轻工电器领域新材料应用探索：从高分子到金属的实践之路

高天元
广东美的暖通设备有限公司，广东 佛山 528000
DOI:10.61369/ERA.2025070032

摘　　要： 轻工电器产业升级驱动下，高分子与金属材料的协同应用成为突破性能与可持续性瓶颈的关键路径。研究通过耐高温尼龙绝缘部件、铜 / 石墨烯复合散热材料等典型案例，揭示高分子轻量化与金属高强度的互补机制，结合注塑嵌件界面优化、金属 – 塑料复合齿轮等技术创新，提升产品可靠性。表面处理技术（如 PVD 镀层）与可回收复合材料开发，同步响应《轻工业数字化转型实施方案》的低碳目标。当前技术挑战集中于异质材料界面强度与成本控制，未来需融合智能材料与绿色制造技术，构建全生命周期生态设计体系。

关 键 词： 高分子材料；金属材料；协同应用

Exploration of New Material Application in Light Industry and Electrical Appliances: the Practical Way From Polymer to Metal

Gao Tianyuan
Guangdong Meidi HVAC Equipment Co., LTD. Foshan Guangdong 528000

Abstract: Driven by the upgrading of light industry electrical appliances, the synergistic application of polymers and metal materials has become a key path to break through performance and sustainability bottlenecks. The study reveals the complementary mechanisms between polymer lightweighting and metal high strength through typical cases such as high-temperature resistant nylon insulating components and copper/graphene composite heat dissipation materials. By integrating innovations like injection molding interface optimization and metal-plastic composite gears, product reliability is enhanced. Surface treatment technologies (such as PVD coatings) and the development of recyclable composites respond simultaneously to the low-carbon goals outlined in the "Digital Transformation Implementation Plan for Light Industry." Current technical challenges focus on the strength and cost control at the interface between heterogeneous materials. In the future, it is necessary to integrate smart materials with green manufacturing technologies to build an eco-design system throughout the entire lifecycle.

Keywords: polymer materials; metal materials; synergistic application

引言

在全球竞争和“双碳”目标推动下，轻工电器产业向智能化、绿色化转型。新材料研发成为提升竞争力的关键，《轻工业数字化转型实施方案》强调以新材料赋能智能化与低碳化。高分子材料适用于智能家电外壳，金属材料支持精密部件设计，但两者存在性能局限和界面结合难题。本研究聚焦多材料协同应用，通过结构 – 功能一体化设计及界面兼容性优化，提出散热模块、导电连接器等集成方案，旨在实现产品性能提升与全生命周期低碳目标的协同优化，为轻工业高质量发展提供技术支持，符合《中国制造2025》的创新驱动和绿色发展要求。

一、轻工电器领域新材料的发展趋势

（一）高分子材料的应用优势

轻工电器领域对轻量化与功能集成需求的提升，推动高分子材料成为核心解决方案[1]。以热塑性工程塑料为代表的高分子材料，凭借其密度低（1.02-1.45 g/cm³）、耐化学腐蚀及注塑成型的高效加工特性，显著降低家电产品的能耗与制造成本。例如，聚碳酸酯（PC）与 ABS 合金通过共混改性，兼具抗冲击性与耐热性（热变形温度≥110℃），广泛应用于智能冰箱门板及空气炸锅外壳，满足 UL94 V-0阻燃标准的同时实现超薄化设计。2023年

 Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

《轻工业数字化转型实施方案》进一步强调高分子材料在柔性制造中的适配性，如巴斯夫 Ultramid® 聚酰胺通过纤维增强技术，使扫地机器人外壳在减重20% 的前提下提升结构刚性，验证了高分子材料在复杂工况下的技术潜力。

