

基于跨季节储热的相变材料的制备及研究

汪 翔 章学来* 袁维烨 华维三 韩兴超

(上海海事大学商船学院,上海 201306)

摘 要 制备了 4 组不同浓度的醋酸钠水溶液。将纯三水醋酸钠分别在 70℃、75℃、80℃、85℃ 不同加热温度中熔化后进行冷却,来研究加热温度对过冷度的影响。4 组样品在 85℃ 水槽中熔化后分别在 10℃ 和 0℃ 低温槽中冷却,手动播种三水醋酸钠晶粒触发结晶放热,来研究醋酸钠水溶液的稳定过冷和放热性能;并通过 DSC 测试醋酸钠水溶液的相变温度和潜热值。结果发现,过冷度随着加热温度的升高而增大,加热温度超过 80℃ 时,三水醋酸钠可以实现稳定过冷。醋酸钠水溶液的相变温度与潜热值随着浓度的降低而降低,且过冷液体随浓度的降低过冷状态越稳定。其中 60% 浓度的醋酸钠水溶液相变温度为 58.4℃,潜热值最大,达到 265.4 kJ/kg,无相分离,适合作为跨季节储热的相变材料。

关键词 水合盐,醋酸钠水溶液,稳定过冷,结晶,相变材料,跨季节储热

Preparation and experimental study of phase change material based on seasonal heat storage

Wang Xiang Zhang Xuelai Yuan Weiye Hua Weisan Han Xingchao

(Merchant Marine Academy, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306)

Abstract Sodium acetate water solution with four different concentrations were prepared. The pure sodium trihydrate was cooled after melting in 70℃, 75℃, 80℃, 85℃ four different heating temperatures to study the effect of heating temperature on the supercooling. Four groups of samples were melted in the water bath of 85℃ cooled in the low temperature bath of 10℃ and 0℃, and triggered crystallization exothermic by manual seeding sodium acetate trihydrate grains to study the stable supercooling and exothermic properties of sodium acetate water solution. And phase transition temperature and latent heat of sodium acetate solution was determined by DSC test. The results showed that supercooling degree increased with the increase of heating temperature, sodium acetate trihydrate can achieve stable undercooling when the heating temperature exceeded 80℃, and the phase transition temperature and latent heat of sodium acetate solution decreased with decreasing concentration, and the stability of the supercooled liquid state was greater. The phase transition temperature of 60% concentration of sodium acetate was 58.4℃, the latent heat was maximum, reaching 265.4 kJ/kg, and no phase separation. It was more suitable for the phase change material of seasonal heat storage.

Key words hydrated salt, sodium acetate water solution, stable undercooling, crystallization, phase change material, seasonal heat storage

太阳能是一种清洁、无污染、分布广泛的可再生能源,但在利用过程中存在不稳定性、间歇性、利用效率低等问题,利用相变储能技术可以有效解决这些问题,应对目前世界面临的能源消耗巨大、环境污染严重的挑战^[1-2]。相变储能技术的核心是相变材料,其中水合盐是一种常用的无机相变材料,经常应用于中低温储热系统中^[3]。其中,十水硫酸钠^[4-5]、

六水氯化钙^[6-7]、三水醋酸钠^[8-9]、五水硫代硫酸钠^[10-11]等无机水合盐是近年来的研究热点,但这些材料因存在过冷度大的问题使其应用受到了限制。为了减少水合盐的过冷度,国内外展开了一系列研究。例如,李金田等^[12]对三水醋酸钠(SAT)的过冷机理进行阐述,并进行了实验研究,发现纯 SAT 的过冷度大于 40℃,添加 5%(wt,质量分数,下同)的

基金项目:国家重点研发课题(2018YFD0401305);国家自然科学基金项目(51376115);上海市科委项目(16040501600)

