

管壳式相变蓄热换热器的研究进展

王梅杰, 刘伟杰, 王佳丽, 徐嘉尉

(华北水利水电大学 环境与市政工程学院, 河南 郑州 450046)

摘 要:本文针对不同管壳式结构对管壳式相变蓄热换热器蓄/放热性能的影响,分别从结构形式、布置方式、肋片设置和运行参数 4 方面进行了概述,总结了已有结构形式和肋片优化设置存在的问题。提出了未来重点研究方向:无量纲参数下的蓄/放热性能研究;不抑制相变材料自然对流的非均布肋片优化设置;充分利用相变材料自然对流和流体传热面的新型结构形式;能同时蓄热和高效供热的新设备研发。

关 键 词:相变蓄热;管壳式;热性能;传热增强

中图分类号:TK172

文献标识码:A

DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2023.10.001

[引用本文格式]王梅杰,刘伟杰,王佳丽,等.管壳式相变蓄热换热器的研究进展[J].热能动力工程,2023,38(10):1-12. WANG Mei-jie, LIU Wei-jie, WANG Jia-li, et al. Research progress of shell-and-tube heat exchanger of latent heat storage[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(10):1-12.

Research Progress of Shell-and-tube Heat Exchanger of Latent Heat Storage

WANG Mei-jie, LIU Wei-jie, WANG Jia-li, XU Jia-wei

(School of Environment and Municipal Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou, China, Post Code: 450046)

Abstract: This paper summarizes the effects of different shell and tube structures on heat storage/release performance of shell-and-tube heat exchanger of latent heat storage in terms of structural form, arrangement, fin settings and operating parameters. Shortcomings of existing structure types and optimized fin settings are summarized. Future key research directions are research on heat storage/release performance under dimensionless parameters, optimization of non-homogeneous fin setup without inhibiting the natural convection of phase change materials, new structures that make full use of the natural convection of phase change materials and fluid heat transfer surfaces, and the development of new equipment that can store heat and supply heat efficiently at the same time.

Key words: latent heat storage, shell-and-tube, thermal performance, heat transfer enhancement

引 言

相变蓄热换热器(Latent Heat Storage Heat Exchangers, LHSHE)是解决可再生能源和余热回收供

需矛盾的关键设备,其性能优劣决定着可再生能源和余热回收的利用效率。相变蓄热换热器的蓄/放热性能主要取决于相变材料(Phase Change Material, PCM)和换热器的结构设计。PCM 的导热系数普遍较低,不利于热量的及时蓄存和提取,严重

收稿日期:2022-12-15; 修订日期:2023-02-13

基金项目:河南省高等学校重点科研基金项目(20A630034)

Fund-supported Project: Key Research Funds for the Provincial Universities of Henan (20A630034)

作者简介:王梅杰(1972-),女,华北水利水电大学副教授。

制约着相变蓄热换热器的发展。因此,提高相变蓄热换热器的蓄/放热速率、缩短蓄/放热时间是关注的重点。相变蓄热换热器的传热增强技术主要包括提高 PCM 导热系数、扩展 PCM 接触面积和优化结构设计。添加高导热介质法是提高 PCM 导热系数的常用方法,但对蓄/放热速率的增强效果并不突出^[1-2]。扩展 PCM 接触面积的方法主要包括多孔基质吸附法、微胶囊封装法和添加肋片法。微胶囊封装法或多孔基质吸附法可以大幅提升蓄/放热速率^[3-4],对于快速移峰填谷的用热场所尤其适用。但其蓄能密度低、制造费用高,故高蓄能密度的相变蓄热换热器几乎都是采用纯 PCM,常通过肋片设置和结构优化设计等方式提高其热性能。优化结构设计,扩展 PCM 与传热流体 (Heat Transfer Fluid, HTF) 之间的传热面,充分利用 PCM 自然对流,缩小 PCM 最不利传热区域等,在不降低蓄能密度的情况下可显著提高相变蓄热换热器热性能和经济性。可见,结构形式优化是提高相变蓄热换热器热性能的基础,其优劣直接决定着相变蓄热换热器的后续发展和应用前景。相变蓄热换热器主要有管壳式、板式和热管式 3 种类型。其中,管壳式相变蓄热换

热器因其单位体积 PCM 填充量大、热损失小及加工工艺简单等特点而备受关注^[5-6],是相变蓄热换热器领域中的研究热点。管壳式相变蓄热换热器在结构优化与改进方面已有大量研究,但关于该方面的回顾与分析却鲜有报道。

为进一步提高管壳式相变蓄热换热器在高蓄能密度下的蓄/放热速率,本文对近 10 年既有研究的结构形式进行分类综述,分析每种结构形式的布置方式、肋片设置、几何和运行参数等对蓄/放热性能的影响,探讨结构形式对比研究的比较基准和结果,深入了解各种结构形式的优劣。通过归纳总结、传热分析、结构对比等方法探索共性规律,分析结论存在矛盾的原因,指出待研究完善之处,展望后续研究方向。

1 管壳式相变蓄热换热器的分类

管壳式相变蓄热换热器主要有直筒管式和螺旋管式两种结构形式。直筒管式是管壳式 LHSHE 中研究最早且最多的结构形式。螺旋管式的研究起步较晚。其他主要是外为直筒管、内为螺旋传热流体的这种结构形式。其分类和结构如图 1 所示。

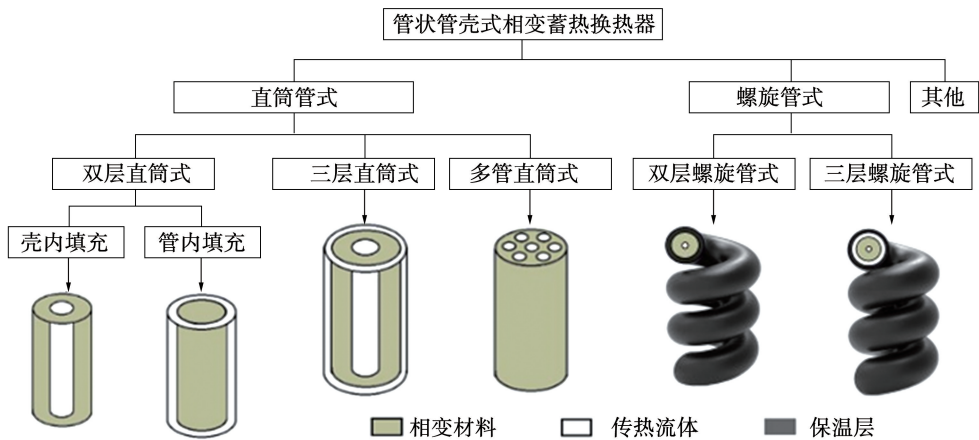


图 1 管状管壳式相变蓄热换热器的分类及其结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of classification and structure of tubular shell-and-tube latent heat storage heat exchanger

