

DOI: 10.7652/xjtuxb201407004

氧化石墨烯纳米流体过冷度及 非均匀成核条件研究

刘玉东, 胡鹏飞, 刘玉民, 李鑫, 高润楠, 彭泉贵, 魏留柱
(重庆大学低品位能源利用技术及系统教育部重点实验室, 400044, 重庆)

摘要: 为研发过冷度低的相变蓄冷材料,降低冰蓄冷系统的能耗,实验测试了5种不同浓度的水基氧化石墨烯纳米流体的过冷度,并采用非均匀成核理论计算了在氧化石墨烯纳米薄片上的成核条件。实验结果表明,跟去离子水相比,各种浓度纳米流体的过冷度均受到了极大抑制,最大可降低69.1%,而且成核时间也大大缩短。理论计算表明:在单层氧化石墨烯纳米薄片的侧面(厚度)上成核需要很大的过冷度,只有当纳米薄片的重叠层数达到6层以上或重叠后的厚度超过6 nm时,有效成核对应的过冷度才接近本实验条件下氧化石墨烯纳米流体的最大过冷度;要在纳米薄片的上下表面成核,过冷度与纳米薄片边长的乘积必须大于或等于 $2.446 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{K}$,借助纳米薄片的粒径分布和过冷度实验结果,验证了氧化石墨烯纳米流体满足这一成核条件。研究结果表明,氧化石墨烯纳米薄片可以作为降低相变材料过冷度的成核剂,对冰蓄冷和快速制冰行业具有重要的指导意义和实用价值。

关键词: 氧化石墨烯;纳米流体;过冷度;非均匀成核

中图分类号: TK124 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2014)07-0017-06

Supercooling Degree and Heterogeneous Nucleation Condition of Graphene Oxide Nanofluids

LIU Yudong, HU Pengfei, LIU Yumin, LI Xin, GAO Runnan, PENG Quanguai, WEI Liuzhu
(Key Laboratory of Low-Grade Energy Utilization Technologies and Systems, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: To develop phase change materials (PCMs) with lower supercooling degree to reduce energy consumption in ice storage system, experiments were conducted to measure the supercooling degree of five nanofluids containing different mass fractions of graphene oxide, and the nucleation condition of nanofluids was evaluated following the theory of heterogeneous nucleation. The results indicate that the supercooling degree of nanofluids is greatly suppressed, and the supercooling degree can be reduced by 69.1% at most, furthermore the nucleation starts in advance. Theoretical calculation demonstrates that ice nucleus cannot grow on the thickness-surfaces of the single graphene oxide nanosheet; only when the layers of graphene oxide nanosheet reach to more than six, the supercooling degree of effective nucleation approaches the greatest supercooling degree of the graphene oxide nanofluids under these conditions; when the nucleation occurs on the top or bottom surface, the product of the supercooling degree and the

收稿日期: 2013-11-28。 作者简介: 刘玉东(1972—),男,副教授,博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51276204)。

网络出版时间: 2014-04-25

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20140425.0930.010.html>

nanosheets size gets equal to or greater than $2.446 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{K}$, which is verified by the results of nanosheets size distribution and supercooling degree. It indicates that graphene oxide nanosheet can be used as a nucleating agent for reducing supercooling degree of PCMs in ice storage and rapid ice making.

Keywords: graphene oxide; nanofluids; supercooling degree; heterogeneous nucleation

纳米流体已经成为相变蓄冷领域的一个研究热点,一些研究者对其作为蓄冷材料的潜力做出过很好的预测^[1-2]。许多学者已经用实验证实了在蓄冷工质中添加纳米颗粒可以起到成核剂的作用,诱使蓄冷工质提前结晶凝固,从而大大抑制其过冷度^[3-4]。贾莉斯等的研究发现,锐钛型和金红石型 TiO_2 /水纳米流体的过冷度均比去离子水小,而且冷却速率和纳米流体浓度均会对过冷度产生影响^[5-6]。朱冬生的实验研究发现, $\text{Cu-H}_2\text{O}$ 纳米流体的过冷度有明显的降低,且随着 Cu 纳米粒子质量分数的增加,结冰时间也相应缩短^[7]。Khodadadi 等采用数值模拟的方法研究了 $\text{Cu-H}_2\text{O}$ 纳米流体的相变过程,结果显示 $\text{Cu-H}_2\text{O}$ 纳米流体具有优越的蓄冷特性,而且放热速率大大高于纯水^[8]。Harikrishnan 等研究了 CuO-oleic acid 纳米流体的传热特性,得出该材料可以作为良好的相变蓄冷材料^[9]。刘玉东等往共晶盐 BaCl_2 水溶液中添加纳米 TiO_2 并进行了蓄冷实验,结果表明该盐水溶液的过冷度得到大幅度降低,而且纳米粒子的体积分数对过冷度也有较大影响^[10-11]。吴鹏等向纯净水中加入纳米微粒(SiO_2 和 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$)进行过冷实验,发现向纯净水中投入纳米粉末后,有效地降低了过冷度^[12]。

