

Flow Characteristics Experimental Analysis of Heat Transfer Enhancement Techniques

Weimin Yang¹, Chonggang Han¹, Fengxiang Li², Changfeng Guan¹, Hua Yan¹, Zhen Zhang¹

¹Beijing University of Chemical Technology, Beijing, 100029

²Practical new-type patent examination department of State Intellectual Property Office of China, Beijing, 100088

Email: yangwm@mail.buct.edu.cn, hcg10qx12@163.com

Abstract: Visualization experiment, rotate speed measurement and PIV test gave an exhibition of disturbed flow field by TSAR from qualitatively to quantitatively. Rotate speed of rotors was theoretically deduced, considering geometrical, mass and viscous factors. A non-rotating flow velocity was believed to exist somewhere in the tube, which was primarily proved by PIV test. Axial flow velocity distribution of tube side combined with rotation of rotors, determined the flow state, such as radial mixing, turbulent intensity and vorticity. The interspace between two adjacent groups of rotors was named stagnant sect, flow characteristics in which were discussed in detail.

Keywords: tube side assembled rotors; heat transfer enhancement; flow field, PIV

强化传热技术的流场特性实验分析

杨卫民¹, 韩崇刚¹, 李锋祥², 关昌峰¹, 阎华¹, 张震¹

¹北京化工大学, 北京, 100029

²中华人民共和国知识产权局专利局实用新型审查部, 北京, 100088

Email: yangwm@mail.buct.edu.cn, hcg10qx12@163.com

摘 要: 本文通过可视化实验、转子转速测试和 PIV 流场测试, 对管程组合转子扰流的冷态流场特性进行了从定性到定量地分析。理论推导出转子转速公式, 认为影响转子转速的因素包括几何因素、质量属性因素和粘性因素。提出在管程存在无旋流速, 并通过 PIV 测试结果得到了初步验证。进而分析认为, 管程的轴向速度分布与转子旋转相结合, 决定了流体的流动状态分布, 如径向混流、湍流强度、涡量等。将相邻两组转子之间的空隙定为滞流区, 并对滞流区的流动特性进行了详细分析。

关键词: 管程组合转子; 强化传热; 流场; PIV

1 引言

建立高效、稳定的能源供应体系, 是保证国民经济和社会发展的基本要求。目前, 我国煤炭在一次能源消费中的比重约为 70%, 其中一半的煤炭被用于燃煤发电, 达 12 亿吨/年。截止到 2009 年底, 燃煤发电装机容量约占全国总装机容量的 76%, 实际发电量的 80% 以上。预计到 2020 年, 燃煤发电在我国电源结构中仍将维持在 60% 以上。为此提高燃煤发电效率降低单位发电煤耗具有重要意义。在火力发电厂中汽轮机冷端凝汽器的能量损失高达 60%, 是节能挖潜最重要的环节。凝汽器在运行过程中容易积污结垢, 一旦积污结垢其换热效

果急剧下降造成能源浪费和污染环境, 为此提高凝汽器换热效果并长期维持凝汽器高的换热效果有重要节能减排意义。针对凝汽器运行过程中存在的问题和建设节约型社会的需要, 北京化工大学研制成功了转子组合式强化传热与在线自清洁装置——“洁能芯”。

转子组合式强化传热装置是一种新型的强化传热装置, 具有在线自动清除污垢和强化传热双重功能。从作用机理角度讲, 转子组合式强化传热装置扰流强化传热涉及结构与流体的耦合、流体与热的耦合两个方面。关于流体流动与传热的关系已经有成熟的对流传热理论和场协同原理作为指导。然而, 结构与流体流动之间的相互作用, 还没有形成系统的理论。陶文铨院士曾表示: 过增元院士提出了温度场与速度场相互作用的场协

基金项目: 北京市自然科学基金项目 (3102013)

同原理,是传热学界的一场革命,那么如果有人能找出结构与流体的相互作用机制,必然是流体力学和传热学界的另一场革命。可见,研究结构与流体之间的耦合作用具有相当的难度,同时也具有重大的意义。本文以管程转子组合扰流强化传热技术作为研究对象,借助多种实验手段,对“洁能芯”转子与流体(水)的相互作用现象、机制进行定性或定量的分析。

2 转子转速测试

转子转速是体现转子在管程作用的最主要运动和动力学参数,其作用直接影响管程流体的流动状态分布以及强化传热效果。因此,研究影响转子转速的因素及其作用规律对分析流场具有重要的意义。林清宇等^[1]就曾对螺旋扭带和微型液轮机的转速进行了实验测定和理论分析,其研究认为螺旋扭带、微型液轮机等扰流元件的转速主要取决于其几何结构,并从运动学的角度推导出转速公式。而本文研究认为,影响转子转速的因素包括几何因素(转子结构)、质量属性因素(流体及转子的密度)和粘滞因素(流体与转子间的粘性附着作用、流体与转子材料间的接触角)。对于水介质,由于其粘度较低,且与转子材料间的接触角较大,仅考虑前两种因素。

2.1 测试装置

在可视化实验装置的基础上,采用涡轮流量计进行流量计量,流量计的前、后稳定段是内径为 40mm(与流量计通流直径相同),长度分别为 1000mm 和 200mm 的有机玻璃圆管;采用分流阀调节水流量;在测试位置对应的“洁能芯”转子上粘贴反光条,用光电测速仪测量转子转速。

2.2 测试结果

在上述实验平台和测试装置的基础上,对 19-100 和 19-400 两种“洁能芯”转子的转速进行测量。

“19-100”中的“19”代表转子外径为 19mm,“100”表示转子的导程为 100mm。19-100 的转子分别安装在 $\Phi 24$ 和 $\Phi 29$ 的管内,每根管 2 个测试点,共 4 个测试点;19-400 的转子安装在一根 $\Phi 29$ 的管内,共 2 个测试点。转子转速与水流速关系的测试结果如图 1 所示。

将同规格转子对应的数据合并为一组,并对数据进行线性回归,得到如图 2 所示的结果。19-100 转子转速线性回归线与 X 轴的交点对应的流速约为 0.03m/s;19-400 转子转速线性回归线与 X 轴的交点对

