

# 相变蓄能传热问题研究最新进展

盛峰<sup>1</sup>, 周宇翔<sup>1</sup>, 王硕<sup>1</sup>, 金玉龙<sup>2</sup>, 李辉<sup>2\*</sup>, 安雪晖<sup>3</sup>

<sup>1</sup>中电建路桥集团有限公司, 北京

<sup>2</sup>清华大学热科学与动力工程教育部重点实验室, 北京

<sup>3</sup>清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京

Email: \*hui-li@mail.tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2020年8月5日; 录用日期: 2020年8月27日; 发布日期: 2020年9月3日

## 摘要

面对全球能源结构调整, 须兼顾能源多元化开发和能源高效化存储, 而蓄能技术对能源的可持续发展起非常重要的作用。相变蓄能技术具有蓄热密度高、蓄/释热温度稳定、易控制等优势, 具有广阔的应用前景。本文介绍了相变蓄能技术的发展背景, 工作原理及技术特点, 并对相变蓄能传热研究现状及历程进行了概述, 着重梳理了相变蓄能技术中传热问题研究方法、相变蓄能单元传热特性以及相变蓄能单元强化传热三个方面的研究进展; 最后对相变蓄能技术特点和主要进展进行总结。

## 关键词

相变蓄能, 传热, 自然对流, 强化换热

# The Latest Development of Research on Heat Transfer in Phase Change Energy Storage

Feng Sheng<sup>1</sup>, Xiangyu Zhou<sup>1</sup>, Shuo Wang<sup>1</sup>, Yulong Jin<sup>2</sup>, Hui Li<sup>2\*</sup>, Xuehui An<sup>3</sup>

<sup>1</sup>PowerChina Roadbridge Group Co., Ltd., Beijing

<sup>2</sup>Key Laboratory for Thermal Sciences and Power Engineering of the Ministry of Education, Tsinghua University, Beijing

<sup>3</sup>State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing

Email: \*hui-li@mail.tsinghua.edu.cn

Received: Aug. 5<sup>th</sup>, 2020; accepted: Aug. 27<sup>th</sup>, 2020; published: Sep. 3<sup>rd</sup>, 2020

\*通讯作者。

## Abstract

In the face of the adjustment of global energy structure, it is necessary to give consideration to the diversified development and the efficient storage of energy, and energy storage technology can play a very important role in this regard. Phase change energy storage technology has the advantages of high heat storage density, stable heat storage/release temperature and easy control, and has a broad application prospect. This paper first introduces the development background of phase change energy storage technology, as well as its working principle and technical characteristics. Then, the research status of the heat transfer in phase change energy storage process is combed from the following three aspects, the research method, the heat transfer characteristics and the enhancement of heat transfer. Finally, the main progress of phase change energy storage technology is summarized.

## Keywords

Phase Change Energy Storage, Heat Transfer, Natural Convection, Enhanced Heat Transfer

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 背景

### 1.1. 能源现状

能源是人类生存和发展的物质基础，是促进世界经济增长不可或缺的核心要素。自 20 世纪 70 年代起，随着战后世界经济的恢复、并开始高速发展，全球能耗不断上升，能源危机问题就已被列入世界五大问题之一(能源、粮食、资源、人口、环境)。同时，伴随世界政治经济格局深刻调整，能源供求关系也发生着深刻变化[1]，如何妥善地解决能源危机问题、保证本国经济的发展、更好地应对国际竞争已经成为了世界各国密切关注的共同问题[2]。

据《BP 世界能源展望(2018)》[3]统计和预测，在未来 20 年内，可再生能源将成为增长最快的能源来源，占一次能源增长的 40%，可再生能源的迅速增长使能源结构更加多元化，到 2040 年，石油、天然气、煤炭和非化石能源(包括可再生能源，核能和水能)预计将各提供世界能源的约四分之一(如图 1 所示)。

中国是世界最大的能源消费国，虽然也是能源生产大国，但国内能源消耗情况不容乐观。事实上，目前我国的能源结构仍以化石燃料——煤为主，化石燃料大量使用，一方面导致环境污染问题严重，另一方面受限于化石燃料生产工艺和技术，能源的利用效率偏低，浪费丰富的余热资源。例如，占全国总能耗三分之二的工业能耗中，有 50%以上是以中低温余热的形式排放[4]。2014 年，国务院印发的《能源发展战略行动计划(2014~2020 年)》指出，要加快构建清洁、高效、安全、可持续的现代能源体系[1]。我国的能源发展“十二五”和“十三五”规划中也指出，节能减排和提高能源利用效率始终是我国能源战略的重要目标[5] [6]。据统计分析，伴随我国的能源结构调整，预计 2040 年可再生能源将接替石油成为我国第二大能源来源(如图 2 所示)。因此，加强对余热资源的有效回收利用，提高能源利用效率，发展各种可再生能源新技术是解决我国能源危机问题的有效途径之一。