对于纳米流体过冷度的研究已有很多,但迄今为止,这些文献都是基于球形纳米粒子或一维纳米线,二维纳米材料对过冷度的影响尚无人涉及,而且对其成核条件的定量分析也很少。本文研究了二维氧化石墨烯纳米薄片对过冷度的抑制,并采用非均匀成核理论分析了成核条件,导出了在氧化石墨烯纳米薄片表面成核时过冷度与纳米薄片尺寸的关系式,并依据粒径分布和过冷度实验结果证实了氧化石墨烯纳米薄片有促进成核的作用。

1 实验

1.1 氧化石墨烯纳米流体的制备及表征

在未添加任何分散剂的情况下,将 100 mL 去离子水与不同质量的氧化石墨烯纳米材料直接混合,并采用超声搅拌。为带走超声波产生的热量,搅拌时需采取冷却措施。分别搅拌 150 min 后,即可

获得均匀且稳定性良好的纳米流体,其质量浓度分别为 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5 g/L。

纳米流体制备后,先静置 2 周,在肉眼观察不到明显的沉淀聚集现象的情况下,通过测量粒径分布、Zeta 电位以及 STEM 图像进行表征。粒径分布与 Zeta 电位采用英国马尔文公司的纳米粒度及 Zeta 电位分析仪(型号 Nano ZS90)进行测量,图 1 和图 2 分别是 0.5 g/L 的氧化石墨烯纳米流体的粒径分布与 Zeta 电位值。由图可见:94% 以上的纳米粒子的粒径分布在 30~70 nm 之间;Zeta 电位绝对值的分布范围为 0~75 mV,平均值为 42 mV。根据 Zeta 电位与纳米流体稳定性理论可知,当 Zeta 电位绝对值大于 30 mV 时,就可认为稳定性良好^[13]。

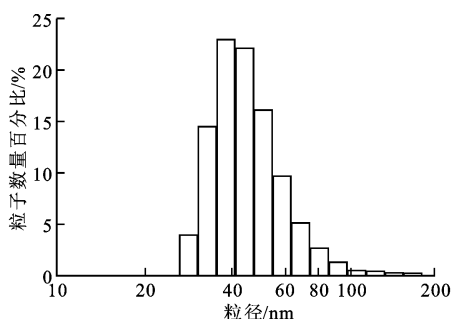


图1 0.5 g/L 的氧化石墨烯纳米流体的粒径分布

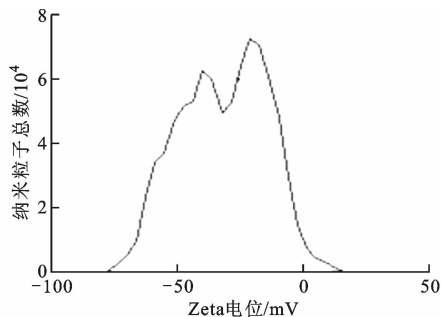


图2 0.5 g/L 的氧化石墨烯纳米流体的 Zeta 电位分布

图3是使用德国蔡司公司的热场发射透射电子显微镜测试的纳米流体 STEM 图像,图中黑色块状物为氧化石墨烯纳米薄片,其分布稀疏均匀,团聚不明显,粒径尺寸均在 100 nm 以下,所形成的砌块则均匀清晰。

