

doi: 10.7690/bgzdh.2024.01.007

## 基于自动化生产的含能材料捏合工艺安全分析

祁良园, 张会锁, 郭泽华, 付 誉, 尚 昆, 刘一凡

(中北大学机电工程学院, 太原 030051)

**摘要:** 针对现有高聚物粘结炸药 (polymer bonded explosive, PBX) 使用大型防爆立式捏合机生产时难以实现自动化的生产模式, 建立 5 L 与 40 L 容量的捏合机模型, 通过数值仿真分析在相同搅拌时间下的参数。4 s 时刻 5 L 捏合机相对 40 L 捏合机, 最高温度低 0.768%, 剪切速度低 49.6%, 剪应力低 51.5%, 最高压强低 47.9%, 铝粉均匀度差值小 0.061 9, 冲击波与殉爆安全距离分别少 75% 与 64.6%, 危害面积减小 50%。结果表明: 以多个小型捏合机等效代替一个大型捏合机方式更能实现浇注 PBX 炸药的连续化、自动化生产。

**关键词:** PBX 炸药; 5 L 捏合机; 40 L 捏合机; 自动化

**中图分类号:** TJ55 **文献标志码:** A

## Safety Analysis of Energetic Material Kneading Process Based on Automatic Production

Qi Liangyuan, Zhang Huisuo, Gao Zehua, Fu Yu, Shang Kun, Liu Yifan

(School of Mechanical and Electrical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** In order to solve the problem that it is difficult to realize the automatic production mode for the production of polymer bonded explosive (PBX) explosive by using large explosion-proof vertical kneader, 5 and 40 L capacity kneader models were established, and the parameters under the same mixing time were analyzed by numerical simulation. Compared with 40 L kneader, the maximum temperature, shear rate, shear stress, maximum pressure, difference of aluminum powder uniformity, safety distance of shock wave and sympathetic detonation of 5 L kneader at 4s are reduced by 0.768%, 49.6%, 51.5%, 47.9%, 0.0619, 75% and 64.6% respectively, and the hazard area is reduced by 50%. The results show that the continuous and automatic production of cast PBX explosive can be realized by replacing one large kneader with several small kneaders.

**Keywords:** PBX explosive; 5 L kneader; 40 L kneader; automatic

### 0 引言

高聚物粘结炸药 (PBX) 炸药是一种以单质炸药为主要成分, 加入各种添加剂, 在一定的压力与温度下制作而成的具有特殊要求与功能的高能混合炸药<sup>[1]</sup>。PBX 炸药在混合过程中压力、温度、剪切应力等对安全性有一定影响<sup>[2]</sup>。

立式捏合机是 PBX 炸药在进行浆液的固液混合生产时不可缺少的关键设备。目前的装药生产中较多使用大型防爆捏合机来进行 PBX 炸药的混合, 并采用土围、安全距离与单元化的工作模式作为防爆措施<sup>[3]</sup>。一次性大药量的生产方式带来的问题是较大的土围或安全距离, 导致捏合机占地面积大、安全防护措施要求高, 这也正是当前大多火炸药生产企业选址时定位郊区或人员稀疏地带的的原因。选址郊区或人员稀疏地带对企业进行人员招聘时产生了不良影响, 阻碍了企业的快速发展。在保证原有生产效率的基础上实现捏合机由大型化向小型化的

转变, 以减少单个捏合机药量, 减小土围厚度, 缩短安全距离, 通过合理布局实现厂房空间的合理利用。大型捏合在单元化的工作模式下建立自动化生产线时条件不便。通过使用多个小型捏合机等效率代替大型捏合机的方式。小型捏合机安全距离小, 防护措施相较大型捏合机简单的特点, 为 PBX 炸药的自动化生产提供了便利。

笔者对 5 L 与 40 L 容积的捏合机进行数值仿真, 比较一次性混合不同体积炸药时捏合机中状态参数, 以及防护需求。

### 1 PBX 炸药设备及工艺

#### 1.1 设备模型

根据已有的 VKM 立式混合机, 根据桨叶轴线与容器轴线之间的距离, 将桨叶分为近心桨与远心桨, 实体模型如图 1 所示。

参照王正方等<sup>[4]</sup>的方法进行 3 维模型的绘制。

收稿日期: 2023-09-12; 修回日期: 2023-10-15

第一作者: 祁良园(1997—), 男, 河南人, 硕士。

近心桨水平截面形状：

$$\left. \begin{aligned} X_1 &= \alpha \cos \theta_1 - r \cos(\theta_1 + \lambda \theta_1 - \beta) \\ Y_1 &= -\alpha \sin \theta_1 + r \sin(\theta_1 + \lambda \theta_1 - \beta) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$



