

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2022.05.003

# 聚合物基熔铸炸药螺旋立式挤注过程的流场仿真研究\*

林高明<sup>①</sup> 王苏炜<sup>①</sup> 王彦杰<sup>②</sup> 张光普<sup>①</sup> 肖磊<sup>①</sup> 郝嘎子<sup>①</sup> 姜炜<sup>①</sup>

①南京理工大学化学与化工学院国家特种超细粉体工程技术研究中心(江苏南京,210094)

②晋西集团江阳化工有限公司(山西太原,030041)

[摘 要] 针对当前聚合物基熔铸炸药装药工序中的人机面对、手工作业问题,拟采用立式螺压工艺来实现药浆的连续挤注以及弹体的自动装药,故在表征药浆流变特性的基础上对其流场特征参数进行仿真分析。结果表明:液相载体的润滑作用以及剪切过程中固相颗粒的取向排列均会导致药浆表观黏度的下降。提高螺杆转速可以显著增大药浆的流动性及产能,但也会造成剪切速率的线性递增以及压力的阶梯状递增。同时,剧烈的剪切作用也会拓宽药浆的温度分布范围,并将最高温度提高 18.6 °C;需要借助芯部调温来削弱螺杆的剪切升温效应,确保工艺安全性。

[关键词] 聚合物基熔铸炸药;立式挤注;流体仿真;团聚体破碎;假塑性流体

[分类号] TQ560

## Simulation Research on Flow Field of Polymer Based Melt-Cast Explosive in Spiral Vertical Extrusion Process

LIN Gaoming<sup>①</sup>, WANG Suwei<sup>①</sup>, WANG Yanjie<sup>②</sup>, ZHANG Guangpu<sup>①</sup>, XIAO Lei<sup>①</sup>, HAO Gazi<sup>①</sup>, JIANG Wei<sup>①</sup>

①National Special Superfine Powder Engineering Research Center of China, School of Chemistry and Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology (Jiangsu Nanjing, 210094)

②Jiangyang Chemical Co., Ltd., Jinxi Industries Group Co., Ltd. (Shanxi Taiyuan, 030041)

[ABSTRACT] In view of the human-machine facing and manual operation in the current charging process of polymer based melt-cast explosive, a vertical screw extrusion process was proposed to realize the continuous extrusion of slurry and automatic charging of the projectile. Therefore, on the basis of characterizing the rheological characteristics of the slurry, the flow field characteristic parameters were simulated and analyzed. Results show that the lubrication effect of the liquid carrier and the orientation alignment of the solid particles during the shearing process will lead to the decrease of apparent viscosity of slurry. Increasing the screw speed can significantly increase the fluidity and productivity of the slurry, but it will also cause the linear increase of shear rate and the step increase of pressure. At the same time, the violent shearing action will also widen the temperature distribution range of the slurry and increase its maximum value by 18.6 °C. It is necessary to use the core temperature adjustment to weaken the shear heating effect of the screw to ensure the process safety.

[KEYWORDS] polymer based melt-cast explosive; vertical extrusion; fluid simulation; aggregate crushing; pseudo-plastic fluid

## 引言

聚合物基炸药采用可塑性较强的聚合物来充当

高能炸药以及金属燃料等组分间的黏合剂。聚合物不仅可以赋予药浆良好的加工性能,还能借助其弹性特征有效改善药浆的力学性能<sup>[1-2]</sup>,故被广泛应用于各国战略武器系统中。

\* 收稿日期:2022-03-09

基金项目:国家自然科学基金(12102194,22105103);江苏省自然科学基金(BK20200471);中国博士后科学基金(2020M673527,2021M691580);江苏省博士后科研资助计划(2021K327)

第一作者:林高明(1997-),男,硕士研究生,主要从事混合炸药成型工艺研究。E-mail:lingaoming@njust.edu.cn

通信作者:姜炜(1974-),男,研究员,博导,主要从事微纳米含能材料制备及应用技术研究。E-mail:superfine\_jw@126.com

目前,基于熔铸装药工艺大批量生产特点以及PBX炸药力学性能好、安全性能高等特点,研究人员开展了聚合物熔铸炸药的相关研究<sup>[3-5]</sup>。其中,张蒙蒙等<sup>[5]</sup>制备了聚合物基复合熔铸载体FH-1,发现相较于传统的熔铸载体炸药,FH-1基熔铸炸药具有冒口缺陷小、便于后处理等特点。然而,由于传统熔铸装药工艺中的转运和装药环节具有人工作业量大等隐患,亟需从工艺优化角度来减少工序中的人为操作环节,改善其装药质量和稳定性。螺杆挤出作为一种典型的连续化技术,被广泛应用于含能药料的输送和成型工序中,可以使产品质量稳定、自动化程度增高,有效降低了由人机面对、手工作业引发的安全隐患<sup>[6-7]</sup>。当前,螺旋挤注工艺的研究主要集中于双基类推进剂等高黏药料的塑化成型,且多以水平横向挤注的形式进行制备<sup>[8-9]</sup>,难以用于实现熔铸炸药的自动化装药。

