

水平与竖直布置方式下静态混合器内 瞬态压力波动混沌特征

孟辉波 禹言芳 王 丰 吴剑华*

(沈阳化工大学 辽宁省高效化工混合技术重点实验室, 辽宁沈阳 110142)

摘 要: 为了获得不同布置方式下 SK 型静态混合器内流体瞬态流动的非线性特征, 在湍流状态下 ($Re = 1756 \sim 3512$) 采用高速数据采集器 Dewe-3021 和压力传感器测量了不同雷诺数和截面处瞬态压力波动时间序列 (PFS); 利用混沌吸引子周界测度、混沌动力结构突变以及递归率等参数定量表征水平放置与竖直放置时 SK 型静态混合器内压力波动特征。研究表明: 不同布置状态下静态混合器内 PFS 的混沌吸引子二维面积增长率随轴向位置的变化趋势基本一致, 且 $S_A - A_0$ 呈线性分布; 与水平放置的 SK 型静态混合器相比, 竖直放置时压力波动混沌特性强, 混沌动力结构突变小, 吸引子演化稳定; 混沌形态特征参数能有效区别 SK 型静态混合器在不同布置状态下的流体动力学特征。

关键词: 静态混合器; 压力波动信号; 面积增长率; 突变; 递归率

中图分类号: TQ051.7

引 言

静态混合器是一种没有运动部件的在线高效混合设备, 其基本工作机理是利用固定在管内的混合单元体改变流体在管内的流动状态, 以达到不同流体之间良好分散和充分混合的目的^[1-2]。静态混合器与孔板柱、文氏管、搅拌器、均质器等其他设备相比, 具有体积小投资省、能耗低效率高和易于连续化生产等优点。因此, 在化工过程强化领域得到了广泛的应用^[3-8]。

混合设备内强化动量传递过程往往与其流场特性密切相关, 只有掌握了设备内的流动规律才能有效地分析流体微团之间的混合和传递特性。因此, 静态混合器内流场特性研究备受关注。对于应用最为广泛的旋流静态混合器, 国内外学者已从流体阻力特性^[2,9-11]、传热性能^[9,12] 以及混合特性^[3,6,8,13] 等方面进行了报道。考虑到静态混合器具有优良传

质与传热行为的关键是螺旋元件与管壁耦合形成径向二次流强化流体微团湍动和混合, 本课题组前期通过对 SK 型静态混合器内压力波动信号 (pressure fluctuation signals, PFS) 和速度时间序列的瞬态特性进行研究, 发现混合器内的瞬态流动具有明显的非线性特征^[5,7,14-16]。

为了获得工艺流程中不同布置方式对 SK 型静态混合器内的流体流动的影响, 本文利用混沌吸引子周界测度、混沌动力结构突变以及递归率等 3 个特征参数分析水平放置与竖直放置下 SK 型静态混合器不同轴向位置处壁压的波动特性, 挖掘布置方式与流动特征之间的内在关系, 以期对 SK 型静态混合器工业化应用的进一步推广提供基础理论支持。

1 压力波动非线性特征

相空间内的混沌吸引子形态和结构是评价湍流流动特性的重要依据^[17]。假设任意瞬态压力波动信号为 $p(i\Delta t)$, $i = 1, 2, \dots, n$ (Δt 是采样时间间隔, n 为数据序列总长度), 其归一化时间序列为 $s(i\Delta t)$ 。

当选取的延迟时间是 τ , 嵌入维是 m 时, 根据 Takens 嵌入定理^[18], 可得到时间序列的重构相空间向量 $S(k)$:

$$S(k) = \{s(k\Delta t), s(k\Delta t + \tau), \dots, s(k\Delta t + (m-1)\tau)\} \quad (1)$$

收稿日期: 2013-06-06

基金项目: 国家自然科学基金 (21106086/21306115); 辽宁省高等学校优秀人才计划资助项目 (LJQ2012035); 辽宁省博士科研启动基金 (20131090); 辽宁省教育厅科研项目计划 (L2013164)

第一作者: 男, 1981 年生, 工学博士, 副教授

* 通讯联系人

E-mail: jianhuawu@163.com

式中, $k = 1, 2, \dots, N$ 。 N 为重构相空间吸引子上点的总数 $N = n - (m - 1)\tau/\Delta t$ 。选择优于伪最近邻域点法的 Cao 方法确定最小嵌入维数 m , 最佳时间延迟 τ 取 Fraser 互信息第一次达到最小值时所对应的时间^[19]。