图4是氧化石墨烯纳米流体过冷度实验装置示

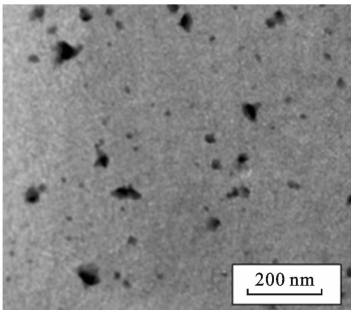


图 3 氧化石墨烯纳米流体的 STEM 图像

意图。恒温浴槽 HS-4(B)的最低温度可达 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，控温精度为 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。温度测量采用经过标定的 T 型热电偶，测量精度为 $\pm 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。实验时设定恒温槽温度为 $-13\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，待达到设定温度后，将装有不同浓度纳米流体的烧杯依次放入恒温浴槽，然后将插入烧杯中央的热电偶与数据采集仪 Agent34970A 连接好进行过冷度实验，采集的温度数据传至计算机，采集时间间隔为 10 s 。

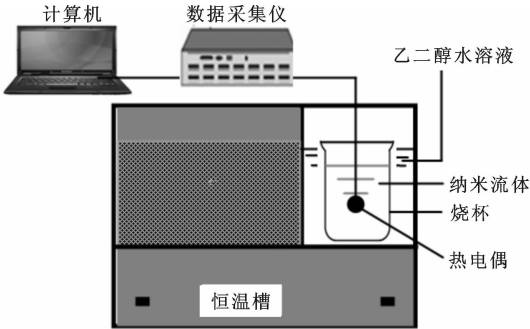


图 4 过冷度实验装置示意图

1.2 氧化石墨烯纳米流体过冷度的测试

为了确保实验结果的可靠性，实验前使用精度为 0.1 级的高精度标准温度计对热电偶进行标定，并实测去离子水的过冷度与文献值进行对比验证。在相同的实验条件(如冷却速率、热电偶、样品容积等)下，对不同浓度的纳米流体样品进行过冷度实验，每组样品都进行 3 次重复性实验。

2 过冷度实验结果与分析

图 5 是去离子水和不同浓度的氧化石墨烯纳米

流体在相同冷却速率下得到的步冷曲线。从图 5 和表 1 可以看出，各种浓度纳米流体的过冷度均小于去离子水的过冷度，说明添加氧化石墨烯纳米薄片使过冷度得到了明显的抑制，其中 0.5 g/L 的纳米流体过冷度为 $2.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，过冷度抑制的效果最佳，与去离子水的过冷度 $6.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 相比，其过冷度降低 69.1%。

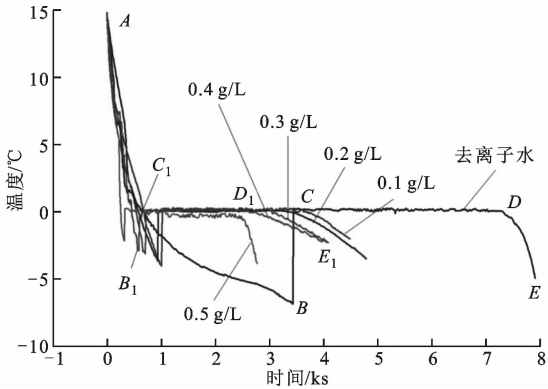


图 5 去离子水与不同浓度氧化石墨烯纳米流体的步冷曲线

此外，纳米流体开始成核的时间大大提前，全部冻结完毕所需时间也极大缩短。从开始冷却到开始成核这一阶段，纳米流体步冷曲线的斜率均比去离子水的斜率大，并且随着纳米流体浓度的增加，步冷曲线的斜率也增大，表明冷却速度更快。这是因为随着纳米流体浓度的增加，其导热系数也越大，强化了传热。现以去离子水和 0.4 g/L 的纳米流体为例来进行对比分析。从图 5 可知，固液相变过程分为 4 个阶段， AB/AB_1 (带下标为纳米流体，下同)是液相显热放热阶段， BC/B_1C_1 是开始成核、冰晶形成的阶段， CD/C_1D_1 是冰晶的生长阶段， DE/D_1E_1 是固态冰的显热放热阶段。在 AB/AB_1 段，纳米流体冷却曲线的斜率比去离子水斜率大，表明纳米流体的冷却速度更快；在 BC/B_1C_1 段，纳米流体开始成核的温度大大提高，时间也大大提前； CD/C_1D_1 段是冰晶的持续生长阶段，纳米流体的强化传热加速了冰晶的生长^[14]，相比于去离子水，冻结完毕所需时间大大缩短；在 DE/D_1E_1 段，随着冷却过程的进行，固态冰的温度持续下降。

