

蓄冰球内定向凝固过程蓄冷特性的实验研究

郭俊菲¹, 王欣怡¹, 宋宇佳¹, 杨肖虎^{1,2}, 何雅玲²

(1. 西安交通大学人居环境与建筑工程学院, 710049, 西安;

2. 西安交通大学热流科学与工程教育部重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 为了探究球形相变介质动态蓄冷过程的传热特性及冷却边界条件对凝固过程的影响,对蓄冰球中纯水凝固过程进行了实验研究。选取一个半球形蓄冷单元为研究对象,设计并搭建了可视化蓄冷实验系统,通过获取相变过程的实时温度响应和凝固界面推移,以分析球形介质相变凝固过程的换热机理。实验结果表明:蓄冰球纯水凝固过程中,固液相界面随着时间呈圆形逐渐向内推移;不同半径同心球球面的温度响应相同,自然对流影响微弱;冷却边界条件温度越低,蓄冷速率越快,与 -7°C 时相比, -5°C 、 -6°C 时可分别缩短凝固阶段用时55%、28.3%,为工程实践中球形蓄冷设备的蓄冷性能提升提供了一定的参考。

关键词: 相变;蓄冷;温度响应;可视化蓄冷实验

中图分类号: TK124 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202107021 **文章编号:** 0253-987X(2021)07-0186-07



OSID 码

Experimental Study on the Characteristics of Cold Storage During Directional Solidification Process in Ice Ball

GUO Junfei¹, WANG Xinyi¹, SONG Yujia¹, YANG Xiaohu^{1,2}, HE Yaling²

(1. School of Human Settlements and Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Key Lab of Thermo-Fluid Science and Engineering of MOE, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To further explore the heat transfer characteristics in dynamic cold storage process of the spherical phase change medium and the influence of cooling boundary condition on the solidification process, the solidification process of distilled water in an ice ball was experimentally studied. A visualized experimental system for cold storage was calibrated and set up. A semi-spherical cold storage unit was selected as the test object, enabling the capture of the transient solidification front. The real-time temperature response of the phase change process and the transition of the solidification interface were obtained. The experimental results showed that the solid-liquid interface gradually moved inward in a circular shape over time. The temperature responses of concentric spheres with different radiuses kept the same. The influence of natural convection was weak and could be ignored. The lower the temperature of the cooling boundary condition was, the faster the transition speed of the phase interface would be. Compared with -5°C and -6°C , the temperature of -7°C can shorten the solidification time by 55% and 28.3%, respectively. This work may provide a reference for improvement and optimization of the cold storage performance in engineering practices.

Keywords: phase change; cold storage; temperature response; visual cold storage experiment

收稿日期: 2021-01-18。 作者简介: 郭俊菲(1997—),女,硕士生;杨肖虎(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51976155);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(xtr042019019)。

网络出版时间: 2021-04-16

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20210416.1315.010.html>

近年来,电力需求显著增加,且昼夜供需严重不平衡。建筑空调系统是电力资源的主要耗能终端之一,呈现出白天负荷高、夜晚负荷低的显著峰谷特性。蓄冷空调技术作为一种具有重要的社会和经济双重效益的供冷新技术^[1-2],通过利用夜间谷电相变蓄冷以削减白天峰电制冷需求,有利于电力削峰填谷。冰球蓄冷技术是冰蓄冷空调常用的一种形式,具有广泛的应用。对相变材料(PCM)蓄冷/释冷动态过程的热物理特性和改善后期传热恶化的研究离不开对蓄冰球内凝固相变过程的深入理解。学者们对此进行了一系列实验和数值模拟研究^[3-8]。

