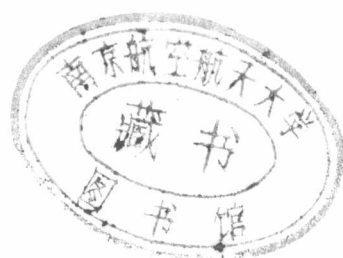




# 能源与动力学院

022 系

023 系



## 目 录

| 序号 | 姓名                       | 职称                   | 单位                       | 论文题目                                                                                                       | 刊物、会议名称                                                          | 年、卷、期      | 类别 |
|----|--------------------------|----------------------|--------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|------------|----|
| 1  | 张羽<br>王锁芳                | 硕士<br>副高             | 023<br>023               | 具有预旋进气的转-静盘腔流动与换热的数值研究                                                                                     | 南京工程热物理学会第七届学术会议论文集                                              | 2004       |    |
| 2  | 栾海峰<br>王锁芳               | 硕士<br>副高             | 023<br>023               | 同步旋转盘射流冲击换热液晶显示实验研究                                                                                        | 南京工程热物理学会第七届学术会议论文集                                              | 2004       |    |
| 3  | 王奉明<br>王锁芳<br>张靖周        | 硕士<br>副高<br>正高       | 023<br>023<br>023        | 扰流柱形状对流动换热特性影响的数值研究                                                                                        | 南京师范大学学报                                                         | 2005       |    |
| 4  | 王奉明<br>王锁芳<br>张靖周        | 硕士<br>副高<br>正高       | 023<br>023<br>023        | 矩形通道内绕流柱形状对流场影响的数值研究                                                                                       | 南京航空航天大学第六届研究生学术会议论文集                                            | 2004       |    |
| 5  | 王锁芳<br>李立国<br>吴国钊        | 副高<br>正高<br>正高       | 023<br>023<br>021        | Numercal Calculation of Three-stream Mixing Flow with Wall Cooling                                         | Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics | 2004.21.02 |    |
| 6  | 王锁芳<br>吕海峰<br>夏登勇        | 副高<br>硕士<br>硕士       | 023<br>023<br>023        | 封严篴齿结构特性的数值分析和实验研究                                                                                         | 南京航空航天大学学报                                                       | 2004.36.06 |    |
| 7  | 王锁芳<br>李立国<br>吴国钊        | 副高<br>正高<br>正高       | 023<br>023<br>021        | 波瓣喷管双层壁扩压器流场的数值分析                                                                                          | 空气动力学报                                                           | 2004.22.01 |    |
| 8  | 王锁芳<br>李立国<br>张靖周        | 副高<br>正高<br>正高       | 023<br>023<br>023        | Grid Generation and Numerica Analysis of Multi-stream Flow in the Complex Channel with a Forced Mixer Lobe | J.of Themal.Vol.13.No.2                                          | 2004.13.02 |    |
| 9  | 韩东<br>郭荣伟<br>易海云<br>周蓓蓓  | 副高<br>正高<br><br>外单位  | 023<br>021<br><br>外单位    | 一种直升机进气道电磁散射减缩方案                                                                                           | 航空动力学报                                                           | 2004.19.02 |    |
| 10 | 毛军逵<br>常海萍<br>方立         | 中级<br>正高<br>硕士       | 023<br>023<br><br>       | 离心力场流体热驱动液晶显现试验研究                                                                                          | 工程热物理学报                                                          | 2004.25.02 |    |
| 11 | 张靖周<br>李勇康<br>谭晓茗<br>李立国 | 正高<br>博士<br>博士<br>正高 | 023<br>023<br>023<br>023 | 阵列射流冲击冷却局部对流换热特性的数值计算与实验研究                                                                                 | 航空学报                                                             | 2004.25.04 |    |
| 12 | 单勇<br>张靖周                | 博士<br>正高             | 023<br>023               | 波瓣喷管引射-混合器的数值研究与验证                                                                                         | 推进技术                                                             | 2004.25.04 |    |
| 13 | 冶萍<br>张靖周                | 硕士<br>正高             | 023<br>023               | 有预旋进气转静盘腔中的流动和换热特性数值模拟                                                                                     | 航空动力学报                                                           | 2004.19.03 |    |

## 目 录

| 序号 | 姓名                      | 职称                   | 单位                       | 论文题目                                                                      | 刊物、会议名称                                                                             | 年、卷、期      | 类别 |
|----|-------------------------|----------------------|--------------------------|---------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|------------|----|
| 14 | 李勇康<br>张靖周<br>谭晓茗       | 博士<br>正高<br>博士       | 023<br>023<br>023        | 3-D Numerical computation of jet array impingement with initial crossflow | Transaction of NUAA                                                                 | 2004.21.02 |    |
| 15 | 冶萍<br>张靖周               | 硕士<br>正高             | 023<br>023               | 求解 N-S 方程 SIMPLE 算法的半交错网格研究                                               | 南京航空航天大学学报                                                                          | 2004.36.01 |    |
| 16 | 杨成凤<br>张靖周<br>谭晓茗       | 硕士<br>正高<br>博士       | 023<br>023<br>023        | 水滴形叉排扰流柱阵列矩形通道内流动和换热数值模拟                                                  | 航空动力学报                                                                              | 2004.19.03 |    |
| 17 | 谭蕾<br>张靖周<br>谭晓茗        | 硕士<br>正高<br>博士       | 023<br>023<br>023        | 有初始横流冲击冷却的数值研究                                                            | 中国工程热物理学会, 传热传质学会议                                                                  | 2004       |    |
| 18 | 谭晓茗<br>张靖周              | 博士<br>正高             | 023<br>023               | 自耦合射流速度分布的试验研究                                                            | 中国工程热物理学会, 传热传质学会议                                                                  | 2004       |    |
| 19 | 姚玉<br>张靖周<br>李勇康        | 硕士<br>正高<br>博士       | 023<br>023<br>023        | 突片对气膜冷却效果影响的数值研究                                                          | 中国工程热物理学会, 传热传质学会议                                                                  | 2004       |    |
| 20 | 谭晓茗<br>张靖周              | 博士<br>正高             | 023<br>023               | 自耦合射流冲击冷却的数值计算                                                            | 工程热物理学报                                                                             | 2004.25.04 |    |
| 21 | 蔡文祥<br>赵坚行              | 博士<br>正高             | 023<br>023               | 先进燃烧室火焰筒及其涡流器流场计算                                                         | 中国工程热物理学会燃烧学术会议                                                                     | 2004       |    |
| 22 | 刘勇<br>蔡文祥<br>颜应文<br>赵坚行 | 副高<br>博士<br>博士<br>正高 | 023<br>023<br>023<br>023 | 燃烧室流场的并行计算与大涡模拟                                                           | 中国工程热物理学会燃烧学术会议                                                                     | 2004       |    |
| 23 | 颜应文<br>赵坚行              | 博士<br>正高             | 023<br>023               | 贴体坐标系下模型加力室的大涡模拟                                                          | 中国工程热物理学会燃烧学术会议                                                                     | 2004       |    |
| 24 | 郭尚群<br>赵坚行              | 硕士<br>正高             | 023<br>023               | 环形燃烧室两相燃烧流场的数值模拟                                                          | 中国工程热物理学会燃烧学术会议                                                                     | 2004       |    |
| 25 | 颜应文<br>赵坚行              | 博士<br>正高             | 023<br>023               | Large-eddy Simulation of two-phase Reacting Flow In a Afterburner         | 9 <sup>th</sup> Annual Conference on ILASS-ASIA                                     | 2004       |    |
| 26 | 颜应文<br>马力伟<br>赵坚行       | 博士<br>硕士<br>正高       | 023<br>023<br>023        | 大涡模拟在加力燃烧室冷态流场中的应用                                                        | 南京航空航天大学学报                                                                          | 2004.36.06 |    |
| 27 | 赵坚行<br>颜应文              | 正高<br>博士             | 023<br>023               | 加力燃烧室热态流场的大涡模拟                                                            | 工程热物理学报                                                                             | 2004.25.增刊 |    |
| 28 | 黄护林<br>韩东               | 正高<br>副高             | 023<br>023               | 磁场控制水垢堆积并减少腐蚀的机理                                                          | 第十二届全国计算流体力学会议论文集                                                                   | 2004       |    |
| 29 | 黄护林                     | 正高                   | 023                      | Numercal Simulation of Heat transfer in MHD Free Surface Flow             | Proceedings of the 6 <sup>th</sup> International Symposium on Heat Transfer (ISHT6) | 2004       |    |

