

旋转直线切向流聚丙烯管式膜器环隙剖面流场测试

王成端¹, 陈文梅², 李建明², 蒋光明¹ (1. 西南科技大学环境工程学院, 绵阳 621002, E-mail: wcd@swwust.edu.cn; 2. 四川大学化工学院, 成都 610065)

摘要: 实验研究了旋转直线切向流管式膜器环隙剖面的流场特征。通过建立膜滤实验装置系统, 首次采用 PIV 激光粒子成像测速系统定量实测了旋转直线切向流管式膜器在不同工况, 即不同流体压力、不同入口流量或不同入口切向流速等操作参数下环隙剖面的流线和涡量图, 并在环隙剖面内测出了流体切向速度和轴向速度及其分布规律: ① 在非涡区域, 无论操作参数如何变化, 在横坐标相同时, 靠近旋转切向流入口方向的速度比远离入口方向的速度要大; 涡内区域流体的速度一般小于涡外部的流体速度; 涡心处速度最低, 而且切向速度一般为 0; 涡心附近的切向速度小于轴向速度。② 在实验工况下, 涡边缘附近的切向和轴向速度均为膜器环隙间平均轴向流速的 1~2 倍; 形成椭圆涡面上的最大切向和轴向速度一般为膜器环隙间平均轴向流速的 2~6 倍。③ 环隙剖面上形成的涡, 其内部流体都要与涡外部的流体进行质量交换。涡外流体大量涌入涡内部, 能够防止颗粒过早堵塞膜管。

关键词: 微滤; 旋转直线切向流; 聚丙烯管式膜; 流场

中图分类号: TQ051.893 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2002)04-06-0057

Flow Field Test on the Tangential Section of Polypropylene Tubular Membrane Module Annular Gap in Rotating Linear Tangential Flow

Wang Chengduan¹, Chen Wenmei², Li Jianming², Jiang Guangming¹ (1. Institute of Environmental Engineering, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621002, China; 2. Institute of Chemical Engineering, Sichuan University)

Abstract: A new type of polypropylene tubular membrane apparatus of rotating cross flow was designed to study experimentally the flow field characteristics of the tangential section of the membrane annular gap. The authors designed rotary linear tangential flow tubular membrane separator and its test system for the first time. Through the system, the flow field of rotary linear tangential flow with the advanced Particle Image Velocimetry (PIV) was tested for the first time. A lot of streamlines and vorticity maps of the tangential section of separator in different operation conditions were obtained. The velocity distribution characteristics were analyzed quantitatively: ① At non-vortex area, no matter how the operation parameters change, the velocity near to rotary tangential flow entrance was higher than the velocity far from entrance at the same radial coordinates. At vortex area, generally the flow velocity of inner vortex was lower than the outer vortex. At the vortex center, the velocity was lowest, the tangential velocity were equal to zero generally. At the vortex center zone, the tangential velocity was less than the axial velocity. ② Under test operations, the tangential velocity and axial velocity of vortices borders are 1~2 times of average axial velocity of membrane module annular gap. The maximum tangential velocity and axial velocity of ellipse vortices were 2~6 times of average axial velocity of membrane module annular gap. ③ The vortices that are formed on the tangential section, there existed mass transfer between inner and outer parts of fluid. Much fluid of outer vortices got into the inner ones, which was able to prevent membrane tube from particles blocking up very soon.

Keywords: microfiltration; rotating linear tangential flow; polypropylene tubular membrane; flow field

为减轻膜污染, 提高膜通量, 膜管和膜器不运动, 也不附加其它扰流器, 而是使悬浮液切向进入膜器并绕膜管轴线旋转, 这种悬浮液称为旋转切向流^[1,2]。初步实验证明, 旋转流横向过滤系统的过滤通量显著加大, 能量利用率提

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(29976025); 四川省教委重点科研项目(川教科[1999]20号)

作者简介: 王成端(1962~), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为过滤与分离过程理论及设备、水处理与污染控制设备。

收稿日期: 2001-08-04; 修订日期: 2001-08-29

高^{[3]*}。本文首次采用 PIV 激光粒子成像测速系统定量实测了旋转直线切向流管式膜器在不同工况,即不同流体压力,不同入口流量或不同入口切向流速等操作参数下环隙切剖面的流线图 and 涡量图,并在环隙切剖面内测出了流体切向速度和轴向速度及其分布规律,主要研究膜器环隙切剖面的流场特征。

