

# 水下航行器动力系统螺旋管式蒸发器建模及动态仿真

白杰, 党建军, 李代金

(西北工业大学 航海学院 陕西 西安 710072)

**摘要:** 基于移动边界法的思想, 建立了螺旋管式蒸发器完整的移动边界模型及准稳态模型, 编制了变工况动态仿真计算程序。以蒸发器进口水量阶跃变化为输入条件进行仿真计算, 得出了蒸发器压力、出口温度、各相区长度等动态特性。计算结果验证了本研究算法的可行性。其中, 准稳态法采用更少的变量, 利于控制器的设计, 数值计算更快。蒸发器存在3个相区时, 采用移动边界法计算更为合理准确。

**关键词:** 螺旋管; 蒸发器; 动态仿真

中图分类号: TL353.13 文献标识码: A

DOI: 10.16146/j.cnki.mdjgc.2016.01.004

### 符号说明

- $C$ ——比热  $J/(kg \cdot K)^{-1}$ ;
- $L$ ——长度  $m$ ;
- $S$ ——周长  $m$ ;
- $T$ ——温度  $K$ ;
- $h$ ——焓  $J/kg$ ;
- $\dot{m}$ ——质量流量  $kg/s$ ;
- $P$ ——压强  $Pa$ ;
- $q$ ——单位长度热功率  $W/m$ ;
- $\alpha$ ——换热系数  $W/(m^2 \cdot K)$ ;
- $\rho$ ——密度  $kg/m^3$ ;
- $\gamma$ ——空隙率;
- $\mu$ ——滑移率;
- 上标:
- ˘——饱和液相;
- ˝——饱和气相。
- 下标:
- $A$ ——截面;
- $B$ ——截面;
- in——进口;
- out——出口;
- w——壁面;
- 0——液相区;
- 1——两相区;
- 2——气相区;

## 引言

螺旋管式蒸发器是高温核电站的重要设备之

一<sup>[1-2]</sup>, 也是一些电站利用有机朗肯循环系统回收余热发电的重要设备之一<sup>[3-4]</sup>。在水下航行器闭式循环动力系统中, 螺旋管是液态水转变为过热蒸汽的场所, 是热能交换的重要组件。其变工况下的动态性能, 影响着系统的正常运转, 对其建模和仿真有着重要的意义。

有相变螺旋管式蒸发器的建模通常采用两类方法<sup>[5-6]</sup>: (1) 分布参数法。这种方法计算精度高, 但是计算效率低, 适合于部件的设计计算; (2) 集总参数法。这种方法计算效率高, 但精度较低。如何建立一种模型, 能够同时兼顾效率和精度, 应用于系统级仿真, 是蒸发器建模的难点。文献[7]最早提出了移动边界法的思想, 将相变换热器分为几个相区, 如图1所示。该方法将各相区物性参数用集总参数表示, 以相区长度作为状态变量, 使得换热器的各相区长度在系统仿真过程中随时间变化。该方法是一种分布集总参数法, 增加了模型所描述系统的真实性。

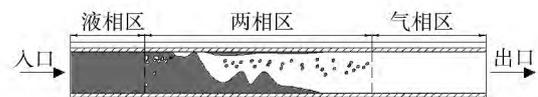


图1 蒸发器示意图

Fig. 1 The schematic diagram of the evaporator

本研究根据移动边界法的思想, 建立了有相变的蒸发器换热完整数学模型。针对外部扰动比较大时, 工质在蒸发器出口状态可能发生变化的情况, 在移动边界法的基础上, 对气相区质量、能量守恒方程进行化简, 建立了准稳态模型。通过对两种模型进行动态仿真计算, 验证了模型的计算效率和稳定性。

收稿日期: 2015-01-13; 修订日期: 2015-04-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51409215)

作者简介: 白杰(1985-)男, 山西阳泉人, 西北工业大学博士研究生。

### 1 基本模型

换热器中同时存在着两相区和单相区。移动边界法的思想是采用分区集总参数方法<sup>[8-9]</sup>,将各相区的长度作为求解变量,动态跟踪两相区和单相区之间边界位置,对各相区分别建立移动边界模型,且在模型建立过程中作如下假设:(1)工质在换热管内为一维流动;(2)忽略工质在换热管中的压降损失;(3)两相区计算时采用平均空隙率理论;(4)忽略工质和换热管的轴向导热。

