

有机-无机混合相变材料的热物性研究

吴丽彬, 陈威, 钱静
(江南大学, 无锡 214122)

摘要: **目的** 获得有效改善过冷, 同时保持较高潜热、性能稳定的混合相变储能材料。**方法** 分别制备不同质量比的硬脂酸/ $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、硬脂酸/ $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ 的混合材料, 使用高低温交变箱测试长期循环性能, 用温度记录仪测其步冷曲线, 得到相变温度和过冷度, 再使用参比温度曲线法对相变材料循环前后的相变潜热进行测试比较。**结果** 硬脂酸/ $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ 混合材料的过冷度降低至 3°C 左右, 经 300 次融化/凝固循环后过冷度维持恒定, 潜热衰减率在 20% 以内。**结论** 采用结构相似的 2 种混合相变材料均可改善无机水合盐的过冷度。硬脂酸与 $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 相容性不佳, 相变潜热的衰减加剧, 循环稳定性变差, 而硬脂酸与 $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ 的相容性良好, 性能表现稳定, 是一种良好的储能材料。

关键词: 有机-无机相变材料; 相变潜热; 过冷度; 循环稳定性

中图分类号: TB484.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2017)09-0113-05

Thermophysical Property of Organic-Inorganic Phase Change Mixed Material

WU Li-bin, CHEN Wei, QIAN Jing
(Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

ABSTRACT: The work aims to obtain the phase change energy-storage mixed material that can effectively improve supercooling and maintain higher latent heat and stable performance. The mixed materials with different mass ratios of stearic acid/ $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ and stearic acid/ $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ mixtures were respectively prepared. The long-term cycling performance was tested with low temperature alternating box and its step cooling curve was tested with temperature logger to obtain the phase change temperature and supercooling degree. Then, the reference temperature curve method was adopted to test and compare the latent heat of phase change before and after the cycling of phase-change material. The supercooling degree of stearic acid/ $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ mixed material reduced to around 3°C . After melting/solidification cycling for 300 times, the supercooling degree remained constant and the attenuation rate of latent heat was within 20%. Both phase-change mixed materials with similar structures can improve the supercooling degree of inorganic hydrous salt. Stearic acid and $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ are of poor compatibility, the latent heat of phase change attenuates dramatically and the cycling stability becomes worse. However, stearic acid and $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ are of good compatibility and with stable performance, which is a good material for energy storage.

KEY WORDS: organic-inorganic phase change materials; latent heat of phase change; supercooling degree; cycling stability

相变材料(PCM)通过其物态转换可以储存(释放)能量, 实现能量在不同时间、空间的转换, 缓解能源危机^[1]。在温度敏感材料的运输与保存^[2]以及食品的包装^[3]、运输和保存^[4]等方面, 相变材料可以满足其对温度的要求, 且温度要求不同的产品均能找到

相应的相变材料^[5-6]。

根据组分可将相变材料大致分为有机类、无机类和混合类^[7]。无机相变材料具有高潜热与高导热系数且成本低廉的优势^[8-9], 但存在相分离和过冷等问题, 而有机相变材料热稳定性好, 无过冷与相分离现

收稿日期: 2016-07-20

作者简介: 吴丽彬(1990—), 女, 江南大学硕士生, 主攻包装材料与制品。

通讯作者: 钱静(1968—), 女, 博士, 江南大学副教授, 主要研究方向为运输包装、机械设计等。

象,但其导热系数低。如何利用有机-无机混合相变材料,实现优势互补是一项重要的研究方向。杨颖^[10]等利用氯化铵和乙二醇制备液体混合蓄冷材料,性能稳定,适用于医药、食品、冰箱及冷库等蓄冷装置;李夔宁等^[11]用丙三醇、乙酸钠和水按质量比为 1:1:8 的比例混合得到一种新型三元混合蓄冷材料,可大规模应用在低温物流、冷库冷藏领域;唐志伟^[12]等利用结构相似原理,将同为单斜晶系的硬脂酸和 $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ 混合,两者具有良好的相容性,既能抑制水合盐的过冷,又能适当增加脂肪族的比热容,优势互补,但该项研究循环次数太少,对实际应用的意义不大,具有一定局限性。

