

基于模糊分散控制的双层搅拌微波反应釜 混料均匀性自适应研究

Adaptive analysis of material mixing uniformity in double-layer stirred microwave reactor

吕志敏

LV Zhi-min

(濮阳职业技术学院, 河南 濮阳 457000)

(Puyang Vocational and Technical College, Puyang, Henan 457000, China)

摘要:以双层搅拌结构微波反应釜的混合搅拌时间与混合搅拌次数为关联特征量,采用模糊 PID 控制方法进行微波反应釜的物料双层搅拌结构自适应控制,以玻璃珠和氧化铝珠作为物料混合搅拌介质,进行双层搅拌的误差反馈调节和自适应控制,建立双层搅拌结构微波反应釜的物料混合均匀控制律,通过物料混合均匀控制的优化控制函数的求取,实现物料混合均匀等。仿真结果表明,采用该方法进行双层搅拌结构微波反应釜的物料混合控制均匀性较好,物料混合均匀控制双层搅拌的稳定性较好。

关键词: 双层搅拌结构;微波反应釜;物料;混合均匀

Abstract: Taking the mixing time and mixing times of double-layer stirred microwave reactor as the correlative characteristic variables, the fuzzy PID control method was adopted to control the material double-layer stirring structure of microwave reactor. Glass and alumina beads were used as the mixing medium to adjust the error feedback of the double-layer stirring. With the adaptive control, the material mixing uniformity control law of the double-layer stirred microwave reactor was established, and the material mixing uniformity was realized by obtaining the optimal control function of material mixing uniformity control. The simulation results showed that the uniformity of material mixing control and the stability of material mixing uniformity control in the double-layer stirred microwave reactor were better.

Keywords: double stirring structure; microwave reactor; material; uniform mixing

随着物料自动化搅拌控制技术的不断发展,微波反

应釜被广泛应用于食品、石油化工等多个行业中,不仅有效提高了生产效率,还节约了大量的人力物力,但随着技术的不断发展,对其物料搅拌均匀度以及效率的要求随之提高^[1]。如何提高微波反应釜物料搅拌的均匀度及效率,成为当前该领域研究的热点^[2]。

夏国标等^[3]提出了基于颜基比和进料速度自适应控制的混合搅拌均衡控制方法,有效实现了均衡控制,但该方法进行双层搅拌结构微波反应釜的物料混合均匀控制的自适应性较差;杨文等^[4]提出模糊反馈调节的基于双层搅拌结构微波反应釜分散混合控制方法,可提高物料搅拌效率,但该方法的模糊度较大,抗干扰性能较弱;徐璐等^[5]提出采用多相流模型等和多重参考系方法,增加了搅拌桨层数,提高了工作效率,但该设计加大了微波反应釜内工作环境的复杂度,对其物料搅拌均匀度考虑甚少。

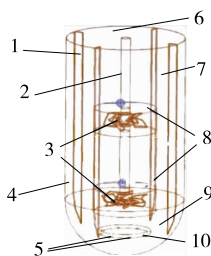
基于上述问题,试验拟提出基于模糊分散控制技术的双层搅拌结构微波反应釜的物料混合均匀控制方法,通过混合搅拌设备、混合搅拌介质、混合搅拌时间等,提高物料搅拌的混合均匀控制能力等,旨在提高微波反应釜物料搅拌的均匀度及效率。

1 双层搅拌微波反应釜结构分析

微波反应釜由挡板、出气口、搅拌桨等部件构成(见图 1)。微波反应釜的主密封口采用 A 型双线密封,其余密封点均采用圆弧面与平面、圆弧面与圆弧面的线接触密封形式,依靠接触面的高精度和光洁度,达到良好的密封效果^[6]。微波反应釜的釜体外装有桶型碳化硅炉芯,电炉丝穿于炉芯中,其端头由炉壳侧下部穿出,通过接线螺柱、橡胶电缆与控制器相连。微波反应釜装有压力表、爆破膜安全装置、汽液相阀、温度传感器等,便于随时了解釜内的反应情况,调节釜内的介质比例,并确保安全运

