要** 以聚二甲基硅氧烷(PDMS)改性环氧树脂(HYSZ)为粘合剂,  $\text{Sm}_2\text{O}_3$  为功能颜料, 纳米  $\text{SiO}_2$  为微纳结构改性剂, 制备得到了一种同时具有良好疏水性能和附着力的近红外吸收涂层。系统分析了 PDMS 和 HYSZ 质量比、邻苯二甲酸二辛酯(DOP)添加量、总填料添加量、 $\text{Sm}_2\text{O}_3$  和纳米  $\text{SiO}_2$  质量比对涂层性能的影响。结果表明: PDMS 改性可明显降低涂层的表面能, 从而使涂层的疏水性得到明显增强。利用 DOP 强化涂层韧性和微观搭桥作用可增强涂层整体性, 从而可明显提高涂层的附着力和近红外吸收性能。涂层的表面粗糙度可随总填料添加量的增加而明显升高, 进而可使涂层表现出更优的疏水性能。当涂层中 PDMS 和 HYSZ 质量比、DOP 添加量、总填料添加量、 $\text{Sm}_2\text{O}_3$  和纳米  $\text{SiO}_2$  质量比分别为 1:9, 20%, 50% 和 5.5:4.5 时, 涂层同时具有良好的近红外低反射率(59.1%)、疏水性能(水接触角为  $137^\circ$ )及附着力(2 级)。

**关键词** 复合涂层; 近红外吸收; 疏水性; 力学性能

**中图分类号**: E952.2

**文献标识码**: A

**DOI**: 10.3964/j.issn.1000-0593(2022)09-2855-07

## 引言

进入 21 世纪以来, 激光制导武器和探测技术得到了快速发展, 相关制导导弹的打击精度已能实现只要发现目标就可击毁目标的水平<sup>[1]</sup>。鉴于此, 具有良好激光吸收能力, 可有效降低战机、导弹、坦克、战车等各类目标激光反射信号, 从而可实现目标激光隐身效果的激光隐身功能材料已受到了国内外学者的广泛关注<sup>[2-5]</sup>。其中, 具有涂装方便、使用及维护成本低、激光隐身效果突出的  $1.06 \mu\text{m}$  近红外吸收涂层是目前被学术界广泛认可的技术方法<sup>[6]</sup>。然而, 传统的由单一聚氨酯或环氧树脂等高表面能树脂作为基体制备得到的  $1.06 \mu\text{m}$  近红外吸收涂层由于高表面能特性<sup>[6-7]</sup>, 使涂层在长期的室内储存及野外战训过程中容易在表面吸附自然界中的灰尘, 导致目标激光隐身能力降低甚至消失。这已成为激光隐身涂层在现有基础上进一步提高使用效能及稳定性的重要现实问题。要解决上述问题的核心技术手段就是要在保持涂层具备良好  $1.06 \mu\text{m}$  近红外光低反射率性能的前提下降低涂层的表面能, 进而明显提高涂层的疏水性<sup>[8-10]</sup>。同时, 作为一种面向陆海空各类军用装备工程应用的特种功能涂

层, 还需具备良好的附着力性能。因此, 研制出一种同时具有良好疏水性、 $1.06 \mu\text{m}$  近红外光低反射率及附着力性能良好的功能涂层具有重要的现实意义。

在制备功能涂层过程中引入具有低表面能特性的树脂基体以降低涂层表面能及在涂层表面构筑具有丰富乳突状结构特征的微纳米粗糙结构是获得具有良好疏水特性涂层的两条主要技术途径<sup>[11-12]</sup>。如将表面能较低的聚二甲基硅氧烷(PDMS)作为功能涂层的树脂基体可获得具有突出疏水特性的表面涂层<sup>[13]</sup>。通过高能激光刻蚀基材表面的方式可在基材表面获得大量的微纳米粗糙结构, 从而可使其表现出突出的疏水特性<sup>[14]</sup>。将具有轻质疏水特性的纳米  $\text{SiO}_2$  颗粒引入低表面能涂层配方中, 可在涂层表面构建大量的由纳米  $\text{SiO}_2$  和低表面能树脂复合而成的乳突状微纳米粗糙结构, 同样可以明显提高涂层的疏水性能<sup>[15]</sup>。

本研究采用具有近红外吸收特性的  $\text{Sm}_2\text{O}_3$  作为功能填料<sup>[16]</sup>, 以低表面能 PDMS 改性后的环氧树脂为黏合剂, 纳米  $\text{SiO}_2$  为微纳米结构改性剂设计并制备得到了一种  $1.06 \mu\text{m}$  近红外低反射率涂层。重点研究了 PDMS 和环氧树脂配比、增韧剂邻苯二甲酸二辛酯(DOP)添加量、总填料添加量及  $\text{Sm}_2\text{O}_3$  和纳米  $\text{SiO}_2$  比对涂层近红外光谱及疏水性能的影响。

收稿日期: 2021-07-23, 修订日期: 2021-10-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(61705029), 安徽省自然科学基金项目(1808085MF187), 安徽省高校优秀青年人才支持计划重点项目(gxyqZD2020044), 安徽省科技重大专项(202103a05020018), 安徽省重点研究与开发计划项目(202104b11020010)和滁州学院大学生创新训练计划项目(2021CXLL20507)资助