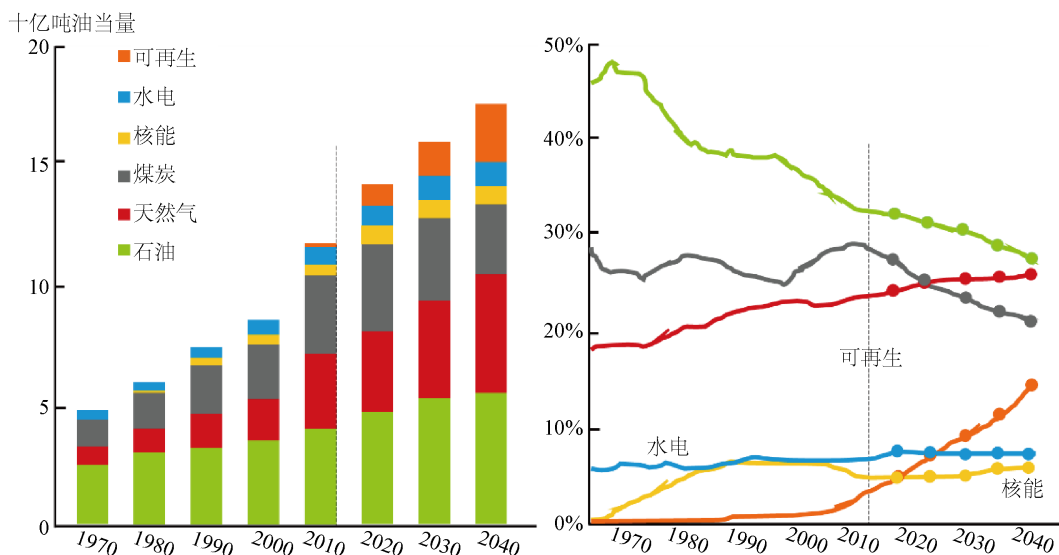


Figure 1. Changes in world primary energy consumption situation [3]

图 1. 世界一次能源消费形势变化[3]

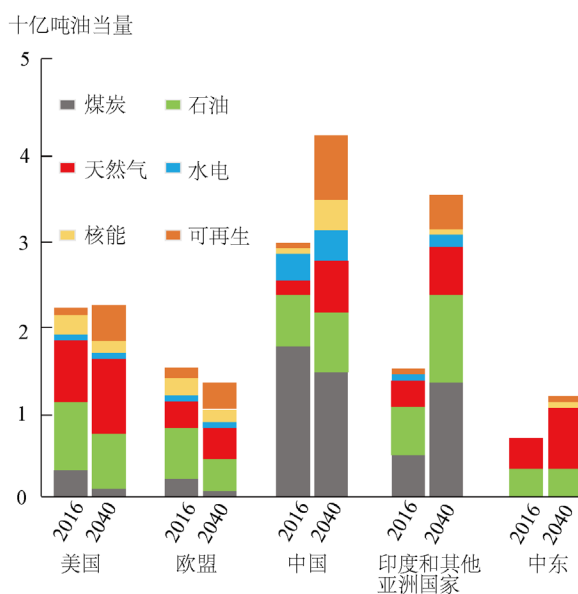


Figure 2. Comparison of primary energy in major regions of the world [3]

图 2. 世界主要地区一次能源对比[3]

## 1.2. 蓄能概念提出

加强对余热资源的有效回收利用, 提高能源利用效率, 发展各种可再生能源新技术是解决能源危机问题的有效途径。然而, 在可再生能源和余热资源的利用上存在着一个共性的问题。在供能侧, 太阳能、风能等可再生能源受天气的影响, 工业烟气废热、动力机尾气等余热资源受运行工况的影响, 多存在不稳定、连续性不足的问题; 在用能侧, 学校、医院、商场、工厂等生活、生产终端用户的冷、热、电负荷需求随时间也会存在较大波动[7]。以上客观存在问题使得能源供求在时间和空间上不匹配, 造成能源利用不充分, 余热资源浪费严重。因此, 采用一种新的余热回收技术而又能克服上述过程难点, 将对节

能减排、能源可持续利用具有重要现实意义。而蓄能技术能够满足上述技术要求，蓄能技术重点关注如何将不同形式的能量以可使用方式储存起来，并在能源供应不足时又以合理的形式释放出来满足能源需求。伴随全球能源结构调整，结合未来能源需求走势，必须兼顾能源多元化开发和能源高效化存储，而蓄能技术对社会未来的发展、能源的可持续发展能起非常重要的作用，可广泛应用于工业废热、余热回收、电力移峰填谷、太阳能热利用即工业、民用建筑节能等众多领域。

### 1.3. 相变蓄能技术

能量的蓄存方式包括电能、机械能、化学能和热能等，其中热能的蓄存是将多余的热存储于蓄能材料中，当用户终端或供能设备需要时再将所存储的热能释放出来，从而在时间和空间维度上实现能源的重构[8]。按照蓄能形式不同，热能的蓄存可分为显热蓄能、相变(潜热)蓄能和热化学蓄能三种。显热蓄能是利用材料固有的热容，将热能以显热的形式进行蓄存与释放，由于其技术简单，运行方便，目前应用最广，然而其蓄热密度低、装置体积庞大、蓄/释热过程温度变化大，使其应用受限[9]。热化学蓄能是利用可逆的化学反应来实现热能的蓄存与释放，虽然蓄热密度较高，但是蓄热过程不安全且不可控、技术复杂，难以广泛应用[10]。相比之下，相变蓄能，又称为潜热蓄能，主要是利用相变材料在物态变化时所释放或吸收的大量潜热进行，具有蓄热密度高(显热蓄能的5~10倍[11])、蓄/释热温度稳定、易控制等优势，具有广阔的应用前景[12]。相变材料可以按照相变过程物态变化的形式进行划分，包括固-固、固-液、固-气、液-气相变材料四种，其中固液相变材料的研究起步较早，也是目前研究最多和应用最广的一类材料[13]，本文所研究的相变蓄能即以固液相变材料为基础的固液相变蓄能。

