

文章编号:1006-9941(2025)11-1288-12

多腔室连续混合工艺及结构参数对压力及剪切力影响的模拟

樊超,李博豪,张彭超,魏宗亮,秦能,马宁,谢中元

(西安近代化学研究所,陕西西安710065)

摘要: 为强化对多腔室混合工艺安全性的认识,以某浇注PBX为对象,建立了基于欧拉方法的多腔室捏合机内多组分物料连续混合的多相流计算流体力学(CFD)数值模型,并开展试验验证了模型的可靠性。基于模型研究了桨叶转速、捏合间隙、桨叶构型等关键工艺及结构参数对混合安全刺激量的影响规律。结果表明,从进料腔室到出料腔室,各腔室内的压力水平逐渐降低;增大桨叶转速有利于降低腔室内的压力,但剪切刺激明显增强,随着桨叶转速从 $15\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 增加至 $75\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$,捏合机内的峰值压力从 402966 Pa 减小至 258107 Pa ,峰值剪切力从 6268.5 Pa 增大至 16607.9 Pa ;增大捏合间隙明显降低了腔室内的压力及剪切力,随着捏合间隙从 1 mm 增加至 5 mm ,捏合机内的峰值压力从 391094 Pa 减小至 284478 Pa ,峰值剪切力从 8320.5 Pa 减小至 3982.6 Pa ;相较于两翼-两翼型桨叶,四翼-两翼型桨叶由于具有更多的捏合位点会产生更强的剪切刺激,但桨叶翼型对捏合压力的影响较小,腔室1~7采用四翼-两翼型桨叶及两翼-两翼型桨叶时,捏合机内的峰值剪切力分别为 7481.3 Pa 和 4518.1 Pa 。

关键词: 多腔室连续混合;多相流;数值仿真;动网格;压力;剪切力;工艺安全

中图分类号: TJ55;O359

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2025055

0 引言

多腔室混合是一种基于多个独立运转而又相互联通腔室的混合工艺,可实现高粘态物料连续化混合作业^[1]。与传统的间歇式立式捏合技术相比,多腔室混合技术具有连续化作业效率高、在制量小、设备易放大等显著技术优势,国外已将其用于复合推进剂、混合炸药等火炸药产品的混合装药。

国内多腔室技术起步较晚,部分研究机构在借鉴国外的基础上开展了多腔室捏合机的结构设计并基本实现了设备的功能^[2-4]。多腔室混合作为一种新工艺,工艺安全性是将其用于含能材料混合的首要考虑,同时也是制约该技术推广应用的主要因素之一。物料在多腔室捏合机中主要受到剪切、挤压等刺激的作用。一方面,多组分物料在剪切、挤压的作用下发生分散及

分布混合从而达到均匀混合状态,另一方面,过大的剪切、挤压刺激一旦超过物料的安全阈值,可能引发燃爆事故^[5-6]。然而,由于桨叶实时运动的特点,目前通过实验测试手段对桨翼翼尖、腔室壁面捏合位置等关键部位剪切力及压力的动态监测仍具有较大的技术难度,从而制约了工艺安全性研究的开展。

作为对实验方法的有效补充,基于计算流体力学(CFD)的数值仿真提供了一种有效的流场分析手段,能够用于获得实验无法获取的速度场、压力场、剪切力场、温度场、组分浓度场等细节信息,已被广泛应用于含能材料混合工艺过程的研究^[7-16]。例如,Long等^[11]以混合好的浆料为对象建立了立式捏合机内物料流动的CFD模型,基于模型结果建立了捏合压力与桨叶运动参数的关联关系;祁良园等^[16]通过数值仿真对比分析了 5 L 及 40 L 立式捏合机中的温度、压力、剪切速度和剪切力水平,得出采用多个小型捏合机等效替代一个大型捏合机更易实现浇注PBX炸药的自动化生产。

在多腔室混合方面,国内研究人员通过建模仿真的方法,从传热^[17]、流场^[18]、混合能^[19]及桨叶优化^[20]等角度对多腔室混合工艺进行了研究,有效加强了对混合过程及规律的认识,但在工艺安全性方面仅研究获

收稿日期:2025-04-02;修回日期:2025-05-30

网络出版日期:2025-07-24

作者简介:樊超(1994-),男,助理研究员,主要从事火炸药制备工艺及装备技术研究。e-mail:fan7015279@163.com

通信联系人:魏宗亮(1985-),男,副研究员,主要从事火炸药制备工艺及装备技术研究。e-mail:1821333091@qq.com

引用本文:樊超,李博豪,张彭超,等.多腔室连续混合工艺及结构参数对压力及剪切力影响的模拟[J].含能材料,2025,33(11):1288-1299.

FAN Chao, LI Bo-hao, ZHANG Peng-chao, et al. Simulation of the Influence of Multi-chamber Continuous Mixing Process and Structural Parameters on Pressure and Shear Stress[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2025, 33(11):1288-1299.

得了单一工况下腔室内的最高压力及剪切力^[18],尚缺乏对安全刺激量影响参数、影响规律及影响机理的系统分析,无法有效指导参数的优化设计以提升工艺的安全水平。针对这一不足,本研究建立基于CFD方法的多腔室连续混合工艺模型,通过开展仿真计算系统获得桨叶转速、捏合间隙、桨叶构型等关键工艺参数及设备结构参数对工艺过程安全刺激量的影响规律,从而为工艺安全控制模型及方法的建立提供基础,在确保安全的前提下实现物料的高效、高质量混合,促进多腔室混合技术的推广应用。

1 模拟研究

1.1 模型建立

本研究中的模型主要用于模拟某浇注高聚物黏结

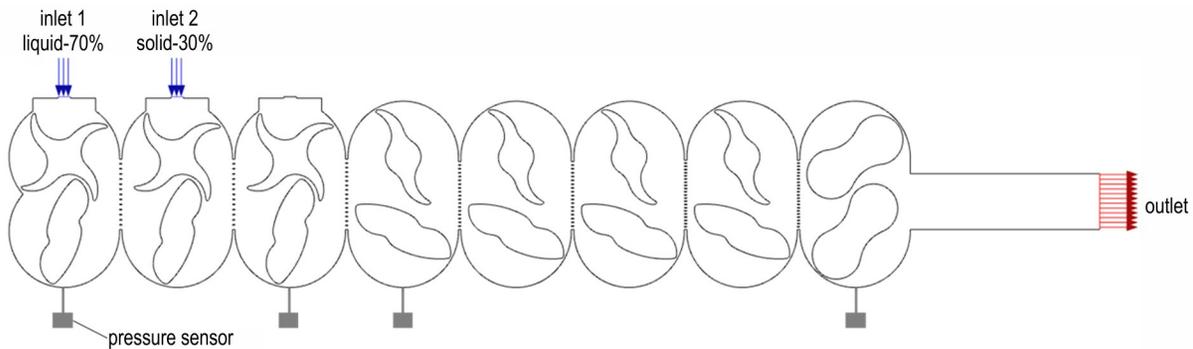


图1 多腔室结构几何模型

Fig.1 Geometric model of the multi-chamber structure

对于图1所示的标准多腔室捏合机,其由8个腔室及出料口组成,长和高分别为1738 mm和300 mm,相邻腔室由具有一定开孔率的隔板隔开,每个腔室内均包含上下一对转速可调的捏合桨叶,可根据需求改变腔室个数、桨叶结构和组合方式。根据物料在不同混合阶段对混合要求的不同,进料腔室1~3为四翼-两翼型捏合桨叶,具有良好的吃料能力;腔室4~7为两翼-两翼型捏合桨叶,具有良好的捏合混合能力;出料腔室8为“8字-8字”型捏合桨叶,具有良好的出料能力。上下桨叶转速比由捏合桨叶构型确定,对于腔室1~7,上下桨叶转速比为1:2,对于腔室8,上下桨叶转速比为1:1。本研究中定义的桨叶转速特指上桨叶的转速,且设置所有腔室中上桨叶转速保持一致,下桨叶转速则根据上下桨叶转速比确定。仿真过程中,桨叶的运动通过动网格方法实现。

