

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2014.10.029

捏合机混合效果的评定分析^①

付小燕¹, 李锡文², 肖淑芬³, 杨明金⁴

1. 中国工程物理研究院 总体工程研究所, 四川 绵阳 621900; 2. 华中科技大学 机械科学与工程学院, 武汉 430074;
3. 湖北工程学院 计算机与信息科学学院, 湖北 孝感 432100; 4. 西南大学 工程技术学院, 重庆 400715

摘要: 捏合机是高粘度物料混合的重要设备. 分析捏合机行星轮系传动系统, 给出桨叶自转与公转转速公式; 使用 Matlab 软件, 通过坐标变换法对捏合机桨叶的刃尖轨迹进行数学建模和数值仿真; 提出移动视窗算法, 在具有特定面积的视窗内准确地计算混合区域内轨迹的数量, 作为判断桨叶对药浆混合均匀性的指标之一, 实现混合效果直观、定量的分析与评定.

关键词: 捏合机; 数值仿真; 移动视窗; 混合均匀性

中图分类号: TH69 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-9868(2014)10-0170-07

捏合机是火箭发动机固体推进剂生产装备组中的关键设备^[1-3], 而搅拌桨叶作为捏合机的执行机构, 其结构参数和运动参数对整个捏合效果起到了极为重要的作用.

混合一方面由流体动力学决定, 同时也与被混物料本身所具有的性质紧密相关^[4]. 根据混合理论中的观点, 该特殊高粘度物料中, 分散相(被分散的物质)为高聚合物弹性基体粘合剂, 分散介质(将分散相分散的物质)为氧化剂和金属燃烧剂等. 因此, 这是连续相为液态粘合剂, 而分散系为氧化剂、金属燃烧剂等的一个多相体系, 同时, 它还具有剪切稀化、静止结构恢复和固体成分比重大等特征^[5]. 在生产中对药浆混合均匀性的评定受其表观粘度高、易燃易爆等本身性质以及搅拌容器不透明等条件约束, 很难通过仪器获取准确直观的评价结果, 在大多工业应用中通过对混合时间进行测量, 进而从宏观的角度对混合均匀性进行量化评估. 姜爱民等^[6]采用计算流体动力学对复杂边界下固体推进剂的流动特性进行研究, 易朋兴^[7]数值模拟流体的速度场、压力场与动力粘度场, 都是从流体的角度对混合效果进行分析.

本文基于小型立式捏合机的机械系统, 在特定的结构参数和运动参数下, 计算桨叶刃尖轨迹在视窗内(特定面积内)的数量, 对药浆的混合均匀性给出定量分析, 作为混合效果评定的一个指标.

1 传动系统分析

桨叶的自转转速与公转转速的比值, 会影响桨叶轨迹的分布, 决定轨迹发生重叠前所需的公转转数或

① 收稿日期: 2013-12-06

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项资助项目(2011YQ160002).

作者简介: 付小燕(1988-), 女, 重庆人, 硕士研究生, 主要从事特种装备方面的研究.

通信作者: 李锡文, 教授, 博士研究生导师.

者时间^[8], 该比值是由其传动系统决定的. 某小型立式捏合机的传动系统通过一个复杂的行星轮系, 带动两个垂直安装的螺旋桨叶(空心桨与实心桨)实现两个桨叶的自转和公转, 通过复杂的桨叶运动情况完成固体推进剂药浆生产过程中的混合工序, 其传动系统如图 1 所示. 通过齿轮 Z_1 、 Z_3 、 Z_4 、 Z_5 和 Z_6 实现系统的公转, 齿轮 Z_1 、 Z_2 、 Z_7 和 Z_8 实现两螺旋桨的自转, 两桨叶中心和公转的中心均存在一个偏心距. 其中 H 为回转体, 带动整个轮系公转.

