

# 方形蓄热单元内铝铜合金熔化和凝固特性数值模拟

崔 富, 袁艳平, 曹晓玲, 孙亮亮, 向 楠

(西南交通大学机械工程学院, 成都 610031)

**摘 要:** 对中心带有恒温换热圆管的方形蓄热单元内铝铜合金的熔化和凝固过程进行数值模拟, 研究相变材料(PCM)的熔化和凝固特性以及蓄热单元宽高比对PCM熔化和凝固特性的影响, 并探讨蓄热面积系数对蓄热单元最佳宽高比的影响。结果显示, 对于中心换热管直径为20 mm、横截面积为6400 mm<sup>2</sup>的方形蓄热单元, PCM的熔化和凝固时间均随宽高比的增加呈现先缩短后增长的变化趋势, 且当宽高比为1.56时, PCM的熔化时间最短, 定义其为该潜热蓄热量条件下蓄热单元的最佳熔化宽高比; 当宽高比为1.00时, PCM的凝固时间最短, 定义其为方形蓄热单元的最佳凝固宽高比。此外, 当蓄热面积系数增加时, 蓄热单元的最佳熔化宽高比出现增大趋势, 而最佳凝固宽高比保持不变。方形蓄热单元的宽高比应结合实际应用条件进行合理选择。

**关键词:** 潜热蓄热; 铝铜合金; 熔化和凝固特性; 数值模拟

**中图分类号:** TK512<sup>+</sup>.4

**文献标识码:** A

## 0 引 言

潜热蓄热因具有储能密度大、蓄放热过程近似等温等优点成为一种极具发展潜力的储能方式, 在太阳能储存、余热回收等方面具有较好的发展前景。目前, 在高温潜热蓄热中研究较多的无机盐类相变材料, 具有较高的储能密度, 但也存在导热系数低、体积变化大、腐蚀性强等缺点<sup>[1,2]</sup>。这既影响了蓄热系统的蓄、放热速率, 也增加了蓄热系统的成本。而合金类相变储能材料虽然储能密度相对较低, 却因具有导热系数高、热稳定性好、体积变化小等优点<sup>[1-3]</sup>, 成为高温潜热蓄热研究的一个新方向。另外, 高效率的发电模块需600~700℃的热源温度<sup>[4]</sup>, 也使合金类相变材料受到研究者青睐。

在相变蓄热单元中相变材料(phase change material, PCM)相变过程的传热特性对于潜热蓄热换热器的设计至关重要。而运用计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)方法进行潜热蓄热器(LHTES)的设计既能节省资金和时间, 又可作为实现太阳能光热利用系统(STEAs)效率最优化

的有效方法<sup>[5]</sup>。国内外诸多研究者采用数值模拟的方法对蓄热容器中PCM相变过程的传热特性进行了较丰富的研究。Ng等<sup>[6]</sup>模拟水平环形蓄热器中PCM的熔化过程, 研究瑞利数对于熔化速率和流动演化模式的影响。Ahmad Ali Rabienataj Darzi等<sup>[7]</sup>采用Fluent软件对环形壳管换热器内管位置对PCM熔化的影响进行研究。胡春妍等<sup>[8]</sup>对环形偏心单元内月桂酸的熔化特性进行模拟研究, 发现偏心单元与同心单元相比, 潜热储能效果更好, 同时对环形单元的结构进行优化设计。Sugawara等<sup>[9]</sup>对中心带有圆管的水平方腔内冰/水的熔化/凝固过程进行数值模拟研究, 发现随着中心换热圆管距离方腔底部距离的增加, 熔化过程逐渐减缓; 相比于距离底部1/3、2/3方腔高度处, 圆管在距离方腔底部1/2处时, 水的凝固最快。Khillarkara等<sup>[10]</sup>对内圆外方和内方外圆两种类型的水平同心环形单元内纯相变材料的熔化过程进行数值计算, 对2种类型单元分别进行内壁加热、外壁加热和内外壁同时加热3种情形下PCM熔化速率的研究, 并对熔体的温度场和流畅、加热面的局部热流以及蓄热量随时间的变化关

收稿日期: 2016-12-19

基金项目: 建筑环境与能源高效利用四川省青年科技创新研究团队项目(2015TD0015); 国家自然科学基金面上项目(51678488)

通信作者: 袁艳平(1973—), 男, 博士、教授、博士生导师, 主要从事地下空间热湿环境与安全、地源热泵、太阳能建筑一体化、相变储能在暖通领域的应用研究。ypyan@home.swjtu.edu.cn

系进行讨论分析。袁艳平等<sup>[11]</sup>在实验基础上,采用熔-多孔介质模型模拟右侧恒温加热的矩形单元内癸酸熔化过程,研究癸酸在不同边界温度条件下熔化时矩形单元内温度分布及相界面变化情况,并分析癸酸熔化平均努谢尔特数及熔化速率的变化规律。胡志培等<sup>[12]</sup>对楔形潜热蓄热单元内的熔化传热过程进行数值模拟,研究单元上下边长比对熔化时间和传热强度的影响,并得到最佳的上下边长比 $n=5.5$ 。Kotzé等<sup>[4]</sup>建立一个以铝硅合金为PCM的标准蓄热测试装置,并通过实验测试来更好地研究潜热蓄热特性,同时建立数学模型并对放热过程的计算情况与测试结果进行对比研究。目前,关于PCM在环形、方形和楔形等蓄热单元中的熔化传热特性、传热强化等方面的研究已有较多文献报道,且主要集中于对低温PCM的研究,鲜有关于具有高热导系数的中高温合金类PCM的研究。结合已有研究工作发现,铝铜合金潜热量较大、导热系数较高、相变温度适中,是一种极具潜力的高温相变储能材料<sup>[13,14]</sup>。然而,其在具有中心换热圆管的方形相变蓄热单元中相变特性的研究少有文献报道。

