

硕士学位论文

相变材料与纳米流体的耦合传热数值模拟 研究

NUMERICAL SIMULATION STUDY ON COUPLED HEAT TRANSFER OF PHASE CHANGE MATERIALS AND NANOFUIDS

孟安宇

哈尔滨工业大学

2019 年 6 月

国内图书分类号: TK124
国际图书分类号: 621.18

学校代码: 10213
密级: 公开

工程硕士学位论文

相变材料与纳米流体的耦合传热数值模拟 研究

硕 士 研 究 生: 孟安宇

导 师: 崔文政副教授

申 请 学 位: 工程硕士

学 科: 动力工程

所 在 单 位: 汽车工程学院

答 辩 日 期: 2019 年 6 月

授予学位单位: 哈尔滨工业大学

Classified Index: TK124

U.D.C: 621.18

Dissertation for the Master's Degree in Engineering

**NUMERICAL SIMULATION STUDY ON COUPLED
HEAT TRANSFER OF PHASE CHANGE
MATERIALS AND NANOFUIDS**

Candidate:	Meng Anyu
Supervisor:	Associate Prof. Cui Wenzheng
Academic Degree Applied for:	Master of Engineering
Speciality:	Power Engineering
Affiliation:	School of Automobile Engineering
Date of Defence:	June, 2019
Degree-Conferring-Institution:	Harbin Institute of Technology

摘 要

潜热储能指的是利用相变材料通过改变物质状态吸收或释放大量的潜热，是储能技术研究的主要方向之一。它在大功率电力电子器件的冷却、工业余热利用、锂离子电池热管理等领域有潜在大量应用。掌握相变材料融化与凝固机理是潜热储能技术应用的关键。另外，为了进一步改善相变材料换热过程而引入高效强化传热工质纳米流体的研究几乎还没有。为此本课题针对上述问题开展研究，研究结果将为相变储能技术在工业领域应用奠定理论基础。

本文首先基于径向基（RBF）神经网络法与响应曲面法（RSM）研究 Al_2O_3 -水纳米流体的相对导热系数。用 Matlab 编写 RBF 神经网络程序，将 RBF 神经网络模型对纳米流体相对导热系数的预测结果与 Maxwell 模型和 Bruggeman 等人模型的进行比较，结果表明本文模型预测结果最好；用 Minitab 进行 RSM 分析，提出按照浓度进行分类的经验关联式，并与 Timofeeva 等人模型和 Minsta 等人模型对纳米流体的相对导热系数的预测结果进行比较，结果表明本文模型预测结果最好。

本文其次采用 Fluent 中的融化/凝固模型对相变材料（PCM）的融化过程进行了研究。首先研究了流速与温差对 PCM 完全融化时间与液相率随时间变化的影响。结果表明：流速对石蜡融化过程影响较弱，而温差对石蜡的融化过程影响剧烈。然后通过轴截面的相界面位置的变化、不同温差对相界面位置的影响、不同时刻与不同温差下的液相石蜡平均流速大小、不同时刻与不同温差下的耦合界面处热流密度大小，再结合不同工况与不同时刻的轴截面温度分布图与在同一时刻处在不同温差下的轴截面的温度分布图对 PCM 融化过程机理进行了研究。结果表明：初始温差大小、耦合界面处热流密度大小、石蜡内部的温度分布与石蜡内部的热传递过程相互影响。最后为了在实际应用中能够依据使用工况更好地对石蜡的含量进行选择，利用 Minitab 进行了全因子实验设计分析，确定出一个关于石蜡完全融化时间与同心套管的内外径与温差大小关系的经验关联式。

本文最后通过求解融化/凝固与离散相（DPM）耦合模型去研究温差与纳米流体对石蜡完全凝固时间与液相率随时间变化的影响，并且依据液相率随时间的变化图将石蜡的凝固过程分为 4 个时间段，计算了每个时间段内的液相率单位时间变化率值。整个数值模拟过程在 Fluent 中完成。结果表明：温差与纳米流体对 PCM 凝固过程的影响主要发生在凝固前期。对比温差与

纳米流体对于石蜡凝固过程的影响后发现，使用纳米流体作为冷却工质等效于增大了初始温差。

关键词：数值模拟；相变；石蜡；纳米流体；导热系数

Abstract

Latent heat storage refers to the use of phase change materials to absorb or release a large amount of latent heat by changing the state of matter. It is one of the main directions of energy storage technology research. It has potential applications in cooling power electronic devices, industrial waste heat utilization, thermal management of lithium-ion batteries and other fields. Mastering the melting and solidification mechanism of phase change materials is the key to the application of latent heat storage technology. In addition, the introduction of high-efficiency heat transfer enhancement refrigerant nanofluids to further enhance the heat transfer process of phase change materials has hardly been studied. For this reason, the research on the above problems will lay a theoretical foundation for the application of phase change energy storage technology in the industrial field.

In this paper, the relative thermal conductivity of Al_2O_3 -water nanofluids is studied by radial basis function (RBF) neural network and response surface methodology (RSM). Among them, the RBF neural network program is compiled by using matlab, and the prediction results of RBF neural network model are compared with those of Maxwell model and Bruggeman et al. model, RBF neural network model is the best. RSM analysis is carried out by using Minitab, and an empirical correlation formula for classification according to concentration is proposed. The prediction results are compared with those of Timofeeva et al. model and Minsta et al. model, the prediction result of this model is the best.

Secondly, the melting process of phase change materials (PCM) was studied by using the melting/solidification model in Fluent. Firstly, the effects of flow rate and temperature difference on the complete melting time and liquid phase ratio of PCM with time were studied. The results show that the effect of flow rate on the melting process of paraffin wax is weak, while the effect of temperature difference on the melting process of paraffin wax is severe. Then through the change of the phase interface position of the axial section, the influence of different temperature difference on the phase interface position, the average flow velocity of liquid paraffin at different time and temperature

difference, the heat flux at the coupling interface at different time and temperature difference, the temperature distribution maps of the axial section at different working conditions and different times, and the temperature distribution maps of the axial section at different temperature difference at the same time, the melting mechanism of PCM was studied. The results show that the initial temperature difference, the heat flux at the coupling interface, the temperature distribution in paraffin wax and the heat transfer process in paraffin wax affect each other. Finally, in order to select the content of paraffin better according to the operating conditions in practical application, a full-factor experimental design analysis was carried out using Minitab, and an empirical correlation was established between the complete melting time of paraffin and the inner and outer diameter of concentric casing and the temperature difference.

Finally, the effects of temperature difference and nanofluids on the complete solidification time and liquid fraction of paraffin wax with time were studied by solving the melting/solidification and discrete phase (DPM) coupled model. The solidification process of paraffin is divided into four time periods according to the change chart of liquid rate with time, and the liquid rate per unit time change rate in each time period is calculated. The whole numerical simulation process is completed in Fluent. The results show that the effects of temperature difference and nanofluids on the solidification process of PCM mainly occur in the early stage. By comparing the effects of temperature difference and nanofluids on the solidification process of paraffin wax, it was found that using nanofluids as refrigerant equivalent to increasing the initial temperature difference.

Keywords: numerical simulation, phase change, paraffin, nanofluids, thermal conductivity

目 录

摘 要	I
Abstract.....	III
第 1 章 绪 论	1
1.1 课题研究背景及意义	1
1.2 国内外研究现状	2
1.2.1 相变材料的研究现状	2
1.2.2 纳米流体的研究现状	4
1.2.3 相变材料与纳米流体耦合传热的研究现状	7
1.3 本文主要研究内容	8
第 2 章 研究工作理论基础	10
2.1 已有的纳米流体相对导热系数修正模型	10
2.2 径向基神经网络（RBF）模型	11
2.3 响应曲面法（RSM）	17
2.4 相变传热理论	17
2.5 离散相模型（DPM）理论	19
2.6 本章小结	21
第 3 章 纳米流体相对导热系数理论预测研究	22
3.1 基于神经网络法预测相对导热系数	22
3.2 基于 RSM 法预测相对导热系数	25
3.3 本章小结	31
第 4 章 相变材料融化过程数值模拟研究	32
4.1 相变模型验证	32
4.1.1 几何模型	32
4.1.2 初始条件与边界条件	32
4.1.3 CFD 仿真模型验证	33
4.2 流速与温差对石蜡融化过程的影响	35
4.2.1 流速对石蜡融化过程的影响	35
4.2.2 温差对石蜡融化过程的影响	37
4.3 相变材料融化过程机理研究	39
4.4 相变材料完全融化时间的预测	44
4.5 本章小结	47

第 5 章 相变材料凝固过程数值模拟研究	48
5.1 离散相模型(DPM)的验证	48
5.2 融化/凝固与 DPM 耦合模型求解方法	50
5.2.1 几何模型	50
5.2.2 CFD 模拟方法	51
5.3 温差对 PCM 凝固过程的影响	52
5.4 纳米流体对 PCM 凝固过程的影响	56
5.5 本章小结	60
结 论	62
参考文献	64
哈尔滨工业大学学位论文原创性声明和使用权限	71
致 谢	72

第 1 章 绪 论

1.1 课题研究背景及意义

进入二十一世纪以来,能源问题日趋严峻。据估计,目前占世界能耗总量 80%的化石燃料(煤炭、石油、天然气)的最终可采量相当于 33730 亿吨原煤,而世界能耗量正以每年 5%的速度增长,已探明储量的化石燃料预计只够人类使用一两百年。随着石油、天然气等化石能源的逐步枯竭,新能源的开发利用还没有重大突破,目前世界正处在“青黄不接”的能源低谷时期。因此,各国都在积极发展可再生能源。依据《全球可再生能源现状报告 2018》报告,2017 年的可再生能源的发电量占到了全球发电量净增加值的 70%^[1]。风能与太阳能属于可再生能源,制约他们发展的一大因素就是能量的存储效率低^[2,3]。在很多国家,白天与晚上电能的利用率会有很大差别^[4]。因此,如何将这此能量更高效大量地存储起来,成为各国学者研究的一个热点问题。

蓄热技术能够将能量以热能的形态有效地存储起来,对于节约能量与提高能量的利用率具有重要意义。现在的蓄热技术主要分为热化学蓄热、显热蓄热和相变蓄热。热化学蓄热的优点是蓄热密度大,缺点是不安全且蓄热过程不可控;显热蓄热是目前应用最广的一种储热方式,但是其蓄热密度小;相变蓄热技术依靠相变材料实现,相变材料具有很广的相变温度范围^[5],且此技术具有温度恒定和蓄热密度大的优点,尤其适用于热量供给不连续或供给与需求不协调的工况。这些优势更加有助于蓄热技术的广泛应用,目前主要应用于以下领域^[6]:能量的时间延迟、能源供应安全(医院,计算机中心等)与热惯性和热保护。

随着工业化水平与科技的进步,传统工质作为换热介质已经不能够很好地满足散热要求,寻求具有更好传热性能的流体成为了各国学者研究的热点问题。1995 年,Choi 等^[7]提出“纳米流体”概念。由于往水中加入的固体颗粒是纳米级别的,因此在实际应用中不容易造成堵塞,并且由于在基液中加入纳米颗粒,形成的传热工质具有相当高的导热系数与对流换热特性,这更有利于强化换热。因此,纳米流体是一种很有潜力的换热工质^[8,9]。

在电池热管理上,现有的方式主要为空气冷却技术、液体冷却技术与相变材料(PCM)冷却技术。空气冷却技术中的被动式冷却技术利用电池内部的热/冷源对电池进行热管理^[10];液体冷却技术^[11]中的被动式冷却采用的方式是通过在电池与电池间布置管套,利用管套中的介质将热量带走,常用的

介质是水;PCM 冷却技术^[11]是用 PCM 包裹电池,利用 PCM 融化吸热,将电池散发出来的热量以潜热的方式储存在 PCM 中。综上所述,PCM 在融化过程中具有储能与控温的作用,研究其融化过程将有助于其实际应用,但是由于 PCM 普遍存在导热系数低的情况,当 PCM 完全融化后,其储存的潜热如果不能及时被带走,将会引起热失控等问题。将液体冷却技术与 PCM 冷却技术结合起来使用,将更加有助于热管理,而现在的液体冷却技术中的被动式冷却中常用的介质是水,水的导热系数与对流换热特性要低于纳米流体,因此如果在液体冷却技术中使用纳米流体作为换热介质,将更加有助于将完全融化后的 PCM 中的热量带走。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 相变材料的研究现状

Jasim M. Mahdi^[12]等人针对相变材料(PCM)导热性差的问题,提出在热交换器中使用纳米颗粒和鳍片的方法加速 PCM 的凝固过程。研究了不同尺寸的鳍片和纳米粒子的体积浓度对 PCM 凝固过程的影响,研究了单独使用鳍片、纳米粒子和两者结合使用对 PCM 凝固过程的影响。结果表明:2 种方法都能使 PCM 凝固时间显著减少,但是,单独使用鳍片最有利于 PCM 的凝固。

Bohayra Mortazavi^[13]等人建立了多尺度建模技术,使用 Newman 的电化学模型模拟电池工作期间的发热,构建了三维传热模型,发现石蜡纳米复合材料的导热系数可以提高几倍,但与纯石蜡相比,电池热管理没有显著改善。

夏莉^[14]求解 VOF 与焓-多孔介质耦合模型。该模型可以较完整地反映出相变材料相变过程中的特征。结果表明:自然对流与融化过程相互影响,石蜡中的温差及相界面位置决定了自然对流的发展。

徐婷^[15]针对有机相变材料导热系数低的问题,制备出直径在 5-20 μm 左右的片状石墨微粉,并将其添加到有机相变基体中,制成石墨/有机复合相变储能材料。结果表明:片状石墨微粉的添加有助于提高相变材料的储、放热速率,片状石墨微粉质量分数越高,储、放热速率越快。

杨梅^[16]采用实验与 Fluent 中融化/凝固模型数值模拟相结合的方法研究纳米氧化铜的添加以及添加不同的体积分数对石蜡放热的影响。结果表明:在凝固过程的开始阶段,促进石蜡的成核凝固,随着凝固过程的进行,石蜡分子链的运动被过多的纳米颗粒阻碍,石蜡凝固过程受到抑制。

贺鹏^[17]提出一种横纹槽翅片管相变蓄热体，用 *Fluent* 模拟探讨不同结构参数对相变蓄放热的影响规律。结果表明：横纹槽强化空气换热，翅片强化相变材料传热。

杨佳霖^[18]采用泡沫金属类多孔介质及肋片对相变材料的导热性能进行了强化。结果表明：在融化初期，此结构影响较小；当液相体积分数较大时，此结构对融化过程的影响明显。

林道光^[19]采用 *Fluent* 对肋片强化换热效果进行模拟优化。结果显示：肋片管的换热效果明显优于光管，能大大缩短融化时间。随着肋片个数、厚度和高度的增加，换热速率提高。

柯彬彬^[20]使用 *Fluent* 对考虑自然对流下水平圆管外石蜡的融化和凝固过程进行模拟。结果表明：固-液相界面形状不规则是自然对流引起的。石蜡的融化速率随着圆管壁面温度的增大而提高，初始温度的影响较小。

Yang Xu^[21,22]等人对热能储存（TES）单元与由多孔介质局部增强的相变材料（PCM）的潜热储能（LHTES）单元进行了研究。在 TES 单元中，考虑了自然对流的影响。结果表明：多孔介质安放于下部对 PCM 的融化性能有最好的改善，多孔介质的最佳填充高度比例为 0.7，高导热系数、大孔径和高孔隙率的多孔插入物最有利于增强 PCM 的融化性能。在 LHTES 单元中，结果表明：在水平 LHTES 单元中，有限的多孔插入物应集中在底部，并且在相邻的插入物之间没有间隔，如果多孔插入物的质量是固定的，则优选高孔隙率，以使多孔插入物充分覆盖热传导占优势的区域。

Xing Jin^[23]等人建立了基于能量不对称的 PCM 传热模型，并通过实验数据进行了验证。结果表明：造成 PCM 能量不对称的两个主要原因是融化温度范围和凝固温度范围不同以及冷却过程中的过冷问题。与对称模型（融化过程和凝固过程）相比，非对称模型具有更高精度，非对称模型中加热/冷却过程更符合 PCM 的实际加热/冷却过程。

Xiwen Cheng^[24]等人提出了一种采用多相变材料（PCM）的级联填充床冷热储存（CTES）装置。首先模拟分析了凝固过程的基本传热特性，其次为了进一步实现更好的热性能，优化了每个阶段的材料、阶段和厚度。结果表明：24 级 CTES 装置具有最佳的热传递性能。

综上所述，对相变材料的研究主要分为以下几个方面：（1）采用不同的方式去改善相变材料的特性，比如加入翅片、往相变材料中加入纳米颗粒、多种相变材料组合使用、多种手段耦合来提高相变材料的融化与凝固特性；（2）研究影响相变材料融化与凝固特性的一些重要因素，比如流体的进口

温度；（3）研究相变材料的实际应用。比如用于锂离子电池的热管理；（4）研究相变传热理论模型。从以上研究中可以看出，相变材料的一大缺点就是导热系数低，这就使得它的储能与控温的作用不能更好地在实际生活中得到应用，并且，通过往相变材料中加入高导热性材料，不一定能够改善相变材料的实际应用性能^[13]。因此，为了更好地应用相变材料，需要我们对相变材料融化与凝固过程进行更加深刻地研究，

1.2.2 纳米流体的研究现状

G.Diglio^[25]等人使用纳米流体作为 BoreHole 换热器中的热载体，并进行了数值模拟研究。结果表明：与基液相比，随着纳米颗粒体积浓度的增加，导热系数增加，定容比热容减小。

V.Ya.Rudyak^[26]等人进行了层流换热系数与湍流换热系数测量，研究了以蒸馏水为基液，二氧化硅、氧化铝与氧化铜纳米颗粒体积浓度和粒径对传热系数的影响。结果表明：纳米流体的使用使得传热系数显著增加，但这一结果取决于流动状态。层流中的传热系数增加仅是由于纳米流体导热系数的增加引起，而在湍流中是由纳米流体粘度与导热系数的比值大小共同决定。

王鹏^[27]将纳米流体应用于实际内燃机活塞的散热过程，采用数值模拟方法研究纳米流体种类与浓度对于冷却油腔内部瞬时流动与换热特性的影响。结果表明：纳米流体作为冷却介质可以有效带走活塞整体热量。

王涛^[28]将多种纳米流体应用于直通微通道散热器中对电池芯片进行冷却。结果表明：与传统介质水相比，换热场协同性更好，碳管纳米流体的换热性能整体高于 Cu 和 SiO₂ 纳米流体。

熊孝鹏^[29]在特定参数影响下用数值模拟方法研究 SiO₂-水纳米流体方腔自然对流流动现象，参数分别为 Ra 数、纳米颗粒体积分数与内部方柱温度。运用多相流混合模型计算 SiO₂-水纳米流体的流动与换热参数，并与单相流模型进行对比。结果表明：随着纳米流体体积分数增加，平均 Nu 数逐步增加。

周长江^[30]利用 Fluent 对不同纳米颗粒浓度的 Al₂O₃-水纳米流体热管蒸发端的沸腾过程进行了数值模拟，与纯水沸腾流型与传热特性进行了对比。结果表明：纳米流体的对流换热系数要大于纯水的。

李天宇^[31]制备了石墨烯-乙醇纳米流体。首先采用层流模型，用数值模拟方法研究了方腔中的自然对流。结果表明：对流换热系数随石墨烯体积分额的提高而提高；接着采用双流体模型模拟纳米流体的池沸腾现象。结果表

明：在一定范围内，随着石墨烯体积份额地增加，纳米流体能够增强基液的换热性能。

刘怀飞^[32]将 Cu-水与 Al_2O_3 -水纳米流体应用于微机 CPU 液冷式散热系统内，研究的 Re 范围是 400-2000，纳米流体质量分数范围是 0.1%-0.5%。结果表明：应用纳米流体后的散热性能更好。

赵宁波^[33]从纳米流体导热系数与粘度的强化机理出发，考虑各种不同影响因素，结合实验数据修正，建立了纳米流体导热系数与粘度理论模型。

Thakleaw Yiamsawasd^[34]等人实验研究了纳米流体的导热系数。采用瞬态热线法测量了在体积浓度为 0-0.8%、温度为 15-65℃ 下的 TiO_2 -水纳米流体与 Al_2O_3 -水纳米流体的导热系数。结果表明：相比于基液，纳米流体的导热系数增加更多，并且随着浓度和温度的增加而增加。现有模型的预测无法根据浓度和温度预测导热系数。最后提出预测 Al_2O_3 -水和 TiO_2 -水纳米流体导热系数的经验关联式。

M. Chandrasekar^[35]等人在室温下研究了在不同体积浓度（0.33-5%）下，粒径为 43nm 的 Al_2O_3 -水纳米流体的有效导热系数与粘度。结果表明：纳米流体的导热系数随纳米颗粒体积浓度地增加而增加。最后给出了经验模型来预测纳米流体的导热系数。

Giovanni A. Longo^[36]等人在大气压下、1 到 40℃ 之间测量了 Al_2O_3 -水（1-4% 颗粒体积分数）和 TiO_2 -水（1-6% 颗粒体积分数）纳米流体的导热系数。结果表明： Al_2O_3 -水纳米流体作为换热介质要优于比 TiO_2 -水纳米流体，特别是在低温（环境温度和冰点之间）下。

S. Lee^[37]等人用瞬态热线法测量氧化物纳米流体的导热系数。结果表明：含有少量纳米颗粒的纳米流体导热性比没有纳米颗粒的相同液体高得多，Hamilton 和 Crosser 模型可以预测含有大团聚 Al_2O_3 颗粒的纳米流体导热系数，但不适用于含有 CuO 颗粒的纳米流体。

王书福^[38]配制了 Al_2O_3 -水纳米流体、 TiO_2 -水纳米流体和金刚石-水纳米流体，测试了导热系数和流变特性。结果表明：当温度与质量分数相同时，导热性能最好的是 Al_2O_3 -水纳米流体，较差的是金刚石-水纳米流体。

Calvin H. Li^[39]等人在温度范围为 7-37℃，体积分数范围为 0.5%-6.0% 的条件下，采用稳态法研究了粒径为 36nm 和 47nm 的 Al_2O_3 -蒸馏水纳米流体的有效导热系数。结果表明：两种纳米流体的导热系数增强，与温度、体积分数和纳米颗粒尺寸呈现非线性关系，体积分数、温度和颗粒尺寸的增加都导致导热系数的增强。不同的纳米颗粒和基液组合存在最佳的导热系数，