有机-无机混合材料的混合机理研究并不多,文中寻找一种新的混合理论与方法来促进有机-无机混合材料的研发。晶体结构相似或相同的有机与无机相变材料混合,良好的相容性可能会使两者优势互补。硬脂酸性能稳定,是少有的晶体特征明显的有机相变材料,与 $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 均为单斜晶系晶体,结构相似,且与 $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ 有相同的单斜晶系菱形晶体结构。文中通过筛选晶体结构类似的硬脂酸来改善无机物的过冷度,同时保持体系较高潜热和性能稳定。

1 实验

1.1 材料和设备

实验材料:硬脂酸、六水硝酸镁、十二水磷酸氢二钠,分析纯,国药化学试剂有限公司。实验设备:温度记录仪, L93-4+, 杭州路格科技有限公司; 高低温交变试验箱, JY-K-80T, 上海巨怡设备有限公司。

1.2 相变材料的制备

为探究晶体结构相似或相同的有机-无机相变材料共混的性能,在 25.4 g 的 $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 中分别添加质量分数为 2%, 4%, 6%, 8%, 10%, 12%, 14%, 16% 的硬脂酸,并以未添加硬脂酸的 $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 作为对照组;在 20 g 的 $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ 里分别添加质量分数为 5%, 10%, 15%, 20%, 25% 的硬脂酸,并以未添加硬脂酸的 $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ 作为对照组。为了更好地促进两者的相容性,添加质量分数为 2%~3% 的聚丙烯酰胺^[13]。最后将各组混合相变材料分别按相应比例进行称量,充分研磨均匀并装入试管,放入高低温交变箱,使之完全熔化,制得相变材料。

1.3 热物性测试

一般采用差示扫描量热法(DSC)与参比温度曲线法(*T*-history)测定相变材料的潜热。DSC 法设备昂贵,测试样品质量很小,一般为 5~10 mg,对于纯物质测试结果比较精确,但对于混合物而言,取样太小时混

合不均会导致测试结果产生较大偏差。由于文中研究的对象是混合材料,不宜使用 DSC 测定,因此,选用操作简单,测试质量较大的 *T*-history 法来测定相变潜热,且该法可同时测定相变温度与过冷度。

T-history 法^[14]最早由张寅平提出,在满足毕奥数小于 0.1 的情况下,使用集总参数法分析传热。将装有待测物和参比物(导热油)的试管升温至相变温度以上并保持一段时间,使之完全处于液体状态,然后将 2 只试管置于低温环境中缓慢降温,用温度记录仪记录温度变化,直至稳定在环境温度附近,实验装置见图 1。

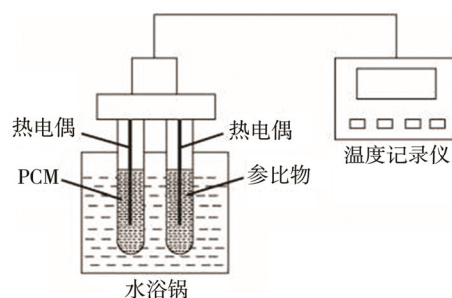


图 1 *T*-history 法实验装置

Fig.1 Schematic of *T*-history experimental device

1.4 长期循环试验

循环稳定性能是考察相变材料经过多次融化/凝固之后性能是否稳定的重要指标,在实际应用中具有重大意义。将各组和参比物放入高低温交变箱中进行热循环测试,并测试热循环过程中相变温度、过冷度、潜热等数据的变化。对于硬脂酸/ $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 混合材料,一个循环过程包括:在 15 min 内从 25 °C 升温至 115 °C,恒温 65 min,然后在 90 min 内降温至 25 °C,在 25 °C 恒温保持 15 min。对于硬脂酸/ $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ 混合材料,一个循环过程包括:在 85 min 内从 25 °C 升温至 75 °C,在 75 °C 恒温 60 min,然后在 85 min 内降温至 25 °C,在 25 °C 恒温保持 20 min。

2 结果与讨论

2.1 硬脂酸/ $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 混合材料

2.1.1 相容性

硬脂酸并不完全溶解于 $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$,未溶解部分浮于上层,说明相容性不佳。由于已溶解的硬脂酸对 $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 的热物性有不同程度的影响,因此文中仍有必要通过计算硬脂酸实际溶解量来探究混合材料的热物性变化。