## 目 录

| 序号 | 姓名                       | 职称                   | 单位                       | 论文题目                                                                                                | 刊物、会议名称                                                                              | 年、卷、期      | 类别 |
|----|--------------------------|----------------------|--------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|------------|----|
| 30 | 黄护林                      | 正高                   | 023                      | 太阳能斯特林发动机的性能模拟                                                                                      | 太阳能学报                                                                                | 2004.25.05 |    |
| 31 | 吉洪湖                      | 正高                   | 023                      | On Fields Synergism and Convective Heat Transfer Enhancement and Control in Centrifugal Force Field | ASME TURBO EXPO                                                                      | 2004       |    |
| 32 | 陈炎<br>吉洪湖<br>胡娅萍         | 硕士<br>正高<br>博士       | 023<br>023<br>023        | 致密微孔壁复合冷却对流换热系数研究                                                                                   | 中国工程热物理学会, 传热传质学会议                                                                   | 2004       |    |
| 33 | 胡娅萍<br>吉洪湖               | 博士<br>正高             | 023<br>023               | Numerical Study of the Effect of Blowing Angle on Cooling Effectiveness of an Effusion Cooling      | ASME TURBO EXPO                                                                      | 2004       |    |
| 34 | 胡娅萍<br>吉洪湖               | 博士<br>正高             | 023<br>023               | The Effect of Blowing Ratio on Effusion Cooling Effectiveness                                       | The 3 <sup>rd</sup> International Symposium on Heat Transfer and Energy Conseruation | 2004       |    |
| 35 | 胡娅萍<br>吉洪湖               | 博士<br>正高             | 023<br>023               | 平壁气膜冷却流场与温度的协同分析                                                                                    | 工程热物理学报                                                                              | 2004.25.01 |    |
| 36 | 张勃<br>吉洪湖<br>张靖周<br>高潮   | 博士<br>正高<br>正高<br>副高 | 023<br>023<br>023<br>023 | 网格格式肋化通道换热与总压损失特性研究                                                                                 | 航空动力学报                                                                               | 2004.19.02 |    |
| 37 | 张勃<br>吉洪湖<br>张靖周<br>高潮   | 博士<br>正高<br>正高<br>副高 | 023<br>023<br>023<br>023 | 肋的几何参数对网格格式肋化通道的传热与总压损失特性的影响                                                                        | 航空动力学报                                                                               | 2004.19.02 |    |
| 38 | 范育新<br>王家骅<br>李建中<br>张义宁 | 副高<br>正高<br>博士<br>博士 | 023<br>023<br>023<br>023 | PDE 加力装置研究                                                                                          | 新概念发动机研讨会技术交流文集                                                                      | 2004       |    |
| 39 | 范育新<br>王家骅<br>李建中<br>张义宁 | 副高<br>正高<br>博士<br>博士 | 023<br>023<br>023<br>023 | PDE 内奇异爆震波形成机理研究                                                                                    | 第十一届全国激波与激波管学术会议                                                                     | 2004       |    |
| 40 | 范育新<br>王家骅<br>李建中<br>张靖周 | 副高<br>正高<br>博士<br>正高 | 023<br>023<br>023<br>023 | 脉冲爆震发动机工作过程控制和协调试验                                                                                  | 推进技术                                                                                 | 2004.25.06 |    |
| 41 | 范育新<br>王家骅<br>李建中<br>张靖周 | 副高<br>正高<br>博士<br>正高 | 023<br>023<br>023<br>023 | 脉冲爆震发动机净推力系数研究                                                                                      | 南京航空航天大学学报                                                                           | 2004.36.03 |    |

## 目 录

| 序号 | 姓名                              | 职称                         | 单位                              | 论文题目                     | 刊物、会议名称            | 年、卷、期      | 类别 |
|----|---------------------------------|----------------------------|---------------------------------|--------------------------|--------------------|------------|----|
| 42 | 张义宁<br>王家骅<br>范育新<br>李建中<br>张靖周 | 博士<br>正高<br>副高<br>博士<br>正高 | 023<br>023<br>023<br>023<br>023 | 两态混气脉冲爆震发动机隔离段研究         | 新概念发动机研讨会技术交流文集    | 2004       |    |
| 43 | 李建中<br>王家骅<br>范育新<br>张义宁<br>张靖周 | 博士<br>正高<br>副高<br>博士<br>正高 | 023<br>023<br>023<br>023<br>023 | 燃用航空煤油脉冲爆震发动机部分充填机理研究    | 新概念发动机研讨会技术交流文集    | 2004       |    |
| 44 | 李建中<br>王家骅<br>范育新<br>张义宁<br>张靖周 | 博士<br>正高<br>副高<br>博士<br>正高 | 023<br>023<br>023<br>023<br>023 | 燃用航空煤油脉冲爆震发动机爆震波压力特性     | 第十一届全国激波与激波管学术会议   | 2004       |    |
| 45 | 李建中<br>王家骅<br>范育新<br>张靖周<br>张义宁 | 博士<br>正高<br>副高<br>正高<br>博士 | 023<br>023<br>023<br>023<br>023 | 脉冲爆震发动机最大净推力和最佳工作频率      | 推进技术               | 2004.25.06 |    |
| 46 | 李建中<br>王家骅<br>范育新<br>张靖周        | 博士<br>正高<br>副高<br>正高       | 023<br>023<br>023<br>023        | 多循环脉冲爆震发动机净推力估算          | 推进技术               | 2004.25.03 |    |
| 47 | 郑殿峰<br>王家骅                      | 副高<br>正高                   | 023<br>023                      | 扰流片对汽油/空气脉冲爆震发动机爆震波压力的影响 | 推进技术               | 2004.25.06 |    |
| 48 | 韩启祥<br>王家骅                      | 副高<br>正高                   | 023<br>023                      | 三管、旋转阀脉冲爆震发动机原理样机研究      | 新概念发动机研讨会技术交流文集    | 2004       |    |
| 49 | 何小民<br>王家骅                      | 副高<br>正高                   | 023<br>023                      | 绕流器对燃烧特性的影响研究            | 第十一届全国激波与激波管学术会议   | 2004       |    |
| 50 | 何小民<br>王家骅                      | 副高<br>正高                   | 023<br>023                      | 气动阀式两相脉冲爆震发动机性能初步研究      | 新概念发动机研讨会技术交流文集    | 2004       |    |
| 51 | 何小民<br>王家骅                      | 副高<br>正高                   | 023<br>023                      | 气动阀式两相脉冲爆震发动机研究          | 航空学报               | 2004.25.06 |    |
| 52 | 夏姝<br>常海萍                       | 博士<br>正高                   | 023<br>023                      | 离心力场下多孔介质中自然对流的稳定性分析     | 中国工程热物理学会, 传热传质学会议 | 2004       |    |
| 53 | 夏姝<br>常海萍                       | 博士<br>正高                   | 023<br>023                      | 重力场下单循环与双循环小通道热驱动比较研究    | 工程热物理学报            | 2004.25.06 |    |