吸引子轨迹 $S_k = (s(k\Delta t), s(k\Delta t + \tau))$ 在两维相空间中充分展开后, 其最大轮廓所包含的面积称为混沌吸引子面积 $A(\tau)$ 。混沌吸引子面积 $A(\tau)$ 的大小可以采用积分方法计算, 瞬态壁压波动信号混沌吸引子在 x 轴方向的极差:

$$\Delta x = \max(s(k\Delta t)) - \min(s(k\Delta t)) \quad (2)$$

将 x 轴方向的变化范围均匀分为间隔为 $l_k = \Delta x/K$ 的 K 个区间。同时将混沌吸引子 x 向分量按照积分区间进行分组:

$$\min(s(k\Delta t)) + l_k(j-1) \leq s(h\Delta t) \leq \min(s(k\Delta t)) + l_k \cdot j \quad (3)$$

式中 $j = 1, 2, \dots, K$ 。特定积分区间内 y 向分量极差为:

$$\Delta y_j = \max(s(h\Delta t + \tau)) - \min(s(h\Delta t + \tau)) \quad (4)$$

混沌吸引子的面积 $A(\tau)$ 可表示为

$$A(\tau) = \lim_{K \rightarrow \infty} \sum_{j=1}^K \Delta y_j \frac{\Delta x}{K} \quad (5)$$

式中 K 的取值决定了计算精度。

吸引子的长轴 $L_{\text{axis}}(\tau)$ 定义为主轴方向上 2 个相空间点之间最长距离

$$L_{\text{axis}}(\tau) = \max(X_i - Y_i) \quad (6)$$

上式中 X_i 与 Y_i 均为主轴上的点。

吸引子的短轴 $S_{\text{axis}}(\tau)$ 定义为副轴方向上 2 个相空间点之间最长距离, 计算式为

$$S_{\text{axis}}(\tau) = \max(X'_i - Y'_i) \quad (7)$$

上式中 X'_i 与 Y'_i 均为副轴上的点。由吸引子面积的定义可知, 当 K 取 1 时, 吸引子面积等于长轴和短轴的乘积。

相空间中的递归状态可通过投影在二维平面上黑点和白点进行定量评价, 其中黑点表示该坐标上横轴及纵轴对应的状态发生递归现象, 白点则表示不发生递归现象。递归率(recurrence rate, R_r) 是递归图平面中递归点占平面可容纳总点数的百分比, 它表明了 m 维相空间中彼此靠近的相空间点占总点数的比例。即:

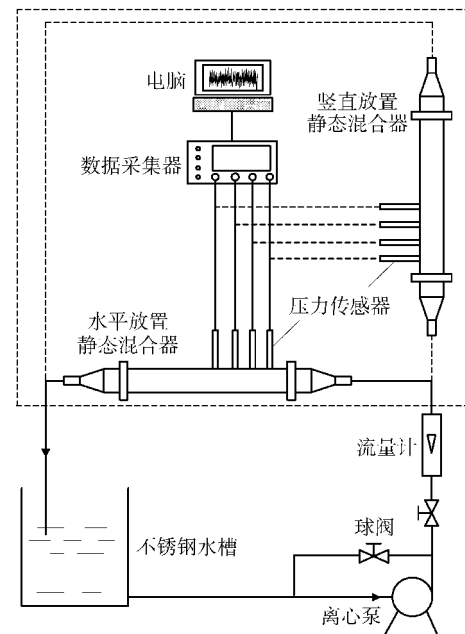
$$R_r = \frac{1}{N^2} \sum_{k,h=1}^N \Theta(\varepsilon - \|S(k) - S(h)\|) \quad (8)$$

其中, ε 是距离的阈值, $\|\cdot\|$ 是一种范数, $\Theta(\cdot)$ 是

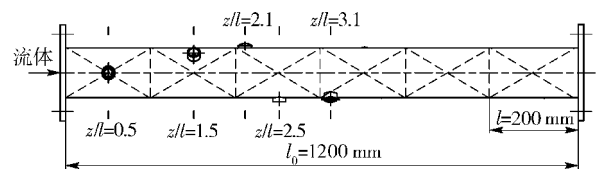
Heaviside 函数。由于递归率 R_r 的变化规律与确定性 D_{et} 、平均对角线长度 L 变化规律相同, 而与分叉性 D_{iv} 变化规律相反, 求得 R_r 变化规律便可知其余特征参数的变化规律^[20]。