本文通过数值模拟的方法,针对铝铜合金在不同宽高比的方形蓄热单元中熔化和凝固过程的传热特性以及蓄热面积系数对铝铜合金熔化和凝固特性的影响进行研究。以期对于以铝铜合金为相变蓄热材料的方形相变蓄热单元的结构设计具有一定的指导和借鉴意义。

## 1 数学模型与求解

### 1.1 几何模型和边界条件

方形相变蓄热单元内部为圆形换热流体管道,中间是由相变材料填充的蓄热层,其示意图如图1所示。

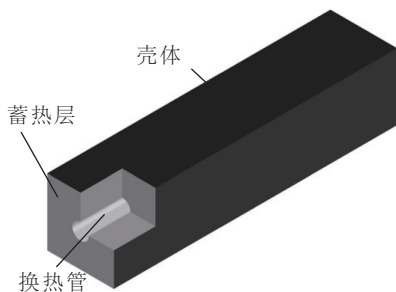


图1 方形蓄热单元示意图  
Fig. 1 Schematic of square heat storage unit

本文主要针对水平放置的方形相变蓄热单元断面处相变材料的熔化和凝固特性进行数值模拟研究,因此将蓄热单元简化为二维的计算模型,如图2所示。图2中 $H$ 为相变蓄热单元的高度,mm; $W$ 为相变蓄热单元的宽度,mm。基于文献[14,15]的报道,本文选择的相变材料为单位体积潜热较大且导热系数较高的Al-51.7%Cu(质量分数),并确定物性参数列于表1中。

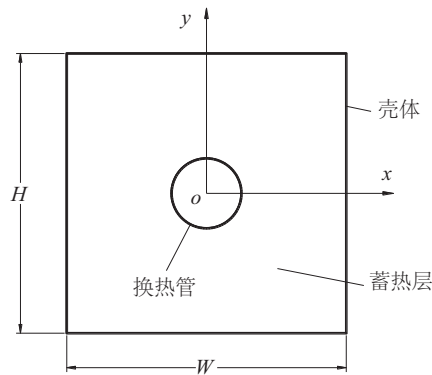


图2 物理模型与坐标系  
Fig. 2 Schematic of the physical model and coordinate system

表1 Al-51.7%Cu的热物性参数	
Table 1 Thermophysical properties of Al-51.7%Cu	
热物性	数值
密度/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	3990
比热/ $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	756.3
导热系数/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	114.7
动力粘度/ $\text{Pa}\cdot\text{s}$	$4.99\times10^{-4}$
热膨胀系数/ $\text{K}^{-1}$	$1.14\times10^{-4}$
熔化潜热/ $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$	$2.955\times10^5$
凝固潜热/ $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$	$2.867\times10^5$
熔化/凝固温度/K	873.55/845.10

为便于进行数值模拟计算,对计算模型作以下假设:

- 1)采用 Boussinesq 假设,即材料各相物性视为常数,仅在考虑浮升力影响时才涉及流体内密度的变化;
- 2)储热单元内的传热为导热-对流形式进行,液态 PCM 为不可压缩牛顿流体;
- 3)相变温度发生在某个温度点,而不是一个温度区间;

4)内部加热面为恒定等温面,其余各面视为绝热面。

基于上述假设,采用 Fluent 软件对能量及动量方程均采用二阶迎风格式进行离散,采用 PRESTO 进行压力校正,分离式求解并实施亚松弛;压力速度耦合采用 SIMPLE 算法。此外,通过对计算区域网格数量和时间步长独立性的验证,最后获得较优的网格密度和时间步长。

## 1.2 模型验证

为了验证本文数值计算方法的正确性,在分析计算前,采用本文的数值计算方法对文献[16]中方腔内金属镓熔化的第一种实验状态进行数值模拟,计算区域为  $47.6 \text{ mm} \times 47.6 \text{ mm}$ ,  $\Delta T_1 = T_H - T_m = 10.2 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\Delta T_s = T_m - T_C = 4.8 \text{ }^\circ\text{C}$ ,其物理模型与坐标系如图 3 所示。经数值模拟,对该方腔的上、中、下 3 条横线上,即分别对应  $\eta = 0.133$ 、 $\eta = 0.500$ 、 $\eta = 0.867$ ,测点的温度变化情况进行检测,将得到的特征点温度值与文献[16]中的实验结果进行比较,如图 4 所示。

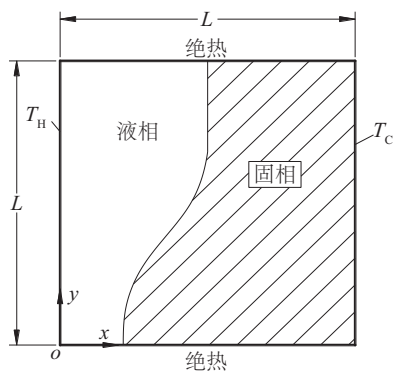
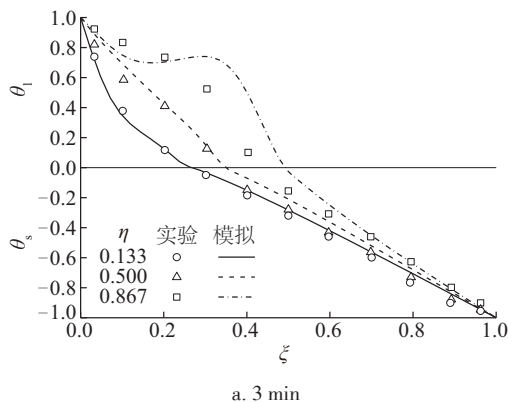