应的流速约为 0.25m/s。这与可视化实验中的起转流速基本一致。

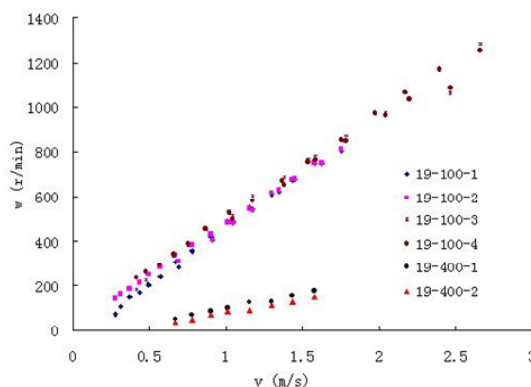


Fig 1. Measured data of rotate speed of rotors

图 1. 转子转速测试结果

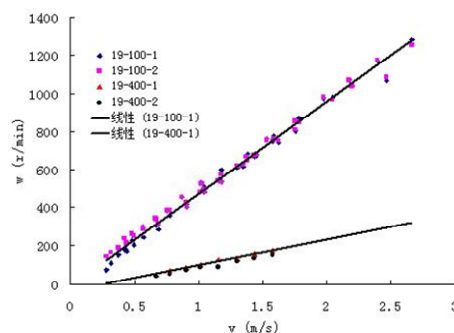


Fig 2. Linear regression of rotate speed of rotors

图 2. 转子转速的线性回归

2.3 转子转速的理论推导

通常认为,像“洁能芯”转子、螺旋扭带这样的管程扰流元件,其转速是与流体的轴向平均流速一一对应的,且成线性关系。而实质上,转子的转动是在流体压力场的作用下逐渐达到稳定状态的一个过程。很多文献对螺旋扭带等类似元件的转速进行了研究,其结论是元件的转速仅与流体平均流速和元件的几何参数(如扭曲比等)有关。而本文则以为,“洁能芯”转子的转速还与质量属性(流体及转子的密度)和粘滞因素(流体与转子间的粘性附着作用)有关,对于粘度较低的流体,可忽略粘滞因素的影响。

既然转子的转速是流场作用的一种平均效应,不妨做如下假设:(1)流体在流动中是连续的,流体不会与转子产生脱落;(2)中心流体做与转子旋向相反的旋转流动,具有平均的角速度;(3)对于水,忽略流体粘性以及其他结构因素带来的阻力,之后利用起

转速度对阻力项进行修正；(4) 当转子在稳定状态旋转时，动力矩与阻力矩达到平衡，认为转子与中心流体的相互作用遵循动量矩守恒。在此 4 条假设的前提下，看图 3 所示的管中的“洁能芯”的横截面视图。首先，将管程流体分为中心流体和环隙流体，仅中心流体与转子相互作用，而环隙流体对转子的作用在阻力项中加以考虑。当“洁能芯”转子从图 3 所示的实线位置 1 旋转至虚线位置 2 时，中心流体在轴向流动的同时，向着与转子转速相反的方向转过一个角度。基于流体的连续性假设和稳定状态的动量矩守恒假设，可得出如下关系式：

$$\omega_f \cdot j_f = \omega_r \cdot j_r \quad (1)$$

$$\omega_r + \omega_f = \frac{2\pi v}{L} \quad (2)$$

其中：

ω_f ——中心流体的平均旋转角速度，rad/s；

ω_r ——转子的旋转角速度，rad/s；

j_r ——转子的转动惯量，mg.mm²；

j_f ——中心流体的转动惯量，mg.mm²；

V ——中心流体的平均流速，m/s；

L ——转子的导程，mm；

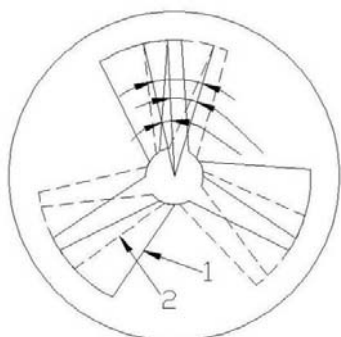


Fig 3. Phasic variation of a rotor in a tube

图 3. 转子在换热管中的相位变化

在计算转动惯量参数时，水的密度取为 1g/cm³，转子材料为 POM（聚甲醛），密度为 1.42 g/cm³。在平均流速计算时，要考虑转子横截面积对流通面积减少的影响。所有转子及水的几何结构参数、转动惯量等，均在 Pro Engineer 三维绘图软件中进行测量计算，将相关数据汇总如表 1 所示。

Table 1. Some useful data of rotors

表 1. 转子相关参数

转子类型	水转动惯量 mg.mm ²	转子转动惯量 mg.mm ²	转子横截面积 mm ²	转子横截面周长 mm
------	-----------------------------	------------------------------	---------------------------	---------------

14-380	6.15E+04	9.24E+03	33.0733	41.29002
14.5-380	7.13E+04	9.88E+03	33.5661	42.694572
15-380	8.21E+04	1.05E+04	34.0325	44.098509
15.5-380	9.42E+04	1.12E+04	34.4725	45.501876
16-380	1.08E+05	1.18E+04	34.8862	46.904664
16.5-380	1.22E+05	1.25E+04	35.2734	48.30699
19-100	2.37E+05	2.68E+04	49.4	55.427424
19-400	3.57E+05	3.80E+04	49.4	55.427424

在表 1 数据的基础上，对 19-100 和 19-400 两种规格转子的转速公式进行推导，考虑到与实验数据的对比，将各参数的量纲进行统一处理。将两种转子的参数代入式 (1) 和式 (2) 进行联立求解，并将求出的比例关系增加常数项进行阻力项修正。对于 19-100 的转子，令其起转流速为 0.03m/s；对于 19-400 的转子，令其起转流速为 0.25m/s。导出 19-100 转子和 19-400 转子的转速公式分别如下：

$$\omega_r = 539.04 \cdot v - 16.17 \quad \text{----- (19-100 转子) (3)}$$

$$\omega_r = 135.57 \cdot v - 33.89 \quad \text{----- (19-400 转子) (4)}$$

将导出的转速公式与实验测试数据进行比较，如图 4 所示。当转子转速较高时（超过 400r/min），出现径向振动撞击管壁，从而实测转速低于理论预测值。

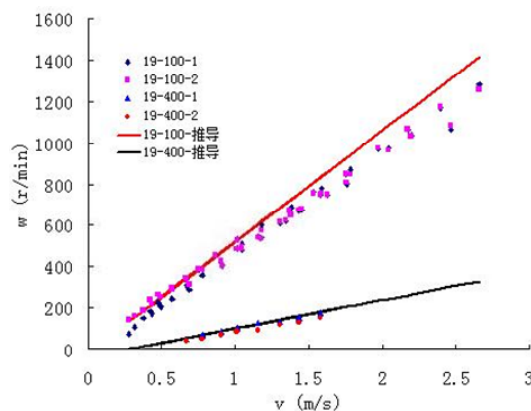


Fig4. Comparison between measured and derived data of rotate speed

图 4. 转速实测值与理论推导值的比较

3 基于 PIV 的流场显示

以上对于管程组合转子扰流的研究都停留在平均化的阶段，无法从根本上揭示管程流场的属性和各种流动参数的分布状态。PIV 技术的飞速发展及其精度的不断提高，为复杂流场甚至细微流场的显示提供了技术支持。本文研究借助二维 PIV 技术，对层流状态