1 流场测试分析原理

为了比较旋转切向流入口结构不同时,膜器流场和膜微滤效果的区别,试验了旋转直线切向流和旋转圆弧切向流 2 种结构*。直线切向流结构加工方便,但流体能量损失大,圆弧切向流结构加工比直线结构困难一些,但流体压力和能量损失小。膜器外筒为玻璃圆筒,其内直径为 80 mm,内筒为选用上海医药工业研究院研制生产的 PA-8 型聚丙烯精密微孔过滤管式膜,管长为 500 mm,外径为 50 mm,内径为 34 mm。PA-8 型微滤膜管的平均孔径为 5 ~ 10 μ m,孔隙率为 39.9%。方水盒主要用于激光测试分析,其作用是尽量保持激光不发生折射,故又称为方形光线补偿盒。方水盒中的水与膜器中的悬浮液体都用同种纯净水,以使激光穿过玻璃筒壁时不发生折射,从而提高流场测试的精度。

为了测试旋转切向流的三维流场,必需要测试膜器环隙中 2 个断面上的流场特征,如图 1 所示的阴影面分别称为膜器环隙的子午面和切剖面。子午面与膜器轴线重合,能最大限度地反映膜器环隙流场的径向速度和轴向速度特征;选择的切剖面除了能最大限度地反映膜器环隙流场的切向速度和轴向速度特征外,还要能反映膜管表面处的切向速度和轴向速度特征。图 1 所示的子午面和切剖面就能满足这些要求。在子午面能够实测径向速度和轴向速度的分布及其相应的速度矢量图、流线和涡量图;在切剖面能够实测切向速度和轴向速度的分布及其相应的速度矢量图、流线和涡量图。于是膜器环隙的三维流场特征就能完全测定。本文主要研究旋转直线切向流膜器环隙切剖面的流场特征。

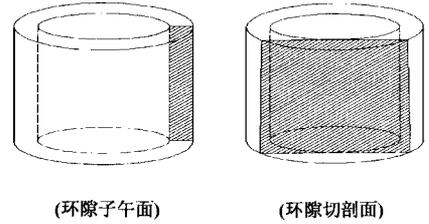


图 1 旋转切向流管式膜器流场测试位置
Fig.1 Testing flow field position of tubular membrane module of rotary tangential flow

PIV 测试系统的原理主要基于 PIV 成像记录系统。由脉冲或连续激光发射器发出的激光通过一个柱面镜而形成片光源,照亮被测试流场,流场中粒子的散射光通过摄像机成像于一个 CCD (Charge Coupled Device) 系统。CCD 系统中的图像立即被传到图像处理系统 (PIV, Processor), 经过初步处理后得到原始互相关向量图,该互相关向量图与原始流场图片被传输到微机硬盘和终端,整个测试采集过程在 200 ms 内即可完成。PIV 测试系统由 5 部分组成,即光路系统、图像记录摄像系统、图像处理系统、采集控制(含数据处理、图像显示软件) Flow Map Software 系统、片光源定位系统。本次测试采用的 PIV 系统由丹麦 DANTEC 公司研制,采用 PIV 专用处理器来处理流场中粒子所成的图像,处理能力数倍于 Cray 大型计算机,是目前市面上最快的 PIV 处理系统。流场测试系统如图 2 所示。

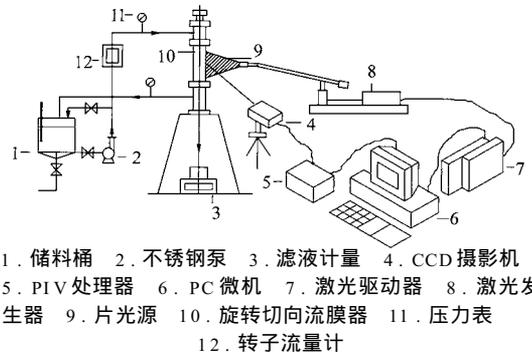


图 2 旋转切向流管式膜分离器流场测试系统
Fig.2 Flow field test system of tubular membrane separator of rotary tangential flow

* 王成端,旋转切向流强化管式膜微滤的机理研究,博士学位论文,成都:四川大学,2001。

2 相同工况不同时刻膜器环隙切剖面的流场

在切剖面中可以测出环隙中流体质点的切向速度和轴向速度,因而对旋转直线切向流的三维速度值的分布信息有一个全面的研究.选取入口压力为 0.03 MPa,切向入口流量为 0.24 L/s,入口切向流速为 1.091 m/s 的工况来测试不同时刻环隙切剖面的流场变化,相应的轴向 Reynolds 数 $Re_a = 1162$. PIV 测试系统每隔 800 ms(即各时刻的间隔时间)记录 1 幅流场互相关照片,连续记录 10 幅.测试结果如表 1 所示.

