

# 导热 PVC 复合材料研究进展

王星星

广州汇天飞行汽车制造有限公司广州分公司 广东 广州 510000

**摘要:** 导热 PVC 复合材料在电子电器等领域应用前景广阔, 本文首先阐述了导热机理, 涉及声子传导和电子传导理论及不同填充体系情况。接着分析了影响导热性能的因素, 包括填充剂种类、含量、粒径与形貌、界面结合情况、PVC 基体特性。然后介绍了制备方法, 有熔融共混法、溶液共混法、原位聚合方法及其他特殊方法, 如溶胶—凝胶法、静电纺丝法等, 指出各方法优势与不足, 为导热 PVC 复合材料研究与应用提供参考。

**关键词:** 导热 PVC 复合材料; 导热机理; 制备方法

**引言:** 在电子电器等众多领域持续发展的当下, 对材料导热性能的要求日益严苛, 导热 PVC 复合材料凭借自身独特优势展现出广阔的应用前景。本文聚焦导热 PVC 复合材料, 深入剖析其导热机理, 全面探讨影响导热性能的各类因素, 包括填充剂相关特性、界面结合情况以及 PVC 基体特性等, 同时对多种制备方法展开研究, 旨在为该材料的研究与应用提供系统且全面的参考。

## 1 导热 PVC 复合材料的导热机理

声子传导理论中, 声子是固体晶格振动量子化表示, 是热传导主要载体, 材料导热性能取决于声子平均自由程和传播速度, 声子传播遇晶格缺陷等散射会限制平均自由程、降低导热性能, PVC 复合材料中基体与填充剂界面、填充剂分散状态影响声子散射进而影响导热。电子传导理论针对导电材料, 电子运动携带热能传递, 导热 PVC 复合材料中若填充剂为导电材料如金属粉末、碳纳米管, 电子可在填充剂内部及与基体间传导提升导热性能, 但 PVC 绝缘使电子在基体传导受限, 贡献取决于填充剂导电性和分散情况<sup>[1]</sup>。不同填充体系下, 金属填充体系因金属有高导热系数和导电性, 填充后金属颗粒间及与基体形成导热网络, 电子和声子传导提升导热性能, 但会增加密度、成本且影响绝缘性; 碳材料填充体系中石墨、碳纳米管、石墨烯等具有优异导热性能和独特结构, 填充后形成导热通道, 声子和电子传导显著提高导热性能, 还能改善综合性能; 陶瓷填充体系如氧化铝等具有高导热系数和良好绝缘性, 填充后陶瓷颗粒分散形成导热通路, 声子传导提升导热性能, 适用于对绝缘要求高的电子电器领域。

## 2 影响导热 PVC 复合材料导热性能的因素

### 2.1 填充剂种类

金属填充剂包含铜、铝等, 这类材料具备较高导热系数, 将其填充到 PVC 中, 能显著提升复合材料导热性能。金属填充剂存在明显弊端, 会增加复合材料密度, 导致材料整体重量上升, 同时还会使成本升高, 不利于成本控制。碳材料填充剂有石墨、碳纳米管等, 它们不仅具有优异导热性能, 还拥有独特结构。这种独特结构使得碳材料填充剂在填充时, 能在较低填充量的情况下, 实现复合材料导热性能较大幅度提升, 有效提高填充效率, 减少材料使用量。陶瓷填充剂如氧化铝、氮化硼等, 具有良好的绝缘性能, 同时具备较高导热系数。在一些对绝缘性能要求较高的场合, 陶瓷填充剂能发挥重要作用, 在保证复合材料绝缘效果的提升其导热性能, 满足特定使用需求。鉴于不同填充剂对导热 PVC 复合材料导热性能有着不同影响, 且各有优缺点, 所以在制备导热 PVC 复合材料时, 必须综合考虑材料的使用场景、性能要求、成本等多方面因素, 选择合适的填充剂种类, 这是提高导热 PVC 复合材料导热性能、保证材料质量的关键所在。

### 2.2 填充剂含量

填充剂含量是影响导热 PVC 复合材料导热性能的关键因素之一。通常情况下, 伴随填充剂含量上升, 复合材料导热性能会逐步提高。原因在于填充剂含量增多, 填充剂颗粒间接触机会增加, 进而形成更多导热通路。这些导热通路为声子和电子的传导提供了便利, 使它们在材料内部传递热量的效率得以提升, 最终让复合材料整体导热性能增强。填充剂含量并非越高越好, 当填充剂含量达到特定程度后, 继续增加其含量, 对导热性能的提升作用会逐渐变弱。甚至在含量过高时, 会出现导

