

文章编号: 1005—8893 (2001) 04—0034—04

# 抛射式双轴混合制粒机混合机理及参数优化<sup>\*</sup>

田 华, 卓 震

(江苏石油化工学院 机械工程系, 江苏 常州 213016)

摘要: 通过固体颗粒在高速混合器内进行的搅拌混合的试验, 研究了混合器内各结构参数与混合效果的关系, 如筒体直径、主搅拌桨离筒底的间隙、主辅搅拌桨间距、辅搅拌桨离筒底的距离; 分析了混合效果与各结构参数及操作参数的关系。通过固定1个物料体系, 进行3因素(主搅拌桨转速、辅搅拌桨转速、混合时间)3水平的正交试验。找出最佳混合参数组合, 给出最适混合转速及最适混合时间。此型混合机与传统的混合装置相比大大缩短了混合时间, 提高了混合效率, 降低能耗。同时还具备制粒、干燥的功能。

关键词: 搅拌; 固—固颗粒混合; 混合度; 流场

中图分类号: TQ 027 文献标识码: A

近年来, 随着化工、医药、农药、轻工、食品、建筑等行业的迅速发展, 粉体混合技术日益受到人们的重视。本文研究的抛射式双轴混合制粒机, 即通过选取2组适当的物料体系进行混合试验, 研究其混合效果, 对其各主要参数进行优化。进一步对固—固体系混合的基础研究作出贡献。

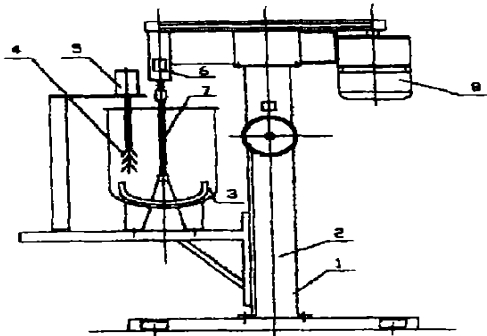
## 1 结构及研究方法、实验设计及方法

### 1.1 抛射式双轴混合制粒机混合机结构

本文研究的高速混合制粒机能在1台设备内, 连续完成均匀搅拌、润湿及制粒的功能。该装置为间歇式混合机, 立式双轴结构, 搅拌桨和切刀的驱动装置设在顶部, 筒体靠丝杠机构可在支架上升降并可固定, 其组成及各自功能如下(装置示意图如图1)。

①无级调速装置驱动带有扭矩传感器的主轴, 实现转速调节和功率测量。②异型搅拌桨——三叶偏心斜锚式结构, 随着其回转物料被翻腾和抛散至一定高度, 使物料瞬时失重。③制粒桨(切刀)驱动装置——采用调压器控制的串激电机, 实现“人

字形”制粒桨转速的调节 ( $n < 26\,000\text{ r/min}$ )。“人字形”制粒桨功能有二: 一是以强力高速剪切作用将被主桨回转抛散的原料分散; 二是通过加入粘合剂依靠其高速旋转达到制粒功能。④制粒桨距调节装置, 实现与搅拌轴间距的横向调节和上下位置调节, 改变“人字形”制粒桨形状数量, 尺寸和间距。⑤可升降并能实现水平面内  $X-Y$  方向移动的三维调节支承台, 调节搅拌桨在筒体中的位置和调节搅拌桨与筒体之间的间隙。



1—试验台; 2—升降平台; 3—筒体; 4—制粒桨; 5—串激电机; 6—扭矩传感器; 7—搅拌桨; 8—调速电机

图1 高速混合制粒机研究装置

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2001—05—28

作者简介: 田华 (1969—), 女, 江苏常州人, 硕士。

## 1.2 实验设计及实验步骤

### 1.2.1 实验设计

设计 1 个正交试验, 选择能反映不同混合固体颗粒特性的具有代表性的合适物料、选择影响混合效果的最主要因素: 转速、混合时间进行混合正交试验, 通过这 2 组不同物料体系作  $2 \times 9$  组实验数据, 从而找出最优工况。选择进行正交试验的参数及水平的依据如下:

①主搅拌桨(异形搅拌桨)三叶偏心斜锚式结构, 其作用是实现物料的抛射与翻滚, 该桨对混合效果的影响因素有 a、搅拌桨型式; b、搅拌桨转速; c、桨叶斜角; d、搅拌桨与筒体底部的距离。

