

文章编号: 1671-6612 (2024) 04-451-08

# 气泡扰动作用下 相变储热器内木糖醇的熔化凝固特性

王彬睿 陈徐烨钊 邵雪峰 袁艳平

(西南交通大学机械工程学院 成都 610031)

**【摘要】** 木糖醇相变材料因其特有的强过冷特性而有望用于长周期储热, 为了研究气泡扰动对储热系统内部熔化凝固特性的影响, 设计搭建了一个相变储热器, 填充 4kg 木糖醇, 用 143℃ 导热油从室温开始加热熔化, 进行了通气和不通气两个工况; 完全融化后以 3℃ 导热油开始冷却凝固过程, 进行了通气、不通气和自然冷却三个工况。在加热融化过程中, 通气工况下加热管道上侧近端和远端的平均温度上升明显, 分别增加了 7.1℃ 和 9.4℃, 且加热管道左右两侧和下侧的平均温度高于上侧约 5℃。在冷却凝固过程中, 储热器中间截面的平均温度高于两侧截面 5℃ 左右, 且远离中心管道空间位置的温度更高, 并且气泡扰动能使得热量利用提前, 耗时缩短 3/4, 同时将木糖醇材料的结晶温度提升了大约 20℃。上述研究为相变储热器的结构优化设计提供了实验基础和参考依据。

**【关键词】** 相变储热; 气泡扰动; 熔化; 凝固; 木糖醇

中图分类号 TK02 文献标志码 A

## Melting and Solidification Characteristics of Xylitol in Phase Change Heat Storage under the Action of Bubble Disturbance

Wang Binrui Chenxu Yeke Shao Xuefeng Yuan Yanping

(School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031)

**【Abstract】** Xylitol phase change materials (PCMs) are promising for long-term thermal energy storage due to their unique strong undercooling characteristics. To investigate the influence of bubble disturbance on the melting and solidification characteristics within thermal storage systems, a phase change thermal energy storage unit was designed and constructed in this study. The unit was filled with 4 kg of xylitol and heated from room temperature using 143℃ thermal oil to initiate melting under two conditions: with and without ventilation. After complete melting, the system was cooled using 3℃ thermal oil to initiate solidification under three conditions: with ventilation, without ventilation, and natural cooling. During the heating and melting process, the average temperatures at the proximal and distal ends of the heating pipeline increased significantly under ventilation conditions, rising by 7.1℃ and 9.4℃ respectively. Additionally, temperatures on the left, right, and lower sides of the heating pipeline were approximately 5℃ higher than those on the upper side. During the cooling and solidification process, the average temperature of the central cross-section of the thermal storage unit was about 5℃ higher than that of the side cross-sections, with temperatures further away from the central pipeline being higher. Bubble disturbance facilitated heat utilization advancement, reducing processing time by three-quarters and increasing the crystallization temperature of xylitol by approximately 20℃. This research provides an experimental foundation and reference for the structural optimization of phase change thermal energy storage

作者简介: 王彬睿 (1998.05-), 男, 在读硕士研究生, E-mail: mushan@my.swjtu.edu.cn

通讯作者: 袁艳平 (1973.06-), 男, 博士, 教授, E-mail: ypyuan@home.swjtu.edu.cn

收稿日期: 2024-04-17

systems.

【Keywords】 Phase change heat storage; Bubble disturbance; Melting; Solidification; Xylitol

## 0 引言

2020年9月22日,国家主席习近平在第七十五届联合国大会上宣布,中国力争2030年前二氧化碳排放达到峰值,努力争取2060年前实现碳中和。碳排放量的降低必然涉及能源结构的转型,大力发展太阳能、风能等清洁能源势在必行,但却存在间歇性和周期性的缺点。其中一个解决办法是能源存储,储热技术可以有效解决能源生产与利用的不匹配问题。长时储能和相变储能技术的应用已经在多个领域展现出了潜力<sup>[1]</sup>,尤其在太阳能热能储存和工业余热利用等方面,为长时储热领域的可行性提供了初步验证<sup>[2]</sup>。

经过学者大量的实验研究,部分多元醇和水合盐类因其特有的强过冷特性而有望用于长时储能系统。在结晶过程中,实际结晶温度总是低于理论结晶温度,这种现象被称为过冷现象,而实际结晶温度 $T_c$ 和理论结晶温度 $T_m$ (即材料的熔点)之间的温差被称为过冷度( $\Delta T_{sup}$ ,  $\Delta T_{sup}=T_m-T_c$ )。这类特殊的相变材料,在低于自身熔点的温度时很难自发地结晶,相变潜热能够稳定地存储在材料内部,正因为材料的过冷特性,热能有望于长周期热能存储而几乎没有损耗。