为此,借助立式挤注的方式来消除螺杆因水平放置导致的末端翘曲问题,以此实现弹体内药浆的连续装填。同时,针对药浆本身较推进剂药料更小的黏滞力,还在分析药浆流变特性和热性能的基础上,仿真分析重力作用下药浆流场特征参数的变化规律,并以此作为安全判据,为后续炸药挤注装置的结构优化与工艺设定提供数据参考和理论指导。

## 1 物性参数表征

### 1.1 实验原料

铝粉(易制爆),纯度99.5%,粒径1~3 μm,上海阿拉丁生化科技股份有限公司;乙烯-醋酸乙烯共聚物(EVA),EVA28400,上海海域化工有限公司;己二酸二辛脂(DOA),工业级,上海麦克林生化科技有限公司;端羟基聚丁二烯(HTPB),II型,上海麦克林生化科技有限公司;聚氯乙烯(PVC),SG-5,荏平

信发聚氯乙烯有限公司;硫酸钠,分析纯,国药集团化学试剂有限公司。

### 1.2 样品制备

聚合物基熔铸炸药主要由熔融载体以及固相颗粒两部分组成。其中,考虑到实验安全性,在典型聚合物基熔铸炸药配方的基础上,采用PVC、硫酸钠代替炸药中的RDX、HMX等硝铵炸药颗粒,EVA、DOA和HTPB充当炸药载体部分。

在制备过程中,首先,按照配方中各组分比例称取适量的EVA、DOA和HTPB放入烧杯中,并将烧杯放置在已预热至(100±0.5)℃的油浴锅中搅拌40 min。其次,在载体充分混合的基础上,依次称取硫酸钠、PVC及金属铝粉固相颗粒添加到熔融载体中,并在高温环境下搅拌70 min,直至填料分散均匀。最后,取样并进行后续的流变性能及热性能表征分析。

样品具体制备流程及配方如图1和表1所示。

表1 聚合物基熔铸炸药代料样品配方(质量分数)

Tab.1 Formulas of substitute sample of polymer based melt-cast explosive

样品编号	固相填料			液相载体
	硫酸钠	PVC	铝粉	
S-75	34.1	15.3	25.6	25.0
S-80	36.4	16.4	27.2	20.0
S-85	38.6	17.4	29.0	15.0

### 1.3 表征分析

#### 1.3.1 流变性能

将上述制备的样品压制成适用于测试要求的圆形试样。采用马尔文Kinexus旋转流变仪在100℃下对其进行动态频率扫描以表征流变特性。其中,转子平板直径为40 mm,两板间距为2 mm,测试频率为1~16 Hz。

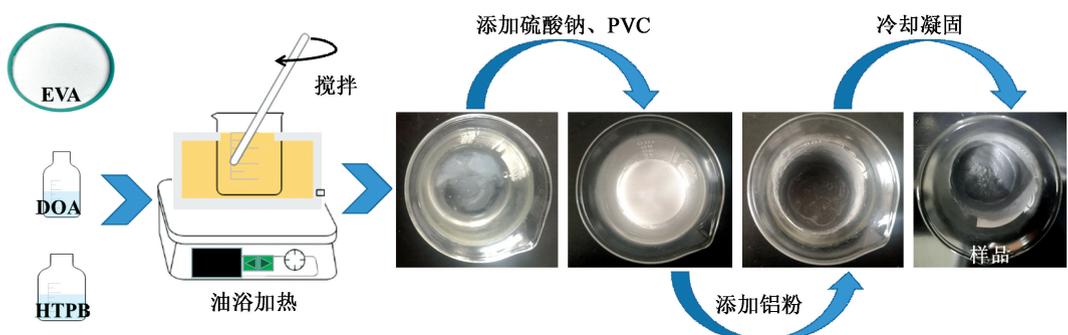


图1 聚合物基熔铸炸药代料样品的制备流程

Fig.1 Preparation process of substitute sample of polymer based melt-cast explosive

### 1.3.2 热性能

为了研究物料的热性能,采用梅特勒-托利多 DSC3 + 差示扫描量热仪在氮气环境下测试样品,并对其升、降温过程进行分析。在测试过程中,以 10 °C/min 的升温速率将坩埚内的样品从 40 °C 升至 250 °C;恒温 1 min 以消除热历史;再以同样速率降至室温。同时,记录其温度变化曲线。

