

# 木材干燥的振荡流热管换热器设计与试验

柴本银<sup>1</sup> 李选友<sup>2</sup> 周慎杰<sup>1</sup> 史勇春<sup>2</sup> 刘登瀛<sup>3</sup> 邵敏<sup>2</sup>

(1. 山东大学机械工程学院, 济南 250061; 2. 山东省科学院工业节能研究中心, 济南 250014;

3. 中国科学院工程热物理研究所, 北京 100080)

**【摘要】** 设计了自激振荡流热管换热器余热回收系统并进行了试验,考察了湿空气和操作参数对热回收效率的影响。试验结果表明,自激振荡流热管换热器能够满足高湿废气余热回收的要求,在给定的操作条件下,系统的热回收效率高于18%。

**关键词:** 木材 余热回收 高湿废气 换热器 自激振荡流热管

**中图分类号:** X706; TK124

**文献标识码:** A

## Design and Experiment on Oscillation Heat-pipe Heat Exchanger of Wood Drying

Chai Benyin<sup>1</sup> Li Xuanyou<sup>2</sup> Zhou Shenjie<sup>1</sup> Shi Yongchun<sup>2</sup> Liu Dengying<sup>3</sup> Shao Min<sup>2</sup>

(1. Mechanical Engineering Department, Shandong University, Ji'nan 250061, China

2. Industrial Energy Conservation Research Centre, Shandong Academy Sciences, Ji'nan 250014, China

3. Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

### Abstract

Heat recovery system of the self-excited oscillation heat pipe heat exchanger was designed and experimented. The effects of humid gas and operating parameters on heat recovery efficiency were studied. The results show that self-excited oscillation heat pipe heat exchanger can meet heat recovery requirements for the high humid exhaust gas. Under the given operating conditions, the system's heat recovery efficiency is higher than 18%.

**Key words** Wood, Waste heat recovery, High humid exhaust gas, Heat exchanger, Self-excited oscillation heat pipe

### 引言

据统计,我国干燥单元的能源利用率为40%~50%<sup>[1]</sup>,大部分热量被尾气排放掉。许多农副产品干燥系统排放的高湿废气含有大量余热,并且含水率可达到90%<sup>[2]</sup>,因此回收这部分高湿尾气热量是一项重要而有广阔前景的节能任务。利用振荡流热管换热器把高湿废气中热能转换到新鲜空气中是理想的节能途径之一。振荡流热管是日本学者Akachi H于1994年发明的一种高效传热元件。振荡流热管具有热通量大(大约为同直径普通热管的20倍)、适应性好、结构简单、易清理、热响应快等优

点<sup>[3~5]</sup>。

本文采用自激振荡流热管换热器对高湿废气(以木材干燥尾气余热回收为例)的余热回收进行试验研究。

### 1 换热器设计参数

自激振荡流热管是毛细管弯曲成的蛇形管路,由细直管道和弯头组成,分为加热段、冷凝段和隔热段,如图1所示。当管径足够小时,在真空下封装在管内的工质将在管内形成液、汽相间的柱塞。在加热段,汽泡或汽柱与管壁之间的液膜因受热而不断蒸发,导致汽泡膨胀,并推动汽液柱塞流向冷端冷凝