刘圣春等搭建了多组分溶液表面凝固性能研究装置,对纯水和不同浓度氯化钠溶液在不同材料表面的凝固特性进行了实验研究^[9]。Anish 等实验研究了不同相变材料(赤藻糖醇、棕榈酸和硬脂酸)的凝固融化行为^[10-11]。白青松等搭建了固液相变可视化测量系统,对方腔中内嵌通孔金属泡沫的蓄冰过程开展了实验研究,结果表明:未凝固相局部自然对流导致凝固相界面发生倾斜,呈现下部略快于上部的凝固界面^[12]。王华生等对圆环形腔内的凝固问题进行研究,得到了热阻法近似解,结果表明圆环形腔蓄冷量大而蓄冷时间又短的最佳半径比为 0.15~0.25^[13]。贾敬芝通过数值模拟分析方法探究了冰球式蓄冷槽内冰球冻结和放热特性,错排方式能够提高冰球在预冷阶段的冷却速率,从而降低冻结时间^[14],在解冻过程中,错排方式融冰相变过程的时间明显小于顺排方式,而融冰后的显热阶段两种排列方式的差异不大。张鲁燕等建立了蓄冷球的封闭空间二维模型,并考虑了固相与液相的密度差的影响,通过对该球非固定融化过程的传热传质数值模拟,获得了球体内部温度场及液相体积比随时间变化的规律,讨论了不同传热温差和球径对蓄冷时间及蓄冷特性的影响,结果表明蓄冷球半径越大相界面移动速度越慢,融化时间显著增加^[15]。仇中柱等建立了 3 种不同蓄冷球球径堆叠方式的相变蓄冷装置模型,对其进行了数值模拟以研究其内部传热及相变特性,探究了不同流速和不同直径的蓄冷球内凝固率变化^[16]。陈晨等采用焓-多孔度法追踪固液相界面,分析了蓄冷腔体尺寸和几何形状对凝固时间和相界面演化的影响^[17]。Ling 等利用 VO-SET 和 IBM 耦合模型模拟凝固和融化过程的相界面变化^[18]。Kant 等对 PCM 融化和凝固过程中的传热过程进行了数值模拟研究,探究了恒、变(正弦)热源对融化时间的影响^[19]。Hong 等对冰球式蓄冷

系统相变换热过程进行了数值优化研究,建立了单个冰球和蓄冰槽系统的流动传热模型,对冰球内部温度和固液相界面变化进行了分析^[20-22]。

综上所述,众多文献中针对多种相变蓄能材料的凝固/融化特性进行了探究,但对于封装纯水的单个球形蓄冷单元的凝固过程和传热过程缺乏可视化实验观测。凝固相界面的动态推进特性决定了蓄冷材料温度分布、蓄冷量随时间的变化规律。本文以封装纯水的半球形蓄冷单元为研究对象,在恒温冷却条件下,对凝固过程中的相变传热行为进行了可视化观测,记录了相界面推移和温度分布等关键热过程参量,为后期冰蓄冷空调性能优化提供工程参考。

1 实验设计

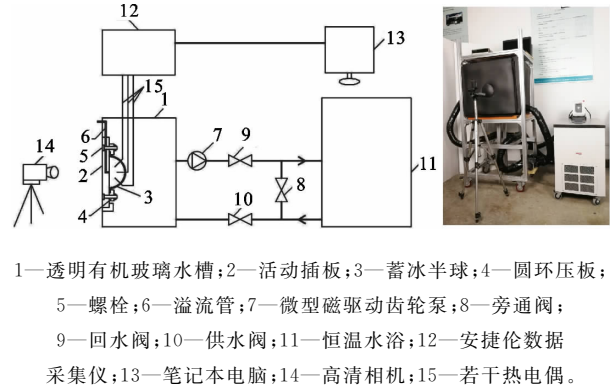
1.1 实验方案

为了可视化观测凝固过程中相界面的推移过程,以及探究蓄冰球内纯水凝固过程的传热特性,设计了两个实验组:实验 1 是可视化观测组,实验过程中每隔 3 min 进行一次拍照记录,通过改变有机玻璃水槽中乙二醇冷媒的温度,从而改变其所提供的冷却边界温度(-5、-6、-7℃),实现 3 种实验工况,研究不同冷却边界条件对蓄冰球内纯水凝固过程中凝固行为特性的影响;实验 2 是温度观测组,通过在不同半径的同心半球内沿经线、纬线布置测点,记录在初温相同、冷却边界条件为-5、-6、-7℃时相变材料的温度分布。对沿经线不同纬度和径向测点的温度变化作分析,揭示球体内相变介质凝固过程的换热机理。

1.2 实验系统

固液相变传热可视化实验系统如图 1 所示,该系统主要包括相变换热装置、冷媒循环系统、数据采集单元 3 大模块。相变换热装置是本实验系统的核心测试部分,冷媒循环系统为蓄冰半球提供恒定的球面温度边界条件,其中恒温水浴的温控精度为 0.1℃。数据采集单元包括温度采集单元和图像采集单元。温度采集单元记录相变材料(纯水)的实时温度数据,图像采集系统实时观测并记录凝固过程中的相界面形貌及瞬态位置。在回水管路上设有回水阀和微型磁驱动齿轮泵,供水管路上设有供水阀,在供回水管路之间还设有旁通管路。在实验过程中,微型磁驱动齿轮泵自带的调频器用于调节进入水槽的乙二醇冷媒流量从而使水槽内液面保持平衡,微型磁驱动齿轮泵以及恒温水浴自带的循环泵

用于提供冷媒循环动力。壁厚为 20 mm 的透明有机玻璃水槽外覆聚氨酯泡沫保温层(导热系数为 $0.02\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$),用于降低冷量损失。



