

MPCMs/环氧树脂复合材料导热调温性能

孙一凡, 方健

(北京林业大学 木材科学与应用教育部重点实验室, 北京 100083)

摘要: **目的** 制备 MPCMs/环氧树脂复合材料, 研究石蜡相变微胶囊 (MPCMs) 对环氧树脂导热调温性能的影响。**方法** 采用共混法制备 MPCMs/环氧树脂复合材料, 对共混改性的复合材料进行导热、储热、调温及热稳定性能表征。**结果** MPCMs/环氧树脂复合材料导热系数增大, 为原来的 4.91 倍以上, 相变潜热特性与 MPCMs 的质量分数成正比, 有自我调节温度能力。**结论** MPCMs/环氧树脂复合材料提高了环氧树脂的导热性能, 保留了 MPCMs 的相变储热调温性能, 热稳定性良好。

关键词: 环氧树脂; 石蜡相变微胶囊 (MPCMs); 导热性能; 调温

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2021)19-0012-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2021.19.002

Thermal Conductivity and Temperature Regulation of MPCMs/Epoxy Resin Composites

SUN Yi-fan, FANG Jian

(Key Laboratory of Wooden Material Science and Application of the Ministry of Education,
Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

ABSTRACT: The work aims to prepare MPCMs/epoxy resin composite and investigate the effect of phase change microcapsules (MPCMs) on thermal conductivity and temperature regulation of epoxy resin. MPCMs/Epoxy resin composites were prepared by blending method, and the modified MPCMs/ epoxy resin composites were characterized by heat conduction, heat storage, temperature regulation and thermal stability. The thermal conductivity of MPCMs/Epoxy resin composite increased by more than 4.91 times compared with the original. The latent heat characteristic of phase change was proportional to the mass fraction of MPCMs, and had the ability of regulating temperature. MPCMs/epoxy resin composite improves the thermal conductivity of epoxy resin, maintains the phase change heat storage and temperature regulation performance of MPCMs, and has good thermal stability.

KEY WORDS: epoxy resin; paraffin phase change microcapsule; thermal conductivity; temperature regulation

环氧树脂作为三大通用型热固性树脂之一, 具有高力学性能和低蠕变倾向, 以及优良的抗化学腐蚀和热形变性能^[1]。由于具有耐候性强、耐磨、耐冲击、强度高、粘接性好等优点, 环氧树脂广泛应用于工业水性涂料、胶黏剂、桥梁修补、电子封装等领域^[2-6]。环氧树脂用于电子封装基于以下优点: 固化体积收缩

率小, 对多种基板有良好的粘接性能, 可控制固化温度和交联密度等^[7-8]。随着电子器件向小型化发展, 产品变得高度紧凑, 只有提供更好的热管理系统才能更好地延长其使用寿命。环氧树脂本身的导热性能较差, 在作为电子元件的灌封材料时, 可能会由于不能及时扩散电子设备集成块产生的热量, 导致设备温度

收稿日期: 2020-12-28

基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFD0600701); 北京林业大学中央高校基本科研业务费专项资金 (2017JC12)

作者简介: 孙一凡 (1995—), 女, 北京林业大学硕士生, 主攻相变微胶囊材料。

通信作者: 方健 (1978—), 女, 博士, 北京林业大学副教授, 主要研究方向为功能性包装材料。

急剧上升, 影响其正常运行, 甚至造成设备损坏^[9]。

针对上述不足, 很多学者对环氧树脂进行改性以提高其导热性能, 主要有以下 2 种途径: 通过改变环氧树脂内部分子粘结结构的取向来增强导热^[10-11]; 填充型, 也叫共混型, 通过在环氧树脂基体中加入有导热性能的填料, 如氮化硼、氧化铝等, 提高导热性能^[12-13]。对比以上 2 种途径, 第 2 种途径工艺简便, 可操作性强, 易于形成工业化生产, 故国内外多采用此类方法提高环氧树脂的热性能。目前, 大多数学者选择的填料多以无机物为主, 只能单方面提高环氧树脂的导热速率, 而使用相变材料作为填料, 可以利用相变材料发生相转变时的相变潜热储存或释放能量, 从而使环氧树脂具有一定的调温效果, 将电子元件所产生的热量有效地吸收与转移^[14]。

