

# PSR 波纹板片的热强度分析

刘振宇, 程惠尔

(上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200030)

**摘 要:** 提出一种新型紧凑式回热器——一次表面回热器 (PSR) 的强度设计技术。结合船用 ICR 燃气轮机一次表面回热器研发, 以 3.7 MW 燃气轮机为背景, 根据热弹性力学和传热学理论, 建立 PSR 板片热强度分析物理数学模型, 并对波纹曲线为椭圆、正弦波和抛物线的 3 种常见波纹传热板片所受热应力做了对比计算, 分析了板片厚度, 两侧压差, 本身温度及形状对板片热强度的影响。给出基于 Von Mises 等效应力极值  $\sigma_{vmax}$  的板片最小设计厚度  $\delta_{min}$ , 还研究了波纹板片在典型工况下的弹性变形情况。本文工作对 PSR 的结构设计有重要参考价值。

**关 键 词:** 燃气轮机; 一次表面回热器; 波纹板片; 热应力

中图分类号: TK472 文献标识码: A

## 1 引 言

一次表面回热器 (Primary Surface Recuperator, PSR) 是当今国际上一种最新形式的热交换器, 紧凑、轻重、高效的特点使其非常适用于车辆、舰艇、船舶及各种燃气轮机装置<sup>[1~9]</sup>。PSR 之所以具有高紧凑度的轻质特点, 根本原因是传热元件为厚度  $\delta=0.1\text{ mm}$  左右的金属薄片。也正因为采用如此薄的轻质传热板片, 众多传热板片就成了 PSR 材料失效的唯一薄弱环节。本文结合回热型燃气轮机 PSR 的研发, 简述这种新型回热器的结构特点, 计算椭圆、正弦波和抛物线形 3 种 PSR 传热板片的热强度, 比较分析通道形面和板片厚度等重要因素对芯体板片热强度的影响, 以进一步掌握这种高紧凑度轻质高效热交换器的结构特点。

## 2 PSR 的结构特点和通道形面参数要求

PSR 主要由芯体、进排气连管和结构支撑系统组成。芯体是 PSR 的关键部件, 它由许多依次整齐排列

的波纹板片与四周的边条焊接而成。当高温低压涡轮排气和低温高压空气从众多波纹板片间的小通道中流过时, 波纹板片表面便构成 PSR 的基本传热表面 (一次表面), 实现热量从高温排气经板片到低温空气的转移, 如图 1 所示。

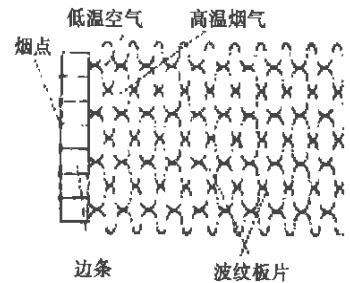


图 1 PSR 芯体的流道截面示意图

板片的波纹曲线及参数见图 2, 可以认为 ABC-DE 构成板片的一个波纹周期, 周期长等于  $2a_1 + 2a_2$ 。描述波纹曲线的几何参数主要有两相邻曲线的短半轴  $a_1, a_2$  和长半轴  $b_1, b_2$ 。通常热通道的  $a_1$  总要稍大于冷通道的  $a_2$ 。从减少流动损失考虑, 要求板片两波纹曲线 ABC 和 CDE 在交点 C 处的斜率保持相等, 以保证两条波纹曲线圆滑过渡, 流动顺畅。为此, 对于椭圆波纹和正弦波纹, 应使  $b_1 = b_2$ , 对于抛物线波纹, 则应有  $b_1/a_1 = b_2/a_2$ 。

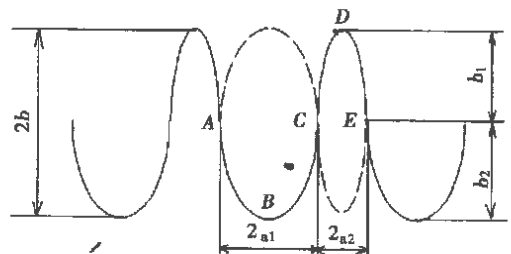


图 2 波纹板片的几何描述

收稿日期: 2004-12-29; 修订日期: 2005-03-01

基金项目: 国家重点基础研究发展规划基金资助项目 (G1999022303); 海军装备部十五预先研究基金资助项目 (401010301)