通过前人<sup>[1]</sup>的工作知, 当  $\gamma = 55^\circ$  时, 搅拌桨外形与筒体基本吻合为最佳, 搅拌桨与筒体底部的距离小于 2 mm, 因此选择主搅拌桨转速为正交试验的 1 个参数(A)。

②制粒桨(切刀): “人字形”制粒桨的形状、数量、尺寸和转速及制粒桨与主搅拌桨距离, 制粒桨高度, 都将影响混合的效果。

由于制粒桨与主搅拌桨距离调节有限, 本文不予考虑; 制粒桨高度可以根据物料被抛射的高度而定, 以物料增高后的“混合制粒区”应使制粒桨刚好“淹没”其中为最佳, 这一项可通过实验测得。所以选择正交试验第二个参数为制粒桨的转速(B)。

③混合时间(C)。

混合效果还与颗粒本身特性有关, 根据物料特性, 本文拟选定二组有代表性的固-固混合体系:

i 2 种粒子密度差在 1 个数量级左右——面粉和铁粉; ii 密度及粒度相近的 2 种物料——盐和碳化硅<sup>[2,3]</sup>。综上所述, 本研究设计的实验是固定 1 个固-固体系, 进行 3 参数、3 水平的正交试验。

### 1.2.2 实验步骤

①通过调节电磁调速系统的控制器使无级调速装置达到指定的转速, 从而驱动主轴在指定的转速下运转并可实现功率的测量。②采用调压器控制的串激电机实现“人字形”制粒桨的转速调节。③秒表控制混合时间。

在混合盐与碳化硅实验过程中首先将混合物料各自入烘箱称重, 再在天平上称量 1.8 kg 食盐投入混合机内(有机玻璃筒体), 调节主轴转速为  $A$  r/min, 调节“人字形”切刀转速为  $B$  r/min, 再加入已称量好的 0.2 kg 碳化硅, 使食盐与碳化硅

的质量比为 9:1, 同时按下秒表开始计时, 使其混合时间为正交表规定混合时间  $C$ , 混合完毕, 取样, 测量混合度。

取样依据为: 由于混合物料在回转搅拌桨的作用下, 沿圆周运动, 因此, 沿径向取样 1, 2 点; 又由于混合物料沿轴向改向循环运动, 因此沿轴向取样 3, 4。所以取 1, 2, 3, 4 点是研究混合均匀性的有代表性的 4 点。取样点示意图详见图 2。

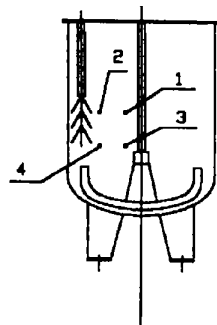


图2 取样点示意图

## 2 理论基础和分析

衡量混合好坏的指标是混合度, 本课题在处理实验数据时采用了 lacey 的统计分析方法表示的混合度<sup>[2]</sup>。

$$M = \frac{\sigma_0^2 - \sigma^2}{\sigma_0^2 - \sigma_r^2} \quad (1)$$

$$\sigma_0^2 = \overline{X} (1 - \overline{X}) \quad (2)$$

$$\sigma_r^2 = \overline{X} (1 - \overline{X}) / N \quad (3)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (X_i - \overline{X})^2 \quad (4)$$

式中:  $M$  ——表征混合状态;  $\sigma_0^2$  ——混合前之标准方差;  $\overline{X}$  ——某组分平均浓度;  $\sigma_r^2$  ——完全混合时之标准方差;  $N$  ——试样中固粒总数;  $\sigma^2$  ——任一混合状态的标准方差;  $m$  ——取样次数;  $X_i$  ——某组分浓度。

## 3 实验及数据分析

### 3.1 食盐-碳化硅的正交试验结果及分析

由测定数据得出正交试验结果, 表 1 为将衡量物料混合好坏的混合度作为目标值的正交试验结果汇总。按照有关数理统计的方法, 对试验数据进行处理。

表 1 食盐——碳化硅体系混合度正交试验结果

试验号	正交试验结果			数据
	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	
	\$1	\$2	\$3	
1	1	1	1	98.23%
2	1	2	2	99.15%
3	1	3	3	98.89%
4	2	1	2	97.46%
5	2	2	3	98.06%
6	2	3	1	97.63%
7	3	1	3	97.65%
8	3	2	1	97.50%
9	3	3	2	98.01%
<i>M</i> 1	2.962 7	2.933 4	2.933 6	8.825 8
<i>M</i> 2	2.931 5	2.947 1	2.946 2	
<i>M</i> 3	2.931 6	2.945 3	2.946	0.980 644
<i>m</i> 1	0.987 567	0.977 8	0.977 867	
<i>m</i> 2	0.977 167	0.982 367	0.982 067	
<i>m</i> 3	0.977 2	0.981 767	0.982	
<i>R<sub>j</sub></i>	0.010 4	0.004 567	0.004 2	0.000 293
effect 1	0.006 922	−0.002 84	−0.002 78	
effect 2	−0.003 48	0.001 722	0.001 422	
effect 3	−0.003 44	0.001 122	0.001 356	
工程平均	0.971 544			

