

生活水箱内相变材料封装结构改进及熔化性能研究

俞准^{1†}, 王姜¹, 严中俊¹, 度晓糠¹, 李水生², 张国强¹

(1. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082;
2. 中国建筑第五工程局有限公司, 湖南 长沙 410014)

摘要:针对生活水箱内封装相变材料现有强化换热方法(如添加翅片或膨胀石墨)会导致蓄能密度降低与石墨沉降等问题,提出在不添加外物的基础上,对当前水箱中应用最为广泛的圆柱型封装结构进行优化改进,通过减小其底面/顶面半径比形成侧壁面倾斜的倒圆锥型结构,使得固态相变材料在重力作用下自然沉降时可充分与面积占比较大的侧壁面发生接触熔化,从而实现相变材料熔化性能的提高.为探究倒圆锥型封装相变材料熔化性能,建立相应熔化传热模型,并通过可视化实验进行验证.在该模型的基础上,对倒圆锥型和圆柱型结构封装相变材料的熔化性能进行了对比和分析.结果显示在相同体积($1.74\text{e}-04\text{ m}^3$)和高度(0.055 m)下,倒圆锥型结构封装相变材料完全熔化时间为 2 520 s,与圆柱型结构相比缩短了 690 s,熔化性能提高了 21.5%.倒圆锥型结构封装相变材料熔化过程中,除接触熔化外液态相变材料的自然对流也对熔化性能有显著影响,且侧壁处形成的 Rayleigh-Bernard 环流会削弱相变材料接触熔化性能.此外,发现在自然对流与接触熔化共同作用下,正圆锥型结构封装相变材料熔化性能与倒圆锥型结构相比更强,提高了 16.7%.在实际应用中可将正圆锥与倒圆锥型封装结构结合使用,在有效利用空间的基础上实现蓄热量和蓄热效率的同时提高.

关键词:生活水箱;相变材料;封装结构;接触熔化;自然对流

中图分类号:TU83

文献标志码:A

Study on Improvement and Melting Performance of Phase Change Material Encapsulated Structure in Domestic Hot Water Tank

YU Zhun^{1†}, WANG Jiang¹, YAN Zhongjun¹, TUO Xiaokang¹, LI Shuisheng², ZHANG Guoqiang¹

(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;
2. China Construction Fifth Engineering Bureau Ltd, Changsha 410014, China)

Abstract: The existing enhancement methods for the heat transfer of phase change material (PCM) in domestic hot water tank, such as adding fins and the expanded graphite, can lead to the reduction in the energy storage density of the encapsulation. Additionally, the graphite may settle during the melting process of PCM. To address this issue, a

* 收稿日期:2020-06-20

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2019YFD1101300), National Key R&D Program of China(2019YFD1101300);中建五局资助项目(900201528), The Foundation for China Construction Fifth Engineering Bureau Ltd(900201528)

作者简介:俞准(1980—),男,安徽芜湖人,湖南大学教授,博士

† 通信联系人, E-mail: zhunyu@hnu.edu.cn

feasible solution is to promote the PCM's melting performance through improving the structure of cylindrical containers, which have been widely applied in domestic hot water tank, thereby taking advantage of contact melting modes without adding additional materials. In particular, an inverted conical container, which has a relatively lower ratio of the top area to the bottom area when compared to the cylindrical containers, has been proposed to encapsulate the PCM with the goal of establishing the contact melting mode between solid PCM and heated side walls when the PCM drops. To evaluate its performance, a mathematical model was developed and validated by the results obtained from a visualization experiment. Based on this model, the melting performance of the PCM encapsulated in the inverted conical container was analyzed and compared with that encapsulated in cylindrical container. The results show that the total melting time of the PCM encapsulated in the inverted conical container is 2 520 s under the same volume ($1.74 \times 10^{-4} \text{ m}^3$) and height (0.05 m). It is decreased by 690 s when compared with that encapsulated in the cylindrical container, which indicates the melting performance has improved 21.5%. Except for the contact melting, the natural convection of the liquid PCM also strongly affects the melting performance of the PCM. It is found that the Rayleigh-Bernard convection in the side region results in the decrease of melting performance of the PCM. In addition, an interesting finding is that higher melting performance (i.e. 16.7%) is achieved for the PCM encapsulated in the conical container when compared with that encapsulated in the inverted conical container. In this view, the combined usage of conical enclosure and inverted conical enclosure can be appreciated to improve both the heat storage capacity and the melting performance in practical applications.

