

# 纳米石墨烯片—石蜡复合相变蓄冷材料 制备方法及其热物性研究

Preparation and thermal properties of nano-GnPs as stuffing into the  
cool storage phase change materials

高茂条      王春煦      吴学红      王燕令      苏 震

GAO Mao-tiao    WANG Chun-xu    WU Xue-hong    WANG Yan-ling    SU Zhen

(郑州轻工业学院能源与动力工程学院, 河南 郑州 450002)

(School of Energy and Power Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou, Henan 450002, China)

**摘要:** 纳米石墨烯材料由于其良好的热物性已成为研究热点。文章以纳米石墨烯片为填料, 通过机械法和化学改性法, 得出在纳米石墨烯片—石蜡复合相变材料的分散体系中聚酯型超分散剂的最佳添加量为 2%。试验通过沉淀、分离得到复合相变材料的稳定均匀分散液, 分析研究得出纳米石墨烯片的添加量对复合相变材料的相变起始点、终止点以及相变峰值等温度参数并没有太大影响, 但纳米石墨烯片的添加量过多过少都会使复合相变材料的相变潜热降低, 当纳米石墨烯片的添加量为 1.5% 时, 复合相变材料的相变潜热较纯石蜡升高 0.7%。同时纳米石墨烯片—石蜡复合相变材料具有良好的循环稳定性。

**关键词:** 石蜡; 纳米石墨烯片; 蓄冷材料; 相变潜热

**Abstract:** Because of its good thermal property, nano-graphite (nano-GnPs) materials has become a research hotspots. The best adding amount of polyester type dispersant of dispersed system of nano-GnP-sparaffin composite phase change materials (PCMs) was 2% by mechanical and chemical modification methods with nano-GnPs as stuffing. The stable uniform dispersion of composite PCMs was obtained by precipitation and separation. The adding amount of nano-graphene had no effect on the starting and termination points and peak of phase change. However, the adding amount of nano-GnPs will lower the phase change latent heat of composite PCMs in some degree. Phase change latent heat of composite PCMs was 0.7% higher than pure paraffin when the adding amount of nano-GnPs was 1.5%.

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(编号: 51476148); 河南省杰出青年基金项目(编号: 154100510014); 河南省教育厅创新团队项目(编号: 17IRTSTHN029)

**作者简介:** 高茂条, 女, 郑州轻工业学院在读硕士研究生。

**通信作者:** 吴学红(1979—), 男, 郑州轻工业学院副教授, 博士。

E-mail: wuxh1212@163.com

**收稿日期:** 2016—10—19

Moreover, a good stability in the process of circulation with nano-GnPs as stuffing was found in composite PCMs.

**Keywords:** paraffin; nano-GnPs; cool storage material; phase change latent heat

在食品冷链的运输及储存过程中, 稳定的冷藏温度可以减缓和防止食品中微生物的生长、化学反应的速度以及酶的活性<sup>[1]</sup>。实际情况下在食品冷链的运输及储存过程中存在有较大的温度波动, 这对食品的品质及安全造成重大的损害<sup>[2-4]</sup>。敞开式食品冷藏陈列柜作为食品冷链的末端设备, 对保障食品的品质起到了重要作用, 但由于其陈列方式以及运行过程存在前后排食品温差较大、融霜期间温度波动较大以及柜内温度分布不均等缺点, 直接影响到储存食品的质量<sup>[5-6]</sup>。

近些年来, 运用相变蓄冷技术来减小食品冷链中的温度波动以及温度分布不均已经成为研究趋势<sup>[7]</sup>。Azzouz 等<sup>[8]</sup>将相变材料放置在蒸发器后侧, 利用相变蓄冷材料为家用冰箱提供冷量, 结果表明, 加入相变蓄冷材料的冰箱比传统冰箱性能有明显提高。Raffaele 等<sup>[9]</sup>研究利用相变蓄冷材料来解决食品冷冻和冷藏保温集装箱的诸多弊端, 试验结果表明填充相变材料的蓄冷板可使集装箱保持冷藏或冷冻温度 7 d。利用相变蓄冷材料能在很小的温差下, 吸收或释放大量的相变潜热, 在制冷系统工作时间内储存冷量, 在制冷系统停机融霜期间释放出它所存储的冷量, 由此来缓冲融霜期间柜内的温度波动。应用于食品冷藏陈列柜的相变蓄冷材料一般选用无毒、无腐蚀性、适用于中低温蓄冷、储热密度高、化学性能稳定、价格便宜、相变前后体积变化小以及相变潜热大的固液相变材料石蜡<sup>[10]</sup>; 但石蜡作为优选相变材料在使用期间, 也存在较大的缺点即导热系数低<sup>[11]</sup>。热传导能力差使石蜡在使用期间不能发挥出优良的储热能力。