木糖醇( $T_m=93.3^\circ\text{C}$ ,  $\Delta H_m=237.5\text{J/g}$ )是醇类材料的一种,其最开始是被用作一种工业代糖,有预防龋齿的功效<sup>[3]</sup>。因其具有高潜热、储能密度大、无色无味无毒等物理性质使得它被选做潜热热能存储的热门材料。木糖醇的熔点大约为 $93^\circ\text{C}$ 左右,可以应用于废热温度在 $100^\circ\text{C}$ 以上的工业余热等场景<sup>[4]</sup>。但是它的过冷特性十分严重,熔化的木糖醇在自然状态下几乎不可能自然结晶,存储在木糖醇内部的潜热很难被释放利用。同时其结晶速率很低,如果不加干预,热量只能以极低的效率缓慢释放出来<sup>[5]</sup>。

气泡触发技术是一种高效的触发高过冷度材料结晶的技术<sup>[6]</sup>。这种低侵入性技术非常容易在标准储存容器中实施和操作,占用的容器空间微乎其微,因此对能量储存密度的影响也微乎其微。此外,气泡搅拌还能产生扰动,促进热量储存和回收过程中的对流传热。

强过冷木糖醇相变材料因其具有较高的相变潜热和相变温度<sup>[7]</sup>合适的特点而被认为是储热器的理想选择<sup>[8]</sup>,诸多学者对其开展了相关研究。Miguel Navarro等人<sup>[9]</sup>通过两种不同的实验室规模原型来评估了不同机制对木糖醇材料结晶的促进作用;其中一个包括一个机械搅拌系统,而另一个采用气体气泡扰动机制。在气泡扰动系统原型中对木糖醇的热功率和放出能进行了评价,并研究了过冷对放出功率和放出能的影响。Louis Piquard等人<sup>[10]</sup>对木糖醇所涉及的成核机制进行了详细的分析,然后确定耦合播种和气泡扰动是对成核触发技术的改进,对机械搅拌和气泡扰动搅拌进行了参数化研究,最后提出了木糖醇过冷表面成核的第一个模型,强调了木糖醇粘度的影响。

在此基础上,也有部分学者将木糖醇应用于相变储能系统中进行研究。Louis Piquard等人<sup>[11]</sup>研究了木糖醇作为PCM在42kWhth的壳管潜热蓄热系统中集成气泡扰动和播种系统的可行性,之后讨论了优化播种步骤的好处和垂直温度均匀化对传热和储热性能的影响。Sung Ho Choi等人<sup>[12]</sup>提出了将气泡注入方法应用于相变材料(PCM),以提高潜热储能(LHTES)的充电性能。在相同的流动条件下,对有无气泡注入进行了对比评价。同时采用了阴影成像和粒子图像测速(PIV)等可视化技术分析液体PCM的相变规律和流场。

现有多数研究主要证明了一些能够触发过冷PCM结晶的有效手段,针对过冷相变材料本身的研究较多,但尚未详细探究储热器腔体内各空间相变材料在熔化凝固过程中的热特性。本研究基于气泡扰动技术,探讨气泡扰动作用下木糖醇相变储热器内部不同位置在熔化凝固过程中的变化情况。通过深入研究和分析热传递机制和热流动规律,为改进相变储能技术提供重要参考<sup>[13]</sup>,实现更高效、可靠的能源储存和利用。

## 1 相变储热腔体设计

在实验开始阶段,搭建了如图1所示的实验装置台,图中与恒温槽连接的管道表示液体通路,与氮气瓶连接的管道表示气体通路,与数据采集单元

连接的为热电偶。其主要组成部分如表 1 所示。

此外, 储热器腔体由中间的 HTF 管道和下侧的气体管道构成, 并且 HTF 管道上还均匀嵌套了三个测量卡片, 用作热电偶的附着位点。所有实验设备可大致分为以下三个主要系统: 核心储热系统、油浴循环系统以及气泡发生系统。主要有加热和冷却两个过程, 均采用导热油作为传热介质, 加热过程作为热源, 冷却过程作为冷源。

为了实现储热过程中内部相变材料 (PCM)

各点温度的测量, 设计了图 1 所示的温度测量卡, 选取 A、B、C 三个不同测温截面, 每个截面均嵌套一个温度测量卡, 提供热电偶安装位点, 每个截面有 5 个温度测点。考虑壳管式 LHTES 的特性, 轴向温度分布近似均匀, 但受盖板和 HTF 流动影响, 温度波动可能较大, 故 A 和 B 测温卡位置稍向两侧移动, 利用数据采集仪 Agilent 34970A 将温度信号传至计算机储存, 每分钟采集一次温度数据。

