

随动式动态混合器固液混合的实验研究

杨优生 丁玉梅 何立臣 阎 华* 贾雨川 杨卫民

(北京化工大学 机电工程学院, 北京 100029)

摘 要: 为了更精确地描述固体颗粒在随动式动态混合器中的分布,在研究管内颗粒分布情况时引入电荷耦合元件(CCD)图像测量系统。采用内置低流阻螺旋转子探讨有无内置低流阻螺旋转子、不同固体颗粒密度、不同连续相流体流速对管路固液混合效果的影响。结果表明:管内加入低流阻螺旋转子后,密度与水接近的固态颗粒的混合效果较光管得到了明显的改善;连续相流体速度为 1 m/s 时,管内加入低流阻螺旋转子后,密度与水接近的固态颗粒混合效果最好。

关键词: 随动式动态混合器;螺旋转子;颗粒分布;固液两相;混合实验;电荷耦合元件(CCD)

中图分类号: TQ027 **DOI:** 10.13543/j.bhxbzr.2017.04.014

引 言

混合操作是极其普遍而又重要的化学工艺过程,广泛存在于化工、石油、食品、造纸、制药、环保等领域的混合、中和、乳化、萃取、反应、气体吸收、传热等单元操作中^[1-3],如工业生产中有毒气体的收集以及污水的治理再利用均与混合操作密切相关。目前由于混合设备的效率低造成每年高达几十亿美元的经济损失^[4]。因此研究开发新型的高效率、少耗能的混合设备具有重要的意义。

随动式动态混合器是近年来研发的一种新型管路混合装置,其特点是安装方便、混合效率高、具有自清洁功能。研究随动式动态混合器混合性能的常用方法一般是利用高速摄像机对混合过程进行拍摄,然后分析所拍摄视频,通过观察两相流体从开始交汇、混合以及混合充分后的整个过程的运行情况来评价其混合性能^[5-6]。这种方法可以直观地观察到混合全过程,但只能进行定性分析,评价方法单一,也无法与其他相同功能的混合设备进行横向比较。文献[7-8]在研究起旋器对水平液固循环硫化床颗粒分布情况的影响时,利用电荷耦合元件(charge-coupled device, CCD)图像与数据处理系统对其颗粒分布特性进行了研究,结果表明起旋器能

有效改善管路内固相颗粒分布不均匀度。为了更加全面地评价随动式动态混合器,本文在随动式动态混合器固液混合性能的实验研究中引入 CCD 图像传感系统,得出该区域的固体颗粒分布情况;然后将光信号转化为数字信号进行定量分析,通过全面评价随动式动态混合器的混合性能,为随动式动态混合器的推广应用奠定基础。

1 实验部分

1.1 实验装置及物料

1.1.1 实验装置

组合式转子及其辅助部件包括挂件、转轴以及限位件等统称为随动式动态混合器^[5],其结构示意图如图 1 所示。

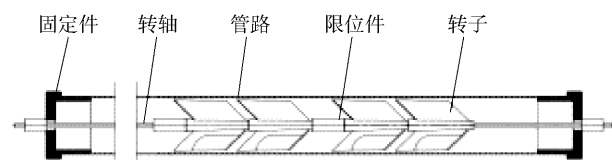


图 1 随动式动态混合器的结构示意图

Fig. 1 Structural representation of the dynamic mixer

本文中所用的实验装置为自行设计并搭建,其示意图如图 2 所示。在实验段管内装入随动式动态实验混合器,选用低流阻转子,内置转子的管路为有机玻璃,可以方便数据的采集以及实验过程的分析。实验中管路的内径为 25 mm,转子外径为 22 mm,转子导程 100 mm;分散相入口设计成漏斗形状^[5]以方便物料流入,同时防止在实验过程中连续相流体溢出,下段入口内径为 15 mm。