表 1 去离子水和不同浓度的纳米流体的过冷度实验数据

样品	过冷度/ $^{\circ}\text{C}$	开始成核时间/s	冻结完成时间/s	过冷度降低百分比/%
去离子水	6.8	3 430	7 310	
0.1 g/L 纳米流体	4.0	1 010	3 730	41.2
0.2 g/L 纳米流体	3.6	940	3 470	47.1
0.3 g/L 纳米流体	3.1	710	3 060	54.4
0.4 g/L 纳米流体	2.8	590	2 750	58.8
0.5 g/L 纳米流体	2.1	320	2 460	69.1

3 氧化石墨烯纳米流体成核条件分析

纳米流体的成核属于非均匀成核,由于纳米颗粒的加入会促进冰晶的形成,因此对纳米颗粒成核机理的探讨就尤为重要。根据图 3,我们将其在平面上的形状简化为正方形,单层厚度 H 为 1 nm,边长为 D ,简化的物理模型如图 6 所示。

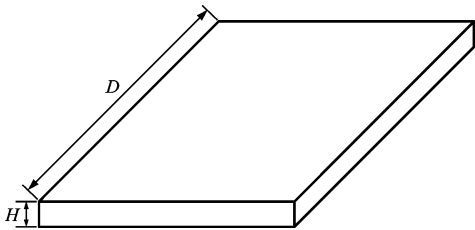
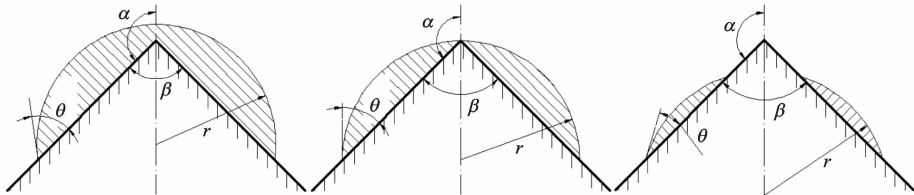


图 6 单层氧化石墨烯纳米薄片物理模型

冰晶的形成可能在正方形的各个棱角上,也可能在侧面或上下底面。首先讨论前一种情况,棱角上的成核属于两面间的锥尖上的成核。锥尖上的冰



(a) $\pi/2 < \alpha < \pi/2 + \theta$ (b) $\alpha = \pi/2 + \theta$ (c) $\pi/2 + \theta < \alpha < \pi$

图 7 锥尖上的成核

表 2 冰、水的物性参数^[16]

$\gamma_w/\text{J} \cdot \text{m}^{-2}$	$\gamma_w^d/\text{J} \cdot \text{m}^{-2}$	$\gamma_i/\text{J} \cdot \text{m}^{-2}$	$\gamma_i^d/\text{J} \cdot \text{m}^{-2}$	$\gamma_{iw}/\text{J} \cdot \text{m}^{-2}$	$\theta_{wn}/(^{\circ})$
0.074 289	0.022 261	0.081 972	0.033 237	0.023 431	34.5

注:下标 iw 表示冰水界面。

图 7c 所示的情况,即冰晶独立生长在棱角的两侧,棱角两侧为模型的侧面和上下表面。由上述分析可知,冰晶的形成只可能出现在模型的侧面(厚度)或上下表面,这两种情况都属于平面成核。

图 8 是在单层氧化石墨烯纳米薄片侧面(厚度)上的成核示意图,根据几何关系可得冰晶半径 r 与

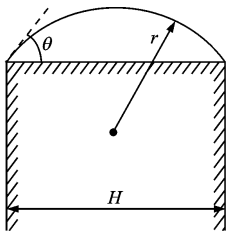


图 8 单层纳米模型侧面(厚度)成核示意图

晶形状存在 3 种可能,如图 7 所示,图中 α 为锥顶半角, θ 为冰和氧化石墨烯纳米薄片之间的接触角。图 7a 为冰晶完全包裹锥角,图 7b 为恰好包裹,图 7c 为冰晶独立生长在锥角的两侧。由于在棱角上 $\beta = 90^{\circ}$,根据 $\alpha = 180^{\circ} - \beta/2$ 可得 $\alpha = 135^{\circ}$ 。