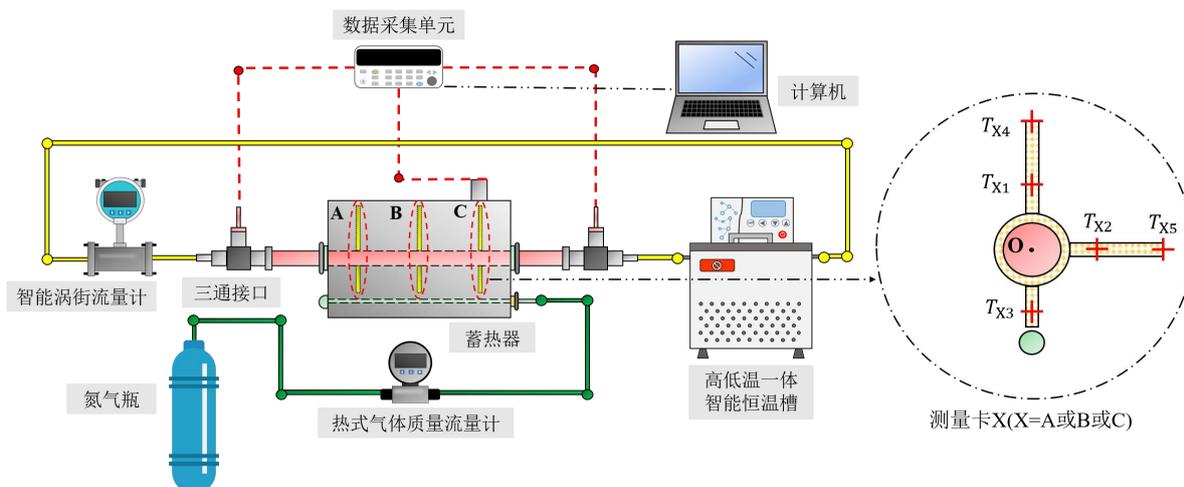


图 1 储热器原理图

Fig.1 Schematic diagram of heat accumulator

表 1 实验系统部件参数及作用

Table 1 Parameters and functions of experimental system components

分区	部件名称	详情参数	作用
换热区	智能涡街流量计	型号	KDC-0510AZ
		数显分辨率	0.01℃
		温度波动度	±0.05℃
		可控温度范围	-120~200℃
数据采区	数据采单元	型号	Agilent 34970A
		数量	1 台
		接收温度数据信号	
气泡发生区	热式气体质量流量计	型号	AMS2106
		量程	0~200L/min
		精度	±3%F.S.
		供货公司	捷力自动化公司
	氮气瓶	容积	40L
		压力	13MPa
			存储高压氮气
			提供惰性氛围

## 2 实验方法

储热过程，对 143℃ 加热过程进行了对应的通气实验，在加热时间 1000min 开始通入气体，研究气泡扰动在加热熔化过程中对木糖醇储热器内部的传热特性影响。释热过程，如表 2 所示，以自然冷却为对比工况，主要研究了在 3℃ 冷却温度条件下气泡扰动对于木糖醇储热器内部传热特性的影响，氮气的流量结合本实验实际情况和文献调研，确定为 3L/min。由于木糖醇是一种具有强过冷的相变材料，在高于其熔点的温度水平是不可发生结晶的，所以实验选定在检测到储热器内部  $T_{A1}$  温度测点降低到木糖醇熔点 93℃ 时开始通入氮气，将此选定为开始通入氮气的时间条件。

表 2 实验工况参数

序号	加热温度	冷却温度	是否通气	气体流量
工况 1	143℃	自然冷却	不通气	无
工况 2	143℃	3℃	不通气	无
工况 3	143℃	3℃	通气	3L/min

为了进一步研究熔化凝固过程储热器内部各个测点的温度变化情况，分别研究了通气和不通气加热过程储热器内部木糖醇几何平均温度、截面平均温度和圈层平均温度的变化情况，具体定义如下列公式所示：

几何平均温度：

$$T_{\text{几何平均}X} = \frac{T_{AX} + T_{BX} + T_{CX}}{3} \quad (X=1,2,3,4,5) \quad (1)$$

截面平均温度：

$$T_{\text{截面平均}Y} = \frac{T_{Y1} + T_{Y2} + T_{Y3} + T_{Y4} + T_{Y5}}{5} \quad (Y=A,B,C) \quad (2)$$