作者简介: 吕志敏(1978—),男,濮阳职业技术学院讲师,硕士。
E-mail: 741695379@qq.com

收稿日期: 2019-08-07



1. 挡板 2. 搅拌轴 3. 双层搅拌桨 4. 筒体 5. 进气口 6. 出气口 7. 静区域 8. 动区域 9. 球形封头 10. 气体分布器

图1 双层微波反应釜内部主要部件结构示意图

Figure 1 Structure of main components in double-layer microwave reactor

行,联轴器主要由具有很强磁力的一对内外磁环组成,中间有承压的隔套等。搅拌时,上层搅拌桨和下层搅拌桨附近轴向和径向均产生比较明显的流动。该微波反应釜中设计比较突出的为搅拌桨、搅拌轴以及挡板3个重要部件^[7]。

1.1 搅拌桨

市场上出现的搅拌桨叶种类繁多,比较常见的有螺旋式四叶搅拌桨、螺旋桨式三叶片搅拌桨、涡轮式搅拌桨、溶解式搅拌桨、锚式搅拌桨等^[8]。试验选择的是标准六直叶圆盘涡轮式搅拌桨(见图2)。该搅拌桨便于产生径向流,其转速较快(200 r/min)、剪切力较强,搅拌电机功率为250 W。

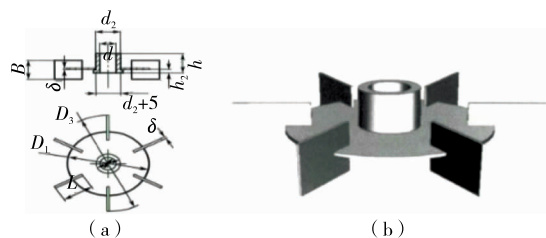


图2 标准六直叶圆盘涡轮式搅拌桨结构

Figure 2 Structure of standard six straight blade disc turbine impeller

搅拌桨在工作过程中与力的大小和流体的物理性质相关,故其搅拌桨功率为:

$$P = 2\tau N\tau, \quad (1)$$

$$\tau = 10^3 L F g, \quad (2)$$

式中:

τ —— 扭矩, $\text{N} \cdot \text{m}$;

Fg —— 受感器所受的力, N/kg ;

L —— 铁杆顶部至槽中心的距离, m 。

1.2 搅拌轴

依据搅拌轴在机械中所处的环境,搅拌轴可选择防腐性能高、表面硬度高的耐磨材质,试验选择不锈钢材

质,并对其表面进行镀铬处理,提高表面的强度和耐磨性能。

搅拌轴在工作过程中弯矩很小,所以用扭转强度来确定搅拌轴直径。

$$z_\tau = \frac{\xi}{\psi_\tau}, \quad (3)$$

式中:

z_τ —— 搅拌轴的可用扭转力, N/kg ;

ξ —— 搅拌轴所受的扭矩, $\text{N} \cdot \text{m}$;

ψ_τ —— 搅拌轴的抗扭截面系数, mm^3 。

1.3 挡板

在微波反应釜中,挡板能使反应釜搅拌得更加均匀。当微波反应釜没有挡板时,在启动之后物料会跟随搅拌轴的快速旋转产生离心力,导致搅拌轴中心位置的液面较低,而微波反应釜内壁周围液面位置较高,不利于微波反应釜搅拌均匀。为了避免这种现象的出现,设计微波反应釜时选择放置6片双层挡板,每层挡板之间为 120° ,上下两层之间设为 60° ,按照挡板与动区域之间的距离均相等放置。不仅可以提高搅拌混合的效率和均匀度,还可改变微波反应釜内的环境。微波反应釜的挡板设置示意图如图3所示。

