

文章编号: 1003-1480(2024)02-0058-07

固体推进剂的流变性能及工艺仿真研究进展

武宇恒, 蔚红建, 付小龙

(西安近代化学研究所, 陕西 西安, 710065)

摘要: 固体推进剂药浆是一种高固含量悬浮液, 其流变性能十分复杂。基于此, 介绍了用于描述固体推进剂流变性能的非牛顿本构方程, 回顾了近年来固体推进剂混合、浇铸、包覆工艺过程仿真的研究进展, 列举出目前推进剂工艺仿真研究中存在的问题和不足, 提出进一步开展混合工艺过程中固体推进剂流变性能仿真以及固体推进剂全工艺过程仿真的建议, 以期对固体推进剂工艺设计及参数优化提供参考。

关键词: 固体推进剂; 本构模型; 流变性能; 制备工艺; 仿真

中图分类号: TJ55 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1003-1480.2024.02.011

Research Advances in Rheological Properties and Process Simulation of Solid Propellants

WU Yu-heng, YU Hong-jian, FU Xiao-long

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

Abstract: Solid propellant slurry is a high solid content suspension, and its rheological properties are very complex. Based on this, the non Newtonian constitutive equations used to describe the rheological properties of solid propellants were introduced. The research progress of the simulation of the solid propellants mixing, casting and coating process in recent years was reviewed. The problems and shortcomings in the current simulation research of propellant processes were listed, and suggestions were proposed for further simulation of the rheological properties of solid propellants in the mixing process and the entire process simulation of solid propellants, in order to provide reference for solid propellant process design and parameter optimization.

Key words: Solid propellant; Constitutive model; Rheological properties; Preparation process; Simulation

固体推进剂在国防领域应用广泛, 是各类火箭、导弹的动力来源, 其性能优劣决定了火箭或导弹能否发射成功^[1], 而固体推进剂的性能在很大程度上取决于制备工艺。固体推进剂的制备工艺繁多, 包括螺旋压伸工艺、浇铸工艺和粒铸工艺等。其中, 浇铸工艺可以制备出大尺寸、形状复杂的药柱, 并且其配方适用性广, 可用于生产多种性能的推进剂, 如壳体黏结推进剂、自由装填推进剂等。浇铸工艺是将高粘度液态粘合剂与氧化剂、金属燃烧剂经过一段时间的充分混合后, 再加入增塑剂和固化剂等, 然后对药浆进行

浇铸和固化, 整个工艺过程包括混合、浇铸、固化、脱模及包覆等。由于药浆的复杂流变性, 浇铸工艺的设计十分复杂^[2-3], 一旦制备过程中出现孔洞、气泡或流平等问题, 都可能导致推进剂装药失败, 甚至引发安全事故。因此, 对固体推进剂浇铸工艺过程进行仿真, 研究浇铸工艺过程中药浆流变性能的变化, 对其工艺设计及参数优化具有重要意义。

固体推进剂药浆流变性能一般受推进剂配方组成和工艺条件两方面的影响。配方组成是决定推进剂药浆流变特性的主要因素, 一般包括粘合剂体系、固

收稿日期: 2023-09-28

作者简介: 武宇恒 (1999-), 男, 在读硕士研究生, 主要从事固体推进剂工艺技术研究。

通讯作者: 付小龙 (1982-), 男, 研究员, 主要从事固体推进剂仿真技术研究。

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 21975150)。

引用本文: 武宇恒, 蔚红建, 付小龙. 固体推进剂的流变性能及工艺仿真研究进展[J]. 火工品, 2024(2): 58-64.

