

连续高速分散混合器内的流体力学性能 —I. 实验研究

董强, 聂毅学, 张华芹, 高正明

(北京化工大学化学工程学院, 北京 100029)

摘要: 针对3种不同结构的定子, 采用不同粘度的牛顿流体及假塑性非牛顿流体作为工作介质, 对连续高速分散混合器(CRS)内的流体力学性能进行了系统的实验研究, 着重对 CRS 的功率特性、流体的表观 Kolmogorov 尺度进行了测定和分析. 结果表明, 3号定子操作条件下的功率准数最大, 为 5.44; CRS 的 Metzner-Otto 常数远大于普通搅拌桨; CRS 内流体的表观 Kolmogorov 尺度比传统的搅拌反应器小一个数量级, 因此 CRS 内的微观混合时间远小于搅拌反应器. 研究结果可为连续高速分散混合器的优化提供参考.

关键词: 连续高速分散混合器; 功率消耗; Kolmogorov 特征尺度

中图分类号: TQ051.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-606X(2007)06-1055-05

1 前言

高速分散混合器即转子-定子混合器(Rotor-Stator Mixer, RS)是一种能够对两种或多种固-液、气-液及不同粘度的液-液物料进行搅拌、混合、分散甚至溶解的高效率高剪切的混合设备, 其主要工作部件为一级或多级相互啮合的转子和定子, 二者间距极小, 通常小于 1 mm. 随着转子的高速旋转, 在转子与定子之间的狭小间隙内瞬间产生高达 $10^4 \sim 10^5 \text{ s}^{-1}$ 的剪切速率(远大于普通搅拌槽), 整个混合腔内则形成强烈的曳力剪切、湍流和空穴, 使物料在同时产生的离心、挤压和碰撞等综合作用力下得到充分的分散、乳化和破碎^[1-4]. 高速分散混合器以其独特的剪切分散机理和高效率等优点已广泛应用于化工、生化及食品加工等行业, 体现了很大的市场潜力和应用前景.

根据工艺流程的不同, 高速分散混合器(RS)可分为间歇式(BRS)和连续式(CRS). 国内外已有学者对 BRS 进行了初步的探讨和研究. Myers 等^[5]研究了 BRS 中牛顿及非牛顿流体流动的功率消耗问题, 得出了搅拌槽中挡板及转子与定子的离底距离对功率消耗的影响, 将功率准数用 Froude 准数进行修正, 并得出了 Metzner-Otto 常数. Doucet 等^[6]对 BRS 混合腔中的气穴现象和混合器的功率消耗进行了研究, 对于非牛顿流体采用了 2 种不同的雷诺数定义, 并通过实验得出了 Metzner-Otto 常数随着流体粘度和转速的变化而变化. Padron^[7]研究了在不同粘度的牛顿流体中, 不同转子和定子操作条件下 BRS 的功率消耗, 得出了雷诺数与功率准数的关系. Calabrese 等^[8]研究了 BRS 中颗粒粒径的分布, 分析了数据, 并认为平衡液滴大小是 Kolmogorov 微观尺度,

液滴并不主要在转子-定子空隙处破碎. Maa 等^[2]研究了 BRS 中的液-液乳化, 得出分散液滴的大小随剪切强度的增强及时间的增加而增大, 并与转子和定子的结构有关, 且乳化效果明显优于普通搅拌槽. 上述研究大都是基于 BRS, 着重研究其功率消耗, 而对物料的输运及混合, 即 CRS 的兼具流体泵送及高效分散混合性能特性的研究还未见文献报道.

本工作对 CRS 在不同转子和定子组合情况下的流体力学性能进行了系统实验研究. 实验中转子的形式保持不变, 采用 3 种不同开孔的定子与之组合, 分别以不同粘度的牛顿流体为实验物料, 测得 CRS 的功率特性、Kolmogorov 特征尺度和混合特性, 并以假塑性非牛顿 CMC 水溶液进行实验, 计算得出 Metzner-Otto 常数. 实验结果对于 CRS 的实际工业应用具有参考价值, 并对转子和定子组合形式的优化选择提供一定的参考, 为 CRS 的后续数值模拟研究打下基础.

2 实验装置与方法

实验采用 YSTRAL 公司的 Conti-TDS-3 型 CRS, 实验装置及相关的数据采集系统示意图如图 1 所示.