2 直筒管式对蓄放热性能的影响分析

2.1 双层直筒管对蓄放热性能的影响

关于双层直筒管式 LHSHE 的研究主要涉及布置方式、几何参数、内外管是否同心、PCM 填充方式、肋片设置等对蓄放热性能的影响。

2.1.1 布置方式和几何参数

关于水平、垂直或其他倾斜布置方式对壳内填

充传热性能的影响, Seddegh 等人^[7] 和 Han 等人^[8] 分别研究了水平和垂直布置方式对熔化和凝固过程的影响。结果表明:水平布置在熔化过程中展示出优异的热性能,在凝固过程中,两种布置方式的传热行为几乎没有任何差异^[7];传热流体 (HTF) 底部流入的垂直布置方式 PCM 融化率和蓄热率最高^[8]。可见,关于布置方式对熔化过程的影响,两者结论相反。Kousha 等人^[9] 研究了水平、30°、60°和垂直 4 种

布置方式对熔化和凝固过程的影响,结果表明:在熔化过程的前半段,水平布置时的熔化率最高,倾斜角度不影响凝固过程的传热速率和温度分布。Mehta 等人^[10]和 Sorour 等人^[11]分别研究了 0°(水平), 15°,30°,45°,60°,75°和 90°的 7 种倾斜角度对熔化过程的影响,结果表明:倾斜 45°布置时熔化时间最短,PCM 平均温度最高^[10];当 PCM 厚度为 7 mm

时,水平布置最优;当 PCM 厚度为 11.28 和 14.5 mm 时,水平优于垂直;最优的布置方式为 45°倾角,且随着 PCM 厚度的增加其优势更加突出^[11]。

由上述可见,布置方式的优劣与 PCM 厚度等几何参数有关。为深入分析导致研究结论不一致的原因,根据文献中给出的几何尺寸,计算了 PCM 厚度和填充率,然后连同管长和结论汇总于表 1 中。

表 1 几何参数和结论的对比
Tab. 1 Comparison of geometric parameters and conclusions

文献	研究方法	管长/ mm	PCM 厚度/ mm	PCM 填充 率/%	布置方式	主要结论
[7]	数值模拟	1 000	31.5	93	垂直/水平	熔化速率水平布置优于垂直布置,凝固速率几乎无影响。
[8]	数值模拟	500	4.14	50	垂直/水平	垂直布置 (HTF 底部流入) 的熔化速率优于水平布置。
[9]	实验测试 + 数值模拟	380	28.65	96	水平/30°/60°/90°	在熔化前半段,水平布置的熔化速率最高。 布置方式对凝固过程几乎无影响。
[10]	实验测试	600	29	89.6	0°/15°/30°/45° /60°/75°/90°	在熔化过程前半段,水平布置最优。 45°倾角的熔化时间最短,PCM 平均温度最高。
[11]	实验测试 + 数值模拟	500	7 11.28 14.5	51.6 65.6 72.5	同上	水平布置时熔化时间最短,但差别不明显。 水平优于垂直布置,45°倾角时最优。 水平优于垂直布置,45°倾角优势更为突出。

由表 1 可知,布置方式几乎对凝固过程无影响,但对熔化过程影响较大,且与 PCM 填充率有关。填充率高时,水平布置始终优于垂直布置,且随着填充率的增大,45°布置的优势更为突出。

PCM 填充率的大小取决于双层管的内外管半径比。Seddegh 等人^[12]对垂直双层管的实验研究发现,在熔化过程中外内管半径比为 5.4 时系统性能更好。Akyurek 等人^[13]实验研究了水平双层管迷你 HTF 管径大小对蓄/放热性能的影响,结果显示,最佳的外内管半径比可达 25 左右。可见,对于双层直筒管存在较佳的外内管半径比或 PCM 填充率。

综上可知,几何效应的影响不可忽略。为消除几何效应,扩大研究结果的适应性,非常有必要研究无量纲参数下的布置方式对蓄/放热性能的影响。

2.1.2 内外管同心

对于壳内填充水平双层管,内外管是否同心影响其熔化和凝固速率。Darzi 等人^[14]的研究结果表明,由于 PCM 自然对流的影响,内管向下偏移时熔化速率急剧增加,如图 2 所示。

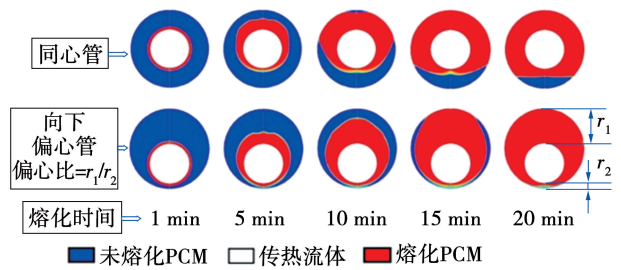


图 2 PCM 在同心和向下偏心管中的熔化示意图
Fig. 2 Schematic diagram of PCM melting in concentric and downward eccentric tubes

Yazici 等人^[15]的实验研究结果表明,偏心设置对总凝固时间有显著影响,且随着向上或向下偏心距离的增加而增加。Modi 等人^[16]的数值研究结果表明:向下偏心显著改善了熔化过程,但减缓了凝固过程;而向上偏心可以加速凝固过程。可见,关于向上偏心对凝固过程影响的结论并不一致。Zhou 等人^[17]的数值研究结果可以较好地解释该现象:向下偏心比在 4:1 和 14:1 之间时,熔化时间缩短 40% 以

上,且对于不同内外管半径比普遍有效;当内管半径较大时,向上偏心比在 1:4 和 1:14 之间时,凝固时间缩短 45% 以上;反之,向上偏心时凝固时间反而增加。可见偏心对凝固过程的影响与内管半径有密切关系。

基于上述分析以及熔化和凝固过程传热特点,结合传热理论可知:内管向下偏心,熔化时间明显缩短,凝固时间增加;内管向上偏心,熔化时间增加,凝固时间与内管半径大小有关,内管半径较大时凝固

时间明显减少;内管半径较小时,凝固时间反而增加。故在实际工程中,需根据蓄/放热时间的需求和内外管直径的相对大小,合理选择偏心设置。

2.1.3 管内和壳内填充

关于双层直筒式 LHSHE,绝大多数研究集中在水平布置的壳内填充上,而管内填充的研究较少^[18],这正是 Chen 等人^[19]对比研究管内与壳内填充热性能的原因。为便于对比分析,将既有的对比研究汇总于表 2 中。