下,管程组合转子扰流的流场进行显示和深入的剖析。

3.1 实验装置

3.1.1 PIV 装置^[2]

实验所用的粒子图像测速系统为美国 TSI 公司生产,该系统主要有以下几部分组成: Nd:YAG 双腔脉冲激光器及其附件一套,片光源透镜组一套,高帧速 CCD 相机两套,高时间分辨率同步器一台,高速数据接口板和轴编码器各一个,图像采集分析系统软件一套,计算机一台。

3.1.2 管程组合转子 PIV 测试装置

对可视化实验装置进行改造,用于管程组合转子扰流的 PIV 测试。主要有两处改动:一是将上述有机玻璃圆管中的“洁能芯”转子材料改为 PMMA (有机玻璃);二是在上侧有机玻璃圆管外侧增加一个方形套管。改造的目的是为后面的折射率匹配和消除实验误差做准备。

3.2 折射率匹配

通过在有机玻璃圆管外侧增设方形套管,防止了激光通过管壁时的折射和无规反射。然而,有机玻璃的“洁能芯”转子在管内不停的旋转,如果流体的折射率不能与有机玻璃的折射率相等,必然造成激光更加复杂的折射与反射,导致 PIV 测试无法进行。因此,需要对有机玻璃的折射率进行匹配。鉴于有机溶剂容易对有机玻璃具有溶解性,考虑用无机溶液对有机玻璃折射率进行匹配。F. Hendriks 和 A. Aviram^[3]最早报道了一种采用 ZnI 溶液进行折射率匹配的方法,用 60 %质量浓度的 ZnI 溶液可与 PMMA 达到令人满意的折射率匹配。然而,由于 ZnI 过于昂贵,本文不予采用。2000 年, T. L. Narrow 等^[4]在大量实验的基础上提出了关于 NaI 水溶液折射率的一个简单模型,将该模型与实测数据进行比较,符合十分精确。2001 年, O. Uzol 等^[5]在 T. L. Narrow 研究的基础上,将其研究结果应用到了涡轮泵流场的 PIV 测试中。采用 64 %质量浓度的 NaI 溶液对 PMMA 的折射率进行匹配,并测试了溶液的粘度为 $1.1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, 与水的粘度十分接近。Yassin A. Hassan 和 E.E. Dominguez-Ontiveros^[6]也是利用 NaI 溶液对有机玻璃微球进行折射率匹配,研究卵石床反应堆中的流动特性,并将折射率匹配效果进行了清晰的对比,如图 5 所示。

NaI 溶液具有优良的折射率匹配特性和与水相近的粘度,而且其价格仅为 ZnI 的一半左右,约为

580¥/kg。本研究采用 NaI 溶液作为折射率匹配液。64 %质量浓度的 NaI 溶液,其密度约为 1.8 g/cm^3 ,粘度为 $1.1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$,对有机玻璃、示踪粒子等没有溶解性和腐蚀性。

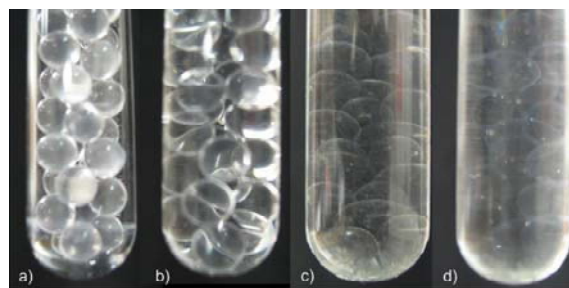


Fig5. PMMA balls in different medium: a) air; b) water; c) p-cymene; d) sodium iodide solution

图 5. 有机玻璃球在三种介质中: a) 空气; b) 水; c) p-cymene; d) NaI 溶液

3.3 示踪粒子选择

示踪粒子的选取和散布在 PIV 测试过程中是一个很重要的环节。由于在 PIV 图像中实际上是示踪粒子的像代表着流场流速的全部信息,因此,选取适当的示踪粒子是 PIV 测量流场的关键问题之一。在选取示踪粒子时,首先应该保证示踪粒子具有良好的跟随性,同时为了提高测量精度,要求粒子的形状为球形,对激光具有较高的折射率。此外还必须对示踪粒子的浓度进行控制。

由于本文研究的管程组合转子扰流,其环隙流体的径向尺度仅为 2mm 左右,因此,需要选用尺度较小的示踪粒子。先后采用了两种示踪粒子:(1) TSI 公司的空心玻璃微珠,粒径 8-12 微米,密度约为 1.5 g/cm^3 ,适合于水或与水的比重接近的液体流场;(2) 立方天地公司的罗丹明 B 荧光粒子,粒径 8-10 微米,密度约为 1.5 g/cm^3 ,适合于水或与水的比重接近的液体流场。在最终的实验中,由于装置中有微小气泡附着在转子上,为了消除气泡的影响,采用罗丹明 B 荧光粒子作为示踪粒子,捕捉到了清晰的粒子分布图像,如图 6 所示。

3.4 影响实验精度的因素

PIV 测量速度的精度^[7]取决于粒子位移测量的精度和脉冲时间间隔的控制精度。产生 PIV 测量误差的原因主要有以下随机误差、加速度误差、速度梯度误差、系统误差、跟随性误差、布朗运动引起的误差这些误差中,有些可以通过选择恰当的示踪粒子及其撒

布密度来避免,如跟随性误差、系统误差等;有些可通过增大系综样本数来进行均化消除,如布朗运动引起的误差;有些误差如速度梯度误差,则是无法避免的。一般 PIV 的测量误差在 0.5%~5%之间。

