

石墨烯基环氧-PDMS涂层的热性能与防污性能研究

陈君华^{1,2*}, 曾志浩¹, 江海林¹, 沈嘉怡¹, 唐伟灿¹, 陈振兴¹, 刘沙沙^{1,2}

(1.肇庆学院, 广东肇庆 526061; 2.广东省环境健康与资源利用重点实验室, 广东肇庆 526061)

摘要:为提高环氧涂层的隔热与防污性能,采用环氧树脂 E51 和环氧基封端 PDMS 作为基体、甲基六氢邻苯二甲酸酐作为固化剂,添加 2-甲基咪唑促进剂,掺入不同含量的石墨烯,制备了石墨烯复合涂层,并对其热固化后的涂层性能进行了研究。结果表明,当 E51 与固化剂质量比为 1:0.4、E51 与石墨烯质量比为 1:0.01、PDMS 添加量为 1 wt% 时,涂层表现出最佳性能,其隔热温差约为 38°C,在 600°C 时的残炭率为 7.5%;此外,涂层还具有出色的疏水、疏油、防污、自清洁和耐热老化性能。

关键词:石墨烯;环氧树脂;隔热;复合涂层;环氧基封端聚二甲基硅氧烷

中图分类号:TQ325.12

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2025)S1-0267-06

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2025.S1.050

Study on thermal and antifouling properties of graphene-based epoxy-PDMS coating

CHEN Jun-hua^{1,2*}, ZENG Zhi-hao¹, JIANG Hai-lin¹, SHEN Jia-yi¹, TANG Wei-can¹,
CHEN Zhen-xing¹, LIU Sha-sha^{1,2*}

(1.Zhaoqing University, Zhaoqing 526061, China; 2.Guangdong Provincial Key Laboratory of Environmental Health and Land Resource, Zhaoqing 526061, China)

Abstract:To enhance the thermal insulation and antifouling performances of epoxy coating, graphene-reinforced epoxy coating is prepared through using epoxy resin E51 and epoxy-terminated polydimethylsiloxane (PDMS) as the matrix, methylhexahydrophthalic anhydride as the curing agent, and 2-methylimidazole as the promoter. The thermal properties of the cured coating are studied. Results show that the optimal performance of the coating is achieved when the mass ratio of E51 to curing agent is 1:0.4, the mass ratio of E51 to graphene is 1:0.01, and the dosage of PDMS is 1 wt%. The thermal insulation temperature difference of the coating is around 38°C, and the char residue rate is 7.5% at 600°C. In addition, the coating exhibits excellent hydrophobicity, oil repellency, antifouling ability, self-cleaning performance, and thermal aging resistance.

Key words: graphene; epoxy resin; thermal insulation; composite coating; epoxy-terminated polydimethylsiloxane

随着科学技术的不断进步和发展,电子器件的集成度不断提高,计算处理速度加快,传送的信息量也随之增大。然而,这也对电子器件和设备的散热性能提出了更高的要求。电子器件在运行过程中会产生大量热量,若这些热量无法及时散发,将会降低电子器件的可靠性,并缩短其使用寿命。为了解决这个问题,人们开始利用主要成分为石墨烯的复合涂料来制备高导热的复合电子导热散热材料^[1-5]。石墨烯作为一种新型的纳米材料,具有巨大的比表面积、优异的导电和导热性能,以及良好的化学稳定性和强大的力学性能。因此,在各个领域中,石墨烯都展现出了巨大的潜力和广阔的前景,成为国内外研究的热点对象^[6-27]。Bai 等^[28]设计并制备了横向

和纵向石墨烯薄膜/环氧树脂复合材料,在电子器件热管理方面具有良好的应用潜力。Kumar 等^[29]在环氧树脂中加入不同的碳基颗粒导热填料后,所有环氧胶黏剂复合材料的导热系数均有所提高,在电子封装行业具有应用前景。该复合材料尽管具有优异的隔热效果,但易受污染导致维护成本增加并影响其使用寿命。随着碳中和政策的实施,开发新型高性能涂层材料对于满足不同领域需求至关重要^[30-33]。而低表面能的聚二甲基硅氧烷(PDMS),由于其具有良好的化学惰性、生物相容性、无毒、成本适中、环境友好、良好的疏水性和防污自清洁性能等优点,已被应用于涂料中以改进涂层的性能^[34-44]。Verma 等^[45]对环氧涂层(N-EP)和环氧-

收稿日期:2025-01-09;修回日期:2025-04-01

基金项目:肇庆学院“新污染物生态毒理与修复创新团队”(TD202418);台师优培计划项目(2024A0505050042);全国大学生创新创业训练计划项目(X202410580133)

