

正四边形截面 90° 扭转通道发展段 传热与阻力特性的研究

王良璧 陶文铨

(西安交通大学能源与动力工程学院 西安 710049)

关键词 发展段, 传热与阻力特性, 正四边形直通道, 正四边形扭转通道

1 引言

燃气轮机中的叶片冷却问题现已成为传热学中一个重要研究领域。叶片内部冷却通道结构比较复杂, 沿翼弦方向各通道截面形状及面积不同, 在径向通道截面还在变化, 并且有扭转。自 80 年代以来, 叶片内部冷却的研究有比较大的进展^[1-4], 但仅限于没有扭转的通道。那么, 当通道扭转时与直通道有何区别呢? 特别是紊流发展段的传热与阻力特性的区别如何? 文献 [5-6] 研究了方形截面的扭转通道中层流充分发展段的与阻力与传热特性, 发现对于换热来说, 当四个壁面温度均匀时, 传热并没有增强, 还有所下降, 但当四个壁面温度不同时, 旋转的二次流使传热在不增加泵功率的情况下增强。有关发展段紊流研究的文献几乎没有。为了查明紊流发展段的流动与传热特性, 我们选用正四边形 90° 扭转通道及相同当量直径的正四边形直通道进行了实验及计算研究。

2 实验装置及数据处理

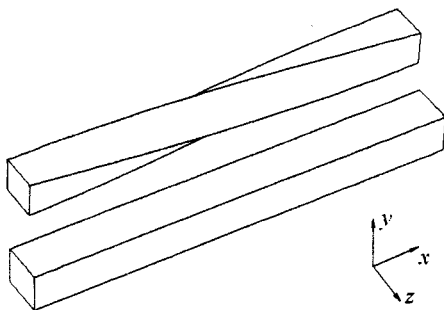


图 1 实验通道示意图

图 1 所示为截面 $50 \times 50 \text{ mm}^2$, 长 520 mm 的 90° 扭转通道及截面为 $50 \times 50 \text{ mm}^2$, 长 500 mm 的直通道。在扭转通道的一个壁面上分三列布置了 51 对热电偶 (每列 17 对)。加热方式为电加热。除装热电偶壁面外, 其余三面中线上开有 10 个测压孔。对于直通道, 相邻两侧面中心线上各装有 16 个热电偶, 并在一侧中线上开有 9 个测压孔。表示扭转程度的几何参数为: $H = \text{扭转为 } \pi \text{ 时管长} / D_m$, 本实验中 $H = 20$ 。取特性尺寸: $D_m = 4F/U$; 定性温度: $t_f = (1/2)(t_{in} + t_{out})$ 。主流方向平均温度用式 $t_b(x) = t_{in} + s(x) \cdot q / (mc_p)_f$

国家教委博士点基金资助项目。

本文曾于 1996 年 10 月在北京召开的中国工程热物理学会传热传质学学术会议上宣读。

确定, 这里 $s(x)$ 是流体从入口到 x 截面处流体受加热的面积。局部换热系数 h_x 、通道平均 Nu 及阻力系数 f 等按常规方式定义。

实验数据的不确定按文献 [7] 的方法分析, f 的最大不确定度为 9.2%, Nu 及 h_x 的最大不确定度各为 7.15% 及 7.22%。

3 计算方法及参数值的影响

本文采用全三维适体坐标系中的有限容积方法, 压力与速度耦合用 SIMPLE 算法 [8], 紊流模型采用标准 $k-\epsilon$ 模型 [9]。计算区域及网格如图 2 所示。边界条件如下: 进口采用均匀流速及均匀入口动能 k , 进口的 μ_t 与 ϵ 采用文献 [9] 中的方法来选取。出口条件均采用局部单向化。温度采用第二类边界条件, 在计算时采用附加源项法。

计算考核中发现: 入口脉动动能在 0.5~1.5% 水平内对计算结果几乎没有影响; Y^+ 、 Z^+ 的范围在 11.5~40 时计算结果与实验结果符合较好; 在 $Re_m = 1.0 \times 10^5$ 时, 三套网格 ($41 \times 16 \times 16$, $61 \times 16 \times 16$, $41 \times 21 \times 21$) 的计算结果偏差小于 1%, 从而计算中采用了 $41 \times 21 \times 21$ 的网格。