图 3 物理模型与坐标系

Fig. 3 Schematic of the physical model and coordinate system



a. 3 min

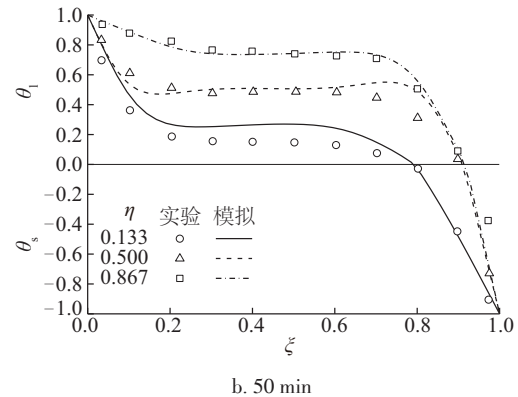


图 4 数值模拟与实验测试结果的对比

Fig. 4 Comparison of numerical simulated and experimental measured temperature profiles

图 4 中  $\eta = y/L$ ,  $\xi = x/L$ ,  $\theta_1 = (T - T_m)/(T_H - T_m)$ ,  $\theta_s = (T - T_m)/(T_m - T_C)$ , 其中,  $L$  为方腔截面边长, mm;  $T_H$ 、 $T_C$ 、 $T_m$  分别为高温端、低温端温度和金属镓熔点温度,  $^\circ\text{C}$ ; 下标 s、l 分别表示固态和液态。

图 4 中显示,在第 3 分钟时,  $\eta = 0.867$  处的计算结果与实验结果偏差较大。这是因为在实验中实际边界条件会有所不同,高温壁面具有一定的显热蓄热能力,实验开始阶段高温壁面达到预定温度的时间相对滞后,导致  $\eta = 0.867$  处的计算结果出现偏差。随着时间的推移,高温端温度滞后的影响逐渐减小,到第 50 分钟时,计算结果与实验结果吻合较好。结合图 4 模拟结果与实验结果的对比情况,考虑到计算所用物性参数、边界条件与实验条件相比存在一定偏差,认为采用文中数值计算方法得到的计算结果与实验结果吻合较好。

## 2 结果与讨论

### 2.1 熔化和凝固过程传热特性分析

对换热管直径为 20 mm、宽和高均为 80 mm 的方形蓄热单元内 PCM 的熔化和凝固过程进行数值模拟,熔化过程取换热温差(即换热管壁温度与 PCM 相变温度之差,  $^\circ\text{C}$ )为 30 K,凝固过程取换热温差(即被加热后的液态 PCM 的温度与换热管壁温之差,  $^\circ\text{C}$ )为 100 K,得到 PCM 液相率随时间变化的情况,如图 5 所示;PCM 的相界面图和流场图随时间的变化情况如图 6 所示。

结合图 5 和图 6a 可将 PCM 在方形蓄热单元中的熔化分为初期、中期和后期 3 个阶段。在熔化初期, PCM 的熔化区域呈环形向外发展, 这主要是导热作用主导传热的原因, 而且这一阶段的 PCM 熔化速率较低。在熔化中期, 随着熔化的不断进行, 环形区域被破坏, 逐渐变形, 呈现出不规则的状态, PCM 熔化速率呈现增大的趋势。这一阶段, 自然对流作用逐渐增强, 直至成为传热的主导作用, 起到增强 PCM 熔化速率的作用。图 5 中显示在熔化过程进行到约 225 s 时, 熔化曲线出现明显拐点, 且随后熔化速率出现下降的情况。这是因为 PCM 的熔化进入熔化后期阶段, 蓄热单元上半部分的 PCM 已全部熔化, 受浮升力影响自然对流作用对于处在方形蓄热单元下部的 PCM 熔化的作用降低, 导热作用重新成为传热的主导作用。

此外, 通过分析图 6b 可看出, 熔化初期, 熔化区域左右两侧中形成若干个较小的环流区域。这主要是因为液态的 PCM 经换热管被加热后温度升高, 受到浮升力的影响而向上浮动, 在将热量传递