作者简介: 刘振宇 (1979-), 男, 江苏常熟人, 上海交通大学硕士研究生。

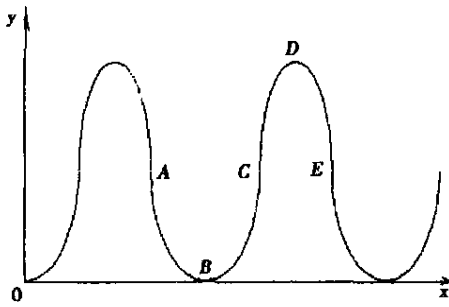
### 3 PSR 芯体板片热强度计算

传热板片由 304 不锈钢带制成, 3 种波纹曲线的基本数据为: 波宽  $2a_1=0.8\text{ mm}$ ,  $2a_2=0.6\text{ mm}$ , 波高  $2b=1.3\text{ mm}$ , 冷热两侧换热系数如表 1 所示, 详见文献 [6]。

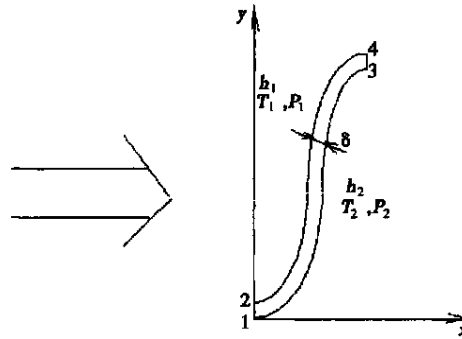
表 1 不同通道形面下 PSR 的换热系数

换热系数 $h/\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{C}^{-1}$	PSR 通道形面		
	椭圆波纹	正弦波纹	抛物线波纹
$h_1, h_2$	234.5/281.6	247.1/284.2	244.5/283.6

注: 表中下标 1 代表烟气侧参数, 下标 2 代表空气侧参数。



(a) 波纹板片的走向



(b) 波纹板片的热边界特点

图 3 板片热强度计算模型

#### 3.1 板片温度场计算

变物性二维稳态导热方程为:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\lambda \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\lambda \frac{\partial T}{\partial y}) = 0 \quad (1)$$

热边界条件:

板片边界 12, 边界 34 为绝热边界条件,  $(\partial T / \partial n)_w = 0$ , 式中:  $w$ —板片边界位置。板片边界 13, 边界 24 为第三类边界条件,  $n\lambda(\partial T / \partial n)_w = h(T_w - T_f)$ , 式中:  $n$ —边界单位法向量;  $T_f$ —板片两侧的流体温度。对 13 侧(冷侧)取空气进口温度  $T_2 = 175\text{ }^\circ\text{C}$ , 24 侧(热侧)取烟气进口温度  $T_1$ (可变), 304 不锈钢板片导热系数取  $\lambda = 14.875 + 0.01325T_m$  ( $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ )( $T_m$  为板片平均温度), 以及  $h$  为空气或烟气换热系数(见表 1)。

利用 Matlab 传热计算工具箱, 设定导热方程和各项系数, 确定 13, 24 曲线边界时, 曲线由首尾连接的短直线段近似得到, 曲线边界的单位法向量  $n$  取各短直线段的单位法向量。三角形计算网格由

计算假定: (1) 由于板片通道轴向长度远大于板片厚度, 故板片导热和应力应变计算都可处理成平面问题; (2) 假定板片导热系数为温度的一次函数; (3) 计算时, 板片两侧温差和压差取最大值, 忽略其轴向差别; 板片两侧换热系数保持常数, 不随流动方向变化; (4) 相邻板片在波峰波谷位置(图 3 中的 B 点和 D 点)紧密接触, 视为固定约束点。显然对于波纹状薄板, 只需取其半个周期作为计算对象。假定传热板片 13 侧走低温高压空气, 24 侧走高温低压烟气, 12 和 34 为固定绝热边界, 如图 3 所示。