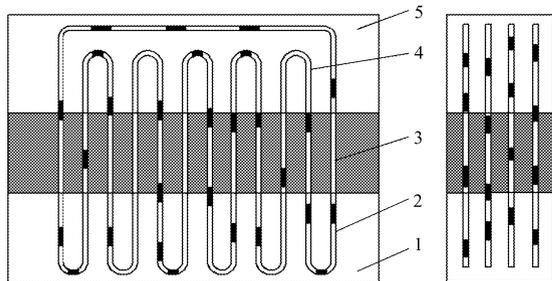


图1 自激振荡流热管换热器示意图

Fig. 1 Self-excited oscillation heat pipe

1. 尾气(热风)通道 2. 加热段 3. 隔热段 4. 冷凝段 5. 新鲜气体(冷空气)通道

收缩,从而在冷、热端之间形成较大的压差。由于汽液柱塞交错分布,因而在管内产生强烈的往复振荡运动,从而实现高效热传递<sup>[6~9]</sup>。

一般来说,高湿废气因携带水蒸气,出口气体流量和进口气体流量的比率大约是1.7。本文以木材干燥尾气余热回收为例来设计振荡流热管换热器,其尾气参数及热回收效率标准为:尾气流量 $96\text{ m}^3/\text{h}$ ,温度 $80^\circ\text{C}$ ,相对湿度 $85\% \sim 90\%$ ,新鲜气体流量 $48\text{ m}^3/\text{h}$ ,温度 $25^\circ\text{C}$ ,热回收效率大于 $18\%$ 。

热回收效率的计算公式为<sup>[3]</sup>

$$\eta = \frac{Q_a}{Q_{\max}} \quad (1)$$

$$\text{其中 } Q_a = V_c \rho_c c_{p_c} (T_{c-\text{out}} - T_{c-\text{in}}) \quad (2)$$

$$Q_{\max} = V_h \rho_h c_{p_h} (T_{h-\text{in}} - T_{\text{en}}) \quad (3)$$

$$c_{p_h} = \frac{m_a c_{p_a} + m_m c_{p_m}}{m_a + m_m} \quad (4)$$

式中  $Q_a$ ——冷气体单位时间吸收的热量, W

$Q_{\max}$ ——热气体单位时间携带总热量, W

$V_c, V_h$ ——冷、热气体体积流量,  $\text{m}^3/\text{h}$

$\rho_c, \rho_h$ ——冷、热气体密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$

$c_{p_c}, c_{p_h}$ ——冷、热气体比热容,  $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$

$c_{p_a}, c_{p_m}$ ——空气、水蒸气比热容,  $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$

$T_{c-\text{in}}, T_{h-\text{in}}$ ——冷、热气体进口温度, K

$T_{c-\text{out}}$ ——冷气体出口温度, K

$T_{\text{en}}$ ——环境温度, K

$m_a, m_m$ ——空气、水蒸气质量流量,  $\text{kg}/\text{h}$

通常,在木材干燥隧道中,木材干燥所需新鲜干燥空气的进口和出口每3 h 转换一次,且进口和出口一般垂直安装。因此,如果换热器被用来进行木材干燥机尾气余热回收,就必须能互换新鲜气体和废气流动通道。此时,要求底部加热的重力热管换热器无法满足这一要求。

根据木材干燥的要求和高湿物料后的尾气温度

和湿度条件,设计了自激振荡流热管换热器,并对其进行测试。换热器由9组不锈钢自激振荡流热管组成,如图2所示。每根热管的总长度为22 m,共有26个弯头,其外径为4 mm,内径为3 mm。尾气和新鲜气流的通道面积均为 $400\text{ mm} \times 400\text{ mm}$ 的方形界面,长度为1 m。管中工作流体的充液率为50%。

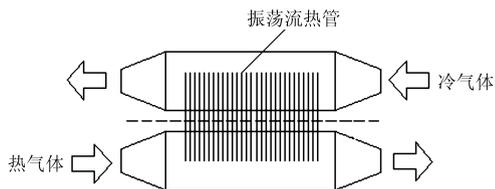


图2 自激振荡流热管换热器

Fig. 2 Self-excited oscillation heat pipe heat exchanger

## 2 试验系统

试验系统由自激振荡流热管换热器、空气预热器、蒸气发生器、数据采集器、气体流量计等组成,如图3所示。

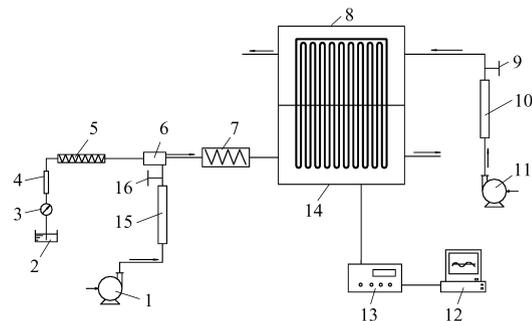


图3 试验系统

Fig. 3 Experimental system

1. 风机 A 2. 水槽 3. 泵 4. 液体流量计 5. 蒸气发生器 6. 空气、蒸气混合器 7. 空气加热器 8. 冷端 9. 阀门 A 10. 空气流量计 A 11. 风机 B 12. 数据采集仪 13. 数据显示仪 14. 热端 15. 空气流量计 B 16. 阀门 B