2 不同布置方式下 PFS 实验装置

不同布置方式下旋流静态混合器瞬态压力波动实验装置如图 1(a) 所示, 主要由 SK 型静态混合循环系统和高速动态数据采集系统组成。其中不锈钢 SK 型静态混合器为 SK-50/100 型(赛依普(南通)石化设备有限公司), 结构如图 1(b) 所示。管长 $l_0 = 1200 \text{ mm}$, 内含的 6 个螺旋混合元件依次按先右旋再左旋周期排列, 混合元件直径 $D = 100 \text{ mm}$, 长径比 $A_r = 2$, 厚度 $\delta = 4 \text{ mm}$ 。SK 型静态混合循环动力系统采用变频磁力驱动泵 50CQ-4.0(上海上泵集团)作为动力源, 驱动流体使其在 SK 静态混合循环系



(a) PFS测量系统



(b) KSM结构

图 1 水平与竖直布置方式下 SK 型静态混合器(KSM)内 PFS 测量系统

Fig. 1 Schematic diagram of the experiment setup for instantaneous PFS in the vertical and horizontal SK mixers (KSM)

统内流动,流量通过转子流量计(沈阳北星)控制。

在线高速数据采集系统包括4支CYG41000高频动态压力传感器(成都泰斯特电子信息有限责任公司)、1台在线数据采集器DEWE-3021(奥地利DEWETRON公司)。其中DEWE-3021有16个通道,每个通道数据最高采集频率为200 kHz,最大采样长度为60000, A/D分辨率为24 bit,线性度精度为0.1%。高频动态压力传感器为不锈钢压阻传感器,量程为 ± 20 kPa,非线性度为0.04%~0.06% FS,过载能力为200%,精度为C档。传感器上标有刻度,可以使探针伸缩定位。

3 结果与讨论

吸引子形态周界测度分析包括吸引子面积、吸引子长轴、吸引子短轴分析。描述吸引子长轴和短轴时,取决于吸引子主轴和副轴上的4个端点。由于实测信号受到噪声的影响,吸引子鲁棒性较差,长轴和短轴随时间延迟的变化不像吸引子面积那样光滑,不利于吸引子特征量的提取^[21],因此在对SK型静态混合器压力波动信号进行吸引子形态周界测度分析时,主要考察吸引子面积及其增长率。

3.1 精度K的选取

图2表示在 $Q=0.5\text{ m}^3/\text{h}$ 时的压力波动信号混沌吸引子面积 $A(\tau)$ 在不同延迟时间 τ 下随精度 K 的变化。从图2中可以看出随着 K 的增大, $A(\tau)$ 逐渐减小并趋于平稳。当 $K \geq 120$ 时, $A(\tau)$ 的变化率基本低于0.5%,同时考虑到计算机的处理能力,本文计算混沌吸引子面积时的精度选用150。

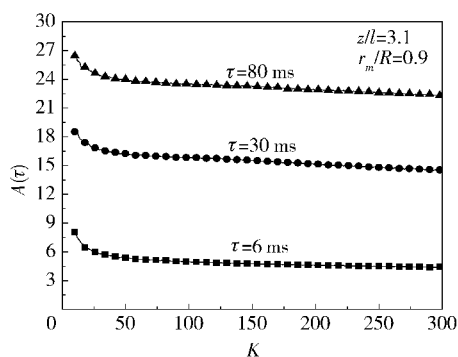


图2 PFS 混沌吸引子面积 $A(\tau)$ 随精度 K 的变化

Fig. 2 The relationship between the chaotic attractor areas and the number of intervals

3.2 不同布置方式混沌吸引子周界测度比较

3.2.1 PFS 二维吸引子形态特征分布

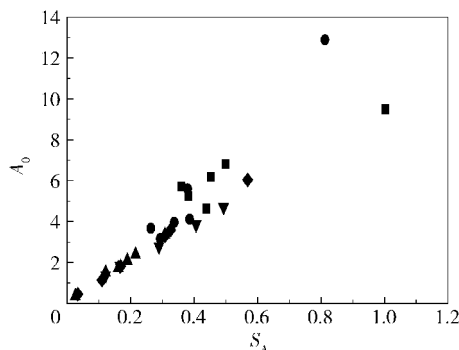
在混沌流体力学分析中,通过直接观察高维系

统吸引子形态来判断湍流非线性流动的特性是十分困难的。而在研究二维吸引子形态时,只需关心 $[s(k\Delta t), s(k\Delta t + \tau)]$ 的动力学轨迹随时间延迟 τ 增大在相平面结构的演化。前期研究表明在 $\tau < \tau_f$ 时,吸引子面积 $A(\tau)$ 随着时间延迟 τ 增加线性增大; $\tau = \tau_f$ 时吸引子完全展开,吸引子面积 $A(\tau)$ 达到最大值 A_0 ^[16],利用最小二乘法回归面积增长率 S_A ,即第一区域的吸引子几何形态特征量满足:

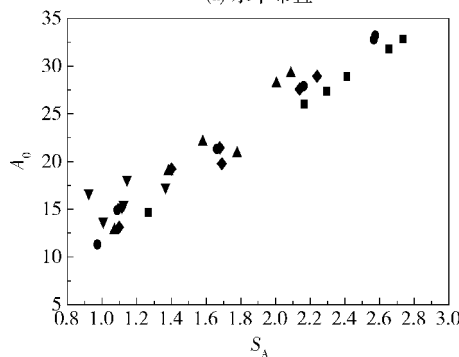
$$A(\tau) \approx S_A \tau + A_0 \quad 0 \leq \tau \leq \tau_f \quad (9)$$

以面积增长率 S_A 为横坐标,吸引子拓扑结构完全展开后的最终面积 A_0 为纵坐标,重点考察不同操作条件下压力波动混沌吸引子形态的变化规律。

当 $Re = 1756 \sim 3512$ 时,水平放置与竖直放置下SK型静态混合器不同截面($z/l = 0.5 \sim 3.1$)处壁压波动信号的混沌吸引子 $S_A - A_0$ 分布如图3所示。从图3中可以看出无论是处于水平放置还是竖直放置的静态混合器,其内PFS的混沌吸引子 $S_A - A_0$ 均呈线性分布, $z/l = 0.5$ 截面处测得的压力波动信号吸引子面积增长率 S_A 和面积 A_0 最大。 $z/l = 1.5$ 、2.1、3.1时,水平放置时PFS的 $S_A - A_0$ 分布比较集



(a) 水平布置



(b) 竖直布置

■ $z/l=0.5$; ● $z/l=1.5$; ▲ $z/l=2.1$; ▼ $z/l=2.5$; ◆ $z/l=3.1$

图3 PFS 混沌吸引子 $S_A - A_0$ 分布图

Fig. 3 The relationship between the maximum areas of chaotic attractors and their growth rates of areas

中,竖直放置状态下 $S_A - A_0$ 分布比较分散,说明在不同的雷诺数下,竖直放置的 SK 型静态混合器内流体受螺旋叶片的切割作用,壁面处流体压力波动信号混沌特性变化范围大。与水平放置的 SK 型静态混合器对比,竖直放置时螺旋叶片对流体切割分流作用更为明显,不同上游流体在下游螺旋通道内的掺混、湍动更为激烈。

3.2.2 截面面积增长率

在 $Re = 3160$ 时,水平放置与竖直放置两种状态下混合器不同截面 ($z/l = 0.5 \sim 3.1$) 处测得的 PFS 进行混沌吸引子周界测度分析,计算第一区域的面积增长率 S_A ,结果如图 4 所示。从图 4 中可以看出,不同布置状态下 SK 型静态混合器内 PFS 的混沌吸引子面积增长率的变化趋势基本一致。在第 3 元件的中间截面 ($z/l = 2.5$) 处面积增长率 S_A 都达到最小。竖直放置时压力波动信号混沌吸引子面积增长率 S_A 是水平放置时的 4.07 ~ 8.37 倍,说明竖直放置时 SK 型静态混合器内壁压波动强度提高,流体微团的混沌混合增强,PFS 时间序列向多维拓扑空间转变的敏感程度强于水平放置。

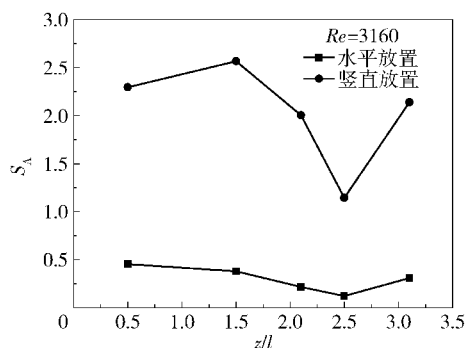


图 4 不同轴截面的 PFS 混沌吸引子面积增长率变化图

Fig. 4 The relationship between the growth rates of areas and axial measurement positions

3.2.3 雷诺数面积增长率

为了比较 $Re = 1756 \sim 3512$ 吸引子面积的变化,以静态混合器 $z/l = 3.1$ 截面在不同放置方式下壁压波动信号为例,计算混沌吸引子面积第一区域的面积增长率 S_A ,计算结果如图 5 所示。从图中可以看出,两种状态下 SK 型静态混合器的 PFS 吸引子面积增长率均呈现随 Re 先减小再增大的趋势。不同之处:当 $Re \geq 2807$ 时竖直放置时管壁尺寸开始约束混沌强化混合作用,而对于水平布置时管壁尺寸约束混沌强化混合不明显。图 3 和图 4 表明在相同的条件下竖直放置的 SK 型静态混合器强化流体微