作者简介:陈君华(1988-),男,博士,副教授,研究方向为功能性涂料,通讯联系人,cehjchen@yeah.net。

端羟基聚二甲基硅氧烷(h-PDMS)共混物进行了对比分析,当 h-PDMS 含量为 30 wt% 时,接触角从 52.3° 显著增加到 90.1°,改性后的涂层具有疏水性。Chen 等^[46]通过开环缩聚反应合成了具有氨基丙基封端侧基的聚二甲基硅氧烷(APDMS),然后将 APDMS 与双酚 A 型环氧树脂(DGEBA)反应形成环氧改性聚硅氧烷基树脂(EAPDMS),该涂层表现出优异的防污性能。王旭华等^[47]为解决环氧树脂疏水差的问题,采用 γ -氨丙基三乙氧基硅烷(APTES)、六氢邻苯二甲酸双缩水甘油酯(CY184)对羟基封端的聚二甲基硅氧烷(HPDMS)进行改性,经过改性后,CY184 环氧树脂的疏水性、热稳定性等均有明显提升。张伟钢等^[48]采用分散剂和硅烷偶联剂 KH560 来改善 PDMS 改性环氧树脂/Al 复合涂层的填料分散状态及界面结构,成功制备出复合涂层,该涂层具备良好的疏水性能。然而,该环氧树脂与 PDMS 共混制备的涂层难以满足电子器件和设备的散热要求。

因此,本研究旨在探究石墨烯复合材料的性能。首先,为了提高涂层的疏水、疏油和防污性能,本研究选用环氧树脂 E51 作为基体,并接枝了环氧基封端 PDMS。此外,通过调整石墨烯的最佳投料比以提升热性能。最后,为提高其热性能与防污性能,采用甲基六氢邻苯二甲酸酐作为交联剂,并通过梯度升温热固化的方式制备了石墨烯环氧-PDMS 涂层。本研究从热失重、防污、自清洁、接触角、滚动角、隔热等方面探讨了石墨烯环氧-PDMS 涂层的热性能与防污性能。该复合涂层有望解决当前电子设备所面临的散热和防污问题。

1 实验部分

1.1 实验试剂与仪器

石墨烯,南京市中洲合金有限公司生产;环氧树脂 E51,广州穗欣化工有限公司生产;环氧基封端 PDMS,克米克生物医药技术有限公司生产;甲基六氢邻苯二甲酸酐,AR,萨恩化学技术(上海)有限公司生产;2-甲基咪唑,萨恩化学技术(上海)有限公司生产;二碘甲烷、正十六烷,AR,上海麦克林生化科技有限公司生产;丙酮、丁酮、甲苯,广州化学试剂厂生产;消泡剂,德谦化学有限公司生产;牛奶、泵油、食用油、咖啡,市售;实验室自制去离子水。

Nicolet6700 傅里叶红外光谱仪,美国 Nicolet 公司生产;JC2000C1 接触角测量仪,上海中晨公司生产;SDT-Q600 热重分析仪,美国 TA 仪器公司生产;

Multimode 8 原子力显微镜,布鲁克光谱仪器公司生产;红外测温仪,深圳市晨岛科技有限公司生产;热电偶测温仪,温州汉邦电子有限公司生产;电子天平,宏衡电子仪器厂生产;磁力搅拌器,常州市亿能实验仪器厂生产;鼓风干燥箱,圣科仪器设备有限公司生产。

1.2 混合溶剂的配制

分别称取 20 g 丙酮、30 g 丁酮、50 g 甲苯混合均匀。

1.3 低表面能环氧树脂的制备

将一定质量的 E51 和 PDMS 加入到 100 mL 的烧杯中,加入少量溶剂,经过 5 min 超声处理,随后以 500 r/min 转速磁力搅拌 30 min,即可得到具有低表面能的改性环氧树脂。具体反应过程如图 1。

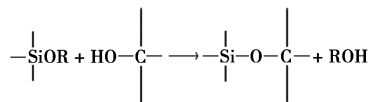


图 1 低表面能环氧树脂的制备过程

1.4 复合涂层的制备

将石墨烯和固化剂按照一定比例加入所制备的低表面能改性环氧树脂中,并搭配促进剂。为解决未经改性的石墨烯分散性问题,添加适量的混合溶剂进行溶解,超声处理 5 min 后,以 1 000 r/min 转速磁力搅拌 1.5 h,制备出复合涂料。将涂料密封静置 2 h 后,使用胶头滴管将涂料滴涂于马口铁表面,滴涂完毕后在室温下静置 30 min。最后,将涂覆了涂料的马口铁放入烘箱中,采用梯度升温的热固化方式进行固化:在 80℃ 下固化 30 min,然后在 100℃ 下固化 30 min,最后在 120℃ 下固化 30 min,从而得到复合涂层。

1.5 测试与表征

红外光谱:将溴化钾固体研磨至粉末,烘干压片,对样品进行 4 000~400 cm^{-1} 波段扫描,得到样品的红外吸收光谱。

热失重:在热失重分析仪上设置温度范围为 30~600℃,升温速率为 10℃/min,氮气环境。

AFM 测试:采用布鲁克光谱仪器公司的型号为 Multimode 8 原子力显微镜(AFM)观测涂层形貌。

隔热性能测试:测温系统如图 2 所示。将铁片吸收光源热量,待涂层表面温度稳定后,使用红外测温仪和热电偶测温仪分别测量铁板上各测温点的温度。每隔 5 min 记录 1 次,每组记录 6 次数据。

