文章编号：1008－8857(2022)01－0053－08　**DOI**: 10.13259/j.cnki.eri.2022.01.008

二元有机复合相变材料相变过程热特性实验研究

崔梦冬，刘道平，杨　亮，李　贝
（上海理工大学 能源与动力工程学院，上海 200093）

摘　要：二元有机复合相变材料因其无腐蚀性、过冷度低、价格低廉和可循环性的优点，在电子器件散热过程中极具发展潜力。通过差示扫描量热法(DSC)测得 4 种脂肪酸和 4 种脂肪醇相变温度与潜热，然后利用准共晶相变理论计算脂肪酸/醇二元有机复合相变材料共晶点，确定 4 种相变温度在 33～37 ℃ 范围内的复合体系，并通过 DSC 实验测量二元体系相变特性。实验结果表明，筛选出的二元有机复合相变材料相变温度分布在 33.08～36.63 ℃，与理论相变温度偏差在 0.30%～4.61%；相变潜热分布在 138.5～215 kJ·kg^{-1}，与理论相变潜热偏差在 0.4%～27%；十二酸与十八醇复合相变材料具有最高的相变潜热(215 kJ·kg^{-1})，相变温度为 36.5 ℃。研究结果可为有机复合相变材料在电子器件热管理中的应用提供技术参考。

关键词：相变材料；脂肪酸；脂肪醇；热特性
中图分类号：TB392　　**文献标志码**：A

Experimental study on thermal characteristics of binary organic composites in the phase change process

CUI Mengdong，LIU Daoping，YANG Liang，LI Bei
(School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Binary organic composites as a kind of phase change material have great potential in the heat dissipation of electronic devices with the advantages of no corrosion, low supercooling degree, low cost, and recyclability. In this paper, the phase change temperature and latent heat of 4 kinds of organic acids and organic alcohols were determined by differential scanning calorimeter (DSC). The eutectic point of organic acid/alcohol composites was calculated by quasi-eutectic phase change theory. Four composites within phase change temperature range of 33～37 ℃ were

收稿日期：2019－07－03
第一作者：崔梦冬(1996—)，男，硕士研究生。研究方向：相变材料。
E-mail：doing1214@yahoo.com
通信作者：杨　亮(1984—)，男，副教授。研究方向：相变蓄能与水合物技术。
E-mail：yanglianghb@163.com

determined. Their phase change characteristics of the binary composites were measured by DSC. The results showed that comparing with the theoretical values, the phase change temperature of screened binary materials ranged from 33.08 ℃ to 36.63 ℃ with a deviation of 0.30%～4.61%, while the latent heat of phase change was in the range of 138.5～215 kJ·kg^{-1} with a deviation of 0.4%～27%. In addition, the composite composing of dodecanoic acid and octadecyl alcohol had the largest phase change latent heat (215 kJ·kg^{-1}), and its phase change temperature was 36.5 ℃. The results can provide useful information for the application of organic composite materials to thermal management of electronic devices.

Keywords: phase change materials; fatty acid; fatty alcohol; thermal characteristics

目前，电子产品发展迅速，但其在工作过程中短时间内产生的大量热量会引起局部温度过高，从而影响工作效率，缩短产品使用寿命[1]，或者发生电路故障、爆炸等安全事故，严重影响生产、使用的安全性[2]。因此，控制电子器件放热过程的温度对其高效工作十分重要。

在电子器件散热控温的研究中，风冷式和液冷式散热作为显热式散热，是最早应用于电子器件散热研究的，Nelson 等[3]结合汽车散热运行过程中的实际耗能和冷却效果进行了评价。虽然风冷能控制局部温度，但需要消耗更多的能量来维持冷却系统的运用。由于导热介质显热吸收的热量十分有限，显热式散热在实际应用中可通过附加冷却装置或增加换热面积的方式来强化换热，但这对安装空间有要求[4]，并不符合对现代电子装置的小巧便捷性要求。2005 年，Selman 等[5]第一次使用相变材料潜热对电子器件散热温度进行了控制，发现该体系散热效果明显优于风冷式散热。2008年，Kizilel 等[6]利用相变材料控制电池大电流放电产热现象，将电池的温度控制在安全范围，提升了电池的使用效率。

将相变材料应用于电子器件散热是一个极具潜力的发展方向。运用在电子器件散热过程中的相变材料一般具有较高的相变潜热，在散热系统中可有效吸收周围热量，快速降低电子器件温度。相变材料又分为有机相变材料和无机相变材料[7-8]。无机相变材料在使用中会出现相分离现象，易腐蚀，且对封装材料和封装工艺有一定的要求[9]，同时会增大使用空间。而有机相变材料具有过冷度低、无相分离现象、储能密度较大、成本低廉等优势。

国内外学者对有机相变材料在电子器件散热管理中的应用进行了大量研究。闫全英等[10]对脂肪酸进行复配研究其导热系数，发现其具有良好的循环稳定性。Zhang 等[11]对于棕榈酸、月桂酸及两者混合物在不同温度下的相变情况进行了研究，发现二元复合相变材料经过 100 次相变过程后，依旧具有很好的热稳定性。赵建国等[12]研究石蜡/膨胀石墨复合材料散热特性时发现其固液相变温度为 61 ℃，相变潜热在 80～150 kJ·kg^{-1}。Dimaano 等[13]对葵酸、十二酸的混合物相变过程进行了研究，发现其相变温度在 14 ℃，相变潜热在 113～133 kJ·kg^{-1}。脂肪酸/醇是少有的可再生的相变材料，而且是纯物质，属于准共晶系相变材料，在低共晶点处可达到相变同步，具有优良的蓄热特征，可以通过复配得到共晶物。