Key words: domestic hot water tank; phase change materials; encapsulated structure; contact melting; natural convection

太阳能生活热水系统中蓄热水箱与封装相变材料的结合使用可有效减缓太阳能的间歇性、不稳定性及供需不匹配等问题^[1]. 由于相变材料(如石蜡和有机酸等)导热性能相对较低,对其进行封装后应用在生活水箱中,充放能速率较慢,从而降低了相变蓄热水箱的蓄放热性能. 现有的相应措施,如在封装结构内部添加翅片^[2]或在相变材料里添加泡沫金属^[3]、膨胀石墨^[4]等,尽管能提高相变材料熔化速率,但同时也会导致相变材料的体积减小,蓄能密度降低. 此外,添加泡沫金属后形成的复合相变材料可能存在液态相变材料从泡沫孔隙中泄露的问题^[5],而石墨等在熔化过程中亦会发生沉降^[6],鉴于此,限制了上述方法的实际应用和推广.

现有生活水箱中相变材料封装结构主要包括圆柱型^[7]、球型^[8]和矩型^[9]等,其中应用最为广泛的为圆柱型封装结构^[7]. 近年来,部分学者对其内部相变材料熔化过程进行了研究,发现固态相变材料由于重力作用,向下运动时会对底部液态相变材料进行挤压并形成薄液态层,该液态层以导热为主要传热方式的熔化传热过程(即接触熔化^[10]),与侧壁面液态相变材料以自然对流换热为主要传热方式的熔化过

程相比,具有更高的熔化传热速率^[11-13]. 基于此,考虑到实际应用中圆柱型封装结构侧壁面面积占总传热面积的比例相对较大,能有效提高圆柱型封装相变材料熔化性能的方法是通过优化改进其结构型式,使得相变材料在侧壁面处发生接触熔化. 值得强调的是,该方法可避免现有添加翅片或高导热剂等措施所导致的封装结构蓄能密度降低或石墨沉降等问题,具有较大的实际应用潜力. 基于上述分析,本文提出在不添加外物的基础上,通过减小圆柱型封装结构底面/顶面半径比形成侧壁面倾斜的倒圆锥型封装结构,使得固态相变材料受重力作用,向下运动时可充分与侧壁面紧密接触并发生接触熔化,从而实现相变材料熔化效率的提高.

为了深入探究倒圆锥型结构内相变材料熔化性能,本文建立了相应熔化传热模型并通过可视化实验进行验证. 在此基础上,本文对倒圆锥型和圆柱型结构封装相变材料的熔化性能进行了对比,并基于瞬时速度场和温度场深入分析了倒圆锥型结构封装相变材料熔化过程特性. 此外,本文还对不同底面/顶面半径比对封装相变材料熔化性能的影响进行了探究,以进一步实现其在实际应用中的优化.

1 实验装置及步骤

图 1 为本文所搭建的恒温水箱内倒圆锥型结构封装相变材料可视化实验系统. 该系统主要由恒温水箱、电加热器、温度控制箱、倒圆锥型封装相变材料和数字照相机组成. 实验采用双水箱结构, 分别控制水箱水温为初始温度与加热温度. 此外, 为便于直接记录封装相变材料熔化过程, 恒温水箱前后面板均选用透明 PC 板, 实验时可直接将封装结构固定在恒温水箱内部, 并用数字照相机进行拍照记录.

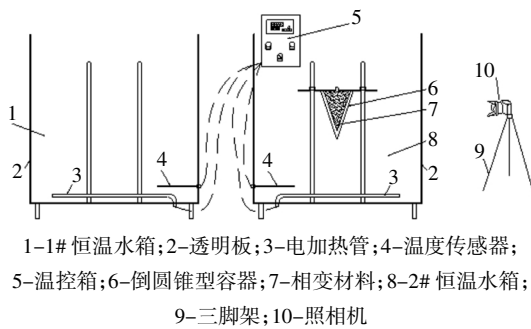


图 1 实验系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of experimental system

图 2 为本文开发的倒圆锥型封装相变材料 (高度为 55 mm, 内径为 110 mm), 其封装结构材质选用厚度为 5 mm 的透明 PC 管, 以实现相变材料熔化过程的可视化; 顶面采用 2 mm 厚的不锈钢板. 实验选用的相变材料为月桂酸, 其物性参数见表 1. 表 1 中同时给出了实验所用不锈钢与透明 PC 管的物性参数^[14].

