

适用于废热回收的相变蓄热装置数值模拟与实验研究

吴 斌, 邢玉明

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191)

摘 要: 固-液相变潜热蓄热技术是一种极具前景的工业废热回收方式, 通过管壳式换热器可利用相变材料 (PCM) 吸收工业废热加以储存再用于加热水, 从而实现了工业废热的回收利用。对填充高导热多孔筛网的管壳式潜热蓄热单元 (LHSU) 建立了二维数学模型, 并对填充与未填充筛网的蓄热容器一同进行了相变蓄热实验。实验结果表明, 填充筛网能够有效改善 PCM 的传热性能; 实验数据和计算值吻合的较好, 证明了计算模型的有效性。利用计算模型, 对 3 种 PCM (石蜡 P116、硬脂酸和软脂酸) 蓄热系统进行了数值计算。结果表明, 采用软脂酸的蓄热系统热性能最佳, 能很好地满足供应生活热水的设计要求。研究结论对蓄热系统的设计和性能优化有一定的指导作用。

关 键 词: 潜热蓄热; 废热回收; 多孔筛网; 相变材料; 相变蓄热系统

中图分类号: TK512.4 文献标识码: A

引 言

固-液相变材料 PCM (phase change material) 的潜热蓄热装置具有储能密度高, 体积小, 相变温度选择范围宽, 相变储/释热过程中温度变化较小、易于控制等优点, 广泛应用于太阳能热利用、工业废热和余热回收、电力的“移峰填谷”以及工业与民用建筑和空调节能等众多领域^[1], 将其用于工业炉高温烟气等工业废热回收利用是极为可行的。

为了对蓄热系统进行长期的性能分析和研究, 需要建立合理的潜热蓄热单元 LHSU (latent heat storage unit) 模型, 已有分析潜热贮存单元的物理模型大多为管壳式模型^[2]。此外, 常用的 PCM 导热率较低, 导致系统内 PCM 的利用率不高, 储/释热均匀性差, 需采用强化手段强化 PCM 的传热能力。国内外对提高 PCM 储热/释热率的方法进行了大量的实验和理论研究^[3], 在 PCM 中加入高导热性填充物如粉末、泡沫、蜂窝状和肋片等可以明显改善相变材料

的导热性能, 从而改善系统的性能^[4~8]。

基于已有的研究基础和出于实际应用的考虑, 对高温烟气废热回收系统的管壳式潜热蓄热装置的释热过程进行数值研究和理论分析, 其中 PCM 容器内填充有高导热率材料制成的多孔筛网以强化 PCM 的传热。

1 废热回收系统

高温烟气废热回收系统主要由高温换热器、蓄热装置 (多个管壳式 LHSU)、泵及其它附属设备构成的, 如图 1 所示。从工业炉出来的高温烟气经高温换热器将部分热量传递给干空气, 被加热的干空气流过管壳式蓄热装置并将热量储存其中, 该蓄热过程直至蓄热装置内 PCM 完全熔化为止。在夜间时分, 常温水通过蓄热装置被加热至用户使用要求的温度, 此过程为蓄热装置释热过程, 直至 PCM 完全凝固。蓄热过程中干空气流率可根据蓄热装置内 PCM 的熔化情况进行调节, 使 PCM 在蓄热时间内完全熔化; 释热过程中水流率按最大使用流率要求设计。

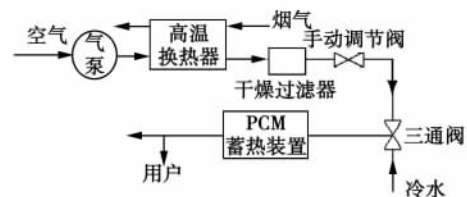


图 1 废热回收系统示意图

2 计算模型

2.1 数学模型

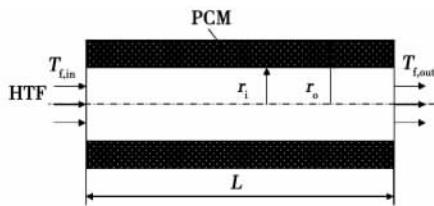
图 1 所示系统在蓄热过程中以完成 PCM 熔化

收稿日期: 2010-02-01; 修订日期: 2010-05-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50876004)