热老化性能测试:将覆盖有涂层的铁片放入电

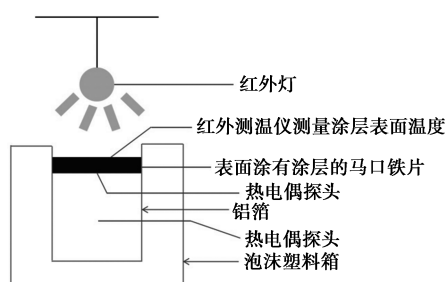


图2 测温系统装置图

热鼓风干燥烘箱中,在 120℃ 高温下加热 1 h,然后迅速取出并冷却至室温。待涂层冷却至室温后,再次放入电热鼓风干燥烘箱中,在 120℃ 高温下加热 1 h,重复进行 100 次。观察涂层表面是否出现裂痕。

静态接触角测试:取 50 μL 水、25 μL 二碘甲烷和 10 μL 正十六烷分别滴在隔热效果最佳添加量的涂层铁板上。使用接触角测量仪测量各铁板的接触角。

动态接触角测试:分别滴取 10、25、50 μL 的去离子水到样板上,将样板水平放置在倾斜平台上,当液滴开始在样板上运动时,得到的夹角即为动态接触角。同样将去离子水替换为正十六烷和二碘甲烷,并记录各自动态接触角。

防污性能测试:选用防水不褪色的白色油性记号笔,在马口铁片的涂层表面以及未覆盖涂层的铁片上进行书写。如果涂层上的记号笔迹与未覆盖涂层的马口铁片上的记号笔迹相比有明显的收缩现象,并且涂层上的笔迹可以用纸巾完全擦掉而不留下任何痕迹,这说明涂层具有良好的防污效果。

自清洁性能测试:通过对泵油和食用油在倾斜角下的滑动进行视频记录,记录滑落时间并观察液滴是否能在涂层表面滑落而不留下痕迹,以进一步分析涂层的疏油性能。此外,观察牛奶和咖啡在涂层表面及未覆盖涂层的表面滑落情况,以此评估其自清洁效果。在马口铁片上均匀覆盖一层白色粉笔粉,并在 45° 倾斜角下滴入 50 μL 的去离子水,观察白色粉笔粉是否能随着水滴一起滑落,且在马口铁片上不留明显的痕迹。

2 结果与讨论

2.1 红外光谱分析

涂层红外光谱分析如图 3 所示。红外光谱显示了以下特征峰:在 3 436 cm^{-1} 处,出现了环氧键上的—OH 伸缩振动峰;在 2 959 cm^{-1} 处,存在环氧环

中—CH₃ 伸缩振动峰;1 729 cm^{-1} 处,出现了羰基伸缩振动吸收峰;在 1 507 cm^{-1} 处,出现了甲基与亚甲基中碳氢键的不对称弯曲吸收峰;1 179 cm^{-1} 处,出现了酯基收缩振动吸收峰;此外,826 cm^{-1} 处,存在环氧基团的特征吸收峰。结果表明,聚二甲基硅氧烷中的环氧基封端和环氧树脂中的 C—OH 基发生了脱醇反应,将含硅的低表面能结构引入到树脂体系中。

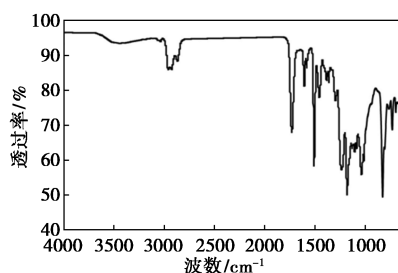


图3 涂层红外吸收光谱

2.2 热失重分析

对涂层进行了热失重分析, TG 曲线如图 4 所示。通过曲线分析可得知,在 30~350℃ 的温度区间内,涂层仅有轻微的质量损失。主要是由水和溶剂等小分子导致的。此外,该涂层分解温度大致在 360℃ 左右。在 360~440℃ 范围内,涂层的质量损失更为严重,这是由于环氧树脂发生了分解。

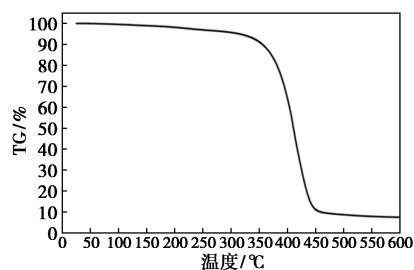


图4 涂层热失重曲线

2.3 AFM 测试

图 5 为涂层的 AFM 图像的三维立体形貌图。通过 AFM 进一步验证复合涂层表面的平整性,发现

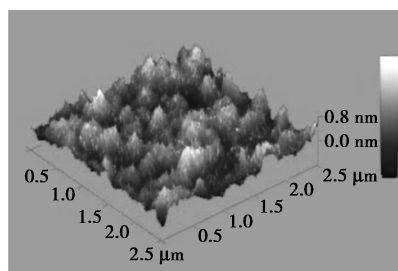
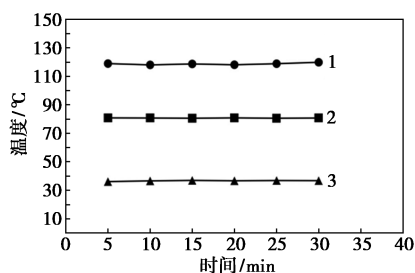