电子器件散热的温度范围一般为 20～50 ℃[14]。Baby 等[15]将十二烷作为电子器件散热材料，在输出功率 2～7 W 下，电子器件工作温度不高于 45 ℃。Fok 等[16]研究电子器件在恒定输出功率 3～5 W 下的散热情况，发现在该功率下工作温度不高于 45 ℃。Alawadhi 等[17]通过研究认为，相变材料在电子器件散热管理中能将器件与环境的温差控制在 5～10 ℃。本文以 35 ℃作为电子器件较优的工作温度，并考虑到脂肪酸与脂肪醇可再生、储能密度高的优点，选择 4 种脂肪酸和 4 种脂肪醇，将其复配成二元有机复合

相变材料，利用差式扫描量热法(DSC)并基于准共晶相变理论，研究脂肪酸/脂肪醇二元有机复合相变材料共晶点及其相变特性，以期使复合相变材料的相变温度在 33～37 ℃，同时具有较高的相变潜热，为其在电子器件散热管理中的应用提供技术参考。

1　实验部分

1.1　实验材料与设备

本文所用脂肪酸为十二酸(AC12)、十四酸(AC14)、十六酸(AC16)、十八酸(AC18)，脂肪醇为十二醇(AL12)、十四醇(AL14)、十六醇(AL16)、十八醇(AL18)。有机相变材料由国药集团化学试剂有限公司提供。材料相变性能测试仪器主要有：①DSC 热分析仪由耐驰科学仪器商贸(上海)有限公司提供，用于测量相变材料热流密度；②恒温水浴(ME/FP50)由莱博技术(北京)有限公司提供，用于控制并改变相变材料温度，其控温精度为±0.01 K；③集热式恒温加热磁力搅拌器(DF−101S)由邦西仪器科技(上海)有限公司提供，用于搅拌复合材料，其转速范围为 0～2 600 $r\cdot min^{-1}$；④电子天平(ME204E)由梅特勒−托利多仪器(上海)有限公司提供，其测量精度为±0.000 1 g。

1.2　实验方法

本文通过 DSC 测得 4 种脂肪酸和 4 种脂肪醇的相变温度和相变潜热，然后再基于准共晶相变理论计算脂肪酸/脂肪醇二元有机复合相变材料共晶点及其相变特性，确定 4 种相变温度在 33～37 ℃ 范围内的复合体系，并将制作好的样品进行 DSC 中测试，输入相变材料的质量，设置控温区为 10～80 ℃，升温速率为 5 $℃\cdot min^{-1}$，得到 DSC 曲线。根据相变过程的峰形判断两种组分是否共同相变，并分析其相变特性。

(1)单一相变材料 DSC 测量

称取单一脂肪酸/脂肪醇约 20.00 mg 于铝坩埚中，利用压样机压制样品，进行 DSC 测量，设置升温速率为 5 $℃\cdot min^{-1}$。由 DSC 测得热流−时间曲线，分析得到热流和温度的变化关系，并测得起始相变温度、峰值相变温度和结束相变温度。样品均为低分子材料，以起始相变温度作为相变温度。

(2)复合相变材料相变特性 DSC 测量

4 种脂肪酸和 4 种脂肪醇两两复配，可获得 28 种有机复合相变材料。对每种复合材料，基于准共晶相变理论计算不同摩尔比下的相变温度，确定其准共晶点对应的摩尔比，并按照该摩尔比称取二元有机相变材料，放入烧杯中，在 80 ℃ 恒温下，利用磁力搅拌器将其混合均匀后，取样进行 DSC 测量，获得复合相变材料的相变潜热和相变温度。

2　理论计算

准共晶系复合相变材料的相变过程满足热力学第二定律和相平衡理论[18]，两种组分复合可以得到平衡方程，即

$$\begin{cases} -\dfrac{H_A}{T_A}(T_M-T_A)+RT_M\ln(1-X_A)+G_{A,ex}=0 \\ -\dfrac{H_B}{T_B}(T_M-T_B)+RT_M\ln(1-X_B)+G_{B,ex}=0 \end{cases} \tag{1}$$

式中：T_A、H_A、X_A、$G_{A,ex}$ 分别为相变材料组分 A 的相变温度、相变潜热、复合相变材料中的摩尔分数和超额自由焓；T_B、H_B、X_B、$G_{B,ex}$ 分别为相变材料组分 B 的相变温度、相变潜热、复合相变材料中的摩尔分数和超额自由焓；T_M、H_M 分别为复合相变材料的相变温度和相变潜热；R 为气体常数，取 8.315 $J\cdot mol^{-1}$。

