

原创研究型文章

# 基于旋转的管壳式潜热存储系统传热强化：从机理到应用

李智<sup>1</sup>, 方成栋<sup>1</sup>, 伍茜<sup>2,\*</sup>, 姜睿铖<sup>1,\*</sup>, 俞小莉<sup>1,\*</sup><sup>1</sup>能源工程学院, 浙江大学, 杭州市 310027, 浙江省, 中国<sup>2</sup>材料成型集成技术与智造装备浙江省工程研究中心, 浙大城市学院, 杭州市 310015, 浙江省, 中国\* 通讯作者: 伍茜, [wuqian@hzcu.edu.cn](mailto:wuqian@hzcu.edu.cn); 姜睿铖, [jiangrc@zju.edu.cn](mailto:jiangrc@zju.edu.cn); 俞小莉, [yuxl@zju.edu.cn](mailto:yuxl@zju.edu.cn)

## 引用格式

李智, 方成栋, 伍茜, 等. 基于旋转的管壳式潜热存储系统传热强化：从机理到应用. 清洁能源科学与技术. 2024; 2(4): 279.

<https://doi.org/10.18686/cncest279>  
Li Z, Fang C, Wu Q, et al. Rotation-based heat transfer enhancement for shell-and-tube latent thermal energy storage systems: From mechanisms to applications (Chinese). Journal of Clean Energy Science and Technology. 2024; 2(4): 279.  
<https://doi.org/10.18686/cncest279>

## 文章信息

收稿日期: 2024-10-06  
录用日期: 2024-11-20  
发表日期: 2024-11-26

## 版权信息



版权 © 2024 作者。

《清洁能源科学与技术》由 Universe Scientific Publishing 出版。本作品采用知识共享署名 (CC BY) 许可协议进行许可。  
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>  
English edition of this article is available online at <https://cae.usp-pl.com/index.php/cest/article/view/237>

**摘要:** 潜热储能 (LTES) 是缓解能源来源与能源供应之间差异的重要储能技术, 在太阳能利用、地热能利用和电力存储等许多领域都有着巨大的应用前景。然而, LTES 系统受到大多数相变材料 (PCM) 导热系数低的困扰, 威胁着其大规模商业应用。为了应对这一挑战, LTES 系统的传热强化至关重要, 并已在世界范围内进行了广泛的研究。对流传热强化技术, 包括翅片、纳米颗粒和多种 PCM, 可以显著提高 LTES 系统的充放电速率。最近, 基于旋转的方法应运而生, 为 LTES 系统的传热强化提供了新的途径, 世界各地的研究人员已经取得了许多成果。本研究对三种基于旋转的传热强化方法的机理和应用进行了简要综述, 旨在深入了解这些新型传热强化方法并推动其未来的发展和应用。

**关键词:** 潜热储存; 相变材料; 强化传热; 旋转

## 1. 引言

由于日益紧迫的能源危机和过度使用化石燃料造成的环境污染, 碳中和已成为全球追求的目标 [1,2]。为缓解温室效应、将 2050 年全球气温上升控制在 1.5 K 以内, 推动了太阳能、风能、地热能等可再生能源的大规模利用 [3,4]。然而, 可再生能源通常具有波动性和间歇性的特点, 导致能源系统运行不稳定, 能源来源和能源需求在时间和空间上存在差异 [5]。因此, 在现有能源系统中引入储能是应对这一挑战的一个有希望的解决方案 [6]。

潜热储能 (LTES) 是平衡能源供应和终端用户能源需求之间错配的重要储能技术之一, 具有相对较高的储能密度、技术成熟度和低成本 [7], 广泛应用于太阳能利用 [8,9]、波动性废热回收 [10,11]、卡诺电池 [12,13] 等领域。然而, 现阶段 LTES 系统仍然存在大多数相变材料 (PCM) 热导率低的问题 [14,15]。PCM 的热导率决定了充放电过程中的传热速率, 进一步影响 LTES 系统在实际应用中的储能效率。人们对 LTES 系统的传热强化进行了大量的研究, 图 1 中收集了具有代表性的对流传热强化方法和新兴传热强化方法。传统对流传热强化方法包括使用各类翅片 [16,17]、高导电添加剂 (如纳米颗粒和金属泡沫) [18,19]、热管 [20,21] 和级联布局的 PCM [22,23]。虽然这些方法表现出良好的传热强化效果, 但也存在纳米颗粒的分散性和沉积性等问题 [24–26]。最近, 依赖于外场 (如磁场 [27,28] 和电场 [29,30]) 的传热强化方法应运而生, 并在 LTES 系统中得到了研究, 尤其是基于旋转的方法 [31]。对于传统的对流强化传热方法, 一旦设计好翅片数量、纳米颗粒浓度或多个 PCM 的段

数就无法调整以适应充放电过程 [32,33]。相反，基于旋转的方法更加灵活和主动，可以在任何阶段通过调节旋转条件（如旋转速度和方向）来调控充放电过程 [34]。由于 LTES 系统的充电过程在放电过程中更加不均匀，旋转方法的独特优势使 LTES 系统能够适应各种热源条件并实现更高的整体充放电率，特别是在热源波动的情况下 [35–37]。因此，基于旋转的方法在家庭和商业应用的小型 LTES 系统的可调传热强化中表现出巨大的前景。

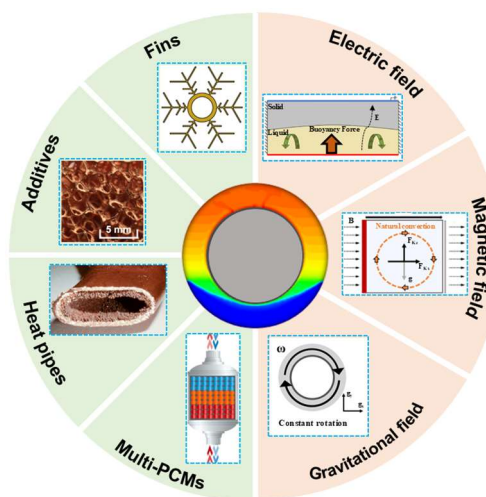


图 1. LTES 系统中主动和被动传热增强方法。

Figure 1. Active and passive heat transfer enhancement methods in LTES system.

对于基于旋转的强化传热方法，存在多种实现方式，例如 LTES 系统整体连续旋转、传热流体（HTF）管连续旋转和 LTES 系统整体翻转等，它们都是通过引发或增强 LTES 系统内部液态 PCM 的自然对流来实现强化传热的效果。对于 LTES 系统整体连续旋转模式，强化传热效果受各种参数影响，包括旋转速度、旋转方向、旋转时间、旋转时机等。其他旋转模式也存在类似问题。针对 LTES 系统中不同运行参数下基于旋转的强化传热方法的机理、效果、应用和局限性，近年来进行了大量的数值和实验研究，并取得了丰硕成果。鉴于这些进展，分析和总结不同旋转模式和运行参数下基于旋转的强化传热方法的潜在机理，为未来 LTES 系统中基于旋转的方法的设计和应用提供指导具有重要意义。通过上述分析，本综述旨在回答与管壳式 LTES 系统基于旋转的传热强化方法有关的以下问题：（1）为什么基于旋转的方法对 LTES 系统的传热强化很重要，（2）基于旋转的传热强化方法如何有效工作，以及（3）可以利用哪些路线来优化操作参数，以实现经济高效且方便的基于旋转的传热强化方法。

## 2. 旋转强化传热的原理

### 2.1. LTES 系统中强化传热的挑战

在管壳式 LTES 系统充料过程中，壳程内相变材料在不同区域经历着不一致的熔化过程，尤其是在底部和顶部区域。如图 2a 所示，由于先前熔化的液态相变材料的自然对流，顶部区域的固态相变材料熔化速度比底部区域快得

多，而大多数相变材料的低热导率进一步扩大了熔化过程的差异。因此，整个壳程的温度和速度分布并不均匀。在整个充料过程中，由于相变材料内部主要传热机制的变化，充料速率和液相体积分数也不是线性的，如图 2b 所示。具体而言，在初期，熔化过程以传热速率较大的自然对流为主，液相体积分数呈现明显的上升趋势。后期熔化过程以传导为主，传热速率较小，受到大部分 PCMs 较低的热导率制约，液相体积分数略有提升。整体而言，液态 PCMs 的自然对流导致 LTES 系统充电过程的不均匀，而大部分 PCMs 的低热导率进一步加剧了温度分布的不均匀，导致充电过程中 LTES 系统充电速率低、储能效率低、熔化时间长。至于放电过程，液态 PCMs 中的自然对流较弱，放电速率受自然对流影响较小，但如果放电过程中液相体积分数处的自然对流加强，则可以提高放电速率。因此，在充电和放电过程中调控液态 PCMs 的自然对流决定了 LTES 系统的充电和放电性能，而这正是基于旋转的传热强化方法的优势所在。

