

# 常规工况下多弯头数脉动热管运行性能的实验研究

杨洪海, 万 劼, 韩洪达

(东华大学 环境学院, 上海 201620)

**摘 要:** 设计了两组内径 1 和 2 mm 的 40 个弯头细铜管组成的脉动热管, 通过开启或关闭管路中的一个阀门, 可以得到闭式或开式两种回路形式, 分别采用 R123、水及酒精为工作介质, 充液率从 15% 变化至 95%, 安装角度可任意调节。通过实验, 分析比较了管内径、工质种类及充液率、加热角度以及回路形式等多弯头数脉动热管在常规工况下启动及传热性能的影响。

**关 键 词:** 脉动热管; 弯头数; 回路形式; 运行性能; 影响因素  
中图分类号: TK172.4 文献标识码: A

## 引 言

脉动热管作为一种新型高效的传热元件, 具有结构简单、传热性能好、随意弯曲等优点, 近年来得到越来越广泛的研究<sup>[1~9]</sup>。研究表明, 闭式回路与开式回路的运行特点不尽相同。GI 等人在 10 弯头的开、闭式回路脉动热管的可视化对比实验中发

现<sup>[7]</sup>, 开式回路仅能轴向振荡, 无法完成管间的循环流动。同样条件下的闭式回路则能良好地循环流动。Zhang 等人也发现<sup>[8]</sup>, 在 6 弯头开式回路实验过程中, 各段温度和空管运行差别很小, 可以视为没有运行; 而闭式回路的实验过程中, 各段温度比空管有明显下降, 表明热管已经运行。

现以构造两组多弯头数脉动热管为例, 如图 1 所示, 蒸发端尺寸如表 1 所示。通过开启或关闭管路中的一个阀门, 得到闭式或开式回路。通过实验, 比较了多弯头数脉动热管在这两种回路形式下的运行规律及性能影响因素。

表 1 蒸发端尺寸 (mm)

|      | $n$ | $l_e$ | $l_1$ | $d_1$ | $d_i$ | $R_m$ |
|------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|
| PHP1 | 40  | 8     | 2     | 1     | 2     | 5     |
| PHP2 | 40  | 8     | 2     | 2     | 3     | 4.5   |

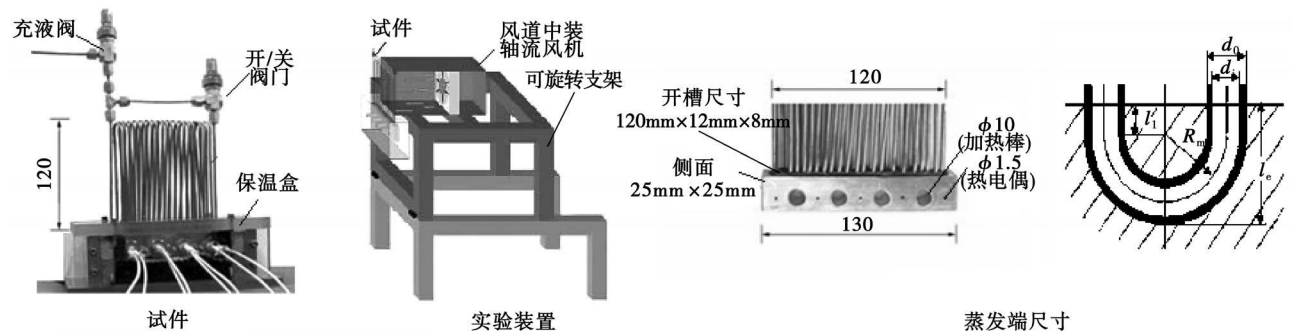


图 1 实验装置及结构尺寸

## 1 实验装置

脉动热管由内径为 1 和 2 mm 的细铜管弯曲而成, 每组 40 个弯头, 有蒸发段和冷凝段, 无绝热段。其中, 蒸发段插入一加热铜块内, 用填焊材料固定。5 根 K 型热电偶用以测量蒸发段平均温度。冷凝段用小风扇冷却, 风速 5 m/s, 冷风温度维持在 22 ±

1.5 °C。整个装置角度可调, +90°、0°、-90° 分别表示垂直底部加热、水平加热以及垂直顶部加热 3 种模式。采用 R123、水及酒精为工作介质, 充液率变化范围从 15% ~ 95%。

