



固体火箭技术  
*Journal of Solid Rocket Technology*  
ISSN 1006-2793, CN 61-1176/V

## 《固体火箭技术》网络首发论文

题目：立式捏合机搅拌槽内混合机理研究  
作者：徐琳，王春艳，梁建  
收稿日期：2018-11-04  
网络首发日期：2019-01-15  
引用格式：徐琳，王春艳，梁建. 立式捏合机搅拌槽内混合机理研究[J/OL]. 固体火箭技术. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1176.V.20190114.1520.004.html>



**网络首发：**在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认：**纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

# 立式捏合机搅拌槽内混合机理研究

徐琳<sup>1</sup>, 王春艳<sup>2</sup>, 梁建<sup>1</sup>

(1 中国空空导弹研究院 河南 洛阳 471009; 2 河南科技大学软件学院 河南 洛阳 471003)

**摘要：**本文以立式捏合机桨叶为研究对象，重点研究桨叶的搅拌过程机理。结合混沌混合理论，阐述了立式捏合机桨叶偏心布置及桨叶行星运动是促使产生混沌混合的必要条件。采用 UV 示踪实验证实了立式捏合机搅拌槽内混沌混合的存在，对比立式捏合机桨叶正、反向转动模式，发现桨叶反向转动模式下混合物料的平均应变速率较大，更有利于物料的分散式混合和分布式混合。依据 Poincaré 截面判定准则，立式捏合机搅拌过程中搅拌槽内搅拌物料处于混沌状态。

**关键词：**立式捏合机；混沌混合；桨叶；混合机理

**中图分类号：**V448.15

**文献标识码：**A

## Chaotic mixing inside twin-blade planetary mixer mixing vessel

XU Lin<sup>1</sup>, WANG Chunyan<sup>2</sup>, LIANG Jian<sup>1</sup>

(1 China Airborne Missile Academy, Henan, Luoyang 471009;

2 School of Software, Henan University of Science and Technology, Henan, Luoyang 471003)

**Abstract:** Taking the blades of twin-blade planetary mixer as the research object, the mechanism of mixing process was studied emphatically. Combined the chaotic mixing thesis, it is expounded that the eccentric layout and the planetary motion of twin-blade planetary mixer's blades are the necessary conditions for urging chaotic mixing. Utilizing the UV tracer experiment verify the existing of chaotic mixing inside the mixing vessel of twin-blade planetary mixer, the clockwise and counter-clockwise mode was compared, it is found that mixing materials have higher average strain rate under the blades' counter-clockwise mode, which is more beneficial to the dispersive mixing and distributive mixing. According to the decision criteria of Poincaré section, during the mixing process of twin-blade planetary mixer, the mixing materials inside mixing vessel are in chaotic mixing condition.

**Key words:** twin-blade planetary mixer; chaotic mixing; blades; mixing mechanism

## 0 引言

固体推进剂混合过程是混合在化学工业领域的一种应用，主要目的是为了提高料浆的均匀度，改变组分结构等<sup>[1]</sup>。立式捏合机桨叶对物料的捏合与搅拌作用促进了不同组分间的混合过程<sup>[2-4]</sup>。揭示立式捏合机混合作用机理，研究桨叶混合过程对立式捏合机桨叶设计、提高固体推进剂生产效率具有重要意义。

固体推进剂料浆具有高固相含量、高粘度、不透明、剪切敏感等特点。目前，固体推进剂实际工业生产中采用的主要混合设备是立式捏合机<sup>[5]</sup>。立式捏合机桨叶的结构特点可有效增强对物料的拉伸和折叠作用强度，促使物料组分发生对流<sup>[6]</sup>。Kol'man-Ivanov, ÉÉ 等<sup>[7]</sup>首次基于几何学与运动学对立式捏合机桨叶进行了型面设计。王正方等<sup>[8]</sup>依据