目前，除了可再生能源和余热资源利用，相变蓄能因其具有的众多优势还已经广泛应用于航空航天、建筑节能、军事红外伪装、电子设备散热等领域[9][10][14]。然而在实际应用中发现相变蓄能装置的蓄/释热速率往往较低[15]，有时难以满足系统调控要求，研究发现这主要是因为常用的相变材料尤其是有机相变材料的导热系数普遍较小。因此如何强化相变蓄能装置的传热性能是目前研究的重要方向。相变蓄能装置是由一个个小的相变蓄能单元组成，相变蓄能单元的传热机理和传热性能极大地影响着整个蓄能装置的传热性能，所以对相变蓄能单元的强化传热研究更是目前研究的重点。

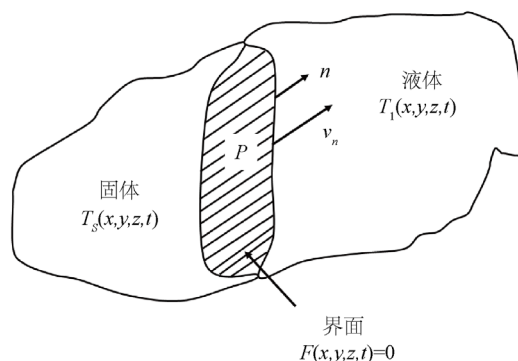
## 2. 相变蓄能传热研究现状

对相变材料的研究最早是在1949年由Telkes和Raymond提出的，但是直到20世纪70年代随着能源危机的爆发，才开始逐渐受到重视。相变蓄能最早是应用于太阳能加热系统中[16]，相变蓄能技术在之后的1990~2010年间获得了井喷式的发展[17]。下面将从与本文直接相关的相变传热问题研究方法、相变蓄能单元传热性能以及相变蓄能单元强化传热三个方面对国内外研究现状进行综述。

### 2.1. 相变传热问题研究方法

相变传热问题又被称为Stefan问题，在熔化和凝固过程中存在随时间移动的固液界面，也正因此，相变传热问题具有较强的非线性，数学求解相对困难。对于单组分纯物质如水，熔化和凝固发生在单一温度下即相变温度，固液界面明显；而对于多组分物质如混合物、合金等，相变温度并不单一，而是一个温度区间，固液相之间不存在明显界面，是由具有一定厚度的两相混合区(糊相区)所分隔[18]。

以纯物质为例，在相变过程中，其控制区域可以分为三部分，分别是固相区、液相区和固液界面(如图3所示)。在固相区，热流以导热的方式传递；在液相区，除了导热，由于温度差所带来的浮升力的作用，还会以可能存在的对流方式传递热量；在固液界面处，温度为相变温度，潜热在界面处被吸收或释放。



**Figure 3.** Phase transition area of pure substance with arbitrary shape [18]

**图 3.** 纯物质任意形状相变区域[18]

由于对流的存在，相变传热问题变得更加复杂。在对相变传热问题的研究中，主要有解析法、数值法和实验三种方法。下面将分别具体介绍。

### 1) 解析法

解析法主要是利用精确的、近似的或半分析的数学方法进行求解，求解结果存在一定误差，只有极少数特例可以获得精确解，在实际科研中使用较少。精确解析法适用于相变传热问题初始及边界条件相对简单，几何模型计算区域可视作无限大等场合，常见精确解析法有诺伊曼解(Neuman 解)及其派生解、圆柱坐标系或球对称坐标系无限大空间相变问题的精确解以及多组分材料相变问题的精确解等[19]。近似解析法适用于有限空间或边界条件相对复杂的相变传热问题，往往不考虑对流项的作用，即使考虑也是采用等效液相导热系数去替代，通常包括准稳态法、热阻法、积分法、摄动法[13]等。例如，陈则韶[20]将移动界面归结于热阻改变，建立了能比较精确计算界面移动和热流释放规律的热阻法，利用热阻联系热流、界面、时间等参数，通过与 Neuman 解作对比，证明热阻法具有一阶精度，在有奇点的柱、球等问题求解中具有明显优势。

