

火力发电厂相变换热器不稳定性实验研究

何毅¹, 汪家琼²

¹上海连成集团苏州股份有限公司, 江苏 苏州

²江苏大学, 江苏 镇江

Email: 641060209@qq.com

收稿日期: 2021年5月26日; 录用日期: 2021年7月30日; 发布日期: 2021年8月10日

摘要

火力发电厂相变换热器在机组灵活运行条件下运行不稳定会造成温度波动、温度迟滞、管路振动、噪声大等问题, 来流介质气液两相流状态的不稳定性是相变换热器运行不稳定的诱因之一。本文从来流介质冷却过程的气液两相流不稳定性入手, 研究相变换热器运行不稳定的机理, 并搭建了环路热管系统进行试验验证, 探索抑制其运行不稳定的方法, 为火力发电厂相变换热器及管道的稳定运行提供参考。

关键词

相变换热器, 两相流不稳定性, 理论研究, 实验研究, 火力发电

Experimental Research on Instability of Phase-Change Heater in Thermal Power Plant

Yi He¹, Jiaqiong Wang²

¹Shanghai Liancheng Group Suzhou Co., Ltd., Suzhou Jiangsu

²Jiangsu University, Zhenjiang Jiangsu

Email: 641060209@qq.com

Received: May 26th, 2021; accepted: Jul. 30th, 2021; published: Aug. 10th, 2021

Abstract

The unstable operation of the phase-change heat exchanger of the thermal power plant under the flexible operating conditions of the unit will cause problems such as temperature fluctuation, tem-

perature hysteresis, pipeline vibration, and loud noise. The instability of the gas-liquid two-phase flow of the incoming medium is one of the causes of the unstable operation of the phase change heat exchanger. The current paper studied the mechanism of gas-liquid two-phase flow instability in the cooling process which was the reason for the instability of the phase change heat exchanger. The current paper set up a loop heat pipe system for test verification and studied the method of suppressing the instability of the phase change heat exchanger. These studies provide references for the stable operation of phase-change heat exchangers and pipelines in thermal power plants.

Keywords

Phase Change Heat Exchanger, Two-Phase Flow Instability, Theoretical Research, Experimental Research, Thermal Power

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

火力发电厂大量使用相变换热器, 相变造成换热器及管道内部温度和压力变化, 并伴随着噪声和振动, 给火力发电系统带来较大的安全隐患。为了提高发电系统的安全可靠性, 需要对相变换热器的不稳定性进行系统研究。

在相变换热器方面, 目前已经有较多研究, 为了揭示气液相变过程中传热与传质过程之间的相互作用机制, 尤田[1]运用孤立系统的热力学耦合机理对换热器中气液相变过程进行了深入研究, 验证了熵产率大于零的自发过程可以驱动熵产率小于零的非自发过程。蔡浩等[2]对相变换热器进行数值模拟, 分析烟气入口速度、翅片间距及翅片管横向间距、纵向间距对流动传热特性的影响。贾卓杭等[3]对相变储能换热器回路进行仿真, 分析了相变材料液相分数及关键位置温度随时间变化的特性, 对比不同材料导热系数及流体回路质量流速对控温特性的影响, 对储能换热器进行了设计和优化。周梦等[4]对相变换热器数值模拟研究, 分析了进口速度、空气质量分数对冷凝换热的影响, 表明空气的混入时, 会降低冷凝换热性能; 换热系数随空气质量分数的增加而降低。文献[5][6][7][8]研究了环路热管的温度波动现象, 并得出蒸发器补偿腔内的气液两相流是导致 LHP 温度波动的结论。文献[9][10]对毛细泵循环两相回路的运行特性进行实验研究, 针对某些工况条件下出现温度剧烈波动现象, 在稳态和瞬态工况下进行了试验, 为循环系统的热力和水力耦合提供了数据依据。文献[11][12][13]研究脉动热管运行不稳定特性, 不稳定运行时有可能导致“烧干”现象而传热恶化, 并对脉动热管运行存在的问题提出相应的解决措施。文献[14][15]研究了平板热管的不稳定特性, 分析了充液率和加热功率对平板热管传热性能的影响。结果表明, 当平板热管的充液率越高时, 其启动所需的时间越长。综上, 热管相变换热器在某些工况条件下均会出现运行不稳定的特性, 特别对于火力发电厂的相变换热器, 在机组灵活运行条件下, 往往以温度波动、局部温度过高(局部烧干)、流体振荡等现象表现出来。相变换热器的运行不稳定会导致换热效率及系统可靠性下降等风险。

