

六方氮化硼改性防腐涂料对海洋环境服役翅片散热器散热性能影响研究

高逸晖¹, 穆琪¹, 赵文忠¹, 任月², 李永^{2*}

(1.中国电子科技集团公司第二十研究所,西安 710068; 2.中国科学院理化技术研究所,北京 100190)

摘要: **目的** 研究海上电子设备翅片散热器所涂覆防腐涂料的导热系数对散热器散热性能的影响规律,提高翅片散热器的散热效能。**方法** 以六方氮化硼粉体为导热填料,将其添加的海上电子装备防腐涂料中,制备添加不同量六方氮化硼的改性防腐涂料,分别研究六方氮化硼对涂层热导率、附着力、冲击性、柔韧性以及耐中性盐雾性能的影响规律,优化配方设计。最后基于上述试验结果,以铝合金翅片散热器为模型,研究不同模拟热源情况下,散热器涂覆六方氮化硼改性防腐涂层前后的散热性能。**结果** 翅片散热器防腐涂层的热导率随掺入六方氮化硼质量分数的增加而提升,在20%时达到最大值($\lambda \approx 1.03 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$),力学性能在添加量为15%时达到最优。相比未改性的防腐涂料,涂覆六方氮化硼改性防腐涂料的铝合金散热器,在自然对流条件下以及加热功率20 W时,可使其平衡温度下降约5℃。**结论** 通过在防腐涂料中添加六方氮化硼,在涂层中构筑了导热网络,降低了涂层传导热阻,提高了经过涂层表面的热流密度,显著提升了铝合金散热器的热管理效能。上述高导热防腐涂层在海洋环境下服役设备的热管理应用方面具有良好的应用前景。

关键词: 氮化硼纳米片; 散热涂层; 防腐涂层; 翅片式散热器; 导热系数; 热管理

中图分类号: TG174

文献标志码: A

文章编号: 1672-9242(2025)01-0125-08

DOI: 10.7643/ issn.1672-9242.2025.01.013

Effects of Boron Nitride Nanosheets Modified Anticorrosive Coating on Heat Dissipation Performance of Fin Heatsinks

GAO Yihui¹, MU Qi¹, ZHAO Wenzhong¹, REN Yue², LI Yong^{2*}

(1. The 20th Research Institute of CETC, Xi'an 710078, China;

2. Technical Institute of Physics and Chemistry, CAS, Beijing 100190, China)

ABSTRACT: The work aims to investigate the effects of thermal conductivity of anti-corrosion coating on the heat dissipation performance of ship borne electronic equipment fin radiators, and improve the heat dissipation efficiency of fin radiators. With hexagonal boron nitride powder as a thermal conductive filler, modified anti-corrosion coatings with different amounts of hexagonal boron nitride were prepared for ship electronic equipment anti-corrosion coatings. The effects of hexagonal boron nitride

收稿日期: 2024-10-12; 修订日期: 2024-12-10

Received: 2024-10-12; Revised: 2024-12-10

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFE0201200)

Fund: National Key Research and Development Program of China (2022YFE0201200)

引文格式: 高逸晖, 穆琪, 赵文忠, 等. 六方氮化硼改性防腐涂料对海洋环境服役翅片散热器散热性能影响研究[J]. 装备环境工程, 2025, 22(1): 125-132.

GAO Yihui, MU Qi, ZHAO Wenzhong, et al. Effect of Boron Nitride Nanosheets Modified Anticorrosive Coating on Heat Dissipation Performance of Fin Heatsinks[J]. Equipment Environmental Engineering, 2025, 22(1): 125-132.

*通信作者(Corresponding author)

on the thermal conductivity, adhesion, impact resistance, flexibility, and neutral salt spray resistance of the coatings were studied, and the formulation design was optimized; Finally, based on the above experimental results, the heat dissipation performance of aluminum alloy finned radiators before and after coating with hexagonal boron nitride modified anti-corrosion coatings was studied under different simulated heat source conditions. The thermal conductivity of the anti-corrosion coating on the finned radiator increased with the increase of the mass percentage of hexagonal boron nitride added, reaching its maximum value ($\lambda \approx 1.03 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) at 20wt%, and the mechanical properties reached their optimal value at a dosage of 15wt%; Compared with unmodified anti-corrosion coatings, aluminum alloy radiators coated with hexagonal boron nitride modified anti-corrosion coatings could lower their equilibrium temperature by $\sim 5^\circ\text{C}$ under natural convection conditions and heating power of 20 W. By adding hexagonal boron nitride to anti-corrosion coatings, a thermal conductivity network is constructed in the coating, reducing the thermal resistance of the coating and increasing the heat flux density passing through the coating surface, significantly improving the thermal management efficiency of aluminum alloy heat sinks. The above-mentioned high thermal conductivity anti-corrosion coating has good application prospects in the thermal management of shipborne equipment serving in marine environments.