表 2 管内填充和壳内填充的对比研究结果汇总

Tab.2 Comparative studies of PCM in-tube and in-shell

文献	年	研究方法	比较基准	主要结论
[8]	2017	数值模拟	PCM 填充量和传热面积同	管内比壳内填充时的熔化率和储热率高,其完全熔化时间可减少 23.5%。
[18]	2017	数值模拟	外壳尺寸和 PCM 填充量同	管内比壳内填充时的熔化时间缩短了 34.4%,PCM 自然对流增强管内填充熔化过程的幅度是壳内填充的两倍。
[19]	2020	实验测试 + 数值模拟	同上	填充率超过 62% 时,管内填充的综合蓄/放热性能比壳内填充的更好。

虽然关于管内填充的研究较少,但由表 2 可知,管内填充优于壳内填充。这是因为在相同设备尺寸和填充率下,管内填充的传热面积大,PCM 自然对流强,且随着填充率的提高,其优势更加突出。为充分利用 HTF 通道的传热面积,可将管内填充与壳内填充有机地结合起来,这不仅能提高蓄能密度,还可

进一步提高系统热效率,故这种新型结构形式的研发是后续研究的主要方向。

2.1.4 肋片

添加肋片扩展传热面是增强 PCM 传热性能的常用方式,且几乎都是针对壳内填充进行的,肋片形状如图 3 所示。

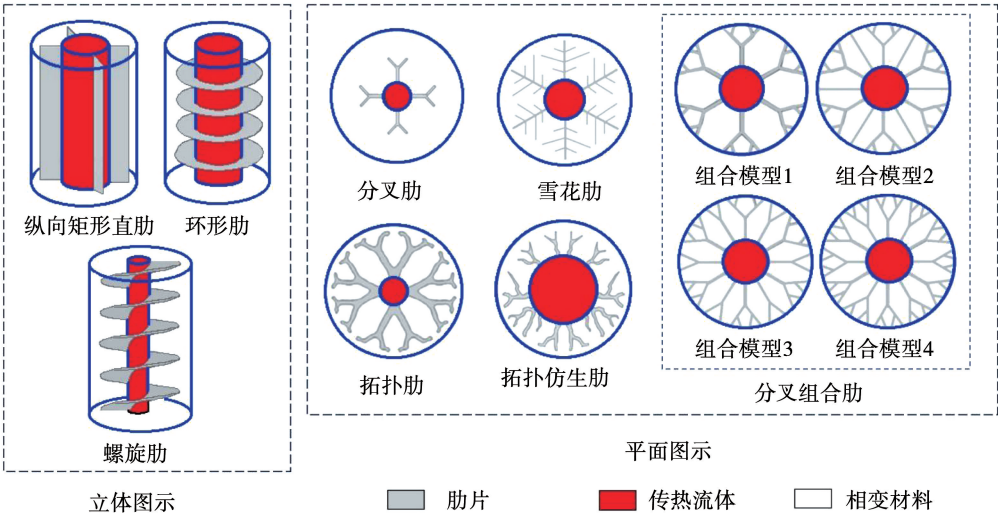


图 3 壳内填充双层直筒管内的肋片形状示意图

Fig.3 Schematic diagram of fin shapes of straight double-tubes with PCM in shell

设置肋片增强传热的研究较多^[20-31]。Hosseini 等人^[20]研究了纵向肋片对水平双层管的蓄/放热性

能的影响。结果表明,肋片的添加有效地缩短了熔化时间,传热性能随肋片高度而变化。Yang 等

人^[21]在相同肋体积的占比下,研究了纵向肋片间距对水平双层管传热性能的影响。结果表明,肋片间距对完全熔化时间影响极大,最佳肋片间距为 6.484 5°,此后进一步缩小肋片间距并不能有效提高储能速率。Tiari 等人^[22]实验研究了两种不同数量和配置的环形肋片对垂直双层管熔化和凝固过程的影响。结果表明,有肋结构明显优于无肋结构;20 个肋片虽优于 10 个肋片效果,但不十分明显;顶部设置较大直径肋片会抑制 PCM 自然对流,故肋片直径从下到上依次减小的布置方式最优。可见肋片形状、间距、数量和布置方式等都影响其传热增强效果,不抑制 PCM 自然对流的肋片传热增强效果更好。

为深入了解不同肋片形状对传热增强效果的影

响,将有关对比研究结果汇总于表 3。

由表 3 可知,添加肋片可显著提高蓄/放热速率,提高幅度不仅取决于肋片形状、结构和体积占比,还取决于比较对象、比较基准、蓄/放热时的温差、双层管的布置方式等,可见影响肋片增强效果的因素很多,但其共性结论为:HTF 与 PCM 的温差越大,肋片增强效果越好;PCM 自然对流可大大缩短熔化时间;添加不抑制 PCM 自然对流的肋片,以及在相同肋体积的占比下,优化肋片结构增大其比表面积,皆可显著提高增强效果。由于在熔化和凝固过程中,皆存在最不利传热区域,增大此区域的肋表面积,在较低肋体积的占比下可获得更好的增强效果。因此优化不抑制 PCM 自然对流的非均布肋片结构是后续研究的主要方向。

表 3 肋片增强传热效果的对比研究结果汇总
Tab. 3 Comparative studies of enhancement heat transfer effects among different fins

文献	年	研究方法	双层管布置 (PCM)	肋片 形状	比较对象 /基准	结论
[23]	2015	实验测试	垂直。 (硬脂酸 60 ℃)	纵向三片 直肋	无肋时/ 管尺寸相同	HTF 入口温度为 80 和 85 ℃ 时,熔化时间分别减少了 12.5% 和 24.5%;HTF 入口温度 24 ℃ 时,凝固时间减少了 43.6%。
[24]	2020	数值模拟	垂直 (石蜡 RT35)	环形肋	无肋时/ 肋片数量不变	均匀肋片阵列的熔化和凝固时间分别减少 41.4% 和 9.7%。非均匀最佳肋片阵列比均匀时的熔化时间减少 23.9%,但对于凝固过程,均匀阵列最好。
[25]	2021	数值模拟	水平 (石蜡)	仿生肋	无肋时/ 管尺寸相同	优化的非对称仿生肋片可将熔化和凝固时间分别缩短 93% 和 80%。
[26]	2021	实验测试 + 数值模拟	水平 (石蜡 49 ℃)	分叉肋	纵向直肋/ 管尺寸及 肋体积相等	分叉肋优于纵向直肋,且肋片排列明显影响熔化时间。与水平呈 45°角且无量纲肋片长度为 0.89 时,熔化时间减少 61.6% (HTF 入口温度 95 ℃)。
[27]	2021	理论模型 + 实验测试	水平 (脂肪酸)	拓扑肋	同上	最佳肋体积的占比为 20%,完全熔化和凝固时间分别缩短 46.8% 和 47.1%。
[28]	2022	数值模拟	垂直 (石蜡 RT35)	雪花肋	同上	雪花肋时能显著提高蓄/放热速率和温度分布均匀性;完全熔化和凝固时间分别缩短 26.9% 和 32.0%。
[29]	2021	实验测试	水平/45°/垂直 (硬脂酸)	螺旋肋	无肋时/ 管尺寸相同	垂直、倾斜和水平设置时的完全熔化时间分别减少了 51.6%,40.97% 和 34.1%。
[30]	2022	实验测试 + 数值模拟	水平 (石蜡 RT50)	纵向和 环形肋	无/管尺寸 及肋体积相同	纵向肋片与内管的接触面积较大,在熔化早期表现更好,但后期限制自然对流;而环形肋片在后期有更好的自然对流和蓄热特性。
[31]	2022	数值模拟	垂直 (月桂酸)	分叉组合	分叉肋片/尺寸 及肋体积相同	分叉组合肋时的完全熔化时间缩短了 68%。肋片间距和传热面积对熔化时间影响较大。