1—透明有机玻璃水槽;2—活动插板;3—蓄冰半球;4—圆环压板;
5—螺栓;6—溢流管;7—微型磁驱动齿轮泵;8—旁通阀;
9—回水阀;10—供水阀;11—恒温水浴;12—安捷伦数据采集仪;13—笔记本电脑;14—高清相机;15—若干热电偶。
图 1 固液相变传热可视化实验系统示意图
Fig. 1 Schematic diagram and photo of experimental system

相变换热测试装置由蓄冰半球、活动插板、圆环压板等组成。蓄冰半球为半径 40 mm、边缘圆环 10 mm 的紫铜金属半球。活动插板、圆环压板均由高透明有机玻璃料制作而成,活动插板内部设有排液孔和排气孔,排液孔和排气孔与上部的溢流管进行连接,与半球壳的接边圆环配合面上设有密封垫圈槽,并与密封垫圈进行配合。本实验选用铜-康铜 T 型热电偶(Omega-T),测量温度范围为 $-200\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 260\text{ }^{\circ}\text{C}$,热电偶直径为 0.255 mm,热响应时间为 0.1 s。所有热电偶在测试前均由校准系统(Omega CL3515R)进行校准,测量不确定度估计为 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

温度测量时,利用 Agilent 34970A 数据采集仪采集实时温度数据,每隔 1 s 采集一次数据,测量误差为 $\pm 1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。温度测点分为两组,一组布置于透明有机玻璃水槽内,水槽内温度测点布置设计图如图 2 所示。水槽的 X 轴、Z 轴方向各放置一条软木棒,Y 轴平行放置两条软木棒,使用 AB 胶与水槽固定连接,软木棒均为 40 mm,每隔 10 mm 布置一个热电偶测点,将热电偶用细丝缠绕包裹固定于软木棒上,并用 AB 胶固定,将热电偶检测端裸露在水槽内,与乙二醇冷媒接触。该组温度测点将实时监测水槽内温度均匀性,保障实验精确性,避免由于蓄冰半球边界冷却条件不均匀带来的实验误差。水槽内外壁面布置温度测点, T_{in} 和 T_{out} 分别是内壁和外壁的温度,用作估算有机玻璃水槽的冷量损失。

另一组温度测点布置于半球内,在半球球壳选定两条相互垂直的经线和纬线,沿着该经/纬线每隔 30° 均匀布置 9 个温度测点。将细木棒从孔穿入球壳内部并指向球心。在半径 R 分别为 10、20、30

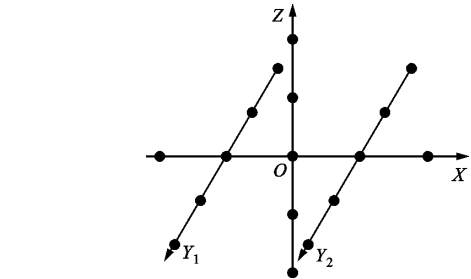


图 2 水槽内温度测点布置设计图
Fig. 2 Arrangement design of temperature measuring points in water tank

mm 的同心球面上分别布置 9 个温度测点,在球心处布置一个温度测点,共 28 个温度测点。图 3 给出了半球内温度测点设计。每个温度测点的编号及位置见表 1。

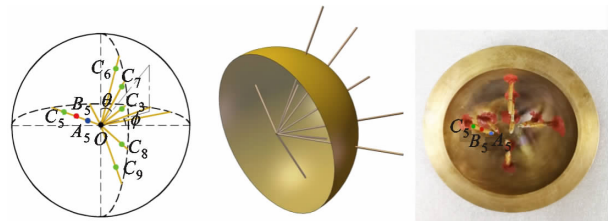


图 3 半球内温度测点设计图及实物图
Fig. 3 Schematic diagram and photo of temperature measuring points in ice storage hemisphere

