

引用格式:王宗勇,由智丹,丁桂彬,等. 叶片宽度比对同心双螺旋静态混合器混合性能的影响[J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 2020, 47(1): 53–60.

WANG ZongYong, YOU ZhiDan, DING GuiBin, et al. Effect of twisted elements aspects ratio on the mixing performance of a concentric double helix static mixer[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science), 2020, 47(1): 53–60.

# 叶片宽度比对同心双螺旋静态混合器混合性能的影响

王宗勇 由智丹 丁桂彬 王智晓

(沈阳化工大学 能源与动力工程学院, 沈阳 110142)

**摘 要:** 同心双螺旋静态混合器是一种新型的静态混合装置,能够实现流体在混合管内的同心反向螺旋流动。为探究同心双螺旋元件内外叶片宽度比对混合效果的影响规律,利用 Fluent 中多相流混合模型对低雷诺数状态下该混合器内的混合过程进行了数值模拟,研究表明:在较低雷诺数下,同心双螺旋静态混合器与对应尺寸的传统 Kenics 型混合器相比混合效果明显提升,在叶片宽度比  $e$  为  $0 \sim 3/2$  时混合效果提升  $6.9\% \sim 28\%$ ;随着内外叶片宽度比的增大,混合效果呈现先增后减的规律,当  $e = 2/3$  时混合效果最好;在不同的宽度比下,流体的分离强度沿混合管轴向变化规律相同,即在第一个混合元件内分离强度下降缓慢,第二、三个元件内下降迅速,第四个元件内几乎保持不变而处于维持混合状态,说明本文所研究的混合器使用较少的混合元件即可达到较好的混合效果。

**关键词:** 静态混合器; 双螺旋结构; 数值模拟; 混合效果; 分离强度

**中图分类号:** TQ053.6 **DOI:** 10.13543/j.bhxbzr.2020.01.009

## 引 言

静态混合器是一种能够实现两种或两种以上流体连续混合或反应的过程设备,其通过内置的混合元件使管内流体流动状态发生改变,利用对流体产生的分割、合并、拉伸等作用来实现多种流体的混合或反应<sup>[1]</sup>。目前工业上的静态混合器主要分为 3 种,分别为分流式、旋流式和绕流式<sup>[2]</sup>。通过一些具有特定排列方式的板条组合结构使管中流体产生绕流的混合器称为绕流式混合器,如 SML 型混合器;能够通过多层波纹板对混合管内的流体进行分流,并引导流体的流动方向发生改变的混合器称为分流式混合器,如 SMV 型混合器<sup>[3]</sup>;通过一系列错

开一定角度呈连续排列的扭旋元件对流体进行旋转、拉伸、分割的混合器称为旋流式混合器<sup>[2]</sup>,如 Kenics 型混合器。

相比于绕流式和分流式混合器,旋流式混合器具有结构简单、可靠性高、制造成本低、流动压降小等优点,因此在工程上得到更广泛的应用。旋流式混合器以 Kenics 混合器为主要代表,经过几十年的发展<sup>[4–9]</sup>,研究人员开发出了多种旋流型静态混合器,如 SSK 型静态混合器<sup>[10]</sup>、单管多旋静态混合器、多流道静态混合器<sup>[11]</sup>等。国内外学者对旋流型混合器进行了深入研究,在其流动特性和混合性能等方面取得了一些很有价值的结论。王修纲等<sup>[12]</sup>用数值模拟方法对静态混合器中液–液两相混合同样进行了研究,结果表明,静态混合器中液–液分散过程包含分散混合和分布混合两种情况,他们针对这两种混合方式分别从液滴和相浓度两种角度对液–液混合过程进行了阐述。Byrde 等<sup>[13]</sup>采用数值模拟方法模拟了含有 6 个混合元件的 Kenics 型静态混合器,研究表明,在雷诺数为 100 时,最佳扭旋角为  $180^\circ$ 。Ling 等<sup>[14]</sup>应用数值模拟的方法验证了当混合管中插入同旋向且无限长的螺旋混合元件时,如果把长径比减小至 0.6 且保持每个元件扭旋

收稿日期: 2019–08–30

基金项目: 国家自然科学基金(21476142); 辽宁特聘教授计划(辽教函[2018]35 号); 辽宁省“百千万人才工程”入选项目(201892151); 辽宁省自然科学基金(2019-ZD-0082); 辽宁省教育厅科研项目计划(LQ2019003); 沈阳市科技计划项目(RC180011)