工具箱的 Mesh 功能自动生成, 网格可自动加密和优化。方程由工具箱提供的 Assemple 求解器求解, 得到板片的温度场分布。

#### 3.2 板片热应力计算

热弹性基本方程:

在平面热应变情况下, 应变  $\epsilon_{yz} = \epsilon_{zx} = \epsilon_{zy} = 0$ 。

应力—应变方程可以简化成:

$$\sigma_z = \mu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) - \alpha ET \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \epsilon_{xx} &= \frac{1}{E_e}[\sigma_{xx} - \mu_e \sigma_{yy}] + \alpha_e T, \quad \epsilon_{yy} \\ &= \frac{1}{E_e}[\sigma_{yy} - \mu_e \sigma_{xx}] + \alpha_e T, \quad \epsilon_{xy} = \frac{\sigma_{xy}}{G} \end{aligned} \quad (3)$$

其中: 杨氏模量可取  $E = 190 \times 10^3 \text{ MN/m}^2$ , 热膨胀系数  $\alpha = 18 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ , 以及泊松比  $\mu = 0.3$ , 方程各项系数表达式  $E_e = \frac{E}{1 - \mu^2}$ ,  $\mu_e = \frac{\mu}{1 - \mu}$ ,  $G = \frac{E}{2(1 + \mu)}$ ,  $\alpha_e = (1 + \mu)\alpha$ 。

力的平衡方程:

$$\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial y} = 0, \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

几何方程:

$$\epsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x}, \epsilon_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y}, \epsilon_{xy} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (5)$$

式中:  $\sigma$ 、 $\epsilon$ —各相应方向上(由两个下角标表示)的应力和应变;  $u$ 、 $v$ —节点在  $x$  和  $y$  方向上的位移。强度计算的边界条件为: 边界 12, 34 为固定边界条件, 位移  $\Delta=0$ , 冷侧边界 13 面取压缩空气载荷压强  $P_2 = \pi P_0$  ( $\pi$  为压比, 可变;  $P_0$  为当地大气压), 热侧边界 24 面取烟气载荷压强  $P_1 = 0.1$  MPa, 因此冷热侧压差  $\Delta P = P_2 - P_1 = P_2 - 0.1$  MPa。

利用 Matlab 偏微分方程工具箱 (PDE Toolbox), 设定平衡方程和应力—应变关系方程, 确定边界条件, 13, 24 曲线边界处理与温度场计算相同。采用有限元法进行计算, 三角形计算网格由工具箱的 Mesh 功能自动生成, 网格可自动加密和优化, 方程由工具箱提供的 Assempde 求解器求解, 求得各节点位移  $\Delta$ , 应变  $\epsilon$  和应力  $\sigma$ , 平面热应变第一主应力  $\sigma_1 = \frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy}}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}}{2}\right)^2 + \sigma_{xy}^2}$ , 第二主应力  $\sigma_2 = \frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy}}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}}{2}\right)^2 + \sigma_{xy}^2}$ ; 平面热应变情况下的 von Mises 等效应力

$$\sigma_v = \sqrt{(\sigma_1^2 + \sigma_2^2)(\mu^2 - \mu + 1) - \sigma_1 \sigma_2 (2\mu^2 - 2\mu - 1)}$$

### 4 计算结果与分析

图 4 给出烟气进口温度  $T_1 = 700$  °C, 空气进口温度  $T_2 = 175$  °C 时正弦板片的等温线分布, 可以看出小波波峰  $D$  点温度最高(约为 435 °C), 大波波谷  $B$  点温度最低(约 430 °C), 两者相差 5 °C 左右, 整个板片平均温度  $T_m \approx (T_1 + T_2) / 2$ , 板片厚度方向温差不到 1 °C。应力集中发生在波纹板片的  $D$  点和  $B$  点,  $B$  点 von Mises 等效应力极值  $\sigma_{vmax}$  约为  $D$  点的 80%~85%。  $C$  处所受应力为  $D$  点的 50% 左右, 各点位置见图 3。