为了研究尾气的相对湿度对自激振荡流热管换热器性能的影响,试验系统中安装了一套由盛水容器、水泵、水流量计及电加热器组成的蒸气发生器,并将其产生的过热蒸气加入到热气体气流中。为了得到预期的热气体进口温度,在热气体管蒸气入口的前、后位置分别安装了一组电加热器。电加热器的总功率是48 kW,每个加热器(包括蒸气发生器)由可控硅控制调节。2个气体流量计分别连接到冷、热空气管上用以控制冷、热气体的流量,用热球风速仪(QDF-II型)测量冷、热空气流速。一组E型热电偶分别敷设于热气流和冷气流的入口及热管的表面,用以测量相应的温度。测量数据通过数据采集器(Agilent 349770A型)传输至计算机中进行自动记录。在每个风机上设置变频测量器,以提供 $0 \sim 1\,000\text{ m}^3/\text{h}$ 的流量。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 热气体进口温度对热回收效率的影响

试验中,在不启动蒸气发生器情况下,空气由风机经电加热器加热后进入换热器热气体通道,通过换热器中振荡流热管和冷气体通道中冷空气进行热交换。由风机变频电动机控制热气体(尾气)和冷气体(新鲜空气)的流量。气体流量固定不变,其中热气体流量为  $103 \text{ m}^3/\text{h}$ ,冷气体流量为  $62 \text{ m}^3/\text{h}$ ,控制高湿物料经过干燥器干燥后出口尾气的温度,试验研究不同的热气体进口温度对自激振荡流热管换热器热回收效率的影响。热气流进口温度控制在  $70\sim 95^\circ\text{C}$ ,每  $5^\circ\text{C}$  为一个工况,当温度稳定后,记录运行参数。

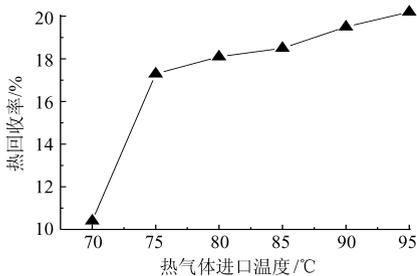


图4 热气体进口温度对热回收效率的影响曲线

Fig.4 Heat efficiency vs hot inlet temperature

图4给出了自激振荡流热管换热器的热回收效率随热气体进口温度的变化。可以看出,当热气体进口温度达到一定值后,热回收效率随着热气体进口温度的升高而明显增大,当进口温度在  $95^\circ\text{C}$  时热回收效率达到  $20.2\%$ 。这主要是因为热气体进口温度升高后,热气流和冷气流之间的温差增加,从而使得热效率增加。同时还可以发现,当进口温度由  $70^\circ\text{C}$  增加到  $75^\circ\text{C}$  时热回收效率变化明显,在  $70^\circ\text{C}$  时热回收效率仅为  $10\%$  左右,振荡流热管效率比较低。这是因为振荡热管存在一个启动温度,当热气体进口温度高于启动温度时振荡流热管才开始工作,反之振荡流热管换热效率低下甚至停止工作,启

动温度主要受到热管中的压力、工作流体的种类、热管的材料等因素的影响。试验表明,在本试验的温度范围内,热管已经启动工作,在进口温度  $80^\circ\text{C}$  时热回收效率达到  $18\%$ ,振荡流热管设计合理高效。