圈层平均温度：

$$T_{\text{内圈}} = \frac{\sum_{i=1}^3 (A_i + B_i + C_i)}{9} \quad (3)$$

$$T_{\text{外圈}} = \frac{\sum_{i=4}^5 (A_i + B_i + C_i)}{6} \quad (4)$$

在壳和管中间的环形空间填充 PCM（木糖醇），需要注意的是，PCM 在储释热过程中其相态会在固液两相之间变化，通常来说，固态 PCM 的密度会比液态 PCM 小，所以在释热过程中，随着 PCM 从液态变成固态，其所占据的总体积也会变大，所以在顶部预留总体积大约 15% 的空间，以适应 PCM 的体积变化，避免因为体积膨胀对容器

壁施加过大压力，造成壁面损坏或者其他危害。

此外，实验过程中用到的木糖醇材料物性参数<sup>[14]</sup>在表 3 中详细给出。

表 3 木糖醇物性参数

名称	数值
化学式	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> OH
分子量	152
纯度	99%
熔点	94.3℃
熔化潜热	220.7kJ/kg
固体平均比热容	2.8kJ/kg·K
液体平均比热容	1.5kJ/kg·K

## 3 结果分析

### 3.1 熔化特性

如图 2、图 3 所示，分别为加热过程不通气和通气条件储热器内部各测点温度随时间变化图，两组对比试验中油浴循环温度都设置为相同的 143℃，该温度高于木糖醇熔点 50℃，以保证木糖醇完全熔化。

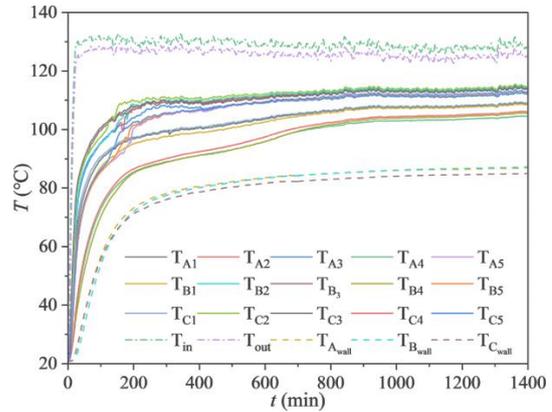


图 2 143℃ 加热过程（不通气）各测点温度

Fig.2 Temperature of various measurement points during heating process at 143℃ (without bubbles)

以图 2 所示的不通气条件下的加热过程为例，在加热的初始阶段，木糖醇的温度快速上升，这表明在加热初期，木糖醇迅速吸收热能。然而随着时间的推移，温度的上升速度开始放缓，这一变化预示着热传递过程的复杂性增加。当温度达到木糖醇的熔点时，出现一个明显的平台期，在这一阶段，温度的变化不再明显，这是因为木糖醇开始熔化，吸收大量的潜热，这部分能量被用于改变物质的状

态而非升高温度。这一过程是相变储能技术中的关键环节,它能够在不显著增加温度的情况下储存大量热能。一旦木糖醇的熔化过程完成,温度会进一步上升。此时,木糖醇继续吸收热量,但这部分热能主要是以显热的形式被储存,直接导致温度的升高,直到加热过程结束。在整个加热过程中,木糖醇先后经历了快速升温、相变储热和显热储热三个阶段。

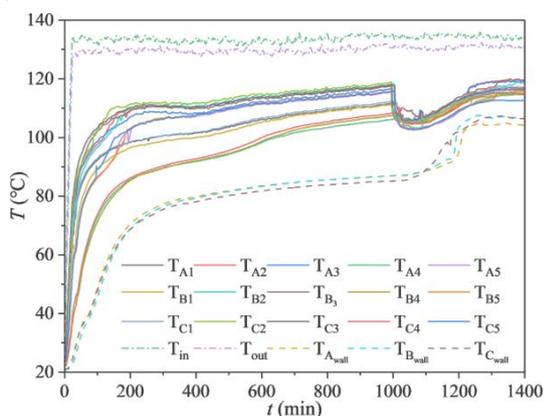


图 3 143°C加热过程(通气)各测点温度

Fig.3 Temperature of various measurement points during heating process at 143°C (with bubbles)

如图 3 所示,在加热时间达到 1000min 时开始通入氮气,气体流量大小设定为 3L/min,在气泡加强扰动下保持运行 400min,内部温度场发生波动变化后又重新恢复并维持新的稳定水平。开始通入气体时刻( $t=1000\text{min}$ ),内部平均温度降低,壁面平均温度升高,这是由于室温气体(氮气)进入储热器内部,带来一部分冷量,使得内部木糖醇的温度在短时间有一个下降趋势,并且扰动产生强制对流使得储热器内部热量朝壁面边界传导的结果。但是随着持续扰动以及加热时间延长,内部平均温度能够回升到略高于原平均温度水平,并且壁面平均温度的二次稳定水平会得到显著提高,较初始稳态温度提升 22.5%,使得下壁面外侧维持在明显高于木糖醇熔点的温度水平,进一步确保储热器腔体内部 PCM 材料的完全融化。实验结果表明,气泡扰动对于加热过程中的热量存储有着明显的正向促进作用。

