

一种新型可导热管传热与控制温度机理分析与实验*

(南京动力高等专科学校) 赵孝保**

(东南大学热能工程研究所) 袁竹林 章名耀

[摘要] 首次提出了一种新型可导热管换热装置,用于增压沸腾流化床发电系统中出灰管的冷却与温度控制。分析与实验表明:在出灰管内灰渣流动不稳定,即外界加热负荷或者冷却条件显著变化时,热管的工作温度几乎不变,能够控制在要求的范围内;热管工作温度随充气量增大而增高,但控制温度特性没有明显改变;与常规热管不同,可导热管内蒸汽温度沿冷凝段轴向显著变化,蒸汽凝结受到了抑制,热管传热量有所减少。

关键词 充气热管 传热性能 温度控制

中图分类号 TK124

1 引言

可导热管是一种特殊的可以控制温度的高效传热元件,其传热能力能够自动地随加热负荷(或冷却条件)的变化而改变,从而保持工作温度不变,实现控制温度的需要^[1]。可导热管既传热又控制温度的特性在航天^[2]、化学反应工程^[3]、锅炉余热回收^[4]等领域得到了开发与应用。增压沸腾流化床发电系统(PFBC)是一种高效、洁净燃煤发电系统^[5],其中,高温级旋风除尘器出灰管(料腿)的冷却是一个难以解决的棘手问题。因为出灰管下部的阀门不能承受高温,因此,高温灰渣必须在流经出灰管时被冷却下来。由于出灰管内灰渣流动是断续的不稳定的流动,如果用水直接冷却,会出现不连续的或局部的过度冷却,导致灰渣聚集并堵塞出灰管,或者导致壁面温度过低而腐蚀壁面。采用可以控制温度的传热效率高的可导热管可以很好地解决出灰管冷却和控制温度的问题。本文首次提出了一种创新的环形可导热管换热装置,对其传热与控制温度性能进行了大量的实验研究与分析。结果表明:在外界加热负荷有非常大的变化时,热管工作温度几乎不变,能够控制在要求的范围内,该装置能够满足灰渣流

动不稳定的出灰管冷却的需要;当外部冷却水量有较大变化时,热管工作温度也没有明显变化,表明可导热管控制温度性能是卓越的,其应用范围是广泛的;热管内充气量的多少对控制温度特性没有显著影响,但热管工作温度有较大变化;可导热管内蒸汽温度沿冷凝段轴向有显著分布,充气量对蒸汽温度分布规律有一定影响。

2 环形可导热管传热机理分析

2.1 结构特点

热管是一种高效传热元件。常规热管必须在热管抽真空以后再充入工作液体。热管运行时,热端受热,工作液体蒸发并流向冷端,蒸汽与冷端管

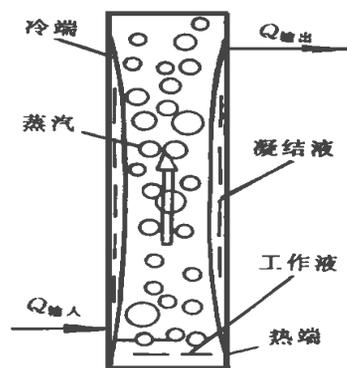


图 1 常规热管工作原理图

外冷流体换热后凝结,凝结液在重力或毛细力作用下返回到热端(图 1)。因为热管内部换热是蒸发与凝结相变换热,所以热管具有传热温差小,传热能力强,壁面温度均匀等独特优点。常规热管内蒸汽与凝结液在管内反方向流动,传热能力受到了汽液两相逆向流动形成的携带极限和声速极限等限制。新型环形可导热管结构与常规热管有显著的不同:1. 热管内不但不需要抽气,而且要根据需要充入一定量的不凝性气体;2. 热管蒸

* 本项目为高等学校博士学科点基金资助项目,由国家教委洁净煤发电和燃烧技术开放实验室完成。

** 东南大学访问学者

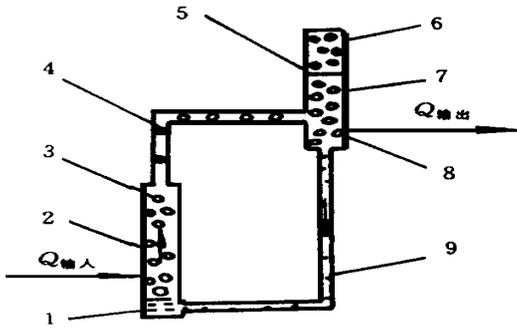


图 2 新型可变导热管工作原理图

1. 工作液 2. 热端 3. 蒸汽 4. 上升段 5. 气-汽界面
6. 不凝性气体 7. 冷凝段 8. 凝结液 9. 下降管

发段和冷凝段用蒸汽上升管和凝结液下降管串连起来组成环形结构；3. 热管热端与冷端分开布置，冷端分为上下两部分。

2.2 传热与控制温度机理分析

环形可变导热管内充入了一定量的不凝性气体，当热端（蒸发段）被加热时，工作液体蒸发，蒸汽压力升高，不凝性气体被驱赶到冷端（冷凝段），蒸汽经上升段到达冷凝段，在冷凝段内与管外冷流体换热并凝结，凝结液经下降管回流到蒸发段再蒸发，实现了热量传递。

