

石蜡相变储热系统的放热效率

甘雪菲, 何正斌, 伊松林*, 张璧光

(北京林业大学材料科学与技术学院, 北京 100083)

摘要: 相变储热技术是节能的重要技术之一, 对相变储热系统的换热系数以及放热效率的研究, 有助于提高相变储热系统的放热效率, 对相变储热系统的实际应用有着重要意义。该试验研究了叉排石蜡管束储热系统的整体放热性能, 测定了该系统的换热系数及放热效率, 并分析了管排数, 风速等影响因素。研究表明, 在小于 3 m/s 的风速下, 空气温度变化在 20~55℃ 的范围内, 该类储热系统的换热系数与使用现有准则关联式计算得到的理论值基本吻合; 放热效率则随着风速的增大而下降, 随管排数的增加而有所提高, 最大可达 83%; 另外, 延长放热时间, 可以提高换热效率, 最高可使放热效率提高 62%。

关键词: 换热系数, 石蜡, 储热, 放热效率

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.02.038

中图分类号: Q051.8+92

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2012)-02-0222-04

甘雪菲, 何正斌, 伊松林, 等. 石蜡相变储热系统的放热效率[J]. 农业工程学报, 2012, 28(2): 222-225.

Gan Xuefei, He Zhengbin, Yi Songlin, et al. Heat release property of paraffin phase change heat storage system[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(2): 222-225. (in Chinese with English abstract)

0 引言

储热技术是开发新能源、提高能源利用率的重要途径, 由于采用相变储能材料的潜热储存具有储热密度高、储热放热近似等温等特点^[1], 在太阳能利用、电力的“削峰填谷”、废热和余热回收等领域^[2-3]具有广泛应用前景。把握储热系统的研究现状, 开展相变储能理论及其在实际中的应用研究不仅具有学术价值, 而且对节约能源、减少环境污染有重大现实意义。

储热材料的种类繁多, 无机相变材料易出现过冷和相分离现象^[4], 一般都有毒性或腐蚀性, 不利于容器盛装等缺点, 限制了无机化合物在相变储能系统中的应用。而有机类相变储能材料具有无过冷及析出, 性能稳定, 无毒, 无腐蚀等优点^[5-7]。其中石蜡类有机物除具有有机化合物的优点外, 其相变潜热量大、相变温度范围广、价格低, 所以在相变储能材料的研究使用中受到广泛的重视。

而现有的很多研究都着重于单根石蜡管的性质研究, 其中主要是提高石蜡管的导热系数的研究和对石蜡管在储热和放热过程中石蜡管内部温度场及石蜡的熔化和凝固特性进行研究。张东等^[8]基于集总参数法和矩形相变等效比热假设建立了相变材料的相变过程温度模型。刘中良等^[9]对相变潜热随温度变化的变温固液相变过程

进行了数值分析计算, 并重点分析了相变潜热随温度变化对相变过程的影响。谢望平等^[10]对石蜡的导热性能进行改进, 为石蜡作为储热材料更为广泛的应用提供了试验基础。Mazman 等^[11]用导热系数比较高的不锈钢片, 铜片和石墨-相变材料复合材料作为添加剂来提高导热流体与相变材料之间的导热系数, 结果表明, 通过添加剂可以大大缩短相变储热材料的熔化时间和凝固时间。Trp^[12]研究了周列壳管式蓄热设备, 重点对技术等级石蜡的熔化凝固过程做了相应的传热分析。李晓倩等^[13]选取壳管式单元体进行传热分析, 建立数学模型编程序选取初始参数进行算法演示, 得到石蜡蓄热、放热过程中水流温度-水流经过的管道-时间、水流经单元体管道的换热量-水流经过的管道-时间、石蜡凝固/熔化半径-不同管道-水流循环次数等关系量间的变化曲线。邹得球等^[14]基于一种相变储热石蜡, 考虑熔化过程中液相的自然对流情况, 建立了矩形腔内石蜡熔化过程的数学模型, 对储热系统的设计起到了很大的指导作用。

在实际的应用中, 往往不是单根石蜡管的利用, 当很多石蜡管排一起使用的时候, 由于石蜡管的相互影响, 很多性质都发生了变化, 另外, 相变储热系统在放热过程中, 储热材料的温度一直在变化, 随着热量的使用和损失, 空气的温度也一直变化, 因此本研究着重于储热系统的整体放热性能, 对多排石蜡管在一起应用时, 管排数, 风速等参数对石蜡管的换热系数以及放热效率的影响进行研究, 有助于提高石蜡储热系统的放热效率, 对相变储热系统的实际应用有着重要意义。