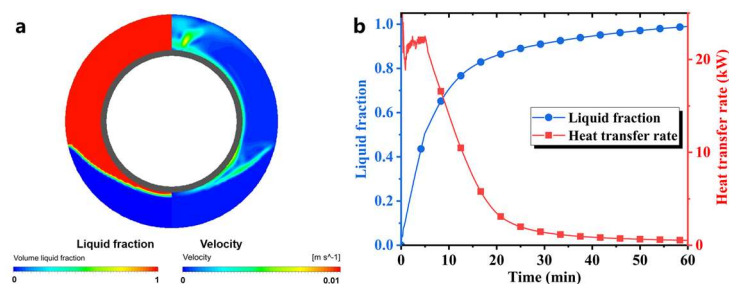


图 2. 管壳式 LTES 系统在充电过程中的不均匀熔化过程：（a）温度和速度分布；（b）热通量和液体体积分数。

**Figure 2.** Nonuniform melting process of shell-and-tube LTES system during charging: (a) distribution of temperature and velocity and (b) heat flux and liquid volume fraction.

## 2.2. 旋转方法的分类和工作原理

为了消除 LTES 系统不均匀的充电过程，充分利用自然对流，采用基于旋转的方法对提高传热速率具有重要意义。旋转可以激发液态 PCM 内部的对流，原本位于 LTES 下部的 PCM 可以通过旋转到上部来改善传热过程。根据最近的研究，基于旋转的方法通常分为三种模式：（1）整个 LTES 系统的连续旋转；（2）传热管的连续旋转；（3）整个 LTES 系统的翻转。对于第一种模式，整个 LTES 系统绕水平轴或垂直轴连续旋转。连续旋转可以将原本位于 LTES 系统下部的难熔区域旋转到上部，以增强液态 PCM 中的自然对流。对于第二种模式，当充电过程中形成足够的液态 PCM 并诱导自然对流的发生和强度时，传热管的连续旋转开始起作用。在卸料过程中，带有刮刀的传热管连续旋转，可以将传热管表面凝固的 PCM 刮掉，从而提高传热速率。对于第三种模式，整个 LTES 可以逐步旋转一定的角度，改变 LTES 系统内部快熔区域和难熔区域的相对位置，利用难熔区域的自然对流。当逐步旋转角度为  $180^\circ$  时，这种逐步旋转称为翻转。与连续旋转模式相比，翻转有可能以更低的寄生功率达到相当甚至更好的强化传热效果。



### 3. LTES 系统中基于旋转强化传热方法进展

如上文所述，旋转方式有多种，包括整个 LTES 系统的连续旋转、传热流体管的连续旋转和整个 LTES 系统的翻转。每种方式都有各自的优点，本节将分别讨论。

#### 3.1. LTES的整体连续旋转

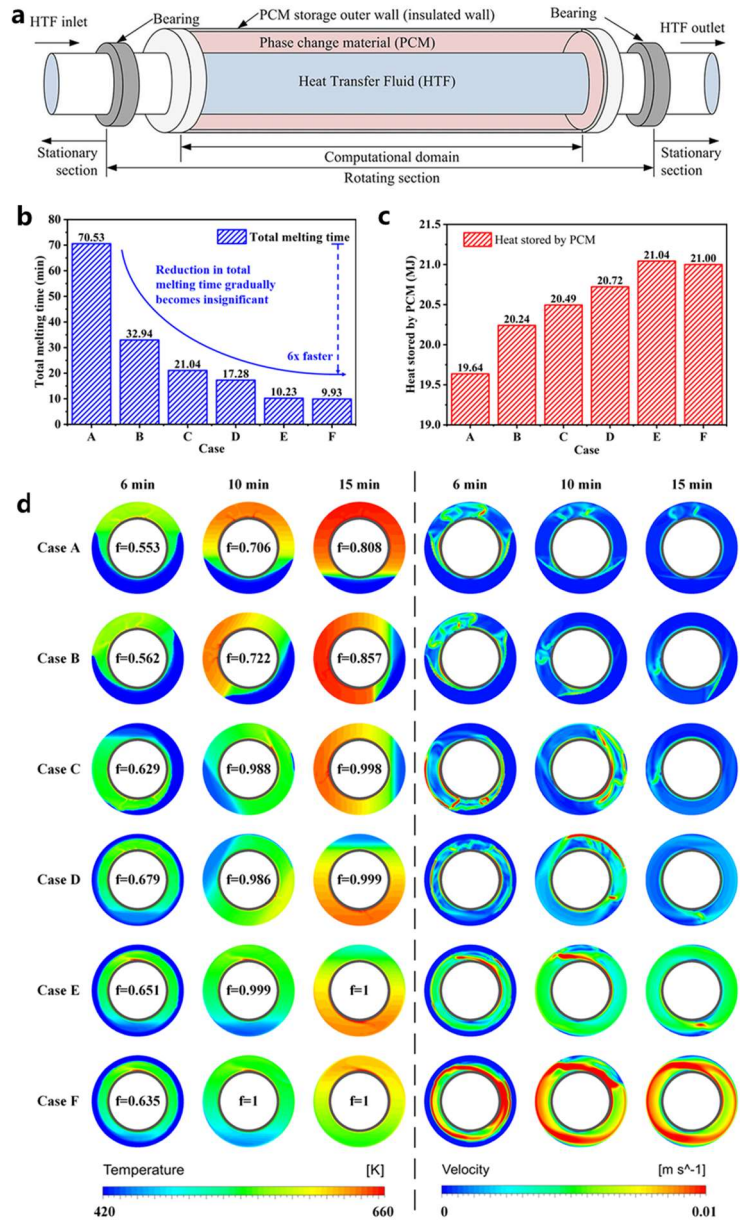


图 3. 整个 LTES 系统的连续旋转：（a）旋转管壳式 LTES 系统示意图 [39]；（b）不同转速下的总熔化时间 [40]；（c）不同转速下 PCM 储存的热量 [40]；（d）不同转速下管壳式 LTES 系统的温度和速度 [40]。

Figure 3. Continuous rotation of entire LTES system: (a) schematic diagram of rotating shell-and-tube LTES system [39]; (b) total melting time at various rotation speeds [40]; (c) heat stored by PCM at various rotation speeds [40]; (d) temperature and velocity of shell-and-tube LTES system under various rotation speeds [40].

旋转最早用于管壳式 LTES 系统的传热强化 [38]。连续旋转带来的传热强化效果受一些关键参数的影响, 包括旋转速度和旋转方向。Kurnia 和 Sasmito [39]设计了一个具有旋转功能的管壳式 LTES 系统, 如图 3a 所示, 并对不同旋转速度下的充放电性能进行了数值研究。结果表明, 旋转提高了 LTES 系统在充放电过程中的传热速率, 并且由于液态 PCM 中更强的自然对流, 增强比率在更高旋转速度下增大。定量上, 与静态条件下的 LTES 系统相比, 旋转状态下的 LTES 系统在充放电过程中的传热速率分别提高了 25.2%和 41%。此外, 结果表明, 当足够多的 PCM 熔化以形成更强的自然对流时, 传热强化效果更显著。Yu 等 [40] 证明了连续旋转对提高管壳式 LTES 系统的传热速率和储热能力的积极作用。结果表明, 旋转 LTES 系统的传热速率提高了 6 倍, 储热能力也更大, 如图 3b 和图 3c 所示, 原因是自然对流更强, 温度场更均匀, 如图 3d 所示。基于上述结果, 虽然旋转速度对 LTES 系统的传热强化有显著影响, 但旋转速度达到临界值后, 传热强化效果略有增强。此外, 旋转速度越高, 整个旋转系统的寄生功耗也就越大。