工程经验得出空心桨螺旋角为 45° 混合效果较好。研究桨叶运动轨迹可间接分析混合作用机理，桨叶的行星运动和自转公转比为无限循环小数时，可有效减少搅拌槽内混合死区的面积<sup>[9-10]</sup>；同样地，提高桨尖遍历率<sup>[10]</sup>、减少移动视窗内桨叶轨迹重叠数量<sup>[11]</sup>、增加桨尖轨迹 Poincaré 截面混沌特性<sup>[12]</sup>亦可增强立式捏合机搅拌槽内混沌混合特性。因此，增大立式捏合机桨尖的遍历率可促进物料组分间的混沌对流，减小混合死区。

计算流体力学 (computational fluid dynamics, CFD) 方法与传统实验方法相比可大大降低设备研制成本，提高搅拌混合设备研发效率<sup>[13-14]</sup>。国外学者 Tanguy P A 等<sup>[15]</sup>和 Coesnon B 等<sup>[16]</sup>较早地采用 CFD 方法对立式捏合机展开了研究，得出压力场分布和速度场分布与桨叶转动速度有关，并且瞬时消

**收稿日期：**2018-11-04；**修回日期：**2018-12-16。

**基金项目：**中国空空导弹研究院科技创新基金 (CKJ1828)、中国空空导弹研究院青年创新基金 (CQKJ00)。

**作者简介：**梁建 (1986—)，男，工学博士，研究方向：立式捏合机混合机理、功率特性研究，舵机非线性动力学仿真与结构优化设计。**E-mail:** liangjian5282@126.com

耗功率与桨叶相对位置变化有关。杨明金<sup>[17]</sup>建立了立式捏合机搅拌槽内二维流场仿真模型, 得出搅拌槽内不同区域位置物料颗粒受桨叶作用强度不同。易朋兴等<sup>[18-19]</sup>和张嘉琪等<sup>[4]</sup>分别建立了立式捏合机搅拌槽内三维流场仿真模型, 得出桨叶间隙、螺旋角会改变桨叶的搅拌和捏合作用强度, 进而影响搅拌槽捏合区物料组分交换速率。

由混沌混合理论可知, 立式捏合机桨叶的搅拌与捏合作用使物料各向的流动速率交替变化, 并发生对流流动, 完全 Smale 马蹄可有效减小或避免搅拌槽内 KAM 环流面。扩大混沌对流区域可有效提高混合效率。本文基于混沌混合理论, 从立式捏合机混合特点研究其混沌混合特性, 从而进一步揭示立式捏合机混合作用机理。

## 1 立式捏合机混沌混合特性

### 1.1 立式捏合机桨叶运动特点

选 1 L 两桨立式捏合机为研究对象, 空心桨和实心桨偏心布置, 立式捏合机物理模型如图 1 所示。空心桨转速  $n_k=60$  r/min 时, 空心桨与实心桨桨尖瞬时运动速率变化曲线如图 2 所示, 由图可知, 桨尖速率随搅拌混合时间周期性波动变化, 可促使混合物料不断被拉伸和折叠(加速和减速运动), 从而促进了分布式混合。依据混沌混合理论, 立式捏合机桨尖速率周期性波动变化属于变速搅拌过程, 为时间混沌混合特征。桨叶桨尖瞬时速率的周期性变化增加了桨叶对流场的扰动, 提高了物料对流交换速率, 进而提高了混合系统的混合效率<sup>[20-21]</sup>。