图 1 VKM 立式混合机

远心桨水平截面形状：

$$\left. \begin{aligned} X_2 &= \alpha \cos \theta_2 - r \cos(\theta_2 + \theta_2/\lambda + \beta) \\ Y_2 &= -\alpha \cos \theta_2 + r \sin(\theta_2 + \theta_2/\lambda + \beta) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中： $a$  为两搅拌桨中心距； $r$  为搅拌桨半径； $\theta_1$  为近心桨旋转  $t$  时刻的角位移； $\theta_2$  为远心桨  $t$  时刻的角位移； $\beta$  为两搅拌桨捏合时的初始角； $\lambda=i_{1,2}$ ， $i_{1,2}=\omega_1/\omega_2$ ； $\omega_1, \omega_2$  分别为近心桨与远心桨的自转角速度。模型尺寸如表 1 所示。

表 1 模型尺寸 mm

参数	捏合机容量/L	
	5	40
X 轴坐标范围	-100~100	-198~198
Y 轴坐标范围	-100~100	-198~198
Z 轴坐标范围	-5~155	-5~305
R	50	100

以桨叶底面旋转中心建立坐标系，捏合机 3 维模型如图 2 所示。为更好地捕捉壁面处的温度等参数的变化，在划分网格时对壁面处的网格进行加密处理，在容器内部采用 7 mm 尺寸网格，这种方法可大大减少网格数量，提升计算速度，减少计算时间。网格的划分方式对网格质量也有着重大影响，高质量的网格有助于仿真计算时的收敛。网格划分模型如图 3 所示，网格总数为 822 601。

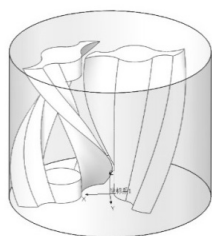


图 2 捏合机 3 维模型

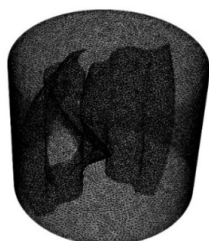


图 3 网格划分模型

## 1.2 PBX 炸药捏合工艺

立式捏合机主要包括 2 根做行星运动的搅拌桨与容器。通过 2 根相互捏合的搅拌桨对容器内部的 PBX 炸药进行混合搅拌。立式捏合机桨叶行星运动

的方式有效地减小了浆液混合时的隔离区，其捏合作用也促进了物料混合均匀，大大提高了生产效率<sup>[5]</sup>。桨叶对 PBX 炸药进行搅拌过程中，桨叶叶尖会产生较大压力，当压力过大及剪切过程中固体颗粒的连续摩擦造成的局部温度过高，会导致炸药爆炸。现有炸药生产工艺的自动化水平不高，仍需要人工进行生产，生产人员劳动强度大，并且炸药的有毒成分对员工的身体健康也产生了较大的影响，增加了在混合工艺中发生安全事故的概率。

## 1.3 捏合机仿真参数

通过 FLENT 对流体使用欧拉-欧拉多相流模型来模拟铝粉在 PBX 粘合剂中的搅拌混合。具体设置参数<sup>[6]</sup>如表 2 所示。

表 2 仿真参数

参数	PBX 浆液	铝粉
密度/(kg/m <sup>3</sup> )	1 670	2 719
粘度/(Pa·s)	100	0.000 018
比热容/(J/(kg·°C))	1 330	880
热导率/(W/(m·°C))	0.454	273
初始温度/K	370	300

PBX 炸药高粘与高固含量的特性使得其在混合过程中，浆液表现出非牛顿流体的特性，使用幂律流体模型来模拟 PBX 炸药流体。

本构方程：

$$\tau = \mu \dot{\gamma} = m \dot{\gamma}^{n-1} \dot{\gamma} \quad (3)$$

式中： $\mu$  为物料粘度； $\tau$  为剪切应力； $m$  为熔体稠度； $n$  为幂律指数； $\dot{\gamma}$  为剪切速率，s<sup>-1</sup>。在这种流体中幂律指数为 1.5。

