DOI: 10.3901/JME.2013.23.028

面向真空注型技术的双组分 材料混合脱泡方法*

张壮雅^{1,2} 张海光^{1,2} 万福平^{1,2} 刘媛媛^{1,2} 胡庆夕^{1,2}

(1. 上海大学快速制造工程中心 上海 200444;

2. 上海大学上海市机械自动化及机器人重点实验室 上海 200444)

摘要: 针对真空注型工艺(Vacuum casting, VC)过程中存在的双组分材料混合不均匀、脱泡不充分而影响最终产品质量的问题。依据混沌混合理论,提出一种几何非对称大叶片式搅拌桨,通过周期性改变搅拌转速的方法来强化混合效果,并利用计算流体力学技术对搅拌槽流场特性进行研究,分析槽内流场结构、压力分布、匀速及变速搅拌下槽内速度分布情况。同时,采用机器视觉和图像处理技术对搅拌过程材料气泡特征进行在线检测,并将检测结果作为控制系统的反馈信号,以实现气泡的自动消除。试验结果表明,所提出的方法不仅能够实现对高黏度双组分材料的均匀混合以及气泡的自动消除,而且还能够进一步缩短处理时间,为有效解决真空注型工艺中高黏度双组分材料难于混合脱泡的问题提供一种可行的方法。

关键词: 真空注型技术 混合脱泡 几何非对称大叶片式搅拌桨 机器视觉

中图分类号: TQ027 TP391

Methodology of Two-components Material Agitating Deaeration for Vacuum Casting

ZHANG Zhuangya^{1,2} ZHANG Haiguang^{1,2} WAN Fuping^{1,2}
LIU Yuanyuan^{1,2} HU Qingxi^{1,2}

(1. Rapid Manufacturing Engineering Center, Shanghai University, Shanghai 200444;

2. Shanghai Key Laboratory of Mechanical Automation & Robotics, Shanghai University, Shanghai 200444)

Abstract: Aiming at solving the problem that results from unevenly mixing two-component materials and inadequately deaerating air and thus affects the product quality, base for chaotic mixing theory, a large asymmetric geometric impeller is adopted herein to periodically change the speed of stirring process for consolidating mixing efforts. Based on computational fluid mechanics, characteristics of flow field are researched in order to study the structure of flow field, pressure distribution, and speed distribution in slot under constant speed and variable speed condition, respectively. Also, based on machine vision and image processing techniques, the bubble features of mixed materials can be on-line detected during mixing process and the detecting result can be used as feedback signal for automatically eliminating bubble. The experiment shows that the proposed method can actually evenly mix the high-viscosity two-component material and automatically eliminate the bubble, thus presenting a feasible solution to the problem of unevenly mixing high-viscosity two-component material and inadequately deaerating air.

Key words: Vacuum casting Agitating deaeration A large asymmetric geometric impeller Machine vision

0 前言

在先进制造生产环境下,企业为快速适应市场的发展变化,满足客户个性化需求,基于快速成形的快速模具制造技术已成为当前研究的热门课题^[1-2]。真空注型技术(Vacuum casting, VC)是典型的间接快

速模具制造技术之一,可以实现单件小批量制品的快速复制,并在制造薄壁件和透明件方面具有独特优势,因此在汽车、家电、轻工等行业具有广阔的市场前景。目前 VC 技术主要成形材料为聚氨酯树脂材料,属于高分子反应加工范畴^[3],其成形过程中的种种化学变化是以参加反应的双组分材料充分混合为前提,若混合不均匀,会导致正常混合反应终止、副产品增加,进而影响到产品质量。同时,混合过程中对脱泡质量的控制也是一个重要环节,脱泡的不充分,将会导致 VC 产品内部及表面存在

* 国家博士后基金资助项目(2011M500755)。20130116 收到初稿,20130908 收到修改稿

气泡缺陷, 从而影响产品外观质量及力学性能^[4]。

搅拌器是搅拌设备中的重要部件, 为混合过程提供所需的能量和适当的流动状态。但目前 VC 设备使用的斜叶式搅拌桨、直叶式搅拌桨、涡轮式搅拌桨等传统搅拌器, 对于介质较为黏稠的双组分材料, 考虑到桨叶等硬件在混合过程中的承受能力以及高速的剪切运动会使高分子材料遭到破坏等因素^[5-6], 转速一般较低(80~150 r/min), 材料通常处于低雷诺数的层流状态, 混合过程中搅拌槽内存在环状混合隔离区^[7], 隔离区内的材料混合只能依靠分子扩散运动来实现, 使得混合质量及效率普遍偏低, 已不能满足产品的质量要求。而目前对于混合脱泡质量的控制, 主要依赖于操作者目测进行判断, 具有一定的主观性和盲目性, 存在检测效率低以及质量难以保证的问题。