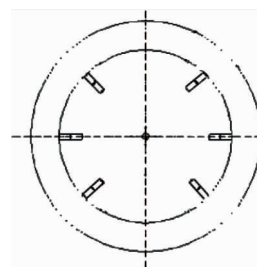


图3 微波反应釜挡板设计示意图

Figure 3 Design sketch of baffle plate of microwave reactor

2 微波反应釜的物料混合控制因素分析和控制对象描述

2.1 控制因素分析

为了实现双层搅拌结构微波反应釜的物料混合均匀控制,提高双层搅拌结构微波反应釜的智能控制能力,需要首先构建双层搅拌结构微波反应釜的物料混合均匀控制的约束参量模型,以混合搅拌介质、混合搅拌时间和混合搅拌次数等因素作为控制因素,进行微波反应釜的物料混合控制的效果和效率分析^[9],结合时滞耦合控制方法构建双层搅拌结构微波反应釜均匀混合的模糊控制器,对双层搅拌结构微波反应釜的混合搅拌模糊控制序列输出为 $x_1 = y, x_2 = \dot{y}, \dots, x_n = y^{(n-1)}$,在搅拌釜的膜组件上,采用激光粒度仪测量微波反应釜的物料输入的

自适应控制,得到膜组件的自适应控制方程为:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2; \\ \vdots \\ \dot{x}_n = f(X, t) + \Delta f(X, t) + d(t) + b(X, t)u. \end{cases} \quad (4)$$

其中 $X = [x_1^T, x_2^T, \dots, x_n^T]^T = [x_1^T, \dot{x}_1^T, \dots, x_1^{(n-1)T}]^T$, 设计自适应律, 得到双层搅拌结构微波反应釜的模糊控制自适应惯性权重系数为:

$$D = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \cdots & d_{1n} \\ d_{21} & d_{22} & \cdots & d_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{m1} & d_{m2} & \cdots & d_{mn} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

设定双层搅拌结构微波反应釜的反渗透系数为 v , $v = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n)$, 在恒压运行工况下, 得到微波反应釜的物料混合均衡反馈线性化调节系数为:

$$\begin{aligned} p_i(t) = & \sum_{k=0}^n \frac{1}{k!} e_i(0)^{(k)} t^k + \sum_{j=0}^n \left[\sum_{l=0}^n \frac{a_{ij}}{T^{j-l+n+1}} e_i(0)^{(l)} \right] \cdot \\ & t^{j+n+1}, \quad 0 \leq t \leq T; \\ & 0, \quad t > T. \end{aligned} \quad (6)$$

随着微波反应釜循环运行中水温的升高, 物料截留率升高, 此时微波反应釜储水罐中有机物浓度控制模型为:

$$\begin{cases} \dot{V}_m = -[I_{E,m} + g_{Na} m_m^3 h_m (V_m + V_{E,m} - V_{Na}) + \\ \quad g_k n_m^4 (V_m + V_{E,m} - V_k) + \\ \quad g_L (V_m + V_{E,m} - V_L)] / C_m; \\ \dot{m}_m = a_m (V_m) (1 - m_m) - \beta_m (V_m) m_m; \\ \dot{h}_m = a_h (V_m) (1 - h_m) - \beta_h (V_m) h_m; \\ \dot{n}_m = a_n (V_m) (1 - n_m) - \beta_n (V_m) n_m. \end{cases} \quad (7)$$

以通量衰减速率作为约束参量, 构建微波反应釜反渗透膜控制模型, 得通量衰减控制的反渗透膜运行模型^[10], 由微波反应釜的物料混合输入向量 $Y(i)$ 可得机器人的刚性驱动特征量为:

$$\begin{aligned} \min_{\beta} \| Y(i) - X(i) \beta \| &= \\ \min_{\beta} \left\| \begin{bmatrix} U'_{i1}{}^T Y_{i1} - \Sigma'_{i1} V'_{i1}{}^T \beta \\ U'_{i2}{}^T Y_{i2} - \Sigma'_{i2} V'_{i2}{}^T \beta \\ \vdots \\ U'_{ip(i)}{}^T Y_{ip(i)} - \Sigma'_{ip(i)} V'_{ip(i)}{}^T \beta \end{bmatrix} \right\| &= \min_{\beta} \| Y(i+1) - X(i+1) \beta \|. \end{aligned} \quad (8)$$