热性能下降的状况<sup>[2]</sup>。这是由于过高填充剂含量会使填充剂在 PVC 基体中难以均匀分散,容易产生团聚现象。团聚的填充剂颗粒会破坏原本形成的导热通路,还会增加声子和电子在传导过程中的散射。声子和电子在传播时,因频繁与团聚体发生碰撞,其传播方向和速度受到干扰,导致热量传递受阻,进而降低了复合材料的导热性能。所以,在制备导热 PVC 复合材料时,要精准控制填充剂含量,找到能使复合材料导热性能达到最佳的含量值,避免因含量不当而影响材料性能,以此确保导热 PVC 复合材料能满足不同应用场景的需求。

### 2.3 填充剂粒径与形貌

填充剂的粒径与形貌对导热 PVC 复合材料导热性能起着关键作用。从粒径方面看,较小粒径的填充剂优势明显。其能增大与 PVC 基体的接触面积,使两者间的界面结合更为紧密,界面结合强度得以提升。紧密的界面结合有利于声子和电子的传导,减少它们在界面处的散射,让热量能够更顺畅地在材料内部传递。而且,小粒径填充剂在 PVC 基体中分散性更好,能更均匀地分布其中,进而形成更为完善的导热网络。这个完善网络就像一条条畅通无阻的“热量通道”,使声子和电子能够高效地在材料中传导,最终提高复合材料的导热性能。不同形貌的填充剂对导热性能的影响差异较大。一些具有特殊形貌的填充剂,如具备高长径比的填充剂,在 PVC 基体中能发挥出独特作用。高长径比的填充剂在材料中可以相互搭接、交错,形成更多有效的导热通道。这些通道为声子和电子的传导提供了更多路径,使它们在材料内部的传导更加高效,从而显著提升复合材料的导热性能。所以,在制备导热 PVC 复合材料时,要综合考虑填充剂的粒径和形貌,选择合适的填充剂,以优化复合材料的导热性能,满足不同应用场景对材料导热性能的要求。

### 2.4 界面结合情况

良好界面结合可减少声子与电子在界面处散射,提升二者传导效率,进而增强复合材料导热性能。填充剂与 PVC 基体间若存在较大界面差异,声子和电子在跨越界面时会因不匹配而频繁散射,导致传导受阻,降低导热性能。为提高界面结合强度,可对填充剂进行表面改性处理,用偶联剂修饰填充剂表面,增加其与 PVC 基体相容性<sup>[3]</sup>。偶联剂分子一端与填充剂表面化学键结合,另一端与 PVC 基体分子链缠绕,增强界面相互作用。优化加工工艺可改善界面结合情况,合适混炼工艺能使填充剂在 PVC 基体中初步均匀分散,再通过控制加工温度,在高温下 PVC 分子链运动加剧,进一步促进填充剂

分散,使其与基体充分接触,形成紧密界面层,减少界面缺陷,降低声子和电子散射概率,提高复合材料导热性能。

### 2.5 PVC 基体特性

分子量方面,较高分子量 PVC 粘度大、力学性能好,但在制备复合材料时,高粘度会阻碍填充剂在 PVC 基体中的分散,填充剂若不能均匀分散,会在局部形成团聚,破坏复合材料内部导热通路连续性,影响声子和电子传导,降低导热性能。结晶度方面,结晶度高时 PVC 分子链排列规整,声子传播时受散射小,能更顺畅传递热量,有利于提高复合材料导热性能。但 PVC 本质是非晶态高分子材料,结晶度低,分子链排列无序,声子传播易受阻,自身导热性能不佳。所以为提高导热 PVC 复合材料导热性能,在考虑 PVC 基体特性基础上,需采取其他措施。比如针对分子量影响填充剂分散问题,可优化加工工艺,控制混炼速度和时间,让填充剂更好分散;对于结晶度低问题,可添加成核剂促进 PVC 结晶,或与其他高导热材料复合,构建更有效导热网络,提升复合材料整体导热性能。

## 3 导热 PVC 复合材料的制备方法

### 3.1 熔融共混法

其过程为将 PVC 树脂与填充剂置于高温环境,利用混炼设备进行混合操作,让填充剂均匀分散于 PVC 基体之中,之后借助挤出、注塑等加工手段,制成导热 PVC 复合材料制品。该方法优势突出,操作相对简便,从原料投入到初步混合,流程不复杂,易于掌握;生产效率颇高,能在较短时间内完成大量原料的混合与加工,适合大规模连续生产,可满足市场对导热 PVC 复合材料的大量需求,所以成为目前制备该材料最常用的方法之一。在熔融共混过程中,需精准控制多项参数。混炼温度要适宜,温度过低, PVC 树脂无法充分熔融,流动性差,填充剂难以均匀分散;温度过高, PVC 可能发生降解。混炼时间和混炼设备转速也需合理把控,时间过短或转速过低,填充剂分散不充分;时间过长或转速过高,不仅浪费能源,还可能因过度剪切导致材料性能下降。只有控制好这些参数,才能确保填充剂均匀分散,形成良好导热网络。