本实验中使用的是醇酸类有机物，其超额自由焓 $G_{i,ex}$ 取 0，简化后为

$$T_M=\left[\frac{1}{T_i}-\frac{(R\ln X_i)}{H_i}\right]^{-1},i=A,B \tag{2}$$

由式(2)可得，复合相变材料的相变温度只与成分的摩尔分数有关，两种组分相变温度变化曲线的交点即为最低共熔点。

张寅平等[18]研究了固液相变过程的复合相变材料相变潜热的计算方法，通过引入无关状态参数来简化相变潜热带来的影响，从而得到复合

相变材料相变潜热 H_M。

$$H_M = T_M\left[\frac{X_A H_A}{T_A} + \frac{X_B H_B}{T_B}\right] \quad (3)$$

二元有机复合相变材料在复配时，其相变温度随着摩尔分数的改变而变化。使用 Matlab 软件编写计算程序，可以得到复合相变材料相变温度随着单一组分摩尔分数变化的趋势，根据曲线的交点得到两种相变材料组分的共晶点。

3 结果分析与讨论

3.1 单一有机相变材料相变特性

通过 DSC 测得 4 种脂肪酸和 4 种脂肪醇相变温度和相变潜热，结果如表 1 所示。8 种单一有机相变材料相变温度在 21.6～59.2 ℃ 之间，相变潜热在 177.6～237.4 kJ·kg^{-1} 之间，其中 AL12 相变温度最低（21.6 ℃），AC18 相变温度最高（59.2 ℃），AL18 相变潜热最高（237.4 kJ·kg^{-1}）。

表 1 单一有机相变材料相变温度和相变潜热

Tab. 1 Phase change temperature and latent heat of single organic phase change material

材料名称	相变温度/℃	相变潜热/(kJ·kg^{-1})
AL12	21.6	200.0
AL14	38.5	204.0
AL16	47.8	218.4
AL18	54.3	237.4
AC12	43.2	177.6
AC14	50.7	185.3
AC16	54.2	193.4
AC18	59.2	187.7

3.2 二元脂肪酸/脂肪醇复合体系理论相变特性

图 1 为 AC12/脂肪醇在不同 AC12 摩尔分数下相变温度的变化。以 AC12/AL18 二元材料理论计算结果为例，从图中可以看出，液相线与摩尔分数有关，液相线表示固–液相变材料随着摩尔分数变化对应的使得相变材料完全熔化为液相的相变温度的曲线；在共晶点时复合相变材料相变温度低于单组分相变温度，复合相变材料在该比例下同时相变，相变潜热更集中，且不易发生材料分离的情况。

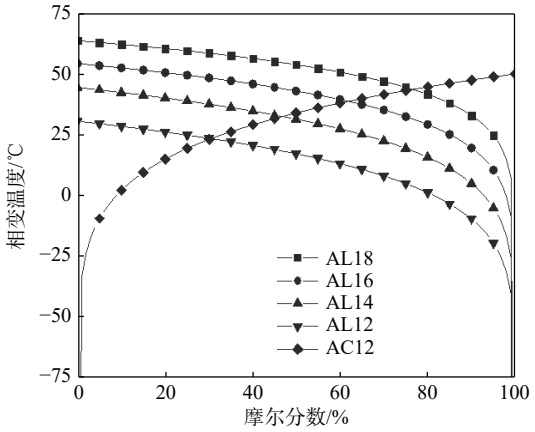

图 1 AC12/脂肪醇二相图

Fig. 1 Two-phase diagram of aliphatic alcohol /AC12

将 28 种二元复合相变材料在理论计算共晶点下的摩尔比、相变温度、相变潜热列于表 2。整体上相变温度和相变潜热随着组分的相对分子量的增大而增大，随着碳原子数的增加，碳链越长，分子之间的结合越牢固，需要更多的热能转换成内能以断开分子之间的连接。而 AL14 和脂肪酸复合的二元有机复合相变材料的相变潜热出现明显下降，低于其他几种复合材料的相变潜热，其主要原因可能是 AL14 和脂肪酸复配时在最低共晶点处会出现过冷现象[18]，导致相变材料热传递效率降低，相变潜热下降。

经理论计算得到的二元有机复合相变材料相变温度范围为 15.74～51.33 ℃，相变温度在 30～50 ℃ 的相变材料共有 18 种。在实验研究过程中需要相变温度更高的相变材料，因此可以根据计算出的相变温度筛选相变材料。

本文根据目标相变温度（35 ℃）筛选出相变潜热大于 190 kJ·kg^{-1} 的二元有机复合相变材料，分别为 AC12/AL18、AC16/AL14 、AC18/AL14、AL14/AL18，其计算得到的相变温度在 33.08～36.63 ℃，相变潜热为 191.33～202.55 kJ·kg^{-1}，其中 AL14/AL18 的相变潜热最高为 202.55 kJ·kg^{-1}。