团湍动程度明显高于水平布置。

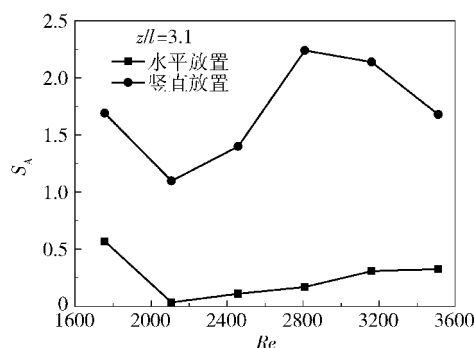


图 5 不同 Re 下 PFS 混沌吸引子面积增长率变化图

Fig. 5 The profiles of the growth rates of area of PFS attractors for different Reynolds numbers

3.3 不同放置方式混沌动力结构突变比较

采用互信息法算法和 Cao 方法得到静态混合器内壁压波动信号的延迟时间 $\tau = 3$ ms 和嵌入维数 $m = 4$ 维,进行相空间重构。应用动力学相关指数分割方法(Q 算法)^[22],检测压力波动吸引子混沌动力结构突变,计算混沌动力结构特征量最大值,比较不同截面和不同雷诺数下 SK 型静态混合器竖直放置和水平放置时壁压波动信号混沌动力结构的差异性。

3.3.1 截面混沌动力结构突变

当 $Re = 2107$ 时,不同截面处壁压波动信号的突变特征最大值 T_{max} 分布如图 6 所示。从图中可以看出 SK 型静态混合器水平放置与竖直放置时,各个截面内壁压波动信号吸引子结构突变特征值 T_{max} 变化规律基本一致,在截面 $z/l = 0.5, 1.5, 2.5$,特征值 T_{max} 缓慢变大;截面 $z/l = 2.1$ 处特征值 T_{max} 达到最大,截面 $z/l = 3.1$ 处特征值 T_{max} 降低。在混合元件过渡处,水平布置的混合器内 PFS 突变指数高于竖直放置。

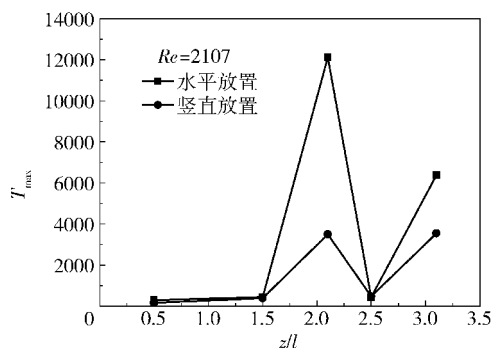


图 6 不同截面处 PFS 结构突变最大值 T_{max} 分布

Fig. 6 The maxima of the dynamic scaling exponents of PFS at different axial positions

3.3.2 雷诺数混沌动力结构突变

图 7 为 SK 型静态混合器 $z/l=3.1$ 截面处壁压波动信号的动力结构突变特征值 T_{\max} 随雷诺数的变化规律。从图中可以看出, 雷诺数 $Re=2107$ 时, 水平放置和竖直放置下 SK 型静态混合器内壁压波动信号突变统计值均达到最大值。当雷诺数增大到 $Re=2456$, 水平放置的 SK 型静态混合器内壁压波动信号突变统计值虽然较 $Re=2107$ 有所减小, 但仍然处于一个高值。当雷诺数 $Re \geq 2809$ 时, 两种状态下 SK 型静态混合器内壁压波动信号混沌吸引子变化特征值 T_{\max} 均趋于稳定。结合图 6 和图 7 发现, 水平放置 SK 型静态混合器结构突变最大值 T_{\max} 比竖直放置时数值大, 说明水平放置时壁压波动信号的混沌吸引子宏观不稳定性增强。而竖直放置时, 由于受到重力的抑制作用, 壁压波动信号的混沌动力系统动力结构差异相对较小。

