

文章编号: 1000-8055(2008)12-2274-06

交替大小肋片方腔通道内换热性能的数值模拟

苏 生^{1,2}, 胡 捷^{1,2}, 刘建军¹, 安柏涛¹

(1. 中国科学院 工程热物理研究所, 北京 100190;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100190)

摘 要: 采用商业软件 CFX 研究了内部具有不同间距的周期性交替大小肋片的方腔通道的换热性能。结果发现: 流体流过斜置肋片时, 从肋片的上游端点开始形成一个紧靠带肋壁面向斜下游发展的喇叭状涡, 此涡使肋片之间形成卵形高换热区域; 高换热区域面积的大小与流体流动情况有关, 而且受下游肋片影响。与采用单一尺寸肋片的通道相比, 在适当的位置加入小肋片能够改善再附着区域下游的换热, 同时降低通道的流阻系数, 增强综合换热能力。

关 键 词: 方腔通道; 大小肋片; 换热特性

中图分类号: V231.1

文献标识码: A

Numerical simulation on heat transfer in duct roughened by periodic alternate scale ribs

SU Sheng^{1,2}, HU Jie^{1,2}, LIU Jian-jun¹, AN Bai-tao¹

(1. Institute of Engineering Thermophysics,

Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: To study the heat transfer characteristics in a rectangular duct rib-roughened by periodic alternate scale ribs, six models with different rib scale were studied by employing commercial computational fluid dynamics (CFD) software CFX. The results show that, as fluid passes through each rib, a trumpet-shaped vortex is generated from the upstream vertex of the rib, shaping a region with high value of heat transfer coefficient (HTC). The area of high HTC region is affected by both the fluid flow condition and the location of the adjacent downstream rib. As compared with the duct roughened by unique size ribs, planting a smaller rib in a proper location between each two original ribs can improve heat transfer downstream re-attachment region. This also can decrease flow resistance coefficient in the duct and improve the general heat transfer ability.

Key words: rectangular duct; periodic alternate scale ribs; heat transfer

带肋通道作为一种简单有效的冷却形式, 在燃气轮机的叶片内部冷却结构中占据着非常重要的地位。

针对内部带肋冷却通道的研究广泛而且深入。普遍认为, 在带肋通道中, 肋片的高度、宽度及间距与通道水力直径之间的比值及肋片角度等都

收稿日期: 2007-11-28; 修订日期: 2008-05-14

作者简介: 苏生(1981-), 男, 四川仁寿人, 博士生, 主要从事叶轮机机械启动热力学的研究。

影响着对通道换热的强化效果^[1]. 各方面的工作主要是研究带有不同具体肋片几何结构的通道中的流动阻力与强化换热性能. 采用直肋^[2-5]、V 形肋^[6-7]、间断肋^[8]等各式肋片的通道都是人们研究的对象. 针对变截面带肋通道的研究也是近年来的一个热点^[9-10], 这些模型在燃气轮机领域更加具有实际意义. 总的来看, 带肋通道以其简单实用的优点一直受到相关各界的重视, 人们希望得到具有高换热能力同时流体压头损失小的结构. 本文跟随前人的步伐推出了一种新型的肋片布置形式: 交替大小肋片.

本文基于文献[5]的实验结果, 在通道中周期性地加入了小肋片, 形成了周期性交替的大小肋片结构, 数值模拟了其中的流动与换热特性, 并比较分析了不同结构的综合换热能力.

1 计算模型

1.1 物理模型

图 1 是通道原始模型, 通道中沿流向均匀地布置了 15 条与流向夹角为、横截面尺寸为 2 mm ×

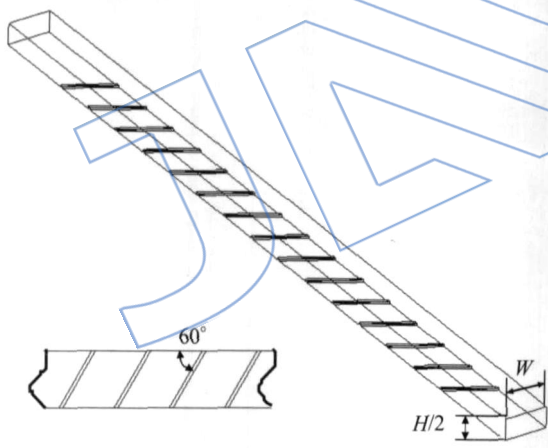


图 1 原始带肋通道 (1/2 模型)
Fig. 1 Original rib-roughened duct (Half)