KEY WORDS: boron nitride nanosheets; heat dissipation coating; anti-corrosion coating; finned heat sinks; thermal conductivity; thermal management

随着半导体技术和高密度封装技术的快速发展,海上设备的电子器件向着集成化、微小型化、高集成度、大功率方向发展。但是,在海上设备内部,电子器件的服役环境空间相对狭小,布局相对紧密,这使得电子设备系统热流密度急剧升高,散热问题尤为突出^[1-3]。由此引发了系统热环境急剧恶化,降低了电子设备系统的工作可靠性,缩短了使用寿命^[4-6]。据统计,55%的电子设备失效是由温度过高引起的^[7-9]。因此,提高电子设备的热管理能力至关重要。

在相对较为恶劣的海洋大气环境中服役的电子设备,湿热、盐雾和霉菌等环境条件并存,且相互作用,对设备及其散热器系统产生较大的腐蚀破坏。翅片式铝合金散热器是海上电子设备的主流散热器,为保护金属散热器,防止其被腐蚀,除了进行化学电镀防腐外,一般会在其壁面上喷涂几百微米厚度的防腐涂料^[10]。目前,海上电子设备散热器所用的防腐涂料主要为丙烯酸聚氨酯和环氧树脂涂料,导热系数为 $0.15 \sim 0.3 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。当热量传递至防腐涂料时,由于防腐涂层的导热系数以及空气对流传热系数较低,因此会在电子设备发热功率器件与传热媒介之间形成较大的传热热阻,影响热量的有效扩散^[11]。文献[12]利用 Fluent 仿真软件研究了片式散热器防腐涂层的导热率对片式散热器散热能力的影响规律,研究结果显示,提升防腐涂层的热导率,能够达成降低风机能耗和缩减散热片数量的目标,同时确保散热器维持原有的散热效能。这一结果对于推动功率器件换热效能的提升与轻量化设计具有重要意义。因此,海上电子设备防腐涂料的导热系数已经成为影响片式散热器散热效能的主要因素。

一种常用的增强防腐材料导热能力的策略是向其中添加高导热填料。要提高涂层的热导率,通常会选择石墨烯^[13-15]、碳纳米管^[16]、碳化硅^[17]、氮化铝^[18]、

氮化硼^[19]等热导率较高的填料。这些导热填料通过相互搭接形成热传输通道,从而提高防腐涂层的热导率。此外,导热填料的引入不仅能在涂层内部构建导热网络结构,还能在涂层表面产生大量微纳结构,这有助于显著增大涂层的散热表面积,进而优化其热交换效率。相比于其他碳材料(碳纳米管、石墨、炭黑等),石墨烯因其室温导热系数可高达 $5000 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,具有高导热性、高导电性、高机械强度和大比表面积等优异特性^[20],因此被视为理想的导热填料。然而,早期研究揭示,纳米碳材料因其巨大的比表面积特性,在涂层内部实现高体积填充率面临挑战,进而阻碍了高效导热通道的形成,限制了热导率的进一步提升。六方氮化硼是一种与石墨烯结构类似的二维片层材料,通常被称为“白色石墨烯”。它具有优异的热导率、电绝缘性和化学惰性^[21],因此被广泛应用于环氧树脂中,以增强其导热和电绝缘性能^[22-24]。由于其高长径比的二维片层结构,六方氮化硼还展现出优异的阻隔性能,使其在防腐领域具有广阔的应用潜力。相关研究指出,六方氮化硼作为填料,在复合材料中的添加量与导热性能之间存在一定关系^[25],适当增加填料含量可以显著提高导热系数,但过高的添加量可能影响材料的韧性和绝缘性,因此优化填料配比成为未来研究的重要方向。综上所述,六方氮化硼在防腐领域以及作为高性能复合材料填料方面展现出显著优势,值得进一步深入研究。

本文以海上电子设备防腐性能优异的氟硅(FSi)、丙烯酸聚氨酯树脂为基本材料,添加六方氮化硼进行导热性能改性,制备出一种高导热防腐涂料。该涂料固化成膜后,形成散热涂层。分析了六方氮化硼的添加量对涂层性能的影响,并测试了涂层的热导率、力学性能和防腐性能。根据该涂料在海洋设备使用工况的需求,采用铝合金翅片散热器进行模拟

试验,以考察该涂料的散热效果。最后,通过软件仿真验证了六方氮化硼改性防腐涂层对翅片式散热器的影响规律。

1 试验

1.1 材料

试验主要材料:六方氮化硼粉末(99.9%,325目)购自 Aladdin(中国上海)。氟硅(FSi)树脂(RF-901,固含量为50%)购自中国上海新木明国际贸易有限公司。异氰酸酯三聚物(N3390)购自拜耳中国有限公司。二甲苯(工业级),购自山东德源化工有限公司。醋酸丁酯(工业级),购自天津市大茂化学试剂厂。无水乙醇(分析纯),购自天津市大茂化学试剂厂。丙烯酸聚氨酯防腐漆(型号:BN04-1),购自湖南昂威涂料有限责任公司。

1.2 制备工艺

选用大气环境用丙烯酸聚氨酯防腐漆黏结剂树脂为研究对象,导热防腐涂料的配方见表1。分别按照不同质量分数(0%、5%、10%、15%、20%)加入氮化硼,制备不同六方氮化硼含量的涂料样品。在多功能搅拌分散机的搅拌缸中,分别加入丙烯酸树脂、六方氮化硼粉体、钛白粉、有机膨润土、溶剂和分散剂,以1500 r/min的转速高速分散10 min后,将其转移至砂磨机中研磨60 min,直至上述涂料组分均匀分散至细度达到30 μm。然后,采用200目筛网过滤后封装,即可获得导热防腐涂料。将马口铁样片和铝合金散热器经过表面喷砂抛光、除油和除尘处理。取不同氮化硼含量的防腐涂料,将其与固化剂混合后,加入适当溶剂调整黏度。然后在0.3~0.4 MPa的条件下喷涂在马口铁和散热器表面,涂层厚度控制在(60±2) μm。喷涂后的涂层在室温(~25℃)环境下放置7 d,以保证涂层固化完全。此外,将上述制备的涂料用涂布器在四氟乙烯样板表面涂覆一层厚度为60 μm的涂层,待涂层固化后,从四氟乙烯表面揭下,制备成直径25 mm的试样,以测试其热导率。