体填料与功能助剂。其中,粘合剂的流变特性决定了推进剂药浆的基本流变性^[4];固体填料包括氧化剂与金属燃料,氧化剂一般占配方含量的50%以上,其含量、粒度、形状^[5-7]和表面性质对推进剂药浆的流变性能有重要影响^[8];此外,为了满足工艺性能、力学性能等技术指标,复合固体推进剂配方中还要加入增塑剂、防老剂、偶联剂、工艺助剂等各种功能组分^[9],这些功能组分对推进剂药浆流变性也存在影响^[10]。工艺条件一般包括混合温度、时间、转速、加料顺序等,这些因素都会对推进剂药浆的流变性能产生影响。药浆黏度随着混合温度升高而降低,流动性变好;增加混合机转速和延长混合时间也有相似效果。针对这些影响因素,可以采用流变学手段对药浆进行表征,从而优化推进剂配方与工艺参数,提高药浆流变性能。

本文总结了用于描述固体推进剂流变特性的非牛顿本构模型,回顾了近年来固体推进剂混合、浇铸、包覆工艺过程仿真的研究进展,列举出目前仿真研究中存在的问题和不足,并提出下一步研究建议,以期对固体推进剂工艺设计及参数优化提供参考。

1 固体推进剂非牛顿流变本构模型研究进展

固体推进剂药浆的流动性主要源于高分子聚合物粘合剂,具有高分子聚物流变学的特性。同时,为了提高能量,固体推进剂加入了高达70%~90%的固体颗粒组分,该组分与液体粘合剂混合均匀,制成多相流体,具有高固含量悬浮液流变学的特性。此外,推进剂药浆需要经过固化反应,使高分子粘合剂变成网状结构,制成具有固定形状和所需机械力学性能的药柱。因此,推进剂流变学是涉及聚物流变学、高固含量悬浮液流变学和化学流变学的一个流变领域^[11],是一个非常特殊和复杂的流变学体系。为了在仿真过程中较好的描述固体推进剂的流变特性,通常对其流变曲线进行拟合,得出推进剂药浆的非牛顿本构模型。用于描述高固含量固体推进剂流变性能的非牛顿本构模型主要包括 Ostwald 幂律模型(公式(1)), Modified-Bingham 模型(公式(2)), Herschel-Bulkley

模型(公式(3)), Casson 模型(公式(4)), Cross 模型(公式(5))及 Carreau 模型(公式(6))^[12-17]:

$$\tau = K\dot{\gamma}^n \quad (1)$$

$$\tau = \tau_0 + \eta\dot{\gamma} + c\dot{\gamma}^2 \quad (2)$$

$$\tau = \tau_0 + K\dot{\gamma}^n \quad (3)$$

$$\sqrt{\tau} = \sqrt{\tau_0} + K\sqrt{\dot{\gamma}} \quad (4)$$

$$\frac{\eta - \eta_\infty}{\eta_0 - \eta_\infty} = \left[1 + (\lambda\dot{\gamma})^{1-n}\right]^{-1} \quad (5)$$

$$\frac{\eta - \eta_\infty}{\eta_0 - \eta_\infty} = \left[1 + (\lambda\dot{\gamma})^2\right]^{\frac{n-1}{2}} \quad (6)$$

式(1)~(6)中: τ 为剪切应力,Pa; K 为粘度系数; $\dot{\gamma}$ 为剪切速率, s^{-1} ; n 为非牛顿指数; τ_0 为屈服应力,Pa; c 为回归系数; λ 为松弛时间常数; η 为粘度,Pa·s; η_0 为零剪切粘度,Pa·s; η_∞ 为极限剪切粘度,Pa·s。

Lade 等^[18]研究了纳米铝颗粒对端羟基聚丁二烯(HTPB)推进剂预混料流变学的影响,并对流变模型的适用性进行了比较,研究表明除 Casson 模型外,Ostwald 幂律模型、Modified-Bingham 模型、Herschel-Bulkley 和 Cross 模型均能预测 HTPB 推进剂的流变性能,且相关性强、误差小,其中,Cross 模型的预测效果最好。流变模型的适用性排名情况如表1所示。

表1 流变模型适用性排名

Tab.1 Applicability ranking of rheological models

w 纳米铝颗粒 /%	Ostwald	Modified-Bingham	Herschel-Bulkley	Casson	Cross
0	4	2	3	5	1
2	4	2	3	5	1
4	4	3	2	5	1
6	3	4	2	5	1