收稿日期: 2017-02-25

第一作者: 男,1991 年生,硕士生

* 通讯联系人

E-mail: 736453912@qq.com

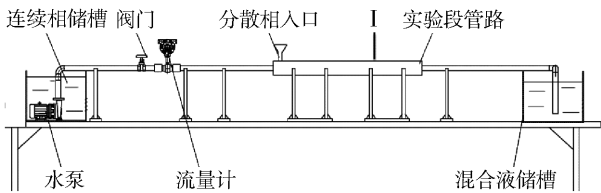


图 2 动态混合器混合实验台

Fig. 2 The experimental station of dynamic mixer mixing

1.1.2 物料

实验中水为连续相,固体颗粒为分散相,固体颗粒有 3 种,直径为 1 ~ 2 mm,形状为圆形,具体参数见表 1。

表 1 3 种固体颗粒物性参数

混合相	密度比	颜色	类型	粒径/mm	硬度
水	1	无色	—	—	—
粒子 a	0.48	黑色	硬质泡沫	1 ~ 2	硬
粒子 b	1.28	墨绿色	塑料颗粒	1 ~ 2	硬
粒子 c	2.8	黑色	玻璃珠	1 ~ 2	较硬

1.2 实验过程

1.2.1 实验步骤

按照实验设计,通过调节阀门的开度大小调节连续相流体的流量,利用改装拼接的长度为 180 mm、内径为 14.3 mm 的针筒将固体颗粒注入实验管路,为方便物料流入将针筒底部变径口切除。每组实验将物料填满整个针筒,以保证在相同时间内流入相同体积的颗粒。实验时,用薄纸片将针筒内固体颗粒封装以防止漏出,然后用针筒将固体颗粒从图 2 所示的分散相入口匀速缓慢注入。为使固体颗粒与转子充分接触,在实验段管路内放置两组转子,每组 6 个,待流动稳定后,利用 CCD 图像传感器在转子尾部 I 处(图 2)对随动式动态混合器的混合效果进行分析。

1.2.2 CCD 图像分析

管内两相流的流动特性参数通过 CCD 图像采集及处理系统在线处理。CCD 图像传感器处理系统通过模数转换器芯片将光信号转换成数字信号进行分析^[9-10]。其波形图(图 3)横轴坐标代表传感器的 128 个像素点,也即传感器在主方向的位置点;纵轴坐标表示灰度,即固体在管路内的颗粒分布密度,其值越高表示透光率越高,即该区域粒子分布密度越低;其值越低则透光率越低,说明该区域粒子分布密度越高。

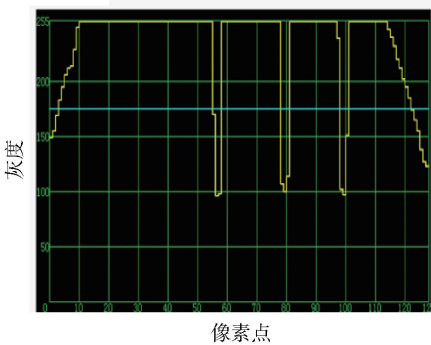


图 3 CCD 波形图

Fig. 3 The CCD waveform

测量实验段管路的方案如图 4(a),在管路一侧进行补光,在相对的一侧放置 CCD 传感器。由于颗粒在水平管内流动时分布不均匀,故将测试段垂直横截面分成 5 个区域^[7](图 4(b)),通过 CCD 图像处理系统得出每个区域的颗粒分布密度(灰度值),并采用颗粒分布密度来表征管中固体颗粒分布的不均匀程度。

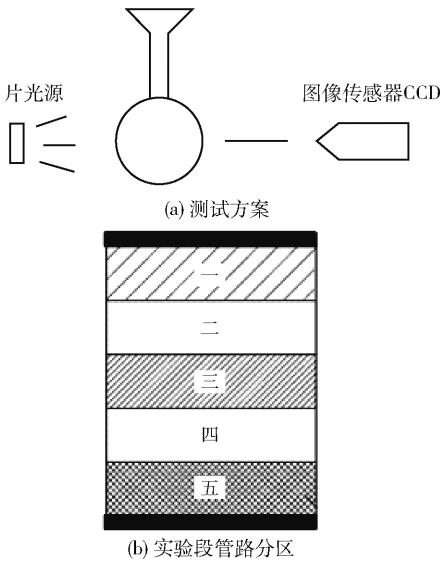


图 4 实验方案

Fig. 4 Experimental scheme

在实验段管路中通入连续相液体水,暂时不汇入固体颗粒,对 CCD 图像传感器处理系统进行初始化,图 5 为实验段管路转子尾部 I 处横截面分区在 CCD 图像处理界面所对应的位置。