作者简介:汪翔(1994-),男,硕士研究生,主要研究方向为太阳能相变蓄热技术。

联系人:章学来(1964-),男,教授,博士生导师,研究方向为相变储能材料的研究及应用及二元冰真空制备。

$\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$, 过冷度达到 18°C ; 再添加 3% 的明胶做增稠剂后, 过冷度降低至 4°C 。何媚质等^[6]利用 $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 与 20% $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 制备二元共晶盐相变储热体系, 并添加 1% $\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 和 0.5% 羧甲基纤维素(CMC), 过冷度降至 0.57°C 。

然而, 广西大学的张子乾团队^[13]和华北电力大学的周国兵团队^[14-15]认为, 如果使水合盐相变材料实现稳定过冷, 在环境温度维持过冷状态, 只要存在一个外力触发, 可以使相变材料储存的潜热释放出来; 如此便可以将夏季的能量储存到冬天释放, 达到跨季节储热的目的。维持水合盐的稳定过冷是长期储存热能的有效地办法, 因为过冷液体可以与环境温度保持很长一段时间的热平衡。

针对如何维持稳定过冷, 目前国内外的研究比较少, Furbo 等^[16]对一种基于醋酸钠水混合物稳定过冷的季节性蓄热装置进行了实验研究, 并在此基础上提出关于稳定过冷的季节性蓄热的发展建议。Dannemand 等^[17]基于三水醋酸钠混合物稳定过冷的原理, 对两套储热单元进行实验测试, 其中三水醋酸钠与水混合物在换热过程中的换热能力明显高于三水醋酸钠与 CMC 混合物的换热能力。Sandnes 等^[18]测试了十二水合磷酸氢二钠、三水醋酸钠和商业热袋 3 种过冷水合盐的焓-温度曲线和过冷特性, 指出在第一次冷却阶段会不可避免地存在热量损失, 但余下的潜热会储存下来, 并在很长的一段时间内不会有进一步的热损失。Zhou 等^[19]在 3 种形状的储热单元中(尖角矩形、圆角矩形、圆柱形)进行了三水醋酸钠稳定过冷特性的研究, 发现三水醋酸钠在圆角矩形中比在尖角矩形中过冷更加稳定, 并在圆形矩形单元中研究了几种影响稳定过冷度的因素。

本研究制备了能实现稳定过冷, 用于跨季节储热的相变材料。研究了加热温度和冷却温度对其过冷度的影响, 并通过示差扫描量热仪(DSC)测试其储热性能。

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

相变材料三水醋酸钠(分析纯, 纯度 $\geq 98\%$), 国药集团化学试剂有限公司; 无水醋酸钠(分析纯, 纯度 $\geq 98\%$), 国药集团化学试剂有限公司; 去离子水, 国药集团化学试剂有限公司。使用的实验仪器如表 1 所示。

表 1 实验仪器一览表

名称	测量范围	精度/灵敏度	生产商
DK-S600 电热恒温水槽	$0 \sim 100^\circ\text{C}$	$\pm 0.1^\circ\text{C}$	上海衡平仪器有限公司
低温恒温槽	$-40 \sim 100^\circ\text{C}$	$\pm 0.1^\circ\text{C}$	上海申贤恒温设备有限公司
Agilent 34972A	$-200 \sim 200^\circ\text{C}$	$\pm 0.01^\circ\text{C}$	安捷伦科技(中国)有限公司
T 型热电偶	$-60 \sim 300^\circ\text{C}$	$\pm 0.05^\circ\text{C}$	欧米茄(OMEGA)
200F3 型差示扫描量热仪(DSC)	$-170 \sim 600^\circ\text{C}$	温度: $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 热流: $\pm 0.1 \mu\text{W}$	德国 Netzsch 公司
FA2004 型分析天平	$0 \sim 200\text{mg}$	0.1mg	上海方瑞仪器有限公司

