

# 微型燃气轮机 CW 原表面回热器芯体内传热及阻力特性分析

桂小红<sup>1</sup> 闫润生<sup>2</sup> 程言君<sup>2</sup> 梁世强<sup>1</sup>

(1. 中国科学院工程热物理研究所, 北京 100190; 2. 轻工业环境保护研究所, 北京 100089)

**摘 要:** 建立微型燃气轮机 CW(交叉波浪型, Cross Wavy) 原表面回热器三维周期性充分发展数值计算模型, 对芯体内传热和阻力特性进行了分析, 确定了质量流量和温度水平对传热量及压降的影响, 给出了 CW 原表面芯体板内阻力、传热因子以及努塞尔数与雷诺数之间的经验关联式。传热及阻力性能分析结果表明: 随着雷诺数的增大, 回热器芯体单元传热系数增大, 传热量逐渐增加, 并且随着低压高温烟气侧的进口温度升高, 传热量增加幅度增大; 回热器芯体单元回热率随雷诺数的增大而减小, 随燃气进口温度升高而减小。

**关 键 词:** 微型燃气轮机; CW 原表面回热器; 传热; 阻力; 周期性充分发展

中图分类号: TK473 文献标识码: A

## 引 言

燃气轮机分布式发电装置简便、机动灵活, 不仅可做为不同档次的电源, 而且还是很好的应急发电设备。通过燃气余热利用, 还可进一步提高燃料综合利用率<sup>[1]</sup>。微型燃气轮机的出现, 为避免统一电网的故障及损失, 适应当今电力工业深化变革的需要, 为办公分散化、生产规模小型化提供了安全可靠的动力和能源, 有人称它为 21 世纪的动力幻想, 市场前景广阔。

微型燃气轮机主要由离心压气机、向心透平、燃烧室、回热器等组成。为了使微型燃气轮机效率达到 30%, 采用回热循环是关键所在。CW 形原表面回热器板片的波纹结构直接影响着板式换热器的流动和传热特性<sup>[2]</sup>。板片之间的流体流动通道是一个复杂的三维流动结构。芯体是回热器的核心部分, 对芯体的 CFD 数值模拟可深入了解芯体整体的流动与传热特性, 其结果可为整个芯体的传热效果和流动阻力确定提供参考, 也是空气流道模拟、燃气流

道优化设计的依据。

## 1 CW 原表面回热器芯体内三维流动和传热数值模拟

### 1.1 几何模型

CW 原表面回热器的芯体结构如图 1 所示, 此结构由芯体板横截面方向和流动方向波纹尺寸来确定, 图 2 所示为回热器的一个流动单元<sup>[3]</sup>, 分别是由上、下两个反对称映射面通过正弦曲线拉伸获得, 图 3 所示为空气进口、燃气出口截面示意图, 横截面上波纹曲线周期为  $P$ , 高度为  $H$ , 流动方向上的波纹曲线周期为  $L$ , 高度为  $A$ , 空气通道半径  $R_1$ , 燃气通道半径  $R_2$ , 固体波纹板厚度  $S$ 。其中  $S=0.1\text{ mm}$ ,  $P=1.6\text{ mm}$ ,  $H=3.6\text{ mm}$ ,  $R_1=0.35\text{ mm}$ ,  $R_2=0.55\text{ mm}$ ,  $L=9.6\text{ mm}$ ,  $A=1.1\text{ mm}$ 。

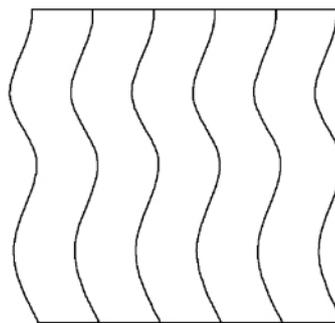


图 1 CW 原表面

Fig. 1 CW original surface

### 1.2 计算物理模型和边界条件

一个周期内, 不同尺寸的映射面和拉伸曲线, 导致上、下两个实体在叠加时, 可以形成 4 种不同的通

收稿日期: 2010-09-07; 修订日期: 2010-09-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50976118)