# 目 录

| 序号 | 姓名                       | 职称                   | 单位                         | 论文题目                                                                                                | 刊物、会议名称                     | 年、卷、期      | 类别 |
|----|--------------------------|----------------------|----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|------------|----|
| 54 | 杨敏<br>常海萍<br>房治有         | 博士<br>正高<br>本科       | 014<br>023<br>023          | 旋转条件下带冷却通道的热驱动换热实验研究和冷却效果比较                                                                         | 中国工程热物理学会, 传热传质学会议          | 2004       |    |
| 55 | 杨敏<br>常海萍<br>毛军逵         | 博士<br>正高<br>中级       | 014<br>023<br>023          | 离心力场下 H <sub>2</sub> O 和 R <sub>12</sub> 热驱动换热特性试验研究                                                | 工程热物理学报                     | 2004.25.02 |    |
| 56 | 杨卫华<br>张靖周<br>程惠尔        | 中级<br>正高<br>正高       | 023<br>023<br>上海交大         | 变截面微小通道传热特性的研究                                                                                      | 中国工程热物理学会, 传热传质学会议          | 2004       |    |
| 57 | 杨卫华                      | 中级                   | 023                        | 青年教师如何早日站稳台                                                                                         | 南京航空航天大学学报 (社会科学版)          | 2004.06.30 |    |
| 58 | 杨卫华<br>程惠尔<br>王平阳<br>吴利俊 | 中级<br>正高<br>副高<br>博士 | 023<br>上海交大<br>交大          | 推力室喉部层板发汗冷却段的设计分析                                                                                   | 推进技术                        | 2004.25.04 |    |
| 59 | 杨卫华<br>张靖周<br>程惠尔        | 中级<br>正高<br>正高       | 023<br>023<br>交大           | 弯曲微小通道的流阻特性                                                                                         | 上海交通大学学报                    | 2004.38.10 |    |
| 60 | 杨卫华<br>程惠尔<br>蔡岸         | 中级<br>正高             | 023<br>上海交大                | Thermal Analysis for Folded Solar Array of Spacecraft in Orbit                                      | Applied Thermal Engineering | 2004.24.00 |    |
| 61 | 刘德彰<br>黄金泉               | 正高<br>正高             | 023<br>021                 | 学院教学指导小组在提高课堂教学质量中的作用                                                                               | 南京航空航天大学学报 (社会科学版)          | 2004.06.28 |    |
| 62 | 魏民祥<br>闫桂荣<br>郭万林        | 正高<br>正高<br>正高       | 022<br>西安交大<br>013         | 基于信息熵原理的结构振动传感器的布局                                                                                  | 仪器仪表学报                      | 2004.25.06 |    |
| 63 | 魏民祥<br>郭万林<br>闫桂荣<br>杜昌海 | 正高<br>正高<br>正高<br>初级 | 022<br>013<br>西安交大<br>山东理工 | 柔性结构复合振动的向量控制及实验研究                                                                                  | 机械科学与技术                     | 2004.23.02 |    |
| 64 | 赵又群<br>尹浩                | 正高<br>博士             | 022<br>022                 | Matrix Perturbation Method for Motion stability Analysis of Vehicle with Four Wheel Steering System | 第七届国际地面-车辆系统学会亚太会议论文集       | 2004       |    |



## 具有预旋进气的转-静盘腔流动与换热的数值研究

张羽 王锁芳

(南京航空航天大学能源与动力学院 南京 中国 210016)

**摘要:** 本文对具有预旋进气、轴向进气和外围屏封严出气、冷却叶片出气的转-静盘腔结构的流动和传热过程进行了数值计算研究,文中研究了旋转雷诺数、无量纲质量流量和预旋角对盘腔内流动换热过程的影响。对不同预旋角的工况下,采用了 RNG  $k-\varepsilon$  模型,对盘腔进行了二维轴对称数值模拟,结果与文献中结果一致,表明本文的计算方法是合理的,计算结果揭示了该型盘腔结构的流动传热基本特征和规律。

**关键词:** 转静盘腔; 冷却叶片; 流动传热; 预旋

## Numerical Investigation for Flow and Heat Transfer Inside Rotor-Stator Cavity with Pre-swirl Inflow

Zhang Yu Wang Suo-fang

(College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** In this paper the computation of flow and heat transfer was conducted inside a rotor-stator cavity with two air inflows (pre-swirl inflow and axial inflow at stator rim respectively) and two outflows (blade-cooling air outflow at rotor rim and radial outflow at outer shroud respectively). The effect of rotating Reynolds number, nondimensional mass flow rate and pre-swirl angle on the flow and heat transfer inside rotor-stator cavity was analyzed. Two-dimensional axisymmetric numerical simulation with different pre-swirl angles inside a rotor-stator cavity was carried out by using RNG  $k-\varepsilon$  model. The result shows good agreement with reference. It is stated that the result is reasonable and reflects the basic characteristics of flow and heat transfer inside this rotor-stator cavity.