文中采用相变石蜡微胶囊 (MPCMs) 作为填料与环氧树脂复合, 旨在提高环氧树脂的导热系数, 同时保留微胶囊作为相变材料的优势, 使环氧树脂具备一定的调温性能, 能够在电子元件的日常使用过程中提供过热保护。

1 实验

1.1 原料

主要原料: 9907 耐高温环氧灌封胶 (甲组分为环氧树脂, 乙组分为固化剂), 江苏圣格鲁新材料科技有限公司; 相变石蜡微胶囊, 安徽美科迪智能微胶囊科技有限公司; 无水乙醇, 分析纯, 北京化工厂。

主要仪器: 导热系数测试仪, DRE-2C, 湘潭市仪器仪表有限公司; 温度巡检仪, XSLC-16S2V0, 广州纹徠仪器仪表有限公司; 差示扫描量热仪 (DSC), Q5000IR 型, 德国耐驰公司; 同步 TG-DSC 热分析仪 (TG), STA 449 F3 Jupiter®, 德国耐驰公司。

1.2 方法

称取适量 MPCMs 放于烧杯中, 加入适量无水乙醇, 置于水浴超声波仪超声 1 h 后, 烘干无水乙醇, 得到分散均匀的微胶囊。称取环氧树脂甲组分与分散好的微胶囊混合 (MPCMs 质量分数分别为环氧树脂甲组分的 10.0%, 12.5%, 15.0%, 17.5%, 20.0%), 温度为 40 °C 水浴搅拌至体系呈均匀流动状态后, 超声 1 h 除去内部气泡。然后按照甲组分质量的 35% 称取环氧树脂乙组分, 添加至之前的混合物中搅拌均匀, 超声 30 min 除去气泡后, 缓慢倒入模具中, 在温度为 90 °C 的鼓风干燥箱中固化 2 h, 最后在室温静置 24 h, 即可得到 MPCMs/环氧树脂复合材料。

1.3 性能测试

采用 DRE-2C 导热系数测试仪, 测定 MPCMs、

环氧树脂和 MPCMs/环氧树脂复合材料的导热系数, 样品直径为 50 mm, 厚度为 20 mm。取样测定 3 次, 结果取平均值。

采用 XSLC-16S2V0 温度巡检仪, 测试并记录从室温至 65 °C 过程中 MPCMs/环氧树脂复合材料温度随时间的变化情况。升温过程使用电热套对样品加热, 温度巡检仪的基本误差为 $\pm 0.2\%$ 。

采用 Q5000IR 型差示扫描量热仪, 测量 MPCMs、环氧树脂和 MPCMs/环氧树脂复合材料的相变温度和相变潜热, 测试温度为 10 ~ 80 °C, 升温速率为 5 °C/min。

采用 STA449 F3 Jupiter® 同步 TG-DSC 热分析仪, 测量 MPCMs、环氧树脂和 MPCMs/环氧树脂复合材料的热稳定性, 测试温度为 0 ~ 800 °C, 升温速率为 10 °C/min。

2 结果与分析

2.1 MPCMs/环氧树脂复合材料的导热性能

实验使用 MPCMs 的壁材为改性脲醛树脂, 芯材为高焓值石蜡。使用导热系数测试仪测得 MPCMs 的导热系数为 0.5930 W/(m·K), 纯环氧树脂的导热系数为 0.0842 W/(m·K)。MPCMs 质量分数变化对环氧树脂导热系数的影响见图 1。由图 1 可知, MPCMs/环氧树脂的导热系数随着 MPCMs 质量分数的增加而增大, 当质量分数为 10.0%, 12.5%, 15.0%, 17.5% 和 20.0% 时, 分别提高纯环氧树脂的 4.91, 4.96, 5.20, 5.37 和 5.58 倍。主要原因是 MPCMs 的导热系数比环氧树脂高, MPCMs 在复合材料中的密度越大, 整个体系的导热系数越大; 由于 MPCMs 的相变特性, 使得在热传导过程中, 除去环氧树脂所吸收的热量, 还有一部分来自 MPCMs 发生固-液相变时多吸收的热量, 使得单位体积内能够传导的热量更多。由于环氧树脂本身的导热性能较差, 因此 MPCMs/环氧树脂复合材料的导热系数会比纯 MPCMs 低。