作为一种主动传热强化方法, 旋转也已与管壳式 LTES 系统中的其他被动传热强化方法相结合, 尤其是通过各种翅片。Soltani 等 [41] 研究了不同旋转条件下翅片管 LTES 系统的传热强化效果。研究发现, 翅片的加入减少了自然对流, 而旋转的采用消除了 PCM 的沉降现象, 增强了自然对流。研究结果还表明, 增加翅片数量会减弱旋转的强化传热效果。因此, 翅片和旋转的结合应用应考虑翅片数量、旋转速度等参数的设计和优化。有作者系统地分析了旋转对增强带翅片三管 LTES 系统充放电性能的作用 [42–46], 图 4 为带翅片的旋转三管 LTES 系统示意图。对于旋转条件下三管 LTES 系统的放电过程, 结果表明, 旋转使传热方式由单一的导热变为导热和自然对流相结合 [45,46], 导致凝固速度更快, 温度分布更均匀, 如图 5 所示, 并且凝固速度随旋转速度的提高而增大。定量分析表明, 与静态 LTES 系统相比, 在旋转速度为 0.05 rpm 和 1 rpm 时, 旋转 LTES 系统的凝固时间分别缩短了 46%和 83.9%, 出料速率提高了 3.3 倍和 5 倍。对于旋转条件下三管 LTES 系统的加料过程, 旋转消除了自然对流引起的 LTES 系统上部热沉积, 提高了自然对流强度和加料速率 [42]。结果表明, 在 0.1 rpm 和 1 rpm 转速下, LTES 系统的熔化时间比静态 LTES 系统缩短了 46.98%和 69.35% [43]。上述研究表明, 旋转整个 LTES 系统是一种有效的方法, 可以显著提高带翅片或不带翅片的管壳式 LTES 系统的充放电速率, 这是由于旋转会影响液体 PCM 的自然对流。对于带翅片的 LTES 系统, 翅片通常会减少自然对流, 但旋转强化传热的机制会改善自然对流。研究从宏观角度优化了翅片参数和旋转速度 [44,47,48], 翅片和旋转对充放电机制的耦合作用, 特别是对自然对流的发生和消除的影响尚未明确揭示, 这值得在未来做出更多努力。

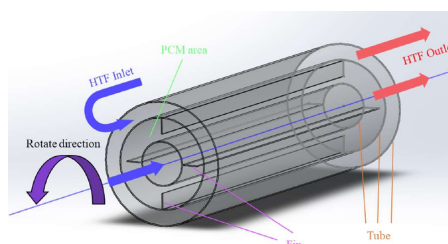


图 4. 带翅片的旋转三管 LTES 系统示意图 [46]。

Figure 4. Schematic diagram of rotating triple-tube LTES system with fins [46].

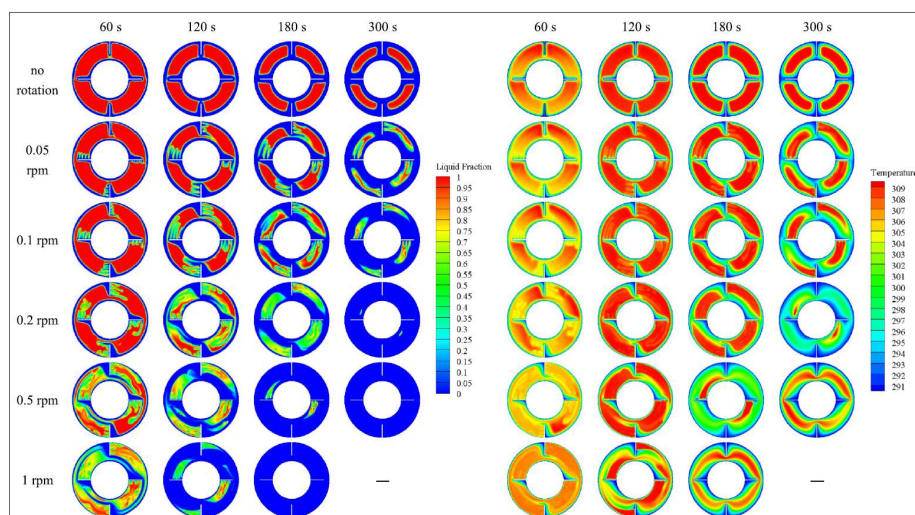


图 5. 不同旋转速度下液体分数和温度的变化 [46]。

Figure 5. Evolution of liquid fraction and temperature under different rotation speeds [46].

旋转也与其他被动传热强化方法相结合，例如在管壳式 LTES 系统中使用纳米颗粒 [49]、金属泡沫 [50–53] 和偏心传热流体管 [54,55]。Huang 等 [49] 研究了纳米颗粒质量比和旋转速度对带纵向翅片的三管 LTES 系统充电过程的影响。结果表明，与没有纳米颗粒和旋转的基本情况相比，在 0.1 rpm 的旋转速度下，加入 2.5% 和 5%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  纳米颗粒的 LTES 系统分别实现了熔化时间缩短 58.5% 和 57.6%、充电速率提高 126.5% 和 123.4%，这意味着纳米颗粒的浓度越大，放电性能越差。更重要的是，从田口分析来看，该研究还表明旋转速度比纳米颗粒浓度具有更大的影响。对于泡沫金属的应用，Huang 等 [50] 重点研究了泡沫金属的孔隙密度和孔隙率对三管 LTES 系统在恒定旋转条件下充电过程的影响，发现含有泡沫金属的 LTES 系统充电速率更大，温度分布更均匀，如图 6 所示。一些研究 [51–53] 强调了泡沫金属的孔隙率范围、泡沫金属的分级层数和旋转速度对 LTES 系统充电和放电性能的重要性，并证明了这些关键参数存在最佳值以实现最佳充电和放电性能。虽然上述研究也关注了泡沫金属的孔隙率和旋转速度等各种参数对 LTES 系统充电和放电性能的影响，但泡沫金属与旋转之间强化传热过程的耦合机制尚未得到深入研究。因此，此类研究对于设计包括转速和旋转方向在内的旋转条件具有重要意义。

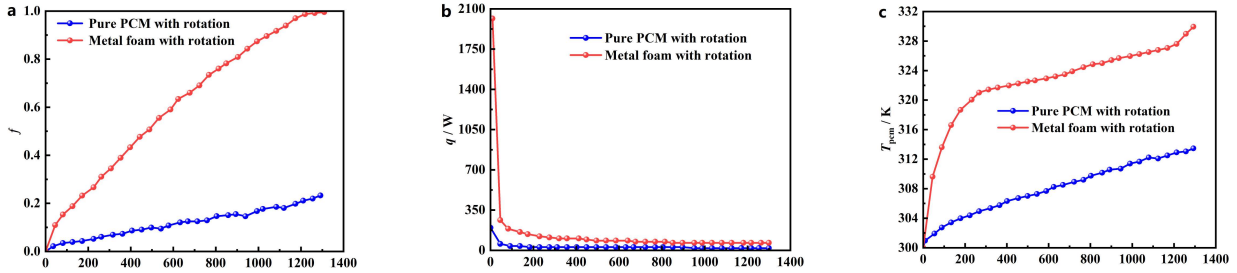


图 6. 旋转 LTES 系统与纯 PCM 和金属泡沫的熔化特性比较: (a) 液相速率变化; (b) 瞬时储热速率; (c) PCM 的平均温度 [50]。

Figure 6. Comparison of melting properties from rotating LTES systems with pure PCM and with metal foam: (a) liquid phase rate change; (b) instantaneous heat storage rate and (c) average temperature of PCM [50].

表 1 列出了关于整个 LTES 系统连续旋转强化传热的研究，总结了评价参数、充放电过程、研究方法和传热类型。可以发现，大多数研究进行了数值模拟，很少有研究通过实验证明连续旋转的效果。当采用旋转强化传热时，最重要的技术挑战之一是实现整个 LTES 系统的旋转。因此，设计合适的旋转原型具有重要意义和关键性。杨等 [56]设计了一个具有旋转功能的管壳式 LTES 系统试验台，如图 7a 所示。由电机驱动的旋转接头用于连接静态部件和旋转部件。采用滑环防止传感器线缠绕其他实验装置。通过调节电机的电压和电流来调节旋转速度。Fathi 和 Mussa [57]设计了一个类似的试验台，如图 7b 所示。两种装置均实现了旋转的功能，与静态 LTES 系统相比，旋转带来的传热强化效果明显。

表 1. 通过整个 LTES 系统的连续旋转来增强传热。

Table 1. Heat transfer enhancement by continuous rotation of entire LTES system.