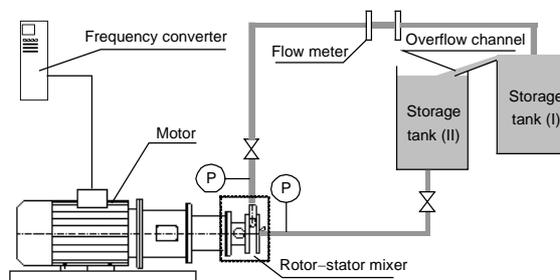


图 1 实验系统示意图
Fig.1 Sketch of the experimental system

收稿日期: 2007-04-02, 修回日期: 2007-06-05

作者简介: 董强(1982-), 男, 山东省枣庄市人, 硕士研究生, 化学工程专业; 高正明, 通讯联系人, E-mail: gaozm@mail.buct.edu.cn.

液相分别采用牛顿流体—自来水(粘度为 0.001 Pa·s)及粘度分别为 0.03, 0.40, 0.79, 2.83 Pa·s 的糖浆水溶液和假塑性非牛顿流体—羧甲基纤维素钠(Carboxy Methylcellulose, CMC)水溶液($T=17\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\omega=2.5\%$, $\mu=14.98\gamma^{-0.55}$)。实验中,物料首先通过储槽 II 进入 CRS,经过转子和定子的高速剪切而高效混合后的液体经文丘里流量计后输出到储槽 I。为减少物料在高速流动过程中泡沫夹带过量的空气,储槽 I 的物料蓄满后通过溢流渠流入储槽 II 进行缓冲。CRS 的转速通过改变变频器对电机的输入频率来控制。扭矩传感器、流量计和压力传感器的信号均经 AD 采集卡数模转换后输入计算机进行处理,以实现数据的实时测量、显示和存储。为防止

物料温度升高,每次实验都在很短的时间内完成,2 次实验之间有一定的时间间隔。实验结束后,使用 HAAKE RS 150 型流变仪重复测定 CMC 水溶液粘度,结果表明,实验后 CMC 水溶液粘度与实验前基本一致。

CRS 设备主体部件包含入口、出口、转子、定子核心部件及蜗壳等。转子为内外双层六齿结构,示意图见图 2。转子内层外直径 d_1 为 116 mm,高度 26 mm,与定子内壁的间隙为 0.5 mm;转子外层的内直径 d_2 为 125 mm,外直径 d_3 为 168 mm,高度 32 mm,与定子外壁的间隙为 0.5 mm。实验中采用 3 种不同形式的定子研究其开孔形状及开孔面积对剪切性能和混合性能的影响,3 种定子的结构示意图如图 2,具体结构参数见表 1。

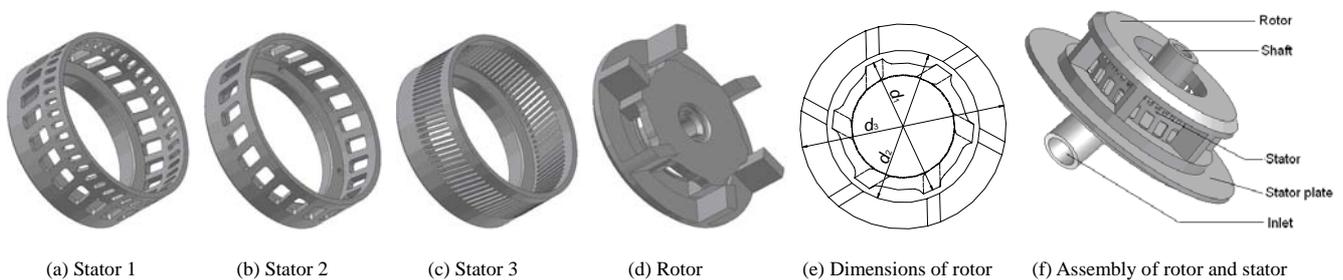


图 2 定子和转子结构示意图

Fig.2 Sketch of the rotor and stators

表 1 定子结构参数

Table 1 Configurations of different stators

Stator	d_3/D'	h (mm)	Hole number	Length (mm)	Width (mm)
1	0.995	52	Upper 45, lower 24	Upper 10, lower 17	Upper 4, lower 10
2	0.995	40	24	17	10
3	0.995	52	94	25	2