第一作者: 男, 1973 年生, 教授

E-mail: syuctwzy@163.com

角均为  $180^\circ$ , 达到的混合效果与使用标准的 Kenics 型混合器的效果是相同的。Hobbs 等<sup>[15]</sup>用示踪粒子法通过对每个混合元件末尾截面的粒子轨迹进行分析, 提出了管内混合效果与混合管轴向长度之间关系的方程, 同时定性、定量地对混合器的混合性能进行了分析。Bakker 等<sup>[16]</sup>用 Fluent 软件对 Kenics 型和 HEV 型静态混合器的流动过程进行了分析, 研究了静态 Kenics 混合器混合过程中流体的压力降和流速分布等特性。王宗勇等<sup>[17]</sup>利用数值模拟的方法对一种多流道螺旋静态混合器的混合性能进行了定性与定量分析, 结果表明随着流道数的增加, 混合效果相应提高。综合前人的研究成果可以发现, 改变并优化管内旋流元件结构是众多研究人员提高混合器混合效果的主要方式和努力方向。

尽管旋流式静态混合器具有较为成熟的应用经验, 但在相同元件长度情况下, 该类型混合器的混合效果相对其他两种类型的混合器要差, 这作为最大的一个弊端阻碍了旋流式混合器进一步的应用与推广。因此, 基于以上背景, 本课题组提出了一种能够实现管内流体同心反向双螺旋流动的新型旋流型混合器, 该混合器具有相同扭旋中心的内外螺旋叶片, 沿管轴向相邻螺旋叶片旋向相反并错开一定角度。该混合器具有不同于其他旋流型混合器的独特的流动特性, 流体的径向流动更强, 理论上具有更强的混合能力。初步的实验结果表明, 该种新型混合器大大提高了旋流型混合器的混合效果, 特别是在较低的雷诺数下混合效果提升更加明显<sup>[18]</sup>。但是由于对管内流体的流动细节和混合过程还缺乏深入的了解, 从而阻碍了该种混合器的优化开发和工业化应用。

为了掌握同心双螺旋元件结构对混合效果的影响规律, 本文拟从元件宽度比这一重要的结构参数

入手, 探究该新型混合器的混合特性, 分析同心双螺旋混合器内外螺旋叶片宽度比对液-液两相流体混合效果的影响规律。

## 1 研究方法

本文应用 Fluent 软件对同心双螺旋静态混合器进行数值模拟, 采用 mixture 多相流模型<sup>[19-20]</sup>来模拟两种不同流体在该新型静态混合器内的混合过程, 分析内外扭旋叶片宽度比对混合性能的影响, 以掌握宽度比对混合性能影响的规律。mixture 多相流模型可以模拟多相流中混合相的动量、连续性和能量方程, 第二相的体积分数以及滑移速度和漂移速度, 其主要用于模拟在短空间尺度上局部的多相之间有良好的耦合性的多相流, 也可以用于模拟有强烈耦合的各相同性多相流和各相以相同速度运动的多相流。

### 1.1 模型及变量

本文所研究的混合单元由 4 个混合元件构成, 如图 1 所示。每个混合元件由旋向相反的内叶片和外叶片同心装配而成, 内、外叶片具有相同的扭旋中心线, 即混合管轴线。若内叶片为左旋, 则外叶片为右旋, 该扭旋元件记为 RoLi 型; 若内叶片为右旋, 外叶片为左旋, 该混合元件记为 LoRi 型。各混合元件内、外叶片数量分别为 1 和 2, 两个外叶片成  $180^\circ$  对称布置, 而内叶片和外叶片在任一横截面内均成垂直状态。为了便于分析, 本文定义混合管中心轴单侧的内叶片或外叶片径向尺寸为叶片宽度, 即图 1 中  $W_o$  为外叶片宽度,  $W_i$  为内叶片宽度。各叶片的扭旋角均为  $180^\circ$ ; LoRi 型和 RoLi 型混合元件首尾连续交替同心装配在混合管内, 前后相邻混合元件中心或周边对应的叶片周向错开一定角度 ( $90^\circ$ )。