Parameter	Process	Method	Heat transfer enhancement method	Ref.
LTES orientation, rotation speed	Charging, discharging	Simulation	Tube, rotation	[39]
Rotation speed, rotation modes	Charging	Experiment	Tube, rotation	[40]
Rotation speed, fin number,	Charging, discharging	Simulation	Finned tube, rotation	[41]
Rotation speed, rotation modes	Charging	Simulation	Finned tube, rotation	[47]
Rotation speed, rotation modes	Charging	Simulation	Finned tube, rotation	[58]
Rotation speed, fin number, fin angle	Charging	Simulation	Triple tubes, fins, rotation	[42]
Rotation speed, fin size, fin angle	Charging	Simulation	Triple tubes, fins, rotation	[43]
Rotation speed	Charging	Simulation	Triple tubes, fins, rotation	[44]
Rotation speed, fin size, fin angle	Charging	Simulation	Triple tubes, fins, rotation	[48]
Rotation speed, fin number, fin angle	Discharging	Simulation	Triple tubes, fins, rotation	[45]
Rotation speed, fin size, fin angle	Discharging	Simulation	Triple tubes, fins, rotation	[46]
Rotation speed, nanoparticle ratio	Charging	Simulation	Triple tubes, fins, nanoparticles, rotation	[49]
Pore density, porosity	Charging	Simulation	Triple tubes, metal foam, rotation	[50]
Porosity range, grade layer, rotation speed	Charging	Simulation	Tube, metal foam, rotation	[52]
Porosity range, grade layer, rotation speed	Charging	Simulation	Finned tube, metal foam, rotation	[53]
Concentration porosity, concentration ratio, rotation speed	Charging, discharging	Simulation	Tube, metal foam, rotation	[51]
Eccentricity angle, rotation speed	Charging	Simulation	Eccentric triplex-tube, rotation	[55]
Eccentricity value, eccentricity angle, rotation speed	Charging	Simulation	Eccentric triplex-tube, rotation	[54]
Rotation speed	Charging	Experiment	Tube, rotation	[56]
Rotation speed	Charging	Experiment	Tube, rotation	[57]



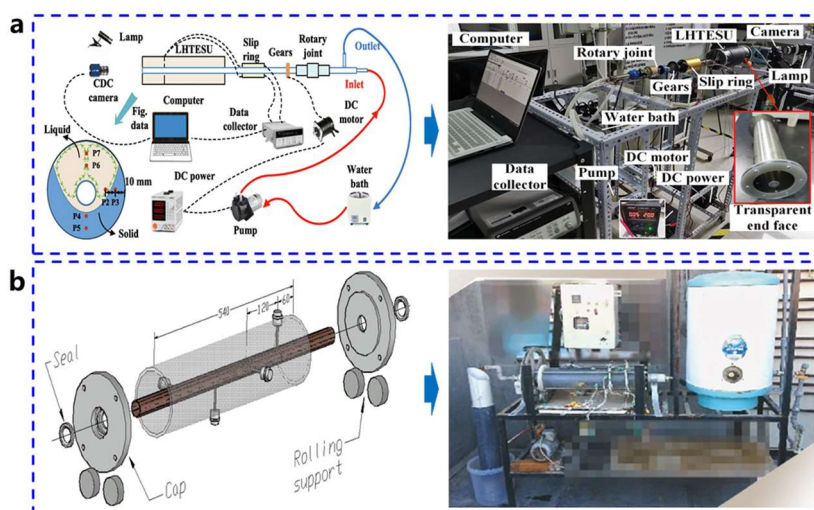


图 7. (a) Yang 等 [56] 和 (b) Fathi 和 Mussa [57] 展示的具有旋转功能的 LTES 试验台的示意图和物理图。

Figure 7. Schematic and physical diagrams of LTES test rigs with rotation function demonstrated by (a) Yang et al. [56] and (b) Fathi and Mussa [57].

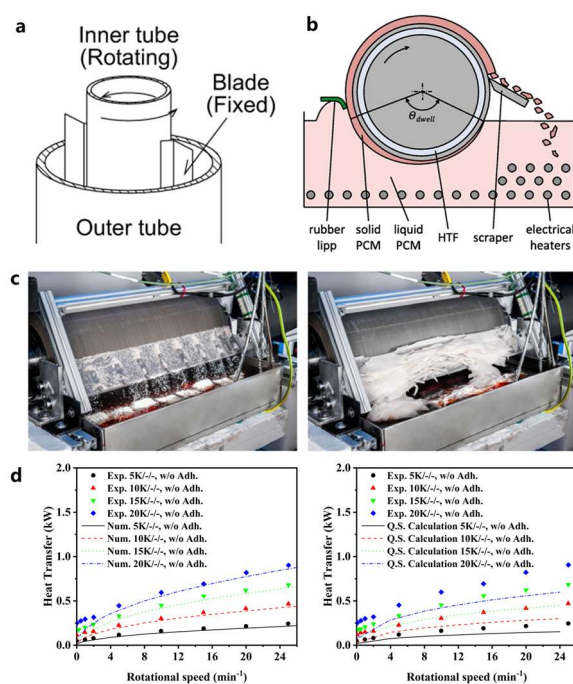
前期研究证明，连续旋转可以在管壳式 LTES 系统中实现更高的充放电速率和更均匀的温度分布。旋转也可以与其他被动传热强化方法相结合，例如使用翅片、纳米颗粒和金属泡沫。然而，连续旋转也会导致更高的寄生功率和更复杂的操作条件，需要更复杂的辅助装置。因此，进一步揭示旋转的传热强化机制，特别是与其他被动传热强化方法的耦合机制，为简化旋转条件（如不连续旋转和变速旋转）提供指导，以达到相同甚至更好的传热强化效果。

### 3.2. 传热管连续旋转

在传统的管壳式 LTES 系统中，基于旋转的方法来强化传热过程 [59–61]，典型的示意图如图 8a 所示。在这种情况下，叶片固定在传热管上，其作用是通过刮擦去除传热边界层，并在传热管旋转时引起对流。在管壳式 LTES 系统中，由于大多数 PCM 的热导率较低，传热管的旋转也被用来强化传热过程 [62,63]。然而，Fathi 和 Mussa [62]通过实验证明，当转速低于 9 rpm 时，在 LTES 系统充电过程中旋转传热管对充电率的影响很小（高达 8%），因为旋转对液态 PCM 中的自然对流的影响很小。后来，更多的研究集中在传热管旋转对 LTES 系统放电过程的影响，因为大多数 PCM 的热导率较低，导致传热管外表面凝固的 PCM 降低 LTES 系统的放电速率。因此，研究人员探索了固定刮刀的传热管旋转，以刮除传热管外表面凝固的 PCM，从而提高放电速率的可行性。Maruoka 等 [64]实验研究了在传热管上固定刮刀的管壳式 LTES 系统的放电性能。结果表明，旋转状态下的 LTES 系统的放电速率是静态 LTES 系统的 100 倍，并且放电速率随着转速的提高而增加。然而，由于低的液体体积分数抑制了固定在传热管上的刮刀的作用，高的放电速率仅持续到液体体积分数达到 30%。一些作者进行了一系列研究，分析了带有刮刀的传热管旋转增强管壳式 LTES 系统的放电性能 [65–67]。设计了试验台，示意图如图 8b 所示。液态



相变材料在放电过程中凝固在传热管的外表面，然后在传热管旋转时被固定的刮刀刮除。实验结果 [65] 也强调了旋转速度对刮除凝固相变材料的重要性，如图 8c 所示。传热强化效果还受到多种温差的影响，包括传热流体与液态相变材料之间的温差、传热流体与熔点之间的温差以及液态相变材料与熔点之间的温差。这些温差会影响凝固相变材料的厚度，从而影响传热管的旋转。由于不便通过实验研究这些参数的影响，Tombrink 和 Bauer [66] 建立了一个数值模型来设计操作参数，并通过实验数据验证了该模型，如图 8 所示。基于数值模型和实验台架，Tombrink 和 Bauer [67] 设计了一种带有固定刮板的旋转传热管的旋转壳管式 LTES 系统，用于纯蒸汽发生系统和可再生能源驱动的蒸汽-电力联产系统，该系统显示出较高的体积储能密度和表面传热系数，表明旋转壳管式 LTES 系统在利用波动性可再生能源方面具有巨大潜力。基于上述旋转壳管式 LTES 系统，人们对其进行了一些修改以用于其他应用。Egea 等 [68] 设计了一种用于生活热水供应的旋转壳管式 LTES 系统。低温水流经外传热管，而 PCM 则填充在内管中。在制备热水时，内管上固定有刮刀以刮除凝固的 PCM。实验结果表明，带有刮刀的旋转 LTES 系统将能量提取率从不带刮刀的 62% 提高到 95%。



**图 8.** (a) 对流热交换器中带固定叶片的旋转传热管 [61]; (b) LTES 系统中带固定刮刀的旋转传热管 [66]; (c) 以 6 rpm (左) 和 12 rpm (右) 的转速刮取固体 PCM [65]; (d) 数值模拟数据 (左) 和准稳态计算数据 (右) 与实验数据的比较 [66]。

**Figure 8.** (a) Rotating heat transfer tube with fixed blades in convective heat exchanger [61]; (b) Rotating heat transfer tube with fixed scraper in LTES system [66]; (c) Scraped solid PCMs at rotation speed of 6 rpm (left) and 12 rpm (right) [65]; (d) Comparison of numerical simulation data (left) and quasi-stationary calculation data (right) against experimental data [66].