对于基本的控制体,其示意图如图2所示,其中长度变量  $L_A$  和  $L_B$  是时间的函数。

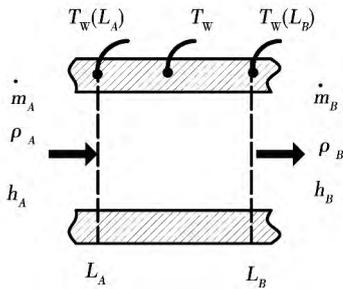


图2 控制体示意图

Fig.2 The schematic diagram of the control volume

沿  $L$  方向、通过定截面积  $A$  的截面  $L_A(t)$  和  $L_B(t)$  的一维换热问题,存在质量连续关系:

$$A \frac{d}{dt} \int_{L_A}^{L_B} \rho dL + \rho_A A \frac{dL_A}{dt} - \rho_B A \frac{dL_B}{dt} = \dot{m}_A - \dot{m}_B \quad (1)$$

及能量平衡关系:

$$A \frac{d}{dt} \int_{L_A}^{L_B} (h\rho) dL - Ah_B \rho_B \frac{dL_B}{dt} + Ah_A \rho_A \frac{dL_A}{dt} - A(L_B - L_A) \frac{dp}{dt} = h_A \dot{m}_A - h_B \dot{m}_B + q(L_B - L_A) \quad (2)$$

对于单相区,平均温度为对数平均值,两相区为饱和温度,工质与壁面换热量为:

$$q = \alpha(T_w - \bar{T})S \quad (3)$$

### 2 数学模型

#### 2.1 移动边界模型

将各相区相关变量代入式(1)和式(2),进行化

简,得到其质量、能量守恒方程。

蒸发器液相区的质量守恒方程为:

$$A \left\{ (\bar{\rho}_0 - \rho') \frac{dL_0}{dt} + L_0 \left( \frac{\partial \bar{\rho}_0}{\partial p} \Big|_h + \frac{1}{2} \frac{\partial \bar{\rho}_0}{\partial h} \Big|_p \frac{dh'}{dp} \right) \frac{dp}{dt} + \frac{1}{2} L_0 \frac{\partial \bar{\rho}_0}{\partial h} \Big|_p \frac{dh_{in}}{dt} \right\} = \dot{m}_{in} - \dot{m}_1 \quad (4)$$

液相区的能量守恒方程为:

$$A \left\{ \left( \frac{1}{2} \bar{\rho}_0 (h_{in} + h') - \rho' h' \right) \frac{dL_0}{dt} + \frac{1}{2} L_0 (\bar{\rho}_0 + \frac{1}{2} (h_{in} + h') \frac{\partial \bar{\rho}_0}{\partial h} \Big|_p) \frac{dh_{in}}{dt} + \frac{1}{2} L_0 \left\{ \bar{\rho}_0 \frac{dh'}{dp} + (h_{in} + h') \cdot \left( \frac{\partial \bar{\rho}_0}{\partial p} \Big|_h + \frac{1}{2} \frac{\partial \bar{\rho}_0}{\partial h} \Big|_p \frac{dh'}{dp} \right) - 2 \right\} \frac{dp}{dt} \right\} = \dot{m}_{in} h_{in} - \dot{m}_1 h' + q_0 L_0 \quad (5)$$

两相区的平均密度为:

$$\bar{\rho}_1 = \gamma \rho'' + (1 - \gamma) \rho' \quad (6)$$

其中,两相蒸发区的平均空隙率为:

$$\bar{\gamma} = \frac{1 - \mu [1 - \ln \mu]}{(1 - \mu)^2} \quad (7)$$

两相区中滑移率为:

$$\mu = \left( \frac{\rho''}{\rho'} \right)^{2/3} \quad (8)$$

两相区的质量守恒方程为:

$$A \left\{ L_1 \left( \bar{\gamma} \frac{d\rho''}{dp} + (1 - \bar{\gamma}) \frac{d\rho'}{dp} \right) \frac{dp}{dt} + (\rho' - \rho'') \frac{dL_0}{dt} + (1 - \bar{\gamma}) (\rho' - \rho'') \frac{dL_1}{dt} \right\} = \dot{m}_1 - \dot{m}_2 \quad (9)$$

