

⑭

235-239

径向反应器流体流动行为研究^{*}

TQ052

张小里 赵彬侠[✓] 樊君 李宝璋

(西北大学化工系, 710069, 西安, 第一作者 33岁, 男, 讲师)

A 摘要 研究了径向反应器流体流动行为。从动量定理出发推导出动量恢复模型, 测定了主流道动量恢复系数和分流、集流情况下的穿孔阻力系数, 为主流道设计提供了依据。

关键词 径向流动; 反应器; 流体均布

分类号 TQ052

径向反应器, 流体流动

径向反应器已广泛地用于氨合成、甲醇氧化、氨氧化、二氧化硫催化氧化、中温变换、催化重整以及芳烃异构、乙苯脱氢等化工过程中。由于径向反应器中, 流体流动方向的改变, 扩大了流通截面, 与轴向反应器相比, 径向床层厚度大为降低, 相同流量下空塔气速亦大为减小, 径向反应器就具有床层压降小的特点, 为提高空速, 采用小颗粒催化剂以强化设备的生产能力, 提高反应质量提供了有利条件。自 60 年代以来, 经过试验和生产实践, 人们对径向反应器内的流体流动、气体分布、传热、传质、稳定性和操作控制等规律的认识不断深化。流体的均匀分布是径向流动设备的关键^[1], 即流体经分布器的侧壁小孔流入(集流)或流出(分流)时, 必须沿轴向均匀分布。为了正确选择和设计分布器, 以保证流体均匀分布, 必须弄清分布器主流道流体的静压分布规律。而主流道的静压分布受摩擦阻力和动量恢复的影响。流体的径向流动行为曾有报道^[2,3]。但推荐的动量恢复系数、穿孔阻力系数不尽一致^[2,6]。由于径向设备的应用条件不同, 穿孔阻力系数和动量恢复系数应由实验测出。我们以动量定理为依据, 测定了分、集流动量恢复系数和穿孔阻力系数, 为径向反应器的设计提供了依据。

1 动量恢复模型

由于在径向反应器的主流道和分流道中, 流体属于变质量流动, 对于这种过程, 工程上有多种处理方法^[3,4], 其中最合理的方法是采用引进动量恢复系数的动量方程描述过程的行为^[2,3,4]。下面以分流管为例(图 1), 依据动量定理进行分析。

图 1 表示等截面圆形分气管中流体经侧孔流出的情景, 设流体不可压缩, 轴向上微元控制面上所受外力为:

$$Fp - F(p + dp) - 2\pi r\tau dx, \quad (1)$$

式中 F 为圆管横截面面积, p 为静压, τ 为剪应力。轴向上单位时间的动量变化为:

$$\rho F(u + du)^2 - \rho Fu^2 + \rho F(-du)u_x, \quad (2)$$

根据动量定理式(1)等于式(2), 整理得

$$dp + \rho\left(1 - \frac{u_x}{2u}\right)du^2 + \frac{2\tau}{r}dx = 0, \quad (3)$$

令 $K = 1 - u_x/2u$, K 为动量恢复系数。剪应力 τ 与摩擦阻力系数 λ 的关系^[5]为:

$$\tau = \frac{1}{8} \lambda \rho u^2, \quad (4)$$

将式(4)代入式(3)整理得:

$$dp + \rho K du^2 + \frac{\lambda}{2de} \rho u^2 dx = 0. \quad (5)$$

对流体经侧孔流入的集气管,同理亦可建立如式(5)的方程式,称之为动量恢复模型。用以描述变质量流动体系中气体压力沿流动方向的变化规律。其中 K 值由实验测定。

用动量定理分析变质量流体压力的变化规律,不必考虑分流或集流时的详细过程,把分、集流时的涡流摩擦等作为内力也不予考虑。

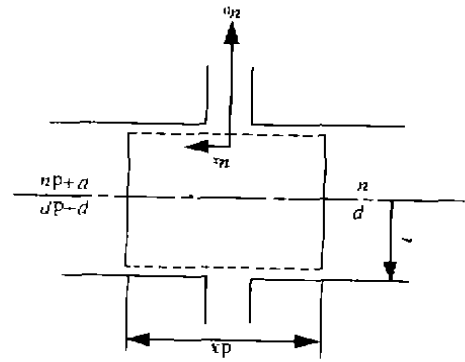


图 1 分流管

Fig. 1 Divided Flow Tube

2 主流道动量恢复系数的测定

2.1 实验装置及说明

采用的实验介质为空气,由罗茨鼓风机供给。进入主流道的流体由转子流量计计量,并经温度、压力校正。在分流和集流的情况下, K 的测定是在试验管的不同开孔段进行。试验管为 $45\text{mm} \times 5\text{mm}$ 。试验管的结构与尺寸如图 2 和表 1 所示。