2 结果与讨论

2.1 随动式动态混合器对颗粒分布的影响

2.1.1 未加入混合器

保持连续相水的流速恒为 1 m/s,从分散相入口

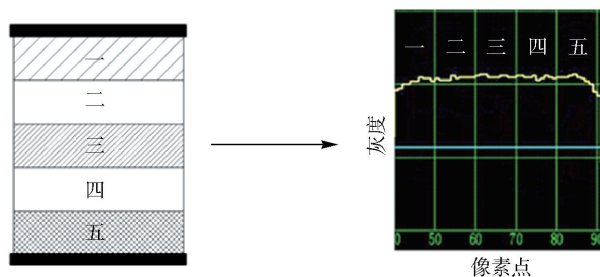


图5 CCD 图像传感器初始化

Fig.5 CCD image sensor initialization

加入3种固体颗粒,其 CCD 波形如图6所示;将3种粒子 CCD 波形图进行转化,得到不同区域的3种粒子颗粒分布密度情况如图7所示。图7中纵坐标表示固体颗粒分布密度,其值为100%表示无颗粒通过,其值越小则表示该区域的固体颗粒含有率越高。

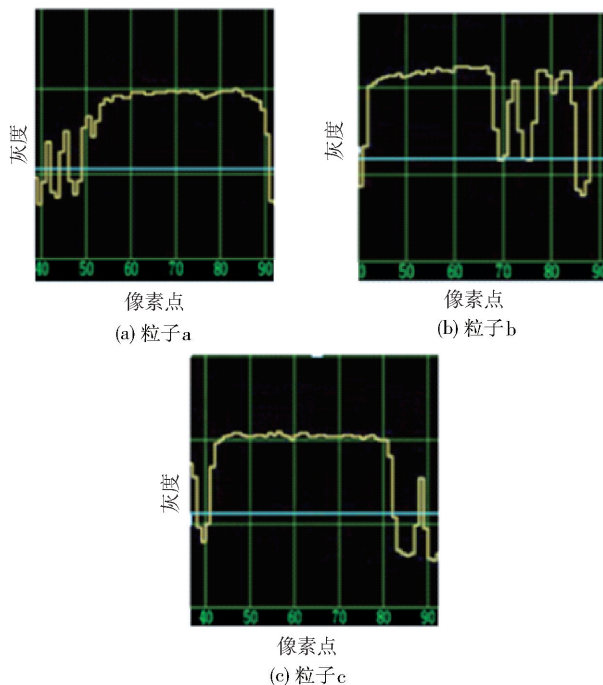


图6 不加入转子的 CCD 波形图

Fig.6 The CCD waveform graph in the pipe without a rotor

由图6、7可以看出,粒子a主要上浮在管路的第一区域,第二区域有少量粒子;粒子b主要下沉在管路的第四、五区域,第三区域也存在少量粒子;粒子c主要下沉在管路的第五区域。在混合管路中,固体颗粒主要受到自身重力和液相流体剪切力作用,因此液相流体在混合管路内的流场成为影响固体颗粒分布的主要因素。不加入动态混合器时,在重力以及与液相流体之间的剪切力作用下,进入管路内的固相颗粒的分布呈现聚集情况:密度较小的颗粒集中在一区即管路的顶部区域,密度较大的颗粒