作者简介: 吕丹丹, 女, 1981 年生, 滁州学院材料与化学工程学院实验师 e-mail: abczwg13@163.com

\* 通讯作者 e-mail: abczwg15@163.com

响规律。以期获得一种具有良好疏水特性和附着力的  $1.06 \mu\text{m}$  近红外吸收涂层。

## 1 实验部分

### 1.1 试剂与仪器

$\text{Sm}_2\text{O}_3$  颗粒(粒径  $100\sim 500 \text{ nm}$ , 纯度  $99.5\%$ ), 凯玛生化(天津)有限公司; 纳米  $\text{SiO}_2$  [粒径  $(30\pm 5) \text{ nm}$ , 纯度  $99.5\%$ ], 上海科延实业有限公司; 聚二甲基硅氧烷(PDMS), 美国道康宁公司; 环氧树脂(HYSZ), 江苏灿维化工有限公司; 邻苯二甲酸二辛酯(DOP), 国药集团。

UV-3600 型 UV-VIS-NIR 分光光度计, 日本岛津公司; JSM-6510 LV 型扫描电子显微镜, 日本电子株式会社; JC2000D7 型接触角测量仪, 上海中晨树脂技术设备有限公司。

### 1.2 涂层制备

将马口铁基片( $12 \text{ cm}\times 5 \text{ cm}$ , 厚度为  $0.3 \text{ mm}$ )经砂纸打磨及无水乙醇擦拭除油除屑处理后作为涂层基板。采用简单的树脂共混改性的方式, 将 PDMS 和 HYSZ 以  $0:10$ ,  $1:9$ ,  $2:8$ ,  $3:7$ ,  $4:6$  的质量比在一次性塑料杯中充分搅拌混合后获得 PDMS 改性 HYSZ, 以 PDMS 改性 HYSZ 作为树脂基体制备近红外吸收涂层。固定  $\text{Sm}_2\text{O}_3$  和纳米  $\text{SiO}_2$  的质量比为  $6:4$ , 在一次性塑料杯中以  $5:5$  的质量比称取适量的 PDMS 改性 HYSZ 和功能填料( $\text{Sm}_2\text{O}_3 + \text{纳米 SiO}_2$ ), 加适量无水乙醇降低涂料粘稠度, 并用玻璃棒将涂料充分搅拌使填料颗粒分散均匀, 直至涂料均匀细腻, 未见明显的颗粒物。再添加少量无水乙醇调节涂料粘度至其具有良好的流动性, 用玻璃棒蘸取适量涂料, 再将玻璃棒竖直后可见涂料呈直线状连续流下。将  $2 \text{ g}$  左右的涂料倒到马口铁基板上, 随后采

用玻璃棒刮涂法将上述涂料在马口铁基板上刮涂均匀, 将样板在室温下干燥  $5 \text{ h}$ , 将其置于  $80 \text{ }^\circ\text{C}$  干燥箱中固化  $10 \text{ h}$ , 获得涂层样品, 对该样品进行微观结构及各种性能测试。采用同样的涂层制备方法在上述最佳涂层配方中引入增塑剂 DOP, 研究 DOP 添加量对涂层性能的影响, DOP 添加量分别为 PDMS 改性 HYSZ 用量的  $10\%$ ,  $20\%$  和  $30\%$ 。再在上述最佳涂层配方基础上研究总填料( $\text{Sm}_2\text{O}_3 + \text{纳米 SiO}_2$ )添加量( $20\%$ ,  $30\%$ ,  $40\%$ ,  $50\%$ )对涂层性能的影响。最后, 在上述最佳涂层配方基础上研究  $\text{Sm}_2\text{O}_3$  和纳米  $\text{SiO}_2$  质量比对涂层性能的影响, 最终确定具有最佳近红外低反射率性能、附着力及疏水性能的近红外吸收涂层。

### 1.3 涂层测试

分别采用 UV-3600 型 UV-VIS-NIR 分光光度计、JC2000D7 型接触角测量仪、JSM-6510 LV 型扫描电镜、QFH 漆膜划格仪表征涂层在  $800\sim 1200 \text{ nm}$  波段的近红外反射光谱、水接触角、微结构、附着力。

## 2 结果与讨论

### 2.1 PDMS 和 HYSZ 质量比对涂层性能的影响

图 1 所示为 PDMS 和 HYSZ 质量比为  $1:9$  和  $3:7$  条件下所制备涂层的 SEM 照片。不同 PDMS 和 HYSZ 质量比所制备涂层在表面形貌上并没有明显差异。由于涂层表面存在团聚状的纳米  $\text{SiO}_2$  颗粒, 表面粗糙度相对较高, 有利于涂层具备良好的疏水性。另外, 由于 HYSZ 固化后相对较脆, 因此涂层固化后在表面出现了明显的裂纹, 明显削弱涂层的附着力等力学性能。因此, 需要采用一定的技术手段进一步改进涂层配方, 避免在涂层中出现裂纹, 从而提高涂层的力学性能。