3.3 二元脂肪酸/脂肪醇 DSC 测量

对筛选出的 4 种复合相变材料在其共晶点质量比下进行 DSC 测量，结果如图 2 所示。由图

表 2　二元有机复合相变材料相变特性

Tab. 2　Phase change characteristics of binary composite phase change materials

二元有机复合相变材料	共晶点摩尔比	共晶点质量比	相变温度/℃	相变潜热/(kJ·kg^{-1})
AC12/AL12	27:73	29.85:70.15	15.74	189.75
AC12/ AL14	48:52	17.48:82.52	26.56	180.81
AC12/ AL16	63:37	9.86:90.14	32.49	185.05
AC12/ AL18	74:26	35.78:64.22	36.63	197.09
AC14/ AL12	15:85	17.78:82.22	18.54	196.41
AC14/ AL14	32:68	33.39:66.61	31.31	188.14
AC14/ AL16	46:54	44.51:55.49	38.13	195.56
AC14/ AL18	58:42	53.80:46.20	42.70	200.03
AC16/ AL12	9:91	11.98:88.02	19.61	199.86
AC16/ AL14	22:78	25.23:74.77	33.08	191.33
AC16/ AL16	35:65	36.28:63.72	39.75	199.52
AC16/ AL18	47:53	45.64:54.36	44.15	209.74
AC18/ AL12	10:90	14.50:85.50	19.82	199.15
AC18/ AL14	25:75	30.67:69.33	33.79	192.99
AC18/ AL16	40:60	43.89:56.11	40.98	199.52
AC18/ AL18	53:47	54.23:45.77	45.73	204.55
AL12/ AL14	27:73	29.85:70.15	15.74	196.03
AL12/ AL16	14:86	17.48:82.52	18.76	201.56
AL12/ AL18	7:93	9.86:90.14	20.23	203.73
AL14/ AL16	33:67	35.78:64.22	31.04	199.14
AL14/ AL18	21:79	25.14:74.86	34.03	202.55
AL16/ AL18	36:64	38.58:61.42	40.74	218.63
AC12/ AC14	66:34	63.00:37.00	40.25	177.09
AC12/ AC16	67:33	61.33:38.67	41.54	179.72
AC12/ AC18	76:24	69.04:30.96	43.09	177.79
AC14/ AC16	50:50	47.11:52.89	49.27	187.48
AC14/ AC18	60:40	54.63:45.37	51.33	184.70
AC16/ AC18	63:37	60.55:39.45	50.56	188.13

中可知，AC12/AL18、AC16/AL14 在融化过程中仅有一个吸热峰，说明两种有机相变材料完全共晶，但后者相变峰值低于前者；AC18/AL14、AL14/AL18在融化过程中存在两个吸热峰，可通过改变质量比观测其是否在共晶点两侧发生共融。

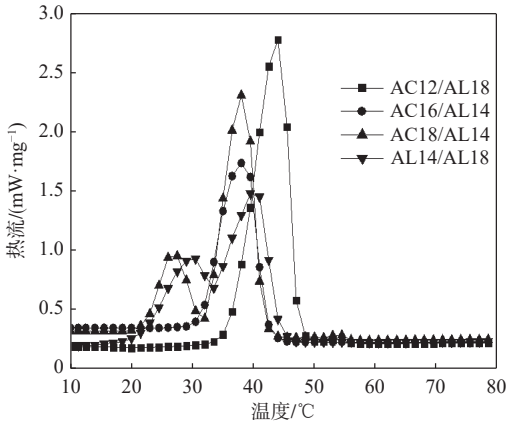

图 2　二元有机复合相变材料 DSC 曲线

Fig. 2　DSC curves of binary composite phase change materials

为了研究复合相变材料相变过程的稳定性，观测临界共晶点区间，在 4 种复合相变材料共晶点质量比附近继续进行 DSC 测试，将 AC12/AL18、AC16/AL14、AL14/AL18、AC18/AL14 的 DSC 曲线的质量比波动范围设定为±5.0 %。

图 3 为二元有机复合相变材料 DSC 相变特性。从图 3(a) 中可以看出，在不同质量比下 AC12/AL18 复合体系的 5 组材料在融化过程中均只有一个相变峰，相变过程基本同步，但当 AC12 质量分数为 72.5% 时相变峰明显变宽，有相分离趋势；AC16/AL14 复合体系 [图 3(b)] 的 5 组材料在融化过程中均只有一个相变峰，相变过程基本同步，当 AC16 质量分数为 32.5%～35.0% 时相变峰变宽，并有分离的趋势；AC18/AL14 复合体系 [图 3(c)] 在 AC18 质量分数为 22.5% 时，其相变过程只有单一峰值，且越接近理论共晶点的样品，其双峰分离越明显；AL14/AL18 复合体系 [图 3(d)] 的 5 组材料在融化过程中均出现两个明显的相变峰，表明两种材料不能同时融化，并且改变两种材料的质量分数时也未出现明显的变化规律。这主要由于两种组分材料之间没有形成晶体结构，两种组分官能团相同，极性也相同，在复配时没有产生共晶体。