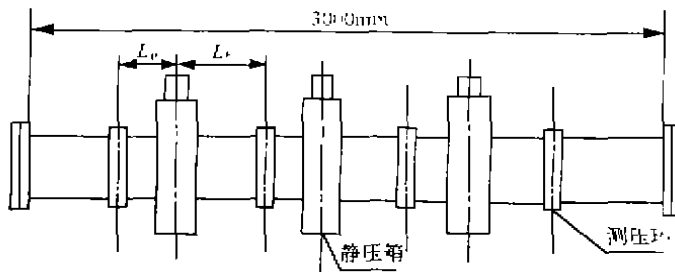


图 2 试验管结构图

Fig. 2 The Schematic Structure Diagram of the Experimental Tube

表 1 试验管结构尺寸

Tab. 1 The Structure Size of the Experimental Tube

开孔编号	孔数	L_a/mm	L_b/mm
1	8	299.5	400.0
2	12	301.0	399.5
3	4	301.5	398.5

试验管各开孔段的小孔直径为 2mm ,孔数分别为 $4, 8, 12$,均布在试验管的同一圆周面上,且垂直于试验管的纵轴。为了消除涡流的影响,以便较准确地测出静压,在开孔段和小孔前后一定距离的地方设置静压箱和测压环。在测定 K 时,利用小孔前后一定距离设置的测压环,测压环内开有 4 个直径 1.5mm 的小孔。

在进行分流试验时,主流流体由试验管尾部放空,分流的流体由转子流量计计量后放空。在进行集流试验时,主流流体路线不变,而支流流体先经流量计计量后进入试验管,主流与支流合流后由尾部放空。分、集流主流道的静压变化均由 JM9 型补偿式微压计测量,其读数刻度为 0.10Pa ,测量误差可保持在 0.01Pa 以内。

2.2 实验数据整理

实验过程中首先测出摩擦系数 λ 和雷诺数 Re 的关系,结果是:

$$\lg \lambda = -0.54 - 0.26 \lg Re. \quad (6)$$

将式(5)在主流道的任意两截面 $A-A$ 到 $B-B$ 截面间积分,可得动量恢复系数的表达式为:

$$K = \frac{p_A - p_B - h_f}{\rho(u_B^2 - u_A^2)}. \quad (7)$$

这里 $h_f = \lambda \frac{\rho u^2 \Delta x}{2de}$, 即 h_f 为 $A-A$ 面到 $B-B$ 面间 Δx 段上的摩擦阻力损失。

实验是在主流道雷诺数 $Re > 10^4$ 的湍流条件下进行的。测得静压差和流量,按式(6)计算摩擦阻力系数 λ ,以计算阻力损失,按式(7)计算 K 。用小孔前后的流速比来描绘 K 值的变化规律,如图3。

将试验管不同开孔段测得的分流动量恢复系数 $K_{分}$ 的51个数据,集流动量恢复系数 $K_{集}$ 的45个数据进行一元线性回归,得如下表示式:

$$K_{分} = 0.51 + 0.22 u_B/u_A, \quad (8)$$

$$K_{集} = 0.81 + 0.37 u_A/u_B. \quad (9)$$

上述动量恢复系数的速度比范围是:式(8)中 $u_B/u_A = 0.47 \sim 0.97$; 式(9)中 $u_A/u_B = 0.55 \sim 0.96$ 。各实验值与式(8)和式(9)的计算值的误差在 $\pm 10\%$ 之间。

2.3 实验结果的讨论

实验表明, K 值与管内的雷诺数 Re 无关,它是小孔前后主流道流体速度比的线性函数,分流和集流的实验 K 值都大于 0.5,它说明在变质量主流道中,直接简单地应用柏努利方程是不合理的。在柏努利方程中,流体静压能与 $\rho u^2/2$ 相互转化,即 $K = 0.5$ 。因此,变质量主流道的速度变化引起的静压变化比恒质量流体的静压变化高。

由式(5)可知, $K = 1 - u_z/z u$, 对分管 $K \leq 1$ 。这是因为当流体沿小孔垂直流出时, $u_z = 0$, 则 $K = 1$, 即通过小孔的流体将全部失去它的轴向速度分量。当流体沿小孔并非垂直流出时, $u_z \neq 0$, 而 $u_z > 0$, 所以 $K < 1$ 。实验测得 $K \leq 0.73$, 与上述结论一致。

通常集气管外的流速远低于集气管内的流速,进入小孔流体的轴向分速度 u_z 低于管内流速 u , 对于集气管 K 接近 1。当集气管内、外流体流动方向相同时, u_z 为正值, 则 K 略小于 1, 当流动方向相反时, u_z 为负值, K 略大于 1。实验过程中,让支流流体做纯粹径向流动,即 $u_z = 0$, 按上面的分析 K 应为 1, 而实测的 K 略大于 1, 这是由于集流时,支流与主流在近壁面处破坏了边界层的流动状态,在孔口处造成涡流,引起了摩擦阻力增加等所致。