1.2 实验方法

1.2.1 醋酸钠水溶液的制备

以 30g 样品为基准, 称取不同质量的去离子水加入相应质量比的无水醋酸钠中, 配制无水醋酸钠质量分数分别为 60%、54.5%、50% 的醋酸钠水溶液; 另外配制 30g 三水醋酸钠(无水醋酸钠质量分数为 60.4%)作为参照项, 共同构成 4 组样品。每种样品各配制两份, 一份用来测定步冷曲线, 另一份用于 DSC 潜热值测定; 分别装入到相同的 50mL 烧杯中; 为了防止醋酸钠盐水在加热过程中失去结晶水, 用橡胶塞密封烧杯口, 且密封一层保鲜膜。

1.2.2 不同加热温度的研究

将纯三水醋酸钠样品分别放入 70°C 、 75°C 、 80°C 、 85°C 恒温水槽中熔化至澄清液体, 然后放入 20°C 低温恒温槽中冷却, 研究不同加热温度对三水醋酸钠过冷度的影响。

1.2.3 触发结晶研究

结晶是固体物质以晶体状态从蒸气、溶液或熔融物中析出的过程, 结晶过程也是水合盐完成放热的重要过程, 分诱发阶段、晶体生长阶段、晶体再生阶段三步完成^[20]。过冷液体储热的主要研究方向是在期望温度下手动控制或自动触发过冷液体结晶放热^[21]。触发方式有电信号触发、手动播种、搅拌、摩擦、冲击波和超声波振动等。本研究采用手动播种的方法, 在过冷液体中加入三水醋酸钠晶粒触发醋酸钠水溶液过冷液体结晶放热。

1.2.4 不同冷却温度的研究

将 4 组样品放入 85°C 恒温槽中加热熔化 45min 后, 然后放入 10°C 和 0°C 低温槽中静置冷却, 无外界干扰; 当温度达到环境温度, 进行手动播种触发 4 组

样品结晶放热;然后利用热电偶、Agilent34972A 数据分析仪连接电脑采集温度数据。其步冷曲线测定实验系统如图 1 所示。

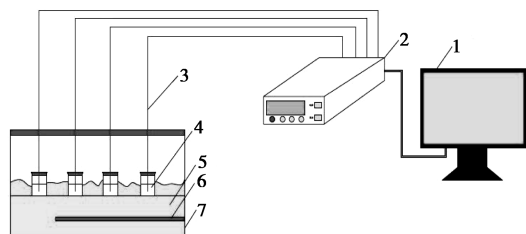


图 1 步冷曲线测定实验系统图

(1:电脑;2:温度数据采集仪;3:T 型热电偶;4:醋酸钠盐水溶液;5:恒温循环水;6:电加热棒;7:恒温水浴槽)

1.2.5 潜热值的测定

通过差示扫描热量仪测试,可精确获取样品的相变温度以及相变潜热。测试样品时,用钢作为参比物校准,温度区间设置为 $20\sim 75^{\circ}\text{C}$,升降温速率均为 5K/min ;采用液氮对相变材料进行降温;氮气作为保护气和吹扫气,保护气流速为 60mL/min ,吹扫气流速为 20mL/min ;样品质量为 $10\sim 15\text{mg}$,分别测试 4 组样品从环境温度加热到 75°C 得到的蓄热量作为该材料的潜热值。

2 结果与分析

2.1 过冷液体观测

将 4 组样品从 85°C 恒温水浴槽熔化后,静置于空气中冷却,达到三水醋酸钠理论凝固点温度 58°C ,发现 4 组样品没有结晶放热;继续于空气中冷却,达到 15°C 时观察,4 组样品继续保持液体状态,没有结晶放热;当样品温度与环境温度相平衡时,4 组样品仍然保持液体状态,没有结晶放热,但是 4 组样品的液体形态有所不同。图 2 为 4 组醋酸钠水溶液的过冷液体形态。由图可见,纯三水醋酸钠冷却到环境温度时,过冷液体呈乳白色,液体表面和烧杯壁面布满细小的树枝状晶体。可见熔化的纯三水醋酸钠在冷却过程中,液体来不及成核或晶核来不及长大,无法形成晶态固体物质。60%醋酸钠盐水过冷液体烧杯底部和下部壁面出现少量树枝状晶体,上部液体仍然清澈,这与烧杯底部粗糙度有一定的关系^[19]。54.5%和 50%醋酸钠盐水过冷液体非常纯净,可知这两种盐水在冷却过程中,难以形成凝固晶体的结晶核,避免了晶化过程,以致达到熔点以下几十度还能继续保持液体状态。由此可以得出,醋酸钠盐水浓度越小,过冷液体越稳定,越有利于形成