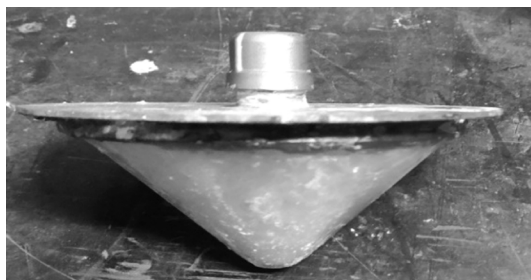


图 2 倒圆锥形结构封装相变材料图

Fig.2 Diagram of PCM encapsulated in the inverted conical container

实验步骤如下:

- 1) 对实验结构进行气密性测试, 确保该结构在 60 °C 水温下不会发生泄露;
- 2) 向实验结构内部缓慢灌注液态相变材料, 直

至凝固后的固态相变材料充满整个腔体;

- 3) 将实验结构置于 1# 恒温水箱中, 水温控制在 30 °C, 静置 2 h, 以保证相变材料的初始温度均匀一致, 且稳定在 30 °C;

- 4) 将实验结构置于 2# 恒温水箱中, 水温控制在 60 °C;

- 5) 用数字照相机记录熔化过程中实验结构内相变材料固液界面的变化, 直至完全熔化.

表 1 实验材料热物性参数

Tab.1 Thermophysical parameters of experimental materials

材料	物性参数	数值
相变材料 (月桂酸)	固态比热容 $C_p/(kJ \cdot (kg \cdot K)^{-1})$	1.7
	液态比热容 $C_p/(kJ \cdot (kg \cdot K)^{-1})$	2.2
	熔化温度区间 $(T_i - T_f)/^{\circ}C$	42.5~44.5
	潜热量 $L/(kJ \cdot kg^{-1})$	177.4
	导热系数 $k/(W \cdot (m \cdot K)^{-1})$	0.147
	固态密度 $\rho/(kg \cdot m^{-3})$	1 007
	液态密度 $\rho/(kg \cdot m^{-3})$	862
	热膨胀系数 α/K^{-1}	9.1×10^{-5}
	动力粘度 $\mu/(Pa \cdot s)$	0.006 8
	不锈钢	比热容 $(kJ \cdot (kg \cdot K)^{-1})$
导热系数 $(W \cdot (m \cdot K)^{-1})$		16.2
透明 PC 管	密度 $(kg \cdot m^{-3})$	7 930
	比热容 $(kJ \cdot (kg \cdot K)^{-1})$	1.26
	导热系数 $(W \cdot (m \cdot K)^{-1})$	0.19
	密度 $(kg \cdot m^{-3})$	1 200

2 模型建立与验证

2.1 模型建立

为便于建立封装相变材料熔化过程数值模型, 本文做出以下假设^[15]:

- 1) 相变材料纯净且各向同性, 相变材料在一定温度范围内发生相变;
- 2) 忽略水箱内的温度分层^[16], 假设水箱内各个高度位置的水温均匀一致;
- 3) 忽略热水与相变材料换热以及电加热引起的温度波动, 假设相变过程中, 水箱内水温保持恒定;
- 4) 忽略封装结构与水的对流换热, 假设外表面温度保持恒定且与水温一致;
- 5) 忽略封装结构内外表面之间的横向传热, 假

设其导热只沿厚度方向传递;

6)相变过程中,忽略由于液态相变材料温度变化引起的密度变化对其流体性质的影响,即 boussinesq 假设.

基于以上假设条件,考虑到倒圆锥封装结构为轴对称结构,同时为了提高模型的计算效率,将其简化为二维轴对称模型^[13].在上述模型假设及简化的基础上,为了获得相变材料熔化过程中的温度场和速率场,相变材料传热与流体流动的控制方程如下^[17-18]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V) = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial H}{\partial t} + \nabla \cdot (-k \nabla T) + \rho V \cdot \nabla H = 0 \quad (2)$$

$$\rho \frac{\partial V}{\partial t} + \rho (V \cdot \nabla) V = -\nabla P + \mu \nabla^2 V + F_a + F_b \quad (3)$$