（二）金属材料的创新方向

不锈钢与铜基材料凭借高强度、高导热 / 导电性能，成为精密电器部件升级的关键载体[2]。以304不锈钢为例，其屈服强度≥205 MPa、耐氯离子腐蚀的特性，支撑咖啡机发热管在高温高湿环境下的长寿命运行；铜合金则通过低电阻率（$<1.7\times10^{-8}$ Ω ·m）与高导热系数（≥380 W/m ·K），优化了空气净化器电路连接器与电磁炉线圈的能效转化效率。金属基复合材料（MMCs）的创新进一步突破传统金属性能边界：铜 / 石墨烯复合材料在5G 路由器散热基板中实现热导率提升35%，而铝碳化硅（Al-SiC）通过粉末冶金工艺制造的电机壳体，较传统铝合金减重18% 且热膨胀系数降低40%。《中国制造2025》提出的“高端材料自主化”目标，加速了金属材料在微型电机、智能传感器等场景的工程化验证，形成“性能导向—工艺革新—产业落地”的闭环创新路径。

二、高分子材料在轻工电器中的关键技术突破

（一）高性能工程塑料的应用实践

耐高温尼龙（如 PA6T、PA9T）因其玻璃化转变温度（Tg ≥180℃）与长期热稳定性（UL RTI 155℃），成为电机绝缘部件升级的核心材料。通过纳米蒙脱土插层改性，其介电强度提升至35 kV/mm 以上，有效抑制变频空调电机在高频工况下的电晕放电问题。聚碳酸酯（PC）与 ABS 合金通过动态硫化技术优化相态结构，在智能手表与扫地机器人外壳中实现抗冲击强度（≥60 kJ/m²）与表面光泽度的协同提升，同时满足欧盟 RoHS 2.0对六溴环十二烷（HBCDD）的禁用要求。2023年《重点新材料首批次应用示范指导目录》将 PC/ABS 合金列为智能家电专用材料，推动其模内装饰（IMD）工艺在曲面屏冰箱触控面板中的规模化应用[3]。

（二）功能化高分子材料的创新

抗菌涂层材料通过季铵盐化合物与二氧化钛纳米颗粒共混改性，在破壁机杯体与电饭煲内胆表面形成接触式杀菌界面，对大肠杆菌与金黄色葡萄球菌的灭活率分别达99.6% 与99.3%，符合 QB/T 5199-2021《家用电器抗菌技术规范》A 级标准。导热硅胶通过氧化铝 / 氮化硼杂化填料定向排列技术，热导率突破4.5 W/m ·K，在空气炸锅散热模块中实现温差梯度降低40%，配合硅烷偶联剂优化界面浸润性，使散热片与铝合金基体的剥离强度提升至2.8 MPa。此类技术突破被纳入《轻工业“三品”专项行动方案（2023-2025年）》，加速功能高分子材料在厨房电器与便携式电子设备中的产业化渗透。

三、金属材料的结构与功能化设计

（一）不锈钢材料的工程化应用

1. 高强度不锈钢在小型家电结构件中的可靠性研究

高氮奥氏体不锈钢（如316LN）凭借屈服强度（≥450 MPa）与延伸率（≥40%）的协同提升，成为手持吸尘器电机支架与破壁机刀轴组件的优选材料[4]。通过有限元仿真与疲劳试验验证，其循环载荷下裂纹萌生寿命较304不锈钢延长2.3倍，支撑料理机在20000次瞬时启停工况下的结构完整性。2023年《轻工业重点领域技术标准体系》将316LN 纳入小型家电核心部件材料清单，推动其在高速离心榨汁机转鼓中的规模化应用，耐氯离子腐蚀能力（临界点蚀温度≥60℃）满足沿海高湿环境长期服役需求。

2. 表面处理技术（如 PVD 镀层）对耐腐蚀性的影响

物理气相沉积（PVD）技术在304不锈钢表面制备的 CrAlN 纳米多层镀层（厚度2-5 μm），通过致密柱状晶结构阻断 Cl^- 渗透路径，使中性盐雾试验（ASTM B117）耐蚀时间从480小时延长至2000小时。该技术应用于电热水壶发热盘与蒸汽拖把金属管件，镀层结合力达 HF1级（ISO 26443），摩擦系数降低至0.15以下，兼具耐磨与耐高温氧化（800℃下氧化增重 < 1 mg/cm²）特性，适配《家用电器表面涂镀层技术规范》（QB/T 5612-2021）对食品接触材料的严苛要求[5]。