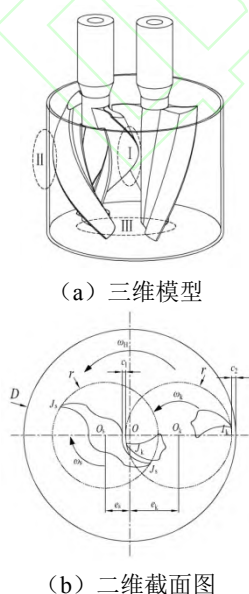


图 1 立式捏合机物理模型

Fig. 1 Physical model of the twin-blade planetary mixer

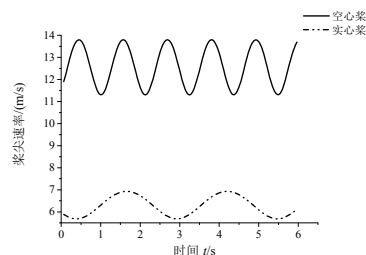


图 2 立式捏合机桨尖瞬时速率变化曲线

Fig. 2 Instantaneous rate curves of the twin-blade planetary mixer blade's tip

空心桨和实心桨的桨尖运动轨迹如图 3 所示, 红线表示实心桨, 蓝线表示空心桨。由图 3 可知, 延长混合时间  $t$ , 桨尖运动轨迹遍历区域:  $50\text{ s} > 30\text{ s} > 10\text{ s}$ , 桨叶搅拌时间越长, 搅拌槽内桨尖遍历率越大。桨尖运动轨迹中空部分即为桨叶运动轨迹遍历死区, 而非混合死区, 延长混合时间可使空心桨和实心桨对饼形图区域进行无死区遍历。

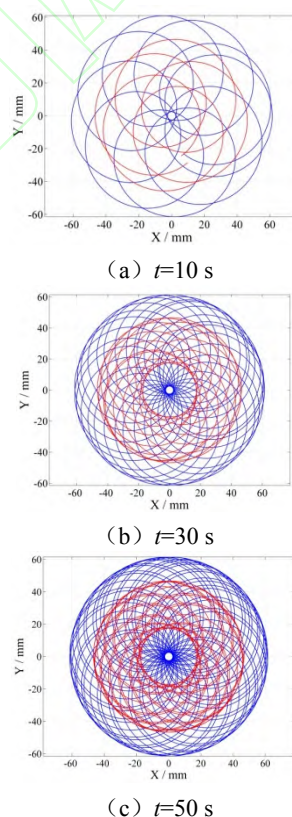


图 3 立式捏合机桨尖运动轨迹图

Fig. 3 Motion trail of the twin-blade planetary mixer blade's tip

提高立式捏合机桨尖运动轨迹遍历率, 是促进搅拌槽内物料发生混沌对流提高混合效率的必要条件。混合系统内流体域流线交叉与分叉如图 4 所示, 其对应数学马蹄映射<sup>[22]</sup>。由图 3、图 4 可知, 立式捏合机桨尖运动轨迹遍历图中的交叉和分叉类似于



流体域马蹄映射图。从而说明立式捏合机桨叶的自转和公转运动可诱导流体流线出现交叉和分叉现象,进而证实立式捏合机桨叶偏心布置与行星运动的必要性。

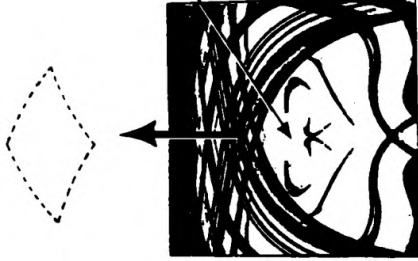


图4 混沌混合系统内流体域的数学马蹄映射

Fig. 4 Mathematical horseshoe mapping inside the fluid domain of chaotic mixing system

## 1.2 立式捏合机搅拌槽内流体流动与数学映射

为进一步证实立式捏合机桨叶运动对搅拌槽内流体流线的拉伸和折叠作用,采用罗丹明 B 标准溶液作为标记进行流场可视化实验,通过紫外光照射可有效识别出流体流线变化过程<sup>[6]</sup>。搅拌物料为玉米糖浆 ( $\rho=1394 \text{ kg/m}^3$ ,  $\mu=3.0 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ), 空心桨转速  $n_k=20 \text{ r/min}$ , 立式捏合机搅拌槽 UV 示踪实验如图 5 所示。桨叶反转模式下,在捏合区 (I) 处,两桨叶 (空心桨、实心桨) 对物料进行挤压和剪切作用,从而使流线被剪断。而在整个流体域内,桨叶的自转和行星运动可对物料进行拉伸,使流线被拉伸和折叠,从而增强搅拌槽内流体的对流混合。