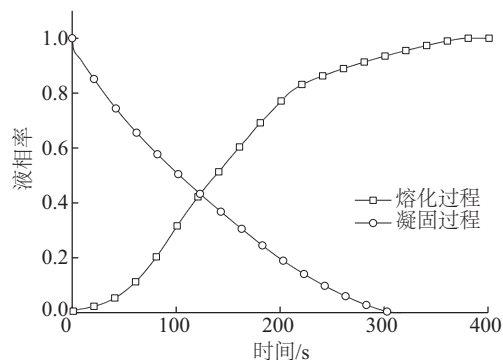
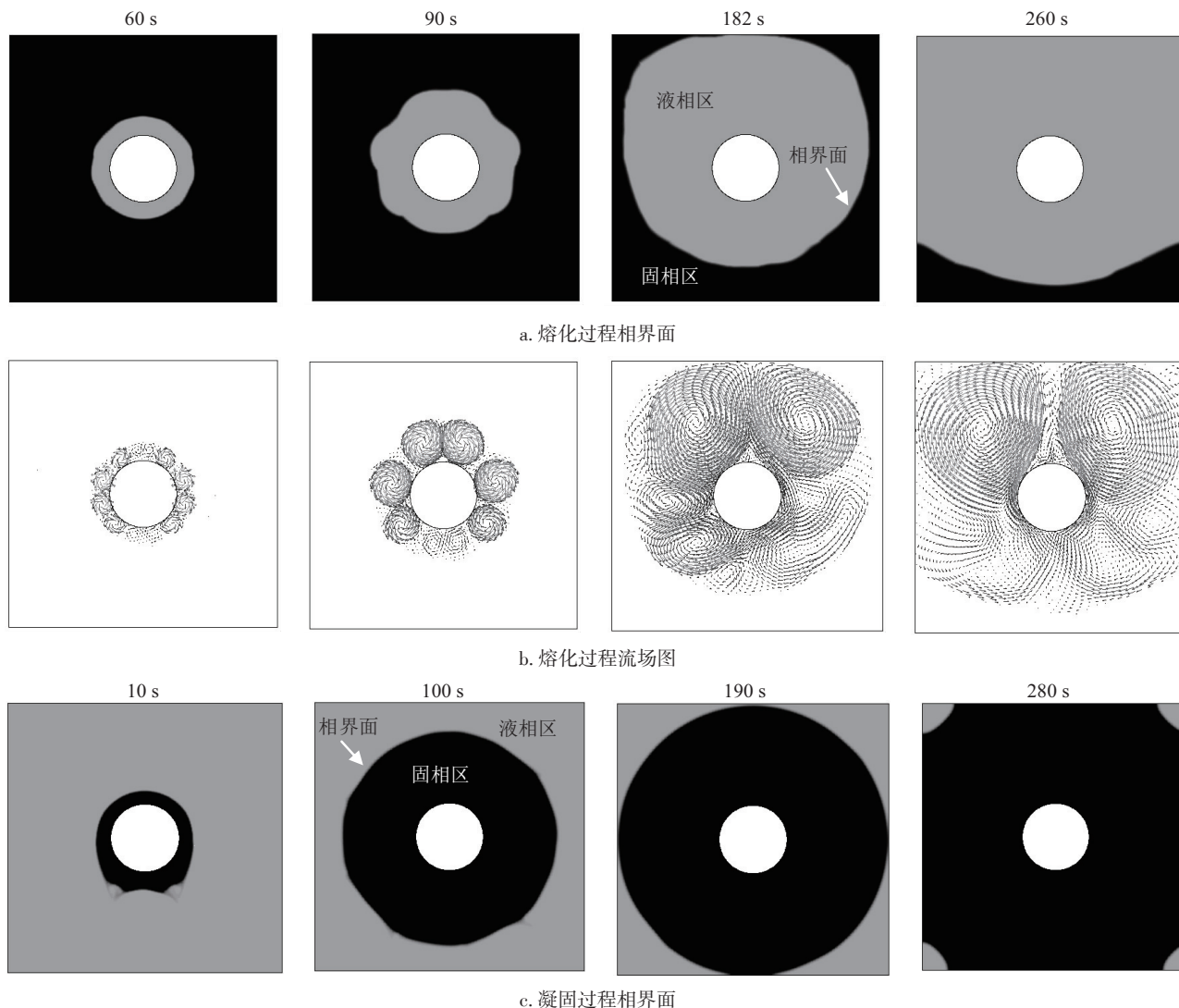
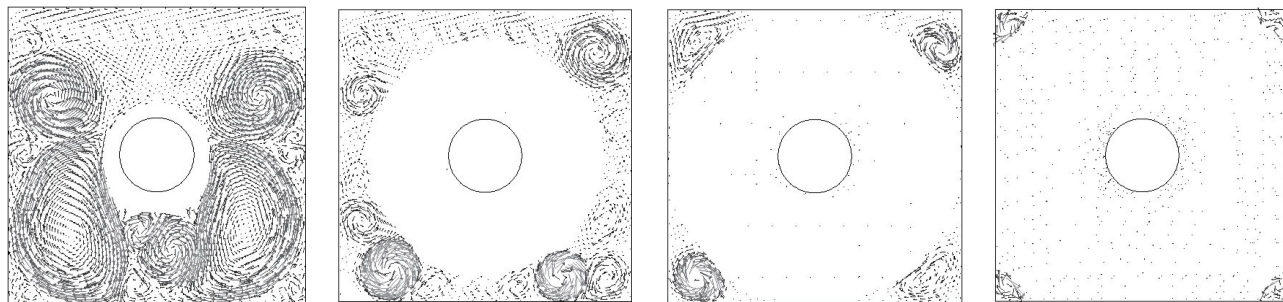


图5 液相率随时间的变化关系

Fig. 5 Liquid fraction changing with time







d. 凝固过程流场图

图6 不同时刻的相界面和流场图

Fig. 6 Liquid fraction and flow field under different time

给固态的 PCM 后, 温度降低向下沉降, 同时仍不断向周围的固态 PCM 传热, 随后经换热管再次被加热上浮, 从而形成环流。随着传热不断进行, 液态区不断扩大, 环流区域呈现不断增大的趋势。同时, 受浮升力的影响, 环流区域主要集中在方形蓄热单元的中上部区域。至熔化后期, 在方形蓄热单元的上部区域形成两个主要的环流区域, 而下部的环流作用则相对较小。可见, 方形单元中自然对流作用主要加强了单元上部 PCM 的熔化传热, 而对于单元下部 PCM 熔化的强化作用则相对较小。

结合图 6a 中 PCM 熔化相界面的变化情况, 不妨将相界面的移动分解到  $x$ 、 $y$  轴两个方向上。从 182 s 和 260 s 时刻相界面的位置可看出, 由于浮升力的作用,  $y$  轴正方向上相界面的移动速度最快, 率先到达蓄热单元的上部边界;  $x$  轴正、负方向上相界面的移动速度次之, 随后到达蓄热单元左右两侧的边界;  $y$  轴负方向上的相界面移动速度最慢, 最后到达蓄热单元下部边界。