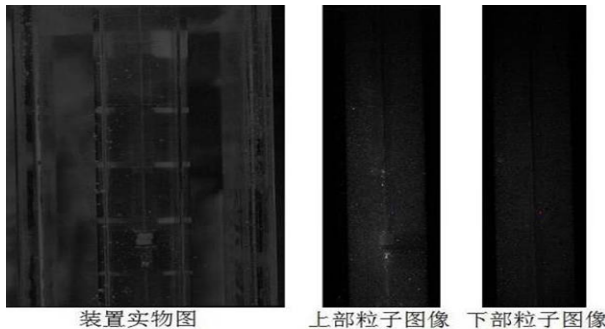


Fig 6. mage of fluorescent particles

图 6. 荧光粒子分布图像

3.5 流场显示

采用 NaI 溶液进行有机玻璃的折射率匹配,选择粒径 8-10 微米的罗丹明 B 荧光粒子作为示踪粒子,在测试装置的基础上,对管程组合转子扰流的流场特性进行显示和分析。由于所采用 NaI 溶液的密度大于转子材料 (PMMA) 密度,转子会受到浮升力的作用,为了消除浮升力对转子正常运转带来的不利影响,将测试装置竖直放置进行最终的 PIV 测试 (见图 6)。另外,由于所采用的测试装置较小,无法消除流体出入口效应的影响,因此,本文研究所得的结果还不能等价于完全的管程组合转子扰流结果。且该 PIV 实验处于层流区。

由于转子的转速无法事先进行准确的标定,因此,测试分析过程中不进行相位平均速度的计算,仅考虑系综平均速度。系综样本数为 500,分别对装置上部和下部的流场进行测试,分别得到了速度场、X 方向湍流强度、Y 方向湍流强度和涡量的分布,如图 7 至图 10 所示。由于装置加工精度的问题,装置放置时略微向左侧倾斜 (见图 6),再加上有机玻璃圆管的尺寸精度不足,采用其规格内径 24mm 进行标定时,导致部分近管壁的数据丢失:上部左侧近管壁处的部分数据丢失;下部左、右两侧侧近管壁处部分数据丢失。

上部和下部由图 6 实物图中的白色垫片和与其紧邻的限位元件进行界定,由于该区域处于两组转子之间,称之为滞流区域。滞流区域对应于上部的 Y 值区间约为 (-97, -110),对应于下部的 Y 值区间约为 (-29, -42)。上部、和下部存在部分重合区域。由图 7 可看

出,速度场分布在径向呈低-高-低-高-低的规律,在滞流区呈现出较混乱的状态;从上、下部的对比来看,速度场从上到下逐渐趋于稳定,是入口效应逐渐削弱的结果。图 8 显示, X 方向的湍流强度在径向呈高-低-高-低-高的分布规律,可见 X 方向湍流强度与剪切效应的显著程度有直接关系;而在滞流区,由于流体向中心急剧地混合,从而形成较大湍流强度。图 9 显示, Y 方向湍流强度与速度场呈相似的分布规律,在滞流区中心有强化。由图 10 可见,涡量分布与 X 方向湍流强度有一定的相似性,不过由于涡量具有方向性,对轴线呈反对称分布,局部有纵向涡产生。在滞流区中心涡量杂乱无序。

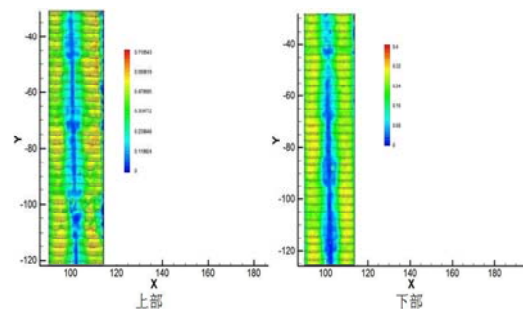


Fig 7. Distribution of flow velocity

图 7. 速度场分布

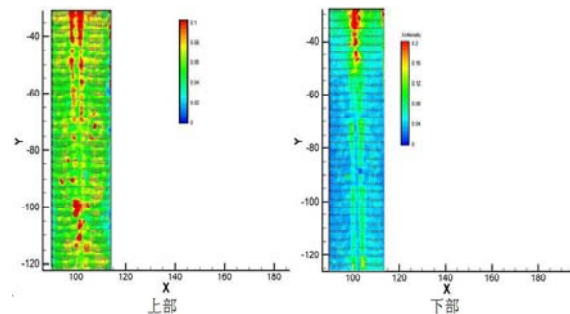


Fig 8. Distribution of X-intensity

图 8. X 方向湍流强度分布

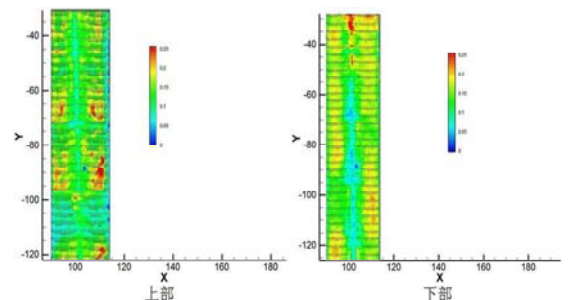


Fig 9. Distribution of Y-intensity

图 9. Y 方向湍流强度分布

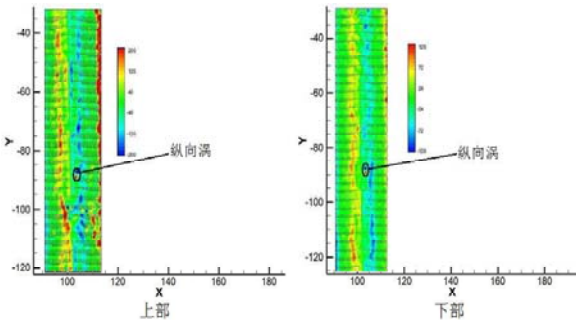


Fig 10. Distribution of vorticity
图 10. 涡量分布

4 轴向速度分布对流动状态的影响

与光管相比，管程增加组合转子造成固体边界的增加而改变了管程的轴向速度分布。而轴向速度分布与转子旋转相结合，进而影响管程流体径向混流、旋流、湍流强度和涡量的分布情况。本节将结合 PIV 测试获得的轴向速度分布结果，分别讨论其在转子旋转的作用下，对径向混流、湍流强度和涡量分布的影响。为此，分别在上部选取 9 个截面，在下部选取 10 个截面，对比分析各流动状态参数在径向和轴向的变化规律。对处于滞流区的上部 7#、8#截面和下部 1#、2#截面进行了单独讨论。所选取截面的编号及其所对应的 Y 坐标值见表 2。

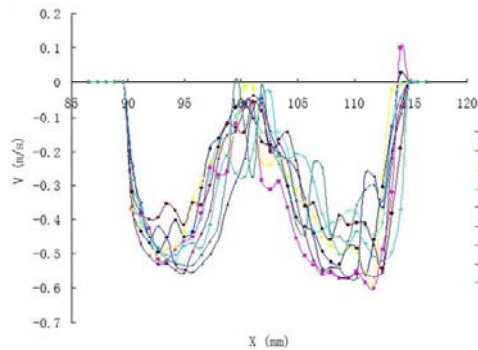


Fig 11. Distribution of axial flow velocity of upside half
图 11. 上部轴向流速分布

Table 2. Serial number and coordinate position of selected sections
表 2. 截面编号与坐标值 (*号表示处于滞流区, ^表示处于滞流区边缘)