**Key words:** rotor-stator cavity; blade-cooling; flow and heat transfer; pre-swirl

## 引言

国外早在七十年代就对冷却预旋系统进行了研究, Owen<sup>[1][2]</sup> 等人对只有预旋进气, 冷却叶片出气的盘腔进行了二维轴对称计算, 提出了预旋系统的理论框架, 并揭示了流动参数对转盘中速度、压力、努谢尔数的影响。国内近来也对冷却预旋系统进行了大量的研究, 丁水汀、徐国强等人<sup>[3]</sup> 将某型发动机的实际涡轮盘腔冷却结构简化成外缘预旋进气的旋转空腔模型, 但仅仅采用了实验的方法研究了旋转雷诺数、冷气雷诺数、哥拉晓夫数对主盘局部换热及流阻特性的影响; 张靖周、吉洪湖和王锁芳<sup>[4]</sup> 在盘腔的核心区采用标准的  $k-\varepsilon$  模型, 近壁区采用低雷诺数  $k-\varepsilon$  模型, 对具有径向进流的转-静盘腔结构的流动和传热过程进行了数值计算, 并没有对具有预旋进气和轴向进气的盘腔进行计算; 冷萍和张靖周<sup>[5]</sup> 对转-静盘腔进行了三维模拟, 研究了旋转雷诺数、无量纲质量流量和预旋比对盘腔内流动换热的影响, 并没有说明预旋角

的改变对盘腔换热效果的影响。本文把离散的预旋孔等效成等面积的环面, 由于盘腔结构大多数具有轴对称特征, 所以采用 RNG  $k-\varepsilon$  模型对具有轴向进气、预旋进气和封严出气和冷却叶片出气的转-静盘腔进行数值计算, 进一步研究旋转雷诺数、无量纲质量流量对盘腔内流动换热的影响, 并且研究了在不同预旋角的工况下, 盘腔内流动换热的情況。

## 1 计算域

图 1 所示为本文计算的有轴向进气、预旋外缘进气和外围屏封严出气、冷却叶片出气的转-静盘简化模型。计算域包括转盘、静盘、内围屏和外围屏围成的区域。盘面的外半径  $b = 200\text{mm}$ , 转盘离转轴的距离  $a = 50\text{mm}$ , 转静盘之间的间隙  $s = 30\text{mm}$ , 静盘上有一个轴向进流环面, 径向间隙为  $5\text{mm}$ ; 外围屏处有一个径向出流环面, 轴向间隙为  $2\text{mm}$ ; 预旋孔直径为  $3.78\text{mm}$ , 冷却叶片孔直径为  $8.02\text{mm}$ , 预旋孔和冷却叶片孔中心到转轴的距离分别为  $r_p$ 、 $r_b$ ,  $r_p = r_b = 189.57\text{mm}$ 。

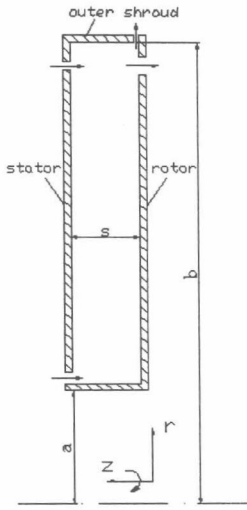


图1 旋转盘腔的结构示意图

## 2 数值计算

### 2.1 湍流模型

本文采用 RNG  $k-\varepsilon$  模型，控制方程<sup>[6]</sup>如下所

示：

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x}(\rho u \phi) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v \phi) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta}(\rho w \phi) \\ &= \frac{\partial}{\partial x}(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\Gamma r \frac{\partial \phi}{\partial r}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta}(\frac{\Gamma}{r} \frac{\partial \phi}{\partial \theta}) + S \end{aligned}$$

广义扩散系数：

$$u, v, w : \Gamma = \eta_{eff} = \eta + \eta_t$$

$$k : \Gamma = \eta + \frac{\eta_t}{\sigma_k}$$

$$\varepsilon : \Gamma = \eta + \frac{\eta_t}{\sigma_\varepsilon}$$

$$T : \Gamma = \frac{\eta}{Pr} + \frac{\eta_t}{\sigma_T}$$

源项：

$$\begin{aligned} u : S &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}(\eta_{eff} \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \eta_{eff} \frac{\partial v}{\partial x}) \\ &+ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta}(\eta_{eff} \frac{\partial w}{\partial x}) \\ v : S &= -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial x}(\eta_{eff} \frac{\partial u}{\partial r}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \eta_{eff} \frac{\partial v}{\partial r}) + \end{aligned}$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta}[\eta_{eff} \frac{r \partial (w/r)}{\partial r}] - \frac{2\eta_{eff}}{r} (\frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial \theta} + \frac{v}{r}) + \frac{\rho w^2}{r}$$

$$w : S = -\frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta} + \frac{\partial}{\partial x}(\eta_{eff} \frac{\partial u}{r \partial \theta}) +$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}[r \eta_{eff} (\frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta} - \frac{w}{r})] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta}[\eta_{eff} (\frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial \theta} + \frac{2v}{r})]$$

$$+ \frac{\eta_{eff}}{r} [r \frac{\partial (w/r)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta}] - \frac{\rho v w}{r}$$

$$k : S = \rho G_k - \rho \varepsilon$$

$$G_k = \frac{\eta_t}{\rho} \{ 2[(\frac{\partial u}{\partial x})^2 + (\frac{\partial v}{\partial r})^2 + (\frac{\partial w}{r \partial \theta} + \frac{v}{r})^2] +$$

$$(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial x})^2 + (\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{r \partial \theta})^2 + (\frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta} + \frac{\partial w}{\partial r} - \frac{w}{r})^2 \}$$

$$\varepsilon : S = \frac{\varepsilon}{K} (c_1 \rho G_k - c_2 \rho \varepsilon)$$

模型中的系数：

$$c_\mu = 0.09 \quad c_1 = 1.44 \quad c_2 = 1.92$$

$$\sigma_k = 1.0 \quad \sigma_\varepsilon = 1.3 \quad \sigma_T = 0.9 \sim 1.0$$

### 2.2 网格分布

由于转盘的泵吸作用，在转盘的近壁面处将形成 Ekman 边界层，在边界层内速度和温度的梯度变化非常剧烈，为了得到在近壁区内变量的精确解，所以应该在转盘附近需要布置密致的网格。为了达到这个要求，在转盘的壁面沿轴向  $z$  采用非均匀网格，布置 9 层边界层网格。将网格的第一层布置在  $z = 0.1mm$  处，然后按照几何级数 1.1 增长，其余采用结构化四边形网格。在涡轮盘腔的流动和换热研究中，由于简化后的盘腔结构大多数具有轴对称特征，因此使用两维轴对称的模型就可以大致了解盘腔内的流动和换热情况，而且这种简化也可以大大减少计算中的工作量，故将整个计算区域划分为  $53 \times 151$ （轴向  $\times$  径向）个节点，对盘腔进行二维轴对称的数值模拟。

### 2.3 边界条件

在流体与固体壁面的交界面上，采用了无滑移边界条件，即

静止壁面:  $U = V = W = k = 0, \frac{\partial \varepsilon}{\partial n} = 0, \frac{\partial p}{\partial n} = 0$