在图 5 (a) 中  $t=0 \text{ s}$  时刻,示踪溶液受重力作用而向下缓慢流动;图 5 (b)  $t=6 \text{ s}$  时刻,捏合机桨叶的剪切和拉伸作用使示踪溶液的流线产生分叉和断裂;图 5 (c)  $t=13 \text{ s}$  时刻,桨叶运动不断对示踪溶液进行剪切和拉伸,分叉和断裂现象更为明显,进而示踪溶液逐渐与溶剂混合;图 5 (d)  $t=60 \text{ s}$  时刻,溶液混合较为均匀。

流体的流动可被描述为映射或点变换,由立式捏合机 UV 示踪实验可知,桨叶对物料的搅拌与捏合作用与数学 Baker 转换和 Smale 马蹄映射相对应。

## 2 立式捏合机搅拌槽内混合量化指标

为定量分析搅拌槽内流场仿真结果,本文选取混合指数、庞加莱截面、应变速率为量化分析指标。

### 2.1 混合指数

混合指数具体定义如下<sup>[23]</sup>:

$$\alpha = \frac{|\gamma|}{|\gamma| + |\omega|} \quad (1)$$

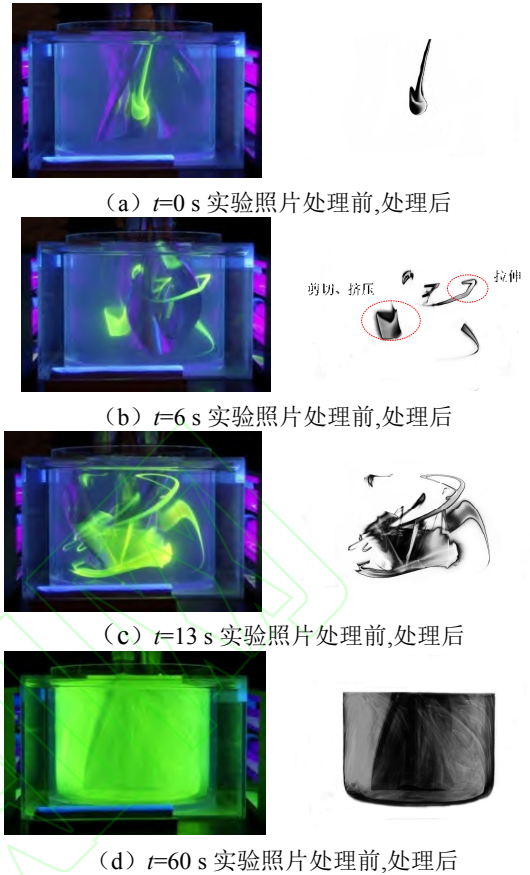


图5 立式捏合机搅拌槽内流体的流动与映射

Fig. 5 Fluid flow and mapping inside the mixing vessel of twin-blade planetary mixer

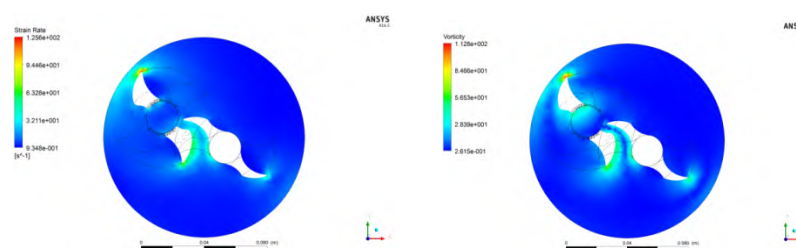
其中,  $|\gamma|$  是剪切速率数值大小,  $|\omega|$  是涡度数值大小, 而剪切速率  $\gamma$  可表示为:

$$\gamma = \frac{(\nabla u + (\nabla u)^T)}{2} \quad (2)$$

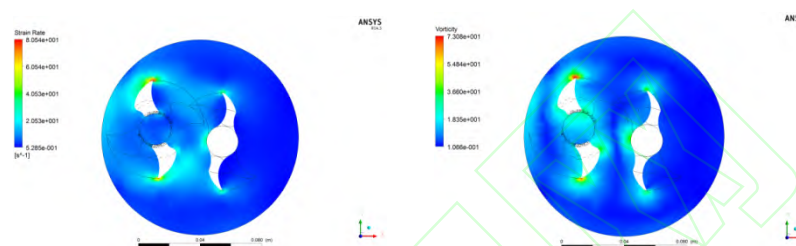
其中,  $\nabla u$  是速度梯度, 混合指数  $\alpha$  取值范围是  $0 \sim 1$ 。  $\alpha=0$  时, 流体是纯旋转流;  $\alpha=0.5$  时, 流体是简单剪切流;  $\alpha=1$  时, 流体是纯拉伸流。  $\alpha$  值越大, 表示拉伸作用越强。