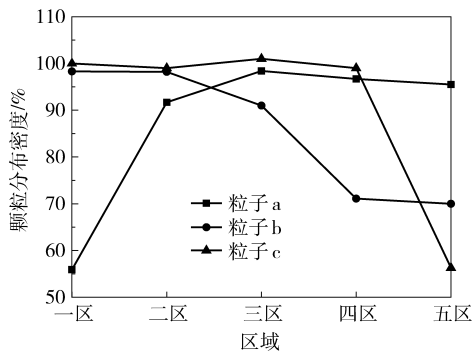


图7 不加入混合器的颗粒分布情况

Fig.7 Particle distribution in the pipe without a rotor

粒都在五区即管内的底部区域,密度适中的颗粒聚集在三、四、五区域即管路的中下部位。由此可知,未加入动态混合器时混合管路内的流场未发生改变,固相颗粒与液相流体混合情况较差。

2.1.2 加入混合器

在实验段管路中分两组,每组6个加入低流组转子进行实验,水流速度为1 m/s;3种不同密度的固体颗粒分别从分散相入口均匀流入,用 CCD 图像处理系统得到如图8所示的波形图,不同区域的3种粒子颗粒分布密度如图9所示。

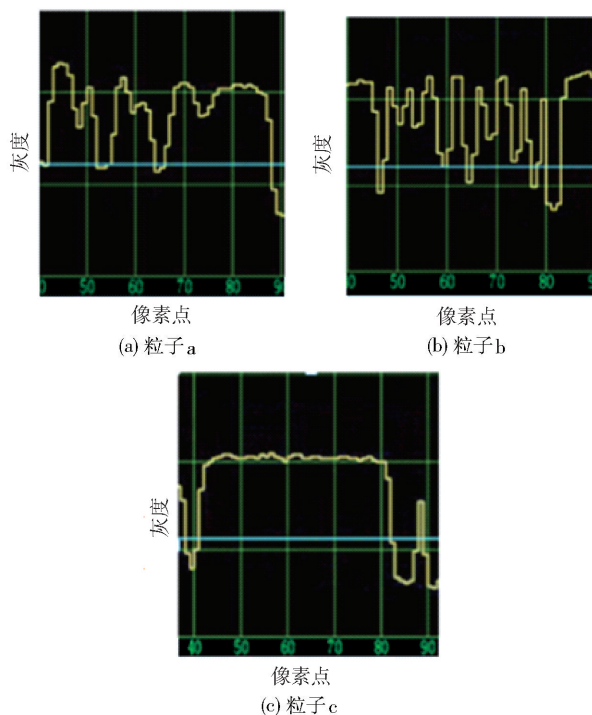


图8 加入转子的 CCD 波形图

Fig.8 The CCD waveform graph in the pipe with rotors

从图8中可以看出,粒子b的颗粒分布密度曲线最为平稳,颗粒分布情况最好,也说明在粒子b在

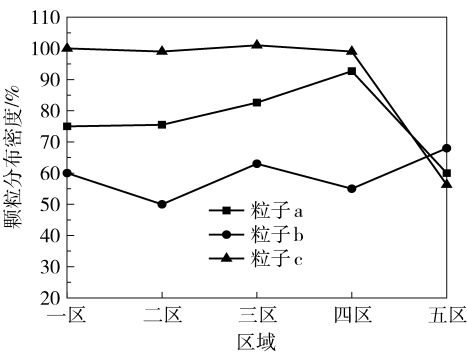


图 9 加入混合器的颗粒分布情况

Fig. 9 Particle distribution in the pipe with rotors

1 m/s 的流速下管路内分布情况最好。由图 9 可以看出加入组合转子后,粒子 a 和粒子 b 的分布情况有了明显的改善,粒子 c 因为比重太大,转子能起到的作用有限,使其分布改善不明显。这表明在动态混合器固液混合中,粒子密度对混合的影响较大,所以密度接近于水的颗粒 b 分布情况最好。

2.2 不同流速下的颗粒分布情况

为了探究不同流速下动态混合器对于同一种固体粒子混合作用的影响,选择 2.1 节中的粒子 b,分别在 0.6、0.8、1.0 和 1.2 m/s 的水流速度下利用低流阻转子进行实验,得出 4 种不同流速下 CCD 图像如图 10 所示,3 种粒子颗粒分布密度图如图 11 所示。