旋转壁面:  $U = V = 0, W = \Omega r, k = 0, \frac{\partial \varepsilon}{\partial n} = 0, \frac{\partial p}{\partial n} = 0$

进口:  $U = U_{in}, V = V_{in}, W = W_{in}, k = k_{in}, \varepsilon = \varepsilon_{in}$

出口: 采用压力出口, 出口压力取 1 个大气压,

即  $1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$

静盘和外围屏取为绝热壁面

转盘的外边界取为恒热流密度

$q = 5000 \text{ W/m}^2$ 。

### 3 计算结果分析

数值计算中流动参数范围:

$1.14 \times 10^5 < \text{Re}_\theta < 2.57 \times 10^5$ ,

$1838 < C_w < 3216, 20^\circ < \theta < 22^\circ$

图 2 是在  $\text{Re}_\theta = 2.57 \times 10^5, C_{wp} = 1838$ ,

$C_{wd} = 1838$ , 预旋角  $\theta = 20^\circ$  条件下, 预旋进口的

速度矢量图。预旋进气流受到轴向进气流的冲击, 向外偏移, 同时又受到外围屏的阻断作用, 形成了三股气流: 一股气流在静盘与外围屏之间形成回流; 另一股气流从外围屏的轴向间隙流出, 从而有效地达到了封严的作用; 还有一股从冷却叶片孔流出, 从而起到冷却的效果, 这与文献[5]中计算结果一致。

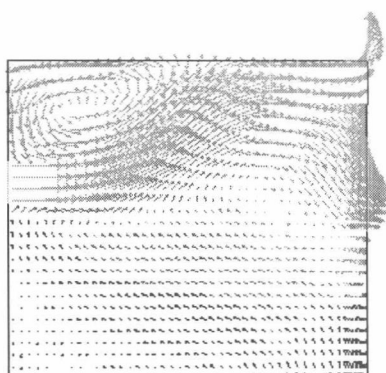


图 2 速度矢量图

图 3 是在  $\text{Re}_\theta = 2.57 \times 10^5, C_{wp} = 1838$ ,

$C_{wd} = 1838$ , 预旋角  $\theta = 20^\circ$  条件下, 有预旋进气

和轴向进气的切向速度等值线图。在图上可以清楚地看到, 由于转盘的泵吸作用, 在转盘的附近形成了 Ekman 边界层, 在边界层中切向速度等值线图较密, 内转静盘腔的其余部分切向速度较低, 但从预旋喷嘴进入的气流具有较高的切向速度, 从而使整个预旋盘腔具有较高的切向速度。有一部分预旋进气流从冷却叶片孔流出, 从而带动了冷却叶片孔内气体的切向速度较高, 因此叶片冷却孔的静温则相对较低, 达到冷却的效果。

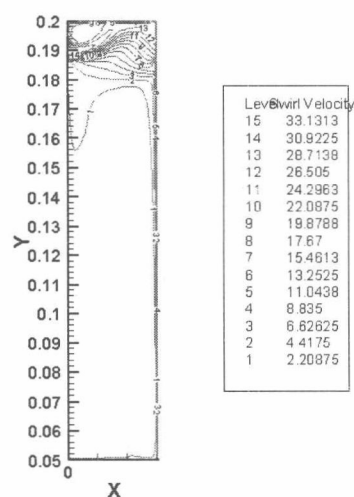
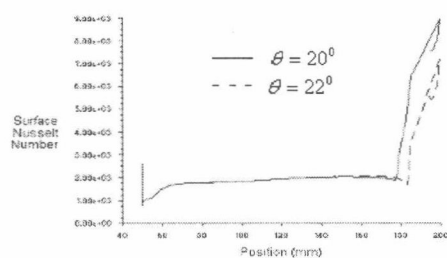
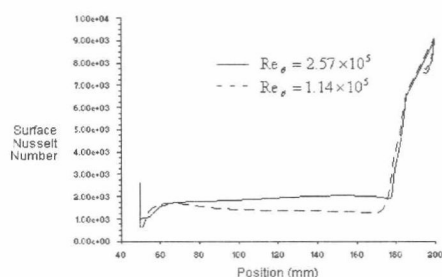


图 3 切向速度等值线图



(a)  $\text{Re}_\theta = 2.57 \times 10^5, C_{wp} = C_{wd} = 1838$



(b)  $C_{wp} = C_{wd} = 1838, \theta = 20^\circ$

2001, June 4-7

- [3] 丁水汀, 徐国强, 陶智等. 外缘预旋进气的旋转进气的旋转空腔主盘局部换热及流阻特性研究[J]. 推进技术, 1998, 19 (6): 45-49
- [4] 张靖周, 吉洪湖, 王锁芳. 具有径向进出流的转-静盘腔流动和换热的数值研究[J]. 工程热物理学报, 2001, 22 (增刊)
- [5] 冶萍, 张靖周. 有预旋进气转静盘腔中的流动和换热特性数值研究[J]. 航空动力学报, 2004, 19 (3): 370-374
- [6] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1992.

# 同步旋转盘射流冲击换热液晶显示实验研究

栾海峰 王锁芳

(南京航空航天大学能源与动力学院 南京 中国 210016)

**摘要:** 采用热色液晶定量测温技术对以空气为工质的稳态射流冲击换热和有同步旋转的射流冲击换热进行了实验研究。与普通射流相比,低转速时的冷却范围和对流换热系数随雷诺数的增大而增大;高转速时的冷却范围受雷诺数的影响较小。随着转速的提高,同步旋转射流冷却中心偏移量增大,冷却范围变小,平均换热系数减小。

**关键词:** 冲击换热; 同步旋转; 液晶显示

## EXPERIMENTAL STUDY OF HEAT TRANSFER OF JET IMPINGEMENT ON SYNCHRONIC ROTATIONAL DISK WITH LIQUID CRYSTAL TECHNIQUE

LUAN Hai-Feng WANG Suo-Fang

(Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, College of Energy and Power  
Engineering, Nanjing 210016 China)

**Abstract** The heat transfer rate of jet impingement, both with and without synchronic rotation, has been studied experimentally using thermal liquid crystal technique. Compare with the common jet, the cooled scope increased with the increasing Re at the low rotor speed while the cooled scope is not sensitive with the Re at the high rotor speed. With the increasing rotor speed, the rotor center deviation magnified and the cooled scope becomes small and the average heat transfer coefficient decreased.

