

文章编号: 1000 8055(2008)01 0138-07

几种紧凑回热面传热和流动的实验 和数值研究

彭 浩, 孙志江, 凌 祥

(南京工业大学 机械与动力工程学院, 南京 210009)

摘 要: 运用计算流体力学方法, 建立单元控制体模型, 对回热器主要型面(不锈钢锯齿型面、CC 型一次表面)的传热及流动特性进行了数值模拟, 并与实验结果进行对比, 结果表明, 数值结果与实验结果吻合的较好. 在此基础上, 研究了 CC 型面结构参数等对传热流动性能的影响, 并且通过 j/f 的大小比较了不同结构参数下 CC 型面以及不锈钢锯齿型面的表面性能, 为回热器的优化设计提供依据.

关 键 词: 航空、航天推进系统; 回热器; 不锈钢锯齿型面; CC 型面; 数值模拟

中图分类号: V221.1

文献标识码: A

Numerical and experimental study on flow and heat transfer performance of some compact surface recuperators

PENG Hao, SUN Zhijiang, LING Xiang

(School of Mechanical and Power Engineering,
Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China)

Abstract: A unit control model was established using computational fluid dynamic (CFD) method, while the heat transfer and fluid flow performances on primary surface of recuperator (stainless steel serrated fin and cross corrugated (CC) primary surface) were simulated numerically and also compared with the experimental results. The results show good consistency between numerical simulation and experimental data. To this end, the effect of CC surface structural parameters on heat transfer performance was discussed, and then the heat transfer and flow characteristics were compared for different structural scales and surface arrangements, thus providing a basis for design optimization of recuperators.

Key words: aerospace propulsion system; recuperator; stainless steel serrated fin; corrugated cross (CC) surface; numerical simulation

符号说明

D_e ——当量直径, m

f ——摩擦因子

G ——介质质量流速, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

H ——CC 型面波高, m

j ——传热因子

ΔL ——流道长度, m

L_f ——锯齿型面切口长度, m

Nu ——努塞特数

Pr ——普朗特数

P ——CC 型面周期, m

Δp ——压降, Pa

q_w ——热流密度, (W/m^2)

Re ——雷诺数

S_T ——能量方程源项

收稿日期: 2006 12 26; 修订日期: 2007-04 20

作者简介: 彭浩(1981-), 男, 湖南长沙人, 博士生, 主要从事高效传热研究.

T ——温度, K
 c_p ——比热容, J/(kg · K)
 h_f ——锯齿型面翅片高度, m
 m ——质量流量, (kg/s)
 u ——流速, (m/s)
 s_f ——锯齿型面翅片间距, m
 Δt ——温差, K
 δ_f ——锯齿型面翅片厚度, m
 θ ——CC 型面交错角度, ($^\circ$)
 λ ——导热系数, W/(m · K)
 ν ——运动粘度, (m^2/s)
 μ ——动力粘度, kg/(m · s)
 μ_t ——湍流粘度, kg/(m · s)
 ρ ——密度, (kg/m³)
 γ ——汽化潜热, (kJ/kg)
下角标
as ——空气侧
ss ——蒸汽侧
{ i, j, k } ——通用坐标系
l ——液体
m ——平均值
w ——壁面

微型燃气轮机是一种新型的发动机, 近年在分布式发电/能源系统领域发展迅猛, 受到广泛关注. 采用回热可以使燃气轮机热效率提高 10% ~ 30%, 燃料消耗下降 20% ~ 30%. 因此, 回热技术在燃气轮机研究中成为一个关键的问题. 目前, 常用回热器的主要型面有紧凑式以及原表面(一次表面)两种形式. 对于这两种型面的传热以及阻力特性, 国外作了不少研究工作, 但涉及商业秘密, 公开发表的并不多^[1-5].

Shan^[6]指出, 在航天器及工业燃气轮机装置中使用的回热器以锯齿型面最为普遍, 这是因为相对其压降而言, 换热效率较高(换热有效度达到 90%). 目前, 基于纯铝材料锯齿型面回热器的表面性能研究较多^[7-10], 主要采用实验方法结合数值模拟得到相关数据. 然而, 随着燃气轮机的进气温度越来越高(与燃气轮机的压比有关), 排气温度也越来越高, 一台进气温度为 1 400~ 1 500 K 的燃气轮机排气温度达 800~ 900 K, 纯铝材料的回热器显然不能适用, 这就要求回热器采用抗高温的材料, 比如不锈钢, 高温金属, 或者陶瓷材料等等. 但目前, 国内外对抗高温材料型面的性能数据还很缺乏.