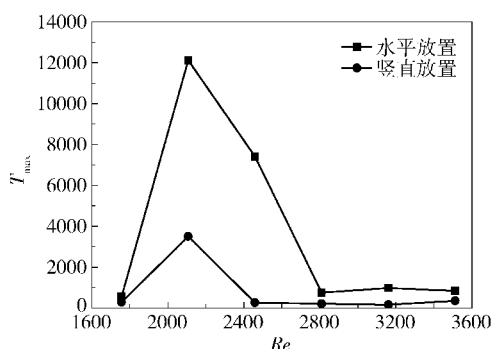


图 7 不同雷诺数下 PFS 结构突变最大值 T_{\max} 分布图

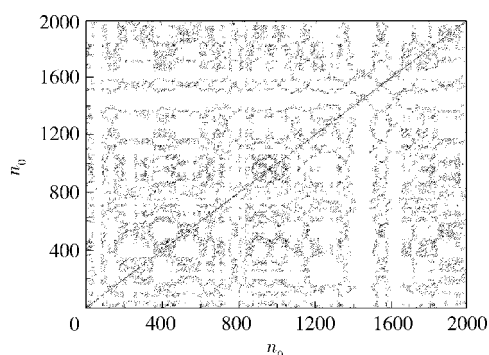
Fig. 7 The maximum of dynamic scaling exponents of PFS for different Reynolds numbers

3.4 不同布置方式递归特性比较

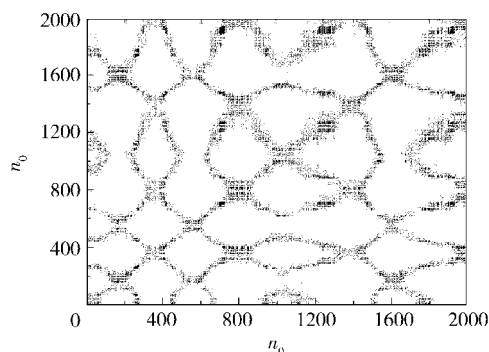
考虑到递归定量分析对数据长度不敏感^[23], 截取数据长度 $n_0=2000$ 的瞬态 PFS, 采用互信息法和 Cao 法计算压力波动信号延迟时间和最小嵌入维数得到了 PFS 的递归图, 如图 8(a) 和 (b) 所示。从图中可以看出 SK 型静态混合器内壁压波动信号递归图, 不仅有孤立的点, 而且存在沿对角线方向发育较好的纹理, 说明 SK 型静态混合器壁面压力脉动信号具有很明显的混沌特性, 即貌似随机却又具有自身确定性的特点。同时可以看出 SK 型静态混合器水平放置时, 递归图中纹理点的分布存在较多的周期性, 并且点比较集中; 而竖直放置时, 纹理结构比较分散, 周期性比水平放置时少。

图 8(c) 表示采用不同放置方式时 SK 型静态混合器内 PFS 递归率 R_r 的变化规律。从图中可以看

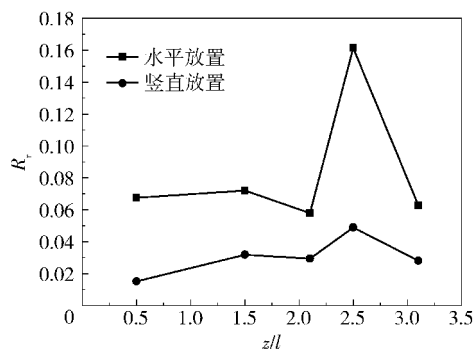
出 SK 型静态混合器水平放置时, 各个截面内壁压波动信号的递归率 R_r 明显比 SK 型静态混合器竖直放置时数值大, 该规律进一步说明水平放置时 SK 型静态混合器内壁压波动信号周期性比竖直放置时高, 混沌特性小。同时也可以看出, 在同一混合元件内截面 $z/l=2.5$ 处 R_r 比截面 $z/l=2.1$ 处的 R_r 高, 与文献[24]的最大 Lyapunov 指数变化规律相反, 上述规律对比进一步说明利用递归率 R_r 与最大 Lyapunov 指数定量表征静态混合器内混沌混合效果一致性。



(a) 竖直放置($z/l=0.5, Re=1756$)



(b) 水平放置($z/l=0.5, Re=1756$)



(c) 轴向分布

图 8 不同放置方式 SK 型静态混合器递归图比较

Fig. 8 The profiles of recursion rate of PFS in the KSM placed under different status

4 结论

(1) 在同一流量下, 竖直放置的 SK 型静态混合器内壁压波动强度提高, 流体微团的混沌混合增强, PFS 混沌吸引子面积增长率是水平放置时的 4.07~8.37 倍; 但当 $Re \geq 2807$ 时, 竖直放置的管壁开始约束混沌强化混合作用, 而水平放置时这种约束作用不明显。

(2) SK 型静态混合器竖直放置时, 重力作用与流体流动方向相反, 抑制 PFS 混沌动力学结构突变, 从而导致水平放置的 KSM 内 PFS 混沌动力结构突变特征值 T_{\max} 高于竖直放置即水平放置时壁面 PFS 混沌吸引子宏观不稳定性较强。