被驱赶到冷凝段的不凝性气体聚集在冷凝段内形成了气塞。气塞占据了冷凝段部分空间，减小了冷凝段蒸汽凝结换热的有效面积，并且气塞具有“弹性”，当加热负荷增大时，蒸汽压力提高，气塞被压缩，气塞长度缩短，冷端传热面积增大，热管导热能力提高；当加热负荷减小时，蒸汽压力减小，气塞膨胀，气塞长度伸长，冷端传热面积减小，热管导热能力降低。按照平面模型理论^[6]，由传热方程 $Q = kF(t_v - t_c)$ ，加热负荷 Q 变化时，因为热管导热能力 (kF) 的改变，热管工作温度变化幅度 ($t_v - t_c$) 减小，实现了控制温度的目的。

环形可变导热管内蒸汽经上升段到达冷凝段，凝结液经下降管返回到蒸发段。蒸汽与凝结液分别不同的通道内流动，彻底避免了汽液逆向流动与剪切阻力，热管传热能力得到了提高。

热管冷凝段内蒸汽与不凝性气体之间相互扩散，不凝性气体的浓度沿冷凝段轴向有显著变化，热管冷凝段内轴向温度有明显变化。

3 实验装置及过程

环形可变导热管结构如图 2 所示。蒸发段长为

0.5 m，冷凝段长为 0.7 m，分为上、下两部分，上半部长 0.5 m，蒸发段和冷凝段均为 H38×3 mm 的无缝碳钢管。蒸汽上升管和凝结液下降管分别为 H32×3 mm 和 H24×3 mm 的无缝碳钢管。工作液体为蒸馏水，由蒸发段下部的充（排）液口注入（或排出）。不凝性气体为空气与氮气，从冷凝段上端的充气口充入，并用压力表计量充气压力和充气量。热管工作压力也由压力表测量，热管工作温度由蒸发段内部两对 NiCr-NiSi 热电偶测量。热端壁面温度由蒸发段外壁面上的两对热电偶测量。加热电阻设在蒸发段外部，加热功率由调压器调节，并由电流表和电压表读数。冷凝段外设有冷却水套管，冷却水在套管内流动并冷却工作蒸汽。冷凝段内蒸汽温度及其沿轴向分布用六对热电偶测量。热管实际传热量由测得的冷凝段外冷却水流量和进出口温度计算得到。

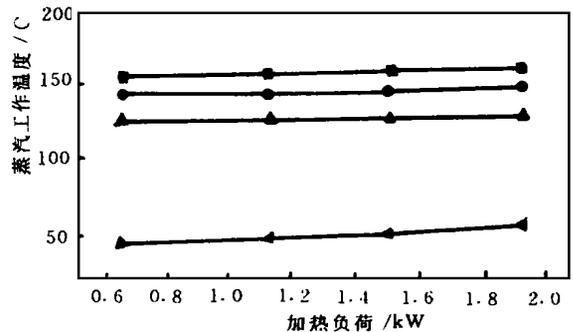


图 3 不同充气压力下热管工作温度随热负荷变化曲线

- $P_0 = 1.96 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ —●— $P_0 = 1.03 \times 10^5 \text{ N/m}^2$
—▲— $P_0 = 0 \text{ N/m}^2$ —▼— $P_0 = -0.19 \times 10^5 \text{ N/m}^2$

实验中，对不同充气压力（充气量）、充液量、加热功率和冷却水量等进行了系统的实验。

4 实验结果与分析

4.1 充气热管传热与控制温度性能分析

图 3 给出了不同加热功率下充气热管工作温度变化的实验结果。在外界加热负荷从 0.65 kW 显著变化到 1.9 kW 时，充气热管的工作温度变化很小，而未充气热管（普通热管 $P_0 = -0.19 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ ）的工作温度明显变化。热管内充气量越大 (P_0 增大)，热管工作温度越高，但工作温度几乎不随加热负荷变化的特性基本上是一致的。因为，充气热管内不凝性气体占据了冷凝段部分空间，使部分冷凝段“封闭”形成气塞，有效冷凝面积减小，因此热管工

