

# 铅铋基石墨烯纳米流体热物性研究

杨 涛<sup>1,2</sup> 赵鹏程<sup>1,2</sup> 赵亚楠<sup>1,2</sup> 于 涛<sup>1,2</sup>

1(南华大学 核科学技术学院 衡阳 421001)

2(南华大学 湖南省数字化反应堆工程技术研究中心 衡阳 421001)

**摘要** 高热导率的石墨烯纳米颗粒掺进铅铋堆冷却剂中可显著提升其导热系数和比热容,从而提高铅铋堆的堆芯功率密度,降低冷却剂用量,有利于实现反应堆小型化和轻量化设计的目的,对于铅铋堆在偏远地区和远海的工程应用具有重要意义。本文通过不同导热系数、黏度、比热容等预测模型对金属基石墨烯纳米流体热物性进行研究,分析纳米流体强化机理,提出适用于铅铋基石墨烯纳米流体的热物性计算模型。研究结果表明:添加石墨烯纳米颗粒的铅铋基,其导热系数、比热容和黏度均得到显著提高。在保证悬浮液相对稳定的情况下,导热系数、比热容和黏度随浓度的添加显著增大,在浓度达到20%时,纳米基液的热导率可以提高80%,但此时的黏度也提升了100%左右,因此在提高浓度的同时应综合考虑对热物性的影响。

**关键词** 铅铋堆, 石墨烯纳米流体, 导热系数, 黏度, 比热容

**中图分类号** TL33

**DOI:** 10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.120602

## Thermophysical properties of lead-bismuth-based graphene nanofluids

YANG Tao<sup>1,2</sup> ZHAO Pengcheng<sup>1,2</sup> ZHAO Yanan<sup>1,2</sup> YU Tao<sup>1,2</sup>

1(School of Nuclear Science and Technology, University of South China, Hengyang 421001, China)

2(Hunan Engineering & Technology Research Center for Virtual Nuclear Reactor, University of South China, Hengyang 421001, China)

**Abstract** [Background] The thermal conductivity of graphene nanoparticles doped into the lead bismuth reactor coolant can significantly improve the coefficient of thermal conductivity and specific heat capacity. That will improve the core power of lead and bismuth pile density, reduce the amount of coolant, and ultimately achieve the goal of reducing the reactor volume. It is of great significance for the engineering application of lead bismuth reactor in remote areas and offshore seas. [Purpose] This study aims to investigate the thermophysical properties of lead-bismuth-based graphene nanofluids. [Methods] First of all, different thermal conductivity, viscosity, specific heat capacity and other prediction models were employed to study the thermophysical properties of metal-base Graphene nanofluids. The strengthening mechanism of nanofluids was analyzed, then a thermophysical calculation model suitable for lead-bismuth-based graphene nanofluids was put forward. [Results] The results show that the coefficient of thermal conductivity, specific heat capacity and viscosity of lead bismuth matrix with graphene nanoparticles are significantly improved, and the thermal conductivity, specific heat and viscosity increase significantly with the increase of the concentration when the suspension is relatively stable. When the concentration reaches 20%, the thermal conductivity of nanofluid can be increased by 80%. However, the viscosity is increased by about 100% simultaneously. [Conclusions] The influence on thermophysical property should be considered while increasing the concentration of graphene nanofluids.

**Key words** Lead-bismuth reactor, Graphene nanofluids, Thermal conductivity, Viscosity, Specific heat capacity

第一作者: 杨涛, 男, 1994年出生, 2016年毕业于华东理工大学, 现为硕士研究生, 研究领域为反应堆热工水力

通信作者: 赵鹏程, E-mail: zpc1030@mail.ustc.edu.cn

收稿日期: 2021-09-01, 修回日期: 2021-10-03

First author: YANG Tao, male, born in 1994, graduated from East China University of Science and Technology in 2016, master student, focusing on reactor thermal hydraulics

Corresponding author: ZHAO Pengcheng, E-mail: zpc1030@mail.ustc.edu.cn

Received date: 2021-09-01, revised date: 2021-10-03

以小型化和轻量化为主要特征的高性能铅铋堆技术将带来远征能源供应模式的改变,其提供的充沛能源可从根本上降低或消除能源设备对后勤和其他基础设施的需要,带来核动力设备的革新性甚至颠覆性发展,在核动力舰船、陆基移动式核电源、水下核能源网络、海上钻井平台和深海作业装备力等军民领域具备广阔的应用前景。在保证反应堆供电能力的基础上,最大限度降低反应堆体积可显著提高核动力装置的灵活机动性,其中一回路冷却剂装量作为影响铅铋堆体积和重量的主要因素之一,是铅铋堆性能提升需要重点考虑的优化方向<sup>[1]</sup>。将高热导率的石墨烯纳米颗粒掺混进铅铋可进一步提升其导热和换热能力,高导热对流冷却工质的研发可进一步提高铅铋堆的堆芯功率密度,降低冷却剂装量,达到堆本体小型化和轻量化设计的目的。

Choi等<sup>[2]</sup>提出纳米流体基本概念,通过在基液中加入纳米大小固体颗粒形成多相分散稳定的悬浮液,相较于基液其导热性能显著提高。乔峰等<sup>[3]</sup>开展石墨烯纳米流体的制备和性能进行研究,提出适用于纳米流体的预测模型;宣益民等<sup>[4]</sup>针对纳米流体进行强化传热机理研究,提出纳米流体颗粒聚集理论,运用分子动力学理论提出纳米流体导热系数模型;舒宇<sup>[5]</sup>开展了水基石墨烯纳米流体的热物性研究,分别进行了水平圆管和矩形小槽的流动换热特性实验验证。Kedar等<sup>[6]</sup>基于布朗运动提出计算球形和非球形颗粒的纳米流体导热系数新解析模型;Cayan等<sup>[7]</sup>开展了水基石墨烯纳米流体流变性能和热物性能表征磁滞现象的研究。上述研究均表明,纳米颗粒添加将显著提升基液热物理性能。

而传统以水、乙二醇等作为基础液体形成的纳米流体,因基液和颗粒比密度相差较大,极易形成沉降影响悬浮液的稳定性,极大限制流体强化传热的能力。而金属基液因其液态金属表面张力大,流体和颗粒间密度差较传统流体小,能在纳米颗粒体积分数达到20%时,依然保持其稳定性,极大地提高了基液的热物性。中国科学院理化技术研究所刘静等<sup>[8]</sup>提出以液态金属或低熔点合金作为传热介质冷却计算机芯片,进一步研究采用液态金属或合金作为纳米流体基础溶液,将纳米尺度固体颗粒弥散稳定分散到液态金属或合金中,提出超高导热性能的“终极冷却剂”构想。门玉宾等<sup>[9]</sup>研究了以液态金属镓作为基液,通过纳米颗粒添加前后的热物性能对比,运用单相流体模型、离散相模型(Discrete Phase Model, DPM)和双欧拉模型(Eulerian - Eulerian, E-E),研究其在强制对流、自然对流情况下的流动和换热效果。Zhou等<sup>[10]</sup>以金属镓作为基液,分别添加

氧化铝( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )、金刚石、碳纳米颗粒,研究纳米尺度颗粒添加影响液态金属热物理性质的规律,结果显示:当 $R_e=1\ 000$ 和 $\phi=6\%$ 时,纳米流体Ga-CNT、Ga-Diam和Ga- $\text{Al}_2\text{O}_3$ 的平均努塞尔数相对于纯液态金属Ga分别增加了17.3%、16.1%和2.1%。其中具有高浓度碳纳米颗粒的纳米粒流体是强化传热更好的选择。