(3) 水平放置的 SK 型静态混合器内壁压波动的 R_t 明显高于竖直放置数值, 说明静态混合器水平放置时壁面 PFS 周期性比竖直放置时高, 混沌特性小; 两种放置方式下 R_t 均在静态混合器的 $z/l = 2.5$ 截面处取得最大值, 表明此截面的混沌特性最弱。

参考文献:

- [1] 骆培成, 程易, 汪展文, 等. 液-液快速混合设备研究进展[J]. 化工进展, 2005, 24(12): 1319-1326.
Luo P C, Cheng Y, Wang Z W, et al. Research progress of liquid-liquid fast mixing equipment[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2005, 24(12): 1319-1326. (in Chinese)
- [2] 禹言芳, 王丰, 孟辉波, 等. 旋流静态混合器内瞬态流动特性研究进展[J]. 化工进展, 2013, 32(2): 255-262, 282.
Yan Y F, Wang F, Meng H B, et al. Research progress of the characteristics of instantaneous flow in static mixer with twisted-leaves[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2013, 32(2): 255-262, 282. (in Chinese)
- [3] Tajima H, Yoshida Y, Abiko S, et al. Size adjustment of spherical temperature-sensitive hydrogel beads by liquid-liquid dispersion using a Kenics static mixer[J]. Chemical Engineering Journal, 2010, 156(2): 479-486.
- [4] Ghasemi F, Ommen J R V, Sahimi M. Analysis of pressure fluctuations in fluidized beds. I. Similarities with turbulent flow[J]. Chemical Engineering Science, 2011, 66(12): 2627-2639.
- [5] 王修纲, 郭瓦力, 吴剑华. 静态混合器中液液分散的实验及 CFD 模拟[J]. 化工学报, 2012, 63(3): 767-774.
Wang X G, Guo W L, Wu J H. Experimental and numerical study on liquid-liquid dispersion in static mixer [J]. CIESC Journal, 2012, 63(3): 767-774. (in Chinese)
- [6] Tajima H, Nagata T, Abe Y, et al. HFC-134a hydrate formation kinetics during continuous gas hydrate formation with a Kenics static mixer for gas separation[J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 2010, 49(5): 2525-2532.
- [7] Meng H B, Liu Z Q, Yu Y F, et al. Intrinsic mode entropy analysis of tube-wall pressure fluctuation signals in the Kenics static mixer [J]. International Journal of Chemical Reactor Engineering, 2011, 9(A70): 1-19.
- [8] Saadjan E, Rodrigo A J S, Mota J P B. On chaotic advection in a static mixer[J]. Chemical Engineering Journal, 2012, 187: 289-298.
- [9] Saha S K, Dutta A. Friction and heat transfer characteristics of laminar swirl flow through a circular tube fitted with regularly spaced twisted-tape elements[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2001, 44(22): 4211-4223.
- [10] Song H S, Han S P. A general correlation for pressure drop in a Kenics static mixer[J]. Chemical Engineering Science, 2005, 60(21): 5696-5704.
- [11] 张春梅, 吴剑华, 龚斌. SK 型静态混合器流体湍流阻力的研究[J]. 化学工程, 2006, 34(10): 27-30.
Zhang C M, Wu J H, Gong B. Flow resistance researches for SK static mixer tube of turbulent flow[J]. Chemical Engineering, 2006, 34(10): 27-30. (in Chinese)
- [12] 龚斌, 吴剑华, 王宗勇, 等. SK 型静态混合器流体湍流时传热性能的研究[J]. 高校化学工程学报, 2008, 22(3): 384-388.
Gong B, Wu J H, Wang Z Y, et al. Turbulent heat-transfer performance in SK static mixer[J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 2008, 22(3): 384-388. (in Chinese)
- [13] Hobb D M, Muzzio F J. The Kenics static mixer: a three-dimensional chaotic flow[J]. Chemical Engineering Journal, 1997, 67(3): 153-166.
- [14] Meng H B, Liu Z Q, Yu Y F, et al. Time-frequency analysis of Hilbert spectrum of pressure fluctuation time series in kenics static mixer based on empirical mode decomposition[J]. Brazilian Journal of Chemical Engineering, 2012, 29(1): 167-182.
- [15] 吴剑华, 禹言芳, 王宗勇, 等. 旋流静态混合器内瞬态压力波动信号递归特性[J]. 化工学报, 2011, 62(10): 2845-2853.
Wu J H, Yu Y F, Wang Z Y, et al. Recurrence characteristics of instantaneous pulsating pressure signals in static mixer with twisted-leaves[J]. CIESC Journal, 2011, 62(10): 2845-2853. (in Chinese)