当硬脂酸完全融化成液态时,通过计算上层硬脂酸未溶解量以获得实际溶解量,见表 1,未溶硬脂酸的质量 $m = \rho h \pi R^2$ 。其中 ρ 为硬脂酸密度(0.847 g/m³); R 为石英试管的直径(22 mm); h 为硬脂酸液面高度。

从结果来看,当硬脂酸的理论质量分数为 10%时溶解程度最高,之后添加越多,溶解度越小。以下基于硬脂酸实际质量分数对混合材料的热性能进行分析。

表 1 实际硬脂酸配比
Tab.1 The actual mass ratio of stearic acid in mixture

硬脂酸理论质量分数/%	硬脂酸液面高度/mm	未溶硬脂酸质量/g	已溶硬脂酸质量/g	硬脂酸实际质量分数/%
2	1	0.3220	0.196	0.77
4	2.5	0.8049	0.253	0.98
6	4	1.2879	0.332	1.30
8	5	1.6098	0.590	2.27
10	6.5	2.0928	0.727	2.78
12	9	2.8900	0.570	2.19
14	11.5	3.7026	0.427	1.46
16	14	4.5400	0.300	1.06

2.1.2 相变温度、过冷度和相变潜热

混合相变材料的相变温度、过冷度和相变潜热见表 2。结果表明,混合材料的相变温度波动范围在 2 ℃ 以内,说明硬脂酸对 $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 相变温度的影响并不明显。 $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 纯物质的过冷度高达 10.45 ℃,不利于潜热释放。添加硬脂酸能降低 $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 的过冷度,尤其当硬脂酸的实际质量分数为 2.78%,过冷度仅有 0.4 ℃。除质量分数为 0.98% 外,硬脂酸的实际质量分数越高,对 $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 的过冷抑制效果越明显。硬脂酸的添加对 $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 的相变潜热均有所提高,这与硬脂酸比 $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 潜热高有关,由于两者只是简单的物理共混,其潜热值位于两组分潜热之间。当硬脂酸的实际质量分数为 2.78% 时,相变潜热达 180.4 J/g,较 $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 的相变潜热(166.09 J/g)提高 8.61%。实际配比越高,混合相变材料的相变潜热也有所提高。

表 2 硬脂酸/ $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 的热物性
Tab.2 The thermophysical properties of stearic acid/ $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$

试样	硬脂酸实际质量分数/%	相变温度/℃	过冷度/℃	相变潜热/(J·g ⁻¹)
A	0	89	10.45	166.095
B	0.77	89.15	8.25	170.04
C	0.98	87.55	2.25	172.4
D	1.06	88.85	8.05	170.85
E	1.30	87.5	6.45	174.85
F	1.46	87.25	6.25	174.85
G	2.19	88.85	4.3	175.15
H	2.27	88.4	4.3	176.35
I	2.78	87.4	0.4	180.4

已溶解的硬脂酸能有效改善 $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 的过冷情况。硬脂酸在 $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 的溶解度越大,对改善过冷与提高潜热值越有利。该实验中当硬脂酸在 $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 中的理论质量分数为 10% 时,溶解度最大(2.78%),此时能最有效地抑制 $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 的过冷,同时较大程度提高其相变潜热。

2.1.3 循环稳定性

文中从相变温度、过冷度、相变潜热来分析混合材料的循环稳定性能。循环次数对硬脂酸 / $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 混合材料的热物性影响见图 2。从相变