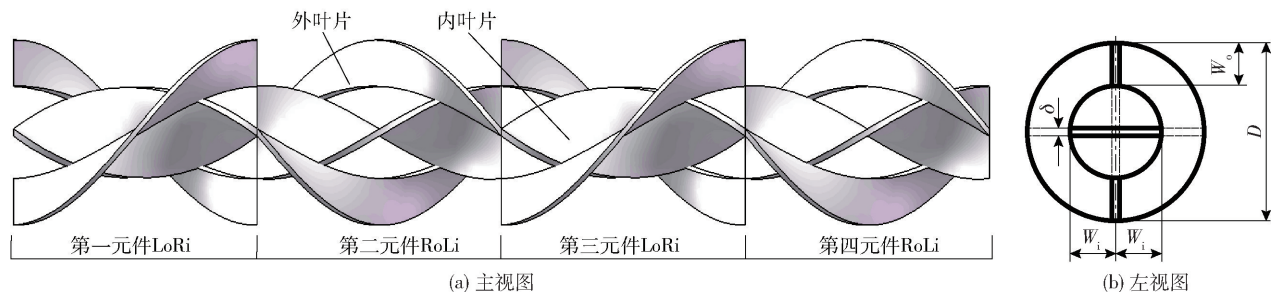


图 1 双螺旋结构扭旋元件的几何模型

Fig. 1 Geometric model of the twisted element with a double-helix

混合管内径  $D = 50\text{ mm}$ , 管长  $L = 500\text{ mm}$ , 混合单元(4 个混合元件) 总长  $L_i = 300\text{ mm}$ , 连续相流体入口长度  $L_a = 125\text{ mm}$ , 离散相流体入口管内径与混合管内径相同, 两管呈垂直状态, 离散相入口管距离混合管入口端面  $L_b = 25\text{ mm}$ , 连续相入口至 T 型管相交位置距离  $L_c = 50\text{ mm}$ , 扭旋片厚度  $\delta$  均为  $1\text{ mm}$ 。外叶片与内叶片宽度比范围  $0 \sim 1.5$ , 长度  $H$  均为  $75\text{ mm}$ (扭转  $180^\circ$  的轴向长度)。混合管结构如图 2 所示。定义叶片宽度比  $e$  为外叶片宽度与内叶片宽度之比( $W_o/W_i$ ), 本文研究  $e$  的改变对混合性能的影响。

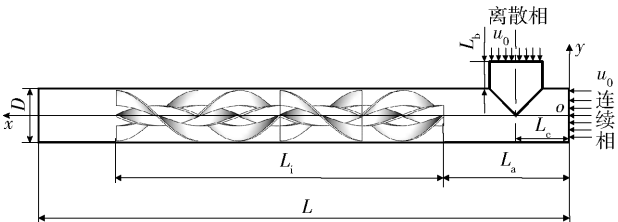


图 2 同心双螺旋静态混合器结构

Fig. 2 Concentric double-helix static mixer structure

利用 Fluent 17.0 对混合管内流体的混合过程进行数值模拟, 建模和划分网格分别使用 Solidworks 软件和 ICFM CFD 软件完成。两种液体采用 T 型入流方式, 忽略重力的影响。多相流模型选择 mixture 模型, 连续相和离散相均采用均匀速度入口边界条件。混合管的流动状态用连续相入口的雷诺数  $Re$  表示

$$Re = \frac{u_0 \rho D}{\mu} \tag{1}$$

式中,  $u_0$  为连续相入口流体速度,  $D$  为连续相入口内径,  $\mu$  为连续相流体动力黏度,  $\rho$  为连续相流体密度。本次模拟采用  $Re = 400$  (以连续相物性为参数选取), 根据公式 (1) 可以计算得到连续相入口速度  $u_0 = 0.008\text{ m/s}$ , 离散相与连续相入口速度相同, 出口选择 Outflow 边界条件, 壁面采用 No Slip 边界条件。

1.2 模拟方案

本文的连续相和离散相工质均为液态水, 物性温度分别为  $20\text{ }^\circ\text{C}$  和  $80\text{ }^\circ\text{C}$  ( $20\text{ }^\circ\text{C}$  水的密度为  $998.2\text{ kg/m}^3$ , 黏度为  $0.001\text{ }003\text{ Pa}\cdot\text{s}$ ;  $80\text{ }^\circ\text{C}$  水的密度为  $971.8\text{ kg/m}^3$ , 黏度为  $0.000\text{ }355\text{ }1\text{ Pa}\cdot\text{s}$ )。在本文的模拟中对两相流体均作以下假定: 在  $Re = 400$  的工况下物性参数均为定值; 两股流体均为连续的不可压缩牛顿流体; 整个模拟过程中均不考虑重力对流

体的影响。

1.3 网格无关性检验

由于本文研究对象结构复杂, 网格密度过大会使计算量剧增, 耗费大量计算机时, 而网格密度过小则会影响计算精度。因此为确定最佳网格密度, 以流体流过最后一个混合元件时的混合效果(分离强度)为标准进行网格无关性检验。

针对  $e = 2/3$  结构的混合器, 对管内流动区域进行网格划分, 建立了 7 种不同网格数量的模型, 选取  $Re = 400$  进行模拟, 分别得到相应的分离强度和网格数量的关系, 如图 3 所示。可以看出, 随着网格数量的增加, 分离强度逐渐趋于稳定, 网格数量大于等于 161 万时, 分离强度几乎保持不变, 说明此时计算精度已不受网格数量影响。在同时保证收敛速度和计算精度的情况下, 本文全部模拟均将网格数量控制在 161 万以上。