2.1.5 运行参数

既有研究关于 HTF 入口温度影响的结论较为一致,随着入口温度的升高,熔化时间缩短,但缩短

幅度逐渐降低^[12-13,32]。关于 HTF 速度影响的结论并不一致。例如,Seddegh 等人^[12]实验研究结果表明,HTF 流速对熔化过程的影响不明显。Wang 等

人^[32]实验研究结果表明,HTF 入口温度和流速都可明显缩短蓄/放热时间。对比文献[12]和[32]可知,文献[12]研究中的 HTF 流速较大,处于紊流状态,而文献[32]的研究中的 HTF 流速较小,处于层流状态。根据传热过程热阻分析可知,当流速较低时 PCM 侧和 HTF 侧的热阻相当,提高流速可减小传热热阻,故可明显缩短蓄/放热时间;当流速较大时,PCM 侧的热阻起主导作用,增大流速对传热热阻的影响极小,故对蓄放热性能的影响不明显。此外,由于泵功率与流速的 3 次幂成比例,故在保持

HTF 处于紊流状态下,尽量降低 HTF 流速。

2.2 三层直筒管对蓄放热性能的影响

三层直筒管由 3 个同心管构成,中间为 PCM,内、外层为 HTF 流道。该结构形式最早是由 Basal^[33]在 2013 年提出。与双层直筒管相比,传热面积显著增加,故换热效率高,近年来引起较多关注。

2.2.1 肋片

三层直筒管的肋片形式如图 4 所示,其增强效果和比较基准汇于表 4。

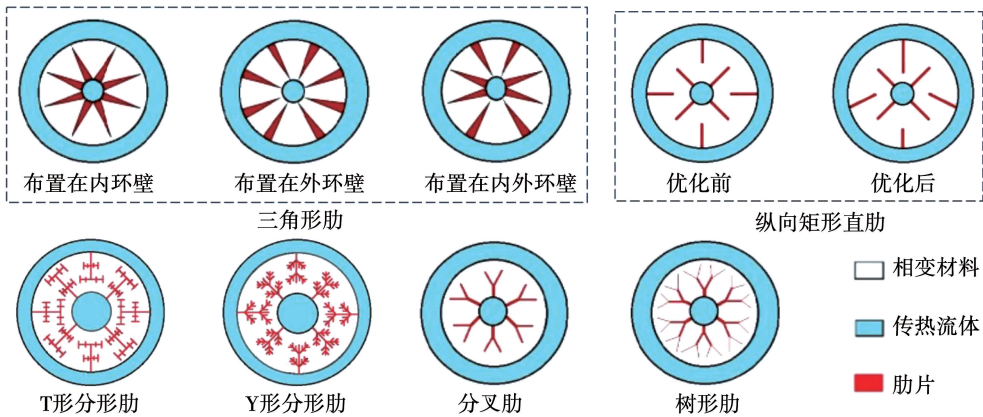


图 4 三层直筒管式的肋片形状示意图

Fig.4 Schematic diagram of fin shapes of straight triple-tubes

表 4 肋片增强传热效果对比汇总

Tab.4 Comparison of enhancement heat transfer effects among different fins

文 献	年份	研究方法	三层管布置	肋片形状	比较对象/基准	结 论
[34]	2015	数值模拟	垂直	环形肋	肋片数量/ 管尺寸相同	研究了肋片数分别为 0,3,5,9 时的蓄热性能。9 个肋片时增强效果最好;肋片数从 5 增加到 9 时的传热增强幅度降低,肋片过多反而抑制 PCM 自然对流,导致增强效果变差。
[35/36]	2017/2018	实验测试 + 数值模拟	水平	三角 形肋	纵向直肋/肋尺 寸和体积相同	PCM 域的外环壁加肋,内环壁加肋和内外环壁同时加肋时,可使熔化时间分别减少 15%,11%,12%;可使凝固时间分别减少 18%,14%,16%。
[37]	2020	数值模拟	水平	T 和 Y 形肋	纵向直肋/ 肋体积相同	T 形和 Y 形肋时的蓄热时间分别缩短了 35.64% 和 33%,放热时间分别缩短了 47.65% 和 43.4%。
[38]	2022	数值模拟	水平	矩形 直肋	优化前后肋/ 肋的数量和 体积相同	响应面法可以有效地分散内部自然对流对各部分的影响,消除熔化“死区”,使整体熔化率保持在较高水平。肋片优化后比优化前的熔化时间减少了 23.87%。
[39]	2022	实验测试 + 数值模拟	垂直	分叉 肋片	纵向直肋/ 肋体积相同	分叉肋片将总熔化时间缩短 27.3%;优化后的分叉肋片将总熔化时间缩短 35.6%。
[40]	2023	理论模型 + 数值模拟	垂直	树形肋	同上	优化树形肋时的熔化和凝固时间分别减少 38.8% 和 32.7%。

由表 4 可知,添加肋片能明显提高蓄/放热性能;较密肋片设置对凝固过程的增强效果优于熔化过程,这是因为较密的肋片抑制了 PCM 的自然对流;在相同肋体积的占比下,高比表面的结构形式和优化布置可显著提高其增强效果;肋片添加在 PCM 域外环壁上的效果更好。

由表 3 和表 4 可知,采用添加肋片的方式增强蓄/放热性能仍是目前比较简单有效的措施;提高肋片结构的比表面积或优化肋片的布置方式皆可明显提高其增强效果。但肋片的添加增大了设备重量和制造成本,降低了蓄能密度。故后续研究需在不抑制 PCM 自然对流的情况下优化肋片结构和布置方式,提高肋片的比表面积,优先扩展熔化和凝固过程中最不利区域的传热面积,提高肋片设置的经济性和系统热效率。