而现有的理论模型既不能预测也不能解释这种现象。

Chan Hee Chon^[40]等人在粒径为 11nm-150nm, 温度为 21°C-71°C 范围内提出了 Al_2O_3 -水纳米流体的导热系数与纳米粒子尺寸的实验关联式。结果表明: 随着温度的升高和纳米粒子尺寸的减小, 纳米流体的导热性增强, 这一现象是由纳米粒子的布朗运动造成。

S.M.S. Murshed^[41]等人对纳米流体的有效导热系数和粘度进行了实验和理论研究。在实验方面, 测量纳米流体的导热系数和粘度, 发现其显著高于基液的值。温度对纳米流体的导热系数影响很大; 在理论方面, 提出了两种基于静态机制的模型, 用来预测具有球形和圆柱形纳米颗粒的纳米流体相对导热系数的。

Dae-Hwang Yoo^[42]等人以两步法制备 Al_2O_3 -水纳米流体。用瞬态热线法测量纳米流体的导热系数。结果表明: 相比于基液, 纳米流体的导热系数提高, 提高值超过了双组分混合物模型的理论值。

Nandy Putra^[43]等人研究了从一端加热并从另一端冷却的水平圆管内纳米流体的自然对流。在实验中观察到了蒸汽转移劣化的实际行为, 研究了这种恶化的性质及其对颗粒浓度、颗粒材料和含腔几何等参数的依赖性。结果表明: 这些特征与普通浆料性质有关。

Calvin H. Li^[44]等人通过实验研究了温度和体积分数对两种不同纳米流体的有效导热系数的影响。结果表明: 纳米颗粒材料、直径、体积分数和温度都对有效导热系数有显著影响。

王照亮^[45]等人采用基于谐波探测技术的 3ω 法对液体导热性能进行了测量。结果表明: 低浓度时, TiO_2 -蒸馏水、 Al_2O_3 -蒸馏水纳米流体的导热系数随温度增加呈线性增大, 且与液体的 Pr 数有关。且水的导热系数随温度升高的特性与纳米颗粒的布朗运动引起的周围基液的微对流作用是纳米流体强化换热的重要因素。

Xinwei Wang^[46]等人通过稳态平行板法测量 Al_2O_3 -水纳米流体与 CuO -水纳米流体的有效导热系数。结果表明: 纳米流体的导热系数高于基液, 现有模型并不能很好地预测。

李金凯^[47]等人采用两步法制备体积分数为 0.1%-0.5% 的 Al_2O_3 -水纳米流体。结果表明: Al_2O_3 -水纳米流体的导热系数高于水的导热系数, 且纳米流体导热系数与纳米颗粒的体积分数和温度呈非线性关系。

寿青云^[48]等人来用瞬态热线法测量了 4 种不同种类、不同体积份额配比的纳米流体的导热系数, 并考虑了纳米颗粒属性、体积分数、悬浮稳定性及

温度的影响。结果表明：在基液中加入纳米颗粒将显著提高流体的导热系数。

Honorine Angue Mintsa^[49]等人对 Al_2O_3 -水和 CuO -水纳米流体的有效导热系数进行了测量。研究了纳米颗粒的体积分数、温度和颗粒尺寸的影响。结果表明：有效导热系数随着颗粒体积分数的增加和颗粒尺寸的减小而增加，且在较高温度下导热系数的增加更加明显。

Elena V. Timofeeva^[50]等人对纳米流体中的热传导和颗粒团聚现象进行了实验和理论研究。在实验方面，结果表明：颗粒的团聚具有随时间演变的团聚状态，导热系数增强值在有效介质理论预测的范围内；在理论方面，提出一种模型，此模型表明纳米颗粒的几何形状、团聚状态和表面电阻是影响纳米流体中导热性增强的主要因素。

综上所述，当纳米颗粒体积浓度、颗粒大小与温度等相关因素在一定范围内时，纳米流体确实能够达到强化换热的效果，并且这一现象也被大量的学者所证实。但是就纳米流体本身和应用于实际强化换热领域而言，目前仍存在以下问题：（1）热物性参数问题。由于纳米流体中颗粒与流体之间的相互作用复杂，颗粒体积分数、尺寸与温度等重要因素的影响规律还停留于定性分析阶段，传统的液-固两相混合介质理论模型不再完全适用于纳米流体。

（2）关于纳米流体强化换热问题。大多数研究者研究纳米颗粒种类、体积分数、粒径与温度对纳米流体在换热过程中的影响，但是由于纳米颗粒与基液之间在不同条件下相互作用的复杂性，使得国内外研究者对纳米流体强化换热过程还没有形成统一的结论，内在机理尚不明确。

1.2.3 相变材料与纳米流体耦合传热的研究现状

王子源^[11]研究锂离子单体电池的产热计算及相变/液体冷却的散热效果，设计了复合 PCM 模块。结果表明：加入 PCM 可以提高系统的降温和均温能力。为保证 PCM 材料的循环使用，使 PCM 及时散热，在复合 PCM 材料中部加入连通液体管道的导热棒体。

Jundika C. Kurnia^[51]等人针对在充放电过程中，由于自然对流的影响，潜热储能（LHTES）经历不均匀的传热过程，其中较高的热传递通常发生在上部区域的问题，提出了一种旋转 LHTES，采用焓-多孔介质模型来考虑 PCM 的融化和凝固过程，采用的是同心套管模型，换热介质是水。结果表明：在充电和放电过程中，旋转增加了热量的传递，更高的旋转速度将导致更高的传热速率。

Mohammad Parsazadeh^[52]等人针对由于石蜡导热系数低而导致的充电

缓慢问题,采用多尺度传热增强技术,在传热流体 (HTF) 管的外表面上安装圆形板翅片,并且分散高导电纳米颗粒 (Al_2O_3) 在壳侧的 PCM 中。用传统方法和统计响应面法 (RSM) 分析获得的数值数据。RSM 分析结果表明:在 PCM 融化过程中,鳍角和纳米粒子浓度是两个重要参数,但翅片的间距影响较小。在 PCM 中添加纳米颗粒不会加速充电过程,相反,由于融化的 PCM 中的自然对流的减少,将导致更长的充电时间和更低的总传热速率。

吴淑英^[53]通过在有机相变材料石蜡中添加 Cu 纳米粒子,有效地提高了石蜡的导热性能及其蓄、放热相变传热速率。并且,采用 Fluent 对 Cu-石蜡相变材料融化和凝固过程进行模拟。结果表明:纳米粒子的添加提高了石蜡的融化和凝固速率,并且融化过程以自然对流为主,凝固过程以热传导为主。

李超^[54]提出多相变材料蓄热器,分析了蓄、放热过程中换热流体沿流向的温度变化特性与蓄热材料的融化及温度分布特性。结果表明:温度越高,蓄热速率越高,降低换热流体入口温度能够加快蓄热材料的凝固。

Zhonghao Rao^[55]等人研究了相变材料 (PCM) /微通道耦合动力电池热管理系统以及三维电池热模型,用数值模拟的方法研究了水的质量流量、相变温度和 PCM 的导热系数这些影响因素。结果表明:PCM 的液相率受 PCM 的导热系数和相变温度的影响很大,较多的通道将导致电池组的最高温度和最大温差的降低。

晋瑞芳^[56]利用 Fluent 模拟研究了相变材料的融化过程。模型为内走传热流体 (水) 外侧充满石蜡。结果表明:流速对相变材料的融化过程的影响较小,而温差对石蜡的融化过程影响剧烈。

姜贵文^[57]通过实验和数值模拟相结合的方法研究了管壳式电池模块的控温效果,探究内部的热量传递与分布规律,设计了基于复合相变材料与液冷耦合散热的方形电池模块。结果表明:此模块具有更高的散热效果。

综上所述,相变材料与纳米流体耦合传热的现有方式为往相变材料中加入纳米颗粒,主要目的是为了提高相变材料的导热系数。而相变材料与流体的耦合传热中的流体为水,将融化的相变材料中的潜热及时带走,从而促进相变材料的循环使用,达到储能与控温的作用。

1.3 本文主要研究内容

综合分析上述文献发现,现有的研究方式是将纳米颗粒混合在 PCM 材料中,以加快 PCM 的凝固过程,而本文提出的方式是直接将换热工质水换成纳米流体,不与相变材料直接接触,这种强化传热方式,在所阅读的文献

中还没有见到, PCM 与纳由于纳米流体与相变材料存在以上不足, 本文以相变材料 (PCM) 为研究核心展开。因为 PCM 在融化时具有储能与控温的作用, 所以本文研究了 PCM 的融化特性, 又针对 PCM 在完全融化后如果在较短时间内不能将储存的相变潜热释放出去将直接影响到下一次的循环使用的问题, 本文提出 PCM 与纳米流体耦合传热的方式去强化 PCM 的散热, 从而加速 PCM 的凝固过程, 又因为纳米流体的导热系数对于纳米流体的传热性能具有很重要的影响, 而现有的模型不能很好地对纳米流体的导热系数作出预测, 缺乏通用性, 所以本文又研究了纳米流体的相对导热系数。本文具体研究内容如下:

(1) 理论预测纳米流体相对导热系数模型研究

本文用两种方法研究 Al_2O_3 -水纳米流体的相对导热系数模型。基于 RBF 神经网络法研究纳米流体的相对导热系数; 基于响应曲面法 (RSM) 研究 Al_2O_3 -水纳米流体的相对导热系数。只对模型预测精度进行了比较。

(2) 相变材料 (PCM) 的融化过程模拟研究

采用 Fluent 中的融化/凝固模型来研究相变材料的融化过程。具体内容如下所示: 1) 流速对 PCM 融化过程的影响; 2) 温差对 PCM 融化过程的影响; 3) 相变材料融化过程机理研究; 4) 石蜡含量与温差的对应关系。

(3) 温差与纳米流体质量分数对 PCM 凝固过程的影响研究

本部分主要针对相变材料的散热问题, 采用融化/凝固与离散相 (DPM) 耦合模型去研究温差与纳米流体质量分数对 PCM 凝固过程的影响, 旨在缩短 PCM 的凝固时间。

第 2 章 研究工作理论基础

2.1 已有的纳米流体相对导热系数修正模型

本文基于径向基（RBF）神经网络法与响应曲面法（RSM）对纳米流体的相对导热系数进行了预测，将预测结果分别与 Maxwell 模型^[58]、Bruggeman 等人模型^[59]与 Timofeeva 等人模型^[50]、与 Minsta 等人模型^[60]进行了对比，这些经典的预测纳米流体导热系数模型的具体表达式如下：

（1）Timofeeva 等人模型^[50]

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = 1 + 3\varphi_p \quad (2-1)$$

式中， k_{nf} ——纳米流体的导热系数（w/m·k）；

k_f ——基液的导热系数（w/m·k）；

φ_p ——纳米颗粒的体积分数。

从式（2-1）可以看出来，Timofeeva 等人只考虑了纳米颗粒的体积分数对于纳米流体相对导热系数的影响。

（2）Maxwell 模型^[58]

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{k_p + 2k_f + 2\varphi_p(k_p - k_f)}{k_p + 2k_f - \varphi_p(k_p - k_f)} = 1 + \frac{3\varphi_p(k_p - k_f)}{k_p + 2k_f - \varphi_p(k_p - k_f)} \quad (2-2)$$

式中， k_p ——纳米颗粒的导热系数（w/m·k）。

此模型忽略了颗粒间的团聚效应，并且颗粒简化为球形。从式（2-2）可以看出来，Maxwell 模型仅考虑了颗粒体积分数、颗粒导热系数与基液导热系数对于纳米流体相对导热系数的影响。

（3）Bruggeman 等人模型^[59]

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{(3\varphi_p - 1)\frac{k_p}{k_f} + [3(1 - \varphi_p) - 1] + \sqrt{\Delta}}{4} \quad (2-3)$$

$$\Delta = (3\varphi_p - 1)\frac{k_p}{k_f} + [3(1 - \varphi_p) - 1]^2 + 8\frac{k_p}{k_f} \quad (2-4)$$

式中, k_{nf} ——纳米流体的导热系数 ($\text{w/m}\cdot\text{k}$);

k_f ——基液的导热系数 ($\text{w/m}\cdot\text{k}$);

φ_p ——纳米颗粒的体积分数;

k_p ——纳米颗粒的导热系数 ($\text{w/m}\cdot\text{k}$);

k_f ——基液的导热系数 ($\text{w/m}\cdot\text{k}$)。

此模型考虑了固体颗粒在基液中的分布, 并且考虑了颗粒体积分数、颗粒导热系数与基液导热系数对纳米流体相对导热系数的影响。

(4) Minsta 等人模型^[60]

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = 1 + 1.72\varphi_p \quad (2-5)$$

Minsta 等人模型只考虑了纳米颗粒的体积分数对于纳米流体相对导热系数的影响。

2.2 径向基神经网络 (RBF) 模型

本文通过 Matlab 编写 RBF 神经网络程序来预测纳米流体的相对导热系数, 关于 RBF 神经网络的理论如下所示:

(1) 单层前向网络 所谓单层前向网络^[61]是指拥有的计算节点 (神经元) 是单层的, 源节点构成输入层, 直接映射到神经元输出层 (计算节点) 上去。图 2-1 表示输入与输出层各有 4 个计算节点。单层指的是神经元输出层, 不把源节点输入层计算在内。具体结构见图 2-1。

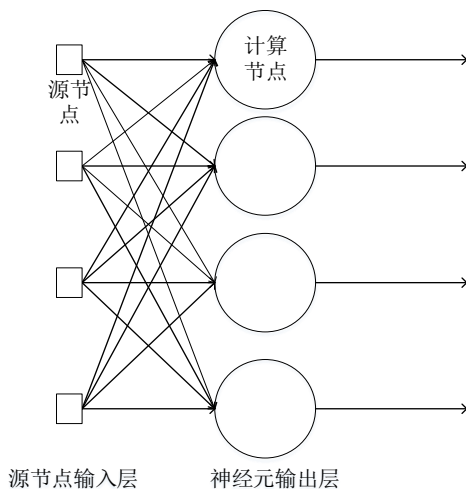


图 2-1 单层前向网络

(2) 多层前向网络 与单层前向网络的主要区别在于：多层前向网络^[61]含有一个或更多的隐含层，计算节点被相应地称为隐含神经元。它在计算输出值的过程中，输入值从输入层单元向前逐层传播，经过隐藏层，最后到达输出层得到输出。前向网络第一层的单元与第二层所有单元相连，第二层又与其下一层单元相连，同一层中的各个单元之间没有连接。前向网络中的神经元激发函数，可采用非线性函数等来表示。在训练过程中，它们的调节权值的算法都是采用有导师的 delta 学习规则，具体结构见图 2-2。

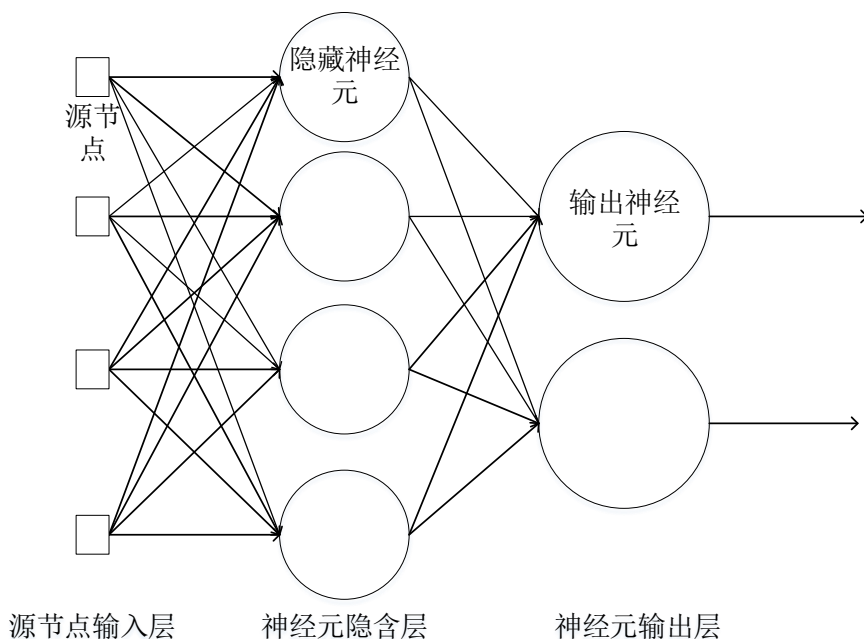


图 2-2 多层前向网络

图 2-2 为多层前向网络，它含有 4 个源节点、4 个隐含神经元和 2 个输出神经元。信号从输入层输入，经过隐含层传给输出层，由输出层得到输出信号。

(3) 神经网络的学习方式 神经网络的学习过程即训练过程，指的是在环境的刺激作用下，调整神经网络的自由参数，以一种新的方式对外部环境做出反应的一个过程。

神经网络的学习方式^[61]可分为：有导师学习与无导师学习。有导师学习又称为监督学习，在学习时需要给出期望输出。神经网络对外部环境是未知的，但是可以将导师看作对外部环境的了解，由输出样本集合来表示。期望响应代表了神经网络执行情况的最佳效果，通过调整网络参数，使得网络输出逼近期望响应。无导师学习包括强化学习与无监督学习。在强化学习中，对输入/输出映射的学习是通过与外界环境的连续作用的最小化性能标量索引来完成的。在无监督学习过程中没有外部评价来统观学习过程，而是通过

一个关于网络学习表示方法质量的测量尺度来使得网络的自由参数最优化。

(4) RBF 神经网络结构 RBF 神经网络^[62]是一种前馈神经网络，一般分为输入层、隐含层与输出层，其具体结构图，见图 2-3。

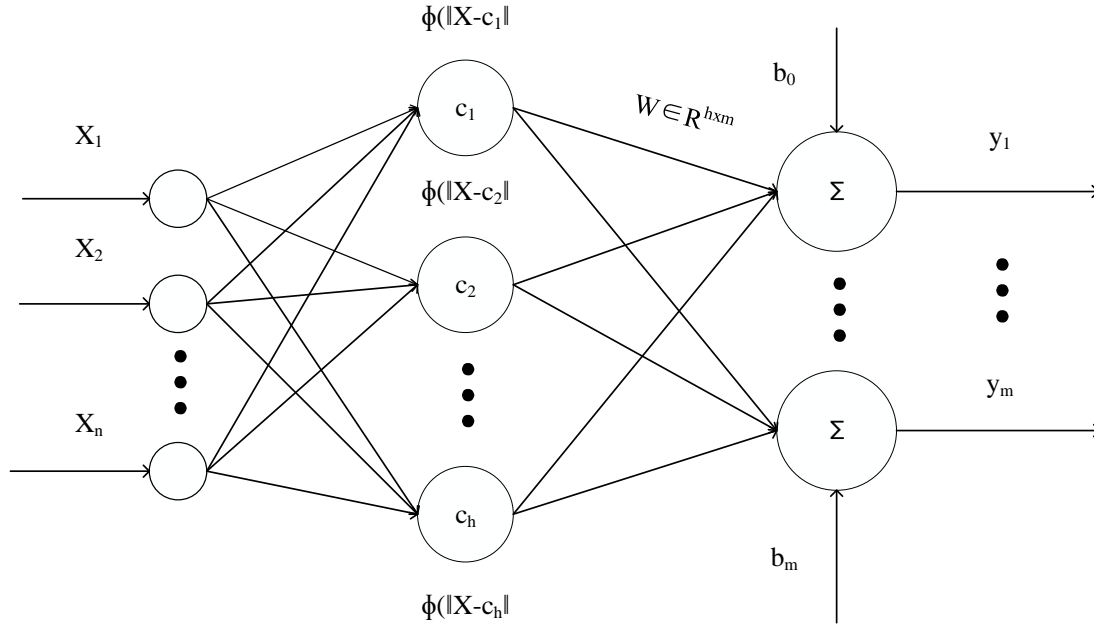


图 2-3 RBF 神经网络

图 2-3 的 RBF 神经网络有 n 个输入、 h 个隐节点与 m 个输出。其中 $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ ， $W \in R^{h \times m}$ 为输出权重向量， $b = (b_0, \dots, b_m)$ 为偏置向量， $y = (y_1, y_2, \dots, y_m)$ 为 m 维输出向量。 $\Phi_i(x)$ 为第 i 个隐节点的激活函数， Σ 表示输出层节点中的神经元采用线性激活函数。

RBF 网络最显著的特点是隐节点的基函数采用距离函数，并采用径向基函数（如高斯函数）作为激活函数，径向基函数关于 n 维空间的一个中心点具有径向对称性，并且神经元的输入距离该中心越远，越难激活神经元。径向基函数的这一特性称为“局部特性”，RBF 网络的每一个隐节点具有一个数据中心。 c_i 是网络中第 i 个隐节点中的数据中心， $\|x\|$ 表示 2 范数。

径向基函数有多种形式，较为常用有以下几种形式：

1) Gaussian 函数

$$\Phi_i(x) = e^{\frac{-x^2}{\delta_i^2}} \quad (2-6)$$

2) Reflected sigmoid 函数

$$\Phi_i(x) = \frac{1}{1 + e^{\frac{x^2}{\delta_i^2}}} \quad (2-7)$$

3) 逆 Multiquadric 函数

$$\Phi_i(x) = \frac{1}{(x^2 + \delta_i^2)^\alpha}, \alpha > 0 \quad (2-8)$$

当 $\alpha=0.5$ 时，称为逆多二次函数。其中， x 表示输入变量， δ_i 表示该基函数的宽度（Spread）。从式（2-6）至式（2-8）可以看出， δ_i 越小（说明该基函数的宽度越小）， $\Phi_i(x)$ 的值越小（表示该基函数越难被激活）。以高斯函数为例。当 δ_i 分别为 1、2 或 3 时，高斯函数的表达式如式（2-9）、（2-10）与（2-11）所示：

$$y1(x) = \Phi_i(x) = e^{-x^2} \quad (2-9)$$

$$y2(x) = \Phi_i(x) = e^{-x^2/2} \quad (2-10)$$

$$y3(x) = \Phi_i(x) = e^{-x^2/3} \quad (2-11)$$

对于 Gaussian 函数而言，基函数具有一定的选择性，即当 x 的值在 0 的附近时，基函数容易被激活，而远离 0 时，基函数则不易被激活。图 2-3 中的第 k 个输出表示如式（2-12）：

$$y_k = \sum_{i=1}^h w_i \Phi_i(\|x - c_i\|) \quad (2-12)$$

（5）RBF 神经网络的数学基础 RBF 神经网络的数学基础^[63,64]如下：

1) 插值问题，高维空间多变量插值理论由 Davis 于 1963 年提出，从严格意义上来说，插值问题可以如下叙述：给定一个包含 N 个点的集合 $\{x_i \in R_{m_0} | i=1, 2, \dots, N\}$ 和相应的 N 个实数组成的一个集合 $\{d_i \in R_1 | i=1, 2, \dots, N\}$ ，寻找一个函数 $F: R_N \rightarrow R_1$ 满足下述插值条件：

$$F(x_i) = d_i, i=1, 2, 3, \dots, N \quad (2-13)$$

这里叙述的严格插值，即插值曲面必须通过所有训练数据点。

径向基函数就是要选择一个函数 F 具有以下形式：

$$F(x) = \sum_{i=1}^N w_i \Phi(\|x - x_i\|) \quad (2-14)$$

将式（2-14）代入式（2-13）得到一个关于未知系数 w 的线性方程组，如式（2-15）所示：

$$\begin{bmatrix} \Phi_{11} & \Phi_{12} & \cdots & \Phi_{1N} \\ \Phi_{21} & \Phi_{22} & \cdots & \Phi_{2N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \Phi_{N1} & \Phi_{N2} & \cdots & \Phi_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \vdots \\ d_N \end{bmatrix} \quad (2-15)$$