国内外学者<sup>[12-13]</sup>对于提高石蜡的导热系数也做出了很多的研究,发现提高相变材料导热系数的主要方法是添加高导热性固体填料以及多孔介质。填料一般为金属粒子<sup>[14]</sup>、金属化合物<sup>[15]</sup>、纳米碳纤材料<sup>[16-17]</sup>。Yang等<sup>[18]</sup>研究表明纳米铝粉的加入有效地提高了石蜡等相变蓄能材料的导热系数。Wang等<sup>[19]</sup>对提高石蜡基复合材料导热性能也做出了许多研究,通过添加铜、锌等金属粒子及其部分化合物粒子、添加膨胀石墨和碳纤维等高导热性材料来提高复合材料的导热系数。Elgafy等<sup>[20]</sup>通过用物理融合法制成石蜡—纳米碳纤维复合相变蓄冷材料,相变材料的导热系数由于纳米碳纤维的加入而增加。Yu等<sup>[21]</sup>将纳米石墨烯片作为高导热性填料,填充到环氧树脂基体中制备复合蓄能材料,其导热率比基体提高了2.6倍。添加各种高导热性材料对于提高石蜡的导热性能都有一定的作用,但在加入这些纳米粒子的同时也会使复合相变材料的相变潜热较纯石蜡有所降低。

综上所述,高导热性材料的加入对提高石蜡的导热性有很好的效果,但对于高导热性材料的选择还需考虑其腐蚀性、易分散性、稳定性。纳米石墨烯片是由多层石墨烯组成的,粒径和厚度均达到纳米级别,其导热系数高达3 000 W/(m·K),具有较高的比表面积,界面热阻小,能在一定程度上提高蓄能材料的储放热效率<sup>[22-24]</sup>。纳米石墨烯片还具有性能稳定,成本低,易获取等特点,但纳米材料在非极性溶剂中的团聚和沉淀是很大的问题,目前,国内外还没有合适的方法使纳米材料较好地长期稳定地溶于非极性溶剂中。本试验拟将纳米石墨烯片作为高导热性填料加入相变蓄冷材料石蜡RT4中,探究制备均匀分散的纳米石墨烯片—石蜡复合相变材料的方法、纳米石墨烯作为填料的添加量对于石蜡的相变起始点温度、峰值点温度、相变焓等热物性参数的影响,以及复合相变材料的循环稳定性,旨在为纳米石墨烯片石蜡复合相变蓄冷材料在冷藏陈列柜中的应用提供依据。

1 试验方案

1.1 试验材料

石蜡RT4:由不同的直链烷烃构成,分子式 $C_nH_{2n+2}$ ,白色油状液体,德国Rubitherm公司;  
纳米石墨烯片:纯度大于99.5%,直径为5~10 nm,层数小于30,中科时代纳米公司。

聚酯型超分散剂WinSpurse3050:含有胺锚固基团的聚合物,非极性超分散剂,浅棕色膏状,维波斯新材料(潍坊)有限公司。

1.2 试验仪器

超声波清洗机:C15型,中土和泰(北京)科技有限公司;  
定时恒温磁力搅拌器:90-2型,上海沪西分析仪器有限公司;  
电子天平:ME204型,梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司;  
差示扫描量热仪:DSC214型,德国Netzsch公司。

1.3 分散方法

由于纳米石墨烯片表面不含有亲水或亲油的官能团而

表现出憎水憎油的特性,以及纳米石墨烯片较大的比表面积而存在的界面之间的强大的范德华力,使纳米石墨烯片在使用中易重新堆叠在一起形成不可逆转的石墨。而石蜡RT4在常温状态下为油性液体状态,由于这些性质,纳米石墨烯片作为填料在石蜡RT4中的均匀稳定分散也是一大难题。