本文主要研究以热管为代表的高效相变换热装置, 主要由热管(HP)、环路热管(LHP)、毛细泵两相回路(CPL)、平面热管(FHP)、脉动热管(PHP)等组成。

2. 气液两相流不稳定性分析

本研究将分析相变换热器不稳定运行的原因, 并搭建环路热管试验台, 用实验结果对理论进行验证。

图 1 所示为冷凝器冷凝管模型, 其中 θ 为冷凝器放置倾斜角、 L 汽液两相区长度、箭头处为冷凝器进口, 冷凝器管内的总压力降主要由摩擦阻力压降、重力压降和速度压降组成, 分别为:

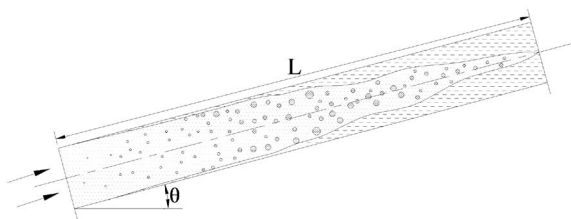


Figure 1. Schematic diagram of condenser tube

图 1. 冷凝器冷凝管示意图

摩擦压降:

$$\Delta P_1 = \lambda \frac{LW^2}{2\rho_l D} \left[1 + \frac{1+x}{2} \left(\frac{\rho_l}{\rho_v} - 1 \right) \right] \quad (1)$$

重力压降:

$$\Delta P_2 = Wg \sin \theta \quad (2)$$

速度压降:

$$\Delta P_3 = - \left(\frac{1}{\rho_v} - \frac{1}{\rho_l} \right) W^2 (1-x) \quad (3)$$

假设冷凝器两相区为等流传热过程, 则汽液两相区长度为:

$$L = \frac{Wr}{q} \quad (4)$$

其中冷凝管道入口干度为 1, 出口处干度 x 为 0。

将(4)带入(1)(2)(3)式, 整理得:

$$a = \frac{\lambda(\rho_l + \rho_v)r}{4D\rho_l\rho_vq}, b = \frac{\rho_l - \rho_v}{\rho_l\rho_v}, c = g \sin \theta。$$

则总压降 $\Delta P = aW^3 - bW^2 + cW$,

$$\text{(其中 } a = \frac{\lambda(\rho_l + \rho_v)r}{4D\rho_l\rho_vq}, b = \frac{\rho_l - \rho_v}{\rho_l\rho_v}, c = g \sin \theta \text{)} \quad (6)$$

相变换热器其他单相流体的沿程压降及局部阻力压降均与流量的平方成正比, 所以相变换热器整个循环的系统压降 $\Delta P = f(W)$ 为一个三次多项式。

为了求极值, 对(6)式求一次导数, 并令一次导数为 0 得:

$$\frac{d\Delta P}{dW} = 3aW^2 - 2bW + c = 0 \quad (7)$$

$$\text{得: } W = \frac{b \pm \sqrt{b^2 - 3ac}}{3a}.$$

当 $\Delta = b^2 - 3ac \leq 0$ 时, W 有实根, 式(6)为单调函数。

$$\Delta = b^2 - 3ac = f(\lambda, r, q, \rho_l, \rho_v, g, \theta, D) \leq 0 \quad (8)$$

由上式可知, Δ 的值与管径, 管长, 介质的汽化潜热, 摩擦阻力系数, 密度, 倾角, 环境空气等多个变量有关, 当 $\Delta \leq 0$ 时, 冷凝器内的压力降为流量的单值函数, 当 $\Delta > 0$ 时, 冷凝器的压力降为流量的多值函数, 如图 2 所示为相变换热器压降随质量流量变化曲线图。

以往研究表明, 在热管相变过程中, 内部液体运行不稳定只可能发生在曲线的负斜率段[16] [17], 即发生在图 2 所示的 AB 段。在 OA 段和 BC 段, 相变换热器内部介质运行稳定, 曲线斜率为正。曲线上的两个拐点也就是极值点 A 点和 B 点的横坐标为质量流量, 坐标值为 $\frac{d\Delta P}{dW} = 3aW^2 - 2bW + c = 0$ 的两个解析解, 求解得:

$$W_{A,B} = \frac{b \mp \sqrt{b^2 - 3ac}}{3a} \quad (9)$$

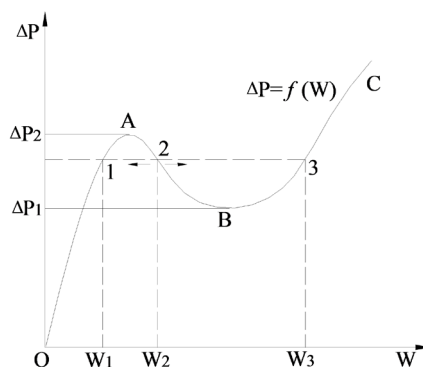


Figure 2. Phase change heat exchanger vs. W curve

图 2. 相变换热器 ΔP 随 W 变化曲线

下面从解析解的角度来解释上述曲线: 当质量流量 $W < W_A$ 或者 $W > W_B$ 时, 相变换热器的 ΔP 和 W 是唯一对应的, ΔP 随 W 单值变化, 换热系统运行平稳。当 $W_A \leq W \leq W_B$ 时, 相变换热器的 ΔP 和 W 不是唯一对应的, 易导致两相流运行出现不稳定, 而两相流的不稳定性导致了相变换热器系统运行不稳定, 通常以温度波动的现象表现出来。

3. 理论与实验对比及讨论

为验证理论的正确性, 本研究搭建了一种热管相变换热器 - 环路热管(LHP)实验系统, 进行理论与实验对比。

3.1. 实验系统介绍

相变换热器系统如图 3 所示, 由环路热管(LHP)模块、辅助加热模块、温控模块、数据采集模块组成。环路热管模块为其核心模块, 由平板型蒸发器、蒸汽管路、冷凝器、液体管路组成。环路热管内部工质为甲醇。甲醇的充灌量在 50%~80%之间。本实验系统按体积比充灌工质量分别为 50%, 60%和 70%。温

控模块采用 Keithley-2700 数据采集仪, 连接 12 个热电偶来检测各测点的温度, 测点布置如图 3 所示。辅助加热采用 2 根加热棒作为模拟热源, 加热功率可调节且可实时测量显示。

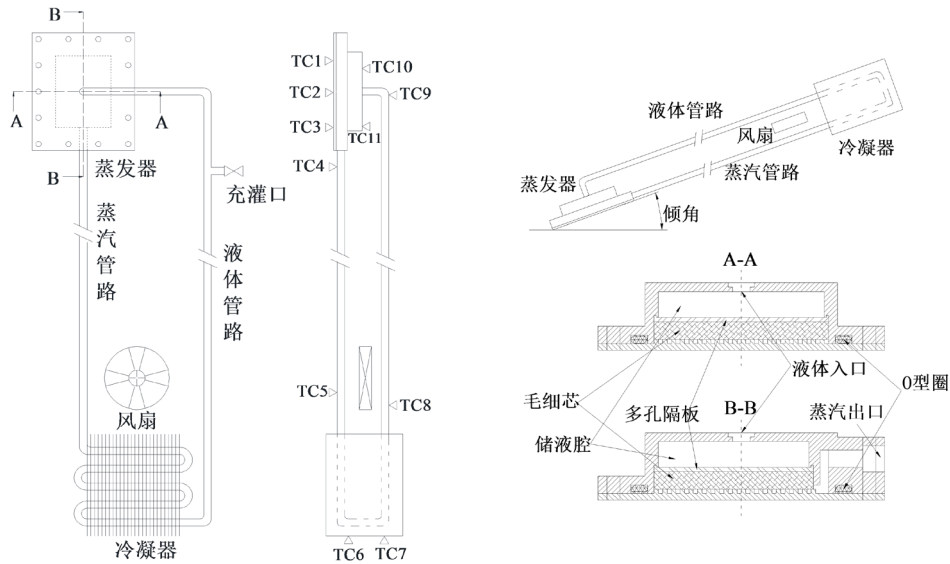


Figure 3. Schematic diagram of phase change heat exchanger system
图3. 相变换热器系统示意图

3.2. 实验结果及讨论

本实验以甲醇为工质, 在不同的充灌量、在不同的倾角下, 研究了相变换热器随着热负荷的增加的运行稳定性。试验结果如图 4~图 6 所示。研究表明相变换热器在不同的热负荷区域内运行稳定性差异较大, 由于换热器的主要功能是换热, 因此温度稳定是考察换热器是否稳定的重要指标之一。以 60%工质充灌量为例, 从图中可以看出随着热负荷的增加温差波动越来越大, 在中等热负荷区域温差波动达到最大, 到高热负荷区域温度波动相对稳定, 说明该相变换热器在低热负荷条区域运行稳定性高, 而在中等热负荷区域出现运行不稳定的情况, 相变换热器内部工质流动不稳定的外在表现为温度波动巨大。