### 1.4 流变模型拟合

在制备过程中,固体颗粒的添加会增强熔融载体内部填料间的内摩擦,进而大幅提高药浆体系的黏稠性及其混合过程中的搅拌阻力,但继续搅拌会改善药浆的流动性。

从图 2 可以看出,随着剪切速率  $\dot{\gamma}$  的提高,不同固含量下药浆的黏度  $\eta$  均出现剪切变稀行为,呈现出典型的假塑性流体特征。随着固含量的提高,黏度变化程度更剧烈,其中, S-85 样品的药浆剪切黏度随着剪切速率的增大而呈断崖式下跌趋势。这主要是由于填料的过度添加,绝大部分载体被约束在颗粒团聚体之间,使得载体由连续相逐渐变得不那么连续,难以润滑颗粒造成的。但随着螺杆剪切作用的加剧,药浆内部团聚的颗粒簇逐渐被打开,并促使其内部液相载体的游离析出,从而借助液相载体的自润滑层作用有效减少颗粒间的内摩擦力,促使药浆黏度的大幅降低<sup>[10]</sup>。此外,流动过程中螺杆的剪切作用还有助于颗粒的有序排列,使得沿流体运动方向能获得较高的排列规整性,进一步降低颗粒间的摩擦概率以及药浆的表观黏度<sup>[11]</sup>。

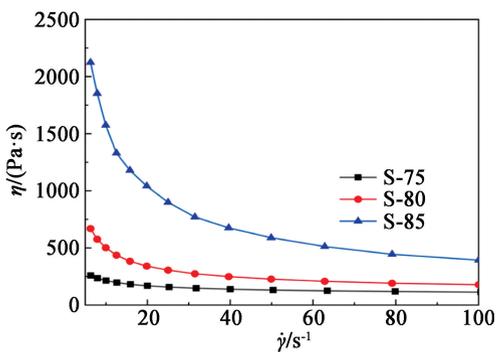


图 2 聚合物基熔铸炸药代料样品的黏度变化曲线  
Fig. 2 Viscosity change curves of substitute sample of polymer based melt-cast explosive

同时,在调研不同类型流体本构模型的基础上<sup>[12]</sup>,采用 Origin 软件对药浆的流变测试结果进行曲线拟合,具体结果如表 2 所示。表 2 中: $K$  为比例常数(稠度系数); $n$  为流动指数(非牛顿指数); $\eta_0$  为零切黏度, Pa · s; $\lambda$  为松弛时间, s; $m$  为 Cross 模型指数。

表 2 不同流变模型曲线的拟合结果

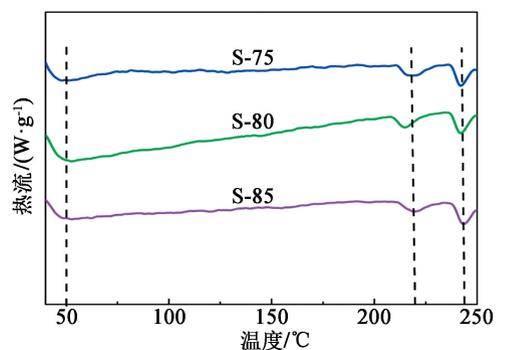
Tab. 2 Curve fitting results of different rheological models

流变模型	拟合参数	拟合度/%
Power 模型	$K = 650.47; n = 0.54$	98.17
Bird-Carreau 模型	$\eta_0 = 12\ 602.39; \lambda = 640.76; n = 0.54$	98.48
Cross 模型	$\eta_0 = 12\ 602.39; \lambda = 492.34; m = 0.47$	98.42
Modified Cross 模型	$\eta_0 = 12\ 602.39; \lambda = 637.64; m = 0.46$	98.55

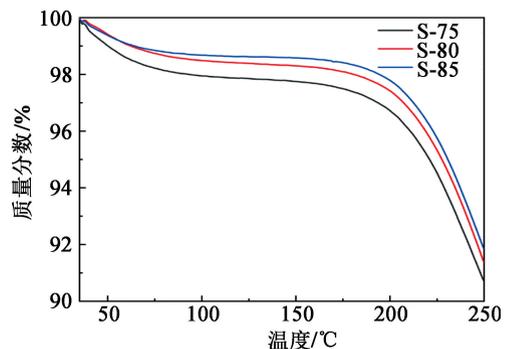
从表 2 中数据可以看出:4 种模型拟合度均在 98% 以上;相较于 Power、Bird-Carreau、Cross 模型, Modified Cross 模型的拟合度最高,可以更准确地描述药浆的流变特征。故选择该模型作为配方药浆的流变本构模型进行后续仿真研究。

### 1.5 热力学参数分析

从图 3 (a) 中 DSC 曲线可以看出,不同固含量下,药浆在 50、218 °C 及 240 °C 左右均存在明显的吸热峰,分别代表着 EVA 的熔化以及 PVC 与 EVA 的热解。此外,从图 3 (b) 中可以看出,随着温度的升



(a) DSC 曲线



(b) TG 曲线

图 3 聚合物基熔铸炸药代料的热性能特征

Fig. 3 Thermal performance characteristics of substitute sample of polymer based melt-cast explosive