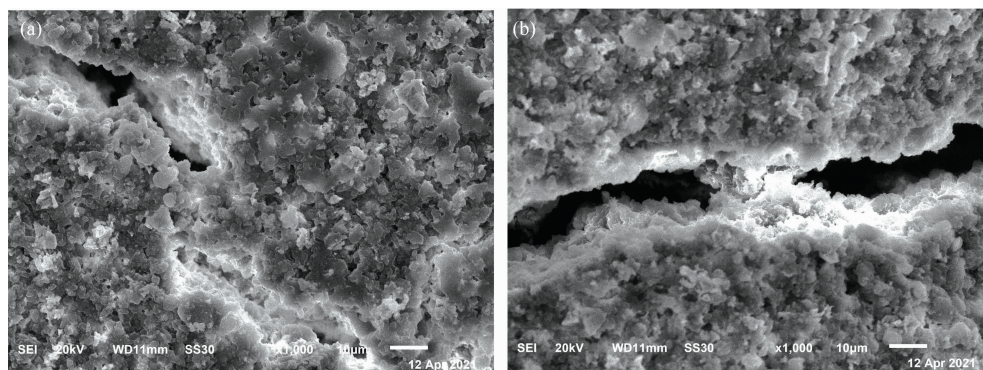


图 1 不同 PDMS 和 HYSZ 质量比下涂层的 SEM 照片

(a):  $1:9$ ; (b):  $3:7$

Fig. 1 The SEM images of the coatings with different mass ratios of PDMS to HYSZ

(a):  $1:9$ ; (b):  $3:7$

图 2 所示为不同 PDMS 和 HYSZ 质量比下涂层的近红外光谱。不同配比下所制备涂层在  $1095 \text{ nm}$  处均存在一强吸收峰, 该吸收峰是由  $\text{Sm}_2\text{O}_3$  中的特殊能带结构对近红外光产生的吸收引起的<sup>[16]</sup>。上述吸收峰的存在明显降低了涂层在  $1.06 \mu\text{m}$  处的反射率, 从而可使涂层具备良好的激光隐

身性能。随着 PDMS 和 HYSZ 质量比的增加, 涂层对近红外光的反射强度逐渐增大, 其中对  $1.06 \mu\text{m}$  近红外光的反射率从 PDMS 和 HYSZ 质量比为  $0:10$  时的  $46.7\%$  上升到质量比为  $4:6$  时的  $76.6\%$ 。其原因主要在于, 涂层中 HYSZ 相对含量较高时, 涂层固化后微观裂纹较多, 近红外光可穿透

裂纹更容易被涂层内部的 Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 颗粒所吸收,从而使涂层在 PDMS 和 HYSZ 质量比较低时表现出相对更低的 1.06 μm 近红外反射率。

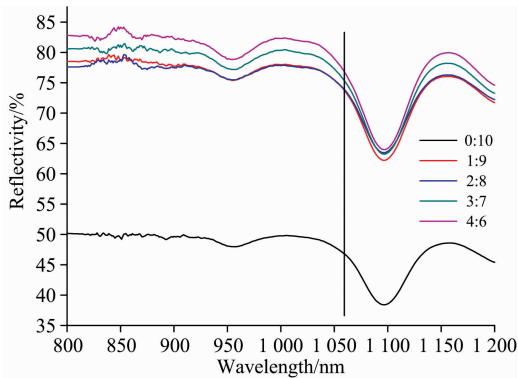


图 2 不同 PDMS 和 HYSZ 质量比下涂层的近红外光谱  
Fig. 2 The near-infrared spectra of the coatings with different mass ratios of PDMS to HYSZ

图 3 所示为不同 PDMS 和 HYSZ 质量比下涂层表面的水接触角。当 PDMS 和 HYSZ 质量比从 0 : 10 略微增大到 1 : 9, 涂层表面的水接触角便可从 118° 增加到 138°, 随后趋于稳定。上述结果表明, 只要采用少量 PDMS 来共混改性 HYSZ, 便可明显提升 HYSZ/Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 复合涂层的疏水性, 从而获得具有良好疏水性能的近红外吸收涂层。

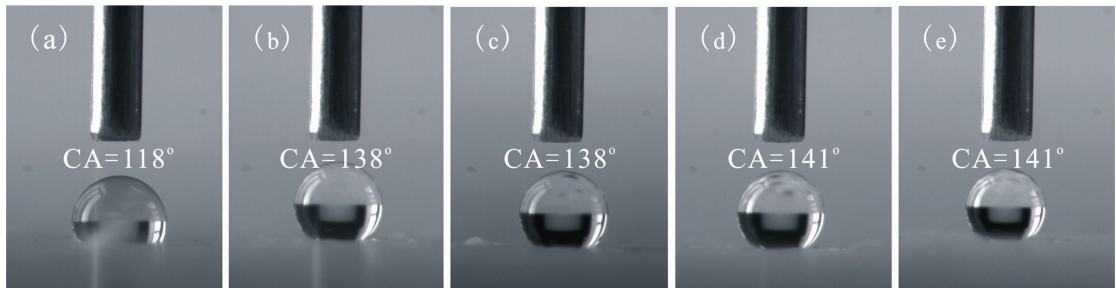


图 3 不同 PDMS 和 HYSZ 质量比下涂层的水接触角  
(a): 0 : 10; (b): 1 : 9; (c): 2 : 8; (d): 3 : 7; (e): 4 : 6

Fig. 3 The water contact angles of the coatings with different mass ratios of PDMS to HYSZ  
(a): 0 : 10; (b): 1 : 9; (c): 2 : 8; (d): 3 : 7; (e): 4 : 6

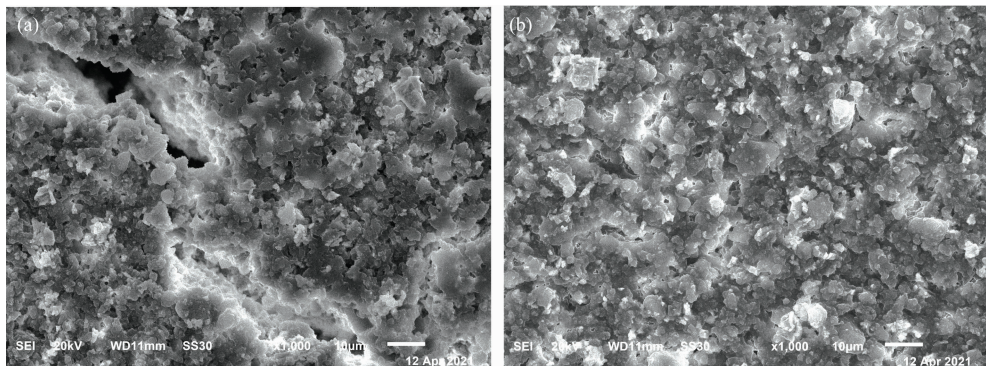


图 4 不同 DOP 添加量下涂层的 SEM 照片  
(a): 10%; (b): 20%

Fig. 4 The SEM images of the coatings with different addition amounts of DOP  
(a): 10%; (b): 20%