内蒙古工业大学候磊^[12]采用 Anton Paar MCR 102 型流变仪测试固体火箭发动机推进剂剪切粘度,并采用 1stOpt 拟合软件对 Ostwald 幂律模型、Carreau 模型和 Cross 模型的一般形式进行数据拟合及相关性分析,拟合结果如图1所示。由图1可见,推进剂药浆剪切粘度的测试数据与 Ostwald 幂律模型、Carreau 模型和 Cross 模型均具有高相关性。但是,由于 Carreau 模型和 Cross 模型中包含零剪切粘度与极限剪切粘度这2个物理量,而这2个物理量无法通过试验方法测得,因此,采用 Carreau 模型和 Cross 模型预测推进剂剪切粘度存在一定局限性。在推进剂流变本构模型

拟合时，应优先选用 Ostwald 幂律模型、Modified-Bingham 模型、Herschel-Bulkley 模型及 Casson 模型，再进行适用性比较。

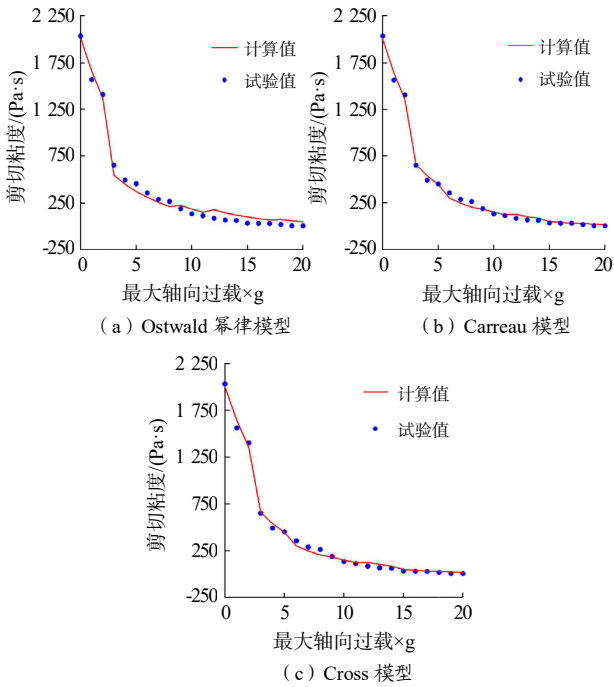


图1 不同非牛顿本构模型拟合结果

Fig.1 Non-Newtonian constitutive model fitting results

由于推进剂配方中存在固化剂^[19]，因此在浇铸过程中伴随着推进剂药浆固化反应的进行，药浆的流变性能会发生极大变化。为了更好的表征推进剂药浆在浇铸工艺过程中的流变学特征，江晓瑞等^[20]对 Herschel-Bulkley 模型进行修正，引入了时间因素，拟合结果如式(7)~(10)所示：

$$\sigma - \sigma_y(t) = K(t)\dot{\gamma}^{n(t)} \quad (7)$$

$$\sigma_y(t) = 577.1e^{0.232 \cdot 3t} \quad (8)$$

$$K(t) = 19.2t^2 + 22.8t + 307.9 \quad (9)$$

$$n(t) = -0.03066t + 0.5348 \quad (10)$$

式(7)~(10)中： σ 为剪切应力，Pa； $\sigma_y(t)$ 为屈服应力随时间变化的函数； $K(t)$ 为粘度系数随时间变化的函数； $n(t)$ 为非牛顿指数随时间变化的函数； t 为时间，h。

引入时间变量后，将各参数表示为时间的函数，可以更加完整地描述浇铸过程中推进剂流变性能的变化。随着固化时间增加，推进剂在固化过程中的非牛顿性越来越强。

综上，固体推进剂非牛顿流变本构模型的适用性

已有一定研究基础，但是，由于推进剂配方组成及浇铸工艺的复杂性，其本构模型还需进一步修正，如引入弹性项，使其更加精确，从而更好地描述药浆的流动状态，使仿真更加贴合实际。