一次表面型回热器的主要特点是其所有的换热面均为直接参与换热的一次表面, 水力直径小, 换热效率高. 目前开发和研究的型面主要有 CC 型(Cross corrugated), CU 型(Corrugated undulated)和 CW 型(Cross wavy). Utriainen^[11]对上述几种一次表面的换热和流动特性进行了分析计算, 认为 CC 型表面(如图 1)的综合性能最佳. 文献[3, 12-13]专门针对 CC 型面进行一系列的实验模拟研究, 获得了一些有用的数据. 但总体来说, 对 CC 型面一次表面回热器性能的研究还远远不能满足实际应用的需要, 尤其针对高雷诺数、尺寸参数 P/H 较大的情况下, 数据尤为缺乏.

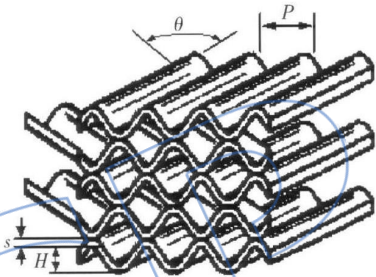


图 1 CC 型面
Fig. 1 Cross corrugated (CC) surface

本文针对回热器的两种不同型面, 即不锈钢锯齿型面及 CC 型一次表面, 对其传热以及流动特性进行实验和数值分析, 同时通过可靠的计算模型和模拟方法进一步研究高雷诺数下 CC 型面大的尺寸参数(P/H)和交错角度(θ)对传热及流动的影响. 并将 CC 型面与锯齿型面的特性进行分析比较, 得出的结论和数据可为实际回热器的优化设计提供依据.

1 实验装置和过程

1.1 试样

试样为不锈钢错流式板翅式换热器, 其几何结构分别如图 2 所示, 具体尺寸参数见表 1.

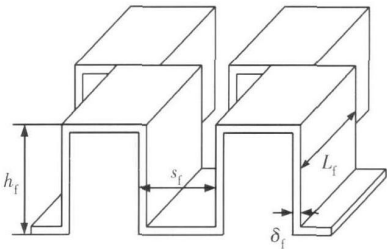


图 2 锯齿型面
Fig. 2 Serrated fin surface

表 1 锯齿型面参数

Table 1 Dimension of the serrated fins

结构参数	蒸汽侧	空气侧
h_f/mm	3.0	6.0
s_f/mm	2.0	2.5
δ_f/mm	0.2	0.2
L_f/mm	5	5
D_e/mm	2.19	3.29

1.2 实验装置

实验装置示意图如图 3 所示. 本实验装置由风洞系统与蒸汽凝结水系统以及测量系统三部分组成.

1.2.1 风洞系统

本系统为吸入式直流传热风洞, 风量由风机出口的蝶阀调节. 空气由双扭线吸风口吸入, 经由数层金属丝网组成的整流网后进入实验元件, 然后经测速段及风量调节阀通向风机而排至大气.

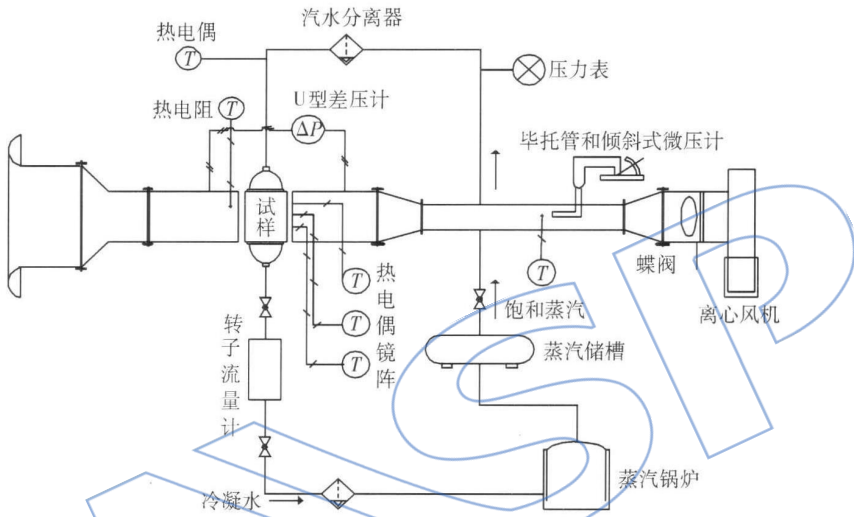


图 3 实验流程图

Fig. 3 Schematic of test apparatus

1.2.2 蒸汽凝结水系统

蒸汽由电蒸汽锅炉产生, 经汽水分离器进入实验段和空气形成错流流动换热, 饱和蒸汽被冷却后形成冷凝水流回水槽.