此外,在加热熔化最开始阶段无法通入氮气,因为木糖醇的熔化是沿着 HTF 加热管道沿四周逐渐延伸的,而熔化初始阶段,气管附近的木糖醇仍处于固体状态,在内部并没有形成有效的气体通

路,依旧是一种堵塞状态,在不同加热时刻尝试通入氮气,1000min 是一个较为合适的能够有效通入气体的时间。

在不通气条件下,即便对储热器进行了较长时间的稳定加热,内部的温度场还是不均匀的,因为内部中心的高温和外界环境的低温不可避免会存在温度梯度,导致 PCM 温度从 HTF 管道中心向储热腔体四周壁面逐渐下降,越靠近加热铜管的位置,PCM 存储的相变潜热和显热越多,热量存储的表现越优秀,而在远离加热铜管的地方,尤其是那些靠近储热器不锈钢腔体壁面的空间位置,热量存储较低,气体的扰动有效地改善了这一能量利用低下的现象。基于此,在后续储热器腔体的设计,尤其是加热管道和气体管道的安装布置上,应优先考虑增大传热覆盖的空间范围,使得储热器腔体内部各个空间位点能够有均匀的受热,并且气管的开口布置应该最大限度地覆盖边角区域,形成强制对流,以获得更好的储热释热表现。

如图 4、5、6 所示,分别为开始通入气体后( $t=1000\text{min}$ ),通气与不通气工况的几何平均温度、截面平均温度和圈层平均温度的对比图。几何平均温度就是储热器沿轴向的平均温度,截面平均温度和圈层平均温度则是从径向的角度去衡量储热器内部的温度水平,在本研究中给与了新定义,以便更好地地区分理解。

通气后几何位置 1 ( $T_{A1}$ 、 $T_{B1}$ 、 $T_{C1}$ ) 和几何位置 4 ( $T_{A4}$ 、 $T_{B4}$ 、 $T_{C4}$ ) 的平均温度变化最为明显,再次稳定平均温度分别上升了 7.1°C 和 9.4°C,可见气泡扰动对于位于加热铜管上侧的 PCM 温度有更明显的影响。几何位置 2、3 处的平均温度处于最高水平,因为这些温度测点布置最为接近中心 HTF 的加热铜管,同时也是由于重力作用下冷热 PCM 密度不均匀而产生自然对流的影响。此外,在 A、B、C 三个截面的平均温度表现出良好的一致性,通气过后三个截面平均温度均有略微上升,但是截面 C 的平均温度会低于截面 A 和截面 B,分析储热器的结构设计,是因为截面 C 的正上方正对出气口,与外界大气相连,进入储热器腔体所有气体均经过截面 C 最终回到外界环境,更多的低温气体带来更多的冷量,换热也更剧烈,因而截面 C 的平均温度会更低。基于此,在后续储热器的结构优化设计上,还需要重点考虑腔体填料口和气孔的尺寸安

装位置,这直接影响到气体在储热器腔体内部的流动路径,进而影响储热能力及热量利用。此外,外圈的平均温度水平会低于内圈,因为理想状态下熔化是沿着中心加热管道沿径向朝周围逐渐延伸的。

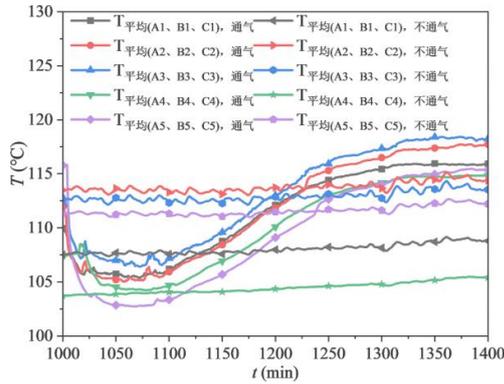


图 4 通气与不通气工况几何平均温度对比图

Fig.4 Geometric average temperature comparison between bubbling and non-bubbling conditions

