

引用格式:金文强,陈松,谢中元,等.多室连续混合设备工艺参数对混合能的影响[J].北京化工大学学报(自然科学版),2023,50(3):109-117.

JIN WenQiang, CHEN Song, XIE ZhongYuan, et al. Influence of the process parameters of a multi-chamber continuous mixing equipment on the mixing energy[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science), 2023,50(3):109-117.

多室连续混合设备工艺参数对混合能的影响

金文强 陈松* 谢中元 魏宗亮 秦能

(西安近代化学研究所,西安 710065)

摘要:为了建立适用于多室连续混合设备的系统性设计方法,采用数值计算与高聚物黏结炸药(PBX)模拟料实验相结合的方法对单室容积为 2.5 L 的多室连续混合设备的混合加强室进行工艺参数(投料速度、桨叶转速)响应分析,得到单位体积混合能与各输入参数之间的关系,并通过实验验证了以单位体积混合能作为混合能力评价指标的多室连续混合设备的设计方法。结果表明:平均扭矩的仿真值与实验值的最大偏差不超过 15%,所建立的模型能够较好地反映平均扭矩随工艺参数的实际变化规律;设备所提供的单位体积混合能总量随桨叶转速的增加而增大,随投料速度的增加而减小,随混合室数量的增加而增大,随药浆密度的增加而增大;实验中各工况的混合质量排序与单位体积混合能的排序吻合较好,单位体积混合能越大,混合终产物的混合质量越好;当投料速度为 20 kg/h,桨叶转速为 45 r/min 时,单位体积混合能为 32 562 J/L,混合终产物中铝粉含量的偏差在 1% 以内,满足 PBX 的工业要求。基于单位体积混合能的混合能力评价指标能够指导多室连续混合设备的结构设计与工艺参数选择,可以为后续不同量级设备的设计提供依据。

关键词:连续混合设备;工艺参数;投料速度;桨叶转速;数值仿真;单位体积混合能

中图分类号: TQ051.7 **DOI:** 10.13543/j.bhxbzr.2023.03.013

引言

多室连续混合设备是一种由多个独立运转而又相互连通的卧式混合单元组合而成的连续化混合设备,与传统的立式、卧式混合设备相比,这种设备最大的优点在于能够实现物料的连续化混合,即通过多对桨叶的异向转动将物料逐渐混合均匀的同时实现对物料的横向输送。目前,国内对多室连续混合设备的相关研究极少,相关成果鲜有公开。朱宏亮等^[1]设计了一种卧式连续捏合机,能够实现连续混合作业,但该连续捏合机并未应用于含能材料领域。杨治林等^[2]采用 ProCAST 软件模拟了一种多腔连续捏合机水浴温控系统的传热过程,并优化了其结构。刘晶等^[3]针对火炸

药连续高效制造过程中存在的问题,对多室连续混合工艺进行了系统的论证和研究,建立了多室连续混合工艺模型,揭示了多室连续混合设备在混合过程中流场特性参数的动态变化规律。然而,目前多室连续混合设备尚未形成系统的设计方法,并且在设计上较为依赖经验,难以将设备的性能提升至最佳。

建立系统的设计方法需要研究多室连续混合设备的输入量与混合能力之间的对应关系。影响多室连续混合设备性能的参数主要包括结构参数和工艺参数,对于桨叶这类复杂型面而言,改变其结构参数会对设备整体结构产生影响,从而产生较高的研究成本。因此,可以考虑先从工艺参数入手,通过改变工艺参数获得不同工况下的设备参数,初步建立起输入量与混合能力之间的定量关系。混合设备工艺参数的研究手段包括数值仿真和实验研究,数值仿真可以减少实验次数和成本,实验研究可以对仿真结果进行验证^[4-6]。

收稿日期:2022-08-25

第一作者:男,1997年生,硕士生

*通信联系人

E-mail: chensonglyj@163.com

在搅拌与混合设备领域,常用单位体积混合能作为设备混合能力的评价指标,即在混合物料相同的前提下,设备对单位容积的物料所提供的能量越多,其混合能力越强,终产物的混合质量越好。这一指标也常常作为混合设备放大设计中的参考量,用于指导大型混合设备的设计^[7]。单位体积混合能可通过混合功率进行计算,混合功率又与桨叶所受的扭矩直接相关,因此研究单位体积混合能首先应对设备的混合功率和扭矩进行分析^[8]。