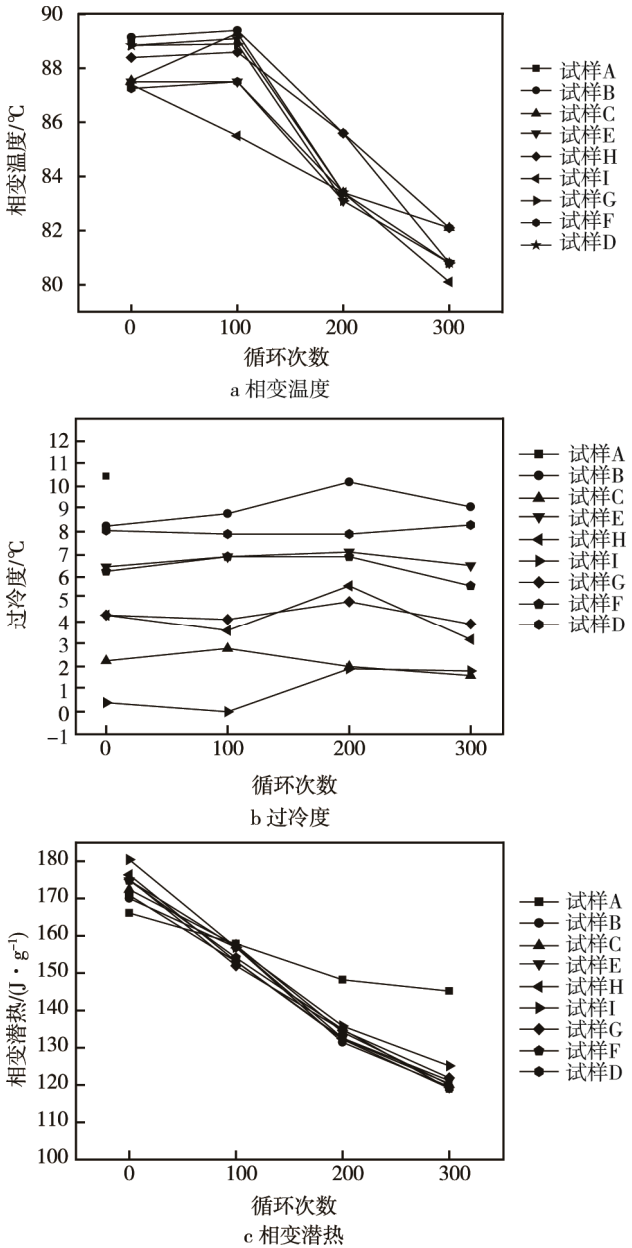


图 2 循环次数对硬脂酸/ $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 混合材料的热物性影响
Fig.2 Effect of cycle times on thermal properties of stearic acid/ $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ composites

温度来看,各配比组在前100次热循环变化并不明显,一直维持在87~89℃,中间100次下降明显,后100次降至80~82℃;从过冷度来看,随着循环次数的增加,过冷度波动变化无明显规律;从相变潜热来看,经过300次的循环,硬脂酸的添加将 $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 的衰减率从13%上升至30%,加剧衰减,不符合实际应用要求,因此硬脂酸与 $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 混合材料不宜作为储能材料。

2.2 硬脂酸/ $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ 混合材料

2.2.1 相变温度、过冷度和相变潜热

与 $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 不同的是, $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ 与硬脂酸表现出良好的相容性,并未发现分层现象,因此直接探讨硬脂酸与 $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ 混合材料的热物性。 $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ 是一种常温水合盐,熔点为35.5℃,熔解热为265 kJ/kg^[15],在该实验中,测得 $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ 的熔点为38.2℃,熔解热为240 kJ/kg,与文献值相差不大。硬脂酸对 $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ 的热物性影响见表3。从相变温度来看,硬脂酸的质量分数越高,相变温度越低,因此可根据实际应用中对相变温度的需求来控制硬脂酸的添加量;从过冷度来看,硬脂酸的添加均能减小 $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ 的过冷度,说明硬脂酸在混合物中起成核剂的作用,其中硬脂酸质量分数为15%,20%,25%时对 $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ 的过冷抑制效果较为明显;从相变潜热来看,硬脂酸的添加对 $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ 的相变潜热均有所降低。从过冷度与相变潜热的角度综合考虑的话,硬脂酸质量分数为15%,20%,25%的混合材料均比较理想。

表3 硬脂酸/ $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ 混合材料的热物性
Tab.3 The thermophysical properties of stearic acid/
 $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ composites

试样	硬脂酸的质量 分数/%	相变温度/ ℃	过冷度/℃	相变潜热/ (J·g ⁻¹)
1	0	38.2	9.7	240.10
2	5	36.8	6.6	221.02
3	10	36.2	5.7	225.93
4	15	35.4	3.1	229.95
5	20	35.4	3.6	233.47
6	25	34.6	3.3	234.97

2.2.2 循环稳定性

循环次数对硬脂酸/ $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ 混合材料的热物性影响见图3。从相变温度来看,不论是纯物质还是混合物,都表现出良好的稳定性;从过冷度来看,随循环次数的增加,表现为小范围波动变化,具有良好的稳定性;从相变潜热分析, $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ 纯物质的相变潜热随着循环次数增加表现为大幅度下降,