经 DSC 测得的复合相变材料的实验相变温度(T_{Exp})和经理论计算得到的相变温度(T_{Theo})如图 4 所示，实验值与理论值相对误差最小的为

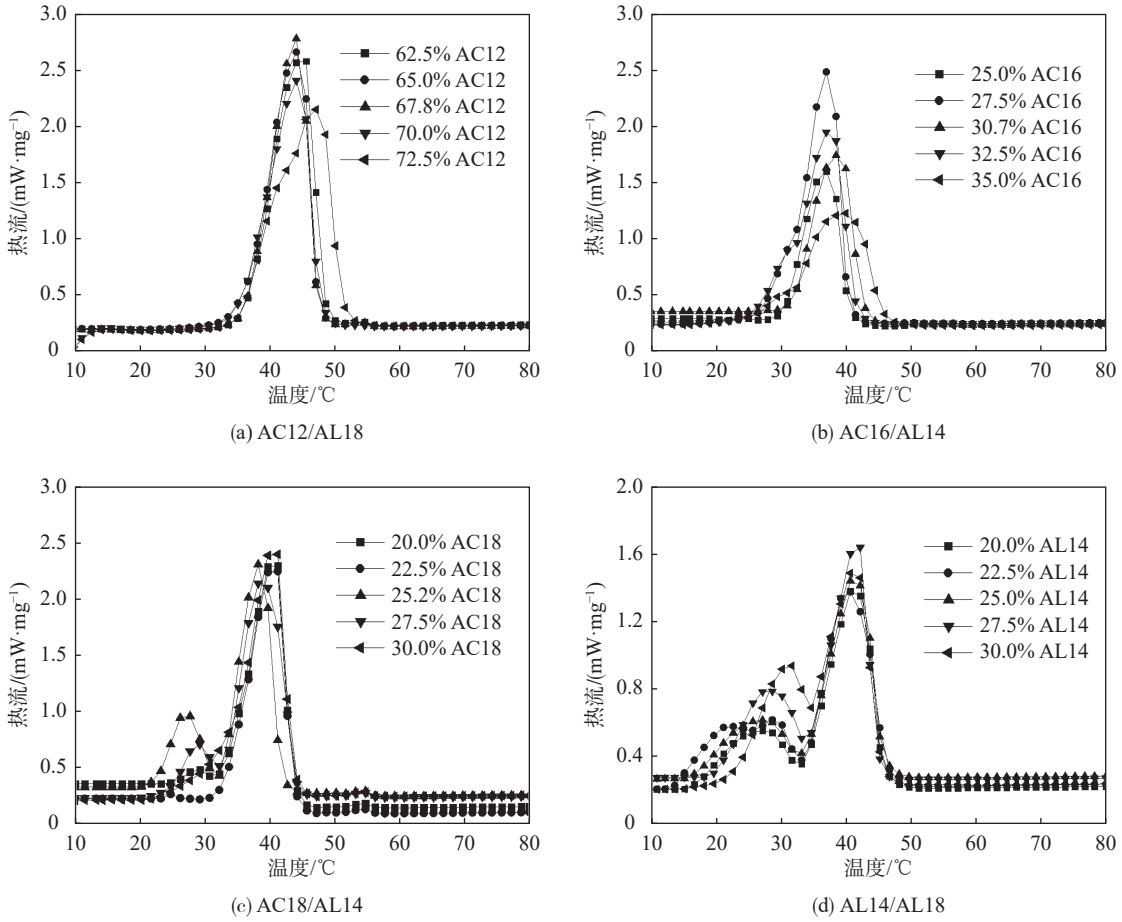

图 3 二元有机复合相变材料 DSC 相变特性

Fig. 3 Phase change characteristics of binary organic phase change materials

AC12/AL18(0.35%)，相对误差最大的为 AC14/AC18(4.61%)，而 AC16/AL14、AC18/AL14 的实验值与理论值相对误差在 3% 左右。