## 2 脉动热管运行性能的衡量及其影响因素分析

收稿日期: 2008-01-28; 修订日期: 2008-03-24

基金项目: 上海市重点学科建设基金资助项目(B604)

作者简介: 杨洪海(1968—), 女, 浙江上虞人, 东华大学副教授。

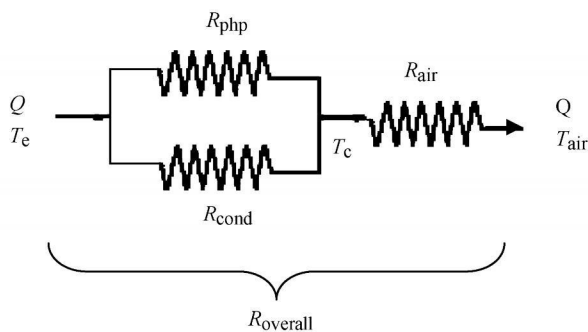


图 2 脉动热管装置的传热热阻网络结构

衡量脉动热管运行性能的指标通常有温度振荡幅度及频率、热阻以及最大热负荷等。本文采用热阻作为指标讨论多弯头数脉动热管在常规工况下的运行性能及影响因素，图 2 为脉动热管装置的传热热阻网络结构。其中， $R_{overall}$ 、 $R_{php}$ 、 $R_{cond}$ 、 $R_{air}$  分别表示整体传热热阻、脉动热管的运行热阻、管壁材料的导热热阻以及空气侧的放热热阻； $T_e$ 、 $T_c$ 、 $T_{air}$  分别表示蒸发段平均温度、冷凝段平均管壁温度以及空气温度； $Q$  为总传热量。本实验中铜管数目较多，如需准确求解冷凝段平均管壁温度  $T_c$ ，需要布置较多测点。由于数据采集通道的接口数目较少，无法精确求得  $T_c$ ，因此，借助热阻网络图间接计算  $R_{php}$ 。从图 2 可以看出：

$$R_{overall} = R_{air} + 1 / \left( \frac{1}{R_{php}} + \frac{1}{R_{cond}} \right) \quad (1)$$

将式(1)变形，可以得到：

$$\frac{1}{R_{php}} = \frac{1}{R_{overall} - R_{air}} - \frac{1}{R_{cond}} \quad (2)$$

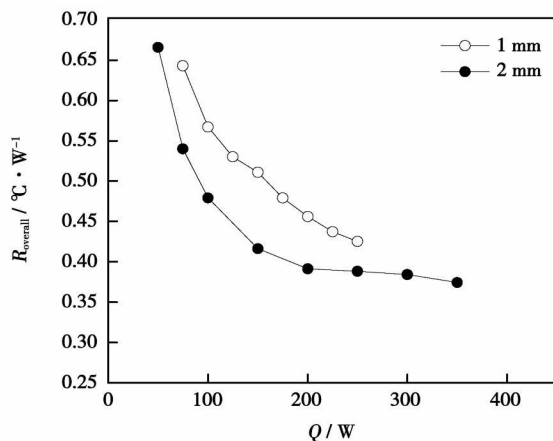
实验过程中  $R_{cond}$  及  $R_{air}$  近似看作常数，这样， $R_{overall}$  与  $R_{php}$  的变化趋势一致。因此，采用  $R_{overall}$  指标来分析脉动热管的运行性能及其影响因素。根据图 2，有：