1.2.3 测量系统

空气侧进口风温采用 Pt100 铂热电阻配合智能温度显示仪表测得; 出口风温采用 10 对镍铬-铜镍热电偶配合电位差计测量. 空气侧流量由标准毕托管及 YYT-2000 倾斜式微压计测量. 蒸汽入口压力由过热蒸汽压力表测量, 蒸汽入口温度由镍铬-铜镍热电偶温度计测量, 凝结水由容积式流量计和秒表测得.

1.3 实验方法

实验时测量得到空气的流速、空气和实验段进出口的温度值以及冷凝水的量, 可计算每一工况下空气侧和蒸汽侧的总传热量. 计算公式如下:

$$Q_{as} = m_{as} C_{pas} \Delta t_{as} \tag{1}$$

$$Q_{ss} = m_{ss} \lambda_{ss} \tag{2}$$

当空气侧和蒸汽侧的热平衡误差在 3% 之下时, 开始记录数据. 为了保证实验准确性, 实验段必须保温良好.

2 数值模拟

本文模拟计算应用计算流体动力学商用程序 Fluent6.2, 并采用湍流模型对两类回热器(板翅式和 CC 型一次表面式) 流场及温度场进行分析.

2.1 控制方程

对于充分发展的流场, 在忽略体积力的情况下, 相应的控制方程为:

连续性方程

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{3}$$

动量方程(标准 $k-\epsilon$ 方程)

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + u_j \frac{\partial \rho k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \rho \epsilon \tag{4}$$

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + u_k \frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial x_k} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_k} \right] + \frac{c_1 \varepsilon}{k} \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - c_2 \rho \varepsilon \frac{\varepsilon}{k} \quad (5)$$

能量方程

$$\frac{\partial \rho T_1}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\lambda}{c_p} \frac{\partial T_1}{\partial x_j} \right) + S_T \quad (6)$$

2.2 计算区域

2.2.1 锯齿型面板翅式回热器

对于锯齿型面板翅式回热器, 本文建立的三维模型如图 4 所示: 在空气侧通道选择一个典型部分进行分析. 模型包括两层隔板, 翅片单元和两个周期性壁面. 为了排除流动区域中入口效应的影响, 选择了在计算区域中央与进口和出口距离相同的翅片.

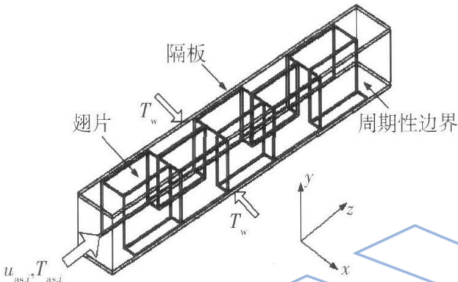


图 4 锯齿型面几何模型
Fig. 4 Geometries of serrated surface

2.2.2 CC 型一次表面回热器

本文建立的 CC 型面模型的当量直径(D_e)与锯齿型面的相等, 这样有利于在同等条件下和锯齿型面数据进行比较. 同时对比研究了不同的 P/H (4~ 8) 和交错角度 θ ($0^\circ \sim 90^\circ$) 下 CC 型面的流动传热情况. 具体模型如图 5 所示.

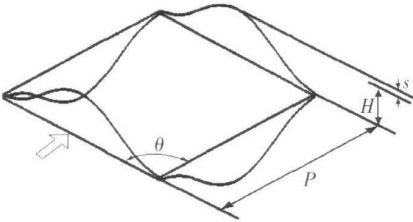


图 5 CC 型面几何模型
Fig. 5 Geometries of CC surface

2.3 边界条件

锯齿型面模型: 进出口边界, 采用速度入口, 出口为充分发展的流动; 固壁条件, 上下隔板为恒温条件, 壁面速度无滑移.

CC 型面模型: 进出口边界, 采用周期性边界

条件, 相对应的质量流量; 固壁条件, 上下波纹板面为恒温条件, 壁面速度无滑移; 对称条件, 主流道左右两侧为对称边界条件.

