环形分布器内气流静压分布规律的近似理论分析*

吕志敏1 李春忠2 丛德滋2

(1.盐城工学院 材料工程系 江苏 盐城 224003 2.华东理工大学 上海 200237)

摘 要 在实验研究的基础上对环形分布器内气体变质量流动的静压分布规律进行了近似的理论分析。根据动量平衡原理建立了环形分布器内气体变质量流动的静压分布数学模型 ,模型参数由实验数据拟合 ,预测结果与测量值基本吻合。

关键词 环形分布器;变质量流动;静压分布中图分类号:TQ511.6 文献标识码:A

文章编号:1671-5322(2003)01-0001-03

分布器是均匀分配进料的关键设备,管式分布器和环形分布器是工业上最常用的两种分布器。由于流体在分布器内沿主流道流动时不断分流,呈变质量流动状态,将导致通过各个分流孔的流量不同,难以达到良好的均匀分配进料的目的^{1]}。实现各分流孔的物料流量均匀分配的前提是主流道中具有均匀的静压分布。因此,对分布器进行优化设计,必须首先了解分布器内变质量流动的静压分布规律。张成芳等对管式分布器内变质量流动的静压分布规律进行了深入的研究,并成功地应用于径向流反应器设计,实现了进料气体的均布^{2]}。但迄今为止环形分布器的研究报导很少。

笔者曾对环形分布器内气体的流动状态和静压分布进行了实验研究 3] ,发现在环形分布器内气体的流动状态和静压分布与管式分布器有很大的差异。环形分布器内存在大量的循环气流 ,气体的切向流速比径向流速高得多 ,环形流道内气体的静压分布在分布器入口(0°)处压强最大 ,其后沿流动方向不断减小 ,在 60°~90°左右达到最小值 ,然后沿流动方向逐步回升 ,呈现复杂的非单调变化趋势。对于环形分布器内复杂的三维变质量流动 ,理论上可用 Navier – Stokes 方程描述 4 1 ,但求解比较困难。为此本文在实验研究的基础上 采用简化的一维模型对环形分布器内气体流

动的静压分布规律进行了近似理论分析,其结果可供环形分布器设计和结构优化参考。

1 数学模型

环形流道内流场的 LDV 测试结果表明 ,在整个环形流道内气体以切向流动为主 ,径向速度分量比切向速度分量小得多 ,因此可近似采用一维模型进行分析。在切向入口的环形分布器中建立如图 1 所示的衡算体系 ,在此衡算体系中取一微元控制体 ,并对微元控制体建立质量平衡和 θ 方向的动量平衡方程如下:

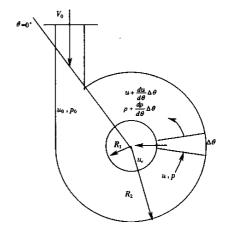


图 1 微元控制体的质量与动量平衡

Fig. 1 Mass and momentum balance of a control cell

^{*} 收稿日期 2003 - 01 - 09

质量平衡方程

$$\rho F u = \rho F \left(u + \frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}\theta} \Delta \theta \right) + \rho F_c u_c$$

$$u_c = -\frac{F}{F_c} \Delta \theta \frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}\theta} \tag{1}$$

动量平衡方程

$$pF + \rho F u^{2} = \left(p + \frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}\theta} \Delta \theta\right) F + \rho F \left(u + \frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}\theta} \Delta \theta\right)^{2} + \rho F_{c} u_{c} w_{c} + S_{w} \tau_{w}$$

忽略上式中二阶小量,并化简后得到:

$$-\frac{1}{\rho}\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}\theta} = 2u\frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}\theta} + \frac{F_c u_c w_c}{F\Delta\theta} + \frac{S_w \tau_w}{\rho F\Delta\theta} \quad (2)$$

式中 $_{u_c}$ 和 $_{w_c}$ 分别是分流穿孔速度的径向分量和切向分量。 $_{w_c}$ 与分流孔的几何尺寸以及分流孔前后的环形流道内气体流动状态等因素有关,参照文献 $_2$],设 $_{w_c}$ 与控制体内气体的切向流速 $_u$ 成正比 ,即:

$$w_c = \beta u \tag{3}$$

 F_c 是分流孔面积 $F = b(R_2 - R_1)$,是主流道的截面积 b 是环形流道宽度 S_w 是微元控制体四边壁面面积之和。

$$S_w = b (R_1 + R_2) \Delta \theta + (R_2^2 + R_1^2) \Delta \theta \quad (4)$$
 τ_w 是壁面摩擦力 ,由下式计算 ,

$$\tau_w = \lambda \rho \, \frac{u^2}{8} \tag{5}$$

式 5)中 λ 是摩擦系数。由于多孔管的摩擦系数数据非常少 本文根据文献 5 采用光滑管的摩擦系数近似代替之。计算光滑管摩擦系数的尼古拉公式在不同的雷诺数 Re 范围内具有不同的表达形式 61 在 1×10^4 < Re < 1×10^5 范围内 λ 的计算表达式为:

$$\lambda = \frac{0.3164}{Re^{0.25}} \tag{6}$$

其中 $Re = \frac{D_{el}ou}{\mu}$,De 是环形流道的当量直径 ,

$$D_e = \frac{2b(R_2 - R_1)}{b + R_2 - R_1}$$

令环形流道内循环气体流量与进口气体流量 V_0 之比为 α 称为循环比。并假设稳定流动状态下,通过各个分流孔的气体流量相等,由物料衡算可导出环形流道内任意 θ 处的流速满足以下关系:

$$u = \left(1 + \alpha - \frac{\theta}{2\pi}\right) \frac{V_0}{F} = \left(1 + \alpha - \frac{\theta}{2\pi}\right) u_0 \tag{7}$$
 对式 7 次步掛据

$$\frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}\theta} = -\frac{u_0}{2\pi} \tag{8}$$