2.2.2 HTF 入口温度和速度

HTF 入口温度和速度对三层直筒管式蓄放热性能的影响规律与双管式的较为一致,即 HTF 入口温度越高,熔化时间越短。当 HTF 流速较低时,提高流速可以增强传热,但处于紊流后再提高流速影响非常小^[41],且在保持内外流体处于紊流状态的前提下,尽量减小质量流率,以提高蓄热系统的(炯)效率。若 HTF 质量流量保持不变时,则在保证内外管的流体处于紊流状态时,优先增加外管的质量流量^[42]。

2.3 多管直筒式对蓄放热性能的影响

多管直筒式 LHSHE,HTF 在管束内流动,PCM 填充在外壳与管束之间,如图 1 所示。由于相邻管束之间存在热干扰,故换热管的排列方式、管径大小、HTF 流速和温度、肋片设置等都会影响蓄/放热速率。近年来,关于多管式的研究逐渐增多。在相同设备体积和 PCM 填充量下,多管式的熔化速率比双层管式的快,且内管数目增加或采用较多的小管径代替较少的大管径等都可有效地缩短 PCM 完全熔化和凝固时间^[6,43]。在相同流通横截面积下,当管束直径从 39.6 mm 变化至 25.0 mm 时,熔化时间缩短了近 25%^[6]。内管数量对熔化时间影响非常显著^[44]。管束排列方式和间距对 PCM 熔化和凝固过程也有一定影响^[5,43-44]。

添加肋片可显著提高多管式相变蓄热换热器蓄/放热性能。例如,在立式多管式 LHSHE 中添加

纵向肋片后大大扩展了传热面积,提高了整体导热系数。因肋片不抑制 PCM 自然对流,故在设备结构尺寸相同情况下,添加肋片后的熔化速率比无肋片时提高 70%^[45]。在相同设备尺寸和肋体积占比 8% 下,添加树状肋片的完全熔化时间比纵向直肋时缩短 34.4%,比无肋时缩短了 80.2%^[46]。同时,添加肋片后改善了 PCM 温度分布的均匀性^[45-46]。可见,在相同外壳尺寸和流通横截面积下,无论将单 HTF 管改为多管,或将大管径的管束改为小管径的管束,还是添加肋片等,都可有效增加传热面积,提高蓄/放热速率,且传热面积增加越多,传热增强效果越好。因此,在相同设备尺寸和 PCM 填充量下,优化结构设计对蓄/放热性能的影响十分显著。关于这方面的研究仍需进一步加强。

关于 HTF 入口温度和流速对多管直筒式蓄放热性能的影响与对双层/三层直筒管式的影响规律是一致的^[6,43,46-47]。

3 螺旋管式蓄放热性能的影响分析

螺旋管式 LHSHE 提出较晚,近年来研究逐渐增多。主要涉及螺旋间距和直径、几何和运行参数等对蓄放热性能的影响。

在相同尺寸下,双层螺旋管比垂直直筒管和水平直筒管的熔化时间分别减少 60% 和 25.7%^[48];三层螺旋管比垂直和水平直筒管的熔化时间分别减少了 44.7% 和 16%,且三层螺旋管垂直布置时的热性能最佳^[49]。现有文献只研究了熔化过程,但根据设备结构和凝固传热过程的特点可推知,与直筒管相比,在低 HTF 流速下,螺旋管的凝固速率明显较快,在高 HTF 流速下并不明显。因此双层和三层螺旋管优于双层和三层直筒管。

HTF 入口温度和速度对螺旋管的影响规律与直筒管类似^[48-50],在此不再赘述。

已有关于螺旋间距和直径对传热性能影响的结论并不一致。Mahdi 等人^[48]在低雷诺数下的数值研究结果显示,螺旋间距对双层螺旋管的熔化时间有明显的影 响,最佳螺旋间距为 2 倍管外直径。而 Najafabadi 等人^[49]在高 HTF 雷诺数下的数值研究表明,螺旋间距的变化对 PCM 熔化过程的影响并不明显,当间距增加 300% 时,熔化过程只提高了 0.6%。Entezari 等人^[50]对三层螺旋管的数值模拟结

果表明,螺旋间距和直径的变化对熔化时间的影响可以忽略不计。故关于螺旋间距和直径,PCM 填充率,倾斜角度等对蓄/放热性能的影响有待进一步研究。

4 其他结构形式

将壳内填充双层直筒管的 HTF 管改为螺旋盘管可明显增加 HTF 与 PCM 之间的传热面积。既有文献主要以实验方式研究了管径、盘管直径和间距等几何参数,HTF 入口温度和速度等运行参数,以及 HTF 盘管的布置方式等对熔化过程的影响^[51-54],但都不涉及凝固过程。虽然随着盘管直径和间距的增大可明显减少熔化时间,但由于凝固过程主要依靠导热来完成,凝固时间反而增加。根据传热过程的热阻分析可知,HTF 采用盘管可明显提高流体侧的对流传热系数,但当流体处于紊流状态时,主要热阻在 PCM 侧。故 HTF 为螺旋盘管的结构形式对蓄/放热性能的综合增强效果低于多管式

或设置肋片的直筒式。

5 不同结构形式间的对比研究

为深入了解结构形式对蓄/放热性能的影响,将结构之间的对比研究汇总于表 5 中。表 5 中的对比研究皆采用了数值模拟方法。

由表 5 可知,无论是双层还是三层直筒管,在相同设备尺寸和 PCM 体积下,将内部 HTF 管改为管束,可大幅度提高设备的热性能。双层及三层螺旋管式的热性能优于相应的直筒管式。在相同 PCM 体积和内部管径下,三层管的传热面积远大于双层管,虽然其熔化和凝固速率显著提高,但设备体积增大,储能密度降低。储能设备体积也是影响其推广应用的关键条件之一,在相同外壳尺寸下,蓄能密度高、蓄/放热速率快的设备更受欢迎,故后续应在相同外壳尺寸和 PCM 填充率下进行蓄/放热性能的对比研究。