由混合指数的定义, 分析混合指数前有必要对搅拌槽内剪切速率和涡度分布进行分析。桨叶反向转动模式, 空心桨转速  $n_k=60 \text{ r/min}$ , 物料为玉米糖浆 ( $\rho=1394 \text{ kg/m}^3$ ,  $\mu=3.0 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ), 搅拌槽内流场剪切速率、涡度分布云图如图 6 所示。桨叶壁面区域的剪切作用较强, 此区域流体的应变速率、涡度值较大, 而对应远离桨叶区域值较小。因此, 远离桨叶区域流体混合指数的意义可忽略, 而桨叶壁面附近的混合指数分布更能有效地反映流体的流动特性。桨叶不同转动模式下混合指数分布云图如图 7 所示, 桨叶正、反向转动模式下, 背料面区域物料

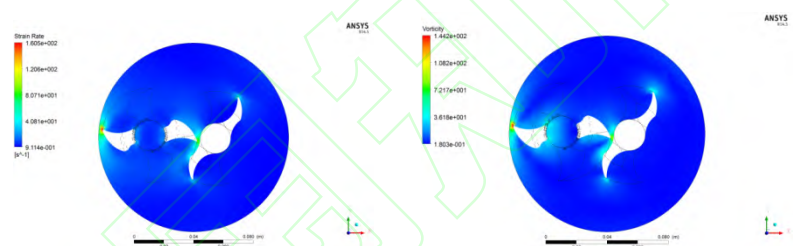
以旋转流动为主（混合指数值  $\alpha \approx 0$ ），迎料面区 指数  $\alpha=0.6 \sim 0.7$ ）。  
域物料处于剪切流和拉伸流之间的过渡流动（混合



(a)  $t=4.0$  s 剪切速率分布云图及涡度分布云图



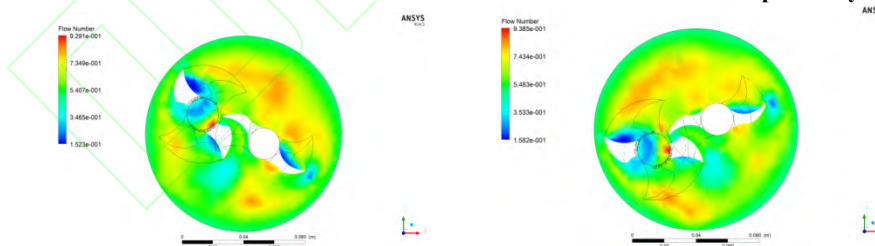
(b)  $t=4.4$  s 剪切速率分布云图及涡度分布云图



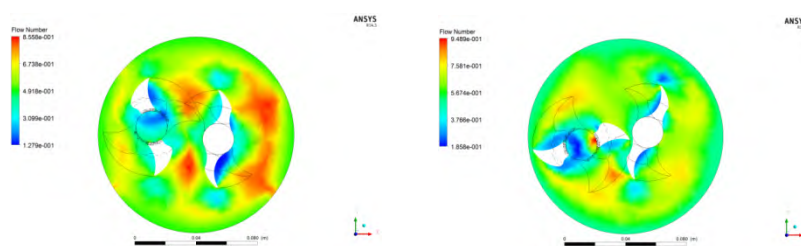
(c)  $t=4.6$  s 剪切速率分布云图及涡度分布云图

图 6 立式捏合机搅拌槽内截面  $Z=50$  mm 处不同云图分布

Fig. 6 Distribution of different contours at  $Z=50$  mm section inside the twin-blade planetary mixer vessel