PDMS 改性 HYSZ/Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 复合涂层作为一种面向工程应用的功能涂层,要求其必须具有良好的附着力,从而满足其在基材表面上的涂覆使用。本研究对不同 PDMS 和 HYSZ 质量比下涂层的附着力进行了测试。结果表明,由纯 HYSZ 制备的涂层,其附着力可达到最高级 1 级,涂层和基材间具有良好的粘附强度。但当 PDMS 和 HYSZ 质量比上升到 1 : 9,涂层的附着力便可明显降低为 3 级,继续增大质量比,涂层的附着力会降低至 6 级,基本失去了与基材间的粘附强度。其原因主要在于, HYSZ 中具有大量环氧基等强极性基团,而在 PDMS 分子结构中几乎不存在上述强极性基团,因此 HYSZ 和 PDMS 之间的相容性较低,涂层固化后很难形成一整体。因此,涂层微观结构上容易出现裂纹等结构缺陷(图 1),从而使涂层的附着力性能会随着 PDMS 和 HYSZ 质量比的上升而明显降低。因此,需要采用一定的技术手段提高涂层的附着力。综合考虑涂层的近红外吸收性能、疏水性能及力学性能后,确定涂层的最佳 PDMS 和 HYSZ 质量比为 1 : 9。

### 2.2 DOP 添加量对涂层性能的影响

固定 PDMS 和 HYSZ 质量比为 1 : 9, Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和纳米 SiO<sub>2</sub> 质量比为 6 : 4, 总填料添加量为 50%。DOP 添加量为 10% 和 20% 条件下所制备涂层的 SEM 照片分别如图 4 所示。不同 DOP 添加量下涂层的表面形貌差异较为明显,当 DOP 添加量仅为 10% 时,涂层表面存在明显的裂纹,涂层整



体性较差,这一缺陷的存在明显降低涂层的力学性能。当 DOP 添加量增大到 20%, 涂层表面形貌非常规整, 不存在裂纹等缺陷, 且涂层表面仍然保持了一定的粗糙度。上述结构特征有利于涂层力学性能的提升, 同时可使涂层保持一定的疏水性能。上述微结构变化的原因主要在于, DOP 属于一种中等分子量的线性增塑剂, 可改善涂层的脆性, 提高涂层的柔韧性, 通过类似搭桥作用提升涂层的整体性。从而使涂层在 20% DOP 改性条件下具备了更好的规整性, 避免了微观裂纹的产生。

图 5 所示为不同 DOP 添加量(10%, 20%, 30%)下涂层的近红外光谱。可见, 由于不同 DOP 添加量下所制备涂层中的总填料添加量均为 50%, 因此涂层的总体谱峰形状保持一致, 在 1 095 nm 处均有一强吸收峰。随着涂层中 DOP 添加量的增加, 涂层在近红外波段的整体反射强度明显降低, 相应 1 060 nm 近红外光的反射率可从 DOP 添加量为 10% 时的 73.6% 明显降低到添加量为 30% 时的 40.1%, 降低了 45.5%, 这有利于涂层大幅提升激光隐身效能。其原因主要在于, DOP 在涂层微观结构体系中的搭桥作用, 有利于与涂层内部的  $\text{Sm}_2\text{O}_3$  颗粒通过 DOP 的搭桥作用形成分散良好的整体, 从而可强化涂层整体对近红外光的吸收作用, 从而明显降低涂层对 1 060 nm 近红外光的反射率, 实现更加优越的激光隐身效能。

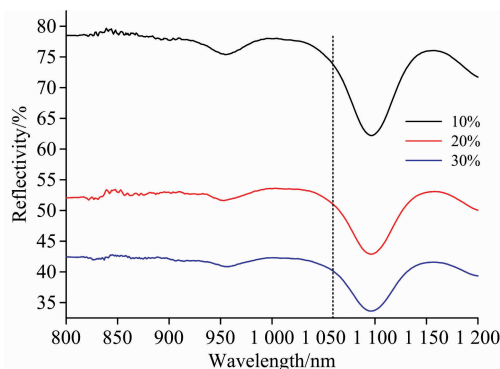


图 5 不同 DOP 添加量下涂层的近红外光谱  
Fig. 5 The near-infrared spectra of the coatings with different addition amounts of DOP

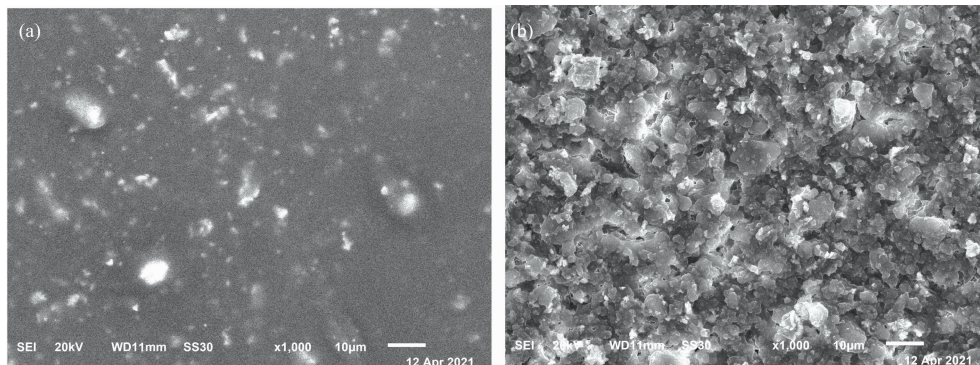


图 7 不同总填料添加量下涂层的 SEM 照片  
(a): 30%; (b): 50%

Fig. 7 The SEM images of the coatings with different addition amounts of total filler  
(a): 30%; (b): 50%