作者简介: 桂小红(1976-), 男, 安徽安庆人, 中国科学院工程热物理研究所助理研究员、博士。

道形式。图 4 为压缩空气芯体单元计算物理模型, 图 5 为燃气芯体单元计算物理模型。

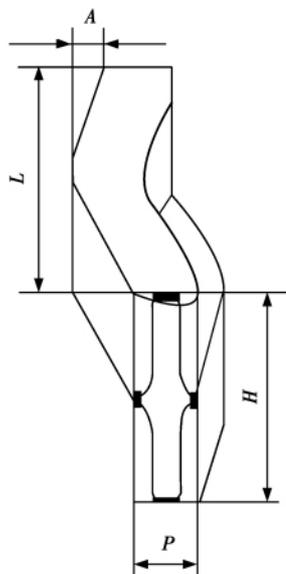


图 2 一个流动单元  
Fig. 2 A flow unit

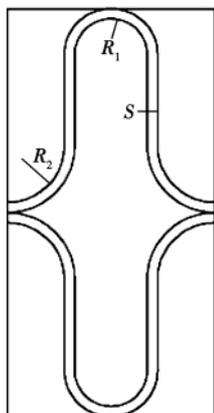


图 3 空气进口与燃气出口截面  
Fig. 3 An air inlet and gas outlet section

为模拟芯体单元内充分发展的流动情况,对单元体采用周期性边界条件进行模拟。空气进口(Air\_inlet)和出口(Air\_outlet)设置为周期边界(Periodic),燃气进口(Gas\_inlet)和出口(Gas\_outlet)设置为周期边界(Periodic),具体设置质量流量、压力梯度及来流温度;上、下表面采用固定壁面边界条件;空气、燃气与壁面进行对流换热<sup>[4]</sup>,壁面材料为不锈钢(0Cr17Ni12Mo2);其他边界设置为对称边界。

### 1.3 数学模型

采用三维稳态变物性数值模拟方法,分析空气

和燃气通道内的流动及传热特性。其流动和传热控制方程通用式为<sup>[5]</sup>:

$$\nabla \cdot (\rho \vec{V}\phi) = \nabla \cdot (\Gamma_\phi \nabla \phi) + S_\phi \quad (1)$$

连续性方程:  $\phi = 1, \Gamma_\phi = 0, S_\phi = 0$ ;

动量方程:  $\phi$  分别为  $u, \nu, w, \Gamma_\phi = \mu, S_\phi = -\partial P / \partial x, S_\nu = -\partial P / \partial y, S_w = -\partial P / \partial z$ ;

能量方程:  $\phi = T, \Gamma_\phi = \mu / Pr, S_\phi = 0$ 。

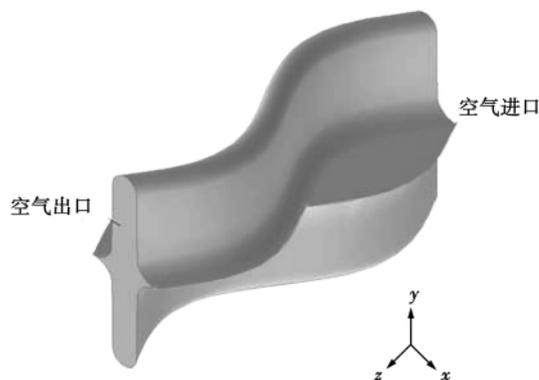


图 4 压缩空气芯体单元计算物理模型  
Fig. 4 Physical model for calculating a compressed air core unit

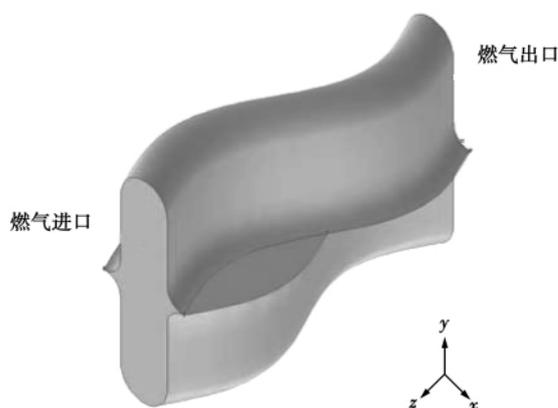


图 5 燃气芯体单元计算物理模型  
Fig. 5 Physical model for calculating a fuel gas core unit

### 1.4 求解方法

采用有限控制容积法对上述控制方程进行离散差分,将上述复杂的偏微分方程转化成代数方程组,使用分离求解器对方程进行求解,采用 SIMPLE(基于压力耦合的半稳式算法, Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) 算法对压力和速度进行