(a)  $t=4.0$  s 反向转动模式和正向转动模式



(b)  $t=4.4$  s 反向转动模式和正向转动模式

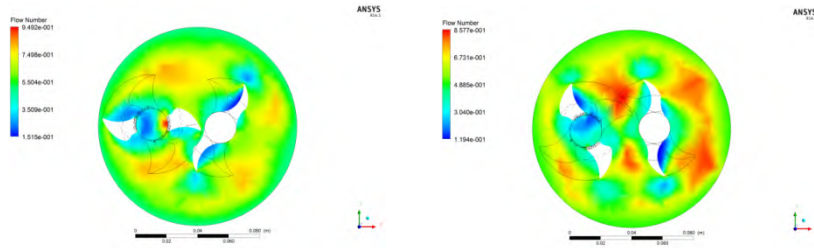

 (c)  $t=4.6$  s 反向转动模式和正向转动模式

 图 7 立式捏合机搅拌槽内截面  $Z=50$  mm 处混合指数分布云图

 Fig. 7 Distribution of mixing index contours at  $Z=50$  mm section inside the twin-blade planetary mixer vessel

## 2.2 庞加莱截面 (Poincaré Section)

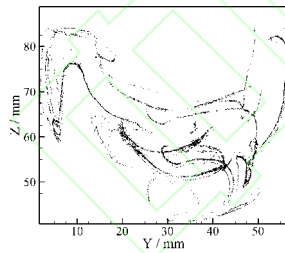
国内外学者多次针对 Poincaré 截面图像中颗粒分布进行讨论分析,以研究混合系统混沌混合特性<sup>[24-26]</sup>。Poincaré 截面可将三维的混合系统简化为二维的截面图形加以判断和分析。

设  $\Sigma \subset R^n$  是  $n-1$  维曲面一部分,若对于任意的  $u \in \Sigma$ ,  $\Sigma$  的法矢量  $n(u)$  与向量场  $f(u)$  满足无切条件:

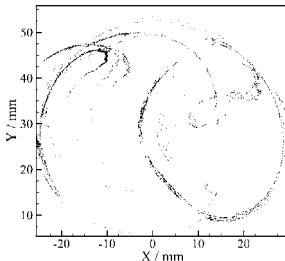
$$n^T(u) \cdot f(u) \neq 0 \quad (3)$$

则称  $\Sigma$  是向量场  $f(u)$  的 Poincaré 截面。

立式捏合机搅拌槽内  $t=3.0$  s 时刻 Poincaré 截面如图 8 所示。由图 8 可知,搅拌槽内竖直和水平方向 Poincaré 截面点分布成片的密集点,且有层次结构,依据混沌混合 Poincaré 截面判定准则可判定流体为混沌状态。



(a) 竖直截面



(b) 水平截面

图 8 立式捏合机搅拌槽内不同方向 Poincaré 截面

Fig. 8 Poincaré section of different directions inside the twin-blade planetary mixer

## 2.3 应变速率

分散式混合过程中,对次级成分的压应力越大,则物料应变速率越大。应变速率定义如下:

$$\dot{\gamma} = \sqrt{\frac{1}{2}(\mathbf{D} : \mathbf{D})} \quad (4)$$

其中,  $\mathbf{D}$  是应变张量<sup>[27]</sup>。

搅拌物料为玉米糖浆 ( $\rho=1394$  kg/m<sup>3</sup>,  $\mu=3.0$  Pa·s), 空心桨转速  $n_k=60$  r/min 时,正、反向转动模式下,搅拌槽内平均应变速率变化曲线如图 9 所示。由图 9 可知,1.5 s 后,平均应变速率周期性变化 ( $T=1.0$  s)。不同转动模式下搅拌槽内物料平均应变速率,反向转动模式下其平均值为 8.133,正向转动模式下其平均值为 8.105。搅拌物料的应变速率越大物料对流作用越显著。由此可知,桨叶反向转动模式混合效率优于正向转动模式。