### 2) 数值法

数值法求解相变传热问题主要采用有限差分法、有限元法和有限容积法[21]等，按照计算过程中侧重点不同，数值法又可分为温度法、焓法、显热容法等。温度法核心是将温度作为因变量，其他参数因其而变化；焓法核心是将物质的焓和温度变化同时作为追踪对象并用来说表征固液界面移动基础行为；显热容法核心是把材料相变时产生的潜热当作显热来处理，其特点是能简化计算，同时也能避免固液界面追踪。事实上，基于计算流体力学等商业软件日益成熟，如 Fluent 等，而且数值法能很好地考虑对流项的影响，准确度较高，因此采用数值法对相变传热过程进行仿真模拟越来越被广泛接受和使用[17]。例如，Tao [22]等采用 Fluent 模拟技术，针对竖直管壳式单元的熔化凝固过程进行仿真研究。在他们的研究中，对比了考虑自然对流影响和不考虑自然对流影响两种模型，发现自然对流对熔化过程影响较大，对管壳式单元结构可以提高 28.5%的蓄能速率；而自然对流对凝固过程影响不大，可以忽略。Jmal [23]等使用 Fluent 对带翅片的竖直管壳式单元的凝固过程进行了模拟研究，发现增加翅片可以强化传热，减少总的凝固时间，但是当翅片数大于 9 片之后，强化效果不再显著。董星聪[24]结合二叉树 SBFEM 和光滑化等效热容方法，提出了一种新的求解相变传热问题的自适应算法。其主要优点在于仅在等效热容变化较快区域进行网格加密，可以有效降低计算量。曹阳等[25]研究热参数扰动对一维相变传热方程解的稳定性的影响，发现各相温度场分布主要受该相热参数的影响，而对其它相的热参数不敏感。

### 3) 实验法

实验研究方法可以最为真实的反应相变传热过程，但是由于实验室设备以及条件的限制，实验的结果总会存在误差，并且很难由实验结果对相变传热过程的机理进行研究，同时实验研究成本高、周期长、能耗大，所以实验研究一般都会以数值研究做辅助，互相验证。比如杨晶晶等[26]开展了相变回填材料配比对地埋管换热器蓄能传热特性影响研究，发现随着当季起作用的相变回填材料配比含量的增加，能够显著提升钻孔换热热量，提升蓄热能力，缓解钻孔外土壤温度的冷热堆积问题，减小热影响范围。Seddegh [27]等分别用实验和数值的方法对竖直管壳式单元的熔化凝固过程进行了研究，发现考虑了自然对流作用的数值模拟结果与实验结果吻合度较高，并且自然对流现象在熔化和凝固过程中都会发生，但对熔化过程影响较大。Sun [28]等采用实验的方法研究了石蜡的熔化过程，发现自然对流的存在强化了熔化过程的传热性能，减少了 45%的熔化时间。郑建琳[29]提出了一种新型相变储能炕(ESKS)。如图 4 所示，其在相变材料的铺设上，采用不同于以往相变蓄热炕的铺设方法，以宏观封装的方式在两炕板之间铺设相变材料，同时结合水管代替传统直燃加热方式，实验结果表明，新型相变储能炕的热性能显著高于普通炕且可以更有效地提高室内空气温度和炕面温度。

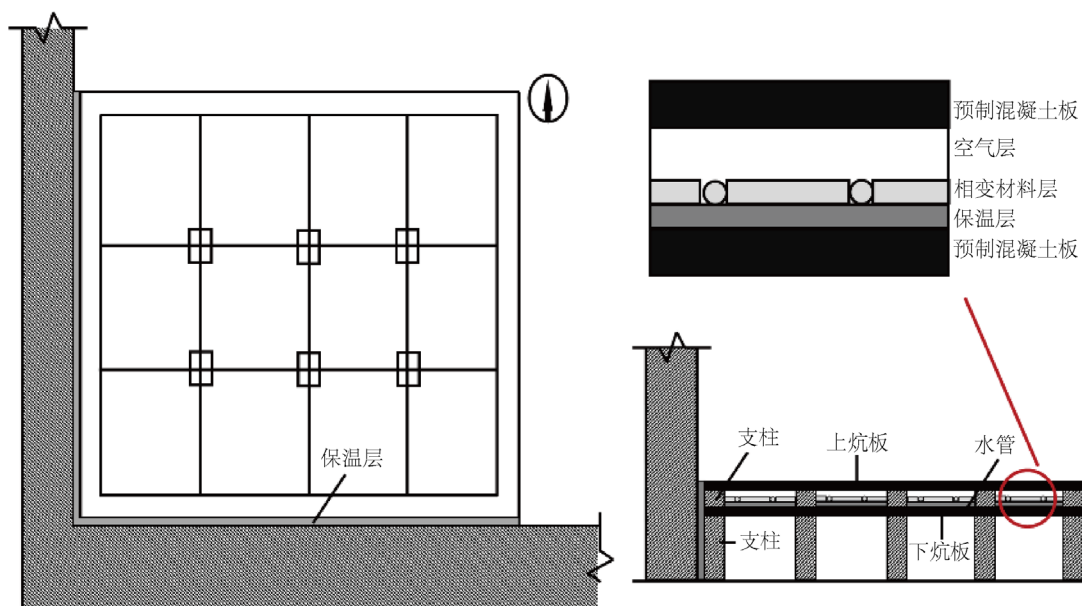


Figure 4. The structure of the new phase change energy storage Kang [29]  
图 4. 新型相变储能炕结构图[29]

## 2.2. 相变蓄能单元传热性能

在相变传热过程中同时存在着导热和自然对流作用，传热机理比较复杂，对一个相变蓄能单元而言，决定其熔化、凝固过程传热性能的因素主要是单元几何结构、相变材料以及换热流体。以下将分别从这三个决定性因素展开综述。

### 1) 几何结构

相变蓄能单元最常见的几何结构主要分两类，分别是管壳式和平板式(矩形)，其中管壳式又最为常见，占比超过 70% [17]。有研究表明，管壳式不仅结构简单、制造方便，还具有在同等相变材料质量和传热面积条件下，管壳式传热速率最快、传热损失最小的优势[26]。考虑到自然对流对相变传热过程的重要性，而自然对流的影响大小又与相变蓄能单元的布置方式有关，近年来，许多学者分别对竖直和水平布置的管壳式相变蓄能单元进行了研究。比如 Seddegh [30]等通过实验研究了不同几何尺寸对竖直管壳式相变蓄