1.2 控制方程

本研究采用欧拉方法^[21-22]对多腔室连续混合过

程进行描述,并假定流体流动为层流。在任意位置处,各相的体积分数之和等于1:

$$\sum \alpha_i = \alpha_a + \alpha_l + \alpha_s = 1 \quad (1)$$

式中, α_i 为*i*相的体积分数;*a*代表气相,即空气;*l*代表液相,即液料;*s*代表固相,即固料。

连续性方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_i \rho_i) + \nabla \cdot (\alpha_i \rho_i u_i) = 0 \quad (2)$$

式中, ρ_i 为*i*相的密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; u_i 为*i*相的速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; *t*为时间,*s*。

动量守恒方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_i \rho_i u_i) + \nabla \cdot (\alpha_i \rho_i u_i u_i) = -\alpha_i \nabla p + \nabla \cdot (\alpha_i u_i \nabla u_i) + \alpha_i \rho_i g - K_{ij}(u_i - u_j) \quad (3)$$

式中, p 为压力, Pa ; g 为重力加速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$; K_{ij} 为*i, j*两相之间的动量交换系数,由Gidaspow曳力模型^[23]确定。

1.3 物性参数

模型中设置主相为空气相,密度为 $1.225 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,黏度为 $1.79\times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$;第二相为流体相,近似采用混合终产物的物性参数,密度为 $1800 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,黏度采用如式(4)幂律模型表示:

$$\eta = K\dot{\gamma}^{n-1} \quad (4)$$

式中, η 为表观黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; K 为稠度系数, $\text{Pa}\cdot\text{s}^n$; $\dot{\gamma}$ 为剪切速率, s^{-1} ; n 为流动行为指数。对于本研究中的物料, $K=202.47$, $n=0.24$,为典型的假塑性流体($n<1$),黏度呈现剪切稀化的特性。

第三相为固体相,其物性参数按配方中的铝粉进行设置,密度为 $2719 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,粒径为 0.01 mm 。对于欧拉方法,固体相被假设为具有流体性质的“拟流体”,颗粒黏度和体黏度分别采用 Gidaspow 模型和 Lun-et-al 模型^[24]进行计算。

1.4 离散及数值方法

本研究采用有限体积法对图1中的二维计算区域进行离散,采用三角形网格,初始网格数量为113629。采用商业软件 ANSYS Fluent 对上述建立的模型进行求解。求解过程选用基于压力的求解器,并采用压力-速度耦合的 Phase Couple SIMPLE 算法^[25]。对流项的空间离散采用二阶迎风格式^[26],压力插值采用二阶格式^[26]。时间离散采用二阶隐式格式^[26],初始时间步长设为 0.001 s ,随着计算趋于稳定逐渐增加时间步

长至 0.0025 s ,每个时间步最多迭代20次。计算收敛的判定依据为连续性方程残差小于 10^{-6} ,其余方程的残差小于 10^{-3} 。

1.5 模型验证

本研究通过仿真与试验结果的对比如验证模型的准确性。首先对模型用于流场仿真的可靠性进行验证。流场验证采用搭建的6腔室捏合机,该捏合机配备了透明的腔室前盖板,可方便地对腔室内的混合情况进行观察(8腔室捏合机采用不锈钢前盖板,不具备可视化功能)。图2展示了混合前期试验及仿真得到的腔室内物料分布情况。从图2a中试验结果可以看到,腔室1和2已基本被物料充满,且物料正在填充第3腔室,而后续腔室则基本没有物料填充,表明物料是按照从前到后的顺序,依次填充当前腔室,然后再进入下一腔室。图2b中仿真结果与图2a中试验结果基本一致:腔室1和腔室2基本被物料充满,腔室3物料填充率约为50%,腔室4至腔室6仅有少量物料。

然后对模型用于压力刺激量计算的准确性进行验证。该部分验证基于搭建的8腔室捏合机,该捏合机在第1、3、4、8腔室底部的最低位置处分别布置有压力传感器(图1),压力测量的量程为 $0\sim 1 \text{ MPa}$ 、精度为 $\pm 0.5\% \text{ FS}$ (满量程的0.5%)。试验中设置桨叶转速为 $45 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$,工艺温度为 $80 \text{ }^\circ\text{C}$ 。图3展示了试验及仿

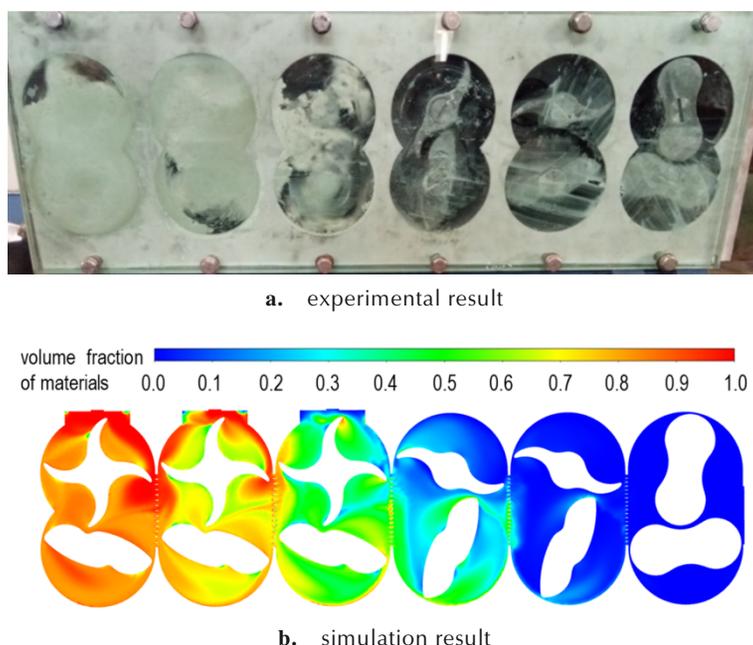


图2 试验及仿真得到的物料在腔室内的分布情况

Fig.2 Material distribution in chambers obtained from experiment and simulation

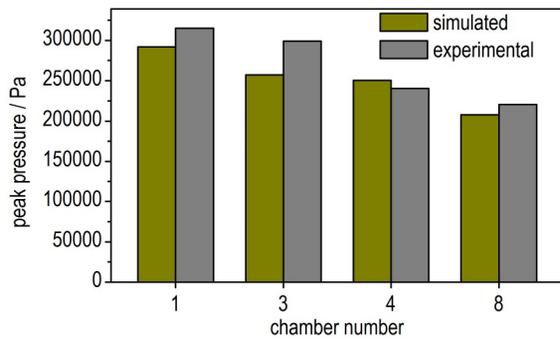


图3 试验及仿真得到的腔室底部最大压力值

Fig. 3 Peak pressures at the bottom of chambers obtained from experiment and simulation