1 材料与方法

1.1 试验材料与设备

石蜡: 54#半精炼石蜡, 熔点 54℃, 潜热 $r=189$ kJ/kg。

收稿日期: 2010-12-23 修订日期: 2011-09-13

基金项目: 教育部新世纪优秀人才支持计划“木材太阳能干燥相变储热系统特性及优化匹配的研究”。

作者简介: 甘雪菲 (1986—), 女, 汉族, 广西梧州人, 北京林业大学研究生, 木材干燥。北京 北京林业大学材料科学与技术学院, 100083。Email: doraemonfei@126.com

※通信作者: 伊松林 (1970—), 男, 北京人, 北京林业大学材料科学与技术学院教授, 博士, 主要从事木材干燥, 木材改性。北京 北京林业大学材料科学与技术学院, 100083。Email: ysonglin@126.com

铝管：外径 20 mm，内径 18 mm，长度 280 mm。

储热单元：将石蜡熔化后灌装于铝管中，单根铝管灌装量为 0.065 kg，铝管两端用胶塞密封。

储热系统：可控温加热系统，循环风机，热线风速仪，叉排管束（高度 280 mm，宽度 216 mm，如图 1 所示， $s_1=54$ mm， $s_2=40.5$ mm）。

数据采集系统：温度传感器 TP100 热电偶，数字巡检仪，电脑。

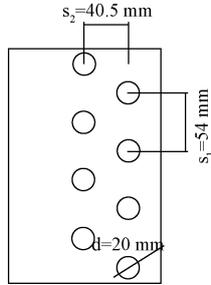


图 1 叉排管束储热系统

Fig.1 Staggered tube bank thermal storage system

1.2 试验方法

试验过程中，石蜡管管排数分别取 2 排、4 排、10 排，风速分别取 1.5、2.0、2.5 和 3.0 m/s，在每个给定的试验条件下，通过传感器实时监控并记录 18 个测温点（分别是储热系统的进口温度、出口温度，各 3 个；铝管壁温度 4 个；管束内部空气温度 4 个；石蜡中心温度 4 个）并得到各个地方的平均值分别为： $T_{进}$ ， $T_{出}$ ， $T_{壁}$ ， $T_{气}$ 和 $T_{石蜡}$ 。

试验步骤：

储热过程：调节风机变频器使风速达到试验选用的风速，然后打开电加热器，以温度为 60℃ 的热干空气流过石蜡管束，加热石蜡。当石蜡中心温度 $T_{石蜡}$ 升至 55℃ 时，停止加热，储热完成。

放热过程：以初始温度为 50℃ 的干空气流经管束进行换热，为模拟实际应用，打开排气口，将空气热量带走（假设热量已使用），使放热过程顺利进行。当 $T_{石蜡}$ 降为 20℃ 时，试验结束，即完成一个放热过程。重复上述步骤，直至完成所有试验。

2 结果与分析

2.1 数据处理方法

由于整个放热过程是非稳态传热，所以取极小段时间 dt 时间内建立热平衡方程。根据牛顿冷却公式有：

$$h = \frac{q}{t_w - t_f} = \frac{cm\Delta T_1}{F\Delta T_1} \quad (1)$$

式中， h 为换热系数， $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ； q 为单位面积热流量， W/m^2 ； t_w 为换热面温度， $^\circ C$ ； t_f 为换热流体温度， $^\circ C$ ； ΔT 为壁面与空气的温差，即 $T_{壁} - T_{气}$ ， $^\circ C$ ； ΔT 为进出口空气温差，即 $T_{出} - T_{进}$ ， $^\circ C$ ； c 为空气比热， $kJ/(kg \cdot ^\circ C)$ ； m 为空气流量， kg/s ； F 为换热面积，即铝管面积， m^2 。

