

# 导电变温涂料的制备性能研究

吴昊洋，王宁信，刘啸飞，张炳蔚，袁新

(国网山东桓台县供电公司，山东 淄博 256407)

**摘要** 针对导电变温涂料的导电稳定性和温变响应灵敏度难以兼顾的问题，本文从填料网络设计、功能组分协同、工艺参数控制三个方面展开系统的研究。借助创建多尺度填料复合体系、采取界面改性及原位聚合手段，实现导电网络同温变响应单元的精确对接。所制备的涂料具有良好的导电性、快速的温变响应以及良好的环境适应性，有效地解决了复合体系中导电性与热敏性的协同问题，以期为导电变温涂料的性能改进提供技术参考。

**关键词** 导电变温涂料；填料网络；性能协同；温变响应

中图分类号：TQ63；TM24

文献标志码：A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.36.036

## 0 引言

智能变温涂料属于先进功能材料，自适应伪装、精确控温以及状态监测等方面具备明显应用价值，在电力设备温控、电子器件散热等工业场景里需求十分迫切。当前研究的主要难题有三个：单一填料体系导电通路断裂、温变响应迟缓，功能组分相容性不佳致使性能衰退，复杂环境耐候性欠缺影响服役年限。因此，本文以国网山东桓台县供电公司实际应用需求为基础，以导电—温变性能协同失衡问题为出发点，确定“结构设计—组分复合—工艺调控”的三维目标，开发出高导电性、快速响应、耐候性良好的涂料产品，用于电力设备智能温控。

## 1 导电变温涂料的关键特性

### 1.1 导电性能的精确可控

导电变温涂料的导电性能要想达到准确可控的程度，就一定要冲破许多层面的技术障碍，重点是形成既有微观结构稳定又有宏观导电均匀性的复合体系，传统的单一种类导电填料容易因为分散不均匀而导致导电通路出现断裂或者局部过度导电的情况，而新的方案要依靠多尺度的填料协同设计来完成梯度调控的任务。把纳米级别的碳基材料和微米级大小的金属粉按照一定的空间分布方式混合起来，用界面修饰手段改善填料之间接触处的电阻状况，并且借助原位聚合工艺在涂层固化进程中动态调整导电网络密度。这样既要在高填料含量的情况下保证力学性质不会恶化，又要通过实时检测涂层固化期间电阻数值的变化创建出反馈机制，从而保障不同应用场合下的导电门槛能够达到精确匹配的要求。在电子设备散热涂层里就要

达成低电压条件下的小电阻调节效果，而在智能建筑温控涂层中则需要宽广温度范围内导电率呈线性响应的效果，这种差异化的规定给导电体系的设计带来了动态适配上的困难，这就必须采用分子模拟与试验验证相结合的方式来攻破这个难题。

### 1.2 温变响应的高效灵敏

导电变温涂料精准温控的关键在于良好的温变响应特性，技术难点包括缩短信号传递距离、加快动态响应速率、保证宽温度区间稳定工作。传统温敏涂层多以单一相变材料或高分子聚合物为核心成分，易导致响应延迟、限制适用范围<sup>[1]</sup>。近年研究重点转向建立功能协同效应体系，结合高效热传导纳米载体与温度敏感型导电填料实现即刻调控。实际制作时，需精确定设定涂层微观结构（如增加多孔/层状架构提高传质效率），优化基底附着性能，降低内热阻，这些会影响整体反应速度。温变响应灵敏度易受外界环境影响，湿度和气压变化会改变涂层内部结构，影响温变性能。为提高涂层对外界干扰的适应能力，保证其在复杂工况下稳定，可通过表面改性或添加功能添加剂增强材料抗扰动能力，使涂层具备良好温度感知精度和快速反应速度，满足航空航天、精密电子等领域对高可靠性温控系统的需求。

### 1.3 环境耐受的持久稳定

环境耐受的持久稳定是导电变温涂料长期服役的关键，技术难点是在复杂环境下保持涂层导电性能、温变响应特性和物理结构完整。在实际使用中，涂层要承受高温高湿、化学腐蚀、紫外老化、机械磨损等考验，如海洋环境的盐雾会氧化腐蚀导电填料、破坏

导电网络，紫外线照射会使高分子基体降解、导致涂层开裂脱落。针对这些问题，需从材料和涂层结构两方面改进处理方法<sup>[2]</sup>。一方面，对导电颗粒实施包覆保护，如用耐蚀陶瓷或高分子层包裹金属成分，使其与外界隔离；另一方面，在基础配方中加入抗老化添加剂，如抗紫外剂、抗氧化剂、交联剂等，提高力学强度。涂层制备工艺改良很关键，可采用多层次复合涂覆形成梯度防护体系，底层提升与基材结合强度，中间层承担功能特性任务，表层改善抗外界干扰能力，既能抵御外界腐蚀，又能解决单层涂层功能难以兼顾的问题。此外，应创建环境老化评价平台，在不同工况下考察材料长时间稳定性，通过失效形式分析完善配方和制作流程，确保材料在服役期可靠发挥性能。