在入口压力为 0.03 MPa 的工况下,膜器环隙切剖面上均为湍流.在每一时刻的流场图中都有不同程度,不同形状的涡出现,但大多数涡为椭圆形.由表 1 可知,在出现的涡中,第 1 时刻,第 2 时刻和第 10 时刻出现了涡型不很明显的疏密型涡,第 3、4、5、8 时刻出现了明显的螺旋涡,其中含有部分 Taylor 涡.第 6、7、9 时刻出现了椭圆涡.从表 1 可知,同一工况内,最大径向速度与环隙平均轴向流速的比值在 2.12 ~ 3.65 之间,最大轴向速度与环隙平均轴向流速的比值在 1.83 ~ 4.45 之间.

表 1 不同时刻环隙切剖面流场测试结果

Table 1 Flow field testing results of tangential section for different time

时刻	涡型	最大涡量/ s^{-1}	最大径向速度/ $m \cdot s^{-1}$	比值	最大轴向速度/ $m \cdot s^{-1}$	比值
1	疏密型	- 68 ~ 54	0.264	3.38	- 0.237	3.04
2	疏密型	- 103 ~ 55	- 0.165	2.12	- 0.194	2.49
3	螺旋涡	- 106 ~ 87	- 0.285	3.65	0.323	4.14
4	螺旋涡	- 69 ~ 69	0.237	3.04	0.194	2.49
5	螺旋涡	- 96 ~ 81	- 0.255	3.27	0.244	3.13
6	椭圆涡	- 57 ~ 105	- 0.199	2.55	0.209	2.68
7	椭圆涡	- 103 ~ 99	- 0.260	3.33	0.347	4.45
8	螺旋涡	- 86 ~ 58	- 0.182	2.33	- 0.143	1.83
9	椭圆涡	- 51 ~ 56	0.203	2.60	0.252	3.23
10	疏密型	- 81 ~ 81	- 0.283	3.63	0.303	3.88

3 相同工况膜器环隙切剖面的速度测试分析

图 3 为第 5 时刻涡内流体的切向速度和轴向速度分布曲线.图中横坐标表示环隙间切剖

面流体质点的横坐标,单位为 mm;从左到右为正方向,纵坐标表示流体质点的切向速度和轴向速度,单位为 m/s.

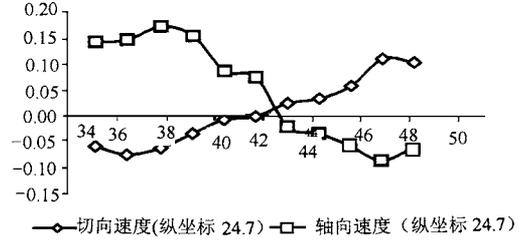
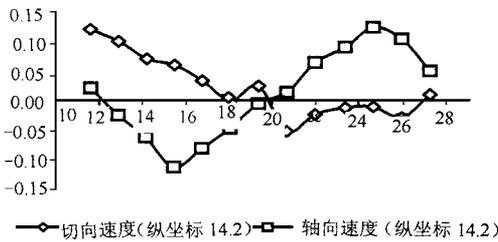


图 3 第 5 时刻切剖面椭圆涡区域切向和轴向速度的分布曲线

Fig.3 Distribution curves of tangential and axial velocities in ellipse vortice areas of tangential section at 5th time

从图 3 可以得到以下结论:

- (1) 在横坐标相同时,除了在涡核附近外,一般纵坐标大的(即向上部入口方向靠近),其切向速度和轴向速度比纵坐标小的切向和轴向速度的值要大.
- (2) 环隙切剖面上椭圆涡的切向速度分布

表现为多峰曲线,而且在涡心的左右两侧,流体的切向和轴向速度方向相反,这与流场图中涡的实际流线方向吻合.

- (3) 图 3 中左右涡的中心处,切向和轴向速度最低,几乎为 0.
- (4) 相同工况下,环隙切剖面上椭圆涡的

涡量值越大,其涡核附近区域的流体速度越小.也就是椭圆涡的涡量绝对值越大,其涡核附近流体速度越小.