基于以上分析, 为了增强传热作用, 加快蓄热单元的蓄热速率, 在蓄热单元的设计中, 一方面, 应在适当减小单元底部与中心换热管距离的同时, 使更多的 PCM 处于加热圆管的中上部区域; 另一方面, 可使相界面在  $x$ 、 $y$  轴的各个方向上都能尽量同时到达蓄热单元的物理边界。

与熔化过程不同, 从图 5 中可看出, 液相率随时间的变化曲线接近直线。而随着凝固过程的进行, 凝固层逐渐增厚, 传热热阻增加, 凝固速率逐渐降低。结合图 6c 可看出, 在凝固过程中, 相界面呈环形向外扩展。而随着凝固时间的推移, 受自然对

流作用影响, 相界面局部呈不规则状, 但凝固相界面整体仍呈现圆环状向外发展直至相界面抵达单元边界。

从图 6d 可看出自然对流作用引起的液态 PCM 的流动规律。与熔化过程不同, 由于换热管上部液态 PCM 的温度高、密度小, 而靠近换热管的液态 PCM 的温度相对较低、密度大, 因此在换热管上部难以形成环流。而在换热管两侧及下部区域, PCM 经换热管冷却后, 温度降低, 密度增大, 向下沉降, 经远离换热管的液态 PCM 加热后, 温度升高, 受浮升力影响而上升, 从而形成环流区。此外, 随着凝固过程的进行, 液态 PCM 流动不明显且越来越弱。

整体来看, 自然对流作用对凝固换热过程影响不大, 凝固过程的传热形式主要以热传导为主。

## 2.2 蓄热单元宽高比对熔化和凝固过程的影响

基于上文对方形相变蓄热单元内 PCM 蓄、放热过程的传热特性的分析, 研究上述方形蓄热单元的宽高比对 PCM 熔化和凝固特性的影响。这里, 定义  $K=W/H$ , 即为方形相变蓄热单元的宽高比。同时, 定义方形蓄热单元内 PCM 熔化/凝固时间最短时对应的宽高比为该方形相变蓄热单元的最佳熔化/凝固宽高比。

针对中心换热管直径为 20 mm、单元横截面积为 6400 mm<sup>2</sup> 的 8 种不同宽高比的蓄热单元(潜热蓄热量相同)进行数值模拟分析, 具体情况如表 2 所示, 得到 PCM 液相率随时间的变化曲线图, 如图 7 所示。对于熔化过程, 结合数值模拟的结果可看出, 在熔化初期, 传热主要以导热为主, 不同宽高比条件下 PCM 的熔化速率相当。

表2 模型尺寸与熔化时间

Table 2 Model size and melting time

序号	W×H/mm	K	熔化时间/s	凝固时间/s
1	64.0×100.0	0.64	463	350
2	71.1×90.0	0.79	417	322
3	80.0×80.0	1.00	380	312
4	90.0×71.1	1.27	366	322
5	100.0×64.0	1.56	351	348
6	112.0×57.1	1.96	361	395
7	128.0×50.0	2.56	381	481
8	160.0×40.0	4.00	444	699

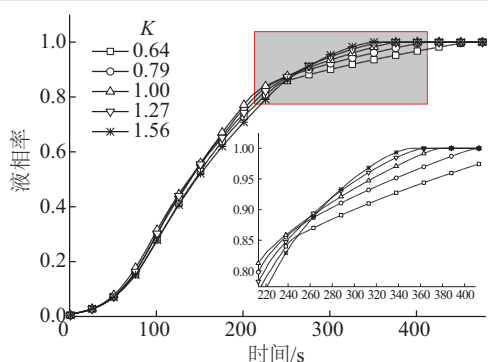
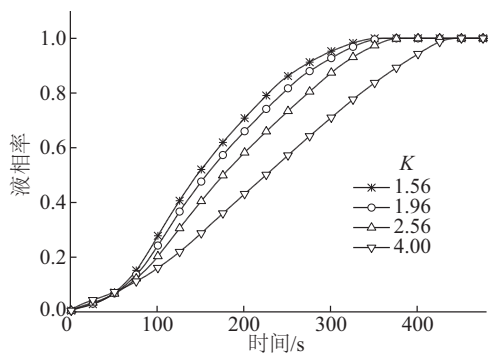
a.  $K \leq 1.56$ b.  $K \geq 1.56$ 

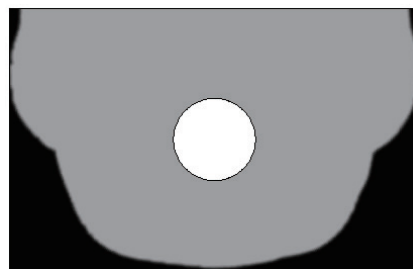
图7 液相率随时间的变化关系

Fig. 7 Liquid fraction changing with time

当蓄热单元的宽高比由 0.64 增加到 1.56 时, PCM 整体的熔化速率呈增大的趋势, 熔化时间逐渐减少, 如图 7a 所示。一方面, 在熔化中期阶段, 随着熔化的不断进行, 当蓄热单元的宽高比偏离 1.00 时, 自然对流强化传热的作用降低, 熔化速率随之下降。另一方面, 在熔化后期阶段, 熔化曲线出现明显拐点, 且随着蓄热单元宽高比的增加, 拐点逐渐削弱并消失。蓄热单元宽高比的增加使蓄热单