高,不同配方比例的药浆均存在不同程度的质量损失,失重过程主要分为两个阶段。首先,当药浆升温至90℃时,由于载体EVA中残留的共聚单体受热气化析出,从而造成药浆1%~2%的质量损失率;且固含量越高,质量损失越小。接下来,药浆的热失重曲线较为平缓且无明显降幅,这表明其质量在升温过程中基本保持不变。但当药浆温度超过170℃后,由于配方中PVC、EVA的热解行为,药浆质量呈断崖式下跌,这与DSC曲线上的后两个分解吸热峰相对应。

## 2 流体仿真研究

### 2.1 螺杆构型设计

在横向挤注过程中,具有悬臂梁结构的螺杆末端容易受自重影响而发生变形,进而与机筒壁面形成刮蹭等安全隐患。为此,采用立式挤注工艺来降低螺杆的径向形变程度,避免重力作用下的末端翘曲现象。网格质量及构型参数如图4和表3所示。螺杆和流道部分分别采用非规则四面体网格、六面体网格进行网格离散。划分后,螺杆结构网格数为252 190,流道网格数为624 000。

### 2.2 边界条件设置

过高的转速容易导致流道内局部高温耗散区的

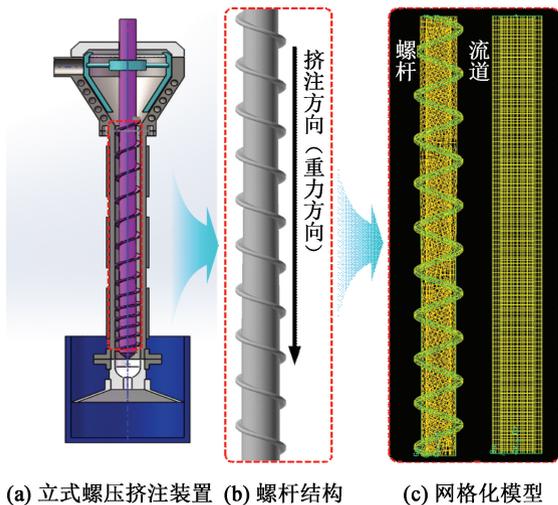


图4 几何模型

Fig.4 Geometric model

形成。选取螺杆转速10、20、30 r/min来探究药浆流场特征参数的变化规律及其在流道内的安全特性。同时,考虑到药浆的熔融特性参数,挤注仿真过程中边界条件的设定情况如表4所示。 $f_n$ 为施加法向力; $f_s$ 为施加切向力; $v_n$ 为法向速度; $v_s$ 为切向速度。此外,为了简化计算步骤、提高仿真效率,还在考虑药浆流动特性的基础上提出以下假设来简化流场模型:药浆不可压缩且流动充分发展,壁面无滑移并考虑流体的惯性力及重力。

表4 边界条件设置

Tab.4 Boundary conditions setting

位置	边界条件
流道入口	$f_n = f_s = 0$
流道出口	$f_n = 1\ 000\ 000, f_s = 0$
内壁面	$v_n = f_s = 0$
外壁面	$v_n = v_s = 0$

## 3 仿真结果及分析

### 3.1 剪切速率分布

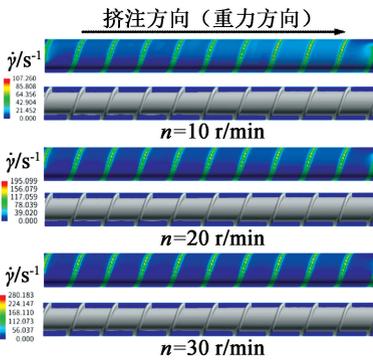
在挤注过程中,较高的螺杆转速有助于提高药浆的挤注效率、缩短弹药的装药周期,然而这也会导致较大的剪切作用,并增加流体的内摩擦力及内摩擦热。为了平衡制品产量与工艺安全,模拟了不同螺杆转速 $n$ 下流道内的药浆剪切速率 $\dot{\gamma}$ ,以探索其分布规律,变化情况如图5所示。

从图5可以看出,不同转速条件下,药浆的剪切速率均沿轴向呈周期性变化,最大值 $\dot{\gamma}_m$ 随着螺杆转速 $n$ 的提高而呈线性递增,且螺棱间隙处的剪切速率要远高于螺槽内的药浆。为此,进一步对间隙处同一位置进行取样分析,获得如图5(b)所示的流场轴向剪切速率变化曲线,发现剪切速率的峰值在初期(轴向距离 $l=0\sim 0.15\text{ m}$ )随药浆挤注而呈递增趋势。这主要是由于螺杆的剪切挤压作用使得药浆内部相互缠结的分子链被逐渐打开,从而造成分子间阻滞作用的降低以及药浆流动性的提高,加剧了螺杆的剪切作用。此外,螺杆的等距变槽深结构特点使得药浆在流动过程中还会因为流道容积压缩而