3 实验结果与分析

3.1 功率特性

3.1.1 雷诺数 Re

在 RS 的研究中,对 Re 的定义方法较多,并不统一。在研究单层转子系统时,Padron^[7]采用了 3 种 Re 的定义方法。

第一种参考传统搅拌混合器中 Re 的定义:

$$Re_1 = Nd^2/\nu. \quad (1)$$

他认为这种定义过高估计了 RS 的 Re 值。

第二种考虑转子和定子之间的间隙 δ_{gap} 和转子外端的线速度 v_{tip} 的影响:

$$Re_2 = v_{\text{tip}}\delta_{\text{gap}}/\nu, \quad (2)$$

其中特征长度选择转子和定子之间的间隙,是因为该值与混合腔内由于粘性剪切造成的能量耗散密切相关,而粘性剪切速率由 v_{tip} 和 δ_{gap} 决定。他认为这种定义能较好

地关联雷诺数与功率准数之间的关系。

第三种则考虑定子水力半径 R_h (R_h =定子上的开孔截面积/开孔润湿周边长)的影响,认为从定子开孔中喷射出的湍流能量耗散与定子的开孔有关:

$$Re_3 = 4R_h v_{\text{tip}}/\nu. \quad (3)$$

考虑到实验中采用的转子为内外双层六齿结构,本研究的雷诺数 Re 定义如下:

$$Re = \pi ND\delta_{\text{gap}}/\nu, D = (d_1 + d_2)/2. \quad (4)$$

本工作的定义方法同时考虑内外两层转子的作用,并充分考虑到转子和定子之间的间隙对能量耗散的作用。

在清水体系中,转速为 600 r/min 时,对 1 号定子 4 种定义的 Re 分别为 2.8×10^5 , 2.6×10^3 , 2.0×10^4 和 1.9×10^3 。

3.1.2 输入功率 P

RS 中的输入功率与转子的几何尺寸、物料性质(密

度和粘度等)、过程参数(转子转速等)等有关. 扭矩传感器安装在主轴上测量扭矩值, 由此计算轴功率 P_s . 实际输入到流体的功率 P 要扣除由于轴承和机械密封摩擦而引起的耗损功率 P_f . 图 3 给出了在 3 种定子操作条件下, 自来水体系(0.001 Pa·s)和糖浆水溶液体系(0.40 Pa·s)的输入功率、轴功率和耗损功率的关系. 可以看出, 随转速增加功率幂指数增大, 指数值约为 3. 相同转速条件下, 随粘度的增加输入功率增加. 在 0.40 Pa·s 糖浆水溶液体系转速最大只能到 2250 r/min, 否则输入功率会超出电机设备的负载. 当到达 3000 r/min 时, 该体系的输入功率超出额定功率 50%. 1 号定子条件下, 在 300 r/min 低转速时耗损功率约占轴功率的 76%(自来水体系)和 43%(0.40 Pa·s 糖浆水溶液体系). 随转速增加, 该值下降. 在 2200 r/min 高转速时两体系耗损功率分别仅占 9%和 6%左右.

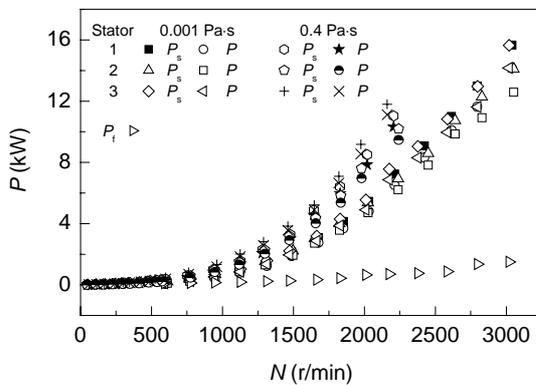


图 3 不同转速下的输入功率
Fig.3 Power input vs. rotor speed

3.1.3 功率准数

功率准数是机械驱动力和惯性力的比值^[9], 即

$$N_p = \frac{P}{\rho N^3 D^5} \tag{5}$$

表 2 功率准数与雷诺数的关系

Table 2 Relationships between power number and Reynolds number

Stator	Laminar ($Re < 1$)	Transition ($1 \leq Re \leq 100$)	Turbulent ($Re > 100$)
1	$N_p = 19.9Re^{-1.44}$	$N_p = 5.40 + 0.67 \times 10^3 / (1 + 16Re^{1.46})$	$N_p = 5.30$
2	$N_p = 11.9Re^{-1.62}$	$N_p = 5.25 + 0.79 \times 10^3 / (1 + 20.5Re^{1.65})$	$N_p = 4.91$
3	$N_p = 17.8Re^{-1.43}$	$N_p = 6.23 + 1.37 \times 10^3 / (1 + 31.6Re^{1.5})$	$N_p = 5.44$

表 2 中的公式能够精确地表示出不同的流动状态下功率准数与雷诺数的关系, 而式(6)更具有通用性, 能够描述功率准数与定子开孔率和转子-定子间间隙的关系. 但由于数据范围比较宽, 随着雷诺数的增加, 拟合误差变大, 相对误差超过 100%. 故而分区拟合数据误差更小, 更合理.