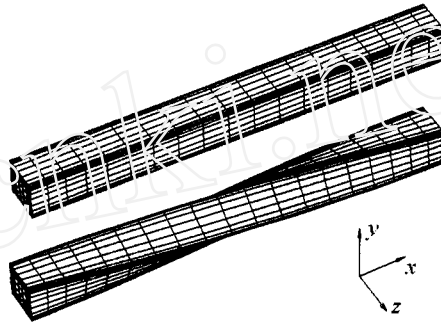
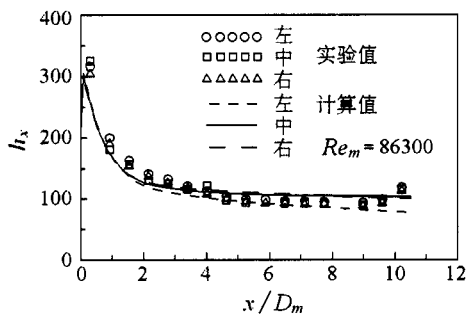


图 2 计算网格示意图

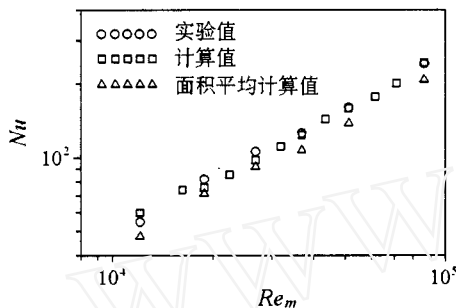
4 结果及分析

图 3 为正四边形直通道、正四边形扭转通道的实验结果及计算结果, 其中图 3(a) 为局部换热系数, 图 3(b) 为平均 Nu , 图 3(c) 为阻力系数 f 。计算结果与实验结果相符比较好, 阻力系数的偏差较大, 这主要是由于在实验与计算中计算压差的截面位置有所差别所致。对于平均值来说, Nu 与 f 都与 Re_m 呈指数规律变化。三条不同的线上的换热系数的计算值有所不同, 其中中心线上与其一条侧面线上的换热系数基本相同, 而另一条侧面线上的换热系数比较小。这两条侧面线上的这种不同分布与扭转方向有关。沿流动方向看, 如果是顺时针扭转, 则中线右侧的换热系数比较大, 左侧的比较小, 由于扭转角度比较小, 这种区别在实验值中没有反映出来。从图 4, 5 所示流场示意图上可以看出, 对于直通道, 横向流动很弱, 而且对称, 但对扭转通道, 在交角的部位有比较强的二次流动。对于同一侧面来说, 其中心线的两侧分别是二次流离开及二次流冲刷的部位, 由于二次流流动情形不同, 造成了同一侧面中心线两侧换热系数的不同。并且随着 x 的增大, 这种过程的强度增强, 从而同一侧面中线左右两侧的换热系数差别增大。

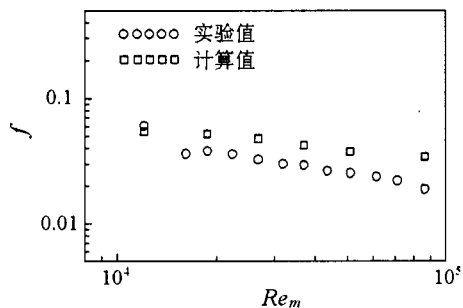
在相同质量流量及泵功率条件下的比较结果 (以计算值为依据), 如图 6 所示, 其中纵坐标为扭转通道与直通道的换热量之比, 从图上可以看出, 在相同质量流量及泵功率条件下, Q_t/Q_s 均大于 1。这与文献 [6] 中所研究的层流充分发展段等壁条件下的结论有所不同。从图 6 还可以看出, 在相同质量流量下, 换热的增强效果比相同泵功率下的要大。