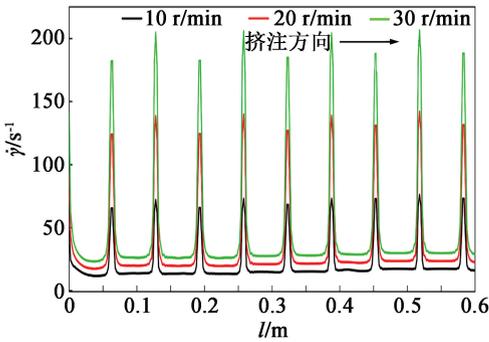
表3 螺杆结构参数

Tab.3 Parameters of screw structure

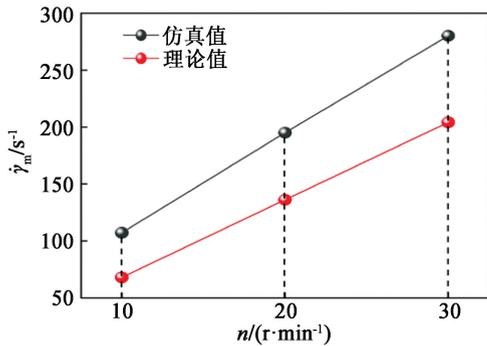
螺杆长度/ mm	螺杆外径/ mm	螺棱/ mm	螺距/ mm	压缩比	机筒内径/ mm	间隙/ mm	断面形状	药浆温度/ ℃	螺杆转速/ ( $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ )	重力加速度/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )
650	65	6	65	1.2	66	0.5	矩形	100	10,20,30	9.8



(a) 分布云图



(b) 轴向变化曲线



(c) 最大剪切速率变化曲线

图 5 药浆剪切速率的变化规律

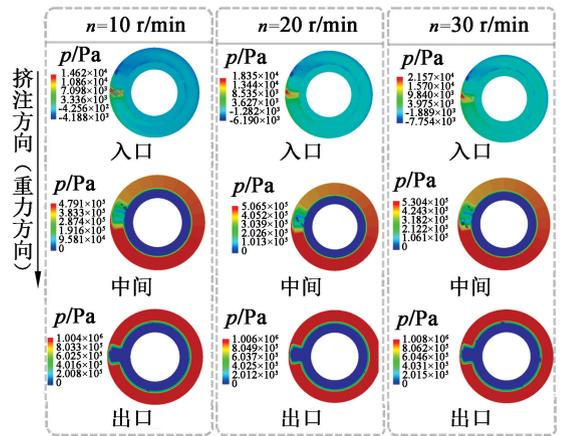
Fig. 5 Variation law of shear rate of slurry

承受一定的挤压作用,进而使其实际流速要高于理论值<sup>[6]</sup>。同时,理论剪切速率在计算时也忽略了槽深变化的影响,难以充分考虑渐变螺杆中药浆压缩引发的流速增大现象,故导致图 5(c) 中的理论计算值远低于仿真结果。

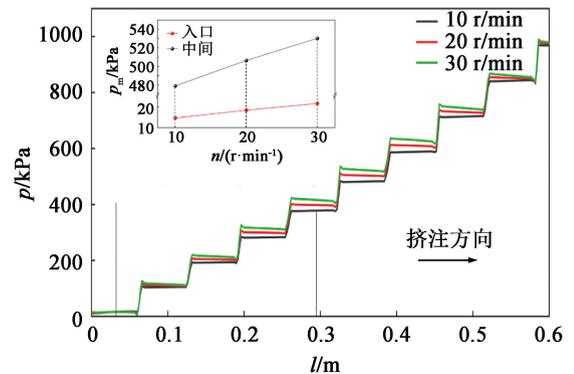
### 3.2 流场压力分布

在装药过程中,过大的挤压负荷容易刺激到药浆内部高感度炸药组分,引发炸药的热解,从而产生安全隐患。而适当的压力有助于排出挥发气体、减少孔洞缺陷,故在机筒末端安装收敛模具以满足更高的装药密度需求。其中,Sun 等<sup>[13]</sup>发现借助加压凝固工艺,通过施加 0.03 ~ 35.00 MPa 的压力可以

有效改善 TNT 基熔铸炸药的装药质量;金大勇等<sup>[14]</sup>采用压滤工艺改善 DNAN 基熔铸炸药的装药质量,发现较高的本质安全性使得具有 75% (固体质量分数) HMX 的 MCX-D 炸药在 1~5 MPa 压力作用下仍保持其工艺安全性。同时,前期实验表明,填充有硝胺炸药的聚合物基熔铸炸药在捏合搅拌过程中可以承受 1~2 MPa 的挤压作用。故设置 1 MPa 的背压以表征收敛模具的建压作用,在减少药料内部缺陷的同时,确保其工艺安全性。图 6 为在不同螺杆转速下的压力分布。