表 1 球内温度测点编号及位置			
Table 1 Number and location of temperature measuring points in ice storage hemisphere			
编号	测点位置	编号	测点位置
A_1	$(10, \pi/2, \pi/6)$	B_1	$(20, \pi/2, \pi/6)$
A_2	$(10, \pi/2, \pi/3)$	B_2	$(20, \pi/2, \pi/3)$
A_3	$(10, \pi/2, \pi/2)$	B_3	$(20, \pi/2, \pi/2)$
A_4	$(10, \pi/2, 2\pi/3)$	B_4	$(20, \pi/2, 2\pi/3)$
A_5	$(10, \pi/2, 5\pi/6)$	B_5	$(20, \pi/2, 5\pi/6)$
A_6	$(10, \pi/6, \pi/2)$	B_6	$(20, \pi/6, \pi/2)$
A_7	$(10, \pi/3, \pi/2)$	B_7	$(20, \pi/3, \pi/2)$
A_8	$(10, 2\pi/3, \pi/2)$	B_8	$(20, 2\pi/3, \pi/2)$
A_9	$(10, 5\pi/6, \pi/2)$	B_9	$(20, 5\pi/6, \pi/2)$
C_1	$(30, \pi/2, \pi/6)$	C_2	$(30, \pi/2, \pi/3)$
C_3	$(30, \pi/2, \pi/2)$	C_4	$(30, \pi/2, 2\pi/3)$
C_5	$(30, \pi/2, 5\pi/6)$	C_6	$(30, \pi/6, \pi/2)$
C_7	$(30, \pi/3, \pi/2)$	C_8	$(30, 2\pi/3, \pi/2)$
C_9	$(30, 5\pi/6, \pi/2)$	O	$(0, 0, 0)$

1.3 实验过程

把蓄冰半球内填满蒸馏水,将蓄冰半球内的空

气通过排气孔和溢流管排出,蓄冰半球通过活动插板与圆环压板使用螺栓紧固。在水槽中充注质量分数为 31.2% 的乙二醇-水溶液(冷媒),打开恒温水浴、关闭供回水阀、打开旁通阀,温度设定为实验工况所需温度进行内循环,使部分冷媒迅速降至低温。待降至所需温度关闭旁通阀,打开供水阀、回水阀,打开微型磁驱动齿轮泵进行外循环,使水槽内冷媒温度降低到所需温度并保持恒定,将安装好蓄冰半球的活动插板迅速放入水槽中。连通数据采集仪、笔记本电脑和高清相机并开始实验,同时监测蓄冰半球中纯水凝固过程中的相变材料的实时温度响应、相界面形貌及瞬态位置。待观测到蓄冰半球中纯水已完全凝固且半球内球心处温度与水槽中水温接近,表明凝固过程已结束,实验结束。

1.4 不确定度分析

本实验中,主要的监测变量是蓄冰过程中的温度变化,温度的测量采用 T 型热电偶及安捷伦数据采集器(Agilent 34970A)进行数据采集,测量过程中产生的测量误差可按式^[23]计算

$$\delta T = \pm \sqrt{(\delta T_a)^2 + (\delta T_b)^2 + (\delta T_c)^2} \quad (1)$$

式中: δT 为热电偶测温系统的总误差; δT_a 为热电偶在其测温范围内的允许误差, Omega T 型热电偶在其测温范围内的允许误差为 $\pm 0.1^\circ\text{C}$; δT_b 为热电偶补偿导线误差, T 型热电偶的补偿导线误差约等于 0; δT_c 为仪表误差, Agilent 34970A 数据采集器对应的 T 型热电偶误差为 $\pm 1.0^\circ\text{C}$ 。

综上所述,本实验过程中温度测量的总误差为

$$\delta T = \pm \sqrt{0.1^2 + 0^2 + 1.0^2} = \pm 1.0^\circ\text{C} \quad (2)$$

由上面的计算结果可知,采用 Agilent 34970A 数据采集器通过 Omega T 型热电偶测量温度的误差为 $\pm 1.0^\circ\text{C}$, 该直接测量误差能够满足实验要求,说明实验数据可靠性较高。

2 实验结果讨论

2.1 相界面形貌变化及推移过程

图 4 给出了在冷却边界条件 T_w 为 -7°C 、初温 T_i 为 25°C 工况下,充注蒸馏水的蓄冰半球从初始状态到完全凝固整个过程中各阶段固液相界面的推移过程。呈现出固液相界面随着时间由外向内、由球面向球心逐渐推移的变化过程。