两相区的能量守恒方程为:

$$A (\rho' h' - \rho'' h'') \frac{dL_0}{dt} + A (1 - \bar{\gamma}) (\rho' h' - \rho'' h'') \frac{dL_1}{dt} + AL_1 \left\{ \bar{\gamma} \left( h'' \frac{d\rho''}{dp} + \rho'' \frac{dh''}{dp} \right) + (1 - \bar{\gamma}) \left( h' \frac{d\rho'}{dp} + \rho' \frac{dh'}{dp} \right) - 1 \right\} \cdot \frac{dp}{dt} = \dot{m}_1 h' - \dot{m}_2 h'' + qL_1 \quad (10)$$

气相区质量守恒方程为:

$$A \left( (\rho'' - \rho_2) \frac{dL_0}{dt} + (\rho'' - \rho_2) \frac{dL_1}{dt} \right) + AL_2 \cdot \left( \left( \frac{\partial \rho_2}{\partial p} \Big|_h + \frac{1}{2} \frac{\partial \rho_2}{\partial h} \Big|_p \frac{dh''}{dp} \right) \frac{dp}{dt} + \frac{1}{2} \frac{\partial \rho_2}{\partial h} \Big|_p \frac{dh_{out}}{dt} \right) = \dot{m}_2 - \dot{m}_{out} \quad (11)$$

气相区能量守恒方程为:

$$A\left(\rho''h'' - \frac{1}{2}\bar{\rho}_2(h'' + h_{out})\right)\left(\frac{dL_0}{dt} + \frac{dL_1}{dt}\right) + AL_2$$

$$\left(\frac{1}{2}\bar{\rho}_2\frac{dh''}{dp} + \frac{1}{2}(h'' + h_{out})\left(\frac{\partial\bar{\rho}_2}{\partial p}\bigg|_h + \frac{1}{2}\frac{\partial\bar{\rho}_2}{\partial h}\bigg|_p\frac{dh''}{dp}\right) - 1\right)$$

$$\frac{dp}{dt} + \frac{1}{2}A\left(\bar{\rho}_2L_2 + \frac{1}{2}(h'' + h_{out})L_2\frac{\partial\bar{\rho}_2}{\partial h}\bigg|_p\right)\frac{dh_{out}}{dt} = \dot{m}_2h''$$

$$- \dot{m}_{out}h_{out} + q_2L_2 \quad (12)$$

### 2.2 准稳态模型

完整的移动边界模型,系统变量多,不利于系统级仿真及控制器设计,而且当外界扰动较大时,出口相态不确定,仿真计算时需要设计液相区、气相区、两相区及液相区和两相区的两类模块,并进行相态判定和计算模块转换,大大降低了运算效率。

基于以上原因,建立了准稳态模型。采用移动边界法中液相区、两相区数学模型,根据气相区特点,忽略其动态过程,将其按照准稳态方法处理,其质量守恒方程为:

$$\dot{m}_{out} = \dot{m}_2 \quad (13)$$

由能量守恒方程可以得出气相区的出口温度为:

$$T_{out} = T'' + (T_w - T'')\left[1 - \exp\left(\frac{-\alpha_2SL_2}{Cm_2}\right)\right] \quad (14)$$

### 3 动态过程仿真与分析

基于以上模型,编制了数值求解程序,可对蒸发器变工况过程进行求解。在外界扰动下,计算模型的稳定性和鲁棒性是首先考虑的问题。本研究基于水下航行器用动力系统蒸发器的设计参数,对蒸发器进口水流量改变时动态过程进行仿真计算。水通过泵进入蒸发器,吸热变为过热蒸汽后通过喷嘴排出。蒸发器结构参数及初始稳态值如表 1 所示,进口水量在 0、10 和 20 s 时发生阶跃变化,仿真结果如图 3 - 图 8 所示。

由图 3 - 图 5 可知,当蒸发器进口水量增加时,管内压力升高,出口温度降低。这是由于液态水增加时,工质在管内流速增加,液相区和两相区长度增加,气相区长度变短,而当管壁温度保持恒定时,工质获得的热量不足以将其加热到更高的温度,因此出口温度降低。图 6 - 图 8 结果验证了各相区长度