### 3.2 溶液共混法

溶液共混法是制备导热 PVC 复合材料的一种途径。操作时,先把 PVC 树脂溶解于合适的溶剂中,待其形成均匀溶液后,加入填充剂,再借助搅拌、超声等手段,让填充剂在 PVC 溶液中均匀分散开来。之后通过蒸发溶

剂,使溶剂逐渐挥发,PVC与填充剂紧密结合;或者采用沉淀方法,改变溶液环境让复合材料沉淀析出,从而得到导热PVC复合材料。此方法能达成填充剂的均匀分散,对于那些在熔融状态下因自身特性,像高熔点、易团聚等,难以均匀分散于PVC基体中的填充剂,溶液共混法可使其在溶液中充分舒展并均匀分布,利于构建良好导热网络<sup>[4]</sup>。溶液共混法存在明显弊端,它需要使用大量有机溶剂,这些溶剂大多具有挥发性和毒性,会污染环境,危害操作人员健康。而且,溶剂回收和处理需复杂设备和工艺,成本较高。大规模使用溶剂存在安全隐患,如易燃易爆等,这些因素共同限制了溶液共混法在导热PVC复合材料大规模生产中的应用。

### 3.3 原位聚合法

原位聚合法用于制备导热PVC复合材料,具体是将填充剂先分散到氯乙烯单体中,再借助引发剂引发聚合反应。在此反应进程中,PVC会在填充剂表面逐步生长,最终达成填充剂在PVC基体中的均匀分散状态。这种方法有不少优势,因PVC直接在填充剂表面生成,二者结合紧密,能极大增强填充剂与PVC基体间的界面结合强度。这种强界面结合可降低声子和电子在界面处的散射概率,提升它们的传导效率,进而提高复合材料的导热性能;在受力时,紧密的界面能更好地传递应力,增强复合材料的力学性能。原位聚合法存在明显不足,其反应条件较为苛刻,反应温度、反应时间、引发剂用量等参数都得严格把控。温度、时间、用量稍有偏差,就可能影响聚合反应效果和产物质量。而且,聚合反应过程中还可能产生副产物,这些副产物会残留在复合材料中,破坏其内部结构,影响导热和力学等性能,限制了该方法的大规模应用。

### 3.4 其他特殊方法

除常见制备方法外,还有溶胶—凝胶法、静电纺丝法等特殊方法可制备导热PVC复合材料。溶胶—凝胶法先把金属醇盐或其他有机金属化合物置于溶剂中,使其发生水解、缩合反应形成溶胶,接着将填充剂加入溶胶,经凝胶化让溶胶转变为凝胶,再经干燥去除水分和

溶剂,最后通过热处理使材料性能稳定,从而得到导热PVC复合材料。静电纺丝法是将PVC溶解形成溶液,在高压电场作用下,溶液被拉伸成丝,同时把填充剂加入纺丝液,制备出含填充剂的PVC纳米纤维,再对纳米纤维进行热压等处理,使纤维间紧密结合,得到导热PVC复合材料<sup>[5]</sup>。这些特殊方法能制备出结构和性能独特的导热PVC复合材料,溶胶—凝胶法可使填充剂在基体中达到纳米级分散,静电纺丝法可制备出具有高长径比纳米纤维的复合材料,有利于提升导热性能。但目前这些方法多处于研究阶段,在工艺稳定性、成本控制、大规模生产效率等方面存在不足,距离大规模应用还有一定距离。

### 结束语

综上所述,导热PVC复合材料研究涵盖导热机理、影响因素及制备方法等多方面。深入理解导热机理,精准把握填充剂种类、含量、粒径与形貌、界面结合及PVC基体特性对导热性能的影响,合理运用熔融共混、溶液共混、原位聚合及其他特殊制备方法,能有效提升导热PVC复合材料性能。随着电子电器等领域发展,对其性能要求不断提高,未来需持续探索创新,以制备出性能更优、成本更低、更环保的导热PVC复合材料。

### 参考文献

- [1] 叶丽军,洪佳晖,杨利平,王亚权,等. 聚合物导热复合材料三维网络构筑及性能研究进展[J]. 复合材料学报,2025,42(10):5445-5469.
- [2] 赵新宇,詹学贵,沃雪亮,陈京,等. 高导热硅橡胶复合材料研究进展[J]. 有机硅材料,2025,39(3):52-56.
- [3] 孟征,卫豪,刘继丹,杨亚光. 导热尼龙复合材料的制备研究进展[J]. 工程塑料应用,2025,53(6):170-177.
- [4] 李子豪,王健龙,刘文龙,陈鹏旭. 综述PVC复合材料的应用及研究进展[J]. 天津化工,2025,39(4):13-16.
- [5] 许一昊,许平凡,章培昆,罗耀发. 三维网络氮化硼/聚合物导热复合材料的研究进展[J]. 复合材料学报,2025,42(10):5588-5603.