2.4 数据处理

一般对于充分发展的流动, 壁面的传热特性可以用 $NuRe$ 或者 $j-Re$ 的关系表示, 摩擦特性可用 $f-Re$ 的关系表示. 本研究中, 相关参数定义如下

$$Re = \frac{GD_e}{\mu} \quad (7)$$

$$Nu = \frac{q_w D_e}{\lambda (T_w - T_m)} \quad (8)$$

$$j = \frac{Nu}{Re Pr^{1/3}} \quad (9)$$

$$f = \frac{2 | \Delta p | D_e}{4 \rho \Delta L \bar{u}^2} \quad (10)$$

3 结果与讨论

3.1 不锈钢锯齿型面

图 6 是数值模拟得到的不锈钢锯齿型面传热因子 j 和摩擦因子 f 与实验数据的比较. 图 6 (a)

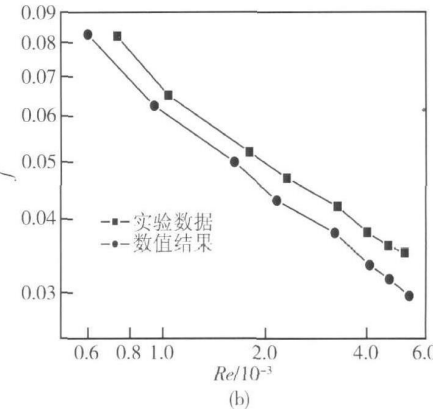
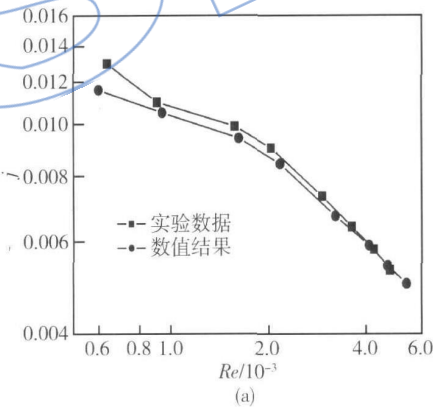


图 6 不锈钢锯齿型面实验数据与数值结果的比较
Fig. 6 Comparison between experimental data and numerical simulation

中,在相同雷诺数区域,数值模拟计算得到的 j 因子与实验数据吻合的很好,而 f 因子的实验结果高于模拟结果.这是由于在模型建立过程中假定翅片以及壁面为光滑平面,未考虑翅片表面粗糙度的影响.这说明除了结构参数外还存在一个不确定的加工工艺因素,影响着翅片的性能.

3.2 CC型面

3.2.1 实验结果与数值模拟的比较

为了验证计算模型和计算方法的准确性,首先建立了 $P/H = 4, \theta = 60^\circ, D_e = 3.29 \text{ mm}$ 的CC一次表面模型,计算得到流道的 Nu 数与摩擦因子 f ,并将计算值和文献[3]中的实验值进行对比.图7为不同流量工况下, Nu 数和摩擦因子 f 与实验值的比较.由图7可见,对于 Nu 数,数值结果比实验值偏大,误差在15%以内,并且随着 Re 数的增加而减少;对于摩擦因子 f ,模拟值比实验值偏小,误差在10%以内.这样的误差范围,工程上是允许的,说明本文的计算模型和计算方法是正确的、有效的.

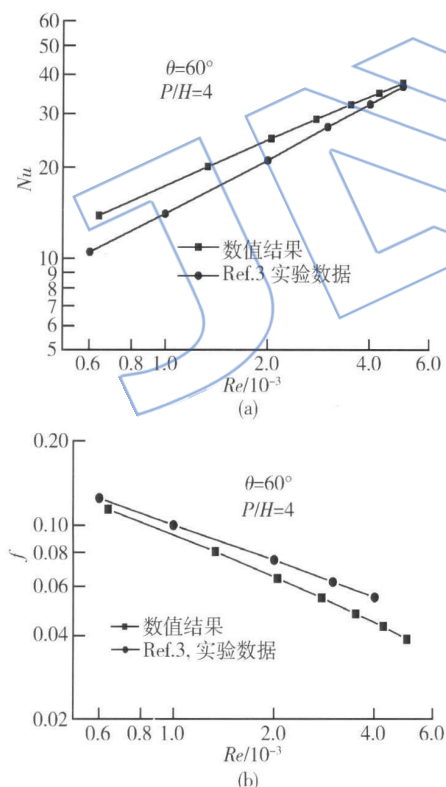


图7 CC型面实验数据与数值结果的比较

Fig. 7 Comparison between experimental data and numerical simulation of CC surface

3.2.2 结构参数的影响

由于本文的数值模型对于预测CC型一次表

面换热器性能具有足够的精度,基于此,本文进一步研究了CC型面尺寸参数(P/H),交错角度(θ)对传热以及流动的影响.