国内外学者<sup>[25-27]</sup>对石墨烯的分散性能进行了许多研究,但大多数是针对石墨烯在水性溶剂以及石墨烯在制备过程中的分散性能的研究。对于石墨烯及纳米石墨烯片在油性溶剂中分散性能的研究却很少。赵磊等<sup>[28]</sup>研究发现以SPAN-80为分散剂,当分散剂的添加量为1%时可以使少量石墨烯分散在基础油中。一般的分散方法都是采用机械法和化学改性法:机械法一般采用超声震荡和磁力搅拌,但只是通过机械破坏了固体颗粒之间的附着力。化学改性法一般采用添加剂改变固体颗粒表面的化学性质使粒子相互排斥。本研究在复合相变材料的制备过程中,添加聚酯型超分散剂,结合机械法得到稳定均匀的纳米石墨烯片—石蜡复合相变材料的分散液。聚酯型超分散剂是一种非极性超分散剂,适用于固体颗粒在有机溶剂及非水介质中的分散。在纳米石墨烯片—石蜡复合相变材料的制备过程中,聚酯型超分散剂在纳米石墨烯片的表面包裹形成多个锚固点,超分散剂自身的亲油性长链与溶剂接触,使复合相变材料更具有空间稳定性而达到稳定均匀分散。聚酯型超分散剂的添加量试验:选择纳米石墨烯片的添加量为1%,配比分散剂添加量分别为1%,2%,3%3组样品。样品使用磁力搅拌器恒温20℃搅拌1 h,超声波清洗机恒温20℃超声1 h,静置观察48 h分离上层分散液。

1.4 复合相变材料的制备方法

按照纳米石墨烯片的添加量为0.0%,0.5%,1.0%,1.5%,2.0%配比5组10 mL的纳米石墨烯片—石蜡复合相变材料的样品。具体试验步骤:在配比好的不同比例的纳米石墨烯片—石蜡的5组样品中均添加在分散试验中分散效果较好的质量分数的聚酯型超分散剂;使用磁力搅拌器恒温20℃搅拌1 h,超声波清洗机恒温20℃超声1 h。将5组样品静置72 h后,观察样品情况,试管上层为均匀分散液,试管底部为纳米石墨烯片不能均匀分散的沉淀物,分离试管上层稳定均匀分散液,观察120 h。5组样品均经过沉淀分离观察过程,稳定的均匀分散液制备合格见图1。

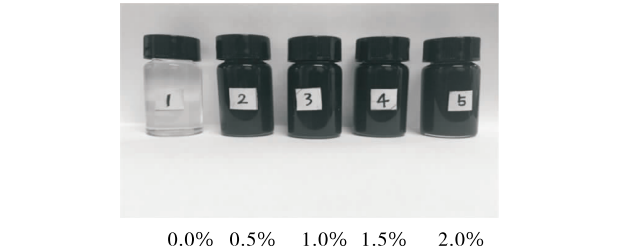


图1 不同质量分数纳米石墨烯片质量分数的上层稳定分散液  
Figure 1 The stable uniform dispersion of different mass fractions of nano-GnP

1.5 复合相变材料热物性及稳定性测试方法

应用 DSC 对试验样品的相性能进行分析,各组试验样品均取 10 mg,在氦气保护下设定升降温区间为 -25~25℃。升降温速率设定为 5 K/min。每组样品测试 3 次,为确保仪器测量误差,测量数据选用后两次测量平均值。稳定性分析时选用复合相变蓄冷材料中纳米石墨烯片的添加量为 1.5% 的样品,通过 DSC 循环 30 次来进行复合相变材料的稳定循环测试。

2 结果与分析

2.1 聚酯型超分散剂添加量对复合相变材料分散性能的影响

由图 2 可知,在纳米石墨烯片含量相同时当分散剂的添加量为 2% 时,试管底部纳米石墨烯片的沉淀量最小,分散效果最好,这是因为聚酯型超分散剂的分散性能与分散体系的粘度和固体颗粒的大小有直接关系,在一定的范围内聚酯型超分散剂的分散稳定性随分散剂添加量的增加先增大后减小,这也与张幸静<sup>[29]</sup>对聚酯型超分散剂的研究一致。

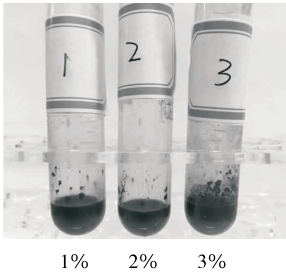


图 2 添加不同量分散剂的复合相变材料分散液中的沉淀量  
Figure 2 The precipitation of the adding different amount of dispersant in the composite PCMs