**Key words** heat transfer of impingement; synchronic rotation; liquid crystal

### 1 引言

热色液晶测温技术是利用热色液晶随温度变化迅速改变其反射光颜色的特性,在现代光学、光电仪器及计算机图像技术的支持下,提供温度场的定量分布信息。它是一种集定量采集和图像显示双重功能于一体的高技术测温手段。近年来在航空航天、工程热物理等领域中,得到愈来愈广泛的应用。

射流冲击冷却是在受冲击表面上的强迫对流换热过程,对于冷却表面局部高温区域相当有效。由于流体直接冲击需要冷却的表面,流程短而边界层很薄,文献[1]的研究表明驻点区的射流冲击冷却换热系数比通常的管内换热要高出几倍至一个数量级。

随着科学技术的迅猛发展,各种热设备的工作温度在不断提高。单纯的射流冲击冷却有时已不能满足需要,因此近年来,人们已经开始对复合强化传热技术进行研究。所谓复合强化传热技术,即两种或两种以上的强化措施同时应用,以期获得更好的传热效果。本实验的目的是在射流冲击盘面的同时,使喷嘴和受冲击转盘同步旋转,以期获得切向空气来流,并采用液晶显示技术获得被冷却壁面温

度场分布及其变化规律,进而得到对流换热系数的变化规律。测定无旋转时的射流在稳态条件下的换热系数,作为同步旋转射流换热的比较基准,以探讨射流冲击冷却和同步旋转这两种强化方式的复合效果。

### 2 实验系统及方法

#### 2.1 实验系统

实验系统如图1所示,它由气体管路系统、电加热系统、电动机旋转实验平台及图像采集系统四部分组成。

气体管路系统由室内压气机、稳压腔(节流阀)、压力表、湿式气体流量计、喷嘴、管件等组成。电加热系统由被加热件(冲击靶)、标准电阻、数字式电压计、硅式整流器、导线等组成,其中喷嘴的内径  $D = 0.9\text{mm}$ ,喷嘴与冲击靶的距离为  $Z = 28\text{mm}$ ,冲击靶为厚度  $H = 0.01\text{mm}$ 、面积  $S = 98\text{cm}^2$  的康铜膜,其背部为厚度  $6\text{mm}$  的有机玻璃,起支撑和隔热保温作用。电动机旋转实验平台由 JZTY41-4 型交流电磁调速电动机、驱动皮带、转轴、防护罩等组成。电动机的转速范围为  $0 \sim 1500$

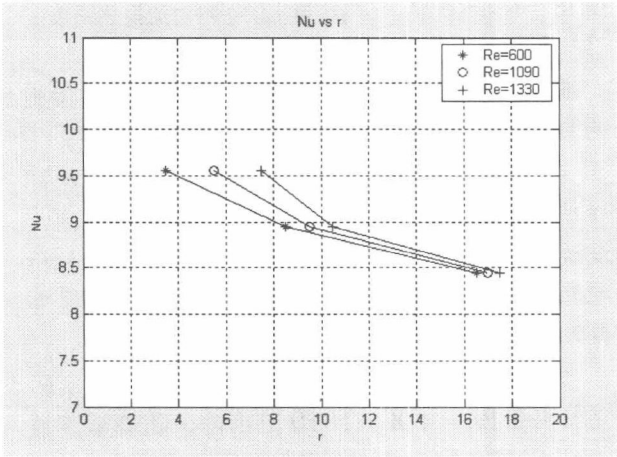


图4  $\omega = 0$  时不同  $Re$  下的  $Nu$  数分布

对于不同转速的情况，采用相同直径的喷嘴和冲击距进行实验。将实验结果与普通射流相比，见图5，这是不同转速时  $Re = 1330$ 、 $h = 255 W/m^2$  的液晶照片叠加图，其中1代表  $\omega = 0rpm$ 、2代表  $\omega = 100rpm$ 、3代表  $\omega = 200rpm$ 、4代表  $\omega = 400rpm$ 、5代表  $\omega = 800rpm$ 、绿点为喷嘴位置。显然随着转速的增大，冷却中心发生偏移，且转速越大偏移量越大（见图6），冷却的范围随着转速的增大而减小（见图7），且形状愈来愈趋向椭圆（见图5）。

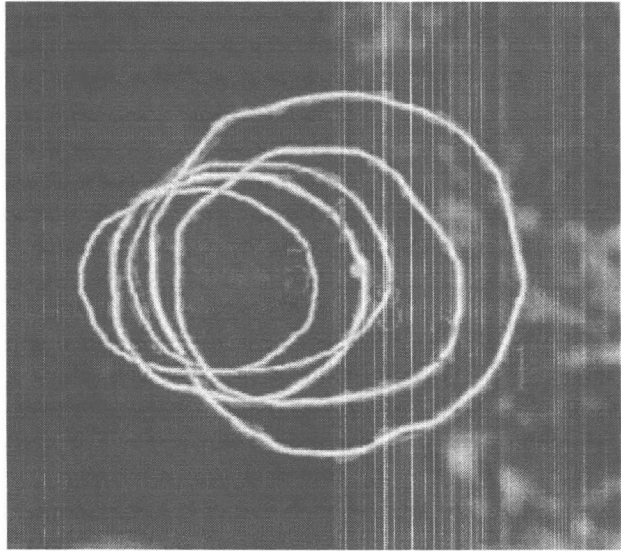


图5 不同转速时的液晶照片叠加照片  
( $Re = 1330$ 、 $h = 255 W/m^2$ )

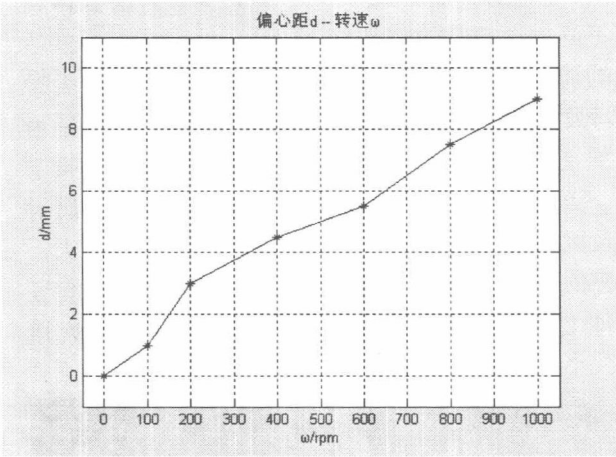


图6 不同转速时的冷却中心偏移量

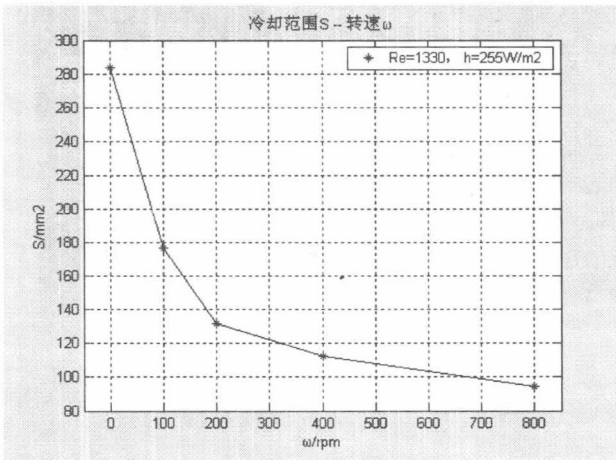


图7 不同转速时的冷却范围面积  
( $Re = 1330$ 、 $h = 255 W/m^2$ )