上部	编号	1	2	3	4	5	6	7*	8^	9	
	Y 值	-40	-50	-60	-70	-80	-90	-100	-110	-120	
下部	编号	1*	2^	3	4	5	6	7	8	9	10
	Y 值	-30	-40	-50	-60	-70	-80	-90	-100	-110	-120

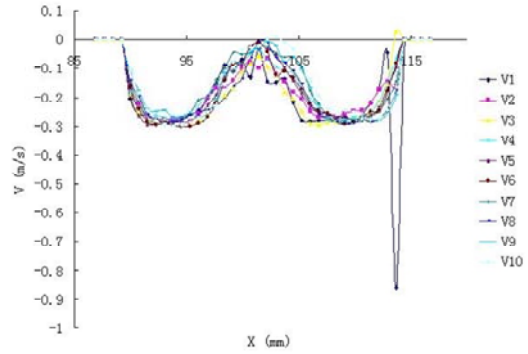


Fig 12. Distribution of axial flow velocity of underside half
图 12. 下部轴向流速分布

图 11 为上部 9 个截面上的轴向流速分布，图 12 为下部 10 个截面上的轴向流速分布。可见，管程组合转子扰流轴向速度的径向分布呈现为双峰曲线，为了便于说明，将其简化如图 13 所示。图中 r 为圆管内径， V 为轴向平均流速， v_{nr} 为无旋流。 V 通过流量和通流面积计算，再按照式(1)和式(2)计算转子转速 ω_r ，进而通过下式计算无旋流 v_{nr} ：

$$v_{nr} = \omega_r * L / 2\pi \quad (5)$$

其中 v_{nr} 小于平均流速 V ，如图 13 所示。

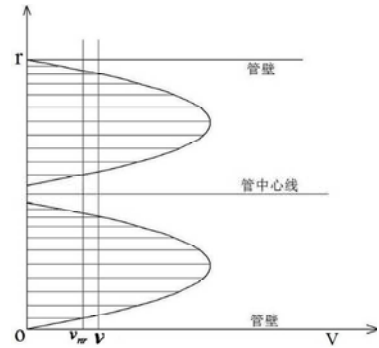


Fig 13. Tube side distribution of axial flow velocity
图 13. 管程轴向流速分布示意图

所谓无旋流，是指如果流体按照该流速流动，恰好可以适应管程转子的螺旋变化，从而可直线通过管道，不受转子结构的阻碍。该流速的引入是为了讨论管程流体平均旋流状态的分布规律，认为以该流速为分界线，管程流体将产生具有不同方向、不同程度的旋流，从而强化了管程流体的剪切作用和径向混合。以此为基础，从以下三个方面讨论轴向速度分布对流动状态的影响。

4.1 对径向混流的影响

管程流体径向的速度分量及其变化规律是衡量径向混流程度最直观的指标。截取表 2 所列出的 19 个截面, 对管程组合转子扰流的 X 方向速度分量 U 进行对比分析, 上部 9 个截面和下部 10 个截面的结果分别如图 14 和图 15 所示。

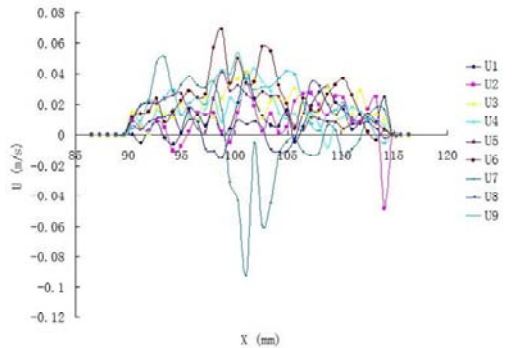


Fig 14. Distribution of radial flow velocity of upside half

图 14. 上部径向流速分布

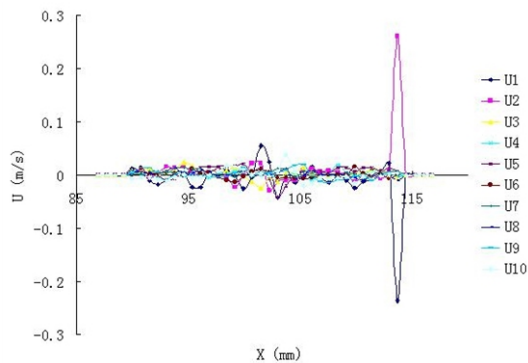


Fig 15. Distribution of radial flow velocity of underside half

图 15. 下部径向流速分布

由图 11 和图 12 可知, 管程流体轴向最高流速约为 0.6m/s, 平均流速约为 0.2m/s; 由图 14 和图 15 亦可看出, 管程流体的径向平均速度可达 0.02-0.03m/s, 最高达到近 0.1m/s。也就是说, 在组合转子扰流作用下, 管程流体的径向速度达到了轴向流速的 10% 以上, 而且速度方向存在正负交替, 足见径向混流效应显著。可以认为, 是转子旋转和轴向速度分布相耦合, 造成不同位置的管程流体发生不同程度、甚至不同方向的旋流, 进而促成了流体的复杂径向混合。值得注意, 下部 1#和 2#截面处, 由于激光强度不够, 所测得贴近壁面数据出现较大偏差。

4.2 对湍流强度分布的影响

湍流强度定义为流体脉动速度的均方根与当地平均速度绝对值之比, 与雷诺数一起, 是衡量流体湍动程度的重要指标。对于二维 PIV 测试来说, 存在两个方向的速度, 因此, 也就存在对应的两个湍流强度 (X 方向湍流强度 X-intensity; Y 方向湍流强度 Y-intensity)。截取表 2 所列出的 19 个截面, 对管程组合转子扰流的 X-intensity、Y-intensity 进行对比分析, 结果分别如图 16 至图 19 所示。