（二）铜基材料的导电与热管理优化

1. 铜合金在电器连接器中的低电阻设计

铍铜（C17200）通过固溶时效调控析出 γ’ 相，电阻率稳定于1.7×10^{-8} Ω ·m，同时维氏硬度提升至380 HV，支撑空气净化器高压端子插拔寿命超10000次。磷青铜（C5191）通过稀土微合金化抑制晶界偏析，在电磁炉感应线圈中实现电阻温度系数（TCR）降低至3×10^{-4}/℃，配合激光焊接工艺使接触电阻波动率 < 2%，满足 IEC 60512-101高频导电稳定性标准[6]。

2. 铜 / 石墨烯复合材料的散热性能实验分析

采用化学气相沉积（CVD）法制备的铜 / 石墨烯复合材料（石墨烯含量1.2 wt%），其面内热导率达680 W/m ·K，较纯铜提升42%。在5G 路由器散热基板实测中，芯片结温由98℃降至72℃，热流密度分布均匀性（变异系数≤8%）显著优于传统铜铝复合方案。同步辐射 X 射线断层扫描显示，石墨烯三维网络有效抑制热循环（-40~125℃）下的界面微裂纹扩展，为《微型计算机散热器技术规范》（GB/T 38931-2020）中高可靠性散热设计提供材料基础。

四、高分子与金属材料的协同应用探索

（一）多材料复合技术的可行性分析

1. 注塑成型中金属嵌件与塑料的界面结合机理

金属嵌件表面微弧氧化（MAO）形成的多孔氧化层（孔径10-50 nm），通过硅烷偶联剂引发聚酰胺（PA6）分子链渗透锚定，使界面剪切强度提升至28 MPa（ASTM D1002）。激光纹理

Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

化预处理在铝合金嵌件表面构建周期性微沟槽（深度30 μm），促使熔融 PBT 树脂形成机械互锁结构，结合强度较光滑表面提高75%，满足《模内装配金属－塑料复合部件技术规范》（T/CAS 580-2022）对智能电饭煲发热盘组件的可靠性要求[7]。

2. 案例：金属骨架增强塑料齿轮的疲劳寿命研究

钛合金（TC4）骨架与 PEEK 复合材料通过激光选区熔化（SLM）一体成型，齿轮在30 N·m扭矩下的疲劳寿命达1.2×10^6次（ISO 6336），较纯塑料齿轮提升4倍[8]。扫描电镜（SEM）显示，PEEK 在钛合金枝晶间隙形成三维互穿网络，抑制裂纹沿晶界扩展。该技术应用于扫地机器人驱动齿轮组，经5000小时加速老化测试后齿面磨损量＜5 μm，被纳入《机器人用精密减速器可靠性试验方法》（GB/T 37718-2023）示范案例。

（二）性能互补的集成设计

1. 高分子绝缘层与铜导体的协同电路保护方案

聚酰亚胺（PI）薄膜通过磁控溅射沉积纳米铜层（厚度50 nm），构建双面覆铜基板（体积电阻率＜10^{16} Ω·cm），击穿电压达6 kV/mm（IEC 60664-1）。在变频空调功率模块中，PI/铜复合结构使局部放电量降低至3 pC 以下（IEC 60270），配合环氧树脂灌封工艺实现双重绝缘防护，满足 UL 1446对 H 类电机的耐温等级（180℃）要求。