- [16] 禹言芳, 熊强, 孟辉波, 等. 竖直上升螺旋流内瞬态压力波动信号混沌吸引子形态特性[J]. 过程工程学报, 2012, 12(5): 735–741.
Yu Y F, Xiong Q, Meng H B, et al. Morphological characteristics of chaotic attractor of instantaneous pressure fluctuation signals in a Kenics static mixer[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2012, 12(5): 735–741. (in Chinese)
- [17] Ottino J M. The kinematics of mixing: stretching, chaos, and transport[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1989: 107–117.
- [18] Takens F. Detecting strange attractors in turbulence[J]. Lecture Notes in Mathematics, 1981, 898: 366–381.
- [19] Fraser A M, Swinney H L. Independent coordinates for strange attractors from mutual information[J]. Physical Review A, 1986, 33(2): 1134–1140.
- [20] 王春华, 仲兆平, 李睿, 等. 气-固流化床压力脉动递归图分析[J]. 化工学报, 2010, 61(3): 557–564.
Wang C H, Zhong Z P, Li R, et al. Recurrence plots analysis of pressure fluctuation in gas-solids fluidized bed[J]. CIESC Journal, 2010, 61(3): 557–564. (in Chinese)
- [21] 宗艳波, 金宁德, 王振亚, 等. 倾斜油水两相流流型混沌吸引子形态周界测度分析[J]. 物理学报, 2009, 58(11): 7444–7551.
Zong Y B, Jin N D, Wang Z Y, et al. The perimeter measure analysis of chaotic attractor morphology of inclined oil-water two phase flow patterns[J]. Acta Physica Sinica, 2009, 58(11): 7444–7551. (in Chinese)
- [22] 龚志强, 封国林, 董文杰, 等. 非线性时间序列的动力结构突变检测的研究[J]. 物理学报, 2006, 55(6): 3180–3186.
Gong Z Q, Feng G L, Dong W J, et al. The research of dynamic structure abrupt change of nonlinear time series[J]. Acta Physica Sinica, 2006, 55(6): 3180–3186. (in Chinese)
- [23] 吕勇, 徐金梧, 李友荣. 递归图和近似熵在设备故障信号复杂度分析中的应用[J]. 机械强度, 2006, 28(3): 317–321.
Lv Y, Xu J W, Li Y R. Application of recurrence plot and approximate entropy on complexity analysis of machinery fault signal[J]. Journal of Mechanical Strength, 2006, 28(3): 317–321. (in Chinese)
- [24] 孟辉波, 吴剑华, 禹言芳, 等. SK型静态混合器切割区内速度混沌特性[J]. 化学工程, 2009, 37(12): 24–27, 46.
Meng H B, Wu J H, Yu Y F, et al. Chaotic characteristics of velocity in cutting region of Kenics static mixer[J]. Chemical Engineering, 2009, 37(12): 24–27, 46. (in Chinese)

Chaotic characteristics of instantaneous pressure fluctuations in vertical and horizontal Kenics static mixers

MENG HuiBo YU YanFang WANG Feng WU JianHua

(Liaoning Key Laboratory of Chemical Technology for Efficient Mixing, Shenyang University of Chemical Technology, Shenyang Liaoning, 110142, China)

Abstract: In order to determine the nonlinear characteristics of transient flow in a Kenics static mixer (KSM) in different directions under turbulent conditions, high-speed data acquisition equipment (Dewe-3021) and a pressure transducer were employed to measure the time series of instantaneous pressure fluctuation signals (PFS) for different Reynolds numbers and different cross sections. The pressure fluctuations in both horizontal and vertical KSMs were characterized quantitatively through chaotic attractor perimeter measurements, dynamic structure changes and recurrence rate measurements. The pressure fluctuation experiment results show that the growth ratios of the chaotic attractors of the two-dimensional areas of KSM in different orientations have the same variation trend with changes in axial position and both $S_A - A_0$ plots have linear distributions. The pressure fluctuation in a vertical KSM has stronger chaotic characteristics, smaller dynamic structure change and more stable attractor evolution than for a horizontal KSM. Chaotic characteristics can distinguish the fluid dynamics properties in KSM placed in different directions and give a theoretical basis for promoting widespread industrial applications of KSM.

Key words: static mixer; pressure fluctuation signals; growth ratio of area; catastrophe; recurrence rate

<http://www.journal.buct.edu.cn>