为了建立适用于多室连续混合设备的设计方法,本文采用数值计算与高聚物黏结炸药(PBX)模拟料实验研究相结合的方法,对单室容积为 2.5 L 的多室连续混合设备的混合加强室进行了工艺参数(投料速度、桨叶转速)响应分析,得到单位体积混合能与各输入参数之间的关系,并验证了以单位体积混合能作为混合能力评价指标的多室连续混合设备的设计方法。研究结果可以指导多室连续混合设备的结构与工艺参数选择,为后续多型号设备的设计提供依据。

1 混合加强室的流场数值计算

1.1 几何模型

多室连续混合设备的各混合室按照功能不同可分为预混室、混合加强室和泵压室,其结构如图 1 所示。其中,混合加强室是承担混合工作的核心混合室,一台多室连续混合设备中往往设置多个混合加强室,以保证将物料中的各种组分充分混合至分布均匀。混合加强室的几何模型如图 2 所示,包括混合室腔体以及一上一下两个捏合桨叶,其中上下桨叶皆为二翼桨叶(反向)结构,即迎料面为桨叶的非捏合面,其捏合转速比为 1:2,混合室总容积为

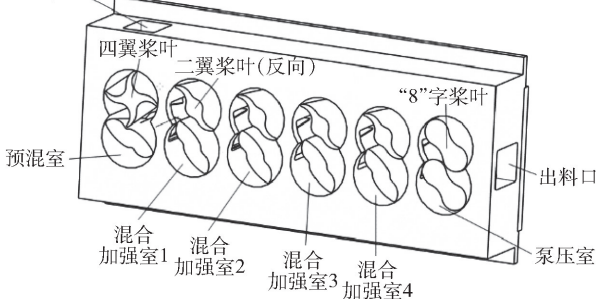


图 1 多室连续混合设备的结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the structure of a multi-chamber continuous mixing equipment

2.5 L,有效混合容积约为 2.2 L。在混合过程中,物料从混合室左侧入口进入,经过上下桨叶的反复捏合后从右侧出口挤出,流入下一个混合室,形成动态的连续混合与输送。

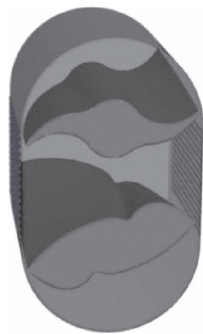


图 2 混合加强室的几何模型

Fig. 2 Geometric model of the reinforced mixing chamber

1.2 有限元模型

由于上下桨叶间的间隙很小,其捏合运动对流场的影响很大,网格会随桨叶的运动发生扭曲,因此只能选用非结构四面体网格。数值仿真过程中多室连续混合设备上下桨叶的捏合运动借助 ANSYS-FLUENT 仿真软件中的动网格技术加以实现,动网格通过加载 profile 文件进行驱动。

网格重构过程的数量无法控制,为确保计算结果的准确性,采用 3 种网格(最小网格尺度分别为 1.6、1.8、2.0 mm)对同一工况(投料速度 20 kg/h,桨叶转速 60 r/min)进行计算,绘制上桨叶的扭矩 T_{up} 随时间 t 的变化曲线,结果如图 3 所示。对上桨叶的平均扭矩值进行网格无关性验证,结果如表 1 所示。可以看出不同的网格尺寸对计算结果的影响很小,为节省计算时间,选择最

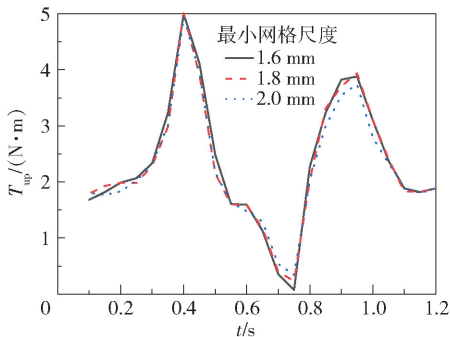


图 3 不同网格尺度下上桨叶的扭矩随时间的变化

Fig. 3 Variation of the torque of the upper blade with time for different mesh sizes

小网格尺度为 2 mm。为保证网格质量良好,设置网格大小 2~4 mm,每两个时间步长重构一次,有限元网格模型如图 4 所示。

表 1 网格无关性验证结果

Table 1 Verification results for mesh independence		
最小网格 尺度/mm	初始网格 单元数量	上桨叶的平均 扭矩/(N·m)
1.6	3 850 861	2.378
1.8	3 519 297	2.320
2.0	3 298 698	2.306