近心桨自转速度 7.5 r/min，远心桨 15 r/min，公转速度 15 r/min。

## 2 捏合机仿真结果及计算

### 2.1 温度、剪切速度、剪切应力

4 s 时刻，5 L 与 40 L 捏合机温度云图如图 4 与 5 所示。

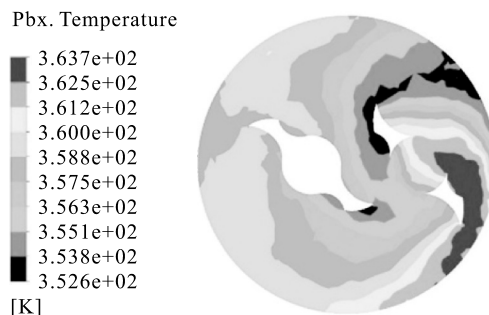


图 4 5 L 捏合机 4 s 时刻温度云

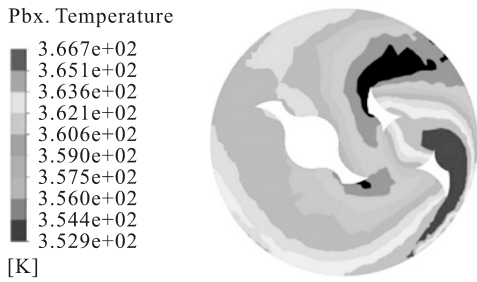


图 5 40 L 捏合机 4 s 时刻温度云

4 s 时刻, 5 L 与 40 L 捏合机浆液速度云图如图 6 与 7 所示。

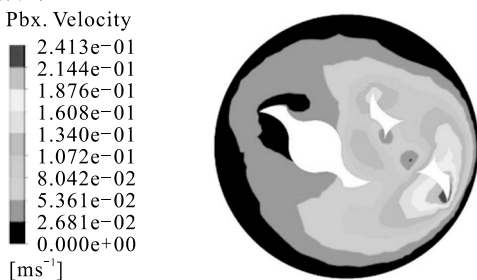


图 6 5 L 捏合机 4 s 时刻浆液剪切速度云图

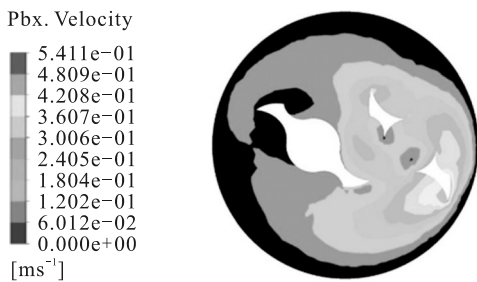


图 7 40 L 捏合机 4 s 时刻浆液剪切速度云图

4 s 时刻, 5 L 与 40 L 捏合机远心桨浆叶剪切应力如图 8 与 9 所示。

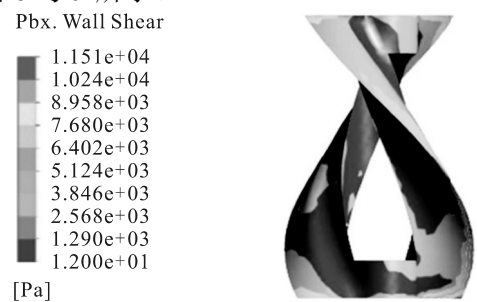


图 8 5 L 捏合机 4 s 时刻浆叶剪应力

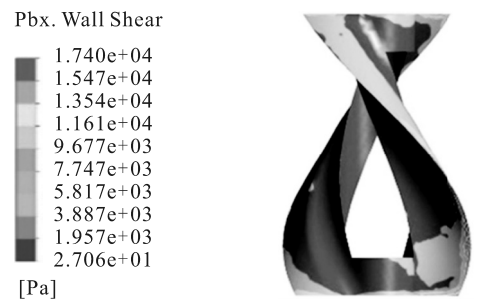


图 9 40 L 捏合机 4 s 时刻浆叶剪应力

### 2.2 最大压强

在使用 CFD-POST 进行后处理时, 软件的默认单位为 m。选取 5 L 捏合机的中心点(0, 0, 0.075)处与 40 L 捏合机的中心点(0, 0, 0.155)处, 容器内部压强随时间的变化如图 10 所示。