由相界面可视化的结果分析,从蓄冰半球放入低温环境开始至完全凝固,蓄冰半球内的相变材料经历了降温阶段和凝固阶段两个阶段。由图 4 可

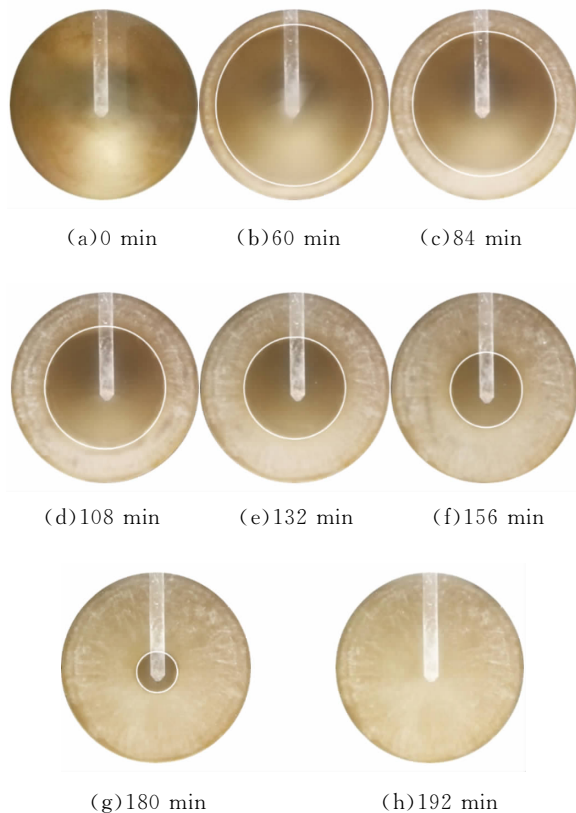


图 4 $T_w = -7^\circ\text{C}$ 、 $T_i = 25^\circ\text{C}$ 时的固液相界面推移过程

Fig. 4 Process of solid-liquid interface transition at $T_w = -7^\circ\text{C}$ and $T_i = 25^\circ\text{C}$

见,降温阶段为从放入恒低温环境初始时刻至 60 min,凝固阶段为 60~192 min。

在降温阶段,随着时间变化积累蓄冰半球内的相变材料区域逐渐呈现由球壳指向球心的锥状浑浊体为冰浆混合物,并未凝固形成冰。由此可知,降温阶段相变材料在温差驱动下进行冷量交换。由于铜半球具有良好的导热性能,因此冷量迅速传递。在此阶段中,蓄冰半球内的相变材料主要发生显热变化进行显热蓄冷,无明显相变行为。

当 60 min 时球壳界面处生长出了冰层,开始进入凝固阶段。在观测面上冰层沿周向区别不明显,厚度近似相同,这是因为在凝固阶段初期重力影响不大,自然对流现象不明显,导热为主要热量传递方式。84 min 时固液相界面开始明显变化,由图 4 可看出,固液相界面大致呈圆形,由球壳至球心逐渐推移,与冷量传递方向一致,周向变化基本保持一致,靠近球壳处冰层颜色比靠近相界面处颜色更深,表明外层冰层更密实。在整个凝固阶段中,蓄冰半球内的相变介质进行潜热蓄冷,固液相界面随着时间由外向内、由球面向球心处呈圆形逐渐推移。

2.2 测点温度变化分析

2.2.1 沿径向测点温度变化 图5给出了初温 25°C 、冷却边界条件 -7°C 时,通过球心的径向4个温度测点 O 、 A_3 、 B_3 、 C_3 的温度变化曲线。可将温度变化曲线分为降温阶段、凝固阶段、二次降温阶段、恒温阶段4个阶段。在降温阶段,球内温度从初始温度(室温)在短时间内急剧下降至 0°C ,进行显热蓄冷。到达相变材料凝固点时,进入凝固过程,测点温度保持不变,此时进行潜热蓄冷。当温度二次降低进入二次降温阶段,表明相变过程已结束,此时进行显热蓄冷。当球内所有温度测点的温度降至与冷却边界温度近似时,表明蓄冷过程结束。

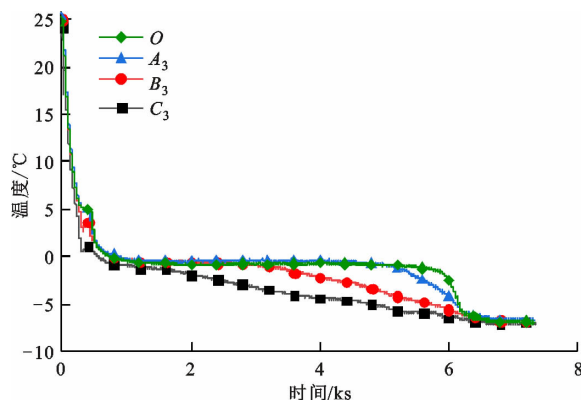


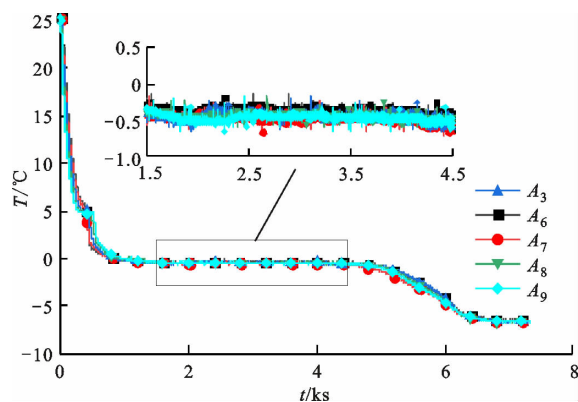
图5 沿通过球心径向方向4个温度测点温度变化

Fig. 5 Temperature changes at four temperature measuring points along the radial direction through the center of the sphere