$$R_{overall} = (T_e - T_{air}) / Q \quad (3)$$

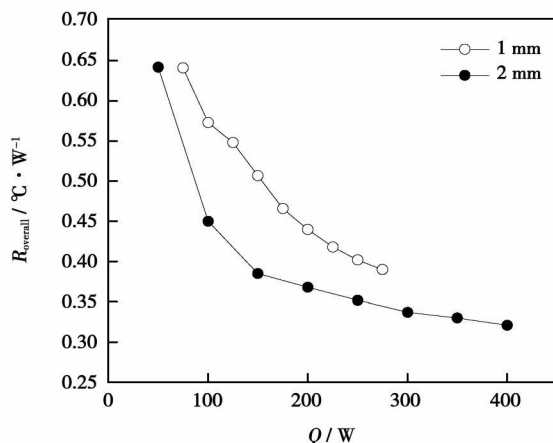
### 2.1 内径对运行性能的影响分析

图 3 显示了内径对脉动热管整体热阻的影响：在其它条件相同的情况下，管径大的热管热阻较小，运行性能较好。其原因是：(1) 小管径的空管热阻大；(2) 流动阻力及压降会随着内径减小而上升，阻碍流体流动，导致传热性能下降；(3) 管径越小，体积越少，可充注的工质质量较小，携热能力较少。当然，管径不能太大，否则，就会失去脉动热管的运行特性，最大允许直径受工质种类及运行温度等因素影响<sup>[9]</sup>。我们还发现，1 mm 内径的脉动热管使用水为工质时只能在底部加热工况下运行，不能在水平加热或顶部加热方式下运行，而 2 mm 内径的脉动热管充水时可

以在上述 3 种加热方式下较好地运行。



(a) 开式回路



(b) 闭式回路

图 3 1 和 2 mm 内径脉动热管热阻的比较  
(垂直底部加热模式，酒精，50%充液率)

### 2.2 工质热物性对运行性能的影响分析

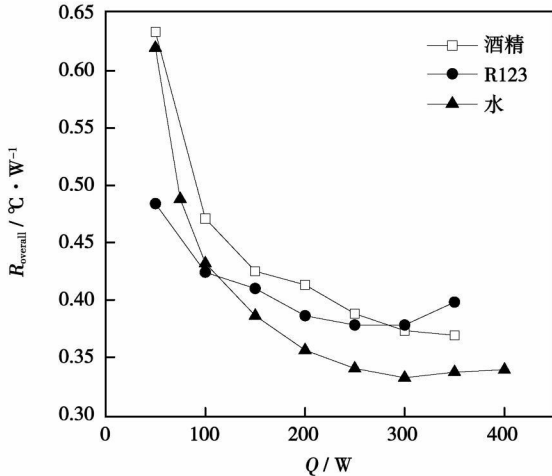
图 4 比较了脉动热管分别充注水、酒精及 R123 3 种工质时热阻的变化情况。我们发现，当采用 R123 时，脉动热管启动运行所需的热负荷较小，例如当热负荷为 50 W 时，热阻已经下降至 0.5 °C/W 以下，远远低于 2 mm 内径的空管热阻 0.75 °C/W。但是当热负荷接近 300 W 时，热阻开始上升，由此可以判断出 R123 必然是最先达到传热极限的工质。充水和酒精的热管启动稍慢。当热管完全启动后，充水的热管热阻较小。

### 2.3 充液率对运行性能的影响分析

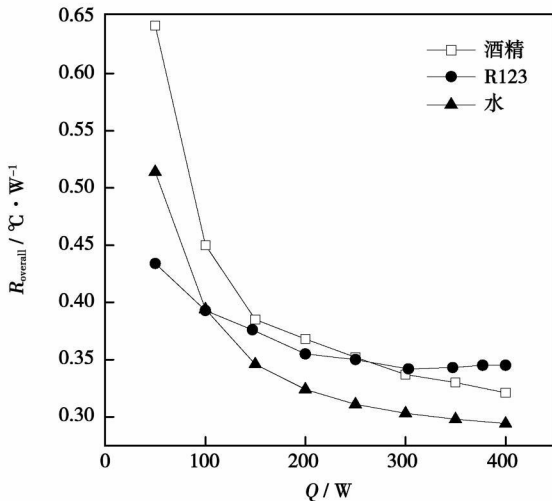
充液率大小直接影响到脉动热管内部气液塞的多少及分布，继而影响到工质流动。文献[10]研究表明，脉动热管稳定运行要求充液率在一定范围之内，若充液率太小，工质质量太少不利于传热；若充液率太大，则会造成流动摩擦阻力过大，也不利于传热

的进行。图 5 为本实验对这个问题的研究结果: 对于 1 mm 内径采用酒精为工质的脉动热管, 当热负荷为 75 W 时, 运行状态离启动工况较近, 总体传热性能改善不多且不太稳定, 热阻随充液率的变化规律不是很明显。当热负荷为 175 W 时, 脉动热管处于完全稳定运行状态, 传热性能明显改善, 随着充液率的增加, 热阻先减少而后增加, 40% ~ 60% 为最佳充液率范围, 对应较小的热阻值。