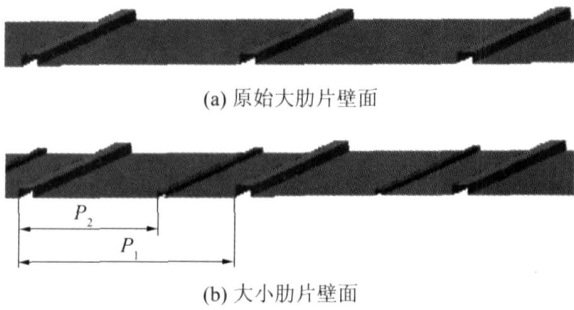


图 2 带肋壁面
Fig. 2 Rib-roughened wall

2 mm、沿流向间距为 40 mm 的肋片, 通道横截面宽 40 mm、高 40 mm. 图 2 是带肋壁面上加入小肋片前后的对比图. 根据重新加入或更改的肋片大小及布置位置的不同, 本文的物理模型包括 6 种方案, 如表 1 所示. 其中, 小肋片横截面尺寸为 1 mm × 1 mm, 与流向夹角为 60°, 所有肋片的周期性间距 P_1 均为 40 mm, 后加入肋片位于原始肋片下游 P_2 距离处. 按照结构的对称性, 计算的物理模型取其中一半, 如图 1 所示.

表 1 不同方案模型的几何尺寸
Table 1 Configuration of different models

模拟 方案号	肋片 类型	单侧壁面 肋片数	P_1 / mm	P_2 / P_1
No. 1	全大肋片	15	40	-
No. 2	全小肋片	15	40	-
No. 3	大小肋片	15	80	0.5
No. 4	大小肋片	30	40	0.5
No. 5	大小肋片	30	40	0.618
No. 6	大大肋片	30	40	0.618

1.2 计算方法

通过商业软件 CFX5 采用有限体积法及全隐式方法求解三维定常粘性 N-S 方程. 数值模拟中把采用 $k-\varepsilon$ 与剪应力输运方程 (SST) 模型得到的计算结果与文献[5]中提供的实验结果进行了对比, 发现采用 SST 模型对肋片上游的传热细节模拟得更准确, 最终本文模拟选用 SST 湍流模型加壁面函数法. 计算选用二阶精度计算格式, 计算残差收敛到 1×10^{-5} . 计算网格为六面体网格, 主要换热壁面的 y^+ 值小于 2, 并进行了细致的网格无关性研究, 图 3 是局部计算网格.

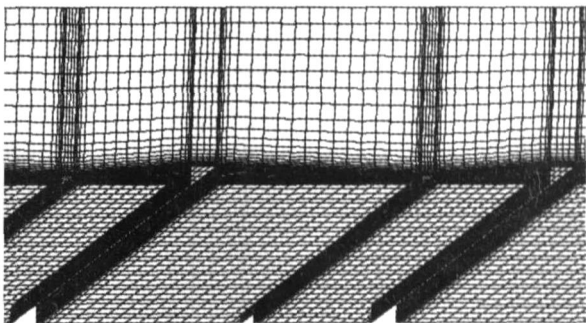


图 3 计算网格
Fig. 3 Computational grid

进口条件给定质量流量、流动方向及总温与湍流度,出口条件给定静压力,壁面为定温.各计算方案中,进口气流总温均为 313 K,壁面均为恒温 303 K,出口压力为一个大气压,来流方向与进口垂直,湍流度为 5%;通过改变进口质量流量得到不同 Re 条件下的流动及换热特性.

2 计算结果及分析

定义换热系数为 $HTC = q / (T_w - T_0)$,其中 q 为壁面单位面积热通量, T_w 为壁面温度, T_0 为通道入口处的气流总温.定义流阻系数为 $G = \Delta p / (\rho u^2 / 2)$,其中, p 为通道进、出口压差, ρ 为通道内的流体密度, u 为通道内流体的平均速度.定义 Re 为基于进口来流速度、密度、水力直径的雷诺数.