与此同时, MPCMs 质量分数分别为环氧树脂组分质量的 10.0%, 12.5%, 15.0%, 17.5% 和 20.0% 时, 复合材料的导热系数分别为纯 MPCMs 的 69.7%, 70.5%, 73.8%, 76.2% 和 79.2%, 显著高于其他材料的填充效果。出现这一现象可能是因为文中实验所使用 MPCMs 的相变温度为 30.29 °C, 开始发生固-液相变至完全相变是在 24.82~34.80 °C, 而导热系数测试仪的所用测试探头温度均值为 25.52 °C, 对于 MPCMs/环氧树脂复合材料来说, 测试时样品处于固-液相变的过程中, 所吸收的热量相较其他非相变填充材料更多, 本身的温度与探头显示的温度温差更小, 因此导热系数更大, 导热增强效果更为明显^[15]。

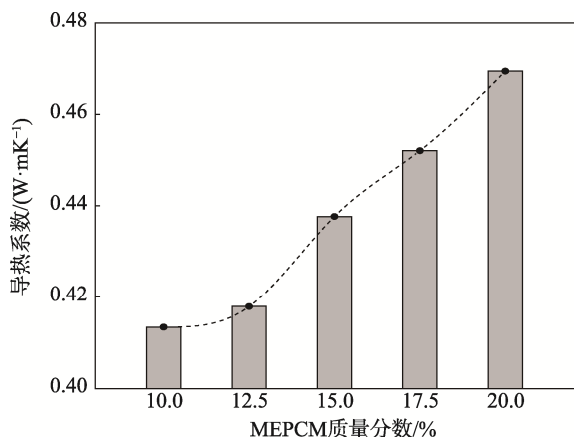


图1 MPCMs和MPCMs/环氧树脂复合材料导热系数曲线
Fig.1 Thermal conductivity curve of MPCMs and MPCMs/epoxy resin composite

此外,复合材料的导热系数在微胶囊质量分数为12.5%左右有明显的转折,当MPCMs质量分数大于12.5%,导热系数增大趋势更为明显。从导热机制来看,聚合物基复合材料的导热性能与基体内部结构、填料性能和基体分子结构有关^[16]。基于Agairi等^[17]提出的填充型复合材料热传导串并联模型理论,MPCMs本身的导热系数高于环氧树脂,当MPCMs质量分数较小时(10.0%~12.5%),单个微胶囊在环氧树脂中单独存在,彼此间距离相对较远,相当于填料与基体呈“串联”存在,见图2a,导热通路不易形成,环氧树脂导热增强效果随微胶囊增加变化不大;当MPCMs质量分数逐步增大(12.5%~20.0%),见图2b,微胶囊在环氧树脂内部的相对距离不断减少,直至接近1条连续的导热通路,此时相当于填料与基体呈“并联”状态;当有效传递热量的MPCMs导热通路增加至足够多时,见图2c,导热通路彼此连接相交,进一步在基体环氧树脂内形成导热网格结构,显著提高了复合材料的导热系数,这也解释了为什么在微胶囊质量分数大于12.5%后,MPCMs/环氧树脂复合材料的导热系数提升比MPCMs质量分数小于12.5%时更明显。MPCMs的均匀分散也有利于提高环氧树脂复合材料的导热性能^[18]。

MPCMs导热通路与导热网格的形成也会降低环氧树脂的固化状态和机械强度。当MPCMs质量分数增大至17.5%以后,环氧树脂始终无法完全固化,具体指经高温固化和室温静置24 h后,环氧树脂再次经受高温后会出现软化的现象(在测试导热系数时不受影响),见表1。这是因为MPCMs质量分数过大,其空间位阻作用减少了环氧树脂与固化剂的接触概率,在一定程度上扩大环氧基链段的受热运动所需要的能量,阻碍环氧基团的相互结合,进而增加反应难度,且反应不充分,从而导致环氧树脂无法固化,复合材料内部出现较多的缺陷^[19]。此种不充分反应也会影响导热机制的复杂化。当MPCMs质量分数小于17.5%时,复合材料的分子呈无序排列,内部气孔相对较多,材料内部的结构较为复杂,分子热运动时的阻力较大,导热系数相应较低;当MPCMs质量分数增大至17.5%后,由于环氧树脂未能完全固化,复合材料的玻璃态形式密度增加,玻璃相粘度相对降低,使得分子热运动阻力变小,分子热运动更加明显,反而导热系数增加。