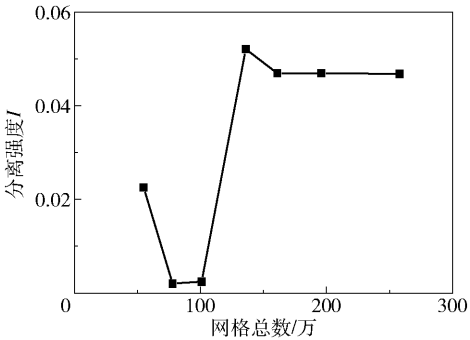


图 3 分离强度随网格密度的变化

Fig. 3 Variation of separation intensity with mesh density

2 混合性能

2.1 轴向浓度分布

图 4 为不同宽度比下混合器纵向截面连续相的

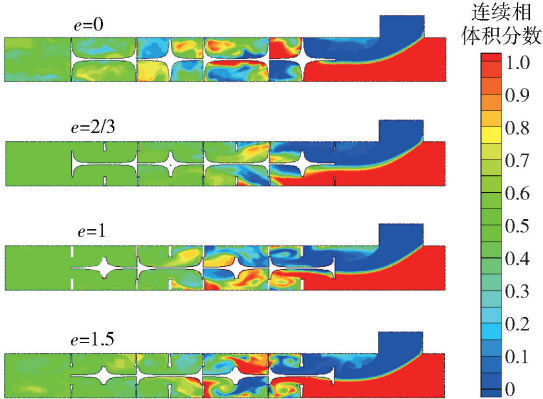


图 4 混合器轴向截面的连续相体积浓度分布

Fig. 4 Continuous phase volume concentration distribution in the axial section of the mixer



浓度分布云图,不同灰度代表不同的连续相体积分数。

由图 4 可以看出,两种不同流体经 T 型入口流入,在入口段的空管部分(未进入混合元件以前),两种流体基本没有发生混合,分界面由管壁逐渐圆弧过渡到混合管中心位置;在进入第一个混合元件后,在内部叶片的扭旋作用下两相流体逐渐发生混合,径向混合区域在混合元件的作用下迅速扩大;流体经过 3~4 个扭旋元件后基本达到均匀混合程度,连续相浓度(体积分数)大致稳定在 50% 左右。当  $e=0$  时,对应的混合元件仅有内螺旋片而无外螺旋片,即传统 Kenics 型元件,流体经过 4 个混合元件后靠近壁面部分流体仍有较多高浓度区域,依然未混合均匀,与其他 3 种同心双扭旋元件相比其混合效果相对较差。

由图 4 可知,混合元件促进了流体之间的扩散,加速了混合过程。同时混合元件的混合能力随着外

叶片的加入而增强,相比于只有内叶片单螺旋结构,同心双螺旋混合元件显著提高了流体径向混合能力,因此达到同样的混合效果所需的混合单元数量相对较少。

尽管图 4 可以定性揭示流体沿混合器轴向的混合变化趋势,但不同横截面内两种流体的分布状态以及不同截面之间的浓度分布差异尚需深入研究。

## 2.2 径向浓度分布

流体流经同心双扭旋元件过程中被分割为多股流体,同时在旋流离心力作用下产生一定程度的径向流动,且由于同一混合元件内外叶片的旋向相反,在内外叶片交界处的流体也会在相反的螺旋流作用下加剧混合,流体在横截面内的径向混合势必会得到强化。为了分析内外叶片宽度比变化对径向混合作用的影响规律,以及同心双螺旋元件的径向混合强化效果,本文绘制了 4 种不同内外叶片比的混合器横截面连续相浓度云图,如图 5 所示。