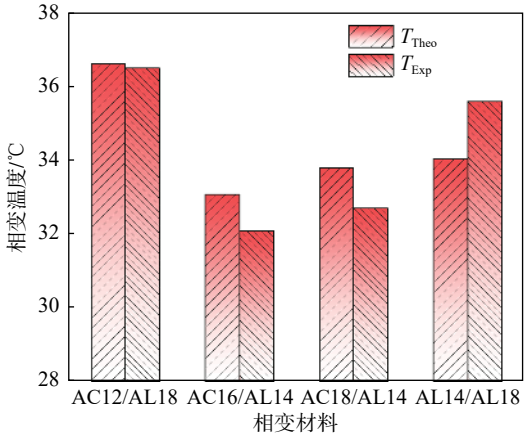

图 4 二元有机相变材料相变温度

Fig. 4 Phase change temperature of binary organic phase change materials

复合相变材料相变潜热 DSC 测量值(实验值)与准共晶理论计算值(理论值)如图 5 所示。AC12/AL18 共晶点相变潜热实验值与理论值是

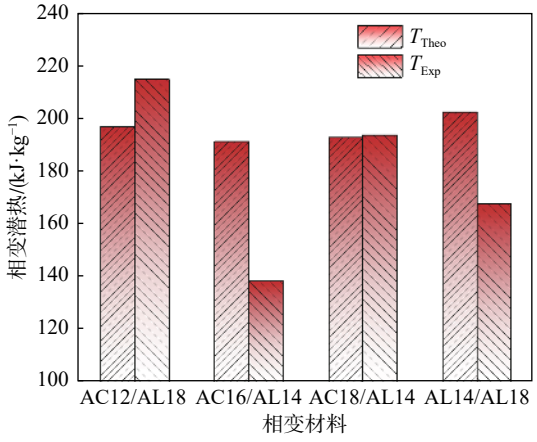

图 5 二元有机相变材料相变潜热

Fig. 5 Latent heat of binary organic phase change materials

4 种材料中最大的，分别为 215、197.09 kJ·kg^{-1}，实验值比理论值高，两者相对误差为 9.09%。

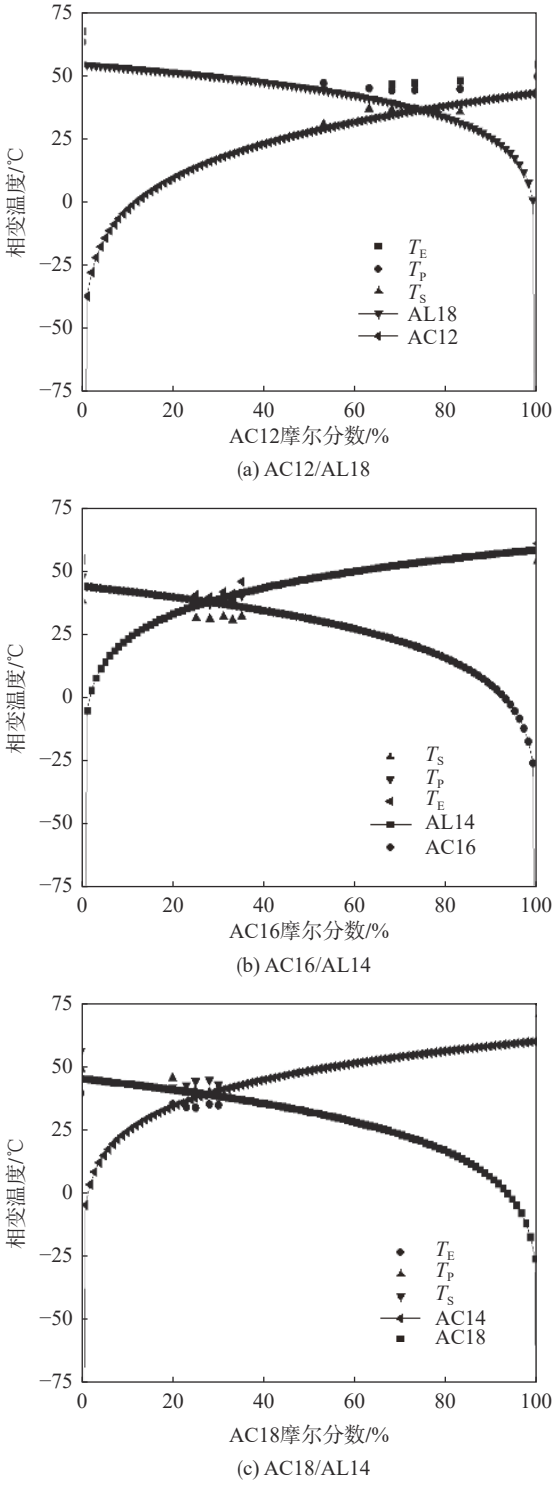

图 6　相变温度实验值与理论值的比较

Fig. 6　Comparison of experimental phase change temperature with theoretical ones

AC16/AL14 共晶点相变潜热实验值和理论值分别为 138.5、191.33 kJ·kg^{-1}，相对误差最大(27.61%)。AC18/AL14 共晶点相变潜热实验值比理论值增大 0.43%。而 AC14/AC18 的实验值与理论值相对误差也偏大(17.11%)，脂肪酸、脂肪醇物理混合形成的二元有机相变材料共晶点相变潜热实验值与理论值相对误差偏大，主要是由于两类物质相溶的同步性差异造成的，因此应尽可能选取相对误差较小的二元有机复合相变材料。

以 T_S、T_P、T_E 分别表示起始相变温度、峰值相变温度及结束相变温度，研究改变单一组分摩尔分数对复合相变材料相变特性的影响，实验值与理论值比较如图 6 所示。可以看出，AC12/AL18 在 AC12摩尔分数为 73% 左右时，T_E 与共晶点温度重合；AC16/AL14 在 AC16 摩尔分数为 28% 左右时，AC18/AL14 在 AC18 摩尔分数为 25% 左右时，T_P 与共晶点温度重合度较高。而 AL14/AL18 复配时没有产生共晶体，所以不考虑其实验值与理论值的比较。复合相变材料的相变温度理论值与实验值重合度高表明，准共晶系理论用于计算不同相变温度的二元共晶系具有一定的准确性。

4　结　论

二元有机复合相变材料因其无腐蚀性、过冷度低、价格低廉和可循环性的优点，在电子器件散热过程中极具发展潜力。本文将 4 种脂肪酸和 4 种脂肪醇进行复配，并基于准共晶理论和 DSC 测量研究复合相变材料的相变特性。研究结果表明：

(1)AC16/ AL18 共晶点相变潜热实验值和理论值相对误差为 27%，相变温度实验值与理论值计算相对误差为 2.96%；AC18/AL14相变温度实验值和理论值相对误差为 3.23%，相变潜热实验值比理论值增大 0.43%，但相变温度偏低。AL14/AL18 两种材料不能同时融化，两种组分材料之间没有形成晶体结构。AC12/ AL18 通过 DSC 测量得到的相变温度和相变潜热分别为 36.5 ℃、215 kJ·kg^{-1}，相变同步较为理想的 AC12

质量比范围为 67.8%～78.0%。

（2）脂肪酸类相变材料包含羧基，脂肪醇类相变材料包含羟基，两种有机相变材料混合时，没有发生化学变化，但官能团的极性会影响复合相变材料的互溶性，从而影响相变同步性，对于实验值和理论值的偏差也要考虑在研究之内。

参考文献：

[1] 黄史坚. 世界电子工业生产和市场发展 [J]. 电子产品世界, 2000(1): 10 - 11.