表 2 总结了 LTES 系统中通过旋转传热管实现强化传热的效果。总体而言，目前已有少量研究关注该主题，并通过实验和模拟探索了其可行性。在低转速下，无刮刀的传热管旋转对装料性能影响不大。更高的传热管转速有待进一步研究，但这种转速会消耗较大的寄生功率。相比之下，带刮刀的传热管旋转已被证明具有良好的可行性，对 LTES 系统的放电性能有显著的影响，因为刮刀可以刮掉传热管表面凝固的 PCM，提高液态 PCM 与传热管之间传热过程的传热系数。为了获得更好的强化传热效果，应根据管壳式 LTES 系统的运行工况，加强传热管和刮刀的设计以及旋转参数的优化。

表 2. LTES 系统中通过旋转传热管增强传热的总结。

Table 2. Summary of heat transfer enhancement by rotation of heat transfer tube in LTES system.

Heat transfer enhancement method	Parameter	Method	Process	Ref.
Tube rotation without scraping	Rotation speed, rotation direction	Experiment	Charging	[62]
Tube rotation without scraping	Rotation speed	Simulation	Charging	[63]
Tube rotation with scraping	Rotation speed	Experiment	Discharging	[64]
Tube rotation with scraping	Rotation speed	Experiment	Discharging	[65]
Tube rotation with scraping	Rotation speed	Simulation	Discharging	[66]
Tube rotation with scraping	Rotation speed	Simulation	Discharging	[67]
Tube rotation with scraping	Rotation speed	Simulation/experiment	Discharging	[68]

### 3.3. LTES系统整体翻转

由于液态相变材料中存在自然对流，管壳式 LTES 系统上部和下部的充注过程呈现不均匀分布。当有足够的液态相变材料存在时，自然对流将主导 LTES 系统的充注过程，因此，合理利用自然对流来增强 LTES 系统下部的充注过程并提高整体充注速率是重要的课题。实际上，液态相变材料中自然对流的强度和演变受 LTES 系统方向的影响 [69]，因此一些研究探索了翻转或改变 LTES 系统的方向来提高传热速率。虽然 LTES 系统的连续旋转可能会消耗更多的寄生功率，但及时翻转 LTES 以在 LTES 系统后方区域引发自然对流有可能实现整体的高传热性能 [40]。因此，研究人员探索了逐步旋转和直接翻转对 LTES 系统的影响，旨在简化连续旋转并实现较高的传热强化性能。

Jaberi 和 Hossainpour [70]研究了逐步旋转对管壳式 LTES 系统装料性能的影响，考虑了每步之间的不同角度，分别为 90°、120°和 180°。研究发现，与其他情况相比，每一步旋转角度为 180°的 LTES 系统实现了最短的熔化时间，因为 LTES 系统的下半部分比上半部分熔化得慢，并且通过 180°翻转，下半部分有更多的机会旋转到上部位置，而上部的自然对流更为强烈，从而增强了熔化过程。在翅片管 LTES 系统中，通过逐步旋转也观察到了类似的现象，但每个旋转步骤的最佳旋转角度受翅片数量的影响 [71]。具体而言，翅片管 LTES 系统的最佳布局为四个翅片，旋转角度为 90°，或两个垂直翅片，旋转角度为 180°（即翻转）。总体而言，直接翻转 LTES 系统可以将其下部（PCM 熔化速度较慢）旋转到上部，从而由于自然对流更强烈而实现更高的熔化速度 [40]。

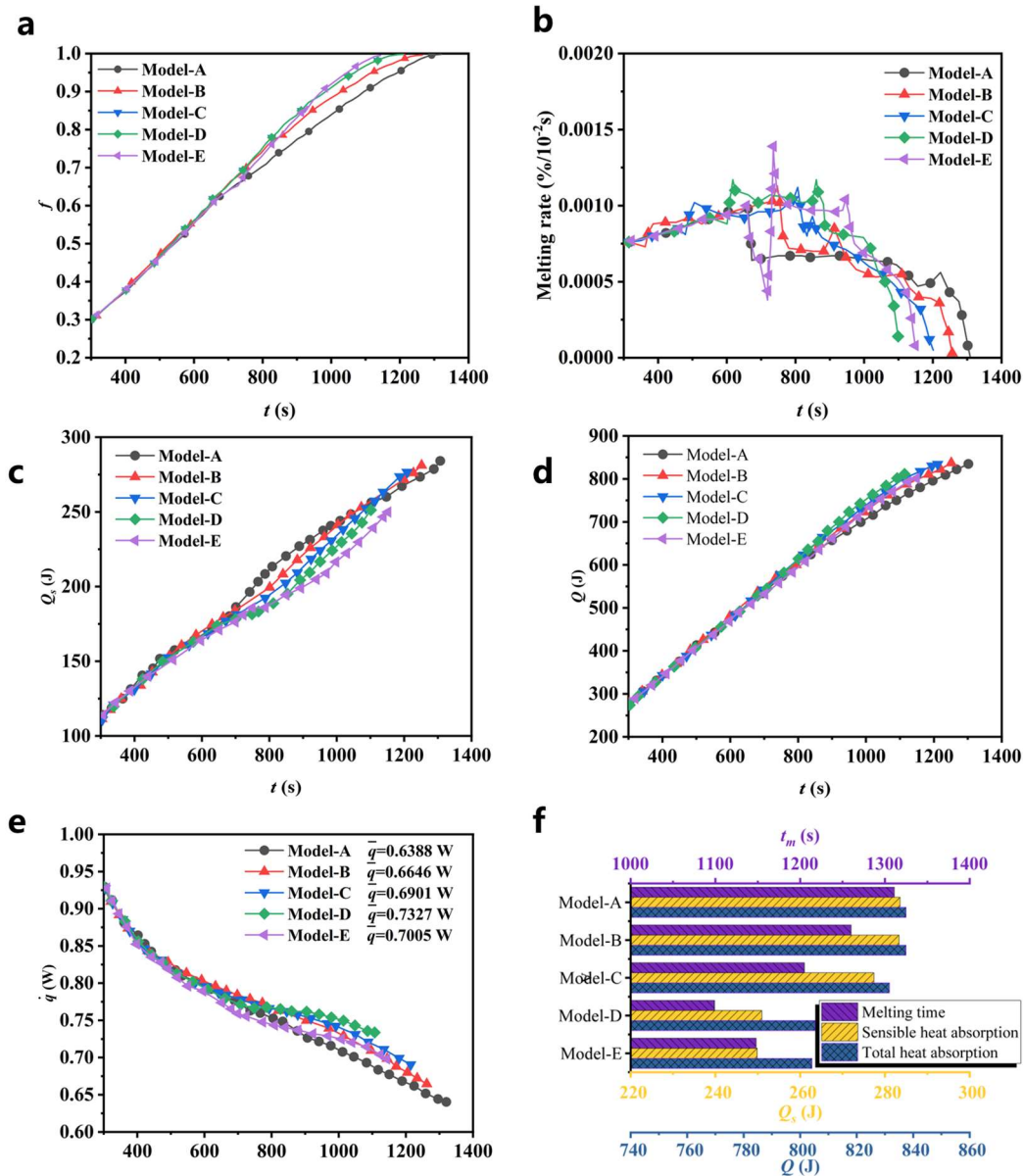


图 9. 翻转时间对 LTES 体系熔化特性的具体影响 [74]: (a) 液相的演变; (b) 熔化速率; (c) 显热能吸收; (d) 总热能吸收; (e) 热吸收率比较和 (f) 熔化时间和热吸收。

Figure 9. Specific effects of flipping time on melting properties in LTES system [74]: (a) evolution of liquid phase; (b) melting rate; (c) sensible heat energy absorption; (d) total heat energy absorption; (e) heat absorption rate comparison and (f) melting time and heat absorption.