图 6 所示为不同 DOP 添加量时涂层表面的水接触角。随着涂层中 DOP 添加量的增加, 涂层的水接触角逐渐降低, 使涂层的疏水性能减弱。分析认为, 由于 DOP 分子结构中存在较多的强极性基团羰基和碳氧碳键, 因此随着 DOP 添加量的增加, 涂层中的强极性基团增多, 涂层表面的极性增强, 表面能升高, 从而使其疏水性能下降。

DOP 添加量的变化对涂层附着力的影响同样较为明显, 当涂层中 DOP 添加量从 10% 升高至 20%, 涂层的附着力可从 3 级明显增强到最高级 1 级, 随后保持 1 级不变。可见, 增大涂层中的 DOP 添加量显著提升涂层的附着力。这与涂层微观结构观察结果一致, 当 DOP 添加量升高至 20% 以后, 涂层表面结构规整, 不存在裂纹等缺陷, 从而使涂层的力学性能得到了明显增强。综上所述, 综合考虑涂层的近红外吸收性能、疏水性能及力学性能, 确定涂层的最佳 DOP 添加量为 20%。

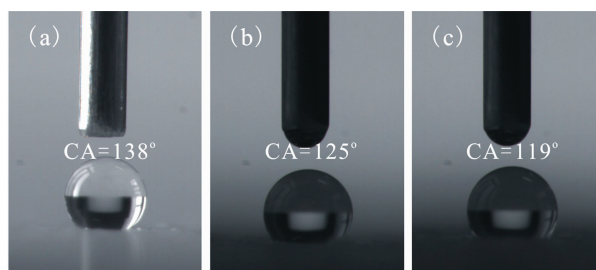


图 6 不同 DOP 添加量时涂层的水接触角  
(a): 10%; (b): 20%; (c): 30%

Fig. 6 The water contact angles of the coatings with different addition amounts of DOP  
(a): 10%; (b): 20%; (c): 30%

### 2.3 总填料添加量对涂层性能的影响

固定 PDMS 和 HYSZ 质量比为 1 : 9,  $\text{Sm}_2\text{O}_3$  和纳米  $\text{SiO}_2$  质量比为 6 : 4, DOP 添加量为 20%。总填料( $\text{Sm}_2\text{O}_3$  + 纳米  $\text{SiO}_2$ )添加量为 30% 和 50% 条件下所制备涂层的 SEM 照片如图 7 所示。总填料添加量的变化对涂层的表面形貌影响明显。当涂层中总填料添加量为 30% 时, 涂层表面总体较为光滑, 不具备明显的由纳米  $\text{SiO}_2$  颗粒构筑而成的粗糙结构,



但填料颗粒在涂层内部的分布较为均匀, 填料颗粒之间的间距较宽, 分散状态较好。上述微结构特征可能会使涂层表面无法具备良好的疏水性能, 但仍然有望使涂层具备良好的近红外吸收性能。随着涂层中总填料添加量升高至 50%, 涂层中分布的填料颗粒明显增多, 涂层表面的粗糙度明显上升, 但涂层仍然保持了较为规整的微观表面。上述微结构特征易使涂层表面表现出良好的疏水性能。

图 8 所示为不同总填料添加量下涂层的近红外光谱。随着涂层中总填料添加量的增加, 涂层在所测试近红外波段的反射强度表现为先降低后升高的变化趋势, 相应的 1 064 nm 近红外光的反射率可从总填料添加量为 20% 时的 39.6% 先降低为 30% 时的 37.9%, 后又升高至添加量为 50% 时的 50.9%。其原因推测为, 在涂层中总填料量不超过 30% 时, 涂层中的总体填料致密度较低,  $\text{Sm}_2\text{O}_3$  颗粒绝对含量的增加便可使涂层对近红外光的吸收强度增大, 从而使近红外反射率降低。当涂层中总填料量升高至 30% 以上, 涂层的填料致密度会明显升高, 而纳米  $\text{SiO}_2$  的密度较低, 更容易漂到涂层表面, 而纳米  $\text{SiO}_2$  对近红外光并不具备吸收作用, 从而使涂层对近红外光的反射强度在总填料添加量较高条件下反而较高。

图 9 所示为不同总填料添加量下涂层表面的水接触角。

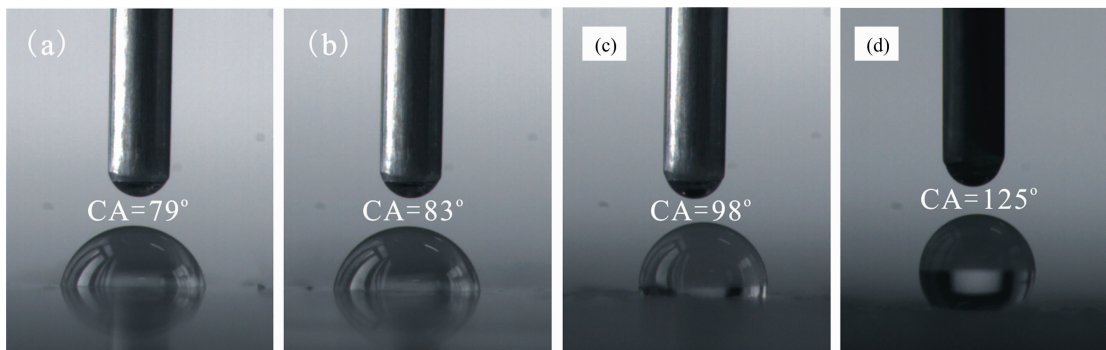


图 9 不同总填料添加量下涂层的水接触角

(a): 20%; (b): 30%; (c): 40%; (d): 50%

Fig. 9 The water contact angles of the coatings with different addition amounts of total filler