图 4 混合加强室的网格模型

Fig. 4 Mesh model of the reinforced mixing chamber

1.3 物性参数

多室连续混合设备中,物料经过预混室预混后成为具有一定流变特性的浆状物料,在混合加强室中药浆呈现非牛顿流体特性。物料参数按照 PBX 配方体系混合终产物的物性给出,采用模拟料进行混合实验,其具体配方见表 2。模拟料的密度为 1 800 kg/m³,黏度采用 DV-III Ultra 型旋转流变仪(BROOKFIELD 公司)进行测定。

表 2 实验配方

Table 2 Experimental formulation

成分	含量(质量分数)/%
Na ₂ SO ₄	54.5
铝粉	33
黏结剂	12
固化剂及小组分添加剂	0.5

图 5 为浆状 PBX 模拟料在混合温度为 80℃ 时的黏度测试结果,可以看出在该条件下药浆是剪切稀化的假塑性流体,其黏度变化符合幂律模型^[9]。

$$\eta = K \dot{\gamma}^{n-1}$$

(1)

式中: η 为表观黏度,Pa·s; K 为稠度系数,Pa·s ^{n} ; $\dot{\gamma}$ 为剪切速率,s⁻¹; n 为流动行为指数, $n < 1$ 时流体为假塑性流体, $n = 1$ 时流体为牛顿流体, $n > 1$ 时流体为胀塑性流体。在 ANSYS-FLUENT 流体属性设置中提供非牛顿幂律流体黏度模型,需用户给定非牛顿指数 n 及稠度系数 K ,对黏度测试结果进行拟合,可得: $n = 0.24, K = 202.47 \text{ Pa} \cdot \text{s}^n$ 。

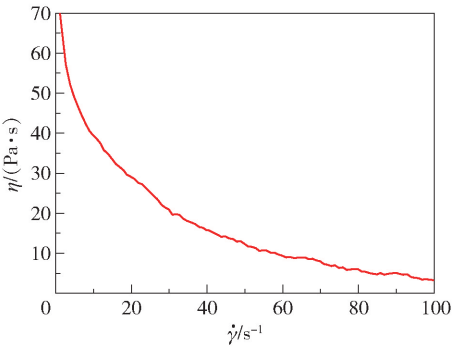


图 5 浆状 PBX 模拟料的黏度测试结果

Fig. 5 Viscosity test results of the simulated PBX slurry

1.4 初始和边界条件

为了研究工艺参数(投料速度、桨叶转速)对多室连续混合设备混合能力的影响规律,分别对不同投料速度(20、30、40 kg/h)及桨叶转速(15、30、45、60、75 r/min)的工况进行数值计算。

计算前对仿真模型做出以下假设:(1)混合室壁面为无滑移刚性壁面,与壁面接壤处的药浆速度与壁面相同;(2)混合流场为等温层流流场;(3)混合过程中药浆充满整个混合室,忽略桨叶转动过程中物料内产生的气体空穴;(4)考虑重力因素影响。

混合过程为瞬态流动,瞬态时间步长为 10⁻³ s,每个时间步长迭代 20 次,总计算时间大于下桨叶转动一周所需时间,从而保证对上下桨叶在所有相对位置的情况进行计算。压力-速度耦合选取 Phase Couple SIMPLE 算法,连续方程及对流项的离散选用一阶迎风差分格式,动量方程离散选用二阶迎风差分格式,压力方程离散相选取 PRESTO! 格式。

2 数值计算结果

2.1 平均扭矩

扭矩是混合设备最重要的特性参数,与混合过程的功耗直接相关,因此是搅拌与混合设备领

域研究的重点^[10-12]。为量化桨叶在混合过程中的扭矩水平,分别计算不同投料速度下上桨叶和下桨叶在一个旋转周期内扭矩的平均值,结果如图6所示。可以看到,在20、30、40 kg/h的投料速度下,上、下桨叶的平均扭矩曲线基本重合,说明投料速度对桨叶的平均扭矩无显著影响。原因在于投料行为对流场速度产生的影响远远小于桨叶转动对流场的影响,因此两种扰动对流场的耦合作用以桨叶转动为主导。由图6还可以看出,平均扭矩随桨叶转速的增加而显著增加,其中上桨叶的平均扭矩随转速增加呈现斜率逐渐减小的趋势,下桨叶的平均扭矩随转速增加近似呈线性增长。这是由于上、下桨叶的转速差异所致,上桨叶的转速仅为下桨叶的一半,导致上桨叶对物料的剪切速率偏低,受物料非牛顿属性的影响较大,而下桨叶的转速始终处于较高水平,受物料黏度的影响较小,因此扭矩近似呈线性增长。