为提高层流搅拌槽的混合效果, 消除混合隔离区, 近年来, 有学者提出利用混沌现象^[8]来加强层流状态下的混合效果。SWANSON 等^[9]和 AREF 等^[10]通过试验或计算机模拟的方法对混沌混合进行了研究; LIU 等^[11]通过数值模拟, 对比分析了周期流和非周期流的混合效果, 与周期流相比, 非周期流的拉伸分布更均匀, 混合效果更好; MONTANTE 等^[12]研究了搅拌桨偏心搅拌的混合特性, 试验结果表明, 偏心搅拌可诱发层流搅拌槽内混沌混合, 进而提高混合质量; YE 等^[13]采用时间延迟反馈控制电动机的方法使电动机产生混沌转动, 试验结果表明混沌转速搅拌可以改善混合效果。综上可知, 增强层流搅拌槽的混合效果, 必须消除混合隔离区, 增大流动中的混沌区; 另一方面, 随着成像硬件和计算机技术的发展, 机器视觉和图像处理技术作为一种实用的缺陷检测手段, 近年来已被用于半导体、工业、纺织等领域的在线缺陷检测^[14-15], 具有非接触、实时、精度高等特点。

因此, 根据混沌混合理论, 提出一种几何非对称大叶片式搅拌桨, 采取周期性改变搅拌转速的方法来强化混合; 并引入机器视觉和图像处理技术对混合过程材料气泡特征进行在线检测, 实现气泡的自动消除。为有效解决真空注塑工艺中高黏度双组分材料难于混合脱泡的问题提供一种可行的方法。

1 搅拌桨结构及参数

搅拌桨的结构形式很大程度上决定了体系的混合效果^[16]。因此, 人们在改善桨叶结构形式方面做了大量研究, 如日本三菱重工、住友重机等公司相继开发了最大叶片式、泛能式、叶片组合式搅拌

器等。本研究在设计桨叶形状时, 依据混沌混合理论, 提出一种几何非对称大叶片式搅拌桨如图 1 所示, 该搅拌桨特点是搅拌桨在搅拌槽的纵剖面上的投影面积占搅拌槽的纵剖面面积比例大、且桨叶相对于转轴几何非对称, 其结构示意图见图 1b, $D=0.11\text{ m}$, $r=0.06\text{ m}$, $H=0.095\text{ m}$, $h=0.054\text{ m}$, $\theta=105^\circ$ 。

图 1 几何非对称大叶片式搅拌桨及其结构示意图

2 新型搅拌桨流场特性

搅拌设备在搅拌过程中存在着复杂的流动现象, 测量搅拌设备内流场特性的试验装置较为昂贵且相当费时。而运用计算流体力学技术可以较为直观的对搅拌槽搅拌桨运行过程进行流场分析、计算和预测, 因此计算流体力学技术近年来在搅拌桨的设计方面得到了广泛的应用。本研究应用计算流体力学技术, 通过建立几何非对称大叶片式搅拌桨变速搅拌槽流体力学数学模型, 对搅拌槽流场特性进行研究。

2.1 搅拌槽流体力学数学模型

大量研究表明, 聚氨酯材料的非牛顿性仅在凝胶点附近较为明显^[17], 且混合搅拌时间相对于材料凝胶时间较短。因此为简化计算, 作如下假设: ①黏度为定黏度的牛顿流体; ②流场为等温流场。在基于上述假设上, 建立混合搅拌数学模型基本控制方程组。求解质量和动量守恒方程, 并以标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型使方程组闭合。机械搅拌过程可认为双组分材料是 2 个互相贯穿并相互作用的不同的连续相, 因此应用欧拉-欧拉法双流体模型对两相流动进行

描述。

第 q 相连续方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \mathbf{v}_q) = 0 \quad (1)$$