由于空气温度随着热量的使用和损失而逐渐下降，

换热系数也随之改变。然而，以 2 m/s 风速条件下的不同定性温度的换热系数理论值为例，随着空气温度在 20~55℃ 间变化，换热系数理论值的差值小于 1.1 $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ 。基于此，计算中忽略空气温度对换热系数的影响，假设换热系数 h 在放热过程中不变，整个放热过程的热平衡方程可以写作：

$$h\Delta T_1 + h\Delta T_2 + \dots + h\Delta T_n = cm\Delta T'_1 / F + cm\Delta T'_2 / F + \dots + cm\Delta T'_n / F \quad (2)$$

整理可得

$$h = \frac{cm \sum \Delta T'}{F \sum \Delta T} \quad (3)$$

根据实测得到放热过程中的 $T_{壁}$ 、 $T_{空气}$ 、 $T_{出}$ 、 $T_{进}$ ，并对其拟合得到函数方程，得到放热时间与各温度的关系式 $f(t)$ ，则换热系数可通过 (4) 式求得。

$$h = \frac{cm \int_0^t [f'(t) - g'(t)] dt}{F \int_0^t [f(t) - g(t)] dt} \quad (4)$$

式中， t 为放热结束时间， s ； $f(t)$ 为储热系统出口温度的拟合函数； $g(t)$ 为储热系统进口温度的拟合函数； $f(t)$ 为管壁温度的拟合函数； $g(t)$ 为空气温度的拟合函数。

所有试验数据均按照此方法计算得到换热系数。

2.2 换热系数实测值与理论值的比较

根据本试验条件，选用叉排管束平均表面传热系数准则关联式 (5)，结合 (6) 式可计算努谢尔特数，然后按 (7) 式计算换热系数的理论值。

$$Nu = 0.31 Re^{0.6} \left(\frac{s_1}{s_2} \right)^{0.2} \quad (5)$$

$$Re = \frac{wd}{\nu} \quad (6)$$

$$h = \frac{\lambda Nu}{d} \quad (7)$$

式中， Nu 为努谢尔特数； Re 为雷诺数； s_1 为管排距， mm ； s_2 为管列距， mm 。如图 1 所示； w 为流速， m/s ； d 为定型尺寸， m ； ν 为流体的运动黏度， m^2/s ； λ 为空气热导率， $W/(m \cdot ^\circ C)$ 。

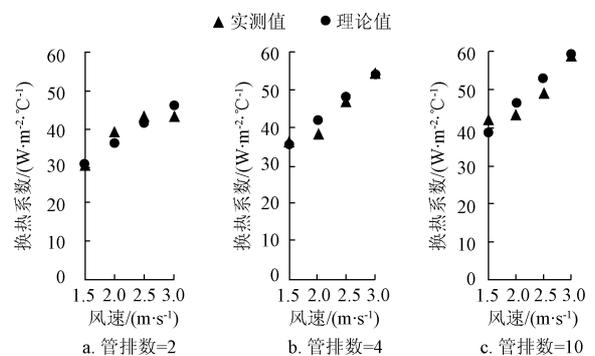


图 2 换热系数的实测值与理论值

Fig.2 Measurement and theoretical values of heat transfer coefficient

各组试验中，取放热过程中空气的平均温度 40℃ 作为定性温度，查得该温度下空气的物性参数，分别计算各组试验的换热系数理论值。实测中以获取潜热为主，以管壁温度降至 $T_{\text{壁}}=40\text{℃}$ 的时刻为放热结束时间 t ，图 2 为理论值与实测值的比较。采用 F 检验法检验实测值与理论值之间是否有显著性差异，结果如表 1。

表 1 F 检验结果
Table 1 Result of f test

管排数		平均值	方差	F	$F_{\text{表}}(P=0.05)$
2	实测值	38.87	34.73	1.33	9.28
	理论值	38.72	46.09		
4	实测值	43.76	71.92	1.16	
	理论值	44.84	61.80		
10	实测值	48.23	61.69	1.22	
	理论值	49.42	75.09		

$F_{\text{表}}$ 为 F 值表中对应置信度为 95% 时的值，由表 1 可知， $F < F_{\text{表}}$ ，两组数据没有显著性差异，实测值与理论值较为相符。该系统是典型的叉排管束换热系统，虽然空气温度一直变化，但是变化幅度不大。因此，即使将整个放热过程的换热系数视作不变，其值亦与理论值趋于一致，直接使用理论值便可满足实际需求。