2.1 流动及换热特性

图 4 是计算得到的 No. 1 方案中的二维流线图 ($Re = 60\,000$).图中显示,由于肋片斜置起到导流作用,使通道中产生了二次流,流体在垂直于流向的横截面上存在一个大的通道涡,肋片附近的分离流动中也存在横向二次流动;沿流向在肋片上、下游分别存在前台阶涡和后台阶涡,在肋片顶部也存在一个涡;需要说明的是横向二次流中的壁角涡与肋片上游的前台阶涡并不是在每个截面上都能形成的.图 5 是计算得到的 No. 1 方案的换热系数分布与文献[5]给出的实验结果的对比图,计算结果中模拟出了肋片上、下游的高换热区 A 和 B,这与实验测得的分布是一致的,计算得到的换热系数值比实验值稍微偏低.总的来说,从流动与换热来看,本文数值计算的结果与实验结果是比较吻合的,证明所运用的数值方法是可行的.

图 4 是 No. 3 方案中的二维流线图 ($Re = 60\,000$).图 5 是 No. 3 方案中的三维流线图(左边为进口,右边为出口,视图方向为从通道外往通道内看, $Re = 60\,000$).图中显示,在气流从上游向下游流动的过程中,斜置肋片靠近上游最近的一端首先出现在通流截面上,减小了流通面积,气流速度在这里得到提高,而且从这里开始产生向下游的分离,在横向二次流的作用下,在靠近带肋壁面附近形成一个流向斜对角的喇叭状三维涡.

图 8 是各方案中带肋壁面换热系数分布 ($Re = 60\,000$).根据前面对图 7 的分析可知,肋片下游的卵形高换热区域(如图 8(a)中的 A)是由于流体肋片下游的喇叭涡的冲击而产生的,涡中的流