第 q 相动量方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q \mathbf{v}_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \mathbf{v}_q \mathbf{v}_q) = \\ -\alpha_q \nabla P + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}_q + \alpha_q \rho_q \mathbf{g} + \\ \alpha_q \rho_q (F_q + F_{lift,q}) + F_{vw,q} + \sum_{p=1}^n K_{pq} (\mathbf{v}_p - \mathbf{v}_q) \end{aligned} \quad (2)$$

式中 α_q ——材料密度

t ——时间

$\rho_q, \mathbf{v}$ ——第 q 相的密度及流速

$\boldsymbol{\tau}_q$ ——第 q 相应力张量

$\mathbf{g}$ ——重力加速度

F_q —— q 相外部体积力

$F_{lift,q}$ —— q 相升力

$F_{vw,q}$ —— q 相虚拟质量力

$K_{p,q}$ —— p 相和 q 相间的动量变换系数

2.2 计算方法及边界条件

处理好运动的桨叶和静止的搅拌槽之间的关系, 是变速搅拌流体计算的关键。因此, 采用动网格技术模拟搅拌叶呈周期性变化的非定常流动, 并通过 C 语言编程定义边界的变速运动规律, 如图 2 所示, 搅拌变速周期为 T , 前 $T/2$ 周期内搅拌转速为 N_1 , 后 $T/2$ 周期内搅拌转速为 N_2 。

图 2 变速搅拌示意图

搅拌槽直径 0.18 m, 槽深 0.15 m, 搅拌桨底边距离槽底 0.03 m。网格剖分时, 对叶面几何扭曲大的桨叶周围流场区域, 采用非结构网格方法划分, 桨叶外围靠近搅拌槽边缘的规则形状区域采用结构网格方法划分, 整个流场网格数为 2 339 682, 如图 3 所示; 对于高黏度材料, 搅拌过程中材料通常处于低雷诺数层流状态, 槽内存在混合隔离区, 难以混合均匀, 因此本文仅考虑介质较为黏稠的材料, 选取 AXSON 公司常用真空注塑聚氨酯树脂材料^[18]中黏度最高的 PX245 材料进行模拟, 其主剂黏度 800 mPa·s, 密度 1 340 kg/m³; 固化剂黏度 1 000

mPa·s, 密度 1 100 kg/m³; 搅拌槽自由液面选取自由边界条件, 壁面边界采用无滑移固壁条件, 并使用标准壁面函数法确定固壁附近的流动。

图 3 搅拌槽网格划分示意图

2.3 搅拌槽流场特性

2.3.1 宏观流场

流场结构是决定混合性能的重要因素, 为研究几何非对称大叶片式搅拌器各截面的流场分布规律, 以 150 r/min 转速为例, 取位于搅拌叶片中部面 $y=0$ 处的纵截面和 $z=0$ 处的横截面, 其流场速度矢量如图 4 所示。

(a) 轴向纵截面内的流场结构

(b) 轴向横截面内的流场结构

图 4 搅拌槽内流场结构示意图

由图 4a 可以看出, 在搅拌槽内形成双循环流, 整个流域处于循环流的影响范围内, 且在槽体底部形成了冲刷区, 有利于全釜搅拌。

由图 4b 可以看出, 桨叶与槽壁之间的区域存在一个较大的闭合循环流, 且搅拌桨叶端部靠近槽壁区存在一个小的旋流, 该结构有利于破坏槽壁面的层流底层, 减少与槽壁面的黏结。

2.3.2 速度分布

搅拌槽内流体的轴向和径向速度大小及分布情况, 是影响混合效果的重要因素。为此, 为研究变速幅度以及速度值对搅拌效果的影响, 采用以下三种转速方案进行模拟。

方案 1: 匀速搅拌, 搅拌速度为 150 r/min。

方案 2: 周期性变速搅拌, 一个周期为 12 s, 搅拌速度在每一周期内 80 r/min 和 120 r/min 相间变换, 每 6 s 改变一次速度。

方案 3: 周期性变速搅拌, 一个周期为 12 s, 搅拌速度在每一周期内 80 r/min 和 150 r/min 相间变换, 每 6 s 改变一次速度。

36 s 时刻, 搅拌槽轴向纵截面内 3 个不同高度

处流体的轴向和径向速度分量分布情况进行定量分析, 分别取桨叶上部靠近自由液面处($z=0.085$ m)、桨叶中上部($z=0.030$ m)以及靠近搅拌槽底部($z=-0.030$ m)三个不同的区域, 分析结果如图 5 所示。它们分别代表了桨叶顶部靠近自由液面处、桨叶中上方以及桨叶下方靠近搅拌槽底部 3 个不同的区域, 分析结果如图 5 所示。