#### 1.4 涂层体系的协同兼容

涂层体系的协同兼容性要求导电变温涂料在发挥主要作用的同时，还要同基材以及其他功能性涂层维持较好的配合关系，技术难题是兼顾多种性能指标并处理好各种组分之间的相容状况，避免各个功能模块互相干扰，传统设计手段往往过分强调某一方面特性而轻视整个系统的协调情况，比如高导电填料可能会削弱涂层对基底表面的粘附力，或者引发感温材料与导电成分发生化学反应进而影响到稳定性。在挑选原料的时候就要全面考量各类物质的化学亲和程度以及物理契合度，并且优先采用热膨胀系数接近于基质本身的聚合物作为承载载体，这样做的好处是可以减小温度波动时内部所产生的应力；而且还可以借助界面工程去改善相邻层间的结合状态，在那些需要传导电流的地方和感应温度变化的部分之间加入一种过渡介质，使得各项能力能够平缓地过渡并且加强彼此间联系<sup>[3]</sup>。在工程应用过程中，涂层系统要同诸多施工工艺相互协作（如喷涂、刮涂以及浸涂等），才能使复杂的基材表面形成均匀且密实的保护层并维持性能稳定，而且还要考虑与其它构件共同组合的效果，在智能电网装置这个范畴中显得更为关键，需要保证导电层面拥有符合电力属性特性的阻抗性质，并完成对温度改变时反应与温控模块发出讯号交互上的精确同步任务，以免因为界面上不相融而造成失效或者停摆现象出现的情况发生。

### 2 导电变温涂料的制备性能研究

#### 2.1 填料网络的优化

填料网络的优化是提升导电变温涂料核心性能的关键环节，其技术难点在于构建高导电性与稳定温变

响应的三维网络结构的同时，还要避免因填料团聚导致涂层性能不均。传统填料网络设计多采用单一尺度或单种类填料，容易出现导电通路不连续或者温变信号传导受阻的情况，创新方向需要向多尺度、多类型填料协同组网的设计转变，比如将纳米级导电颗粒和微米级温变功能颗粒按照一定比例复合，并利用界面改性技术在颗粒表面生成亲和性基团，促使不同填料之间实现均匀分散并紧密结合，从而形成“导电—温变”双功能协同作用的网络结构。在实际优化过程中要处理好填料添加量同涂层力学性质之间的矛盾关系问题，过多填充物会使得涂层变得脆弱，而添加量不够又难以形成完整的网络结构，所以必须借助动态光散射来监控填料分散状况，并且结合流变学分析控制涂料体系黏度水平，以保证填料能在基体内部形成连续而又均匀分布的状态<sup>[4]</sup>。

此外，还要着重关注填料网络的动态适应状况，在温度波动情况下，必须保证其结构能够随着填料体积变动而作小幅度调整，以免由于热胀冷缩差异造成整体失效的现象，借助分子动力学模拟来分析填料间的相互影响机制，并且规划带有弹性的匹配联系方案，以此达成导电性能和温变反应稳定状态之间长期协调改善的目标。

#### 2.2 功能组分的复合

功能组分的复合是导电变温涂料实现多功能集成的关键步骤，其技术难点在于如何处理不同功能组分之间的相容性问题，避免发生物理或化学作用导致性能下降。

传统的方式大多采用简单的机械混合方式，容易出现组分分层、界面结合不良等状况，创新需要从分子层面和界面调控两方面入手，比如在进行导电组分与温变组分的复合时，可以借助接枝共聚的技术，在导电填料表面添加能够与温变高分子相兼容的链段来提升两者间的界面结合强度，并且运用超分子组装的方法使各种不同的功能组分按照预定结构整齐排列起来，从而形成一种“导电通道—温变响应区”清晰分开却又彼此协同工作的复合系统。

在复合过程中，要精确把控各组分的比例及其分散状况，温变组分过多时会把导电填料包裹起来从而堵住导电通路，而如果导电组分太多就会削减温变响应的灵敏程度，所以要用原位表征手段来即时观测复合进程中各种成分的分布情况和相互作用情形，并