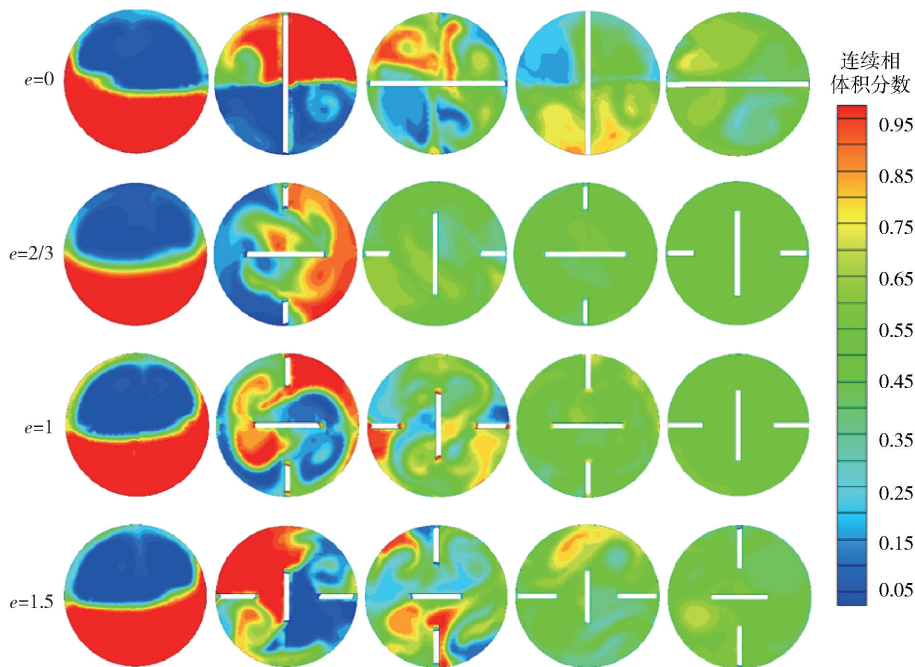


图 5 横截面内连续相浓度分布云图

Fig. 5 Continuous phase concentration distribution cloud map

由图 5 可以看出,对于所分析的 4 种宽度比不同的混合单元而言,流体在未进入旋流叶片之前连续相浓度分布差别不大,说明在较小的雷诺数下即使采用 T 型管入流,在无扭旋元件的空管段两种流体也几乎不发生混合;流体经过一个混合元件的旋流作用后,在其出口截面处离散相和连续相明显出现相互交错状态,但此刻呈现的仍旧是整体的分布

混合,两种流体分别被分割成多个区域并相互间隔。随着宽度比的增大,离散相和连续相区域的形状和大小发生一定变化,整体而言, $e=2/3$  对应的连续相浓度分布较为均匀,但不够明显;流体在达到第二个扭旋单元出口时,混合效果明显得到改善,连续相分布更为均匀。对 4 种宽度比元件的浓度分布进行比较, $e=0$  下存在高浓度连续相区域,混合效果最

差,而其他 3 种宽度比的元件差别不大;在第三个扭旋单元出口处,宽度比  $e = 2/3$  和  $e = 1$  的两种元件对应的流体混合基本均匀,而其余两种元件的混合效果相对较差,特别是  $e = 0$  元件环绕内壁面处存在明显的高浓度连续相区域。这种现象说明外扭旋片的加入提高了混合速度,在满足一定混合要求的前提下能够缩短混合元件的长度,降低混合器的空间需要。流体流过第四个元件后, $e = 2/3$  元件对应的流体已经完全混合均匀, $e = 1$  和  $e = 1.5$  元件对应的流体也仅存在极少的高浓度区域,说明此时基本混合均匀,相比而言  $e = 0$  元件对应流体还存在相对较多的高浓度区域(主要分布在近壁面处),混合效果相对较差。

综上,双螺旋结构提升了混合效果,流体在内外双螺旋叶片的影响下形成两股相反的螺旋流,同一股流体被内、外叶片分割并反向旋流流动,离散相和连续相接触面积增大,内外螺旋流分界区域流体剪切拉伸作用增强。相比之下,单螺旋结构的静态混合器(Kenics 型)在流动过程中只存在单股同向的螺旋流,周向流动性远不如双螺旋结构的混合器,且内部流体在大直径处由于壁面阻碍其继续向外扩散的趋势,径向流动性较差,导致靠近壁面处的流体混合效果不如双螺旋混合器。因此双螺旋结构的混合器在混合元件长度相同的情况下,总体混合效果更优。

3 混合性能的定量分析

第二节所列出的连续相轴向与径向分布云图(图 4、5)仅能够从定性的角度分析与评价静态混合器的混合效果。为精确分析同心双螺旋静态混合器的混合效果,本文采用分离强度来进行定量表征<sup>[19-20]</sup>。分离强度的概念由 Danckwerts<sup>[19]</sup>首次提出,现已成为科研人员经常采用的表征混合效果的手段,其数学含义为实际测得的混合流体浓度方差与完全分离体系(未混合)方差的比值,计算公式为

$$I = \frac{\sigma^2}{\sigma_{\max}^2} = \frac{\frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (X_i - \bar{X})^2}{\bar{X}(1 - \bar{X})}$$