作者简介: 吴 斌 (1983-), 男, 江西永丰人, 北京航空航天大学博士生。

为目标,可通过调节空气流率来实现,因此蓄热系统设计的关键在于释热过程,该系统的设计需同时满足:(1) 在用户使用热水时间内出口热水温度需达到使用要求;(2) 蓄热装置内 PCM 完全凝固以达到利用率最高。对图 2 所示管壳式 LHSU 建立数学模型,图中传热流体 HTF(Heat Transfer Fluid)在管内流动,环形管夹层填充由 PCM 和多孔环形筛网组成的蓄热介质体,HTF 流经内管时与夹层中的 PCM 发生热交换。在释热过程中,液态 PCM 凝固放热,HTF 沿轴向升温。为简化数学模型作了以下假定:(1) HTF 流动充分发展;(2) 不考虑 HTF 的径向导热和粘性耗散;(3) PCM 的热物性参数与温度无关;(4) 忽略管壁热阻;(5) 忽略 PCM 熔化时自然对流的影响。基于上述假设,可分别得出 HTF 和 PCM 的能量控制方程。



r_i —LHSU 管内径; r_o —外径; L —LHSU 轴向长度;
 $T_{f,in}, T_{f,out}$ —HTF 的入口和出口温度。

图 2 LHSU 示意图

对 HTF:

$$\rho_f c_f \frac{\partial T_f}{\partial t} + \rho_f c_f u \frac{\partial T_f}{\partial x} = \frac{2h}{r_i} (T_p - T_f) + k_f \frac{\partial^2 T_f}{\partial x^2} \quad (1)$$

LHSU 中 PCM 填充有多孔筛网,将筛网对 PCM 的强化导热作用以有效导热率的形式归于 PCM 的能量控制方程中:

$$(\rho c)_{\text{eff}} \frac{\partial T_p}{\partial t} = \nabla \cdot (k_{\text{eff}} \nabla T_p) - \rho_p l \varepsilon \frac{\partial f_1}{\partial t} \quad (2)$$

其中:

$$(\rho c)_{\text{eff}} = \varepsilon (\rho c)_p + (1 - \varepsilon) (\rho c)_s \quad (3)$$

蓄热介质单元体的有效导热系数 k_{eff} 的计算式可参考文献 [9] 得出:

$$k_{\text{eff}} = \frac{\left[k_p + \pi \left(\sqrt{\frac{1-\varepsilon}{3\pi}} - \frac{1-\varepsilon}{3\pi} \right) (k_s - k_p) \right] \left[k_p + \frac{1-\varepsilon}{3} (k_s - k_p) \right]}{k_p + \left[\frac{4}{3} \sqrt{\frac{1-\varepsilon}{3\pi}} (1-\varepsilon) + \pi \sqrt{\frac{1-\varepsilon}{3\pi}} - (1-\varepsilon) \right] (k_s - k_p)} \quad (4)$$

$$f_1(T) = \begin{cases} 1 & \text{当 } T_p > T_m \\ 0 & \text{当 } T_p < T_m \end{cases} \quad (5)$$

式中: ρ —密度; c —比热; T —温度; t —时间; u —HTF

流速; x —轴向坐标; h —对流换热系数; k —导热系数; l —相变潜热; f_1 —单元控制体内 PCM 液相分数; ε —筛网孔隙率; 下标: f、P、eff、s—HTF、PCM、有效蓄热介质和固体筛网。