石墨烯是由SP<sup>2</sup>轨道杂化碳原子组成的单层二维蜂窝状晶体,具有良好的导热性,因其良好的化学稳定性和耐腐蚀性,可以与铅铋基液制成稳定的纳米流体。目前关于石墨烯纳米流体的研究主要停留在常温下传统基液(水、乙醇等)的实验与模型预测,针对金属基液铅铋研究较少。为此,本文将以高温液态金属铅铋作为基液,并与钠、镓等金属基液比较,研究浓度、温度、粒径等因素对导热系数、黏度和比热容的影响,提出适用于铅铋基石墨烯纳米流体导热系数、黏度和比热容的预测模型,为后续铅铋基石墨烯纳米流体作为铅铋堆冷却工质的应用奠定理论基础。

## 1 铅铋基石墨烯纳米流体稳定性影响因素

将纳米尺度的固体颗粒均匀分散到不同的液体溶液中,形成相较于基液有良好热物性的纳米流体。然而,纳米流体中固体颗粒因其小尺寸效应、无规则布朗运动、较大的比表面能等因素的综合影响,最终不均匀地受力而发生团聚现象而聚集沉淀,从而影响纳米流体稳定性和均匀性,其热物性也会受到严重制约。因此,保证颗粒稳定弥散在基液中而不发生聚集,是研究纳米流体各热物性的首要前提。纳米颗粒所受合力如式(1)<sup>[11]</sup>所示:

$$F_{\text{合}} = F_b + F_f + F_u + F_A + F_R \quad (1)$$

式中: $F_b$ 为颗粒布朗力; $F_f$ 为浮力; $F_u$ 为相间阻力; $F_A$ 为范德华力; $F_R$ 为静电斥力。

因纳米颗粒尺寸较小,纳米颗粒所受的质量力在众力系中可忽略,暂只考虑范德华力和斥力对颗粒的作用力影响。由受力分析可以看出,纳米颗粒能保持长时间的均匀稳定分布主要取决于斥力与引力的相对大小,当纳米颗粒的斥力大于吸力时,足以阻止布朗运动使纳米颗粒相互碰撞而团聚沉淀,使悬浮液处于稳定状态。通过不同的手段调节悬浮液纳米颗粒所受吸力和斥力的受力平衡,可以使悬浮液能长期保持稳定状态。根据排斥力所产生的原因不同,分散的纳米颗粒所承受斥力可分为空间斥力和电荷斥力(图1)<sup>[12]</sup>。

从微观角度分析,影响纳米流体主要包括三个

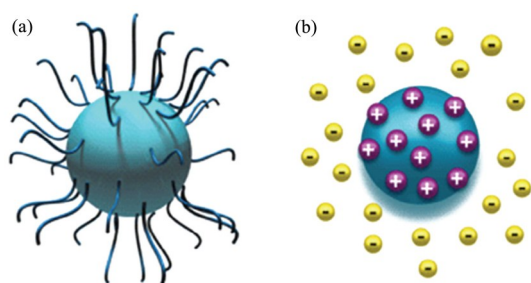


图1 纳米颗粒所受斥力种类 (a) 空间斥力, (b) 电荷排斥  
Fig. 1 Types of repulsion forces acting on nanoparticles  
(a) Spatial repulsion, (b) Charge repulsion

方面<sup>[13]</sup>: 1) 纳米流体纳米颗粒悬浮在基液中的的多相稳定分散系统, 因较小尺寸的纳米颗粒拥有较大比表面积和表面能, 纳米颗粒之间有相互聚集而减弱表面能的趋向, 即高能向低能的释能趋势; 2) 纳米颗粒的小尺寸效应、剧烈无规则布朗运动, 纳米颗粒间相互碰撞使受力不均匀从而产生沉降; 3) 在电荷斥力和空间斥力的作用下, 纳米颗粒很容易发生团聚, 团聚一旦发生将影响悬浮液中周围的纳米颗粒亦发生吸附团聚, 从而影响纳米流体的稳定性。由上述微观机理分析及实验观测研究, 影响纳米流体稳定性因素主要包括粒子的密度、粒子形态、基液黏度、分散剂、pH 等, 这些因素往往会对热导率、比热容等热物性参数产生影响。

针对铅铋基石墨烯纳米流体的制备, 需要充分考虑其纳米颗粒分散和稳定性问题, 采用添加分散剂、超声振动等方法, 获得稳定性较好的纳米流体。同时, 纳米颗粒的浓度也是影响纳米颗粒稳定地分散在基液中的其中一个因素, 针对金属基铅铋基液较传统基液(水、乙醇等)有着更大的密度及动力黏度, 使之纳米颗粒的浓度达到 20%, 且保证纳米流体的稳定性。

## 2 铅铋基石墨烯纳米流体热导率研究

纳米流体热导率是纳米流体主要的热物性之一。国内外众多研究表明, 向基液中添加纳米尺度的颗粒可以显著提升基液自身的热导率。

### 2.1 纳米流体的导热机理

纳米颗粒的添加对基液导热性能强化机理主要分为以下 6 个方面:

#### 1) 纳米颗粒的布朗运动和微对流作用

根据布朗运动理论, 纳米颗粒受到周围液体分子和其他纳米颗粒的微弱相互作用, 颗粒永不休止地进行紊乱活动。粒子的尺寸越小, 速度越大, 移动越频繁, 进而纳米颗粒与周围介质能量交换频率加快, 使纳米流体传热性能提高, 即热导率提高<sup>[14]</sup>。

#### 2) 纳米颗粒的团聚和逾渗结构

在纳米流体能量传递的过程中, 理想情形是纳米颗粒可以在相对较大浓度时, 均匀稳定分散在悬浮液中, 不发生团聚现象。实际上, 纳米颗粒在基液中由于布朗运动产生随机碰撞, 容易产生团聚, 形成较大的簇团, 从而减弱纳米颗粒的小尺寸效应, 这些团聚体的速度比单个粒子小, 所受到的垂直力较大, 会加快粒子的沉淀。纳米颗粒发生团聚将造成纳米颗粒与纳米流体内部能量传递速率减缓, 限制纳米流体的强化传热性能<sup>[15]</sup>。

#### 3) 纳米颗粒与基液形成的液体层理论

研究人员根据实验观测, 发现一层纳米尺度的胶状薄层包裹着纳米颗粒, 这种胶状结构对固体到液体的导热过程中起主导作用, 将增加纳米流体的有效热导率。则其厚度可表示为:

$$d_s = \frac{1}{\sqrt{3}} \left( \frac{4M}{\rho_f N_A} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

式中:  $M$  为基液质量分数;  $\rho_f$  为基液密度;  $N_A$  为阿伏伽德罗常数 ( $6.022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ )<sup>[16]</sup>。

可以看出, 纳米颗粒与基液形成相互作用形成的厚度只考虑与基液有关。其他影响因素还待持续完善, 且其液体层主要导热方式是固体导热还是液体导热需进一步深入研究。

#### 4) 弹道输运和非局部效应

在纳米颗粒粒径小于声子自由程的状况下出现弹道输运现象, 由于分子内部发生的是直线输运, 此时纳米颗粒内部不发生散射导致热量交换能力不足, 而纳米颗粒与基液界面处的扩散能力占优势, 而部分研究显示此种局部效应不能很好地证明热导率的明显增加与其有关。

#### 5) 热泳理论

热泳是由于局部温度的不均性引起的, 高温侧分子比低温侧活跃, 加剧分子间的撞击, 导致分子从高温侧向低温侧迁移。实验表明热泳对于纳米流体导热系数几乎没有影响, 甚至比布朗运动产生的影响小几个数量级。

#### 6) 辐射换热等

从分子动力学模拟出发, 当两个颗粒之间的距离小于  $1 \mu\text{m}$  时, 两粒子的能量传递速度急剧增加, 因此可认为近场辐射可能对导热系数产生较大影响。但研究者指出近场辐射对纳米流体导热没有明显的增强作用, 即使近场辐射的强度比黑体辐射强度大。