X_{ij} 作为微波反应釜的物料混合控制因向量的秩为 r_{ij} , $r_{ij} \leq m$, 在不同流道宽度反渗透膜中, 得到 Σ'_{ij} 、 U'_{ij} 、 V'_{ij} 的维数分别为 $r_{ij} \times r_{ij}$, $N_{ij} \times r_{ij}$ 和 $m \times r_{ij}$, 对矩阵进行酉分解得 $X(i+1)$ 和 $Y(i+1)$ 的函数, 从而得到微波反应釜的模式数:

$$N(i+1) = \sum_{j=1}^{p(i)} r_{ij}. \quad (9)$$

由于 $r_{ij} \leq m < N_{ij}$, $N(i) = \sum_{j=1}^{p(i)} N_{ij}$, 综合分析, 构建微波反应釜的物料混合控制因素模型, 从而进行双层搅拌结构微波反应釜的物料混合控制设计。

2.2 双层搅拌结构性调节

以双层搅拌结构微波反应釜的混合搅拌时间与混合搅拌次数为关联特征量, 采用模糊 PID 控制方法进行微波反应釜的物料双层搅拌结构自适应控制^[11], 得到反渗透组件抗膜的控制律:

$$\beta^* = V_1 \Sigma^{-1} U_1^T Y. \quad (10)$$

其中微波反应釜的物料的扰动特征分布为 $\Sigma \in R^{n \times m}$, 且 $\Sigma = \text{diag}(\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_r)$, $\delta_i = \sqrt{\lambda_i}$, 令 $y_{iq,t} =$

$$\begin{cases} a_{iq} \delta_{iq,r}, q < q_1 \\ x'_i b'_t - \sum_{q=1}^{q_1} a_{iq} \delta_{iq,r}, q = q_1, \text{采用通量稳定性调节方法,} \\ 0, q > q_1 \end{cases}$$

得到微波反应釜混合均匀调节过程中的稳态特征分布为:

$$\begin{cases} x_i^{(k+1)} = \frac{1}{a_{ii}} [b_i - \sum_{j=1}^{i-1} a_{ij} x_j^{(k+1)} - \sum_{j=i+1}^n a_{ij} x_j^{(k)}]; \\ a_{ij} \neq 0, i = 1, 2, \dots, n. \end{cases} \quad (11)$$

根据上述分析, 采用玻璃珠和氧化铝珠作为物料混合搅拌介质, 进行双层搅拌的误差反馈调节。

3 微波反应釜的物料混合均匀优化控制

3.1 优化控制函数

在构建了双层搅拌结构微波反应釜混合均匀搅拌控制因素分析模型的基础上, 进行微波反应釜的物料混合均匀控制的优化, 基于模糊分散控制技术的双层搅拌结构微波反应釜的物料混合均匀控制方法^[12], 构建双层搅拌结构微波反应釜的混合均匀性搅拌可靠性调节参量集:

$$P^* \stackrel{\Delta}{=} \{x^* | \rightarrow \exists x \in X_f : x \succ x^*\}. \quad (12)$$

在反渗透组件约束下, 得到微波反应釜的物料混合搅拌的膜通量衰减因素为:

$$\begin{aligned} PF = & \{f(X) = [f_1(X), f_2(X), \dots, f_r(X)] | X \in \{X^*\}\}. \end{aligned} \quad (13)$$