将式1)和式3)至式8)代入式(2),并整理得

$$-\frac{1}{\frac{1}{2}\rho u_0^2}\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}\theta} = \frac{\lambda_0 R_m}{D_e} \left(1 + \alpha - \frac{\theta}{2\pi}\right)^{1.75} -$$

$$\frac{(2-\beta)}{\pi}\left(1+\alpha-\frac{\theta}{2\pi}\right) \tag{9}$$

 R_m 是环形流道的平均半径 $R_m = (R_1 + R_2)/2$ 。 根据边界条件:

$$\theta = 0$$
 $p = p_0$
 $\theta = \theta$ $p = p$

为了便于推导 ,先假设 β 与 θ 无关 ,将式(9)积分 , 并整理得 ,

$$\overline{p} = \frac{p - p_0}{\frac{1}{2} \rho u_0^2} = A \left[\left(1 + \alpha - \frac{\theta}{2\pi} \right)^{2.75} - \left(1 + \alpha \right)^{2.75} \right] -$$

$$B\left[\left(1+\alpha-\frac{\theta}{2\pi}\right)^2-\left(1+\alpha\right)^2\right] \tag{10}$$

式(10)是应用动量平衡原理进行一维分析得到的环形流道内变质量流动相对压强与进口气体动能之比随周向角度 θ 变化的关系式。方程的右边包括两项。第一项表示摩擦阻力对变化的贡献 ϕ 数 ϕ 4 在环形分布器几何尺寸和进口流量一定时为一常数 其值可由下式直接算出:

$$A = \frac{2\pi\lambda_0 R_m}{2.75 D_c} \tag{11}$$

其中 λ_0 是以入口流速 λ_0 计算的摩擦系数。第二项表示动量交换作用对 λ_0 变化的贡献。参数 λ_0 包含了分流穿孔流线切向分量对动量变化的影响和分流穿孔对管壁边界层和管壁摩擦的影响 λ_0 的表达式为:

$$B = 2 - \beta \tag{12}$$

因为式 12)中表征分流穿孔流线切向分量大小的 β 值是随 θ 变化的 ,且具体数值难以确定 ,所以 B 的值需要通过实验数据来修正。

2 模型参数的确定

将环形流道内流场和静压分布的实验数据代入式 10 进行回归计算 ,得到参数 B 随 θ 的变化关系列于图 2。由图 2 可见 ,环形流道中 B 随 θ 增大而减小 ,变化范围在 $0.7 \sim 0.35$ 之间。此结果表明 ,不同 θ 位置的动量交换程度及分流穿孔对壁面摩擦系数的影响不同。因此 ,计算环形分布器内压强时 ,不能把 B 当作常数处理 ,否则将

导致较大的计算误差。在分布器入口附近,不同的 Re 数下 B 的离散程度较大,主要原因是进口气流撞击分布器壁面以及与循环气体合流等作用使该区域内流场扰动异常激烈,同时也使实验测量误差增大。在此之后,流动逐渐趋于稳定,不同 Re 数下的 B 基本重合。图 2 中的实线是将 4 组实验数据计算得到的 B 取平均值,再按指数衰减规律拟合的修正曲线,曲线的方程为:

$$B(\theta) = 0.24437 + 0.45688 \exp\left(-\frac{\frac{\theta}{2\pi} - 0.08333}{0.45205}\right)$$
(13)

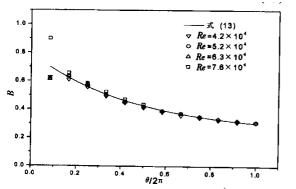


图 2 参数 B 的拟合曲线

Fig.2 The fitted profile of the parameter B

3 模型验证

图 3 是 $Re_0 = 6.9 \times 10^4$ $\alpha = 1.78$ 条件下由式

符号说明

A----模型参数;

B、B'----模型回归参数;

b----流道宽度 ,m;

De-----当量直径 ,m;

F----流道截面积 ,m²;

 F_c ——分流孔面积 m^2 ;

p-----压强 ,Pa;

p---相对压强与进口动能之比;

R——半径 ,m;

Re----雷诺数;

u——主流道切向流速 $m \cdot s^{-1}$;

参考文献:

- [1]上海化工学院无机化工专业.径向反应器流体均布研究 [].化学工程,1978(6)80-96.
- [2] 张成芳. 径向反应器流体均布设计的研究 []. 化工学报 ,1979 (1) 67 87.
- [3] 吕志敏 , 李春忠 丛德滋.环形分布器内气体变质量流动及压强分布规律[J]. 华东理工大学学报 , 2000 , 26(4) 362 万方数据 (下转第 15 页)

(10)预测环形流道内变质量流动的静压分布,并与同样条件下的实验结果进行了比较。由图可见,式(10)的预测结果与实验结果基本吻合,平均相对偏差小于5%。在制备氯化钛白的气相氧化反应器进料环均布试验中[7],运用本模型确定整流环的开孔率,显著地提高了试验工作效率,并得到令人满意的结果。

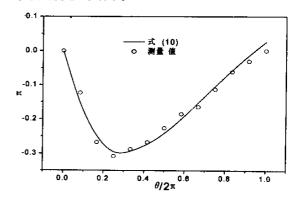


图 3 式(10)的预测结果 Fig.3 Results predicted by formula(10)

4 结论

根据动量平衡原理,导出环形流道内变质量流动周向静压分布的一维数学模型,并由实验数据拟合得到模型参数。该模型预测结果与实验值基本吻合,平均相对偏差小于5%。结果表明,采用一维模型描述环形分布器内变质量流动以及对模型简化提出的几点假设是合适的,计算结果基本满足工程设计要求。

```
u_c ——分流流速径向分量 m \cdot s^{-1} ; V ——体积流量 m^3 \cdot s^{-1} ; w_c ——分流流速切向分量 m \cdot s^{-1} ; \alpha ——循环比 ; \beta ——系数 ; \theta ——角度 (°); \lambda ——摩擦系数 ; \rho ——气体密度 kg \cdot m^{-3} ; \tau_w ——壁面摩擦力 N \cdot m^{-2} ; 下标:
```

nanocrystalline materials [J]. Journal of applied physics, 1995, 78(2) 847 - 861.

- [5] Schiotz J, Tolla FD, Jacobsen W. Softening of nanocrystalline metals at vary small grain size J]. Nature, 1998 391 561 563.
- [6] Swygenhoven H V, Caro A. Molecular dynamics computer simulation of nanophase Ni: structure and mechanical properties J. Nanostructured materials 1997 9 569 672.
- [7] Faux D A. Molecular dynamics studies of sodium diffusion in hydrated Na Zeolite 4A[J]. Journal of Physics Chemistry B, 1998, 102:10658 10662.
- [8] Kelchner C L, Deprsto A E. Molecular dynamics simulation of low energy cluster deposition during diffusionlimited thin growth [J]. Nanostuctured Materials, 1997 & 3) 253 268.
- [9] Zang P , Zajac S , Clapp P C , Rifkin J A. Nanoparticale sintering simulation [J]. Materials Science and Engineering A ,1998 252: 301 306.
- [10] Chen C Y , Ding J Q. Molecular dynamics studies on dislocation in crystallites of nanocrystalline α iror[J]. Nanostructured Materials ,1998 ,10(2) 205 215 .
- [11] Heermann D. W. Computer Simulation Methods in Theoretical Physics M. J. Berlin: Springer Verlab ,1990.

Quasi - molecular Dynamics

SHI You-jin

(Department of Basic Science of Yancheng Institute of Technology Jiangsu Yancheng 224003 China)

Abstract: A new multi – scales quasi – molecular dynamics method is proposed. The method is based on molecular potential functions and time – space – scale corelation. A declining elastic wave propagation in a disc subjected to a pair opposite concentrate compressive loading symmetrically is simulated with the method. The method is a powerful tool to solve macro – scale dynamic problems and convenient to transform from micro – scales to macro – scales.

Keywords 'quasi - molecular dynamics ; potential function ; stress wave ; multi - scales mechanics

(上接第3页)

- [4] 陈春生.用 Navier Stokes 运动方程求解环形流道中的变质量流动[J] 化学工程, 1985 (2) 7-12.
- [5] Acrivos A, Baleock BD, Pigford RL. Flow Distribution in Manifold [J]. Chem. Eng. Sci., 1959, 10:112.
- [6] 陈敏恒 丛德兹 方图南.化工原理(上[M].北京:化学工业出版社,1984.
- [7] 吕志敏 李春忠 涨曙明.环形分布器气体的流动及气流均布[J].化学工程 2001 (2) 26-30.

Approximate Theoretic Analysis of the Gas Pressure Distribution in a Circle Distributor +

 $LU~Zhi\text{-}min^1$,
LI Chun-zhong^2 ,CONG $\mathrm{De\text{-}zi}^2$

(1. Department of Building Material Engineering of Yancheng Institute of Technology Jiangsu Yancheng 224003 ,China ; 2. East China University of Science and Technology Shanghai 200237 ,China)

Abstract An approximate theoretic analysis on the pressure distribution of a mass variable flow in a circle distributor was made on the basis of its experiment study. According to the principle of momentum balance, A mathematic model for predicting the pressure distribution of the mass variable flow in the circle distributor was set up, and the model parameters was fitted by experiment data. The predicted value of the model was consistent with that measured by experiment.

Keywords : circle distributor; mass variable flow; pressure distribution