作温度增高,充气量越大,气塞长度越长。冷凝段有效传热面积越小,热管工作温度越高。当

外界加热负荷变化时,蒸汽温度与压力变化,蒸汽压力变化迫使气塞被压缩或膨胀,气塞长度变化,冷凝段有效传热面积变化,从而抑制了蒸汽工作温度的变化。实验结果表明,气塞的“弹簧”作用具有显著的

调节热管导热能力性能,使热管工作温度几乎不随外界加热负荷的波动而变化,在传递热量的同时,实现了控制温度的需要

4.2 冷却水量对热管传热与控制温度性能的影响

冷却水量变化对热管传热与控制温度性能影响表示在图4中。当冷凝段冷却水量增大时,普通热管的工作温度显著下降,而充气热管的工作温度几乎恒定不变,充气热管具有良好的控制温度性能。因为,普通热管冷凝段有效传热面积大,且冷凝段内蒸汽凝结主要受冷却水与壁面间的对流换热控制,冷却水量增大时,对流换热增强,蒸汽凝结量大,蒸汽温度明显下降。而充气热管内不凝性气体形成的气塞使得蒸汽凝结有效传热面积减小,并且气塞的“弹簧”作用又抑制了蒸汽压力和温度的变化,因此,蒸汽凝结不随冷却水量增大而明显增强,热管工作温度几乎不变。同样,充气量越大,热管工作温度越高。

4.3 冷凝段内蒸汽温度分布的实验结果

不同充气压力下热管冷凝段内蒸汽温度分布的

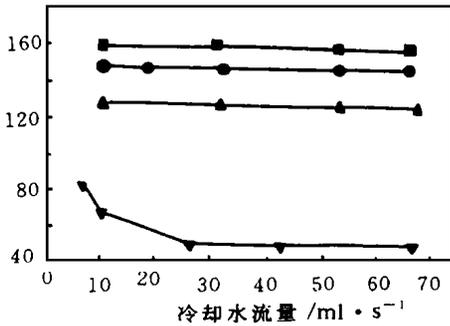


图4 不同充气压力下热管工作温度随冷却水量变化曲线

—▼— $P_0 = 0.19 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ —▲— $P_0 = 0 \text{ N/m}^2$
 ●— $P_0 = 1.03 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ —■— $P_0 = 1.96 \times 10^5 \text{ N/m}^2$

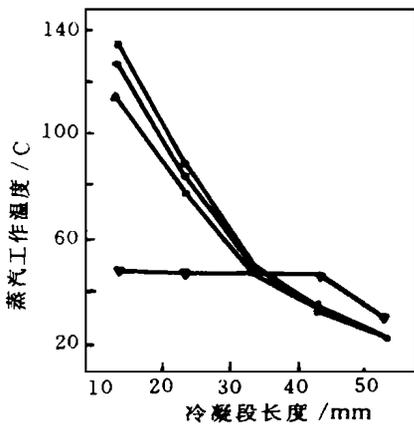


图5 不同充气压力下冷凝段内蒸汽温度沿轴向分布规律

—▼— $P_0 = 1.96 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ —▲— $P_0 = 0 \text{ N/m}^2$
 ●— $P_0 = 1.03 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ —■— $P_0 = 0.19 \times 10^5 \text{ N/m}^2$

实验结果表示在图5中。充气热管内蒸汽温度沿冷凝段轴向分布十分显著,而普通热管内蒸汽温度在冷凝段内基本上均匀一致。实验表明,聚集在冷凝段内的不凝性气体与蒸汽之间有相互扩散,两者之间不存在明确的分界面,因此,蒸汽温度沿冷凝段轴向显著变化,并且充气量越多,蒸汽温度分布越显著。

4.4 传热计算关联式

充气热管传热性能与控制温度特性受到了加热负荷 Q 冷却水量 G 冷却水温度 T_c 充气压力 P_0 (充气量) 等的影响。根据无量纲参数分析和实验数据,得到了传热量 Q 热管工作温度 T_v 以及热管工作压力 P_v 等参数的计算关联式

$$\frac{T_v}{T_c} = 2.4944 \left(\frac{Q g}{c_g h_{fg} d_i^3 l} \right)^{0.493} \left(\frac{G}{c(d_o + d_i) g} \right)^{-0.697} \left(\frac{P_0}{P_v} \right)^{0.053}$$