且不断调节复合工艺参数，而且功能组分的复合还要顾及涂层本身的加工性能问题，比如复合体系所含有的黏度需符合后续涂覆工艺的要求，不同组分之间的反应活性也应当处在合理区间内以防止提前发生固化现象。在这种情况下，需要从选择功能组分开始便展开一系列兼容性方面的考量工作，按照工艺需求规划分子结构并设计出对应的复合路径组合方案。

### 2.3 制备工艺的精准调控

制备工艺的精准掌控是保证导电变温涂料性能稳定的关键因素，其技术难点在于把材料设计参数转变成可操作的具体工序，并且要化解多步骤流程中参数波动给最终品质带来的影响。传统办法常常依靠经验来设置有关参数，这很容易造成涂层厚度不均、填料分布失衡以及固化过程欠佳等情况；以后的研究应该致力于创建“参数—结构—性能”协同调控体系。在分散环节可以改变搅拌转速，挑选合适的分散剂并改良超声处理时长，从而达成在目标粒径范围内的均匀悬浮或者预设团聚状况，而且凭借在线粒度检测系统随时观察分散情况进而动态调整工艺条件；到了涂覆阶段就得采用高精度喷涂设备搭配红外温度监控装置，严密把控涂层厚度和施加速率，防止因为局部厚薄不同而引发的导电特性和热响应一致性的下降现象出现。而在交联固化工序当中，则必须经过分段升温曲线和环境湿度精确管控，使得基体聚合反应与填充网络形成同步开展，杜绝过快加热所致使的机械损害或者裂缝瑕疵发生。制备工艺设计时，要全面考虑规模化生产是否可行，把实验室里精细的工艺变成工业上可以复制的过程的时候，主要解决各个工艺环节之间协同稳定的问题，还要采用智能传感和自动化控制技术来实现参数随时监测并准确调整，这样就能保证产品质量一致，填补从研发成果到工业应用之间的技术缺口。

### 2.4 性能协同的提升

性能协同的提升是导电变温涂料制备研究的最终目标，其技术挑战在于打破单一性能优化对其他性能的制约，实现导电、温变、力学、耐候等多性能的同步提升。传统研究常聚焦某一性能改进，如为提升导电性增加填料含量却导致涂层韧性下降，或为增强耐候性添加防护组分却削弱温变响应。创新思路需建立多性能协同优化的设计框架。例如：在配方设计中，引入兼具增韧与相容功能的改性助剂，在提升涂层力学性能的同时改善功能组分相容性；在结构设计中，

构建梯度功能涂层，底层强化基材附着力与力学支撑，中层优化导电—温变协同性能，表层提升耐候防护能力，通过层间界面设计实现各层性能的互补与协同。在性能协同提升过程中，需建立多维度性能评价体系，不仅要关注单一性能指标，更要分析性能间的耦合关系，如通过动态力学分析研究温度变化下涂层力学性能与导电性能的关联，利用加速老化测试评估耐候性对导电、温变性能长期稳定性的影响。

此外，性能协同还需结合应用场景需求进行针对性优化，如面向汽车电子的涂层需重点协同导电性与耐高低温性能，面向建筑外墙的涂层则需强化温变响应与耐紫外线、耐污染性能的协同，这就要求在研发过程中以应用需求为导向，通过多变量优化算法筛选最佳配方与工艺参数，实现导电变温涂料综合性能的系统性提升<sup>[5]</sup>。

## 3 结束语

本研究通过系统优化填料网络，依靠多组分体系构建和精确调控技术，研制出一种导电变温涂料，这种材料拥有较好的性能表现，导电特性同温度响应结合紧密，而且具有较强的环境适应能力和基材兼容性。从实验数据来看，该种物质确实有效地解决了复合体系中导电性和热敏性的协同问题，在智能涂层领域有着重要的理论意义和应用潜力，并为相关科技的发展提供了有力的技术支撑。

## 参考文献：

- [1] 周海军.基于导电聚合物/金银核壳纳米棒复合纳米结构构建变温、变色器件及其性能研究[D].泉州:华侨大学,2023.
- [2] 方也.新型中高压半导体屏蔽料的制备与性能研究[D].北京:北京化工大学,2012.
- [3] 白会娟.导电材料结构电磁热弹性多场行为的理论研究[D].兰州:兰州大学,2010.
- [4] 王琴,武克忠,李建玲,等.导电高分子聚苯胺热寿命及变温红外光谱的测定[A].中国化学会第十三届全国化学热力学和热分析学术会议论文摘要集[C].中国化学会,河南师范大学,中国化学会,2006.
- [5] 武克忠,王新东,邓庚凤,等.导电高分子聚苯胺热寿命及变温红外光谱的测定[J].北京科技大学学报,2005(05):593-595.