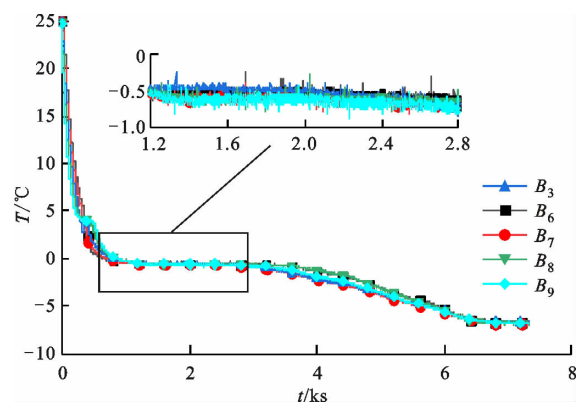
2.2.2 沿经线不同纬度测点温度变化 图6给出了初温 25°C 、冷却边界条件 -7°C 时, R 分别为10、20、30 mm时半球上沿经线不同纬度5个温度测点温度变化。由图可见,在整个实验记录过程中,不同纬度的温度测点的温度变化规律相同,由凝固阶段的局部放大图可见,同一经线上不同纬度的测点温度凝固阶段始终保持相同,同时进入凝固阶段完成相变行为。由上述分析可见,在球形相变介质相变过程中,沿经线不同纬度测点的热物理行为特性保持基本一致,反映出重力对其内部温度分布无显著影响,在蓄冰半球纯水凝固过程中自然对流影响微弱。

2.3 冷却边界条件的影响

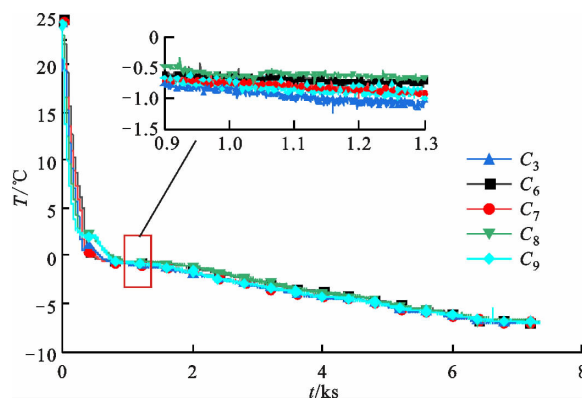
图7给出了初温 25°C 、不同冷却边界条件对径向温度变化的影响。如图7a所示,对于 R 为10 mm球面平均温度变化,即冷却边界条件对其球形相变介质内部区域的凝固阶段用时有显著影响:冷却边界温度越低,凝固阶段用时越短,与 -7°C 相比, -5 、 -6°C 工况下可分别缩短凝固阶段用时



(a) $R=10\text{ mm}$



(b) $R=20\text{ mm}$



(c) $R=30\text{ mm}$

图6 不同半径面沿经线不同纬度测点温度变化

Fig. 6 Temperature changes at different latitudes along the meridian of different radius

55%、28.3%; -5°C 工况下凝固阶段用时近似为 -7°C 工况下的2倍, -6°C 工况下凝固阶段用时近似为 -7°C 工况下的1.5倍。在二次降温阶段,温度下降迅速,用时近似,均为2 300 s。