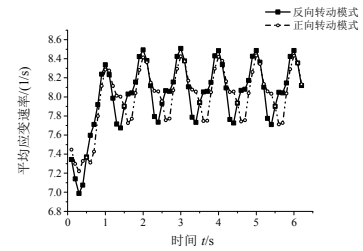


图 9 正、反转动模式物料平均应变速率

Fig. 9 Average strain rate of the mixing material under counter-rotating and co-rotating mode

## 3 结论

为揭示立式捏合机混合机理,通过分析立式捏合机桨叶运动特点,研究立式捏合机搅拌槽内混合流场变形,得出结论如下:

(1) 提高立式捏合机桨尖运动轨迹桨尖遍历率,是增强搅拌槽内混沌混合作用强度的必要条件。立式捏合机搅拌槽内对物料的搅拌与捏合作用与 Baker 转换和 Smale 马蹄映射相对应。



(2) 立式捏合机搅拌槽内临近桨叶壁面区域流体对流动性较大, 混合物料在背料面区域以旋转流动为主, 在迎料面区域既有剪切流, 又有拉伸流。立式捏合机搅拌槽内, 桨叶反向转动模式下, 混合物料的平均应变速率较大, 混合效率更高。

(3) 立式捏合机搅拌槽内 Poincaré 截面图像内颗粒分布为成片的密集点状态。依据混沌混合 Poincaré 截面判断准则, 立式捏合机桨叶搅拌过程中流体处于混沌混合状态。

## 参考文献:

- [1] NIENOW A W, EDWARDS M F, HARNBY N. Mixing in the process industries [M]. Butterworth-Heinemann: Oxford, 1997
- [2] 梁建, 杨红, 魏佳, et al. 立式捏合机桨叶扭矩特性的 CFD 仿真研究 [J]. 固体火箭技术, 2018(1): 78-83.  
LIANG Jian, YANG Hong, WEI Jia, et al. CFD analysis on the characteristics of blades' torque of the twin-blade planetary mixer [J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2018(1), 78-83.
- [3] 梁建, 李锡文, 史铁林, et al. 立式捏合机桨叶结构参数对混合釜流场影响的仿真分析 [J]. 固体火箭技术, 2017(03): 347-352.  
LIANG Jian, LI Xiwen, SHI Tielin, et al. Numerical analysis of effects of geometrical parameters of blades on flow field in mixing tank of vertical planetary kneading mixers [J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2017(03): 347-352.
- [4] 张嘉琪, 李锡文, 何锐波, et al. 双轴差速立式捏合机混合釜流场特性分析 [J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2015, 43(2): 6-10.  
ZHANG Jiaqi, LI Xiwen, HE Ruibo, et al. Analysis of characteristics of flow field in mixing tank of differential twin shaft vertical kneader [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2015, 43(2): 6-10.
- [5] 侯林法. 复合固体推进剂 [M]. 北京: 中国宇航出版社, 1994.  
HOU Linfa. Composite Solid Propellant [M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 1994.
- [6] ZHANG J, LI X, HE R, et al. Study on double-shaft mixing paddle undergoing planetary motion in the laminar flow mixing system [J]. Advances in Mechanical Engineering, 2015, 7(7): 1-12.
- [7] KOL'MAN-IVANOV É, SHKLOVSKAYA F. Geometric design of planetary mixers where the blades clean one another [J]. Chemical and Petroleum Engineering, 1966, 2(3): 168-178.
- [8] 王正方, 翟瑞清. 立式捏合机搅拌桨的设计 [J]. 固体火箭技术, 1993, (1): 65-69.  
WANG Zhengfang, ZHAI Ruiqing. The design of stirring blades of vertical kneading machine and parametric calculations [J]. Journal of Solid Rocket Technology, 1993, (1): 65-69.
- [9] ASCANIO G, FUENTE E, YATOMI R, et al. Design considerations in laminar fluid mixing with unconventional geometries [J]. Front Sci Eng, 2012, 2(1): 15.
- [10] 杨明金, 李锡文, 谢守勇, et al. 立式捏合机混合釜内流场遍历性研究 [J]. 农机化研究, 2009, (4): 20-23,27.  
YANG Mingjin, LI Xiwen, XIE Shouyong, et al. Research on ergodicity of flow field in the mixing tank of a vertical kneader [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009, (4): 20-23,27.
- [11] 付小燕, 李锡文, 肖淑芬, et al. 捏合机混合效果的评定分析 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2014, (10): 170-6.  
FU Xiaoyan, LI Xiwen, XIAO Shufen, et al. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2014, (10): 170-176.
- [12] 张嘉琪. 双轴差速立式捏合机混合釜流场分析与实验研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.  
ZHANG Jiaqi. Analysis and experimental study of the mixing tank of dual-shaft differential vertical kneader [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2015.
- [13] 曹乔乔, 郝惠娣, 王瑾, et al. 搅拌槽内三相混合特性的数值模拟 [J]. 化工机械, 2015( 04): 548-553.  
CAO Qianqian, HAO Huidi, WANG Jin, et al. Numerical Simulation of Three-phase Mixing Characteristics in Stirring Tank [J]. Chemical Machinery, 2015(04): 548-553.
- [14] RANADE V, MISHRA V, SARAPH V, et al. Comparison of axial flow impellers using a laser Doppler anemometer [J]. Industrial & engineering chemistry research, 1992, 31(10): 2370-2379.
- [15] TANGUY P A, BERTRAND F, LABRIE R, et al. Numerical modelling of the mixing of viscoplastic slurries in a twin-blade planetary mixer [J]. Chemical Engineering Research and Design, 1996, 74(A4): 499-504.
- [16] COESNON B, HENICHE M, DEVALS C, et al. A fast and robust fictitious domain method for modelling viscous