其中,

$$\rho(T) = \rho_s + (\rho_l - \rho_s) B(T) \quad (4)$$

$$H = \begin{cases} C_{ps} T \\ C_{ps} T_s + B(T) \cdot L \\ C_{ps} T_s + L + C_{pl} (T - T_l) \end{cases} \quad (5)$$

$$F_s = -\rho(1 - \alpha(T - T_m))g \quad (6)$$

$$F_b = -A(T) \cdot V \quad (7)$$

$$A(T) = \frac{C(1 - B(T))^2}{B(T)^3 + q} \cdot L \quad (8)$$

$$B(T) = \begin{cases} 0 \\ (T - T_s)/(T_l - T_s) \\ 1 \end{cases} \quad (9)$$

式中: ρ 为相变材料的密度,kg/m³;V为流体速度,m/s;T为相变材料的温度,°C;P为相变材料的表面压力,Pa;F_a为考虑液态相变材料的密度随温度变化而引起变化产生的浮力,N/m³;F_b为考虑焓孔隙法中的源项^[9],N/m³;B(T)为相变区域中的液相体积分数;其中C为糊状区系数,为了确保固态区域相变材料速度为0,现有文献中C一般取10³~10⁶^[17];q为足够小但不为0的数,在本文中C和q的值分别设定为1000与0.001^[9].

2.2 模型验证

在上述假设与模型基础上,本文采用 Comsol Multiphysics 5.3a 软件进行相应模拟计算分析,并通过计算结果与可视化实验结果的对比分析,验证模型的准确性,对比结果分别如图3和图4所示.

图3为熔化时间分别为1910s、2800s以及3300s时的可视化实验与模型计算的固-液界面对比图.左侧为可视化实验结果,右侧为模型计算结

果.由图3可见,模型计算的固态相变材料形状以及固液界面始终与实验值吻合.在此基础上,图4将模型与实验的液相体积分数值进行了对比.由图4可见,实验值与模拟值的吻合程度较好,且两者之间的均方根误差仅为0.018,表明该传热模型具有较高的准确性,可用于探究封装结构内相变材料的熔化性能.

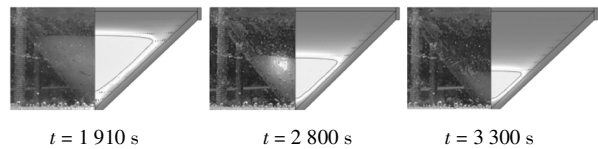


图3 固-液界面对比图

Fig.3 Comparison of numerical shapes of solid and liquid fractions with experiment

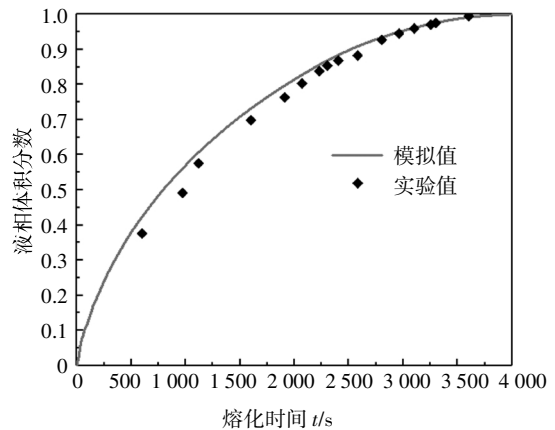


图4 液相体积分对比图

Fig.4 Comparison of the numerical and experimental PCM liquid volume fraction

3 结果与讨论

3.1 两种封装结构内相变材料液相体积分变化

图5为倒圆锥型与圆柱型两种封装结构内相变材料液相分数对比图.两种封装结构简图及尺寸如图6所示,两种结构材质均为壁厚2mm的不锈钢,内部容积和高度分别为1.74e-04m³和0.055m,各个壁面加热温度设定为60°C.

由图5可见,在熔化最初阶段两种结构内相变材料的熔化速率(即液相体积分随时间变化曲线的斜率)相对较大且基本一致,这主要是因为该阶段加热壁面处熔化的液态相变材料层较薄,此时两种结构内主导的传热方式均为导热;随着熔化过程的进行,液态相变材料层厚度的增大会导致表面传热热阻增大,使得相变材料的熔化速率逐渐下降.此

外,从图 5 中可以看出倒圆锥型结构内相变材料的熔化速率更大,说明与圆柱型结构底面所发生的接触熔化相比,倒圆锥型结构侧壁处的接触熔化性能更强,其封装相变材料的熔化速率更快;在熔化后期,未熔化的固态相变材料体积已较小,且倒圆锥型结构内固态相变材料聚集在底部锥角处,与侧壁面的接触面积较小,接触熔化速率降低,此时两种结构封装相变材料的熔化速率又基本持平。