各理论的示意图如图 2<sup>[17]</sup>所示。

针对铅铋基石墨烯纳米流体, 在热导率的研究方面, 应重点考虑纳米颗粒的布朗运动和微对流运

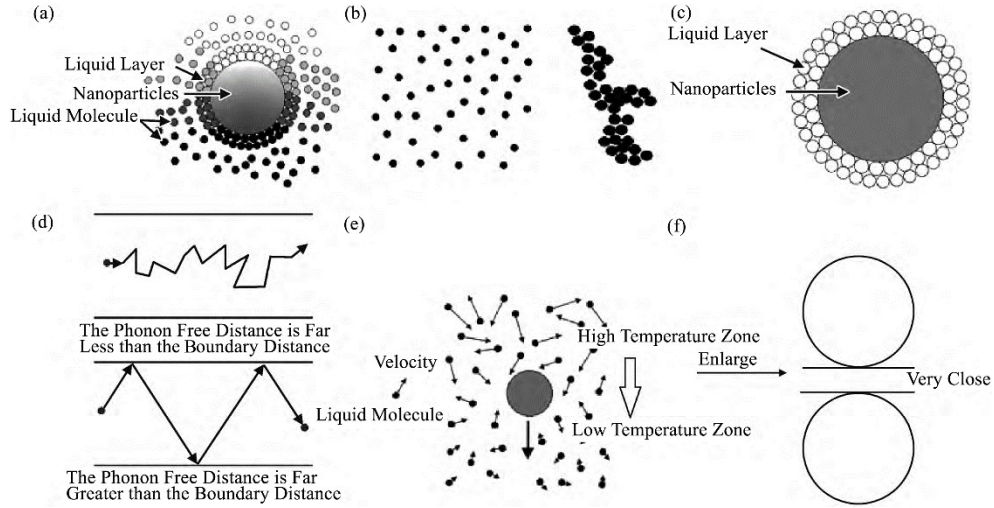


图2 纳米流体导热机理 (a) 纳米颗粒布朗运动和微对流, (b) 纳米颗粒团聚、渗透, (c) 纳米颗粒液体层, (d) 弹道运输和非局部效应, (e) 热泳理论, (f) 辐射换热

Fig.2 Nanofluid heat conduction mechanism (a) Nanoparticle Brownian motion and microconvection, (b) Nanoparticle agglomeration and penetration, (c) Nanoparticle liquid layer, (d) Ballistic transport and nonlocal effects, (e) Thermophoresis theory, (f) Radiation heat

动对热导率的影响。因本文研究石墨烯纳米颗粒的体积份额较大, 纳米颗粒的碰撞加剧, 纳米颗粒团聚发生可能性增大, 需重点考虑纳米颗粒团聚对纳米颗粒热导率的影响。纳米颗粒与液体形成的液体层, 在下文进行比热容的研究中, 提出的半固体层理论仔细阐述了此种机理, 这也是在铅铋基石墨烯纳米流体的研究中重点关注点。而弹道运输、热泳理论、辐射换热因其对纳米流体的热物性影响较小, 本文中所研究的理论模型均忽略其对热物性的影响。

## 2.2 热导率计算模型

基于上述纳米流体导热机理研究, 国内外学者分别建立了纳米流体热导率理论计算模型。

1873年, Maxwell<sup>[18]</sup>对液体中添加微小的固体颗粒增加导热系数进行机理研究, 给出固液两相流基础导热模型, 此后研究主要对其提出的理论模型进行改进修正。其基本模型虽未准确预测固液流体的导热系数, 但是其导热系数变化规律为后面实验研究指明了方向。

$$\frac{k_{\text{eff}}}{k_f} = \frac{k_p + 2k_f - 2\phi(k_f - k_p)}{k_p + 2k_f + 2\phi(k_f - k_p)} \quad (3)$$

式中:  $k_f$  为液体初始导热系数;  $k_p$  为颗粒导热系数;  $\phi$  为纳米颗粒体积分数。

Wu等<sup>[19]</sup>通过分析纳米颗粒形状、大小等因素对纳米流体热导率的不同作用, 显示纳米流体导热系数受颗粒形状的影响, 长方形颗粒远高于球形颗粒, 并且纳米粒子分散均匀, 不发生团聚现象, 有较高的热导率。

Hamilton等<sup>[20]</sup>针对纳米颗粒形状对悬浮液的导热性能影响, 提出了H-C导热系数计算模型:

$$\frac{k_{\text{eff}}}{k_f} = \frac{k_p + (n-1)k_f - (n-1)\phi(k_f - k_p)}{k_p + (n-1)k_f + \phi(k_f - k_p)} \quad (4)$$

$$\psi = \frac{S_v}{S_p} \quad (5)$$

式中:  $n$  是形状因子,  $n=3/\psi$ ,  $\psi$  是颗粒的球形度;  $S_v$  是与颗粒体积相同的球形粒子表面积;  $S_p$  是颗粒的表面积。

Leal等<sup>[21]</sup>提出了适用于球形粒子的多相流热导率理论模型, 此模型综合考虑不规则的布朗运动对纳米流体热导率的影响。

$$\frac{k_{\text{eff}}}{k_f} = 1 + \phi \left[ \frac{1.176(k_p - k_f)^2}{(k_p + 2k_f)^2} + 5(0.6 - 0.028 \frac{k_p - k_f}{k_p + 2k_f}) \right] Pe_f^{3/2} \quad (6)$$

式中:  $Pe_f = r^2 \gamma \rho c_{pf} / k_f$ 。其中:  $r$  为粒子半径;  $\gamma$  为速度梯度;  $\rho$  为密度;  $c_{pf}$  为定压比热容。

宣宜民等<sup>[22]</sup>从纳米颗粒分子动力学及微观分子热量传递过程出发, 综合考虑纳米颗粒所占体积分数、粒径、基液温度、界面热阻等因素, 提出纳米流体导热系数计算模型:

$$\frac{k_{\text{eff}}}{k_f} = \frac{k_p + 2k_f - 2\phi(k_f - k_p)}{k_p + 2k_f + \phi(k_f - k_p)} + \frac{18\phi H A k_B T}{\pi^2 \rho d_p^6} \tau \quad (7)$$

式中:  $H$  为总传热系数;  $A$  为换热表面积;  $T$  为流体温度;  $d_p$  为粒子粒径;  $k_B$  为玻尔兹曼常数;  $\tau$  为时间常数。

随后再考虑纳米颗粒在基液中极易产生团聚现象的特点, Xuan等<sup>[23]</sup>提出纳米在发生团聚现象的导热系数计算模型, 值得注意的是, 此模型忽略了界面热阻对导热系数的影响:

$$\frac{k_{\text{eff}}}{k_f} = \frac{k_p + 2k_f - 2\varphi(k_f - k_p)}{k_p + 2k_f + \varphi(k_f - k_p)} + \frac{\rho_p \varphi C_p}{2k_f} \sqrt{\frac{k_B T}{3\pi r_c \mu}} \quad (8)$$

式中： $\rho_p$ 为颗粒密度； $C_p$ 为颗粒比热容； $\varphi$ 为粒子体积分数； $r_c$ 为颗粒粒径； $\mu$ 为基液运动黏度。

Chu等<sup>[24]</sup>通过对石墨烯纳米流体的实验研究，提出其导热系数计算模型(式(9))。该模型充分考虑了石墨烯纳米颗粒的体积分数、厚度、长度、界面热阻和颗粒平面度。但其在不同的基液体系中，其纳米颗粒的界面热阻和平面度是需要通过实验测定的，由此给此模型具有较多不确定性。

$$\frac{k_{\text{eff}}}{k_f} = \frac{3 + 2\eta^2 \varphi / [k_f (\frac{2R_k}{L} + 13.4\sqrt{t})]}{3 - \eta\varphi} \quad (9)$$