表 1 导热防腐面漆的配方

Tab.1 Formula of thermal conductive anti corrosion coating

成分	质量分数/%
丙烯酸树脂	19.5
HDI 固化剂	1.95
氮化硼	0.0~20.0
钛白粉	5.0~25.0
有机膨润土	0.8
消泡剂	0.4
分散剂	0.4
醋酸丁酯	21.0
二甲苯	9.0

1.3 性能测试与表征

采用场发射扫描电子显微镜(FE-SEM,型号:4800)对六方氮化硼粉体的微观形貌进行测试与表征。涂层的热扩散系数(α)采用激光导热仪(NETZSCH,型号:LF467)进行测试。同时,利用同步热分析仪(NETZSCH,STA449)测量涂层的比热容 c_p 。最终,依据公式(1)计算得到涂层的导热系数λ。

$$\lambda=c_p \cdot \rho \cdot \alpha \tag{1}$$

式中:λ为涂层的导热系数; c_p 为涂层的比热容;ρ为涂层的密度;α为涂层的热扩散系数。

取涂覆涂层的铝合金样板,参照相关标准分别对其附着力(ISO 2409—2007)、硬度(GB/T 6739—2006)、耐冲击性能(GB/T 20624.1—2006)进行测试。

按照耐中性盐雾性能标准(GB/T 1771—2007)对涂覆涂层的铝合金样板进行测试。测试参数:NaCl质量分数为5%,压力桶温度为35℃,相对湿度为99.9%,试验样板与垂直线夹角为30°,盐雾时间为168 h。试验前,均使用红色PVC胶带进行封边处理,所有测试样板在进入盐雾箱之前,需要在涂层样片中心部位进行划痕操作。

模拟实际工况,搭建涂层散热性能测试装置(如图1所示),以考察防腐导热涂层在铝合金散热器上的散热效果。散热测试装置包括铝合金散热器、热电偶、陶瓷加热片、电源模块以及导热硅脂等。陶瓷加热片和铝合金翅片散热器之间涂覆导热硅脂(热导率为3 W·m⁻¹·K⁻¹),以减少测试过程中的接触热阻。选择2个铝合金散热器,一个在翅片表面喷涂六方氮化硼改性防腐涂料,另一个不喷涂作为空白对照。通过测量2个散热器在不同加热功率下的温度并计算温差,以考察该涂层在实际工况下的散热性能。

2 结果与讨论

2.1 导热性能

利用SEM分别对未添加六方氮化硼和添加六方氮化硼涂层样品微观形貌进行表征,如图2所示。图2a为未添加氮化硼微片涂层断口形貌,表面准球形的氧化钛颜料粒子均匀分布在涂层中。不同六方氮化硼添加量的防腐涂层微观形貌如图2b~e所示。片状的氮化硼微片填料在涂料成膜过程中,受到溶剂和黏结剂树脂表面张力的作用,会发生移动,并在成膜后沿水平方向排列取向。当涂料中氮化硼微片含量较低时(见图2b、c),氮化硼微片填料片层之间不能良好接触,形成的导热通路有限。随着氮化硼微片填料含量的不断增大(见图2d、e),水平取向的氮化硼微片之间会相互搭接,形成丰富的导热通路,实现热量的高效传输,从而显著提升涂层的导热性能。在室温下不同六方氮化硼添加量所制备的涂层的比导热系数结果见表2。