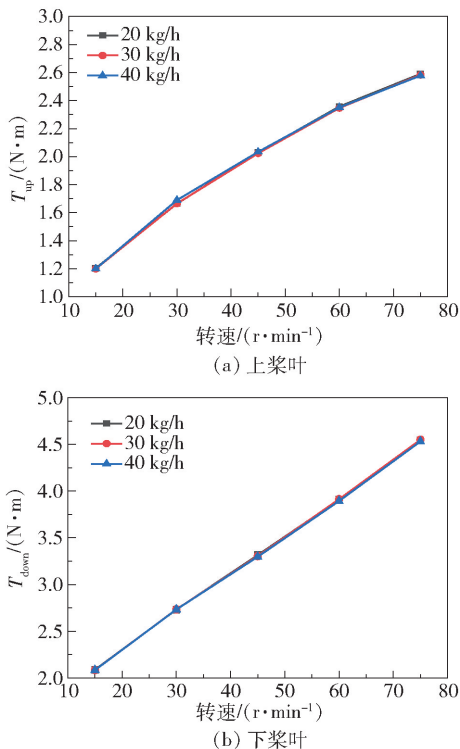


图6 不同投料速度下上桨叶和下桨叶的平均扭矩随转速的变化

Fig. 6 Variation of the average torque of the upper and lower blades with the rotational speed at different feeding speeds

为了获得混合过程中总扭矩与转速之间的关系,计算上、下桨叶在一个混合周期内的总扭矩平均

值,结果如图7所示。可以看出上、下桨叶的总扭矩平均值随桨叶转速的增加近似呈线性增长,采用线性拟合得到该型设备的总扭矩平均值 T_{avg} 与桨叶转速 n 之间的近似关系为

$$T_{avg} = 0.0638n + 2.4197 \quad (2)$$

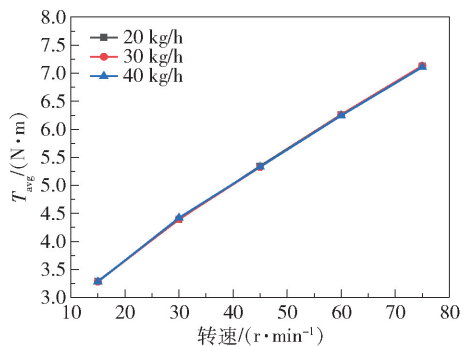


图7 不同投料速度下总扭矩的平均值随转速的变化

Fig. 7 Variation of the average total torque with rotational speed at different feeding speeds

2.2 单位体积混合能

单位体积混合能 W_v 可通过搅拌设备内单位体积物料的搅拌功率 P_v 和混合时间 θ_m 的乘积(式(3))来计算。

$$W_v = P_v \cdot \theta_m \quad (3)$$

搅拌功率 P 通过扭矩 T 与桨叶转速 n 进行计算(式(4)),进而可推导出单位体积搅拌功率 P_v 的表达式(式(5))。

$$P = \frac{T \cdot n}{9550} \quad (4)$$

$$P_v = \frac{T \cdot n}{9550 \cdot V} \quad (5)$$

扭矩 T 通过桨叶在一个旋转周期内的平均扭矩即 T_{avg} 来代替,混合时间 θ_m 由混合室的容积 V 与体积投料速度 v 计算得到(式(6))。

$$\theta_m = \frac{V}{v} \quad (6)$$

由式(2)~(6)可以推导出该型多室连续混合设备全部混合加强室的单位体积混合能总量 W 与各输入参数之间的关系式(式(7))。

$$W = \frac{(0.0638n + 2.4197)n \cdot 3600d}{9.550 v_m} \cdot N \quad (7)$$

式中: d 为药浆的相对密度; v_m 为质量投料速度, kg/h; N 为混合加强室的数量。

根据式(7)可知,设备所提供的单位体积混合能总量随桨叶转速的增加而增大,随投料速度的增

加而减小,随混合室数量的增加而增大,随药浆密度的增大而增大。式(7)揭示了多室连续混合设备的单位体积混合能总量和桨叶转速、投料速度、混合室数量以及药浆密度之间的关系,既能够指导工艺参数的选择,也能为设备的结构设计提供参考,为后续多型号设备的设计提供依据。

3 实验验证

3.1 实验条件

为了验证以单位体积混合能作为混合能力评价指标的设计方法的正确性,采用西安近代化学研究所研制的多室连续混合原理样机进行工艺实验,原理样机为 6 室结构,单室容积 2.5 L,有效容积 2.2 L。在 30 r/min 和 45 r/min 的转速下对不同投料速度(20、30、40 kg/h)的工况进行 PBX 模拟料混合工艺实验,各工况对应的工艺参数如表 3 所示。