对公转运动:

$$i_{16}^H = \frac{z_3}{z_1} * \frac{z_5}{z_4} * \frac{z_6}{z_5} = \frac{z_3 z_6}{z_1 z_4} = \frac{n_1 - n_H}{n_6 - n_H} \quad n_6 = 0$$

得

$$n_H = \frac{z_1 z_4}{z_1 z_4 - z_3 z_6} n_1 \quad (1)$$

对空心桨运动:

$$i_{12}^H = -\frac{z_2}{z_1} = \frac{n_1 - n_H}{n_2 - n_H}$$

空心桨相对回转体的转速:

$$n_7 - n_H = n_2 - n_H = -\frac{z_1}{z_2} (n_1 - n_H) \quad (2)$$

因此, 空心桨自转转速与公转转速比值 C :

$$C = \frac{n_7 - n_H}{n_H} = \frac{-\frac{z_1}{z_2} (n_1 - n_H)}{n_H} = \frac{z_1}{z_2} * \frac{z_3 z_6}{z_1 z_4} = \frac{z_3 z_6}{z_2 z_4} \quad (3)$$

在此台捏合机中, $C \approx 7.84$.

2 螺旋桨叶运动轨迹仿真

由于混合药浆粘度高且具有一定危险性, 为了保证安全生产, 混合速率不能太高, 整个流体呈层流状态, 螺旋桨的运动带动周围的流体运动, 短时间内靠近螺旋桨的流体物质点相对于螺旋桨表面满足伪轨跟踪性和平均跟踪性条件^[5], 对于本文中的螺旋桨叶与高粘度药浆, 在桨叶外表面, 药浆质点对其的相对速度为零, 即药浆质点随着对应的桨叶质点一起运动. 因此, 为了分析药浆内质点的运动规律, 可以转化为研究桨叶截面内某一点的运动. 刃尖作为捏合平面内的捏合点, 其周围的剪切、折叠作用都比较强烈, 将其作为典型特征点进行研究, 即可采用刃尖的轨迹来近似刃尖带动的药浆质点的运动轨迹.

两螺旋桨与混合容器均存在一个偏心距, 空心桨与实心桨偏心距分别为 E_k, E_s , 其位置关系及基本参数如图 2 与表 1.

表 1 螺旋桨结构参数

序	桨 结 构	符 号
1	实心桨桨叶半径	r
2	空心桨桨叶半径	r
3	实心桨偏心距	E_s
4	空心桨偏心距	E_k
5	两桨中心距 L	$L = E_s + E_k$
6	间隙 1	C_1
7	间隙 2	C_2

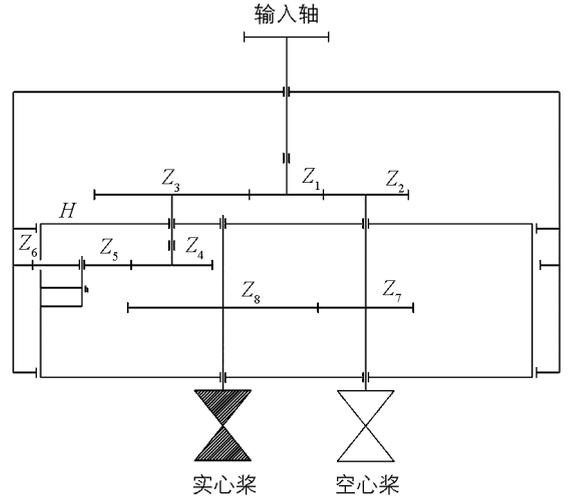


图 1 传动系统图

2.1 空心桨运动轨迹的生成

为分析这种复杂的运动形式, 首先需研究桨叶运动轨迹的生成. 桨叶的运动为自转、公转两种转动的合成, 通过坐标变换法研究其复杂运动轨迹^[8-9]. 设空心桨自转角速度为 ω_k , 实心桨自转角速度为 ω_s , 公转角速度为 ω_h .