(a): 20%; (b): 30%; (c): 40%; (d): 50%

将总填料添加量控制在 50% 以内, 涂层的附着力不受填料添加量的影响, 其值在不同填料添加量下均可保持最高级 1 级。体现出了涂层与基材间突出的粘附强度。综合考虑涂层的近红外吸收性能、疏水性能及力学性能, 确定涂层的最佳总填料添加量为 50%。

#### 2.4 $\text{Sm}_2\text{O}_3$ 和纳米 $\text{SiO}_2$ 质量比对涂层性能的影响

固定 PDMS 和 HYSZ 质量比为 1 : 9, DOP 添加量为 20%, 总填料添加量为 50%。 $\text{Sm}_2\text{O}_3$  和纳米  $\text{SiO}_2$  质量比为 6 : 4 和 5 : 5 条件下所制备涂层的 SEM 照片分别如图 10 所示。不同  $\text{Sm}_2\text{O}_3$  和纳米  $\text{SiO}_2$  质量比条件下, 涂层均具有较为规整的表面结构, 涂层中的填料颗粒分散均较为均匀。但涂层在  $\text{Sm}_2\text{O}_3$  和纳米  $\text{SiO}_2$  质量比较低条件下相对具有更为粗糙的表面结构, 有利于提升涂层的疏水性能。其原因主要在于, 当  $\text{Sm}_2\text{O}_3$  和纳米  $\text{SiO}_2$  质量比相对较低时涂层中的纳

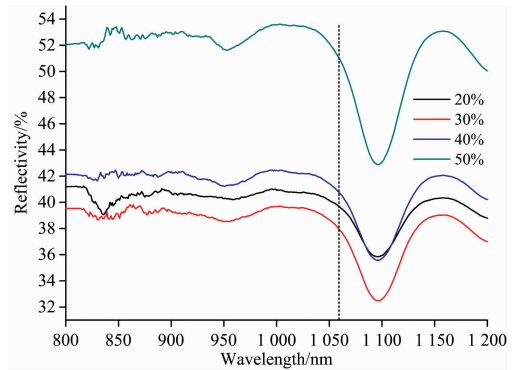


图 8 不同总填料添加量下涂层的近红外光谱

Fig. 8 The near-infrared spectra of the coatings with different addition amounts of total filler

随着涂层中总填料添加量的增加, 涂层的水接触角明显升高, 可从总填料添加量为 20% 时的  $79^\circ$  上升至添加量为 50% 时的  $125^\circ$ , 升高了  $58.2\%$ 。其原因主要在于, 随着涂层中总填料添加量的增加, 涂层中纳米  $\text{SiO}_2$  的绝对含量明显上升, 由于其密度低, 易漂浮到涂层表面形成微纳粗糙结构, 从而使涂层的疏水性明显升高, 水接触角增大。

米  $\text{SiO}_2$  含量相对较高, 由其在涂层表面构筑而成的微纳米粗糙结构自然也就较多, 涂层表面便具有更明显的粗糙结构。

图 11 所示为不同  $\text{Sm}_2\text{O}_3$  和纳米  $\text{SiO}_2$  质量比下涂层的近红外光谱。随着涂层中  $\text{Sm}_2\text{O}_3$  和纳米  $\text{SiO}_2$  质量比的降低, 涂层在所测试近红外波段的反射光谱逐渐增强, 相应的 1 064 nm 近红外光的反射率可从  $\text{Sm}_2\text{O}_3$  和纳米  $\text{SiO}_2$  质量比为 6 : 4 时的 50.9% 升高至质量比为 4.5 : 5.5 时的 73.3%。其原因主要在于, 随着涂层中  $\text{Sm}_2\text{O}_3$  和纳米  $\text{SiO}_2$  质量比的降低, 涂层中  $\text{Sm}_2\text{O}_3$  的绝对含量较低, 而纳米  $\text{SiO}_2$  的绝对含量则会升高, 从而使涂层对近红外光的总体吸收强度减弱, 近红外光谱的反射强度逐渐增强。因此, 需要调控  $\text{Sm}_2\text{O}_3$  和纳米  $\text{SiO}_2$  质量比为一合适值, 以确保涂层具有良好的近红外低反射率性能, 进而确保涂层具备良好的激光隐身效能。

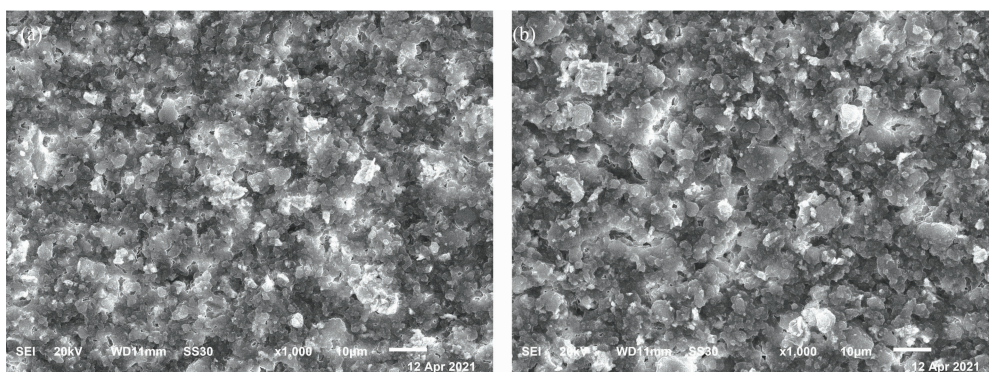


图 10 不同  $\text{Sm}_2\text{O}_3$  和纳米  $\text{SiO}_2$  质量比下涂层的 SEM 照片

(a): 6 : 4; (b): 5 : 5

Fig. 10 The SEM images of the coatings with different mass ratios of  $\text{Sm}_2\text{O}_3$  to nano- $\text{SiO}_2$

