

研究论文

螺旋管内对流传质场协同强化模拟

陈迁乔, 钟 秦

(南京理工大学化工学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 通过计算流体力学方法对层流直管内浓度场的模拟, 发现大部分区域浓度梯度在径向比轴向高 2 个数量级。为了强化传质, 应降低浓度梯度矢量和速度矢量的夹角, 在径向产生一定的流动。对螺旋管内浓度场和速度场的计算表明, 二次流横穿浓度等值线, 提高了两场的协同。两种螺旋结构的比较表明, 二次流随着 Reynolds 数的增大而增强, 传质增强效果也越显著, 正是二次流显著提高了速度场和浓度场的协同。所研究的螺旋结构在 $Re=1000\sim 2400$ 时, 平均二次流速度最大达到主流速度的 $6.5\%\sim 6.8\%$, Sherwood 数增大了 $4.99\sim 6.43$ 倍。

关键词: 场协同; 对流传质; 传质强化; 螺旋管

DOI: 10.3969/j.issn.0438-1157.2012.12.004

中图分类号: TQ 021.4

文献标志码: A

文章编号: 0438-1157 (2012) 12-3764-07

Simulation on field synergy enhancement for convective mass transfer in helical tube

CHEN Qianqiao, ZHONG Qin

(School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China)

Abstract: The field synergy principle for convective mass transfer indicates that Sherwood number depends not only on Reynolds number and the Schmidt number but also on the synergy of concentration field and velocity field. The numerical simulations are performed for laminar convective mass transfer and fluid flow characteristics in the straight tube, and the results show that concentration gradient in radial direction is 2 orders of magnitude larger than that in axial direction when Sc is 1.2, which means that the synergy of concentration field and velocity field is not good. In order to strengthen the mass transfer, the angle of velocity and concentration gradient should be decreased, in another word, the radial flow of fluid should be generated. From the observation and quantitative calculation of the velocity field and concentration field in the helical tube, it is found that the secondary flow crosses the equi-concentration line, and the presence of secondary flows improves the synergy of the two fields. For the same Re , the secondary flow is more intense, the effect of mass transfer is more significant. For the same helical structure, the secondary flow increases with Re . The secondary flows promote the synergy of concentration and velocity fields, which is the reason for helical tube to improve the mass transfer. The maximum of area-average secondary velocity reaches $6.5\%\sim 6.8\%$ of bulk velocity, and Sh increases $4.99\sim 6.43$ folds when $Re=1000\sim 2400$ for helical structure in the paper. It is shown that the field synergy principle well explains the mechanism of mass transfer enhancement in the helical tube.

Key words: field synergy principle; convective mass transfer; mass transfer enhancement; helical tube

2012-05-28 收到初稿, 2012-07-06 收到修改稿。

联系人及第一作者: 陈迁乔 (1970—), 女, 副教授。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (U1162119)。

Received date: 2012-05-28.

Corresponding author: CHEN Qianqiao, cqj @ mail. njust. edu. cn

Foundation item: supported by the National Natural Science Foundation of China (U1162119).

引言

圆管内传质有很多重要应用，特别是在膜分离过程，如海水淡化处理用的管式反渗透器，用合成材料制备的中空纤维膜，管式膜组件医药上人造肾内物质作血透析用的超滤微滤等。各种关于强化管内传质的研究不断涌现^[1-6]，而对强化传质机理的研究不够深入。

过增元等^[7-9]提出了对流换热场协同的基本概念，指出对流换热过程的强度不仅取决于流速、温差和流体物性，还取决于温度场与速度场的相互配合，即取决于速度场和温度场的协同程度。场协同理论为强化换热技术的发展提供了理论依据，据此发展了一些控制对流换热强度的新方法。对流传质和对流传热有很多类似性，王松平等^[10]提出了强化对流传质场协同唯象机制，说明了强化对流传质场协同控制方法。魏立峰等^[11]利用场协同理论分析了除湿空调器传质性能的强化。Lei 等^[12]建立了基于多场协同理论的渗透蒸发传质模型。Chen 等^[13]将热量传递势容概念场推广到质量传递过程的分析，提出了质量积和质量积耗散，并在一定条件下应用于空间站通风排污除湿以及光催化氧化反应器。场协同理论为各种传质过程的强化提供了理论依据。