由图 5a、5b、5c 可知, 周期性变速搅拌与匀速搅拌相比, 周期性变速搅拌槽内流体轴向速度 v_z 明显增大, 尤其是桨叶中上方以及靠近搅拌槽底部的增强效果最显著; 且速度跨度越大, 轴向速度 v_z 变化越大。其中方案 3 对轴向速度 v_z 的改善效果最好。

径向速度 v_r 分布曲线如图 5d、5e、5f 所示, 效果和轴向速度 v_z 分布情况类似。由此可见, 变速搅拌可以改善搅拌效果, 且改善的程度受速度值大小及速度跨度范围影响。速度跨度较大时, 搅拌过程中对流体产生的扰动越大, 对流场的改善越好。

图 5 轴向和径向速度分布图

2.3.3 压力分布

材料混合过程中, 气泡是由于气体具有一定的溶解度, 并以气泡核的形式存在于材料中, 当材料在极短的时间内流过一个绝对压强很低的区域时, 气泡核会快速蒸发或游离出来, 产生的现象^[19]。图

6 是几何非对称大叶片式搅拌桨 80 r/min 和 150 r/min 变速搅拌, 一个周期时, 纵截面所形成的压力分布情况, 可以看出: 压力 p 从上至下依次增大, 且在搅拌槽的中上部出现了较大的低压区, 根据气泡生成的条件, 气泡应主要在中、上部产生、集聚,

结构上有利于脱泡。

图 6 纵截面搅拌槽压力分布

3 气泡特征的图像识别

双组分材料混合搅拌过程中产生的气泡具有两个明显特征：① 气泡粒径变化范围大，跨度范围大致在 0.1~0.5 mm；② 由于机械搅拌作用，气泡变形较大。为此，提出气泡总周长像素比例算法对整个混合脱泡过程进行在线检测，检测结果作为是否继续脱泡的反馈信号，通过对真空泵及进气电磁阀的控制，实现对材料气泡的自动消除。

算法流程：首先完成气泡图片的采集和传输；其次对采集图像进行预处理与气泡特征边缘提取；最后通过气泡边缘像素比例算法，对气泡图像进行特征识别及量化分析，实现对气泡特征信息的在线检测。

3.1 图像采集与预处理

(1) 数据采集。采用工业 CCD 黑白摄像机，对整个脱泡过程进行实时监控。

(2) 图像预处理。由于箱体内拍摄到的材料表面图像灰暗，图像的对比度和信噪比都较低，加之图像传输、恢复等过程，不可避免地会引入噪声污染，使图像变得模糊、难以捕捉图像特征。因此本研究采用中值滤波法及直方图均衡化算法对图像进行平滑、锐化等的前期处理。

3.2 气泡边缘提取

气泡边缘特征的确定，对于整个脱泡过程气泡状态的识别非常重要。其中检测算子的选择直接关系到检测系统对气泡边缘的敏感性。由于 Canny 算子具有一定的噪声抑制力，能够检测到气泡的弱边缘^[20-21]且算法成熟，因此本研究采用 Canny 算子对气泡图像进行处理，图 7a 为气泡采集图像，图 7b 为气泡图像处理结果。

图 7 气泡采集图像及图像处理效果

3.3 气泡特征识别算法

混合搅拌过程中，由于气泡变形严重，因此研究气泡个体特征的意义不大，但不同阶段的脱泡效果，可由单位面积内气泡所占面积的百分比来表示，且气泡检测图像中不同气泡特征的周长，如图 8 所示，可由 Canny 算法得到的边缘像素点计算。