在空心桨叶上取刃尖 A, 以及与其对称的另一刃尖 a, 根据坐标变换原理, 分别以混合容器中心 O, 空心桨自转中心 O', 实心桨自转中心 O'' 为原点建立 XOY、X'O'Y'、X''O''Y'' 三个坐标系, 并对其进行数学建模.

空心桨上刃尖 A 在 XOY 坐标系中任一时刻的坐标为:

$$\begin{cases} X_A = X_{O'} + X'_A = E_k \cos\omega_h t + r \cos\omega_k t \\ Y_A = Y_{O'} + Y'_A = E_k \sin\omega_h t + r \sin\omega_k t \end{cases} \quad (4)$$

同理, 刃尖 a 在 XOY 坐标系中任一时刻的坐标为:

$$\begin{cases} X_a = X_{O'} + X'_a = E_k \cos\omega_h t - r \cos\omega_k t \\ Y_a = Y_{O'} + Y'_a = E_k \sin\omega_h t - r \sin\omega_k t \end{cases} \quad (5)$$

在 Matlab 中对上述数学模型进行仿真, 运动时间取 300 s, 时间步长取 $\Delta t = 0.001$ s, 对于不同的空心桨自转与公转转速比值 C, 刃尖轨迹的仿真结果如图 3 所示.