正交表中, 1、2、3 分别为各因素的 3 个不同的水平, *M*1、*M*2、*M*3 为对应因素中水平面 1、2、3 的混合度 *M* 的和, *m* 1、*m* 2、*m* 3 分别等于 *M*1/3、*M*2/3、*M*3/3, *R<sub>j</sub>* 为极差值, 等于该列 *m* 值中的最大值与最小值的差, 其实际意义为 *R<sub>j</sub>* 值越大, 该因素的水平变化对指标的影响就越重要。effect 的值为对应 *m* 值与 9 次试验混合度值平均值的差, 亦即该因素水平对目标值的贡献大小。effect 值中的最小值即表示相应水平对混合效果的影响最大。

由上表可以看出, *R<sub>j</sub>* (*A*) > *R<sub>j</sub>* (*B*) > *R<sub>j</sub>* (*C*), 因此, 影响混合度的因素顺序为 *A* > *B* > *C*,

表 2 盐——碳化硅混合体系回归分析结果汇总

序号	<i>M</i> , %	<i>n</i> <sub>1</sub> / (r/min)	<i>n</i> <sub>2</sub> / (r/min)	<i>t</i> / min	ln <i>M</i>	ln <i>n</i> <sub>1</sub>	ln <i>n</i> <sub>2</sub>	ln <i>t</i>
1	98.23%	300	1 000	3	−0.017 858 52	5.298 317 367	6.907 755 279	1.098 612 289
2	99.15%	300	2 000	5	−0.008 536 33	5.298 317 367	7.600 902 46	1.609 437 912
3	98.89%	300	3 000	4	−0.011 162 06	5.298 317 367	8.006 367 568	1.386 294 361
4	97.46%	400	1 000	5	−0.025 728 15	5.703 782 475	6.907 755 279	1.609 437 912
5	98.06%	400	2 000	4	−0.019 590 65	5.703 782 475	7.600 902 46	1.386 294 361
6	97.63%	400	3 000	3	−0.023 985 36	5.703 782 475	8.006 367 568	1.098 612 289
7	97.65%	200	1 000	4	−0.023 780 53	5.991 464 547	6.907 755 279	1.386 294 361
8	97.50%	200	2 000	3	−0.025 317 81	5.991 464 547	7.600 902 46	1.098 612 289
9	98.01%	200	3 000	5	−0.020 100 67	5.991 464 547	8.006 367 568	1.609 437 912
	0.009	0.004	−0.016	0.029	#N/A			
	0.006	0.003	0.004	0.031	#N/A			
	0.802	0.003	#N/A	#N/A	#N/A			
	6.761	5.000	#N/A	#N/A	#N/A			
	0.000	0.000	#N/A	#N/A	#N/A			

即主搅拌桨（三叶偏心锚式搅拌桨）的转速的影响最大, 其次是辅搅拌轴（“人字形”制粒切刀）的转速, 混合时间的影响最小。本试验的最优工况为 *A*2*B*1*C*1。在最优工况条件下, 最优工程平均达到的混合度的值为 97.15%。

3.2 混合机实际混合度的回归分析

为了实现对混合机混合度的有效控制, 建立起混合度与影响混合度的因素如主搅拌轴转速 *n*<sub>1</sub>、辅搅拌桨转速 *n*<sub>2</sub>、混合时间 *t* 之间的函数关系式。

首先, 上述函数关系是非线性的。假设这一关系式为<sup>[4]</sup>:

$$M_{\text{食盐-碳化硅}} = K n_1^a n_2^b t^c \tag{5}$$

式中: *M*——混合度, %; *K*、*a*、*b*、*c*——待定常数; *n*<sub>1</sub> 主搅拌轴转速, r/min; *n*<sub>2</sub>——辅搅拌桨转速, r/min; *t*——混合时间, min。

对方程 (5) 2 边取自然对数, 从而将多元非线性问题转化为线性问题。将试验过程中混合机的实测混合度值代入上述公式, 用最小二乘法进行回归计算, 回归分析的结果见表 2。