若要改善环氧树脂无法固化的情况,应适量减少MPCMs的含量,加强环氧基体中环氧基团的反应,形成更强烈的界面结合力,减少MPCMs对复合材料造成的内部缺陷^[20-21]。由于MPCMs质量分数大于17.5%后,环氧树脂无法固化,经高温会再次软化,严重影响其应用价值,因此在后续的调温性能、DSC和TGA检测过程中,仅对质量分数为10.0%~15.0%的MPCMs/环氧树脂复合材料进行性能检测与探讨。

2.2 MPCMs/环氧树脂复合材料的储热性能

MPCMs、环氧树脂和环氧树脂复合材料的DSC曲线见图3,热性能参数见表2。结合表2可知,MPCMs的熔融峰值温度为30.29℃,熔融峰为单峰,熔融相变潜热为271.23 J/g,说明其相变储热能力较好。在测试范围内,纯环氧树脂没有出现吸热峰,但掺杂MPCMs的环氧树脂出现了吸热峰,且所有样品的熔融峰均为单峰,说明复合材料体系产生的相变热效应是由于添加的MPCMs所引起^[22]。MPCMs质量分数为10.0%、12.5%和15.0%的环氧树脂复合材料

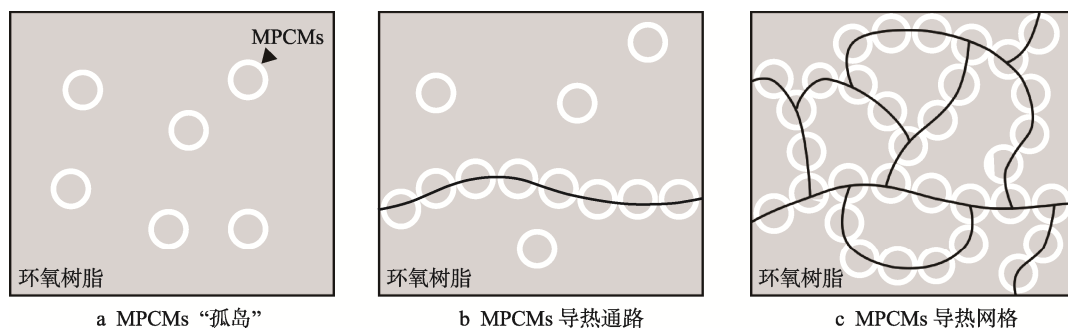


图2 MPCMs/环氧树脂复合材料导热增强机制

Fig.2 Enhancement mechanism of thermal conductivity of MPCMs/epoxy resin composite

表 1 掺入 MPCMs 后环氧树脂固化状态
Tab.1 Curing state of epoxy resin added with MPCMs

MPCMs 质量分数/%	固化时间/h
10.0	2
12.5	2
15.0	2
17.5	无法固化
20.0	无法固化

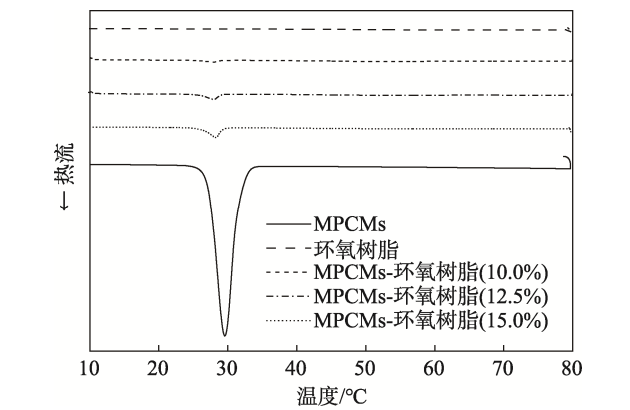


图 3 MPCMs 和 MPCMs/环氧树脂复合材料 DSC 曲线
Fig.3 DSC curves for MPCMs and MPCMs/ epoxy composite

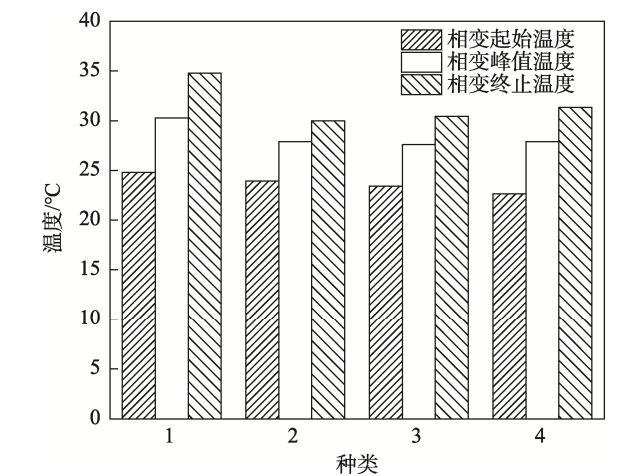
表 2 MPCMs/环氧树脂复合材料的升温热性能参数
Tab.2 Thermal properties of MPCMs/ epoxy resin composite