能单元相变传热性能的影响,发现内、外径比例对相变过程影响较大,最优的内、外径比约为 5.4。Kousha [31]等通过实验对比了水平和竖直布置的相变蓄能单元传热性能差异,发现在熔化阶段,水平布置的传热速率较快,而在凝固阶段,水平和竖直布置差别不大,分析指出这是由于自然对流对熔化过程影响较大,而水平布置会增强熔化过程中自然对流作用影响。此外,通过引入翅片式结构增大金属接触面从而增强传热的技术也是一种广泛适用的传热增强技术,已有诸多针对各种翅片类的建模研究,其中以图 5 所示的两类翅片结构最为常见[32]。

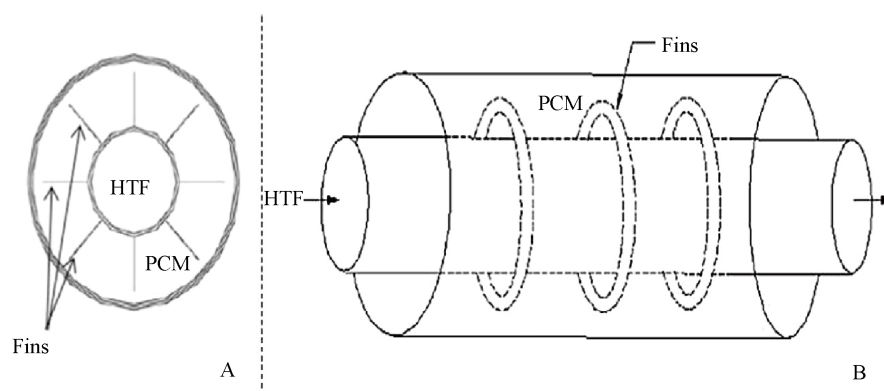


Figure 5. Common fin structure: A horizontal fin; B ring fin [32]

图 5. 常见翅片结构: A 水平翅片; B 环状翅片[32]

## 2) 相变材料

相变材料按照其成分,可以分为无机类、有机类和复合类相变材料[33]。无机相变材料包括熔融盐、金属合金和其他无机物等,无机相变材料一般导热系数较大、相变潜热较高,并且使用温度范围宽,但在相变过程中存在过冷和相分离现象,限制其规模发展。有机相变材料包括烷烃、石蜡、脂肪酸或盐类、醇类等,一般不容易出现过冷和相分离现象、性能比较稳定,但会存在导热系数小,密度低,相变过程体积变化大等缺点[13]。

实际应用层面,复合相变材料越来越受研究者青睐,其由多种相变材料复合而成,综合性能更好,弥补了单一相变材料本身不足。如Lv等[34]通过掺混一定比例的癸酸和月桂酸,研制出了相变温度适宜、相变潜热较高的新型二元相变材料,并通过实验证明其在建筑材料节能领域具有较好适用性。Sari [35]等制备了癸酸-硬脂酸低共熔混合物,并将其与石膏结合用于定形相变墙体制造,通过实验研究了其对减少室内温度波动的作用。

## 3) 换热流体

理论分析表明,换热流体的物性参数(导热系数、普朗特数、粘度等)、流动参数(进口温度,流速等)都会对相变蓄能单元传热性能产生影响,并且换热流体的导热系数越高、流速越快、与相变材料相变温度之间的温差越大,相变蓄能单元的传热性能越好,蓄/释热速率越快。为了探究以上因素对传热性能的影响关系和协同作用,诸多学者针对不同换热流体特性对相变蓄能单元传热性能的影响进行了研究。比如Agarwal等[36]用实验方法研究了换热流体(水)流动参数对传热性能的影响,发现提高水温会使得熔化过程时间减少;降低水的流量会使得凝固过程时间增长。Meng等[37]用实验和数值方法研究了换热流体和相变材料之间温差对传热性能的影响,发现增大温差会使得蓄能单元蓄/释热速率和蓄/释热效率增加。

## 2.3. 相变蓄能单元强化传热

对相变蓄能单元的强化传热研究是目前关于相变蓄能研究的重点,国内、外学者均针对性地做了诸

多建设性工作。

#### 1) 传统强化传热方法

传统相变蓄能单元强化传热方法主要集中在两方面：一是在相变材料侧，通过添加碳纤维、泡沫金属、膨胀石墨、纳米颗粒、金属滤网等高导热微纳介质用以提高相变材料导热系数或采用梯形相变材料布置用以维持换热温差，从而达到强化传热目的；二是在单元结构侧，通过相变材料微胶囊封装或增加环形、圆形等形状翅片或采用热管辅助的方式，增加换热面积，提高传热性能[38] [39] [40]。