图 8 气泡特征边缘检测效果

因此在脱泡不同检测阶段，脱泡的效果可引入气泡边缘像素比例 η 来研究，其表达式如下

$$\eta = \frac{S_e}{lw} \in [0, 1] \quad (3)$$

式中 S_e ——边缘像素点的总和

l ——采集区域的长度(以像素点计)

w ——采集区域的宽度(以像素点计)

lw ——采集区域像素点总和

单位面积内气泡的质量分数越高，则 η 值越大。

以如图 8 所示两幅气泡图像为例，图 8a 和图 8b 的气泡边缘像素比例 η_a 和 η_b ，由式(3)可得

$$\eta_a = 116 / (32 \times 32) = 0.113 \ 3$$

$$\eta_b = 134 / (32 \times 32) = 0.130 \ 9$$

$\eta_a < \eta_b$ ，与正常的视觉判断相符。因此通过对 η 值判断，可完成对脱泡过程的控制。当 $\eta = 0$ ，认为气泡状态达标，反之则不达标，需要继续循环脱泡。

4 试验与结果分析

4.1 试验装置控制系统实现

为实现混合过程中的搅拌速度的变速控制及气泡特征的在线监测及自动消除，开发了如下控制

系统, 如图 9 所示。

图 9 混合脱泡控制系统示意图

1. 箱体 2. 几何非对称大叶片式搅拌桨 3. 视觉传感器
4. 光源 5. 步进电动机 6. 电动机驱动器 7. 计算机
8. 数模转换模块 9. 可编程逻辑控制器 10. 电磁阀
11. 真空泵 12. 压力传感器

系统由 4 部分组成, 分别是: 图像采集模块、变速控制及图像处理模块、变速执行模块和脱泡执行模块。图像采集模块主要由视觉传感器 3、光源 4 等组成, 负责脱泡阶段气泡图像的采集; 变速控制及图像处理模块, 主要由计算机 7、可编程逻辑控制器 9 和数模转换模块 8 组成, 负责步进电动机的运行参数设置及处理、箱体 1 内压力数据的实时采集, 以及对采集的气泡图像信息进行识别、分析、判别, 并对编程逻辑控制器发出相应控制的指令; 变速执行模块主要由步进电动机 5、驱动器 6 及几何非对称大叶片式搅拌桨 2 等组成, 脱泡执行模块主要由真空泵 11、压力传感器 12 及电磁阀 10 等组成, 能够根据变速控制及图像处理模块发出的控制指令, 完成对步进电动机的变速控制以及脱泡压力的控制。

4.2 试验材料及方法

由于实际的真空注型聚氨酯树脂材料价格比较昂贵, 且材料混合均匀性较难测定, 因此根据 AXSON 公司的真空注型聚氨酯树脂材料 PX245 的性能, 用黏度相同而代价较低的甘油溶液替代, 搅拌槽直径 0.18 m, 液面高度 0.16 m, 并采用基于酸碱中和反应的褪色试验定性描述高黏度流体的混合效果, 充分混合的区域为酸性, 显示为浅色, 未混合区为碱性, 显示为深色, 根据溶液颜色的变化情况判定混合效果的好坏; 混合脱泡试验材料采用 PX245。

试验一: 以 0.04% 的溴百里酚蓝溶液作为酸碱指示剂, 主剂与固化剂混合比例按 3:1, 其中主剂含 1 mol/L 的 NaOH 2 mL, 固化剂含 1 mol/L 的 HCL 4 mL。试验共进行 4 组, 分别如下。

(1) 采用斜叶式搅拌桨, 桨叶直径 0.11 m, 桨叶垂直高度 0.025 m, 中心距槽底高度 0.07 m, 以 150 r/min 匀速搅拌。

(2) 采用几何非对称大叶片式搅拌器以 150 r/min 匀速搅拌。

(3) 采用几何非对称大叶片式搅拌桨进行周期性变速搅拌, 一个周期为 12 s, 搅拌速度在每一周期内进行 80 r/min 和 120 r/min 相间变换, 每 6 s 改变一次速度。

(4) 采用几何非对称大叶片式搅拌桨进行周期性变速搅拌, 一个周期为 12 s, 搅拌速度在每一周期内进行 80 r/min 和 150 r/min 相间变换, 每 6 s 改变一次速度。