螺旋管强化传质在中空纤维膜上应用较多，对其传质强化的一般解释是二次流增强了流体的混合，壁面剪应力的增强消除了膜管内的浓差极化，强化了传质^[1]。本文在前人工作的基础上^[7-13]，用计算流体力学方法对直管和螺旋管内对流传质的浓度场进行模拟，通过分析速度场与浓度场的特点，从场协同的角度解释螺旋管传质强化机理，以期场协同的概念在对流传质强化领域引起重视，能为对流传质强化提供理论指导。

1 管内对流传质的场协同

对于稳态对流扩散，不计黏性耗散，其对流扩散方程为

$$\mathbf{U} \cdot \nabla c_A = \nabla \cdot (D_{AB} \nabla c_A) \quad (1)$$

其中， $\mathbf{U}$ 是速度矢量， c_A 、 D_{AB} 为组分的浓度和扩散系数；其壁面的湍流扩散率为 0，根据高斯公式可得该管壁面 S 导入或导出的物质为

$$Q_s = \oint_S (D_{AB} \nabla c_A) dS = \oint_V (\mathbf{U} \cdot \nabla c_A) dV \quad (2)$$

引入特征尺度 D 和量纲 1 变量

$$D = \frac{4V_0}{S}, \quad d\bar{V} = \frac{dV}{V_0}$$

$$\bar{\mathbf{U}} = \frac{\mathbf{U}}{U_0}, \quad \nabla \bar{c}_A = \frac{\nabla c_A}{(c_{AW} - c_{Ab})/D} \quad (3)$$

则平均 Sh 为

$$Sh = 0.25 Re Sc \oint_V (\bar{\mathbf{U}} \cdot \nabla \bar{c}_A) d\bar{V} \quad (4)$$

若体积分区域在流动方向为等截面，管截面面积为 A_0 ，对流传质的边长为 P ，可对垂直于主流方向某截面进行面积分，并引入下列特征尺度 D 和量纲 1 变量

$$D = \frac{4A_0}{P}, \quad d\bar{A} = \frac{dA}{A_0}$$

$$\bar{\mathbf{U}} = \frac{\mathbf{U}}{U_0}, \quad \nabla \bar{c}_A = \frac{\nabla c_A}{(c_{AW} - c_{Ab})/D} \quad (5)$$

则可得其截面平均 Sh

$$Sh = 0.25 Re Sc \oint \bar{\mathbf{U}} \cdot \nabla \bar{c}_A d\bar{A} \quad (6)$$

积分号内的矢量点积项可表达为

$$\bar{\mathbf{U}} \cdot \nabla \bar{c}_A = |\bar{\mathbf{U}}| |\nabla \bar{c}_A| \cos \beta \quad (7)$$

其中， β 为速度矢量与浓度梯度矢量的夹角。管内对流传质速率的大小不仅决定于流速、物质的浓度差以及流体物性，还依赖于浓度梯度矢量和速度矢量的夹角 β ，即浓度场和速度场的协同。 $\cos \beta$ 越大，传质速率越高。因此，强化传质的方法之一是增大 $\cos \beta$ ，即减小夹角 β ，在浓度梯度较大的方向产生流动，增大浓度场与速度场的协同。层流直管的速度场呈抛物线分布，这是常识，下面只分析直管内对流传质的浓度场。

2 管内对流传质的特点及强化

2.1 数值方法

应用计算流体力学软件 Fluent，采用直径为 2 mm、长度为 0.2 m 的膜管，径向及周向网格大小设为 0.05 mm。以二维轴对称双精度层流模型模拟烟气在中空纤维膜内的流动情况，假定计算流体域为不可压层流牛顿流体，其密度、黏度、扩散系数均为常数， Sc 为 1.2。计算控制方程为连续方程、质量传递方程及 Navier-Stokes 方程。设定模拟烟气进口 SO_2 浓度为 $2000 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ，壁面 SO_2 浓度为 0。 SO_2 在管中扩散，到达壁面后消失。烟气进口采用抛物线速度分布，出口边界条件设为 outflow。 Re 为 1000 时，出口处浓度边界已充分发展。各项速度的迭代收敛精度为 10^{-4} ，浓度的收敛精度为 10^{-10} 。