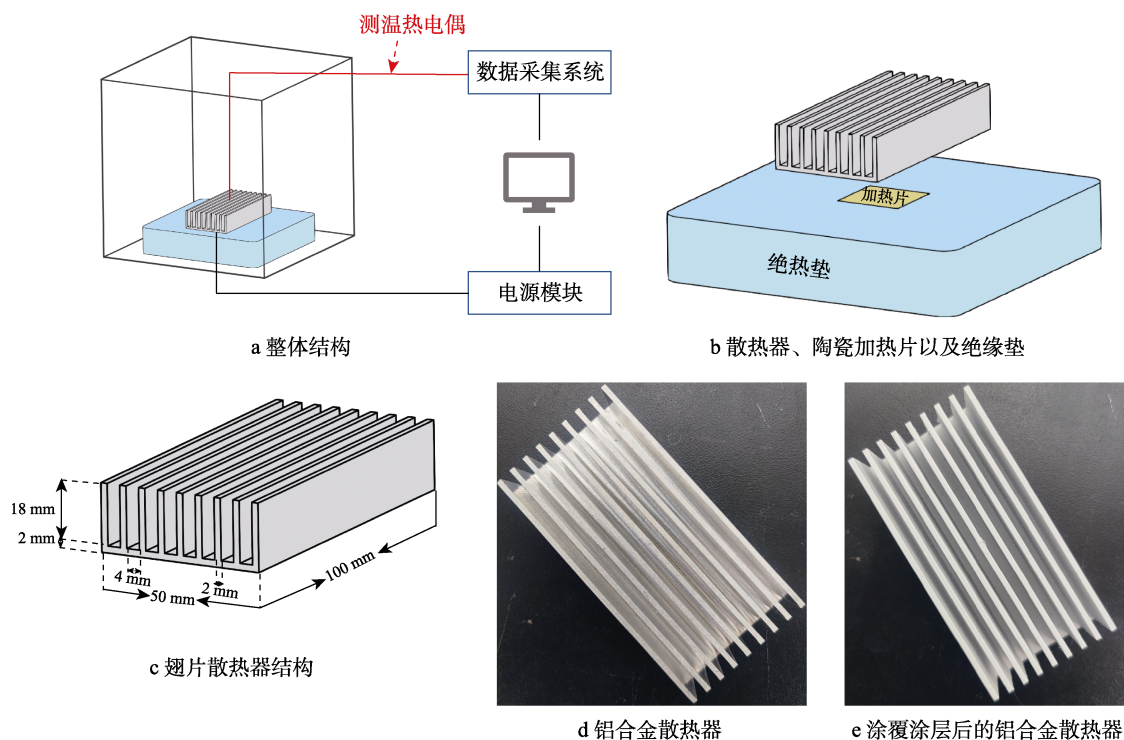


图 1 涂层散热性能测试装置及其部件

Fig.1 Coating heat dissipation performance testing device and its components: a) overall structure; b) schematic diagram of heat sink, ceramic heat source and insulation pad; c) structure of straight-fin heat sink; d) aluminum alloy heat sink; e) aluminum alloy heat sink after coating

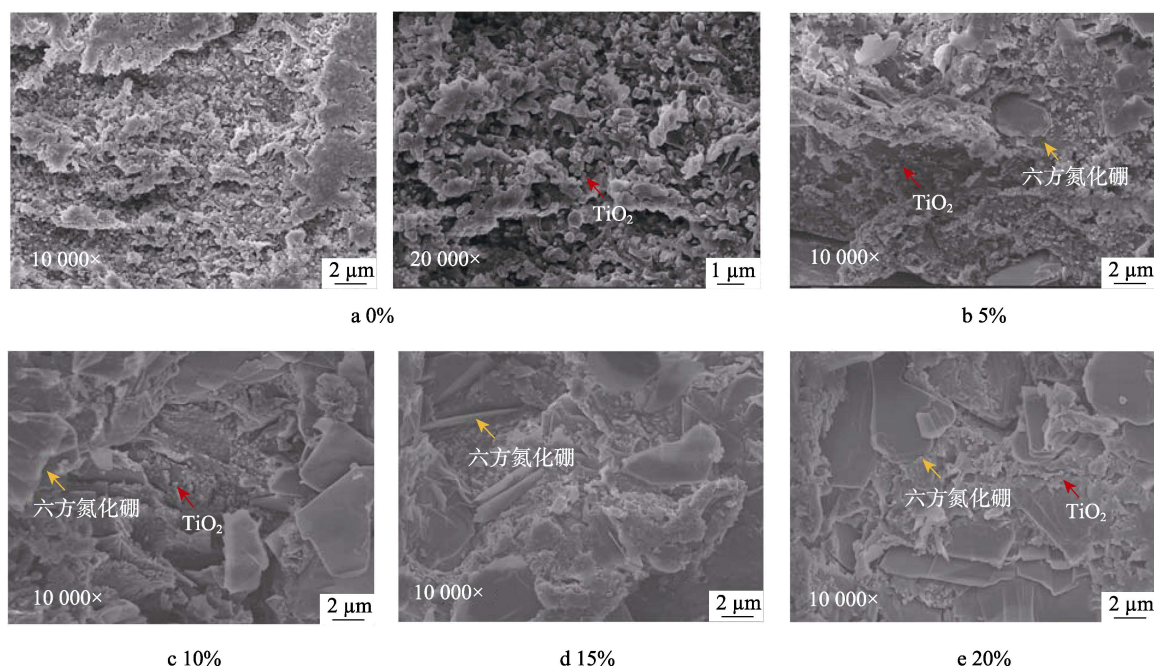


图 2 不同六方氮化硼含量下涂层的 SEM 微观形貌

Fig.2 SEM micro morphology of coating with different amounts of hexagonal boron nitride

表 2 掺入不同含量六方氮化硼的防腐涂层导热系数

Tab.2 Changes of thermal conductivity of coating doped with different amounts of boron nitride nanosheets

六方氮化硼质量分数/%	热导率/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	六方氮化硼质量分数/%	热导率/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)
0	0.46	15	0.95
5	0.54	20	1.03
10	0.67		

观察表 2 可知, 六方氮化硼添加量的增加使得涂层的导热系数显著提升。在六方氮化硼添加量较低的情况下, 热传导性能的增强并不显著, 这是由于其在防腐涂层基质中的分布模式类似“海岛”状, 此时六方氮化硼片层间的有效接触位点稀缺, 难以构建有效的导热网络。随着六方氮化硼的含量的不断提高, 高长径比的六方氮化硼之间相互接触的概率增大, 逐步形成有效的导热网络, 在涂层基体上构建了传热通道, 因此复合涂层的热导率显著提升。当六方氮化硼含量达到 15% 时, 导热系数最大达到了 0.95 W/(m·K)。然而, 当六方氮化硼含量继续增加时, 涂料的分散难度加大, 且易发生团聚, 从而影响涂层热导率的进一步提升。综合考虑成本因素, 选择氮化硼纳米片的添加量为 15%。

2.2 力学和防腐性能

目前的散热防腐涂料研发往往重视涂层导热性能的改善, 通过添加大量导热填料提升涂层热导率, 从而提高涂层的散热性能。然而, 这种配方设计思路虽然能够改善涂层的热导率 ($\geq 1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$), 但过多的导热填料会导致涂层的力学性能劣化, 如附着力差 (低于 2 级)、硬度低 (低于 H 级) 以及耐冲击性能差 (小于 40 kg·cm), 限制了涂层的应用范围^[26-27]。不同六方氮化硼添加量对电子设备翅片散热器用防腐涂层的附着力、硬度以及耐冲击性能的影响见表 3。