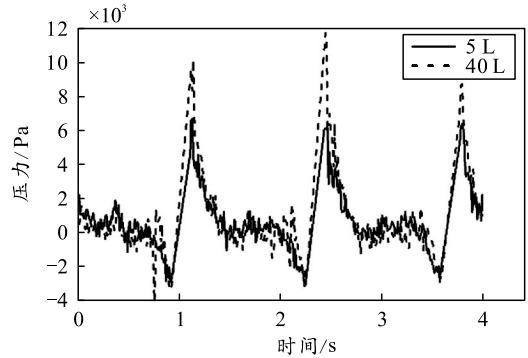


图 10 中心点处压强变化曲线

选取距离容器内壁面 1 mm 处的点。分别为 5 L 捏合机取坐标为(-0.099, 0, 0.075)点处, 40 L 捏合机取坐标为(-0.197, 0, 0.155)点处, 压强随时间的变化如图 11 所示。

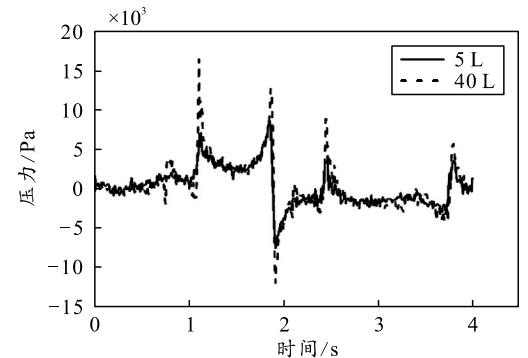


图 11 距边界 1 mm 处压强变化

### 2.3 混合均匀度

立式捏合机的混合效率取决于内部铝粉颗粒混合均匀时所需的时间。图 12 为 0 时捏合机内部铝粉体积分数随轴线 Z 高度的变化情况。

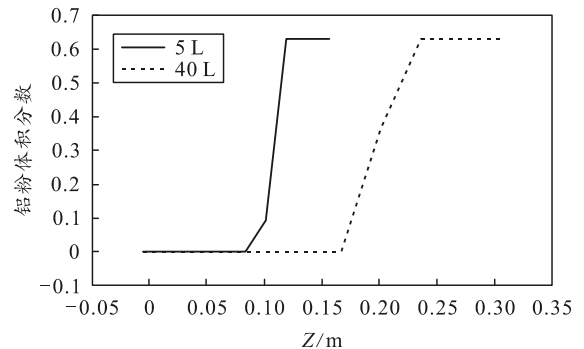


图 12 0 时刻铝粉体积分数分布情况

图 13 为在 4 s 时刻捏合机内部铝粉体积分数分

布随轴线 Z 高度变化的情况。

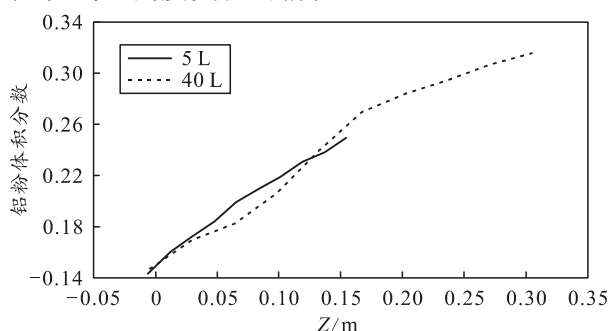


图 13 4 s 时刻铝粉体积分数分布情况

### 3 仿真结果分析

#### 3.1 温度、剪切速度、剪切应力分析

4 s 时刻, 5 L 与 40 L 捏合机中心所在水平面的温度、剪切速度、浆液剪切应力最大值的相应数值及对于 40 L 捏合机的减少百分比如表 3 所示。

表 3 温度、剪切速度、剪切应力及减少百分比

参数	捏合机容量/L		减少率/%
	5	40	
最高温度/K	363.694	366.508	0.768
最大剪切速度/(m·s <sup>-1</sup> )	0.241	0.478	49.600
桨叶剪应力/Pa	15 378.100	31 681.100	51.500

两捏合机中心所在的水平面, 5 L 捏合机在此平面最高温度为 363.694 K, 40 L 捏合机最高温度为 366.508 K, 通过采用 5 L 捏合机温度减小了 0.768%。40 L 捏合机其温度的传递速度慢, 在实际生产中由于捏合过程中浆液本身为放热过程, 将导致热量积累。若 PBX 炸药热量的积累使其温度超过了一定数值则会引发安全事故。