表 5 结构对比研究汇总
Tab. 5 Comparative studies of structures

文献	年份	研究对象	比较对象/基准	结 论	蓄能密度
[33]	2013	三层管	双层管,壳内填充/PCM 质量和内部管径相等	PCM 层越厚熔化时间缩短效果越好。PCM 层厚为 3 cm 时,其熔化速率为双层管的 6 倍	减少
[55]	2018	三层管	同上/同上	蓄热过程快,HTF 出口温度低,太阳能热水器的集热效率提高	减少
[19]	2020	三层管(水平椭圆内管)	双层管,管内填充/PCM 质量和内部管径相等	蓄/放热时间分别减少 40.9%/59.2%,单位质量 PCM 的热功率在蓄/放热过程中分别提高 82.0%/143.7%	减少
[47]	2016	三层多管	三层管/PCM 质量和流通面积相等	内部 HTF 管为 4 根时,总熔化时间减少 29%	相等
[56]	2020	双层多管	双层管,壳内填充/PCM 质量和管径总和相等	HTF 管为 2 根时熔化时间减少 57%;为 8 根时的能量储存密度提高 18.2%	增加
[43]	2022	双层多管	双层管,壳内填充/外壳尺寸和 PCM 体积相等	内管数目增多可有效缩短熔化凝固时间;内管间距对凝固过程有一定影响	相等
[48]	2020	双层螺旋管	双层管,壳内填充/尺寸和传热面积相等	比水平和垂直双层管的熔化时间分别减少 25.9% 和 60%	相等
[50]	2021	三层螺旋管	三层管,壳内填充/同上	三层螺旋管的熔化时间比水平和垂直直筒管分别节省了约 16% 和 44.7%。	相等
[57]	2021	双层螺旋管	双层管,壳内填充/PCM 质量和传热面积相等	熔化时间比水平和垂直直筒管分别减少了 27.8% 和 48.5%	相等
		新双层螺旋管	双层直筒和螺旋管,壳内填充/PCM 质量相等	新型双层螺旋管比垂直、水平直筒管和螺旋管的熔化时间分别减少了 76%,66% 和 53%	减少

根据结构特点及传热分析可知,无论双层、三层直筒管式还是螺旋管式,随着结构尺寸的增大和 PCM 填充量的增加,熔化和凝固时间延长,而多管式相变蓄热换热器的熔化和凝固时间可保持不变。故双层、三层直筒管式和螺旋管式适用于蓄热量不多的场所。螺旋管式可与现场其它管线紧密布置,对蓄热量不多、蓄/放热速率需求较快的狭窄空间更加适用。多管直筒式对于蓄热量大、蓄/放热速率高的场所尤其适用。

6 讨论与展望

综合上述分析可知,管内填充优于壳内填充、三管式优于双管式的实质是因增大了传热面和有利于 PCM 自然对流;多管式优于相应双、三层管式的实质是因增大了传热面和缩小了最不利传热区域;双、三层螺旋管式优于相应直筒管式的实质是因螺旋结构显著缩小了最不利传热区域;新双层螺旋管优于螺旋管的实质是因其结构顺应了 PCM 的自然对流。由此可见,增大传热面积,顺应 PCM 自然对流,缩小最不利传热区域皆可有效提高装置的热性能。既有管壳式 LHSHE 的结构设计都未从促进 PCM 自然对流的视角去考虑。因此,充分促进 PCM 自然对流、扩展 HTF 传热面、缩小最不利传热区域的新型结构设计,将成为后续研究的主要方向。

添加不影响 PCM 自然对流的优化肋片,可在较小肋体积的占比下达到较高的增强效果。虽然高比表面肋片能显著提高蓄/放热性能,但降低了蓄能密度,增加了制造成本,抑制了 PCM 自然对流,进而削弱了其在熔化时的增强效果。为提高蓄热设备的技术经济性,添加能优先扩展最不利蓄/放热区域传热面积且不抑制 PCM 自然对流的非均布肋片结构形式,将是未来肋片设置的主要研究方向。

对比采用结构改进和肋片设置增强蓄/放热性能的结果可知,结构改进可在不降低蓄能密度的情况下显著提高增强效果,而肋片的设置势必降低蓄能密度。因此,结构改进明显优于肋片设置。结构改进仍是后续研究的重点。

既有关于 LHSHE 热性能的研究几乎都是在某一特定结构尺寸下进行的,提高幅度受几何因素影

响较大,缺少可比性。为扩大研究结果的适用性,后续应在无量纲参数(壳管径比,PCM 填充率,肋体积的占比等)下进行热性能研究。

既有管壳式 LHSHE 的冷/热 HTF 流经同一通道,只能交替地蓄热和放热,不能在蓄热的同时高效地向用户供热,无法较好地解决可再生能源在强度上不匹配问题。为促进可再生能源和余热的高效利用,实现在蓄热的同时能够向用户高效供热的新型设备研发将成为后续研究的重点方向之一。

对于相变蓄热技术而言,成本控制是决定其发展前景的重要因素,但到目前为止,现有对比研究(如表 4 与 5)都只针对管壳式 LHSHE 蓄/放热性能的提高,并未涉及经济性分析,但随着相变蓄热技术研究的深入,在后续研究中经济性分析将会受到重视。

7 结 论

通过对管壳式 LHSHE 既有研究成果的分类总结、对比分析和讨论,可得出如下结论:

(1) 高蓄能密度 LHSHE 的蓄/放热性能,管内填充双层管优于壳内填充;壳内填充水平优于垂直,45°倾斜布置最优;三层直筒式优于双层;多管直筒式优于相应的双/三层直筒式;螺旋管式优于相应的直筒管式;结构改进优于肋片设置。

(2) HTF 与 PCM 温差越大,蓄/放热速率越快,肋片增强效果越好,但温差取决于工程实际;HTF 流速低时,提高流速可缩短熔化和凝固时间,HTF 流速高且处于紊流状态时,增加流速几乎无影响,为减少泵功率,在保持 HTF 处于紊流状态时应尽量降低流速。

(3) 充分利用 PCM 自然对流和 HTF 传热面的新型结构设计;无量纲参数下的热性能研究;不抑制 PCM 自然对流的非均布肋片的结构优化设置;实现在蓄热的同时高效地向用户供热的新型设备研发,将是未来重点研究方向。

参考文献:

[1] ABDULATEEF A M, MAT S, ABDULATEEF J, et al. Thermal performance enhancement of triplex tube latent thermal storage using fins-nano-phase change material technique [J]. Heat Transfer En-