表1 纳米流体导热系数计算模型

Table 1 Thermal conductivity calculation models for nanofluids

| 模型<br>Models     | 表达式<br>Expressions                                                                                                                                                          | 备注<br>Remarks                                                                                                 |
|------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Maxwell          | $\frac{k_{\text{eff}}}{k_f} = \frac{k_p + 2k_f - 2\varphi(k_f - k_p)}{k_p + 2k_f + 2\varphi(k_f - k_p)}$                                                                    | 适用于球形颗粒<br>Suitable for spherical particles                                                                   |
| Hamilton-Crossor | $\frac{k_{\text{eff}}}{k_f} = \frac{k_p + (n-1)k_f - (n-1)\varphi(k_f - k_p)}{k_p + (n-1)k_f + \varphi(k_f - k_p)}$                                                         | 适用于球形颗粒和分球形颗粒<br>Suitable for spherical and subspherical particles                                            |
| Leal             | $\frac{k_{\text{eff}}}{k_f} = 1 + \varphi \left[ \frac{1.176(k_p - k_f)^2}{(k_p + 2k_f)^2} + 5(0.6 - 0.028 \frac{k_p - k_f}{k_p + 2k_f}) \right] Pe_f^{3/2}$                | 考虑布朗力对导热系数的影响<br>Considers the influence of Brownian force on thermal conductivity                            |
| Xuan(a)          | $\frac{k_{\text{eff}}}{k_f} = \frac{k_p + 2k_f - 2\varphi(k_f - k_p)}{k_p + 2k_f + \varphi(k_f - k_p)} + \frac{18\varphi H A k_B T}{\pi^2 \rho_d^6} \tau$                   | 考虑纳米颗粒体积分数、粒径、温度等因素<br>Considers factors such as nanoparticle volume fraction, particle size, and temperature |
| Xuan(b)          | $\frac{k_{\text{eff}}}{k_f} = \frac{k_p + 2k_f - 2\varphi(k_f - k_p)}{k_p + 2k_f + \varphi(k_f - k_p)} + \frac{\rho_p \varphi C_p}{2k_f} \sqrt{\frac{k_B T}{3\pi r_c \mu}}$ | 考虑纳米颗粒团聚和表面吸附<br>Considers nanoparticle agglomeration and surface adsorption                                  |
| Chu              | $\frac{k_{\text{eff}}}{k_f} = \frac{3 + 2\eta^2 \varphi / [k_f (\frac{2R_k}{L} + 13.4\sqrt{t})]}{3 - \eta\varphi}$                                                          | 考虑体积分数、长度、界面热阻和平面度等<br>Considers volume fraction, length, interface thermal resistance, and flatness          |
| Kedar            | $\frac{k_{\text{eff}}}{k_f} = (1 - \varphi) + \varphi \left[ \frac{k_p}{k_f} + \left( \frac{\pi}{6\varphi} \right)^{1/3} \times \frac{\psi}{\pi Nu} \right]^{-1}$           | 考虑界面热阻和布朗运动<br>Considers interface thermal resistance and Brownian motion                                     |

分析纳米流体热导率的综合影响因素，深入研究其热导率提升的理论机理，以球形纳米颗粒作为研究对象，选取不同导热系数计算模型对纳米颗粒体积分数在0%~20%内进行计算研究，计算结果如图3所示。

结果显示，所选模型均能正常反映纳米流体导热系数随纳米颗粒浓度的变化规律，且Xuan模型对导热系数的预测趋于较大值。Maxwell和Hamilton-Crossor模型以传统的固液掺混模型作为导热系数的计算模型，而未从微观机理中考虑纳米颗粒相对于传统大尺寸颗粒对基液导热系数所带来的显著影响。Xuan模型不仅考虑了悬浊液中的固体粒子的

式中： $\eta$ 为石墨烯纳米颗粒平面度； $R_k$ 为界面热阻； $L$ 为粒子的长度； $t$ 为粒子的厚度。

Kedar等<sup>[25]</sup>给出考虑布朗运动的纳米流体导热系数计算模型(式(10))。该模型考虑纳米颗粒的界面热阻，布朗运动导致的微能量传递。

$$\frac{k_{\text{eff}}}{k_f} = (1 - \varphi) + \varphi \left[ \frac{k_p}{k_f} + \left( \frac{\pi}{6\varphi} \right)^{1/3} \times \frac{\psi}{\pi Nu} \right]^{-1} \quad (10)$$

式中： $\psi$ 为纳米颗粒的球形度； $k_p$ 为纳米颗粒导热系数； $k_f$ 为基液导热系数， $\varphi$ 为纳米颗粒体积分数； $Nu=f(Re, Pr)$ ，其中 $Re$ 为雷诺数， $Pr$ 为布朗特数，对于纳米颗粒对基液相对静止时， $Pr < 1$ 且 $Re \ll 1$ ，此时努塞耳数 $Nu$ 可取2。

对上文中提到的纳米流体导热系数计算模型整理如表1所示。

加入改变了基液的结构，增强了内部悬浊液的能量传递。还充分考虑了纳米粒子的小尺寸效应，粒子受到布朗力的作用，在基液中做无规则的运动，使得粒子与液体之间有微对流的存在，增强了粒子与液体之间的能量传递。而Chu和Kedar模型考虑到纳米颗粒与基液形成的透明结构中的界面热阻，此热阻只能通过实验得出，而在铅铋基液与纳米颗粒间形成的界面热阻无法准确得出。

本实验推荐选用由Xuan等提出的考虑团聚现象发生的理论计算模型，此模型以Maxwell为基础，充分考虑分子动力学和热力学理论规律，从理论上准确反映铅铋基纳米流体导热系数随各因素的变化

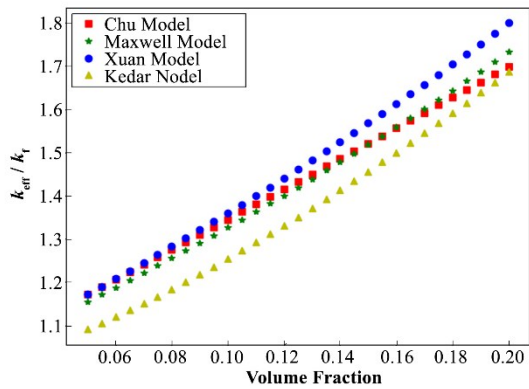


图3 导热系数随纳米颗粒浓度的变化( $T=600\text{ K}$ ,  $r=20\text{ nm}$ )  
Fig.3 Variation of the thermal conductivity with nanoparticle concentration ( $T=600\text{ K}$ ,  $r=20\text{ nm}$ )

趋势。分别研究纳米流体导热系数随石墨烯纳米颗粒浓度、温度、粒径的变化趋势,分别以铅铋(LBE)、钠(Na)、镓(Ga)为基液进行对比,结果如图4~6所示。

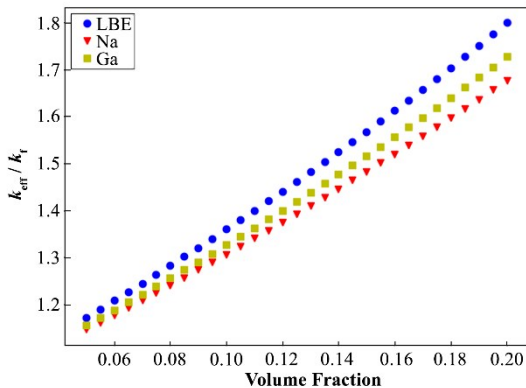


图4 导热系数随纳米颗粒浓度的变化( $T=600\text{ K}$ ,  $r=20\text{ nm}$ )  
Fig.4 Thermal conductivity changes with nanoparticle concentration ( $T=600\text{ K}$ ,  $r=20\text{ nm}$ )

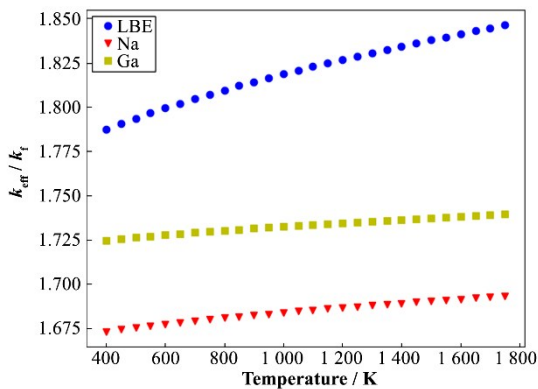


图5 导热系数随温度的变化( $\phi=0.2$ ,  $r=20\text{ nm}$ )  
Fig.5 Thermal conductivity changes with temperature ( $\phi=0.2$ ,  $r=20\text{ nm}$ )