- flows in complex mixers: The example of propellant make-down [J]. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 2008, 58(4): 427-449.
- [17] 杨明金. 立式捏合机混合釜内固体推进剂药浆混合的研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.
- YANG Mingjin. Research on mixing of solid propellant slurry in tanks of the vertical kneaders [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2008.
- [18] YI P, HU Y, LIU S. Numerical investigation of Stirring Blades on Mixing Efficiency of a Planetary Kneading Mixer with Non-newtonian and Viscoplastic Materials [M]. *The XV International Congress on Rheology, The Society of Rheology 80th Annual Meeting*. 2008: 442-444.
- [19] 易朋兴, 胡友民, 崔峰, et al. 立式捏合机捏合间隙影响 CFD 分析 [J]. *化工学报*, 2007, 58(10): 2680-2684.
- YI Pengxing, HU Youmin, CUI Feng, et al. Numerical investigation of effect of kneading clearance on mixing performance of vertical kneading mixers [J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)*, 2007, 58(10): 2680-2684.
- [20] NOMURA T, UCHIDA T, TAKAHASHI K. Enhancement of mixing by unsteady agitation of an impeller in an agitated vessel [J]. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 1997, 30(5): 875-879.
- [21] 杨锋苓, 周慎杰, 张翠勋. 搅拌槽混沌混合研究进展 [J]. *化工进展*, 2008, (10): 1538-1543.
- YANG Fengling, ZHOU Shenjie, ZHANG Cuixun. Recent development of chaotic mixing of stirred tank [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2008, (10): 1538-1543.
- [22] CHIEN W, RISING H, OTTINO J. Laminar mixing and chaotic mixing in several cavity flows [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1986, 170(1): 355-377.
- [23] MANAS-ZLOCZOWER I, NIR A, TADMOR Z. Dispersive mixing in internal mixers-A theoretical model based on agglomerate rupture [J]. *Rubber Chemistry and Technology*, 1982, 55(5): 1250-1285.
- [24] PAUL E L, ATIEMO-OBENG V A, KRESTA S M. *Handbook of industrial mixing: science and practice* [M]. John Wiley & Sons, 2004.
- [25] MENG H, SONG M, YU Y, et al. Chaotic mixing characteristics in static mixers with different axial twisted-tape inserts [J]. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 2015, (10): 1849-1859.
- [26] YUAN F, ISAAC K M. A study of MHD-based chaotic advection to enhance mixing in microfluidics using transient three dimensional CFD simulations [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2017, 238:226-238.
- [27] ANSYS Inc. *ANSYS Fluent User's Guide* [M]. 2012.

(编辑: 薛永利)