- gineering, 2018, 39(12): 1067–1080.
- [2] NEMATPOURKESHTALI A, LASIELLO M, LANGELLA G, et al. Enhancing PCMs thermal conductivity: a comparison among porous metal foams, nanoparticles and finned surfaces in triplex tube heat exchangers [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022, 212: 118623.
- [3] XU Y, LI M J, ZHENG Z G, et al. 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.
- [4] HUANG X B, CHEN X, LI A, et al. Shape-stabilized phase change materials based on porous supports for thermal energy storage applications [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019, 356: 641–661.
- [5] 陈久林. 管壳式相变蓄热器热性能分析及结构优化[J]. *热能动力工程*, 2022, 37(7): 93–101.
- CHEN Jiu-lin. Thermal performance analysis and structural optimization of shell-and-tube phase change accumulator [J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 2022, 37(7): 93–101.
- [6] 李 椿, 王志华, 王建春, 等. 壳管式相变储能换热器性能研究与场协同效应分析[J]. *太阳能学报*, 2020, 41(3): 226–233.
- LI Chun, WANG Zhi-hua, WANG Jian-chun, et al. Performance study and field synergy analysis of shell and tube phase change energy storage heat exchanger [J]. *Acta Energetica Sinica*, 2020, 41(3): 226–233.
- [7] SEDDEGH S, WANG X L, HENDERSON A D. A comparative study of thermal behavior of a horizontal and vertical shell-and-tube energy storage using phase change materials [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 93: 348–358.
- [8] HAN G S, DING H S, HUANG Y, et al. A comparative study on the performances of different shell-and-tube type latent heat thermal energy storage units including the effects of natural convection [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2017, 88: 228–235.
- [9] KOUSHA N, HOSSEINI M J, ALIGOODARZ M R, et al. Effect of inclination angle on the performance of a shell and tube heat storage unit – an experimental study [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 112: 1497–1509.
- [10] MEHTA D S, SOLANKI K, RATHOD M K, et al. Influence of orientation on thermal performance of shell and tube latent heat storage unit [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 157: 113719.
- [11] SOROUR M M, HASSAB M A, ZAYTOUN M M, et al. The effect of inclination angle on the performance characteristic of a double-pipe latent heat storage unit [J]. *Journal of Energy Storage*, 2021, 34: 102202.
- [12] SEDDEGH S, WANG X L, TOYBARI M M, et al. Investigation of the effect of geometric and operating parameters on thermal behavior of vertical shell-and-tube latent heat energy storage systems [J]. *Energy*, 2017, 137: 69–82.
- [13] AKYUREK E F, YOLADI M. An experimental investigation on melting and solidification behavior of phase change material in cylindrical latent heat storage units with mini-channel [J]. *Journal of Energy Storage*, 2021, 41: 102938.
- [14] DARZI A R, FARHADI M, SEDIGHI K. Numerical study of melting inside concentric and eccentric horizontal annulus [J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2012, 36(9): 4080–4086.
- [15] YAZICI M Y, AVCI M, AYDIN O, et al. On the effect of eccentricity of a horizontal tube-in-shell storage unit on solidification of a PCM [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2014, 64: 1–9.
- [16] MODI N, WANG X L, NEGNEVITSKY M. Melting and solidification characteristics of a semi-rotational eccentric tube horizontal latent heat thermal energy storage [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022, 214: 118812.
- [17] ZHOU H, WEI L Y, CAI Q L, et al. Annulus eccentric analysis of the melting and solidification behavior in a horizontal tube-in-shell storage unit [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2021, 190: 116752.
- [18] TAO Y B, LIU Y K, HE Y L. Effects of PCM arrangement and natural convection on charging and discharging performance of shell-and-tube LHS unit [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, 115: 99–107.
- [19] CHEN G J, SUN G X, JIANG D Y, et al. Experimental and numerical investigation of the latent heat thermal storage unit with PCM packing at the inner side of a tube [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, 152: 119480.
- [20] HOSSEINI M J, RANJBAR A A, RAHIMI M, et al. Experimental and numerical evaluation of longitudinally finned latent heat thermal storage systems [J]. *Energy and Buildings*, 2015, 99: 263–272.
- [21] YANG X H, WANG X Y, LIU Z, et al. Effect of fin number on the melting phase change in a horizontal finned shell-and-tube thermal energy storage unit [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2022, 236: 111527.
- [22] TIARI S, HOCKINS A, SHANK K. Experimental study of a latent heat thermal energy storage system assisted by varying annular fins [J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 55: 105603.
- [23] RATHOD M K, BANERJEE J. Thermal performance enhancement of shell and tube latent heat storage unit using longitudinal fins [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 75: 1084–1092.
- [24] SHAHSAVAR A, GOODARZI A, MOHAMMED H I, et al. Thermal performance evaluation of non-uniform fin array in a finned double-pipe latent heat storage system [J]. *Energy*, 2020, 193: 116800.