θ 很难直接测出,根据去离子水在氧化石墨烯纳米薄片表面的接触角 θ_{wn} ,由下式可间接计算 θ ^[15]

$$\cos\theta = \left(\gamma_w \left(\left(\frac{\gamma_i^d}{\gamma_w^d} \right)^{1/2} + \left(\left(\frac{\gamma_i^d}{\gamma_w^d} \right)^{1/2} - 1 \right) \cos\theta_{wn} \right) - \gamma_i \right) / \gamma_w \quad (1)$$

式中: γ_w 、 γ_i 分别为水、冰表面自由能;上标 d 表示色散力对界面张力的贡献。根据文献[16]给出的去离子水在氧化石墨烯纳米薄片表面的接触角与纳米流体 pH 值的关系图,可得本实验相对应的 $\theta_{wn} = 34.5^{\circ}$ (本实验中氧化石墨烯纳米流体的 pH 值为 5.5)。将 θ_{wn} 值和表 2 的物性参数代入式(1),可得 $\theta = 17^{\circ}$ 。

由 $\theta = 17^{\circ}$ 、 $\alpha = 135^{\circ}$ 可知,在棱角上的成核属于

H 的关系式为

$$r = H/2\sin\theta \quad (2)$$

由 $\theta = 17^{\circ}$ 、 $H = 1 \text{ nm}$ 可得 $r = 1.7 \text{ nm}$,即在侧面上能形成晶核的临界半径 $r^* = 1.7 \text{ nm}$ 。单位体积自由能和临界半径的计算式如下

$$\Delta g = -l\Delta T/T_0 \quad (3)$$

$$r^* = -2\gamma_{iw}/\Delta g \quad (4)$$

$$l = l_w\rho_{ice} \quad (5)$$

式中: Δg 为单位体积吉布斯自由能增量; ΔT 为过冷度; T_0 为相平衡温度;根据文献[17]知冰的密度 ρ_{ice} 随过冷度的变化很小,可取为定值 915.10 kg/m^3 ; l_w 为水的凝固潜热,标准工况下为 334.39 kJ/kg ; l 为单位体积凝固潜热。

由式(3)、(4)可得 $r^* = 1.7 \text{ nm}$ 对应的过冷度

为 24.6℃,因此只有当过冷度大于或等于 24.6℃ 时,在单层氧化石墨烯纳米薄片的侧面(厚度)才可能形成有效晶核,在本文的实验条件下,过冷度无论如何也达不到 24.6℃,因此不可能形成晶核。

考虑到水相中氧化石墨烯纳米薄片常以聚集态存在,假设纳米薄片的厚度是由 n 个相同的单层纳米薄片叠加而成,此处不考虑叠加后出现交错的情况,且单层氧化石墨烯纳米薄片的厚度取为 1 nm。根据上述单层纳米薄片在厚度方向过冷度的计算结果,可推导出 n 层重叠后过冷度的具体结果,如表 3 所示。

由表 3 可知,随厚度方向纳米薄片层数的叠加,形成有效晶核对应的过冷度会降低。参照过冷度实测结果可知,只有当重叠层数达到 6 层以上时,过冷度才接近本实验条件下氧化石墨烯纳米流体的最大过冷度 4.0℃,亦即在本文的实验条件下,只有 6 层以上的重叠才可促进厚度方向的成核。

图 9 是冰晶在单层纳米薄片上下表面形成的示

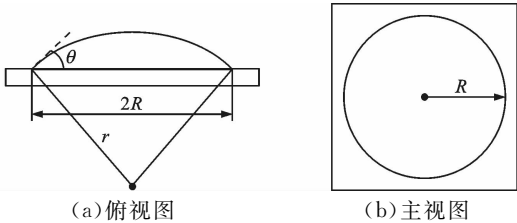


图 9 单层纳米薄片上下表面成核示意图

意图,根据几何关系可得冰晶与纳米薄片表面接触圆的半径 R 与 r 的关系式为

$$R = r \sin \theta \tag{6}$$

当接触圆直径等于纳米薄片模型边长时,在纳米薄片表面形成最大的冰晶,最大冰晶半径 $r_{\max}$ 与 D 的关系为

$$r_{\max} = D/2 \sin \theta \tag{7}$$

只有当 $r_{\max} \geq r^*$ 时,才能在纳米粒子表面形成有效晶核,将式(4)和(7)代入不等式 $r_{\max} \geq r^*$,得到

可在纳米薄片上下表面成核的最小边长为

$$D \geq 4 \gamma_{\text{IW}} T_0 \sin \theta / \Delta T l \tag{8}$$

代入各参数的具体数值,可得

$$D \Delta T \geq 2.446 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{K} \tag{9}$$