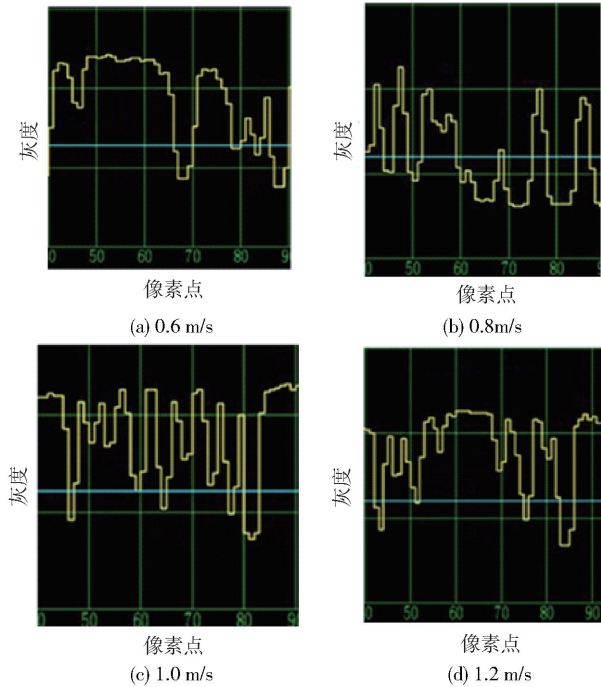


图 10 不同流速下的 CCD 波形图

Fig. 10 The different velocities of CCD waveform graphs

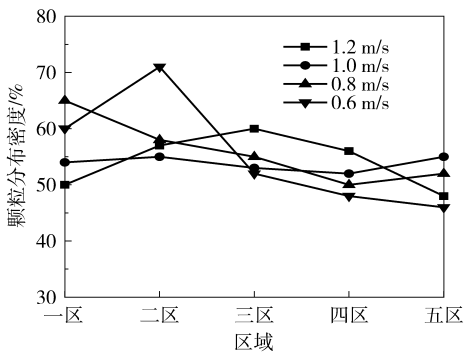


图 11 不同流速下固体颗粒在管路中的分布情况

Fig. 11 The different velocities of distribution of solid particles

从图 10、11 中可以看出,当管内流体流速达到 1 m/s 时,管内颗粒分布较为均匀,一区到五区的颗粒分布密度值相差不大,曲线的斜率最小,说明各个区域的固体含有率较为均匀,混合的效果最好;管路内流速为 0.6 m/s 时,一区灰度值小于二区域,从二区到五区依次递减;管内流体速度达到 0.8 m/s 时,一区的颗粒分布密度值较大,二区到四区依次递减,五区略高于四区,说明颗粒在底部区域沉积较多,混合效果不好,这是因为叶片转子转速较低时,固体颗粒接触叶片转子后被叶片转子剥离开时的切向速度较小,加上自身的重力,固体颗粒被扰乱的动力会减小,所以固体颗粒离开叶片时间较短动能减少就会继续往下沉。管内流体速度达到 1.2 m/s 时,一区和五区的颗粒分布密度相近且较低,但是二、三、四区分布密度较大,说明该流速下固体颗粒基本都在管内上下两个区域,中间分布较少,因此混合效果也较差。原因是叶片转子转速较大时,固体颗粒接触叶片转子后被叶片转子剥离开时的切向速度较大,使固体颗粒向管的底部与顶部运动,这样虽然增强了无序性,但是无法与管路中央的流体混合,仍然达不到混合要求。

3 结论

(1)在主流体流速 1 m/s 时加入螺旋转子,对于密度与水接近的固体颗粒,由于转子的旋转运动,混合管路内流场发生改变,固体颗粒受到管路内流体的剪切作用后使聚集在一起的固体颗粒被打散,固体颗粒在流体的剪切力作用下由原来的有序流动变为无序流动,增加了与液相流体的混合时间与几率,说明加入转子能提高管路的混合效果。