5 结论

(1) 本文提出的新型环形可变导热管换热结构具有优良的控制温度与传热性能,可以应用在传热负荷有显著波动,但温度却需要保持不变的沸腾增压流化床出灰管的冷却中。

(2) 环形充气热管内不凝性气体有良好的“气塞弹簧”调节作用,使得热管工作温度几乎不随加热负荷和冷却水量的变化而变化,达到控制温度的目的。

(3) 环形充气热管内充气量增加,热管工作温度提高,但对热管工作温度不随加热负荷或冷却条件变化的特性没有影响。

(4) 充气热管内蒸汽温度沿冷凝段轴向有显著分布,表明蒸汽与不凝性气体之间有强烈的扩散作用。

(5) 无量纲分析与实验结果得到的传热计算关联式综合反映了环形充气热管的性能,为后续研究提供了参考。

参考文献

- Chi S W. Heat pipe theory and practice. New York: McGraw-Hill, 1976.
- Peterson P F, Tien C L. Numerical and analytical solutions for two-dimensional gas distribution in gas-loaded heat pipes. ASME J of Heat Transfer, 1989, (111): 598.
- Tomashevsky A G, Muzlov D P, Toklitsev L P. Application of gas Controlled heat pipes in the equipment for single-crystal growth. In: Ma T Z, eds. Proceedings of 8th Int Heat Pipe Conf. Beijing: 1992: 226.
- 马钦,陈远国,袁毅. 充气热管的传热性能试验. 哈尔滨: 第四届全国热管会议论文集. 1992: 118~123.
- 章名耀等. 贾汪增压流化床燃烧联合循环中试电站的设计概念. 东南大学学报, 1992, 22(增刊): 1~5.
- Edwards D K, Marcus B D. Heat and mass transfer in the vicinity of the vapor-gas front in a gas-loaded heat pipe. ASME J. of Heat Transfer, 1972, (94): 155~162.

(渠源 编辑)

作者简介 赵孝保 男,1962年生,硕士研究生,现在南京动力高等专科学校动力工程系任教. 邮编: 210042南京

树皮在复合燃烧锅炉流化床内的燃烧份额 = **The Combustion Share of Bark in a Bark Fluidized Bed-Pulverized Coal Compound Combustion Boiler** [刊, 中] / Zhao Guangbo, Liu Wentie, Huang Yimin, Qin Yukun (Harbin Institute of Technology), Li Han (Boiler & Pressure Vessel Inspection Institute of Harbin Labor Bureau) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1998, 13(5). - 325~ 327
By the analysis of a heat balance of fluidized bed in a bark fluidized bed-pulverized coal compound combustion boiler a calculation formula is obtained of the combustion share of bark in the fluidized bed. With a 75t/h bark fluidized bed-pulverized coal compound combustion boiler being taken as an example the authors analyze the effect on bark combustion share of such factors as fluidized bed temperature, fluidized bed outlet nominal excess air factor, hot air temperature, embedded tube heat absorption share and the evaporation heat consumption of water contained in the fluidized bed unburned bark. **Key words** compound combustion boiler, bark, combustion share

一种新型可变导热管传热与控制温度机理分析与实验 = **Experimental Study and Analysis of a New type of Variable Heat Conduction Pipe Heat Transfer and Temperature Control Mechanism** [刊, 中] / Zhao Xiaobao (Nanjing Power Engineering College), Yuan Zhulin, Zhang Mingyao (Southeastern University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1998, 13(5). - 328~ 330

A new type of variable heat conduction pipe heat exchange unit is proposed, which can be used for the cooling and temperature control of ash exhaust pipe in a pressurized fluidized bed power generation system. The results of analysis and tests show that in case of an unstable ash flow in the ash exhaust pipe, i. e. in the presence of a significant change in the outside heating load or cooling conditions, the operating temperature of the heat pipe remains almost unchanged and can be controlled within a required range. The heat pipe working temperature will increase with an increase in gas loading, but the control temperature characteristics will not undergo a marked change. In contrast with conventional heat pipes there is a significant change of steam temperature in the variable heat conduction pipe along a condensing section axial direction. Steam condensation is inhibited and a reduction in heat pipe heat transfer quantity results. **Key words** gas-loaded heat pipe, heat transfer performance, temperature control

燃气轮机余热锅炉三通档板阀的研制 = **Development of a Three-way Diverter Damper for Gas Turbine HRSG** [刊, 中] / Liang Haidong, Yang Jiadong, Wang Jianzhi (Harbin No. 703 Research Institute) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1998, 13(5). - 331~ 333

This paper describes the working principle, main construction and technical features of a three-way diverter damper. It is a new product developed and put into operation in China for the first time. Also given in the paper is the approach to be taken for its further improvement and a forecast of future application prospects. **Key words** gas turbine, HRSG, three-way diverter damper

方形里克和里克 - ZT型脉动燃烧器研究 = **A Study of Square-shaped Model Rijke and Rijke ZT Pulsating Combustors** [刊, 中] / Zhong Yingjie, Chen Fulian, Shi Zhuling, et al (Zhejiang Industrial University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1998, 13(5). - 334~ 336

Tests were conducted of model Rijke and Rijke ZT pulsating combustors of a 350× 350 mm square-shaped furnace. The test results show that with the help of the square-shaped combustor a model Rijke pulsating combustion under natural draft conditions can be realized but with a greater difficulty than in the case of a