

文章编号:1671-1513(2012)01-0062-04

# SL型静态混合器的改进结构与两相流分析

吴青<sup>1</sup>, 郝丽燕<sup>2</sup>, 任京生<sup>2</sup>

(1. 北京工商大学材料与机械工程学院, 北京 100048; 2. 首钢工学院, 北京 100144)

**摘要:**提出了一种SL型静态混合器的改进结构,对其内部结构加以描述,并对其中两相流的流动场进行分析.考虑实际装置结构内部两相流流动状态下参数之间的相互关系,对其进行理论研究.两相流通过改进的静态混合单元受到撞击、形成分离、绕流以及融合,持续加强混合效果.通过对真实湍流流态所做的解析,可为进一步完善SL型静态混合器的改进结构与参数的选择及优化提供依据.

**关键词:**静态混合器;单元结构改进;两相流分析

**中图分类号:**TS223

**文献标志码:**A

静态混合器是先进的混合单元装置.因其体积小、结构简单、制造容易、安装维护方便,特别是不需要动力驱动,在两相流的混合与吸收操作中可以替代传统的动力搅拌混合设备.其中SL型静态混合器特别适宜食品行业的油脂加工,可用于处理黏度 $\leq 10^4\text{P}$ 或伴有高聚合物介质的混合并同时传质、混合与传热反应的热交换器,加热或冷却黏性产品等单元操作.

传统的SL型静态混合器结构简单、成本低,与其它类型的静态混合器相比,两相流的流动能量损失小.但由于其单元结构内部的叶片少、叶片间隔较大,因此混合效果会有所降低,需通过增加单元数量来弥补.为解决此问题,缩短混合器的长度,提高两相流的混合效率,作者对传统的SL型静态混合器的单元结构加以改进.同时对工作时通道内部的湍流混合状态进行分析,以便能够进一步确定和改进静态混合单元组件、通道形状以及相关结构,达到优化设计的目的.

## 1 SL型静态混合器的改进结构及流动状态

### 1.1 SL型静态混合器的改进结构特点

改进后的SL型静态混合器是由多组改进的静

态混合单元构成(见图1),其单元内部为几层相互直立交叉的薄不锈钢宽横条叶片按X型规律排列叠擦焊接在一起填充在外管内.同层横条相互隔开相同距离且平行,横条排列方向与管壳轴线呈 $45^\circ$ ,相邻两层横条互呈 $90^\circ$ .而在上下横条之间焊有一根直不锈钢圆棒(见图2).

1. 静态混合单元; 2. 外管.

图1 SL改进型静态混合器结构示意图

Fig. 1 Structure of improved SL type static mixer

### 1.2 静态混合器流道内流体的流动状态

两相流沿轴向流进静态混合单元后,按单元结构分为两股流.对于同一层的液流,其中一股主流转过 $45^\circ$ 进入叶片之间的通道形成无阻碍顺流;另一股反方向拐 $45^\circ$ ,受到叶片阻挡,只能绕过叶片形成垂直平板绕流.两叶片间隙之后的通道上下空间突然扩大,顺流液通过后与相邻液流形成垂直撞击

1. 圆棒; 2. 叶片.

图2 SL改进型静态混合单元组件结构

Fig.2 Structure of improved SL type static mixing unit

混合,随后经过的间隙通道又缩小. 绕流液在绕叶片时通道缩小,与相邻液流形成垂直冲击,随后流道再扩大,成为波浪流. 不论是顺流还是绕流,在沿同方向通道至外管壁时受到阻挡,又撞击转向. 由于静态混合单元特殊的纵横交错结构,使得两相流在流道中时而左旋时而右旋,不断改变流动方向,不仅将中心液流冲向周边,而且将周边的流体推向中心,这种沿不同方向的撞击、搅动,形成强烈的旋流径向混合. 两相流进入下一混合单元时,方向突变,在空间转一角度进入通道. 其自身的旋转作用在相邻元件的连接处界面上亦会发生. 经过多组静态混合单元,两相流流出时实现了均匀混合. 这种完善的径向环流混合作用,使两相流在管内截面上的温度梯度、速度梯度和质量梯度明显减小.

## 2 静态混合器中两相流流态分析

SL型静态混合器的改进结构中两相流是复杂的三维湍流混流状态. 为便于建模分析,在理论研究中要做一些必要简化. 可考虑将两相液流分解为不同方向的顺流与在空间连续扩大又缩小的旋流.

### 2.1 两相流在静态混合单元流道内的流动分析

建立直角坐标系,在各部分结构分析中,分别以各自的相对坐标系,采用不同下标数字表示.