2.2 模拟的可靠性

为了验证模型的可靠性,对层流直管的传质性能和流动阻力进行模拟,并将模拟结果和公式计算结果进行比较。 Sh 的模拟值由模拟得到的进出口浓度计算得出。范宁摩擦因子 f 由模拟计算壁面剪应力得到。

直管传质速率理论计算式为

$$Sh = 1.62 \left(\frac{d^2 u_o}{LD_{AB}} \right)^{1/3} \quad (8)$$

传质速率模拟值和计算值的比较如图 1 所示。由图 1 可以看出, Sh 随着 Re 的增大而增大,与计算值比较, $Re = 1000$ 时模拟误差最大,为 10.6%,在 $Re = 1000 \sim 2400$ 范围内,平均误差为 4.18%。而在 $Re < 1000$ 时,式(8)的计算误差较大,没有进行两者的比较。

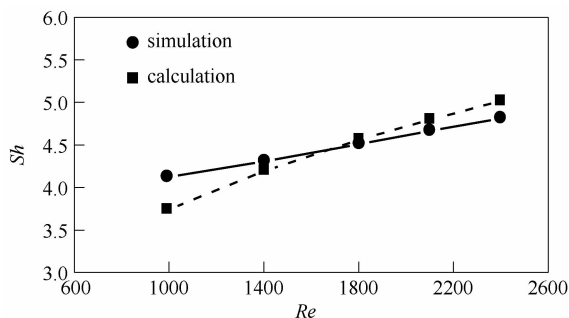


图 1 模拟和理论 Sh 的比较

Fig. 1 Comparison of Sh between simulation and calculation

f 模拟值和计算值的比较如图 2 所示。 f 随 Re 的增大而减小,模拟值和理论计算值非常接近,最大误差为 4.2%。通过对层流直管的传质性能和流动阻力模拟结果的分析比较,说明模拟方法合理,模拟结果可靠。

2.3 浓度分布

$Re = 1000$ 时,浓度充分发展长度 $x = 0.14$ m。对 x 和 $x/2$ 处截面浓度进行处理,得到两截面上径向和轴向浓度梯度随 Re 的变化如图 3 所示。从图中可以看出,无论浓度分布是否充分发展,轴向浓度梯度都非常小,并随径向距离的增大而减小。而径向浓度梯度除轴心附近外,都远大于平轴向浓度梯度,且变化很小。在大部分区域,浓度梯度在径向比轴向高 2 个数量级。

2.4 管内传质强化

管内充分发展的层流对流传质,其主流方向与浓度梯度方向近似于垂直,因而其对流传质能力较

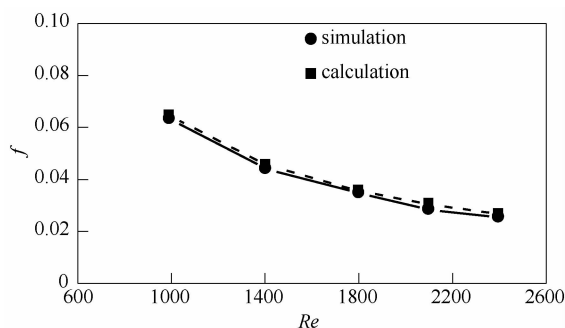


图 2 f 模拟值和计算值的比较

Fig. 2 Comparison of f between simulation and calculation

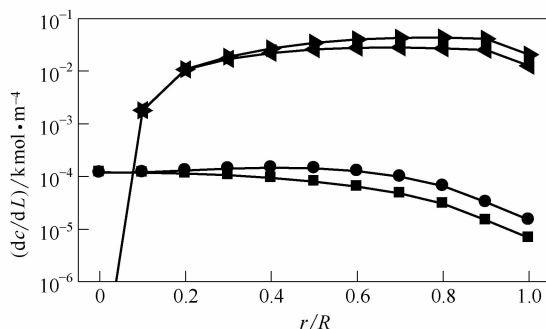


图 3 层流管内浓度梯度的分布

Fig. 3 Distribution of concentration gradient in tube

$x = 0.07$ m: $\blacktriangleright$ dc/dr $\bullet$ dc/dz
 $x = 0.14$ m: $\blacktriangleleft$ dc/dr $\blacksquare$ dc/dz