真得到的混合过程中上述各腔室底部的最大压力值的对比。图中仿真值与试验值的偏差范围为4.1%~13.9%，表明仿真结果具有较高的可信度。此外，仿真结果和试验结果均显示下游腔室的压力水平低于上游腔室，表明仿真模型能够较好地描述腔室间压力的变化规律。

需要说明的是，受当前技术手段的限制，难以对捏合过程的剪切力进行动态测量。在多腔室捏合机中，由于物料所受的剪切力主要取决于物料自身物性及在腔室内的流动特性，故图2中模型用于流场仿真可靠性的验证结果可在一定程度上间接反映模型用于剪切力仿真计算的可行性。

1.6 模拟参数与模拟

基于以上建立的模型开展模拟仿真，研究揭示多腔室混合过程中的细节特性，并获得浆叶转速、捏合间隙、浆叶构型等关键工艺参数及设备结构参数对混合过程中物料所受挤压及剪切刺激量的影响规律，从而为进一步多腔室连续混合工艺安全控制方法的建立，以及设备及工艺过程的优化设计提供理论指导。表1所示为不同工况下模型中上述工艺及结构参数的选取情况。其中，关于浆叶构型的选取，本研究中的捏合浆叶涉及四翼-两翼、两翼-两翼、“8字-8字”3种浆叶组合形式。由于出料腔室通常选用出料能力较强的“8字-8字”浆叶组合，因此本研究仅对腔室1~7中的浆叶构型进行变化。其中：对于组合方式1，腔室1~7均为四翼-两翼型浆叶；对于组合方式2，采用图1中的混合浆叶组合方式；对于组合方式3，腔室1至腔室7均为两翼-两翼型浆叶。此外，由于本研究主要关注物料在混合过程中的安全性，而在出料过程中物料所受的安全刺激较小，故以下仅对混合腔室中物料的混合行为进行讨论。

表1 不同工况下模型的工艺及结构参数

Table 1 Process and structural parameters of the model for different conditions

research content	blade rotation speed / $r \cdot \min^{-1}$	kneading clearance / mm	blade profile (chambers 1-7)
effect of blade rotation speed	15	2	mixing
	30	2	mixing
	45	2	mixing
	60	2	mixing
	75	2	mixing
effect of kneading clearance	30	1	mixing
	30	2	mixing
	30	3	mixing
	30	4	mixing
	30	5	mixing
effect of blade profile	30	2	four-wing-two-wing
	30	2	mixing
	30	2	two-wing-two-wing

2 结果与讨论

2.1 混合工艺对压力的影响

压力是含能材料混合过程中重要的刺激量参数，控制压力在合理的限度范围内对确保混合过程的安全性至关重要。物料开始进入捏合机后，随着时间的增加，各个腔室逐渐被物料充满，流动阻力增大，压力也随之增大，直至稳定出料后压力变化趋于稳定。以浆叶转速 $45 r \cdot \min^{-1}$ ，捏合间隙 2 mm ，浆叶采用混合浆叶组合方式为例，图4展示了该工况下出料稳定后某时刻下捏合机各个腔室内的压力分布。由图4可知，该时刻下捏合机内的最大压力位于腔室8中，各个腔室中压力的分布均以浆叶轮廓为边界明显划分为不同的区域，各区域的连接处为浆叶与腔室壁面或浆叶之间相互捏合的狭小区域，在该位置处具有非常大的压力梯度。分析认为，产生这一现象的原因为不同区域之间物料的流通受阻，且不同区域内的物料受到浆叶的作用力不同。以腔室8为例，该时刻下浆叶-浆叶以及浆叶-腔室壁面均接近最小捏合位置处，腔室左右两侧压力的分布表现出明显的差异，且由于上下浆叶分别顺时针及逆时针反方向转动，右侧区域物料瞬时受到较强的挤压，压力较左侧区域更大。而在腔室4~7中，由于该时刻下捏合距离较大，压力的分布差异不如其他腔室中明显。进一步分析可知，当各腔室中浆叶旋转至其他位置时，各腔室内的压力分布情况也会

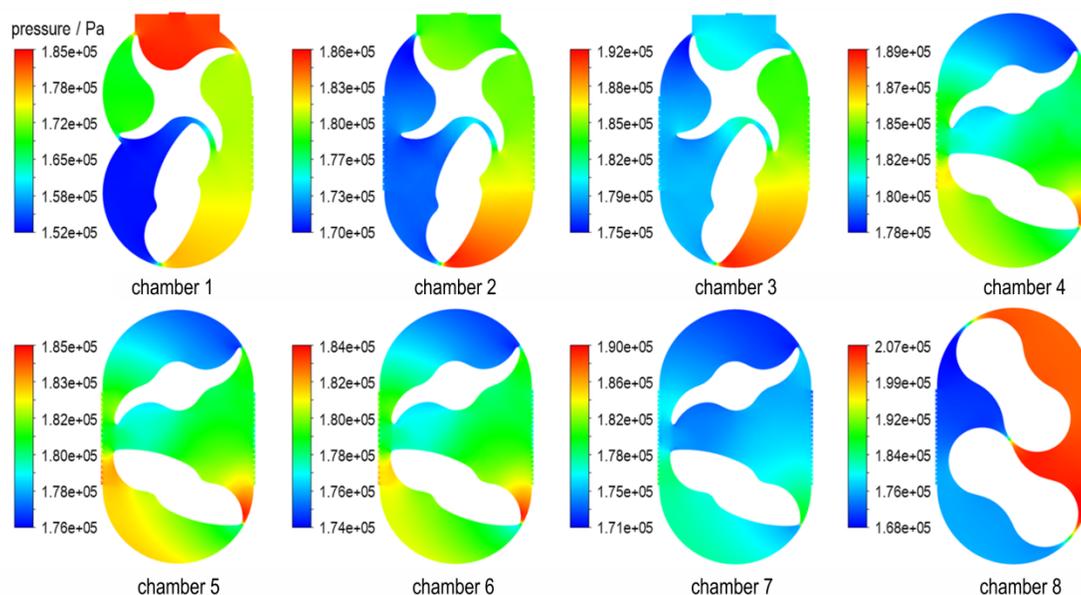


图4 出料稳定后各腔室内的压力分布

Fig.4 Pressure distribution in each chamber after the discharging being stable

发生相应变化,如当腔室1中上下桨叶处于最小捏合位置处时,则捏合机内最高压力可能出现在该腔室中。

在多腔室捏合过程中,峰值压力代表了物料受到的最大压力刺激量,对防止压力超限具有重要的参考意义。在上述腔室内压力整体分布特性分析的基础上,以峰值压力作为腔室内压力水平的评价指标,对桨叶转速、捏合间隙和桨叶构型对压力的影响进行进一步的分节讨论和定量分析。

2.1.1 桨叶转速对压力的影响

不同桨叶转速下出料稳定后一段时间内捏合机内峰值压力随时间的变化如图5所示。由图5可知,不同转速下峰值压力均随桨叶转动表现出周期性变化的规律,且变化周期与桨叶转动周期一致;此外,随着桨

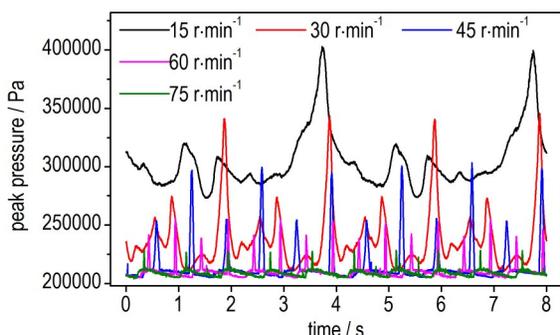


图5 出料稳定后一段时间内不同桨叶转速下捏合机内峰值压力的变化

Fig.5 Variations of peak pressures in the kneader with different blade rotation speeds within a certain period after the discharging being stable

