泡沫金属对高温熔盐熔化过程的影响

宗肖*, 吴桂龙, 冯娟娟, 马连湘

青岛科技大学机电学院, 青岛 266061

* 联系人, E-mail: lambertgod@163.com

2013-01-03 收稿, 2013-12-03 接受, 2014-01-09 网络版发表

摘要 泡沫金属对高温熔盐的相变过程影响很大. 本文通过 Fluent 软件研究了在微重力、真空条件下, 泡沫金属的孔隙率, 填充位置和体积对高温熔盐熔化过程的影响. 结果表明, 虽然泡沫金属的孔隙率的变化对高温熔盐整个熔化过程温度的分布影响不大. 但是, 随着孔隙率的变小, 对熔化速率的影响越小. 泡沫金属的填充体积对温度分布影响较小, 但是填充位置对融化过程温度场影响很大. 在一定范围内可以减少泡沫金属的填充体积, 将泡沫金属填充到一定的位置来增加蓄热量.

关键词

泡沫金属
高温熔盐
孔隙率
填充位置和体积

高温相变蓄热技术是空间太阳能热动力发电系统的关键技术之一. 但是, 由于相变蓄热中所固有的相变材料导热系数低的问题极大地限制了其应用. 为了弥补其不足, 可以采用将相变材料填充到高孔隙的多孔介质中, 在相变材料中安置金属结构等方法来强化其传热速率. 其中, 泡沫金属因为其比表面积大, 孔隙率高等独特的优点^[1], 受到广泛的重视.

张涛和余建祖^[2], 彭冬华等人^[3]以及 Bugaje^[4]用模拟和实验的方法研究了向低温相变材料石蜡中加入泡沫金属, 能够改善相变蓄热装置温度的均匀性, 提高低温相变材料的熔化和凝固速率; 刑玉明和许昕^[5], Mesalhy 等人^[6]对填充泡沫金属的高温相变材料相变过程进行了数值模拟, 证明其能够有效地改善高温固液相变中空穴的分布和提高传热性能.

本文以单个相变材料容器为研究对象, 相变材料为 80.5LiF-19.5CaF₂, 探讨了微重力真空环境下泡沫金属的孔隙率及泡沫金属在相变容器中的填充体积和填充位置对高温相变材料熔化过程的影响, 为泡沫金属的合理应用提供了指导.

1 传热模型

1.1 几何模型

图 1 为本文采用的相变材料容器的计算几何模型和网格划分, 模型为吸热器换热管上单个相变材料容器, 长为 25.4 mm, 高为 12.4 mm, 采用三角形网格划分方式, 网格通过无关性检验, 为了计算方便, 对模型做了如下假设^[7].

(1) 在微重力真空条件下, 忽略液相相变材料的自然对流, 忽略黏性耗散.

(2) 相变材料相变发生在一个固定的温度, 而不是在一个温度区域, 为 1040 K.

(3) 相变材料的密度符合 boussinesq 假设.

图 1 相变容器的二维模型及网格划分

引用格式: 宗肖, 吴桂龙, 冯娟娟, 等. 泡沫金属对高温熔盐熔化过程的影响. 科学通报, 2014, 59: 722-726

Zong X, Wu G L, Feng J J, et al. Effects of metallic foams on melting process of high temperature molten salt (in Chinese). Chin Sci Bull (Chin Ver), 2014, 59: 722-726, doi: 10.1360/972013-684

1.2 边界条件及初始条件

容器底部和侧面都用保温材料保温, 顶部有固定的热流密度 $q(t)=6000 \text{ W/m}^2$, 即给定的边界条件为顶部

$$k \frac{\partial}{\partial r} T(r, z, t) = q(t). \quad (1)$$

底部

$$\frac{\partial}{\partial r} T(r_0, z, t) = 0. \quad (2)$$

侧壁

$$\frac{\partial}{\partial z} T(r, 0, t) = 0, \quad \frac{\partial}{\partial z} T(r, l, t) = 0. \quad (3)$$

整个模型的初始温度小于相变材料的熔点, 即相变材料完全处于固相区. 不计重力, 操作压力为 0 MPa.