结果表明:纳米流体的热导率随纳米颗粒的增加而增加,铅铋基液所形成纳米流体导热系数大于

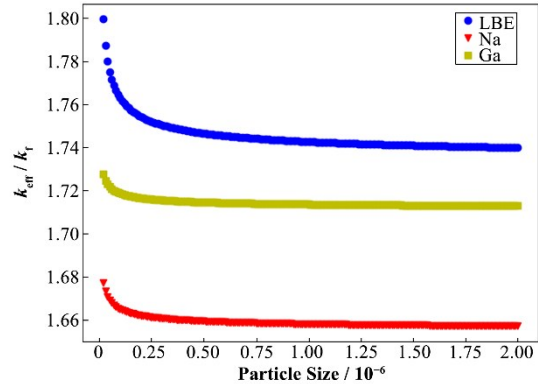


图6 导热系数随粒径的变化( $T=600\text{ K}$ ,  $\phi=0.2$ )  
Fig.6 Thermal conductivity changes with particle size ( $T=600\text{ K}$ ,  $\phi=0.2$ )

钠、镓的比导热系数。纳米颗粒浓度添加到20%时,铅铋基液的热导率提高约80%。纳米流体的导热系数随温度升高而提高,但随温度的变化较为平缓。同温度下,添加石墨烯纳米颗粒到铅铋基液中形成纳米流体,其导热系数大于以钠,镓作为基液的导热系数。纳米颗粒粒径的增大,或纳米颗粒发生团聚使纳米颗粒表现纳米粒径增大,使纳米流体热导率减小,且粒径较小时导热系数变化敏感。后续纳米颗粒的直径(约500 nm)增大或形成团聚体时,粒径对导热系数的影响较小。其中可以看出纳米颗粒的浓度对纳米流体导热系数影响较为明显,为有效提高纳米流体导热系数,在保持纳米颗粒悬浮稳定前提下,可尽量提高纳米颗粒的体积分数。

### 3 铅铋基石墨烯纳米流体黏度研究

黏度在纳米流体的流动换热过程中起着极其重要的作用,纳米流体的流动换热强度受纳米流体的流变特性制约。流体黏度受纳米颗粒浓度影响,随颗粒的加入而持续增加,流体性质会从牛顿流体变为非牛顿流体,此时会对流体换热极其不利<sup>[26]</sup>。

基液黏度、颗粒浓度、颗粒形状、颗粒尺寸、基液密度和基液温度等会对纳米流体黏度产生影响。纳米流体黏度关系表达式可用下式表示:

$$\mu_{\text{eff}} = f(\mu_f, \phi, r, K, \xi, T) \quad (11)$$

式中: $\mu_f$ 为基液黏度; $\phi$ 为纳米粒子体积份额; $r$ 为粒子粒径; $K$ 为粒子形状系数; $\xi$ 为电动势,表示电黏滞效应; $T$ 为温度。

Einstein<sup>[27]</sup>在1906年所提出的经典悬浮体系小球理论模型,结合实验数据和理论分析来预测纳米流体的黏度变化随各影响因素变化规律。小球模型即假设球形颗粒是无电荷刚性的,彼此的弱相互作用可以忽略,均匀稳定地分散在黏性流体中。纳米流体黏度可表示为:

$$\frac{\mu_{\text{eff}}}{\mu_f} = 1 + 2.5\varphi \quad (12)$$

式中： $\varphi$ 为纳米颗粒体积分数。

Brinkman<sup>[28]</sup>在Einstein模型的基础上考虑粒子间的相互作用,体积分数的适用范围扩展到4%,提出Brinkman模型,可表示为:

$$\frac{\mu_{\text{eff}}}{\mu_f} = (1 - \varphi)^{-2.5} \quad (13)$$

Batchelor等<sup>[29]</sup>考虑纳米颗粒不规则布朗运动,假设纳米颗粒稳定分散在基液中,颗粒与颗粒之间无相互作用,提出Batchelor模型:

$$\frac{\mu_{\text{eff}}}{\mu_f} = 1 + 2.5\varphi + 6.5\varphi^2 \quad (14)$$

Krieger-Dougherty等<sup>[30]</sup>提出假设在高剪切速率下的球形粒子悬浮液中,提出半经验公式,可表示为:

$$\frac{\mu_{\text{eff}}}{\mu_f} = \left(1 - \frac{\varphi}{\varphi_m}\right)^{-2.5\varphi_m} \quad (15)$$

式中: $\varphi_m$ 为最大体积分数,约为常数0.605。

Thomas等<sup>[31]</sup>提出适用于球形粒子且粒子体积浓度较高时的黏度计算公式:

$$\frac{\mu_{\text{eff}}}{\mu_f} = 1 + 2.5\varphi + 10.05\varphi^2 + 0.00273e^{16.6\varphi} \quad (16)$$

Massimo等<sup>[32]</sup>基于纳米流体基液黏度、颗粒浓度、颗粒尺寸对纳米流体黏度影响,给出了纳米粒子尺寸在25~200 nm时的黏度计算公式。

$$\frac{\mu_{\text{eff}}}{\mu_f} = \frac{1}{1 - 34.87(d_p/d_f)^{-0.3}\varphi^{1.3}} \quad (17)$$

$$d_f = 0.1\left(\frac{6M}{N_A\pi\rho_0}\right)^{1/3} \quad (18)$$

式中: $d_p$ 为纳米颗粒的直径; $M$ 是基液的摩尔质量; $N_A$ 是阿伏伽德罗常数; $\rho_0$ 是基液在303.15 K时基液的密度。

上文提到的纳米流体黏度计算模型整理为表2。

表2 纳米流体黏度计算模型  
Table 2 Viscosity calculation models for nanofluids

| 模型<br>Model       | 表达式<br>Expressions                                                                            | 备注<br>Remarks                                                                                                      |
|-------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Einstein          | $\frac{\mu_{\text{eff}}}{\mu_f} = 1 + 2.5\varphi$                                             | 球形粒子的悬浮液<br>Suspension of spherical particles                                                                      |
| Brinkman          | $\frac{\mu_{\text{eff}}}{\mu_f} = (1 - \varphi)^{-2.5}$                                       | 考虑粒子间相互作用<br>Considers the interaction between particles                                                           |
| Batchelor         | $\frac{\mu_{\text{eff}}}{\mu_f} = 1 + 2.5\varphi + 6.5\varphi^2$                              | 考虑布朗运动的影响<br>Considers the influence of Brownian motion                                                            |
| Krieger-Dougherty | $\frac{\mu_{\text{eff}}}{\mu_f} = \left(1 - \frac{\varphi}{\varphi_m}\right)^{-2.5\varphi_m}$ | 高剪切速率下的球形粒子悬浮液<br>Spherical particle suspension under high shear rate                                              |
| Thomas            | $\frac{\mu_{\text{eff}}}{\mu_f} = 1 + 2.5\varphi + 10.05\varphi^2 + 0.00273e^{16.6\varphi}$   | 球形粒子,浓度较高情形<br>Spherical particles with higher concentration                                                       |
| Massimo           | $\frac{\mu_{\text{eff}}}{\mu_f} = \frac{1}{1 - 34.87(d_p/d_f)^{-0.3}\varphi^{1.3}}$           | 考虑基液黏度、颗粒浓度、颗粒尺寸的影响<br>Considers the influences of base fluid viscosity, particle concentration, and particle size |