力——工质受热相变产生的膨胀功随之上升, 使得重力的影响程度随之减弱。



(a) 开式回路

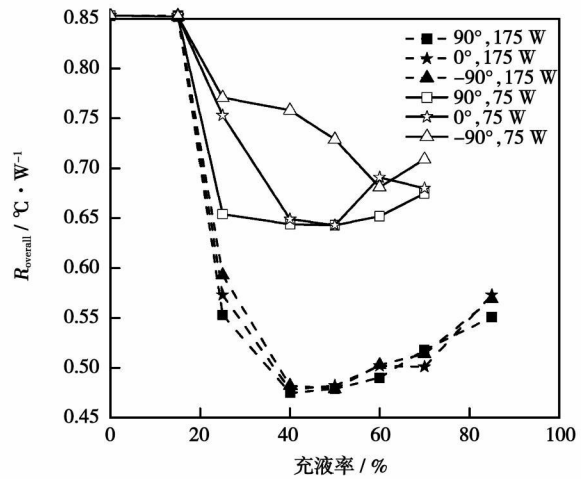


(b) 闭式回路

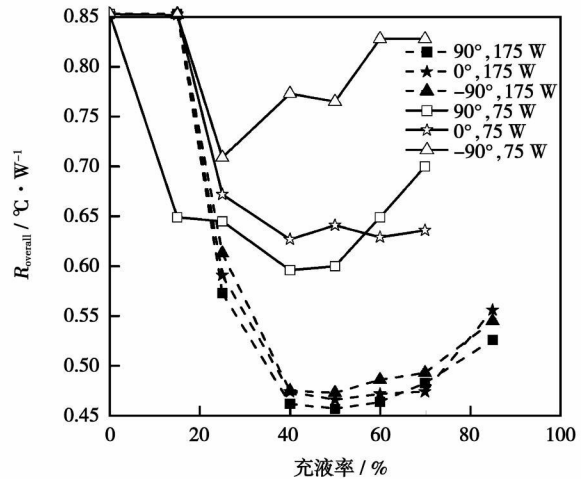
图 4 充注不同工质热管热阻的比较 (充液率 50%, 水平加热模式, 内径 2 mm)

### 2.4 加热模式对运行性能的影响分析

从图 5 可以看出, 当热负荷为 75 W 时, 顶部加热模式下热管热阻值明显高于水平加热模式及底部加热模式, 说明重力对运行性能的影响比较明显。当热负荷上升到 175 W 时, 3 种模式下热阻的差别缩小, 仅 5% 左右, 工程计算时可以忽略。对此我们做如下解释: 随着热负荷上升, 工质运行的主要驱动



(a) 开式回路



(b) 闭式回路

图 5 加热模式及充液率对热阻的影响规律 (酒精, 内径 1 mm)

### 2.5 回路形式对运行性能的影响分析

考察了多弯头数脉动热管在开、闭两种回路形式下运行性能的差别, 结果如图 3 ~ 图 5 所示。可以看出, 两种回路形式下脉动热管的运行情况基本相似。一般情况下, 闭式回路的总体传热性能略优于开式回路, 性能改善约 5% ~ 15%, 取决于管径、倾斜角、热负荷、工质种类及充液率等因素, 如图 6 所示。本文对这个问题的研究结果与文献[7 ~ 8]的研究结果有较大差别, 考虑到本实验装置中弯头数为 40 的因素, 远大于 GI 等人的 6 弯头与 Zhang 等人的 10 弯头, 我们把产生这种差别的原因主要归结为弯头数的多少。文献[9]研究表明, 弯头数对脉动热管运行性能影响较大。当弯头数较少时, 脉动热管只能在底部加热方

式下运行;随着弯头数的增加,脉动热管有可能在水平加热方式甚至在顶部加热方式下运行。类似地,我们还认为,随着弯头数的增加,流体运行的空间自由度增加,管路是否闭合对工质流动带来的限制也就减

少。由此给我们一个启发,在实际使用过程中,当设计的弯头数较少时,回路的开、闭形式对运行性能影响较大,不能忽略;当设计的弯头数较多时,回路形式对运行性能影响较小,可以忽略。