考虑两相流在通道内的空间湍流状态,用 Navier-Stokes 方程表示为:

$$\frac{\partial(\bar{u}_1\bar{u}_1)}{\partial x_1} + \frac{\partial(\bar{u}_1\bar{v}_1)}{\partial y_1} + \frac{\partial(\bar{u}_1\bar{w}_1)}{\partial z_1} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_1} + \nu \nabla^2 \bar{u}_1 - \left[ \frac{\partial(\bar{u}'_1\bar{u}'_1)}{\partial x_1} + \frac{\partial(\bar{u}'_1\bar{v}'_1)}{\partial y_1} + \frac{\partial(\bar{u}'_1\bar{w}'_1)}{\partial z_1} \right],$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\bar{v}_1\bar{u}_1)}{\partial x_1} + \frac{\partial(\bar{v}_1\bar{v}_1)}{\partial y_1} + \frac{\partial(\bar{v}_1\bar{w}_1)}{\partial z_1} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial y_1} + \\ & \nu \nabla^2 \bar{v}_1 - \left[ \frac{\partial(\bar{v}'_1\bar{u}'_1)}{\partial x_1} + \frac{\partial(\bar{v}'_1\bar{v}'_1)}{\partial y_1} + \frac{\partial(\bar{v}'_1\bar{w}'_1)}{\partial z_1} \right], \\ & \frac{\partial(\bar{w}_1\bar{u}_1)}{\partial x_1} + \frac{\partial(\bar{w}_1\bar{v}_1)}{\partial y_1} + \frac{\partial(\bar{w}_1\bar{w}_1)}{\partial z_1} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial z_1} + \\ & \nu \nabla^2 \bar{w}_1 - \left[ \frac{\partial(\bar{w}'_1\bar{u}'_1)}{\partial x_1} + \frac{\partial(\bar{w}'_1\bar{v}'_1)}{\partial y_1} + \frac{\partial(\bar{w}'_1\bar{w}'_1)}{\partial z_1} \right]. \end{aligned} \quad (1)$$

其中  $\bar{u}_1 = \tilde{u}_1 - u'_1, \bar{v}_1 = \tilde{v}_1 - v'_1, \bar{w}_1 = \tilde{w}_1 - w'_1$ .

式(1)中,  $\bar{u}_1, \bar{v}_1, \bar{w}_1$  分别为  $x_1, y_1, z_1$  速度分量的平均随机值;  $\bar{u}'_1, \bar{v}'_1, \bar{w}'_1$  分别为  $x_1, y_1, z_1$  速度分量的平均脉动值;  $\tilde{u}_1, \tilde{v}_1, \tilde{w}_1$  分别为  $x_1, y_1, z_1$  速度分量的随机值;  $u'_1, v'_1, w'_1$  分别为  $x_1, y_1, z_1$  速度分量的脉动值;  $\rho$  为两相流的平均密度;  $\bar{p}$  为两相流的平均压力;  $\nu$  为两相流的运动黏性系数.

### 2.2 两相流在静态混合单元的顺流分析

两相流体沿外管轴线进入静态混合单元后,冲到倾斜  $45^\circ$  的叶片表面便分成顺流与绕流两股. 假定两相流在叶片表面一定距离之外的速度分布是均匀的. 取两相流进出口及壁面为系统,以通道中线与横条片表面相交处建直角坐标系 ( $x_2, y_2, z_2$ ),  $x_2$  轴垂直于叶片表面,  $y_2$  轴平行叶片表面,外管轴线与  $x_2$  轴夹角为  $\alpha$ . 其动量运输量可表示为

$$\begin{aligned} \oint_{\Sigma} \rho u_{\alpha} (\mathbf{u}_{\alpha} \cdot \mathbf{n}) dA &= \iint_{1,2} \rho u_1 (\mathbf{u}_1 \cdot \mathbf{n}) dA + \\ & \iint_{2,3+6,1} \rho u (\mathbf{u}_0 \cdot \mathbf{n}) dA + \iint_{3,4} \rho u_2 (\mathbf{u}_2 \cdot \mathbf{n}) dA + \\ & \iint_{5,6} \rho u_3 (\mathbf{u}_3 \cdot \mathbf{n}) dA, \end{aligned} \quad (2)$$

式(2)中,  $u_1$  为两相流进入速度;  $u_2$  为两相流顺流出口速度;  $u_3$  为两相流逆流终止处速度;  $A$  为过流面积.

式(2)中 1,2 为两相流入口位置; 3,4 为两相流顺流出口位置; 5,6 为两相流逆流终止位置; 2,3 与 6,1 为壁面.