2.2 复合相变材料相变温度

通过测量各组样品的温度变化曲线,分析 5 组样品的热物性参数。由于石蜡 RT4 是由多种烷烃混合而成的,在其发生凝固和融化的相变过程只有熔融点和凝固点的大致温度范围,并没有准确的数值,在其热物性的分析中采用与试验测得纯石蜡 RT4 的热物性作对比分析。

由图 3、4 可知,5 组样品的融化曲线和凝固曲线波动基本一致,在融化 DSC 曲线和凝固 DSC 曲线中可分别观察到其融化起始点温度与凝固起始点温度基本一致,发生融化和凝固相变反应达到峰值点的温度也基本一致。对 5 组样品

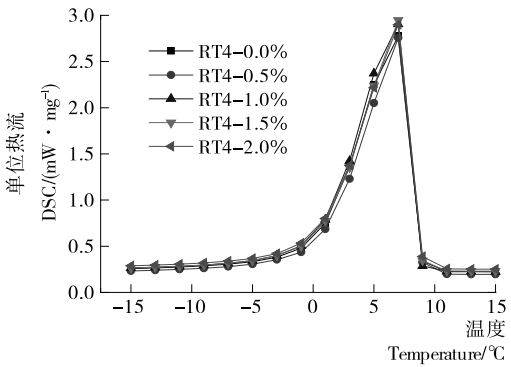


图 3 不同样品的 DSC 融化曲线  
Figure 3 DSC melting curves for different samples

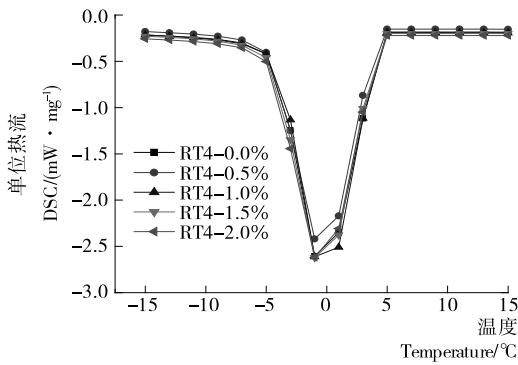


图 4 不同样品的 DSC 凝固曲线  
Figure 4 DSC freezing curves for different samples

的融化 DSC 曲线、凝固 DSC 曲线进行分析结果见表 1。由表 1 可知,复合相变材料的相变起始点温度、终止点温度以及峰值温度均与试验分析的石蜡 RT4 的温度范围基本一致。这说明石蜡 RT4 在进行相变蓄冷时,纳米石墨烯片的加入以及加入量的大小不会影响石蜡的各相变温度参数。

2.3 复合相变材料相变潜热

在 DSC 测量得到的温度曲线上,相变材料开始发生相变时的点、相变材料结束相变时的点以及吸放热峰围成的面积为相变材料的相变潜热。分析得到,5 组样品的相变潜热随填料纳米石墨烯片的添加量的变化趋势见图 5。

复合相变材料样品的相变潜热的熔融段和凝固段变化趋势基本一致,在纳米石墨烯片的添加量小于 1.5% 时,其相变潜热随纳米石墨烯片添加量的增加先减小后增加,当纳米石墨烯片的添加量大于 0.5% 时复合相变材料的相变潜热近似于线性增长;但当纳米石墨烯片的添加量大于 1.5% 时,复合相变材料的相变潜热减小。当纳米石墨烯片的添加量为

表 1 各组样品的热物性参数  
Table 1 The thermal physical parameters of the samples

| 纳米石墨烯片含量/% | 融化起始点/℃ | 融化终止点/℃ | 融化峰值/℃ | 融化潜热/(kJ·kg <sup>-1</sup> ) | 凝固起始点/℃ | 凝固终止点/℃ | 凝固峰值/℃ | 凝固潜热/(kJ·kg <sup>-1</sup> ) |
|------------|---------|---------|--------|-----------------------------|---------|---------|--------|-----------------------------|
| 0.0        | 1.22    | 8.42    | 6.74   | 157.6                       | 3.51    | -3.89   | -0.45  | 160.3                       |
| 0.5        | 1.41    | 8.42    | 7.04   | 148.8                       | 3.46    | -4.07   | -0.55  | 152.6                       |
| 1.0        | 1.52    | 8.67    | 7.21   | 151.5                       | 3.45    | -4.30   | -0.71  | 155.2                       |
| 1.5        | 1.43    | 8.35    | 6.91   | 158.7                       | 3.48    | -4.04   | -0.48  | 162.4                       |
| 2.0        | 1.42    | 8.41    | 6.98   | 157.3                       | 3.51    | -4.11   | -0.61  | 161.2                       |