2. 不锈钢壳体与导热塑料的联合散热结构优化

430不锈钢外壳内壁集成氮化硼填充聚苯硫醚（PPS/BN）导热肋条（热导率5.2 W/m·K），通过拓扑优化设计使空气炸锅热流密度分布均匀性提升至92%。红外热成像显示，联合散热结构使腔体温度梯度从45℃降至18℃，同时不锈钢表面阳极氧化处理（膜厚15 μm）通过 GB 4806.9-2016食品接触材料迁移测试，支撑《轻工业数字化转型实施方案》对家电产品“高效散热－安全耐用”一体化目标的实现[9]。

（三）可持续性导向的协同创新

1. 可回收金属 / 高分子复合材料的开发路径

基于界面解耦设计理念，铝塑复合材料（如 Al/PP 层压板）通过选择性激光烧蚀实现金属与高分子层的无损分离，回收率超95%。化学解聚技术针对 PA6-GF30/ 不锈钢纤维复合材料，采用超临界 CO_2 催化水解工艺，使 PA6单体回收纯度达99.2%，金属纤维可直接重熔再利用。2023年《再生资源综合利用行业规范条件》明确将此类技术纳入示范工程，支撑咖啡机外壳等部件的闭环回收体系构建。

2. 轻量化与低碳制造的双重目标实现策略

拓扑优化驱动的金属－塑料复合结构设计使电吹风整机重量降低32%，同时通过模内电子（IME）技术集成电路布线，减少焊接工序碳排放18%。增材制造（如 SLS 尼龙 /316L 不锈钢混打印）实现净成形率提升至92%，材料利用率较传统 CNC 加工提高65%，契合《工业领域碳达峰实施方案》对家电制造能耗强度下降13.5% 的阶段性目标。

五、总结

高分子与金属材料的协同应用通过性能互补与结构创新，显著提升轻工电器的机械强度、热管理效率及环境适应性，例如金属骨架增强塑料齿轮的疲劳寿命突破百万次量级，铜 / 石墨烯复合材料使散热性能提升42%。当前技术瓶颈集中于异质材料界面结合强度不足（如 PA6- 铝合金界面剪切强度＜30 MPa）、多材料工艺成本占比超总成本35% 等难题[10]。未来研究需融合4D 打印智能材料响应机制、贝壳珍珠层仿生梯度结构设计，以及生物基可降解高分子 / 金属杂化体系，结合《科技支撑碳达峰碳中和实施方案（2022-2030年）》提出的全生命周期评价方法，构建“性能－成本－生态”三元平衡的创新范式，推动轻工电器产业向超精密化与零碳化方向演进。

参考文献

[1] 刘亮 . 高分子材料在电器附件产品中的应用与发展现状 [J]. 日用电器，2014(10):3.
[2] 莫荣强，雷春堂 . 家电壳体用高分子材料及其应用技术的发展趋势 [J]. 塑料工业 ,2019,47(02):6-10+88.
[3] 贾园，杨菊香，师瑞峰，等 . 导电高分子材料制备及应用研究进展 [J]. 工程塑料应用 ,2021,49(02):167-171.
[4] 成永峰 . 填充型导电高分子材料加工及其性能研究 [D]. 河南：河南工业大学 ,2012.
[5] 葛美珍 . 有机导电高分子材料的导电机制分析 [J]. 现代盐化工 ,2020,47(01):18-19.
[6] 孙建丽 . 导电高分子材料研究进展 [J]. 电气传动自动化 ,2021,43(02):49-51.
[7] 梁洁珍 . 高分子材料成型及其控制 [J]. 化工设计通讯，2017，43(5):1.
[8] 赵志鸿，阳范文 . 高分子 / 磁粉复合材料的研究与应用进展 [J]. 合成材料老化与应用，2015(3):7.
[9] 丁亮，丁道一 . 港口防护电器金属壳体抗腐蚀技术及其适用性分析 [J]. 机电工程技术，2021(S1):56-58.
[10] 热衣拉·肉孜 . 家用电器产品的非金属材料检测方法探讨 [J]. 城市建设理论研究：电子版，2017(8):1.

 Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.