2 固体推进剂工艺仿真研究进展

2.1 固体推进剂混合工艺仿真研究进展

2.1.1 混合工艺及设备

固体推进剂制备过程中最危险的工艺是混合工艺。在混合过程中，粘合剂、大量成团的固体颗粒与其它组分一起交互作用，在物料内部产生巨大粘阻力，增大了混合难度^[21-22]。此外，固体推进剂中的组分大多属于易燃易爆的材料^[23]，对混合设备的安全性要求很高。根据混合机的结构和功能不同，固体推进剂的混合设备可分为有浆间歇式、有浆连续式和无浆式混合3类^[24]。有浆间歇式混合工艺早期主要采用卧式混合机，但由于卧式混合机容易产生过度摩擦，出现安全事故，目前已被立式混合机所取代。有浆连续式混合工艺具有柔性化、连续化、效率高、成本低等优点，其混合设备包括双螺杆连续混合机、基于拉伸流变^[25]的连续混合系统、多腔混合机和蠕动混合机。无浆混合工艺是基于声共振混合机的一种全新的混合技术，具有混合效率高、时间短、安全性高等特点，近几年应用在推进剂^[26]、PBX炸药^[27]、共晶炸药等领域。实际混合过程中，通常采用结构特殊的混合设备，或者多台不同类型混合设备相结合来完成混合，并通过仿真优化混合工艺参数，以降低危险性。

2.1.2 混合工艺仿真研究进展

单螺杆成型技术具有完善的理论基础和广泛的实践应用，是当前含能材料加工中较为成熟的技术之一^[28]。国内外一直非常重视对单螺杆技术的研究，针对含能材料的单螺杆挤出过程的仿真是其中一个重要的研究方向。南京理工大学钟婷婷^[29]利用 Polyflow 软件对双基推进剂单螺杆螺压挤出成型工艺进行仿真，发现螺杆转速和螺杆处的温度对成型过程影响很大。增大螺杆转速后，物料温度、剪切速率、压力及速度均会增大，并且螺杆转速的影响在加料段及均化

段更为明显。

双螺杆连续挤出工艺由于混合效率高、安全性高,受到了广泛重视。北京化工大学马秀清等^[30]设计了4种用于加工固体推进剂的双螺杆元件,如图2所示。通过仿真软件 Ansys Polyflow 对4种螺杆元件的综合混合性能进行仿真,对比发现 KB45°/12/60、S120/60 这2种元件具有较好的综合混合性能,有利于提高固体推进剂在双螺杆挤出机中的混合效果。此外,通过对混合过程进行三维仿真,发现较薄厚度以及错列角为60°和90°的捏合盘元件安全性较高。该研究可为双螺杆挤出机的螺杆选型设计提供参考。

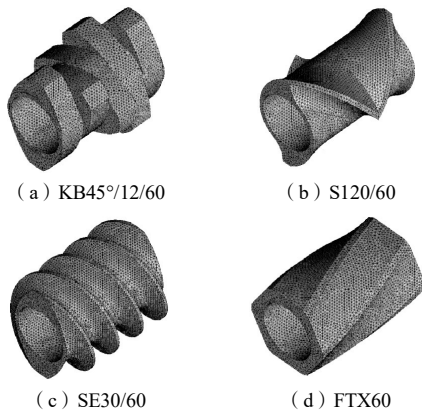


图2 螺杆元件几何模型^[30]

Fig.2 Geometric models of screw elements

海军航空工程学院姜爱民等^[31]对固体推进剂药浆在立式捏合机中的搅拌过程进行仿真,结合网格叠加技术和加密技术,实现了药浆搅拌可视化,获取了药浆在搅拌过程中的剪切应力、剪切粘度和速度等参数,得到了温度场、压力场、应力场云图,如图3所示。该研究可以为固体推进剂药浆在捏合机中的搅拌过程提供现象预测与理论参考。