初始条件:

$$T_p = T_m, T_f = T_{f,in} \quad (6)$$

边界条件:

$$T_f(x=0) = T_{f,in}, \frac{\partial T_p}{\partial x}(x=0, r) = 0 \quad (7a)$$

$$\frac{\partial T_f}{\partial x}(x=L) = 0, \frac{\partial T_p}{\partial x}(x=L, r) = 0 \quad (7b)$$

$$h(T_p - T_f) = -k_{\text{eff}} \frac{\partial T_p}{\partial r}(x, r=r_i) \quad (7c)$$

$$\frac{\partial T_p}{\partial x}(x, r=r_o) = 0 \quad (7d)$$

2.2 数值求解方法

将求解区域划分为均匀网格,再将控制微分方程在以网格节点为中心的控制体积内用有限体积法进行数值离散。在求解能量方程时采用全隐格式,以交替方向的隐式格式与 3 对角矩阵解法相结合的方法来求解方程。对于离散后的 PCM 能量方程中的液相分数在每个时间步的更新采用文献 [10] 中由 Voller 提出的计算方法进行计算。在离散 PCM 能量方程时,控制体积界面上的导热系数取两相邻节点导热系数的调和平均值。对 HTF,由于是一维流动,因此在轴向用有限差分进行数值离散,其中对对流项(一阶微商项)采用逆风格式,在求解过程中,对 HTF 和 PCM 分别求解之后,两者通过边界条件进行耦合。在每个时间步长内,必须进行迭代,直至结果收敛。

3 实验系统

为验证填充多孔筛网对 PCM 导热的强化效果及计算模型的有效性,建立了实验系统装置。实验采用了铝制容器封装 60 号石蜡作为相变蓄热介质,为了对比验证填充高导热多孔筛网对固液传热过程的影响,设计制造了 4 个结构尺寸相同的蓄热容器,其中 1 号和 2 号容器内填充有铝制筛网,3 号和 4 号容器内为纯 PCM。如图 3 所示,实验系统主要由高压供气设备、空气加热器、换热器、热水加热设备、蓄热装置及温度采集系统组成。在各个容器表面布置了 Pt100 铂电阻,并将铂电阻通过数据采集模块与计算机相连对温度进行实时观测和记录。

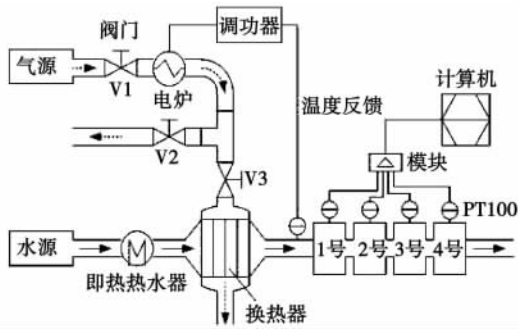


图 3 实验系统示意图

实验在常温常压下进行,分为储热和释热两个过程。蓄热过程中,用即热式热水器和高温高压热空气共同作用将水加热至 80 °C 后通过并加热容器内壁,使容器内 PCM 熔化;当容器内 PCM 完全熔化后停止加热蓄热容器,关闭即热式热水器和空气加热设备,让常温水直接通过容器内壁并带走热量,使 PCM 凝固,此过程即蓄热装置放热过程。