图5 涂层表面 AFM 三维立体(3D)形貌图像

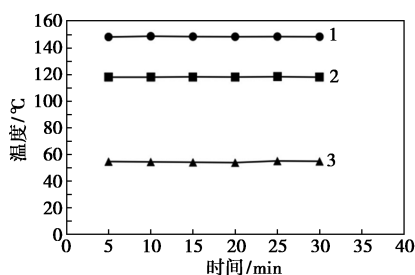
其表面厚度均一,涂层的均方根粗糙度约为 1.0 nm。推测石墨烯环氧-PDMS 涂层最终在固化过程中熔合在一起,并且没有发生大的相分离,产生高度交联和紧密的结构。

2.4 隔热性能测试

将铁片分别吸收相同功率大小的光源热量,待涂层表面温度稳定后,使用红外测温仪和热电偶测温仪分别测量铁板上各测温点的温度,并且每 5 min 记录一次,每组记录六次数据。数据如图 6 所示,图 6(a)为添加了石墨烯的环氧-PDMS 复合涂层隔热测试,图 6(b)为未添加石墨烯的环氧-PDMS 复合涂层隔热测试。未添加石墨烯的环氧-PDMS 涂层表面的温度为 $148.3^{\circ}\text{C} \pm 0.3^{\circ}\text{C}$,涂层背面的温度为 $118.3^{\circ}\text{C} \pm 0.2^{\circ}\text{C}$,箱子中部的温度为 $54.4^{\circ}\text{C} \pm 0.2^{\circ}\text{C}$,涂层的隔热温差约为 30°C 。而添加了石墨烯的环氧-PDMS 涂层表面的温度为 $118.6^{\circ}\text{C} \pm 0.4^{\circ}\text{C}$,涂层背面的温度为 $80.8^{\circ}\text{C} \pm 0.1^{\circ}\text{C}$,箱子中部的温度为 $36.6^{\circ}\text{C} \pm 0.4^{\circ}\text{C}$,涂层的隔热温差约为 38°C ,且所测得的各项温度均低于未添加石墨烯的温度,显示出优异的隔热性能。这是因为石墨烯具有优异的隔热性,石墨烯在环氧涂料中的应用显著提高了涂层的隔热性能。在涂料中加入石墨烯之后,涂层表面的散热速度会显著增加。此外,石墨烯还具有较大的比表面积,将其填充到涂层中可以明显增加散热表面的面积,从而降低涂层背面温度,进一步提高涂层的隔热性能。



(a) 添加了石墨烯的环氧-PDMS 复合涂层



(b) 未添加石墨烯的环氧-PDMS 复合涂层

1—涂层表面温度;2—涂层背面温度;3—箱子中部温度

图 6 涂层隔热测试

2.5 耐热老化性能测试

将覆盖有涂层的铁片放入电热鼓风干燥烘箱中加热至 120°C ,持续加热 1 h。然后迅速取出并冷却,待涂层冷却至室温后再次放入电热鼓风干燥烘箱中在 120°C 高温下加热 1 h。重复这个循环 100 次,以模拟器件在高温工作环境下的情况,观察涂层表面是否出现裂痕。根据观察结果,经过 100 次循环实验后,涂层表面没有明显变化。这是因为石墨烯具有良好的热稳定性,与环氧树脂体系相容后有助于降低热氧化老化程度。其次,石墨烯的二维结构使其在涂层中形成良好的阻隔层,有效防止了氧气和水分子的侵入,从而提高了涂层的耐热老化性能。此外,石墨烯出色的散热性能使得涂层体系热氧化性能显著提高。因此,涂层具有良好的耐热老化性能。

2.6 接触角测试

图 7 显示了液滴的图像以及 $50\ \mu\text{L}$ 水、 $25\ \mu\text{L}$ 二碘甲烷和 $10\ \mu\text{L}$ 正十六烷在涂层上的静态接触角。为了评价涂层表面的润湿性,测量了水、二碘甲烷和正十六烷液滴在涂层表面上的接触角和滚动角。这些液滴的表面张力分别为 ~ 72 、 50 、 $27\ \text{mN/m}$ ^[49-50]。如图 7 中的静态接触角数据所示,可以看出这些液滴在涂层表面上的瞬时接触角分别为 $103.358^{\circ} \pm 1.5^{\circ}$ 、 $72.667^{\circ} \pm 1.5^{\circ}$ 和 $17.074^{\circ} \pm 2^{\circ}$,说明该涂层具有良好的疏水疏油性能。表 1 比较了水、二碘甲烷和正十六烷液滴在涂层上的滑动行为。水滚动角分别为 $27.0^{\circ} \pm 0.4^{\circ}$ 、 $17.9^{\circ} \pm 0.4^{\circ}$ 和 $12.6^{\circ} \pm 0.3^{\circ}$,而二碘甲烷的滚动角分别为 $8.5^{\circ} \pm 0.3^{\circ}$ 、 $4.8^{\circ} \pm 0.5^{\circ}$ 和 $3.0^{\circ} \pm 0.2^{\circ}$ 。正十六烷液滴的滚动角分别为 $4.4^{\circ} \pm 0.6^{\circ}$ 、 $3.1^{\circ} \pm 0.4^{\circ}$ 和 $1.3^{\circ} \pm 0.3^{\circ}$ 。水的滚动角高于二碘甲烷和正十六烷,这是因为涂层中可能含有酯基、羟基等极性基团以及其他吸引水的官能团。有机溶剂的表面张力比水低,因此其接触角和滚动角也较小。因此,通过引入 1 wt% 的低表面能结构 PDMS 改性环氧树脂,PDMS 分子链呈弯曲且具有螺旋结构,分子间作用力极其微弱,因此具有低表面张力和表面附着力,可以调整涂层表面的化学组成和分布,