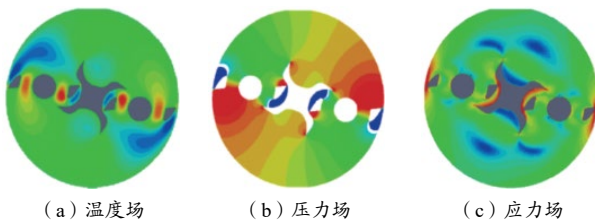


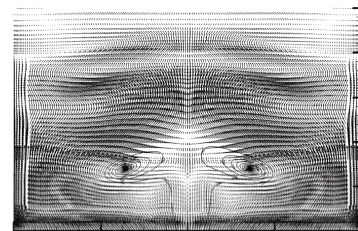
图3 立式混合机搅拌过程仿真结果^[31]

Fig.3 Simulation results of vertical mixer mixing process

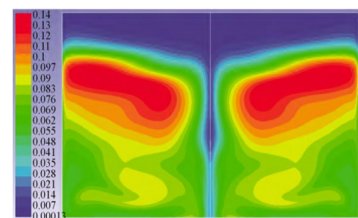
此外,华中科技大学梁建等^[32]采用 CFD 方法研究了立式捏合机桨叶间隙、螺旋角对搅拌扭矩和功率特性的影响。结果表明减小桨叶间隙或增大桨叶螺旋角可增大桨叶搅拌扭矩和功率消耗;减小桨叶螺旋角

可增加桨叶捏合作用时间;减小桨叶间隙或增大桨叶螺旋角可增大桨叶捏合作用强度,并且桨叶间隙比桨叶螺旋角对立式捏合机功率特性曲线的影响大。

西安交通大学张毅铭等^[33]采用气液固三相流模型对高固含量推进剂模拟物在声共振混合容器中的混合过程进行仿真,使用滑移网格边界条件对振动边界进行加载,使用 Fluent UDF 编程得到区域周期运动函数;采用固体颗粒体积分数标准偏差对混合均匀性进行评价;利用自搭建的声共振混合样机,分别在低固含量、高固含量条件下进行试验,记录混合过程中固体颗粒的运动轨迹,初步验证了仿真的正确性以及声共振样机的混合能力。声共振混合过程中铝粉颗粒的速度矢量图(130.00 s 时)和体积分布云图(137.62 s 时)分别如图4(a)~(b)所示。由图4可见,计算流动时间为130.00 s 时,声共振混合容器内部铝粉颗粒分布接近于混合均匀状态;计算流动时间137.62 s 时,铝粉颗粒分布更加均匀,仅在管壁处有铝粉聚集。



(a) 固体颗粒速度矢量图



(b) 固体颗粒体积分数云图

图4 声共振混合过程的仿真结果^[33]

Fig.4 Simulation results of acoustic resonance mixing process

综上,目前混合工艺仿真研究大多使用简化的固体推进剂本构模型。但是推进剂的混合过程是一个分批加料的过程,而简化模拟中通常将药浆假设为混合均匀状态,缺少针对混合工艺过程中药浆流变性能的研究,接下来需对此进一步开展研究。

2.2 固体推进剂浇铸工艺仿真研究进展

固体推进剂的浇铸工艺是将混合完成的药浆用适当的工艺浇铸到燃烧室壳体中,经过固化后形成符

合设计要求的药柱^[34]。浇铸工艺方法主要有插管浇铸法、底部浇铸法、真空浇铸法以及真空除气法等^[35]。

内蒙古工业大学乌岳等^[36]和黄帅鑫^[37]基于 Herschel-Bulkley 本构模型,采用 Ansys-polyflow 软件对固体推进剂药浆浇铸工艺过程进行仿真,研究了真空浇注工艺下不同孔径药浆的流动速度、黏度、剪切速率等,并通过实验对仿真结果进行了验证。仿真得到的不同时刻药浆的体积分数图如图 5 所示。由图 5 可见,仿真浇铸时长为 72.0 s。而实际的浇铸时长为 120.0 s。浇铸时长的差异主要是由于在实际浇注过程中,药浆的极高黏度导致其流动过程中在料斗和套筒中形成了挂壁现象,随着时间增加,挂壁层逐渐加厚;并且,高黏度药浆还会阻塞花板孔,从而延长了总的浇注时间。此外,试验和仿真所选用的花板规格存在差异,也会对浇铸时间造成影响。