### 2.3 两相流在静态混合单元的绕流分析

两相流在通过两条叶片间隙后,流通面积突然扩大,随后到达下一叶片,间隙又减小;而在绕过叶片时,流通面积减小,随后又扩大,这都造成两相流各流束之间的相互撞击并形成旋涡. 同时在经过叶片间隙的不锈钢直圆条时,形成圆柱绕流.

### 2.3.1 两相流绕叶片的流态

两相流绕叶片的  $z$  向流态可用复势  $W(z)^{[1]}$  表示为

$$W(z) = \Phi(x, y) + i\Psi(x, y) = A(r^n \cos n\theta + ir^n \sin n\theta), \quad (3)$$

公(3)式中的实部为速度势  $\Phi$ , 虚部为流函数  $\Psi$ ,  $\theta$  为流线与流道方向的夹角。

液流绕过叶片边角的流型以幂函数形式表示为

$$W_j = Az^n. \quad (4)$$

速度场表示为

$$\bar{U} = \frac{dW_j}{dz} = Anz^{n-1}. \quad (5)$$

两相流以一定角度撞击并绕过叶片, 则  $n = 1/2$ , 对当量半径  $r$  有

$$W_j = A\sqrt{z} = A[\sqrt{r_d} \cos(\theta/2) + i\sqrt{r_d} \sin(\theta/2)], \quad (6)$$

因两相流绕叶片  $2\pi$  角流动, 将其代入得

$$W_j = \Phi = -A\sqrt{r_d}, \Psi = 0.$$

### 2.3.2 两相流通过扩大流道的流态

1) 流道突然扩大, 两相流中心流线沿流道轴向流动, 其它流线则转向, 最外层流线几乎沿垂直方向流动. 建立相对直角坐标系, 中心轴为  $x_1$  轴,  $y_1$  轴沿径向. 假定  $x_1$  正向特征长度为  $x'_1$ , 中心流平均速度为  $u_x$ , 中心流脉动速度为  $u'_x$ ,  $y_1$  正向特征长度为  $y'_1$ , 中心流平均速度为  $v_y$ , 中心流脉动速度为  $v'_y$ , 而  $\frac{y'_1}{x'_1} < 0.1$ , 连续性方程表示为

$$\frac{\partial u_x}{\partial x_1} + \frac{\partial v_y}{\partial y_1} = 0. \quad (7)$$

对于雷诺平均运动方程在  $y_1$  方向的分量为

$$u_x \frac{\partial v_y}{\partial x_1} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y_1} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y_1} - \frac{\partial}{\partial x_1} \overline{v'_y u'_x} - \frac{\partial}{\partial y_1} \overline{v'^2_y}. \quad (8)$$

2) 形成两相流附面层, 随后又分离. 其附面层方程变换后, 附面层动量厚度  $\delta$  为

$$\delta(y_1) = l \left( \frac{u_x}{u_0} \right)^{-3} \left[ c_1 + \left( \frac{c_2}{2} \right)^{1+\frac{1}{n}} \int_{\frac{y_{1c}}{l}}^{\frac{y_1}{l}} \left( \frac{u_x}{u_0} \right)^{3+\frac{2}{n}} d\left( \frac{y_1}{l} \right) \right]^{\frac{n}{n+1}}, \quad (9)$$

式(9)中,  $l$  为附面层当量长度;  $u_0$  为平均流速;  $y_{1c}$  为变流区坐标;  $c_1, c_2, n$  均通过实验来确定。

对于附面层脱离有

$$\frac{\partial u_y}{\partial z} = \frac{u_x(1-\eta)^2}{\delta} \left[ 4\eta - \frac{B}{6}(4\eta-1) + 2 \right], \quad (10)$$

$$\eta = \frac{z}{\delta(y_1)},$$

式(10)中,  $B$  为速度分布形状系数。

### 2.3.3 两相流通过缩小流道的流态

到达两条叶片间隙后, 流通面积突然减小, 忽略间隙周围空间液流对两相流的影响, 其速度分布方程为

$$u_2 = -\frac{\bar{p}}{2\mu L}(y_2^2 - by_2), \quad (11)$$

式(11)中,  $L$  为流道  $x$  向长度;  $b$  为流道  $y$  向长度。

### 2.3.4 两相流的圆柱绕流

对于远离边界的两相流在绕不锈钢圆柱时是做平面流动, 可利用经过变换后的幂级数表示. 其势流流速方程<sup>[2]</sup>为

$$u_4(x_4) = 2u_2 \left[ \frac{x}{r_s} - \frac{1}{3!} \left( \frac{x_4}{r_s} \right)^3 + \frac{1}{5!} \left( \frac{x_4}{r_s} \right)^5 - \dots \right], \quad (12)$$