变化。以上结果亦可反应蒸发器进口水量减少时的动态特性。

表 1 蒸发器结构参数及仿真初始稳态值

Tab. 1 Structure parameters of the evaporator and initial steady values

系统结构参数	数据	仿真初始稳态值	数据
蒸发器管内径/m	0.004	蒸发器壁面温度/K	1 000
蒸发器管外径/m	0.006	蒸发器压强/MPa	5.1
蒸发器液相区换热系数/ $W \cdot (m^2 \cdot K)^{-1}$	1 200	蒸发器进口流量/ $kg \cdot s^{-1}$	0.008
蒸发器两相区换热系数/ $W \cdot (m^2 \cdot K)^{-1}$	2 000	蒸发器进口温度/K	373
蒸发器气相区换热系数/ $W \cdot (m^2 \cdot K)^{-1}$	800	蒸发器出口温度/K	800

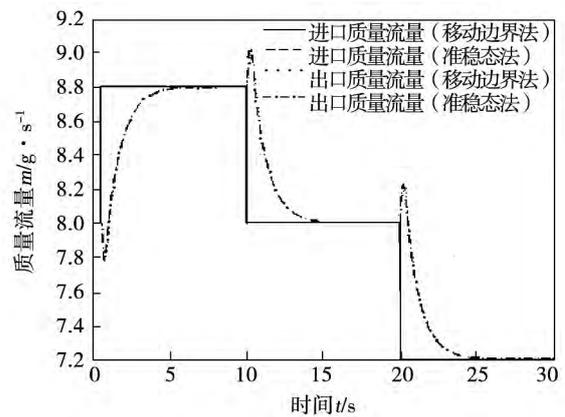


图 3 进口及出口水量变化

Fig. 3 The flow rate change of inlet and outlet

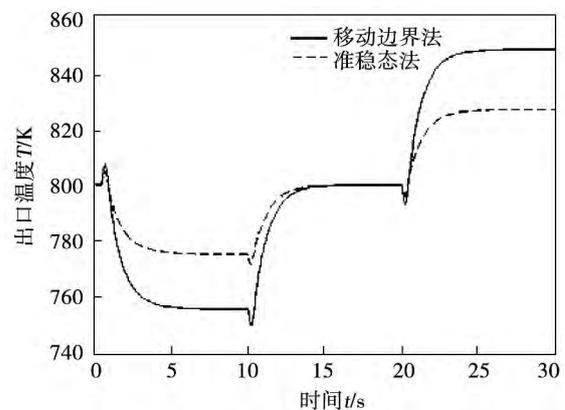


图 4 出口温度

Fig. 4 Outlet temperature

从仿真结果看,移动边界法和准稳态法都可以反应扰动状态下管内的相变转换过程,计算模型体现出了很好的稳定性和鲁棒性。在同样设计点工况

下 采用准稳态法计算得出的蒸发器管长比移动边界法大,因而两种方法计算出的工质出口温度相差较大,而管内压力及各相区长度计算值差别很小。

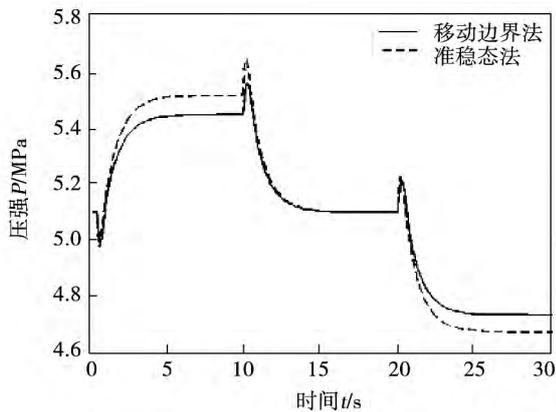


图 5 蒸发器压力

Fig. 5 The pressure of the evaporator

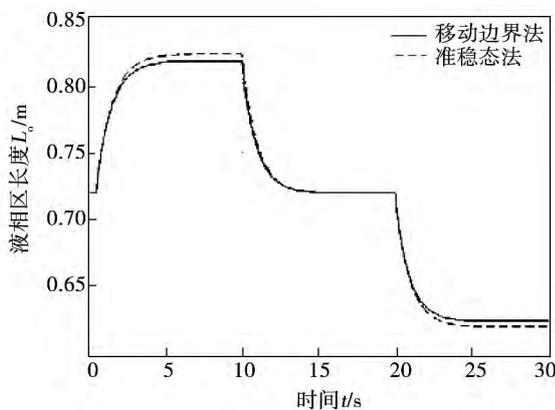


图 6 液相区长度

Fig. 6 The length of the liquid phase region

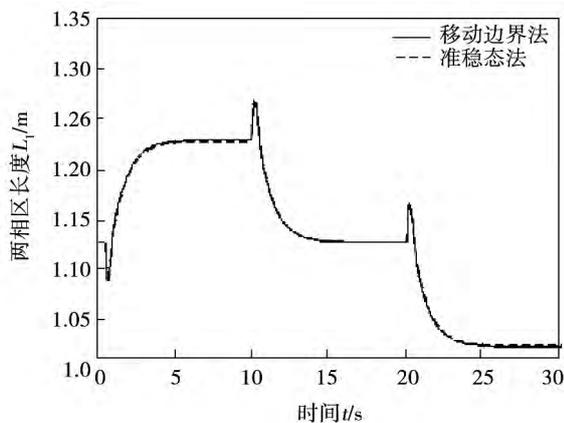


图 7 两相区长度

Fig. 7 The length of the two-phase region

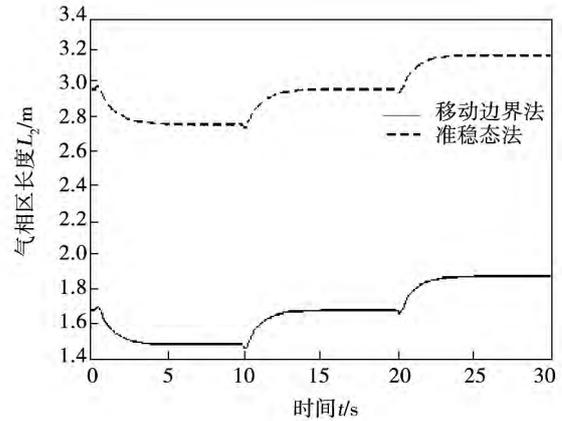


图 8 气相区长度

Fig. 8 The length of the vapor region

两种方法都能反应蒸发器的动态特性,然而两种方法各有优势。移动边界法,采用了完整的质量、能量方程,可以更为准确的反应蒸发器的特性。准稳态法采用的变量更少,计算时间更短,适用于控制器的设计,也适用于系统级的仿真。在外界有大的干扰、出口相态不明确时,采用准稳态法具有更大优势。

### 4 结 论

(1) 移动边界法和准稳态法都能反映相变换热的动态过程,两计算模型都具有良好的稳定性。

(2) 蒸发器存在 3 个相区时,采用移动边界法计算结果更为合理、准确。准稳态法采用更少的移动变量,利于控制器的设计,数值计算更快。

### 参考文献:

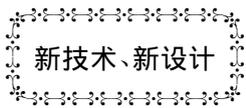
[1] 李海鹏,黄晓津,张良驹.螺旋管式直流蒸汽发生器的集总参数动态模型[J].原子能科学技术,2008(08):729-733.  
 LI Hai-peng, HUANG Xiao-jin, ZHANG Liang-ju. Lumped parameter dynamic model of helical coiled once-through steam generator [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2008(08): 729-733.