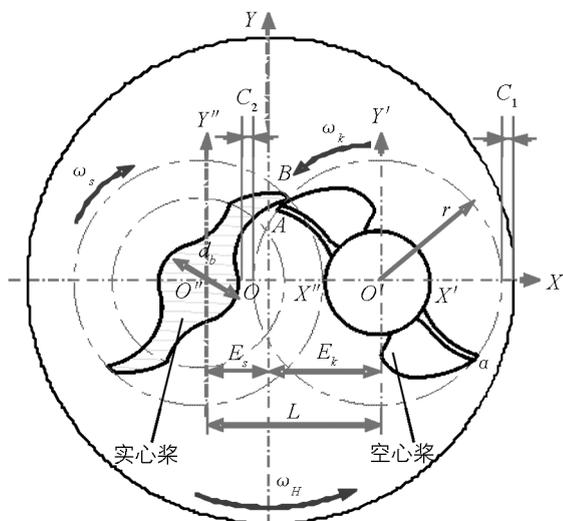


图 2 螺旋桨结构参数

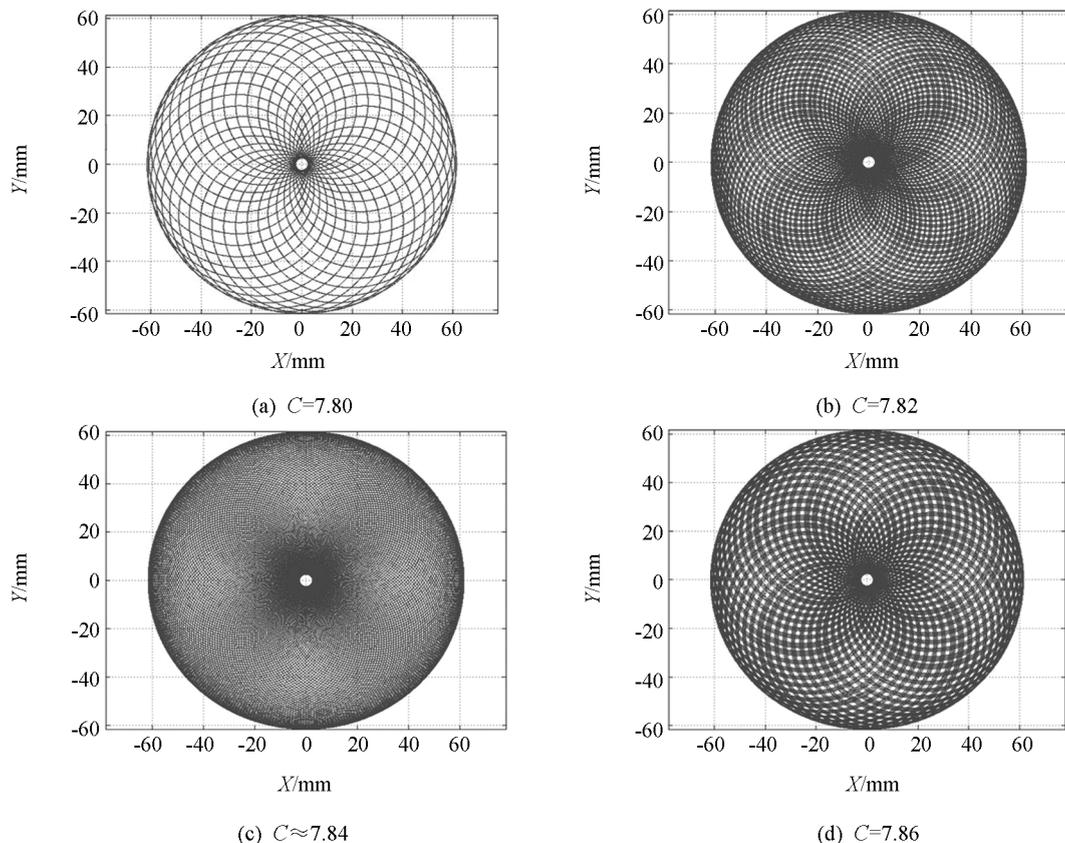


图 3 不同 C 值下空心桨轨迹仿真

图 3 轨迹仿真只能对刃尖轨迹分布做定性判断, 而考察混合药浆的混合效果更需要一个定量的分析.

取图 3(c) 做定量分析. 在文献[5]中, 作者引出穿越与遍历率的概念, 考察的是运动轨迹从 XOY 坐标系第四象限到第一象限, 经过 X 正半轴的轨迹数量, 再通过计算其满足条件的已穿越子集的数量. 为了获取分析整个研究截面内混合效果的定量数据, 以及后续工程应用中对速度谱、功率谱的分析, 在此基础上, 本文提出采用移动视窗的方法. 由上述仿真结果可知, 因为混合容器及桨叶运动轨迹的中心对称性, 因此只需研究某个中心线上的情况, 即可得出整个研究截面内的情况. 如图 4(a), 取一个可移动的矩形视窗, 计算扫掠过该视窗的轨迹数量, 计算完一个位置的轨迹数量后, 视窗沿着 X 坐标轴逐渐移动, 即可求得整个直径上的轨迹分布. 同时, 对于图 3 中的其他 C 值下的情况, 桨叶转动速率和运动时间均相同, 因此实际数量也相当, 只是部分轨迹发生了重叠, 从而达不到均匀混合的目标, 因此, 在轨迹数量计算中应该计算的是非重叠的轨迹.

仿真中, 桨叶运动时间为 300s, 取视窗大小为 6mm × 6mm, 视窗中心沿着混合区域中心线经过的区域为 (-67, 0) 到 (67, 0), 共统计 135 组数据, 统计对象为 Matlab 中得出的空心桨叶轨迹仿真图, 计算环境为 Microsoft Visual Studio. 空心桨刃尖非重叠轨迹的计算结果如图 4(b) 所示.