差。若能使流体在管内产生径向的流动,减小速度矢量和浓度梯度的夹角,使流体在浓度梯度较大的径向产生混合,将有利于流体浓度在主流区的均匀化,实现传质的强化。由内置扰动元件可产生径向流动^[3-6],由特定管结构可产生二次流^[1-2]。如波纹管、螺旋管等,这些结构产生的二次流能起到较大的传质强化作用。下面分析螺旋管的流场和浓度场,从场的角度探讨传质强化的机理。

3 螺旋管的流动和传质特性

3.1 螺旋管模型

螺旋管可以使流体在管道内部形成与管的轴向垂直的二次流动,二次流动的方向与浓度梯度方向一致,从而提高传质速率。下面对两种结构参数的螺旋管的传质和流动性能进行三维模拟分析。螺旋管半径为 1 mm,圈数为 2,总长度为 0.2 m。参数如表 1 所列,结构如图 4 所示,模拟的数值方法与 2.1 节相同。

表 1 螺旋管的结构参数

Table 1 Structure parameter of helical tubes

Structure	Helical diameter d_t/mm	Helical pitch H/mm	Length/ mm
A	32	10	200
B	24	66	200



图 4 螺旋结构示意图

Fig. 4 Schematic representation of helical tube

3.2 速度和浓度场

当主体流速为 $7.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时，对应的 Re 为 1000。从入口表面开始沿着螺旋管旋转，可以得到 180° 、 360° 、 540° 旋转面。这 3 个面的浓度等值线和速度矢量如图 5 所示。从图 5 可以看出，流体在

向前流动的同时，不断从螺旋管的外侧分为两部分分别沿着上下轮廓向内侧运动，到达内侧汇聚后，沿着径向向螺旋管的外侧移动，清晰地呈现出两个 Dean 涡。速度矢量在总体向前的同时，不断改变方向，穿过浓度等值线，提高了浓度场和速度场的协同。促进流体的混合，加快物质的传递。从图中可以看出浓度场沿径向变化剧烈。两种螺旋管结构中的 Re 均为 1000，但从 180° 、 360° 、 540° 三个面浓度等值线来看，结构 A 中浓度场的变化更快，即传质速率更大。

当流体沿着螺旋管运动一定角度后，流动将达到充分发展^[1]。分别研究不同 Re 时，螺旋管已充分发展截面（ 360° 截面）上的速度场，结构 A 和 B 的速度矢量图如图 6 所示。从图中可以看出，对同一种螺旋结构，随 Re 增大，Dean 涡中心向管壁移动，中心区域二次流速度占主体流速的比重下降。 Re 相同时，与结构 B 相比，结构 A 的 Dean 涡中心更靠近管壁，二次流的强度更大。

气体中 SO_2 的浓度随着传质的进行而降低。计算结果表明，经过一个螺旋周期后，以上 6 个截面上 SO_2 的最大浓度都低于 $900 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。在 $0 \sim 900 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 的浓度范围，划分 10 个浓度等级，对两种结构的螺旋管，分别画出以上 6 个截面上的浓度等值线，如图 7 所示。图 7 说明，对同一种结构， Re 越小，传质时间越长，浓度变化更剧烈， Re 为 1000 是 2400 传质时间的 2.4 倍， Re 为 1000 时，浓度变化更剧烈。 Re 相同时，与结构 B 相比，结构 A 各截面上的浓度降低得更快，浓度变化更剧烈，因此传质速率更快。对 360° 截面的二次流进行定量研究，其大小采用 $(u_r^2 + u_t^2)^{0.5}$ 进行计算。该面上的面平均二次流速度和最大二次流速度如图 8、图 9 所示。结果显示，截面上平均二次流速度随 Re 的增大而增大，并且结构 A 的二次流强度大于结构 B。在 $Re=1000$ 时，对于结构 A，面平均二次流流速最大值为主体流速的 6.8%，对于结构 B，为 6.2%，这也正是结构 A 中传质更快的原因。面平均二次流强度随 Re 增大，但占主体流速的比重随之略微减小，最大二次流速度随主体流速的增大变化不明显，相同 Re 时，两种螺旋管的二次流速度比较接近，达到主体流速的 15% 左右。