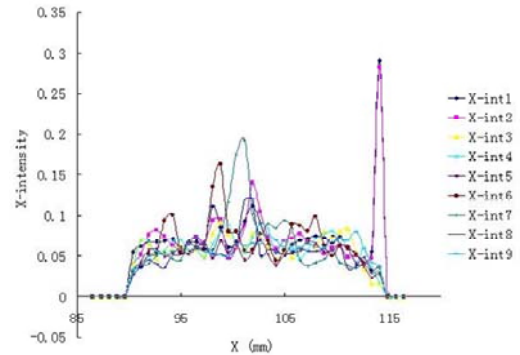


Fig 16. Distribution of X-intensity of upside half

图 16. 上部 X 方向湍流强度分布

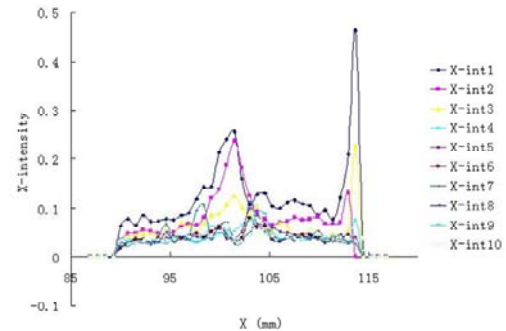


Fig 17. Distribution of X-intensity of underside half

图 17. 下部 X 方向湍流强度分布

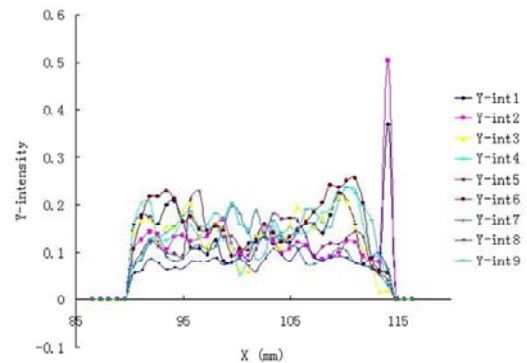


Fig 18. Distribution of Y-intensity of upside half

图 18. 上部 Y 方向湍流强度分布

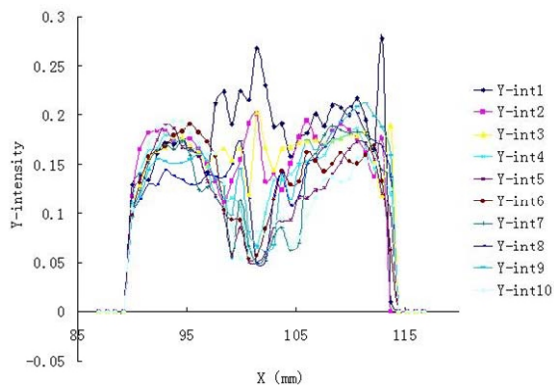


Fig 19. Distribution of Y-intensity of underside half

图 19. 下部 Y 方向湍流强度分布

考虑到由于标定的原因, 左侧近壁处部分数据丢失, 按照图 16 和图 17 中 X 方向湍流强度的分布规律, 对丢失数据进行增补, 那么 X 方向的湍流强度沿管程径向呈高-低-高-低-高分布, 在轴向流速对应的低流速区 (见图 11 和图 12) 出现较大的径向湍流强度。这恰恰符合上文关于无旋流动分界线的说法: 偏离无旋流的低流速区, 其速度梯度最大, 从而旋流梯度也最大, 剪切效应最显著。对于 Y 方向的湍流强度, 其分布基本与轴向速度分布一致, 只是滞流区的分布曲线有所不同, 将在下文进行讨论。

4.3 对涡量分布的影响

速度场的旋度称为涡量。上文提及管程组合转子扰流造成不同位置的流体具有不同的旋流程度。那么, 涡量就是用来衡量所谓旋流程度的矢量。通过上、下部共 19 个截面的涡量分布, 进一步验证上文关于无旋流和轴向速度分布对旋流分布影响规律的观点。涡量是速度的旋度, 具有方向性。因此, 涡量有正负之分。上部 9 个截面的涡量分布如图 20 所示; 下部 10 个截面的涡量分布如图 21 所示。

如果忽略涡量的方向性, 仅考虑其大小。由图 20 和图 21 可见, 涡量在管程径向呈高-低-高-低-高-低-高的反对称分布。涡量的极大值分别出现在两侧近壁处和管轴线两侧, 共 4 个极值点; 涡量的零值出现在管轴线和无旋流对应位置附近。由此, 上文关于无旋流的观点得到进一步证实。

4.4 滞流区的流动状态

上文关于轴向流速、径向流速、湍流强度和涡量的所有线图中, 均包含了处于滞流区域的两个截面 (上部 7#和下部 1#) 和处于滞流区域边缘的两个截面 (上部 8#和下部 2#)。由于滞流区位于两组转子之间, 不存在由于转子而增加的固体边界, 也不存在转子扰流, 增加的是由于尺寸突变而引起的流体剧烈的混合, 其流动特性区别于其它位置。接下来分别对滞流区截面上的轴向速度、径向速度、湍流强度和涡量分布进行对比分析。

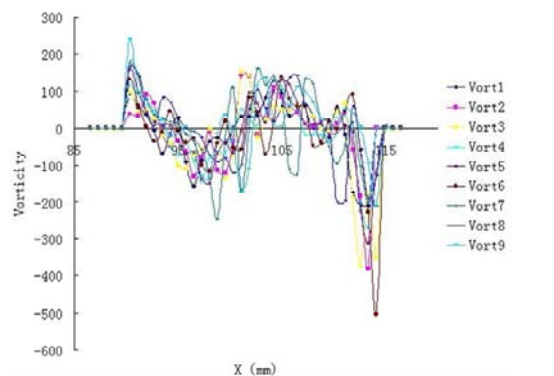


Fig 20. Distribution of vorticity of upside half

图 20. 上部涡量分布

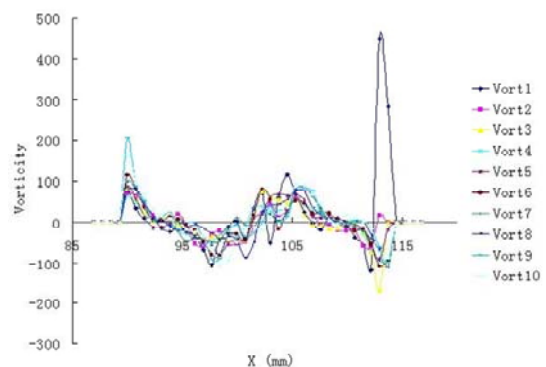


Fig 21. Distribution of vorticity of underside half

图 21. 下部涡量分布

图 22 所示, 为上部 7#和 8#截面的轴向速度分布图。其中 7#截面处于滞流区, 由图可见其轴向速度出现剧烈的振动, 尤其是在管轴线附近。可以认为, 7#截面上轴向速度不稳定是源于滞流区由于流通尺寸突变而引起的流体混合。相比较而言, 8#截面的轴向速度分布就稳定得多, 基本与管程其它截面的分布规律一致, 只是还存在稍许波动。这是因为 8#截面已经处于滞流区边缘, 流体的混合已经基本完成, 达到稳定。