叶转速的增大,捏合机内的峰值压力降低。分析认为,更高的桨叶转速强化了腔室内物料的流动混合,同时增强了物料在各个腔室之间的流通性,进而避免了物料由于局部聚集、挤压产生高的压力。

进一步提取从开始加料到混合出料达到稳定整个时间段各腔室内的峰值压力,绘制图6中的曲线。总的来看,不同转速下捏合机内的峰值压力均出现在腔室1中,且在随后的腔室中峰值压力逐渐减小,这一现象主要与多腔室混合的工艺特点有关,桨叶的结构设计及旋转方式使得上游腔室物料在挤压作用下向下游腔室连续输运,故上游的整体压力要高于下游。此外,随着桨叶转速的增大,各腔室内的峰值压力均表现出逐渐降低的规律。最终,转速15~75 r·min⁻¹范围内整个混合过程中腔室内的峰值压力分别为402966, 345682, 304133, 275484 Pa和258107 Pa,峰值压力

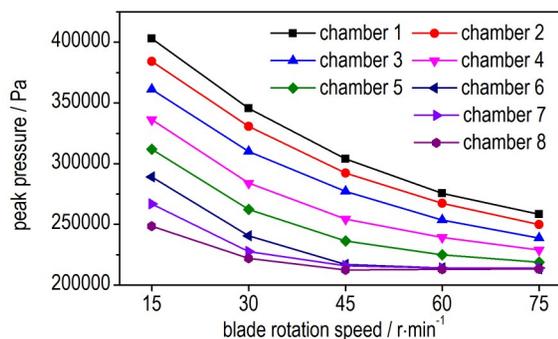


图6 各腔室内峰值压力随桨叶转速变化曲线

Fig.6 Curves of peak pressures varying with the blade rotation speed in each chamber

随转速增加而下降的幅度为35.9%。由此可见,从混合腔室内压力变化的角度考虑,增大桨叶转速并不会降低多腔室混合工艺过程的安全性。

2.1.2 捏合间隙对压力的影响

在多腔室捏合机中,多组分物料主要通过桨叶-桨叶以及桨叶-腔室壁面之间的捏合作用完成混合过程,捏合间隙是桨叶及腔室设计的重要结构参数。减小捏合间隙有利于物料的高质量混合,但由此带来的安全问题也是设计中需重点考虑的因素。不同捏合间隙条件下出料稳定后一段时间内捏合机内峰值压力随时间的变化如图7所示。由图7可知,随着捏合间隙的增大,捏合机内的峰值压力整体上减小。

图8进一步定量展示了不同捏合间隙条件下混合过程中各腔室内的峰值压力。由图8可知,捏合间隙对各腔室内压力的影响较为明显,尤其是压力较高的上游腔室。以压力最高的腔室1为例,捏合间隙1~5 mm范围内,腔室内的峰值压力分别为391094,345682,317302,298027 Pa和284478 Pa,峰值压力随捏合间

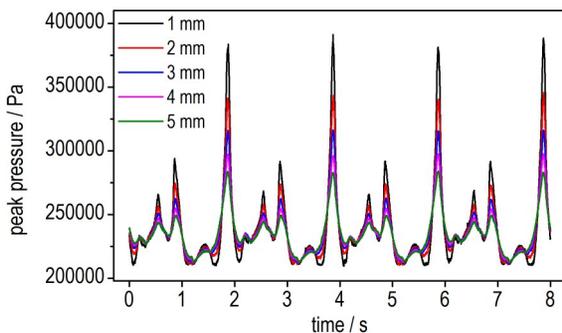


图7 出料稳定后一段时间内不同捏合间隙条件下捏合机内峰值压力的变化

Fig.7 Variations of peak pressures in the kneader with different kneading clearances within a certain period after the discharging being stable

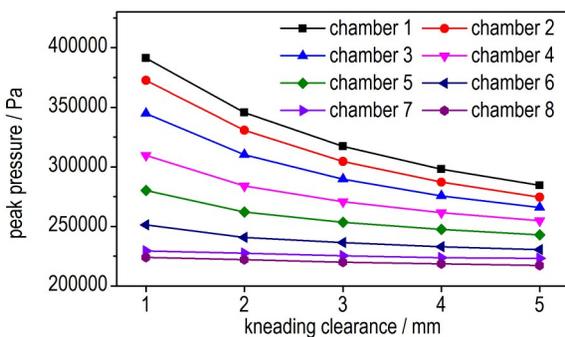


图8 各腔室内峰值压力随捏合间隙变化曲线

Fig.8 Curves of peak pressures varying with the kneading clearance in each chamber

隙增大而下降的幅度为27.3%。如前述分析,由于桨叶对流动的阻滞作用,各腔室内压力场分布明显以桨叶轮廓为边界划分为不同的区域,且在捏合位置处存在较大的压力梯度。随着捏合间隙的增大,腔室内各区域之间的流通性增强,由于减少了对局部物料过高的挤压,压力整体趋于更加均匀的分布,峰值压力也随之降低^[29]。显然,从减小压力刺激量的角度讲,增大捏合间隙对提升混合工艺过程安全性是有利的。

2.1.3 桨叶构型对压力的影响

在多腔室捏合机中,桨叶是驱动物料运动并完成混合的主要部件,不同的桨叶构型通过影响腔室内的混合流场进而对混合过程产生影响,桨叶的优化设计是多腔室设备研制的重要研究内容。不同桨叶构型组合下出料稳定后一段时间内捏合机内峰值压力随时间的变化如图9所示。由图9分析可知,由于不同翼型的桨叶转动至最小捏合位置处的时间和周期不同,故不同桨叶构型组合下捏合机内压力达到峰值的时间并不一致。此外,桨叶翼型为组合1时的峰值压力要略高于组合2及组合3。

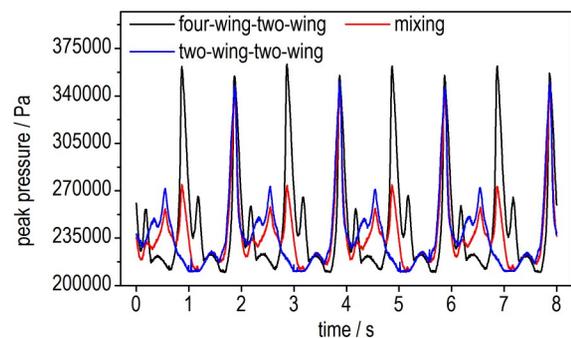


图9 出料稳定后一段时间内不同桨叶组合下捏合机内峰值压力的变化

Fig.9 Variations of peak pressures in the kneader with different combinations of blades within a certain period after the discharging being stable

图10进一步定量展示了不同桨叶组合下混合过程中各腔室内的峰值压力。由图10可知,组合1时各腔室内的峰值压力均是最高的,由此可见,相较于两翼-两翼型桨叶,四翼-两翼型桨叶会导致腔室内更高的压力。分析认为,相较于两翼型桨叶,四翼型桨叶一方面减小了物料的流动空间,另一方面造成更多的压力分区,从而更易对物料产生较强的局部挤压。不过,桨叶翼型对捏合压力的影响并不显著,组合1~3下捏合机内的峰值压力分别为363263,345682 Pa和352219 Pa,组合2和组合3相较组合1的变化幅度分