而添加硬脂酸后,衰减情况均有所改善。经过300次循环后,将30%的衰减率降低至20%以内,说明硬脂酸对于 $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ 来说具有稳定的作用。

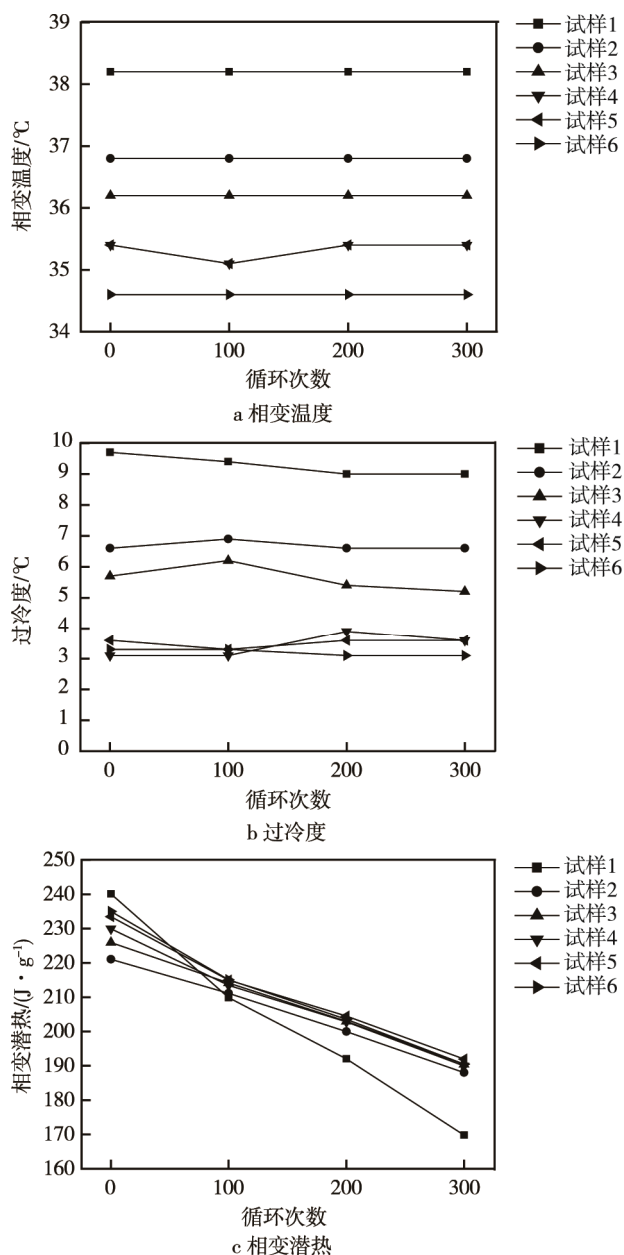


图3 循环次数对硬脂酸/ $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ 混合材料的影响
Fig.3 Effect of cycle times on thermal properties of stearic
acid/ $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ composites

3 结语

研究晶体结构相似与相同的有机-无机混合相变材料的热物性,得出如下结论。

1) 硬脂酸与 $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 虽晶体结构相似,但相容性不佳,已溶解的硬脂酸虽能有效改善 $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 的过冷情况,提高体系潜热值,但随着循环次数的增加,硬脂酸加剧 $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 的潜热衰减,不符合实际应用要求,因此硬脂酸与

Mg(NO₃)₂·6H₂O 混合材料不宜作为储能材料。

2) 硬脂酸与 Na₂HPO₄·12H₂O 相容性良好, 硬脂酸对 Na₂HPO₄·12H₂O 的相变温度具有一定的调节作用, 对过冷有抑制效果, 其中硬脂酸质量分数为 15%, 20%, 25% 时均能有效将过冷度降至 3 ℃, 且经 300 次循环后, 仍能维持较低水平, 此外, 硬脂酸可有效减缓 Na₂HPO₄·12H₂O 的潜热衰减, 经 300 次循环后将衰减率从 30% 降至 20% 以内。

综合来看, 文中采用结构相同或相似的 2 种混合相变材料均可改善无机水合盐的过冷度, 但晶体结构相似, 相容性未必好。硬脂酸与 Mg(NO₃)₂·6H₂O 都属于单斜晶系, 相容性不佳, 加剧相变潜热的衰减, 稳定性变差。硬脂酸与 Na₂HPO₄·12H₂O 同为单斜晶系菱形, 相容性良好, 硬脂酸既能改善 Na₂HPO₄·12H₂O 过冷, 且能保持体系较高潜热和性能稳定。