式中， N 表示训练样本的长度。以上矩阵就称为插值矩阵，写成非齐次线性方程组，如 (2-16) 所示：

$$d = \Phi \cdot w \quad (2-16)$$

$$\text{式中， } d = [d_1, d_2, \dots, d_N]^T, \Phi = \begin{bmatrix} \Phi_{11} & \Phi_{12} & \cdots & \Phi_{1N} \\ \Phi_{21} & \Phi_{22} & \cdots & \Phi_{2N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \Phi_{N1} & \Phi_{N2} & \cdots & \Phi_{NN} \end{bmatrix}, w = [w_1, w_2, \dots, w_N]^T。$$

以上问题的关键在于如何使得 Φ 为非奇异矩阵，Micchelli 在 1986 年证明了只要使得所有的输入点 x_i 互不相同，就能够满足插值矩阵 Φ 满足非奇异的要求。于是有式 (2-17)：

$$w = \Phi^{-1}d \quad (2-17)$$

基于此，就会产生以下两个问题：1) 当训练样本数远远大于物理过程中固有的自由度时，隐含层矩阵 Φ 求逆时可能会出现不稳定的现象；2) 由于严格插值必须经过所有数据点，如果样本输出含有噪声，作完全内插是不合适的，可能会出现错误的插值曲面，此时对数据近似逼近比较合理。为了解决以上问题，采用正则化网络。

2) 正则化理论, 由 Tikhonov 在 1963 年提出^[63], 包含标准误差项与正则化项。

a. 标准误差项

$$E_s(F) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N (d_i - y_i)^2 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N [d_i - F(x_i)]^2 \quad (2-18)$$

式中 d_i ——期望相应；

y_i ——实际响应；

$\frac{1}{2}$ ——比例因子。

b. 正则化项

$$E_c(F) = \frac{1}{2} \|DF\|^2 \quad (2-19)$$

式中 D ——线性微分算子，关于解的形式的先验知识就包含在算子 D （稳定因子）中。并且 D 与所解答的问题有关系，可以使得正则化问题的解稳定且光滑，从而满足连续性的要求；

$E_c(F)$ ——依赖于逼近函数 $F(x)$ 的几何性质，是一项限制逼近复杂性的项，对最终解的影响取决于 λ 。

正则化方法总的误差项定义如式（2-20）所示：

$$E(F) = E_s(F) + \lambda E_c(F) \quad (2-20)$$

式中 λ ——正实数，为正则化参数。

3) 正则化问题的解，在光滑函数空间的一个 N 维子空间上，以 $x_i (i=1, 2, \dots, N)$ 为中心的一组 Green 函数 $\{G(x, x_i)\}$ 组成该子空间的基。对于某类 Green 函数，如果提供的输入数据点 x_1, x_2, \dots, x_N 是互不相同的，则 Green 函数就是正定的，满足 Micchelli 定理的 Green 函数包括高斯（Gaussian）函数与逆多二次函数。

4) 正则化网络，该网络包括三层，第一层由输入节点组成，且节点数目等于输入向量 x 的维数 m_0 （问题的独立变量数），第二层是隐藏层，是直接和输入节点相连的非线性单元，一个隐藏单元对应一个数据点 $x_i (i=1, 2, \dots, N)$ ，隐藏单元的激活函数由 Green 函数给出；输出层只有一个线性单元，其权值就是未知的展开系数。具体结构见图 2-4。

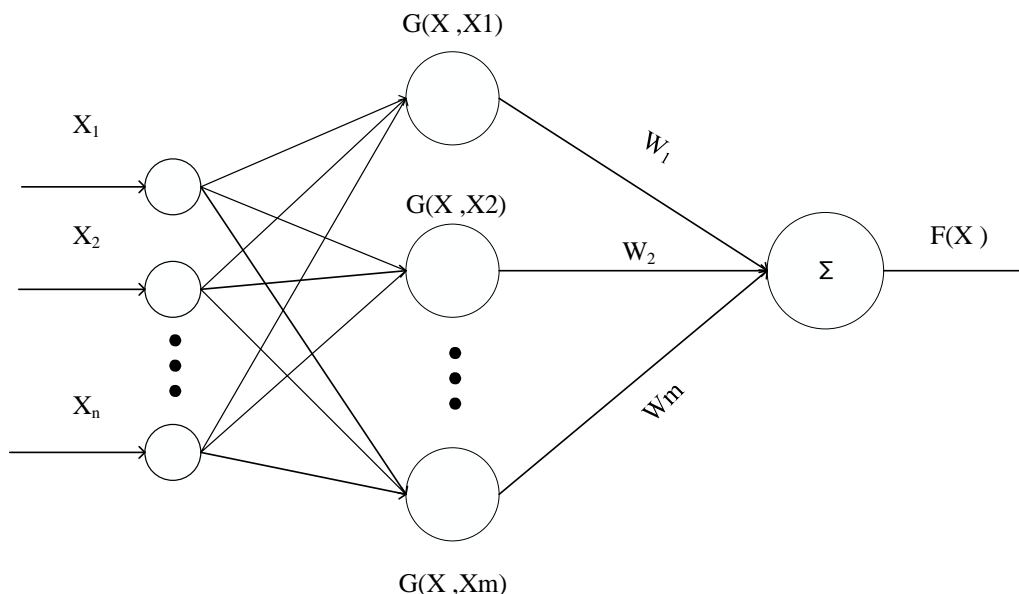


图 2-4 正则化网络结构图

正则化网络具有以下三个性质：只要有足够多的隐藏单元，可以以任意

精度逼近任意连续函数；由正则化导出的逼近格式的未知系数是线性的，具有最佳逼近性能；由正则化网络求出的解是最佳的。

2.3 响应曲面法（RSM）

纳米流体导热系数是由多个影响因素共同作用的结果，这些因素包括纳米颗粒粒径大小、温度大小、基液的种类、颗粒的种类及纳米颗粒的体积分数等因素。而传统的一次一因子方法研究纳米流体的导热系数并不能考虑到各个因子之间的相互作用，而 RSM^[64]是利用合理的实验设计方法，采用多元二次回归方程来拟合因素与响应值之间的函数关系，解决多变量问题的一种统计方法，在应用时考虑了交互作用，效率高，且在模型中有平方项。采用这种方法将更有助于我们理解影响纳米流体导热系数的各个因素之间的关系。RSM 的一般模型^[65]如式（2-21）所示：

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^{i=k} \beta_i x_i + \sum_{i=1}^{i=k} \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{1 \leq i < j}^k \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (2-21)$$

式中， β_0 ——常数项；

β_i ——线性参数系数；

β_{ii} ——二次项参数系数；

β_{ij} ——因子之间相互作用参数系数；

ε ——与实验之间的残差值；

x ——变量。

2.4 相变传热理论

本文对相变材料的融化与凝固过程的整个模拟过程在 Fluent 中完成，在进行模拟的过程中所做的假设^[20,54]如下所示：1）融化的相变材料是牛顿流体；2）相变材料各向同性；3）相变材料的导热系数与比热容仅仅是温度的函数，且换热管壁热阻忽略不计；4）相变材料的密度满足 Boussinesp 假设，仅在动量方程的浮力项中考虑相变材料在融化过程中体积随着温度的变化，其他各项中的密度为常数。

在考虑自然对流的条件下，Fluent 中的融化/凝固模型基本方程^[54,66]为：

（1）连续性方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{u}) = 0 \quad (2-22)$$

式中, \vec{u} ——流体的速度 (m/s);
 ρ ——流体的密度 (kg/m³)。

(2) 动量方程

$$\frac{\partial(\rho\vec{u})}{\partial t} + \nabla(\rho\vec{u}\vec{u}) = -\nabla p + \nabla(\mu\nabla\vec{u}) + S_M \quad (2-23)$$

其中, 源项 S_M 在自然对流中 x 方向、y 方向与 z 方向上的定义形式分别为:

在 x 方向:

$$S_{Mx} = \frac{(1-\beta)^2}{(\beta^3 + \varepsilon)} A_{mush} \vec{u}_x \quad (2-24)$$

在 y 方向:

$$S_{My} = \frac{(1-\beta)^2}{(\beta^3 + \varepsilon)} A_{mush} \vec{u}_y \quad (2-25)$$

在 z 方向:

$$S_{Mz} = \frac{(1-\beta)^2}{(\beta^3 + \varepsilon)} A_{mush} \vec{u}_z + \rho_{ref} \vec{g} \alpha (T - T_{ref}) \quad (2-26)$$

式中, β ——液相率, 按照如下方式定义:

$$\beta = \begin{cases} 0 & T < T_s \\ (T - T_s)/(T_l - T_s) & T_s < T < T_l \\ 1 & T_l < T \end{cases} \quad (2-27)$$

A_{mush} 代表固液模糊区常数, 与融化的状态有关, 通常取 $10^5 \sim 10^7$, 本文中取为 10^5 。 α 为体积膨胀系数 (1/k); ρ_{ref} 为参考密度 (kg/m³), 即最初相变材料的密度; T_{ref} 为参考温度 (k), 即最初相变材料的温度大小, T 代表任一瞬间的温度 (k), T_s 代表相变材料的固相线温度大小 (k), T_l 代表相变材料的液相线温度大小 (k); ε 为一个非常小的数, 目的是使得公式中的分母恒大于 0; \vec{u} 为流体的速度, \vec{u}_x 、 \vec{u}_y 与 \vec{u}_z 为各个方向分量 (m/s); \vec{g} 为重力加速度 (m/s²)。

(3) 能量方程

$$\frac{\partial(\rho H)}{\partial t} + \nabla(\rho\vec{u}H) = \nabla(k\nabla T) + S_E \quad (2-28)$$

式中, \vec{u} ——流体的速度 (m/s);

ρ ——流体的密度 (kg/m^3)；

k ——导热系数 ($\text{W/m}\cdot\text{k}$)；

T ——温度 (k)；

S_E ——源项，定义为：

$$S_E = \frac{\rho}{C_p} \cdot \frac{\partial(\Delta H)}{\partial t} \quad (2-29)$$

$$H = h + \Delta H \quad (2-30)$$

$$h = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T C_p dT \quad (2-31)$$

$$\Delta H = \alpha L \quad (2-32)$$

式中， C_p ——比定压热容 ($\text{J/kg}\cdot\text{k}$)；

h ——显热的焓值 (J/kg)；

ΔH ——潜热的焓值；

h_{ref} ——在参考温度为 T_{ref} 时的参考焓；

α ——体积膨胀系数 ($1/\text{k}$)；

L ——相变潜热 (J/kg)。

2.5 离散相模型 (DPM) 理论

本文采用 DPM 来模拟纳米流体，整个模拟过程在 Fluent 中完成，Fluent 中 DPM 的分散相的体积分数一般来说小于 10%-12%，忽略了颗粒与颗粒之间的相互作用。关于纳米流体的数值模拟过程中用到的理论如下所示：

(1) 纳米流体的控制方程^[67]

1) 连续性方程

$$\frac{\partial \rho_l}{\partial t} + \nabla(\rho_l \vec{u}_l) = 0 \quad (2-33)$$

式中， ρ_l ——纳米流体密度 (kg/m^3)；

\vec{u}_l ——纳米流体速度 (m/s)；

t ——时间 (s)。

2) 动量方程

$$\frac{\partial(\rho_l \vec{u}_l)}{\partial t} + \nabla(\rho_l \vec{u}_l \vec{u}_l) = -\nabla p + \nabla T_l - S_p + \rho_l \vec{g} \quad (2-34)$$

$$T_l = \mu_l \left[\nabla \vec{u}_l + (\nabla \vec{u}_l)^T \right] - \frac{2}{3} \mu_l \nabla (\vec{u}_l I) \quad (2-35)$$

式中, p ——纳米流体中的压强大小 (Pa);

S_p ——由纳米颗粒引起的源项;

μ_l ——动力粘度 (kg/m·s);

\vec{g} ——重力加速度 (m/s²);

T_l ——应力张量;

I ——单位张量。

3) 能量方程

$$\rho_l c_l \left[\frac{\partial T_l}{\partial t} + \vec{u}_l \nabla T_l \right] = \nabla [k_l \nabla T_l] \quad (2-36)$$

式中, T_l ——纳米流体温度 (K);

k_l ——纳米流体导热系数 (W/m·K)。

(2) 纳米颗粒的控制方程^[67]

依牛顿第二定律在拉格朗日坐标系下求颗粒的力平衡。计算方法如下:

$$m_p \frac{d \vec{u}_p}{dt} = \vec{F} \quad (2-37)$$

式中, m_p ——纳米颗粒的质量 (kg);

\vec{u}_p ——纳米颗粒的速度 (m/s);

\vec{F} ——纳米颗粒受到的合外力 (N)。

本文中的合外力包括曳力、重力与浮力、热泳力、虚拟质量力、压力梯度力与 Saffman 升力。其中, 曳力指的是一个物体在流体中有相对运动时, 物体会受到流体的作用力且力与相对速度方向相反; 重力与浮力是由于纳米颗粒与流体之间的密度差与重力加速度引起的; 热泳力是当颗粒在一个具有温度梯度的流场中时受到的一个与温度梯度相反的作用力; 虚拟质量力是使周围流体加速引起的附加作用力, 是由于流体与颗粒之间存在相对运动引起的; 压力梯度力由于流场中存在压力梯度力引起的附加作用力, 压强梯度沿着流动方向且力的方向与流动方向相反; Saffman 升力是由颗粒两侧流速不同而产生的横向速度梯度引起。

2.6 本章小结

本章主要阐述了本文研究工作的理论基础,为后续章节提供理论支撑。本章对已有纳米流体相对导热系数修正模型、径向基(RBF)神经网络模型与响应曲面法(RSM)进行阐述,为研究纳米相对导热系数理论预测研究打下基础;对相变传热理论进行阐述,为研究相变材料的融化与凝固打下基础;对离散相模型(DPM)理论进行阐述,为研究相变材料与纳米流体的耦合传热打下基础。

第3章 纳米流体相对导热系数理论预测研究

由于纳米颗粒在基础液体中复杂的布朗运动及所引起的基础液微观物质结构改变,纳米流体的导热系数与很多影响因素有关。现在对于纳米流体导热系数预测模型的研究主要有理论模型的研究与经验模型的研究。在理论模型的研究过程中,学者们发现纳米颗粒的自然传输、在固体颗粒界面附近排列紧密的液体分子形成的一层较薄的液体层(界面层)、纳米颗粒的布朗运动与团聚作用是使得纳米流体导热系数提高的几个关键因素;在经验模型研究过程中,纳米颗粒的体积分数、粒径与温度是几个重要的影响纳米流体导热系数提高的因素。但是仍旧存在以下两个弊端:第一个弊端是由于经验模型的建立是依据于实验数据,实验数据往往数量较少,学者们研究出来的经验模型可能只是在他们的研究范围内适用;第二个弊端是大多数学者对纳米流体物性参数的实验研究方法都是一次一因子,这并没有考虑到因子之间的相互作用。本文选取 Al_2O_3 作为纳米颗粒,因为 Al_2O_3 常见便宜,且 Al_2O_3 -水纳米流体与其他纳米流体相比具有更高的导热系数和充足的样品容量。针对以上的两个弊端,本文搜集了发表文献中的大量实验数据用来研究 Al_2O_3 -水纳米流体的相对导热系数。针对第一个弊端,提出基于神经网络方法去预测 Al_2O_3 -水纳米流体相对导热系数;针对第二个弊端,提出由响应曲面法(RSM)分析得到的经验公式去预测 Al_2O_3 -水纳米流体相对导热系数。这两种方法旨在使得提出的模型对于纳米流体的相对导热系数预测更加准确,使得所提出的模型更具有普遍性。又因为本章研究了纳米流体的体积分数、粒径大小与温度对于纳米流体相对导热系数的影响,而纳米流体的导热系数是影响纳米流体热传递性能的一个重要因素,这也为第五章的研究打下基础。

3.1 基于神经网络法预测相对导热系数

本文采用 Matlab 编写径向基(RBF)神经网络程序。以纳米流体的体积分数、粒径大小和温度作为输入参数,纳米流体的相对导热系数(纳米流体的导热系数与基液导热系数的比值)作为输出值。本文使用的数据来自已知文献的 303 组实验值,由公式(3-1)将纳米流体的体积分数、粒径大小和温度标准化:

$$\bar{x} = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (3-1)$$

式中, x ——物性参数值;

x_{\min} ——物性参数中的最小值；

x_{\max} ——物性参数的最大值。

用 243 组实验值训练 RBF 神经网络，然后用 60 组实验值验证训练好的模型。数据来自文献^[9,33-37,39-48,50]。通过计算 RBF 神经网络对纳米流体相对导热系数的预测值与实验值之间的相对误差最大值、平均值和均方误差来说明该模型的优劣。结果表明：基于 RBF 神经网络法预测的 60 个相对导热系数值与实验值之间的相对误差最大值、平均值和均方误差分别为 6.5%，1.8%，1.6%。基于 RBF 神经网络法预测的 60 个预测值与实验值的拟合情况如图 3-1 所示。

60 个实验值来自文献^[9,42,45-46,69-71]。从图中可以看出，RBF 神经网络对纳米流体相对导热系数的预测准确。预测值与实验值之间的相对误差最大值仅为 6.5%。为更好地说明用于预测纳米流体相对导热系数的 RBF 神经网络，将 RBF 神经网络的预测结果与 Maxwell 模型^[58]和 Bruggeman 等人模型^[59]的预测结果进行比较，结果见表 3-1 所示。

将 RBF 神经网络与 Maxwell^[58]和 Bruggeman 等人模型^[59]对纳米流体相对导热系数的预测值与实验值^[45]之间的相对误差最大值、平均值以及均方误差见表 3-2 所示。

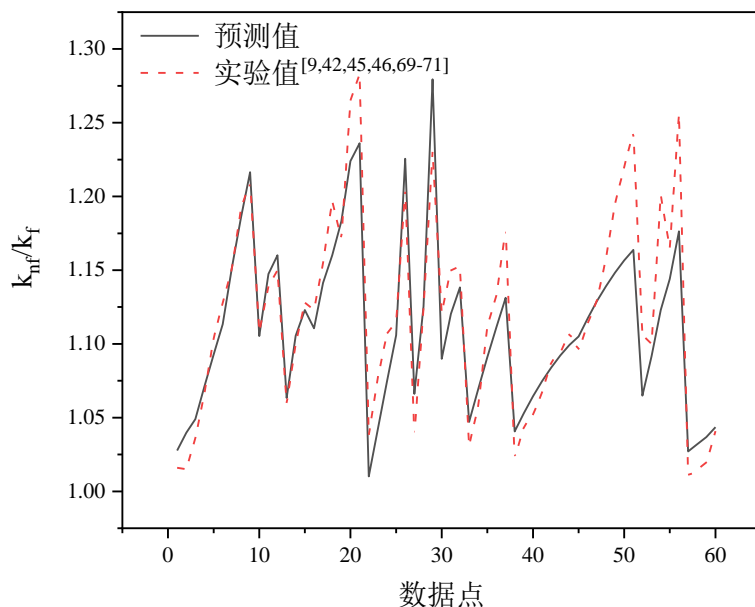


图 3-1 RBF 神经网络预测相对导热系数的验证结果

表 3-1 相对导热系数预测对比结果

体积分 数 (Φ (%))	实验值 [9,42,45-46, 69-71]	RBF 神 经网络	相对误 差	Maxwel -1 [58]	相对误 差	Brugge- man et al. [59]	相对误 差
1	1.036	1.049	0.013	1.028	0.008	1.030	0.006
2	1.067	1.071	0.004	1.058	0.008	1.061	0.006
3	1.104	1.093	0.010	1.087	0.015	1.094	0.009
4	1.128	1.113	0.013	1.119	0.008	1.129	0.000
6	1.151	1.152	0.001	1.181	0.026	1.204	0.046
8	1.192	1.186	0.005	1.247	0.046	1.292	0.084
10	1.210	1.216	0.005	1.315	0.087	1.392	0.150

表 3-2 预测值的相对误差性能评估

	最大值	平均值	均方误差
RBF 神经网络	0.013	0.007	0.005
Maxwell ^[58]	0.087	0.028	0.029
Bruggeman et al. ^[59]	0.150	0.043	0.056

图 3-2 为基于 RBF 神经网络对纳米流体相对导热系数的预测值与 Maxwell 模型^[58]、Bruggeman 等人模型^[59]预测值与实验值^[45]的对比。