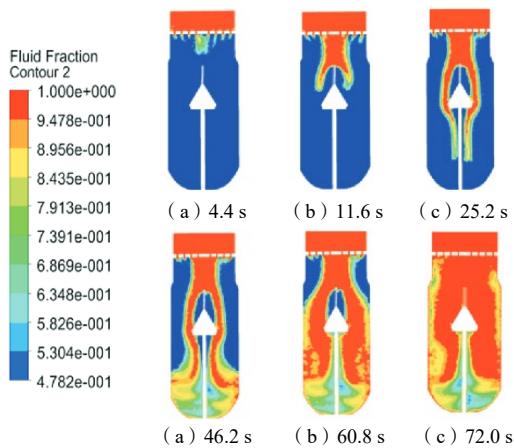


图 5 不同时刻药浆的体积分数图^[38]

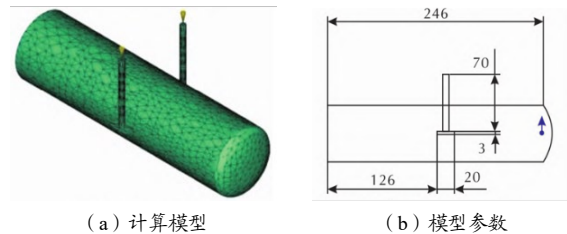
Fig.5 Plot of volume fraction of drug slurry at different moments

综上,目前浇铸工艺仿真研究相对较少。由于药浆流变性能非常复杂,固体推进剂药浆中气孔率及固体颗粒对流变性能的影响及复杂流动状态下推进剂的仿真方法还有待进一步研究。

2.3 固体推进剂包覆工艺仿真研究进展

北京理工大学刘奔奔等^[39]建立了包覆工艺计算模型,如图 6 所示。通过仿真和试验相结合的方式研究了 EPDM 的流动规律,从而优化包覆工艺参数。仿真时,采用 Carreau 模型拟合 EPDM 的流变性能方程,采用 Moldflow 软件模拟 EPDM 包覆层的注射成型过程;选择适当的浇口位置,预测了气穴和熔接线的形成位置以及前沿温度的变化。仿真和试验结果均

表明气穴更容易在弧形顶部形成,并且,选择侧面对称的双注射口对于成型过程的帮助更大。此外,作者还分析了温度、压力和流动速率对填充过程的影响,初步预测了成型参数。



(a) 计算模型

(b) 模型参数

图 6 包覆工艺计算模型及参数^[39]

Fig.6 Calculation model and parameters for coating process

综上,目前对于包覆工艺的仿真研究尚处于起步阶段,还需要建立更多的仿真模型更好的表征包覆工艺过程中推进剂药浆的流变性能,从而优化包覆工艺参数。此外,固体推进剂的浇铸工艺过程还包括固化成型、脱模整形、断面包覆、无损检测等^[40],需进一步对其全工艺流程进行仿真,从而实现对推进剂工艺流程的全面可控。

3 结语

本文介绍了用于描述固体推进剂流变性能的非牛顿本构方程及其适用性,回顾了近年来固体推进剂混合、浇铸、包覆工艺过程仿真的研究进展。在此基础上,指出了目前推进剂工艺仿真研究中存在的问题和不足,并对下一步的研究方向提出了建议。

(1) 由于固体推进剂配方组成及浇铸工艺的复杂性,目前采用的推进剂非牛顿流变本构模型还需进一步修正,如引入弹性项,使其更加精确,从而更好地描述药浆的流动状态,使仿真更加贴合实际。此外,在国外商业软件面临禁用或禁售的背景下,针对固体推进剂制备设备特性,开发自主可控的固体推进剂工艺仿真软件具有重要意义。