式(12)中,  $r_s$  为不锈钢圆条直径。

### 2.3.5 两相流在流道终点的流态<sup>[3]</sup>

1) 两相流沿流道至管壁处即转向成为反向涡流, 其当量半径为  $r_0$ , 角速度为  $\omega_1$ 。

当  $r \leq r_0$ , 流场为  $u_\theta = r\omega$ 。

$$\text{涡流速度环量: } \Gamma = \int_0^{2\pi} ru_\theta d\theta = 2\pi r^2 \omega.$$

$$\text{涡量: } \Omega_z = 2\omega.$$

当  $r > r_0$ , 周围流体被带动, 流速场为  $u_\theta = \frac{r_0^2 \omega}{r}$ ;

势涡沿圆周的速度环量为  $\Gamma = 2\pi r_0^2 \omega$ 。

2) 两相流以  $45^\circ$  撞击在内管壁, 产生分离并改变流动方向, 其位势流动速度分布为

$$U = ax_1, \quad (13)$$

$$V = ay_1.$$

式(13)中,  $U$  为  $x_1$  方向速度分量;  $V$  为  $y_1$  方向速度分量;  $a$  为常数。

### 2.3.6 两相流的二次流旋涡

两相流在静态混合单元流道绕流的叶片和不锈钢圆柱背面形成背面涡流, 而在流道终点拐角处形成横向二次流旋涡, 流向均与主流旋转方向相反. 其流态可用涡量方程表示为:

$$u_5 du_5 + v \nabla^2 u_5 dy_5 - \frac{\partial \Omega}{\partial y_5} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y_5} dy_5 = 0. \quad (14)$$

## 3 结 论

1) 改进后的 SL 静态混合器既保留了传统 SL

型静态混合器结构简单、制造使用成本低、安装维护方便、两相流的流动能量损失小等优点,又克服了传统SL型静态混合器单元结构内部叶片少、叶片间隔较大、混合效果降低的缺点,可以提高单元操作中两相流的混合效率.

2) 对改进后的静态混合单元叶片内两相流的流动进行初步分析. 由于混合器单元内部结构特殊,两相流的流动状态复杂,因此不同部位要建立不同的模型. 下一步是在理论分析基础上采用计算流体动力学求得数值解,并通过实验确定和验证.

3) 通过对改进后的静态混合器通道内部的湍流混合状态进行分析和研究,综合各影响因素,运用正确的数学分析方法和计算机工具,可以为单元组件、通道形状以及相关结构参数的合理选择及特性优化提供必要的参考依据.

#### 参考文献:

- [1] 林建忠. 流体力学[M]. 北京:清华大学出版社, 2005:200-203.
- [2] 章梓雄,董曾南. 粘性流体力学[M]. 北京:清华大学出版社,1998:167.
- [3] Wu Qing. Study of gas-liquid two-phase flow in SV type static mixer[C]//International Symposium on Fluid Machinery and Fluid Engineering. Beijing: 1996,9: 510-517.
- [4] 陈懋章. 粘性流体动力学基础[M]. 北京:高等教育出版社,2002.
- [5] 张兆顺,崔桂香. 流体力学[M]. 2版. 北京:清华大学出版社,2006.
- [6] 黄卫星,李建明,肖泽仪. 工程流体力学[M]. 2版. 北京:化学工业出版社,2009:226-228.
- [7] 陈卓如. 工程流体力学[M]. 2版. 北京:高等教育出版社,2004:192-194.
- [8] 张春梅,吴剑华,王宗勇. SV型静态混合器湍流阻力的初步研究[J]. 化学工程,2009,37(1):19-23.

## Improved Structure and Two-phase Flow Analysis for SL Type Static Mixer

WU Qing<sup>1</sup>, HAO Li-yan<sup>2</sup>, REN Jing-sheng<sup>2</sup>

(1. School of Material and Mechanical Engineering, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China; 2. Shougang Institute of Technology, Beijing 100144, China)

**Abstract:** An improved structure of SL type static mixer was presented in this paper. The internal structure was described and two-phase flow field was analyzed. The comprehensive influencing factors were considered during analyzing the relationship of two-phase flowage parameters in practical device, and the theoretical study was carried out. The two-phase flow was impinged, separated, flowed around and merged by the two-phase flow. The mixture effect was strengthened. The analytic calculation was carried out according to the practicable turbulent flow pattern. The results are useful for the structure parameters effectively selection and the characteristic optimization for the improved structure of SL type static mixer.

**Key words:** static mixer, improved unit structure, two-phase flow analysis

(责任编辑:檀彩莲)