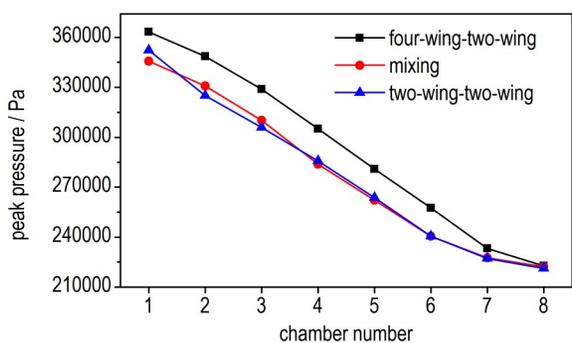


图10 不同桨叶组合下混合过程中各腔室内的峰值压力

Fig.10 Peak pressures in each chamber with different combinations of blades

别仅为4.8%和3.0%。

2.2 混合工艺对剪切力的影响

在多腔室捏合机中,桨叶的剪切作用一方面促进了组分间的混合,另一方面过大的剪切刺激量一旦超过物料的安全阈值,则可能导致安全事故的发生。因此,剪切力同样是含能材料混合过程中的关键刺激量

参数。剪切力的大小取决于剪切速率及流体黏度,即速度场和物料黏度场的分布。

以桨叶转速 $45 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 捏合间隙 2 mm , 桨叶采用混合桨叶组合方式为例,图11展示了该工况下出料稳定后某时刻下捏合机各个腔室内的速度场分布。由图11可知,对于腔室1~7,腔室下部区域的流场速度要明显大于上部区域,这是由于在腔室1~7中上下桨叶转速比为1:2,下桨叶对流场的扰动更为剧烈,而对于腔室8,由于上下桨叶转速相等,上部及下部区域速度水平整体相当。此外,对于相同桨叶翼型组合的腔室,其速度场分布表现出较高的相似性,如腔室4~7中的速度场分布基本一致,表明不同桨叶构型对腔室内的流场特性具有较大的影响。此外,从图11进一步分析可知,在桨叶附近,尤其是桨叶-桨叶以及桨叶-腔室壁面捏合位置处物料的流速明显更大,相应也会导致捏合区内具有更大的速度梯度即剪切速率。

图12展示了对应时刻下腔室内物料的黏度场分

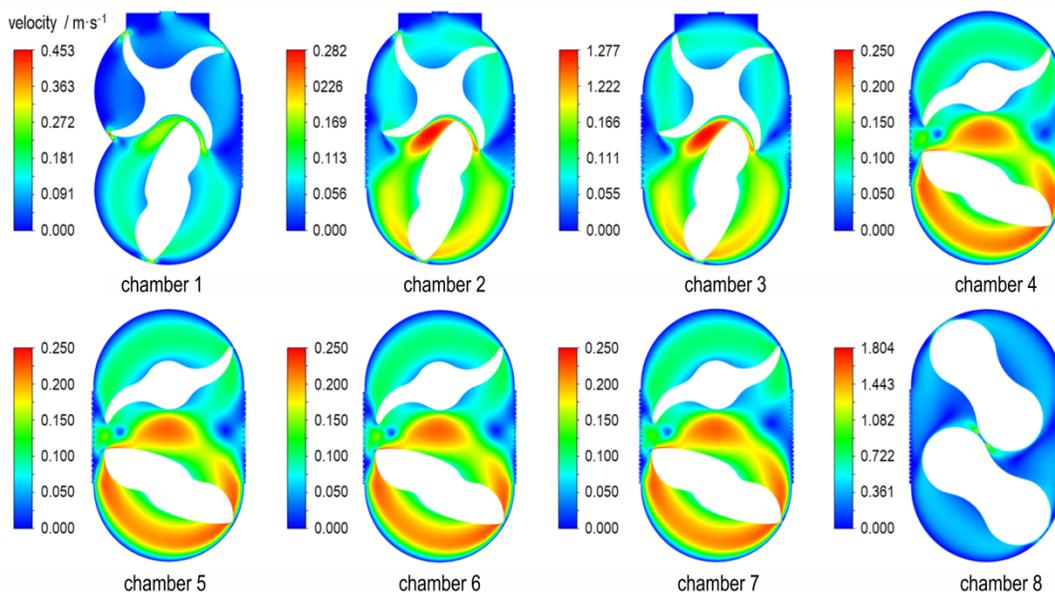


图11 出料稳定后各腔室内速度场分布

Fig.11 Velocity field distribution in each chamber after the discharging being stable

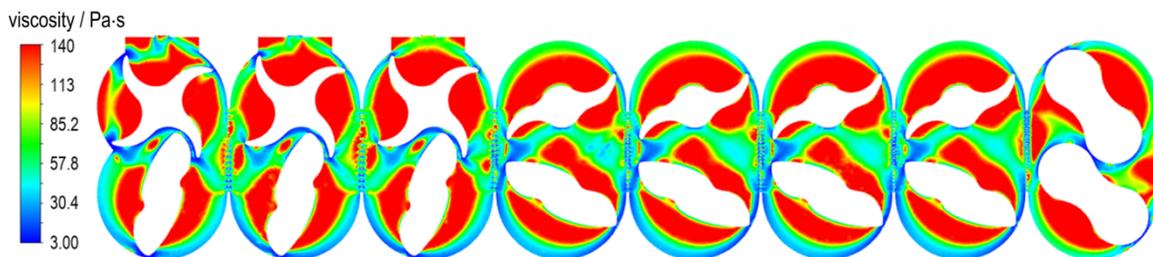


图12 出料稳定后腔室内物料黏度分布

Fig.12 Viscosity distribution in each chamber after the discharging being stable

布。由于本研究中的物料具有假塑性流体剪切变稀的特点,因此黏度的分布表现出与速度分布相反的规律,即在捏合区内较大的剪切速率导致较小的物料黏度,非捏合区域则由于剪切速率较小黏度较大。实际上,物料剪切变稀的黏度变化特性广泛存在于混合炸药及推进剂药浆中^[27-28],这一特点在一定程度上减小了混合过程中捏合区域的剪切力,对提升混合过程的安全性是有益的。

图 13a 展示了在速度场和物料黏度场综合影响下下捏合机内剪切力场的整体分布,图 13b 进一步选取

3 种不同桨叶构型的腔室展示了各腔室中剪切力场的分布情况。由图 13a 可知,各腔室内较大的剪切力均分布于桨叶-桨叶及桨叶-腔室壁面之间的捏合区域,而在非捏合区剪切力则基本可以忽略不计。以该时刻下捏合距离最小的腔室 8 为例,从图 13b 中可以明显看到,最大剪切力分布于桨叶-桨叶捏合位置处,这与图 11 中速度场的分布是一致的。在设备设计及生产运行过程中,需通过控制捏合间隙、桨叶转速等方式使得捏合区的剪切刺激量处于合理的范围内。