表 3 涂层力学性能测试结果
Tab.3 Test result of mechanical properties of coating

六方氮化硼添加量/%	附着力/级	硬度(H)	耐冲击性/cm
0	2	2	40
5	1	2	40
10	1	2	50
15	1	2	50
20	2	4	40

从表 3 可以看出, 试验所制备的涂层的附着力、硬度、耐冲击性能随着六方氮化硼填料添加量的增加

先提升后下降。造成这一现象的原因主要有以下 2 点: 1) 具有高长径比的六方氮化硼均匀分布在涂层中, 增强了涂层与金属基层的结合强度, 从而提升了硬度和附着力, 如图 3 所示; 2) 涂层受到机械冲击时, 六方氮化硼作为应力承载点, 可以吸收和消耗部分冲击能量, 因此涂层的耐冲击强度会增加。随着六方氮化硼填料含量继续增加, 当纳米片质量分数达到 20% 时, 纳米片在涂层中会出现明显团聚现象, 涂层的力学性能相应下降, 达不到预期的增强效果^[28-29]。综上所述, 涂层中六方氮化硼的添加量在 15% 比较合适。

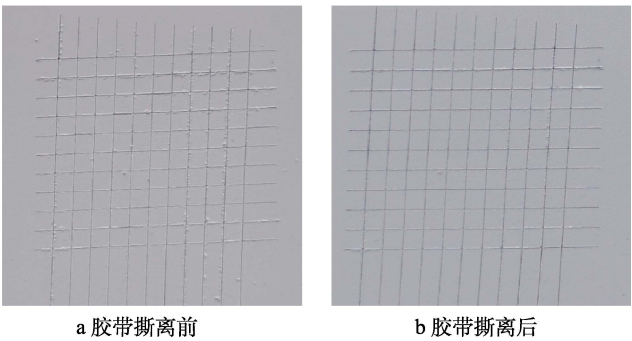


图 3 六方氮化硼添加量为 15% 的防腐涂层附着力测试
Fig.3 Adhesion test of anticorrosive coating with hexagonal boron nitride addition of 15%: a) before peeling; b) after peeling.

氮化硼改性防腐涂层的耐盐雾试验结果如图 4 所示。从图 4 可知, 经过 168 h 中性盐雾试验后, 六方氮化硼质量分数为 0%、10%、15% 的涂层均未产生起泡、剥落和腐蚀等现象。这是由于涂层中添加的六方氮化硼形成了“迷宫效应”, 使得腐蚀介质与基底接触的路径变长, 从而阻碍了氯离子的渗透所致^[30-33], 说明该涂层具有良好的耐盐雾性能 (168 h)。为了快速评价耐盐雾性能, 进行了试片划痕测试, 如图 4 所示。六方氮化硼添加量为 20% 的涂层, 在划口处出现轻微的鼓泡现象; 六方氮化硼添加量为 5% 的涂层, 在切口位置出现一定程度的鼓泡现象, 如图 4 中圆圈所示。分析认为, 当氮化硼添加量较低时, 六方氮化

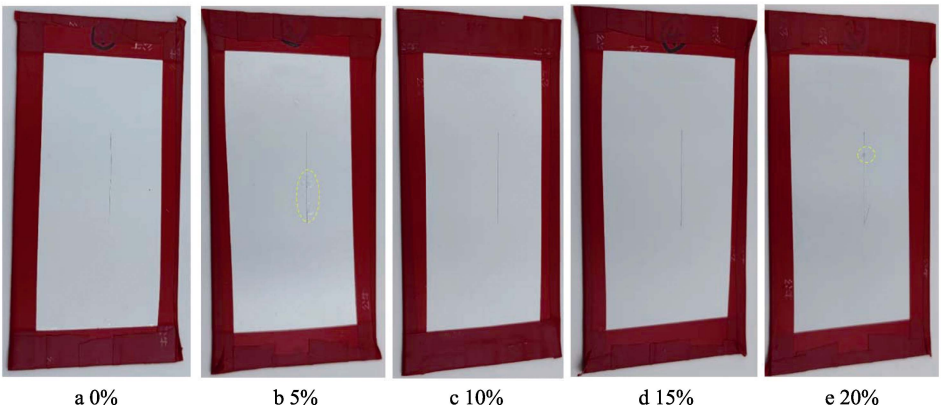


图 4 耐盐雾 (168 h) 试验前后涂覆涂层样片的形貌
Fig.4 Morphology of coated samples before and after salt spray test (168 h)

硼纳米片之间一方面不能通过相互搭接形成物理屏蔽层,导致涂层的刚性较低,抗环境介质的去黏化作用弱,从而使水、氯离子等容易沿着涂膜划口部位向两侧扩散,导致划痕附近起泡。当氮化硼添加量过高时,树脂与基材的黏化作用减弱,同时过量的六方氮化硼片由于分散不均匀,在涂层形成缺陷,也会导致划痕附近起泡,从而造成耐盐雾性能下降。综上所述,一定量(10%~15%)的六方氮化硼添加到涂层中,在提升涂层热导率的同时,同时也具有较好的耐盐雾性能。