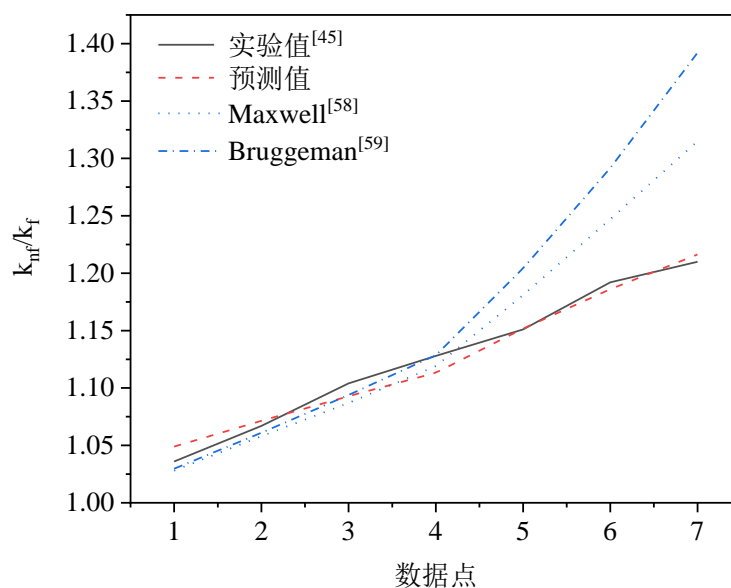


图 3-2 相对导热系数的预测结果

以上结果表明，本文提出的用来预测纳米流体相对导热系数的 RBF 神经网络模型优于 Maxwell 模型^[58]和 Bruggeman 等人模型^[59]。与实验值相比，RBF 神经网络模型对于纳米流体相对导热系数预测值的最大相对误差仅为 1.3%，而 Maxwell 模型^[58]和 Bruggeman 等人模型^[59]的最大相对误差分别为 8.7% 和 15%。

3.2 基于 RSM 法预测相对导热系数

利用 Minitab 软件，通过 RSM 分析出的数学模型来预测 Al_2O_3 -水纳米流体的相对热导率，将纳米流体的体积分数、颗粒粒径与温度确定为影响纳米流体相对热导率的重要因素，然后利用 Minitab，得出在不同的体积浓度之下的影响 Al_2O_3 -水纳米流体的相对热导率的重要因素。

从文献^[47]可知，高浓度的纳米流体是指体积分数大于 1% 的纳米流体，低浓度纳米流体是指体积分数小于 1% 的纳米流体。因此，本文将纳米流体体积浓度分成三类，即：体积浓度小于 1%、体积浓度等于 1% 与体积浓度高于 1%。本文采用 482 组实验值进行分析。其中，439 组实验值用于分析模型，43 组实验值用于验证模型，实验值来自文献^[9,33-50,69-78]。439 组实验值和 43 组验证值的分类结果见表 3-3 所示。

表 3-3 按照体积浓度分类的纳米流体数量

浓度分类	分析数据量	验证数据量
<1%	64	8
1.00%	74	10
>1%	301	24

对于纳米颗粒体积分数小于 1% 的纳米流体，将纳米流体的体积分数、颗粒粒径与温度作为自变量，将纳米流体相对导热系数作为因变量。计算得到的模型的各个项的 P 值（即概率大小，通常把发生概率小于 5% 的事件称为小概率事件）如下所示：模型总效果、线性项与温度项的 P 值均为 0，平方项、体积分数项、尺寸项、尺寸·尺寸项与温度·温度项的 P 值分别为 0.001、0.036、0.003、0.004 与 0.012。对应的模型及各个因子及二因子交互作用 P 值均小于 0.05，表明应拒绝原假设（原假设为模型无效），即可以判定，本模型总的来说是有效的。得出的关联式如式（3-2）所示：

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = 0.9087 + 0.0551\Phi + 0.01245d - 0.00369T - 0.0002d^2 + 0.0001T^2 \quad (3-2)$$

式中， k_{nf} ——纳米流体的导热系数 (w/m·k)；

k_f ——水的导热系数 (w/m·k)；

T ——温度 (°C)；

d ——粒径 (nm)；

Φ ——纳米流体体积分数 (%)。

从关联式 (3-2) 可以看出，相对导热系数与体积分数、温度与颗粒粒径大小都有关系。在纳米流体体积分数小于 1% 的条件下，本文预测值的最大相对误差为 1.1%。实验值^[68]、本文模型预测值 ($\Phi < 1\%$) 和 Timofeeva 等人模型^[50]和 Minsta 等人模型^[60]的预测值及其相对误差见表 3-4。表 3-5 为本文模型、Timofeeva 等人模型^[50]和 Minsta 等人模型^[60]预测值的相对误差最大值、平均值和均方误差。

表 3-4 相对导热系数预测对比结果 ($\Phi < 1\%$)

Φ (%)	实验值 [68]	本文模 型	相对误 差	Timofeev a et al. ^[50]	相对 误差	Minsta et al. ^[60]	相对 误差
0.100	1.021	1.026	0.005	1.003	0.018	1.002	0.019
0.200	1.038	1.031	0.007	1.006	0.031	1.003	0.033
0.300	1.046	1.037	0.009	1.009	0.035	1.005	0.039
0.400	1.054	1.042	0.011	1.012	0.040	1.007	0.045
0.500	1.057	1.048	0.009	1.015	0.040	1.009	0.046
0.600	1.062	1.053	0.008	1.018	0.041	1.010	0.049
0.700	1.066	1.059	0.007	1.021	0.042	1.012	0.051
0.800	1.065	1.064	0.001	1.024	0.038	1.014	0.048

表 3-5 预测值的相对误差性能评估 ($\Phi < 1\%$)

	最大值	平均值	均方误差
本文模型	0.011	0.007	0.003
Timofeeva 等人模型 ^[50]	0.042	0.036	0.008
Minsta 等人模型 ^[60]	0.051	0.041	0.011

图 3-3 为本文模型 ($\Phi < 1\%$)、Timofeeva 等人模型^[50]与 Minsta 等人模型^[60]的预测值与实验值^[68]的对比情况，从图中可以看出，与实验值^[68]相比，每一个模型的预测值的变化趋势都是一样的，但是本文模型预测结果与实验值之间的差异是最小的，即更加切近于实验值的变化趋势，而其他两个模型与实验值的误差较大，所以本文模型 ($\Phi < 1\%$) 对于相对导热系数的预测能力是最好的。

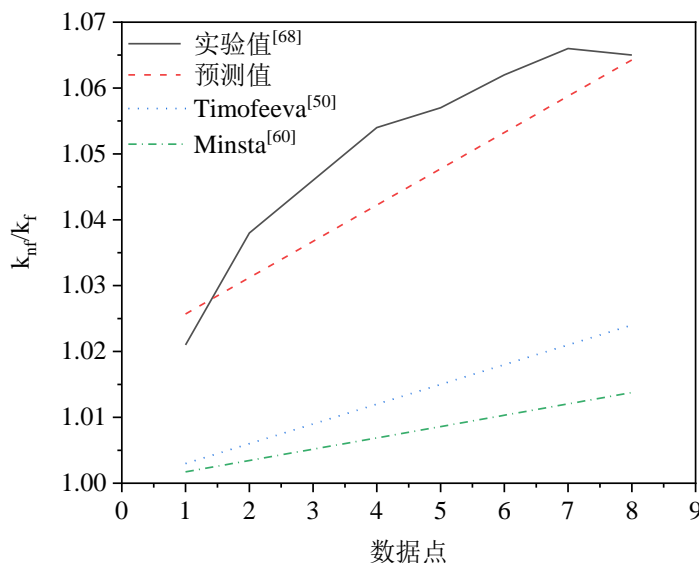


图 3-3 相对导热系数的预测结果 ($\Phi < 1\%$)

对于纳米颗粒体积浓度等于 1% 的纳米流体，将颗粒粒径与温度作为自变量，将纳米流体相对导热系数作为因变量。计算得到的模型各个项的 P 值如下所示：模型总效果、线性项、尺寸项与温度项均为 0，2 因子交互作用与尺寸·温度均为 0.018。得出的关联式如式（3-3）所示：

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = 0.9971 - 0.00002d + 0.00231T + 0.00001dT \quad (3-3)$$

我们从表 3-7 可以看到本模型的最大相对预测误差为 5.8%，与其他两个模型相比，本模型预测结果最优。实验值^[41]、本文模型 ($\Phi = 1\%$)、Timofeeva^[50]和 Minsta 等人的模型^[60]预测值及其相对误差如表 3-6 所示。

表 3-6 相对导热系数预测结果 ($\Phi = 1\%$)

Φ (%)	实验值 [41]	本文模 型	相对误 差	Timofee va et al. ^[50]	相对误 差	Minsta et al. ^[60]	相对误 差
1.000	1.032	1.026	0.006	1.030	0.002	1.017	0.015
1.000	1.062	1.039	0.022	1.030	0.030	1.017	0.045
1.000	1.083	1.056	0.025	1.030	0.049	1.017	0.066
1.000	1.100	1.071	0.027	1.030	0.064	1.017	0.083

本文模型 ($\Phi = 1\%$)、Timofeeva 等人模型与 Minsta 等人模型的相对误差最大值、平均值和均方误差见表 3-7。

表 3-7 预测值的相对误差性能评估 ($\Phi=1\%$)

	最大值	均值	均方误差
本文模型	0.058	0.030	0.017
Timofeeva 等人模型 ^[50]	0.081	0.042	0.027
Minsta 等人模型 ^[60]	0.104	0.056	0.033

本文模型 ($\Phi=1\%$)、Timofeeva 等人模型^[50]与 Minsta 等人模型^[60]的预测值与实验值^[41]的对比情况见图 3-4。后两者的模型由于只与纳米流体的体积分数有关，所以在图中为一条水平线。

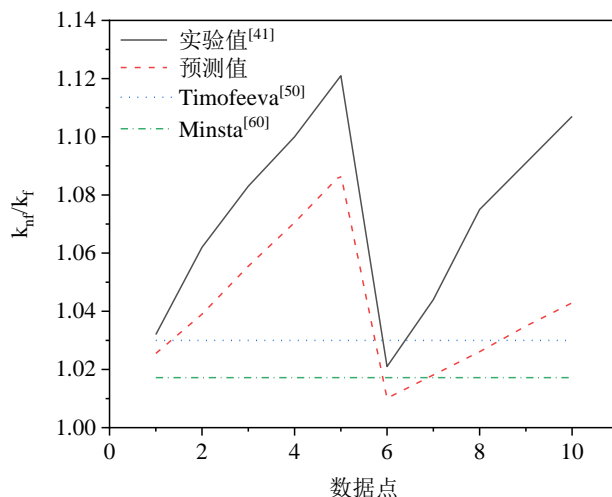


图 3-4 相对导热系数的预测结果 ($\Phi=1\%$)

从本文模型 ($\Phi=1\%$)可以看出，纳米流体相对导热系数是多种因素共同作用的结果，这意味着需要进一步探索其内在影响机制，单纯的仅仅考虑纳米流体体积分数对于相对导热系数的影响可能在某一范围内成立，但是一旦超出这一范围，则预测值会有比较大的误差。

对于纳米颗粒体积分数大于 1%的纳米流体，本文将纳米流体的体积分数、颗粒粒径与温度作为自变量，将纳米流体相对导热系数作为因变量。计算得到的模型各个项的 P 值均为 0，这些项包括：模型项、线性项、体积分数项、尺寸与温度项。得出的关联式如 (3-4) 所示：

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = 0.97225 + 0.01593\Phi + 0.00016d + 0.00268T \quad (3-4)$$

实验值^[9,37]、本文模型 ($\Phi > 1\%$)、Timofeev^[50]和 Minsta 等人模型^[60]预测值及各个模型预测值的相对误差见表 3-8，相对误差最大值、平均值与均方误差及实验值 ($\Phi > 1\%$)见表 3-9。从表 3-9 可以看出，本文模型预测值最大相对误差为 6.3%，相比于其他两个模型更优。

表 3-8 相对导热系数预测结果 ($\Phi > 1\%$)

Φ (%)	实验值 ^[9,37]	本文模 型	相对误 差	Timofeev -a et al. ^[50]	相对误 差	Minst- a et al. ^[60]	相对误 差
2	1.054	1.067	0.012	1.06	0.006	1.034	0.019
3	1.071	1.082	0.011	1.09	0.018	1.052	0.018
4	1.092	1.098	0.006	1.12	0.026	1.069	0.021
4.3	1.1	1.103	0.003	1.129	0.026	1.074	0.024
2	1.037	1.068	0.029	1.06	0.022	1.034	0.003
2	1.027	1.069	0.041	1.06	0.032	1.034	0.007
2	1.073	1.072	0.001	1.06	0.012	1.034	0.036
5	1.083	1.115	0.030	1.15	0.062	1.086	0.003
5	1.077	1.117	0.037	1.15	0.068	1.086	0.008
5	1.11	1.120	0.009	1.15	0.036	1.086	0.022
7.5	1.123	1.155	0.029	1.225	0.091	1.129	0.005
7.5	1.1	1.157	0.051	1.225	0.114	1.129	0.026
7.5	1.176	1.160	0.014	1.225	0.042	1.129	0.040
10	1.164	1.195	0.027	1.3	0.117	1.172	0.007
10	1.126	1.196	0.063	1.3	0.155	1.172	0.041
10	1.234	1.200	0.028	1.3	0.053	1.172	0.050
2	1.046	1.067	0.020	1.06	0.013	1.034	0.011
2	1.098	1.107	0.008	1.06	0.035	1.034	0.058
2	1.142	1.147	0.004	1.06	0.072	1.034	0.094
3	1.066	1.082	0.015	1.09	0.023	1.052	0.014
3	1.117	1.123	0.005	1.09	0.024	1.052	0.059
3	1.168	1.163	0.004	1.09	0.067	1.052	0.100
4	1.091	1.098	0.007	1.12	0.027	1.069	0.020
4	1.157	1.139	0.016	1.12	0.032	1.069	0.076
4	1.238	1.179	0.048	1.12	0.095	1.069	0.137

表 3-9 预测值的相对误差性能评估 ($\Phi > 1\%$)

	最大值	平均值	均方误差
本文模型	0.063	0.021	0.017
Timofeeva 等人模型 ^[50]	0.155	0.051	0.038
Minsta 等人模型 ^[60]	0.137	0.036	0.035

本文模型 ($\Phi > 1\%$)、Timofeev^[50]和 Minsta 等人模型^[60]预测值与实验值的对比情况见图 3-5 所示:

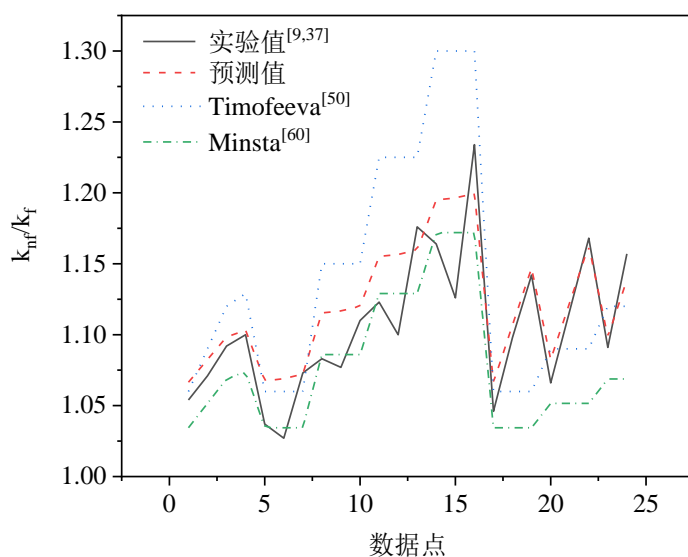


图 3-5 相对导热系数的预测结果 ($\Phi > 1\%$)

综上所述,本文提出的纳米流体相对导热系数的预测模型要优于现有模型。本文模型主要有以下优点:

(1) 分析纳米流体相对导热系数的数据量大,基本上涵盖了现在学者们对于 Al_2O_3 -水导热系数测量的实验数据,这就保证所提出模型的准确性。

(2) 相对于传统的一次一因子方法, RSM 可以考虑到纳米流体各个因素之间的相互作用,使得提出的模型更加准确。

此外,本模型还进行了以下研究:

1) 试图利用整个实验数据分析出一个总的模型,发现其模型并不如本文最后确定的模型好。

2) 进行了分界点 1%的分析,即 $\Phi \leq 1\%$ 或者 $\Phi \geq 1\%$ 的模型,其模型预测效果依然不如本文最后确定的结果。

3.3 本章小结

基于径向基（RBF）神经网络法与响应曲面法（RSM）对纳米流体的相对导热系数进行了预测，将两种方法的预测结果与经典模型的预测结果作了对比，得出的主要结论如下：

（1）基于 RBF 神经网络法预测 Al_2O_3 -水纳米流体的相对导热系数，与 Maxwell 和 Bruggeman 等人模型的预测结果进行比较后发现，本文模型预测能力最好。

（2）将纳米流体按照体积浓度进行分类： $\Phi < 1\%$ 、 $\Phi = 1\%$ 与 $\Phi > 1\%$ ，基于 RSM 法提出一个按照浓度进行分类的用来预测 Al_2O_3 -水相对导热系数的经验公式，与 Timofeeva 和 Minsta 等人的模型预测值进行比较，本模型预测能力最好。

第 4 章 相变材料融化过程数值模拟研究

相变材料具有储能与控温的作用，但是由于相变材料普遍存在热导率低的问题，如果我们在实际生活中不能够合理地使用相变材料，将会引起热失控。为了在实际生活中能够更好地应用相变材料，我们必须对其融化过程进行深入研究。本文使用 **Fluent** 中的融化/凝固模型对相变材料融化过程进行了数值模拟研究，并将石蜡选为相变材料，石蜡具有以下优点^[56]：1) 在低温相变材料中相变潜热较大；2) 化学性质稳定；3) 没有毒且无腐蚀作用；4) 相变过程热循环性能好且使用寿命长；5) 获取容易、价格低且易制取。

4.1 相变模型验证

4.1.1 几何模型

本章模拟相变材料（PCM）的融化过程使用同心套管，重力加速度方向与流体流向相反，具体结构见图 4-1。

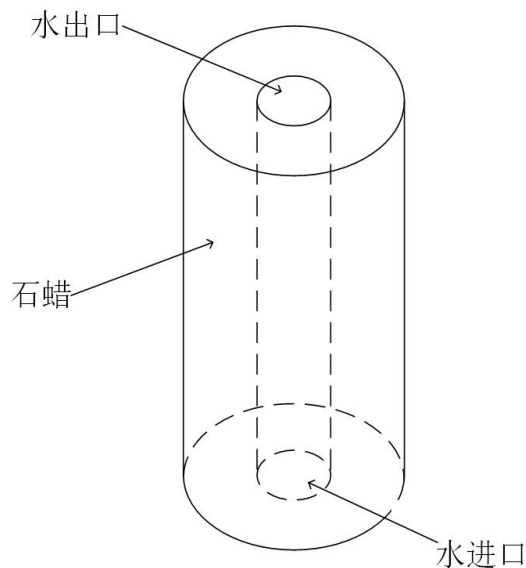


图 4-1 模拟相变材料融化过程的几何模型

4.1.2 初始条件与边界条件

（1）壁面边界条件：

$$\begin{cases} \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=\frac{D}{2}} = 0 \\ \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=0, r \in (d/2, D/2)} = 0 \\ \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=L, r \in (d/2, D/2)} = 0 \end{cases} \quad (4-1)$$

其中, d 为内径大小 (mm); D 为外径大小 (mm); z 为轴向距离 (mm), $z=0$ 为水进口位置, $z=L$ 为水出口位置。

(2) 耦合边界条件:

因为忽略了换热管的热阻, 所以在相变材料与水耦合界面处热流密度连续, 即:

$$q|_{fluid} = q|_{pcm} \quad (4-2)$$

(3) 初始条件:

在初始时刻, 温差与相变材料的温度如下所示:

$$\begin{cases} \tau = 0 \\ T_{pcm}(x, y, z, 0) = T_0 \\ T_{fluid}(x, y, z, 0) = T_1 \end{cases} \quad (4-3)$$

其中, τ 表示时间; T_0 表示相变材料初始温度; T_1 表示流体的初始温度。

4.1.3 CFD 仿真模型验证

本文采用 Fluent 中的融化/凝固模型对石蜡进行相变融化过程模拟, 在模拟过程中考虑了自然对流, 自然对流是由于石蜡密度的变化与重力作用引起的。石蜡的固相密度大, 液相密度小, 由于石蜡与水之间的换热, 导致固相石蜡逐渐融化成液相石蜡, 在浮升力的作用下, 液相石蜡向上移动, 从而形成自然对流。相变过程为一个瞬态传热过程, 即非稳态过程, 瞬态项格式采用一阶隐式。能量方程与动量方程的离散格式采用二阶迎风差分格式; 压力梯度采用 PRESTO 格式; 压力与速度耦合采用 SIMPLE 算法; 时间步长为 0.2s; 水的进口为速度入口边界条件, 流速大小为 0.035m/s, 水的初始流速大小为 0.035m/s, 水的进口温度与初始温度为 336.15k, 出口为质量出口边界条件; 相变材料的初始温度为 301.35k; 计算迭代精度 (即残差) 与松弛因子采用 Fluent 中的默认值。

模拟相变材料融化过程时，密度采用 Boussinesp 假设，初始密度为固相密度。相变材料的比热容与导热系数采用以温度作为自变量的分段函数，以相变温度为分界点。实验^[56]过程中热电偶测量的数据点位置为筒体中心高度 70mm, 距离轴心位置 23mm, 本文中模拟相同位置处的温度。石蜡的物性参数见表 4-1。

表 4-1 石蜡的物性参数

物性参数	数值
固相密度 (kg/m^3)	890
液相密度 (kg/m^3)	726
固相导热系数($\text{w/m}\cdot\text{k}$)	0.295
固相比热容 ($\text{J/kg}\cdot\text{k}$)	2464
液相比热容 ($\text{J/kg}\cdot\text{k}$)	2950
液相导热系数($\text{w/m}\cdot\text{k}$)	0.118
热膨胀系数($1/\text{k}$)	0.001
动力粘度($\text{kg/m}\cdot\text{s}$)	0.00324
相变温度(k)	324.65
相变潜热(J/kg)	210300

