

# 合成脂类导热材料的热传导特性分析

## ——基于数据中心液冷系统

白瑞晨 林子杰

兰洋(宁波)科技有限公司 浙江宁波 315100

**摘要:** 在数字化信息飞速发展的当下,数据中心是信息存储、处理与传输的核心枢纽,其规模和运算能力持续攀升。液冷系统具有高效的散热能力,逐渐成为数据中心散热解决方案的主流趋势。合成脂类导热材料是液冷系统中的关键传热介质,它有良好的热稳定性、化学稳定性、低粘度以及与多种材料的优异兼容性等特性,因此在液冷系统中应用广泛。本文深入剖析这种材料在数据中心液冷系统中的热传导特性,研究显示合成脂类导热材料热传导特性受多种因素综合作用,优化其性能对提升数据中心液冷系统散热效率意义重大,能为数据中心高效稳定运行提供有力支撑。

**关键词:** 数据中心;液冷系统;合成脂类导热材料;热传导特性

### 前言

在数字化快速发展的背景下,数据中心作为信息存储、处理与传输的核心枢纽,正面临数据量爆发式增长带来的挑战。由于计算需求和存储容量要求都极高,设备功率密度被大幅提升,这让数据中心陷入严重的散热困境。传统散热方式很难满足当前需求,液冷系统应运而生,成为解决高热密度数据中心散热问题的关键技术<sup>[1]</sup>。合成脂类材料是性能优良的导热介质,在数据中心液冷系统中应用前景十分广阔。合成脂类导热材料的热传导特性会受到多种因素的综合影响,所以研究这些因素对热传导特性的影响规律能够优化合成脂类导热材料的性能,以此提升数据中心液冷系统的散热效率。

### 一、数据中心液冷系统概述

数据中心是全球协作的特定设备网络,其功能是在因特网络基础设施上传递、加速、展示、计算并存储数据信息。数据中心中的大部分电子元件都依靠低直流电

源来驱动运行<sup>[2]</sup>。液冷系统是数据中心散热的核心技术,它的关键部件包括冷却液循环回路、冷板、热交换器和泵等。在泵的驱动作用下,冷却液会在循环回路中持续流动,当冷却液流到冷板时就会和安装在冷板上的发热元件形成紧密接触,接着通过热传导把热量从发热元件转移到冷却液当中。进入热交换器之后,高温冷却液会与外部冷却介质开展热量交换,将自身携带的热量传递给外部冷却介质,借此实现温度的降低。

数据中心液冷系统的技术存在不少优势,其一能够高效处理大功率密度IT设备的散热问题,冷板式单机柜功率密度处于30kW-100kW,浸没/喷淋式则能达到200kW以上;其二可以充分运用自然冷源,节能方面成效明显,冷板式PUE<1.2,浸没/喷淋式PUE<1.15;其三能够减少甚至不用散热风扇,让机房实现低噪声运行;其四能降低机房在环境方面的要求,像装修标准、正压控制等内容;其五散热水温较高,便于余热的回收再利用。

### 二、合成脂类材料的分子结构与热传导之间的关系

合成脂类材料属于有机化合物,由脂肪酸与醇经酯化反应形成,分子结构中有酯基(-COO-),还有不同结构的脂肪酸链和醇基<sup>[3]</sup>。通常较长的脂肪酸链可提供更多分子间相互作用位点,让分子间范德华力变强,这有助于热量在分子间传递,进而提升材料的热导率。另外不饱和脂肪酸链存在碳-碳双键,这些双键会让分子链结构变刚性,对分子链自由旋转和紧密堆积产生阻碍。相比之下饱和脂肪酸链结构更柔顺,分子间能排列得更紧密,这对热量传导有很大的帮助。在热传导过程中,

**基金项目:** 2024年宁波市高新区重点科技项目:国产芯片服务器新型液冷复合热管理材料研发及应用示范:2024CX050001

### 作者简介:

白瑞晨(1987.1.5-),男,蒙古族,辽宁省沈阳市人,日本熊本大学博士研究生,研究方向:先进机械系统;  
林子杰(1984.11.5-),男,满族,吉林省吉林市人,日本熊本大学博士研究生,研究方向:热工学和能源转化领域。

材料一端受热时，分子会获得能量，振动随之加剧。就合成脂类材料而言，热量先通过分子内原子间的振动来传递，之后依靠分子间的范德华力、氢键等相互作用把振动能量传到相邻分子，以此实现热量在材料中的传导。

### 三、数据中心液冷系统中合成脂类导热材料热传导特性实验研究

#### (一) 实验目的

本实验旨在剖析数据中心液冷系统中合成脂类导热材料的热传导特性，研究温度、压力以及材料微观结构等因素对热传导性能产生的影响规律，以此为优化合成脂类导热材料在液冷系统中的应用提供实验方面的依据。