(1) 角度的影响

为研究角度对CC型面流动以及传热的影响,固定尺寸参数 $P/H = 4.0$,建立了交错角度 θ 为 $30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$ 的模型.对相应结构的流场温度场进行分析,其结果如图8所示: P/H 不变时,相同 Re 数下, Nu 数及摩擦因子 f 均随着交错角度 θ 的增大而增大.这是因为 θ 的增大,增强了沿波纹面的螺旋型二次流动,它能够将处于中心的较低温度的流体带到更接近壁面的区域,强化壁面的传热,使得 Nu 数增大.同时,二次流动也对边界层的生成产生扰动,使摩擦因子 f 增加.

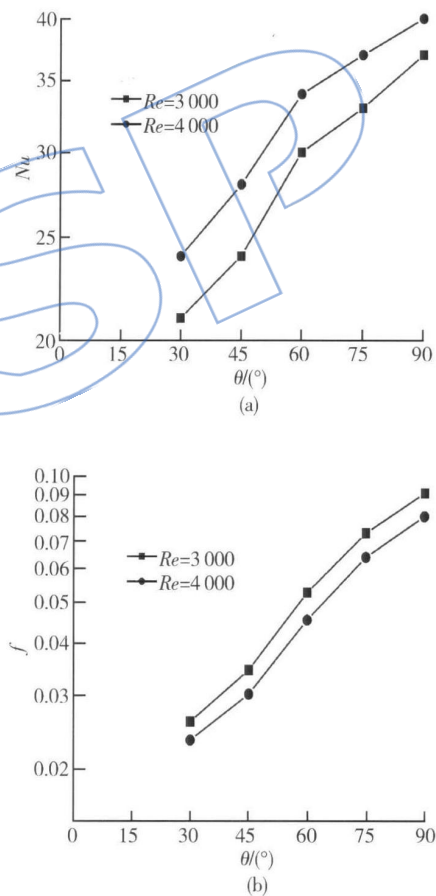


图8 不同 Re 数下 Nu 数和 f 因子随交错角度的变化

Fig. 8 Nu and f factor versus corrugation angle at different Reynolds numbers

(2) P/H 的影响

取 θ 为中间角度 60° , P/H 分别为4,6,8时,研究不同 P/H 的结构下CC型面的表面特性.对相应的流场温度场进行模拟计算,结果如图9所示:当 θ 不变时, Nu 数随着 P/H 的增大而增大,这是

因为当 θ 不变时, P/H 的增加使得上下两股流体流动之间的摩擦面积增大, 从而强化了二次流动. 相同的趋势也体现在 f 因子的变化规律上.

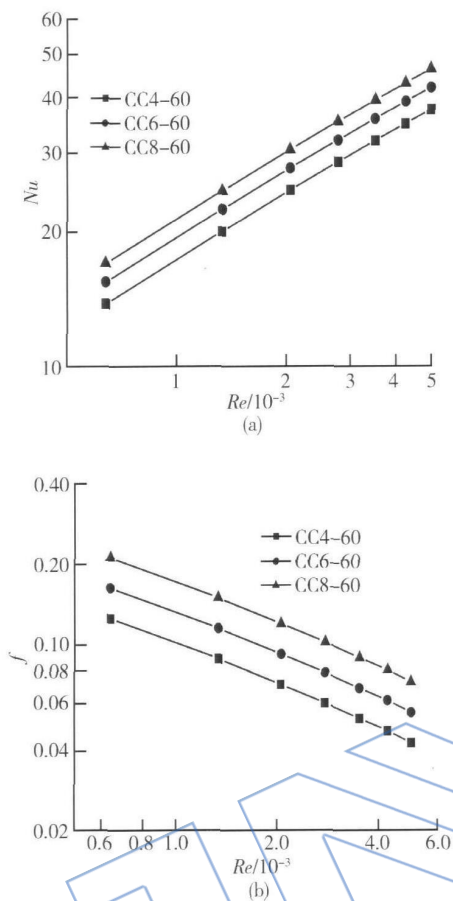


图 9 不同 P/H 下 Nu 数和 f 因子随 Re 数的变化
Fig. 9 Nu and f factor versus Reynolds numbers with various P/H

3.3 不锈钢锯齿型面与 CC 型面的传热与阻力特性的比较

对于回热器优化设计而言, 对换热面的选择不仅要求有较高的对流换热系数, 而且要求气体在换热面之间流动压降较小. 这充分体现了传热与流动压降的相关性, 通常我们将传热因子 j 和摩擦因子 f 的比值作为衡量换热器表面性能优越的标准, j/f 越大表明传热表面性能越优越.