Sari 等[41]研究了添加膨胀石墨对石蜡导热系数的影响，发现当添加比例为 10%时石蜡蓄能效果最好，同时复合材料的稳定性好、导热系数大、相变潜热下降少。Siahpush 等[42]研究发现在二十烷添加泡沫金属铜(孔隙度:95%)会使其导热系数从  $0.423 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  提升至  $3.06 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ 。梯形相变蓄能最早在 1986 年由 Farid 提出，Farid 等[43]通过数值和实验方法，发现采用三级梯形相变蓄能单元相比于单级蓄能单元，其传热速率提高了 10%~15%。Aldoss 等[44]通过数值模拟发现，增加相变材料的梯级数可以显著提高蓄/释热速率，同时能增加总的蓄能量，但是级数超过三级提升效果不再明显。

Yu 等[45]以碳酸钙作为壳材料，通过实验将正十八烷微胶囊封装并研究了其对相变材料导热系数的增强效果，发现全部微胶囊样品导热系数均获得明显提升，并且微胶囊样品显示出了良好的热稳定性和结构可靠性。Yang 等[46]数值模拟研究了加环形翅片对竖直管壳式蓄能单元传热性能的影响关系并进行了优化分析，发现在相变材料侧增加翅片可以强化传热，减少总的熔化时间，但是翅片的增加也会占据一定体积，减少相变材料质量，从而减少蓄能量，对翅片数量的选取存在最佳值，在 Yang 等研究的几何尺寸约束下，翅片数最优为 31。Robak 等[47]实验研究发现，热管辅助和翅片强化综合作用下，其相变蓄能单元在凝固过程中的传热速率约是只有翅片强化或既无热管辅助又无翅片强化单元的两倍。

#### 2) 新型强化传热方法

近年来，考虑到自然对流对相变传热过程影响的重要性，有学者针对性地从结构侧提出了一些新型的强化传热方法，核心目的在于扩大自然对流控制区域，强化自然对流作用，从而强化蓄能单元传热性能。对新型强化传热方法的研究尚处于起步阶段，基于现有研究可以发现，无论对于竖直单元还是水平单元，数值模拟和实验研究结果均表明在熔化阶段，单元上部熔化较快，液体发生堆积。分析指出，这是由于自然对流强化了单元上部的传热性能。为了使得自然对流控制区域的相变材料增多，学者们针对竖直单元提出了采用锥形管、对于水平单元采用偏心布置的新型结构。

对于竖直单元，Hu 等[40]通过数值模拟比较了圆柱形和管侧锥型蓄能单元在熔化过程的传热性能，发现锥型管的蓄能速率大于圆柱形管，并得出了当内管上下管径比  $n=5$  时，锥形管的提升效果最好，减少了 33.1%的熔化时间。Seddegh 等[48]通过数值模拟比较了圆柱形和壳侧锥型蓄能单元在熔化和凝固过程传热性能，发现在熔化阶段，锥形管的蓄能速率比圆柱形快 12%左右，而在凝固阶段，两者差别不大。

对于水平单元，Pahamli 等[49]通过数值模拟研究了偏心布置对蓄能单元熔化过程的影响，发现偏心布置可以强化自然对流作用，减少总的熔化时间，当偏心率等于 0.75 时，可以减少约 67%的熔化时间。Yazici 等[50]通过实验研究发现偏心布置对蓄能单元凝固过程并无益处，反而会使得凝固时间变长。Zheng 等[51] [52]通过数值模拟发现对于熔化过程，存在最佳的偏心率，最佳偏心率与瑞利数相关，随瑞利数增加呈线性增加趋势。

### 3. 结论和展望

综上所述，相变蓄热技术能实现余热、废热等能量储存和再释放，能解决能源供需时间不协调及能源地域分布不平衡的矛盾，有效提高了能源利用效率，因而相变蓄能技术具有广阔的应用前景。在相变传热问题的研究中，数值法和实验法是应用最广泛的研究方法，自然对流对相变传热过程尤其是熔化过



程影响较大,不可忽略。管壳式是最为常见的相变蓄能单元结构[53],其具有结构简单、制造方便以及传热损失少等优势。由于自然对流强化作用,相比于竖直单元,水平单元能表现出更好的传热性能。在相变蓄能单元的强化传热方面,目前主要采用添加高导热微纳材料、梯形相变材料、微胶囊封装、翅片强化、热管辅助等传统增强方式。

相变蓄能技术需在实际应用中考虑封装及结构复杂度,尽管封装后的相变蓄能系统具有较低的 PCM 体积比,但是良好的封装系统能够包容相变的几何多功能性,从而可以集成到任何现有系统中而没有重大技术限制,同时还能维持更大的等温阶段时长。但是,PCM 之间的传热增强是未来封装系统中需着重关注的重点,因为如果想实现一个合理的系统热输出,PCM 的导热系数可能是一个主要问题。