模拟结果与实验结果对比见图 4-2 所示：

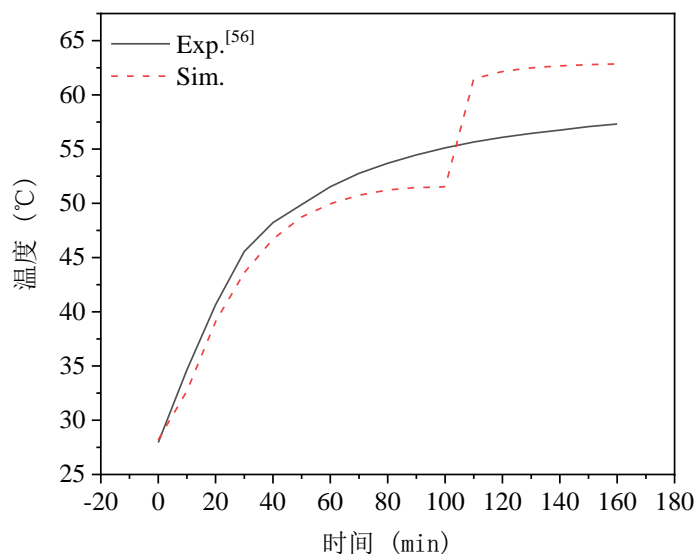


图 4-2 相变模型模拟温度与实验温度对比图

本文模拟的温度值与实验值最大模拟误差在 11% 以内, 相对误差的平均值为 6.2%。模拟误差的来源有如下两点: 一是因为在模拟过程中将相变点温度设定为一个固定的值, 即 324.65K, 而作为混合物的石蜡其实际的相变温度应该是一个温度范围。当温度达到相变温度时, 曲线接近于水平, 即此时监测点处的石蜡状态为固液共存, 当监测点的温度高于相变温度时, 此时监测点处的石蜡完全变为液态, 导致温度迅速上升。如果我们在模拟过程中把相变温度设定一个温度范围, 则模拟曲线在相变点处的温度变化趋势应该是一个逐渐上升的过程, 这样温度的变化幅度将变小, 从而也就使得在监测点处发生相变之后的温度模拟值与实验值更加接近, 也将导致相对误差的减小; 二是因为石蜡的物性参数随着融化过程的进行在时刻改变, 模拟过程无法体现这一复杂的变化过程。

4.2 流速与温差对石蜡融化过程的影响

所选取的几何模型如图 4-1 所示, 几何模型具体参数为: 管长 400mm, 外径 36mm, 内径 12mm。考虑到实际应用前景, 研究的工况为层流, 即 $Re < 2300$ 。众所周知, 热量是一个过程量, 其传递的推动力是温差, 所以, 本文设计了不同的温差 (温差与石蜡初始温度的差值), 旨在研究在不同的温差下对石蜡融化过程的影响。所设计的水的初始流速大小分别为: 0.03m/s, 0.04m/s 与 0.05m/s, 水的初始温度大小分别为: 71.5°C、76.5°C、81.5°C 与 86.5°C, 相对应的温差大小分别为: 46.5°C、51.5°C、56.5°C 与 61.5°C, 以往研究者研究的都是温度对相变材料的融化过程的影响, 而本章研究的是温差, 这更加贴近于热传递的本质。水的物性参数来自于文献^[79]。

4.2.1 流速对石蜡融化过程的影响

当温差一定时, 研究流速对于石蜡融化过程的影响。表 4-2 为流速对石蜡完全融化时间 (对石蜡液相率保留 3 位小数后得到) 的影响; 图 4-3 温差为 46.5°C, 即初始温度为 71.5°C; 图 4-4 温差为 51.5°C, 即初始温度为 76.5°C; 图 4-5 温差为 56.5°C, 即初始温度为 81.5°C; 图 4-6 温差为 61.5°C, 即初始温度为 86.5°C。从表 4-2 可以看出, 在同一个温差下, 流速虽然不同, 但是石蜡完全融化时间相差较小。从图 4-3 至图 4-6 中可以看出, 液相率随时间的变化曲线几乎重合。综上所述, 流速对石蜡完全融化的时间有影响, 流速越大, 石蜡完全融化的时间越短, 但是影响较弱。

表 4-2 流速对石蜡完全融化时间的影响

温差 (°C)	流速 (m/s)	石蜡完全融化时间 (s)
46.5	0.03	8098
	0.04	8002
	0.05	7953
51.5	0.03	6798
	0.04	6649
	0.05	6555
56.5	0.03	5908
	0.04	5665
	0.05	5568
61.5	0.03	4952
	0.04	4874
	0.05	4841

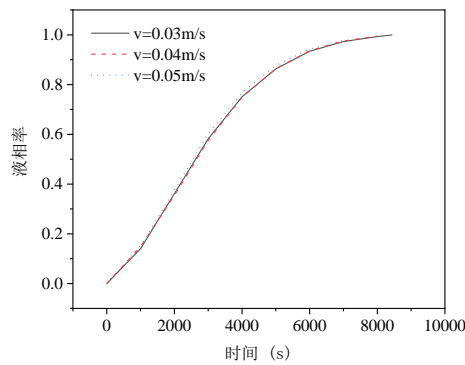


图 4-3 液相率随时间的变化 ($\Delta T=46.5^{\circ}\text{C}$)

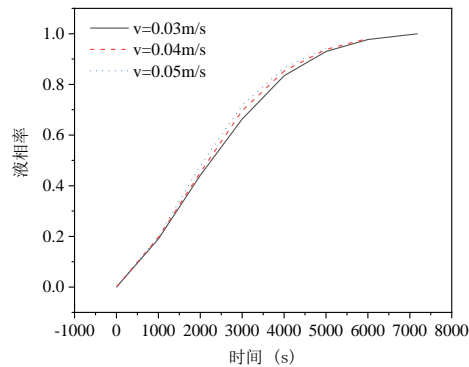


图 4-4 液相率随时间的变化 ($\Delta T=51.5^{\circ}\text{C}$)

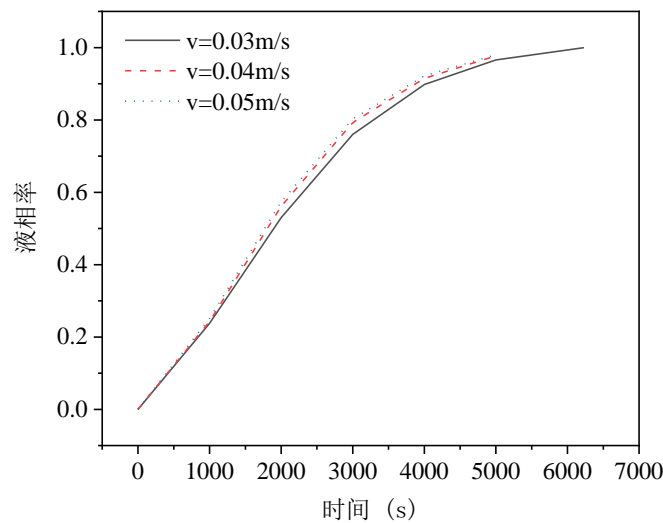


图 4-5 液相率随时间的变化 ($\Delta T=56.5^{\circ}\text{C}$)

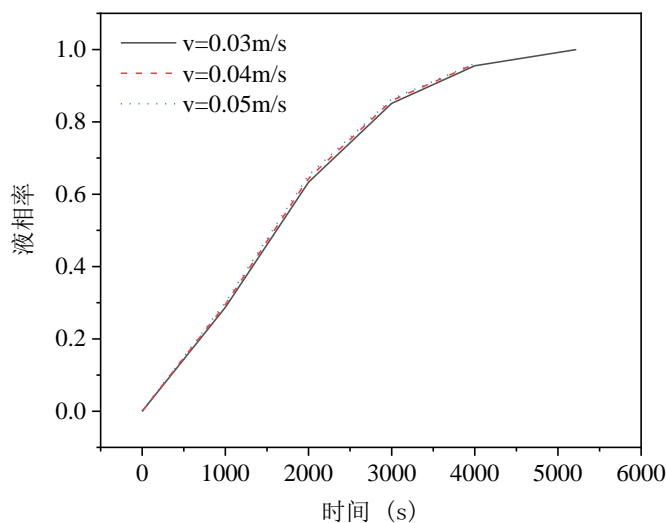


图 4-6 液相率随时间的变化 ($\Delta T=61.5^{\circ}\text{C}$)

4.2.2 温差对石蜡融化过程的影响

在流速一定的条件下，研究温差对石蜡融化过程的影响。本文依据石蜡的相变温度 (51.5°C) 与考虑到相变材料的实际应用设计了文本的温差大小。表 4-3 为温差对石蜡完全融化时间 (对石蜡液相率保留 3 位小数后得到) 的影响；图 4-7 为流速 $v=0.03\text{m/s}$ 时温差对石蜡液相率变化的影响；图 4-8 为流速 $v=0.04\text{m/s}$ 时温差对石蜡液相率变化的影响；图 4-9 为流速 $v=0.05\text{m/s}$

时温差对石蜡液相率变化的影响。从表 4-3 和图 4-7 至图 4-9 中可以看出，温差越大，石蜡完全融化的时间越短。其中，在流速为 0.03m/s、0.04m/s 与 0.05m/s，温差为 61.5℃相对于温差为 46.5℃，提高的相对值分别为 38.86%、39.01%与 39.12%。从这些数据可以看出，温差对于石蜡的融化过程是一个显著性因素。

表 4-3 温差对石蜡完全融化时间的影响

流速 (m/s)	温差(℃)	石蜡完全融化时间 (s)
0.03	46.5	8098
	51.5	6798
	56.5	5908
	61.5	4952
0.04	46.5	8002
	51.5	6649
	56.5	5665
	61.5	4874
0.05	46.5	7953
	51.5	6555
	56.5	5568
	61.5	4841

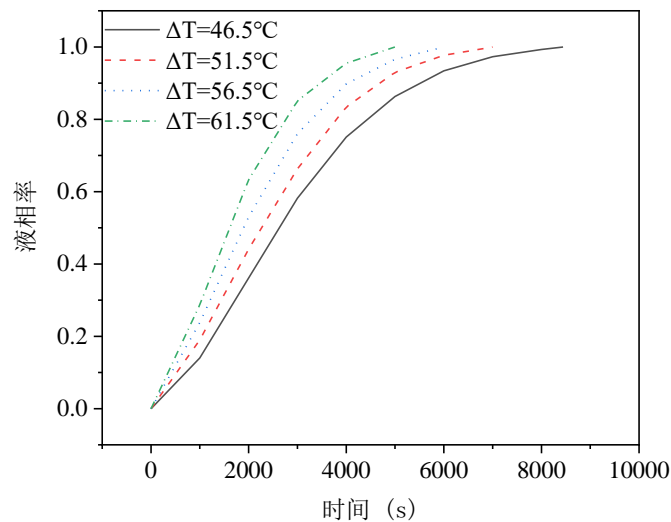


图 4-7 液相率随时间的变化 ($v=0.03\text{m/s}$)

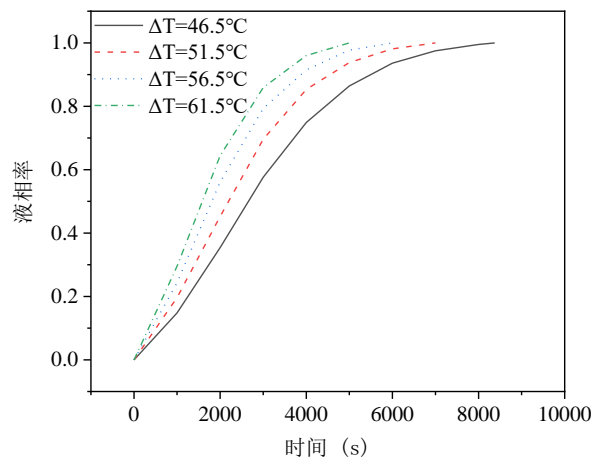


图 4-8 液相率随时间的变化 ($v=0.04\text{m/s}$)

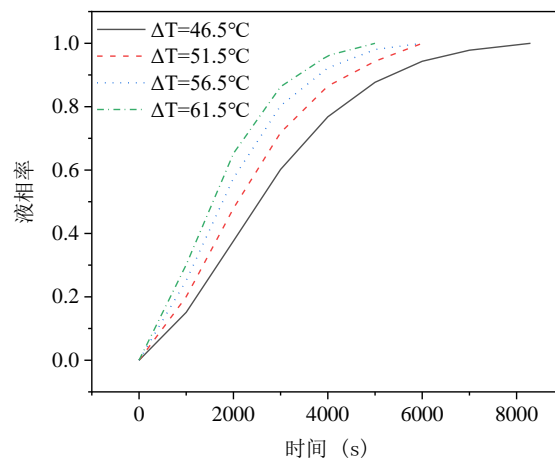


图 4-9 液相率随时间的变化 ($v=0.05\text{m/s}$)

从图 4-7 至图 4-9 可以看出，石蜡液相率的变化速率是一个由快逐渐变慢的过程，温差较小时与温差较大时存在很大差异。从液相率随时间的变化曲线中可以看出，温差越大，液相率变化越快，即石蜡融化的速率越快。

4.3 相变材料融化过程机理研究

相变材料可以应用在电池热管理、太阳能储存等领域，为了更好地应用相变材料，我们有必要对相变材料的融化过程进行深入地研究。以下为图 4-1 轴截面图。

图 4-10 为石蜡在不同时刻的相界面位置图，水的初始温度为 76.5°C ，流体流向与图 4-1 一致：

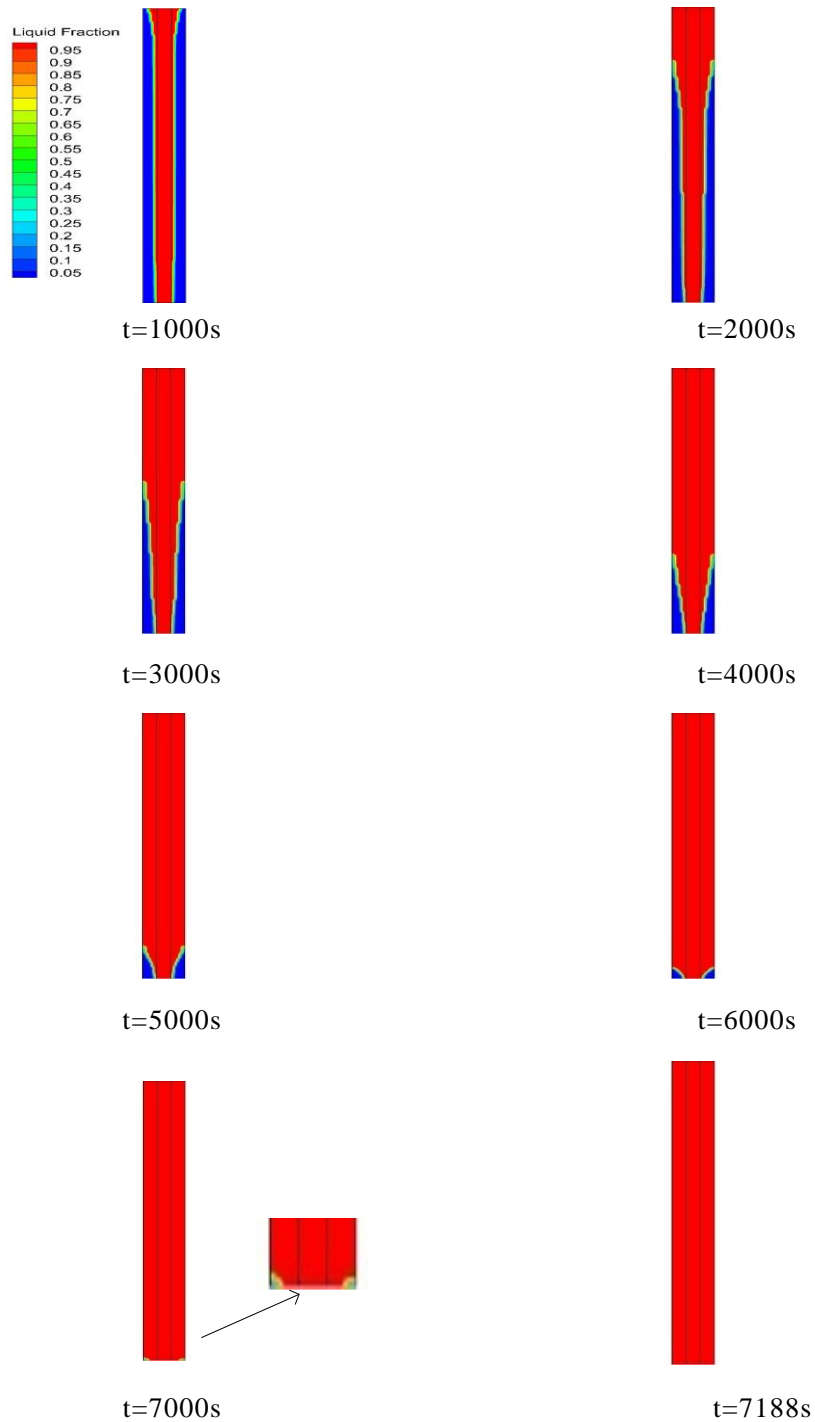


图 4-10 相界面位置随时间变化图 ($v=0.03\text{m/s}$, $\Delta T=51.5^\circ\text{C}$)

从图 4-10 可以看出，在石蜡融化过程中，相界面的位置并不与水与石蜡的耦合界面相平行，这是由于在模拟石蜡融化过程时考虑了自然对流，如果没有考虑，则相界面的位置应该与水与石蜡的耦合界面相平行。从图中可以清晰地看出，上部的石蜡融化速度较快，这主要是因为模拟石蜡的融化过程时，水的初始温度是 76.5°C ，这就相当于给了石蜡一个定壁温边界条件，

随着融化过程的进行，高温液相石蜡由于浮升力的作用向上流动，形成自然对流，这就加速了顶部石蜡的融化过程，在石蜡融化后期，剩余的固相石蜡远离耦合壁面，此时石蜡的量虽然很少，但是石蜡的融化过程却很缓慢，这可以通过对比液相率在不同时间段内的变化程度得出，在 6000s 到 7000s 之间，液相率变化了 0.021，在 5000s 到 6000s 之间，液相率变化了 0.047，在 4000s 到 5000s 之间，液相率变化了 0.096，在 3000s 到 4000s 之间，液相率变化了 0.171s，在 2000s 到 3000s 之间，液相率变化了 0.222，在 1000s 到 2000s 之间，液相率变化了 0.251，在 0-1000s 之间，液相率变化了 0.19，从这些数据可以看出，融化后期的液相率变化速率很慢，这也能从图 4-10 中相界面的移动看出。

图 4-11 流速为 0.03m/s，温差为 56.5℃时的不同时刻的相界面位置，水的初始温度为 81.5℃，流体流向与图 4-1 一致。

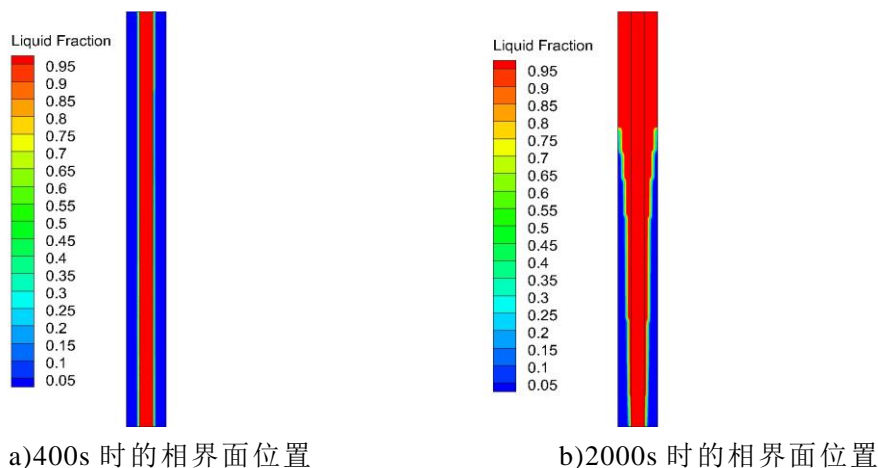


图 4-11 不同时刻的相界面位置 ($v=0.03\text{m/s}$, $\Delta T=56.5^\circ\text{C}$)

从图 4-11 可以看出，在融化初期，即 $t=400\text{s}$ 时，由于石蜡融化的空间区域很小，自然对流难以展开，Fluent 计算出的液相石蜡的平均流速只有 0.0002m/s ，且此时相界面位置与耦合界面平行，随着融化过程的进行，到了 $t=2000\text{s}$ 时，石蜡融化的空间区域变大，即液相石蜡含量增多，相界面的位置与耦合界面不平行，液相石蜡的平均流速为 0.0012m/s ，通过分析这两个相界面位置的变化及液相石蜡的平均流速可知初期热传递过程主要依靠导热，随着融化过程的进行，自然对流对石蜡融化过程的影响剧烈，此时的热传递过程转变为主要依靠对流换热。

图 4-12 为流速 $v=0.03\text{m/s}$ ，石蜡融化时间为 1000s，温差分别为 $\Delta T=51.5^\circ\text{C}$ 与 $\Delta T=56.5^\circ\text{C}$ 的相界面位置图，流体流向与图 4-1 一致。

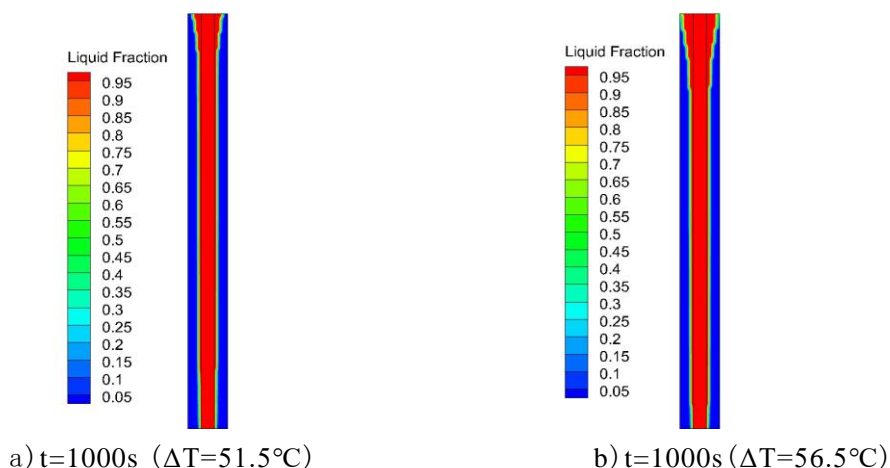


图 4-12 不同温差对石蜡相界面位置的影响

从图 4-12 可以看出，在同一个时刻，不同温差下石蜡融化过程的相界面位置是不一样的，温差大的相界面的移动速度快。这是因为当其他条件一定时，温差越大， Gr 数（ Gr 数是一个无量纲数，表征浮升力与粘滞力的相对大小，能够表征自然对流的强弱）越大，浮升力越大，自然对流对石蜡的融化过程的影响越剧烈。