从以上分析可以看出，无论从矢量图观察，还是二次流的计算，螺旋管内产生了垂直主流方向的

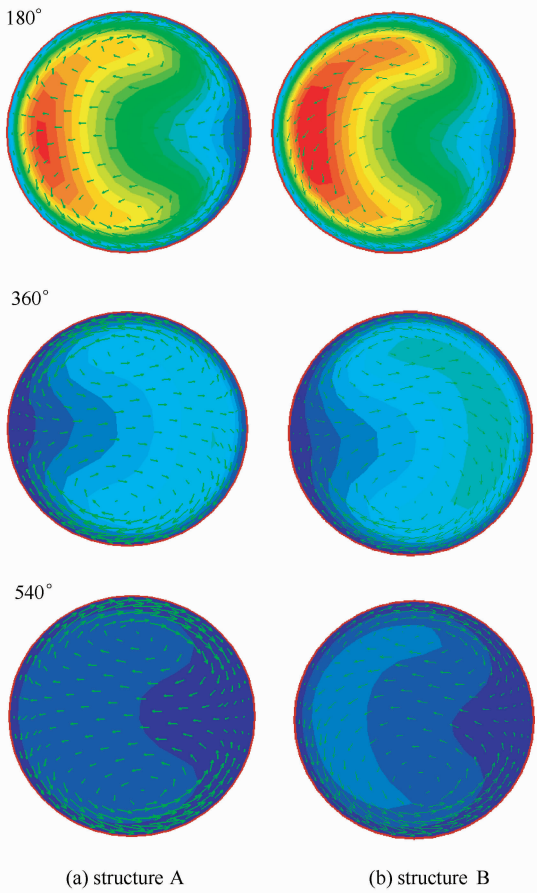


图 5 螺旋管内截面上的流场和浓度场

Fig. 5 Flow and temperature field in helical tube

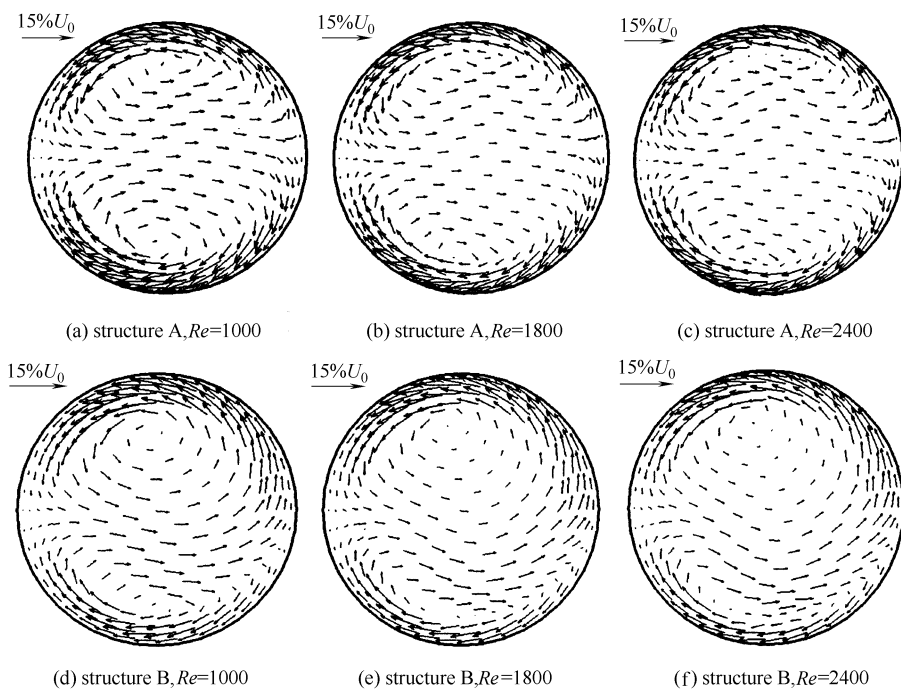


图 6 螺旋管横截面上的流场图

Fig. 6 Flow field in helical tube cross-section

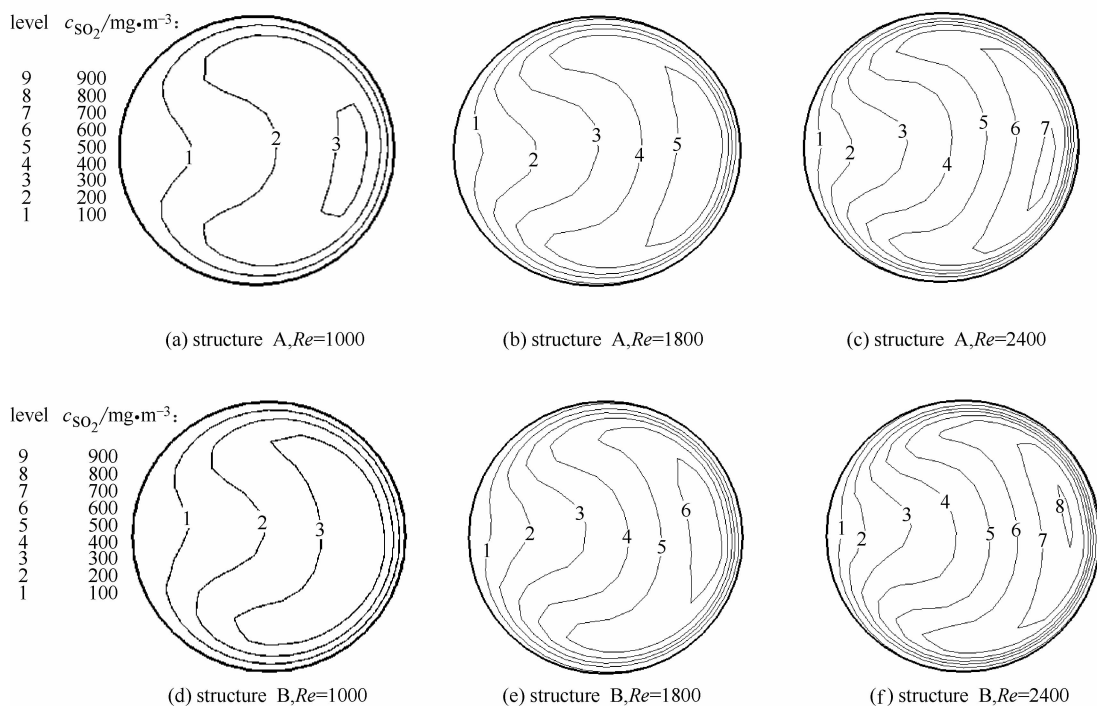


图 7 螺旋管浓度等值线图

Fig. 7 Concentration field in helical tube

二次流, 即从场的角度分析, 改善了浓度场和速度场的协同, 强化了传质, 而结构 A 产生的二次流强度大, 两场的协同程度高, 传质速率也更大。