3.1.4 非牛顿流体的功率特性

在 3 种定子及不同粘度的糖浆水溶液操作条件下, 通过改变转速和流量系统研究雷诺数与功率准数的关系. 在传统的搅拌混合器研究中, $Re < 10$ 时为层流区, 永田进治^[10]给出关系式 $N_p = C/Re$ (C 为常数), 功率准数与 Re 为倒数关系. 图 4 给出了 1 号定子的雷诺数与功率准数的关系. 由图可以看出, 对于 CRS 设备, 层流区可以界定在 $Re < 1$, 但 Re 的指数更小. 过渡流区则可界定在 $1 \leq Re \leq 100$. 当 $Re > 100$ 时则进入湍流区, 该区域内 N_p 不再随 Re 的增加而变化. 对 3 种定子 3 个不同区域分别拟合公式列入表 2. 可见 3 种定子的功率准数在各区域差别不大, 在湍流区时 2 号定子仅为 3 号定子的 90.3%, 在相同的雷诺数下, 使用 3 号定子时输入功率最大. 因为定子的开孔形式不同, 故分别适用于不同粘度的物料, 2 号定子适用于高粘体系, 3 号定子适用于低粘体系. 通过对功率消耗的分析, 发现定子开孔率越大, 孔间距越大, 转子-定子间间隙越大, 则功率准数就越小. 通过对数据的拟合, 可得出:

$$N_p = 4.3Re^{-1.5} \varphi^{-0.2} (\delta_{gap}/D)^{-0.2} \tag{6}$$

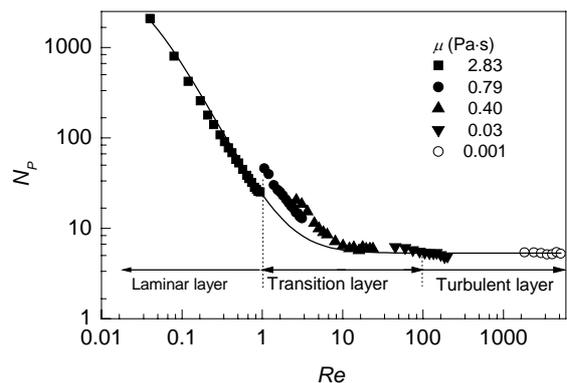


图 4 功率准数与雷诺数的关系(1 号定子)
Fig.4 Power number vs. Reynolds number (Stator 1)

在不同转速下, 转子对流体施加的剪切作用不同, 非牛顿流体的表观粘度具有不同的数值^[11]. 即使在同一转速下, 由于流体受到的剪切作用随着距转子的远近而变化, 混合腔内不同位置的流体也将具有不同的表观粘度. 在传统混合器研究中, Metzner 等^[12]确定搅拌槽中的平均剪切速率与叶轮转速成正比, 即

$$\gamma = kN, \tag{7}$$

其中, k 为 Metzner–Otto 常数, 是表征搅拌反应器的一个重要参数.

采用假塑性非牛顿流体进行实验. 非牛顿流体的雷诺数使用 Metzner–Otto 方法计算. 1 号定子操作条件下牛顿流体与非牛顿流体的功率准数比较见图 5. 选 $k=10$ (常应用于普通的涡轮搅拌桨)时, 所得的数据不能与牛顿流体很好地吻合. 当选 $k=84$ 时, 非牛顿流体与牛顿流体的功率准数吻合较好. Myers 等^[5]也得到了类似的 BRS 的 k 值为 71. 显然 k 值远大于普通搅拌桨的 k 值, 这是因为转子和定子的间隙非常小($d_3/D'=0.99$). 由图 5 可见, 假塑性流体和牛顿流体的搅拌功率基本一致, 但假塑性流体的层流范围比牛顿流体宽. 对假塑性流体确定电机功率时, 采用牛顿流体的功率准数曲线保险系数更稳妥.