2.3 散热效能

将六方氮化硼改性防腐涂层喷涂在电子设备铝合金散热器翅片表面,采用陶瓷加热片模拟电子设备工作时的发热功率,使用K型热电偶测试散热器表面温度,并与未改性防腐涂层和未喷涂的空白铝合金散热器进行散热效能对比。在散热器底部分别施加恒定为20W的加热功率,随着时间的延长,中心测温点的温度在2500s时趋于平衡,如图5所示。在加热功率20W时,相比空白铝合金散热器,涂覆防腐涂层和氮化硼改性防腐涂层散热器平衡温度均显著降低(12~15℃)。这是因为纯铝合金的表面发射率较低(0.1~0.15),而涂层中添加的黏结剂和填料具有较高的红外发射率(0.85~0.9),涂覆在铝合金翅片表面后显著提升了表面发射率。在铝合金散热器的传热过程中,这种提升显著强化了辐射散热,降低了散热器表面的平衡温度。与涂覆防腐涂层散热器相比,涂覆氮化硼改性防腐涂层的散热器的平衡温度降低了5℃,如图5中虚线框所示。通常情况下,当电子设备的工作温度处于70~80℃时,每升高1℃,其可靠性会降低约10%,且随着温度进一步升高,可靠性的

下降幅度更加显著。上述5℃的平衡温度下降,显著提升了铝合金散热器的热管理效能。这是因为,在改性后的防腐涂层中,六方氮化硼纳米片构筑了导热通道,降低了传热热阻,增加了通过涂层的热流密度,从而降低了散热器表面的平衡温度。

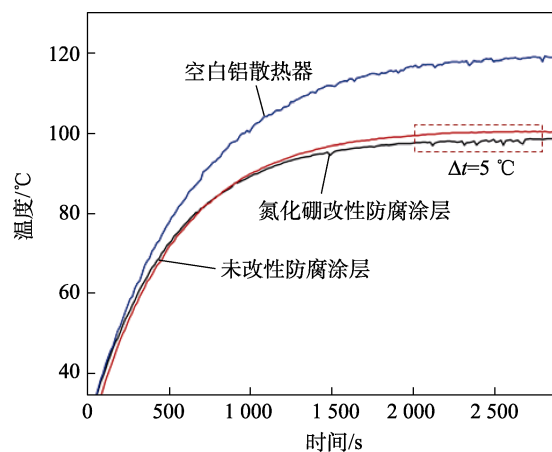


图5 涂层的散热性能试验结果
Fig.5 Thermal performance tests and thermal simulation results of coatings

铝合金散热器达到平衡温度时的红外热成像如图6所示。空白铝合金散热器具有较高的平衡温度,且温度分布显示出均匀特性。与涂覆防腐涂层的铝合金散热器相比,涂覆氮化硼改性防腐涂层的散热器在保持较低的平衡温度的同时,提高了设备的散热均匀性,这与热电偶实际测试结果一致。上述热电偶和红外热像仪的测试结果表明,六方氮化硼改性的防腐涂层显著提升了铝合金散热器的散热效能。这种高导热防腐涂层在海洋环境下服役的设备的热管理应用方面具有良好的应用前景。

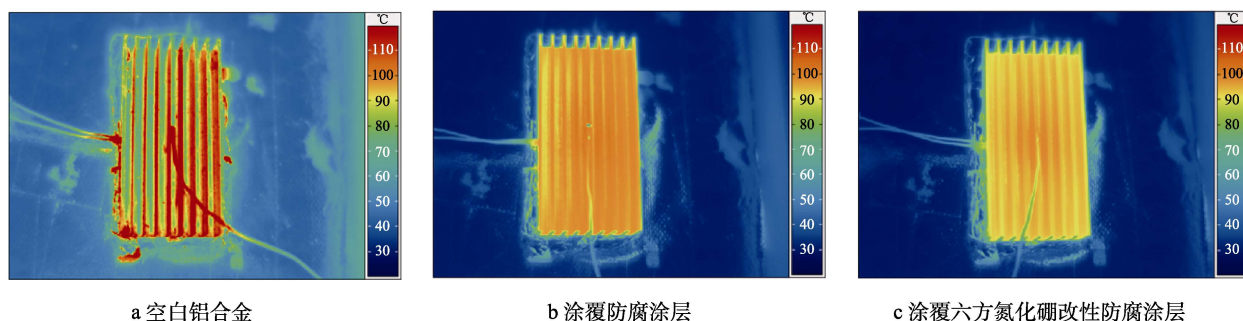


图6 散热器达到热平衡时的红外热像仪图像

Fig.6 Infrared thermal camera photos of radiator reaching thermal equilibrium: a) blank aluminum alloy radiator; b) coated anti-corrosion coating; c) modified anti-corrosion coating coated with hexagonal boron nitride

3 结论

本文采用海洋环境装备的丙烯酸聚氨酯防腐色漆为基体,添加不同质量的六方氮化硼作为导热填料,将其分散在防腐色漆主剂中,制备了六方氮化硼

改性的防腐导热涂料,并测试了其导热性能、耐腐蚀性能以及模拟工况下的散热性能,得到如下结论:

1) 随着六方氮化硼添加量的增加,所制备的防腐涂层的导热系数也呈正相关增加,防腐涂层中六方氮化硼添加量在15%时,涂层的热导率可达0.95 W/(m·K)。继续提升添加量,热导率增长缓慢,

且涂料黏度增大,不利于生产和施工。

2) 六方氮化硼添加量为 15% 所制备的涂层散热性能优异,在 20 W 的模拟热源下,涂覆涂层的铝合金散热器与涂覆防腐涂层相比,下降 5 °C,显著提升了铝合金散热器的热管理性能。

3) 通过在防腐涂料中添加六方氮化硼获得散热能力的同时,在保证涂层力学性能的前提下,仍具有优异的耐盐雾防腐性能。这种高导热防腐涂层在海洋环境下服役的设备的热管理应用方面具有良好的应用前景。