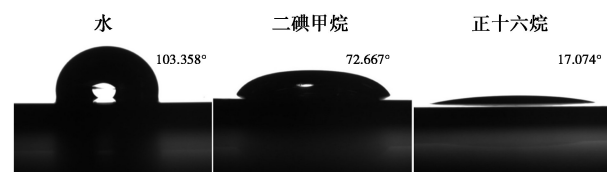


图 7 液滴的图像以及水、二碘甲烷和正十六烷在涂层上的静态接触角

表 1 液滴在复合涂层上的滚动角

液滴体积	10 μL	25 μL	50 μL
水	27.0° \pm 0.4°	17.9° \pm 0.4°	12.6° \pm 0.3°
二碘甲烷	8.5° \pm 0.3°	4.8° \pm 0.5°	3.0° \pm 0.2°
正十六烷	4.4° \pm 0.6°	3.1° \pm 0.4°	1.3° \pm 0.3°

从而改善其润湿性能,降低系统的表面能,并使涂层具有良好的疏水和疏油性能^[50-52]。

2.7 防污性能测试

使用白色马克笔对不同金属板铝板、铜板和马口铁进行了防涂鸭性能测试。在用纸巾擦拭之前,比较了涂覆部位和未涂覆部位的墨痕,涂覆部位的笔迹出现了收缩和不连续现象。而在擦拭后,涂覆基材表面的痕迹容易去除,而未涂覆基材表面的痕迹很难去除。这是因为在表面能不够低的情况下,白色马克笔的笔迹会残留在材料表面而不能被轻易擦除。结果表明,该涂层体系中引入 PDMS 低表面能链段后具有良好的防污性能,合成的石墨烯环氧-PDMS 涂料适用于不同的基材。

2.8 自清洁测试

使用白色粉笔粉薄涂覆于涂层表面,模拟污染物,取 50 μL 去离子水进行冲洗。另外,选用牛奶和咖啡作为液体污染源,并将涂层倾斜以使液滴沿斜面滑落,以观察其流动情况。经过去离子水冲洗,涂层表面的白色粉笔粉随着液滴滑落,涂层表面变干净。牛奶和咖啡在涂层倾斜后液滴轻松滑落。涂层在沾有泵油后,在倾斜角度 45° 下经过 133 s 泵油完全滑落至塑料杯中;涂层沾有食用油后,在倾斜 38 s 后食用油完全滑落至塑料杯中。因此,该复合涂层表现出优异的自清洁性能。

3 结论

对石墨烯复合材料进行了研究,使用环氧树脂 E51 和环氧基封端 PDMS 作为基体,甲基六氢邻苯二甲酸酐作固化剂,并添加了石墨烯,制备了石墨烯基环氧-PDMS 涂层。通过红外光谱分析、热失重分析、AFM、接触角、防污、自清洁和隔热等测试,探讨了石墨烯环氧-PDMS 涂层的热性能与防污性能。结果如下:

(1) 红外光谱分析表明,聚二甲基硅氧烷中的环氧基封端和环氧树脂中的 C—OH 基发生了脱醇反应,将含硅的低表面能结构引入到树脂体系中。通过热失重分析,发现该涂层在约 360°C 时开始分解,这表明低表面能环氧石墨烯复合涂层体系在此

温度下开始发生分解。涂层的 AFM 形貌图呈现出涂层表面厚度均一,没有发生大的相分离,产生了高度交联和紧密的结构。

(2) 水、二碘甲烷和十六烷在涂层表面上的静态接触角分别为 103.358° \pm 1.5°、72.667° \pm 1.5° 和 17.074° \pm 2°,同时对涂层表面上不同大小液滴的滚动角变化情况。发现该涂层具备疏水疏油性。液滴的滚动角随着液滴的大小和表面张力的降低而增加,这可能是由于涂层存在极性基团(如酯基、羟基)和其他吸引水的官能团的影响。

(3) 不同的液滴、泵油和食用油在涂层表面容易滑落,而不会留下明显痕迹。使用白色粉笔粉测试,证实涂层具有自清洁性能。使用白色马可笔测试,油墨在不同基材涂层表面收缩导致标记不连续,说明该涂层具有优异的抗污自清洁性能,且适用于不同的底物。

(4) 在隔热性能测试中,添加了石墨烯的环氧-PDMS 复合涂层的表面温度为 118.6°C \pm 0.4°C,背面温度为 80.8°C \pm 0.1°C,箱体中部的温度为 36.6°C \pm 0.4°C。这表明该涂层具有出色的隔热性能,其隔热温差约为 38°C。此外,石墨烯环氧-PDMS 涂层在热老化测试中显示出良好的耐热老化性能。综上所述,该涂层具有优异的热性能与防污性能,未来有望在电子设备基材上得到大规模的工业应用。