#### 3.2 热气体进口相对湿度对于热回收效率的影响

在启动蒸气发生器情况下,固定热气体流量为  $7 \text{ m}^3/\text{h}$ ,冷气体流量为  $15 \text{ m}^3/\text{h}$ ,改变热气体相对湿度进行试验。试验结果如图5所示。从图中可以看出,当热气体的相对湿度为  $5.9\%$  时,换热器的回收效率仅为  $15\%$ ,而当相对湿度增加到  $98\%$  时热回收效率达到了  $34\%$ ,即随着相对湿度的增加,热回收效率明显增加,设计的自激振荡流热管换热器表现出优异的换热性能。对于高湿物料来说,热气体进口湿度可达到  $80\%$  以上,采用本试验设计的自激振荡流热管换热器可以很好地进行余热回收。

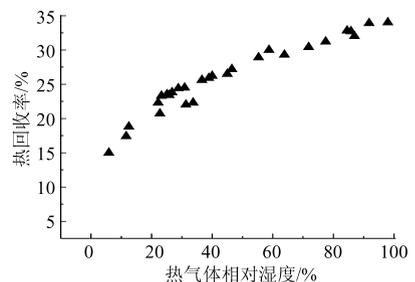


图5 热气体进口湿度对热回收效率的影响

Fig.5 Heat efficiency vs hot inlet humidity

### 4 结论

(1)热回收效率随着热空气入口温度和相对湿度的增加而明显增大。

(2)自激振荡流热管存在一个启动温度,只有当热气体温度高于这个启动温度时,换热器才能有较高的换热效率。

(3)自激振荡流热管是一种高效的传热元件,利用这种热管研制出的高效换热器完全适用于农副产品干燥尾气高湿废气的余热回收。

### 参 考 文 献

- 1 潘永康,王喜忠,刘相东. 现代干燥技术[M]. 2版. 北京:化学工业出版社, 2007.
  - 2 Perry R H, Green D W. Chemical engineers handbook[M]. 7th Edition. New York: McGraw-Hill, 1998.
  - 3 Rittidech S, Dangeon W, Soponronnarit S. Closed oscillating heat-pipe (CEOHP) air-preheater for energy thrift in a dryer [J]. Applied Energy, 2005, 81(2): 198~208.
  - 4 洗海珍,商福民,刘登瀛,等. 自激振荡流热管脉冲加热强化传热实验研究[J]. 工程热物理学报, 2006, 27(3): 457~459.
- Xian Haizhen, Shang Fumin, Liu Dengying, et al. Experimental investigation on heat transfer enhancement of SEMOS heat pipe by pulse heating[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2006, 27(3): 457~459. (in Chinese)