参考文献:

- [1] 任瑞敏, 南小影. 某雷达电子机箱的散热分析[J]. 电子机械工程, 2020, 36(2): 19-21.
REN R M, NAN X Y. Thermal Analysis of a Radar Electronic Chassis[J]. Electro-Mechanical Engineering, 2020, 36(2): 19-21.
- [2] 李宝洋. 某有源相控阵雷达阵面散热设计研究[J]. 现代制造技术与装备, 2018(5): 74-76.
LI B Y. Research on Heat Dissipation Design of an Active Phased Array Radar[J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2018(5): 74-76.
- [3] 刘瑞国, 卢山, 陈年瑞. 某舰载电子机箱的散热设计[J]. 电子机械工程, 2021, 37(4): 17-20.
LIU R G, LU S, CHEN N R. Thermal Design of a Shipboard Electronic Chassis[J]. Electro-Mechanical Engineering, 2021, 37(4): 17-20.
- [4] 任恒, 刘万钧, 黄靖, 等. 基于 Icepak 的密闭机箱热设计研究[J]. 电子科学技术, 2015, 2(6): 639-644.
REN H, LIU W J, HUANG J, et al. Thermal Analysis of an Airtight Cabinet Based on Icepak[J]. Electronic Science & Technology, 2015, 2(6): 639-644.
- [5] LI Y, SONG Y N, ZU H Y, et al. Bioinspired Radiative Cooling Coating with High Emittance and Robust Self-Cleaning for Sustainably Efficient Heat Dissipation[J]. Exploration, 2024, 4(3): 20230085.
- [6] ZU H Y, DAI W, LI Y, et al. Analysis of Enhanced Heat Transfer on a Passive Heat Sink with High-Emissivity Coating[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2021, 166: 106971.
- [7] 邱成梯, 赵惇旻, 蒋全兴. 电子设备结构设计原理[M]. 南京: 东南大学出版社, 2002.
QIU C T, ZHAO C Y, JIANG Q X. Structural Design Principle of Electronic Equipment[M]. Nanjing: Southeast University Press, 2002.
- [8] 聂伟民, 陈自强, 周诗尧, 等. 极地科考船舶储能系统热管理模块设计[J]. 装备环境工程, 2018, 15(12): 50-54.
NIE W M, CHEN Z Q, ZHOU S Y, et al. Design of Thermal Management Module for Energy Storage System of Polar Research Ship[J]. Equipment Environmental Engineering, 2018, 15(12): 50-54.
- [9] 杨科, 郭威威. 弹载相控阵天线系留液冷散热设计与优化分析[J]. 装备环境工程, 2021, 18(12): 37-41.
YANG K, GUO W W. Design and Optimization Analysis of Liquid Cooling for a Missile-Borne Phased Array Antenna[J]. Equipment Environmental Engineering, 2021, 18(12): 37-41.
- [10] 周晓红, 杨春雷. 散热器内防腐涂料的研制[J]. 中国涂料, 2015, 30(9): 40-44.
ZHOU X H, YANG C L. Study on the Preparation of Anticorrosion Coatings Applied in Radiators[J]. China Coatings, 2015, 30(9): 40-44.
- [11] 吕谦. 三防涂敷对电子元器件散热影响的研究[J]. 机械研究与应用, 2023, 36(2): 61-63.
LYU Q. Study on the Effect of Coating on the Heat Dissipation of Electronic Components[J]. Mechanical Research & Application, 2023, 36(2): 61-63.
- [12] 殷浩洋, 尹忠东. 防腐涂料导热率对片式散热器散热能力影响的数值计算[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(13): 5142-5148.
YIN H Y, YIN Z D. Numerical on the Effect of Thermal Conductivity of Anti-Corrosive Coating on Heat Transfer of Panel Type Radiator[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(13): 5142-5148.
- [13] 任云鹏, 邢宝岩, 李世杰, 等. 石墨烯增效环氧导热涂层的制备及应用[J]. 涂料工业, 2024, 54(5): 66-70.
REN Y P, XING B Y, LI S J, et al. Preparation and Application of Graphene Enhanced Epoxy Thermal Conductivity Coating[J]. Paint & Coatings Industry, 2024, 54(5): 66-70.
- [14] 殷浩洋, 尹忠东. 石墨烯复合材料对功率器件散热性能影响的仿真与实验研究[J]. 电子元件与材料, 2019, 38(7): 49-54.
YIN H Y, YIN Z D. Simulation and Experimental Study on Effect of Graphene Composites for Heat Dissipation Performance of Power Devices[J]. Electronic Components and Materials, 2019, 38(7): 49-54.
- [15] 梁宇, 陈凯锋, 黄从树, 等. 石墨烯在功能涂料中的应用研究进展[J]. 装备环境工程, 2019, 16(8): 95-101.
LIANG Y, CHEN K F, HUANG C S, et al. Application Research Progress of Graphene Functional Coatings[J]. Equipment Environmental Engineering, 2019, 16(8): 95-101.
- [16] 李金凤, 丁华, 陈名海, 等. 导热填料对碳纳米管水性辐射散热涂料性能的影响[J]. 上海涂料, 2019, 57(1): 1-6.
LI J F, DING H, CHEN M H, et al. The Effect of Heat Conducting Filler on the Properties of Waterborne Carbon Nanotubes Radiation Heat Dissipation Coatings[J]. Shanghai Coatings, 2019, 57(1): 1-6.
- [17] 柴全微. 高导热涂料的制备及在电机上的应用[J]. 现代涂料与涂装, 2018, 21(1): 6-9.
CHAI Q W. Preparation of High Thermal Conductivity Coatings and Its Application on Motor[J]. Modern Paint & Finishing, 2018, 21(1): 6-9.