[2] 李昭亮. 我国电子产品安全标准的现状和发展方向 [J]. 计算机光盘软件与应用, 2011(9): 155.

[3] SABBAH R, KIZILEL R, SELMAN J R, et al. Active (air-cooled) vs. passive (phase change material) thermal anagement of high power lithium-ion packs: Limitation of temperature rise and uniformity of temperature distribution[J]. Journal of Power Sources, 2008, 182(2): 630 - 638.

[4] 王合叶, 赵永富, 盛中伟, 等. 可视化风冷装置对冷鲜鸡品质的影响 [J]. 中国农机化学报, 2017, 38(11): 67 - 71.

[5] KHATEEB S A, FARID M M, SELMAN J R, et al. Design and simulation of a lithium-ion battery with a phase change material thermal management system for an electric scooter[J]. Journal of Power Sources, 2004, 128(2): 292 - 307.

[6] KIZILEL R, LATEEF A, SABBAH R, et al. Passive control of temperature excursion and uniformity in high-energy Li-ion battery packs at high current and ambient temperature[J]. Journal of Power Sources, 2008, 183(1): 370 - 375.

[7] 张新星, 周园, 李翔, 等. 六水氯化钙基无机水合盐相变储能材料的研究进展 [J]. 储能科学与技术, 2018, 7(1): 40 - 47.

[8] 谢荣建, 戴征舒, 徐红艳, 等. 激光载荷相变材料热控装置力学性能及升温特性研究 [J]. 上海理工大学学报, 2017, 39(2): 114 - 119.

[9] 刘广英. 相变材料在半柔性路面中的应用 [D]. 西安: 长安大学, 2013.

[10] 闫全英, 张静, 刘莎. 脂肪酸和石蜡复合相变材料导热系数的研究 [J]. 新型建筑材料, 2018, 45(10): 68 - 71.

[11] ZHANG J J, ZHANG J L, HE S E, et al. Thermal studies on the solid-liquid phase transition in binary systems of fatty acids[J]. Thermochimica Acta, 2001, 369(1−2): 157 - 160.

[12] 赵建国, 郭全贵, 高晓晴, 等. 石蜡/膨胀石墨相变储能复合材料的研制 [J]. 新型炭材料, 2009, 24(2): 114 - 118.

[13] DIMAANO M N R, ESCOTO A D. Preliminary assessment of a mixture of capric and lauric acids for low-temperature thermal energy storage[J]. Energy, 1998, 23(5): 421 - 427.

[14] RAO Z H, WANG S F. A review of power battery thermal energy management[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011, 15(9): 4554 - 4571.

[15] BABY R, BALAJI C. Experimental investigations on phase change material based finned heat sinks for electronic equipment cooling[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2012, 55(5−6): 1642 - 1649.

[16] FOK S C, SHEN W, TAN F L. Cooling of portable hand-held electronic devices using phase change materials in finned heat sinks[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2010, 49(1): 109 - 117.

[17] ALAWADHI E M, AMON C H. Performance analysis of an enhanced PCM thermal control unit[C]//ITHERM 2000. The Seventh Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems. Las Vegas: IEEE, 2000: 289.

[18] 张寅平, 苏跃红, 葛新石. (准) 共晶系相变材料融点及融解热的理论预测 [J]. 中国科学技术大学学报, 1995, 25(4): 474 - 478.

[19] 蔡伟. 复合相变材料储能特性实验研究 [D]. 苏州: 苏州科技大学, 2016.

信息

我国新发现亿 t 级油气区

1 月 26 日，从中国石化获悉，该公司在塔里木盆地顺北油气田新发现亿 t 级油气区。据初步测算，该地区将增加资源量凝析油 8 800 万 t、天然气 2 900 亿 m^3。这对我国进一步提升能源供应能力、保障国家能源安全具有重要意义。

顺北油气田位于塔里木盆地中西部，其油气藏类型特殊，具有超深、超高压、超高温等特点，储层平均埋藏深度超过 7 300 m，是世界上埋藏最深的油气藏之一，勘探开发难度大。

国内续航时间最长氢动力无人机成功首飞

1 月 23 日，哈尔滨工业大学重庆研究院氢动力及低碳能源研究中心独立开发的“青鸥 30”氢动力无人机成功完成首飞。

“青鸥 30”氢动力无人机最大起飞重量 30 kg，翼展 4 m，飞行巡航速度 18～25 $m \cdot s^{-1}$，巡航时间 9 h，载重 3 kg，续航里程可达 800 km，续航能力相比于同等功率等级的锂电池无人机提升约 3～4 倍。该无人机采用了首创的撞击换气燃料电池动力系统，降低了燃料电池附属系统功率，大幅度提升了系统运行效率，是国内续航时间最长的垂直起降固定翼无人机，可应用于长时间侦查、线路巡检、航测、物流运输及火灾预警等场景。

国内首创高空风能项目开工

1 月 17 日，由中国能建投建营一体化实施的国内首创高空风能项目——安徽绩溪高空风能发电示范项目正式开工。该项目采用梯伞组合高空风能发电技术，属于国内首创。该项技术利用独有的伞梯式结构降落伞组吸收高空风能，通过缆绳带动地面卷扬机、齿轮箱转动，将风能转化为机械能，最后通过地面发电设备将机械能转化为电能，实现稳定持续发电。