表 3 各工况的工艺参数

Table 3 Process parameters of each working condition		
工况序号	桨叶转速/(r·min ⁻¹)	投料速度/(kg·h ⁻¹)
1	30	20
2	30	30
3	30	40
4	45	20
5	45	30
6	45	40

3.2 仿真模型验证

为了确保混合过程中上、下桨叶之间捏合的相对位置可靠,上桨叶传动轴与下桨叶传动轴之间采用齿轮传动方式。其中下桨叶传动轴为主动轴,上桨叶传动轴为从动轴,混合过程的总扭矩通过下桨叶传动轴输入,因此可以将实验过程中上、下桨叶的总扭矩值与仿真值进行对比验证。桨叶传动轴通过减速机和伺服电机相连,电机扭矩可以在原理样机的控制面板中自动反馈。首先记录不同工况下的电机在一段时间内的平均负载扭矩,然后减去空载状态下的电机扭矩,再与减速机的减速比相乘,即为桨叶的平均扭矩。

将实验测得的平均扭矩与数值仿真结果进行比较,以验证仿真模型的正确性,结果如图 8 所示。可以看出,实验测得的桨叶平均扭矩与仿真结果存在一定差异,整体上实验值略小于仿真值,二者的最大

偏差在 15% 以内。原因在于数值计算对模型做了假设,即混合过程中药浆充满整个流道,而在实际混合过程中混合室内可能存在一定的中空区域,导致扭矩值降低。

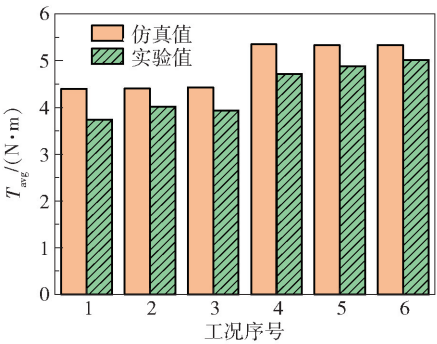


图 8 平均扭矩的仿真值与实验值比较
Fig. 8 Comparison of the average torque between the simulated and experimental values

物料在混合室中的充满度不仅会影响实际扭矩值,还会影响物料在混合室中的停留时间。为验证假设的合理性,通过透明板观察实际混合过程中混合室内的物料状态,发现物料在混合室间的流动规律与预期相符:当物料进入第一个混合室时会在该混合室中持续混合,混合过程中物料不会直接进入第二个混合室;当第一个混合室中的物料加满时物料才会逐渐进入第二个混合室混合,直至第二个混合室料满后,物料才会进入第三个混合室,依此类推直至出料。图 9 为物料在混合室间的流动过程,可以看出,当第三个混合室尚未充满物料时,后续混合室中未见物料,而前两个混合室虽然存在少量中空区域,但整体上物料的充满率保持在较高水平,因此混合过程中药浆充满整个流道的假设是合理的,实验结果能够证明仿真模型的正确性。



图 9 物料在混合室间的流动过程
Fig. 9 Flow process of materials between the mixing chambers

3.3 不同工况下多室连续混合设备的混合能力对比

根据式(7)计算出各工况下多室连续混合设备

的单位体积混合能,结果如图 10 所示。可以看出,6 种工况下混合加强室的混合能力大小关系为:工况 4 > 工况 5 > 工况 1 > 工况 6 > 工况 2 > 工况 3。

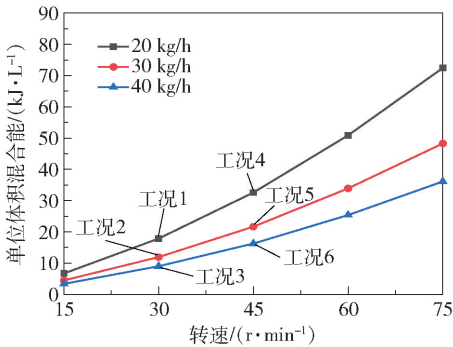


图 10 不同工况下多室连续混合设备的单位体积混合能
Fig. 10 Mixing energy per unit volume of the multi-chamber continuous mixing equipment under different working conditions

为了对比不同工况下混合加强室的实际混合能力,对混合终产物中铝粉组分的均匀性进行表征,组分均匀性越好,物料的混合质量越高,设备的混合能力越强。通过扫描电子显微镜-能谱分析法 (SEM-EDS) 对混合终产物进行组分分析。首先采用 S-3400-N 型扫描电子显微镜 (日本 Hitachi