试验二: 为验证所提出气泡检测方法的有效性, 针对聚氨酯树脂材料 PX245 脱泡过程, 以固定时间段采集气泡图像, 观察材料脱泡效果。

4.3 试验结果及分析

(1) 混合搅拌试验。图 10 为斜叶式搅拌器匀速 150 r/min 搅拌效果, 当转速为 150 r/min 匀速搅拌时, 未加入含酸溶液的固化剂溶液时溶液呈碱性, 显示为深色, 如图 10a 所示; 加入含酸溶液的固化剂搅拌 120 s 后, 对应的混合情况如图 10b 所示, 由于含酸溶液的固化剂是由搅拌槽顶部加入, 故搅拌槽中桨叶上方液体首先参与混合, 并形成直径较大的圆环; 经过 8 min 的搅拌以后, 搅拌槽中桨叶上方仍存在一个很清晰的圆环, 即混合隔离区, 由于隔离区内流体没有参与整体对流混合, 所以只能通过分子扩散来产生中和反应, 从而存在很长时间而不消失, 而此时搅拌槽中其他区域均已充分混合呈现浅色, 如图 10c 所示。

图 11 为采用几何非对称大叶片式搅拌器匀速 150 r/min 搅拌的混合效果, 加入过量酸搅拌 90 s 后, 没有出现明显的隔离区, 经过 150 s 匀速搅拌后混合已较为均匀。

图 12 为采用几何非对称大叶片式搅拌器变速搅拌效果。其中图 12a 为几何非对称大叶片式搅拌器在 80~120 r/min 变速搅拌时, 加入酸溶液搅拌 30 s 后, 搅拌槽内整体颜色分布较为均匀, 90 s 后达到混合均匀; 图 12b 为几何非对称大叶片式搅拌器在 80~150 r/min 变速搅拌时, 经过 60 s 已达到 80~120 r/min 变速搅拌 90 s 的混合效果。

从试验结果可以看出, 采用几何非对称大叶片式搅拌桨变速具有良好的搅拌效果, 且变速搅拌可以降低混合所需要时间, 并且速度跨度越大混合效果越好。

(a) 未加入酸之前

(b) 加入酸 120 s 后

(c) 加入酸 8 min 后

图 10 斜叶式搅拌桨匀速 150 r/min 搅拌效果

(a) 加入酸 30 s 后

(b) 加入酸 90 s 后

(c) 加入酸 150 s 后

图 11 几何非对称大叶片式搅拌桨匀速 150 r/min 搅拌效果

(a) 80~120 r/min, 30 s 后

(b) 80~120 r/min, 90 s 后

(c) 80~150 r/min, 30 s 后

(d) 80~150 r/min, 60 s 后

图 12 几何非对称大叶片式搅拌桨变速搅拌效果

(2) 混合脱泡试验。如图 13a、13b、13c 所示,

气泡边缘像素比例法检测到的 η 值随着气泡的减少而减小, 经过三次自动循环脱泡后, 液面上已基本没有气泡存在, η 值为零, 验证了所提方法的有效性。

(a) $\eta = 0.0727$ (b) $\eta = 0.0282$ (c) $\eta = 0$

图 13 脱泡各阶段检测图像及处理结果

5 结论

(1) 根据混沌混合理论, 提出一种几何非对称大叶片式搅拌桨, 桨叶结构使其在搅拌槽内形成上下两个闭合循环流, 整个流域处于循环流的影响范围, 有利于全釜搅拌; 搅拌桨端部近槽壁区存在一个小的旋流, 有利于减少壁面的黏结, 改善近壁区流动状况; 同时, 搅拌桨形成的从上至下依次增大压力场, 便于脱泡。

(2) 采取周期性改变搅拌转速的方法, 提高了搅拌槽内材料流动的轴向和径向速度, 降低了层流状态下材料完全混合所需要的时间, 强化了双组分材料的混合效果。

(3) 提出一种基于计算机视觉及图像处理技术的气泡在线监测方法, 可以实现混合脱泡过程中气泡的实时检测和自动消除。

参 考 文 献

- [1] WOHLERS T. Wohlers report 2012 [R]. USA: Wohlers Associates, 2012.
- [2] 刘洪军, 李亚敏, 曹驰. 快速模具制造技术分析与发展趋势[J]. 模具工业, 2010, 36(3): 63-66.
LIU Hongjun, LI Yamin, CAO Chi. Development trends and demand analysis of rapid tooling technology[J].