#### (二) 实验方案设计

##### 1. 样品选择

实验选取多种具有代表性的合成脂类材料作为研究对象，这些材料包含不同脂肪酸链长度、饱和度及分支结构的合成脂，目的是全面考察分子结构对热传导特性产生的影响。

##### 2. 变量控制

实验过程中，温度、压力等实验条件都需要得到严格控制，同时设置20℃、40℃、60℃、80℃等多个温度梯度与0.1MPa、0.3MPa、0.5MPa等压力梯度，借此研究不同温度和压力下合成脂类导热材料的热传导特性变化。

##### 3. 测量参数

实验研究的主要测量参数是合成脂类材料的热导率，测量时采用稳态热流法并且通过显微镜等设备观察材料在不同条件下的微观结构变化，以此分析微观结构与热传导特性之间存在的关联。

#### (三) 实验步骤

##### 1. 样品制备

依据实验设计，精确称取定量脂肪酸与醇，把它们放进配有搅拌器、温度计及回流冷凝管的三口烧瓶。在氮气保护环境中添加适量对甲苯磺酸催化剂，慢慢将温度升到反应所需范围（通常是150–200℃），同时保持搅拌状态让反应持续数小时。反应完成后，把产物冷却到室温，借助减压蒸馏、水洗和干燥等后处理方式获取纯净的合成脂类样品，再将制备好的样品加工成尺寸规格相同的测试试样，用在后续的热导率测量与微观结构分析中。

##### 2. 热导率测量

采用稳态热流法热导率测量仪测定合成脂类样品的热导率，具体操作是把样品放到测量仪的测试平台上，让样品和加热板、冷却板紧密接触，借此减小接触热阻。在设定好的温度条件中，加热板会向样品传递稳定热流，系统达成稳态后就要测定通过样品的热流量、样品的温

度差以及样品的几何尺寸等参数，再依据傅里叶热传导定律算出样品的热导率，其表达式为 $Q = -\lambda A \frac{dT}{dX}$ ，这里 $Q$ 代表热流量， $\lambda$ 代表热导率， $A$ 代表样品横截面积， $\frac{dT}{dX}$ 代表温度梯度。每个温度点时，每个样品都要经过多次重复测量，最终以平均值作为该样品在这一温度下的热导率。

##### 3. 不同压力条件下的实验

实验研究对热导率测量装置做了改装，让它能施加不同压力，工作人员将样品放进可施加压力的测试模具中，然后在0.1MPa、0.3MPa、0.5MPa等不同压力条件下，依照上述热导率测量方法来测量合成脂类样品在不同压力下的热导率。经由分析不同压力下热导率的变化，以此研究压力对合成脂类导热材料热传导特性产生的影响。

##### 4. 微观结构观察与分析

实验研究借助扫描电子显微镜（SEM）与透射电子显微镜（TEM），针对合成脂类样品在不同实验条件下的微观结构展开观察。先对样品实施切片、镀膜等恰当处理，再把它们放进显微镜中，观察其微观形貌、分子排列状况以及可能存在的微观缺陷等，之后分析微观结构图像，同时结合热导率测量数据，以此探讨微观结构与热传导特性之间的内在联系。

#### (四) 实验结果与分析

##### 1. 温度对热传导特性的影响

实验结果显示，温度上升过程中合成脂类导热材料的热导率会有不一样的改变情况。多数合成脂类材料的热导率会随温度上升出现小幅度增长，这是因为温度上升使得分子热运动更剧烈，分子间碰撞次数变多，以此对热量传递起到促进作用<sup>[4]</sup>。温度上升到特定水平之后，部分合成脂类材料的热导率却会呈现下降态势，这是因为高温让分子链热运动过于强烈，分子间的有序排列遭到破坏，分子间相互作用变弱，热量传导因此受到阻碍。比如某一种长链饱和脂肪酸酯在20℃–60℃温度区间内，热导率从0.25W/(m·K)逐步增长到0.28W/(m·K)，温度进一步升高到80℃时，其热导率则下降到0.26W/(m·K)。

##### 2. 压力对热传导特性的影响

压力对合成脂类导热材料的热导率有着影响，在一定压力范围内，随着压力不断增大，热导率会呈现出上升的趋势。这是因为压力增加致使分子间距离减小，分子间相互作用提高，有利于热量在分子间进行传递。当压力超过一定数值后，热导率的增长趋势逐渐变缓甚至出现下降情况。而这是由于过高压力可能使分子链发生

变形或者破坏,影响分子间的有序排列,对热传导产生不利作用。实验数据说明对于一种含有分支结构的脂肪酸酯,在0.1MPa压力下热导率为 $0.22\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ,当压力增加到0.3MPa时,热导率上升至 $0.25\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ,但当压力增加到0.5MPa时,热导率仅稍微上升至 $0.26\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。