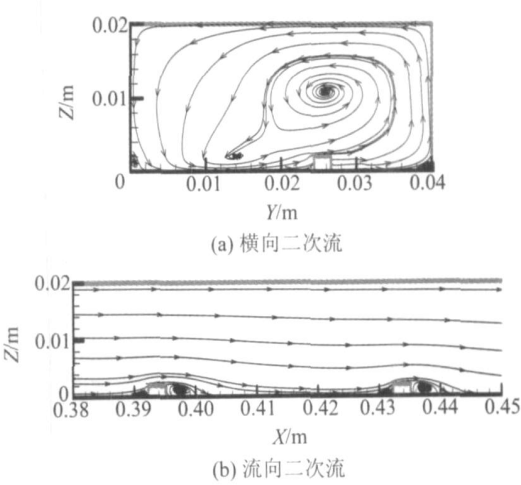


图 4 No. 1 方案中的二维流线图

Fig. 4 2-D streamline in case No. 1

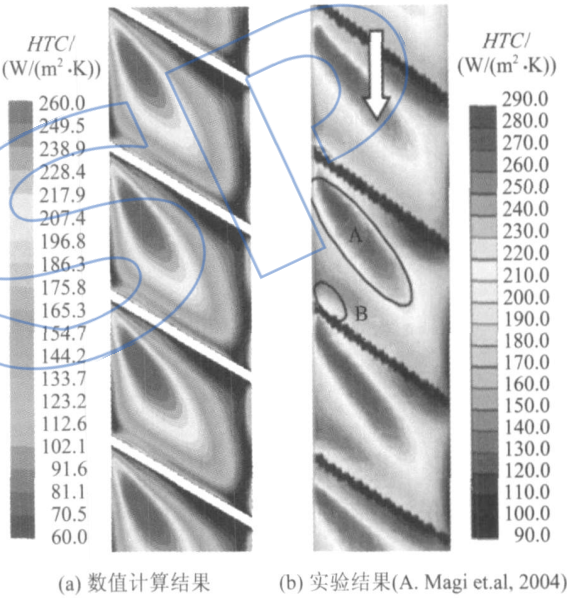


图 5 No. 1 方案中的带肋壁面换热系数分布

Fig. 5 HTC distribution in case No. 1

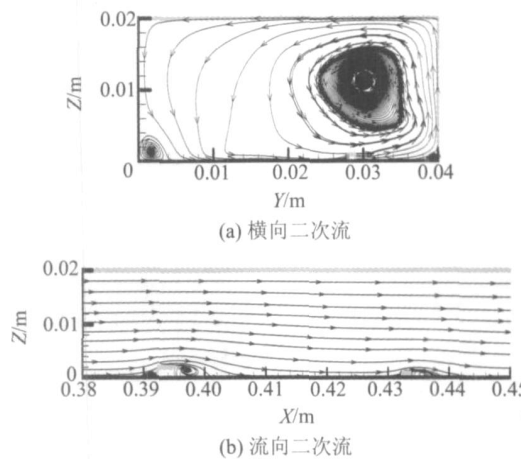


图 6 No. 3 方案中的二维流线图

Fig. 6 2-D streamline in case No. 3

体在下洗时速度高,对壁面形成局部冲击,提高了局部换热系数.当上游的喇叭涡强度足够大时,其尾迹能跨过下游肋片继续旋转并冲击在两条肋片之间的壁面上,形成局部的次高换热区,这种效果在图 8(c)中最明显.肋片受到上游来流冲击,也是重要的高换热区域.图 8(a)中的 B 区域是肋片上游的前台阶涡的下洗流动所造成的.

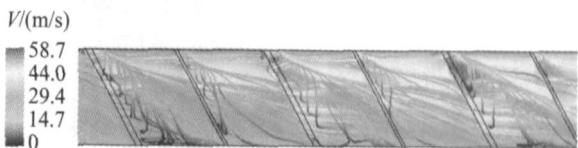


图 7 No. 3 方案中的三维流线图
Fig. 7 3-D streamline in case No. 3

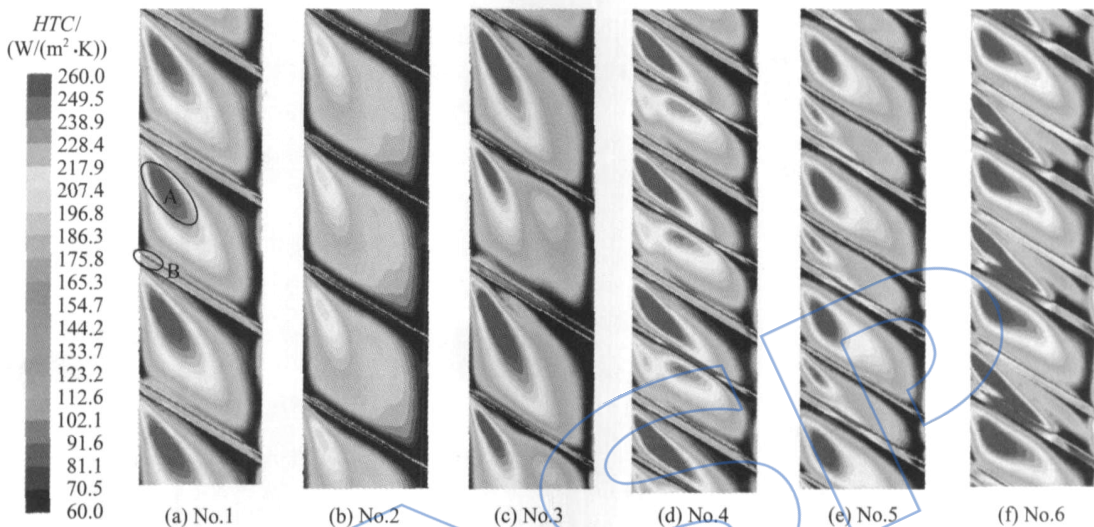


图 8 带肋壁面换热系数分布
Fig. 8 HTC distributions

在 No. 1, No. 2 和 No. 3 方案中,全部采用小尺寸肋片的方案 2 的肋片扰流效果不够显著,换热系数最低;与 No. 1 的结果相比, No. 3 方案中肋片顶部换热系数较低,大肋片下游的卵形高换热区域有所延长,小肋片下游区域的换热系数最大值有所下降,但是存在两个较高换热系数区域,使得高换热区域面积沿横向有所增大.