- [18] 刘丰文, 张浩, 楼平, 等. 碳纳米管/氮化硼水性涂料的制备与性能研究[J]. 化工新型材料, 2016, 44(12): 134-136.
LIU F W, ZHANG H, LOU P, et al. Research on Propagation and Property of CNTS/BN Aqueous Coating[J]. New Chemical Materials, 2016, 44(12): 134-136.
- [19] YAO Y M, SUN J J, ZENG X L, et al. Construction of 3D Skeleton for Polymer Composites Achieving a High Thermal Conductivity[J]. Small, 2018, 14(13): 1704044.
- [20] ZHU P J, YAN Y N, ZHOU Y, et al. Thermal Properties of Graphene and Graphene-Based Nanocomposites: A Review[J]. ACS Applied Nano Materials, 2024, 7(8): 8445-8463.
- [21] SHI X F, WANG K J, TIAN J, et al. Few-Layer Hydroxyl-Functionalized Boron Nitride Nanosheets for Nanoscale Thermal Management[J]. ACS Appl Nano Mater, 2020, 3: 2310-2321.
- [22] 张俊英, 郑乔文, 李宜珊, 等. 改性六方氮化硼/环氧粉末涂料的制备及性能测试[J]. 闽南师范大学学报(自然科学版), 2023, 36(4): 118-126.
ZHANG J Y, ZHENG Q W, LI Y S, et al. Preparation and Properties of Modified Hexagonal Boron Nitride/Epoxy Powder Coating[J]. Journal of Minnan Normal University (Natural Science), 2023, 36(4): 118-126.
- [23] 张俊英. 六方氮化硼的功能化改性及其对环氧粉末涂料性能的影响[D]. 漳州: 闽南师范大学, 2024.
ZHANG J Y. Functional Modification of Hexagonal Boron Nitride and Its Influence on the Properties of Epoxy Powder Coatings[D]. Zhangzhou: Minnan Normal University, 2024.
- [24] 邢伟义, 陈亮, 周慕天, 等. 氮化硼/石墨烯复合导热填料的制备及其环氧树脂复合材料阻燃导热绝缘性能的研究[J]. 中国科学: 化学, 2023, 53(2): 207-216.
XING W Y, CHEN L, ZHOU M T, et al. Preparation of Boron Nitride/Graphene Composite Thermal Conductive Filler and Study on Flame Retardant, Thermal Conductivity and Insulation Properties of Epoxy Resin Composites[J]. Scientia Sinica Chimica, 2023, 53(2): 207-216.
- [25] 罗舒娟, 邓玉媛, 徐新宇, 等. 改性六方氮化硼/环氧树脂复合材料研究进展[J]. 化工新型材料, 2024, 52(7): 1-6.
LUO S J, DENG Y Y, XU X Y, et al. Research Progress on Modified Hexagonal Boron Nitride/Epoxy Resin Composites[J]. New Chemical Materials, 2024, 52(7): 1-6.
- [26] 易盼, 徐金, 莫娟, 等. 变压器用高导热环保保护涂层技术研究[J]. 变压器, 2022, 59(6): 25-30.
YI P, XU J, MO J, et al. Research on High Thermal Conductivity and Environmentally Friendly Coating Technology for Transformer[J]. Transformer, 2022, 59(6): 25-30.
- [27] BALDELLI A, OU J F, LI W, et al. Spray-on Nanocomposite Coatings: Wettability and Conductivity[J]. Langmuir, 2020, 36(39): 11393-11410.
- [28] PAN D, ZHANG X D, YANG G, et al. Thermally Conductive Anticorrosive Epoxy Nanocomposites with Tannic Acid-Modified Boron Nitride Nanosheets[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2020, 59(46): 20371-20381.
- [29] 袁超, 王刚, 郭冰, 等. 石墨烯微片水性散热涂料的性能研究[J]. 鲁东大学学报(自然科学版), 2020, 36(3): 252-257.
YUAN C, WANG G, GUO B, et al. Performance of Graphene Nanoplatelets Water-based Dissipating Coating[J]. Journal of Ludong University (Natural Science Edition), 2020, 36(3): 252-257.
- [30] 孙九龙, 曹湾湾, 王宁, 等. 氮化硼纳米片在重防腐涂层中的应用进展[J]. 化学学报, 2020, 78(11): 1139-1149.
SUN J L, CAO W W, WANG N, et al. Progress of Boron Nitride Nanosheets Used for Heavy-Duty Anti-Corrosive Coatings[J]. Acta Chimica Sinica, 2020, 78(11): 1139-1149.
- [31] ZHOU Z Y, SEIF A, POURHASHEM S, et al. Experimental and Theoretical Studies Toward Superior Anti-Corrosive Nanocomposite Coatings of Aminosilane Wrapped Layer-by-Layer Graphene Oxide@MXene/Waterborne Epoxy[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2022, 14(45): 51275-51290.
- [32] TANG X M, WANG H Y, LIU C Y, et al. Direct Growth of Hexagonal Boron Nitride Nanofilms on Stainless Steel for Corrosion Protection[J]. ACS Applied Nano Materials, 2021, 4: 12024-12033.
- [33] ZHAO H R, DING J H, YU H B. Phosphorylated Boron Nitride Nanosheets as Highly Effective Barrier Property Enhancers[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2018, 57(42): 14096-14105.