式中, $\bar{X}$  为混合器某一截面某组分  $m$  个采样点体积分数的平均值; $X_i$  为混合器某一截面不同位置某组分的体积分数值。

分离强度表达式表明,在完全分离的情况下,分离强度值为 1;混合均匀时,分离强度为 0。因此分

离强度数值越小,代表流体的混合效果越好。

根据由分离强度公式求得的数据绘制出流体流经 5 种不同宽度比的混合元件后分离强度随混合轴向位置的变化关系,如图 6 所示。由图 6 可以看出,双螺旋结构的静态混合器混合效果明显优于单螺旋结构的静态混合器( $e = 0$ ,即 Kenics 型混合器),4 种不同  $e > 0$  的双螺旋结构混合器在整个混合过程中混合效果均优于单螺旋结构混合器。在流经第一混合元件时,各宽度比混合器的混合效果差别不大。4 种双螺旋结构( $e > 0$ )的混合器在经过 1.5 个左右的混合元件后,分离强度均已达到 0.7,而单螺旋混合器达到该分离强度则需要 2 个混合元件,同比节约 0.5 个混合元件。在  $e = 0$  的混合器中流体分离强度达到 0.3 左右时需要流过至少 3 个混合元件,而  $e = 2/3$  的混合器分离强度达到 0.3 仅需要略长于 2 个混合元件的长度,同比节省约 1 个混合元件。即使对于混合性能相对较差的  $e = 1$ 、 $e = 1.5$  和  $e = 3/7$  这 3 种双螺旋结构的混合器,在流体流过第三个混合元件时的分离强度也比  $e = 0$  的单螺旋结构混合器的分离强度低约 0.1 左右,优于单螺旋混合器中流体流过第四个混合元件时的混合效果。

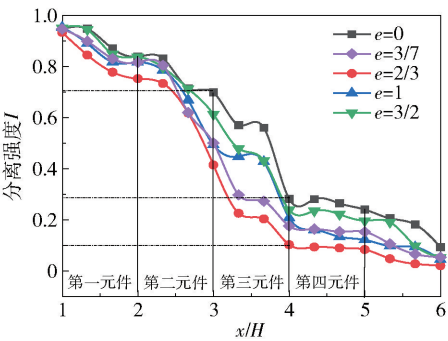


图 6 分离强度随轴向位置的变化关系

Fig. 6 Relationship between separation strength and axial position

根据以上分析可以得出,在本文的研究范围内混合器在  $e = 2/3$  的条件下混合效果最好,相比于单螺旋混合器在达到相同的混和效果时能够节省 0.5~1 个混合元件,其次是  $e = 3/2$ 、 $e = 1$  和  $e = 3/7$ , $e = 0$  时混合效果最差。4 种双螺旋结构混合器混合效果均优于单螺旋结构的混合器。

由图 6 可以相对直观地看出整个混合单元混合效果的下降趋势,但是仍缺乏对各元件混合效果的定量分析。为分析混合管中每个混合元件对混合效果的影响程度,本文引入贡献率的概念并定义为  $Q$ ,

表示为

$$Q_n = \frac{I_{i,n} - I_{o,n}}{I_{i,1} - I_{o,4}} \times 100\% \quad (2)$$

式中,  $I_{i,n}$  为第  $n$  个元件入口的分离强度,  $I_{o,n}$  为第  $n$  个元件出口的分离强度,  $n$  为第 1 ~ 4 混合元件序号。

由式(2)可以得到  $Q_1 \sim Q_4$  分别为 21%、40%、37%、2%。由此可知流体在经过第一元件时,在叶片的作用下由平流逐渐变为旋流,旋流强度较低,混合相对平缓;在流经第二和第三混合元件时流体旋流强度增大,分离强度下降迅速,这两个元件对混合的贡献率较大;当流体流经第四元件时分离强度下降缓慢,表明流体已经接近均匀混合,说明对于该混合器,若增加混合元件主要起到的仅是维持混合的作用,对提升混合效果作用微小。

由图 6 可以比较直观地看出以上 5 种混合器混合性能的优劣,但是各宽度比下分离强度曲线在一定程度范围内波动,并有部分区域存在相互交错现象,较难定量地确定各结构的整体混合效果优劣程度,为此,本文提出平均分离强度的概念,平均分离强度  $I_m$  表示为

$$I_m = \left[ \int_{L_o}^{L_e} I(x) dx \right] / (L_e - L_o)$$

式中,  $L_o$  代表第一元件起始轴向位置,  $L_e$  代表第四元件末端轴向位置,  $I(x)$  代表轴向位置  $x$  处的分离强度。

$I_m$  可以表征混合单元长度范围内的整体混合效果,其与宽度比的关系如图 7 所示。由图 7 可以看出,当  $e=0, 3/7, 2/3, 1, 3/2$  时其平均分离强度分别为 0.372、0.303、0.268、0.319、0.347。由此可知,混合效果最优的双螺旋混合器( $e=2/3$ )相比于单螺旋混合器( $e=0$ )混合效果提升约 28%,即使混合效果最差的双螺旋混合器( $e=3/2$ )相比单螺旋混合器混合效果也提升了 6.9%。

改变混合元件的结构会对管内的流动阻力造成影响,流动阻力同时也决定了混合器能耗的大小,而反映流动阻力大小最直观的参数就是压力降,因此本文绘制了图 8 来说明压力降与宽度比之间的关系。