鉴于直接翻转所展现出的强化传热效果，研究人员从其他角度进一步研究了翻转在 LTES 系统中的作用，旨在为旋转条件的设计获得更多的指导意义。Dai 等 [72] 评估了不同翻转时间下立式管壳式 LTES 系统的充放电性能。研究结果表明，总熔化时间随翻转时间（单位无量纲）的增加呈现先减小后增大的趋势，在翻转时间为 0.5 时总熔化时间达到最低值，比未翻转的 LTES 系统降低了 33.4%；总凝固时间与总熔化时间总体趋势一致，但由于充放电过程的传热机理不同，翻转时间的最优值为 0.25。Huang 等 [73] 研究了翅片管 LTES 系统在不同翻转时间下的充电性能，Li 等 [74] 研究了三管 LTES 系统在不同翻转时

间下的充电性能。两者都强调了翻转时间对强化传热效果的重要性，因为整个 LTES 系统的翻转会削弱难熔区域（特别是在 LTES 系统下部）并减少熔化过程中高温 PCM 的区域，从而提高整个 LTES 系统的熔化均匀性。例如，图 9 给出了不同翻转时间下 LTES 系统的装料性能。对于模型 A，没有翻转。模型 B、C、D 和 E 的翻转时间分别为 360、480、600 和 720 s。当翻转时间为 0.458 时，装料速率提高了 14.7%，总熔化时间减少了 16.7% [74]。需要注意的是，本研究仅采用了一次翻转，因此翻转时间也值得进一步研究以获得更好的传热强化效果。与连续旋转模式类似，翻转模式也与其他被动式强化传热方法相结合，如使用偏心传热管 [75,76]。已综述的研究证明了翻转对偏心传热管 LTES 系统充放电性能的有效性，并指出了实现最佳传热强化效果的最佳偏心值。表 3 显示了直接翻转整个 LTES 系统对传热的强化总结。翻转模式应用于管式、翅片管式、三管式和偏心管 LTES 系统，展示了不同程度的传热强化效果。但大多数研究都是从充放电过程的整体性能角度探讨翻转 LTES 系统的影响，因此应投入更多的精力来揭示翻转对难熔区域自然对流形成和演变的影响。此外，LTES 系统的翻转时间对于实现最佳的传热强化效果至关重要，而最佳翻转时间对于充液和放液过程是不同的。实际上，最佳翻转时间与难熔区域的液体体积分数有关，需要明确这种关系才能更好地实施翻转模式。此外，所有研究都进行了模拟，缺乏翻转模式的实验验证。

表 3. 直接翻转整个 LTES 增强传热的总结。

Table 3. Summary of heat transfer enhancement by direct flipping of entire LTES.

Heat transfer enhancement method	Parameter	Method	Process	Ref.
Tube, step-by-step rotation	Rotation angle	Simulation	Charging	[70]
Finned tube, step-by-step rotation	Rotation angle	Simulation	Charging	[71]
Tube, flipping	Flipping time	Simulation	Charging	[40]
Tube, flipping	Flipping time	Simulation	Charging, discharging	[72]
Finned tube, flipping	Flipping time	Simulation	Charging	[73]
Triple tube, flipping	Flipping time	Simulation	Charging	[74]
Eccentric tube, flipping	Eccentricity	Simulation	Charging, discharging	[75]
Eccentric tube, flipping	Eccentricity, rotation angle	Simulation	Charging	[76]

#### 4. 结论

基于旋转的方法作为一种主动传热强化方法应运而生，国内外研究人员已取得了许多成果。本文对基于旋转的传热强化方法的机理和应用进行了简要综述，得出以下主要结论：

- (1) 在管壳式 LTES 系统中，整体 LTES 的连续旋转可实现更高的充放电速率和更均匀的温度分布，其性能受转速、旋转时间等许多关键参数的影响。旋转还可以与其他被动传热强化方法相结合，例如使用翅片和金属泡沫。进一步揭示旋转的传热强化机理，特别是与其他被动传热强化方法的耦合机制，有助于降低旋转装置的寄生功率和复杂性。



- (2) 无刮刀传热管旋转对低转速下的充放电性能影响不大, 传热管高速旋转下的影响有待进一步研究。而带有刮刀的传热管旋转对 LTES 系统卸料性能影响显著, 因为刮刀会刮掉传热管表面凝固的 PCM。应在刮刀设计和旋转参数优化方面投入更多精力, 以获得更好的强化传热效果。
- (3) 翻转可以替代连续旋转, 具有较低的寄生功率, 其性能受翻转时间的影响很大, 因为翻转时间决定了自然对流的利用率, 并且对于充放电过程, 最佳翻转时间是不同的。大多数研究从充放电过程的整体性能角度探讨翻转 LTES 系统的影响, 忽略了翻转对难熔区域自然对流形成和演变的影响。实际上, 最佳翻转时间与难熔区域液相体积分数有关, 需要明确该关系以更好地实施翻转模式。此外, 由于所有研究都进行了模拟, 缺乏对翻转模式的实验演示。
- (4) 虽然已经证明三种旋转模式具有明显的强化传热效果, 但在未来的设计和应用中仍需付出更多的努力。一方面, 旋转一直与其他被动方法相结合, 例如使用翅片和金属泡沫, 因此应进一步揭示复合效应对传热过程, 特别是自然对流的演变的影响, 为优化旋转速度、旋转方向和翻转时间等参数提供指导。另一方面, 面向应用的具有旋转功能的 LTES 系统设计对于推动基于旋转的传热强化方法的发展至关重要, 这需要在该研究领域进行更多的实验演示, 同时考虑经济性能。随后, 可以在家庭和商业应用等小规模热能存储场景中考虑具有旋转功能的 LTES 系统。

**作者贡献:** 概念化, 李智; 方法论, 李智 和 姜睿铖; 软件, 李智; 验证, 李智、方成栋和伍茜; 形式分析, 李智; 调查, 李智; 资源, 俞小莉; 数据管理, 李智和方成栋; 写作—原始草稿准备, 李智; 写作—审查和编辑, 李智和伍茜; 可视化, 方成栋和姜睿铖; 监督, 俞小莉; 项目管理, 俞小莉; 资金获取, 李智和俞小莉。所有作者均已阅读并同意稿件的出版版本。

**致谢:** 本研究得到国家自然科学基金(批准号: 52476224、52206027)和能源清洁利用全国重点实验室(批准号: ZJUCEU2022017)的大力支持。

**利益冲突:** 作者声明没有潜在的利益冲突。

## 参考文献

1. Li Z, Lu Y, Huang R, et al. Applications and technological challenges for heat recovery, storage and utilisation with latent thermal energy storage. *Applied Energy*. 2021; 283: 116277. doi: 10.1016/j.apenergy.2020.116277
2. Zhang Y, Xiao Y, Abuelgasim S, Liu C. A brief review of hydrogen production technologies. *Clean Energy Science and Technology*. 2024; 2(1): 117. doi: 10.18686/cest.v2i1.117
3. Jiang R, Zhi X, Qian G, Li Z, Yu X. Design and techno-economic analysis of a thermal battery for residential hot water supply under different charging modes. *Journal of Energy Storage*. 2024; 94: 112578. doi: 10.1016/j.est.2024.112578
4. Li Z, Yu X, Wang L, et al. Effects of fluctuating thermal sources on a shell-and-tube latent thermal energy storage during charging process. *Energy*. 2020; 199: 117400. doi: 10.1016/j.energy.2020.117400
5. Li Z, Lu Y, Huang R, et al. Parametric study on melting process of a shell-and-tube latent thermal energy storage under fluctuating thermal conditions. *Applied Thermal Engineering*. 2020; 180: 115898. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2020.115898