两捏合机中心所在的水平面, 5 L 捏合机 PBX 炸药最大剪切速度为 0.241 m/s, 40 L 捏合机浆液的最大剪切速度为 0.478 m/s。5 L 捏合机的剪切速度减小了 49.6%, 而 40 L 捏合机中较大的剪切速度增大了浆液中铝粉颗粒之间与铝粉同桨叶之间的摩擦, 会造成局部点的温度升高, 这对安全生产是不利的。

捏合机工作时近心桨与远心桨以相同角速度公转的同时还以不同的角速度自转。由于远心桨公转半径大且自转角速度快, 因此最大应力应出现于远心桨的叶尖处。5 L 捏合机桨叶最大剪切应力为 15 378.1 Pa, 40 L 捏合机最大剪切应力为 31 681.1 Pa。桨叶面与浆液之间的压强使得铝粉颗粒与桨叶之间的摩擦作用加剧。当局部的铝粉颗粒密度较高时连续的摩擦会导致局部点温度过高, 引起炸药爆炸, 造成安全事故。

#### 3.2 最大压强分析

在立式捏合机运行时, 浆液内部由于剪切作用会产生较大的压强, 压强的增大会降低 PBX 炸药的产量并且会引起浇注 PBX 炸药发生危险; 因此, 在研究中需对 5 L 与 40 L 混合时浆液压强的大小进行比较。5 L 捏合机与 40 L 捏合机在不同位置时压强最大值及 5 L 捏合机减少百分比如表 4 所示。

表 4 最大压强及减少百分比

最大压强/Pa	捏合机容量/L		减少率/%
	5	40	
中心点	6 717.933	1 174 924	42.8
距容器内壁 1 mm	8 546.539	1 640 947	47.9

比较 5 L 与 40 L 捏合机中 0~4 s 时中心点处与距边界 1 mm 点处的最大压强, 5 L 捏合机内压强分别下降了 42.8%、47.9%, 压强的下降提升了捏合机工作过程中安全性。

#### 3.3 混合均匀度分析

0 时刻, 铝粉在两容器中分布情况基本相同, 当捏合机内铝粉混合均匀时各个高度层铝粉的体积分数应相等, 体积分数随时间的图像应呈现一条水平直线, 最大体积分数应与最小体积分数相等; 因此, 可以用最大体积分数与最小体积分数差值来表示铝粉在 5 L 与 40 L 捏合机内的混合程度, 如表 5 所示。

表 5 0、4 s 时刻 5、40 L 铝粉体积分数及差值

容量/L	0 时刻		4 s 时刻	
	5	40	5	40
最大值	0.629 4	0.629 4	0.249 3	0.315 6
最小值	0	0	0.143 0	0.147 4
差值	0.629 4	0.629 4	0.106 3	0.168 2

由上表可知: 4 s 时刻, 5 L 捏合机的铝粉的体积分数差值为 0.106 3, 40 L 捏合机铝粉体积分数差值为 0.168 2, 越小的差值表示混合程度越好。5 L 捏合机体积分数差值比 40 L 捏合机铝粉体积分数差值小 0.061 9, 5 L 捏合机的混合效率高于 40 L 捏合机, 证明使用小型捏合机可提升 PBX 炸药的生产效率。

### 4 安全分析

PBX 炸药生产在安全设计时是以总药量进行保守安全距离设计计算的。此计算方式不利于生产效率的提升, 因为炸药发生反应基本遵循点到面再到整体的爆轰成长机理。对于小药量的生产方式, 可参考左亚帅等<sup>[7]</sup>使用水滴帷幕的方式对其进行可

靠有效的防护，从而阻止其成长为整体爆轰。

### 4.1 安全距离计算

PBX-9404 炸药的最大爆热为 6 530.16 J<sup>[8]</sup>，得  $Q_{vPBX}=6\ 530.16\text{ kJ/kg}$ 。