如图 8 所示,  $e=0$  时的压力降最小,显然增加双螺旋结构增大了混合器的流动阻力。随着宽度比的增大,压力降在  $e=1$  时达到峰值,然后随宽度比的继续增大压力降逐渐减小。结合图 7 可以分析得

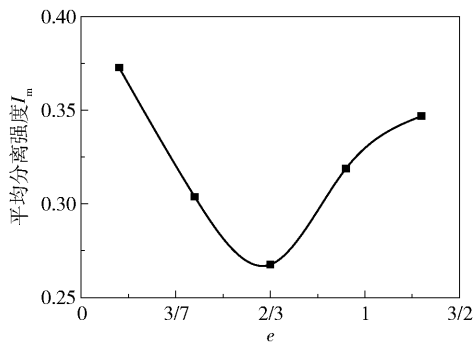


图 7 平均分离强度与宽度比的关系

Fig. 7 Plot of average separation intensity versus width ratio

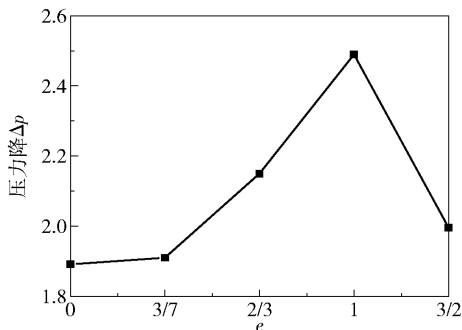


图 8 压力降与宽度比关系

Fig. 8 Relationship between pressure drop and width ratio

出,宽度比在 0 ~ 2/3 之间时随着压力降的增大分离强度逐渐减小,而宽度比为 1 时压力降较大,混合效果与  $e=2/3$  和  $e=3/7$  混合器相比较差,因此在选用本文研究范围内的同心双螺旋混合器时应将宽度比控制在 0 ~ 2/3,既能够实现良好的混合效果,同时也能够满足低能耗的经济需求。

## 4 结论

(1)在较低雷诺数下,本文所研究的 4 种不同宽度比的同心双螺旋静态混合器的混合效果均明显好于传统的单螺旋结构静态混合器,混合效果提升约 6.9% ~ 28%。

(2)较低雷诺数下,同心双螺旋静态混合器横截面内的径向混合效果均匀,中心处和靠近壁面处混合效果差距较小,与单螺旋静态混合器相比明显改善靠近壁面处流体的混合效率。

(3)较低雷诺数下,本文所研究的几种双螺旋结构的静态混合器中  $e=2/3$  混合器混合效果最好,因此该宽度比是此种双螺旋结构静态混合器的最优制造参数。

(4)同心双螺旋静态混合器中的 4 个混合元件



对整体混合的贡献率有一定差异,其中第二元件的贡献率高于其余3个混合元件,由于流体在流经第四混合元件时已经混合相对充分,分离强度下降较为平缓,因此第四元件对混合的贡献率最小。由此可知,少于3个混合元件液体不能充分混合,而大于4个混合元件则对混合效果影响较小,所以在实际应用中该种静态混合器的混合元件数应不少于4个。