高空风能是一种储量丰裕、分布广泛的可再生清洁能源。高空风能发电技术已列入国家发展和改革委员会《能源技术革命创新行动（2016—2030）》。项目位于安徽省宣城市绩溪县，充分利用当地优质风能资源，设计装机总容量 2×2.4 MW，一次规划分期实施。

上海生物能源再利用（二期）项目建成投产

1 月 13 日，位于老港生态环保基地内的上海生物能源再利用（二期）项目，按既定计划实现全量投产，进料量达到 1 500 $t \cdot d^{-1}$，包括餐厨垃圾处理设计规模为 900 $t \cdot d^{-1}$，厨余垃圾处理设计规模为 600 $t \cdot d^{-1}$。加上先前投产的一期项目，合计处理湿垃圾规模达到 2 500 $t \cdot d^{-1}$，成为华东地区最大的湿垃圾处理项目。

上海生物能源再利用（二期）项目于 2020 年 9 月 30 日开工建设。采用运行稳定、成熟可靠的“预处理+厌氧”作为主体工艺。厨余垃圾预处理系统采用“破碎+筛分+挤压”处理工艺，分为接料粗破、厨余筛分和出渣三个处理单元；物料输送采用双道门封闭及全厂微负压控制，不仅防止了异味外溢，而且采用先进除臭工艺，异味去除率达到了 99%，并能日产厌氧沼气达 15 万 m^3，沼气可实现供热和发电上网，日发电量可达 24 万 kW·h。

我国 6 座世界最大液化天然气储罐主体开建

2 月 20 日，中国海油盐城“绿能港”6 座世界单罐容量最大的 27 万 m^3 液化天然气储罐完成全部承台混凝土浇筑，储罐主体正式启动建设。中国海油盐城“绿能港”即江苏滨海液化天然气接收站项目，是国家天然气产供储销体系建设及互联互通重点规划项目，也是我国在建规模最大液化天然气储备基地。该项目将建造 10 座大型液化天然气储罐，包括先建的 4 座 22 万 m^3 储罐和扩建的 6 座 27 万 m^3 储罐。2023 年底全部投产运行后，液化天然气年处理能力可达 600 万 t。

三峡集团可再生能源年发电量居世界第一

截至 2022 年 1 月 12 日，中国三峡集团可再生能源装机容量突破 1 亿 kW，达 1.04 亿 kW；2021 年可再生能源年发电量超 3 400 亿 kW·h，同比增长 9.5%，居世界第一。

据测算，3 400 亿 kW·h 清洁电能可替代标准煤约 1 亿 t，减排二氧化碳约 2.8 亿 t。2021 年 9～12 月，在迎峰度冬、能源保供关键期，三峡集团持续加大出力，以三峡电站为代表的部分水电站发电量达历史同期最高水平。2021 年，三峡电站发电量再破千亿 kW·h，为我国经济社会平稳运行提供了可靠的清洁能源保障。

我国自主研制大型煤制天然气甲烷化催化剂实现首次应用

1 月 29 日，由中海石油气电集团有限责任公司（简称气电集团）与西南化工研究设计院有限公司（简称西南院）联合研制的甲烷化催化剂在庆华 15 亿 $m^3 \cdot a^{-1}$ 煤制天然气项目中首次应用，标志着我国自主大型煤制天然气甲烷化技术取得重大突破。

甲烷化是把煤炭变为清洁的天然气的关键核心技术之一。气电集团于 2010 年开始进行煤制天然气工艺技术和催化剂的研究，2013 年联合西南院开展联合研发，当年完成 350 $Nm^3 \cdot h^{-1}$ 甲烷化模试运行和催化剂的公斤级与吨级制备，2014 年完成了全球最大规模的 2 000 $Nm^3 \cdot h^{-1}$ 煤制天然气甲烷化全流程中试运行和 13 亿 $m^3 \cdot a^{-1}$ 工艺包编制。2021 年，自主甲烷化技术在庆华伊犁煤制气现场完成工业侧线试验。结果证明，自主甲烷化催化剂整体性能与国外先进催化剂处于同一水平，单程甲烷化转化效率、原料适应性和操作灵活性等方面优于国外产品。

世界最大规模新能源分布式调相机群在青海投运

1 月 23 日，青海海南新能源基地最后 3 台 50 Mvar 新能源调相机完成 168 h 试运行后正式转入商业运行，标志着世界最大规模新能源分布式调相机群在青海全面建成投运。调相机群投运后，可直接提升青海海南地区新能源外送能力 350 万 kW，预计年均增发新能源电量 70.2 亿 kW·h，若全部输送至华中地区，年均可替代当地火电原煤 318.9 万 t，减排二氧化碳 574.2 万 t。

此次建成投运的 21 台 50 Mvar 新能源分布式调相机群是世界首个、目前规模最大的新能源分布式调相机群。其中 21 台调相机全部由我国自主研发生产，具有完全知识产权，具备动态性能好、过载能力强等优点，动态电压支撑能力较传统电机提升 2 倍，温升降低 50%，过载能力提升 4.5 倍，可在 4 000 m 高海拔地区运行，设备性能优越，运行稳定可靠。

（王 波）