## 参考文献

- [1] 中华人民共和国国务院. 能源发展战略行动计划(2014-2020年)[R]. 2014.
- [2] Lund, H. and Mathiesen, B.V. (2009) Energy System Analysis of 100% Renewable Energy Systems—The Case of Denmark in Years 2030 and 2050. *Energy*, **34**, 524-531. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2008.04.003>
- [3] British Petroleum. BP 世界能源展望(2018年版)[M]. 伦敦: BP, 2018.
- [4] 高林, 金红光, 郑丹星, 等. 混合工质中低温热力循环特性研究[J]. 工程热物理学报, 2001(6): 677-679.
- [5] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 能源发展“十三五”规划[R]. 2016.
- [6] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 能源发展“十二五”规划[R]. 2013.
- [7] 张国宝. 储能影响未来能源大格局[J]. 中国电力企业管理, 2015(5): 14-15.
- [8] Anisur, M.R., Mahfuz, M.H., Kibria, M.A., et al. (2013) Curbing Global Warming with Phase Change Materials for Energy Storage. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, **18**, 23-30. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.10.014>
- [9] 胡春妍. 环形单元内脂肪酸融化过程的传热特性及结构优化设计[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2014.
- [10] 龙伟月. 脂肪酸相变单元熔化过程传热特性研究及结构优化[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2017.
- [11] Da Cunha, J.P. and Eames, P. (2016) Thermal Energy Storage for Low and Medium Temperature Applications Using Phase Change Materials—A Review. *Applied Energy*, **177**, 227-238. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.05.097>
- [12] Alva, G., Lin, Y. and Fang, G. (2018) An Overview of Thermal Energy Storage Systems. *Energy*, **144**, 341-378. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.12.037>
- [13] 王立勋. 相变蓄热/冷换热器的传热特性研究[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 郑州轻工业学院, 2015.
- [14] 房丛丛. 相变蓄热装置的数值模拟与优化[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东建筑大学, 2012.
- [15] 韩广顺, 丁红胜, 王培伦, 等. 偏心管翅式相变储热单元性能强化的模拟[J]. 节能技术, 2015(6): 483-488.
- [16] Telkes, M. (1980) Thermal Energy Storage in Salt Hydrates. *Solar Energy Materials*, **2**, 381-393. [https://doi.org/10.1016/0165-1633\(80\)90033-7](https://doi.org/10.1016/0165-1633(80)90033-7)
- [17] Agyenim, F., Hewitt, N., Eames, P., et al. (2010) A Review of Materials, Heat Transfer and Phase Change Problem Formulation for Latent Heat Thermal Energy Storage Systems (LHTESS). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **14**, 615-628. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.10.015>
- [18] 张仁元. 相变材料与相变储能技术[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [19] 顾元宪, 周业涛, 赵国忠. 相变传热问题的灵敏度分析与优化设计方法[J]. 力学学报, 2006(1): 66-72.
- [20] 陈则韶. 求解凝固相变热传导问题的简便方法——热阻法[J]. 中国科学技术大学学报, 1991(3): 69-76.
- [21] 吕玉卓, 路原睿, 顾兆林. 考虑对流换热的水平套管式蓄热体数值模拟[J]. 石油化工设备, 2014, 43(3): 38-42.
- [22] Tao, Y.B., Liu, Y.K. and He, Y. (2017) Effects of PCM Arrangement and Natural Convection on Charging and Discharging Performance of Shell-and-Tube LHS Unit. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **115**, 99-107. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.07.098>
- [23] Jmal, I. and Baccar, M. (2015) Numerical Study of PCM Solidification in a Finned Tube Thermal Storage Including Natural Convection. *Applied Thermal Engineering*, **84**, 320-330. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.03.065>
- [24] 董兴聪. 相变传热问题数值分析的自适应四叉树-比例边界元方法[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学

2019.