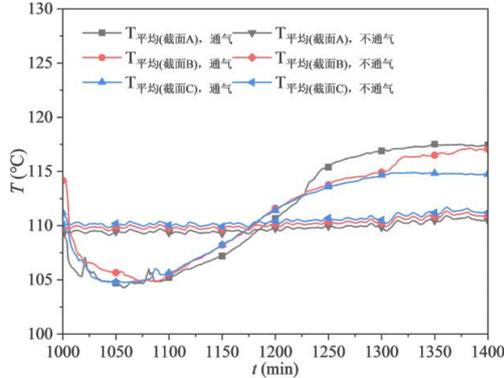


图 5 通气与不通气工况截面平均温度对比图

Fig.5 Cross-sectional average temperature comparison between bubbling and non-bubbling conditions

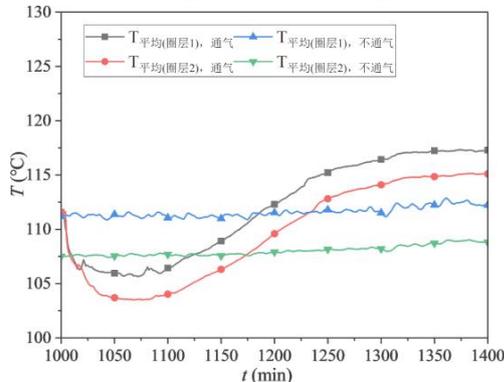


图 6 通气与不通气工况圈层平均温度对比图

Fig.6 Circle layer average temperature comparison between bubbling and non-bubbling conditions

### 3.2 凝固特性

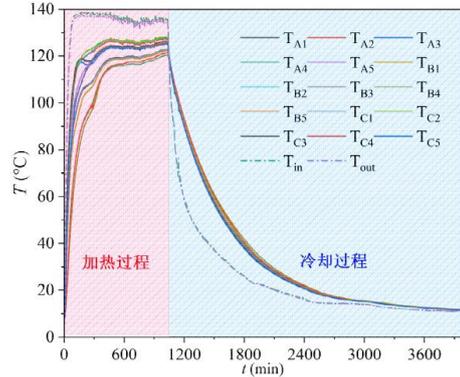


图 7 “加热-自然冷却”全过程各测点温度

Fig.7 Temperature of various measurement points during the whole process of heating and natural cooling

如图 7 所示,为“加热熔化-凝固放热”全过程储热器腔体内部所有温度测点随时间变化曲线图,整个实验过程分为加热熔化和冷却凝固两个大的过程。固体 PCM 从室温开始,不断接收来自 HTF 的热量,温度逐渐升高,最后完全熔化,内部温度水平保持稳定,之后开启冷却循环或自然冷却,温度逐渐降低至冷却循环温度或者环境温度保持稳定。在没有冷却介质的干预下,储热器内部 PCM 的降温过程相对来说是缓慢的。

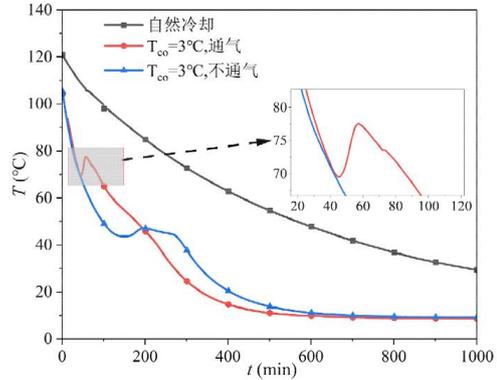


图 8 三工况冷却过程木糖醇平均温度

Fig8. The average temperature of xylitol in three cooling conditions

图 8 所示为三个对比工况储热器内部木糖醇平均温度随时间变化的曲线图,其中自然冷却对照组仅是随着时间的推移平稳下滑,并没有明显的温度波动,说明并没有发生结晶释热现象。其余两条曲线则是在通气或是不通气的条件下进行的 3°C 恒定温度的冷却循环,从图示局部放大图可见有明显的“放热驼峰”,说明储热器内部的木糖醇经历了结晶释热的相变过程,大量的潜热释放不仅补偿了

低温冷却循环导热油所需要吸收的热量, 还使得储热器内部整体的平均温度得到明显的回升。总的来说, 自然冷却状态下, 储热器内部 PCM 热量释放是一个缓慢的过程, 冷却介质的引入增加了换热速率, 气泡扰动则进一步强化了储热器腔体内部的传热传质, 使热量在更短的时间内得到更充分的利用, 耗时仅为不通气工况的 1/4, 同时也将木糖醇材料的结晶温度提升了大约 20℃。

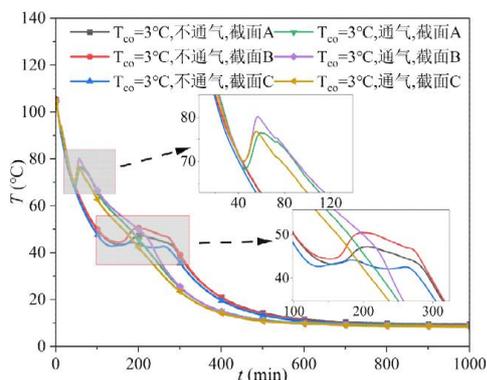


图 9 3℃冷却通气与不通气工况截面平均温度

Fig.9 Cross-sectional average temperature under 3°C cooling with and without bubbles