元下部的 PCM 距离换热管的距离缩短, 而受浮升力影响自然对流作用对蓄热单元中上部区域 PCM 熔化的强化作用较大, 对蓄热单元下部区域 PCM 的强化作用则较小。随着宽高比的增加, 一方面, 自然对流主导传热的时间有所增长; 另一方面, 自然对流对蓄热单元下部区域 PCM 熔化的强化作用也有所增加。因此, PCM 熔化速率提升, 熔化时间缩短。

当该蓄热单元的宽高比大于 1.56 时, PCM 的熔化速率随着蓄热单元宽高比的增加呈降低的趋势, 熔化时间逐渐增长, 如图 7b 所示。在熔化中期阶段, 随着宽高比的增加, 自然对流对熔化的强化作用有所降低, 熔化速率下降。当熔化进入后期阶段, 随着宽高比的增大, 蓄热单元的竖直尺寸减小, 横向尺寸增加, 相界面可更快速地到达蓄热单元的底部边界, 却无法迅速到达两侧边界, 自然对流作用虽然能更多地占据传热的主导作用, 但随着宽高比的逐渐增加自然对流对于 PCM 熔化的强化作用随之降低, 使得 PCM 整体的熔化速率降低, 熔化时间增长。可发现, 在接近最佳宽高比状态下, 即宽高比  $K$  为 1.56 时, PCM 熔化过程中熔化相界面几乎可同时到达蓄热单元的左、右两侧和底部边界, 如图 8 所示。

图8 第236秒相界面 ( $K=1.56$ )Fig. 8 Contour of liquid fraction at 236 s ( $K=1.56$ )

总的来看, PCM 的熔化时间随着宽高比的增加呈现先降低后升高的趋势。当宽高比为 1.56 时, 蓄热单元内 PCM 的熔化时间最短, 其总体熔化速率达到最快。因此, 方形相变蓄热单元的最佳熔化宽高比约为 1.56。

为了综合研究宽高比在整个蓄、放热过程中的影响作用, 继续对不同宽高比的蓄热单元内 PCM 凝固过程进行数值模拟分析, 所得凝固总时间如表 2 所示, 液相率随时间的变化情况如图 9

所示。

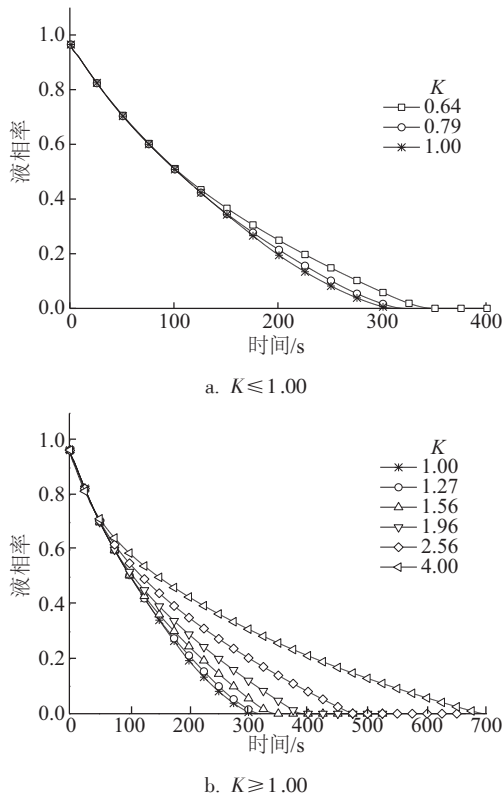


图9 液相率随时间的变化关系  
Fig. 9 Liquid fraction changing with time

从表 2 可看到,随着宽高比的增加,PCM 的凝固时间呈先缩短后增长的变化趋势,且当宽高比为 1.00 时,PCM 的凝固时间最短。因此,方形蓄热单元的最佳凝固宽高比为 1.00。结合图 9 可看出,在凝固过程开始阶段,对于宽高比不同的蓄热单元,PCM 的凝固速率相当。而随着凝固过程的推进,当宽高比偏离 1.00 时,凝固速率开始减缓,且偏离 1.00 越多时,凝固速率减缓越大,总凝固时间越长。这是因为当宽高比偏离 1.00 时,远端的 PCM 与换热管之间的距离也被拉长,而随着凝固层厚度的增加,其导热热阻增加,使得 PCM 整体的凝固速率下降,凝固时间增加。

### 2.3 蓄热面积系数对熔化和凝固过程的影响

为满足不同蓄热量需求,在不同蓄热能力条件下研究蓄热单元内 PCM 的熔化和凝固特性显得尤为重要。通过控制蓄热单元中心换热管的直径不变并改变蓄热单元横截面积(即改变潜热蓄热量)的方法,研究蓄热单元内 PCM 熔化和凝固特性随

着蓄热量的变化情况。

定义方形蓄热单元的蓄热面积系数  $S$  来衡量方形蓄热单元的蓄热能力,如式(1)所示。

$$S = \frac{S_{\text{PCM}}}{S_{\text{H}}} \quad (1)$$

式中,  $S_{\text{PCM}}$  ——方形蓄热单元中 PCM 所占区域的横截面积,  $\text{m}^2$ ;  $S_{\text{H}}$  ——方形蓄热单元中心换热管的横截面积,  $\text{m}^2$ 。

控制换热管的直径为 20 mm 不变,将蓄热单元的边长分别增加至 1.0、1.2、1.5 和 2.0 倍,得到对应的蓄热面积系数分别 19.38、28.35、44.86 和 80.53。此外,结合上文对于蓄热单元最佳宽高比的研究,当中心换热管尺寸不变、蓄热面积系数增加时,分别选取了宽高比 1.27、1.56、1.96 和 2.56 的情况进行数值模拟,以便快速获得蓄热单元的最佳宽高比值。