参考文献

- [1] Tang G, Jiang Z G, Li X, *et al.* Three dimensional graphene aerogels and their electrically conductive composites [J]. Carbon, 2014, (77): 592-599.
- [2] Boga K, Rao C R K, Suresh K I. New triepoxy monomer and composites for thermal and corrosion management [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2020, 137(41): 49251.
- [3] Li X, Li Y, Alam M M, *et al.* Enhanced thermal conductivity of nanocomposites with MOF-derived encapsulated magnetic oriented carbon nanotube-grafted graphene polyhedral [J]. RSC Advances, 2020, 10(6): 3357-3365.
- [4] Lv Q, Peng Z, Meng Y, *et al.* Three-dimensional printing to fabricate graphene-modified polyolefin elastomer flexible composites with tailorable porous structures for electromagnetic interference shielding and thermal management application [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2022, 61(45): 16733-16746.
- [5] Ferrand A, Sijaj M, Claverie J P. Graphene, the swiss army knife of nanomaterials science [J]. ACS Applied Nano Materials, 2020, 3(8): 7305-7313.
- [6] D'Souza F. Nanocarbon hybrids: Interactions with luminophores to applications in energy harvesting and solar fuel production [J]. The Journal of Physical Chemistry Letters, 2013, 4(5): 842-843.
- [7] Pan C, Liu L, Gai G. Recent progress of graphene-containing

- polymer hydrogels; Preparations, properties, and applications [J]. *Macromolecular Materials and Engineering*, 2017, 302(10): 1700184.
- [8] Cheng Y, Zhou S, Hu P, *et al.* Enhanced mechanical, thermal, and electric properties of graphene aerogels via supercritical ethanol drying and high-temperature thermal reduction [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 1439.
- [9] Troncoso O P, Torres F G. Bacterial cellulose—Graphene based nanocomposites [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2020, 21(18): 6532.
- [10] Wang L, Liu Z, Zhang J. Synthetic carbon nanomaterials for electrochemical energy conversion [J]. *Nanoscale*, 2022, 14(37): 13473–13489.
- [11] Sang B, Li Z, Li X, *et al.* Graphene-based flame retardants: A review [J]. *Journal of Materials Science*, 2016, 51: 8271–8295.
- [12] Reddy Y V M, Shin J H, Palakollu V N, *et al.* Strategies, advances, and challenges associated with the use of graphene-based nanocomposites for electrochemical biosensors [J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2022, 304: 102664.
- [13] Li J, Zhu Q, Zhang G, *et al.* Flower-like ZnO nanosheets grown on O₂ plasma treated monolayer graphene and its photocatalytic property [J]. *Optik*, 2022, 251: 168476.
- [14] Ma Z. Effect Evaluation of Biomedical Experiment Teaching Based on Intelligent Sensor [J]. *Journal of Sensors*, 2022, 2022: 2124462.
- [15] Ren R, Zhong Y, Ren X, *et al.* Chitosan-based oxygen-doped activated carbon/graphene composite for flexible supercapacitors [J]. *RSC Advances*, 2022, 12(39): 25807–25814.
- [16] 李昕, 郭建喜. 导电涂料的作用机理及应用 [J]. *天津化工*, 2011, 25(3): 12–16.
- [17] 傅敏. 导电涂料以及导电材料在导电涂料中的应用发展概况 [J]. *涂料技术与文摘*, 2006, (2): 5–11.
- [18] Tekke H S, Kumlutas D, Tavman I H. Effect of particle shape on thermal conductivity of copper reinforced polymer composites [J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2007, 26(1): 113–121.
- [19] 王晓, 王华进, 李志士, 等. 石墨烯在涂料中的应用进展 [J]. *中国涂料*, 2017, 32(2): 1–5.
- [20] 赖奇, 罗学萍. 石墨烯导电涂膜的制备研究 [J]. *非金属矿*, 2014, 37(3): 28–29.
- [21] 杨建锋, 季铁正, 张教强, 等. 石墨烯/超高分子量聚乙烯复合材料的导电性能 [J]. *高分子材料科学与工程*, 2013, 29(12): 48–51.