4 结果与分析

4.1 实验结果及分析

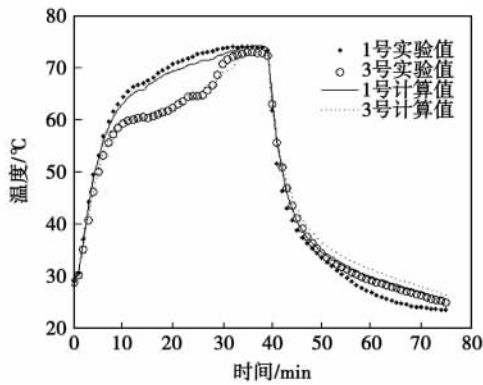


图 4 1 号、3 号容器测点温度变化曲线

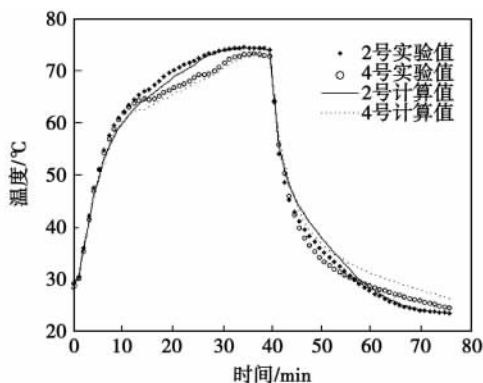


图 5 2 号、4 号容器测点温度变化曲线

图 4 和图 5 分别对应的是 1 号和 3 号容器及 2 号和 4 号容器测点温度实验测定值和数值计算值的变化曲线。由图可见,计算模型的数值结果和实验值吻合的很好,温度最大误差为 2.13%,误差可能是由接触热阻以及温度变化引起的材料热物性参数变化等因素产生的,由此可见,计算模型能够较为准确的预测蓄热容器储/释热过程的热性能。此外,1 号和 3 号,2 号和 4 号这两对容器的温度曲线对比可见:(1) 1 号和 2 号容器的温度变化分别比 3 号和 4 号容器更快,能更早地达到蓄释热过程的平衡温度,说明筛网的填充强化了蓄热容器内 PCM 的导热,从而缩短了相变过程的时间;(2) 3 号和 4 号容器在蓄热过程中的温度升高趋势在 PCM 相变温度点附近放缓,说明相变过程中的固液相变界面比较集中,相变过程随相变界面比较缓慢的推进;而 1 号和 2 号容器在蓄热过程中升温趋势比较连续,说明填充筛网使得蓄热容器内的固液相变界面更加分散,相变过程更加迅速。

4.2 蓄热系统的 PCM 选择

为更好地研究 PCM 物性参数对装置性能的影响,考虑到应用背景即 PCM 熔点需高于热水出口温度,在此选择了 3 种 PCM 并分别对各自蓄热装置的释热过程进行了数值计算分析,选择导热性较好、密度较小的 A_1 作为多孔筛网材料,其热物性参数如表 1 所示^[3]。LHSU 各主要计算参数分别为: $L = 3 \text{ m}$, $r_i = 0.01 \text{ m}$, $r_o = 0.05 \text{ m}$, $T_{i,im} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$, $\varepsilon = 0.97$, 供热时间为 2 h,由计算的雷诺数 Re 数值可知 HTF 为紊流流动,HTF 与 PCM 之间的管内受迫紊流对流换热系数可参考文献 [11] 求得。对网格粗细进行计算分析后,将二维模型划分为 50(轴向) \times 20(径向) 个网格,时间步长取 5 s,网格再细化后对结果影响不大。

表 1 材料热物性参数

	ρ /kg·m ⁻³	c /J·(kg·K) ⁻¹	k /W·(m·K) ⁻¹	l /kJ·kg ⁻¹	T_m /°C
石蜡(P116)	802	2 510	0.358	226	47
硬脂酸	903	1 590	0.29	169	58
软脂酸	989	2 222	0.162	185.4	64
铝	2 707	383	386	-	-

在对蓄热装置释热过程的考察和研究时,主要考察可衡量相变速度的 PCM 熔化率 f (所有单元体液相分数 f_l 总和) 来评价蓄热系统的性能。图 6 所示为 3 种 PCM 蓄热装置中不同 HTF 质量流率在

0.01 ~ 0.1 kg/s 时熔化率随时间的变化。图 6 (a) 所示,HTF 流率为 0.01 ~ 0.05 kg/s 时 PCM 在要求时间内不能完全熔化,蓄热装置储存的热量不能完全释放出来,在实际应用中会造成材料的浪费;对于硬脂酸蓄热装置,如图 6 (b) 所示,在 HTF 流率低于 0.02 kg/s 时也存在上述问题,只有软脂酸蓄热装置在 0.01 ~ 0.1 kg/s 时 PCM 能完全熔化,所蓄热量也能基本全部释放。