3 穿孔阻力系数

要计算径向流量或径向孔直径必须知道径向穿孔阻力系数。穿孔阻力系数的大小反映了流体穿过径向孔时的突然缩小、孔壁摩擦以及突然扩大的能量损失。关于穿孔阻力系数的研究曾有报道^[3,6]。一般认为,穿孔阻力系数主要与孔流雷诺数 Re_0 、流速比 u_0/u 、截面比 F_0/F 及厚径比 δ/d_0 有关。但是研究结果又随反应器的结构形式、流体介质而异。因此,必须通过试验测出穿孔阻力系数,从而为径向反应器的合理设计提供依据。

本文采用局部阻力系数公式。一般地,分、集流穿孔阻力损失表示如下:

$$\Delta p = \xi_0 \frac{\rho u_0^2}{2g} \quad (10)$$

分、集流穿孔阻力系数的测定是在图2所示的实验装置中进行的。利用主流道的测压环和支流的静压箱测出静压差,用转子流量计测流量。

在试验条件下,主流道雷诺数 Re 可保持在大于 10^4 的湍流区,流体穿孔雷诺数 Re_0 大于 2 300。本研究在 2 号孔上安排一定的 u_0/u , 不同 Re_0 条件下,测定分流穿孔阻力系数的实验,测定结果见表 2。

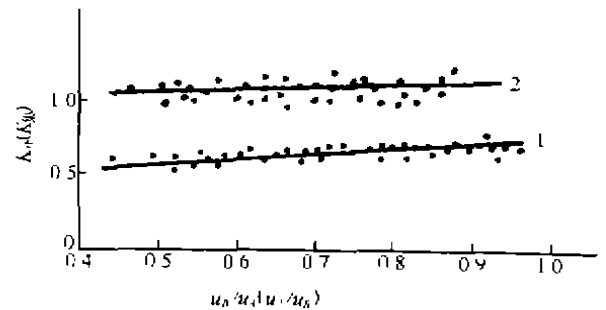


图3 分流(集流)动量恢复系数和主流道流速比的关系

Fig. 3 The Relation between K and the Ratio $u_B(u_A)$ to $u_A(u_B)$

1 分流动量恢复系数 2 集流动量恢复系数

表 2 穿孔阻力系数 ξ_0 与 Re_0 的关系数据 ($u_0/u=2.70$)
 Tab. 2 The Date of Relation between the Resistance Coefficients
 of the Side Flow through the Hole and Re_0

Re_0	2 907	3 688	4 421	4 998	5 855	6 790
$\xi_{0分}$	1.66	1.71	1.62	1.69	1.64	1.69

结果表明,在 $Re_0 > 2\ 300$ 的测试范围内,分流穿孔阻力系数几乎与 Re_0 的变化无关。在试验管的不同开孔段上,进行分、集流穿孔阻力系数与流速比 u_0/u 关系的测定。结果见图 4 和图 5。

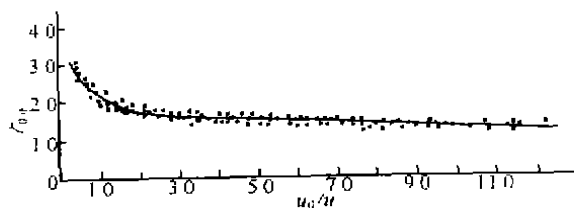


图 4 分流时 ξ_0 与流速比 u_0/u 的关系

Fig. 4 The Relation between Divided Flow ξ_0 and u_0/u

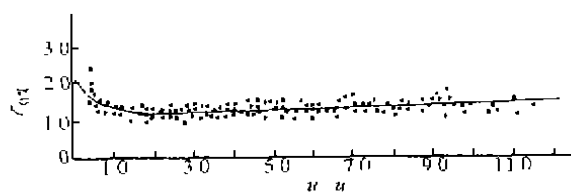


图 5 集流时 ξ_0 与流速比 u_0/u 的关系

Fig. 5 The Relation between Combined Flow ξ_0 and u_0/u

从图 4 和图 5 可以看出,在试验管不同开孔段上得到的分、集流穿孔阻力系数的变化规律基本相同。而且当孔截面积 F_0 变化 2~3 倍的条件下,测得的分流或集流穿孔阻力系数差值在测试系统误差范围之内。这表明:孔截面与主流道截面积之比 F_0/F 对穿孔阻力系数的影响并不显著,可忽略不计。但是,流速比 u_0/u 的改变对分、集流穿孔阻力系数有很大的影响。本文把图 4 和图 5 回归成下列关系式:

对分流

$$\begin{aligned} \xi_{0分} &= 2.16(u_0/u)^{-0.279} & u_0/u &\leq 2.5 \\ \xi_{0分} &= 1.77 - 0.042u_0/u & 2.5 < u_0/u < 8 \\ \xi_{0分} &= 1.47 - 1.46 \times 10^{-3}u_0/u & u_0/u &\geq 8 \end{aligned} \quad (11)$$

对集流

$$\begin{aligned} \xi_{0集} &= 1.51(u_0/u)^{-0.23} & u_0/u &\leq 2 \\ \xi_{0集} &= 1.26 + 0.02u_0/u & u_0/u &> 2 \end{aligned} \quad (12)$$

上述试验是在厚径比 $\delta/d_0 = 2.5$ 的条件下进行的,实验应用时应考虑厚径比对穿孔阻力系数的影响。

参 考 文 献

- 1 Ponzi P R, Kaya L A. Effect of flow maldistribution on conversion and selectivity in radial flow fixed bed reactors. AICHE J., 1979, 25(1):100~108
- 2 上海机械学院. 单相流体在并联管组集箱中静压分布规律的研究. 动力机械通讯, 1974(3):58~63
- 3 王昂, 刘开烈, 倪炳华等. 多孔管流体流动行为研究. 化学工程, 1992, 20(3):52~57
- 4 Greskorich E J. Perforated-pipe distributors. IEC Process Design Development, 1968, 7(4):593~595
- 5 王绍亭. 动量热量与质量传递. 天津:天津科学技术出版社, 1985. 143
- 6 金涌, 俞芷青, 孙竹范等. 流化床多管式气流分布器的研究. 化工学报, 1984, 35(3):203~212

责任编辑 时亚丽

A Study on the Uniform Fluid Distribution of Radial Fixed-bed Reactors

Zhang Xiaoli Zhao Binxia Fan Jun Li Baozhang

(Department of Chemical Engineering, Northwest University, 710069, Xi'an)

Abstract The problem of uniform fluid distribution of radial flow fixed-bed reactors is explored. The flow in the main channel may be described by the momentum exchange model of the varying mass. The momentum exchange coefficient K is measured. The result is that K in divided flow channel is less than 0.73, but in combined flow channel, it is a little more than 1. On the other hand, the resistance coefficients of the side flow through the hole in the divided flow channel and the combined flow channel are determined. The resistance coefficients depend essentially on the ratio of the velocity through the hole to the velocity along the axis direction in the main channel.

Key words radial flow; reactor; uniform fluid distribution

· 学术动态 ·

我校城市与资源学系青年教师王家鼎副教授科研成果斐然

我校城市与资源学系青年教师王家鼎副教授近年来承担了一系列省、部级重大科研、工程项目,其中主持完成的项目有 3 项获省部级科技进步奖,一项获厅局级科技进步奖,作为主要参加者参与的项目有 3 项获省部级科技进步奖。目前他主持的另外 2 项科技成果分别通过省级鉴定。这些成果既有理论上的进展,又能率先应用于生产实际,产生很大的经济效益和社会效益。

王家鼎副教授的研究领域主要有两个方面:一是模糊数学在地震和灾害防治方面的应用。与他人合作出版的专著有《模糊信息分析与应用》(北京师范大学出版社,1992)、《模糊信息优化处理技术及其应用》(北京航空航天大学出版社,1995),发表有“*The analysis of Loess slope instability on fuzzy information method, BUSEFAL,*”等论文 20 余篇。在这些成果中,首次提出了信息分配、信息扩散、信息集中等原理以及建立了一系列地震和灾害方面的预报、评价和防治的数学模型,改进了传统的模型,大大提高了精度。这些理论受到模糊数学创始人 L. A. Zadeh 教授及汪培庄教授的好评。它们分别应用于西安、宝鸡、兰州、天水、西宁等城市的抗震防灾规划中,取得很大的经济效益和社会效益。另一个研究领域是黄土地质灾害,发表有“*高速黄土滑坡的一种机理——饱和黄土蠕动液化*”(《地质论评》)等论文 10 余篇。提出饱和黄土蠕、滑动液化的观点,对黄土高速滑坡的机理、稳定性评价、监测预报和防治措施提出了针对性很强的意见。他和甘肃省防灾所的科研人员一起在甘肃省十几处黄土滑坡的应急处理中加以应用,采取及时的疏散和防治措施,减少了人民生命财产的损失。这些成果已被美、日、俄等一些权威杂志收录。在以著名的工程地质学家张成荣教授为首组织的专家鉴定会上,认为该成果“首次提出了饱和土蠕、滑动液化的观点,对黄土滑坡具有普遍意义,填补了国内外从液化角度去研究滑坡的空白,具有国内领先水平”。

由于王家鼎副教授所取得的突出成绩,已被应邀出席中国科协组织的第七次“青年科学家论坛”活动。

(薛 鲍)