图 4-13 为不同时刻与不同温差下的液相石蜡平均流速大小。

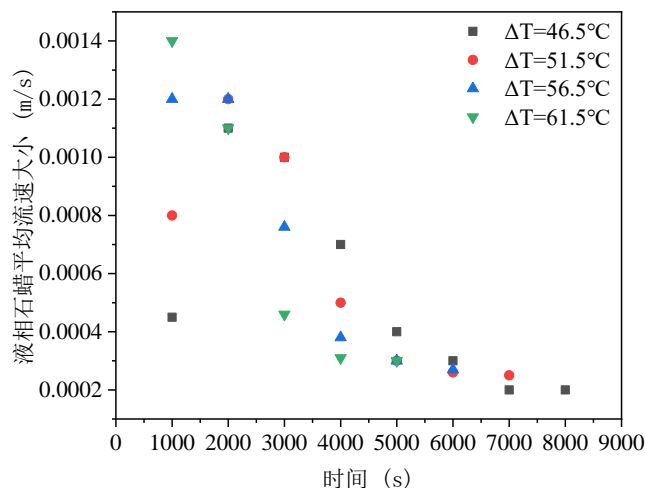


图 4-13 不同时刻与不同温差下的液相石蜡平均流速大小（m/s）（ $v=0.03m/s$ ）

从图 4-13 可以看出，在石蜡融化前期，液相石蜡的平均流速大，联系图 4-11 与图 4-12 可知，此时石蜡内部的换热过程主要依靠对流换热，而随着融化过程的进行，液相石蜡的平均流速接近于 0，在 $t=6000s$ 时（融化后期）与 $\Delta T=56.5^{\circ}C$ 的工况下的液相石蜡的平均流速为 $0.00027m/s$ ，这与图 4-11 中 $t=400s$ 时的液相石蜡平均流速差值只有 $0.00007m/s$ ，因此可以得知，热传

递过程由原来的主要依靠对流换热转变为主要依靠导热，所以也就导致在融化后期石蜡的融化速率缓慢，剩余固相石蜡量虽少，但需要的时间却很长。

图 4-14 为不同时刻与不同温差下的耦合界面处热流密度大小。

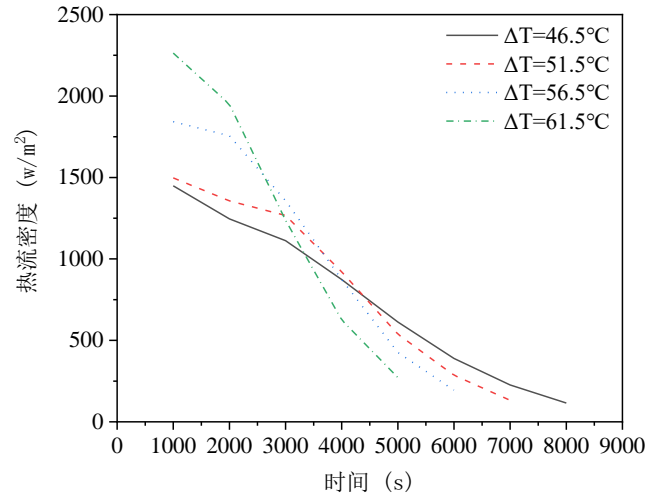


图 4-14 不同时刻与不同温差下的耦合界面处热流密度大小 (w/m^2) ($v=0.03m/s$)

从图 4-14 可以看出，在石蜡融化过程的前期，温差越大，热流密度越大，随着融化过程的进行，热流密度逐渐减小，在石蜡完全融化后（图 4-14 展示的是石蜡整个融化过程中耦合界面处的热流密度变化，即意味着在热流密度最小时石蜡已经完全融化了），耦合界面处的热流密度大小却不为 0。

图 4-15 为不同工况与不同时刻的温度分布图，初始温差为 $51.5^\circ C$ 的石蜡完全融化时间为 $6798s$ ，温差为 $56.5^\circ C$ 的石蜡完全融化时间为 $5908s$ ，即此时的石蜡都已经完全融化，流体流向与图 4-1 一致。

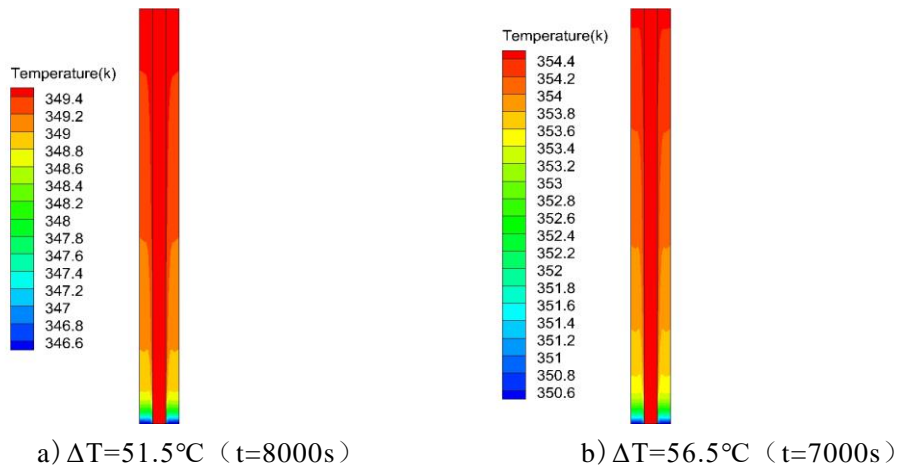


图 4-15 不同工况与不同时刻的温度分布图 ($v=0.03m/s$)

从图 4-15 可以看出，虽然在两个工况下的石蜡已经完全融化了，但是

温度分布却不均匀，这也就导致了此时的热流密度并不为 0，使得石蜡内部温度分布趋于均匀还需要更长的时间，这与图 4-14 中得出的结果是一致的。

图 4-16 为在 6000s 时的石蜡内部温度分布，此时初始温差为 51.5℃的石蜡属于融化后期，还没有完全融化，而初始温差为 56.5℃的石蜡已经完全融化。

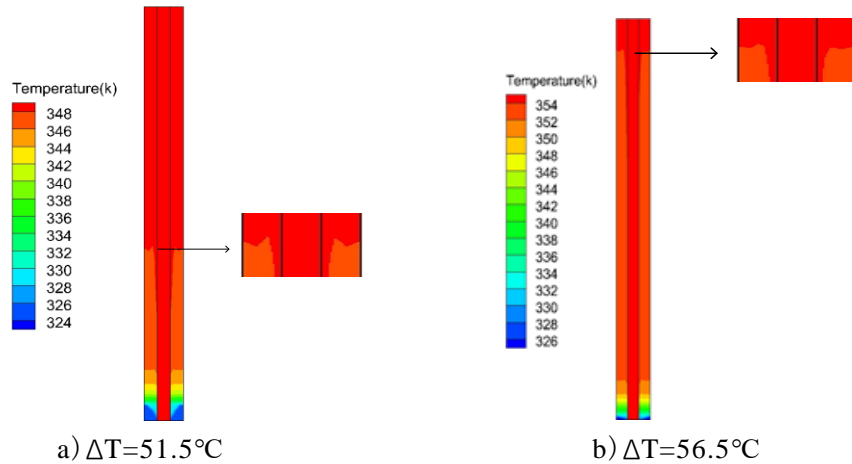


图 4-16 在 6000s 时石蜡的温度分布图($v=0.03\text{m/s}$)

从图 4-16 中我们可以看出，当初始温差不同时，在融化过程进行到同一个时刻时，石蜡内部的温度分布是不一样的，温差越大，石蜡内部温度趋近于均匀的速度越快。

依据图 4-13 与图 4-14 可以得知，在融化前期，初始温差越大，液相石蜡平均流速越大，耦合界面处的热流密度越大；随着融化过程的进行，初始温差大的反而液相石蜡平均流速与耦合界面处的热流密度小于初始温差小的，结合图 4-16 可知，随着融化过程的进行，初始温差大的比初始温差小的使得石蜡内部的温度分布更快的趋于均匀，这就导致了在石蜡的融化后期，温差大的反而热流密度小，又因为初始温差大的要比初始温差小的提前进入到融化后期，即提前由主要依靠对流换热转变为了主要依靠导热，也就导致了此时液相石蜡的平均流速变小，又由于在融化后期，石蜡的导热系数低，这也是石蜡的量虽然很少，但融化过程却很缓慢的原因（图 4-10）。综上所述，我们可以得知，初始温差大小、耦合界面处的热流密度大小与石蜡内部的热传递过程相互影响。

4.4 相变材料完全融化时间的预测

本节的主要目的在于依据相变材料所处的工况及相变材料的含量去预测相变材料完全融化的时间是多少，从而使得其融化时间可以控制与预测，

进一步使人们在实际生活中能够更好地利用石蜡。在流速与内径一定的基础上，采用不同的内外径与温差探究对石蜡融化时间的影响，应用全因子实验设计方法去分析四者关系，得出经验关联式。研究思路如下：选用管长 400mm 的同心套管，流速为 $u=0.03\text{m/s}$ 。其他模拟参数如下：初始温度分别是 71.5°C 、 76.5°C 、 81.5°C 与 86.5°C ，对应的温差大小分别为（石蜡初始温度为 25°C ） 46.5°C 、 51.5°C 、 56.5°C 与 61.5°C ，所研究的同心套管的外径大小分别为 16mm、24mm 与 32mm，内径大小分别为 8mm、10mm 与 12mm。一共做了 36 组模拟数据，数值模拟结果见表 4-4 所示：

表 4-4 温差与同心套管的内外径大小对石蜡融化时间的影响

温差大小 ($^{\circ}\text{C}$)	内径大小 (mm)	外径大小 (mm)	时间 (s)
46.5	8	16	1660
46.5	8	24	5473
46.5	8	32	10480
51.5	8	16	1376
51.5	8	24	4323
51.5	8	32	8500
56.5	8	16	1185
56.5	8	24	3732
56.5	8	32	7210
61.5	8	16	1046
61.5	8	24	3371
61.5	8	32	6239
46.5	10	16	807
46.5	10	24	3817
46.5	10	32	8574
51.5	10	16	705
51.5	10	24	3272
51.5	10	32	6917
56.5	10	16	635
56.5	10	24	2882
56.5	10	32	5915
61.5	10	16	570

表 4-4 温差与同心套管的内外径大小对石蜡融化时间的影响（续表）

温差大小 (°C)	内径大小 (mm)	外径大小 (mm)	时间 (s)
61.5	10	24	2495
61.5	10	32	5227
46.5	12	16	246
46.5	12	24	2799
46.5	12	32	6207
51.5	12	16	199
51.5	12	24	2379
51.5	12	32	5223
56.5	12	16	173
56.5	12	24	2069
56.5	12	32	4601
61.5	12	16	151
61.5	12	24	1809
61.5	12	32	4096

从表 4-4 中可以看出，石蜡完全融化的时间与石蜡的含量呈现正相关。当石蜡的含量较少时，石蜡能够在较短时间内完全融化，这说明我们在利用相变材料储能与控温时，一定要依据工况选择好石蜡的量，石蜡的量如果选择不好，可能会引起热失控。并且，在选择之前，如果能够估算出石蜡完全融化的时间，将更加有利于我们利用相变材料。依据表 4-4 的模拟数据，利用 Minitab 进行全因子实验设计（与 RSM 的区别在于分析出的数学模型中没有平方项，仅有一次项与各因子的乘积项）分析，最终得到以下经验关联式，如式(4-9)所示：

$Time = -5377 - 15.9\Delta T - 625d + 1090.7D + 13.75\Delta T \cdot d - 8.99\Delta T \cdot D - 25.09d \cdot D$ (4-9)
式中 $Time$ ——时间 (s)；

ΔT ——温差 (°C)；

d ——同心套管内径 (mm)；

D ——同心套管外径 (mm)。

其中，线性项与 2 因子交互作用项的 P 值均小于 0.05，说明这些因素均为显著性因素。本模型中的 R^2 （拟合优度，取值 0-1，接近 1 表示模拟拟合度较好）值为 99.16%，且 R^2 的预测值为 98.64%，从这两个数据可以看出，

模型拟合数据优度很高，且本模型的预测能力也很出色。

为了更好的说明本模型的预测能力，又进行了 3 个工况下的模拟，石蜡的初始温度是 25℃，模拟参数见表 4-5 所示。从表 4-5 中可以看出，预测数据与模拟数据之间相差不大，预测值相对于模拟值的相对误差分别为：13.8%、7.4%与 9.5%。

表 4-5 模拟时间与预测时间对比表

水的初始温度 (°C)	温差大小 (°C)	内径大小 (mm)	外径大小 (mm)	模拟时间 (s)	预测时间 (s)
71.5	46.5	10	20	2162	2462
80	55	9	18	1487	1597
75	50	11	26	3660	4009

4.5 本章小结

本章主要采用数值模拟方法研究相变材料的融化过程，整个模拟过程在 Fluent 中完成。主要分析了流体流速与温差对于石蜡融化过程的影响；相变材料融化过程的机理研究；如何对相变材料的融化时间进行预测。主要结论如下：

(1) 研究流速与温差对石蜡融化过程的影响。结果表明：当温差相同时，流速对石蜡的融化过程影响较弱，流速越大，石蜡完全融化所需要的时间越少；当流速相同时，温差对石蜡的融化过程影响剧烈，温差越大，石蜡完全融化所需要的时间越短。

(2) 对相变材料融化过程的机理进行了研究。结果表明：1) 石蜡在各个时期的热传递方式是不同的。在石蜡融化初期，石蜡内部的热传递过程主要依靠导热，随着融化过程的进行，液相石蜡越来越多，此时热传递过程转变为主要依靠对流换热，在融化后期，导热又占据了热传递的主导地位；2) 石蜡内部的自然对流可以加速石蜡的融化过程；3) 初始温差越大，石蜡内部的温度趋近于均匀的速度越快；4) 当石蜡完全融化后，石蜡内部温度分布并不均匀，此时在耦合界面处的热流密度并不为 0，且石蜡内部温度达到均匀分布还需要更长的时间；5) 初始温差大小、耦合界面处热流密度大小、石蜡内部的温度分布与石蜡内部的热传递过程相互影响。

(3) 预测相变材料的完全融化时间。将同心套管的内外径与温差大小确定为影响石蜡融化过程的三个重要因子，利用 Minitab 进行全因子实验设计分析，确定出一个经验关联式。

第 5 章 相变材料凝固过程数值模拟研究

本部分主要针对相变材料的散热问题进行研究。相变材料吸热融化后，如果不能在较短的时间将热量散发出去，将完全变成液态，使其失去储能与控温的作用，影响到下一次的使用。本章通过求解融化/凝固与离散相(DPM)耦合模型，对相变材料(PCM)与纳米流体的耦合传热过程进行数值模拟研究，这种强化传热方式在所阅读的文献中还没有见到。整个数值模拟过程在 Fluent 中完成。

5.1 离散相模型(DPM)的验证

由于在所阅读的文献中还没有见到求解融化/凝固与 DPM 耦合模型，所以本章对离散相模型首先进行单独验证，Fluent 中融化/凝固模型在第 4 章中已经验证过。

在验证 DPM 模型时所使用的几何模型的具体参数如下所示：圆管直径 3.5mm，圆管长 0.6m，如图 5-1 所示：

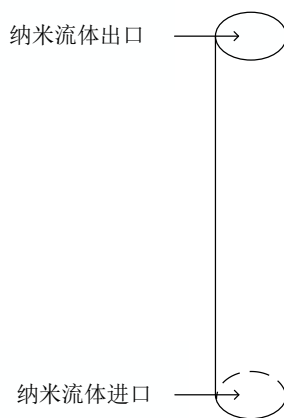


图 5-1 验证 DPM 的几何模型

使用 Fluent 对 DPM 进行验证。Fluent 中具体设置如下：采用瞬态传热过程，即非稳态过程，瞬态项格式采用一阶隐式；能量方程与动量方程的离散格式采用二阶迎风差分格式；压力梯度采用 PRESTO 格式；压力与速度耦合采用 SIMPLE 算法。纳米流体与纳米颗粒的初始温度为 10℃，进口速度均为 0.57m/s，纳米流体的进口边界条件为速度入口边界条件，纳米流体的出口边界条件为质量出口边界条件，纳米颗粒的进出口边界条件均为逃逸边界条件，壁面条件采用反弹边界条件，纳米流体与纳米颗粒的时间步长均为 0.1s，计算迭代精度（即残差）与松弛因子采用 Fluent 中的默认值。

本文采用的是 TiO_2 纳米颗粒, TiO_2 纳米颗粒的密度为 3840kg/m^3 , 粒径为 25nm , 导热系数为 $13.7\text{W/(m}\cdot\text{k)}$ 。将求出的纳米颗粒质量分数分别为 0.5% (体积分数为 0.13%)、 1% (体积分数为 0.26%) 与 1.5% (体积分数为 0.39%) 的 TiO_2 -水纳米流体在圆管中的压力降与实验值、经验公式计算值进行对比来验证本文的模拟结果。经验公式为 1991 年 White 提出的压力降公式^[80]:

$$\Delta P = f \frac{L}{d} \frac{V^2}{2} \rho_f \quad (5-1)$$

$$f = \frac{64}{R_e} \quad (5-2)$$

$$R_e = \frac{Vd}{\mu_f} \quad (5-3)$$

式中, f ——摩擦因数;

d ——圆管的内径 (mm);

L ——圆管的长度 (m);

V ——流体的平均流速 (m/s);

ρ_f ——流体的密度 (kg/m^3);

μ_f ——流体的动力粘度 ($\text{kg/m}\cdot\text{s}$)。

用 DPM 模拟纳米流体在圆管中的压力降结果见图 5-1 所示:

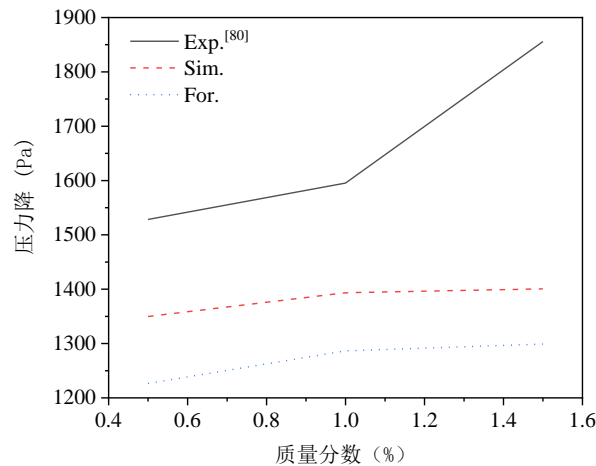


图 5-2 压力降随纳米流体质量分数的变化

其中, EXP.代表实验值^[80], Sim.代表模拟值, For.代表用 White 提出的压力降公式计算的值,此值由文献^[80]直接给出,也被用作实验结果的对比值。

从图 5-2 可知,本文模拟的压力降与实验结果及经验公式结果变化趋势相同,平均相对误差为 16.29% ,与实验值存在一定的误差。分析其原因,

一是因为在模拟过程中管壁面视为绝热，而在实际过程中管壁面不能完全达到绝热状态；二是因为 Fluent 中的离散项模型没有考虑颗粒与颗粒之间的相互作用，且在离散相模型中颗粒的边界条件采用的是反弹边界条件，而在实际情况中颗粒与壁面的作用情况复杂；三是因为在实验的过程中，流体的动力黏度、密度、质量流率与温度在发生变化，而文中模拟过程中将这些参数看作是定值。以上这些原因都将造成模拟值存在误差。也可以发现，本文中的模拟结果要优于 White 提出的压力降公式，从压力降公式中可以看出，它仅考虑了流体平均流速大小、动力粘度与密度大小对于压力降的影响，而本文在模拟的过程中不仅仅考虑了这些因素，还考虑了流体对纳米颗粒的作用力，包括曳力、重力与浮力、热泳力、虚拟质量力、压力梯度力与 Saffman 升力。

5.2 融化/凝固与 DPM 耦合模型求解方法

本节提出采用 Fluent 求解融化/凝固与 DPM 耦合模型的思路。我国工程上常温是按 20℃ 计的（俄罗斯工程常温为 10℃），这是我国大多数地方春天与秋天的温度；水处理中常温略有不同，有的按 15℃，有的按 20℃，有的 25℃；暖通专业常温有几种，如无人房间 10℃，有人房间 18℃；在化工系统中，常温的设计温度为 $T > -20 \sim 200^{\circ}\text{C}$ ；在药品行业里，常温指 10-30℃。本文在设计纳米流体的初始温度时，考虑了上述因素。

5.2.1 几何模型

几何模型如图 5-3 所示：

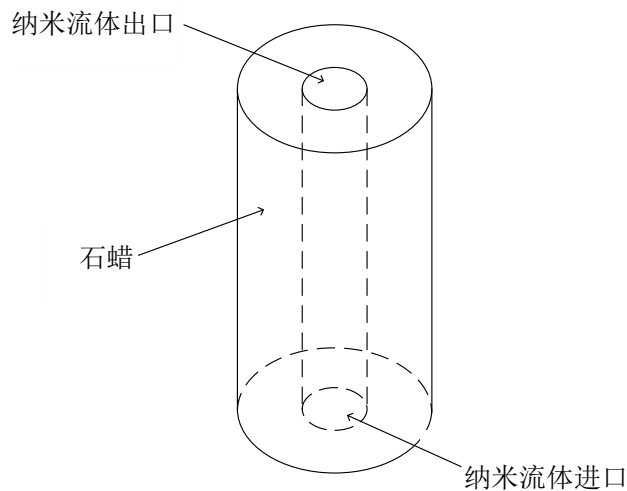


图 5-3 相变材料与纳米流体耦合传热几何模型

具体参数为：管长 600mm，同心套管的内径为 3.5mm，外径为 12mm。

5.2.2 CFD 模拟方法

采用 Fluent 对融化/凝固与 DPM 耦合模型进行求解，对相变材料与纳米流体的耦合传热过程进行数值模拟分析。

两个过程均为瞬态传热过程，即非稳态过程；瞬态项格式采用一阶隐式；能量方程与动量方程的离散格式采用二阶迎风差分格式；压力梯度采用 PRESTO 格式；压力与速度耦合采用 SIMPLE 算法；计算迭代精度（即残差）与松弛因子采用 Fluent 中的默认值。