采用玻璃珠和氧化铝珠作为物料混合的搅拌介质, 进行双层搅拌的误差反馈调节和自适应控制, 得到优化的双层搅拌结构微波反应釜的物料混合均匀控制律为:

$$F(x) = \sum_{i=1}^N v_i^2(x) = v^T(x) v(x). \quad (14)$$

在膜比通量衰减速率进化下, 得到膜组件的抗渗透

动态调节参量分布为 $CH_i (i \in C_1)$, 进水隔网定向角度调整为 45° , 得物料混合均匀控制的优化控制函数表述为:

$$Y(s) = \frac{e^{-L_ms}}{(\lambda_1 s + 1)} R(s) + \frac{(\lambda_2 s + L_m)s}{(\lambda_2 s + 1)} D(s)。(15)$$

物料混合均匀控制的优化控制函数可进行双层搅拌结构微波反应釜的物料混合均匀调节, 实现了双层搅拌结构微波反应釜的物料混合均匀控制。

3.2 湍流模型

由于搅拌轴、挡板等结构的存在, 微波反应釜内流体存在较强的流线弯曲、漩涡和旋转的情况, 故湍流模型选用带旋流修正的 Realizable $k-\epsilon$ 模型^[13], 即:

$$\frac{\partial}{\partial t} = (pk) + \frac{\partial}{\partial x_i} (pk\mu_j) = \frac{\partial}{\partial x_i} [(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}) \frac{\partial k}{\partial x_j}] + G_k + G_b - p\epsilon - Y_M + S_K, (16)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (p\epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j} (p\epsilon\mu_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} [(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j}] + pC_1 S\epsilon - pC_2 \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{\nu\epsilon}} + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} C_{36} G_b + S_\epsilon, (17)$$

式中:

G_k ——由层流速度梯度而产生的湍流动能, J;

G_b ——由浮力产生的湍流动能, J;

Y_M ——过渡扩散产生的波动;

$C_2, C_{1\epsilon}$ ——常量;

S_k, S_ϵ ——可根据具体需求用户自行进行定义。

在微波反应釜工作过程中, 釜内的流动环境非常复杂, 通过该模型来修正微波反应釜内的工作环境, 处理搅拌桨叶、挡板、搅拌轴以及其他静止区域, 可确保物料混合均匀控制。

4 试验与结果分析

为了验证试验方法的有效性, 选择 Microtrac S-3500 激光粒度测试仪为试验设备, 直径 1.6, 1.8~2.0, 2.4~2.8 mm 的磁微粒为混合搅拌介质, 进行双层搅拌结构微波反应釜的物料混合均衡性搅拌控制, 混合搅拌 30 min 后分析物料的均匀性, 双层搅拌结构微波反应釜中物料组成分布见表1。由表1可知, 各直径的磁微粒介质进行

双层搅拌混合控制后, 反应釜中的物料组成均匀可控。

按表 1 的物料成分分布, 以 40 mil-40°和 40 mil-45°两种膜作为物料搅拌介质, 进行双层搅拌结构微波反应釜混合均匀搅拌, 测试在不同的玻璃珠、氧化铝珠和氧化锆珠作为搅拌微粒介质下的粒径大小分布如图 4 所示。由图 4 可知, 采用玻璃珠和氧化铝珠混合作为物料搅拌介质进行双层搅拌, 物料混合控制均匀性较好。