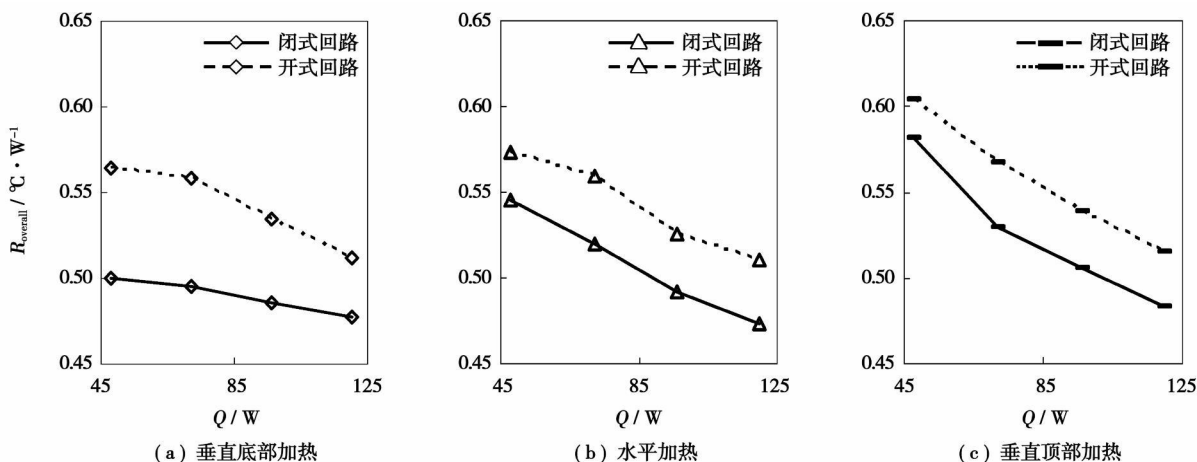


图 6 开式及闭式回路脉动热管热阻比较 (R123, 充液率 50%, 内径 1 mm)

### 3 结 论

对两组由内径为 1 和 2 mm 的 40 个弯头数脉动热管进行了试验研究,分析了开式和闭式回路脉动热管的运行特点及性能影响因素,结果表明:

(1) 在多弯头数情况下,开、闭式回路脉动热管的运行特点基本相似,闭式回路的总体热力性能略优于开式回路,但差别不大。

(2) 脉动热管充注 R123 时最容易启动,也最容易烧干;以水为工质时热管启动较慢,但是稳定运行后,热阻较小,也不容易烧干。

(3) 2 mm 内径脉动热管整体运行性能优于 1 mm 内径脉动热管。对于两组热管,热阻随充液率的变化趋势基本一致,也即热阻随充液率的增加先下降而后上升。存在一个最佳的充液率范围 40%~60%,热管的整体运行性能较好。

(4) 重力作用确实影响脉动热管的运行性能,但其影响程度随着管内径的减少、弯头数的增加以及热负荷的增加而减少。

#### 参考文献:

- [ 1 ] 曹小林, 席战利, 周 晋, 等. 脉动热管运行可视化及传热与流动特性的试验研究[ J ]. 热能动力工程, 2004, 19(4): 411—415.
- [ 2 ] 马永锡, 张 红. 振荡热管传热性能的实验设计与多因素分析[ J ]. 热能动力工程, 2005, 20(6): 571—574.
- [ 3 ] 杨洪海, KHANDEKAR S, GROLL M. 脉动热管技术的研究现状与前沿热点[ J ]. 东华大学学报, 2006, 32(3): 134—138.
- [ 4 ] 商福民, 冼海珍, 刘登瀛, 等. 振荡热管自激强化传热的可行性分析[ J ]. 热能动力工程, 2006, 21(2): 161—164.
- [ 5 ] 商福民, 刘登瀛, 冼海珍, 等. 非均匀截面自激振荡热管内热传输特性实验研究[ J ]. 热能动力工程, 2007, 22(2): 201—204.
- [ 6 ] 周 岩, 曲 伟. 脉动热管的毛细结构和尺度效应实验研究[ J ]. 工程热物理学报, 2007, 28(4): 646—648.
- [ 7 ] GI K, SATO E, MAEZAWA S, et al Flow visualization experiment on oscillating heat pipe //11th Int. Heat Pipe Conf[ C ]. Tokyo, 1999. 149—153.
- [ 8 ] ZHANG X M, XU J L, LI Y X, et al Experimental study of a pulsating heat pipe using FC-72, ethanol and water as working fluids [ J ]. Experimental Heat Transfer, 2004(17): 47—67.
- [ 9 ] CHAROENSAWAN P, KHANDEKAR S, GROLL M, et al Closed loop pulsating heat pipes part A: parametric experimental investigations [ J ]. Applied Thermal Engineering, 2003, 23(16): 2009—2020.
- [ 10 ] KHANDEKAR S, DOLLINGER N, GROLL M. Understanding operational regimes of pulsating heat pipes: an experimental study [ J ]. Applied Thermal Engineering, 2003, 23(6): 707—719.