取 PBX 炸药密度为 1 670 kg/m<sup>3</sup>。

5 L 捏合机： $\omega_{PBX}=0.005\times 1\ 670=8.35\text{ kg}$ ；

40 L 捏合机： $\omega_{PBX}=0.04\times 1\ 670=66.8\text{ kg}$ 。

将 PBX 炸药根据  $\omega_{iT}=\omega_i Q_{vi}/Q_{vTNT}$  化成 TNT 当量计算。

5 L 捏合机：

$$\omega_{PBXT}=8.35\times 6\ 530.16/4\ 180=13.045\text{ kg}$$

40 L 捏合机：

$$\omega_{PBXT}=66.8\times 6\ 530.16/4\ 180=104.358\text{ kg}$$

#### 4.1.1 冲击波安全距离

安全距离<sup>[9]</sup>是根据规定的安全等级标准防护冲击波破坏的最小距离。研究安全距离对于危险品的生产、试验、储存、运输和处理等过程的安全性具有重要的意义。

$$R_s = K\sqrt[3]{\omega^2} \tag{4}$$

式中： $R_s$  为安全距离，m； $\omega$  为 TNT 装药量，kg； $K$  为安全系数，m/kg<sup>1/3</sup>。

为保证安全性，安全系数取破坏等级为 5 (严重破坏) 时的值，即  $K=4$ 。

5 L 捏合机：

$$R_s = K\sqrt[3]{\omega^2} = 4\times\sqrt[3]{13.045^2} = 22.166\text{ m}$$

40 L 捏合机：

$$R_s = K\sqrt[3]{\omega^2} = 4\times\sqrt[3]{104.358^2} = 88.663\text{ m}$$

#### 4.1.2 殉爆安全距离

$$R_s = K\sqrt{\omega} \tag{5}$$

式中： $R_s$  为安全距离，m； $\omega$  为 TNT 装药量，kg； $K$  为与炸药、介质性质、装药条件有关的系数。

取空气介质中炸药裸露状态下的殉爆安全距离系数且  $K=1.20$ 。

5 L 捏合机：

$$R_s = K\sqrt{\omega} = 1.20\times\sqrt{13.045} = 4.334\text{ m}$$

40 L 捏合机：

$$R_s = K\sqrt{\omega} = 1.20\times\sqrt{104.358} = 12.259\text{ m}$$

### 4.2 安全距离分析

较小的安全距离可以减小安全防护时的占地面

积，提高厂房面积的利用率。经过计算可得：5 L 与 40 L 捏合机的冲击波安全距离与殉爆安全距离及相对于 40、5 L 捏合机安全距离减少的百分比，其结果如表 6 所示

表 6 安全距离及减少百分比

参数	捏合机容量/L		减少率/%
	5	40	
冲击波安全距离/m	22.166	88.663	75.0
殉爆安全距离/m	4.334	12.259	64.6

为研究相同产量下的安全性，使用 5 L 与 40 L 捏合机 8:1 的个数进行安全分析。假设在无建筑等其他条件干扰的 2 维平面下，炸药爆炸时的危害面积以自身为圆心向外呈圆形扩散。计算 8 个 5 L 捏合机与 1 个 40 L 捏合机的危害面积及其面积比值，结果如表 7 所示。

表 7 危害面积对比 m<sup>2</sup>

捏合机		冲击波危害面积	殉爆危害面积
容量/L	数量		
5	8	12 342.25	471.84
40	1	24 683.94	471.89
面积比值(40 L/5L)		1.999 9	1.000 1

从上表可见：在相同产量下，1 个 40 L 捏合机的冲击波危害面积是 8 个 5 L 捏合机危害面积的 1.999 9 倍，殉爆危害面积为 1.000 1 倍。考虑到上文混合均匀度分析中 5 L 捏合机的效率高于 40 L 捏合机，故要生产与 40 L 捏合机相同药量时所需的小捏合机数量小于 8，最终导致上表所得的面积比值偏小。5 L 与 40 L 捏合机为保证安全应分别取其冲击与殉爆中危害面积较大值作为防护依据。由此可见，在防护以及对厂房面积的利用率上，5 L 捏合机比 40 L 捏合机更有优势。

### 5 结束语

根据仿真结果得出以下结论：

1) 5 L 和 40 L 捏合机在捏合过程中，浆液温度减小了 0.768%，压强减少了 47.9%，浆叶剪应力降低了 51.5%，冲击波以及殉爆安全距离分别减少 75.0%、64.6%，综合数据分析 5 L 捏合机在安全性上要高于 40 L 捏合机。

2) 在生产效率上，5 L 捏合机最大剪切速度减小了 49.6%，铝粉的最小体积分数减小了 0.061 9。5 L 捏合机做到了保持较小剪切速度的同时拥有较高的混合效率，既保证了生产的安全性，又保证了生产效率。