对于转速较低 ( $\omega < 400rpm$ ) 时，以  $\omega = 100rpm$  为例，得到其液晶叠加照片（见图8），从中可以发现其冷却中心偏移较小，随着雷诺数的增大冷却范围也增大；色带区分清晰，说明此时横流对射流的影响较小，冷却效果较好。

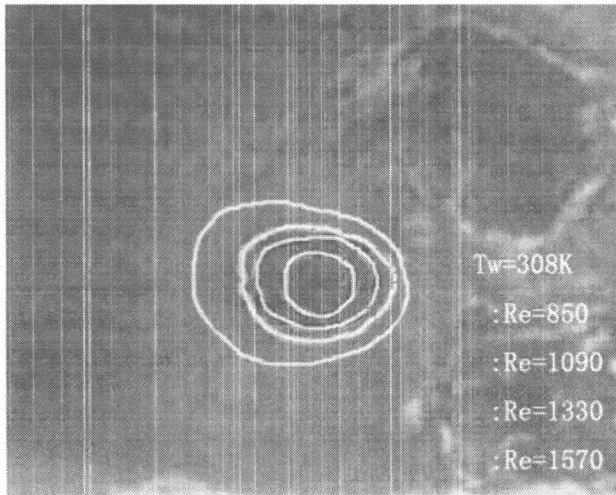


图8  $\omega = 100rpm$  时的液晶叠加照片

# 扰流柱形状对流动换热特性影响的数值研究

王奉明<sup>1</sup> 张靖周 王锁芳

(南京航空航天大学能源与动力学院, 南京, 210016)

**摘要:** 运用 FLUENT-CFD 商用软件对装有圆形、准水滴形、椭圆形和水滴形四种扰流柱叉排阵列矩形通道内流动和换热进行了三维数值模拟, 获得了通道内流场、压力场以及局部对流换热系数分布的基本特征, 并对扰流柱通道得换热特性和压力损失特性进行了对比分析。计算结果表明: 装有水滴形扰流柱阵列的矩形通道压力损失为前三者的 44.1%、70.5% 和 79.8%, 而恒热流壁面的平均对流换热系数相对于前三者而言分别降低了 18.5%、12.4% 和 3.8%, 压力损失降低的幅度明显高于强化换热的减弱。水滴形扰流柱是一种具有综合性能、替代常规圆形扰流柱的理想结构。

**关键词:** 强化传热; 压力损失; 水滴形扰流柱; 数值计算

**中文分类号:** V213.3; V211.3

**文献标识码:** A

## Numerical Study for Effects of Pin Fin Shapes on Flow and Heat Transfer Characteristics in Rectangular Passage

Wang Feng-ming Zhang Jing-zhou Wang Suo-fang

(Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** FLUENT-CFD Software is used to simulate the flow and heat transfer process in rectangular passage with staggered arrays of circle-shaped, similar-drop-shaped, elliptic-shaped and water drop-shaped pin fins. The velocity fields, pressure fields, temperature fields and the local convective heat transfer coefficients are obtained and the enhancement of heat transfer and the pressure loss characteristics with different fin pins are compared. It is found that the pressure loss of drop-shaped fin pins is 66.3%, 70.5% and 79.8% of the former three fin pins while the average heat transfer coefficient on the uniform heat flux endwall decreases 18.5%, 12.4% and 3.8% compared with the former three fin pins, respectively. The wall heat transfer enhancement capability reduced weakerly than the pressure loss. So that the water drop-shaped fin pins is a promising alternative configuration to circle-shaped fin pins.

**Key words:** enhanced heat transfer; pressure loss, drop-shaped pin fins; numerical calculation

## 1 引言

涡轮叶片尾缘主要采用多排扰流柱结构以强化换热, 在加强了叶片冷却效果的同时也带来了很大的流动损失。Metzger 等<sup>[1]</sup>对不同直径和高度的圆形扰流柱在不同排列方式下进行了实验研究, 发现扰流柱的直径、高度和排列间距是影响其传热效果和压力损失的三个主要因素。Sparrow<sup>[2]</sup>对叉排菱形扰流柱群的强化换热和压力损失效果进行了研究, 比较了顶角为 45° 和 90° 的扰流柱的压力损失情况及强化换热特性。Li 等<sup>[3]</sup>通过实验对椭圆形扰流柱的强化换热效果和压力损失进行了研究, 并与在相同扰流柱排列间距下、具有相同周长的圆形扰流柱进行了比较, 发现前者的换热系数比后者有了一定的提高, 且压力损失仅为后者的 44~58%。Uzol 和 Camci<sup>[4]</sup>通过实验比较了圆形、标准椭圆和加长椭圆三种形状不同、具有相同横向尺寸扰流柱后部尾迹区的换热特性和压力损失特性, 发现圆形扰流柱的传热系数比标准椭圆和加长椭圆的高出 25-30%, 压力损失系数却高出 100-200%。Chen 和 Li 等<sup>[5]</sup>设计了一种准水滴型扰流柱, 李庆领和丛培军<sup>[6]</sup>对内安装有截面为圆柱形、椭圆形和准水滴形扰流柱的矩形通道的阻力特性进行了实验研究, 表明准水滴形扰流柱的阻力性能优于圆形及椭圆形的。

对于常规的非流线型扰流柱的流动和传热特性, 国内外众多学者作了详细研究, 明确了其规律和机理, 但还没有对流线型的扰流柱做任何研究报道。本文设计了一种横截面形状为水滴型的扰流柱, 并运用商用 FLUENT-CFD 软件, 对具有相同横截面积的水滴形扰流柱和常规的圆形、椭圆形和类水滴形扰流柱<sup>[5]</sup>在相同排列方式下叉排阵列的强化换热特性和压力损失特性进行了数值模拟和对比分

逐渐降低直至完全滞止。对于圆形扰流柱，绕流分离点位置从前驻点起约为  $110^\circ$ ，扰流柱尾迹中的卡门涡结构非常明显；对于水滴形扰流柱，由于其良好的流线外形，即使是在扰流柱的尾部区域，流体仍与扰流柱接触，几乎不发生分离及涡的脱落。