(a) 压力分布云图



(b) 压力轴向变化曲线

图 6 流场压力的分布规律

Fig. 6 Distribution law of flow field pressure

从图 6 可以看出,在输送过程中随着螺杆的转动,流道内的药料的内部压力沿轴向方向呈递增趋势变化,并在机筒下方的出口处达到最大值。这主要是由于药浆过低的黏滞力使其在纵向挤压过程中易受重力影响而向下渗流,从而加剧出口端药料的挤压作用,并促使机头高压区的形成。同时,螺杆转速越高,输送能力越强,这也加剧了药料间的挤压作用,从而使得中间段处的药料压力显著递增,与前人所做实验结果相吻合<sup>[15]</sup>。

### 3.3 药浆黏度分布

不同螺杆转速下药浆的黏度分布情况见图 7。

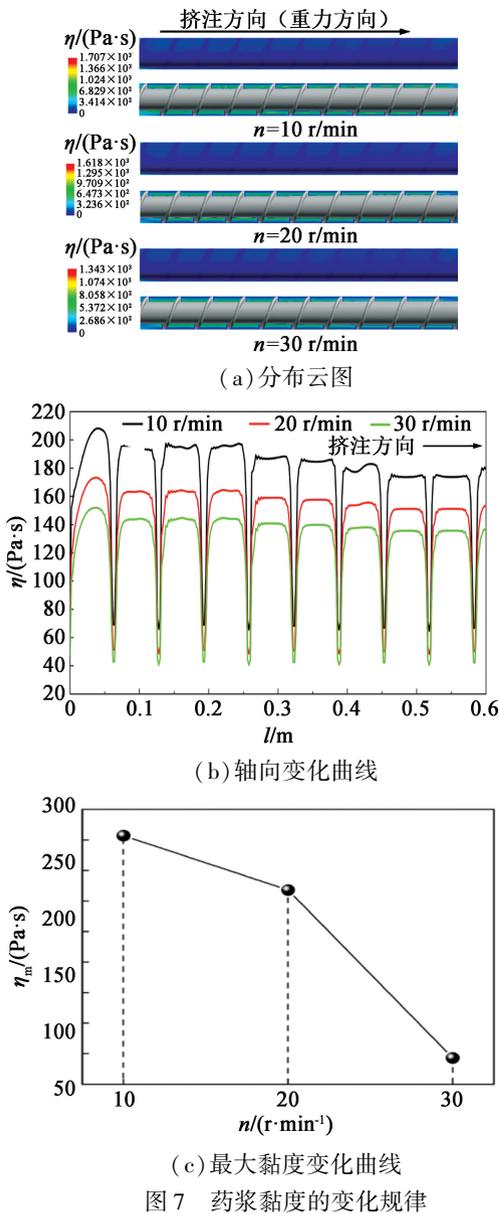


图7 药浆黏度的变化规律

Fig. 7 Variation law of viscosity of slurry

从图7(a)中可以看出,螺棱附近的云图颜色较深,且向着螺槽芯部逐渐变浅,这表明螺棱的强剪切作用以及药浆的剪切变稀特性使得螺槽内部低剪切区的药浆黏度远高于靠近高剪切螺棱间隙处的药浆黏度,且其分布规律正好与剪切速率相反。图7(b)中的轴向黏度变化曲线也表明:靠近螺槽底部位置的药浆所受剪切作用较弱、黏度较高;而螺棱间隙处剪切速率最大,药浆黏度反而降至最低。此外,螺棱转速的提高会增大流场内的剪切速率的最小值,加剧团聚体的破碎,提高颗粒的排列规整性,进而改善药浆的流动性,并使药浆最大黏度 $\eta_m$ 有所降低。