耦合计算 动量和能量方程均采用一阶迎风差分格式进行计算。

### 2 计算数据整理方法

将得到的计算数据按如下方法进行整理<sup>[6]</sup> 得:

$$\varepsilon = (T_x - T_2) / (T_1 - T_2) \tag{2}$$

式中:  $\varepsilon$ —回热度;  $T_x$ —压缩空气出口温度, K;  $T_2$ —压缩空气入口温度, K;  $T_1$ —燃气入口温度, K。

$$Nu = \sigma d_e / \lambda \tag{3}$$

式中:  $Nu$ —努塞尔数;

$\sigma$ —表面传热系数,  $W / (m^2 \cdot K)$ ;

$d_e$ —水力直径, m;

$\lambda$ —介质的导热系数,  $W / (m \cdot K)$ 。

$$j = Nu / Re Pr^{1/3} \tag{4}$$

式中:  $j$ —传热因子;  $Re$ —雷诺数;  $Pr$ —普朗特数。

### 3 计算结果及分析

本研究进行了两个方面的分析:

(1) 采用等流量法,即 CW 原表面回热器芯体板两侧的质量流量不变,通过改变低压高温烟气侧进口温度和高压低温空气侧进口温度,让其温度在 260 ~ 800 °C 范围内变化,分析其对传热负荷的影响;

(2) 固定两侧温度,让雷诺数  $Re$  在 300 ~ 500 范围内变化,分析其对传热量的影响。

#### 3.1 CW 原表面回热器芯体内传热特性分析

图 6 为一个周期内芯体单元传热量与雷诺数的关系。从图中可以看出:随着雷诺数的增大,芯体单元内压缩空气与高温烟气侧的传热量随之增加,这是由于通道内流量增加,导致流速增大,表面换热系数随之增大,从而强化了传热;随着烟气侧进口温度的升高,传热量增幅随之增大,这是由于随着进口温度的升高,气体的定性温度也升高,由理想气体方程可知,气体密度减小,要维持设定的气流量,必须增大管内流速,从而达到强化传热的目的。

通过对计算数据进行整理,并利用最小二乘法进行拟合,可得到两侧表面传热系数的无量纲准则关系式。

低压高温烟气侧:

$$Nu = 0.0494 Re^{0.68} Pr^{1/3} \tag{5}$$

高压低温空气侧:

$$Nu = 0.0584 Re^{0.486} Pr^{1/3} \tag{6}$$

以上计算式的适用范围为  $Re = 300 \sim 500$ , 温度在 260 ~ 800 °C 内变化,拟合误差分别为 4.3% 和 4.8%。

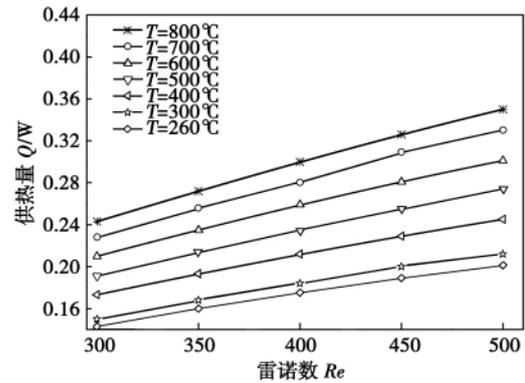


图 6 传热量随雷诺数变化

Fig. 6 Change of heat transfer quantity with Reynolds number

图 7 为文献 [7] 中通过实验研究所得平均努塞尔数随雷诺数变化,其平均  $Nu$  数随  $Re$  数增加而增大,其总结的平均  $Nu$  数与  $Re$  数的拟合关联式为:

$$Nu = 0.0815 Re^{0.62803} \tag{7}$$

将式(7)同式(5)、式(6)进行比较后可以发现,所分析的烟气侧和空气侧努塞尔数与雷诺数之间关联式,并考虑了普朗特数即温度因素的影响,所得关联式更加合理。式(5)、式(6)中的努塞尔数  $Nu$  均随雷诺数  $Re$  增大而增大,这与图 7 所示平均努塞尔数与雷诺数之间的变化趋势保持一致。