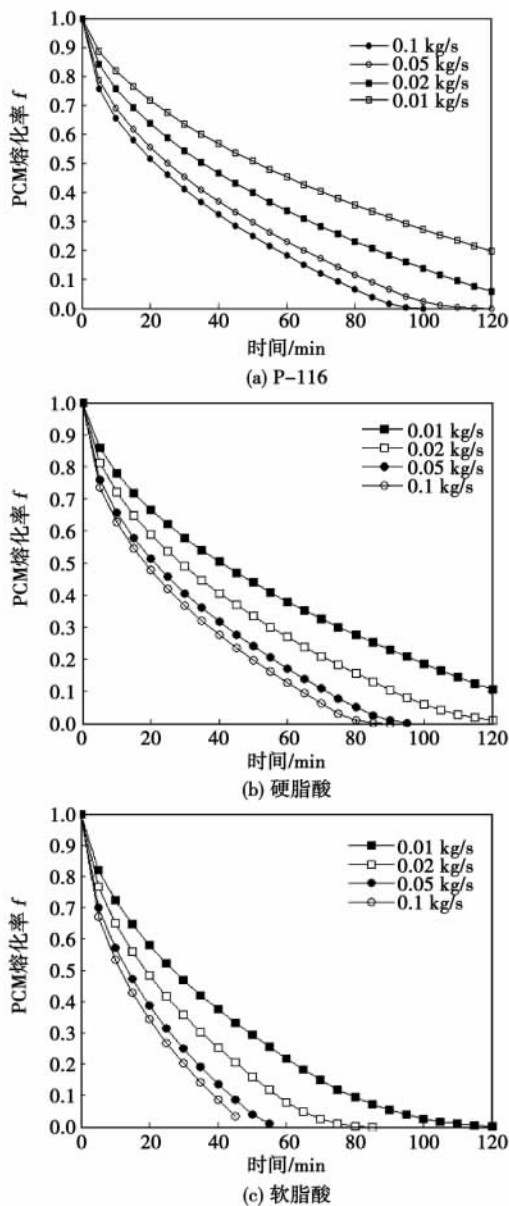


图 6 不同 HTF 流率时 3 种 PCM 熔化率随时间的变化

图 7 所示为 3 种 PCM 蓄热装置中热水出口温度随时间的变化。由图可见,随着 HTF 流率增加热水出口温度 $T_{f,out}$ 急速下降;此外,还可看到,当 HTF

流率较小时(0.01 kg/s), $T_{f,out}$ 变化很慢且流率越小 $T_{f,out}$ 会越接近 PCM 的熔化温度。通过对 3 种 PCM 蓄热系统的比较,可见软脂酸在 HTF 流率较大时仍可以保证 $T_{f,out}$ 高于用户要求的热水出口温度,而其余两者在相同条件下要达到相同的 $T_{f,out}$ 则需减小 HTF 流率也就是在满足同等供热水量时增加 LHSU 蓄热管数,从而需要增加管材用量和相应的附属设备及材料等的用量,这会在实际应用中相当程度的增加系统的成本。因此,选择软脂酸作为 PCM 蓄热系统的蓄热介质是能够很好地满足工业余热回收热水系统的。