No. 4, No. 5 和 No. 6 方案是在 No. 1 方案基础上在肋片下游加入小肋片,这 3 个方案中肋片上的换热都有所提高.大肋片下游的卵形高换热区受到了不同程度的影响: No. 4 中卵形区域沿流向被半路截断, No. 6 中没有充分形成卵形区域.在 No. 1 的结果中卵形区域与下游肋片之间存在换热系数较低的区域,而在 No. 5 中这个区域的换热得到了加强. No. 7 中的高换热区域面积最大.综合图 8 中各方案的结果来看,在特定 Re 及特定结构情况下,流体在肋片下游再附着时产生的高换热区域(即受喇叭涡冲击的区域)需要一定的空间才能充分成形,合理布置下游肋片的位置对通道整体换热能力有一定的影响.

图 9 给出了各结构方案中带肋壁面的平均努塞尔数随雷诺数的变化曲线,雷诺数范围为 $Re =$

5 000~60 000.可以看出,随着 Re 的增加,各方案的换热能力都有所上升,其中, No. 6 方案的换热能力最强, No. 4 次之, No. 1, No. 3 和 No. 5 的效果相当, No. 2 最低.

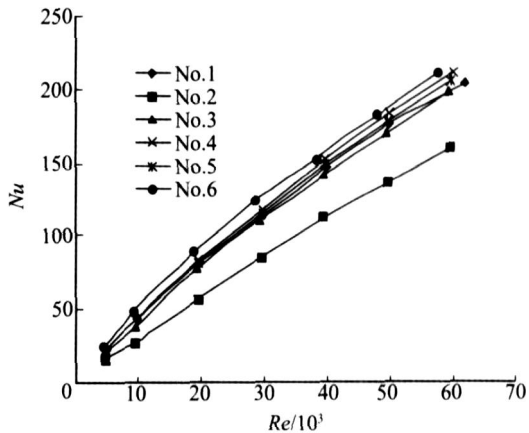


图 9 换热特性曲线
Fig. 9 Characteristics of heat transfer

2.2 流阻特性

图 10 是各结构方案中通道流阻系数随雷诺数的变化曲线.在肋片数目最少的 3 个方案中,全部采用小肋片的 No. 2 方案流阻系数最低,采用交替大小肋片的 No. 3 方案次之,全部采用大肋

片的 No. 1 方案最高. 在所有方案中, No. 6 的流阻系数最高, No. 4 次之. 比较 No. 1 和 No. 5 的结果发现, 肋片越少, 流阻系数不一定越小: No. 4 和 No. 5 方案是在 No. 1 方案的基础上加入了小肋片, 而 No. 5 的流阻系数却比 No. 1 的有所下降, 其原因是在靠近大肋片的上游位置加入小肋片之后, 相当于为流体流过大肋片做了一个过渡, 使冲击损失有所减小.

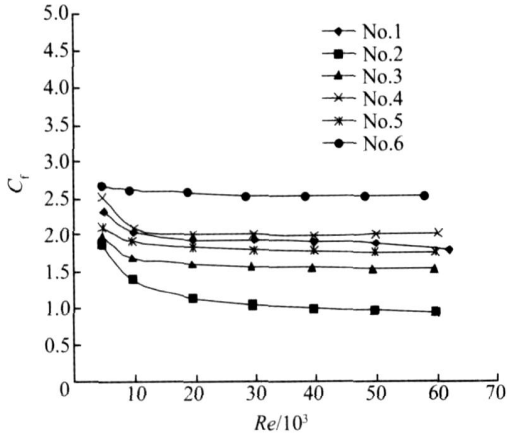


图 10 流阻特性曲线

Fig. 10 Characteristics of flow resistance

2.3 综合效果分析

为了评价通道的综合换热效果, 引入 $\eta = (Nu / Nu_s) / (C_f / C_{f,s})^{1/3}$, 其中, Nu_s 和 $C_{f,s}$ 分别是相同 Re 工况下具有相同水力直径的光滑通道中的平均努塞尔数与流阻系数. 图 11 给出了各方案结构在不同雷诺数下的综合换热效果. 可以看出, 在 Re 数较高的情况下, 采用交替大小肋片的 No. 3, No. 4 和 No. 5 的综合效果都比 No. 1 原型结构好, 其中, No. 3 和 No. 5 效果最佳, No. 4 次之.