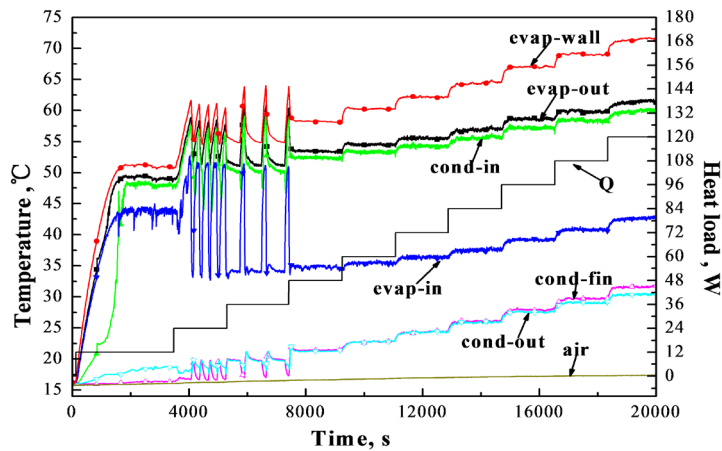


Figure 4. Operation diagram of phase change heat exchanger under variable conditions ($\theta = 10^\circ$)
图4. 相变换热器变工况运行图($\theta = 10^\circ$)

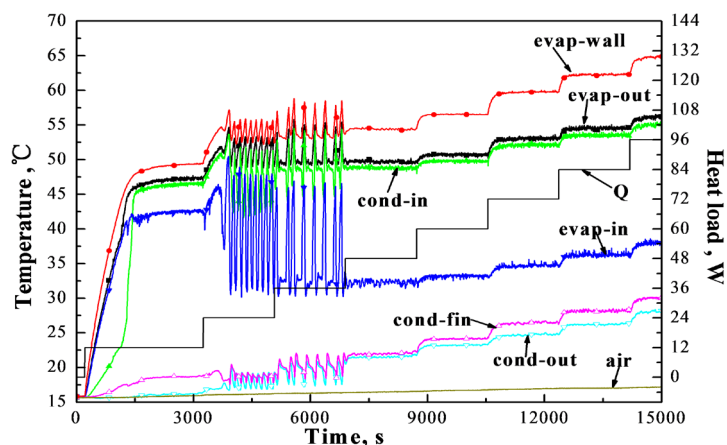


Figure 5. Operation diagram of phase change heat exchanger under variable conditions ($\theta = 50^\circ$)

图 5. 相变换热器变工况运行图($\theta = 50^\circ$)

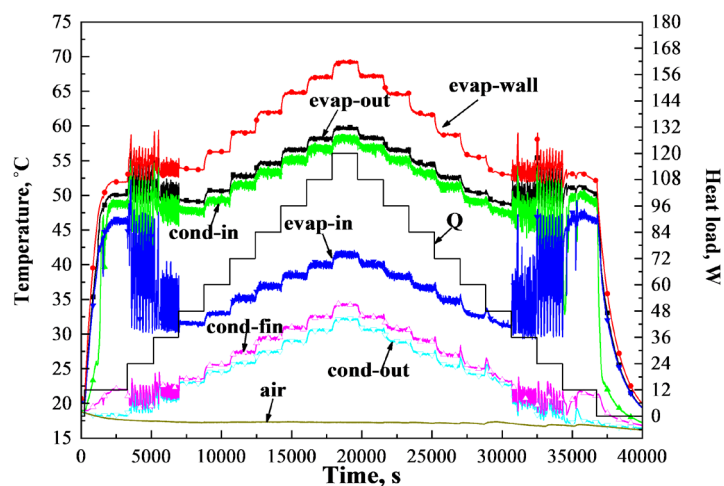


Figure 6. Operation diagram of phase change heat exchanger under variable conditions ($\theta = 90^\circ$)

图 6. 相变换热器变工况运行图($\theta = 90^\circ$)

实验结果和理论分析结论相符,如图 2 所示,当热负荷较小时,流量小于 W_A ,相变换热器运行在 OA 段,能够平稳运行,当流量 $W_A \leq W \leq W_B$ 时,由于存在流量漂移现象导致相变换热器内的流量周期性改变,外在表现为温度波动现象,随着流量增加,热负荷增大,当流量 $\geq W_B$ 时,相变换热器在 BC 段能够平稳运行。根据图 6 可知,热负荷下降的过程同样符合上述规律。综上,两相流的热负荷不稳定性是导致相变换热器不稳定的主要原因,主要外在表现为换热器进出口温度波动剧烈。

如图 4~图 6 所示,倾角分别为 10° 、 50° 和 90° 时,相变换热器温度波动曲线形态不同,随着倾角的增加在中等热负荷区域温度波动更加剧烈,尤其是当倾角到 90° 时,温度波动出现峰值,波动最为剧烈,表明倾角对相变换热器运行稳定性具有不可忽略的影响。