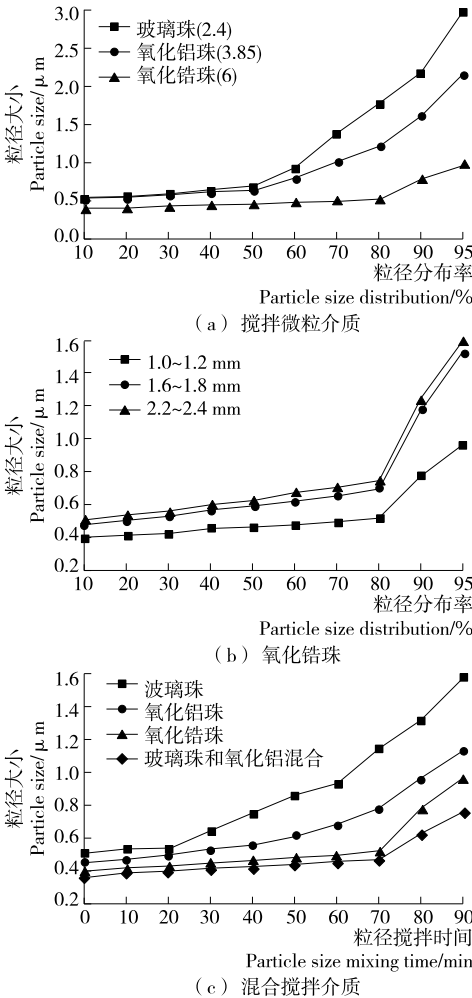


图 4 微波反应釜物料混合搅拌控制的粒径分布
Figure 4 Particle size distribution of material mixing and stirring control in microwave reactor

采用玻璃珠和氧化铝珠作为物料混合的搅拌介质, 进行双层搅拌的误差反馈调节和自适应控制, 混合搅拌 90 min, 在直径小的微粒中, 得到混合搅拌介质物料吸收指数分布、消耗指数分布以及生产效率指数分布如表 2 所示。由表 2 可知, 通过微波反应釜的物料双层搅拌结构自适应调节, 提高了物料混合搅拌的均匀性。

测试混合搅拌物料搅拌的养分平衡指数分布指标见表 3。由表 3 可知, 通过混合搅拌介质, 提高了微波反应釜的物料养分平衡指标与平衡率。

表 1 双层搅拌结构微波反应釜中的物料组成分布
Table 1 Composition of materials in microwave reactor with double-layer stirring structure mg/kg

样本区域	盐	磷	钾
A 区	143	90	150
B 区	156	60	140
C 区	43	60	40
D 区	134	56	140
E 区	156	54	150

表 2 混合搅拌介质物料的分布指数
Table 2 Distribution index of mixed media

物料	产量吸收指数	消耗指数	生产效率指数
氮	6	1.5	190
磷	2	0.5	510
钾	10	2.5	98

表 3 微波反应釜的物料搅拌平衡指标

Table 3 Nutrient balance, balance index and balance rate index of material agitation in microwave reactor

物料	养分平衡/(kg·mol ⁻¹)	平衡指数	平衡率/%
氮	14.6	4.0	134.6
磷	4.5	6.4	-5.6
钾	134.6	65.7	-41.8

分析物料混合的养分吸收量与搅拌控制的关系,得到微波反应釜的物料双层搅拌吸收增量分布如图 5 所示。由图 5 可知,采用试验方法进行双层搅拌结构微波反应釜的物料混合控制均匀性较好,物料混合均匀控制双层搅拌稳定性较好。

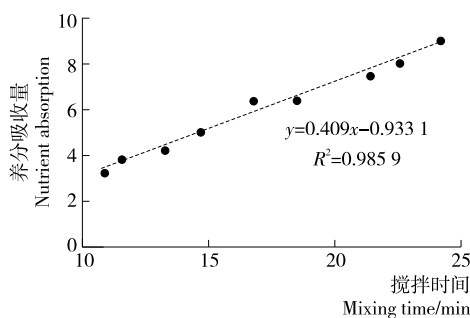


图 5 微波反应釜的物料双层搅拌吸收增量分布

Figure 5 The increment distribution of material double-layer agitation absorption in microwave reactor

5 结论

试验研究了相关因素下双层搅拌结构微波反应釜的物料混合均匀性控制方法,分析了控制约束模型、控制算法和双层搅拌结构微波反应釜的物料混合均匀性分析的试验材料、仪器和测试方法。结果表明,采用玻璃珠和氧化铝珠作为物料混合的搅拌介质,进行双层搅拌的误差反馈调节和自适应控制,可实现双层搅拌结构微波反应釜的物料混合均匀性能,提高物料混合均匀性。后续可研究适当增加双层搅拌结构微波反应釜的混合搅拌时间与混合搅拌次数,从而提升试验结果的准确性。

参考文献

[1] 杨闪闪, 王玲, 廖启豪, 等. 基于径向基函数法的五轴数控机床空间动态性能研究[J]. 机械工程学报, 2019, 55(9): 144-153.