从图7b可以看出, -5°C 工况下凝固阶段用时近似为 -7°C 的1.5倍。图7c给出了对于 R 为30 mm时,即蓄冰半球靠近冷却边界处,不同冷却边界

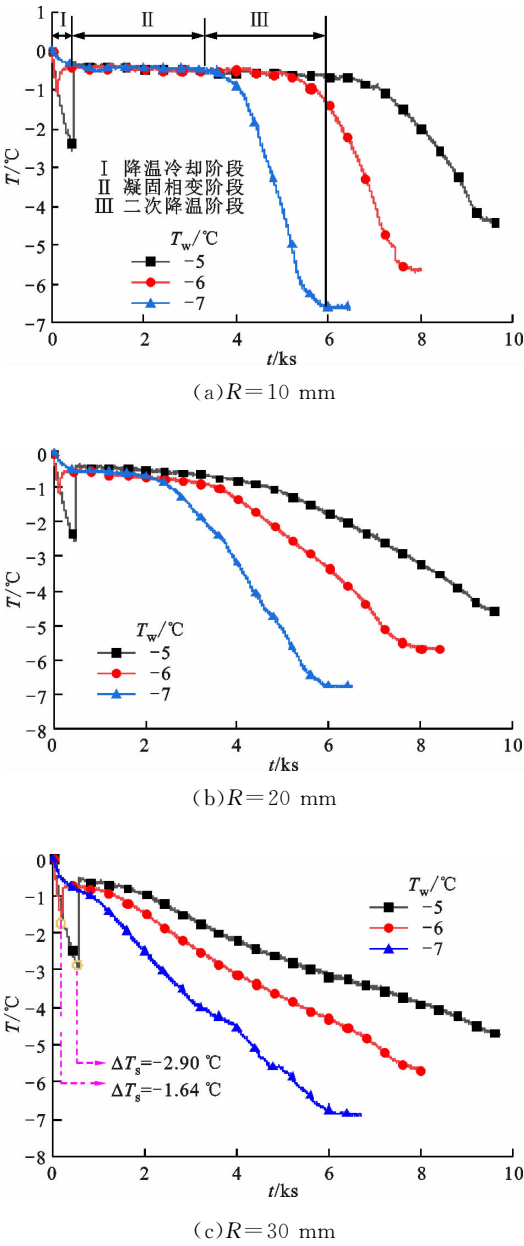


图 7 不同冷却边界条件下不同半径面的平均温度变化
Fig. 7 Average temperature changes on the surfaces of different radiuses under different cooling boundary conditions

条件的凝固阶段用时相近,约为 500 s。在二次降温阶段,冷却边界温度越低,温度下降速率越快,用时越短。 $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 最快, $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 次之, $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 最慢。

从图 7 来看,当冷却边界条件为 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时可明显观察到,在降温至相变温度之后出现了温度的突变,表现出显著的过冷现象: $T_w=-5\text{ }^{\circ}\text{C}$,过冷度 $\Delta T_s=-2.90\text{ }^{\circ}\text{C}$; $T_w=-6\text{ }^{\circ}\text{C}$,过冷度 $\Delta T_s=-1.64\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。 $T_w=-7\text{ }^{\circ}\text{C}$,过冷度基本消失。

3 结 论

本文通过搭建可视化球形相变蓄冷实验系统,

记录蓄冷过程中相变介质的温度分布和相界面推移,分析球形介质凝固相变过程的换热机理。根据实验结果分析,得到以下结果:

- (1)蓄冰半球纯水凝固过程中,固液相界面随着时间由外向内、由球面向球心呈圆形逐渐推移。凝固阶段相同时刻,冷却边界条件温度越低、推移速度越快、固液相界面半径更小、更接近于球心。
- (2)在球形相变介质相变过程中,重力对其内部温度分布无显著影响,自然对流影响微弱。
- (3)冷却边界条件对各区域凝固阶段用时有显著影响,冷却边界温度越低,凝固阶段用时越短,与 $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 相比, $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 可分别缩短凝固阶段用时 55%、28.3%。在冰球式冰蓄冷空调的运行过程中,蓄冷过程提供的冷却边界条件越低,蓄冷速率越快,蓄冷性能可进一步提高。

参考文献:

[1] 李艺群,黄凯良. 冰蓄冷空调系统在工业方面的应用分析 [J]. 节能, 2019, 38(6): 21-23.
LI Yiqun, HUANG Kailiang. Application analysis of ice-storage air conditioning system in industry [J]. Energy Conservation, 2019, 38(6): 21-23.

[2] 贾珍,申肖肖. 综合体建筑冰蓄冷模式适用性分析 [J]. 建筑技术开发, 2019, 46(6): 102-103.
JIA Zhen, SHEN Xiaoxiao. Applicability analysis of ice storage mode for complex buildings [J]. Building Technology Development, 2019, 46(6): 102-103.

[3] 吴东波,张泉,陈晓明,等. 小型相变蓄冷空调性能的实验研究 [J]. 建筑科学, 2017, 33(6): 62-67.
WU Dongbo, ZHANG Quan, CHEN Xiaoming, et al. Experimental research on the performance of small phase change cold storage air conditioners [J]. Building Science, 2017, 33(6): 62-67.

[4] KAPILOW D, HSUAN Y G, SUN Y, et al. Convective melting and freezing of phase change materials encapsulated within small diameter polymer tubes [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2018, 92: 259-269.

[5] DOS SANTOS F S, ISMAIL K A R, LINO F A M, et al. Parametric investigation of the enhancing effects of finned tubes on the solidification of PCM [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 152: 119485.