稳定过冷。

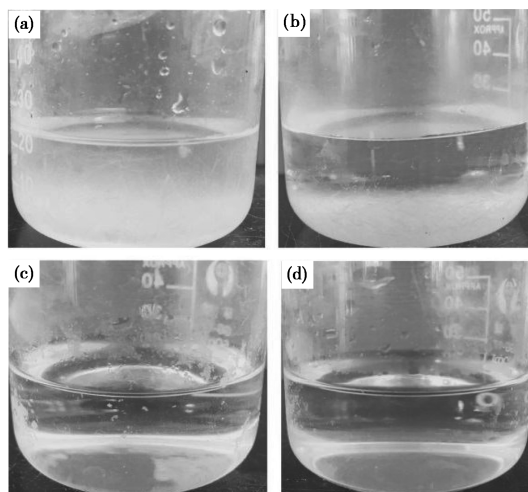


图 2 4 组醋酸钠水溶液的过冷液体形态

[(a)纯三水醋酸钠;(b)60%醋酸钠水溶液;(c)54.5%醋酸钠水溶液;(d)50%醋酸钠水溶液]

过冷液体是介于非晶态和液体的中间态物质,是一种亚稳定状态,极易受到杂质和外部干扰的影响,当其具备凝固所需的结晶核,便可以让过冷液体迅速凝固成晶体。因此,相变材料要结晶放热必须具备可靠的成核能力^[22]。

2.2 加热温度对三水醋酸钠过冷影响分析

在不同加热温度条件下熔化后的三水醋酸钠熔体在 20°C 水冷下步冷曲线如图 3 所示。

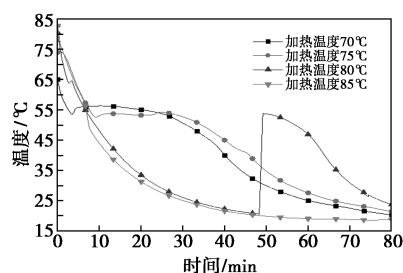


图 3 不同加热温度对三水醋酸钠过冷度影响

由图可见,随着加热温度的升高,三水醋酸钠的过冷度越来越大, 70°C 加热条件下,过冷度最小,在 5°C 左右; 75°C 加热条件下,过冷度在 6°C 左右;在 70°C 加热温度条件下,其相变平台和放热效果明显比 75°C 加热温度条件下好;在 80°C 加热温度条件下,其冷却到 20°C 左右才结晶放热; 85°C 加热条件下,则达到环境温度也没有发生结晶,无法相变释放潜热,实现稳定过冷。

根据热力学第二定律,在等温等压条件下,晶体凝固过程自发进行的方向是体系自由能降低的方向^[20],见公式(1)。

$$\Delta G_v = Q\Delta T/T_m \quad (1)$$

式中, ΔG_v 为液相到固相转变的单位摩尔自由能变化, kJ/kmol ; Q 为吸/放热量, 晶体凝固时向环境放热, Q 为负值, kJ/kmol ; ΔT 为过冷度, 是熔点 T_m 与实际凝固温度 T 之差, $^{\circ}\text{C}$ 。

根据公式(1)可知, 要想晶体凝固自发进行, 则要使 $\Delta G_v < 0$, 必须使 $\Delta T > 0$ 。因此, 相变材料冷却凝固放热需要有过冷度作为结晶驱动力。当提高加热温度时, 相变材料蓄热吸收的能量越大, 成核自由能 ΔG_v 越大, 则相变材料凝固放热需要更大的结晶驱动力。因此, 过冷度随加热温度的升高而增大。