试验表明，空气温度变化越大，换热系数的变化也越大。在使用该储热系统时，放热终止温度越低，低温空气换热的的时间则越长，其综合换热系数则会偏大。从图 2 可以看出，风速增大，换热系数随空气温度的变化也随之增加，因此，当空气温度变化超出 20~55℃ 的范围，或者风速大于 3 m/s 时，不宜选用以空气平均温度为定性温度计算的理论值。

2.3 放热效率

放热效率定义为实际得到热量与理论热量的比值，可由 (8) 式计算得到，其值反应了该储热系统的热利用效率。

$$\eta = \frac{Q}{Q_0} = \frac{cm \int_0^{t'} [f'(t) - g'(t)] dt}{Mr + c_{ps} \Delta T_0} \quad (8)$$

式中， η 为热效率，%； Q 为实际放热量，kJ； Q_0 为理论储热值，kJ； M 为石蜡质量，kg； r 为石蜡潜热，kJ/kg； c_{ps} 为石蜡固态比热，kJ/(kg·℃)； ΔT_0 为石蜡固态温度变化，℃。

试验以 $T_{\text{壁}}=55\text{℃}$ 为放热初始温度，分别取 $T_{\text{壁}}=40\text{℃}$ ， $T_{\text{壁}}=35\text{℃}$ 作为放热终止温度，计算其放热效率，结果如图 3 所示。

如图 3，与换热系数相反，放热效率随风速的增大而减小。原因是：1) 从单次换热来看，风速增大固然换热越强，然而从放热全程看，在储有热量一定的条件下，风速的增大加速了管壁温度下降，极大地缩短了有效的换热时间（当管壁温度过低而无法实际需求，放热便无效）；2) 较大的风速使得放热极不均匀，增加了热损；3) 风速增大，使得石蜡管外层加快冷却凝固，固态层加快增厚，进一步阻碍了内部热量向外部传递，最终

导致石蜡中心处仍有大量热量无法利用。放热效率随管排数的增加而增大，原因是：根据经验公式，管排数在 16 排以上可忽略管排数对换热系数的影响，管排数在 16 排以下，管排数越少，换热系数越小，因此影响着换热效率。试验中，放热效率最大值为 84%，属于管排数为 10，风速为 1.5 m/s 的工况。

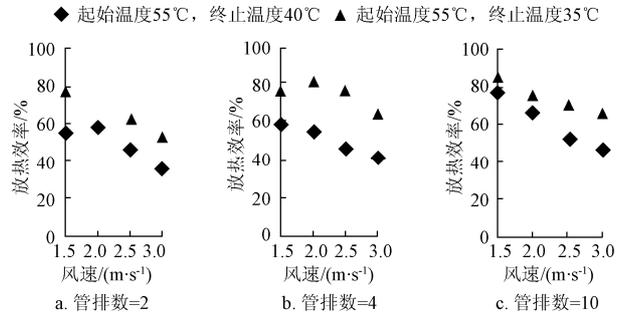


图 3 储热系统的放热效率

Fig.3 Heat exchange efficiency of the heat storage system

另外，从图 3 可以看出，起始温度 55℃，终止温度 35℃ 的放热效率比起始温度 55℃，终止温度 40℃ 的放热效率高。原因是：1) 短时间的换热由于放热不均匀，可能存在部分热量没有得到完全释放，放热时间越长，可使更多热量利用上，最终提高放热效率；2) 如前面所述，低温可使整个过程的综合换热系数增加，在一定程度上有助于提高放热效率。因此，在低温气流适用的情况下，可使放热时间延长，以提高储热系统的整体放热效率。当管排数为 4，风速为 2.5 m/s 时，终止温度 $T_{\text{壁}}=35\text{℃}$ 的放热效率比 $T_{\text{壁}}=40\text{℃}$ 可提高 62%。

3 结论

1) 试验表明，该储热系统的换热系数实测值与理论值较为符合，在给定试验条件下，可忽略空气温度的影响，将整个放热过程的换热系数视作定值，并在实际应用中可直接用准则关联式求得此值。

2) 换热系数随风速的增大而增大，放热效率随风速的增大而减小，随管排数的增加而增大。在本试验条件下，当管排数为 10，风速为 1.5 m/s 时，放热效率达到最大值 84%。

3) 适当降低放热终止温度，延长放热时间，可提高整体放热效率。风速越大，管排数越小，效果越明显。当管排数为 4，风速为 2.5 m/s 时，起始温度为 55℃，终止温度为 35℃ 的放热效率比起始温度为 55℃，终止温度为 40℃ 的放热效率最高可提高 62%。

[参 考 文 献]

[1] 张仁元. 相变材料与相变储能技术[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
 [2] 王守涛. 蓄能式空调系统中有机相变材料的研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2008.
 [3] Mondal S. Phase change materials for smart textiles: An over review[J]. Applied thermal Engineering. 2008, 28(11/12): 1536—1550.