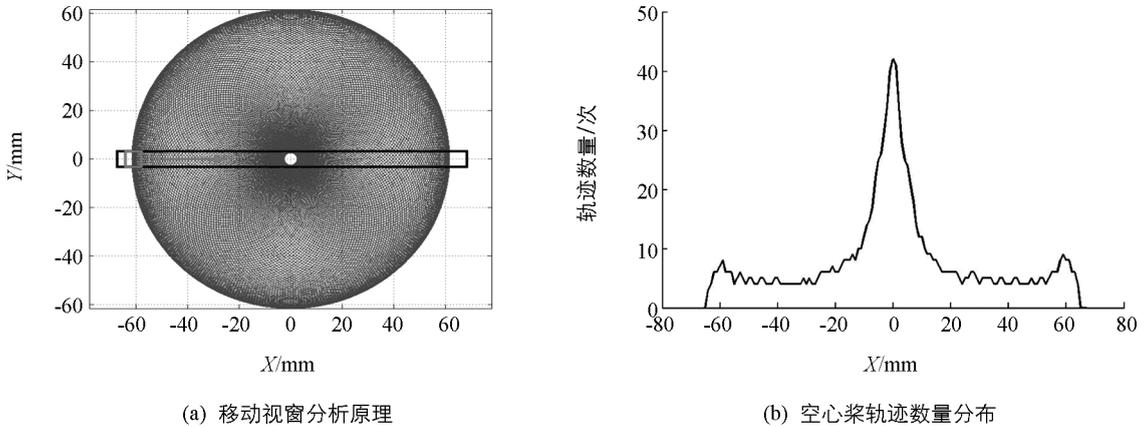


图 4 空心桨轨迹分布图

从图中可看到, 除了混合容器中心和靠近内壁的区域, 其他区域的刃尖轨迹数量曲线呈下凹趋势, 说明轨迹较稀疏, 可以在此区域布置实心桨.

2.2 双螺旋桨运动轨迹的生成

实心桨运动轨迹的数学模型与空心桨相似, 只需将相应的参数换成实心桨即可, 在实心桨叶上取刃尖 B, 实心桨上点 B 在 XOY 坐标系中任一时刻的坐标为:

$$\begin{cases} X_B = X_{O'} + X_B'' = E_s \cos \omega_h t + r \cos \omega_s t \\ Y_B = Y_{O'} + Y_B'' = E_s \sin \omega_h t + r \sin \omega_s t \end{cases} \quad (6)$$

取 $C \approx 7.84$, 带入实心桨偏心距 E_s 、桨叶半径 r , 在 Matlab 中对实心桨刃尖轨迹进行仿真, 结果如图 5(a). 其中较大的饼状区域为空心桨刃尖运动轨迹, 较小的饼状区域为实心桨刃尖运动轨迹, 这样即弥补了空心桨所不能扫掠到的一些稀疏混合区域.

双螺旋桨运动时, 通过程序定量地计算穿过移动视窗的不重叠轨迹数量, 结果如图 5(b)(c), 图 5(b) 为实心桨穿过移动视窗的轨迹分布, 图 5(c) 为双螺旋桨穿过移动视窗的运动轨迹分布. 从图中可见, 加入实心桨后, 以前轨迹较稀疏的区域数量明显上升, 即该区域混合效果得到了补充.

2.3 混合时间对混合效果的影响

理论上, 如果传动系统能满足空心桨自转转速与公转转速的比值 C 为一无理数, 则桨叶轨迹可以保证永远不出现重叠现象, 从而达到混合无死区, 因此只要混合时间足够长, 就可以达到混合完全均匀的效果,

然而在工程实际中, 为了达到均匀混合的前提下需要最经济高效的方法, 混合时间不可能无限长, C 值也只需达到某一数值就可以认为桨叶能够达到混合容器的任意位置而实现无死区混合。