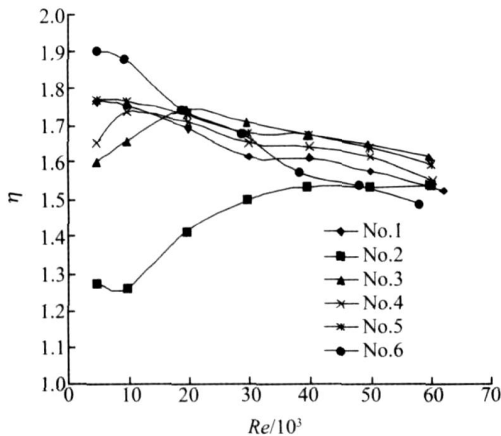


图 11 综合换热性能曲线

Fig. 11 Characteristics of general heat transfer

3 结 论

通过对内部带有不同结构交替大小肋片的方腔通道进行了流动与换热特性的数值模拟, 得出了以下结论:

- 1) 内部带肋通道中, 肋片上、下游及肋片顶部都存在分离, 斜置肋片会诱导出较强的二次流, 在通道横截面上形成一个大的通道涡, 在带肋壁面附近形成以每条肋片最上游位置为起点, 向紧邻的下游肋片的最下游端发展的喇叭状涡;
- 2) 流体流过肋片发生分离后, 在肋片下游再附着时产生高换热区域, 这个区域的大小与来流情况及肋片结构有关, 根据具体工况, 合理布置下游肋片的位置能使通道整体换热性能得到改善;
- 3) 在肋片上游适当位置加入小肋片, 能降低通道的流阻系数, 提高通道的综合换热能力.

参考文献:

- [1] Han J C, Dutta S, Ekkad S. Gas turbine heat transfer and cooling technology [M]. New York: Taylor & Francis Books Inc., 2000.
- [2] Magi A, Montomoli F, Adami P, et al. Experimental and numerical investigation of stationary ribbed ducts [R]. ASME GT2004-53180, 2004.
- [3] Liou T M, Hwang Y S, Li Y C. Flowfield and pressure measurements in a rotating two-pass duct with staggered rounded ribbed skewed 45° to the flow [R]. ASME GT-2004-53173, 2004.
- [4] 张魏, 金文. 带交错叉排肋的矩形通道流场和壁面换热特性的数值模拟[J]. 汽轮机技术, 2007, 49(5): 362-365. ZHANG Wei, JIN Wen. Prediction of flow and heat transfer in rectangular passages with 60 degree rib turbulators arranged crossly on the opposite walls [J]. Trbine Tchnology, 2007, 49(5): 362-365. (in Chinese)
- [5] 邓宏武, 张炜, 陶智. 旋转状态下带肋 U 形通道内换热的实验研究[J]. 推进技术, 2000, 21(1): 26-29. DENG Hongwu, ZHANG Wei, TAO Zhi. Experimental investigation on heat transfer within a rotating ribbed serpentine passage [J]. Journal of Propulsion Technology, 2000, 21(1): 26-29. (in Chinese)
- [6] Lee E, Wright L M, Han J C. Heat transfer in rotating rectangular channels with V-shaped and angled ribs [J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 2005, 19(1): 48-56.
- [7] Kim K Y, Lee Y M. Design optimization of internal cooling passage with V-shaped ribs [J]. Numerical Heat Transfer (Part A: Application), 2007, 51(11): 1103-1118.
- [8] Han J C, Zhang Y M. High performance heat transfer ducts with parallel broken and V-shaped broken ribs [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1992,

35(2) :513-523.

[9] 苏生,刘建军,安柏涛.非对称蛇形旋转通道换热及流场数值研究[J].工程热物理学报,2007,28(增刊 1) :77-80.

SU Sheng, LIU Jianjun, AN Baitao. Calculations of heat transfer and fluid flow in an unsymmetrical rib-roughened branch of a rotating two-pass duct [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2007, 28 (Suppl. 1) :77-80. (in

Chinese)

[10] 魏喆,邓宏武,陶智,等.带交叉肋变截面回转通道内换热的实验研究[J].航空动力学报,2004,19(5) :645-649.

WEI Zhe, DENG Hongwu, TAO Zhi, et al. Experimental investigation of heat transfer in turn-over variable cross-section channels with interleaving ribs[J]. Journal of Aerospace Power, 2004, 19(5) :645-649. (in Chinese)

JASR