[2] 曲立国, 邓亚颂. 基于多传感器的 AGV 定位误差校正方法研究[J]. 中北大学学报: 自然科学版, 2018, 39(6): 780-785, 799.

[3] 夏国标, 陈剑云, 夏孟显. 基于 ZYNQ 的谐波检测系统设计[J]. 华东交通大学学报, 2018, 35(4): 89-96.

[4] 杨文, 赵千川. 基于能量平衡的暖通空调系统故障检测方法[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2017, 57(12): 1 272-1 279.

[5] 徐璐, 柯世堂. 大型冷却塔自振频率估算方法及拟合优度分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2018, 50(12): 193-198.

[6] 魏仁超, 陈学东, 范志超, 等. FV520B 钢在湿 H₂S+Cl⁻ 环境中的腐蚀疲劳性能[J]. 机械工程学报, 2018, 54(14): 43-49.

[7] 马泽文, 刘涛, 孙旭东. 基于 CFD 的结晶搅拌反应釜流场分析与改进[J]. 系统仿真学报, 2018, 30(5): 1 900-1 907.

[8] WU Qiao-guo, CHEN Xue-dong, FAN Zhi-chao, et al. Corrosion fatigue behavior of FV520B steel in water and salt-spray environments[J]. Engineering Failure Analysis, 2017, 79(5): 422-430.

[9] 段翔宇, 柳和生, 黄兴元, 等. 不同工艺下反应釜内 PS/CO₂ 均相体系流变性能模拟[J]. 工程塑料应用, 2017, 45(7): 52-55.

[10] 桂挺, 付双成, 袁惠新, 等. 食品工业中挡板对于搪玻璃反应釜固液悬浮的影响研究[J]. 食品工业, 2018, 39(1): 192-196.

[11] 李军, 石青. 基于 KELM 的连续搅拌反应釜模型辨识[J]. 控制工程, 2017, 24(10): 2 137-2 143.

[12] 张玉, 金光远, 崔政伟, 等. 组合浆微波反应釜内流动混合特性数值模拟[J]. 食品与机械, 2018, 34(11): 88-94.

[13] 张慧敏, 胡守明, 孔祥征. 偏心双桨搅拌流场及效果分析[J]. 化学反应工程与工艺, 2017, 33(1): 49-54, 64.

(上接第 69 页)

[9] 张翔宇, 隋嵩, 张德远, 等. 超声振动改善深孔镗削加工质量[J]. 机械工程学报, 2017, 53(19): 143-148.

[10] 赵艳丽, 肖金陵. 激光加工机械手系统工件位姿自动校正的方法[J]. 激光技术, 2015, 39(2): 206-208.

[11] SHA Xiao-peng, LI Hui-guang, LI Wen-chao, et al. Three-dimensional positioning control based on stereo microscopic visual servoing system[J]. Optical Engineering, 2015, 54(1): 977-982.

[12] 崔艳军, 张文峰, 李建欣, 等. 条纹投影三维测量的 Gamma 畸变校正方法[J]. 光学学报, 2015, 35(1): 153-171.

[13] 杨亮亮, 武晓虎, 史伟民, 等. 基于正交投影迭代学习的高频响闭环运动控制系统模型参数辨识研究[J]. 机械工程学报, 2015, 51(1): 188-195.

[14] 季云峰, 施之皓, 任杰, 等. 基于单目视觉伺服系统的高速旋转球体三维速度测定[J]. 中国体育科技, 2017, 53(2): 139-144.

[15] 尚忠义, 李伟仙, 董明利, 等. 基于四步相移光栅投影的三维形貌测量系统[J]. 应用光学, 2015, 36(4): 584-589.