(a) 局部换热系数



(b) 平均换热系数



(c) 平均阻力系数

图3 壁面中线上计算结果与实验结果的比较

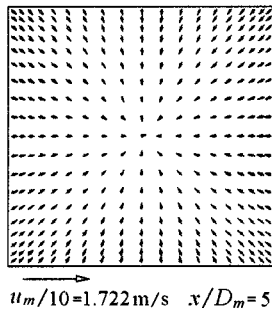


图4 直通道横截面速度分布

图4 (\$Re_m=29300\$)

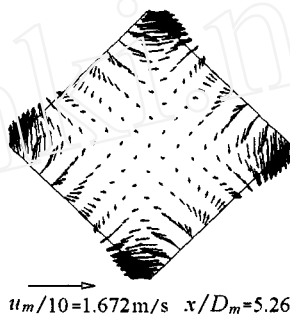


图5 扭转通道横截面速度分布

(\$Re_m=52300\$)

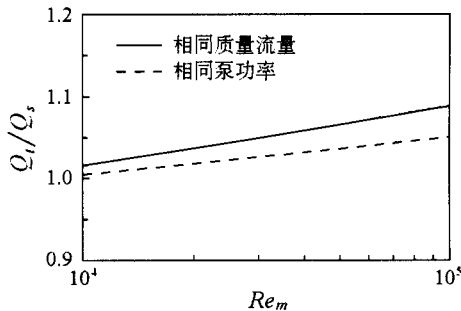


图6 扭转通道与直通道性能比较

5 结论

本文对正四边形截面扭转 90° 通道及正四边形截面通道进行了入口段紊流换热的实验与计算的对比研究, 计算结果与实验结果相符比较好。在传热特性方面, 扭转通道的横向的换热分布不同于直通道。在相同质量流量及泵功率条件下, 扭转通道有增强换热的效果, 并随着 Re_m 的增加, 效果更明显。在流动方面, 对于 $H = 20$ 的结构, 旋转流动仅发生在角部, 而核心区几乎没有二次流动。

参 考 文 献

- [1] Sparrow E M, Tao W Q. Enhanced Heat Transfer in a Flat Rectangular Duct with Streamwise-periodic Disturbance at One Principle Wall. *ASME J. Heat Transfer*, 1983, 105: 851-861
- [2] Sparrow E M, Tao W Q. Symmetric vs Asymmetric Periodic Disturbance at the Walls of Heated Flow Passage. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1984, 27: 2133-2144
- [3] Han J C, Park J S. Developing Heat Transfer in Rectangular Channels with Rib Turbulators. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1988, 31: 183-195
- [4] Liou T M, Hwang J J. Developing Heat Transfer and Friction in a Ribbed Rectangular Duct with Flow Separation at Inlet. *ASME, J. Heat Transfer*, 1992, 114: 565-573
- [5] Masliyah J H, Nandakumar K. Steady Laminar Flow through Twisted Pipes: Fluid Flow in Square Tubes. *ASME J. Heat Transfer*, 1981, 103: 785-790
- [6] Masliyah J H, Nandakumar K. Steady Laminar Flow through Twisted Pipes: Heat Transfer in Square Tubes. *ASME J. Heat Transfer*, 1981, 103: 791-796
- [7] Moffat R J. Contributions to the Theory of Single-Sample Uncertainty Analysis. *ASME J. Heat Transfer*, 1982, 104: 250-260
- [8] 王良璧, 陶文铨. 三维适体坐标系中有限差分交错网格与同位网格比较. 见: 第六届全国计算传热学会论文集, 1995, 460-465
- [9] 陶文铨. 数值传热学. 西安: 西安交通大学出版社, 1987

DEVELOPING HEAT TRANSFER AND FRICTION CHARACTERISTICS OF SQUARE DUCT WITH 90 DEG. TWIST

WANG Liangbi TAO Wenquan

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)

Abstract

The heat transfer and friction characteristics of 90 deg. twisted square duct were experimentally and numerically studied. With the constraints of same mass flow rate and same pumping power, the performance of twisted duct is compared with that untwisted duct. It is shown that the average heat transfer performance of twisted duct is better than that of untwisted one, and with the increasing of Re_m , the superiority of twisted duct to untwisted duct increases.

Keywords developing region, heat transfer and friction characteristics, square duct, twisted square duct