2.3 冷却温度对醋酸钠水溶液过冷影响分析

通过不同加热温度实验, 可以发现当加热温度超过 80°C 时, 可以实现稳定过冷, 这也是相变材料实现跨季节储热的重要条件之一。因此, 将 4 组样品在 85°C 加热温度下熔化后, 分别放置在 10°C 和 0°C 低温槽中冷却, 其步冷曲线分别如图 4 和图 5 所示。

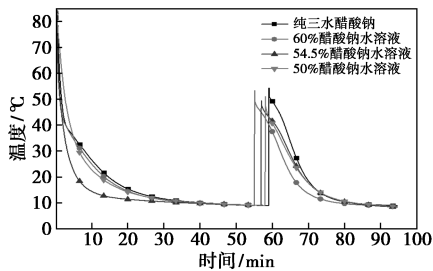


图 4 10°C 水浴下步冷曲线

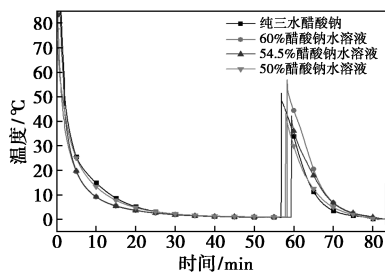


图 5 0°C 水浴下步冷曲线

从图 4 和图 5 步冷曲线可以看出, 60%、54.5%、50% 醋酸钠和纯三水醋酸钠在 10°C 和 0°C 两种工况下冷却, 均变成稳定的过冷液体, 达到环境温度未发生结晶相变, 实现了稳定过冷。在两种工况下, 手动播种触发结晶放热后, 醋酸钠水溶液的相变温度随着浓度的降低而减小。在 10°C 工况下(图 4), 60% 醋酸钠水溶液的相变温度最大, 达到 58.5°C ; 而纯三水醋酸钠的相变温度为 53.0°C , 小于三水醋酸钠的理论相变温度 58.4°C [20]。这是由

于三水醋酸钠的结晶动力较差导致的, 结晶动力越好, 相变温度越接近理论值。图 5 可以看出, 相同的冷却温度, 不同浓度的结晶放热效果不同, 60% 醋酸钠水溶液的放热效果最好, 50% 醋酸钠水溶液放热效果最差。一方面, 结晶放热效果与相变材料的潜热值有关, 浓度大的醋酸钠水溶液结晶形成的三水醋酸钠晶体较多, 潜热值越大, 放热效果越好; 同时, 这也跟传热系数有关, 醋酸钠水溶液的浓度越低, 多余的水的含量越多, 考虑到水的换热系数比相变材料大, 其传热过程不单单是通过相变材料导热, 还通过水导热。另外, 根据图 4 和图 5, 两组步冷曲线均没有体现出相变材料的相变平台, 这是因为冷却温度和冷却速率较大, 热量散失量远大于材料潜热释放量。

2.4 不同浓度醋酸钠溶液的潜热值分析

用 DSC 测定 4 组样品的相变温度和潜热值, 结果如表 2 所示。从表中可以看出, 纯三水醋酸钠与 60% 醋酸钠水溶液的相变温度均为 58.4°C , 且相变潜热接近。考虑相变材料的稳定过冷特性, 60% 醋酸钠水溶液形成的过冷液体更稳定, 更易维持稳定过冷。随着醋酸钠水溶液浓度的下降, 其相变温度和潜热值均在减小, 说明水加入到无水醋酸钠中, 通过熔化和结晶后, 仍然可以形成具有潜热的三水醋酸钠; 但是无水醋酸钠的浓度大小会影响相变温度和相变潜热, 浓度越小, 相变温度越低, 潜热值越小。而当无水醋酸钠的浓度大于 60.4% 时, 即加入到无水醋酸钠的去离子水太少, 溶液体系无法熔化, 无法结合形成相变材料, 失去储热特性; 当醋酸钠水溶液的浓度太低, 会形成相分层, 影响材料的储热特性。因此, 综合考虑, 60% 醋酸钠水溶液作为跨季节储热相变材料最好, 其过冷稳定, 潜热值大, 且没有相分层。