对于纳米流体而言，采用 DPM，纳米颗粒与纳米流体的时间步长均为 0.1s；纳米流体的进口边界条件为速度入口边界条件，流速大小为 0.57m/s，纳米流体的进口温度与初始温度分别为 10℃、20℃、30℃与 40℃，对应的与相变材料的初始温度（在模拟过程中初始温度为 55℃）温差大小为 45℃、35℃、25℃与 15℃。纳米流体与纳米颗粒在初始时刻具有一样的温度大小，纳米颗粒的初始速度为 0.1m/s。纳米流体的出口边界条件为质量出口边界条件，纳米颗粒的进出口边界条件均为逃逸边界条件，壁面条件采用反弹边界条件。在模拟纳米流体过程中，在 DPM 模型中考虑了纳米颗粒受到的曳力、重力与浮力、热泳力、虚拟质量力、压力梯度力与 Saffman 升力。对于石蜡的相变模拟，采用第四章中的石蜡的物性参数进行模拟，其初始温度为 55℃，属于完全融化状态，密度为石蜡液相密度大小。其他设置在第四章中已经陈述，在这里不再赘述，纳米流体物性参数来自文献^[80]。

（1）初始条件：

$$\begin{cases} \tau = 0 \\ T_{nanofluid}(x, y, z, \tau) = T_{Tio_2}(x, y, z, \tau) = T_1 \\ T_{pcm}(x, y, z, \tau) = T_0 \end{cases} \quad (5-4)$$

式中， T_1 为纳米流体与纳米颗粒的初始温度， T_0 为相变材料的初始温度。

（2）壁面边界条件：

$$\begin{cases} \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=\frac{D}{2}} = 0 \\ \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=0, r \in (d/2, D/2)} = 0 \\ \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=L, r \in (d/2, D/2)} = 0 \end{cases} \quad (5-5)$$

式中, d 为内径大小 (mm); D 为外径大小 (mm); z 为轴向距离 (mm), $z=0$ 为水进口位置, $z=L$ 为水出口位置。

(3) 耦合边界条件:

$$q|_{nanofluid} = q|_{pcm} \quad (5-6)$$

式中, q 代表相变材料与纳米流体在耦合界面处的热流密度 (W/m^2)。

5.3 温差对 PCM 凝固过程的影响

温差是热传递的推动力, 以往的研究中虽然本质上也是研究温差对于 PCM 凝固过程的影响, 但是在描述中并没有直接点出是温差, 以往文献中的描述往往是流体的温度对于石蜡凝固过程的影响, 而本节主要研究不同的温差大小对相变材料凝固过程的影响, 直接在研究中以温差作为影响 PCM 凝固过程的因素。以下为当纳米流体质量分数一定时, 不同温差对石蜡完全凝固时间的影响, 具体结果见表 5-1。

表 5-1 不同温差对石蜡完全凝固时间的影响

纳米流体质量分数 (%)	温差 (°C)	时间 (s)
0	15	582
	25	354
	35	253
	45	200
0.5	15	506
	25	284
	35	223
	45	185
1	15	492
	25	272
	35	217
	45	172
1.5	15	476
	25	269
	35	214
	45	168

从表 5-1 可知, 当 TiO_2 -水纳米流体的质量分数相同时, 温差越大, 石

蜡完全凝固所需时间越短，将温差为 45°C 与温差为 15°C 对石蜡凝固时间的影响对比后发现，大温差与小温差对石蜡凝固时间的影响剧烈程度差异大。

当 TiO_2 -水纳米流体质量分数分别为 0%、0.5%、1% 与 1.5% 时，不同温差对石蜡完全凝固过程的影响见图 5-4 至图 5-7 所示：

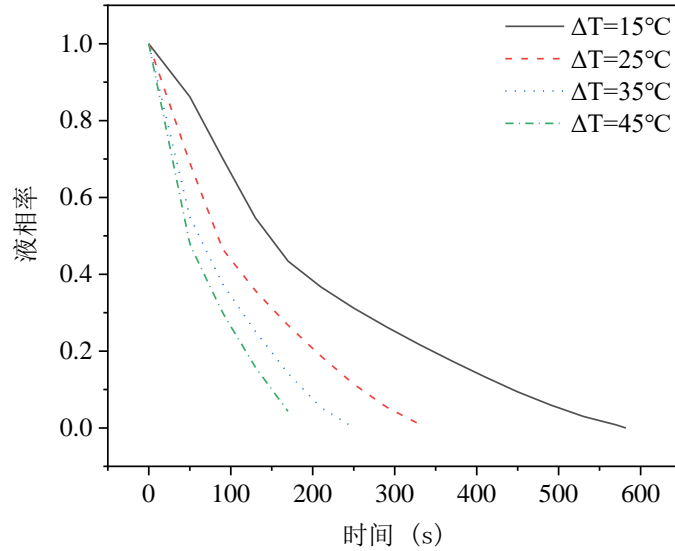


图 5-4 液相率随时间变化图 (wt=0%)

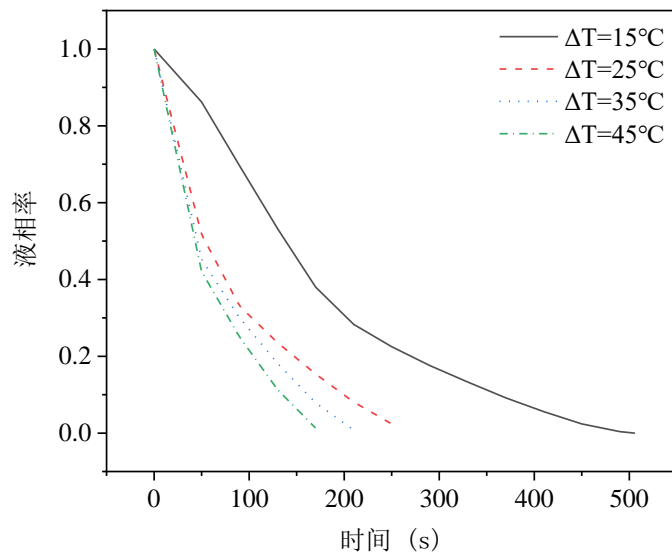


图 5-5 液相率随时间变化图 (wt=0.5%)

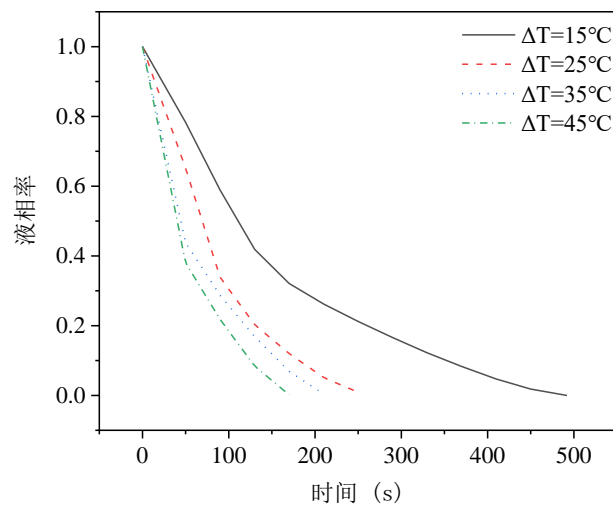


图 5-6 液相率随时间变化图 (wt=1%)

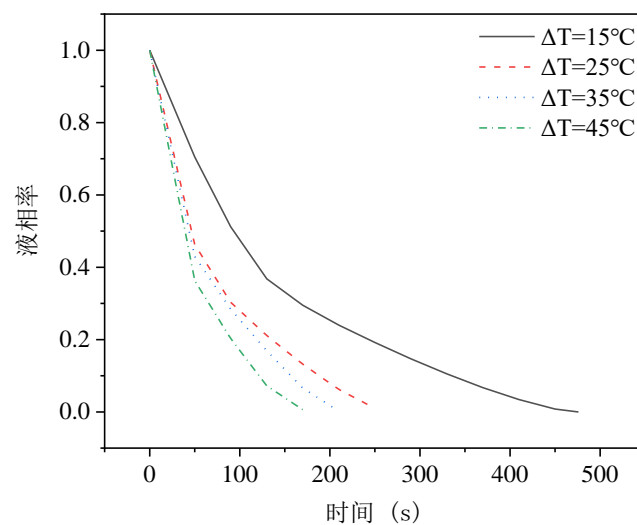


图 5-7 液相率随时间变化图 (wt=1.5%)

从图 5-4 至图 5-7 可以看出，液相率总的变化趋势是由快到慢。在石蜡凝固前期，液相率在短时间内下降很快，这表明此时石蜡的凝固速率大，且温差越大，液相率下降速率越快。随着凝固过程的进行，液相率下降速率变缓，此时温差对石蜡的凝固过程的影响要弱于凝固前期。

图 5-8 至图 5-11 为不同温差下的纳米流体质量分数分别为 wt=0%、wt=0.5%、wt=1%与 wt=1.5%，在 0-50S、50-90S、90-130S 与 130S-170S 的 4 个时间段（依据液相率随时间的变化图）内的液相率在每个时间段内的单位时间变化率。

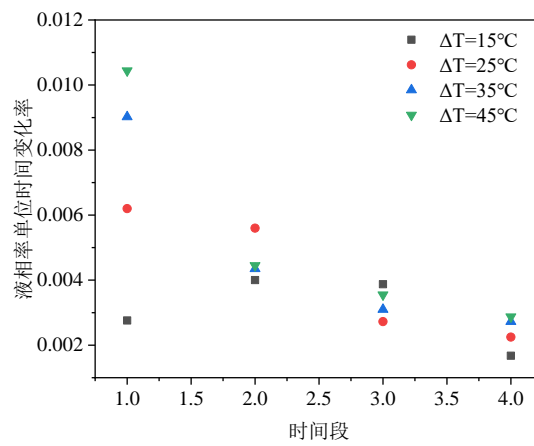


图 5-8 每个时间段内的液相率单位时间变化率值 ($w_t=0\%$)

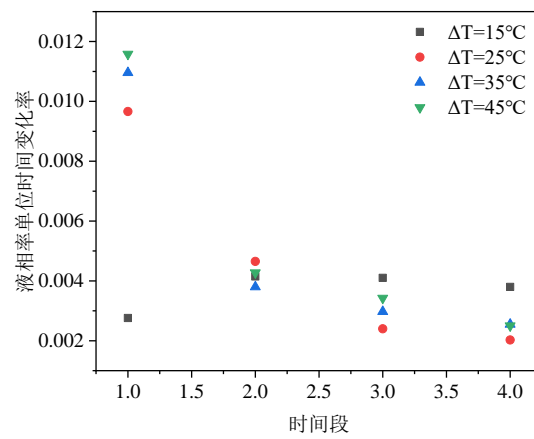


图 5-9 每个时间段内的液相率单位时间变化率值 ($w_t=0.5\%$)

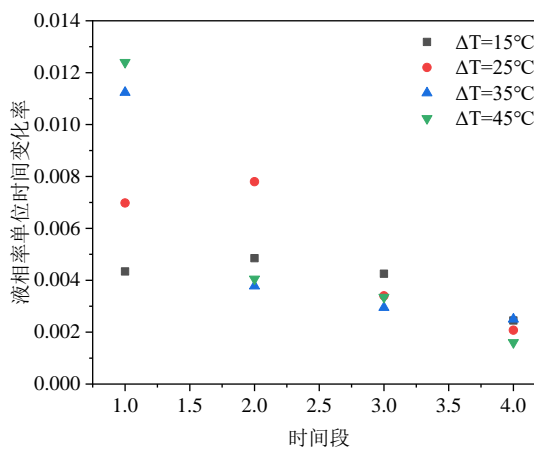


图 5-10 每个时间段内的液相率单位时间变化率值 ($w_t=1\%$)

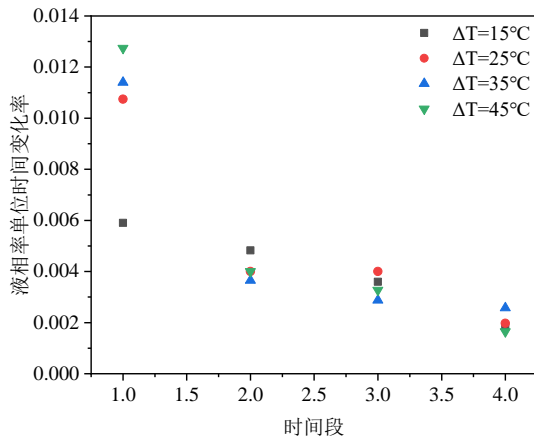


图 5-11 每个时间段内的液相率单位时间变化率值 (wt=1.5%)

从图 5-8 至图 5-11 可以看出，在石蜡凝固前期，温差越大，液相率单位时间变化率越大，随着凝固过程的进行，虽然会出现温差大而液相率单位时间变化率低的情况，但是此时我们发现在凝固前期的液相率单位时间变化率的值要大于之后的，且前期不同温差下的液相率单位时间变化率之间的差值要大于凝固后期的，这表明温差对于石蜡凝固过程的影响主要发生在凝固过程前期。

5.4 纳米流体对 PCM 凝固过程的影响

纳米流体是一种高效强化传热工质。本节使用质量分数分别为 0%、0.5%、1% 与 1.5% 的 TiO_2 -水纳米流体去冷却完全融化的石蜡。得到的石蜡完全凝固时间结果见表 5-2。

表 5-2 纳米流体质量分数对于石蜡完全凝固时间的影响

温差 ($^{\circ}\text{C}$)	纳米流体质量分数 (%)	时间 (s)	凝固时间提高率 (%)
15	0	582	0
	0.5	506	13.1
	1	492	15.5
	1.5	476	18.2
	0	354	0
25	0.5	284	19.8
	1	272	23.2
	1.5	269	24
	0	253	0
35	0.5	223	11.9
	1	217	14.2
	1.5	214	15.4

表 5-2 纳米流体质量分数对于石蜡完全凝固时间的影响（续表）

温差（℃）	纳米流体质量分数（%）	时间（s）	凝固时间提高率（%）
45	0	200	0
	0.5	185	7.5
	1	172	14
	1.5	168	16

从表 5-2 可以看出，纳米流体的质量分数越高，石蜡完全凝固所需要的时间越短，不同质量分数的纳米流体对石蜡凝固过程影响的剧烈程度不一样，其中，从凝固时间提高率（在同一温差下，不同质量分数的纳米流体使得石蜡完全凝固时间与水使得石蜡完全凝固时间的差值的绝对值与水使得石蜡完全凝固时间的比值）上来看，当温差相同时，纳米流体的质量分数越大，凝固时间提高率越大，这与温差对 PCM 凝固时间的影响是不一样的。

当温差分别为 15℃、25℃、35℃与 45℃时，不同质量分数的 TiO₂-水纳米流体对于石蜡液相率的影响见图 5-12 至图 5-15。

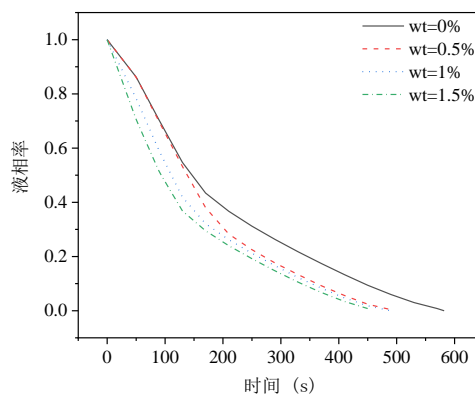


图 5-12 液相率随时间变化图（ $\Delta T=15^{\circ}\text{C}$ ）

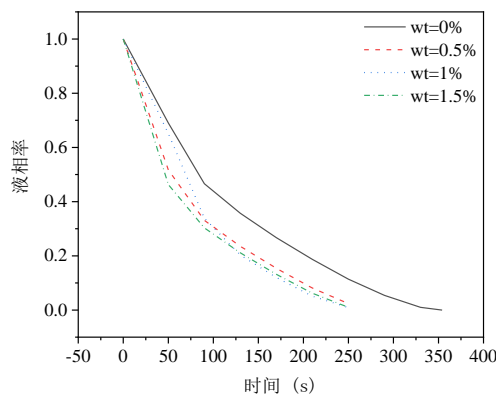


图 5-13 液相率随时间变化图（ $\Delta T=25^{\circ}\text{C}$ ）

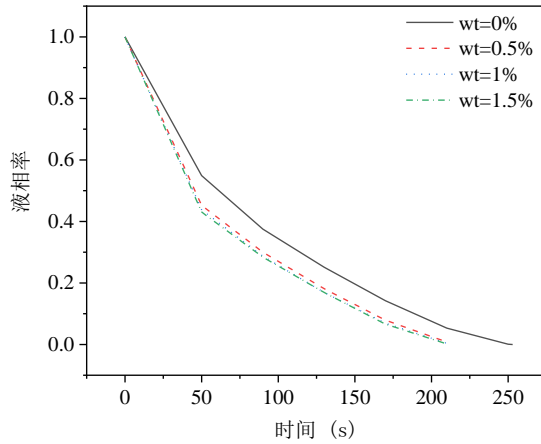


图 5-14 液相率随时间变化图 ($\Delta T=35^{\circ}\text{C}$)

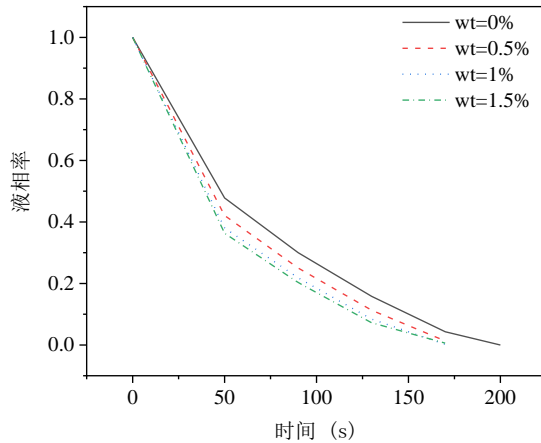


图 5-15 液相率随时间变化图 ($\Delta T=45^{\circ}\text{C}$)

从图 5-12 至图 5-15 中可以看出，液相率总的变化趋势是由快到慢。在石蜡凝固前期，液相率在短时间内下降很快，这表明此时石蜡凝固速率大，并且随着 TiO_2 -水纳米流体质量分数的提高而增加。随着凝固过程的进行，液相率下降速率变缓，且液相率下降速率几乎相等，这说明此时 TiO_2 -水纳米流体的质量分数对石蜡的凝固速率的影响较弱。综上所述，纳米流体对石蜡凝固速率的影响主要发生在石蜡的凝固前期，而后期影响较弱。

图 5-16 至图 5-19 为 40°C ($\Delta T=15^{\circ}\text{C}$)、 30°C ($\Delta T=25^{\circ}\text{C}$)、 20°C ($\Delta T=35^{\circ}\text{C}$)、与 10°C ($\Delta T=45^{\circ}\text{C}$)，在 0-50S、50-90S、90-130S 与 130S-170S 的 4 个时间段的液相率在每个时间段内的单位时间变化率。

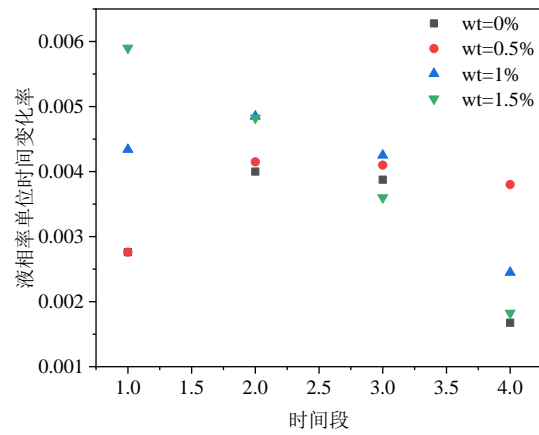


图 5-16 每个时间段内的液相率单位时间变化率值 ($\Delta T=15^{\circ}\text{C}$)

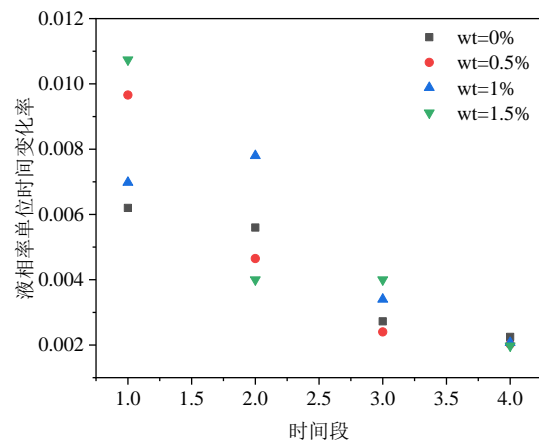


图 5-17 每个时间段内的液相率单位时间变化率值 ($\Delta T=25^{\circ}\text{C}$)

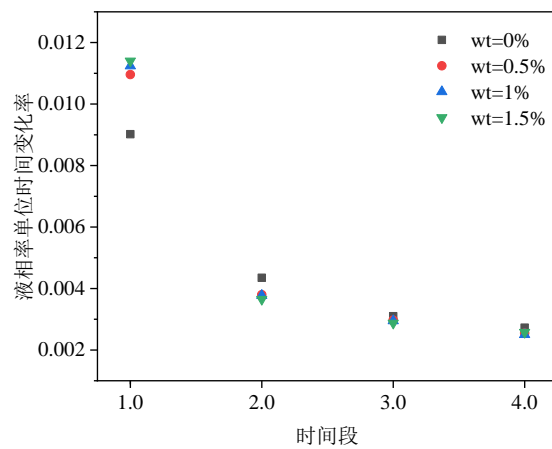


图 5-18 每个时间段内的液相率单位时间变化率值 ($\Delta T=35^{\circ}\text{C}$)

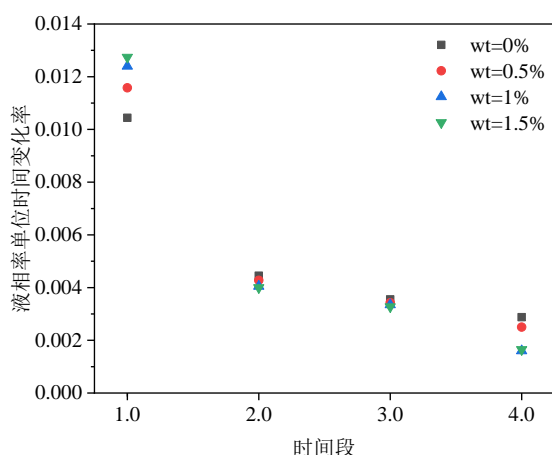


图 5-19 每个时间段内的液相率单位时间变化率值 ($\Delta T=45^{\circ}\text{C}$)

从图 5-16 至图 5-19 可以看出，在石蜡凝固前期，纳米流体的质量分数越高，液相率单位时间变化率越大，随着凝固过程的进行，虽然会出现纳米流体质量分数大而液相率单位时间变化率低的情况，但是此时对于石蜡凝固过程造成的影响已经不如凝固前期造成的影响大，换言之，不同质量分数的纳米流体对于石蜡凝固过程的影响主要发生在凝固前期。