根据上述黏度计算模型,纳米流体黏度随浓度的变化规律如图7所示。

根据图7显示,以上提到的关于纳米流体黏度的经典模型均无法在一个较宽的浓度范围准确预测纳米流体的黏度,对于不同的纳米流体体系,模型并不适用。而在经典模型基础上,根据实验结果预测的Thomas模型更加准确地反映了纳米流体黏度随纳米颗粒体积分数的变化。根据Thomas模型,纳米颗粒浓度达到20%时,黏度提高一倍。为更好预测较高浓度铅铋基石墨烯纳米流体的黏度可选用精确度更高的Thomas模型。

关于金属流体的黏度与温度变化关系,普遍使用VFT(Vogel-Fulcher-Tammann)公式<sup>[33]</sup>。用此模型

可预测纳米流体黏度随温度的变化。

$$\eta = \eta_0 e^{\frac{A \times T_0}{T - T_0}} \quad (19)$$

式中: $\eta_0$ 、 $T_0$ 、 $A$ 是特定参数。对式(19)两边取对数得: $\ln\eta$ 与 $1/(T-T_0)$ 成线性关系。

在浓度较低情况下,石墨烯纳米流体黏度随着温度的升高而变小,其变化规律如图8所示,与基液黏度随温度的变化趋势相同。随着石墨烯纳米颗粒的浓度的增加,基液和颗粒之间的摩擦应力增强,使流体黏度增加。

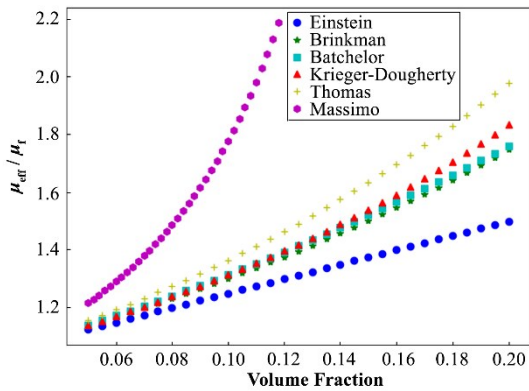


图7 不同模型预测纳米流体黏度随颗粒浓度的变化 ( $T=600\text{ K}$ )

Fig.7 Variation of the nanofluid viscosity with particle concentration predicted by different models ( $T=600\text{ K}$ )

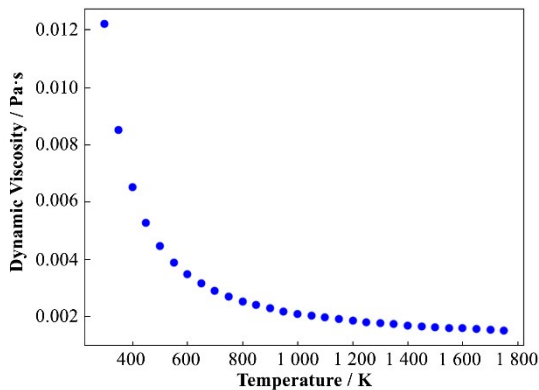


图8 纳米流体动力黏度随温度变化( $\phi=0.2$ )

Fig.8 Dynamic viscosity of nanofluids changes with temperature ( $\phi=0.2$ )

## 4 铅铋基石墨烯纳米流体比热容研究

比热容是反应堆冷却工质重要的热物性质,代表冷却介质传热蓄热能力。Pacheco等<sup>[34]</sup>认为传统流体的比热容必须高于  $2.25\text{ J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ,且能在  $600\sim 800\text{ }^{\circ}\text{C}$  温度区间稳定运行,才具有与化石能源在价格上的竞争力。铅铋基的比热容相对较低,远达不到此要求。提高铅铋的比热容将减少铅铋的冷却剂用量,减少本体体积,提高蓄热能力及热交换系统的稳定性。众多学者对纳米流体比热容进行了广泛研究,实验表明纳米颗粒的添加对基液比热容有较大的提高。

### 4.1 比热容强化机理

纳米颗粒比热容强化机理研究,主要以实验为基础,运用计算模拟的手段进行模型预测。据此,研究人员提出了三种纳米流体比热容强化机理<sup>[35]</sup>。

#### 1) 纳米颗粒比热增大导致

此机理认为纳米颗粒本身比热容较大导致纳米

流体的比热容增加。然而部分研究者指出,比热容较小的  $\text{SiO}_2$  纳米固体颗粒稳定分散到比其比热容大的无机盐中,纳米流体的比热容较基液也能得到较高的强化效果。故此,比热容强化来源于纳米颗粒本身的机理还有待商榷。

#### 2) 纳米颗粒比表面能和固液界面热阻

由于纳米颗粒的纳米尺寸尺度,比表面积和表面能较大,其表面的原子数占原子总数比例大。相对于靠近中心的原子,由于内外的受力不均,导致更多的外部原子活跃,形成较大的震动熵。纳米颗粒与基液接触部分具有界面热阻,因其较大的比表面积,界面热阻较大,能量储蓄能力得到增强,进而纳米流体比热容增大。

#### 3) 纳米颗粒表面与基液之间形成半固体层

纳米颗粒表面会吸附基液分子,液体原子形成具有定向有序的原子排列,导致形成半固体层结构。由于此类似于晶体结构的形成,分子间结合紧密,导致半固体中存在势垒现象。必须吸收足够的能量才能脱离于纳米颗粒的束缚,从而带来纳米流体比热容的增加。

## 4.2 比热容计算模型

目前大部分纳米流体比热容研究集中常温环境中,对高温纳米流体的比热容研究较少。根据目前所建立的纳米流体比热容计算模型整理如下:

Pak等<sup>[36]</sup>在1998年提出纳米流体比热容计算模型,此模型从理想气体混合物的混合概念形成,称简单混合模型:

$$C_{\text{peff}} = (1 - \phi)C_{\text{pf}} + \phi C_{\text{pp}} \quad (20)$$

式中: $\phi$ 为纳米颗粒体积分数; $C_{\text{peff}}$ 、 $C_{\text{pf}}$ 、 $C_{\text{pp}}$ 分别为纳米流体、基液、纳米颗粒的比热容。

Xuan等<sup>[37]</sup>将密度因素考虑在内,提出纳米流体的比热容修正公式如下:

$$C_{\text{peff}} = \frac{(1 - \phi)(\rho C_p)_f + \phi(\rho C_p)_p}{(1 - \phi)\rho_f + \phi\rho_p} \quad (21)$$

Shin等<sup>[38]</sup>根据比热容导热机理提出的半固体层模型,纳米颗粒表面将形成厚度约为  $1\text{ nm}$  的半固体层。基于高温熔盐基,提出新的高温纳米流体比热容计算模型如下:

$$C_{\text{peff}} = \frac{\phi_p \rho_p C_{\text{pp}} + \phi_f \rho_f C_{\text{pf}} + \phi_s \rho_s C_{\text{ps}}}{\phi_p \rho_p + \phi_f \rho_f + \phi_s \rho_s} \quad (22)$$

式(22)中的半固体层的比热容和密度,以目前的观测和测量数据手段难以得到精确测量,故该模型还有待改进修正。故此,shin等作出如下假设:根据实验观察半固体层厚度取  $1\text{ nm}$ ,半固体比热容、密度等于纳米颗粒的比热容、密度,在基于如上假设

的基础上提出改进的比热容预测模型。如公式：

$$C_{\text{peff}} = \frac{M_x C_{\text{pp}} + \frac{M\phi}{m_p} m_{\text{bs}} C_{\text{pbs}} + (M - m\phi - \frac{m\phi}{m_p} m_{\text{bs}}) C_{\text{pf}}}{M} \quad (23)$$

$$m_p = \rho_p V_p = (\rho_p \pi D_p^3)/6 \quad (24)$$

$$m_{\text{bs}} = \rho_{\text{bs}} V_{\text{bs}} = \rho_{\text{bs}} \frac{4}{3} \pi \left[ \left( \frac{D_p}{2} + \delta + d \right)^3 - \left( \frac{D_p}{2} + d \right)^3 \right] \quad (25)$$