### 3. 微观结构对热传导特性的影响

通过微观结构观察能够发现合成脂类材料的微观结构同热传导特性存在密切关联。在微观层面上,分子链的排列方式、晶体结构以及微观缺陷等因素都会对热传导性能产生影响。分子链排列规整且晶体结构良好的合成脂类材料,热导率相对更高,这源于规整结构有助于热量借助分子间的振动和相互作用实现高效传递<sup>[5]</sup>。与之不同的是存在较多空洞、杂质等微观缺陷的材料,热导率会出现明显下降,这类微观缺陷会对声子形成散射,进而阻碍热量的传导。比如SEM图像显示,某类经优化合成工艺处理的合成脂类材料,分子链排列紧密且有序,热导率达到 $0.30\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ,另一种存在较多微观空洞的材料,热导率则仅为 $0.20\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。

## 四、合成脂类导热材料在数据中心液冷系统中的热传导性能优化策略

### (一) 选用高导热系数的合成脂类基础材料

合成脂类材料自身的导热系数对于液冷系统的热传导性能有着重要影响。相关数据表明其比热容处于 $1.8\text{--}2.1\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ,导热系数则在 $0.14\text{--}0.17\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ,这一数值相较于导热系数为 $0.12\text{--}0.15\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 的矿物油等而言存在一定优势。基于这一点,在挑选合成脂类基础材料的过程中,人们可以对比不同类型合成脂类材料在不同温度条件下的导热系数,着重选用那些在数据中心运行温度区间(通常为 $20\text{--}40\text{℃}$ )内导热系数较高且保持稳定的材料。比如长链饱和脂肪酸与直链醇合成的脂类,其分子结构对热量传递十分有利,一般具有相对较高的热导率。所以在实际应用中,这类高导热系数的合成脂类材料可以作为基础材料优先使用。

### (二) 优化流道结构设计

合理的流道结构设计能够显著改善合成脂类导热材料在液冷系统中的流动特性和热交换效率,以此提升热传导性能。在设计流道时就应充分考虑冷却液的流速、流量分布以及与发热元件的接触面积等因素,像微通道、叉指型这类特殊流道结构就很适用,它们能增加冷却液与发热元件的接触面积,提高热交换效率。另外流道的布局和形状也应优化,这样可以减少流动阻力,保证冷却液能够均匀、顺畅地流经各个发热区域,防止局部过热现象出现。所以将数值模拟和实验验证结合起来,对

不同流道结构展开优化设计就可以让合成脂类导热材料在液冷系统中的热传导性能达到最大。

### (三) 添加高导热性纳米填料

纳米填料有高比表面积和出色的热传导性能,它们能在合成脂类基体中形成高效的热传导网络,让材料整体的热导率得到明显提高,像 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、BN、CNT等都是常用的高导热性纳米填料。添加纳米填料要控制好添加量和分散性,适量添加能有效提升热导率,添加量太高的话,材料粘度会增加,流动性也会变差,这样反而会会影响散热效果。另外采用表面改性等方法可以提高纳米填料在合成脂类基体中的分散性,保证纳米填料可以均匀分布,充分起到热传导增强作用。比如对BN进行表面有机化处理就能让它更好地分散在合成脂类基体中,添加量为5wt%时,复合材料的热导率比纯合成脂类材料约提高30%。

## 结语

本研究针对数据中心液冷系统中合成脂类导热材料的热传导特性做了全面且深入的探讨。在研究过程中,通过精心设计实验方案,系统分析了温度、压力及微观结构等因素对合成脂类导热材料热传导特性产生的影响。依据实验结论提出选用高导热基础材料、优化流道结构和添加纳米填料等热传导性能优化策略,以此提升合成脂类导热材料在数据中心液冷系统中的应用性能。不过目前合成脂类导热材料在复杂工况下的长期稳定性以及和液冷系统其他部件的兼容性方面的研究仍存在不足,未来的研究可以朝着这些方向推进,完善合成脂类导热材料在数据中心液冷系统中的应用技术体系,推动数据中心行业实现可持续发展。

## 参考文献

- [1] 吴辉,何凯,李华,旷佳,罗谦. 并联多支路液冷系统流量测试和修正方法研究[J]. 机车电传动, 2024, (06): 112-120.
- [2] 曹清,傅恂涵,梁兴壮,刘阳. 液冷系统仿真模型置信度评估方法[J]. 飞机设计, 2024, 44(02): 59-66.
- [3] 本刊编辑部. 中国工程建设标准化协会标准《数据中心液冷系统技术规程》通过审查[J]. 工程建设标准化, 2024, (04): 43.
- [4] 李纪元. 数据中心液冷散热系统设计及节能研究[D]. 南京航空航天大学, 2023.
- [5] 黄国英. 液冷电视发射机液冷系统和1+1系统的改造与实践[J]. 西部广播电视, 2020, (02): 224-225+240.