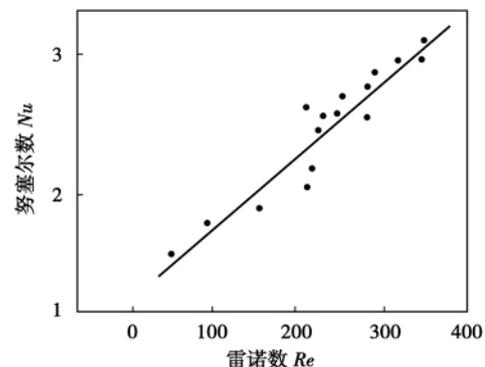


图 7 平均努塞尔数随雷诺数变化<sup>[7]</sup>

Fig. 7 Change of the practical mean Nusselt number with Reynolds number

图 8 为一个周期内芯体单元回热度与雷诺数的关系,从中可以看出:随着雷诺数的增大,回热度减

小; 随着燃气进口温度升高, 回热度也随之减小。

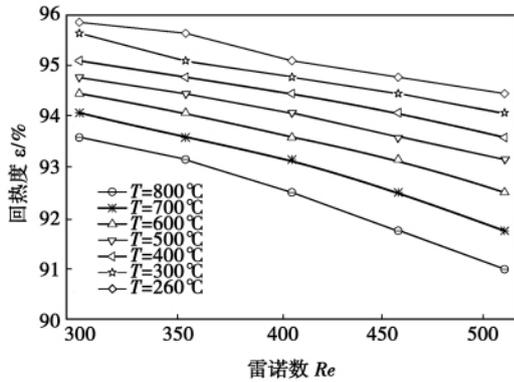


图 8 回热度随雷诺数变化

Fig. 8 Change of the recuperative degree with Reynolds number

### 3.2 CW 原表面回热器芯体内阻力特性分析

对于微燃气轮机 CW 原表面回热器而言, 压降也是一个重要的性能指标。

图 9、图 10 分别为一个周期内芯体单元烟气、空气侧压降与雷诺数的关系, 从中可以看出: 随着雷诺数的增大, 芯体单元内高温烟气与压缩空气侧的压降随之增加, 这是由于通道内流量增加, 导致流速增大, 表面换热系数随之增大, 从而强化了传热; 随着烟气侧进口温度的升高, 传热量增幅随之增大, 给出了在计算设定流量范围内(温度在 260 ~ 800 °C, 雷诺数为 300 ~ 500) 烟气与空气两侧压降随雷诺数的变化情况。

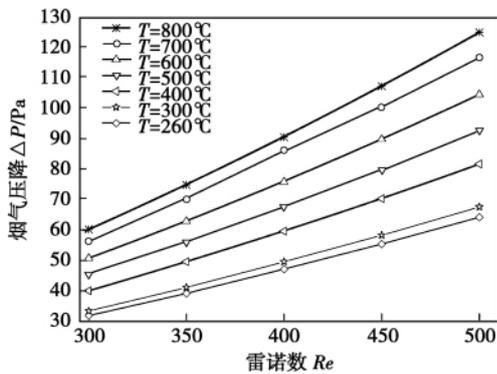


图 9 烟气侧压降随雷诺数变化

Fig. 9 Change of the pressure drop at the flue gas side with Reynolds number

通过对计算数据进行整理, 并利用最小二乘法进行拟合, 可得到高压低温空气侧阻力与雷诺数及

普朗特数的关系式为:

$$\Delta P = 0.02Re^{1.43}Pr^{1/3} \tag{8}$$

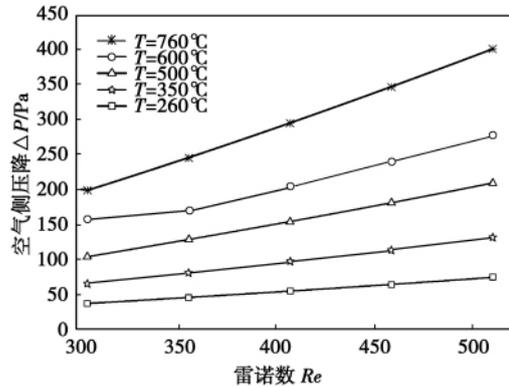


图 10 空气侧压降随雷诺数变化

Fig. 10 Change of the recuperative degree with Reynolds number

低压高温烟气侧阻力与雷诺数及普朗特数的关系式为:

$$\Delta P = 0.011Re^{1.5}Pr^{1/3} \tag{9}$$

以上计算式的适用范围为  $Re = 300 \sim 500$ , 温度在  $260 \sim 800^\circ\text{C}$  内变化, 拟合误差分别为 4.2% 和 3.3%。

低压高温烟气侧平均  $j$  因子计算式为:

$$j = 0.166Re^{-0.56} \tag{10}$$

高压低温空气侧平均  $j$  因子计算式为:

$$j = 0.015Re^{-0.11} \tag{11}$$

## 4 结 论

通过建立微型燃气轮机 CW 原表面回热器芯体单元三维周期性充分发展数值计算模型, 对其传热和阻力特性进行数值模拟, 可以得到以下结论:

(1) 归纳出 CW 原表面回热器芯体单元内阻力与雷诺数之间, 传热因子与雷诺数之间, 以及努塞尔数与雷诺数之间的经验关联式, 如式 (5) 和式 (6), 式 (8) 和式 (9)。

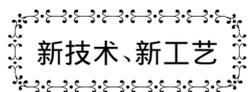
(2) 随着雷诺数的增大, 回热器芯体单元传热系数增大, 传热量逐渐增加, 并且随着低压高温烟气侧的进口温度升高, 传热量增加幅度增大。

(3) 回热器芯体单元回热度随雷诺数的增大而减小, 随燃气进口温度升高而减小。

参考文献:

[1] 张昊志, 李 政. 正在兴起的微透平技术[J]. 动力工程, 2001,

- 21(6):1532-1538.  
ZHANG Hao-zhi, Zheng Li etc. Rising Microturbine Technology [J]. Power Engineering 2001 21(6):1532-1538
- [2] UTRIAINEN E, SUNDÉN B. A numerical investigation of primary surface rounded cross wavy ducts [J]. Heat and Mass Transfer, 2002 38(7-8):537-542.
- [3] 梁红侠, 王秋旺. 原表面通道流动与换热数值模拟 [C]//中国工程热物理学会传热传质学术会议论文集, 吉林: 中国工程热物理学会 2004:782-785.  
LIANG Hong-xia, WANG Qiu-wang. Numerical simulation of the flow and heat transfer in the primary surface passages [C]//Proceedings of a Heat and Mass Transfer Symposium of the Chinese Society of Engineering Thermophysics. Jilin: Chinese Society of Engineering Thermophysics 2004, 782-785.
- [4] 杨世铭, 陶文铨. 传热学(第三版) [M]. 北京: 高等教育出版社, 1998.  
YANG Shi-ming, TAO Wen-quan. Heat transfer(Third Edition) [M]. Beijing: Higher Education Press, 1998.
- [5] 陶文铨. 数值传热学(第二版) [M]. 西安: 西安交通大学出版社 2001.  
TAO Wen-quan. Numerical Heat transfer(Second Edition) [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press 2001.
- [6] 徐之平, 张磊. 微型燃气轮机圆筒原表面回热器的性能试验研究 [J]. 动力工程 2009 29(6):540-544.  
XU Zhi-ping, ZHANG Lei. Experimental study of the performance of a cylindrical primary surface recuperator in a micro gas-turbine [J]. Power Engineering 2009 29(6):540-544.
- [7] 梁红侠, 杜林秀. 原表面回热器换热阻力特性试验研究 [J]. 工程热物理学报 2009 30(12):2110-2112.  
LIANG Hong-xia, DU Lin-xiu. Experimental study of heat exchange resistance characteristics of a primary surface recuperator [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2009, 30(12):2110-2112.