1.3 材料及计算方法

根据相变温度, 本文采用的容器的固体材料为 Haynes188, 相变材料为 LiF-CaF₂ 混合盐^[8], 泡沫金属材料为镍. 各材料物性参数如表 1 所示.

采用 Fluent 中的熔化/凝固模型, 应用焓法模型进行求解, 在整个区域建立统一的能量方程, 简化了计算过程.

表 1 材料性质列表

属性	LiF-CaF ₂		Haynes188	Ni
	固态	液态		
密度 (kg/m ³)	2590	2190	8813	8902
比热容 (J kg ⁻¹ K ⁻¹)	1770	1770	548	460
导热系数 (W m ⁻¹ K ⁻¹)	3.8	1.7	24.6	90
熔化温度 (K)	1040		1575~1630	—
相变潜热 (J/kg)	816000		—	—
热膨胀系数 (1/K)	2.87×10 ⁻⁴		—	—

二维柱坐标下的焓法能量方程为

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right), \quad (4)$$

其中, ρ 为密度, k 为导热系数, h 为比焓.

采用非定常计算方式, SIMPLE 算法, 时间步长为 1 s, 初始温度为 990 K.

2 计算结果及分析

2.1 孔隙率对熔化过程的影响

图 2 分别是在熔化过程中未加入泡沫金属和加入孔隙率为 0.95, 0.9 和 0.8 的泡沫金属在 36 min 的温度分布等值线图. 由图 2(a)可知, 在没有填充泡沫金属, 相变材料开始熔化, 整个容器的最大温差达到了 11 K. 在加入泡沫金属后, 整个容器相变材料都

图 2 未填充和填充不同孔隙率的泡沫金属的温度分布(K)
(a) 未填充; (b) 孔隙率为 0.95; (c) 孔隙率为 0.9; (d) 孔隙率为 0.8

开始熔化, 温度的分布明显比之前要均匀, 最大温差 4 K 左右. 两者温差相差不是特别大, 主要原因是本文采用容器的体积比较小, 外壁面的导热对温度的分布产生了一定的影响, 外壁面材料的高导热率对温度的均匀分布起到了一定的作用. 从图 2(b)~(d)中可以看出, 在一定范围内, 不同孔隙率之间对温度的分布影响比较小.

图 3 是填充几种不同孔隙率的泡沫金属和未填充的外壁最高温度的变化图和熔化过程的液相率变化, 由图 3 可知, 相变材料中的熔化时间都在 400 s 左右, 填充泡沫金属后, 泡沫金属的孔隙率的变化对

在微重力、真空环境中高温熔化过程中对相变容器外壁温度变化和熔化开始的时间影响不大. 孔隙率越高, 因为填充的相变材料越多, 熔化速率越小, 完成熔化所需要的时间越长. 另一方面, 随着孔隙率的变小, 对熔化速率的影响越小, 孔隙率从 0.8 增大到 0.9 的影响要小于从 0.9 到 0.95 对熔化速率的影响. 在实际应用中, 应综合考虑, 找到最合适的孔隙率以达到最好的效果.

2.2 填充体积和位置对熔化过程的影响

图 4 分别是泡沫金属填充体积为 90%, 80%和

图 3 外壁面最高温度(a)及液相率(b)变化

图 4 不同填充体积的温度分布(K)

(a) 填充体积为 90%; (b) 填充体积为 80%; (c) 填充体积为 70%

70%在 36 min 的温度分布图, 泡沫金属孔隙率为 90%, 填充到容器的上部, 由图 4 可以看出, 在填充不同体积的情况下, 对比图 2 填充体积 100%的情况, 在不考虑空穴和流动时, 发现整个熔化过程中容器温度分布变化不明显. 因此, 在一定条件下, 如果在一定程度上减小泡沫金属的体积, 能够在不影响温度分布的前提下, 同时能减轻设备的重量, 增加相变材料的容量, 进而增加蓄热量.