- [4] 黄金, 柯秀芳. 无机水合盐相变材料 $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 的研究进展[J]. 材料导报, 2008, 22(3): 63—67.
Huang Jin, Ke Xiufang. Research and development of $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ as phase change materials[J]. Materials Review, 2008, 22(3): 63—67. (in Chinese with English abstract)
- [5] Wang Jifen, Xie Huaqing, Xin Zhong. Thermal properties of heat storage composites containing multiwalled carbon nanotubes[J]. Journal of Applied Physics, 2008, 104(11): 1—5.
- [6] Mithat Akgun, Orhan Aydin, Kamil Kaygusuz. Experimental study on melting/solidification characteristics of a paraffin as PCM[J]. Energy Conversion and Management, 2007, 48(2): 669—678.
- [7] Shuo Peng, Alan Fuchs, Wirtz R A. Polymeric phase change composites for thermal energy storage[J]. Polymer Engineering and Science, 2003, 93(3): 1240—1251.
- [8] 张东, 周剑敏, 吴科如. 相变储能材料的相变过程温度模型[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2006, 34(7): 928—932.
Zhang Dong, Zhou Jianmin, Wu Keru. Temperature model of phase change process of phase change material[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2006, 34(7): 928—932. (in Chinese with English abstract)
- [9] 刘中良, 马重芳, 孙旋. 相变潜热随温度变化对固-液相变过程的影响, 太阳能学报, 2003, 24(1): 53—57.
- [10] 谢望平, 朱冬生, 汪南, 等. 石蜡熔化蓄热的试验研究[J]. 广东化工, 2008, 35(1): 10—13.
Xie Wangping, Zhu Dongsheng, Wang Nan, et al. Experimental research on melting heat storage of paraffin[J]. Guangdong Chemical Industry, 2008, 35(1): 10—13. (in Chinese with English abstract)
- [11] Mazman, Muhsin, Cabeza, Luisa F, Mehling, Harald, et al. Heat transfer enhancement of fatty acids when used as PCMs in thermal energy storage[J]. International Journal of Energy Research, 2008, 32(2): 135—143.
- [12] Trp A. An experimental and numerical investigation of heat transfer during technical grade paraffin melting and solidification in a shell and tube latent thermal energy storage unit[J]. Solar Energy, 2005, 79(6): 648—660.
- [13] 李晓倩. 石蜡相变储热与转换系统的研究[D]. 北京: 中国农业大学水利与土木工程学院, 2006.
- [14] 邹得球, 肖睿, 宋文吉, 等. 一种余热利用相变石蜡储热过程的数值模拟[J]. 热能动力工程, 2010, 25(1): 77—81.
Zou Deqiu, Xiao Rui, Song Wenji, et al. Numerical simulation of the heat storage process of a waste heat utilization-oriented phase-change paraffin[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2010, 25(1): 77—81. (in Chinese with English abstract)

Heat release property of paraffin phase change heat storage system

Gan Xuefei, He Zhengbin, Yi Songlin^{*}, Zhang Biguang

(College of Material Science and Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: Phase change heat storage is one of the most important energy-saving technologies. The research of heat transfer coefficient and heat release rate is helpful to improve the thermal efficiency and it also play a significant role in applying of phase change heat storage system. Focused on the heat release property of the staggered tube bank with paraffin thermal storage system, we measured the heat transfer coefficient and the heat release rate, and then analyzed influencing factors in terms of the number of tube rows, wind speed and other factors. The results showed that under the conditions that the wind speed was less than 3 m/s, and the temperatures varied from 20°C to 55°C, the testing results of heat transfer coefficient were in good correspondence with the theoretical values; The heat release rate reduced with higher wind speed, and increased with the rise of the number of tube rows, which could reach up to 83%. The heat efficiency could be improved by 62% at most by prolonging heat exchange time.

Key words: heat transfer coefficients, paraffin waxes, heat storage, heat release rate