### 3.4 黏性耗散热分布

在挤注过程中,温度是影响工艺安全的重要因素之一,而螺棱的剪切作用又极易产生过量的耗散热并引发流道内高温热点的形成。模拟了不同螺棱

转速下药浆的黏性耗散热 $Q$ 的分布规律,变化情况如图8所示。

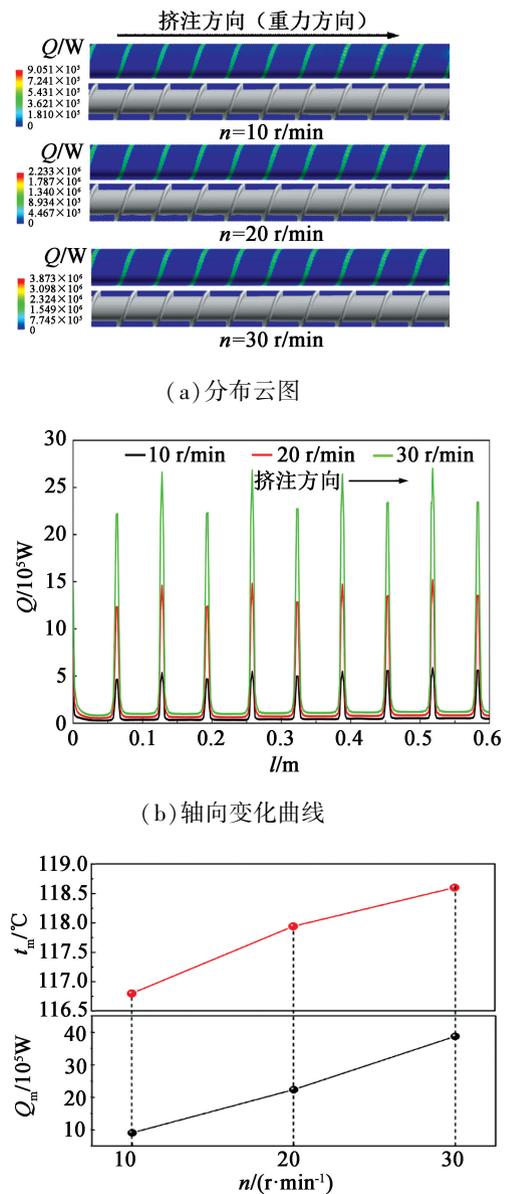


图8 药浆黏性耗散热变化规律

Fig. 8 Variation laws of viscous heat dissipation of slurry

从图8可以看出,药浆耗散热的分布规律与黏度、剪切速率类似,均沿轴向呈周期性变化且在螺棱间隙处取得峰值。这主要是因为螺棱剪切作用造成的药浆耗散热正比于剪切速率和剪切应力的乘积,而剪切应力又等于黏度与剪切速率的乘积,故药浆在螺棱剪切过程中生成的摩擦热正比于剪切速率的平方。

同时,受耗散热的影响,流域内药浆的最大温度 $t_m$ 也随之增大。在药浆初始温度为100℃时,随着螺棱转速提高到30 r/min,其温度峰值增至118.6℃,升温幅度也随之提高到18.6℃。鉴于较大的升

温幅度容易引发硝胺炸药等固相填料的热解行为,需要通过调节螺杆转速、增大螺棱间隙等手段降低挤注过程中药料的耗散热,避免由此引发的热安全性风险。其中,通过芯部调温的形式调整螺杆温度,可以有效控制机筒内的药料温差,在平衡热量分布、改善产品质量方面更具优势<sup>[16]</sup>。

### 3.5 不同螺杆转速下的运动过程分析

挤注效率是表征装药周期以及工艺产能的重要指标。通过选取某一转速下每个螺棱间隙处的径向数据进行加权平均,得到螺棱间隙处药浆的平均速率  $\bar{v}_1$ 。同样,用该处理方法得到螺槽处药浆的平均速率  $\bar{v}_2$ ,以此来分析螺杆转速对药浆运动过程的影响。结果如图 9 所示。

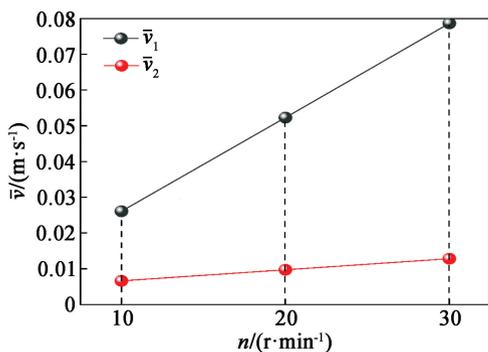


图 9 药浆平均速率的变化曲线

Fig. 9 Variation curves of average velocity of slurry

从图 9 可以看出,随着螺杆转速的增大,螺杆不同部位药浆的平均速率均呈线性增大;相较于螺槽处,螺棱间隙处药浆的平均速率受螺杆转速的影响更显著,增幅更大,这与图 5 剪切速率的变化规律相符。螺杆内药浆平均速率的增大,能够有效地缩短装药周期,提高螺压工艺的挤注效率。因此,实际生产过程中,可以通过适当增大螺杆转速,增大流道内药浆的流动速率,实现含能药浆产能的提高。

## 4 结论

1) 药浆的黏度随着剪切速率的增大而降低,且随着固含量的提高,黏度变化程度更剧烈,需要在更大的剪切速率下趋于稳定。而液相载体的润滑作用及颗粒在剪切过程中的取向排列,均能促使药浆黏度降低。

2) 随着螺杆转速增大,剪切速率随之增大,最大压力和进、出口压差增大,轴向压力呈阶梯状递增且增幅随之增大,螺杆的建压能力得到增强,有助于提高成品质量。基于药浆的剪切变稀特性及流场内