从式(9)可以看出,氧化石墨烯纳米薄片边长直接影响过冷度的大小。纳米薄片边长越大,表面成核所需的过冷度越小;过冷度越高,表面成核要求的纳米薄片边长越小。表 4 为不同浓度纳米流体对应的实测过冷度下,在纳米薄片上下表面成核的 D 值。当 D 大于对应数值时,在纳米薄片表面可以形成有效晶核,抑制过冷度。为了验证这一理论计算结果,对过冷度最小的 0.5 g/L 的纳米流体进行了粒径分布的测量(见图 1),其粒径均在 20 nm 以上,且主要分布在 30~70 nm 之间,大于表 4 的理论计算最小边长 11.6 nm,所以本文制备的氧化石墨烯纳米薄片满足表面成核的条件。

4 结 论

(1)氧化石墨烯纳米流体的过冷度均小于去离子水的过冷度,成核结晶时间也均大大提前,说明添加二维氧化石墨烯纳米薄片会使过冷度得到抑制;0.5 g/L 的纳米流体过冷度抑制的效果最佳,过冷度降低了 69.1%。

(2)氧化石墨烯纳米流体的成核属于非均匀成核,纳米颗粒的加入会促进冰晶的形成。理论计算表明:在厚度为 1 nm 的单层氧化石墨烯纳米薄片侧面(厚度)成核需要很大的过冷度,只有当纳米薄片重叠层数达到 6 层以上时,有效成核对应的过冷度才接近本实验条件下氧化石墨烯纳米流体的最大过冷度;在氧化石墨烯纳米薄片上下表面成核必须满足 $D \Delta T \geq 2.446 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{K}$ 这个条件。通过对 0.5 g/L 的纳米流体粒径分布和过冷度的测量,证实本实验的氧化石墨烯纳米薄片满足该成核条件,可以促进成核,从而有效抑制过冷度。

表 3 聚集态氧化石墨烯纳米薄片厚度方向有效成核对应的过冷度

重叠层数	1	2	3	4	5	6	...	n
H/nm	1	2	3	4	5	6	...	n
r^*/nm	1.7	3.4	5.1	6.8	8.5	10.2	...	$1.7n$
$\Delta T/^\circ\text{C}$	24.60	12.30	8.20	6.15	4.92	4.10	...	$24.6n^{-1}$

表 4 氧化石墨烯纳米薄片表面成核的临界边长

质量浓度/ $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
$\Delta T/^\circ\text{C}$	4.0	3.6	3.1	2.8	2.1
D/nm	6.1	6.8	7.9	8.7	11.6

(3)二维氧化石墨烯薄片可以作为相变材料的成核剂,有望用于冰蓄冷和快速制冰行业。

参考文献:

- [1] METTAWEE E B S, ASSASSA G M R. Thermal conductivity enhancement in a latent heat storage system [J]. *Solar Energy*, 2007, 81(7): 839-845.
- [2] 朱冬生, 李新芳, 汪南, 等. 纳米流体相变蓄冷材料的基本特性与应用前景 [J]. *材料导报*, 2007, 21(4): 87-91.
ZHU Dongsheng, LI Xinfang, WANG Nan, et al. Fundamental properties and application prospect of the phase change nanofluids as a cold storage material [J]. *Materials Review*, 2007, 21(4): 87-91.
- [3] ZHANG X J, WU P, QIU L M, et al. Analysis of the nucleation of nanofluids in the ice formation process [J]. *Energy Conversion and Management*, 2010, 51(1): 130-134.
- [4] 李新芳, 朱冬生. 纳米流体强化相变蓄冷特性的实验研究 [J]. *材料导报*, 2009, 23(3): 11-16.
LI Xinfang, ZHU Dongsheng. Experimental study of cold storage characteristics of nanofluids as the phase change material [J]. *Materials Review*, 2009, 23(3): 11-16.
- [5] 贾莉斯. 水基纳米流体固液相变过程成核机理的研究 [D]. 广州: 广东工业大学, 2010.
- [6] JIA Lisi, CHEN Ying, MO Songping. Solid-liquid phase transition of nanofluids [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2013, 59: 29-34.
- [7] WU S, ZHU D, ZHANG X, et al. Preparation and melting/freezing characteristics of Cu/paraffin nanofluid as phase-change material (PCM) [J]. *Energy & Fuels*, 2010, 24(3): 1894-1898.
- [8] KHODADADI J M, HOSSEINIZADEH S F. Nanoparticle-enhanced phase change materials (NEPCM) with great potential for improved thermal energy storage [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2007, 34(5): 534-543.
- [9] HARIKRISHNAN S, KALAISELVAM S. Preparation and thermal characteristics of CuO-oleic acid nanofluids as a phase change material [J]. *Thermochimica Acta*, 2012, 533: 46-55.
- [10] LIU Y D, ZHOU Y G, TONG M W, et al. Experimental study of thermal conductivity and phase change performance of nanofluids PCMs [J]. *Microfluidics and Nanofluidics*, 2009, 7(4): 579-584.
- [11] HE Q B, WANG S, TONG M W, et al. Experimental study on thermophysical properties of nanofluids as phase-change material (PCM) in low temperature cool storage [J]. *Energy Conversion and Management*, 2012, 64: 199-205.
- [12] WU P, ZHANG X, QIU L, et al. Nucleation characteristics of nano-additives in binary ice thermal storage system [J]. *Journal of Zhejiang University: Engineering Science*, 2009, 43(9): 1668-1671.
- [13] YU W, XIE H, BAO D. Enhanced thermal conductivities of nanofluids containing graphene oxide nanosheets [J]. *Nanotechnology*, 2010, 21(5): 055705.
- [14] JOHNATHAN J, VADASZ S, VADASZ G P. Heat transfer enhancement in nano-fluids suspensions: possible mechanisms and explanations [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2005, 48(13): 2673-2683.
- [15] 张承虎. 提取冷水凝固潜热的换热理论与装置 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008: 45-46.
- [16] HU X, YU Y, HOU W. Effects of particle size and pH value on the hydrophilicity of graphene oxide [J]. *Applied Surface Science*, 2013, 273: 118-121.
- [17] 曲凯阳, 江亿. 均质形核结冰随机性及形核率的研究 [J]. *物理学报*, 2000, 49(11): 2214-2219.
QU Kaiyang, JIANG Yi. Studies on randomness and nucleation rate of supercooled water freezing from homogeneous nucleation [J]. *Acta Physics Sinica*, 2000, 49(11): 2214-2219.

[本刊相关文献链接]

- 缪金, 董明, 温福新, 等. ZnO 纳米颗粒改性变压器油介质损耗模型研究. 2014, 48(2): 50-55. [doi:10.7652/xjtuxb201402009]
- 缪金, 董明, 任明, 等. ZnO 纳米改性变压器油的相对介电常数模型. 2013, 47(8): 121-126. [doi:10.7652/xjtuxb201308021]
- 缪金, 董明, 杨彦博, 等. 纳米改性变压器油电导率改进模型. 2013, 47(2): 87-91. [doi:10.7652/xjtuxb201302015]
- 韩龙飞, 钱军民, 崔宁. ZnO 纳米线的控制生长及在染料敏化太阳能电池中的应用. 2013, 47(1): 90-95. [doi:10.7652/xjtuxb201301018]
- 张虎, 谷伟, 李增耀, 等. 氧化硅纳米多孔材料表面的水蒸气吸附动力学研究. 2012, 46(3): 1-8. [doi:10.7652/xjtuxb201203001]
- 高明琦, 徐友龙, 白杨. 用于染料敏化太阳能电池的铈、氟双掺杂二氧化钛微球. 2011, 45(12): 87-91. [doi:10.7652/xjtuxb201112016]
- 周健儿, 胡学兵, 包启富, 等. 纳米 ZnO 改性在 ZrO_2 微滤膜油水分离过程中的作用. 2011, 45(2): 117-120. [doi:10.7652/xjtuxb201102024]

(编辑 荆树蓉)