3.3 传质强化效果

螺旋管和直管性能的比较如图 10 所示。可以看出两种螺旋管的传质强化效果都较明显。螺旋管 Sh' 和直管 Sh 的比值随 Re 的增大而增大, 即 Re

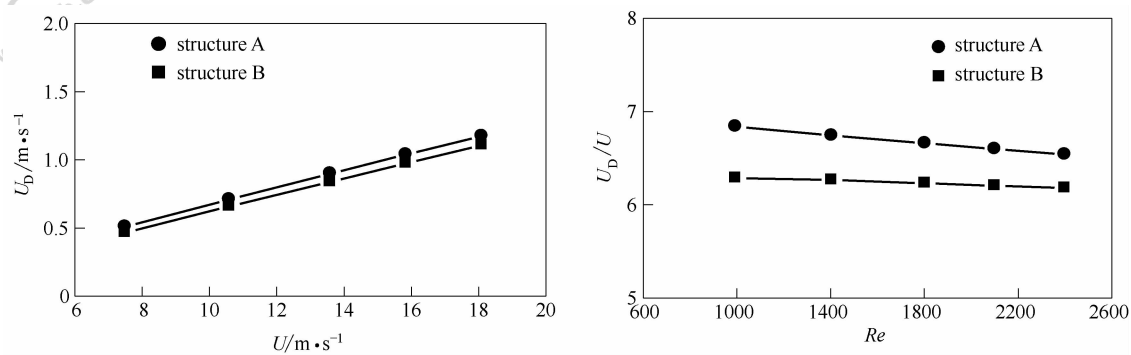


图 8 360°截面上二次流的平均值
Fig. 8 Average secondary flow of 360° cross-section

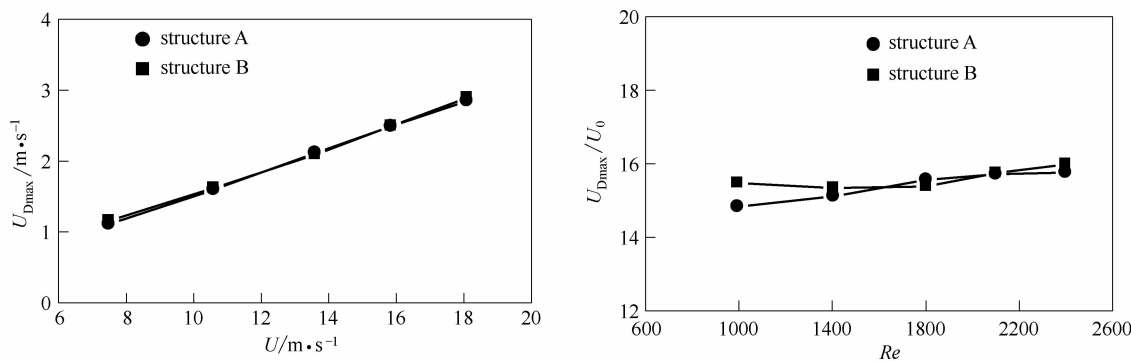


图 9 360°截面上二次流的最大值
Fig. 9 Maximum secondary flow of 360° cross-section

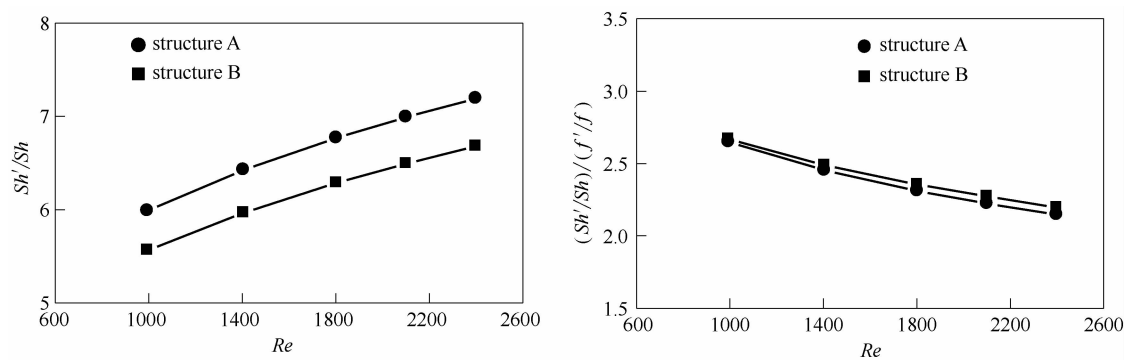


图 10 螺旋管和直管性能比较
Fig. 10 Comparison between straight and helical tube character

越大，传质强化效果越明显。这是由于随着 Re 的增大，二次流速度增大，浓度场在二次流的作用下发生了显著的改变，场协同情况改善。 Re 相同时，结构 A 的传质强化效果优于结构 B，也是由于结构 A 的场协同程度高造成的。所以，场协同原理可以很好地解释螺旋管对流传质强化的机理。在所研究的范围内，相对于直管，螺旋管 A 的 Sh' 增大了 4.99~6.43 倍，而流动阻力增大了 1.23~2.63 倍。即 Re 小时，强化传质效果明显而流阻增加较少。

4 结 论

通过数值模拟的方法对层流直管和螺旋管对流传质的浓度和速度场进行分析。从场协同的角度归纳了管内对流传质强化方法，结论如下。

(1) 管内对流传质速率的大小不仅决定于流速、物质的浓度差以及流体物性，还依赖于浓度梯度矢量和速度矢量的夹角 β ，即浓度场和速度场的协同。减小浓度梯度和速度矢量的夹角 β ，可强化质量传递。