表 2 不同浓度醋酸钠溶液的相变温度和潜热值

	相变温度/ $^{\circ}\text{C}$	潜热值/ $(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1})$
纯三水醋酸钠	58.4	261.9
60% 醋酸钠水溶液	58.4	265.4
54.5% 醋酸钠水溶液	57.0	209.8
50% 醋酸钠水溶液	51.2	148.1

3 结论

将不同质量的去离子水加入相应比例的无水醋酸钠中, 配制了 4 组浓度的醋酸钠水溶液, 在不同的加热温度下熔化, 在不同冷却温度下冷却, 手动播种

触发结晶,并进行 DSC 测试,可以得到以下结论:

(1) 纯三水醋酸钠随着加热温度的升高,其过冷度越大,当加热温度超过 80℃ 时,可以实现稳定过冷,这是相变材料实现跨季节储热的重要条件之一。

(2) 4 组浓度的醋酸钠水溶液在 85℃ 加热温度下蓄热,在 10℃ 和 0℃ 条件下冷却,均实现了稳定过冷,且溶液的浓度越低,过冷液体的状态越稳定。

(3) 随着醋酸钠水溶液浓度的降低,其相变温度和潜热值也相应减小,其中 60% 醋酸钠水溶液的相变温度为 58.4℃;潜热值最大,为 265.4 kJ/kg,且没有相分离现象,更加有利于作为稳定过冷的材料,更加适合应用于跨季节储存太阳能。

参考文献

- [1] 王腾月,刁彦华,赵耀华,等.微热管阵列式太阳能空气集热-蓄热系统性能试验[J].农业工程学报,2017,33(18):148-156.
- [2] 闫云飞,张智恩,张力,等.太阳能利用技术及其应用[J].太阳能学报,2012(s1):47-56.
- [3] Cunha J P D, Eames P. Thermal energy storage for low and medium temperature applications using phase change materials-a review[J]. Applied Energy, 2016, 177: 227-238.
- [4] 徐笑锋,章学来, Jotham, 等.十水硫酸钠相变蓄冷保温箱保冷特性的试验研究[J].农业工程学报,2017,33(22):308-314.
- [5] 刘欣,徐涛,高学农,等.十水硫酸钠的过冷和相分离探究[J].化工进展,2011(s1):755-758.
- [6] 何媚质,杨鲁伟,张振涛.无机相变材料 $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 的过冷特性[J].化工学报,2017,68(11):4016-4024.
- [7] 徐云龙,刘栋.六水氯化钙相变材料过冷性质的研究[J].材料工程,2006(z1):218-221.
- [8] 王智平,郭长华,王克振,等.相变材料三水醋酸钠储热性能实验研究[J].化学工程,2011,39(5):27-30.
- [9] 卢大杰,胡凡,赵斌斌,等.三水合醋酸钠纳米成核剂的性能研究[J].工程热物理学报,2012,33(8):1279-1282.
- [10] 高学农,胡小冬,陈思婷,等.五水硫代硫酸钠相变蓄热材料的

制备[J].华南理工大学学报(自然科学版),2014(2):8-13.