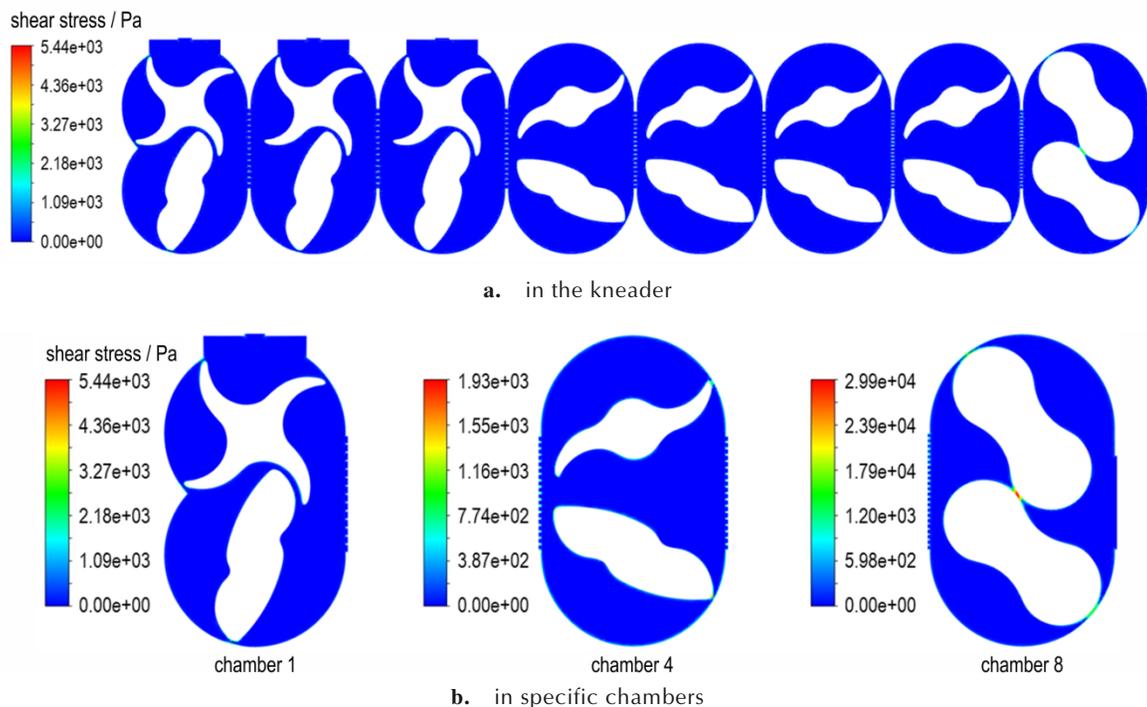


图 13 出料稳定后腔室内剪切力分布

Fig.13 Shear stresses distribution in each chamber after the discharging being stable

在多腔室捏合过程中,峰值剪切力代表了物料受到的最大剪切刺激量,对混合过程安全防护具有重要的参考意义。在上述腔室内剪切力整体分布特性分析的基础上,以峰值剪切力作为腔室内剪切力水平的评价指标,对桨叶转速、捏合间隙和桨叶构型对剪切力的影响进行进一步的分节讨论和定量分析。

2.2.1 桨叶转速对剪切力的影响

不同桨叶转速下出料稳定后一段时间内捏合机内峰值剪切力随时间的变化如图 14 所示。由图 14 可知,不同转速下的峰值剪切力均随桨叶转动表现出周期性变化的规律。不过与压力变化相反的是,随着桨

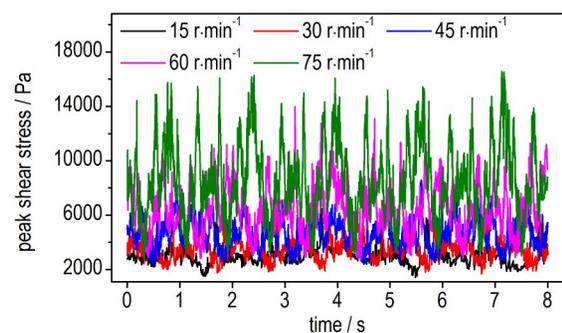


图 14 出料稳定后一段时间内不同桨叶转速下捏合机内峰值剪切力的变化

Fig.14 Variations of peak shear stresses in the kneader with different blade rotation speeds within a certain period after the discharging being stable

叶转速的增加,捏合机内的峰值剪切力明显增大,具体原因已在上述讨论中进行了分析。此外,图14中峰值剪切力的变化较图5中峰值压力的变化更为剧烈,这是由于峰值剪切力位于腔室内的最小捏合位置处,桨叶转动造成的捏合位置的微小变化即可能导致峰值剪切力的剧烈波动。

进一步提取从开始加料到混合出料达到稳定整个时间段各腔室内的峰值剪切力,绘制图15中的曲线。由图15分析可知,混合过程中各腔室内的峰值剪切力均随转速的增加而增大。转速 $15\sim 75\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 范围内,多腔室捏合机内的峰值剪切力分别为6268.5, 6393.1, 9269.9, 13983.5 Pa和16607.9 Pa,峰值剪切力随转速增加而增大的幅度为165%,可见转速对剪切刺激量具有非常显著的影响,在实际混合生产过程中要避免设置太大的桨叶转速,以防止剪切力超过物料安全阈值造成安全隐患。

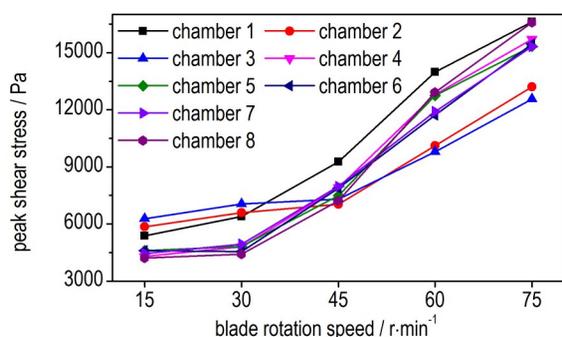


图15 各腔室内峰值剪切力随桨叶转速变化曲线

Fig.15 Curves of peak shear stresses varying with the blade rotation speed in each chamber

2.2.2 捏合间隙对剪切力的影响

不同捏合间隙条件下出料稳定后一段时间内捏合机内峰值剪切力随时间的变化如图16所示。与压力变化类似,随着捏合间隙的增大,混合过程中峰值剪切力减小,根据上文分析,这主要是由于增大捏合间隙降低了捏合位置处的剪切速率。图17进一步展示了不同捏合间隙条件下混合过程中各腔室内的峰值剪切力。由图17可知,随着捏合间隙的增大,各腔室中的峰值剪切力均随之减小。以峰值剪切力最大的腔室8为例,捏合间隙 $1\sim 5\text{ mm}$ 范围内,峰值剪切力分别为8320.5, 6393.1, 5454.8, 4947.4 Pa和3982.6 Pa,峰值剪切力随捏合间隙增大而下降的幅度为52.1%。由此可见,从减小剪切刺激量的角度讲,增大捏合间隙对提升工艺过程安全性也是显著有利的,不过同样是以降低混合质量为代价的。

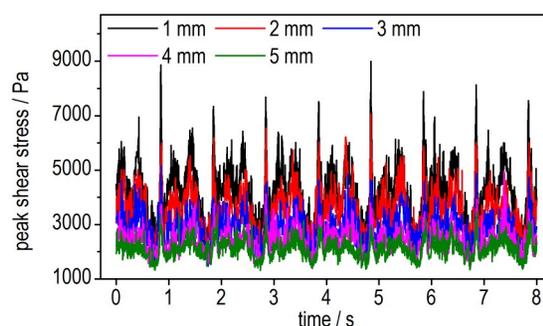


图16 出料稳定后一段时间内不同捏合间隙条件下捏合机内峰值剪切力的变化

Fig.16 Variations of peak shear stresses in the kneader with different kneading clearances within a certain period after the discharging being stable