## 带有汽轮机驱动压气机的蒸燃联合装置

据《Тяжёлое машиностроение》2010年12月刊报道,俄罗斯“莫斯科动力学院”的学者深入研究了过渡到带有汽轮机驱动压气机的 ПГУ(蒸燃联合装置)的热力学基础理论。

分析了其压气机由汽轮机部分和全部驱动的 ПГУ 的工作性能。研究了在余热锅炉后具有蒸汽补充过热的 ПГУ 的工作特点。

分析研究的结论如下:

(1) 在使 ПГУ 的效率保持在标准 ПГУ 水平时,取决于所采用燃气轮机装置的类型,应用汽轮机驱动压气机可使 ПГУ 的输出功率增加 10%~20%。

(2) 转换到汽轮机驱动压气机可以实现高转速汽轮机,从而减小汽轮机的外形尺寸,并降低汽轮机的部分造价。

(3) 在 ПГУ 上应用氢气加热蒸汽,使其过热,在蒸汽过热到 800℃ 的情况下,可以使 ПГУ 的效率提高 2%,并使其输出功率增加 17%~18%。

(4) 蒸汽过热所需的蒸汽耗量不超过 1 kg/s。

(吉桂明 摘译)

Chinese Academy of Sciences , Beijing , China , Post Code: 100190) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2010 26( 5) . - 513 ~ 517

By using a numerical simulation method , studied was the influence of the hole-row spacing on the air-film cooling characteristics of a dual jet flow with a composite angle at different air ratios. It has been found that the reverse kidney shaped vortex formed by a relatively small hole-row spacing is of a upper and lower structure and unsymmetrical and the improvement of the air-film cooling effectiveness is limited while a relatively large hole-row spacing is favorable for forming a right and left symmetrical reverse kidney shaped vortex , capable of forming a large area cooling air coverage along the chord direction at the lower reaches and meanwhile making the jet flow attached to the wall surfaces better , thus greatly enhancing the cooling efficiency. Such a structure was applied in the stator blades of a heavy-load gas turbine and a good cooling effectiveness was achieved. **Key words:** air-film cooling , dual jet flow , hole-row spacing , reverse-kidney-shaped vortex

微型燃气轮机 CW 原表面回热器芯体内传热及阻力特性分析 = **Analysis of the Heat Transfer and Flow Resistance Characteristics Inside the Core Body of a Cross Wavy Primary Surface Recuperator in a Micro Gas Turbine** [刊 汉] / GUI Xiao-hong , LIANG Shi-qiang ( Engineering Thermophysics Research Institute , Chinese Academy of Sciences , Beijing , China , Post Code: 100190) , YAN Run-sheng , CHENG Yan-jun ( Light Industry Environmental Protection Research Institute , Beijing , China , Post Code: 100089) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2011 , 26( 5) . - 518 ~ 522

With a 3-D periodically fully developed numerical calculation model for a cross wavy ( CW) primary surface recuperator in a micro gas turbine being established , analyzed were the heat transfer and flow resistance characteristics inside the core body. Moreover , the influence of the mass flow rate and temperature on the heat quantity exchanged and the pressure drop was determined and the empirical correlation formula among the in-plate flow resistance , heat transfer factors , Nusselt number and Reynolds number of the CW primary surface recuperator was given. The heat transfer and flow resistance performance analytic results show that with an increase of the Reynolds number , the heat transfer coefficient of the recuperator core unit will increase and the heat transfer quantity will gradually increase. With a rise of the temperature at the inlet of the LP high temperature flue gas side , the extent of the increase in heat transfer quantity will grow. The recuperative degree of the recuperator core unit will decrease with an increase of the Reynolds number and the temperature of the gas at the inlet. **Key words:** Micro gas turbine , CW ( cross wavy) primary surface recuperator , heat transfer , flow resistance , periodically full development

燃气机热泵部分负荷特性的实验研究 = **Experimental Study of the Partial Load Characteristics of a Gas-engine-driven Heat Pump** [刊 汉] / LIU Huan-wei , YANG Zhao , WANG Ming-tao ( Thermal Energy Research Institute , Tianjin University , Tianjin , China , Post Code: 300072) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2011 , 26( 5) . - 523 ~ 527