(2) 层流直管对流传质, 径向浓度梯度远大于轴向浓度梯度, 流动方向与浓度梯度方向近似于垂直。产生径向流动将会增加浓度场和速度场的协同, 强化传质。

(3) 无论从矢量图观察, 还是二次流流速的计算结果, 都表明螺旋管内产生的垂直主流方向的二次流横穿浓度等值线, 浓度场和速度场的协同程度得到了改善, 从而强化了质量传递。二次流强度大, 速度场和浓度场协同程度高, 传质速率也更大。

(4) 场协同原理可以很好地解释螺旋管对流传质强化的机理。

符 号 说 明

A_0 ——管横截面面积, m^2

c_A, c_{AW}, c_{Ab} ——分别为物质浓度、壁面处及某截面混合杯浓度, $\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$

D ——特征尺寸, 此处为管直径, m

D_{AB} ——扩散系数, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

d ——管直径, m

f ——范宁摩擦因子

L ——管长, m

P ——某截面处对流传质边界, m

S ——对流传质管壁面积, m^2

U, U_D, U_0 ——分别为速度、二次流及平均速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

β ——速度与浓度梯度矢量夹角, $(^\circ)$

References

- [1] Moulin P, Veyret D, Charbit F. Dean vortices: comparison of numerical simulation of shear stress and improvement of mass transfer in membrane processes at low permeation fluxes [J]. *Journal of Membrane Science*, 2001, **183** (2): 149-162
- [2] Jia Baoju (贾宝菊), Sun Faming (孙发明), Bian Yongning (卞永宁), Xu Xinsheng (徐新生). Numerical simulation of pulsatile flow and mass transfer enhancement in a wavy-walled tube [J]. *CIESC Journal* (化工学报), 2009, **60** (1): 6-14
- [3] Zhang Bingqiang (张冰强), Min Jingchun (闵敬春).

Mass transfer enhancement by various flow disturbers in a membrane channel [J]. *J. Tsinghua Univ. : Sci. & Tech.* (清华大学学报: 自然科学版), 2010, **50** (7): 1114-1117

- [4] Johannes G Khinast, Alexander Bauer, David Bolz, Anthony Panarello. Mass-transfer enhancement by static mixers in a wall-coated catalytic reactor [J]. *Chemical Engineering Science*, 2003, **58** (3-6): 1063-1070
- [5] Zhang Weidong, Chen Geng, Li Jiang, Liu Junteng. Intensification of mass transfer in hollow fiber modules by adding solid particles [J]. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2009, **48** (15): 8655-8662
- [6] Cao Z, Wiley D E, Fane A G. CFD simulation of net type turbulence promoters in a narrow channel [J]. *Journal of Membrane Science*, 2001, **185** (2): 157-176
- [7] Guo Zengyuan (过增元). Mechanism and control of convective heat transfer-coordination of velocity and heat flows [J]. *Chinese Science Bulletin* (科学通报), 2000, **45** (19): 2118-2122
- [8] Guo Z Y, Li D Y, Wang B X. A novel concept for convective heat transfer enhancement [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1998, **41** (14): 2221-22-25
- [9] Meng Ji'an (孟继安), Chen Zejing (陈泽敬), Li Zhixin (李志信), Guo Zengyuan (过增元). Field coordination analysis and convection heat transfer enhancement in duct [J]. *Journal of Engineering Thermophysics* (工程热物理学报), 2003, **24** (4): 652-654
- [10] Wang Songping (王松平), Xu Yanfang (徐艳芳), Song Hongxun (宋洪训), Chen Qinglin (陈清林), Hua Ben (华贲). Physical mechanical and control approach to enhancing convective mass transfer [J]. *Journal of Qingdao University* (青岛大学学报), 2003, **16** (1): 32-36
- [11] Wei Lifeng (魏立峰), Qiu Lin (邱林). Study of field synergy theory on the performance of mass transfer in dehumidifying air conditioner [J]. *Refrigeration Air Conditioning & Electric Power Machinery* (制冷空调与电力机械), 2007, **28** (3): 26-29
- [12] Lei Zhen, Wu Yingying, Lu Shiqing, Yang Bolun. Mass transfer modeling in pervaporation based on multifields synergy theory [J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2008, **16** (1): 79-83
- [13] Chen Qun, Meng Ji'an. Field synergy analysis and optimization of the convective mass transfer in photocatalytic oxidation reactors [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2008, **51** (11): 2863-2870