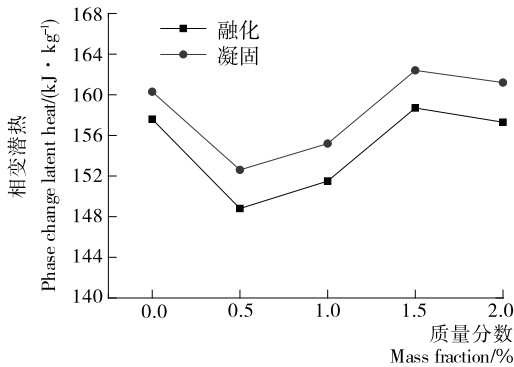


图 5 复合相变蓄冷材料的相变潜热随纳米石墨烯片添加量的变化

Figure 5 The change of the phase change latent heat of composite cool storage PCMs along with the change of the adding of nano-GnPs

0.5%时,复合相变蓄冷材料的相变潜热降低 5%,是由于在复合相变材料中,相变潜热主要是由石蜡 RT4 提供,纳米石墨烯片对于复合相变材料的潜热并没有贡献,由于复合相变材料中纳米石墨烯片的添加石蜡的量相应地减小导致复合相变材料的相变潜热降低。而在纳米石墨烯添加量为 1.0%和 1.5%时,复合相变材料的相变潜热线性增加,且当添加量为 1.5%时其相变潜热高于纯石蜡 RT4 的相变潜热 0.7%,是由于纳米石墨烯片的添加量增加虽然会导致复合相变材料的相变潜热降低,但复合相变材料中纳米石墨烯片的增加也会相应地增加相变材料的整体分子能,从而促进复合相变材料自身的蓄热能力增强。当纳米石墨烯片的添加量为 2.0%时,复合相变材料的相变潜热又比纳米石墨烯片添加量为 1.5%时下降 0.7%,这是由于当一定量的石蜡溶液中纳米石墨烯片的添加量增大时,石蜡溶解度却在减小,过量的纳米石墨烯片使石蜡量减小,使复合相变材料相变潜热降低。所以在复合相变材料中以纳米石墨烯片为填料时,当纳米石墨烯片的添加量在一定的范围时,纳米石墨烯片的质量分数越高相变材料的分子势能增加越明显。

2.4 复合相变材料稳定性分析

试验选用复合材料中纳米石墨烯片的添加量为 1.5%的样品,循环 30 次,测量结果见图 6、7。

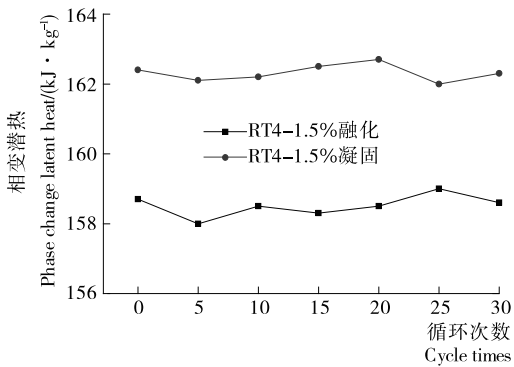


图 6 循环次数对相变潜热的影响

Figure 6 The influence of cycle time on phase change latent heat

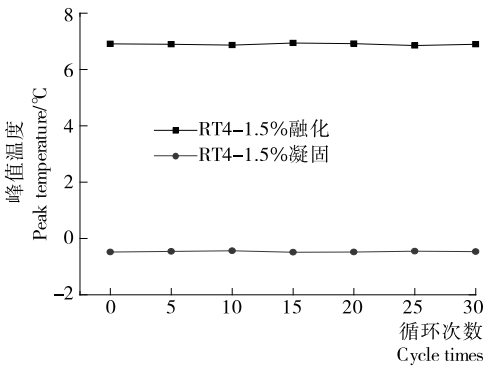


图 7 循环次数对峰值温度的影响

Figure 7 The influence of cycle time on temperature of peak point

由图 6、7 可知,以纳米石墨烯片为填料的复合相变蓄冷材料在循环融化、凝固 30 次后,其相变潜热以及峰值温度波动较小,由此可得到,纳米石墨烯片—石蜡复合相变蓄冷材料具有较好的循环稳定性。