图 9 是 3℃冷却通气与不通气工况储热器内部木糖醇截面平均温度随时间变化图。在不通气条件下, 截面 B 的平均温度水平高于两侧的截面 A 和截面 C, 偏高 5℃左右, 这是因为截面 A 和截面 C 靠近储热器两侧壁面, 和外界换热强度更高, 热损失相较于中间截面 B 会更多。并且截面 C 的平均温度水平最低, 冷却过程虽然没有通气, 但是截面 C 的正上方是直接和外界大气连通的, 相较于具有对称位置的截面 A 而言, 热损失更加严重, 因而温度处在最低水平。在通气条件下, 截面 A、截面 B 和截面 C 的温度高低水平具有相同的分布规律。在理想情况下, 储热器腔体和外界环境之间没有热量传递, 储热器内部每个径向截面的温度分布大致相同, 可以简化为一个二维传热问题, 但从实验结果可知, 实际应用中无法做到完全绝热, 因为热量的损耗不可避免, 在越靠近储热器腔体中间的截面温度越高, 热量表现效果越好, 越靠近储热器的壁面边界, 截面温度越低, 这还同时受到气孔开孔位置的影响。基于此, 可以在腔体两侧部位增厚材料的厚度, 以减少热应力长期作用对储热器腔体产生的损伤。

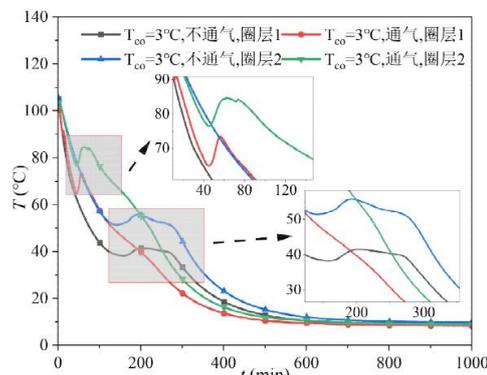


图 10 3℃冷却通气与不通气工况圈层平均温度

Fig.10 Circle layer average temperature under 3°C cooling with and without bubbles

图 10 是 3℃冷却通气与不通气工况储热器内部木糖醇圈层平均温度随时间变化图。通气较不通气工况的热量利用更为提前, 但均是外圈的温度水平高于内圈, 同时刻外圈温度要高 10℃左右, 这与加热过程内圈温度高于外圈完全相反。这是由于不论是加热还是冷却过程, HTF 所带来的热量和冷量均是以中心铜管为中心向四周辐射的。加热过程, 越靠近导热铜管温度越高, 导热油提供的热量被内圈的 PCM 吸收, 之后才逐步传递到外圈的材料中; 与之相反的冷却过程, 越靠近导热铜管温度越低, 存储在木糖醇相变材料中的显热和潜热, 在内圈更接近铜管的位置散失得更快, 因而外圈材料中存储的热量延迟释放, 温度会更高。并且在气泡扰动下, 温度回升的幅度大约为不通气工况的 2 倍。基于此, 在储热器的结构优化设计中, 可以使储热器腔体内更多的相变材料处于导热铜管的“内圈”范围以获得更好的热量利用表现, 比如采用多根并列排布的导热管<sup>[15]</sup>, 或者将导热管设计成蛇形盘管的样式等。

图 11 和图 12 是 3℃冷却通气与不通气工况储热器内部木糖醇几何平均温度随时间变化图。处于外圈的几何位置 4 和几何位置 5, 不论是通气工况还是不通气工况, 二者的温度都比内圈所处几何位置的平均温度要高, 且均有几何位置 4 比几何位置 5 的平均温度高, 在不通气工况下前者平均偏高 5℃, 若在通气工况下, 二者温差被进一步放大, 平均温差变为原来的 2 倍以上。这是由于在重力作用下自然对流造成的复杂传热传质的影响, 并且在气泡扰动的条件下, 外圈上侧的温度水平进一步提升。处于内圈的几何位置 1、2 和 3, 不通气条件