参考文献:

- [1] 于党伟, 卢立新. 乙烯基微胶囊相变材料的研究进展[J]. 包装工程, 2013, 34(23): 127—131.
YU Dang-wei, LU Li-xin. Research Progress in Vinyl Micron-capsulated Phase Change Materials[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(23): 127—131.
- [2] AHMED M, MEADE O, MEDINA M A. Reducing Heat Transfer across the Insulated Walls of Refrigerated Truck Trailers by the Application of Phase Change Materials[J]. Energy Conversion Management, 2010(1): 383—392.
- [3] HOANG H M, LEDUCQ D, PÉREZ-MASIA R, et al. Heat Transfer Study of Submicro-Encapsulated PCM Plate for Food Packaging Application[J]. International Journal of Refrigeration, 2015(2): 151—160.
- [4] GIN B, FARID M M. The Use of PCM Panels to Improve Storage Condition of Frozen Food[J]. Journal of Food Engineering, 2010(10): 372—376.
- [5] 菅宗昌, 潘嘹, 卢立新. 一种典型潜热型控温包装的有限元分析[J]. 包装工程, 2014, 35(9): 14—17.
JIAN Zong-chang, PAN Liao, LU Li-xin. Analysis of a Typical Latent Heat Type Temperature-control Package[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(9): 14—17.
- [6] 潘嘹, 卢立新, 王军. 控温包装控温时间预测模型研究[J]. 包装工程, 2014, 35(5): 27—30.
- PAN Liao, LU Li-xin, WANG Jun. Prediction Model for the Shelf Life of Insulating Package[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(5): 27—30.
- [7] RATHOD M K, BANERJEE J. Thermal Stability of Phase Change Materials Used in Latent Heat Energy Storage Systems: A Review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013(18): 246—258.
- [8] ZALBA B, MARIN J M, CABEZA L F, et al. Review on Thermal Energy Storage with Phase Change: Materials, Heat Transfer Analysis and Applications[J]. Applied Thermal Engineering, 2003(23): 251—283.
- [9] SHARMA S D, SAGARA K. Latent Heat Storage Materials and Systems: A Review[J]. International Journal of Green Energy, 2005, 2(1): 1—6.
- [10] 杨颖, 沈海英. 混合低温相变蓄冷材料的实验研究[J]. 低温物理学报, 2009, 31(2): 144—147.
YANG Ying, SHEN Hai-ying. Investigation on Cryogenics Cool Thermal Energy Storage Phase Change Composition Material[J]. Chinese Journal of Low Temperature Physics, 2009, 31(2): 144—147.
- [11] 李夔宁, 郭宁宁, 王贺. 有机相变蓄冷混合材料的研究[J]. 化工新型材料, 2009, 37(4): 87—88.
LI Kui-ning, GUO Ning-ning, WANG He. Research on the Organic Phase Change Material for Energy Storage[J]. New Chemical Materials, 2009, 37(4): 87—88.
- [12] 唐志伟, 赵化涛, 陈志锋. 硬脂酸与 Na₂HPO₄·12H₂O 混合相变材料储能性能[J]. 北京工业大学学报, 2009, 35(6): 809—814.
TANG Zhi-wei, ZHAO Hua-tao, CHEN Zhi-feng. Study on Mixture Stearic Acid and Na₂HPO₄·12H₂O as Heat Storage Phase Change Material[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2009, 35(6): 809—814.
- [13] 张芸, 钱静. 可降解凝胶蓄冷剂的制备及性能分析[J]. 包装工程, 2012, 33(23): 40—44.
ZHANG Yun, QIAN Jing. Preparation and Performance Analysis of Biodegradable Gelatinous Refrigerant[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(23): 40—44.
- [14] 张寅平, 郑迎松, 葛新石. 多组相变材料多个热物性的同时测定性[J]. 科学通报, 1997(14): 1559—1562.
ZHANG Yin-ping, ZHENG Ying-song, GE Xin-shi. A Method of Multi-group Phase Change Material Simultaneous Determination Thermal Properties[J]. Science Bulletin, 1997(14): 1559—1562.