最小剪切速率的增大,药浆流动性增大,最大黏度降低,黏度变化表现出与剪切速率相反的规律。

3) 黏性耗散热受剪切速率影响明显。随着螺杆转速的增大,黏性耗散热随之增大,且其对升温幅度提升较大,易形成局部热区,需通过芯部调温等形式对药浆温度进行控制。药浆平均速率线性增大,且螺棱间隙处增幅显著,可以适当调节螺杆的转速来提高挤注产量。

## 参 考 文 献

- [1] 张百磊,常双君,欧亚鹏. 浇注钝感 PBX 的研究进展及发展趋势[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2015, 13(1): 42-45, 64.  
ZHANG B L, CHANG S J, OU Y P. Research progress and development trend of casting desensitized PBX[J]. Chemical Propellants & Polymeric Materials, 2015, 13(1): 42-45, 64.
- [2] 胡雪垚,沈飞,肖玮,等. 被动围压下浇注 PBX 炸药的动态力学性能研究[J]. 爆破器材, 2022, 51(1): 25-28, 34.  
HU X Y, SHEN F, XIAO W, et al. Dynamic mechanical properties of a cast PBX explosive under passive confinement[J]. Explosive Materials, 2022, 51(1): 25-28, 34.
- [3] 陈春燕,郭昕,孙培培,等. 一种高粘态聚合物基熔铸炸药粘度的测试方法; CN111006969A [P]. 2020-04-14.
- [4] 郭昕,陈春燕,孙培培,等. 一种聚合物基熔铸炸药; CN111039733A [P]. 2020-04-21.
- [5] 张蒙蒙,罗一鸣,王红星,等. 聚合物基与传统熔铸载体炸药的工艺性差异研究[J]. 爆破器材, 2021, 50(3): 29-34.  
ZHANG M M, LUO Y M, WANG H X, et al. Study on technological difference between polymer based explosive and traditional melt-cast carrier explosive[J]. Explosive Materials, 2021, 50(3): 29-34.
- [6] 李敏,薛平,王江宁,等. 典型含能材料单螺杆压伸过程模拟分析[J]. 固体火箭技术, 2020, 43(5): 594-601.  
LI M, XUE P, WANG J N, et al. Simulation analysis for single-screw extrusion process of typical energetic material [J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2020, 43(5): 594-601.
- [7] KOWALCZYK J E, MALIK M, KALYON D M, et al. Safety in design and manufacturing of extruders used for the continuous processing of energetic formulations[J]. Journal of Energetic Materials, 2007, 25(4): 247-271.

- [8] 李雪珍, 薛平, 宋秀铎, 等. 含能材料加工过程模拟仿真的研究进展[J]. 塑料工业, 2021, 49(1): 1-6, 12.  
LI X Z, XUE P, SONG X D, et al. Research progress in numerical simulation of energetic material processing[J]. China Plastics Industry, 2021, 49(1): 1-6, 12.
- [9] 李敏. 含能材料单螺杆压伸过程仿真模拟研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2020.  
LI M. Simulation research on the single-screw extrusion process of energetic materials [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2020.
- [10] 孙业斌, 惠君明, 曹欣茂. 军用混合炸药[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1995.
- [11] CHINESTA F, AUSIAS G. Rheology of non-spherical particle suspensions[M]. ISTE Press-Elsevier, 2016.
- [12] 马秀清, 金律, 张亚军, 等. 固体推进剂同向双螺杆元件混合性能模拟[J]. 中国塑料, 2018, 32(8): 131-136.  
MA X Q, JIN L, ZHANG Y J, et al. Simulation of mixing performance of co-rotating twin-screw elements for solid propellants[J]. China Plastics, 2018, 32(8): 131-136.
- [13] SUN D W, GARIMELLA S V, SINGH S, et al. Numerical and experimental investigation of the meltcasting of explosives[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2005, 30(5): 369-380.
- [14] 金大勇, 王亲会, 蒋秋黎, 等. 一种DNAN基熔铸炸药压滤装药工艺安全性分析[J]. 爆破器材, 2015, 44(3): 16-21.  
JIN D Y, WANG Q H, JIANG Q L, et al. Safety analysis for filter press process of a DNAN based melt-cast explosive[J]. Explosive Materials, 2015, 44(3): 16-21.
- [15] 王建华, 吴大鸣, 许红, 等. 单螺杆挤出各区段数学模型的衔接方法研究[J]. 塑料, 2002, 31(6): 30-34.  
WANG J H, WU D M, XU H, et al. Linking-up between different stages of the single screw extrusion model [J]. Plastics, 2002, 31(6): 30-34.
- [16] 杨忠久, 王瑞清. 锥形双螺杆挤出机自动控制原理与故障处理[J]. 门窗, 2009(10): 40-42.

## 版 权 声 明

1、本刊对发表的文章拥有出版电子版、网络版版权,并拥有与其他网站交换信息的权利。本刊支付的稿酬已包含以上费用。

2、本刊文章版权所有,未经书面许可,不得以任何形式转载。

《爆破器材》编辑部