(编辑 滨)

jing, China, Post Code: 100011), HUANG Xiang, XU Yan-qiang (China Huadian Engineering (Group) Co. Ltd., Beijing, China, Post Code: 100044)// Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2009,24(1). - 73 ~ 76

A direct air-cooled condenser consists of several direct air-cooled elements. A study of its elements is of major importance. Based on a practical engineering project, the flow and heat transfer performance of a 135 MW direct air-cooled condenser sample unit has been studied. By using a numerical heat transfer (NHT) software Fluent, a numerical simulation has been performed of the air-cooled sample unit at its design and test operating conditions. The reason why the simulation results differ from the design and test data was analyzed. The simulation, analysis and study of the external air speed and temperature field of the direct air-cooled condenser can be helpful for the optimized design of the systems in question. **Key words:** direct air-cooled condenser, sample unit, numerical simulation, optimized design

常规工况下多弯头数脉动热管运行性能的实验研究 = **Experimental Study of the Operation Performance of Multi-elbow Pulsating Heat Pipes at Conventional Operating Conditions** [刊, 汉] / YANG Hong-hai, WAN Qing, HAN Hong-da (College of Environment Science and Engineering, Donghua University, Shanghai, China, 201620) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2009,24(1). - 77 ~ 80

Two groups of pulsating heat pipes consisting of 40 thin copper tube elbows with an inner diameter of 1 and 2 mm respectively were designed. Two loop types, closed or open, can be made available by opening or closing a valve in the pipe. With R123, water and alcohol serving as working media respectively, liquid filling rate ranges from 15% to 95% and the installation angle can be regulated freely. Through tests, analyzed and compared was the influence of the inner diameter, working medium, liquid filling rate, heating angle and loop type of the multi-elbow pulsating heat pipe on its startup and heat transfer performance at conventional operating conditions. **Key words:** pulsating heat pipe, number of elbows, loop type, operation performance, influencing factor

超临界变压运行直流锅炉中间集箱分配特性的试验研究 = **Experimental Study of Intermediate Header Flow Distribution Characteristics of a Supercritical Once-through Boiler Operating at Variable Pressures** [刊, 汉] / ZHU Yu-qin (Technology Research Center of Petroleum Refinery Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an, China, Post Code: 710065), BI Qin-cheng, CHEN Ting-kuan (National Key Laboratory on Multi-phase Flows in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2009,24(1). - 81 ~ 84

In the light of the structural and parameter features of an intermediate header serving as a transition connection between the spiral coil-tube water-wall at the lower part of the furnace and the vertical tube water-wall at the upper part of the furnace in a 600 MW supercritical boiler, the distribution characteristics of gas-liquid two-phase flows in the intermediate header of the supercritical boiler at a load of 35% ECR (Economical Continuous Rating), 50% ECR and 75% ECR were simulated by using an air-water test loop. Through observations and a high-speed photographic method, the flow pattern in parallel branch tubes of a distribution header was measured and analyzed. By using a quick-closing valve and friction resistance method, measured respectively were the phase and flow distribution among various branch tubes. The test results show that at three operating conditions and with inlet dryness ranging from  $x = 0.7$  to 0.95, the flow distribution of the air-water two-phase flows passing through the parallel branch tubes of the distribution header is comparatively uniform, and in most cases, the flow rate deviation is less than 10%. **Key words:** supercritical once-through boiler, header, distribution characteristics, air-water two-phase flow

氧燃烧方式下煤粉锅炉辐射传热特性分析 = **Thermodynamic Calculation of Radiative Heat Transfer in a Coal-**