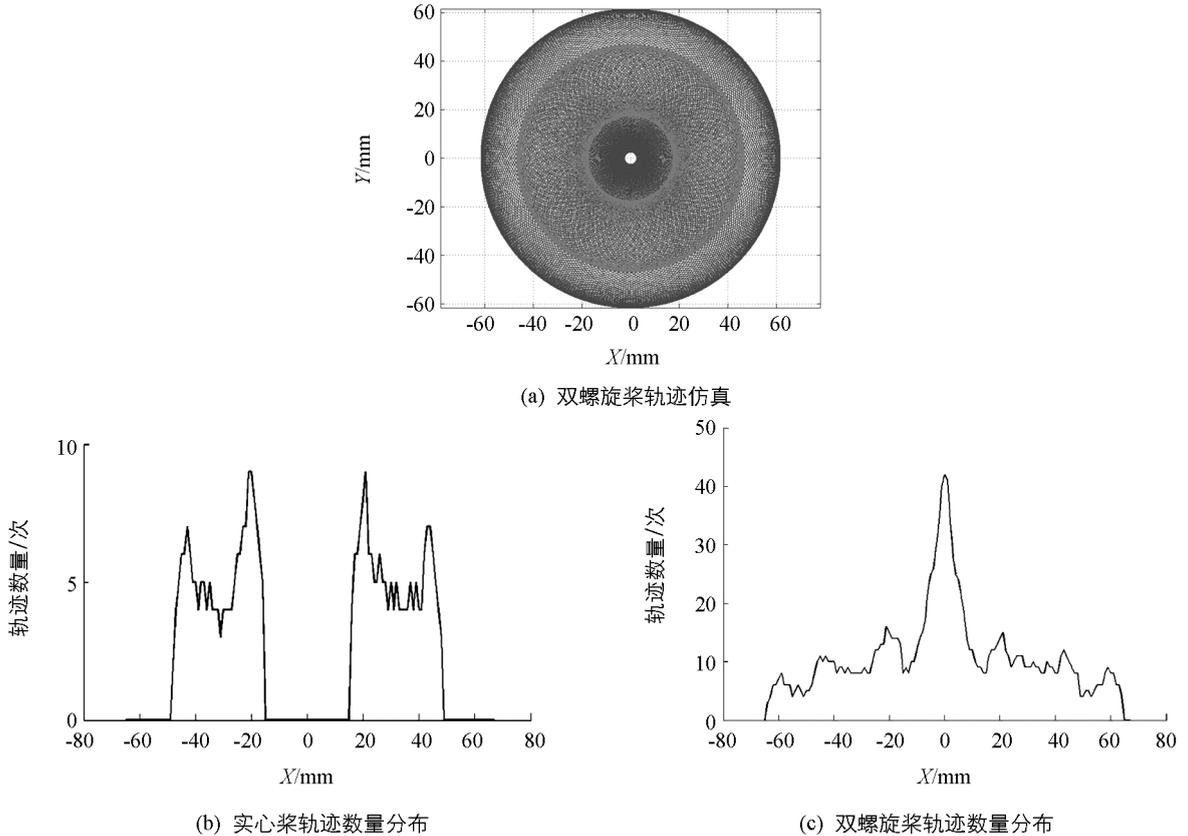


图 5 双螺旋桨轨迹分布图

对于本文所述的捏合机, 当 $C \approx 7.84$, 桨叶刀尖轨迹情况与时间的关系如图 6 所示。

从图 6(a)到 6(d)依次为 $t=10\text{ s}$, $t=100\text{ s}$, $t=300\text{ s}$, $t=600\text{ s}$ 时间段内桨叶刀尖轨迹的仿真结果, 图 6(e)为这四种情况下通过移动视窗法所计算的双螺旋桨非重叠轨迹数量的比较曲线。

从图中可以看出, 随着时间的延长, 混合区域内不重叠轨迹的数量不断增加, 即刀尖到达过的区域不断增加。对相同混合时间的桨叶, 其轨迹最密集区域仍集中在混合容器中心区域, 即混合效果最好的区域。

3 仿真分析与讨论

通过对空心桨、双螺旋桨运动轨迹的仿真和计算表明, 不同的传动比、不同的桨叶结构参数与桨叶布置都会造成不同的运动轨迹和混合效果。

1) 对于空心桨自转公转转速比 C 细微的波动将导致刀尖运动轨迹明显的变化, 而且轨迹稀密程度并不完全随 C 值的增加而增加。因此在传动系统的设计中, 要充分考虑传动系统和桨叶的结构参数。

2) 混合容器中心和内壁附近区域轨迹比较密集, 而其他区域轨迹比较稀疏, 可以在稀疏区域布置实心桨。当加入实心桨后, 原稀疏区域的轨迹数量明显增加, 说明刀尖对药浆分散效果加强。