- Mould Industry, 2010, 36(3): 63-66.
- [3] 徐培林, 张淑琴. 聚氨酯材料手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011.
- XU Peilin, ZHANG Shuqin. Handbook of polyurethane material[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2011.
- [4] 刘厚均. 聚氨酯弹性体手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2001.
- LIU Houjun. Handbook of polyurethane elastomer [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2001.
- [5] YAO W G, SATO H, TAKAHASHI K, et al. Mixing performance experiments in impeller stirred tanks subjected to unsteady rotational speeds[J]. Chem. Eng. Sci., 1998, 53(17): 3013-3040.
- [6] MIN K E, HWANG Y G, CHOI G Y, et al. Effect of reactive polyurethane on toughness of unsaturated polyester resin[J]. Appl. Polym. Sci., 2002, 84(4): 735-740.
- [7] KARCZ J, CUDAK M, SHINBROT T, et al. Stirring of a liquid in a stirred tank with an eccentrically located impeller[J]. Chem. Eng. Sci., 2005, 60(8/9): 2369-2380.
- [8] AREF H. Stirred by chaotic advection[J]. J. Fluid Mech., 1984, 143: 1-21.
- [9] SWANSON P D, OTTINO J M. A comparative computational and experimental study of chaotic mixing of viscous fluids[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1990, 213: 227-240.
- [10] AREF H, BALACHANDAR S. Chaotic advection in a stokes flow[J]. Phys. Fluids, 1986, 29: 3515-3521.
- [11] LIU M, MUZZIO F J, PESKIN R L. Quantification of mixing in periodic chaotic flows[J]. Chaos Solutions and Fractals, 1994, 4(6): 869-893.
- [12] MONTANTE G, BAKKER A, PAGLIANTI A, et al. Effect of the shaft eccentricity on the hydrodynamics of unbaffled stirred tanks[J]. Chem. Eng. Sci., 2006, 61 (9): 2807-2814.
- [13] YE S, CHAU K T. Chaoization of dc motors for industrial mixing[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54(4): 2024-2132.
- [14] 毕昕, 丁汉. TFT-LCD Mura 缺陷机器视觉检测方法[J]. 机械工程学报, 2010, 46(12): 13-19.
- BI Xin, DING Han. Machine vision inspection method of mura defect for TFT-LCD[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(12): 13-19.
- [15] 高向东, 丁度坤, 赵传敏. 用于焊缝位置识别的视觉模型设计与试验[J]. 机械工程学报, 2009, 45(4): 136-141.
- GAO Xiangdong, DIN Dukun, ZHAO Chuanmin. Design and experiment of visual model for detecting weld position[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(4): 136-141.
- [16] 陈志平, 章序文, 林兴华. 搅拌与混合设备设计选用手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- CHEN Zhiping, ZHANG Xuwen, LIN Xinghua. Stirring and mixing equipment design selection manual[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004.
- [17] 周文秀, 谢洪泉. 真空浇注用二组分聚氨酯的研究[J]. 华中科技大学学报, 2002 (2): 37-41.
- ZHOU Wenxiu, XIE Hongquan. Two ingredients polyurethane for vacuum casting[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2002(2): 37-41.
- [18] AXSON High Technology Resin for Innovative Industries Inc. Vacuum casting polyurethanes resins[EB/OL]. [2012-09-08]. <http://www.axson-technologies.com/en/find-product/rapid-prototyping/vacuum-casting-polyurethanes-resins>.
- [19] KENDOUSH A A. The drag force on a collapsing bubble[J]. Mechanical Engineering Science, 2008, 222 (7): 1225-1229.
- [20] HONKANEN M. Recognition of highly overlapping ellipse-like bubble images[J]. Measurement Science & Technology, 2005, 16(9): 1760-1770.
- [21] SUN Wei, HU Yuehua, LIU Runqing. Bubble size measurement in three-phase system using photograph technology[J]. Journal of Central South University of Technology, 2005, 12(6): 677-681.
-
- 作者简介: 张壮雅, 男, 1981 年出生, 博士研究生。主要研究方向为快速成形与快速模具技术。
E-mail: zhangzhuangya@126.com
- 张海光(通信作者), 女, 1978 年出生, 博士, 讲师。主要研究方向为快速成形与快速模具技术。
E-mail: haiguangdd@shu.edu.cn