### 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] 王修纲. 静态混合环管反应器的流体力学研究及应用[D]. 天津: 天津大学, 2016.  
WANG X G. Research and application of hydrodynamics in static hybrid loop reactor[D]. Tianjin: Tianjin University, 2016. (in Chinese)
- [3] 张春梅,孔祥玲,王宗勇,等. SMV 静态混合器内气液两相流压降的研究[J]. 当代化工, 2011, 40(5): 490-493.  
ZHANG C M, KONG X L, WANG Z Y, et al. Research on pressure drop of two-phase flows in SMV static mixer[J]. Contemporary Chemical Industry, 2011, 40(5): 490-493. (in Chinese)
- [4] MENG H B, JIANG X H, YU Y F, et al. Laminar flow and chaotic advection mixing performance in a static mixer with perforated helical segments[J]. Korean Journal of Chemical Engineering, 2017, 34(5): 1328-1336.
- [5] 龚斌,包忠平,张春梅,等. 混合元件数对 SK 型静态混合器流场特性的影响[J]. 化工学报, 2009, 60(8): 1974-1980.  
GONG B, BAO Z P, ZHANG C M, et al. Effect of number of mixing elements on flow field in Kenics static mixer[J]. CIESC Journal, 2009, 60(8): 1974-1980. (in Chinese)
- [6] 刘向阳,靳新涛,王建康. 不同旋转角度 Kenics 静态混合器的数值模拟及分析[J]. 塑料, 2014, 43(1): 104-107.  
LIU X Y, JIN X T, WANG J K. Numerical simulation and analysis of Kenics static mixer with different rotation angle[J]. Plastic, 2014, 43(1): 104-107. (in Chinese)
- [7] HOBBS D M, MUZZIO F J. Reynolds number effects on laminar mixing in the Kenics static mixer[J]. Chemical Engineering Journal, 1998, 70(2): 93-104.
- [8] 孟辉波,吴剑华,禹言芳,等. 旋流叶片轴向排列对静态混合器混合特性的影响[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2009, 30(8): 924-929.  
MENG H B, WU J H, YU Y F, et al. Analysis of the mixing characteristic in static mixers with different axial-arrangements of twisted-leaves [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2009, 30(8): 924-929. (in Chinese)
- [9] HOBBS D M, MUZZIO F J. Optimization of a static mixer using dynamical systems techniques[J]. Chemical Engineering Science, 1998, 53(18): 3199-3213.
- [10] 费宇,刘雪垠,张志会,等. SSK 型静态混合器和 SX 型静态混合器的数值模拟及对比[J]. 机械, 2014, 41(8): 54-57.  
FEI Y, LIU X Y, ZHANG Z H, et al. Neo-philosophy type static mixer and SX type static mixer in the numerical simulation and comparison [J]. Machinery, 2014, 41(8): 54-57. (in Chinese)
- [11] 吴剑华,张静,张春梅,等. 四叶片组合静态混合器湍流传热性能的数值模拟分析[J]. 过程工程学报, 2009, 9(1): 7-11.  
WU J H, ZHANG J, ZHANG C M, et al. Numerical simulation analysis of turbulent heat transfer performance of four-blade combined static mixer[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2009, 9(1): 7-11. (in Chinese)
- [12] 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)
- [13] BYRDE O, SAWLEY M L. Parallel computation and analysis of the flow in a static mixer[J]. Computers & Fluids, 1999, 28(1): 1-18.
- [14] LING F H, ZHANG X. A numerical study on mixing in the Kenics static mixer[J]. Chemical Engineering Communications, 1995, 136(1): 119-141.
- [15] HOBBS D M, MUZZIO F J. Effects of injection location, flow ratio and geometry on Kenics mixer performance[J]. AIChE Journal, 1997, 43(12): 3121-3132.
- [16] BAKKER A, LAROCHE R. Flow and mixing with Kenics static mixers[J]. Cray Channels, 1993, 15(3): 25-28.

- [17] 王宗勇, 陈超. 多流道螺旋静态混合器混合性能数值模拟研究[J]. 中国机械工程, 2013, 24(2): 268–273, 279.  
WANG Z Y, CHEN C. Numerical simulation of mixing performance in a multi-channel spiral static mixer[J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24(2): 268–273, 279. (in Chinese)
- [18] 王宗勇, 孟辉波, 张春梅, 等. 管内同心双螺旋静态混合器: CN 103816822A [P]. 2014–05–28.  
WANG Z Y, MENG H B, ZHANG C M, et al. Concentric double-helix static mixer in tube: CN 103816822A [P]. 2014–05–28. (in Chinese)
- [19] DANCKWERTS P V. The definition and measurement of some characteristics of mixtures[J]. Applied Scientific Research, 1952, 3(4): 279–296.
- [20] MICKAILY-HUBER E S, BERTRAND F, TANGUY P, et al. Numerical simulations of mixing in an SMRX static mixer[J]. The Chemical Engineering Journal, 1996, 63(2): 117–126.

## Effect of twisted elements aspects ratio on the mixing performance of a concentric double helix static mixer

WANG ZongYong YOU ZhiDan DING GuiBin WANG ZhiXiao

(School of Energy and Power Engineering, Shenyang University of Chemical Technology, Shenyang 110142, China)

**Abstract:** A concentric double-spiral static mixer is a new type of static mixing device, which can realize concentric reverse spiral flow of fluids in a mixing tube. Fluent software was used to explore the influence of the ratio of the widths of the inner and outer blades of the concentric double-spiral element on the mixing effect. The multi-phase-flow mixing model was used to numerically simulate the mixing process in the mixer under low Reynolds number conditions. The results show that the concentric double-spiral static mixer has a significantly improved mixing effect compared with a traditional Kenics type mixer of a comparable size, with the mixing effect increasing by 6.9%–28%, when  $e$ , the ratio of blade widths, was varied from 0 to 3/2. With increasing width ratio of the inner and outer blades, the mixing effect initially increases and then decreases, and the mixing effect is the best when  $e = 2/3$ . For different width ratios, the separation strength of the fluid changes along the axial direction of the mixing tube. The separation strength decreases slowly in the first mixing element, but decreases rapidly in the second and third elements, and remains almost unchanged in the fourth element and maintains a mixing state. The results indicate that, compared with the conventional mixer, the mixer studied in this paper can achieve better mixing results with fewer mixing components.

**Key words:** static mixer; double helix; numerical simulation; mixing effect; separation strength

(责任编辑:吴万玲)