样品	熔融峰			熔融焓/ (J·g ⁻¹)
	起始温度/°C	峰值温度/°C	终止温度/°C	
MPCMs	24.82	30.29	34.80	271.23
环氧树脂	—	—	—	—
MPCMs-环氧树脂(10.0%)	23.92	27.91	29.99	3.580
MPCMs-环氧树脂(12.5%)	23.41	27.60	30.45	5.059
MPCMs-环氧树脂(15.0%)	22.65	27.89	31.34	6.207

的相变潜热分别为 3.580，5.059，6.207 J/g，随着 MPCMs 质量分数的增加而增大，这说明 MPCMs 在环氧树脂的固化过程中保持稳定性，仍具备相变蓄热能力。

放热过程中相变起始温度由高到低为：MPCMs > MPCMs-环氧树脂（质量分数为 10.0%）> MPCMs-环氧树脂（质量分数为 12.5%）> MPCMs-环氧树脂（质量分数为 15.0%），无显著差异。复合材料的熔融峰峰值温度相较于 MPCMs 均出现左移，无显著差

异。相变终止温度由高到低为：MPCMs > MPCMs-环氧树脂（质量分数为 15.0%）> MPCMs-环氧树脂（质量分数为 12.5%）> MPCMs-环氧树脂（质量分数为 10.0%）。相变温度区间大小为 MPCMs > MPCMs-环氧树脂（质量分数为 15.0%）> MPCMs-环氧树脂（质量分数为 12.5%）> MPCMs-环氧树脂（质量分数为 10.0%），相变温度范围变窄，但随着微胶囊质量分数的增加，复合材料的相变区间有变宽的趋势，见图 4。



注：种类 1—4 依次为 MPCMs，质量分数为 10.0%，12.5%，15.0%的 MPCMs/环氧树脂复合材料
图 4 MPCMs 和 MPCMs/环氧树脂复合材料熔融相变温度
Fig.4 Phase transition temperature of MPCMs and MPCMs/ epoxy resin composite in melting process

这些现象可能是与直接进行 DSC 测试的 MPCMs 块体材料相比，环氧树脂内部的微胶囊相对分散，相当于单粒存在，而单粒微胶囊的相变点往往低于其块体材料，但最终会趋于块体相变点。即颗粒越小，相同的分子热运动剧烈程度对于材料内部的传热效率影响越大，相变温度越低^[23]，因此掺入 MPCMs 的复合材料会出现熔融峰提前，且相变区间变窄的现象。随着质量分数的增加，微胶囊在环氧树脂内部彼此连接，相对体积变大，相变区间范围也就越宽。复合材料相较于 MPCMs 的熔融峰出现左移，也是由于自身导热系数的提高使得材料内部的分子热运动加剧，传热效率提高，提前引起了 MPCMs 中石蜡的熔融。

2.3 MPCMs/环氧树脂复合材料的调温性能

一般情况下，民用消费类和工业类电子器件所接受的环境温度不超过 55 °C^[24]，因此，使用温度巡检仪测试了 MPCMs/环氧树脂复合材料从室温升至 65 °C 过程中的温度曲线，结果见图 5。由图 5 可知，在升温过程中，MPCMs/环氧树脂复合材料比纯环氧树脂所需时间更短，且微胶囊质量分数越大，升温速

率越快,这是由于复合材料的导热系数与 MPCMs 质量分数呈正相关,微胶囊的加入提高了环氧树脂的导热系数,增大了传热效率,从而提高了复合材料的升温速率,加强了热交换。此外,纯环氧树脂在 200 s 时出现温度转折点,随后迅速达到 65 °C;添加 MPCMs 后,此温度转折点逐渐提前,且在转折点后曲线斜率变小,说明微胶囊缓解了环氧树脂出现的温度骤变现象。