- [22] 石成利, 梁忠友. 红外辐射涂料的研究与应用现状及其发展趋势 [J]. *中国陶瓷工业*, 2005, (4): 34–36.
- [23] 郭茹. 导热环氧树脂复合材料的制备 [D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
- [24] 孙汉东, 常大定, 樊震. 高发射率红外涂层的研究 [J]. *红外研究*, 1990, (5): 401–404.
- [25] 汤大新, 杨钧, 王淑华. 日本红外辐射陶瓷材料的最新进展 [J]. *物理*, 1988, (11): 666–670.
- [26] 刘业明. 高效散热涂料的制备及其散热机理研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
- [27] 罗文谦. 石墨烯在导热散热领域的应用 [J]. *新材料产业*, 2018, (11): 35–37.
- [28] Zhang Y F, Ren Y J, Bai S L. Vertically aligned graphene film/epoxy composites as heat dissipating materials [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 118: 510–517.
- [29] Kumar R, Mohanty S, Nayak S K. Thermal conductive epoxy adhesive composites filled with carbon-based particulate fillers: A comparative study [J]. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2020, 34(8): 807–827.
- [30] Chen J, Lu X, Chen J, *et al.* Synthesis and properties of cationic core-shell fluorinated polyurethane acrylate [J]. *Polymers*, 2023, 16(1): 86.
- [31] Chen J, Zeng Z, Liu C, *et al.* Aqueous cationic fluorinated polyurethane for application in novel UV-curable cathodic electrodeposition coatings [J]. *Polymers*, 2023, 15(18): 3725.
- [32] Chen J, Yuan T, Tu W, *et al.* Electrophoretic deposition of waterborne ultraviolet (UV)-curable coatings based on microgels [J]. *Journal of Coatings Technology and Research*, 2019, 16: 1367–1378.
- [33] Chen J, Peng K, Deng Z, *et al.* Effects of different molecular chain lengths and side groups on structure and property of UV-curable waterborne cathodic electrophoretic deposition coatings [J]. *Progress in Organic Coatings*, 2019, 129: 10–20.
- [34] Cao Y, Zhou M, Wang S, *et al.* Superhydrophobic and flame retardant polydimethylsiloxane coatings with layered double hydroxide and ammonium polyphosphate [J]. *Progress in Organic Coatings*, 2022, 172: 107117.
- [35] Wu W, Zhang Y, Miao S, *et al.* Photothermal superhydrophobic cotton fabric based on silver nanoparticles cross-linked by polydopamine and polyethylenimine [J]. *Langmuir*, 2023, 39(42): 15131–15141.
- [36] Teng Y, Wang Y, Shi B, *et al.* Robust superhydrophobic surface fabrication by fluorine-free method on filter paper for oil/water separation [J]. *Polymer Testing*, 2020, 91: 106810.
- [37] Li M, Wei D, Zhang W, *et al.* Development of biobased polyol from epoxidized soybean oil for polyurethane anti-smudge coatings [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2022, 139(44): e53101.
- [38] Gong X, He S. Highly durable superhydrophobic polydimethylsiloxane/silica nanocomposite surfaces with good self-cleaning ability [J]. *ACS Omega*, 2020, 5(8): 4100–4108.
- [39] Dores A P D, Llorente O, Martin L, *et al.* Polydimethylsiloxane containing waterborne hydrophobic polyurethane coatings with good adhesion to metals: Synthesis and characterization [J]. *Progress in Organic Coatings*, 2022, 162: 106564.
- [40] Eduok U. New superhydrophobic and self-cleaning zirconia/polydimethylsiloxane nanocomposite coated cotton fabrics [J]. *New Journal of Chemistry*, 2021, 45(2): 638–650.
- [41] Verma S, Mohanty S, Nayak S K. Preparation of hydrophobic epoxy-polydimethylsiloxane-graphene oxide nanocomposite coatings for antifouling application [J]. *Soft Matter*, 2020, 16(5): 1211–1226.
- [42] Syafiq A, Vengadaesvaran B, Rahim N A, *et al.* Transparent self-cleaning coating of modified polydimethylsiloxane (PDMS) for real outdoor application [J]. *Progress in Organic Coatings*, 2019, 131: 232–239.