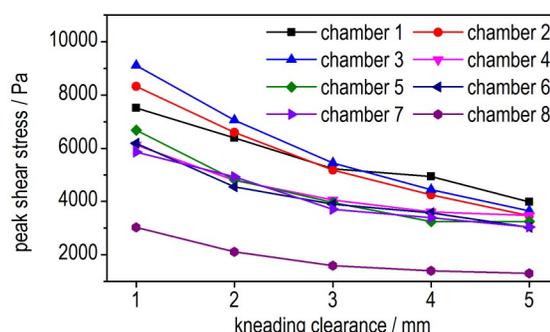


图17 各腔室内峰值剪切力随捏合间隙变化曲线

Fig.17 Curves of peak shear stresses varying with the kneading clearance in each chamber

2.2.3 桨叶构型对剪切力的影响

不同桨叶构型组合下出料稳定后一段时间内捏合机内峰值剪切力随时间的变化如图18所示,由图18可知,腔室1~7采用四翼-两翼型桨叶组合时的峰值剪切力最大。图19进一步展示了不同桨叶组合下

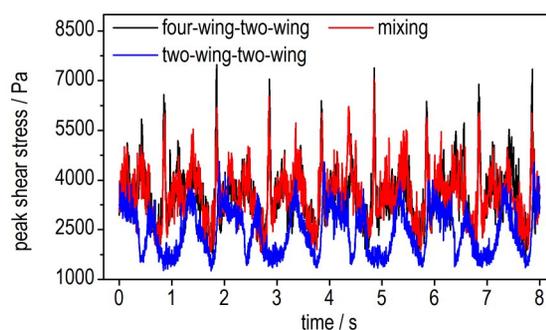


图18 出料稳定后一段时间内不同桨叶组合下腔室1~7中峰值剪切力的变化

Fig.18 Variations of peak shear stresses in chambers 1~7 with different combinations of blades within a certain period after the discharging being stable

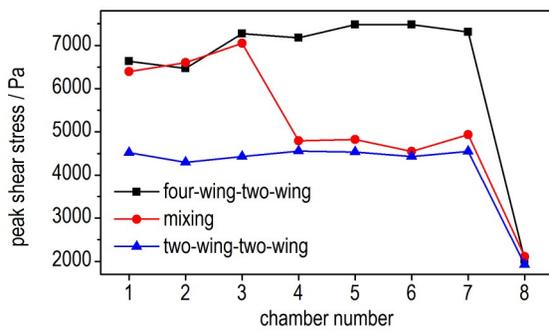


图 19 不同桨叶组合下混合过程中各腔室内的峰值剪切力

Fig. 19 Peak shear stresses in each chamber with different combinations of blades

整个混合过程中各腔室内的峰值剪切力。由图 19 可知,四翼-两翼型桨叶所在腔室的峰值剪切力要明显大于两翼-两翼型桨叶所在腔室。在整个捏合机内,组合 1~3 下的峰值剪切力分别为 7481.3, 6393.1 Pa 和 4518.1 Pa,组合 1 较组合 3 增大 65.6%。分析认为,相较于两翼-两翼型桨叶,四翼-两翼型桨叶组合下桨叶-桨叶以及桨叶-腔室壁面之间具有更多捏合点,从而使得物料在混合过程中更易受到强的剪切作用,也正因如此,四翼-两翼型桨叶组合具有更高的混合效率。

3 结论

本研究针对某浇注 PBX 的多腔室连续混合工艺开展建模及仿真研究。首先建立了基于欧拉方法的多腔室捏合机内多组分物料混合的 CFD 数值模型,采用动网格方法模拟桨叶的转动及其对物料的捏合作用,并开展试验验证了模型的可靠性;然后基于所建立的模型研究分析了桨叶转速、捏合间隙、桨叶构型等关键工艺及设备结构参数对混合过程中物料所受压力及剪切力刺激量的影响规律,从而为多腔室混合工艺安全控制方法的建立、设备及工艺过程的优化设计提供基础。本研究的主要结论如下:

(1) 增大桨叶转速有利于降低腔室内的压力水平,但混合物料所受的剪切力明显增大。随着桨叶转速从 $15 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 增加至 $75 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$,捏合机内的峰值压力降幅为 35.9%,峰值剪切力增幅则达到 164.9%。

(2) 增大捏合间隙明显降低了腔室内的压力及剪切力水平,随着捏合间隙从 1 mm 增加至 5 mm,捏合机内峰值压力和峰值剪切力的降幅分别为 27.3% 及 52.1%。

(3) 桨叶捏合位点的增加会对物料产生更强的剪切刺激,相较于两翼-两翼型桨叶组合,腔室 1~7 采用四翼-两翼型桨叶组合时峰值剪切力增大 65.6%,不过桨叶翼型对捏合压力的影响较小。

参考文献:

- [1] 陆志猛, 曾庆林, 郑丽兵, 等. 固体推进剂混合装备研究现状与发展[J]. 固体火箭技术, 2021, 44(3): 372-378.
LU Zhi-meng, ZENG Qing-lin, ZHENG Li-bing, et al. Review on solid propellant mixing equipment [J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2021, 44(3): 372-378.
- [2] 刘晶, 魏宗亮, 秦能, 等. 一种模块化多腔室连续捏合机: CN 201811541035.0[P], 2019.
LIU Jing, WEI Zong-liang, QIN Neng, et al. A modular multi-chamber continuous kneading machine: CN 201811541035.0[P], 2019.
- [3] 朱宏亮, 刘臻. 一种卧式连续捏合机: CN201822046851.6 [P], 2019.
ZHU Hong-liang, LIU Zhen. A horizontal continuous kneading machine: CN201822046851.6[P], 2019.
- [4] 张博, 肖勇, 张玉辉, 等. 一种含能材料捏合装置及方法: CN 202011202790.3[P], 2021.
ZHANG Bo, XIAO Yong, ZHANG Yu-hui, et al. A kneading device and method for energetic materials: CN 202011202790.3 [P], 2021.
- [5] 洪寅, 刘看, 武毅, 等. 固体推进剂药浆立式混合过程 SPH 方法研究[J]. 含能材料, 2024, 32(11): 1162-1173.
HONG Yin, LIU Kan, WU Yi, et al. SPH method for vertical mixing process of the solid propellant slurry [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2024, 32(11): 1162-1173.
- [6] 黎红艳, 白志鑫, 刘福生, 等. 含能材料摩擦感度的影响因素及理论预测[J]. 炸药学报, 2023, 46(10): 855-865.
LI Hong-yan, BAI Zhi-xin, LIU Fu-sheng, et al. Influencing factors and theoretical prediction of friction sensitivity of energetic materials [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2023, 46(10): 855-865.
- [7] CHENG W K, YE Y, JIANG S, et al. Mixing intensification in a horizontal self-cleaning twin-shaft kneader with a highly viscous Newtonian fluid [J]. *Chemical Engineering Science*, 2019, 201: 437-447.
- [8] 张嘉琪, 李锡文, 何锐波, 等. 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, 2015, 43(2): 6-10.
ZHANG Jia-qi, LI Xi-wen, HE Rui-bo, et al. Analysis on characteristics of flow field in mixing tank of differential twin shaft vertical kneader [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology*, 2015, 43(2): 6-10.
- [9] LONG J, ZHAN X, GUO F, et al. Study of hydrodynamics and flow characteristics in a twin-blade planetary mixer with non-Newtonian fluids [J]. *AIChE Journal*, 2022, 68 (10) : e17797.
- [10] 梁建, 罗小辉, 李锡文, 等. 立式捏合机桨叶间隙、螺旋角对搅拌扭矩和功率特性的影响[J]. 机械工程学报, 2018, 54(20): 330-337.
LIANG Jian, LUO Xiao-hui, LI Xi-wen, et al. Effects of