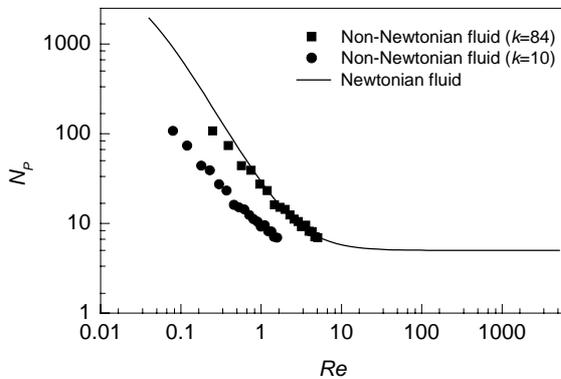


图 5 牛顿流体与非牛顿流体功率准数比较(1 号定子)
Fig.5 Comparison of Newtonian and Non-Newtonian fluid power number (Stator 1)

同样的方法可得 2 号和 3 号定子的 k 值分别为 71 和 66. 可以看出使用 1 号定子时的 k 值最大, 3 号定子的 k 值最小, 相同转速下流体的剪切速率最小. 同时转子的形状及转子与定子的间距也影响 k 值, 这需要在以后的实验中更深入地研究.

3.2 表观 Kolmogorov 尺度

在湍流区, 流体主体流动的不稳定性导致了漩涡的产生, 而能量从大尺度涡向小尺度涡传输. Kolmogorov 理论假定在足够大的雷诺数下, 小涡的尺度完全由流体的运动粘度 ν 和湍动能耗散率 ε 确定. 应用量纲分析, 表观 Kolmogorov 尺度定义为

$$\eta = (\nu^3/\varepsilon)^{1/4}, \quad \varepsilon = P/(\rho V). \quad (8)$$

由图 6 可以看出, 随着雷诺数的增加, 计算的表观 Kolmogorov 尺度平均值减小. 搅拌槽中的表观 Kolmogorov 尺度^[10]一般在 10~100 μm , 而 CRS 中在 1~10 μm 的范围内, 可见 CRS 内流体的表观 Komogorov

尺度比传统的搅拌反应器小一个数量级, 因此 CRS 内的微观混合时间远小于搅拌反应器. 湍流动能耗散率越大, 微观混合时间越短, 因此加速了物料达到分子尺度上的均匀, 所以 CRS 对促进微观混合非常有效, 对于快速复杂的反应等具有很好的应用前景. 表观 Kolmogorov 尺度的计算是假设能量均一地扩散到整个混合腔中, 这只是一种极端的情况. 尽管转子-定子可以产生强烈的搅动, 还是有一部分能量扩散到混合腔之外的空间. 所以实际的表观 Kolmogorov 尺度在部分区间小于计算值, 在部分区间大于计算值.

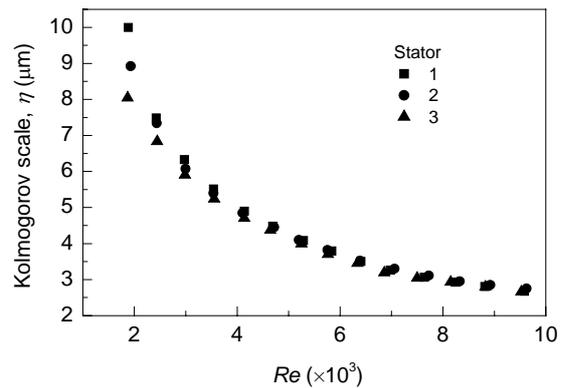


图 6 雷诺数与表观 Kolmogorov 尺度的关系
Fig.6 Reynolds number vs. Kolmogorov scale

4 结论

(1) 给出了新的雷诺数定义, 测定了 3 种转子-定子组合在牛顿流体中的功率准数, 归纳出功率准数与雷诺数在层流区、过渡流区与湍流区的关系式. 分析得出 CRS 的功率主要与雷诺数、定子开孔率、转子-定子间隙/转子直径比有关, 并通过非牛顿流体(CMC 水溶液)进行实验计算出 Metzner–Otto 常数, CRS 的 Metzner–Otto 常数值远高于普通混合搅拌器.