- [11] 李海丽,李旭,冷从斌,等.膨胀石墨/五水硫代硫酸钠相变储能复合材料热性能[J].复合材料学报,2016,33(12):2941-2951.
- [12] 李金田,茅新丰,李伟华,等.三水醋酸钠的过冷机理与实验研究[J].制冷学报,2009,30(5):32-35.
- [13] 张德佳,谷怀珍,吕桂桃,等.醋酸钠水溶液过冷特性探究[J].广西物理,2015(2):24-26.
- [14] 项宇彤.水合盐过冷蓄能单元设计与触发释能特性实验研究[D].北京:华北电力大学(北京),2016.
- [15] 王雪皎.相变材料过冷跨季节蓄能地板采暖系统模拟[D].北京:华北电力大学,2015.
- [16] Furbo S, Fan J, Andersen E, et al. Development of seasonal heat storage based on stable supercooling of a sodium acetate water mixture[J]. Energy Procedia, 2012, 30 (Complete): 260-269.
- [17] Dannemand M, Dragsted J, Fan J, et al. Experimental investigations on prototype heat storage units utilizing stable supercooling of sodium acetate trihydrate mixtures[J]. Applied Energy, 2016, 169: 72-80.
- [18] Sandnes B, Rekstad J. Supercooling salt hydrates; stored enthalpy as a function of temperature[J]. Solar Energy, 2006, 80(5):616-625.
- [19] Zhou G, Xiang Y. Experimental investigations on stable supercooling performance of sodium acetate trihydrate PCM for thermal storage[J]. Solar Energy, 2017, 155: 1261-1272.
- [20] 张仁元.相变材料与相变储能技术[M].北京:科学出版社,2009.
- [21] Safari A, Saidur R, Sulaiman F A, et al. A review on supercooling of phase change materials in thermal energy storage systems[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2017, 70: 905-919.
- [22] Chen S L, Wang P P, Lee T S. An experimental investigation of nucleation probability of supercooled water inside cylindrical capsules[J]. Experimental Thermal & Fluid Science, 1998, 18(4): 299-306.

收稿日期:2018-05-28

修稿日期:2019-06-28

(上接第 73 页)

黏性和形变损耗能量开始小幅度下降。PA66 的加入对丁苯橡胶导热性能有明显影响,但未改性纤维与橡胶基体粘合差的问题也给丁苯橡胶复合材料导热系数的测定带来了困难,引入了误差,但整体导热性能都有所提升。

参考文献

- [1] 谭珏,文江福,俞强.尼龙 66/聚醚氧共混体系的共混形态和力学性能[J].现代塑料加工应用,2017,29(6):5-8.
- [2] 李汉堂.短纤维-橡胶复合材料的发展前景[J].现代橡胶技术,2006,32(4):5-12.
- [3] 鲁学峰,郝智,罗筑,等.天然短纤维/橡胶复合材料研究进展[J].化工新型材料,2016,44(11):17-19.
- [4] Tao J, Zhou Z, Shu X, et al. Experimental investigation on the yield loci of PA66[J]. Polymer Testing, 2016, 51: 148-150.

- [5] 刘春利,罗筑,李斌,等.MA-g-HTPB 制备及对芳纶纤维增强丁苯橡胶复合材料性能的影响[J].化工新型材料,2017,45(12):76-78,82.
- [6] 孙云波,鲁学峰,廖丹萍,等.不同改性尼龙短纤维增强天然橡胶复合材料的性能[J].科学技术与工程,2017,17(33):236-241.
- [7] 战艳虎,孟艳艳,夏和生.不同维数填料对橡胶 Payne 效应的影响[J].高分子材料科学与工程,2017,33(1):92-96.
- [8] 盛翔,郝智,鲁学峰.尼龙短纤维增强天然橡胶复合材料的性能研究[J].化工新型材料,2017,45(12):209-211.
- [9] 吴兴德,刘春林,吴爱平,等.尼龙基导热复合材料制备与性能研究[J].化工新型材料,2015,43(2):78-80,120.
- [10] 李丽,肖红,程博闻,等.单纤维及其集合体的导热性能研究现状[J].丝绸,2016,53(8):20-25.
- [11] 杨雨舟,刘晓霞,肖俐,等.纤维排列方向对热线法导热系数测试的影响[J].轻纺工业与技术,2015,44(1):23-25.
- [12] 孙丽萍,晏雄.纤维导热性能的研究[J].玻璃钢/复合材料,1998(2):5-7.

收稿日期:2018-05-26