(5) 除了涡心处的切向速度一般为 0 外,一般椭圆涡区域内的切向速度还比轴向速度值小,这说明椭圆涡内流体的轴向运动比切向运动更强烈.

(6) 通过左涡和右涡内部的切向和轴向速度的比较计算发现,环隙剖面椭圆涡内部,尤其是涡心附近循环的流体,其切向和轴向速度

均比平均轴向流速低,而在椭圆涡边缘附近,其切向速度和轴向速度均为膜器环隙间的平均轴向流速 0.078 m/s 的 $1 \sim 2$ 倍;而环隙剖面内最大切向和轴向速度仍然近似为环隙间平均轴向流速的 $2 \sim 5$ 倍.

4 不同工况膜器环隙切剖面的流场变化

旋转直线切向流膜器环隙切剖面的流场随工况改变的试验操作参数如表 2 所示,每种操作参数连续记录了 10 幅流场照片和互相关速度图,观察到的现象和测试结果如表 3 所示.

表 2 不同工况的流场操作参数

Table 2 Different parameters in different operation of the flow field

工况序号	1	2	3	4	5	6
入口压力 / MPa	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06
入口流量 / $\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$	0.167	0.2	0.24	0.27	0.29	0.31
入口切向速度 / $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	0.759	0.909	1.091	1.227	1.318	1.409
入口轴向 Re_a	819	968	1162	1311	1415	1504
平均轴向流速 / $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	0.055	0.065	0.078	0.088	0.095	0.101

表 3 不同操作参数的流场测试结果

Table 3 Different parameters and testing results of the flow field

工况序号	1	2	3	4	5	6
椭圆涡的次数	9	9	7	7	6	7
其它涡型次数	1	1	3	3	4	3
气泡数量	多	多	少	少	无	无

表 3 中椭圆涡的次数是指 10 次记录中形成含有椭圆涡,但也混合有其它涡型,如 Taylor 涡的记录次数.其它涡型次数是指不含椭圆涡的记录次数.从表 3 看出,第 1 工况和第 2 工况,形成的椭圆涡为 9 次最高.随入口压力和

流量的增加,每种工况 10 次记录中形成涡的次数变化不大,有些涡可能是气泡形成的,如第 1 工况的涡.图 4 为第 1 和第 2 工况具有典型椭圆涡和螺旋涡的流线图.

5 不同工况膜器环隙切剖面的速度测试分析

图 5 为第 1 和第 2 工况典型椭圆涡区域的切向和轴向速度分布比较曲线.图 5 中的横坐标表示涡的切向位置,纵坐标表示涡区流体质点的切向和轴向速度.图 5 中括号注明的纵坐标值表示椭圆涡核相近的轴向坐标.从图 5 和表 4 可以发现:

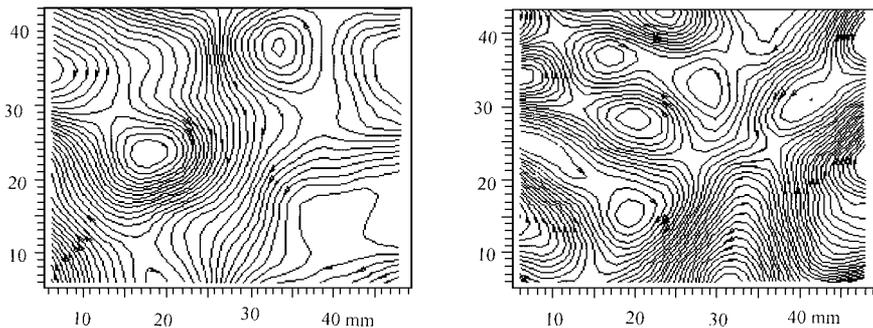


图 4 第 1 和第 2 工况下的典型椭圆涡流线图

Fig. 4 Streamlines of typical ellipse vortices at 1st to 2th operation

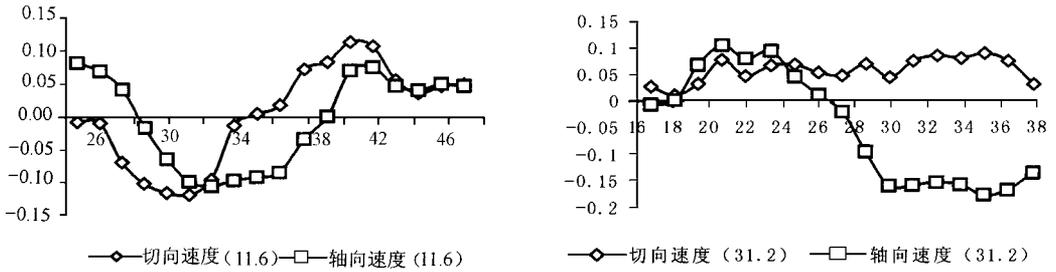


图 5 第 1 和 2 工况典型椭圆涡区域切向和轴向速度的分布曲线

Fig. 5 Distribution curves of tangential and axial velocities in typical ellipse vortice areas at 1st to 2th operation

表 4 不同工况典型椭圆涡速度比较

Table 4 Comparison of velocities in typical ellipse vortices in different operation

工况序号	1	2	3	4	5	6
典型椭圆涡时刻	2	7	5	6	3	3
最大切向速度 / $m \cdot s^{-1}$	0.288	-0.264	-0.271	-0.186	0.220	-0.188
坐标 / mm	(39.1, 6.3)	(6.3, 48.2)	(6.3, 40.4)	(12.9, 48.2)	(6.3, 29.9)	(33.8, 11.6)
比值	5.24	4.06	3.47	2.11	2.32	1.86
最大轴向速度 / $m \cdot s^{-1}$	0.313	0.323	0.249	0.258	-0.211	-0.220
坐标 / mm	(7.6, 6.3)	(11.6, 48.2)	(6.3, 33.8)	(6.3, 28.6)	(6.3, 43.0)	(7.6, 48.2)
比值	5.69	4.97	3.19	2.93	2.22	2.18
涡心坐标 / mm	(37.0, 11.5)	(27.5, 31.5)	(43.2, 25.0)	(14.2, 34.0)	(28.0, 16.0)	(35.0, 29.5)
典型疏密型时刻	6	9	6	4	4	8
最大切向速度 / $m \cdot s^{-1}$	-0.265	0.239	-0.199	-0.152	-0.202	0.257
坐标 / mm	(6.3, 48.2)	(36.1, 26.0)	(6.3, 48.2)	(7.6, 46.9)	(24.7, 48.2)	(32.5, 48.2)
比值	4.82	3.68	2.55	1.73	2.13	2.54
最大轴向速度 / $m \cdot s^{-1}$	-0.310	0.280	0.197	0.205	0.187	0.253
坐标 / mm	(8.9, 8.9)	(46.9, 26.0)	(41.7, 36.4)	(10.3, 23.4)	(48.2, 6.3)	(33.8, 6.3)
比值	5.64	4.31	2.53	2.33	1.97	2.50

①无论操作参数如何变化,在横坐标相同时,一般纵坐标大的,其切向速度和轴向速度比纵坐标小的切向和轴向速度的值要大。②每种工况下,环隙切剖面上椭圆涡的切向速度分布不是单峰曲线,呈现多峰形状,而且在椭圆涡核的左右两侧,流体的轴向速度方向相反,符合流线图中涡的实际流线方向。③涡内区域流体的切向和轴向速度一般小于涡外部的流体切向和轴向速度;切剖面内两涡之间逆时针和顺时针变向临界点的轴向速度为零。在涡核处速度最低,而且切向速度一般为 0,其切向和轴向速度均比涡内其它区域或涡边缘的切向和轴向速度要小。④无论入口压力和流量怎样变化,涡核附近的切向速度小于轴向速度,这说明涡核附

近流体的轴向运动比切向运动更强烈。⑤当入口压力从 0.01 MPa 增加到 0.06 MPa 时,涡心附近循环的流体,其切向和轴向速度均比平均轴向流速低,在涡边缘附近,其切向和轴向速度均为膜器环隙间平均轴向流速的 1~2 倍;而且涡面上的最大切向和轴向速度一般为膜器环隙间平均轴向流速的 2~5 倍。实验还表明,0.01 MPa 是该实验膜器系统的最佳工况。

参考文献:

- 褚良银,陈文梅,钟月华. 旋转流强化管式膜微滤过程中分离因数研究. 过滤与分离,1999,9(2),9~12.
- 褚良银,陈文梅等. 管式陶瓷膜十字流微滤过程强化研究. 膜科学与技术,1998,18(6),49~53.
- 方为茂,陈文梅. 管式膜十字流微滤过程分析. 过滤与分离,2000,10(1),10~15.