图 5 为 304 不锈钢拉伸强度曲线,  $\sigma_b$  为抗拉强度极限,  $\sigma_s$  为屈服极限。根据常用强度理论适用范围, 采用 von Mises 等效应力极值  $\sigma_{vmax}$  作为考虑板片强度的主要标准, 如板片所受 von Mises 等效应力极值  $\sigma_{vmax}$  不能满足形状改变比能理论判别式  $\sigma_{vmax} \leq \sigma_s / n$ ,  $n$  为安全系数(本文取  $n = 1.5$ ), 认为板片将

发生屈服破坏。

图 6 给出 3 种形面波纹板片在典型工况下 ( $\Delta P = 0.9$  MPa,  $T_m = 400$  °C)  $D$  点所受应力比较, 结果表明正弦波纹板片所受应力最小, 抛物线波纹所受应力最大, 但彼此相差不是很大, 仅为 10%~20%。

由图 7 给出正弦波纹板片的等效应力极值  $\sigma_{vmax}$  曲线, 厚度  $\delta = 0.1$  mm 的板片在  $T_m = 450$  °C,  $\Delta P = 0.8$  MPa 典型工况下,  $\sigma_{vmax} = 90$

MPa,  $\sigma_s = 150$  MPa, 满足形状改变比能理论判别式(安全系数  $n = 1.5$ ), 有比较好的可靠性。

图 8 按形状改变比能理论判别式给出 304 不锈钢正弦板片在不同平均温度、压差条件下所允许的最小厚度  $\delta_{min}$ , 计算时可取安全系数  $n = 1.5$ 。目前,

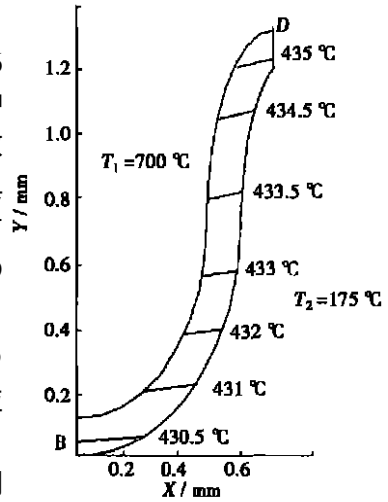


图 4 板片温度分布

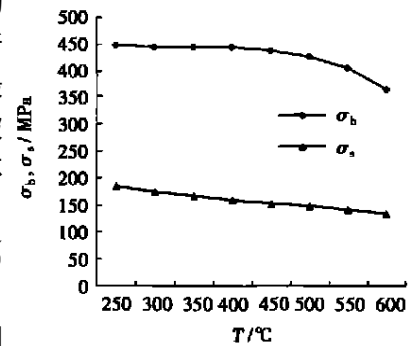


图 5 304 不锈钢板片拉伸强度曲线

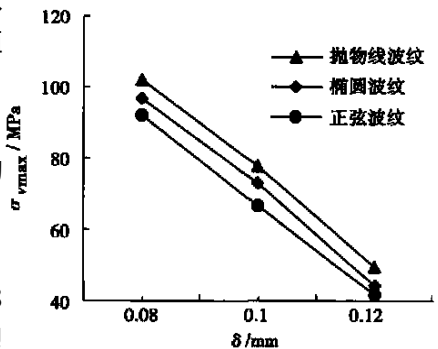


图 6 3 种波纹板片受力比较

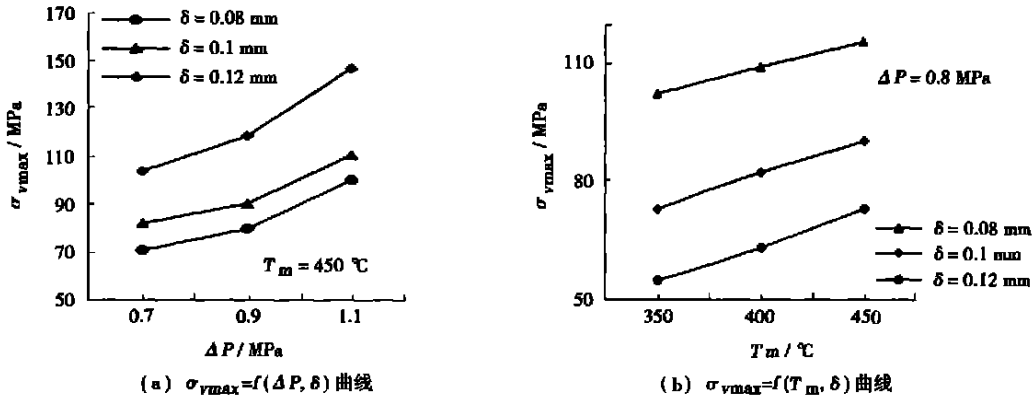


图 7 正弦波纹板片受力比较

国外 PSR 板片材料采用 347 不锈钢, 计算表明, 根据 347 不锈钢的机械性能, 其允许的板片最小厚度近似等于 304 不锈钢允许厚度乘系数 0.85。