- 2022, 10(2): 2205443.
- [10] Li Z, Wu G, Yang Y, *et al.* An ion-conductive grafted polymeric binder with practical loading for silicon anode with high interfacial stability in lithium-ion batteries [J]. *Advanced Energy Materials*, 2022, 12(29): 2201197.
- [11] Han X, Gong H, Li H, *et al.* Fast-charging phosphorus-based anodes; Promises, challenges, and pathways for improvement [J]. *Chemical Reviews*, 2024, 124(11): 6903–6951.
- [12] He Z, Zhang C, Zhu Z, *et al.* Advances in carbon nanotubes and carbon coatings as conductive networks in silicon-based anodes [J]. *Advanced Functional Materials*, 2024, 34(48): 2408285.
- [13] Patra A, Matsumi N. Densely imidazolium functionalized water soluble poly(ionic liquid) binder for enhanced performance of carbon anode in lithium/sodium-ion batteries [J]. *Advanced Energy Materials*, 2024, 15(5): 2403071.
- [14] Lusztig D, Luski S, Shpigel N, *et al.* Silicon anodes for lithium-ion batteries based on a new polyimide binder [J]. *Batteries & Supercaps*, 2024, 7(8): e202400255.
- [15] Xue S, Fu Y, Song Z, *et al.* Coil-to-stretch transition of binder chains enabled by “nano-combs” to facilitate highly stable SiO_x anode [J]. *Energy & Environmental Materials*, 2022, 5(4): 1310–1316.
- [16] Wang X, Li H, Fu W, *et al.* Cooperation of covalent bonds and coordinative bonds stabilizing the Si-binder-Cu interfaces for extending lifespan of silicon anodes [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2025, 683: 36–45.
- [17] Dong B W, Zhu H Z, Cai X C, *et al.* Rational design of alginate-derived network binder for high-performance silicon-based anodes in Li-ion batteries [J]. *Journal of Power Sources*, 2025, 626: 235745.
- [18] Sun J, Li Y, Lv L, *et al.* Selective adsorption of electrolyte anions with chitosan skin producing LiF-enriched solid electrolyte interphase for Si-based lithium-ion batteries [J]. *Advanced Functional Materials*, 2024, 34(52): 2410693.
- [19] Cao P F, Yang G, Li B, *et al.* Rational design of a multifunctional binder for high-capacity silicon-based anodes [J]. *ACS Energy Letters*, 2019, 4(5): 1171–1180.
- [20] Choi S, Kwon T, Coskun A, *et al.* Highly elastic binders integrating polyrotaxanes for silicon microparticle anodes in lithium ion batteries [J]. *Science*, 2017, 357(6348): 279–283.
- [21] Sun Q, Wu X, He Z, *et al.* A Self-healing binder based on host-guest interaction for carbon-silicon anodes in lithium ion batteries [J]. *Journal of The Electrochemical Society*, 2025, 172(1): 010508.
- [22] Li Z, Tang W, Yang Y, *et al.* Engineering prelithiation of polyacrylic acid binder; A universal strategy to boost initial coulombic efficiency for high-areal-capacity Si-based anodes [J]. *Advanced Functional Materials*, 2022, 32(40): 2206615.
- [23] Son H J, Reddy B S, Na H J, *et al.* An elastic cross-linked polymeric binder for high-performance silicon/graphite composite anodes in lithium-ion batteries [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2025, 1010: 177724.
- [24] Wang L, Liu T, Peng X, *et al.* Highly stretchable conductive glue for high-performance silicon anodes in advanced lithium-ion batteries [J]. *Advanced Functional Materials*, 2018, 28(3): 1704858.
- [25] Huang Q, Song J, Gao Y, *et al.* Supremely elastic gel polymer electrolyte enables a reliable electrode structure for silicon-based anodes [J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 5586.
- [26] Yoon J, Oh D X, Jo C, *et al.* Improvement of desolvation and resilience of alginate binders for Si-based anodes in a lithium ion battery by calcium-mediated cross-linking [J]. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 2014, 16(46): 25628–25635.
- [27] Kim J, Park K, Cho Y, *et al.* Zn²⁺-imidazole coordination crosslinks for elastic polymeric binders in high-capacity silicon electrodes [J]. *Advanced Science*, 2021, 8(9): 2004290.
- [28] Huang H, Wei D, Zhu X, *et al.* Calcium ions modification polyacrylamide grafted protein binder for silicon anode in lithium-ion battery [J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2023, 295: 127129.
- [29] Zheng Z, Gao H, Ke C, *et al.* Constructing robust cross-linked binder networks for silicon anodes with improved lithium storage performance [J]. *ACS Applied Material & Interfaces*, 2021, 13(45): 53818–53828.
- [30] Liu J, Zhang Q, Zhang T, *et al.* A robust ion-conductive biopolymer as a binder for Si anodes of lithium-ion batteries [J]. *Advanced Functional Materials*, 2015, 25(23): 3599–3605.
- [31] Liang J, Fan Z, Chen S, *et al.* A novel three-dimensional cross-linked net structure of submicron Si as high-performance anode for LIBs [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, 860: 158433. ■
-
- (上接第 272 页)
- [43] Qiao X, Chen R, Zhang H, *et al.* Outstanding cavitation erosion resistance of hydrophobic polydimethylsiloxane-based polyurethane coatings [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2019, 136(25): 47668.
- [44] Liu S, Wang Y, Tang X, *et al.* Fabrication of polydimethylsiloxane superhydrophobic coatings with self-healing properties using the template method [J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2023, 33(3): 1349–1357.
- [45] Verma S, Das S, Mohanty S, *et al.* A facile preparation of epoxy-polydimethylsiloxane (EP-PDMS) polymer coatings for marine applications [J]. *Journal of Materials Research*, 2019, 34(16): 2881–2894.
- [46] Sun X, Chen R, Gao X, *et al.* Fabrication of epoxy modified polysiloxane with enhanced mechanical properties for marine antifouling application [J]. *European Polymer Journal*, 2019, 117: 77–85.
- [47] 王旭华, 吴仲岩, 杨洁, 等. 疏水 CY184/E-PDMS 环氧树脂复合材料的制备及性能 [J]. *工程塑料应用*, 2024, 52(7): 8–13.
- [48] 张伟钢, 李娇, 吕丹丹. 涂料助剂对 PDMS 改性环氧树脂/Al 复合涂层性能的影响 [J]. *材料导报*, 2024, 38(10): 282–286.
- [49] Wu X, Wyman I, Zhang G, *et al.* Preparation of superamphiphobic polymer-based coatings via spray-and dip-coating strategies [J]. *Progress in Organic Coatings*, 2016, 90: 463–471.
- [50] Chen J, Ke Q, Li S, *et al.* Robust UV-curable anti-smudge electrodeposition coating for self-cleaning, anti-graffiti and corrosion protection [J]. *Progress in Organic Coatings*, 2023, 179: 107526.
- [51] Zhong X, Sheng J, Fu H. A novel UV/sunlight-curable anti-smudge coating system for various substrates [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018, 345: 659–668.
- [52] Zheng C, Liu G, Hu H. UV-curable anti-smudge coatings [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, 9(30): 25623–25630. ■