从表 5-2 可以得知，在温差为 45°C ，纳米流体的质量分数为 0% 时，石蜡完全凝固时间为 200s，而当温差为 35°C ，纳米流体的质量分数分别为 0%、0.5%、1% 与 1.5% 时，使得石蜡完全凝固所需要的时间分别为 253s、223s、217s 与 214s，按照上述方式对比表中其他参数也会发现一样的规律。因为要体现纳米流体的加入等效于增大了温差，所以在温差为 45°C ，纳米流体的质量分数为 0% 时相当于没有加入纳米颗粒，而选取的温差为 35°C ，纳米流体的质量分数分别为 0.5%、1% 与 1.5% 时加入了纳米颗粒，且选取温差为 35°C 且纳米流体的质量分数为 0% 作为对比，这就说明了纳米流体的使用相当于增大了温差。综上所述，使用纳米流体作为冷却工质等效于增大了温差，这是很可观的，因为在实际生活应用中，降低温差意味着损失更多的能耗。

5.5 本章小结

为了使融化后的相变材料 (PCM) 中的潜热迅速释放出去，以便于下一次的循环使用，本章针对 PCM 的散热问题进行了研究，采用纳米流体作为换热工质，相比于其他冷却石蜡的方法 (比如往石蜡中添加高导热性材料)，本方法的优点在于既提高了 PCM 材料的散热速率，又没有减少 PCM 的相变潜热，因而能够更好地发挥石蜡储能与控温的作用。整个模拟过程在 Fluent

中完成。主要结论如下：

(1) 求解融化/凝固与 DPM 耦合模型，数值模拟出纳米流体对石蜡凝固过程的影响，这在作者所阅读过的文献中还没有见到。

(2) 探究了温差与纳米流体质量分数对石蜡凝固过程的影响。结果表明：温差与纳米流体对石蜡凝固过程的影响主要发生在前期，温差与纳米流体的质量分数越大，对石蜡的凝固过程影响越剧烈，石蜡完全凝固所需要的时间越少，将温差对石蜡凝固过程的影响与纳米流体对石蜡凝固过程的影响对比后发现，使用纳米流体作为冷却工质等效于增大了温差。

结 论

利用相变材料进行潜热储能是储能技术研究的主要方向之一,而相变材料是潜热储能技术实现的基础,因此,掌握相变材料融化与凝固机理是潜热储能技术应用的关键。本文以相变材料为核心展开研究,对相变材料的融化机理进行了研究,考虑到相变材料完全融化后将不利于下一次的循环使用,又采用高效强化传热工质纳米流体对相变材料进行散热,这种强化换热方式既提高了 PCM 材料的散热速率,又没有减少 PCM 的相变潜热,又因为纳米流体的导热系数对纳米流体的强化传热具有重要影响,所以又研究了纳米流体的相对导热系数,这有助于理解纳米流体的强化换热。本文研究结论如下:

(1) 纳米流体相对导热系数研究结论

1) 基于径向基(RBF)神经网络法预测 Al_2O_3 -水纳米流体相对导热系数模型要优于 Maxwell 模型与 Bruggeman 等人模型;

2) 提出基于响应曲面法(RSM)预测 Al_2O_3 -水纳米流体相对导热系数的经验关联式,其对纳米流体相对导热系数的预测能力要优于 Timofeeva 和 Minsta 等人的模型。

(2) 相变材料的融化过程机理研究结论

1) 石蜡在各个时期的热传递方式是不同的。在石蜡融化初期,石蜡内部的热传递过程主要依靠导热;随着融化过程的进行,液相石蜡含量增多,由原来主要依靠导热的热传递方式转变为主要依靠对流换热;在融化后期,导热又占据了热传递的主导地位。从整个融化过程分析,石蜡内部的自然对流可以加速石蜡的融化过程;

2) 初始温差越大,石蜡内部的温度趋近于均匀的速度越快;

3) 当石蜡完全融化后,石蜡内部温度分布并不均匀,此时在耦合界面处的热流密度并不为 0,石蜡内部的温度达到均匀分布还需要更长的时间;

4) 初始温差大小、耦合界面处热流密度大小、石蜡内部的温度分布与石蜡内部的热传递过程相互影响;

5) 利用全因子实验设计方法,提出了一个预测石蜡完全融化时间的经验关联式,以便于在实际应用中能够依据使用工况更好地对石蜡含量进行选择。

(3) 相变材料凝固过程机理研究结论

1) 求解融化/凝固与 DPM 耦合模型,数值模拟出纳米流体对石蜡凝固过程的影响,这在作者所阅读文献中还没有见到;

2) 采用纳米流体作为换热工质去加速石蜡的凝固过程。结果表明:温差与

纳米流体对石蜡的凝固过程都有影响，温差与纳米流体的质量分数越高，越能够加速石蜡的凝固过程，且这一影响主要发生在凝固前期。对比温差与纳米流体对石蜡凝固过程的影响后发现，使用纳米流体作换热工质等效于增大温差。未来工作展望：

(1) 基于 RBF 神经网络法与 RSM 法研究 Al_2O_3 -水纳米流体相对导热系数，没有考虑到不同种类的纳米颗粒对于纳米流体相对导热系数的影响，未来研究过程中应可以加以考虑。

(2) 在得出的预测石蜡完全融化时间的关联式中，没有考虑到同心套管长度的影响，在未来的研究中应该加以考虑。

参考文献

- [1] 中国循环经济协会可再生能源专业委员会(CREIA). REN21《全球可再生能源现状报告 2018》[J]. 能源, 2018, 116(07):93.
- [2] 苗红. 全球可再生能源现状及展望[J]. 世界环境, 2017(2):65-67.
- [3] 余海. 太阳能利用综述及提高其利用率的途径[J]. 能源研究与利用, 2004 (3): 34-37.
- [4] Mohammed M Farid, Amar M Khudhair, Siddique Ali K Razack, Said Al-Hallaj. A review on phase change energy storage: materials and applications[J]. Energy Conversion and Management, 2004, 45(9-10):1597-1615.
- [5] Vineet Veer Tyagi, D. Buddhi. PCM thermal storage in buildings: A state of art[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2007, 11(6):1146-1166.
- [6] Belen Zalba, Jose Marin, Cabeza L F, Harald Mehling. Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications[J]. Applied Thermal Engineering, 2003, 23(3):251-283.
- [7] Choi S U S. Enhancing Thermal Conductivity of Fluids with Nanofluids. ASME FED, 1995, 231(66): 99-103.
- [8] S.M. Sohel Murshed, C.A. Nieto de Castro. Conduction and convection heat transfer characteristics of ethylene glycol based nanofluids-A review [J]. Applied Energy, 2018, 184: 681-695.
- [9] Sarit Kumar Das, Nandy Putra, Peter Thiesen, Wilfried Roetzel. Temperature Dependence of Thermal Conductivity Enhancement for Nanofluids[J]. Journal of Heat Transfer, 2003, 125 (4) :567.
- [10] Said. Al-Hallaj, J.R. Selmán. A novel thermal management system for electric vehicle batteries using phase-change material[J]. Journal of The Electrochemical Society, 2000, 147(9):3231-3236.
- [11] 王子源. 基于高导热壳体的动力电池热管理系统设计与研究[D]. 广州, 广州工业大学硕士学位论文, 2015.
- [12] Jasim M. Mahdi, Emmanuel C. Nsofor. Solidification enhancement of PCM in a triplex-tube thermal energy storage system with nanoparticles and fins [J]. Applied Energy, 2018, 211: 975-986.
- [13] Bohayra Mortazavi, Hongliu Yang, Farzad Mohebbi, Gianaurelio Cuniberti. Graphene or h-BN paraffin composite structures for the thermal management

- of Li-ion batteries: A multiscale investigation [J]. *Applied Energy*, 2017, 202: 323-334.
- [14] 夏莉. 复合相变储能材料的研制与潜热储能中热物理现象的研究[D]. 上海, 上海交通大学博士学位论文, 2011.
- [15] 徐婷. 高效复合相变材料的传热特性研究及数值模拟[D]. 广州, 华南理工大学硕士学位论文, 2012.
- [16] 杨梅. 纳米颗粒强化相变蓄热机理研究[D]. 上海, 上海交通大学博士学位论文, 2013.
- [17] 贺鹏. 具有相变蓄热体的蓄热换热器研究[D]. 广州, 华南理工大学硕士学位论文, 2013.
- [18] 杨佳霖. 潜热蓄热相变过程换热强化研究[D]. 北京, 华北电力大学博士学位论文, 2016.
- [19] 林道光. 相变材料蓄热特性的模拟研究[D]. 湘潭, 湖南科技大学硕士学位论文, 2013.
- [20] 柯彬彬. 圆管外石蜡相变传热过程数值模拟及传热强化[D]. 镇江, 江苏大学硕士学位论文, 2016.
- [21] Yang Xu, Qinlong Ren, Zhang-Jing Zheng, Ya-Ling He. Evaluation and optimization of melting performance for a latent heat thermal energy storage unit partially filled with porous media[J]. *Applied Energy*, 2017, 193: 84-95.
- [22] Yang Xu, Ming-Jia Li, Zhang-Jing Zheng, Xiao-Dai Xue. Melting performance enhancement of phase change material by a limited amount of metal foam: Configurational optimization and economic assessment[J]. *Applied Energy*, 2018, 212: 868-880.
- [23] Xing Jin, HuoYan Hu, Xing Shi, Xin Zhou, Yang Liu , YongGao Yin, XiaoSong Zhang. A new heat transfer model of phase change material based on energy asymmetry[J]. *Applied Energy*, 2018, 212: 1409-1416.
- [24] Xiwen Cheng, Xiaoqiang Zhai. Thermal performance analysis and optimization of a cascaded packed bed cool thermal energy storage unit using multiple phase change materials[J]. *Applied Energy*, 2018, 215: 566-576.
- [25] Giuseppe Diglio, Carlo Roselli, Maurizio Sasso, UmavathiJawali Channabasappa. Borehole heat exchanger with nanofluids as heat carrier [J]. *Geothermics*, 2018, 72:112-123.
- [26] V.Ya.Rudyak, A.V.Minakov, S.L.Krasnolutskii. Physics and Mechanics of Heat Exchange Processes in Nanofluid Flows[J]. *Physical Mesomechanics*,

2016,19:298-306.

- [27] 王鹏. 纳米流体强化内燃机活塞冷却油腔传热的基础研究[D]. 大连, 大连理工大学博士论文, 2015.
- [28] 王涛. 纳米流体微通道散热器在菲涅尔 CPVT 系统中的应用研究[D]. 呼和浩特, 内蒙古工业大学硕士论文, 2017.
- [29] 熊孝鹏. SiO₂-water 纳米流体方腔自然对流流动与传热数值分析[D]. 武汉, 华中科技大学硕士学位论文, 2016.
- [30] 周长江. 纳米流体热管内传热特性的数值模拟[D]. 镇江, 江苏科技大学硕士学位论文, 2014.
- [31] 李天宇. 石墨烯纳米流体的制备和换热特性研究[D]. 哈尔滨, 哈尔滨工业大学硕士学位论文, 2015.
- [32] 刘怀飞. 纳米流体在微电子元件水冷系统的实验研究[D]. 吉林市, 东北电力大学硕士学位论文, 2017.
- [33] 赵宁波. 纳米流体的热物性预测建模及强化流动换热特性研究[D]. 哈尔滨, 哈尔滨工程大学博士学位论文, 2016.
- [34] Thakleaw Yiamsawasd, Ahmet Selim Dalkilic, Somchai Wongwises. Measurement of the thermal conductivity of titania and alumina nanofluids[J]. *Thermochimica Acta*, 2012, 545(19): 48-56.
- [35] M. Chandrasekar, S. Suresh, A. Chandra Bose. Experimental investigations and theoretical determination of thermal conductivity and viscosity of Al₂O₃/water nanofluid[J]. *Experimental Thermal & Fluid Science*, 2010, 34 (2) :210-216.
- [36] Giovanni A. Longo, Claudio Zilio. Experimental measurement of thermophysical properties of oxide-water nano-fluids down to ice-point[J]. *Experimental Thermal & Fluid Science*, 2011, 35 (7) :1313-1324.
- [37] S. Lee, S.U.S. Choi, S. Li, J. A. Eastman. Measuring Thermal Conductivity of Fluids Containing Oxide Nanoparticles[J]. *Journal of Heat Transfer*, 1999 ,121 (2) :280-289.
- [38] 王书福. 封闭方腔内纳米流体自然对流传热特性研究[D]. 哈尔滨, 哈尔滨工业大学硕士学位论文, 2012.
- [39] Li C H, Peterson G P. The effect of particle size on the effective thermal conductivity of Al₂O₃-water nanofluids[J]. *Journal of Applied Physics*, 2007, 101(4):044312-044312-5.
- [40] Chan Hee Chon, Kenneth D. Kihm, Shin Pyo Lee, Stephen U. S. Choi.

- Empirical correlation finding the role of temperature and particle size for nanofluid (Al_2O_3) thermal conductivity enhancement[J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 87 (15) :435.
- [41] S.M.S. Murshed, K.C. Leong, C. Yang. Investigations of thermal conductivity and viscosity of nanofluids[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2008, 47 (5) :560-568.
- [42] Dae-Hwang Yoo, K.S. Hong, Ho-Soon Yang. Study of thermal conductivity of nanofluids for the application of heat transfer fluids[J]. *Thermochimica Acta*, 2007, 455 (1) :66-69.
- [43] Nandy Putra, Wilfried Roetzel. Natural Convection of Nanofluids[J]. *Heat and Mass Transfer*, 2003, 39:775-784.
- [44] Calvin H. Li, G. P. Peterson. Experimental investigation of temperature and volume fraction variations on the effective thermal conductivity nanoparticle suspensions (nanofluids)[J]. *Journal of Applied Physics*, 2006, 99 (8) :286-10.
- [45] 王照亮,唐大伟,郑兴华,周乐平,刘石. 利用 3ω 法同时测量纳米流体导热系数和热扩散系数[J]. *化工学报*, 2007, 58 (10): 2462-2468.
- [46] Xinwei Wang, Xianfan Xu, Stephen U. S. Choi. Thermal Conductivity of Nanoparticle-Fluid Mixture[J]. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 2012, 13 (13) :474-480.
- [47] 李金凯,赵蔚琳,刘宗明,韩亚东.低浓度 Al_2O_3 -水纳米流体制备及导热性能测试[J].*硅酸盐通报*, 2010 , 29 (1) :204-208.
- [48] 寿青云,陈汝东.金属氧化物纳米流体的导热性能研究[J]. *材料导报*, 2006 , 20 (5) :127-129.
- [49] Honorine Angue Mintsu, Gilles Roy, Cong Tam Nguyen, Dominique Doucet. New temperature dependent thermal conductivity data for water-based nanofluids[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2009, 48(2):363-371.
- [50] Elena V. Timofeeva, Alexei N. Gavrilov, James M. McCloskey, Yuriy V. Tolmachev. Thermal conductivity and particle agglomeration in alumina nanofluids: Experiment and theory[J]. *Phys Rev E Stat Nonlin Soft Matter Phys*, 2007, 76 (6) :061203.
- [51] Jundika C. Kurnia, Agus P. Sasmito. Numerical investigation of heat transfer performance of a rotating latent heat thermal energy storage [J].

- Applied Energy, 2017.
- [52] Mohammad Parsazadeh, Xili Duan. Numerical study on the effects of fins and nanoparticles in a shell and tube phase change thermal energy storage unit [J]. Applied Energy, 2018, 216: 142-156.
- [53] 吴淑英. 纳米复合蓄热材料强化相变传热实验与数值模拟研究[D]. 广州, 华南理工大学博士学位论文, 2010.
- [54] 李超. 多相变材料蓄热器蓄放热过程数值模拟研究[D]. 大连, 大连理工大学硕士学位论文, 2014.
- [55] Zhonghao Rao, Qingchao Wang, Congliang Huang. Investigation of the thermal performance of phase change material/mini-channel coupled battery thermal management system[J]. Applied Energy, 2016, 164: 659-669.
- [56] 晋瑞芳. 太阳能相变蓄热装置蓄热性能实验及模拟研究[D]. 上海, 东华大学, 2009.
- [57] 姜贵文. 高导热复合相变材料的制备与动力电池热管理应用研究[D]. 南昌, 南昌大学博士论文, 2017.
- [58] Maxwell J C A . A Treatise On Electricity and Magnetism[M]// A treatise on electricity and magnetism /. 交通书店, 1954.
- [59] Bruggeman D A G. Berechnung Verschiedener Physikalischer Konstanten von Heterogenen Substanzen, I. Dielektrizitätskonstanten und Leitfähigkeiten der Mischkörper aus Isotropen Substanzen[J]. Annalen der Physik, 1935, 416(7): 636-679.
- [60] Mints H A, Roy G, Nguyen C T, Douceta D. New Temperature Dependent thermal conductivity data for water-based nanofluids. International Journal of Thermal Sciences, 2009, 48(2): 363-371.
- [61] 张德丰. MATLAB 神经网络仿真与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009: 11-13.
- [62] 魏海坤. 神经网络结构设计的理论与方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005: 40-45.
- [63] Simon Haykin. 神经网络原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004: 187-199.
- [64] 闵亚能. 实验设计 (DOE) 应用指南[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011: 336-436.
- [65] Marcos Almeida Bezerra, Ricardo Erthal Santelli, Eliane Padua Oliveira, Leonardo Silveira, Villar, Luciane Amélia, Escaleira. Response surface methodology (RSM) as a tool for optimization in analytical chemistry[J].

Talanta,2008,76:965-977.

- [66] 邹得球, 肖睿, 宋文吉, 冯自平. 一种余热利用相变石蜡储热过程的数值模拟[J]. 热能动力工程, 2010, 25(1):77-81.
- [67] 何玉荣, 赵云华, 刘亚宁, 陆慧林, 丁玉龙. $\text{TiO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 纳米流体管内流动和对流换热行为的数值模拟研究[C]//中国工程热物理学会多相流学术会议. 2006.
- [68] Syam Sundar, K.V. Sharma. Experimental Determination of Thermal Conductivity of Fluid Containing Oxide Nanoparticles[J]. International Journal For Numerical Methods In Dynamic Fluids 4 (2008) 57-69.
- [69] 张亮. 纳米流体强化热量与动量传递的实验研究[D]. 大连, 大连理工大学, 2014.
- [70] X. Zhang, H. Gu, M. Fujii. Experimental Study on the Effective Thermal Conductivity and Thermal Diffusivity of Nanofluids[J]. International Journal of Thermophysics, 2006, 27 (2) :569-580.
- [71] Jeffrey A Eastman, U.S Choi, Shaoping Li, G Soyeze. Novel Thermal Properties of Nanostructured Materials[J]. Journal of Metastable and Nanocrystalline Materials, 1999,2-6:629-634.
- [72] Xing Zhang, Hua Gu, Motoo Fujii. Effective thermal conductivity and thermal diffusivity of nanofluids containing spherical and cylindrical nanoparticles[J]. Experimental Thermal & Fluid Science, 2007 ,31 (6) :593-599.
- [73] Michael P. Beck, Yanhui Yuan, Pramod Warriar, Aryn S. Teja. The effect of particle size on the thermal conductivity of alumina nanofluids[J]. Journal of Nanoparticle Research, 2008 ,11 (5) :1129-1136.
- [74] Binglu Ruan, Anthony M. Jacobi. Investigation on Intertube Falling-Film Heat Transfer and Mode Transitions of Aqueous-Alumina Nanofluids[J]. Journal of Heat Transfer,2011.
- [75] 赵宁波,郑洪涛,李淑英,杨磊,杨家龙. $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$ 纳米流体的导热系数与粘度实验研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2018 (1) :60-66.
- [76] 江宦明,夏国栋,刘冉. $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 纳米流体导热系数与稳定性影响因素分析[J]. 工程热物理学报, 2014 (8) :1550-1553.
- [77] 夏国栋, 刘冉, 杜墨. 纳米流体导热系数影响因素分析[J]. 北京工业大学学报, 2016 , 42 (8) :1252-1258.
- [78] Adi T. Utomo, Heiko Poth, Phillip T. Robbins, Andrzej W. Pacek.

- Experimental and theoretical studies of thermal conductivity, viscosity and heat transfer coefficient of titania and alumina nanofluids[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2012, 55 (25-26) :7772-7781.
- [79] 杨世铭, 陶文铨. 传热学第四版[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 563-564.
- [80] T. P. Teng, Y. H. Hung. Pressure Drop of TiO₂ Nanofluid in Circular Pipes. Particuology, 2011, 09 (5) :486-491.

致 谢

时间飞逝，转眼间两年的研究生生活结束了！记得开学时我师兄与我同学对我说，两年时间过得很快，你要珍惜，在此时，我真正体会到了这句话。回想两年的研究生生涯，我学会了很多，也成熟了很多，但是这都离不开老师们与同学们的帮助，在这里，衷心感谢帮助过我的老师们与同学们！

首先感谢我的导师崔文政老师。在与老师相处的这两年当中，我学会了很多，不仅仅是自我学习与解决问题能力的提高，还有为人处世的一些态度。在研究课题的过程中，每次我遇到了问题，老师都是给我提一些很具有建设性的建议，老师每次都是用探讨的方式在与我交流问题，帮助我解决问题，让我能够沉醉在自己的喜欢的研究领域，让我知道了未来的路要如何走才更加有利于自我的发展，正是因为这些，我的研究生生活感觉充实且愉快。感谢崔老师，感恩崔老师！

其次要感谢在我科研道路上帮助过我的杨建国老师、张继春老师、何玉荣老师、胡彦伟老师、张兆营老师、戴正元经理与臧俊工程师，每次都是耐心帮助我解答遇到的问题，感谢，感恩！

还要感谢我的师兄师弟师妹与朋友们。感谢师兄毛东旭、淳良；感谢朋友谭紫莹、魏一萍、李振杰、张雅慧、张志伟、赵佳晨、姜思聪、陈阳阳、王皓、沈天闰、姜天鸣、鞠晓东、张潇、刘小龙、胡凯、赫鲲鹏、李瑞欣与刘作霖；感谢师弟吴岳羲、高继鹏、刘一鸣与李泽群，师妹苏展。正是因为有了你们，我的研究生生活才变得更加精彩，感谢，感恩！

最后要感谢我的父母、哥哥、嫂子，他们是我科研道路上的坚强后盾，给予我鼓励，给予我关怀，有你们真好！