由图 5 可知,当质量分数为 10.0%, 12.5%, 15.0% 的 MPCMs/环氧树脂复合材料温度分别达到 23.92, 23.41, 22.65 °C 时,3 组不同质量分数的 MPCMs/环氧树脂复合材料出现了一段温度平台期,甚至有下降的趋势。这是因为使用的 MPCMs 相变温度为 24.82~34.80 °C,当环境温度上升至此范围内,MPCMs 内部的石蜡会由固相到液相进行转变,以相转变的形式储存一部分外界能量,从而抑制环氧树脂吸热升温的趋势,起到了调节温度的作用。MPCMs 掺入越多,能通过相转变利用的潜热越多,对环境的调温效果越好。

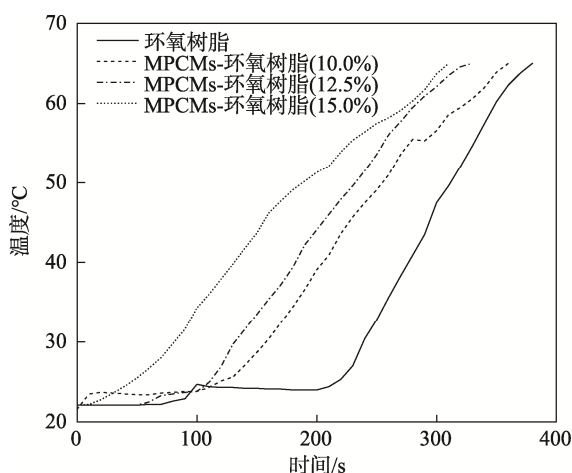


图 5 MPCMs/环氧树脂复合材料升温过程温度曲线
Fig.5 Temperature curve of MPCMs/ epoxy resin composite in heating

2.4 MPCMs/环氧树脂复合材料的热稳定性

热稳定性是评估相变材料热性能的重要指标,MPCMs、环氧树脂和 MPCMs/环氧树脂复合材料的 TGA 曲线见图 6。从图 6 可知,升温过程中 MPCMs 在 0~130 °C 时质量损失率低于 3%,是由于微胶囊表面未完全干燥或者保存过程中吸附的水分蒸发;温度为 130~200 °C 时,石蜡内含有的少量小分子烷烃分解;温度超过 200 °C 后,MPCMs 的质量随着温度的上升而快速下降,这是由于微胶囊中的剩余石蜡逐渐汽化,使芯材体积膨胀,壁材结构逐渐被破坏,石蜡气体逃逸,从而产生质量损失;在温度为 350 °C 左右时,石蜡基本分解完毕;第 2 次快速质量损失,由温度为 350~400 °C 时壁材热解导致,直至质量损失率达

到 90%。环氧树脂在温度为 200 °C 之前未发生明显的质量损失现象,200 °C 之后,环氧树脂迅速热分解,在温度为 490 °C 时终止,剩余的为热解生成的难熔物。

掺杂了 MPCMs 的环氧树脂复合材料热重曲线呈现出与 MPCMs 相似的 3 个阶段:第 1 个阶段为 180~220 °C,这是体系中的低分子物质蒸发分解所引起的;第 2 个阶段为 220~280 °C,此时环氧树脂与 MPCMs 中的石蜡开始热分解,石蜡在 280 °C 左右完全挥发;第 3 个阶段为 280~430 °C,此时除了环氧树脂仍在热分解外,MPCMs 的壁材也开始发生热分解,最后剩余的为热解难熔物。除此之外,MPCMs 质量分数越大,复合材料的分解温度越低,但总体差别不大。从上述结果可以看出,与环氧树脂相比,复合材料热分解温度虽然由 200 °C 降低为 180 °C,但是在 180 °C 之前并未发生明显质量损失现象。由于复合材料的目标是应用于电子封装材料上,环境温度一般不超过 100 °C,所以完全可以保证复合材料在实际使用过程中的安全性与可靠性。