6. Zheng J, Su Y, Wang W, et al. Hydrogen-electricity coupling energy storage systems: Models, applications, and deep reinforcement learning algorithms. *Clean Energy Science and Technology*. 2024; 2(1): 96. doi: 10.18686/cest.v2i1.96
7. Yu X, Zhang Z, Qian G, et al. Evaluation of PCM thermophysical properties on a compressed air energy storage system integrated with packed-bed latent thermal energy storage. *Journal of Energy Storage*. 2024; 81: 110519. doi: 10.1016/j.est.2024.110519
8. Li Z, Zhi X, Wu Z, et al. Role of different energy storage methods in decarbonizing urban distributed energy systems: A case study of thermal and electricity storage. *Journal of Energy Storage*. 2023; 73: 108931. doi: 10.1016/j.est.2023.108931
9. Shoeibi S, Jamil F, Parsa SM, et al. Recent advancements in applications of encapsulated phase change materials for solar energy systems: A state of the art review. *Journal of Energy Storage*. 2024; 94: 112401. doi: 10.1016/j.est.2024.112401
10. Li Z, Yu X, Wang L, et al. Comparative investigations on dynamic characteristics of basic ORC and cascaded LTES-ORC under transient heat sources. *Applied Thermal Engineering*. 2022; 207: 118197. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2022.118197
11. Li Z, Wang L, Jiang R, et al. Experimental investigations on dynamic performance of organic Rankine cycle integrated with latent thermal energy storage under transient engine conditions. *Energy*. 2022; 246: 123413. doi: 10.1016/j.energy.2022.123413
12. Yu X, Li Z, Zhang Z, et al. Energy, exergy, economic performance investigation and multi-objective optimization of reversible heat pump-organic Rankine cycle integrating with thermal energy storage. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2022; 38: 102321. doi: 10.1016/j.csite.2022.102321
13. Zhao Y, Huang J, Song J, Ding Y. Thermodynamic investigation of a Carnot battery based multi-energy system with cascaded latent thermal (heat and cold) energy stores. *Energy*. 2024; 296: 131148. doi: 10.1016/j.energy.2024.131148
14. Yu X, Chang J, Huang R, et al. Sensitivity analysis of thermophysical properties on PCM selection under steady and fluctuating heat sources: A comparative study. *Applied Thermal Engineering*. 2021; 186: 116527. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2020.116527
15. Wu T, Wu D, Deng Y, et al. Three-dimensional network-based composite phase change materials: Construction, structure, performance and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2024; 199: 114480. doi: 10.1016/j.rser.2024.114480
16. Jiang R, Yu X, Chang J, et al. Effects evaluation of fin layouts on charging performance of shell-and-tube LTES under fluctuating heat sources. *Journal of Energy Storage*. 2021; 44: 103428. doi: 10.1016/j.est.2021.103428
17. Zhang Y, Yang X, Zou S, et al. Enhancing the phase change material based shell-tube thermal energy storage units with unique hybrid fins. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2024; 157: 107763. doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2024.107763
18. Li Z, Baghaei Oskouei S, Fu G, et al. Enhanced power density during energy charging of a shell-and-tube thermal storage unit: Comparison between the inclusion of metal fins and foams. *Journal of Energy Storage*. 2022; 55: 105576. doi: 10.1016/j.est.2022.105576
19. Ji C, Waqas H, Liu D, et al. Melting performance improvement of phase change materials with thermal energy storage unit using nanoparticles. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2024; 61: 104892. doi: 10.1016/j.csite.2024.104892
20. Shailesh K, Naresh Y, Banerjee J. Heat transfer performance of a novel PCM based heat sink coupled with heat pipe: An experimental study. *Applied Thermal Engineering*. 2023; 229: 120552. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2023.120552
21. Wang Z, Zhu J, Wang M, Gao Q. Experimental study on heat transfer and storage of a heating system coupled with solar flat heat pipe and phase change material unit. *Journal of Energy Storage*. 2023; 73: 108971. doi: 10.1016/j.est.2023.108971
22. Liu J, Liu Z, Nie C. Phase transition enhancement through circumferentially arranging multiple phase change materials in a concentric tube. *Journal of Energy Storage*. 2021; 40: 102672. doi: 10.1016/j.est.2021.102672
23. Li M, Li M, Xue X, Li D. Optimization and design criterion of the shell-and-tube thermal energy storage with cascaded PCMs under the constraint of outlet threshold temperature. *Renewable Energy*. 2022; 181: 1371-1385. doi: 10.1016/j.renene.2021.09.086
24. Gao Y, Li Y, Chen X. Hygroscopic all-polymer composite for moisture management and evaporative cooling. *Clean Energy Science and Technology*. 2024; 2(1): 111. doi: 10.18686/cest.v2i1.111
25. Yang W, Zhang W, Chen J, Zhou J. Mono-functionalized pillar [*n*]arenes: Syntheses, host-guest properties and applications. *Chinese Chemical Letters*. 2024; 35(1): 108740. doi: 10.1016/j.ccllet.2023.108740
26. Zhang R, Zhou J. Ultrafast-adsorption-kinetics molecular sieving of propylene from propane. *Clean Energy Science and Technology*. 2024; 2(2): 126. doi: 10.18686/cest.v2i2.126

27. Hu Y, Shi L, Zhang Z, et al. Magnetic regulating the phase change process of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-paraffin wax nanocomposites in a square cavity. *Energy Conversion and Management*. 2020; 213: 112829. doi: 10.1016/j.enconman.2020.112829
28. Sheikholeslami M. Solidification of NEPCM under the effect of magnetic field in a porous thermal energy storage enclosure using CuO nanoparticles. *Journal of Molecular Liquids*. 2018; 263: 303-315. doi: 10.1016/j.molliq.2018.04.144
29. Luo K, Pérez AT, Wu J, et al. Efficient lattice Boltzmann method for electrohydrodynamic solid-liquid phase change. *Physical Review E*. 2019; 100(1): 013306. doi: 10.1103/PhysRevE.100.013306
30. Sun Z, Yang P, Luo K, Wu J. Experimental investigation on the melting characteristics of n-octadecane with electric field inside macrocapsule. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2021; 173: 121238. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121238
31. Mahdi AH, Mussa MA. Comprehensive review of optimization of latent thermal energy storage systems using multiple parameters. *Journal of Energy Storage*. 2024; 86: 111120. doi: 10.1016/j.est.2024.111120
32. Shank K, Tiari S. A Review on Active Heat Transfer Enhancement Techniques within Latent Heat Thermal Energy Storage Systems. *Energies*. 2023; 16(10): 4165. doi: 10.3390/en16104165
33. Rashid FL, Rahbari A, Ibrahim RK, et al. Review of solidification and melting performance of phase change materials in the presence of magnetic field, rotation, tilt angle, and vibration. *Journal of Energy Storage*. 2023; 67: 107501. doi: 10.1016/j.est.2023.107501
34. Jiang R, Qian G, Li Z, et al. Progress and challenges of latent thermal energy storage through external field-dependent heat transfer enhancement methods. *Energy*. 2024; 304: 132101. doi: 10.1016/j.energy.2024.132101
35. Huang X, Li F, Li Z, et al. An in-depth study on melting performance of latent heat thermal energy storage system under rotation mechanism by fluctuating heat source. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2023; 263: 112584. doi: 10.1016/j.solmat.2023.112584
36. Huang X, Li F, Guo J, et al. Design optimization on solidification performance of a rotating latent heat thermal energy storage system subject to fluctuating heat source. *Applied Energy*. 2024; 362: 122997. doi: 10.1016/j.apenergy.2024.122997
37. Huang X, Li F, Li Y, et al. Solar photothermal utilization of coupled latent heat storage: A numerical and optimization study. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2024; 271: 112864. doi: 10.1016/j.solmat.2024.112864
38. Kurnia JC, Sasmito AP, Ping SI. Investigation of Heat Transfer on a Rotating Latent Heat Energy Storage. *Energy Procedia*. 2017; 105: 4173-4178. doi: 10.1016/j.egypro.2017.03.887
39. Kurnia JC, Sasmito AP. Numerical investigation of heat transfer performance of a rotating latent heat thermal energy storage. *Applied Energy*. 2018; 227: 542-554. doi: 10.1016/j.apenergy.2017.08.087
40. Yu X, Jiang R, Li Z, et al. Synergistic improvement of melting rate and heat storage capacity by a rotation-based method for shell-and-tube latent thermal energy storage. *Applied Thermal Engineering*. 2023; 219: 119480. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2022.119480
41. Soltani H, Soltani M, Karimi H, Nathwani J. Heat transfer enhancement in latent heat thermal energy storage unit using a combination of fins and rotational mechanisms. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2021; 179: 121667. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121667
42. Huang X, Li F, Li Y, et al. Optimization of melting performance of a heat storage tank under rotation conditions: Based on taguchi design and response surface method. *Energy*. 2023; 271: 127100. doi: 10.1016/j.energy.2023.127100
43. Huang X, Li F, Li Y, et al. Investigation and optimization on melting performance of a triplex-tube heat storage tank by rotational mechanism. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2023; 205: 123892. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.123892
44. Huang X, Li F, Li Y, et al. Influence of different rotational speeds of inner and outer tubes on phase change heat storage: An optimization study. *Applied Thermal Engineering*. 2023; 233: 121154. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2023.121154
45. Huang X, Li F, Lu L, et al. Depth optimization of solidification properties of a latent heat energy storage unit under constant rotation mechanism. *Energy and Buildings*. 2023; 290: 113099. doi: 10.1016/j.enbuild.2023.113099
46. Huang X, Li F, Xiao T, et al. Investigation and optimization of solidification performance of a triplex-tube latent heat thermal energy storage system by rotational mechanism. *Applied Energy*. 2023; 331: 120435. doi: 10.1016/j.apenergy.2022.120435
47. Guo J, Yang B, Li Z, et al. Charging characteristics of finned thermal energy storage tube under variable rotation. *Applied Thermal Engineering*. 2024; 236: 121887. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2023.121887