当泡沫金属填充到容器的下部, 填充体积为 80%时, 在 36 min 时温度分布如图 5 所示, 容器内最大温差达到了 8 K, 容器外壁侧一小部分开始发生熔化, 大部分区域刚刚达到熔化温度. 对比图 2 未填充

图 5 泡沫金属在底部时的温度分布(K)

泡沫金属的结果, 在这种条件下, 泡沫金属能够使温度分布均匀的作用大大地减弱, 甚至可以忽略. 另一方面, 还使得相变材料的蓄热量减少. 因此, 把泡沫金属填充到容器的下部对相变材料的熔化过程不能起到很好的作用.

3 结论

本文对在微重力、真空条件下泡沫金属对单个容器的熔化过程的影响进行了模拟, 模拟结果表明如下几点.

(1) 添加泡沫金属, 能使相变容器温度分布更加的均匀, 但是在考虑壁面导热下, 效果不是很明显.

(2) 在一定范围内泡沫金属的孔隙率的变化对相变材料整个熔化过程温度的分布影响不大. 但是, 随着孔隙率的变小, 对熔化速率的影响越小.

(3) 泡沫金属的填充体积对熔化过程的温度分布影响很小. 可以在一定程度上减小泡沫金属的体积, 增加蓄热量.

(4) 泡沫金属的填充位置对熔化过程的温度分布影响很大, 当泡沫金属填充到热流一侧时, 能够使整个容器温度分布均匀. 相反, 当填充到远离热流的一侧时, 极大地削弱了泡沫金属的作用, 还使得蓄热量减少.

参考文献

- 1 于英华, 李智超, 刘敬福. 多孔泡沫铝性能研究现状及应用前景展望. 辽宁工程技术大学学报, 2003, 22: 259-260
- 2 张涛, 余建祖. 相变装置中填充泡沫金属的传热强化分析. 制冷学报, 2007, 28: 13-17
- 3 彭冬华, 陈振乾, 施明恒. 泡沫金属内相变材料熔化传热过程的数值模拟. 工程热物理学报, 2009, 30: 1025-1028
- 4 Bugaje I M. Enhancing the thermal response of latent heat storage systems. Int J Energy Res, 1997, 21: 759-766
- 5 刑玉明, 许昕. 高温相变单元管蓄热过程数值模拟. 航空动力学报, 2002, 17: 231-235
- 6 Mesalhy O, Lafdi K, Elgafy A. Numerical study for enhancing the thermal conductivity of phase change material (PCM) storage using high thermal conductivity porous matrix. Energ Convers Manage, 2005, 46: 847-867
- 7 徐伟强, 袁修干. 蓄热容器内固液相变蓄热过程的仿真计算. 系统仿真学报, 2011, 23: 1346-1349
- 8 Wichner R P, Solomon A D, Drake J B. Thermal analysis of heat storage canisters for a solar dynamic space power system. NASA R P, 1988

Effects of metallic foams on melting process of high temperature molten salt

ZONG Xiao, WU GuiLong, FENG JuanJuan & MA LianXiang

College of Electromechanical Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266061, China

Metallic foams had great influence on the phase transition process of high temperature molten salt. Based on the software of fluent, the effects of the metallic foams porosity, filling position and volume on melting process of high temperature molten salt in microgravity and vacuum conditions were studied in this paper. Results showed that although the metallic foams porosity had little impact on temperature distribution of the melting process, the impact on the melting rate became smaller with the porosity becoming smaller. In contrast to the filling volume of metallic foams, the filling position had great influence on temperature field of melting process. Within a certain range, reducing the filling volume of metallic foams could increase the storage quantity of heat across filling in certain locations.

metallic foams, high temperature molten salt, porosity, filling position and volume

doi: 10.1360/972013-684