- Technology, 2004. (in Chinese)
- 2 刘颖, 邹志敏, 李云飞, 等. 锦绣黄桃主动气调包装研究[J]. 食品工业, 2007(3):41~44.  
Liu Ying, Wu Zhimin, Li Yunfei, et al. Study on active modified atmosphere packaging for "Jinxu" yellow peaches[J]. The Food Industry, 2007(3):41~44. (in Chinese)
  - 3 Sannai G, Kenneth A C. Predicting steady-state oxygen concentrations in modified atmosphere packages of tomatoes[J]. Journal of the American Society for Horticultural Science, 1994, 119(3):546~550.
  - 4 Cameron A C, Boylan-Pett W, Lee J. Design of modified atmosphere packaging systems modeling oxygen concentrations within sealed packages of tomato fruits[J]. Journal of Food Science, 1998, 54(6):1 413~1 416.
  - 5 彭贵霞, 郁志芳, 夏志华, 等. 鲜切山药片生产工艺技术的研究[J]. 食品科学, 2003, 24(2):66~69.  
Peng Guixia, Yu Zhifang, Xia Zhihua, et al. Study on processing techniques for fresh-cut *Yam slices*[J]. Food Science, 2003, 24(2):66~69. (in Chinese)
  - 6 田平海. 黄桃冷藏气调小包装呼吸速率模型与品质变化实验研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2003.  
Tian Pinghai. Studies on respiration rate and quality of modified atmosphere packaged yellow peach combined with cold storage[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2003. (in Chinese)
  - 7 朱继英. 双孢蘑菇采后褐变机理及气调保鲜技术研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2006.  
Zhu Jiying. Mechanism of postharvest browning and techniques of controlled atmosphere storage for *Agaricus bisporus*[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2006. (in Chinese)
  - 8 朱广廉, 钟海文, 张爱琴. 植物生理学实验[M]. 北京: 北京大学出版社, 1990.
  - 9 Zauberman G, Ronen R, Akerman M, et al. Postharvest retention of the red colour of litchi fruit pericarp[J]. Scientia Horticultura, 1991, 47(1~2):89~97.
  - 10 罗云波, 蔡同一. 园艺产品贮藏加工学[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2001.
  - 11 许英超. 双孢蘑菇气调保鲜机理的研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2004.  
Xu Yingchao. Research on mechanism of controlled atmosphere preservation of *Agaricus bisporus*[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2004. (in Chinese)
  - 12 林河通, 席屿芳, 陈少军, 等. 龙眼采后生理和病理及贮运技术研究进展[J]. 农业工程学报, 2002, 18(1):185~190.  
Lin Hetong, Xi Yufang, Chen Shaojun, et al. Research advances of postharvest physiology, postharvest pathology and storage and transport technologies for longan fruits[J]. Transactions of the CSAE, 2002, 18(1):185~190. (in Chinese)
  - 13 Leshem Y Y, Halevy A H, Frenkel C. Processes and control of plant senescence[M]. Amsterdam: Elsevier Press, 1986: 57~89.
  - 14 姜爱丽, 田世平, 徐勇, 等. 不同气体成分对甜樱桃果实采后生理及品质的影响[J]. 中国农业科学, 2002, 35(1):79~84.  
Jiang Aili, Tian Shiping, Xu Yong, et al. Effects of different atmospheres on postharvest physiology and quality of sweet cherry[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2002, 35(1):79~84. (in Chinese)
  - 15 Remon S, Ferrer A, Marquina P, et al. Use of modified atmosphere to prolong the postharvest life of *Burlatcherries* at different degrees of ripeness[J]. J. Sci. Food Agri., 2000, 80(10):1 545~1 552.

(上接第 163 页)

- 5 Chai Benyin, Li Xuanyou, Zhou Shenjie, et al. Experimental study on energy thrift in a fluidized bed dryer with self-excited mode oscillating-flow heat pipe[C]//The Proceedings of the 5th Asia-Pacific Drying Conference, 2007: 601~607.
- 6 洗海珍, 刘登瀛, 商福民, 等. 干燥用振荡流热管强化传热研究[J]. 干燥技术与设备, 2007, 5(3):107~113.  
Xian Haizhen, Liu Dengying, Shang Fumin, et al. Study on heat transfer enhancement of oscillating-flow heat pipe for drying[J]. Drying Technology & Equipment, 2007, 5(3): 107~113. (in Chinese)
- 7 马永锡, 张红, 苏磊. 振荡热管内的振荡及传热传质特性[J]. 化工学报, 2005, 56(12):2 265~2 270.  
Ma Yongxi, Zhang Hong, Su Lei. Oscillating flow and heat and mass transfer characteristics in oscillating heat pipes[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2005, 56(12): 2 265~2 270. (in Chinese)
- 8 崔晓钰, 黄万鹏, 翁建华, 等. 振荡热管研究进展及展望[J]. 电子机械工程, 2009, 25(1):6~10.  
Cui Xiaoyu, Huang Wanpeng, Weng Jianhua, et al. Progress and prospects of pulsating heat pipe[J]. Electro-Mechanical Engineering, 2009, 25(1): 6~10. (in Chinese)
- 9 马永锡. 振荡热管传热机理及传热性能的研究[D]. 南京: 南京工业大学, 2006.  
Ma Yongxi. Investigation on mechanism and performance of heat transfer in oscillating heat pipes[D]. Nanjing: Nanjing University of Technology, 2006. (in Chinese)