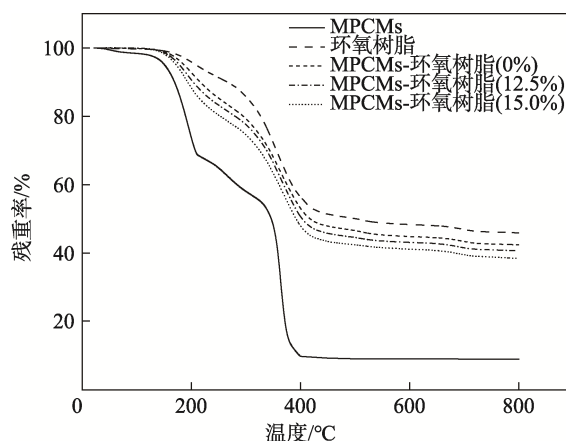


图 6 MPCMs/环氧树脂复合材料 TGA 曲线
Fig.6 TGA curve of MPCMs/ epoxy resin composite

3 结语

将 MPCMs 掺入环氧树脂中,可以提高环氧树脂的导热系数至原来的 4.91 倍以上,MPCMs 的质量分数越大,环氧树脂导热系数越高。这是由于微胶囊在环氧树脂内部形成了导热网格,但过量的 MPCMs 可能会导致环氧树脂在交联过程中出现内部缺陷,从而无法固化。MPCMs/环氧树脂复合材料保留了 MPCMs 的相变储热性能,熔融相变潜热与 MPCMs 质量分数呈正相关,熔融峰相较 MPCMs 出现了左移,相变温度区间变窄。MPCMs/环氧树脂复合材料呈现良好的自我调温性能,能够在一定程度上为电子器件提供过热保护。MPCMs/环氧树脂复合材料的热降解过程与纯环氧树脂基本相符,热稳定性良好,在实际应用中具有安全性与可靠性。

参考文献:

- [1] 崔益华, 陶杰, 徐勇, 等. 无机纳米粒子/环氧树脂基复合材料的研究现状[J]. 宇航材料工艺, 2003, 33(4): 10—15.
- CUI Yi-hua, TAO Jie, XU Yong, et al. Research Progress of Inorganic Particles/Epoxy Matrix Nanocomposites[J]. Aerospace Materials & Technology, 2003, 33(4): 10—15.
- [2] TANG E J, YAO M M, DU P Y, et al. Synthesis and Dynamic Mechanical Study of Core-Shell Structure Epoxy/Polyacrylate Composite Particle[J]. Journal of Polymer Research, 2016, 23(9): 204.
- [3] WU Y, SONG N N, WANG W C. Synthesis of Graphene/Epoxy Resin Composite Via 1, 8-Diaminooctane by Ultrasonication Approach for Corrosion Protection[J]. Ultrasonics-Sonochemistry, 2018, 42(6): 464—470.
- [4] VALIPOUR, ALIREZE, SING, et al. Mechanical Properties Characterization and Finite Element Analysis of Epoxy Grouts in Repairing Damaged Pipeline[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2018, 140(6): 061701.
- [5] 杨媛媛, 张成祥, 赵国静, 等. 环氧树脂电子封装胶研究进展[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2017, 15(3): 54—57.
- YANG Yuan-yuan, ZHANG Cheng-xiang, ZHAO Guo-jing, et al. Research Progress of Epoxy Resin Electronic Packaging Adhesive[J]. Chemical Propellants & Polymeric Materials, 2017, 15(3): 54—57.
- [6] WONG C P, XU J, ZHU L, et al. Recent Advances on Polymers and Polymer Nanocomposites for Advanced Electronic Packaging Applications[C]// 2005 Conference on High Density Microsystem Design and Packaging and Component Failure Analysis, Shanghai, 2005: 1—16.
- [7] 张超, 白瑞钦, 马勇, 等. 电子封装用环氧树脂基复合材料研究进展[J]. 工程塑料应用, 2019, 47(10): 144—149.
- ZHANG Chao, BAI Rui-qin, MA Yong, et al. Progress on Research in Epoxy Resin Matrix Composites for Electronic Packaging[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(10): 144—149.
- [8] JIANG Y L, SHI X J, FENG Y Z, et al. Enhanced Thermal Conductivity and Ideal Dielectric Properties of Epoxy Composites Containing Polymer Modified Hexagonal Boron Nitride[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2018(107): 657—664.
- [9] 陈卫东, 张鹏云, 陈艳丽. 高性能环氧树脂胶黏剂研究概况[J]. 化工科技, 2016, 24(3): 81—85.
- CHEN Wei-dong, ZHANG Peng-yun, CHEN Yan-li, et al. High Performance Epoxy Resin Adhesive[J]. Science & Technology in Chemical Industry, 2016, 24(3): 81—85.
- [10] HOU J, LI G H, YANG N, et al. Preparation and Characterization of Surface Modified Boron Nitride Epoxy Composites with Enhanced Thermal Conductivity[J]. RSC Advances, 2014, 4(83): 44282—44290.
- [11] ZHANG C, HUANG R J, WANG Y G, et al. Amino-propyltrimethoxysilane-Functionalized Boron Nitride Nanotube Based Epoxy Nanocomposites with Simultaneous High Thermal Conductivity and Excellent Electrical Insulation[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2018, 6(42): 20663—20668.
- [12] OWAIS M, ZHAO J, IMANI A, et al. Synergetic Effect of Hybrid Fillers of Boron Nitride, Graphene Nanoplatelets, and Short Carbon Fibers for Enhanced Thermal Conductivity and Electrical Resistivity of Epoxy Nanocomposites[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2019(117): 11—22.
- [13] 鲁猷桀, 陈晶晶, 陈迦冰, 等. 液体环氧底填料制备及球型二氧化硅对其性能影响[J]. 热固性树脂, 2019, 34(6): 9—14.
- LU You-luan, CHEN Jing-jing, CHEN Jia-bing, et al. Preparation of Liquid Epoxy Resin Underfill and Effect of Spherical Silica on the Properties of the Underfill[J]. Thermosetting Resin, 2019, 34(6): 9—14.
- [14] 孟多, 赵薇. 新戊二醇/环氧树脂复合相变材料的制备和性能[J]. 新型建筑材料, 2014, 41(4): 1—4.
- MENG Duo, ZHAO Wei. Preparation and Properties of Neopentyl Glycol/Epoxy Resin Composite Phase Change Material[J]. New Building Materials, 2014, 41(4): 1—4.
- [15] 朱雯, 苏云, 陈若颖, 等. 相变微胶囊涂层织物在热防护服中的应用[J]. 中国安全科学学报, 2020, 30(12): 180—185.
- ZHU Wen, SU Yun, CHEN Ruo-ying, et al. Application of Fabric Coated with Phase Change Microcapsule in Thermal Protective Clothing[J]. China Safety Science Journal, 2020, 30(12): 180—185.
- [16] HUSSAIN A R J, ALAHYARI A A, EASTMAN S A, et al. Review of Polymers for Heat Exchanger Applications: Factors Concerning Thermal Conductivity[J]. Applied Thermal Engineering, 2017(113): 1118—1127.
- [17] AGARI Y, UNO T. Estimation on Thermal Conductivities of Filled Polymers[J]. Journal of Applied Polymer Science, 1986, 32(7): 5705—5712.
- [18] YAO A, MORI I. Synthesis and Evaluation of Fluorinated Nano Diamond for Application of Polymer Composite[C]// 2016 IEEE 16th International Conference on Nanotechnology, Sendai, 2016: 608—611.
- [19] 张影. 微胶囊对环氧树脂体系性能影响的研究[J]. 热固性树脂, 2020, 35(3): 20—23.