- blades' clearance and helical angle on the stirring torque and power of the twin-blade planetary mixer [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 54(20): 330-337.
- [11] LONG J, HE Y, ZHAN X, et al. Study of kneading pressure and power consumption in a twin-blade planetary mixer for mixing highly viscous fluids [J]. *Chemical Engineering Science*, 2021, 241: 116723.
- [12] 张峰峰. 浇注 PBX 炸药物料混合及固化工艺数值模拟与安全评估[D]. 太原: 中北大学, 2020.
ZHANG Feng-feng. Numerical simulation and safety assessment of mixing and curing process of cast-cured PBX explosives[D]. Taiyuan: North University of China, 2020.
- [13] 王自豪, 崔庆忠, 黄求安, 等. 基于 Fluent 的 PBX 炸药混合数值模拟[J]. 兵工自动化, 2023, 42(2): 83-86.
WANG Zi-hao, CUI Qing-zhong, HUANG Qiu-an, et al. Numerical simulation of PBX explosive mixing based on fluent [J]. *Ordnance Industry Automation*, 2023, 42(2): 83-86.
- [14] AUGER F, ANDRÉC, BOUVIER L, et al. Power requirement for mixing shear-thinning fluids with a planetary mixer [J]. *Chemical Engineering & Technology*, 2015, 38(9): 1543-1549.
- [15] 胡木林, 武毅, 王行远, 等. HTPB/Al/AP/RDX 固体推进剂动态混合过程数值仿真[J]. 兵工学报, 2024. DOI: 10.12382/bgxb.2024.0611.
HU Mu-lin, WU Yi, WANG Xing-yuan, et al. Numerical simulation of the dynamic mixing process of HTPB/Al/AP/RDX solid propellant [J]. *Acta Armamentarii*, 2024. DOI: 10.12382/bgxb.2024.0611.
- [16] 祁良园, 张会锁, 郜泽华, 等. 基于自动化生产的含能材料捏合工艺安全分析[J]. 兵工自动化, 2024, 43(1): 30-35.
QI Liang-yuan, ZHANG Hui-suo, GAO Ze-hua, et al. Safety analysis of energetic material kneading process based on automatic production [J]. *Ordnance Industry Automation*, 2024, 43(1): 30-35.
- [17] 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 Zhi-lin, GUO Jin-yong, LI Quan-jun, 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.
- [18] 金文强, 陈松, 谢中元, 等. 多室连续混合设备流场仿真与实验验证[J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 2023, 50(3): 101-108.
JIN Wen-qiang, CHEN Song, XIE Zhong-yuan, et al. Flow field simulation and experimental verification of multi-chamber continuous mixing equipment [J]. *Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science)*, 2023, 50(3): 101-108.
- [19] 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 Wen-qiang, CHEN Song, XIE Zhong-yuan, 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.
- [20] 阮班铨, 金文强, 魏宗亮, 等. 多室连续混合设备桨叶设计参数优化[J]. 固体火箭技术, 2024, 47(1): 78-86.
RUAN Ban-cheng, JIN Wen-qiang, WEI Zong-liang, et al. Optimized design of blade parameters of multi-chamber continuous mixing equipment [J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2024, 47(1): 78-86.
- [21] GAO Z, LIU G, GUO X, et al. A dynamic coefficient of restitution applied to two-fluid model in liquid-solid fluidized bed [J]. *Powder Technology*, 2022, 402: 117335.
- [22] ELREAFAY A M, SALEM K M, ABUMANDOUR R M, et al. Effect of particle diameter and void fraction on gas-solid two-phase flow: A numerical investigation using the Eulerian - Eulerian approach [J]. *Computational Particle Mechanics*, 2024: 1-23.
- [23] DING J, GIDASPOW D. A bubbling fluidization model using kinetic-theory of granular flow [J]. *AIChE Journal*, 1990, 36(4): 523-538.
- [24] REN H, ZENG L, LI W, et al. Numerical investigation of turbulent mass transfer processes in turbulent fluidized bed by computational mass transfer [J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2024, 76: 64-74.
- [25] PATANKAR S V, SPALDING D B. A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1972, 15: 1787-1806.
- [26] 王福军. 计算流体动力学分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 24-81.
WANG Fu-jun. *Computational fluid dynamics analysis* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 24-81.
- [27] 刘慧慧, 郑申声, 罗观, 等. 基于端羟基含氟黏合剂的铝钎浇注 PBX 炸药性能[J]. 含能材料, 2023, 31(10): 979-985.
LIU Hui-hui, ZHENG Shen-sheng, LUO Guan, et al. Performances of aluminized casting pbx explosive based on hydroxyl-terminated fluorine-containing binder [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2023, 31(10): 979-985.
- [28] 卢鑫浩, 叶宝云, 程王健, 等. B-GAP 基推进剂药浆流变特性和固化动力学研究[J]. 含能材料, 2022, 30(11): 1083-1089.
LU Xin-hao, YE Bao-yun, CHENG Wang-jian, et al. Research on rheological properties and curing kinetics of B-GAP-based propellant slurry [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2022, 30(11): 1083-1089.
- [29] 梁建, 李锡文, 史铁林, 等. 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, 40(3): 347-352.
LIANG Jian, LI Xi-wen, SHI Tie-lin, et al. Numerical analysis on effects of geometrical parameters of blades on flow field in mixing tank of vertical planetary kneading mixers [J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2017, 40(3): 347-352.

Simulation of the Influence of Multi-chamber Continuous Mixing Process and Structural Parameters on Pressure and Shear Stress

FAN Chao, LI Bo-hao, ZHANG Peng-chao, WEI Zong-liang, QIN Neng, MA Ning, XIE Zhong-yuan

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

Abstract: To enhance the understanding of safety of multi-chamber mixing processes, a multiphase flow CFD numerical model based on the Eulerian method was established for the continuous mixing of multi-component materials in a multi-chamber kneader, taking a cast polymer bonded explosive (PBX) as the object. Experimental verification was conducted to confirm the reliability of the model. Based on the model, the influence laws of key process and structural parameters including blade rotation speed, kneading clearance and blade profile on the mixing safety stimulus were studied. The results show that the pressure level gradually decreased from the feeding chamber to the discharging chamber. Increasing the blade rotation speed was beneficial for reducing the pressure in the chambers, but the shear stimulus significantly increased. As the blade rotation speed increased from $15 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ to $75 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$, the peak pressure in the kneader decreased from 402966 Pa to 258107 Pa, and the peak shear stress increased from 6268.5 Pa to 16607.9 Pa. Increasing the kneading clearance significantly reduced the pressure and shear stress in the chambers. As the kneading clearance increased from 1 mm to 5 mm, the peak pressure in the kneader decreased from 391094 Pa to 284478 Pa, and the peak shear stress decreases from 8320.5 Pa to 3982.6 Pa. Compared with the two-wing-two-wing blades, four-wing-two-wing blades produced stronger shear stimulus due to more kneading sites, but the blade profile had a smaller impact on the kneading pressure. When the four-wing-two-wing blades and two-wing-two-wing blades were used in chambers 1–7, the peak shear stresses in the kneader were 7481.3 Pa and 4518.1 Pa, respectively.

Key words: multi-chamber continuous mixing; multiphase flow; numerical simulation; dynamic mesh; pressure; shear stress; process safety

CLC number: TJ55;O359

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2025055

(责编:姜梅)