48. Ren F, Li Q, Wang P. Investigation and optimization on a Y-shaped fins for phase change heat storage by rotational mechanism. *Journal of Energy Storage*. 2024; 94: 112436. doi: 10.1016/j.est.2024.112436
49. Huang X, Hu R, Gao X, et al. Study on melting process of latent heat energy storage system by nano-enhanced phase change material under rotation condition. *Applied Thermal Engineering*. 2024; 247: 123040. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2024.123040
50. Huang X, Li Z, Xie Y, et al. Phase change heat storage and enhanced heat transfer based on metal foam under unsteady rotation conditions. *Energy*. 2024; 306: 132501. doi: 10.1016/j.energy.2024.132501
51. Yang C, Wang X, Xu X, et al. Numerical study of solidification and melting behavior of the thermal energy storage system with non-uniform metal foam and active rotation. *Journal of Energy Storage*. 2024; 86: 111353. doi: 10.1016/j.est.2024.111353
52. Yang C, Xu X, Bake M, et al. Numerical investigation and optimization of the melting performance of latent heat thermal energy storage unit strengthened by graded metal foam and mechanical rotation. *Renewable Energy*. 2024: 120537. doi: 10.1016/j.renene.2024.120537
53. Yang C, Xu Y, Xu X, et al. Melting performance analysis of finned metal foam thermal energy storage tube under steady rotation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2024; 226: 125458. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.125458
54. Shahsavari A, Yekta A, Arıcı M. Numerical investigation of the effect of eccentricity on the melting performance of a rotating triplex-tube latent heat energy storage system. *Journal of Energy Storage*. 2024; 98: 113018. doi: 10.1016/j.est.2024.113018
55. Shahsavari A, Naderi M, Selimefendigil F. Exploring the impact of tube rotation on the melting performance of multi-tube latent heat storage systems: A numerical investigation. *Journal of Energy Storage*. 2024; 93: 112355. doi: 10.1016/j.est.2024.112355
56. Yang C, Zheng Z, Cai X, Xu Y. Experimental study on the effect of rotation on melting performance of shell-and-tube latent heat thermal energy storage unit. *Applied Thermal Engineering*. 2022; 215: 118877. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2022.118877
57. Fathi MI, Mussa MA. The effect of whole system rotation on the thermal performance of a phase change energy storage. *Journal of Energy Storage*. 2023; 68: 107732. doi: 10.1016/j.est.2023.107732
58. Yang B, Guo J, Huang X, et al. Evaluation of variable rotation on enhancing thermal performance of phase change heat storage tank. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2024; 106: 109328. doi: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2024.109328
59. Mehryan SAM, Raahemifar K, Gargari LS, et al. Latent Heat Phase Change Heat Transfer of a Nanoliquid with Nano-Encapsulated Phase Change Materials in a Wavy-Wall Enclosure with an Active Rotating Cylinder. *Sustainability*. 2021; 13(5): 2590. doi: 10.3390/su13052590
60. Solano JP, Martínez DS, Vicente PG, Viedma A. Enhanced thermal-hydraulic performance in tubes of reciprocating scraped surface heat exchangers. *Applied Thermal Engineering*. 2023; 220: 119667. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2022.119667
61. Nogami H, Aonuma K, Chiba Y. Development of Heat Exchanger with New Mechanism of Scraping Temperature Boundary Layer. *ISIJ International*. 2010; 50: 1276-1281. doi: 10.2355/isijinternational.50.1276
62. Fathi MI, Mussa MA. Experimental study on the effect of tube rotation on performance of horizontal shell and tube latent heat energy storage. *Journal of Energy Storage*. 2021; 39: 102626. doi: 10.1016/j.est.2021.102626
63. Sadr AN, Shekaramiz M, Zarinfar M, et al. Simulation of mixed-convection of water and nano-encapsulated phase change material inside a square cavity with a rotating hot cylinder. *Journal of Energy Storage*. 2022; 47: 103606. doi: 10.1016/j.est.2021.103606
64. Maruoka N, Tsutsumi T, Ito A, et al. Heat release characteristics of a latent heat storage heat exchanger by scraping the solidified phase change material layer. *Energy*. 2020; 205: 118055. doi: 10.1016/j.energy.2020.118055
65. Tombrink J, Jockenhöfer H, Bauer D. Experimental investigation of a rotating drum heat exchanger for latent heat storage. *Applied Thermal Engineering*. 2021; 183: 116221. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2020.116221
66. Tombrink J, Bauer D. Simulation of a rotating drum heat exchanger for latent heat storage using a quasistationary analytical approach and a numerical transient finite difference scheme. *Applied Thermal Engineering*. 2021; 194: 117029. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2021.117029
67. Tombrink J, Bauer D. Demand-based process steam from renewable energy: Implementation and sizing of a latent heat thermal energy storage system based on the Rotating Drum Heat Exchanger. *Applied Energy*. 2022; 321: 119325. doi: 10.1016/j.apenergy.2022.119325



68. Egea A, García A, Pérez-García J, Herrero-Martín R. Parametric study of a scraped surface heat exchanger for latent energy storage for domestic hot water generation. *Applied Thermal Engineering*. 2024; 248: 123214. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2024.123214
69. Mehta DS, Solanki K, Rathod MK, Banerjee J. Influence of orientation on thermal performance of shell and tube latent heat storage unit. *Applied Thermal Engineering*. 2019; 157: 113719. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2019.113719
70. Jaberl Khosroshahi A, Hossainpour S. Investigation of storage rotation effect on phase change material charging process in latent heat thermal energy storage system. *Journal of Energy Storage*. 2021; 36: 102442. doi: 10.1016/j.est.2021.102442
71. Jaberl Khosroshahi A, Hossainpour S. A numerical investigation on the finned storage rotation effect on the phase change material melting process of latent heat thermal energy storage system. *Journal of Energy Storage*. 2022; 55: 105461. doi: 10.1016/j.est.2022.105461
72. Dai H, Zhou S, Niu P, et al. Numerical investigations of the effect of the flip method on charging/discharging performance of a vertical shell-and-tube latent heat thermal energy storage unit. *Journal of Energy Storage*. 2023; 73: 108976. doi: 10.1016/j.est.2023.108976
73. Huang X, Li F, Xiao T, et al. Structural optimization of melting process of a latent heat energy storage unit and application of flip mechanism. *Energy*. 2023; 280: 128164. doi: 10.1016/j.energy.2023.128164
74. Li F, Huang X, Li Y, et al. Application and analysis of flip mechanism in the melting process of a triplex-tube latent heat energy storage unit. *Energy Reports*. 2023; 9: 3989-4004. doi: 10.1016/j.egyr.2023.03.037
75. Modi N, Wang X, Negnevitsky M. Melting and solidification characteristics of a semi-rotational eccentric tube horizontal latent heat thermal energy storage. *Applied Thermal Engineering*. 2022; 214: 118812. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2022.118812
76. Shahsavari A, Yekta A. Numerical investigation of the effect of simultaneous use of eccentricity and rotation on the entropy generation characteristics in a triplex-tube latent heat storage system. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2024; 156: 107648. doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2024.107648

Article

# Rotation-based heat transfer enhancement for shell-and-tube latent thermal energy storage systems: From mechanisms to applications

Zhi Li<sup>1</sup>, Chengdong Fang<sup>1</sup>, Qian Wu<sup>2,\*</sup>, Ruicheng Jiang<sup>1,\*</sup>, Xiaoli Yu<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> College of Energy Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang Province, China

<sup>2</sup> Zhejiang Provincial Engineering Center of Integrated Manufacturing Technology and Intelligent Equipment, Hangzhou City University, Hangzhou 310015, Zhejiang Province, China

\* **Corresponding authors:** Qian Wu, wuqian@hzcu.edu.cn; Ruicheng Jiang, jiangrc@zju.edu.cn; Xiaoli Yu, yuxl@zju.edu.cn

---

**Abstract:** Latent thermal energy storage (LTES) is an important energy storage technology to mitigate the discrepancy between energy source and energy supply, and it has great application prospects in many areas, such as solar energy utilization, geothermal energy utilization and electricity storage. However, LTES systems suffer from the low thermal conductivity of most phase-change materials (PCMs), threatening their large-scale commercial applications. To tackle this challenge, heat transfer enhancement for LTES systems is critically important and has been widely investigated worldwide. Convective heat transfer enhancement techniques, including fins, nanoparticles and multiple PCMs, can significantly improve the charging and discharging rates of an LTES system. Recently, rotation-based methods have emerged to provide new routes for the heat transfer enhancement of LTES systems, and many achievements have been obtained by researchers around the world. This study conducted a short review of the mechanisms and applications of three rotation-based heat transfer enhancement methods, aiming to provide deep insights into these novel heat transfer enhancement methods and propel their future development and applications.

**Keywords:** latent thermal energy storage; phase-change materials; heat transfer enhancement; rotation