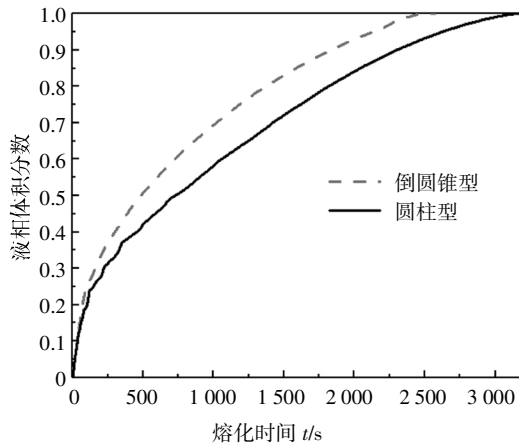


图 5 液相体积分数对比图

Fig.5 Comparison of the PCM liquid volume fraction in cylindrical container and inverted conical container

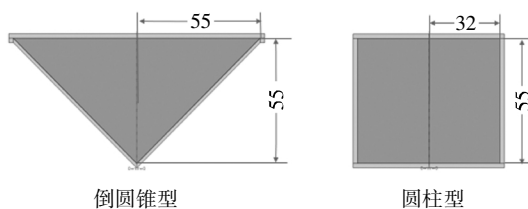


图 6 结构简图(单位:mm)

Fig.6 Schematic diagram of containers(unit:mm)

就相变材料完全熔化时间(即相变材料液相体积分数为 1 时的熔化时间)而言,倒圆锥型封装结构内相变材料完全熔化时间为 2 520 s,与圆柱型结构封装相变材料需要的 3 210 s 相比缩短了 690 s,熔化性能提高了 21.5%。该结果表明,通过优化圆柱型结构来增强固态相变材料与加热壁面的接触熔化,可以有效提高封装结构内相变材料的熔化性能。

3.2 倒圆锥型封装结构内相变材料熔化过程

为了进一步探究倒圆锥型结构内相变材料的熔化过程特性,本文基于所建数学模型对其在恒温水箱中熔化过程的瞬时速度场和温度场进行了分析。图 7 为相变材料被加热到 20 s、80 s、390 s、1 840 s、2 190 s 与 2 520 s 时的速度场(左侧)和温度场(右

侧)分布云图。

如图 7(a)所示,当相变材料加热到 20 s 时,附着于加热壁面的相变材料已完全熔化,并在壁面与固态相变材料之间形成厚度约为 0.8 mm 的液态相变材料层。由于该液态层厚度较小,在密度差作用下受到的热浮力不足以克服固体壁面的粘滞力,从而处于静止状态,此时的传热方式主要为导热。随着加热过程进行到 80 s,壁面处液态相变材料层厚度逐渐增大,其受到的热浮力逐渐大于壁面粘滞力,开始产生运动,此时侧壁面和顶部液态相变材料的最大流速分别可达到 1.75×10^{-4} m/s 与 8.09×10^{-5} m/s,如图 7(b)所示。该现象标志着封装相变材料的传热方式开始从导热转变为对流换热。

图 7(c)显示当加热时间达到 390 s 时,顶部液态相变材料的厚度达到了 5.2 mm,显著大于侧壁面液态相变材料厚度(1.5 mm)。这是因为固态相变材料在重力作用下,向下运动并对侧壁处液态相变材料产生挤压,促使其沿侧壁面向上流动,从而呈现顶部液态相变材料层厚度较大,而侧壁相对较小的现象。值得强调的是,此时固态相变材料在重力作用下对侧壁处液态相变材料层进行挤压并发生接触熔化,与圆柱型封装结构侧壁处传热过程相比^[14],倒圆锥型结构侧壁面处的接触熔化是提高相变材料熔化性能的一个重要因素。

图 7(d)显示,随着熔化过程持续进行到 1 840 s,侧壁面处出现了明显的 Rayleigh-Bernard 环流^[20]。产生这种现象的主要原因可能是随着固体相变材料与侧壁面之间液态层厚度的增大(此时已达到 4.5 mm),由加热壁面传到固态相变材料表面的热量已经不足以将刚熔化的低温相变材料迅速加热至高温,并向上流动,因此熔化的低温液态相变材料会沿着固-液界面向下流动,在流动过程中换热升温后再向上流动,从而形成环流。该环流的形成促进了液态相变材料的对流换热,同时也加大了固态相变材料与侧壁面间液态层的厚度,削弱了侧壁面的接触熔化。

图 7(e)显示,当熔化时间进行到 2 190 s 时,侧壁面处的 Rayleigh-Bernard 环流已经消失,且液态层的厚度降低到 2.3 mm。这可能是由于随着固态相变材料体积逐渐减小,通过侧壁面传入的热量足以将熔化的低温液态相变材料加热至高温并沿壁面向上流动,导致固态相变材料对侧壁液态相变材料的压

力增大,从而使得液态层厚度减小,传热速率得以提升.当加热时间达到 2 520 s 时,如图 7(f)所示,倒圆锥形结构内部的固态相变材料已经全部熔化,标志相变材料固-液相变过程的结束.