3 结论

本试验研究了纳米石墨烯片—石蜡复合相变蓄冷材料的制备方法和热物性。结果表明:当聚酯型超分散剂的添加量为 2%时,与机械法相结合能成功制备出稳定且均匀分散的纳米石墨烯片—石蜡复合相变材料。对复合相变材料进行热物性分析及循环稳定性分析表明,当纳米石墨烯片的添加量为 1.5%时,复合相变材料的相变潜热较纯石蜡升高 0.7%,且具有良好的循环稳定性。在纳米石墨烯片—石蜡复合相变材料研究过程中发现,进一步的研究需要寻找更好的分散方法来提高纳米石墨烯片的溶解量,以提高复合材料的热物性。

参考文献

[1] PÉREZ-MASIÁ R, LÓPEZ-RUBIO A, FABRA MJ, et al. Use of electrohydrodynamic processing to develop nanostructured materials for the preservation of the cold chain[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2014, 26: 415-423.

[2] 赵晨, 卢君, 陈桂平, 等. 草鱼冷藏过程中脂类的变化[J]. 食品与机械, 2013, 29(2): 151-162.

[3] 颜丽萍, 刘升, 饶先军. 预冷、冷藏运输和销售方法对青花菜品质的影响[J]. 食品与机械, 2012, 28(2): 174-218.

[4] 李锦, 谢如鹤, 刘广海. 易腐食品冷藏运输车内部温度场影响因素仿真研究[J]. 食品与机械, 2012, 28(3): 190-194.

[5] 吕彦力, 薛牡丹, 袁培, 等. 陈列方式对立式冷藏陈列柜食品温度的影响[J]. 食品与机械, 2007, 23(6): 72-75.

[6] 吴学红, 王春煦, 李伟平, 等. 敞开式食品冷藏陈列柜研究进展[J]. 食品与机械, 2016, 32(6): 208-214.

[7] 吴学红, 李伟平, 王立勋, 等. 填充相变材料的复合搁架的传热与蓄冷特性[J]. 制冷学报, 2015, 36(4): 23-28.

[8] AZZOUZ K, LEDUCQ D, GOBIN D. Enhancing the performance of household refrigerators with latent heat storage: an experimental investigation[J]. International Journal of Refrigeration, 2009, 32(7): 1 643-1 644.

[9] SEPE R, ARMENTANI E, POZZI A. Development and stress behaviour of an innovative refrigerated container with pcm for fresh and frozen goods[J]. Multidiscipline Modeling in Materials and Structures, 2015, 11(2): 202-215.

[10] 郭美茹, 周文, 周天, 等. 石墨烯/石蜡复合材料的热物理性能研究[J]. 工程热物理学报, 2014, 35(6): 1 200-1 205.

[11] 王刚, 孙文鸽, 吴志根. 石蜡基/碳素复合相变材料的强化传热研究现状与应用[J]. 化工新型材料, 2014, 42(9): 219-222.

[12] 丁晴, 方昕, 范利武, 等. 不同二维纳米填料对复合相变材料导热系数的影响[J]. 储能科学与技术, 2014, 3(3): 250-255

[13] MESALHY O, LAFDI K, ELGAFY A, et al. Numerical study for enhancing the thermal conductivity of phase change material (Pcm) storage using high thermal conductivity porous matrix [J]. Energy Conversion and Management, 2005, 46(6): 847-867.

[14] 张鸿声, 汪南, 朱冬生, 等. 纳米铜粉/石蜡复合相变储能材料的性能研究[J]. 材料导报, 2011, 25(5): 173-189.

[15] 王继芬, 谢华清, 辛忠, 等. 纳米 ZnO/石蜡复合相变材料的热物理性质研究[J]. 工程热物理学报, 2011, 32(11): 1 897-1 899.

[16] WANG Ji-fen, XIE Hua-qiang, XIN Zhong. Thermal properties of paraffin based composites containing multi-walled carbon nanotubes[J]. Thermochimica Acta, 2009, 488(1/2): 39-42.

[17] CUI Yang-bin, LIU Cai-hong, HU Shan, et al. The experimental exploration of carbon nanofiber and carbon nanotube additives on thermal behavior of phase change materials[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2011, 95(4): 1 208-1 212.

[18] 杨硕, 汪南, 吴淑英, 等. 纳米铝粉/石蜡复合相变储能材料的性能研究[J]. 材料导报, 2009, 23(12): 20-22.