- ZHANG Ying. Effects of Microcapsules on the Properties of Epoxy Resin Systems[J]. Thermosetting Resin, 2020, 35(3): 20—23.
- [20] LI X W, FENG Y Z, CHEN C, et al. Highly Thermally Conductive Flame Retardant Epoxy Nanocomposites with Multifunctional Ionic Liquid Flame Retardant-Functionalized Boron Nitride Nanosheets[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2018, 6(41): 20500—20512.
- [21] XIAO C, TANG Y L, CHEN L, et al. Preparation of Highly Thermally Conductive Epoxy Resin Composites via Hollow Coron Nitride Microbeads with Segregated Structure[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2019(121): 330—340.
- [22] 马磊, 肖悦, 张文静, 等. 环氧树脂复合相变材料基本性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(8): 2536—2542.
- MA Biao, XIAO Yue, ZHANG Wen-jing, et al. Basic Properties of Epoxy Resin Composite Phase Change Material[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2018, 37(8): 2536—2542.
- [23] 李静, 廖强. 新型纳米复合材料 Cu/SiO₂ 的热特性及相变特性的分子动力学研究[J]. 中国科学院大学学报, 2018, 35(2): 248—253.
- LI Jing, LIAO Qiang. Thermal Properties and Phase Transition Properties of Cu/SiO₂ Nanocomposites[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2018, 35(2): 248—253.
- [24] 周雄兵. 温度试验对电子元器件的性能影响分析[J]. 信息通信, 2016(11): 257—258.
- ZHOU Xiong-bing. Analysis of the Influence of Temperature Test on the Performance of Electronic Components[J]. Information & Communication, 2016(11): 257—258.