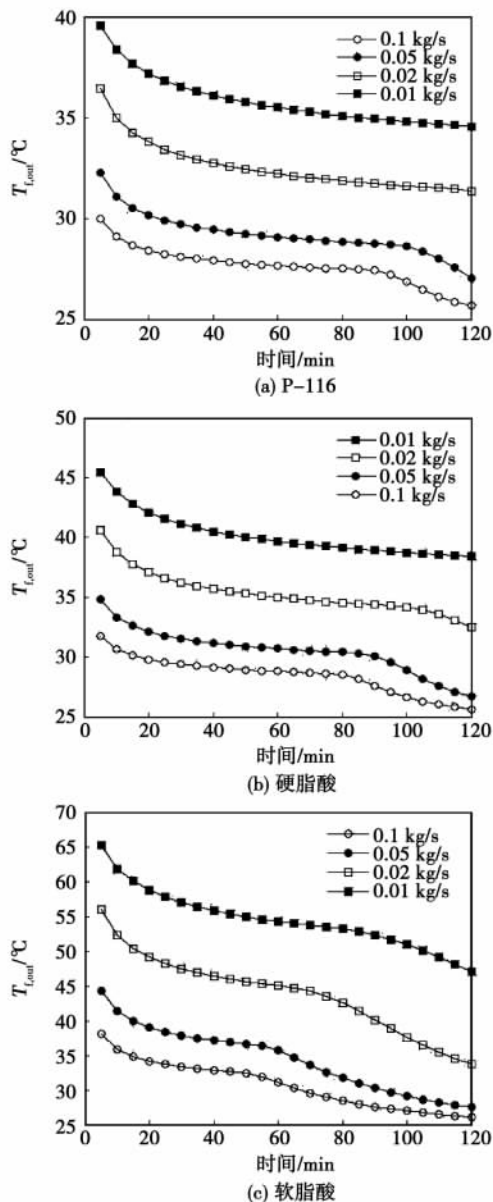


图 7 不同 HTF 流率时热水出口温度随时间的变化

5 结 论

对废热回收系统的填充多孔筛网的管壳式 LH-SU 蓄热系统建立了物理模型,并进行了实验和数值模拟研究,结果表明:

(1) 填充高导热筛网可以很好地改善 PCM 的传热性能;计算模型能够有效地预测蓄热装置的热性能;

(2) HTF 质量流率对蓄热装置热性能有较大影响,在释热过程中 HTF 出口温度随其值增加而降低,但在 HTF 流量确定的情况下,LHSU 单管 HTF 质量流率的减小则管数增加,从而会增加设备的成本。因此,在设计时需综合考虑各项因素后再进行反复的校核验证设计,这样才能得出较好且合理的蓄热装置设计方案;

(3) 以软脂酸为蓄热介质并填充高导热率筛网的 LHSU 的蓄热装置可以很好的实现对废热的回收利用,其所回收的热量能有效的用于生活取热如提供生活用热水等方面。

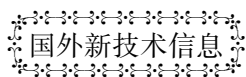
在 PCM 内填充高导热率筛网的构思及其研究工作可对于工业余热废热回收的蓄热装置的设计和性能优化提供有益的参考。

参考文献:

- [1] 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: 318 - 345.
- [2] SAMAN W, BRUNO F, HALAWA E. Thermal performance of PCM

- thermal storage unit for a roof integrated solar heating system [J]. *Solar Energy*, 2005, 78: 341 - 349.
- [3] BELEN Z, JOSE M M, LUISA F C, et al. Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2008, 23: 251 - 283.
- [4] NAYAK K C, SAHA S K, SRINIVASAN K, et al. A numerical model for heat sinks with phase change materials and thermal conductivity enhancers [J]. *Int J Heat and Mass Transfer*, 2006, 49: 1833 - 1844.
- [5] TONG X, KHAN J, AMIN M R. Enhancement of heat transfer by inserting a metal matrix into a phase change material [J]. *Numerical Heat Transfer, Part A*, 1996, 30: 125 - 141.
- [6] OLIVES R, MAURAN S. Paraffin/porous-graphite-matrix composite as a high and constant power thermal storage material [J]. *Int J Heat Mass Transfer*, 2001, 44: 2727 - 2737.
- [7] LAFDI K, MESALHY O, ELGAFY A. Graphite foams infiltrated with phase change materials as alternative materials for space and terrestrial thermal energy storage applications [J]. *Carbon*, 2008, 46: 159 - 168.
- [8] RAVI K, XIANG QIWANG, ARUN S M. Transient cooling of electronics using phase change material (PCM) based heat sinks [J]. *J Applied Thermal Engineering*, 2008, 28: 1047 - 1057.
- [9] LAFDI K, MESALHY O, ELGAFY A. Graphite foams infiltrated with phase change materials as alternative materials for space and terrestrial thermal energy storage applications [J]. *Carbon*, 2008, 46: 159 - 168.
- [10] VOLLER V R. Fast implicit finite-difference method for the analysis of phase change problems [J]. *Numerical Heat transfer, Part B*, 1990, 17: 155 - 169.
- [11] INCROPERA F P, DEWITT D P. *Introduction to heat transfer [M]*. New York: John Wiley & Sons, 1985.