[19] WANG Wei-long, YANG Xi-tang, FANG Yu-tang, et al. Enhanced thermal conductivity and thermal performance of form-stable composite phase change materials by using  $\beta$ -aluminum nitride[J]. Applied Energy, 2009, 86(7/8): 1 196-1 200.

[20] ELGAFY A, LAFDI K. Effect of carbon nanofiber additives on thermal behavior of phase change materials[J]. Carbon, 2005, 43(15): 3 067-3 074.

[21] 于伟, 谢华清, 陈立飞, 等. 石墨烯制备方法及粒径对复合材料热导率的影响[J]. 工程热物理学报, 2016, 37(1): 168-171.

[22] LIN Jin-shan, WANG Li-wei, CHEN Guo-hua. Modification of graphene platelets and their tribological properties as a lubricant additive [J]. Tribology Letters, 2010, 41(1): 209-215.

[23] FANG Xin, FAN Li-wu, DING Qing, et al. Increased thermal conductivity of eicosane-based composite phase change materials in the presence of graphene nanoplatelets[J]. Energy, 2013, 27(7): 4 041-4 047.

[24] LIN Wei, ZHANG Rong-wei, WANG C P. Modeling of thermal conductivity of graphite nanosheet composites [J]. Journal of Electronic Materials, 2010, 39(3): 268-272.

[25] 林锦山. 石墨作为润滑油添加剂研究进展[J]. 化学工程与装备, 2010(6): 139-141.

[26] 乔玉林, 赵海朝, 臧艳, 等. 石墨烯的功能化修饰及作为润滑添加剂的应用研究进展[J]. 化工进展, 2014, 33(S1): 216-223.

[27] 苏睿. 石墨烯分散液的制备与应用研究进展[J]. 广东化工, 2014(8): 190-191.

[28] 赵磊蔡, 张祖川, 张旭, 等. 石墨烯作为润滑油添加剂在青铜织构表面的摩擦磨损行为[J]. 材料研究学报, 2016, 30(1): 57-62.

[29] 张杏静. 聚酯型超分散剂的合成及性能研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2012: 41-53.

(上接第 16 页)

[25] KASANKALA L M, YAN Xue, YAN Wei-long, et al. Optimization of gelatine extraction from grass carp (*Catenopharyngodon idella*) fish skin by response surface methodology [J]. Bioresource Technology, 2007, 98(17): 3 338-3 343.

[26] SHA Xiao-mei, TU Zong-cai, LIU Wei, et al. Effect of ammonium sulfate fractional precipitation on gel strength and characteristics of gelatin from bighead carp (*Hypophthalmichthys nobilis*) scale [J]. Food Hydrocolloids, 2014, 36: 173-180.

[27] BADII F, HOWELL N K. Fish gelatin: structure, gelling properties and interaction with egg albumen proteins [J]. Food Hydrocolloids, 2006, 20(5): 630-640.

[28] EYSTURSKAR D J, HAUG I J, ULSET A S, et al. Mechanical properties of mammalian and fish gelatins based on their weight average molecular weight and molecular weight distribution [J]. Food Hydrocolloids, 2009, 23(8): 2 315-2 321.

(上接第 99 页)

分析及改进设计,明确了不同结构形式对其动态特性的影响,同时获得了最佳的结构改进与动态优化方案,即采用十字筋结构时能够有效增强其抗振性能,为薄壁箱式零件的减振设计、结构改造及动力学性能优化提供了重要参考和依据,有利于食品加工机械的高速低振化设计。

参考文献

[1] 管小清, 吕志强. 工业码垛机器人动力学仿真分析与研究[J]. 食品机械, 2013, 29(1): 149-176.

[2] 陈小安, 刘俊峰, 合桦, 等. 高速电主轴热态性能及其影响[J]. 机械工程学报, 2013, 49(11): 135-142.

[3] 吕冬梅, 韩江. 大型数控双柱立车立柱动力学结构分析与优化[J]. 制造技术与机床, 2015(5): 42-45.

[4] 吴玲丽, 胡小秋, 赵雁. 加工中心立柱动态特性分析与比较[J]. 机械设计与制造, 2014(3): 117-119.

[5] 杨兆军, 陈传海, 陈菲, 等. 数控机床可靠性技术的研究进展[J]. 机械工程学报, 2013, 49(20): 131-139.