[6] PIZZOLATO A, SHARMA A, MAUTE K, et al. Design of effective fins for fast PCM melting and solidification in shell-and-tube latent heat thermal energy storage through topology optimization [J]. Applied

- Energy, 2017, 208: 210-227.
- [7] KHATRA L, EL QARNIA H, EL GANAOUI M. Numerical study of a cold storage system for air cooling [J]. Energy Procedia, 2017, 139: 16-22.
- [8] JMAL I, BACCAR M. Numerical investigation of PCM solidification in a finned rectangular heat exchanger including natural convection [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 127: 714-727.
- [9] 刘圣春, 姜婷婷, 董紫腾. 纯水和氯化钠溶液凝固过程的实验研究 [J]. 化工进展, 2016, 35(2): 68-74.
LIU Shengchun, JIANG Tingting, DONG Ziteng. Experimental research on the solidification process of pure water and sodium chloride solution [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2016, 35(2): 68-74.
- [10] ANISH R, MARIAPPAN V, SURESH S. Experimental investigation on melting and solidification behaviour of erythritol in a vertical double spiral coil thermal energy storage system [J]. Sustainable Cities and Society, 2019, 44: 253-264.
- [11] KUMAR S B S, CHINNAPANDIAN M. Experimental investigation on freezing/melting characteristics of two different phase change materials [J]. Materials Today: Proceedings, 2018, 5(6): 14258-14264.
- [12] 白青松, 郭增旭, 刘亦琳, 等. 通孔金属泡沫强化蓄冰实验研究 [J]. 西安交通大学学报, 2018, 52(1): 20-25.
BAI Qingsong, GUO Zengxu, LIU Yilin, et al. Experiment study on enhanced ice storage in open-cell metal foams [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2018, 52(1): 20-25.
- [13] 王华生, 吴业正, 俞炳丰, 等. 圆环形腔内凝固问题的热阻法近似解 [J]. 西安交通大学学报, 2001, 35(3): 255-260.
WANG Huasheng, WU Yezheng, YU Bingfeng, et al. Approximate solution of heat resistance method for solidification in concentric annulus [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2001, 35(3): 255-260.
- [14] 贾敬芝. 冰球式蓄冷槽内冰球冻结和放热特性的数值模拟分析 [J]. 能源研究与信息, 2019, 35(4): 216-220.
JIA Jingzhi. Numerical analysis of freezing and thawing characteristics of spherical capsules in the encapsulated ice storage tank [J]. Energy Research and Information, 2019, 35(4): 216-220.
- [15] 张鲁燕, 郝学军, 宋孝春, 等. 蓄冷冰球非固定融化的数值模拟 [J]. 区域供热, 2018, 1(1): 92-97.
ZHANG Luyan, HAO Xuejun, SONG Xiaochun, et al. Numerical simulation on the process of ambulatory melting in storage sphere [J]. District Heating, 2018, 1(1): 92-97.
- [16] 仇中柱, 姚远, 郑雨柔, 等. 相变蓄冷装置内传热及相变特性研究 [J]. 热科学与技术, 2020, 19(5): 409-415.
QIU Zhongzhu, YAO Yuan, ZHENG Yurou, et al. Study on heat transfer and phase change characteristics in phase change cold storage rig [J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2020, 19(5): 409-415.
- [17] 陈晨, 彭浩. 石墨烯纳米流体相变材料蓄冷特性的数值模拟 [J]. 化工进展, 2018, 37(2): 681-688.
CHEN Chen, PENG Hao. Numerical simulation of solidification characteristics of graphene nanofluid as phase change material [J]. Chemical Industry and Engineering Process, 2018, 37(2): 681-688.
- [18] LING K, TAO W Q. A sharp-interface model coupling VOSET and IBM for simulations on melting and solidification [J]. Computers and Fluids, 2019, 178: 113-131.
- [19] KANT K, SHUKLA A, SHARMA A, et al. Melting and solidification behaviour of phase change materials with cyclic heating and cooling [J]. Journal of Energy Storage, 2018, 15: 274-282.
- [20] HONG Yuxiang, YE Weibiao, HUANG Simin, et al. Can the melting behaviors of solid-liquid phase change be improved by inverting the partially thermal-active rectangular cavity? [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 126: 571-578.
- [21] 张鲁燕, 郝学军, 宋孝春, 等. 冰球式蓄冷系统蓄冰槽蓄冷过程的动态模拟 [J]. 暖通空调, 2018, 48(8): 130-132.
ZHANG Luyan, HAO Xuejun, SONG Xiaochun, et al. Dynamic simulation of ice storage tank of ice ball storage system [J]. Heating, Ventilation and Air Conditioning, 2018, 48(8): 130-132.
- [22] 张鲁燕. 冰球式蓄冷系统相变换热过程的数值模拟优化 [D]. 北京: 北京建筑大学, 2018: 24-54.
- [23] 彭招. 方腔内金属泡沫: 水的自然对流换热实验研究 [D]. 南昌: 华东交通大学, 2016: 22-25.

(编辑 武红江)