式中： $C_{\text{peff}}$ 、 $C_{\text{pp}}$ 、 $C_{\text{pbs}}$ 、 $C_{\text{pf}}$ 分别为纳米流体、纳米颗粒、半固体层、基液的比热容； $M$ 、 $m_p$ 、 $m_{\text{bs}}$ 为纳米流体的总质量、纳米颗粒的质量，半固体层的质量； $\phi$ 为纳米颗粒的质量分数； $\delta$ 为半固体层厚度； $d$ 为间隙宽度。

Pakdaman等<sup>[39]</sup>基于最小二乘法的关联式，结合所做的实验数据得到温度区间在313~343 K的比热容计算模型。Alade等<sup>[40]</sup>研究者使用遗传算法/支持向量回归(GA/SVR)模型，纳米颗粒在体积分数为3.7%~9.3%内进行了精确预测。

表3 纳米流体比热容计算模型  
Table 3 Specific heat capacity calculation models for nanofluids

| 模型     | 表达式                                                                                                                                                               | 备注                                                                                     |
|--------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| Models | Expressions                                                                                                                                                       | Remarks                                                                                |
| Pak    | $C_{\text{peff}} = (1 - \phi)C_{\text{pf}} + \phi C_{\text{pp}}$                                                                                                  | 基于理想气体混合物混合概念<br>Based on the ideal gas mixture mixing concept                         |
| Xuan   | $C_{\text{peff}} = \frac{(1 - \phi)(\rho C_p)_f + \phi(\rho C_p)_p}{(1 - \phi)\rho_f + \phi\rho_p}$                                                               | 考虑密度的影响<br>Considers the influence of density                                          |
| Shin   | $C_{\text{peff}} = \frac{\phi_p \rho_p C_{\text{pp}} + \phi_f \rho_f C_{\text{pf}} + \phi_s \rho_s C_{\text{ps}}}{\phi_p \rho_p + \phi_f \rho_f + \phi_s \rho_s}$ | 考虑密度、半固体层的影响<br>Considers the influences of density and semi-solid layer               |
|        | $C_{\text{peff}} = \frac{M_x C_{\text{pp}} + \frac{M\phi}{m_p} m_{\text{bs}} C_{\text{pbs}} + (M - m\phi - \frac{m\phi}{m_p} m_{\text{bs}}) C_{\text{pf}}}{M}$    | 基于半固体层厚度1 nm的假设<br>Based on the assumption that the semi-solid layer thickness is 1 nm |

运用上述各模型对铅铋基加入石墨烯纳米颗粒进行模型分析计算(图9)。

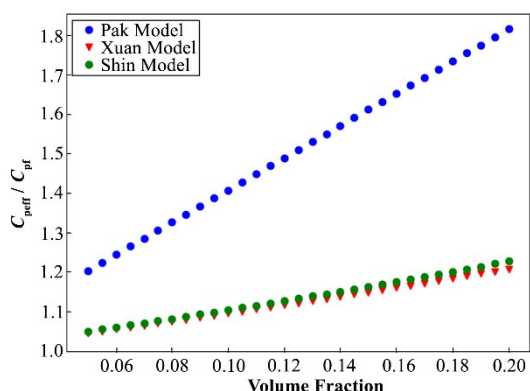


图9 铅铋基石墨烯纳米流体比热容随浓度变化  
Fig.9 Variation of the specific heat capacity of lead-bismuth-based graphene nanofluid with nanoparticle concentration

研究表明：纳米流体中纳米颗粒的添加可对基液的比热容有效提升。Pak模型只是简单地考虑浓度对比热容的影响，而Xuan模型考虑了基液和纳米颗粒的密度对纳米流体的影响，更加契合实验数据，但是在微观层面没有考虑纳米颗粒表面形成的半固体层结构，此结构由Shin等观察并提出，并能准确预测纳米流体比热容的实际变化。从Shin模型可以看出石墨烯的添加对比热容的增加有限，约为20%。

目前关于纳米流体的比热容研究的理论、实验、模型等较多，但都局限于特定实验数据的模型预测与理论分析，半固体层、分液面等微型结构难以精确测量，并未形成全面准确地理论机理和计算模型。特别是针对金属基等高温纳米流体的研究数据较少，还有待深入考究。

## 5 结语

本文结合现有纳米流体的相关研究进展，结合铅铋基石墨烯纳米流体的热物特性进行研究计算，有如下结论：

1) 纳米颗粒的添加对纳米流体导热系数有较大影响，在保证纳米流体稳定的前提下，颗粒浓度达到20%时，基液热导率可以提高80%。纳米流体的导热系数因温度的升高随之增大，但上升的趋势较为平缓。随着纳米颗粒粒径的增大，或随着团聚现象的发生而使颗粒聚合物粒径变大，纳米流体的导热系数减小，且粒径增加到一定程度后，对导热系数的影响可忽略。

2) 纳米流体黏度主要受纳米颗粒浓度和温度的影响，纳米流体黏度随浓度的增加而变大，随流体温度下降而变大。然而对影响纳米流体黏度其他影响因素只能通过有限的实验定性分析其机理作用，纳米流体黏度计算精确理论模型还有待于进一步深入研究。

3)目前纳米颗粒的添加对基液比热容强化基础理论仍不完善,高温、高腐蚀等严苛条件下纳米流体比热容的测试技术仍有待改进,现有计算模型局限于特定实验表征,预测模型难以正确反映纳米流体比热容强化的普遍规律。近年部分学者尝试通过分子动力学模拟方法对纳米流体比热容进行了计算和机理研究,将成为纳米流体比热容强化机理新的研究方向。

总之,纳米流体技术为增强铅铋等金属的热物性有着广泛的实用前景。石墨烯加入铅铋堆冷却剂中将有效改善其各方面热物理性能,减少其冷却剂的用量,提高热功率密度,降低铅铋堆堆体体积和重量,为铅铋堆在偏远地区和海洋环境应用提供坚实的理论基础。

## 参考文献

- 李宗洋, 郭慧芳, 赵畅, 等. 国外铅铋堆发展及军事应用[J]. 国外核新闻, 2020, (7): 29 - 31.  
LI Zongyang, GUO Huifang, ZHAO Chang, *et al.* Development and military application of foreign lead-bismuth reactors[J]. Foreign Nuclear News, 2020, (7): 29 - 31.
- Choi S U S, Eastman J A. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles[R]. IL (United States): Argonne National Lab., 1995.
- 乔峰. Ag、石墨烯纳米流体的制备及性能研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2010.  
QIAO Feng. Preparation and properties of Ag and graphene nanofluids[D]. Qingdao: Qingdao University of Science & Technology, 2010.
- 宣益民. 纳米流体能量传递理论与应用[J]. 中国科学: 技术科学, 2014, 44(3): 269 - 279. DOI: 10.1360/092013-1236.  
XUAN Yimin. An overview on nanofluids and applications[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2014, 44(3): 269 - 279. DOI: 10.1360/092013-1236.
- 舒宇. 水基石墨烯纳米流体的热物性及流动换热特性研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2019.  
SHU Yu. An experimental study on the thermal properties and heat transfer characteristics of water-based graphene nanofluids[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2019.
- Shukla K N, Koller T M, Rausch M H, *et al.* Effective thermal conductivity of nanofluids - a new model taking into consideration Brownian motion[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2016, 99: 532 - 540. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.03.129.
- Demirkr A, Ertürk H. Rheological and thermal characterization of graphene-water nanofluids: hysteresis phenomenon[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 149: 119113. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.119113.
- Ma K Q, Liu J. Nano liquid-metal fluid as ultimate coolant [J]. Physics Letters A, 2007, 361(3): 252 - 256. DOI: 10.1016/j.physleta.2006.09.041.
- 门玉宾. 液态金属及纳米流体流动和传热特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.  
MEN Yubin. Investigation on the flow and heat transfer of liquid metal and liquid metal nanofluids[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
- Zhou X M, Jiang Y Q, Wang Y, *et al.* Comprehensive heat transfer performance analysis of liquid metal based nanofluid laminar flow in circular tube[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2020, 175: 105530. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2020.105530.
- Agarwal D K, Vaidyanathan A, Sunil Kumar S. Synthesis and characterization of kerosene-alumina nanofluids[J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 60(1 - 2): 275 - 284. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2013.06.049.
- Balanta A, Godard C, Claver C. Pd nanoparticles for C-C coupling reactions[J]. Chemical Society Reviews, 2011, 40(10): 4973 - 4985. DOI: 10.1039/c1cs15195a.
- 伍婷婷, 刘建忠, 陈冰虹, 等. 纳米流体燃料稳定性及金属颗粒改性方法研究进展[J]. 推进技术, 2020, 41(3): 481 - 492. DOI: 10.13675/j.cnki.tjjs.190313.  
WU Tingting, LIU Jianzhong, CHEN Binghong, *et al.* Research progress on nanofluid fuels stability and metal particle modification methods[J]. Journal of Propulsion Technology, 2020, 41(3): 481 - 492. DOI: 10.13675/j.cnki.tjjs.190313.
- Einstein A. Investigations on the theory of the Brownian movement[M]. Courier Corporation, 1956.
- Wang J J, Zheng R T, Gao J W, *et al.* Heat conduction mechanisms in nanofluids and suspensions[J]. Nano Today, 2012, 7(2): 124 - 136. DOI: 10.1016/j.nantod.2012.02.007.
- 马坤全. 液态金属芯片散热方法的研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(理化技术研究所), 2008.  
MA Kunquan. Study on liquid metal cooling method for thermal management of computer chip[D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences (Technical Institute of Physics and Chemistry), 2008.