经验回归公式为

$$M = 1.029\,4 n_1^{-0.016} n_2^{0.004} t^{0.009} \tag{6}$$

公式的线性相关系数为 0.802, 置信度为 95%。这说明回归的结果较好。

由式 (6) 可见, 实际混合度随着主搅拌轴转速的提高有所下降; 随着辅搅拌轴转速及混合时间的增大而有所上升。

同理面粉——铁粉混合体系作正交试验结果试验的最优工况为 *A*2*B*1*C*1。在最优工况条件下, 最优工程平均达到的混合度的值为 97.08%。

## 4 结 论

(1) 本文采用正交试验的方法, 通过 2 组不同的固体混合物料体系, 研究了固体混合机的工艺参数优化问题。在正交试验的基础上, 得出最优工况条件。将衡量固体混合机的混合效果的混合度作为目标值, 得到了食盐—碳化硅体系及铁粉—面粉体系的最优工况。

(2) 试验表明, 主搅拌桨的转速、辅搅拌桨的转速、混合时间等是影响固体混合设备混合效果的主要因素。采用最小二乘法, 对正交试验结果进行回归分析, 得出控制混合机混合度的经验回归公式, 对食盐—碳化硅体系:  $M = 1.0294n_1^{-0.016}n_2^{0.004}t^{0.009}$ ; 对铁粉—面:  $M = 0.9560n_1^{-0.012}n_2^{0.015}t^{-0.013}$ 。该公式可作为针对不同固体体系控制混合机实际混合度的指导公式, 在工程应用上, 可同过确定主搅拌桨转速、辅搅拌桨的转速、混合时间来控制该混合机的混合度, 从而克服混合机参数设置的盲目性。

(3) 本课题测定了固体混合设备的性能, 主搅拌桨的适宜转速范围为  $\leq 400$  r/min, 试验表明当转速超过 400 r/min, 物料翻腾抛射现象减弱, 反而降低了混合效果。混合时间的范围为  $< 5$  min。该混合机是高效高速混合机, 即在较短时间已将物

料混合至肉眼分辨不出的混合效果, 当混合时间超过 5 min, 混合效果并未增强。

(4) 由于时间的原因, 本文的工作尚可进一步开展, 今后的工作将在以下几个方面进行。①增加更多组的物料混合体系, 观察该实验未包括的粒子大小、形状、粒径分布等对混合度的影响及对流场的影响。②2 搅拌桨的各自结构对混合效果都有影响, 通过有目的地制作不同结构的主、辅搅拌桨研究其与混合效果的影响。从而关联不同的结构与不同的混合目的及不同的颗粒的关系。③本课题只研究了该混合制粒机混合的功能, 而对其制粒的功能却没能研究。将混合与制粒功能放在 1 台设备上, 在短时间内完成均匀混合、制粒、干燥是国际上高效制药机械发展的趋势, 该方面的研究将是今后研究的重点。

## 参考文献:

- [1] 卓震. 高速混合制粒机的混合制粒机理与流场分析 [J]. 化工装备技术, 1995 (5): 1—4.
- [2] 化学工程手册编辑委员会. 化学工程手册 [M]. 北京: 化学工业出版社, 1985.
- [3] Tatsuro Shiraishi. Studies on the Granulation Process of Granules for Tableting with a High Speed Mixer [J]. Chem Pharm Bull, 1994 (4): 932—936.
- [4] 牛长山. 试验设计与数据处理 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1988.

## Study on Mixing Principle and Optimum Combination of the Structure and Operation Parameter by Rotating Double Impeller in Mixing and Granulating Cylinder

TIAN Hua, ZUO Zheng

(Department of Mechanical Engineering, Jiangsu Institute of Petrochemical Technology, Changzhou 213016, China)

**Abstract:** Through the experiment of the powders and granules mixing in the high-speed mixer, this paper characterized the structure parameter of the mixture, such as the diameter of the cylinder, the distance between the main impeller and the bottom of the cylinder, the altitude of the secondary impeller and the distance between the two impellers. An equation has been proposed to determine the relationship of the mixing degree and the structure parameter and the operation parameter. A suitable impeller speed has been given at which the granules could reach the highest agitating altitude. An orthogonal experiment was given, including three factors, the speed of the main impeller, the speed of the secondary impeller and the mixing time. Each factor has three levels. By this means, the optimum combination of each parameter was found.

**Key words:** agitate; granular mixture; mixing degree; flow field