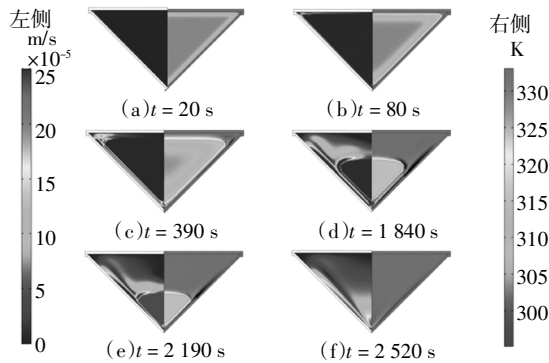


图7 熔化过程中的瞬时速度场和温度场
Fig.7 Time evolution of thermal and flow fields

由上述分析可知,与圆柱型结构相比,倒圆锥形结构封装相变材料与侧壁面间的接触熔化得到了显著提升,从而提高了相变材料的熔化性能.同时,熔化过程中液态相变材料的对流换热对相变材料的熔化性能也具有重要影响,且侧壁面处形成的 Rayleigh-Bernard 环流会加大该处液态层厚度,导致相变材料接触熔化性能有所削弱.

3.3 底面/顶面半径比对相变材料熔化性能的影响

封装结构高度和体积不变时,其上下底面积及相应侧壁面倾斜角度变化会对相变材料接触熔化和对流换热产生显著影响,从而导致相变材料熔化性能的改变.为评估上述参数变化对相变材料熔化性能的影响,本文以底面/顶面半径比(β)作为特征参数,在保持封装结构高度和体积分别为 0.055 m 和 $1.74e-04 \text{ m}^3$ 的基础上,基于所建传热模型对以下五种典型封装结构内相变材料的熔化性能进行了对比分析,其封装结构参数如表 2 所示,物理模型简图如图 8 所示.

表 2 封装结构的尺寸参数

Tab.2 Structure parameter of containers

型式	β	底面半径/m	顶面半径/m	比表面积/($\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$)
倒圆锥	0	0	0.055	0.131
倒圆台	1/2	0.021	0.042	0.105
圆柱	1	0.032	0.032	0.098
正圆台	2	0.042	0.021	0.105
正圆锥	∞	0.055	0	0.131

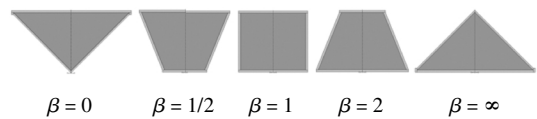


图 8 五种典型封装结构型式简图

Fig.8 Schematic diagram of five typical containers

图 9 为上述五种封装结构内相变材料液相体积分数变化曲线图.由图 9 可知,不同封装结构内相变材料液相体积分数随时间的变化趋势基本一致,在熔化初期相变材料的熔化速率最大,随着熔化过程的进行,熔化效率会逐渐降低,但其完全熔化时间存在较大的差异,如表 3 所示.

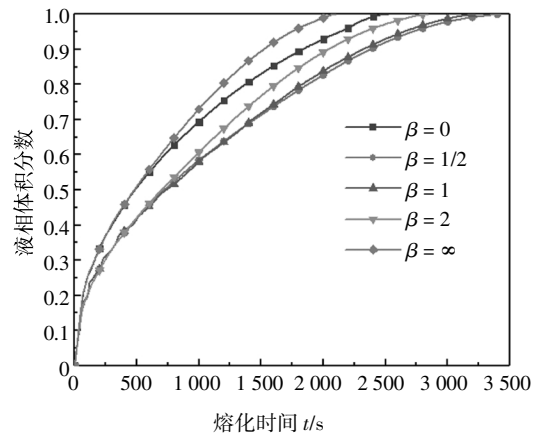


图 9 不同结构封装相变材料液相体积分数对比图
Fig.9 Comparison of the PCM liquid volume fraction in different containers