- 17 赵国昌, 曹磊, 宋丽萍, 等. 纳米流体导热机理研究分析[J]. 沈阳航空航天大学学报, 2013, **30**(4): 7 - 11. DOI: 10.3969/j.issn.2095-1248.2013.04.002.  
ZHAO Guochang, CAO Lei, SONG Liping, *et al.* Analysis of research on heat conduction mechanisms of nanofluids[J]. Journal of Shenyang Institute of Aeronautical Engineering, 2013, **30**(4): 7 - 11. DOI: 10.3969/j.issn.2095-1248.2013.04.002.
- 18 Maxwell J C. A treatise on electricity and magnetism[M]. 2nd ed. Cambridge, U.K: Oxford University Press, 1904.
- 19 Wu J M, Zhao J Y. A review of nanofluid heat transfer and critical heat flux enhancement—research gap to engineering application[J]. Progress in Nuclear Energy, 2013, **66**: 13 - 24. DOI: 10.1016/j.pnucene.2013.03.009.
- 20 Hamilton R L, Crosser O K. Thermal conductivity of heterogeneous two-component systems[J]. Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals, 1962, **1**(3): 187 - 191. DOI: 10.1021/i160003a005.
- 21 Leal L G. On the effective conductivity of a dilute suspension of spherical drops in the limit of low particle peclet number[J]. Chemical Engineering Communications, 1973, **1**(1): 21 - 31. DOI: 10.1080/00986447308960412.
- 22 宣益民. 纳米流体能量传递理论与应用[J]. 中国科学: 技术科学, 2014, **44**(3): 269 - 279. DOI: 10.1360/092013-1236.  
XUAN Yimin. An overview on nanofluids and applications[J]. Scientia Sinica: Technologica, 2014, **44**(3): 269 - 279. DOI: 10.1360/092013-1236.
- 23 宣益民, 胡卫峰, 李强. 纳米流体的聚集结构和导热系数模拟[J]. 工程热物学报, 2002, **23**(2): 206 - 208.  
XUAN Yimin, HU Weifeng, LI Qiang. Simulations of structure and thermal conductivity of nanofluids[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2002, **23**(2): 206 - 208.
- 24 Chu K, Li W S, Tang F L. Flatness-dependent thermal conductivity of graphene-based composites[J]. Physics Letters A, 2013, **377**(12): 910 - 914. DOI: 10.1016/j.physleta.2013.02.009.
- 25 Shukla K N, Koller T M, Rausch M H, *et al.* Effective thermal conductivity of nanofluids - a new model taking into consideration Brownian motion[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2016, **99**: 532 - 540. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.03.129.
- 26 司爱国, 王浩昌, 高玉国, 等. 水基石墨烯纳米流体黏度的实验研究[J]. 河南科技, 2017, (5): 134 - 136.  
SI Aiguo, WANG Haochang, GAO Yuguo, *et al.* Experimental research on the viscosity of water-based graphene nanofluids[J]. Henan Science and Technology, 2017, (5): 134 - 136.
- 27 Einstein A. Eine neue Bestimmung der Moleküldimensionen[J]. Annalen Der Physik, 1906, **324**(2): 289 - 306. DOI: 10.1002/andp.19063240204.
- 28 Brinkman H C. The viscosity of concentrated suspensions and solutions[J]. The Journal of Chemical Physics, 1952, **20**(4): 571. DOI: 10.1063/1.1700493.
- 29 Batchelor G K. The effect of Brownian motion on the bulk stress in a suspension of spherical particles[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1977, **83**(1): 97 - 117. DOI: 10.1017/s0022112077001062.
- 30 Krieger I M, Dougherty T J. A mechanism for non-Newtonian flow in suspensions of rigid spheres[J]. Transactions of the Society of Rheology, 1959, **3**(1): 137 - 152. DOI: 10.1122/1.548848.
- 31 苏子威, 周涛, 刘梦影, 等. 液态铅铋合金热物性研究[J]. 核技术, 2013, **36**(9): 090205. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2013.hjs.36.090205.  
SU Ziwei, ZHOU Tao, LIU Mengying, *et al.* Thermophysical properties of liquid lead-bismuth eutectic[J]. Nuclear Techniques, 2013, **36**(9): 090205. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2013.hjs.36.090205.
- 32 Corcione M. Empirical correlating equations for predicting the effective thermal conductivity and dynamic viscosity of nanofluids[J]. Energy Conversion and Management, 2011, **52**(1): 789 - 793. DOI: 10.1016/j.enconman.2010.06.072.
- 33 谢朝阳, 田荫棠, 包荫鸾. 液态合金 Al-4.5 Cu 的粘滞性[J]. 西北工业大学学报, 1988, **6**(2): 219 - 226.  
XIE Chaoyang, TIAN Yintang, BAO Yinluan. On the viscosity of liquid alloy Al-4.5 Cu[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 1988, **6**(2): 219 - 226.
- 34 Romero M, Buck R, Pacheco J E. An update on solar central receiver systems, projects, and technologies[J]. Journal of Solar Energy Engineering, 2002, **124**(2): 98 - 108. DOI: 10.1115/1.1467921.
- 35 Ho M X, Pan C. Optimal concentration of alumina nanoparticles in molten Hitec salt to maximize its specific heat capacity[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014, **70**: 174 - 184. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.10.078.
- 36 Pak B C, Cho Y I. Hydrodynamic and heat transfer study

- of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles [J]. *Experimental Heat Transfer*, 1998, **11**(2): 151 - 170. DOI: 10.1080/08916159808946559.
- 37 Xuan Y M, Roetzel W. Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2000, **43**(19): 3701 - 3707. DOI: 10.1016/S0017-9310(99)00369-5.
- 38 Shin D, Banerjee D. Specific heat of nanofluids synthesized by dispersing alumina nanoparticles in alkali salt eutectic[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2014, **74**: 210 - 214. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.02.066.
- 39 Fakoor Pakdaman M, Akhavan-Behabadi M A, Razi P. An experimental investigation on thermo-physical properties and overall performance of MWCNT/heat transfer oil nanofluid flow inside vertical helically coiled tubes[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2012, **40**: 103 - 111. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2012.02.005.
- 40 Alade I O, Rahman M A A, Saleh T A. An approach to predict the isobaric specific heat capacity of nitrides/ethylene glycol-based nanofluids using support vector regression[J]. *Journal of Energy Storage*, 2020, **29**: 101313. DOI: 10.1016/j.est.2020.101313.