经过数值模拟,得到如表 3 所示的相关数据,并绘制得到如图 10 所示的变化关系图。

表3 不同尺寸蓄热单元内 PCM 的熔化时间

Table 3 Melting time changing with mass of PCM under unit area

S	熔化时间/s			
	K=1.27	K=1.56	K=1.96	K=2.56
19.38	366	351	361	381
28.35	567	541	542	563
44.86	935	900	881	893
80.53	1842	1757	1684	1644

从图 10 可看出,当蓄热单元的宽高比一定时,PCM 熔化时间随蓄热面积系数的增大呈现线性递增的变化关系。同时,随着宽高比从 1.27 增加到 2.56,该线性递增关系的斜率呈现降低的趋势。当蓄热面积系数为 44.86 时,宽高比为 1.96 的蓄热单元内 PCM 的熔化时间已少于宽高比为 1.56 的蓄热单元内 PCM 的熔化时间。可见,当蓄热面积系数增加到一定程度时,蓄热单元的最佳宽高比出现了增大趋势。

而针对于凝固过程来看,其传热方式相对简单,整个过程以热传导为主。所以,无论  $S$  如何变化,方形蓄热单元的最佳凝固宽高比应为 1.00。



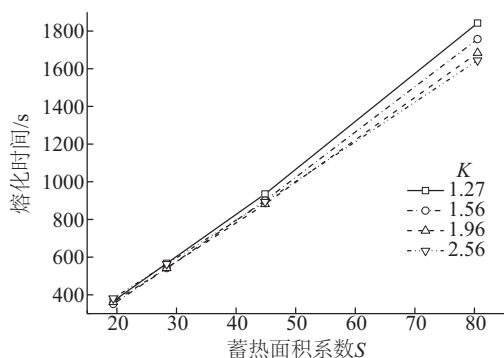


图10 熔化时间与蓄热面积系数的关系

Fig. 10 Melting time changing with heat storage area coefficient

不妨对上述结论进行验证性研究,为此,针对  $S$  为 28.35 且  $K$  分别为 0.79、1.00 和 1.27 时的方形蓄热单元内 PCM 的凝固过程进行数值模拟,所得结果如图 11 所示。由图 11 可见,当宽高比为 1.00 时,PCM 的凝固时间仍最短。可认为,方形蓄热单元的最佳凝固宽高比不随  $S$  变化。

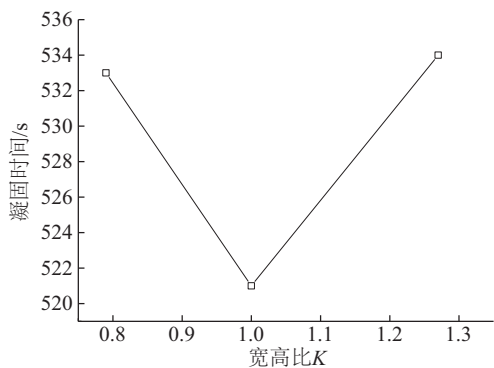


图11 凝固时间与宽高比的关系

Fig. 11 Solidification time changing with  $K$ 

## 2.4 熔化和凝固过程的综合分析

经过前文的数值模拟分析发现,在熔化过程中,方形蓄热单元宽高比的变化对于 PCM 的熔化速率的增加有促进作用,可缩短 PCM 的熔化时间,提升蓄热速率。对于最佳熔化宽高比(即  $K=1.56$  时)的蓄热单元,其熔化时间相比于宽高比为 1.00 时缩短了 7.63%。而在凝固过程中,当 PCM 凝固最快时,方形蓄热单元对应的宽高比为 1.00。

实际上,对于热量的储蓄和释放,一般希望尽可能地缩短蓄热时间,提升蓄热速率,而放热速率

却需要根据实际的能量需求来加以控制。因此,方形蓄热单元的宽高比应根据实际应用情况进行合理选择。

## 3 结 论

通过对水平放置中心圆管加热的方形蓄热单元内 Al-Cu 合金的熔化和凝固过程进行数值模拟,分析其熔化和凝固过程的传热特性,并着重研究方形蓄热单元宽高比对单元内 Al-Cu 合金熔化和凝固过程传热特性的影响以及蓄热面积系数对方形蓄热单元最佳宽高比的影响。

研究表明,在熔化过程中,自然对流作用对于蓄热单元内 Al-Cu 合金的熔化有强化作用,而由于浮升力作用,其主要影响单元中上部区域 PCM 的熔化,对于单元下部区域 PCM 熔化的强化作用则相对较小。在凝固过程中,蓄热单元内的传热以热传导为主,受自然对流作用影响较小。

方形蓄热单元内 PCM 的熔化和凝固时间均随宽高比的增加呈先缩短后增加的变化趋势,且存在最佳宽高比。在熔化过程中,当宽高比为 1.56 时,PCM 的熔化时间最短,故单元最佳熔化宽高比为 1.56;在凝固过程中,当宽高比为 1.00 时,方形蓄热单元内 PCM 的凝固时间最短,故单元最佳凝固宽高比为 1.00。

对不同蓄热量条件下的方形蓄热单元内 PCM 的熔化和凝固情况进行模拟,并定义方形蓄热单元的蓄热面积系数。随着蓄热面积系数的增加,PCM 熔化时间呈线性递增的趋势,且蓄热单元的最佳熔化宽高比也呈增加趋势。而在凝固过程中,无论蓄热面积系数如何变化,其最佳凝固宽高比始终为 1.00。