[2] 袁媛,彭敏俊,夏庚磊,等.螺旋管式直流蒸汽发生器热工水力分析模型[J].原子能科学技术,2014(S1):251-256.  
 YUAN Yuan, PENG Min-jun, XIA Geng-lei, et al. Thermal-hydraulic model for helical-coil once-through steam generator [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2014(S1): 251-256

[3] Wei D H, Lu X S, Lu Z, et al. Dynamic modeling and simulation of an organic rankine cycle (ORC) system for waste heat recovery [J]. Appl Therm Eng, 2008, 28(10): 1216-1224.

- [4] 魏东红, 鲁雪生, 顾建明, 等. 移动边界模型应用于废热驱动的有机朗肯循环系统的动态仿真 [J]. 上海交通大学学报, 2006 (08): 1394 - 1397.  
WEI Dong-hong, LU Xue-sheng, GU Jian-ming, et al. Moving boundary model application in the dynamic simulation of an organic rankine cycle (ORC) system driven by exhaust [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2006(08): 1394 - 1397.
- [5] Horst T A, Rottengruber H S, Seifert M, et al. Dynamic heat exchanger model for performance prediction and control system design of automotive waste heat recovery systems [J]. Appl Energ, 2013 (105): 293 - 303.
- [6] Rasmussen B P. Dynamic modeling for vapor compression systems—Part I: Literature review [J]. Hvac&R Res, 2012, 18(5): 934 - 955.
- [7] He X, Liu S, Asada H. Modeling of vapor compression cycles for advanced controls in HVAC systems [C]//American Automatic Control Council. Proceedings of the 1995 American Control Conference. Seattle: IEEE, 1995, 3664 - 3668.
- [8] Cecchinato L, Mancini F. An intrinsically mass conservative switched evaporator model adopting the moving-boundary method [J]. Int J Refrig, 2012, 35(2): 349 - 364.
- [9] Tummescheit H. Design and implementation of object-oriented model libraries using modelica [D]. Sweden: Lund Institute of Technology, Department of Automatic Control, 2002.