下,内圈左右两侧的温度高于内圈上侧,内圈上侧高于内圈下侧,同样是对流效应产生的结果;但是在通气条件下,内圈上侧的温度高于内圈左右两侧,内圈下侧温度最低,也就是说,从储热器腔体底部发出的气泡扰动,改变了储热器腔体内部原来形成的温度分区,使得几何位置 1 的温度维持在内圈的领先水平。通过这部分实验结果,深入地揭示了在冷却过程中储热器腔体内部各个空间几何位置的温度情况,存在明显的热量分区,热量更多集中分布在上层材料中,气泡的扰动更能促进形成这样的热量分布,在储热器腔体下部甚至底部,不可避免地存在热量利用不充分的区域,基于此,后续关于储热系统的升级改造应该着重关注这些问题。

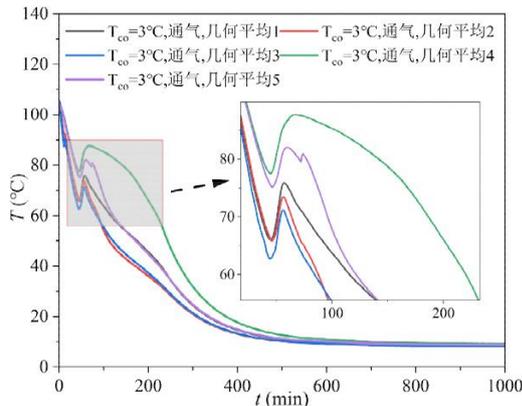


图 11 3°C 冷却通气工况几何平均温度

Fig.11 Geometric average temperature under 3°C cooling with bubbles

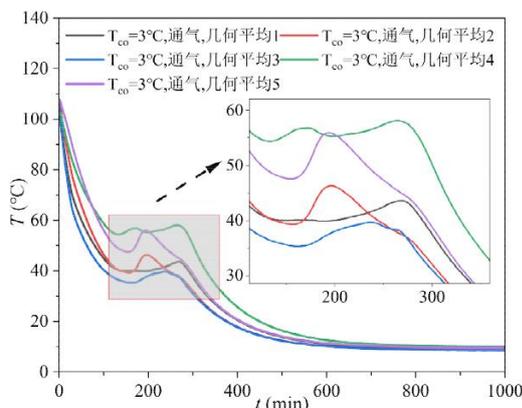


图 12 3°C 冷却不通气工况几何平均温度

Fig.12 Geometric average temperature under 3°C cooling without bubbles

#### 4 结论

(1) 储热器加热融化过程, 通气工况几何位

置 1 ( $T_{A1}$ 、 $T_{B1}$ 、 $T_{C1}$ ) 和几何位置 4 ( $T_{A4}$ 、 $T_{B4}$ 、 $T_{C4}$ ) 的平均温度变化最为明显, 再次稳定平均温度分别上升了 7.1°C 和 9.4°C, 几何位置 2、3 处的平均温度最高, 在 A、B、C 三个截面的平均温度表现出良好的一致性, 外圈的平均温度水平低于内圈, 温差大约为 7°C。

(2) 储热器冷却凝固过程, 越靠近腔体中间截面的平均温度越高, 实验条件下截面 B 比截面 A 和 C 的平均温度高 5°C 左右。外圈的平均温度高于内圈, 温差大约为 10°C。不论是内圈还是外圈, 通常是圈层上侧的温度高于两侧, 两侧的温度高于下侧, 通气使得几何位置 4 和几何位置 5 的温差变为原来的 2 倍以上。此外, 储热腔体底部存在热量利用不充分的区域。

(3) 气泡扰动能够有效地改善传热和增强储热能力, 将热量有效利用的时间缩短 3/4, 同时将木糖醇材料的结晶温度提升了大约 20°C。

#### 参考文献:

- [1] 房丛丛, 钱焕群. 相变蓄热技术及其应用[J]. 节能, 2011, 30(11):27-30.
- [2] Cano D, Funéz C, Rodriguez L, et al. Experimental investigation of a thermal storage system using phase change materials[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 107:264-270.
- [3] Seppälä A, Meriläinen A, Wikström L, et al. The effect of additives on the speed of the crystallization front of xylitol with various degrees of supercooling[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2010, 34(5): 523-527.
- [4] Duquesne M, Palomo Del Barrio E, Godin A. Nucleation Triggering of Highly Undercooled Xylitol Using an Air Lift Reactor for Seasonal Thermal Energy Storage[J]. Applied Sciences, 2019, 9(2):267.
- [5] Diarce G, Rojo A, Quant L, et al. Thermal endurance of xylitol as a phase change material for thermal energy storage applications[J]. Journal of Energy Storage, 2022, 55:105717.
- [6] Godin A, Duquesne M, Del Barrio E P, et al. Bubble agitation as a new low-intrusive method to crystallize glass-forming materials[J]. Energy Procedia, 2017, 139: 352-357. (下转第471页)