4. 结论

本文对火电厂大量使用的相变换热器的不稳定性进行了理论分析,并进行了实验验证,得出以下结论:

- 1) 气液两相流的热负荷不稳定性是导致相变换热器内部流动波动及运行温度不稳定的重要原因;
- 2) 相变换热器的流动压降函数 $\Delta P = aW^3 - bW^2 + cW$ 的 $\Delta = b^2 - 3ac$ 可作为换热器是否稳定运行的判别式, 当 $\Delta > 0$ 时系统才会出现运行不稳定现象, 当 $\Delta \leq 0$ 时, 相变换热器一直处在稳定状态;
- 3) 当 $\Delta > 0$ 时, 相变换热器只有在部分中等热负荷(即中等工质流量)情况下才会发生运行不稳定, 而在较低热负荷和较高热负荷时均能平稳运行;
- 4) 相变换热器的稳定性不仅与热负荷有关, 换热器系统结构、重力倾角、工质种类及工质充灌量等均对其稳定性有一定的影响。

参考文献

- [1] 尤田. 换热器中气液相变过程的热力学耦合研究[J]. 甘肃科学学报, 2020, 32(5): 46-49.
- [2] 蔡浩, 戴世佳, 王助良, 步奕. 相变换热器烟气侧流动及传热特性的数值模拟[J]. 热能动力工程, 2020, 35(6): 191-197.
- [3] 贾卓杭, 郭亮, 张旭升. 基于 Fluent 的相变储能换热器回路仿真分析[J]. 节能技术, 2019, 37(2): 126-129+179.
- [4] 周梦, 虞斌, 曹宇. 相变换热器中蒸汽冷凝数值研究[J]. 化工机械, 2018, 45(6): 730-737.
- [5] Maydanik, Y.F. (2005) Loop Heat Pipes. *Applied Thermal Engineering*, **25**, 635-657. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2004.07.010>
- [6] Maydanik, Y.F., Vershinin, S.V. and Chernysheva, M.A. (2018) The Results of Comparative Analysis and Tests of Ammonia Loop Heat Pipes with Cylindrical and Flat Evaporators. *Applied Thermal Engineering*, **144**, 479-487. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.08.022>
- [7] Kimihide, O. and Hosei, N. (2019) Heat Transfer Characteristics of Flat Evaporator Loop Heat Pipe under High Heat Flux Condition with Different Orientations. *Applied Thermal Engineering*, **153**, 828-836. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.02.022>
- [8] Xie, Y.Q., Zhou, Y. and Wen, D.S. (2018) Experimental Investigation on Transient Characteristics of a Dual Compensation Chamber Loop Heat Pipe Subjected to Acceleration Forces. *Applied Thermal Engineering*, **130**, 169-184. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.11.014>
- [9] Blet, N., Bertin, Y., Ayel, V., et al. (2016) Experimental Analysis of a Capillary Pumped Loop for Terrestrial Applications with Several Evaporators in Parallel. *Applied Thermal Engineering*, **93**, 1304-1312. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.10.096>
- [10] Lachassagne, L., Ayel, V., et al. (2012) Experimental Study of Capillary Pumped Loop for Integrated Power in Gravity Field. *Applied Thermal Engineering*, **35**, 166-176. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.10.019>
- [11] 张东伟, 蒋二辉, 等. 脉动热管强化传热技术研究进展[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(21): 1-7.
- [12] 刘向东, 邱升, 陈永平, 等. 脉动热管闭合回路内热驱动气液两相脉动运行特性的非线性研究[J]. 工程热物理学报, 2016, 37(4): 825-829.
- [13] Yoon, A. and Kim, S.J. (2017) Characteristics of Oscillating Flow in a Micro Pulsating Heat Pipe: Fundamental-Mode Oscillation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **109**, 242-253. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.02.003>
- [14] 侯跃攀, 崔文智, 聂秀, 等. 非均匀槽道平板热管的传热性能实验[J]. 重庆大学学报, 2018, 41(3): 13-20.
- [15] Peng, Y., Liu, W., Liu, B., et al. (2015) The Performance of the Novel Vapor Chamber Based on the Leaf Vein System. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **86**, 656-666. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.01.126>
- [16] 林宗虎, 王树众, 王栋编. 气液两相流和沸腾传热[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2003: 248-256.
- [17] 盖德·希特斯洛尼, 主编. 多相流动和传热手册[M]. 鲁钟琪, 等, 译. 北京: 机械工业出版社, 1993.