方形蓄热单元宽高比对于 PCM 的熔化和凝固过程的影响不同,而实际上,蓄热速率应当越快越好,放热速率则要按需控制。因此,方形蓄热单元的宽高比应根据实际的需求进行合理选择。

## 【参考文献】

- [1] Kenisarin M M. High-temperature phase change materials for thermal energy storage[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010, 14(3): 955—970.
- [2] Farkas D, Birchenall C E. New eutectic alloy and their



- heats of transformation [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 1985, 16(3): 323—328.
- [3] 张国才, 徐 哲, 陈运法, 等. 金属基相变材料的研究进展及应用[J]. *储能科学与技术*, 2012, 1(1): 74—81.
- [3] Zhang Guocai, Xu Zhe, Chen Yunfa, et al. Progress in metal-based phase change materials for thermal energy storage applications[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2012, 1(1): 74—81.
- [4] Kotzé J P, von Backström T W, Erens P J. Simulation and testing of a latent heat thermal energy storage unit with metallic phase change material[J]. *Energy Procedia*, 2014, 49: 860—869.
- [5] Al-Abidi A A, Bin Mat S, Sopian K, et al. CFD applications for latent heat thermal energy storage: A review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 20(4): 353—363.
- [6] Ng K W, Gong Z X, Mujumdar A S. Heat transfer in free convection-dominated melting of a phase change material in a horizontal annulus[J]. *Heat Mass Transfer*, 1998, 25(5): 631—640.
- [7] Ahmad Ali Rabienataj Darzi, Mousa Farhadi, Kurosh Sedighi. Numerical study of melting inside concentric and eccentric horizontal annulus[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2012, 36(9): 4083—4086.
- [8] 胡春妍, 袁艳平, 曹晓玲, 等. 偏心单元内月桂酸融化传热研究及结构优化设计[J]. *太阳能学报*, 2015, 36(8): 2008—2015.
- [8] Hu Chunyan, Yuan Yanping, Cao Xiaoling, et al. Heat transfer performance of lauric acid in eccentric unit[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2015, 36(8): 2008—2015.
- [9] Sugawara M, Komatsu Y, Beer H. Melting and freezing around a horizontal cylinder placed in a square cavity [J]. *Heat Mass Transfer*, 2008, 45: 83—92.
- [10] Khillarkara D B, Gong Z X, Mujumdar A S. Melting of a phase change material in concentric horizontal annuli of arbitrary cross-section[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2000, 20: 893—912.
- [11] 袁艳平, 曹晓玲, 白 力, 等. 矩形单元内癸酸熔化特性的数值模拟与实验[J]. *西南交通大学学报*, 2012, 47(2): 236—240.
- [11] Yuan Yanping, Cao Xiaoling, Bai Li, et al. Melting behaviors of capric acid in rectangular enclosure [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2012, 47(2): 236—240.
- [12] Hu Zhipei, Li Angui, Gao Ran, et al. Effect of the length ratio on thermal energy storage in wedge-shaped enclosures[J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2014, 117: 807—816.
- [13] Birchenall C E, Riechman A F. Heat storage in eutectic alloys[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 1980, 11(8): 1415—1420.
- [14] 崔 富, 袁艳平, 赵君文, 等. Cu含量对高温相变材料 Al-Cu 合金热特性的影响[J]. *化工学报*, 2017, 68(1): 112—118.
- [14] Cui Fu, Yuan Yanping, Zhao Junwen, et al. The influence of Cu content on thermal characteristics of high-temperature phase change material Al-Cu alloy[J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)*, 2017, 68(1): 112—118.
- [15] Konstantinova N, Kurochkin A, Popel P. Viscosity and volume properties of the Al-Cu melts[J]. *European Physical Journal Conferences*, 2011, 15(12): 1059—1063.
- [16] Beckermann C, Viskanta R. Effect of solid subcooling on natural convection melting of a pure metal [J]. *Journal of Heat Transfer*, 1989, 111(2): 416—424.

## NUMERICAL SIMULATION ON MELTING AND SOLIDIFICATION BEHAVIORS OF Al-Cu ALLOY IN SQUARE HEAT STORAGE UNIT

Cui Fu, Yuan Yanping, Cao Xiaoling, Sun Liangliang, Xiang Nan

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

**Abstract:** The melting and solidification process of Al-Cu alloy was simulated numerically in square heat storage unit which has an isothermal circular heat exchange tube inside. The melting and solidification behaviors of PCM and the effect of ratio of width-height on the melting and solidification behaviors of PCM were studied. And the effect of heat storage area coefficient on the optimum ratio of width-height of heat storage unit was discussed. The results showed that for a square heat storage unit with 20 mm diameter of the center heating tube and 6400 mm<sup>2</sup> cross-sectional area, the melting and solidification time of PCM are first decreasing and then increasing with the increase of ratio of width-height. Especially, when the ratio of width-height is 1.56, the melting time of PCM is shortest, and this ratio of width-height is defined as the optimum melting ratio of width-height. When the ratio of width-height is 1, the solidification time of PCM is shortest, and this ratio of width-height is defined as the optimum solidification ratio of width-height. Besides, with heat storage area coefficient increasing, the optimum melting ratio of width-height of heat storage unit presents an increasing trend, and the optimum solidification ratio of width-height of heat storage unit remains unchanged. The ratio of width-height of square heat storage unit should be reasonably selected according to the practical application conditions.

**Keywords:** latent heat thermal energy storage; Al-Cu alloy; melting and solidification behavior; numerical simulation