(编辑 陈 滨)



国外新技术信息

新型垂直轴风力发电机组(2011-X002)

技术领域: 能源

应用领域: 可再生能源风力发电设备领域

项目简介: 新型垂直轴风力发电机具有双转子结构, 安装维修方便、叶片设计制造新颖, 任何方向来风都能利用发电。可以在低风速下启动运行, 并能提高风力发电机稳定性和效率, 可有效利用风能和消除风车转动时的噪声。能够做到常年低风发电, 大大增加了风力的年利用小时数, 从而提高了风车的工作效率, 并且可以降低对电网功率波动的影响。配合专利技术的叶片使用, 将大幅度提高风力发电机的整机性能, 具有显著的社会效益。

我国部分地区 8 级以下风能资源丰富, 这种新型垂直轴风力发电机更加适用于其风力资源和地形特点, 对于调整能源结构, 最大限度的利用风能资源, 缓解环境污染, 减少碳排放量具有十分重要的意义。

(需要该技术请与编辑部联系)

Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. – 2011, 26(1). – 48 ~ 52

By employing a flow boiling-based heat transfer test platform, studied were the flow boiling-based heat transfer characteristics of an iron-base sintering type perforated vertical tube. By using the basic theory and formula of flow boiling-based heat transfer, the heat flux, boiling heat transfer coefficient and related parameters were calculated and the influence of the superheated degree and flow speed on the flow boiling-based heat transfer performance of the perforated tube was investigated. The research results show that the flow boiling-based heat transfer capacity of the sintering type surface perforated tube is superior to that of a bare tube under the same condition and the inner surface boiling heat transfer coefficient is about 1.6 times of that of a bare tube in the same size. The surface wall superheated degree required for attaining the boiling is about 5 °C lower than that of the bare tube. Moreover, to increase the superheated degree and flow speed can both increase the boiling heat transfer coefficient of the perforated tube. In the meantime, the cause that the heat transfer performance of the surface perforated tube is better than that of the bare tube was also analyzed. **Key words:** sintering, perforated tube, flow boiling, heat transfer

适用于废热回收的相变蓄热装置数值模拟与实验研究 = **Numerical Simulation and Experimental Study of a Phase Change Heat Accumulation Device Applicable for Waste Heat Recovery** [刊, 汉] WU Bin, XING Yu-ming (College of Aeronautical Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing, China, Post Code: 100191) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. – 2011, 26(1). – 53 ~ 57

Solid-liquid phase change latent heat accumulation technology constitutes an industrial waste heat recovery mode, which has extremely good prospects. Through a shell and tube heat exchanger, the phase change latent heat stored in the phase change material (PCM) by absorbing industrial waste heat was used for heating water, thereby realizing an industrial waste heat recovery and utilization. A two dimensional mathematical model for the shell and tube latent heat storage unit (LHSU) intensified by filling with high conductivity porous matrix was established and a phase change heat storage test was conducted simultaneously of a heat storage vessel being filled and one not filled with the porous matrix. The test results show that filling with the porous matrix can effectively improve the heat transfer performance of the PCM. The test data were in relatively good agreement with the calculated ones, having proved the validity of the calculation model. By making use of the model in question, a numerical calculation was performed of a heat storage system using three kinds of PCM (paraffin P116, stearic acid and palmitic acid). It has been found that the heat storage system using palmitic acid has the best thermal performance and can meet very well the design requirements for supplying daily used domestic hot water. The foregoing research findings can offer a definite guide for the design and performance optimization of heat storage systems. **Key words:** latent heat accumulation, waste heat recovery, porous matrix, phase change material, phase change heat accumulation system

基于 LS-SVM 的气液两相流含气率软测量 = **Least Square Supportive Vector Machine(LS-SVM) -based Soft Measurement of the Gas Content in a Gas-liquid Two-phase Flow** [刊, 汉] LIU Ze-hua, GAO Ya-kui (First Aircraft Designing and Research Institute, Aviation Industry Corporation of China (AVIC) , Xi'an, China, Post Code: 710089) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. – 2011, 26(1). – 58 ~ 62