(a): 6 : 4; (b): 5 : 5

传统的近红外吸收涂层对 1 064 nm 近红外光的反射率可低至 58.7%<sup>[6]</sup>。可见, 当 PDMS 改性 HYSZ/ $\text{Sm}_2\text{O}_3$  复合涂层

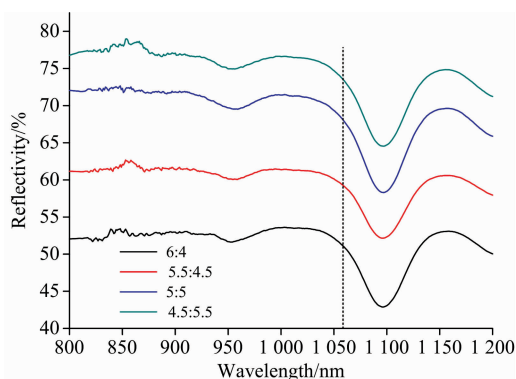


图 11 不同  $\text{Sm}_2\text{O}_3$  和纳米  $\text{SiO}_2$  质量比下涂层的近红外光谱

Fig. 11 The near-infrared spectra of the coatings with different mass ratios of  $\text{Sm}_2\text{O}_3$  to nano- $\text{SiO}_2$

中  $\text{Sm}_2\text{O}_3$  和纳米  $\text{SiO}_2$  质量比为 5.5 : 4.5 以上时, 所制备疏水型近红外吸收涂层对 1 064 nm 近红外光的吸收性能相比传统近红外吸收涂层并无明显差别。而 PDMS 改性 HYSZ/ $\text{Sm}_2\text{O}_3$  复合涂层具备良好的疏水性能, 因此具有更可观的应用前景。

图 12 所示为不同  $\text{Sm}_2\text{O}_3$  和纳米  $\text{SiO}_2$  质量比下涂层表面的水接触角。  $\text{Sm}_2\text{O}_3$  和纳米  $\text{SiO}_2$  质量比对涂层的水接触角具有显著影响。当  $\text{Sm}_2\text{O}_3$  和纳米  $\text{SiO}_2$  质量比从 6 : 4 降低至 5.5 : 4.5 便可使涂层的水接触角从  $125^\circ$  上升至  $137^\circ$ , 随后趋于稳定。其原因主要在于, 在总填料添加量不变的情况下, 随着涂层中  $\text{Sm}_2\text{O}_3$  和纳米  $\text{SiO}_2$  质量比的降低, 涂层中的纳米  $\text{SiO}_2$  含量上升, 且其为轻质疏水性纳米颗粒, 极易漂浮到涂层表面形成微纳粗糙结构, 使涂层表面的粗糙度上升, 进而使涂层的水接触角明显增大, 疏水性增强。但当涂层中纳米  $\text{SiO}_2$  量过多时, 由于涂层表面由其构筑的微纳粗糙结构已近饱和, 因此过多的纳米  $\text{SiO}_2$  并未起到相应的增量作用。

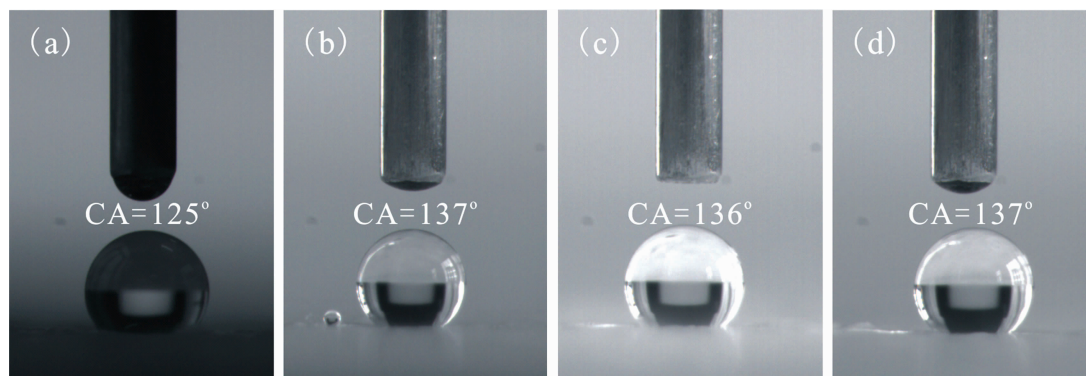


图 12 不同  $\text{Sm}_2\text{O}_3$  和纳米  $\text{SiO}_2$  质量比下涂层的水接触角

(a): 6 : 4; (b): 5.5 : 4.5; (c): 5 : 5; (d): 4.5 : 5.5

Fig. 12 The water contact angles of the coatings with different mass ratios of  $\text{Sm}_2\text{O}_3$  to nano- $\text{SiO}_2$