### 3.2 扰流柱内部压力场分析

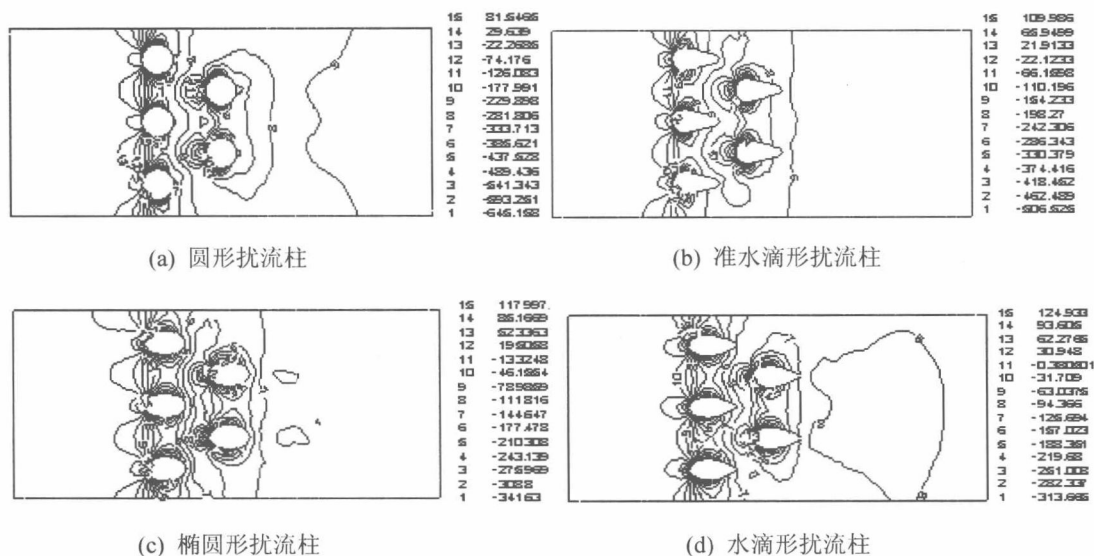


图2 矩形通道中截面静压分布图

图2为通道内压力分布的计算结果。可以看出，在扰流柱前缘，由于速度滞止造成在驻点局部区域出现相对较高的静压值；在最小流通截面处，也就是扰流柱之间最大宽度处扰流柱的表面附近，由于气流的加速，存在一低压区；气流经过扰流柱排后再通过一段光滑通道恢复至出口环境压力，因此在后排扰流柱区域大都出现相对低的静压分布。

对于不同形状扰流柱矩形通道，其通道进出口的静压差分别为：圆形 227.31Pa；准水滴形 132.30Pa；椭圆形 116.56Pa；水滴形 93.94Pa。若引进压力损失系数  $C_p = (P_{in} - P_{out}) / (\rho_m u_m^2 / 2)$  [4] 来表示流动损失（其中  $P_{in}$  和  $P_{out}$  分别为通道进口和出口的平均压力），则可得到以上四者的压力损失系数依次为 1.92, 1.12, 0.99, 0.79。由以上数据可以得到：准水滴形扰流柱的压力损失是圆形扰流柱压力损失的 58.3%，这与文献[6]中水滴形柱排的压力损失仅为圆形柱排的 31~28%有不小的差距，这是由于截面形状的设计方法（本文所采用的四种扰流柱的截面积相等，而[6]中却是采用等周长扰流柱）和扰流柱的排列方式不同引起的，但在压力损失都明显降低的趋向上是一致的。椭圆形扰流柱的压力损失是圆形扰流柱的 51.6%，这与[1]中的所测数据（58%~44%）是基本吻合的。水滴形扰流柱的压力损失仅仅是圆形扰流柱压力损失的 41.1%。可见，在压力损失方面，水滴形扰流柱的低阻性能非常明显。

### 3.3 恒热流壁面局部对流换热系数的分布

由恒热流壁面局部对流换热系数的分布可以看出，扰流柱区的局部对流换热系数远远高于无扰流柱区域的，在扰流柱周围区域（尤其是在尾迹区）局部对流换热系数很大，特别是在气固耦合面上，局部对流换热系数的值高达 220 多。第二排扰流柱驻点前附近区域的对流换热系数要大于第一排扰流柱前的，这是由于流通截面的减小而引起柱面附近区气流速度增大以及前排扰流柱绕流尾涡的影响。扰流柱排后，随着绕流尾涡影响的减弱和冷气温度的升高，换热效果逐渐降低。

比较四种不同形状的扰流柱，圆柱形扰流柱排段的壁面局部对流换热系数主要集中在  $155 \sim 200 \text{ W/m}^2 \text{ K}$  范围内，在第一排扰流柱附近区域，局部对流换热系数的最大值处于扰流柱前缘附近区域和绕流尾涡区，这是柱前马蹄涡和柱后尾涡的影响作用；在第二排扰流柱附近区域，局部对流换热系数的最大值也位于这两个区域，但由于受前排扰流柱的影响，换热能力得到了进一步加强。准水滴形扰流柱排段的局部对流换热系数主要集中在  $150 \sim 192 \text{ W/m}^2 \text{ K}$  范围内，除马蹄涡和尾涡影响区域，扰流柱最大宽度略后区域的换热系数也比较高，这是由于气流在此处分离所引起的，其尾区的强化换

## 4 结论

(1) 圆柱形扰流柱的扰流尾涡要远远地强于准水滴形和椭圆形扰流柱, 而水滴形扰流柱的扰流尾涡很小, 这就保证了水滴形扰流柱的压力损失要小于前三者。计算结果表明, 水滴形扰流柱的压力损失系数分别是圆形、准水滴形和椭圆形扰流柱的 44.1%, 70.5% 和 79.8%, 具备了低阻的特性。

(2) 与其他三种截面形状的扰流柱相比, 水滴形扰流柱的强化换热效果略逊, 其恒热流壁面的平均对流换热系数相对于前三者而言分别降低了 18.5%, 12.4% 和 3.8%。

(3) 用特殊压力损失系数来权衡, 水滴形扰流柱的特殊压力损失系数分别是圆形、准水滴形和椭圆形扰流柱的 52.1%, 82.0% 和 84.7%, 是一种具有较高综合性能的新型扰流柱。

## 参 考 文 献

- [1] Metzger D E, Berry R A, Bronson J P. Developing heat transfer in rectangular duct with staggered array of short pin fins. *Journal of Heat Transfer*. 1982,104:700~706
- [2] Q. Li *et al.* Heat transfer and pressure drop characteristics in rectangular channels with elliptic pin fins. *Int. J. Heat and Fluid Flow*. 1998,19: 245-250
- [3] Sparrow E M, Grannis V B. Pressure drop characteristics of heat exchangers consisting of arrays of diamond-shaped pin fins. *Int. J. Heat Mass Transfer*. 1991,34(3): 589-600
- [4] Uzo Q, Camci C. Elliptical pin fins as an alternative to circular pin fins for gas turbine blade cooling applications, part 1: endwall heat transfer and total pressure loss characteristics. *ASME Paper 2001-GT-0180*, 2001
- [5] Z.Chen, Q.Li, D.Meier, H.J.Warnecke, Convective heat transfer and pressure loss in rectangular ducts with drop-shaped pin fins. *Heat and Mass transfer*. 1997,33:219-224.
- [6] 李庆领、丛培军. 矩形通道内扰流柱形状对阻力特性的影响. *石油化工技术设备*, 1997, 18 (6): 42~44
- [7] 苏红桢、刘松龄. 扰流柱排内部流场的实验研究. *航空动力学报*, 1997,1.12(2): 175~179
- [8] 苏红桢、刘松龄、许都纯. 叉排形扰流柱排内部流场的实验研究. *航空动力学报*, 1998,1.18(2):51~55