- [25] TIAN Y, LIU X L, XU Q, et al. Bionic topology optimization of fins for rapid latent heat thermal energy storage [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2021, 194: 117104.
- [26] SAFARI V, ABOLGHASEMI H, KAMKARI B. Experimental and numerical investigations of thermal performance enhancement in a latent heat storage heat exchanger using bifurcated and straight fins [J]. *Renewable Energy*, 2021, 174: 102–121.
- [27] ZHANG T W, LU G F, ZHAI X Q. Design and experimental investigation of a novel thermal energy storage unit with phase change material [J]. *Energy Reports*, 2021, 7: 1818–1827.
- [28] 张永学, 王梓熙, 鲁博辉, 等. 雪花型翅片提高相变储热单元储/放热性能[J]. *储能科学与技术*, 2022, 11(2): 521–530.
ZHANG Yong-xue, WANG Zi-xi, LU Bo-hui, et al. Enhancement of charging and discharging performance of a latent-heat thermal-energy storage unit using snowflake-shaped fins [J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2022, 11(2): 521–530.
- [29] MEHTA D S, VAGHELA B, RATHOD M K, et al. Heat transfer enhancement using spiral fins in different orientations of latent heat storage unit [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2021, 169: 107060.
- [30] LIU Y K, TAO Y B. Experimental and numerical investigation of longitudinal and annular finned latent heat thermal energy storage unit [J]. *Solar Energy*, 2022, 243: 410–420.
- [31] LUO X M, GU J A, MA H Q, et al. Numerical study on enhanced melting heat transfer of PCM by the combined fractal fins [J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 45: 103780.
- [32] WANG Y, WANG L, XIE L, et al. Experimental study on the melting and solidification behavior of erythritol in a vertical shell-and-tube latent heat thermal storage system [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016, 99(1): 770–780.
- [33] BASAL B, ÜNAL A. Numerical evaluation of a triple concentric-tube latent heat thermal energy storage [J]. *Solar Energy*, 2013, 92: 196–205.
- [34] JMAL I, BACCAR M. Numerical study of PCM solidification in a finned tube thermal storage including natural convection [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 84: 320–330.
- [35] ABDULATEEF A M, MAT S, SOPIAN K, et al. Experimental and computational study of melting phase-change material in a triplex tube heat exchanger with longitudinal/triangular fins [J]. *Solar Energy*, 2017, 155: 142–153.
- [36] ABDULATEEF A M, ABDULATEEF J, MAT S, et al. Experimental and numerical study of solidifying phase-change material in a triplex tube heat exchanger with longitudinal/triangular fins [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2018, 90: 73–84.
- [37] 赵明, 田扬, 胡明禹, 等. 三套管式相变蓄热器分形肋片设计及(焓)耗散分析[J]. *热能动力工程*, 2020, 35(2): 148–154.
- ZHAO Ming, TIAN Yang, HU Ming-yu, et al. Fractal fins design and entransy dissipation analysis of three-tube type phase change thermal accumulator [J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 2020, 35(2): 148–154.
- [38] HUANG X Y, YAO S G, YANG X H, et al. Melting performance assessments on a triplex-tube thermal energy storage system: optimization based on response surface method with natural convection [J]. *Renewable Energy*, 2022, 188: 890–910.
- [39] SHI S S, NIU J Y, WU Z H, et al. Experimental and numerical investigation on heat transfer enhancement of vertical triplex tube heat exchanger with fractal fins for latent thermal energy storage [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2022, 198: 123386.
- [40] SHEN Y L, MAZHAR A R, ZHANG P W, et al. Structure optimization of tree-shaped fins for improving the thermodynamic performance in latent heat storage [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2023, 184: 108003.
- [41] YANG K, ZHU N, CHANG C, et al. Numerical analysis of phase-change material melting in triplex tube heat exchanger [J]. *Renewable Energy*, 2020, 145: 867–877.
- [42] YANG K, ZHU N, LI Y Z, et al. Effect of parameters on the melting performance of triplex tube heat exchanger incorporating phase change material [J]. *Renewable Energy*, 2021, 174: 359–371.
- [43] 高杨, 张树坤, 许玲, 等. 石蜡/石墨烯相变材料在多管换热器中的储热性能[J]. *青岛科技大学学报(自然科学版)*, 2022, 43(1): 77–85.
GAO Yang, ZHANG Shu-kun, XU Ling, et al. Heat storage performance of paraffin/graphene phase change material in multi-tube heat exchanger [J]. *Journal of Qingdao University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2022, 43(1): 77–85.
- [44] MA X, ZHANG Q, WANG J Q, et al. Sensitivity analysis and optimization of structural parameters of a phase change material based multi-tube heat exchanger under charging condition [J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 56: 105940.
- [45] KHAN Z, KHAN Z A. Experimental investigations of charging/melting cycles of paraffin in a novel shell and tube with longitudinal fins based heat storage design solution for domestic and industrial applications [J]. *Applied Energy*, 2017, 206: 1158–1168.
- [46] SONG L P, WU S C, YU C, et al. Thermal performance analysis and enhancement of the multi-tube latent heat storage (MTLHS) unit [J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 46: 103812.
- [47] ESAPOUR M, HOSSEINI M J, RANJBAR A A, et al. Phase change in multi-tube heat exchangers [J]. *Renewable Energy*,

2016,85:1017 – 1025.

[48] MAHDI M S,MAHOOD H B,MAHDI J M,et al. Improved PCM melting in a thermal energy storage system of double-pipe helical-coil tube [J]. Energy Conversion and Management, 2020, 203:112238.

[49] NAJAFABADI M F,FARHADI M,ROSTAMI H T. Numerically analysis of a phase-change material in concentric double-pipe helical coil with turbulent flow as thermal storage unit in solar water heater [J]. Journal of Energy Storage,2022,55:105712.

[50] ENTEZARI S,TAHERI A,KHATIBI M,et al. Acceleration of melting process of phase change material using an innovative triplex-tube helical-coil storage unit: three-dimensional numerical study [J]. Journal of Energy Storage,2021,39:102603.

[51] RAHIMI M,HOSSEINI M J,GORZIN M. Effect of helical diameter on the performance of shell and helical tube heat exchanger: an experimental approach [J]. Sustainable Cities and Society, 2019,44:691 – 701.

[52] MAHDIA M S,MAHOODB H B,KHADOM A A,et al. Experimental investigation of the thermal performance of a helical coil latent heat thermal energy storage for solar energy applications [J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2019, 10: 287 – 298.

[53] 李培涛,田 瑞,辛 浩,等. 圆柱形等距螺旋盘管式相变蓄热装置蓄热性能研究 [J]. 可再生能源, 2019, 37 (3): 463 – 468.

LI Pei-tao,TIAN Rui,XIN Hao,et al. Study on heat storage performance of spiral coil phase change thermal storage device [J]. Renewable Energy Resources,2019,37(3):463 – 468.

[54] PUNNIAKODI B M S,SENTHIL R. Experimental study on melting enhancement of phase change material in a vertical cylindrical latent heat storage using a short concentric helical heat transfer tube [J]. Journal of Energy Storage,2021,41:102879.

[55] EIBAHJAOUI R,QARNIA H E. Thermal performances analysis of combined solar collector with triple concentric-tube latent heat storage systems [J]. Energy and Buildings,2018,168:438 – 456.

[56] PARK S H,PARK Y G,KA M Y. A numerical study on the effect of the number and arrangement of tubes on the melting performance of phase change material in a multi-tube latent thermal energy storage system [J]. Journal of Energy Storage, 2020, 32:101780.

[57] WOLOSZYN J,SZOPA K,CZERWINSKI G. Enhanced heat transfer in a PCM shell-and-tube thermal energy storage system [J]. Applied Thermal Engineering,2021,196:117332.

(姜雪梅 编辑)



从先进核能和可再生能源中直接捕获空气的研究

据官网报道,研究人员将研究利用先进的核能和可再生能源为德克萨斯州休斯顿附近的直接空气捕获(DAC)区域中心提供动力的可行性。作为拟议研究的一部分,研究人员将评估使用通用日立公司的 BWRX-300 小型模块化反应堆(SMR)为 DAC 系统提供动力。

直接空气捕获(DAC)技术直接从任何地点的大气中提取二氧化碳,然后,碳可以储存在地质基础中或用于各种应用,例如可作为可持续航空燃料的原料。该项目完成后,每年可从空气中清除 100 万吨的二氧化碳。开发 DAC 区域中心的几个初期项目旨在推广能够从大气中捕获二氧化碳并将其储存在佛罗里达州塔斯卡卢萨集团和科罗拉多州丹佛-朱尔斯堡盆地地下的技术。

通用日立公司的 BWRX-300 是通用公司的沸水反应堆设计的第十次演变。300 MW 水冷反应堆的设计以该公司的经济简化沸水反应堆(ESBWR)为基础,该反应堆已获得美国核管理委员会的许可。

(孙嘉忆摘译自 [www. powerengineeringint. com](http://www.powerengineeringint.com))