(2) CRS 内流体的表观 Komogorov 尺度比传统的搅拌反应器小一个数量级, 因此 CRS 内的微观混合时间远小于搅拌反应器. 湍流动能耗散率越大, 微观混合时间越短, 因此加速了物料达到分子尺度上的均匀, 所以 CRS 对促进微观混合非常有效, 对于快速复杂的反应等具有很好的应用前景

符号表:

d	搅拌桨直径 (m)	d_1	内转子外直径 (m)
d_2	外转子内直径 (m)	d_3	转子外直径 (m)
D	内外转子直径平均值 (m)	D'	混合腔直径 (m)
h	定子高度 (mm)	k	Metzner–Otto 常数
N	转速 (r/min)	N_p	功率准数
P	输入功率 (W)	P_f	摩擦消耗的功率 (W)
P_s	轴功率 (W)	R_h	水力半径 (m)
T	温度 ($^{\circ}\text{C}$)	v_{up}	转子外端线速度 (m/s)
V	混合腔体积 (m^3)	ω	质量浓度 (%)

δ_{gap} 转子-定子间隙 (m)
 γ 平均剪切速率 (s^{-1})
 φ 定子开孔率
 ν 运动粘度 (m^2/s)

ε 湍动能耗散率 (m^2/s^3)
 η Kolmogorov 尺度 (μm)
 μ 物料粘度 (Pa·s)
 ρ 密度 (kg/m^3)

of Rotor–Stator Mixer with Viscous Fluids [J]. Chem. Eng. Res. Des., 2005, 83(10): 1186–1195.

参考文献:

- [1] Barailler F, Heniche M, Tanguy P A. CFD Analysis of a Rotor–Stator Mixer with Viscous Fluids [J]. Chem. Eng. Sci., 2006, 61(9): 2888–2894.
- [2] Maa Y F, Hsu C. Liquid–Liquid Emulsification by Rotor/Stator Homogenization [J]. J. Controlled Release, 1996, 38(2/3): 219–228.
- [3] Paul E L, Kresta S M, Atiem-Obeng V A. Handbook of Industrial Mixing: Science and Practice [M]. New York: John Wiley & Sons Inc., 2004. 470–505.
- [4] 赵青. 最新的搅拌混合技术 [J]. 日用化学工业, 2001, 31(5): 46–48.
- [5] Myers K J, Reeder M F, Ryan D. Power Draw of a High-shear Homogenizer [J]. Can. J. Chem. Eng., 2001, 79(1): 94–99.
- [6] Doucet L, Ascanio G A, Tanguy P A. Hydrodynamics Characterization of Rotor–Stator Mixer with Viscous Fluids [J]. Chem. Eng. Res. Des., 2005, 83(10): 1186–1195.
- [7] Padron G A. Measurement and Comparison of Power Draw in Batch Rotor–Stator Mixer [D]. Maryland: University of Maryland, 2001. 38–52.
- [8] Calabrese R V, Francis M K, Mishra V P. Measurement and Analysis of Drop Size in a Batch Rotor–Stator Mixer [A]. Derksen J J. 10th European Conference on Mixing [C]. New York: Elsevier Science, 2000. 149–156.
- [9] Hanselmann W, Windhab E. Flow Characteristics and Modeling of Foam Generation in a Continuous Rotor/Stator Mixer [J]. J. Food Eng., 1999, 38(4): 393–405.
- [10] 永田进治. 混合原理与应用 [M]. 马继舜, 译. 北京: 化学工业出版社, 1984. 27, 159.
- [11] 丁绪淮, 周理. 液体搅拌 [M]. 北京: 化学工业出版社, 1983. 191–192.
- [12] Metzner A B, Otto R E. Agitation of Non-Newtonian Fluids [J]. AIChE J., 1957, 3(1): 3–10.

Hydrodynamic Characteristics in a Continuous Rotor–Stator Mixer

—I. Experimental Investigation

DONG Qiang, NIE Yi-xue, ZHANG Hua-qin, GAO Zheng-ming

(College of Chemical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: The hydrodynamic characteristics in a continuous rotor–stator mixer (CRS) with Newtonian and Non-Newtonian fluids were studied experimentally, and three different stators were used in the experiment. The power characteristics and Kolmogorov scale were measured and analyzed. The results show that the power number of stator type 3 is larger than that of stator types 1 and 2, the value is 5.44. The Metzner–Otto constant of CRS is larger than that of normal impellers. The Kolmogorov scale in the CRS is an order of magnitude smaller than that in a traditional stirred tank, so the CRS offers much shorter micro-mixing time than stirred tanks. The results are of importance to the optimization of industrial continuous rotor–stator mixers.

Key words: continuous rotor–stator mixer; power consumption; Kolmogorov scale