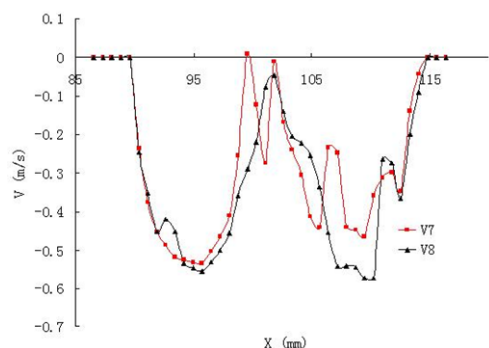


Fig 22. Axial flow velocity on 7# and 8# section of upside half

图 22. 上部 7#和 8#截面的轴向流速

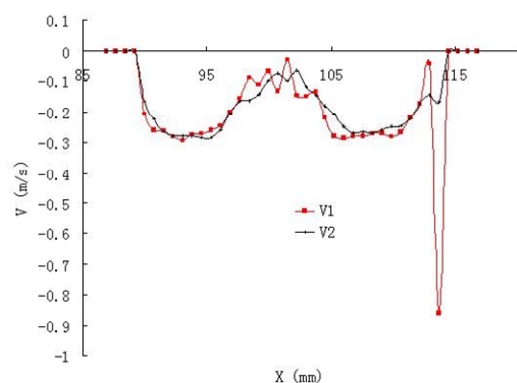


Fig 23. Axial flow velocity on 1# and 2# section of underside half

图 23. 下部 1#和 2#截面的轴向流速

图 23 为下部 1#和 2#截面的轴向速度分布。其中 1#截面处于滞流区，轴向速度波动较大，尤其是在管中心位置附近。2#截面处于滞流区边缘，其轴向速度相对稳定得多。另外，由于上部和下部的 1#和 2#截面皆处于激光照射面的上部区域，激光强度较弱（从图 8 的粒子分布可以看出），从而导致少数数据出现较大偏差。所有关于流动状态分布的线图中，在这四个截面上靠近右侧壁面处数据的剧烈突变，都是由上述原因引起。但该数据并不影响各流动状态参数整体规律的判定。

图 24 所示为上部 7#和 8#截面的 X 方向流速（径向流速）分布。7#截面处于滞流区，其管中心线附近出现剧烈的速度波动；8#截面处于滞流区边缘，速度变化相对平稳。这同样是流体在滞流区急剧混合的体现。

图 25 所示为下部 1#和 2#截面的 X 方向流速（径向流速）分布。1#截面处于滞流区，同样是管中心线附近出现剧烈的速度波动；2#截面处于滞流区边缘，

速度变化相对平稳。由于激光强度不足的原因，在靠近右侧壁面处，数据出现坏点。

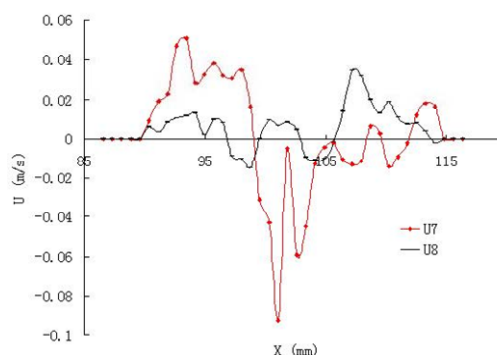


Fig 24. Radial flow velocity on 7# and 8# section of upside half

图 24. 上部 7#和 8#截面的径向流速

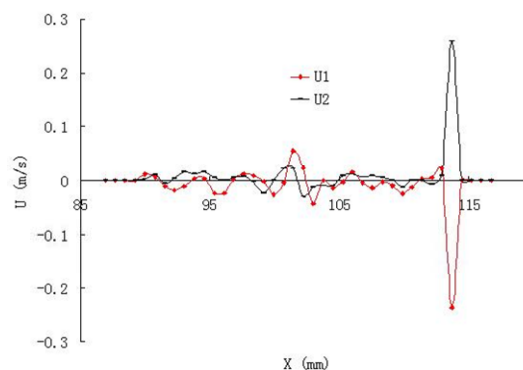


Fig 25. Radial flow velocity on 1# and 2# section of underside half

图 25. 下部 1#和 2#截面的径向流速

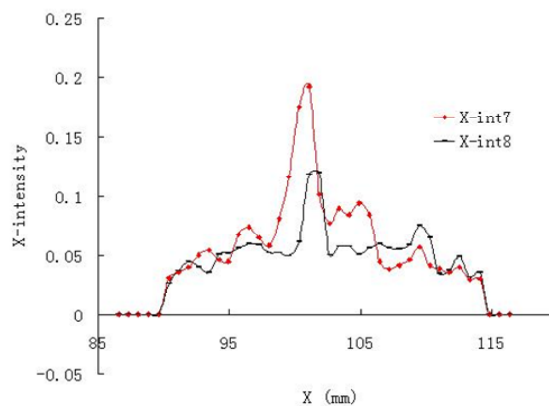


Fig 26. X-intensity on 7# and 8# section of upside half

图 26. 上部 7#和 8#截面的 X 方向湍流强度

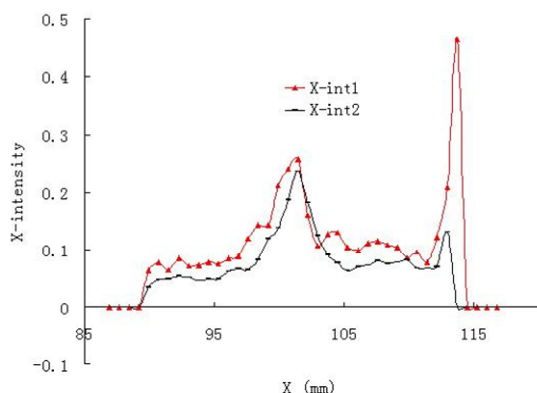


Fig 27. X-intensity on 1# and 2# section of underside half

图 27. 下部 1# 和 2# 截面的 X 方向湍流强度

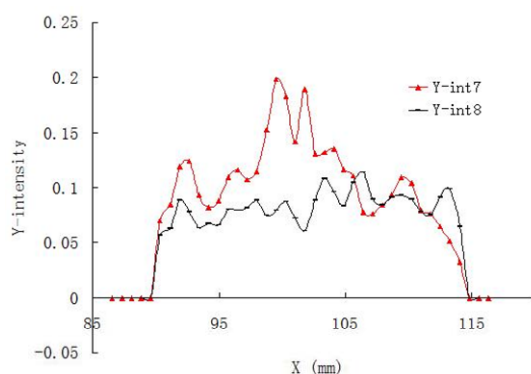


Fig 28. Y-intensity on 7# and 8# section of upside half

图 28. 上部 7# 和 8# 截面的 Y 方向湍流强度

图 26 所示为上部 7# 和 8# 截面的 X 方向湍流强度分布。图 27 所示为下部 1# 和 2# 截面的 X 方向湍流强度分布。管中心线附近湍流强度值较大，且滞流区截面大于滞流区边缘截面。