(2)在管内主流体速度为 1 m/s 时,密度为

1.28 的固体颗粒混合效果相对最好。实验结果表明适中的液相流体速度会使管内固液混合更加充分,达到混合要求。

参考文献:

- [1] 王峰. 随动式动态混合器混合性能研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2014.
Wang F. Studies on mixing performance of the servo dynamic mixer[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2014. (in Chinese)
- [2] Zhang Q, Yong Y, Mao Z S, et al. Experimental determination and numerical simulation of mixing time in a gas-liquid stirred tank [J]. Chemical Engineering Science, 2009, 64(12): 2926–2933.
- [3] 李卫明. 静态混合器在硝基苯生产中应用的侧流试验研究[J]. 化学工业与工程技术, 2007, 28(6): 40–44.
Li W M. Side-test of static mixer applied in production of nitrobenzene [J]. Journal of Chemical Industry & Engineering, 2007, 28(6): 40–44. (in Chinese)
- [4] Paul E L, Atiemo-Obeng V A, Kresta S M. Handbook of industry mixing: science and practice [M]. New York, USA: John Wiley & Sons, 2004: 59–60.
- [5] 王峰, 阎华, 张震, 等. 随动式动态混合器的混合性能[J]. 化工进展, 2013, 32(11): 2574–2578.
Wang F, Yan H, Zhang Z, et al. Studies on mixing performances of the servo dynamic mixer [J]. Chemical In-

dustry and Engineering Progress, 2013, 32(11): 2574–2578. (in Chinese)

- [6] Pan G, Meng H. Experimental study of turbulent mixing in a tee mixer using PIV and PLIF [J]. AIChE Journal, 2001, 47(12): 2653–2665.
- [7] 张少峰, 张伟, 刘燕. 起旋器对水平液固循环流化床颗粒分布的影响[J]. 河北工业大学学报, 2009, 38(2): 69–73.
Zhang S F, Zhang W, Liu Y. Effects of the spiral flow generator on particles distribution in liquid-solid horizontal circulating fluidized bed[J]. Journal of Hebei University of Technology, 2009, 38(2): 69–73. (in Chinese)
- [8] Wang H, Zhang Y Y, He G H, et al. A contactless CCD dilatometer for foil materials [J]. International Journal of Thermophysics, 1999, 20(2): 743–753.
- [9] 李儒颂, 徐芹, 叶文江. 基于迈克尔逊干涉测力传感器装置的设计[J]. 光电技术应用, 2015, 30(2): 83–86.
Li R S, Xu Q, Ye W J. Design of force transducer based on Michelson interference[J]. Electro-Optic Technology Application, 2015, 30(2): 83–86. (in Chinese)
- [10] Taira R K, Mankovich N J, Boechat M I, et al. Design and implementation of a picture archiving and communication system for pediatric radiology[J]. American Journal of Roentgenology, 1988, 150(5): 1117–1121.

The solid-liquid mixing performance of a servo dynamic mixer

YANG YouSheng DING YuMei HE LiChen YAN Hua* JIA YuChuan YANG WeiMin

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

Abstract: A charge-coupled device (CCD) image measurement system has been used to investigate the characteristics of solid-liquid two-phase flow mixing in a dynamic mixer. In order to describe the distribution of solid particles in the dynamic mixer, the CCD image measurement system was used to explore the experimental characteristics of solid-liquid two-phase flow mixing, both with low flow resistance rotors, and without a rotor, in the dynamic mixer. An experimental study of the distribution in the tube of particles with mixed stability was carried out, and the influence of the low flow resistance rotors, different solid particle densities, and the flow rate of the continuous phase on the solid-liquid mixing effect were studied. The results showed that when the low flow resistance rotors are incorporated in the tube, the mixing effect of the solid particles close to the water is obviously improved. Furthermore when the flow rate of the continuous phase is 1 m/s, the mixing effect of the solid particles whose density is close to that of water is the best.

Key words: servo dynamic mixer; helical rotor; particle distribution; solid-liquid two-phase; mixing experiment; charge-coupled device (CCD)

(责任编辑:汪 琴)