图 10 是将本文得到的锯齿型面与 CC 型面的表面性能进行对比的结果, 从图中可以看出, CC4 30 和 CC4 45 表面性能较为优越, 可在回热器设计中优先选用.

4 结 论

(1) 建立了数值流体动力学模型, 对不锈钢锯齿型面和 CC 型面的流动传热性能进行计算,

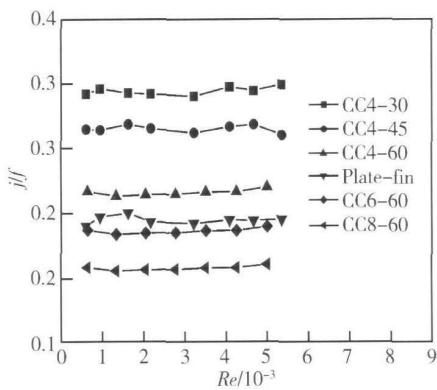


图 10 不同型面 j/f 的对比
Fig. 10 j/f versus Reynolds numbers in various surfaces

并与实验结果进行对比, 二者结果基本一致, 说明本文的数值方法是有效的, 准确的.

(2) 对 CC 型面而言, 模拟中预测到螺旋型二次流动的存在, 可强化壁面的传热. 强化效果随着交错角度 θ 以及 P/H 的增大而增大但同时摩擦因子 f 也随之增大.

(3) 对比 6 种型面 j/f , 得出 CC4 30 和 CC4 45 表面性能较为优越, 可为回热器设计中的优选型面.

参考文献:

[1] McDonald C F. Low cost recuperator concept for microturbine applications[R]. ASME 2000 GT- 167, 2000.
[2] Gunnar L, Max X. High performance and cost effective recuperator for microgas turbines[R]. ASME GT- 2002- 30402, 2002.
[3] Ciofalo M, Stasiek J, Collins M W. Investigation of flow and heat transfer in corrugated passages I experimental results[J]. International Journal of Heat Mass transfer, 1996, 39: 149 164.
[4] Utriainen E, Sundén B. Evaluation of the cross corrugated and some other candidate heat transfer surfaces for microturbine recuperators[J]. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2002, 12: 550 560.
[5] Campbell J F, Rohsenow W M. Gas turbine regenerators: a method for selecting the optimum plate finned surface pair for minimum core volume[J]. International Journal of Heat Mass Transfer, 1992, 35: 3441 3450.
[6] Shan R K. Compact heat exchanger technology and applications[M]. Heat Exchange Engineering: Vol. 2, London: Ellis Horwood Limited, 1991.
[7] Sparrow E M, Hajiloo A. Measurements of heat transfer and pressure drop for an array of staggered plates aligned parallel to an air flow[J]. Transactions of the ASME, 1980, 102: 426 432.
[8] Sparrow E M, Liu C H. Heat transfer pressure drop and

- performance relationships for inline, staggered and continuous plate heat exchangers[J]. Int. J. Heat Mass Transfer, 1979, 22: 1613-1625.
- [9] Joshi H M, Webb R L. Heat transfer and friction in the offset strip fin heat exchanger[J]. International Journal of Heat Mass Transfer, 1987, 30: 69-84.
- [10] Manglik R M, Bergles A E. Heat transfer and pressure drop correlations for the rectangular offset strip fin compact heat exchanger[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 1995, 10: 171-180.
- [11] Utriainen E. Investigation of some heat transfer surface for gas turbine recuperator[R]. Sweden, Lund: Lund Institute of Technology, 2001.
- [12] Ciofalo M, Collins M W, Henry F S. Laminar and turbulent flow and heat transfer in crossed corrugated heat exchangers[J]. In Numerical Methods for Thermal Problems, 1991, 8: 622-638.
- [13] NIE Song, QU Wei. Numerical simulation on heat transfer and flow performances of CC primary surface recuperator[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2004, 25(6): 899-991.