表 3 封装相变材料的完全熔化时间

Tab.3 Total melting time of PCM

型式	β	完全熔化时间/s
倒圆锥	0	2 520
倒圆台	1/2	3 410
圆柱	1	3 210
正圆台	2	2 840
正圆锥	∞	2 100

显然,当封装结构由倒圆锥型向倒圆台型与圆柱型转变时,相变材料完全熔化时间先上升后下降.与倒圆锥型结构相比,倒圆台型与圆柱型结构封装相变材料的完全熔化时间更长,说明 β 的增大使得熔化过程中固态相变材料对侧壁处液态相变材料的挤压力减小,液态层厚度增大,导致侧壁面传热速率

大幅降低,且表面积的减小同样会降低表面传热量,导致相变材料熔化速率降低;而圆柱型结构封装相变材料完全熔化时间相比倒圆台型结构有所下降,可能是 β 的增大同时会加强底面接触熔化与液态相变材料的自然对流,弥补了侧壁面接触熔化的削弱以及表面积减小导致壁面传热量的降低,从而使得相变材料熔化性能微弱上升。

当封装结构由圆柱型向正圆台型和正圆锥型转变时,相变材料完全熔化时间持续显著降低。其主要原因是, β 的增大促进了液态相变材料的自然对流换热以及底面处的接触熔化,此外,表面积的增大进一步加强热流体与封装结构之间的传热,从而有效提高相变材料的熔化性能。一个有趣的发现是,与倒圆锥型结构封装相变材料完全熔化时间(2 520 s)相比,正圆锥型结构封装相变材料完全熔化仅需 2 100 s,熔化性能提高了 16.7%。这说明与倒圆锥结构相比,虽然正圆锥结构内固态相变材料在侧壁面处的接触熔化性能相对较弱,但其内部液态相变材料的自然对流换热效果要远强于倒圆锥型结构,且倒圆锥型结构侧壁面处的 Rayleigh-Bernard 环流会加大该处液态层厚度,削弱相变材料接触熔化性能,从而导致正圆锥结构封装相变材料熔化性能更好。因此,在相变材料封装结构改进设计过程中,应同时考虑固态相变材料与加热壁面的接触熔化以及液态相变材料的自然对流作用,才能实现封装结构的最优化设计。

尽管实际应用中圆锥型封装结构可以有效提高相变材料的熔化性能,但与传统圆柱型结构相比,其对空间的利用率较低,不利于封装结构的布置。针对该问题,一种可行的方法是将正圆锥型结构与倒圆锥型结构间隔布置,在有效提高空间利用率的基础上,实现蓄热量以及蓄热效率的同时提高。

4 结 论

本文提出在不改变圆柱型封装结构体积的基础上,通过减小其底面/顶面半径比形成侧壁面倾斜的倒圆锥型封装结构,使得固态相变材料受重力作用向下运动时可充分与侧壁面紧密接触并发生接触熔化,从而实现相变材料熔化效率的有效提高,并通过建立相应熔化传热模型对倒圆锥型结构封装相变

材料的熔化性能进行了深入分析。主要结论如下:

1)与圆柱型结构相比,倒圆锥型结构可充分利用固态相变材料与侧壁面间的接触熔化,从而有效提高相变材料的熔化性能。其中,倒圆锥型结构封装相变材料完全熔化需 2 520 s,与圆柱型结构相比缩短了 690 s,熔化性能提高了 21.5%。

2)倒圆锥型结构封装相变材料熔化过程中,除固态相变材料与侧壁面间的接触熔化外,液态相变材料的自然对流对相变材料熔化性能也具有重要影响,且侧壁面处形成的 Rayleigh-Bernard 环流会加大该处液态层厚度,导致相变材料接触熔化性能有所削弱。

3)相比倒圆锥型结构,正圆锥型结构封装的相变材料熔化性能提高了 16.7%。因此,在相变材料封装结构改进设计中应同时考虑接触熔化以及液态相变材料自然对流的作用。同时,为了有效提高相变蓄热水箱空间利用率并减小布置难度,在实际应用中可将正圆锥型与倒圆锥型结构间隔布置,在有效利用空间的基础上实现水箱蓄热量和蓄热效率的同时提高。

在此工作基础上,考虑到用户用水行为会对水箱内温度分布以及封装相变材料的熔化过程产生较大的影响,未来应基于用户用水行为建立相应的数值传热模型,以进一步优化研究不同参数(相变材料热物性及封装结构几何尺寸等)以及相变材料封装结构布置方式对相变材料熔化性能的影响。此外,为了探究其在实际太阳能热水系统中的应用,应进一步将该相变蓄热水箱与太阳能热水系统进行耦合,以探究其对系统运行性能的影响。