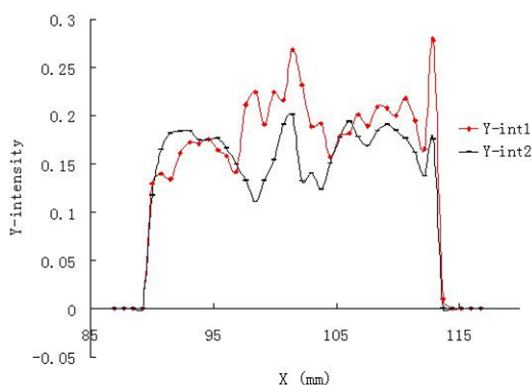


Fig 29. Y-intensity on 1# and 2# section of underside half

图 29. 下部 1# 和 2# 截面的 Y 方向湍流强度

由图 28 和图 29 可见，管中心线附近 Y 方向湍流强度值较大，且滞流区截面大于滞流区边缘截面。滞流区边缘的 Y 方向湍流强度分布已经开始向图 18 和图 19 所示的常规形态过度。

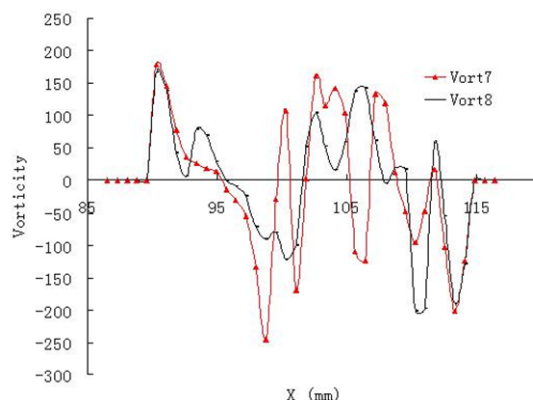


Fig 30. Vorticity on 7# and 8# section of upside half

图 30. 上部 7# 和 8# 截面的涡量

图 30 和图 31 显示，涡量在滞流区呈现杂乱无序的状态，充分体现了混流的影响。在滞流区边缘，涡量分布的方向性逐渐明显。

总之，滞流区由于流通尺寸突变而诱发剧烈的流体混合，从而使得滞流区流体呈现出混乱无序的状态。轴向速度、径向速度、涡量等都表现出显著的波动；轴向和径向的湍流强度都有所强化。

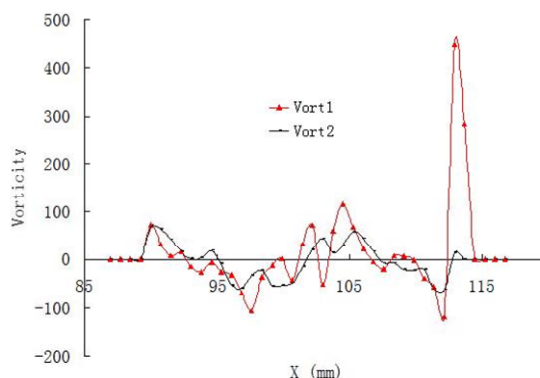


Fig 31. Vorticity on 1# and 2# section of underside half

图 31. 下部 1# 和 2# 截面的涡量

5 小结

本文通过可视化实验、转子转速测试和 PIV 流场测试，对管程转子组合扰流强化换热装置的流场特性进行了从定性到定量地分析。理论推导出转子转速公

式,认为影响转子转速的因素包括转子结构几何因素、质量属性因素和粘性因素。提出在管程存在无旋流,并通过 PIV 测试结果得到了初步验证。将相邻两组转子之间的空隙定为滞流区域,并对滞流区的流动特性进行了详细分析。研究得出如下结论:(1)管程组合转子对流体造成不同程度、甚至不同方向的旋流,从而强化了剪切效应,进而促进了流体的径向混合和边界层剪切变薄;(2)滞流区的流动状态更为复杂无序,湍流强度更大;(3)管程局部有纵向涡产生。

由于本文 PIV 实验处于层流区,而湍流状态的轴向流速分布与层流状态有较大差别,因此,不能将上述结论简单地推广至湍流区。需要对湍流区的管程组合转子扰流进行进一步的实验研究。

致 谢

感谢清华大学航空航天学院过增元院士、李志信老师、孟继安老师、陈泽敬老师、李晓伟博士、邢程博士对本课题研究所给予的支持和帮助。

References (参考文献)

- [1] Lin Qingyu. Study on Rotating Speed of Self-rotating Twisted Tape Inserted Tubes[J]. Chinese Mechanical Engineering, 2007, 18(16): 1970-1973
林清宇等. 管内自旋扭带转速的研究[J]. 中国机械工程, 2007, 18(16): 1970-1973
- [2] Pan Chunmei. Investigation of Fluid Flow in a Dual Rushton Impeller Stirred Tank Using Piv[D]. Beijing University of Chemical Technology Chemical Engineering, 2008
潘春妹. 双层桨搅拌槽内流动场的 PIV 研究[D]. 北京: 北京化工大学化学工程学院, 2008
- [3] F. Hendriks, A. Aviram. Use of zinc iodide solutions in flow research[J]. Rev. Sci. Instrum., 1982, 53(1): 75-78
- [4] T.L. Narrow, M. Yoda, S.I. Abdel-Khalik. A simple model for the refractive index of sodium iodide aqueous solutions[J]. Experiments in Fluids, 2000, 28: 282-283
- [5] O. Uzol, Y.C. Chow, J. Katz, C. Meneveau. Unobstructed PIV measurements within an axial turbo-pump using liquid and blades with matched refractive indices[A]. 4th International Symposium on Particle Image Velocimetry, Göttingen, Germany, September 17-19, 2001
- [6] Yassin A. Hassan, E.E. Dominguez-Ontiveros. Flow visualization in a pebble bed reactor experiment using PIV and refractive index matching techniques[J]. Nuclear Engineering and Design, 2008, 238: 3080-3085
- [7] Gu Ju. An Investigation of Vortex Structure in High-turning Dihedral Compressor Cascade with PIV Candidate[D]. Harbin Institute of Technology Energy Science and Engineering, 2007
谷君. 大转折角弯曲扩压叶栅旋涡结构 PIV 研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学能源科学与工程学院, 2007