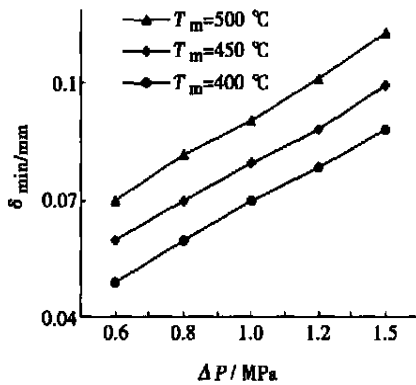


图 8 正弦波纹板片的最小设计厚度

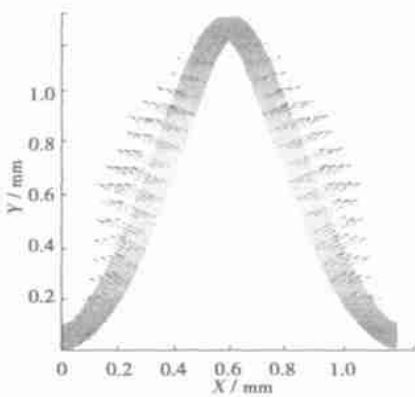


图 9 波纹板片弹性变形示意图

图 9 为板片受压发生变形示意图, 计算结果表明, 在  $T_m = 450^\circ\text{C}$ ,

$\Delta P = 0.8 \text{ MPa}$  典型工况条件下, 板片变形最大位移(在板片中间部位)仅为板片厚度的 1% 左右, 因此板片受压变形对通道截面积的影响可以忽略不计。

5 结论

(1) 传热板片平均温度  $T_m$  近似等于冷热两侧流体温度的算术平均值, 板片冷热两侧温差不到  $1^\circ\text{C}$ 。

(2) 相比较而言, 3 种波纹形面中, 正弦波纹板片最能耐压, 椭圆次之, 抛物线型最差, 但三者  $\sigma_{vmax}$  差别不大, 变化范围仅在 10% ~ 20%, von Mises 等效应力最大值位于相邻波纹传热板片的峰、谷接触位置。

(3) 波纹板片工作时会发生微小变形, 但对冷热通道形面尺寸的实际影响可以忽略不计。

(4) 图 8 给出两种常用材料的板片在典型工况下的最小允许厚度, 计算表明, 厚度为 0.1 mm 的 304 不锈钢波纹板片足以承受现有燃气轮机回热器的工作压力。

参考文献:

- [1] 闻雪友. WR-21—新一代的船用燃气轮机[J]. 热能动力工程, 1999, 14(1): 1—6.
- [2] WARD M E, HOLMAN L. Primary surface recuperator for high performance prime movers[J]. SAE Technical Paper Series, 1992(2): .24—28.
- [3] MCDONALD C F. Low cost compact primary surface recuperator concept for microturbines[J]. Applied Thermal Engineering, 2000, 20(5): 471—497.
- [4] MCDONALD C F. Recuperator considerations for future higher efficiency microturbines[J]. Applied Thermal Engineering 2003, 23: 1463—1487.
- [5] MAZIASZ PHILIP J, PINTI BRUCE A. Advanced alloys for high temperature recuperators[R]. Tennessee: National Laboratory, 2002.
- [6] 程惠尔, 杨 静. 三种通道形面下 PSR 热性能的比较分析[J]. 燃气轮机技术, 2003, 16(1): 57—60.
- [7] 叶秀汉. 动力机械热应力理论和应用[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1987.