公司)对样品进行成像,结果如图 11 所示。可以看到,工况 4 的混合终产物的样品颗粒较小,分散程度较均匀,而其他样品的颗粒大小不一,存在一些较大颗粒,由此可初步判断工况 4 的混合质量最佳。

为了进一步对比不同工况下的混合质量及其与单位体积混合能的对应关系,将各工况的 SEM 图像划分为 5 个区域,采用 INCA 能谱仪 (英国牛津公司)对每个区域进行铝粉含量分析,每个区域对应一个 EDS 谱图,最后通过计算各工况中 5 个谱图的铝粉含量的标准差及最大偏差来表征混合质量的好坏。各工况下的铝粉含量、标准差、最大偏差及单位体积混合能计算结果如表 4 所示。可以看出,以混合终产物中铝粉含量的标准差为评价指标时,各工况下混合质量好坏的关系为:工况 4 > 工况 5 > 工况 1 > 工况 6 > 工况 2 > 工况 3;以铝粉含量的最大偏差为评价指标时,各工况下混合质量好坏的关系为:工况 4 > 工况 5 > 工况 6 > 工况 1 > 工况 2 > 工况 3;以单位体积混合能为评价指标时,各工况下混合质量好坏的关系为:工况 4 > 工况 5 > 工况 1 > 工况 6 > 工况 2 > 工况 3。结果表明,以铝粉含量的标准差和最大偏差为评价指标与以单位体积混合能为评价指标所

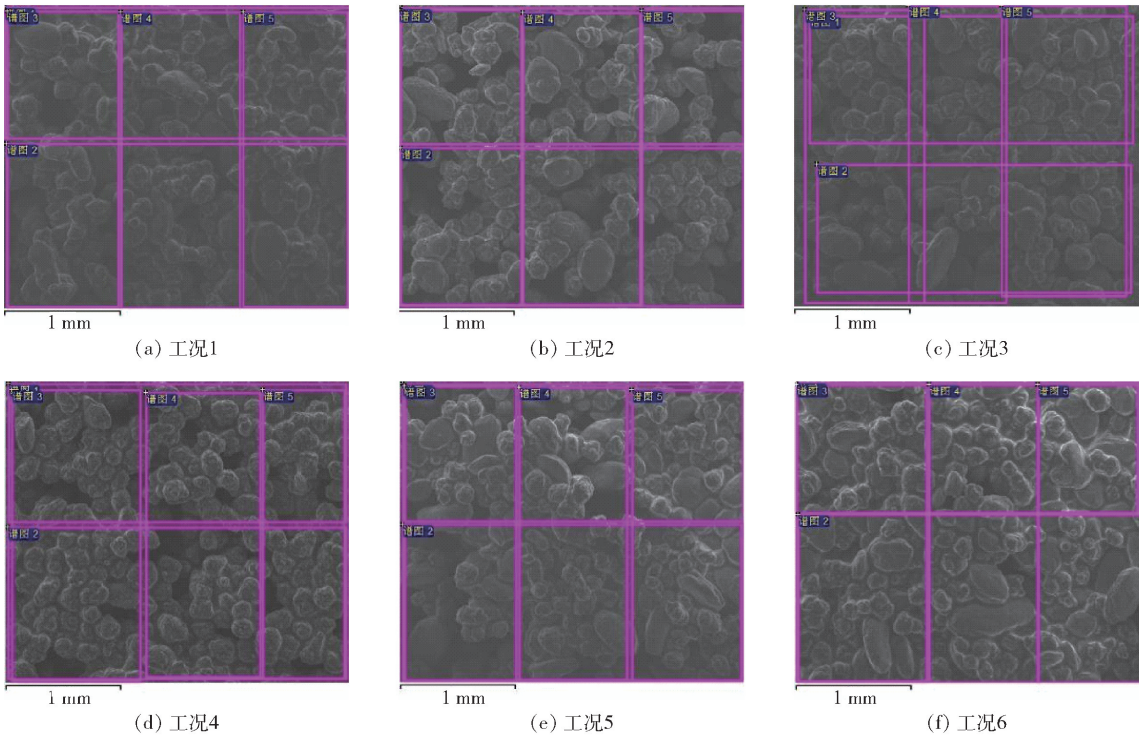


图 11 不同工况下混合终产物的 SEM 图像

Fig. 11 SEM images of the mixed final products under different working conditions

表 4 不同工况下铝粉含量及单位体积混合能的计算结果

Table 4 Calculated results of aluminum powder content and mixing energy per unit volume under different working conditions