(丛敏 编辑)



新技术、新设计

## 路德维斯费尔特清洁能源中心投入使用

据《Gas Turbine World》2015年5-6月刊报道,今年2月西门子公司正式开放了它在柏林附近路德维斯费尔特的清洁能源中心,其目的在于进一步改进它的部件试验并证实性能。

新的中心将覆盖整个西门子的燃气轮机系列,包括5 MW和400 MW之间型号。它将在研制新型号和改进现有燃气轮机方面起关键的作用。

花费1亿欧元建成的该能源中心最初工作将集中在燃烧试验上。在燃气轮机内的燃烧过程将在清洁能源中心得到检查和证实,其目的在于提高燃气轮机效率并改进关于使用各种液体和气体燃料的灵活性。

清洁能源中心可以进行各种试验:

- 用于燃烧系统试验、材料试验(例如陶瓷热防护层)的部件试验台以及用于压气机和涡轮的试验台试验。
- 用于非设计工况试验、速度变化、控制参数变化的试验台试验。
- 用于在现场条件下的用户发动机和部件耐久的现场试验。

清洁能源中心也将试验并取得包括3D打印部件和陶瓷热防护层材料的性能。

(吉桂明 摘译)

水下航行器动力系统螺旋管式蒸发器建模及动态仿真 = **Establishment of a Model for a Spirally-coiled Tube Type Evaporator in a Underwater Vehicle Power System and Its Dynamic Simulation** [刊 汉] BAI Jie , DANG Jian-jun , LI Dai-jin ( College of Marine Navigation , Northwest Polytechnical University , Xi'an , China , Post Code: 710072) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016 31( 1) . -27 -31

According to the idea given in the moving boundary method , established was an all-inclusive moving boundary method-based model and a quasi-steady-state model for spirally-coiled tube type evaporators and prepared was an off-design condition dynamic simulation and calculation program. With a stepped change in the water flow rate at the inlet of the evaporator serving as the input condition , a simulation calculation was performed and such dynamic characteristics of the evaporator as the pressure inside the evaporator , outlet temperature and lengths of various phase zones etc. were obtained. The calculation results verified that the calculation methods under discussion are feasible and stable. Among them , the quasi-steady-state method uses fewer variables , thus favorable to the design of controllers and quicker in numerical calculation. When three phase zones are present in the evaporator , to conduct a calculation by using the moving boundary method is more rational and accurate. **Key words:** spirally-coiled tube , evaporator , dynamic simulation

管内加装波形板扰流件强化对流传热的试验研究 = **Experimental Study of the Intensified Convection Heat Transfer in a Tube Additionally Installed with Corrugated Plate Flow Disturbors Inside the Tube** [刊 汉] DING Shao-wei , LI Ju-xiang , ZHANG Su-jun ( College of Energy Sources , Nanjing Polytechnic University , Nanjing , China , Post Code: 211816) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016 31( 1) . -32 -36

By using various test methods , studied were the convective flow heat transfer and resistance characteristics of the flue gases at a high temperature in a tube additionally installed with corrugated plate flow disturbors inside the tube under the condition of the Reynolds number being small and compared were the test results with those obtained in absence of the corrugated plates and calculated by using the empirical formulae respectively. It has been found that after the corrugated plate flow disturbors have been installed inside the tube , the convective flow heat transfer performance of the flue gases at a high temperature can be notably enhanced and with an increase of the Reynolds number , the enhancement effectiveness will become better and better. The convective flow heat transfer enhancement rate of the corrugated plate flow disturbors ranges from 1.6 to 3.5. As per the test results , a correlation formula of the heat quantity transferred and resistance coefficient of the tube installed with corrugated plate flow disturbors inside