- [25] 曹阳, 丛日立, 赵明宇, 晨光, 张伟东, 王永涛. 热参数扰动下一维相变传热定解问题的稳定性研究[J]. 内蒙古大学学报, 2018, 49(6): 589-596.
- [26] 杨晶晶, 杨卫波. 相变回填材料配比对埋管换热器蓄能传热特性影响研究[J]. 建筑节能, 2020(1): 50-56.
- [27] Seddegh, S., Joybari, M.M., Wang, X., *et al.* (2017) Experimental and Numerical Characterization of Natural Convection in a Vertical Shell-and-Tube Latent Thermal Energy Storage System. *Sustainable Cities and Society*, **35**, 13-24. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.07.024>
- [28] Sun, X., Zhang, Q., Medina, M.A., *et al.* (2016) Experimental Observations on the Heat Transfer Enhancement Caused by Natural Convection during Melting of Solid-Liquid Phase Change Materials (PCMs). *Applied Energy*, **162**, 1453-1461. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.03.078>
- [29] 郑建琳. 冀东地区新型相变储能炕研究[D]: [硕士学位论文]. 邯郸: 河北工程大学, 2019.
- [30] Vyshak, N.R. and Jilani, G. (2007) Numerical Analysis of Latent Heat Thermal Energy Storage System. *Energy Conversion and Management*, **48**, 2161-2168. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2006.12.013>
- [31] Seddegh, S., Wang, X., Joybari, M.M., *et al.* (2017) Investigation of the Effect of Geometric and Operating Parameters on Thermal Behavior of Vertical Shell-and-Tube Latent Heat Energy Storage Systems. *Energy*, **137**, 69-82. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.07.014>
- [32] Jegadheeswaran, S. and Pohekar, S.D. (2009) Performance Enhancement in Latent Heat Thermal Storage System: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **13**, 2225-2244. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.06.024>
- [33] Kniep, R., Mann, S. and Zachos, A. (1986) Low-Temperature Latent Heat Storage in Pseudobinary Systems  $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NaNO}_3/\text{KNO}_3$ . *Solar Energy*, **36**, 291-292. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(86\)90144-1](https://doi.org/10.1016/0038-092X(86)90144-1)
- [34] Lv, S.L., *et al.* (2006) Eutectic Mixtures of Capric Acid and Lauric Acid Applied in Building Wallboards for Heat Energy Storage. *Energy and Buildings*, **38**, 708-711. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2005.10.006>
- [35] Sari, A., Karaipekli, A. and Kaygusuz, K. (2008) Capric Acid and Stearic Acid Mixture Impregnated with Gypsum Wallboard for Low-Temperature Latent Heat Thermal Energy Storage. *International Journal of Energy Research*, **32**, 154-160. <https://doi.org/10.1002/er.1352>
- [36] Agarwal, A. and Sarviya, R.M. (2016) An Experimental Investigation of Shell and Tube Latent Heat Storage for Solar Dryer Using Paraffin Wax as Heat Storage Material. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, **19**, 619-631. <https://doi.org/10.1016/j.jestech.2015.09.014>
- [37] Meng, Z.N. and Zhang, P. (2017) Experimental and Numerical Investigation of a Tube-in-Tank Latent Thermal Energy Storage Unit Using Composite PCM. *Applied Energy*, **190**, 524-539. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.163>
- [38] Ibrahim, N.I., Al-Sulaiman, F.A., Rahman, S., *et al.* (2017) Heat Transfer Enhancement of Phase Change Materials for Thermal Energy Storage Applications: A Critical Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **74**, 26-50. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.169>
- [39] Khan, Z., Khan, Z. and Ghafoor, A. (2016) A Review of Performance Enhancement of PCM Based Latent Heat Storage System within the Context of Materials, Thermal Stability and Compatibility. *Energy Conversion and Management*, **115**, 132-158. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.02.045>
- [40] Hu, Z., Li, A., Gao, R., *et al.* (2015) Enhanced Heat Transfer for PCM Melting in the Frustum-Shaped Unit with Multiple PCMs. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, **120**, 1407-1416. <https://doi.org/10.1007/s10973-014-4370-6>
- [41] Sari, A. and Karaipekli, A. (2007) Thermal Conductivity and Latent Heat Thermal Energy Storage Characteristics of Paraffin/Expanded Graphite Composite as Phase Change Material. *Applied Thermal Engineering*, **27**, 1271-1277. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2006.11.004>
- [42] Siahpush, A., O'Brien, J. and Crepeau, J. (2008) Phase Change Heat Transfer Enhancement Using Copper Porous Foam. *Journal of Heat Transfer-Transactions of the ASME*, **130**, Article ID: 082301. <https://doi.org/10.1115/1.2928010>
- [43] Farid, M.M., Kim, Y. and Kansawa, A. (1990) Thermal Performance of a Heat Storage Module Using PCMs with Different Melting Temperature-Experimental. *Journal of Solar Energy Engineering—Transactions of the ASME*, **112**, 125-131. <https://doi.org/10.1115/1.2929644>
- [44] Aldoss, T.K. and Rahman, M.M. (2014) Comparison between the Single-PCM and Multi-PCM Thermal Energy Storage Design. *Energy Conversion and Management*, **83**, 79-87. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.03.047>
- [45] Yu, S., Wang, X. and Wu, D. (2014) Microencapsulation of n-Octadecane Phase Change Material with Calcium Carbonate Shell for Enhancement of Thermal Conductivity and Serving Durability: Synthesis, Microstructure, and Performance Evaluation. *Applied Energy*, **114**, 632-643. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.10.029>

- 
- [46] Yang, X., Lu, Z., Bai, Q., *et al.* (2017) Thermal Performance of a Shell-and-Tube Latent Heat Thermal Energy Storage Unit: Role of Annular Fins. *Applied Energy*, **202**, 558-570. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.05.007>
- [47] Robak, C.W., Bergman, T.L. and Faghri, A. (2011) Enhancement of Latent Heat Energy Storage Using Embedded Heat Pipes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **54**, 3476-3484. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.03.038>
- [48] Seddegh, S., Wang, X. and Henderson, A.D. (2015) Numerical Investigation of Heat Transfer Mechanism in a Vertical Shell and Tube Latent Heat Energy Storage System. *Applied Thermal Engineering*, **87**, 698-706. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.05.067>
- [49] Pahamli, Y., Hosseini, M.J., Ranjbar, A.A., *et al.* (2016) Analysis of the Effect of Eccentricity and Operational Parameters in PCM-Filled Single-Pass Shell and Tube Heat Exchangers. *Renewable Energy*, **97**, 344-357. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.05.090>
- [50] Yazici, M.Y., Avci, M., Aydin, O., *et al.* (2014) On the Effect of Eccentricity of a Horizontal Tube-in-Shell Storage Unit on Solidification of a PCM. *Applied Thermal Engineering*, **64**, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.12.005>
- [51] Zheng, Z., Xu, Y. and Li, M. (2018) Eccentricity Optimization of a Horizontal Shell-and-Tube Latent-Heat Thermal Energy Storage Unit Based on Melting and Melting-Solidifying Performance. *Applied Energy*, **220**, 447-454. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.03.126>
- [52] Xu, H., Romagnoli, A., Sze, J.Y., *et al.* (2017) Application of Material Assessment Methodology in Latent Heat Thermal Energy Storage for Waste Heat Recovery. *Applied Energy*, **187**, 281-290. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.11.070>
- [53] 陈静. CCHP 系统中管壳式潜热蓄能装置蓄/释能特性研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 清华大学, 2018.