参考文献

- [1] ZAYED M E, ZHAO J, ELSHEIKH A H, *et al.* Applications of cascaded phase change materials in solar water collector storage tanks: a review [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2019, 199: 24-49.
- [2] ABDULATEEF A M, MAT S, ABDULATEEF J, *et al.* Geometric and design parameters of fins employed for enhancing thermal energy storage systems: a review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 82: 1620-1635.
- [3] 张平, 张国强, 唐益宁, 等. 纳米 TiO_2 /石蜡复合乳液相变材料的制备与传热性能[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2018, 45

- (12):117—123.
- ZHANG P,ZHANG G Q,TANG Y N,*et al.* Preparation of phase change material based on nano-TiO₂/wax emulsion and its thermal conductive properties [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*,2018,45(12):117—123. (In Chinese)
- [4] ZHONG Y J,ZHAO B C,LIN J,*et al.* Encapsulation of high-temperature inorganic phase change materials using graphite as heat transfer enhancer[J]. *Renewable Energy*,2019,133:240—247.
- [5] ZALBA B,MARÍN J M,CABEZA L F,*et al.* Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications[J]. *Applied Thermal Engineering*,2003,23(3):251—283.
- [6] SHARMA A,TYAGI V V,CHEN C R,*et al.* Review on thermal energy storage with phase change materials and applications [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*,2009,13(2):318—345.
- [7] BECHIRI M,MANSOURI K. Study of heat and fluid flow during melting of PCM inside vertical cylindrical tube [J]. *International Journal of Thermal Sciences*,2019,135:235—246.
- [8] KENISARIN M M,MAHKAMOV K,COSTA S C,*et al.* Melting and solidification of PCMs inside a spherical capsule:a critical review [J].*Journal of Energy Storage*,2020,27:101082.
- [9] YE W B. Thermal and hydraulic performance of natural convection in a rectangular storage cavity [J]. *Applied Thermal Engineering*,2016,93:1114—1123.
- [10] 陈文振,孙丰瑞,杨强生. 接触熔化的研究进展[J]. *物理学进展*,2001,21(3):373—384.
- CHEN W Z,SUN F R,YANG Q S.Advances in study of contact melting[J].*Progress in Physics*,2001,21(3):373—384. (In Chinese)
- [11] HU N,ZHU Z Q,LI Z R,*et al.* Close-contact melting heat transfer on a heated horizontal plate:Revisited in the presence of nano-enhanced phase change materials (NePCM) [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*,2018,124:794—799.
- [12] SPARROW E M,GEIGER G T. Melting in a horizontal tube with the solid either constrained or free to fall under gravity[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*,1986,29(7):1007—1019.
- [13] SHMUELI H,ZISKIND G,LETAN R. Melting in a vertical cylindrical tube:Numerical investigation and comparison with experiments [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*,2010,53:4082—4091.
- [14] SHOKOUMAND H,KAMKARI B. Experimental investigation on melting heat transfer characteristics of lauric acid in a rectangular thermal storage unit [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*,2013,50:201—212.
- [15] 周跃宽,俞准,贺进安,等. 新型结构相变蓄热水箱模型研究及应用分析[J]. *建筑科学*,2017,33(2):27—33.
- ZHOU Y K,YU Z,HE J A,*et al.* Model and application of a domestic hot-water tank with a novel structure comprising a phase-change material[J].*Building Science*,2017,33(2):27—33. (In Chinese)
- [16] ZHAO J D,ZHAI J,LU Y H,*et al.* Theory and experiment of contact melting of phase change materials in a rectangular cavity at different tilt angles [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*,2018,120:241—249.
- [17] SOUAYFANE F,BIWOLE P H,FARDOUN F. Melting of a phase change material in presence of natural convection and radiation:a simplified model [J]. *Applied Thermal Engineering*,2018,130:660—671.
- [18] 杨靖,张思远,刘凯敏,等. 基于两相流沸腾传热模型的缸盖温度场辨析 [J]. *湖南大学学报(自然科学版)*,2015,42(8):34—39.
- YANG J,ZHANG S Y,LIU K M,*et al.* An analysis on thermal load of cylinder head based on two-phase flow boiling heat transfer[J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*,2015,42(8):34—39. (In Chinese)
- [19] VOLLER V R,PRAKASH C. A fixed grid numerical modelling methodology for convection-diffusion mushy region phase-change problems [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*,1987,30(8):1709—1719.
- [20] AHLERS G,GROSSMANN S,LOHSE D. Heat transfer and large scale dynamics in turbulent Rayleigh-Bénard convection [J]. *Reviews of Modern Physics*,2009,81(2):503.