3) 轨迹数量曲线图中, 在稀疏区域出现小的波动, 说明视窗在相邻计算位置穿越过的轨迹数量变化较大, 这是由于仿真中所取的桨叶运动时间较短, 混合区域内存在着刀尖没有扫掠到的区域。

4) 在时间无限延长、轨迹不重叠的理想情况下, 桨叶运动轨迹可布满整个混合域, 但生产中, 为达到在尽量短的时间内用最少的能耗实现安全而均匀混合的生产目标, 只需达到标准值即可。

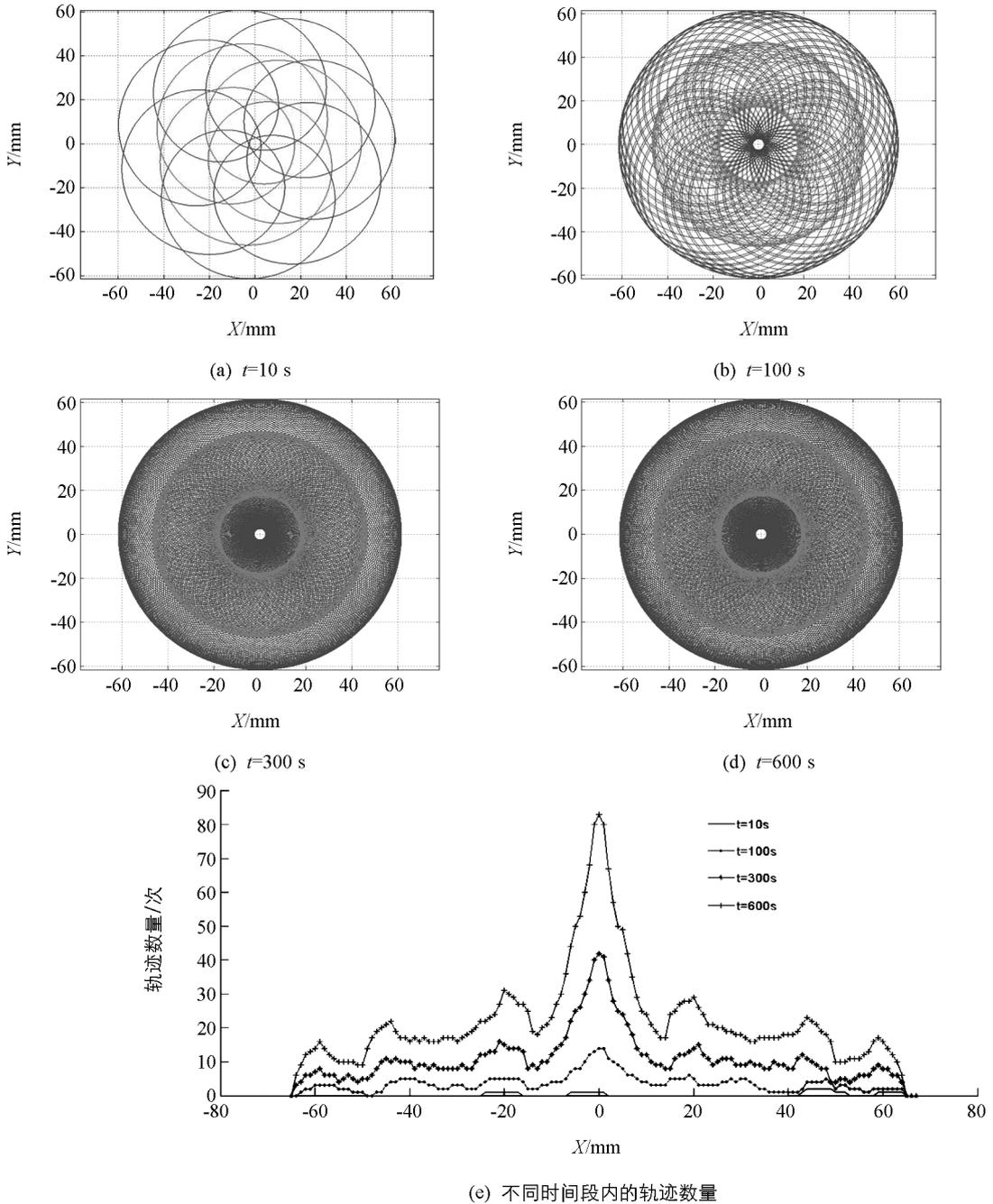


图 6 混合时间对混合效果的影响

5) 桨叶运动轨迹是中心对称的, 因此当视窗移动到混合截面的其他位置同样可求得其穿越轨迹数量, 从而知道整个捏合截面内的轨迹分布情况.

4 结 论

捏合机是固体推进剂生产的关键设备, 本文研究了一种固体推进剂药浆混合效果评定分析的方法. 通过 Matlab 仿真螺旋桨刃尖的运动轨迹, 在不同的传动系统中因为桨叶自转、公转转速之比 C 的不同, 造成不同的轨迹分布情况, 进而影响混合效果. 对混合效果的评定通过一个可移动的具有特定面积的视窗, 计算穿过视窗的非重叠轨迹数量, 准确而直观地得到统计数据. 结果表明, 空心桨可以保证混合容器中心和靠近内壁的区域轨迹密集, 桨叶对药浆分散效果较好, 但其他区域要达到均匀混合的效果需要较长的时

间, 为达到在尽量短的时间内用最少的能耗实现安全而均匀混合的生产目标, 需加入一个实心桨, 采用双螺旋桨可以大大提高混合效率, 减少混合时间.

参考文献:

- [1] 王正方, 翟瑞清. VKM-5 型立式捏合机研制与应用 [J]. 固体火箭技术, 1992(9): 59-64.
- [2] DAVENS A. Development of Modern Solid Propellants [J]. Journal of Propulsion and Power, 2003, 19(6): 1109-1128.
- [3] 易朋兴, 刘世元, 崔峰, 等. 基于流场模拟的复杂形面搅拌桨叶三维设计与优化系统 [J]. 宇航学报, 2009, 30(1): 321-326.
- [4] 吴英桦. 粘性流体混合及设备 [M]. 北京: 中国轻工业出版社, 1993: 2-19.
- [5] 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.
- [6] 姜爱民, 于胜春, 邹常青. 立式捏合机混合釜内推进剂药浆混合过程数值仿真 [J]. 海军航空工程学院学报, 2011, 26(4): 381-386.
- [7] 易朋兴. 立式捏合机设计研究与性能分析 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
- [8] 许章忠, 霍跃西. 立式混合机桨叶运动轨迹分析 [J]. 宇航学报, 1996, 17(3): 104-107.
- [9] 詹小斌, 李锡文, 邹大军. 立式捏合机桨叶截面设计参数分析 [J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2012, 41(8): 83-86.

Assessment and Analysis of the Mixing Effect for the Kneading Mixer

FU Xiao-yan¹, LI Xi-wen², XIAO Shu-fen³, YANG Ming-jin⁴

1. Institute of System Engineering, CAEP, Mianyang Sichuan 621900, China;

2. School of Mechanical Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

3. School of Computer and Information Science, Hubei Engineering University, Xiaogan Hubei 432100, China;

4. College of Engineering and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China

Abstract: The kneading mixer is an important equipment for high viscosity material mixing. In this study, the planetary gear box of the kneading mixer was analyzed and the calculation formula of the double screw blades' speed was given. Using the coordinate transformation method and based on Matlab, the mathematical modeling and numerical simulation of the double screw blades tips were obtained. The concept of "movable window" with a specific area was proposed to calculate the accurate number of trajectories which can be regarded as one of the judgment standards of mixing uniformity of the solid propellant slurry.

Key words: kneading mixer; numerical simulation; movable window; mixing uniformity