(a): 6 : 4; (b): 5.5 : 4.5; (c): 5 : 5; (d): 4.5 : 5.5

涂层的附着力受  $\text{Sm}_2\text{O}_3$  和纳米  $\text{SiO}_2$  质量比的影响同样明显。其值可从  $\text{Sm}_2\text{O}_3$  和纳米  $\text{SiO}_2$  质量比为 6 : 4 时的 1 级

降低为质量比为 5.5 : 4.5 时的 2 级, 继续降低涂层中  $\text{Sm}_2\text{O}_3$  和纳米  $\text{SiO}_2$  质量比, 涂层的附着力会继续减弱至 5

级并趋于稳定。综合考虑涂层的近红外吸收性能、疏水性能及力学性能,确定涂层的最佳  $\text{Sm}_2\text{O}_3$  和纳米  $\text{SiO}_2$  质量比为 5.5 : 4.5。

### 3 结 论

通过系统的配方研究,获得了一种同时具有良好近红外低反射率性能、疏水性能和附着力的 PDMS 改性 HYSZ/

$\text{Sm}_2\text{O}_3$  近红外吸收涂层。PDMS 改性可明显降低涂层的表面能,从而使涂层的疏水性得到明显增强。DOP 的添加可发挥其增强涂层韧性和微观搭桥作用使涂层整体性增强,从而可明显提高涂层的附着力和近红外吸收性能。总填料添加量的增加可明显提升涂层的表面粗糙结构,进而使涂层表现出更优的疏水性能。调控涂层中  $\text{Sm}_2\text{O}_3$  和纳米  $\text{SiO}_2$  质量比为 5.5 : 4.5,可使涂层同时具有良好的近红外吸收性能、疏水性能及力学性能。

### References

- [1] Li C, Hui T, Ping C. *Optik*, 2019, 183: 863.
- [2] Chen M, Li C, Xu M, et al. *Optics and Laser Technology*, 2007, 39(1): 214.
- [3] Golnabi H, Mahdih M. *Optics and Laser Technology*, 2006, 38(2): 122.
- [4] Zhu Y, Han P, Zhang L, et al. *Journal of Rare Earths*, 2013, 31(11): 1102.
- [5] Qin Y, Zhang M, Guan Y, et al. *Ceramics International*, 2019, 45(11): 14312.
- [6] ZHANG Wei-gang, XU Guo-yue, XUE Lian-hai(张伟钢, 徐国跃, 薛连海). *Infrared Technology(红外技术)*, 2016, 38(2): 102.
- [7] ZHANG Wei-gang, WU Jia-jia(张伟钢, 吴佳佳). *Surface Technology(表面技术)*, 2018, 47(1): 39.
- [8] Aditya K, Bidisha G. *Tribology International*, 2018, 122: 114.
- [9] Pawar P, Xing R, Kambale R, et al. *Progress in Organic Coatings*, 2017, 105: 235.
- [10] Satapathy M, Varshney P, Nanda D, et al. *Surface & Coatings Technology*, 2018, 341: 31.
- [11] Li C, Sun Y, Cheng M, et al. *Chemical Engineering Journal*, 2018, 333: 361.
- [12] Liu Y, Li S, Zhang J, et al. *Chemical Engineering Journal*, 2014, 248: 440.
- [13] Wang Z, Shen X, Yan Y, et al. *Applied Surface Science*, 2018, 450: 387.
- [14] Jin M, Feng X, Xi J, et al. *Macromolecular Rapid Communications*, 2005, 26(22): 1805.
- [15] GUO Yong-gang, GENG Tie, WU Hai-hong, et al(郭永刚, 耿铁, 吴海宏, 等). *Chinese Journal of Materials Research(材料研究学报)*, 2013, 450: 387.
- [16] Zhang W, Lu C, Ni Y, et al. *Materials Letters*, 2012, 87: 13.

## Study on Near-Infrared Spectroscopy and Hydrophobicity of PDMS Modified Epoxy Resin/ $\text{Sm}_2\text{O}_3$ Composite Coating

LÜ Dan-dan, WEI Hui-ru, ZHANG Wei-gang\*

College of Materials and Chemical Engineering, Chuzhou University, Chuzhou 239000, China

**Abstract** Using polydimethylsiloxane (PDMS) modified epoxy resin (HYSZ) as a binder,  $\text{Sm}_2\text{O}_3$  as a functional pigment, and nano- $\text{SiO}_2$  as a micro-nano structural modifier, a near-infrared absorption coating with good hydrophobic properties and adhesion strength was prepared. The effects of the mass ratio of PDMS to HYSZ, DOP addition amount, total filler addition amount, and the mass ratio of  $\text{Sm}_2\text{O}_3$  to nano- $\text{SiO}_2$  on the coating performances were systematically analyzed. The results show that: PDMS modification can significantly reduce the surface energy of the coating, thereby significantly enhancing the hydrophobicity of the coating. The use of DOP to strengthen the toughness of the coating and the micro-bridging effect can enhance the integrity of the coating, which can significantly improve the adhesion strength and near-infrared absorption performance of the coating. The surface roughness of the coating can be significantly increased with the increase of the total filler addition, so that the coating can exhibit better hydrophobic properties. When the mass ratio of PDMS to HYSZ, DOP addition amount, total filler addition amount, and the mass ratio of  $\text{Sm}_2\text{O}_3$  to nano- $\text{SiO}_2$  are 1 : 9, 20%, 50%, 5.5 : 4.5 in the coating, respectively, the coating has good near-infrared low reflectivity (59.1%), hydrophobic performance (water contact angle is  $137^\circ$ ) and adhesion strength (2 grade).

**Keywords** Composite coatings; Near-infrared absorption; Hydrophobicity; Mechanical properties

\* Corresponding author

(Received Jul. 23, 2021; accepted Oct. 14, 2021)