用于高温气冷堆发电设备的闭式循环氦气轮机装置 = **A Closed Cycle Helium Gas Turbine Plant Used for a High-temperature Gas Cooled Reactor-based Electric Power Generation Unit** [刊, 汉] / WANG Hui (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036), WANG Chong (Heilongjiang University, Harbin, China, Post Code: 150080) // *Journal of Engineering for Thermal Energy & Power*. — 2005, 20(4). — 337 ~ 341

A brief account is given of the helium gas turbine plant installed in a HTGR-GT electric power generation unit. After a description of its cycle, working medium and key factors having an impact on its cycle efficiency analyzed are the current and near-term parameters of the HTGR-GT power generation unit-based Brayton cycle system. Regarding the helium gas turbine plant the design and construction features of its major components are discussed. They include the turbine, air compressor, heat exchangers, rotors, bearings and hot helium gas piping, etc. Materials used for the helium gas turbine are also briefly described. In conclusion, two key technical issues demanding close attention during the development of HTGR-GT power generation equipment are pointed out. They are: 1. the development of safe and reliable magnetic bearings to be used for a large-sized unit, 2. the elimination of radioactive pollution to ensure a safe operation and the realization of effective maintenance. **Key words:** power generation unit, helium gas turbine, heat exchanger, material, design

PSR 波纹板片的热强度分析 = **Thermal Strength Analysis of the Corrugated Plates of Primary Surface Recuperators (PSR)** [刊, 汉] / LIU Zhen-yu, CHEN Hui-er (Mechanical & Power Engineering Institute under the Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200030) // *Journal of Engineering for Thermal Energy & Power*. — 2005, 20(4). — 342 ~ 345

Proposed is the strength design technology for an innovative compact recuperator, the so-called primary surface recuperator (PSR). In conjunction with the development of a PSR for an intercooled recuperator-based marine gas turbine with a 3.7 MW gas turbine serving as a background unit a physico-mathematical model is set up for analyzing the thermal strength of PSR plates on the basis of thermo-elastic mechanics and heat transfer theory. A contrast calculation was conducted for the thermal stresses being subjected to by three kinds of commonly seen corrugated heat-transfer plates. They feature elliptical, sine wave and parabola curves. An analysis is performed of the impact of plate thickness, pressure difference at two sides, plate temperature and shape on the thermal strength of the plates. The minimum design thickness of the plate based on von Mises equipotent stress limiting value is presented along with a study of the elastic deformation situation under the typical operating condition of the corrugated plates. The work conducted by the authors is of major reference value for the construction design of PSR. **Key words:** primary surface recuperator, corrugated plate, thermal stress

PG6581B 燃气轮机构成燃煤联合循环系统的性能分析 = **Performance Analysis of a PG6581B Gas Turbine-based Coal-fired Combined Cycle System** [刊, 汉] / WANG Li-wei, XU Xiang-dong (Key Laboratory of Electrical Power System & Power Generation Equipment Control and Simulation of the Thermal Energy Engineering Department under Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // *Journal of Engineering for Thermal Energy & Power*. — 2005, 20(4). — 346 ~ 349

The construction and features of a PG6581B gas turbine-based coke-carrying thermal partial-gasification coal-fired combined cycle system are described along with a calculation and analysis of the performance of the PG6581B gas turbine when firing coal gas of medium and low calorific value. The results of the calculation indicate that the output power and efficiency of the PG6581B will somewhat be reduced when firing the above-mentioned coal gas, but the reduction is within an acceptable range. A further analysis has revealed that by lowering the content of non-combustible constituents in coal gas, such as CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub> and by increasing the H<sub>2</sub> content in the combustibles it is possible to enhance gas turbine performance. A preliminary calculation of the combined cycle system shows that the thermal efficiency of the PG6581B gas turbine-based coke-carrying thermal partial-gasification coal-fired combined cycle system can exceed 42%. **Key words:** coal-fired combined cycle, coke-carrying thermal partial-gasification, PG6581B, performance analysis

逆流喷雾式饱和器内湿化过程的实现研究 = **Experimental Study of a Humidifying Process in a Counter-flow Spray Saturator** [刊, 汉] / WANG Yu-zhang, LI Yi-xing, WENG Shi-lie, et al (Education Ministry Key Laboratory for