工况 序号	铝粉含量/%					平均 值/%	标准 差/%	最大 偏差/%	单位体积 混合能/(J·L ⁻¹)
	谱图 1	谱图 2	谱图 3	谱图 4	谱图 5				
1	33.95	32.60	32.46	33.04	33.72	33.154	0.662	2.88	17 854
2	32.98	31.06	31.73	31.06	34.97	32.36	1.656	5.97	11 911
3	32.52	29.26	29.15	30.93	35.32	31.436	2.573	11.67	8 981
4	33.32	33.24	33.31	32.78	32.69	33.068	0.307	0.97	32 562
5	32.96	33.05	33.62	32.71	32.39	32.946	0.456	1.88	21 639
6	32.92	32.08	32.62	33.83	33.91	33.072	0.789	2.79	16 241

得到的混合能力大小关系基本吻合,因此单位体积混合能可作为多室连续混合设备的混合能力评价指标。

3.4 组分一致性检验

根据 PBX 的工业使用要求,混合终产物中主要组分的偏差波动应在 1% 以内。前文通过 SEM-EDS 分析了不同工况下混合终产物中铝粉含量的偏差,仅工况 4 满足混合要求。为了进一步检测设备的混合稳定性,对工况 4 在不同时间的出料情况进行采样,用于考察多室连续混合设备的混合产物在时间维度上的组分一致性。在设备稳定出料后每隔 3 min 对泵压室出口的物料进行取样,不同时间的采样情况如图 12 所示。采用滴定法^[13]测量不同出料时间的样品中铝粉的含量(质量分数),结果如表 5 所示。可以看出,各样品中铝粉含量比较稳定,波动范围为 32.73% ~ 33.31%,与铝粉投料量(33%)之间的最大差值为 0.31%,占铝粉投料量的 0.939 4%,满足工业使用要求。

表 5 不同出料时间的样品中铝粉的含量

Table 5 Aluminum powder content in samples at different discharge times

样品 序号	出料 时间/min	铝粉 含量/%	样品 序号	出料 时间/min	铝粉 含量/%
1	3	33.24	5	15	33.12
2	6	32.73	6	18	33.31
3	9	33.16	7	21	33.05
4	12	32.94			

4 结论

为了建立适用于多室连续混合设备的设计方法,采用数值计算与 PBX 模拟料实验相结合的方法对单室容积为 2.5 L 的多室连续混合设备的混合加强室进行工艺参数(投料速度、桨叶转速)响应分析,得到以下结论:

(1) 仿真计算结果与实验结果的一致性良好,平均扭矩的仿真值与实验值的最大偏差不超过 15%,所建立的模型能够较好地反映平均扭矩随工艺参数的实际变化规律。

(2) 推导出单位体积混合能与各输入参数之间的定量关系,单位体积混合能总量随桨叶转速的增加而增大,随投料速度的增加而减小,随混合室数量的增加而增大,随药浆密度的增加而增大。

(3) 实验中各工况的混合质量排序与单位体积混合能排序吻合较好,单位体积混合能越大,混合终产物的混合质量越好;当投料速度为 20 kg/h,桨叶转速为 45 r/min 时,单位体积混合能为 32 562 J/L,混合终产物中铝粉含量的偏差在 1% 以内,满足 PBX 的工业要求。

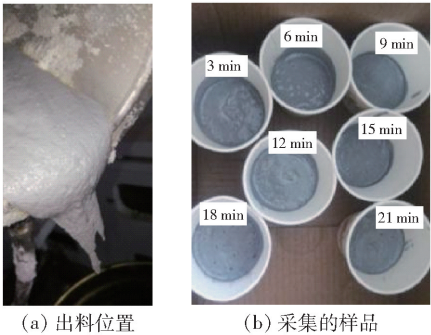


图 12 工况 4 在不同时间的出料情况

Fig. 12 Discharge conditions of working condition 4 at different times

参考文献:

- [1] 朱宏亮,刘臻. 一种卧式连续捏合机:CN 209580148U [P]. 2019-11-05.
ZHU H L, LIU Z. A kind of horizontal continuous kneader: CN 209580148U [P]. 2019-11-05. (in Chinese)
- [2] 杨治林,郭进勇,李全俊,等. 基于 ProCAST 的 PBX 多腔捏合机传热过程仿真模拟与设计[J]. 兵工自动化, 2020,39(10):62-65.
YANG Z L, GUO J Y, LI Q J, et al. Simulation and design of heat transfer process of PBX multi-cavity kneader based on ProCAST[J]. Ordnance Industry Automation, 2020, 39(10): 62-65. (in Chinese)
- [3] 刘晶,魏宗亮,秦能,等. 一种模块化多腔室连续捏合机:CN 109664429A [P]. 2019-04-23.
LIU J, WEI Z L, QIN N, et al. A kind of modular multi-chamber continuous kneader: CN 109664429A [P]. 2019-04-23. (in Chinese)
- [4] 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.
YI P X. Research on design methodology and performance of the vertical kneading mixers[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007. (in Chinese)
- [5] 梁畅. 同向双螺杆挤出机熔融段熔融传热过程研究[D]. 北京:北京化工大学,2012.
LIANG C. Study on melting and heat transfer in melting zone of co-rotating twin screw extruders[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2012. (in Chinese)
- [6] WANG X P, ZHU S F, CHEN S, et al. Proper orthogonal decomposition analysis and dispersion characteristics of resonant acoustic flow [J]. Shock and Vibration, 2020, 2020: 5068042.
- [7] 陈志平,章序文,林兴华,等. 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 Z P, ZHANG X W, LIN X H, et al. Design and selection manual for mixing and mixing equipment[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004. (in Chinese)
- [8] 易朋兴,崔峰,胡友民,等. 立式捏合机搅拌桨螺旋角影响数值分析[J]. 固体火箭技术,2008,31(4):381-385.
YI P X, CUI F, HU Y M, et al. Numerical analysis on effects of helix angle of stirring paddle on mixing performance of vertical kneading machine[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2008, 31(4): 381-385. (in Chinese)
- [9] 王凯. 非牛顿流体的流动、混合和传热[M]. 杭州:浙江大学出版社,1988.
WANG K. Flow, mixing and heat transfer of non-Newtonian fluids[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1988. (in Chinese)
- [10] 梁建,杨红,魏佳,等. 立式捏合机桨叶扭矩特性的 CFD 仿真研究[J]. 固体火箭技术,2018,41(1):78-83.
LIANG J, YANG H, WEI J, et al. CFD analysis on the characteristics of blades' torque of the twin-blade planetary mixer[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2018, 41(1): 78-83. (in Chinese)
- [11] 易传云,关英波. 立式捏合机桨叶转矩分析[J]. 机械与电子,2006(11):6-9.
YI C Y, GUAN Y B. Study on the torque of kneading mixer[J]. Machinery & Electronics, 2006(11): 6-9. (in Chinese)
- [12] 徐江华. 立式捏合机搅拌桨叶的转矩数值分析[D]. 武汉:华中科技大学,2012.
XU J H. A numeral analysis on the torque of the vertical kneading mixer's blades[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012. (in Chinese)
- [13] 刘慧云,王金英,吴宏杰,等. EDTA 络合滴定法测定推进剂中铝含量[J]. 火工品,2016(2):57-60.
LIU H Y, WANG J Y, WU H J, et al. EDTA complexometric titration measuring aluminum content of propellant [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2016(2): 57-60. (in Chinese)

Influence of the process parameters of a multi-chamber continuous mixing equipment on the mixing energy

JIN WenQiang CHEN Song* XIE ZhongYuan WEI ZongLiang QIN Neng

(Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065, China)

Abstract: In order to establish a systematic method for the design of multi-chamber continuous mixing equipment, numerical calculations and PBX simulation experiments have been combined to analyze the process parameter (feeding speed and blade speed) response of the reinforced mixing chamber of a multi-chamber continuous mixer with a single chamber volume of 2.5 L. The relationship between the mixing energy per unit volume and the input parameters was obtained, and the design of the multi-chamber continuous mixer with the mixing energy per unit volume as the mixing capacity evaluation index was verified by experiment. The maximum deviation between the simulated and experimental values of average torque was less than 15%, and the established model can reflect the actual variation of the average torque with the process parameters. The total mixing energy per unit volume provided by the equipment increases with increasing blade speed, decreases with increasing feeding speed, increases with increasing mixing chamber number, and increases with increasing slurry density. The mixing quality ranking of each working condition is in good agreement with the ranking of mixing energy per unit volume. The larger the mixing energy per unit volume is, the better the mixing quality of the final product is. When the feeding speed is 20 kg/h, and the blade speed is 45 r/min, the mixing energy per unit volume is 32 562 J/L, and the deviation of aluminum powder content in the mixed final product is within 1%, which meets the industrial requirements of PBX. The mixing ability evaluation index based on mixing energy per unit volume can guide the structural design and process parameter selection of multi-chamber continuous mixers and can provide a basis for the subsequent design of mixers of different scales.

Key words: continuous mixing equipment; process parameter; feeding speed; blade speed; numerical simulation; mixing energy per unit volume

(责任编辑: 于少云)