(2) 固体推进剂的混合过程是一个分批次加料的过程,而目前仿真中采用的简化模拟中通常将药浆假设为混合均匀状态,缺少针对混合工艺过程中药浆流变性能的研究,接下来需对此进一步开展研究。

(3) 目前固体推进剂的工艺仿真通常集中于混合、浇铸过程,需进一步对推进剂固化成型、脱模整

形、断面包覆、无损检测等全工艺流程进行仿真,从而实现推进剂工艺流程的全面可控。

参考文献:

- [1] 袁申, 刘海青, 齐铭, 等. 复合推进剂力学性能及其改善技术研究进展[J]. 兵工自动化, 2022, 41(12): 114-121.
- [2] 唐汉祥, 吴倩, 陈江. 推进剂药浆混合均匀性研究[J]. 推进技术, 1999(1): 81-84.
- [3] 易维坤. 制造技术面临 21 世纪的选择[J]. 航天工艺, 1998(6): 1-6.
- [4] 王亚娜. GAP/DGTM 复合固体推进剂药浆流变特性研究[D]. 太原: 中北大学, 2022.
- [5] 唐汉祥. AP 级配和铝粉对 HTPB 推进剂药浆流变性的影响[J]. 固体火箭技术, 1998(1): 28-32.
- [6] 唐汉祥. 铝粉/HTPB 悬浮液的流变特性[J]. 固体火箭技术, 1996(3): 23-25, 27.
- [7] 唐汉祥. AP 级配和铝粉对 HTPB 推进剂药浆流变性的影响[J]. 固体火箭技术, 1998(1): 28-32.
- [8] 魏青, 李葆莹. AP/HTPB 悬浮液的流变特性研究[J]. 固体火箭技术, 2003(1): 39-42.
- [9] 尹必文, 鲁国林, 吴京汉, 等. 功能助剂对 GAP 微烟推进剂流变性能的影响[J]. 固体火箭技术, 2015, 38(5): 702-706.
- [10] 赵越, 丁政茂, 杨武, 等. 蒙脱土对丁羟推进剂力学和流变性能的影响[J]. 火炸药学报, 2022, 45(04): 555-560.
- [11] 张云龙, 程王健, 李昆, 等. 表面活性剂对固黑铝炸药流变性能的影响[J]. 火炸药学报, 2022, 45(03): 419-424.
- [12] 侯磊. 固体火箭发动机推进剂插芯成型气孔率控制方法研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2021.
- [13] Rueda M M, Auscher M C, Fulchiron R, et al. Rheology and applications of highly filled polymers: a review of current understanding[J]. Progress in Polymer Science, 2017(66): 22-53.
- [14] 张路, 余瑞, 邓康清, 等. 固体推进剂本构模型研究现状及发展趋势[J]. 战术导弹技术, 2019(03): 94-100, 106.
- [15] 王真. GAP 基含能热塑性弹性体推进剂的流变性能研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2017.
- [16] Martinez-pastor J, Franco P, Ramirez F J, et al. Influence of rheological behaviour on extrusion parameters during non-continuous extrusion of multi-base propellants[J]. International Journal of Material Forming, 2018, 11(1): 87-99.
- [17] Sun H, Jiang L, Xia Y. LBM simulation of non-Newtonian fluid seepage based on fractional-derivative constitutive model[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2022(213): 110-378.
- [18] Lade R, Wasewar K, Sangtyani R, et al. Effect of aluminium nanoparticles on rheology of AP based composite propellant: experimental study and mathematical modelling[J]. Molecular Simulation, 2021, 47(6): 526-535.
- [19] 张伟, 樊学忠, 陈永铎, 等. NEPE 推进剂固化交联的流变学研究[J]. 高等学校化学学报, 2009, 30(6): 1 230-1 234.
- [20] 江晓瑞, 李卓, 韩秀洁, 等. 固体推进剂药浆改进 Herschel-Bukely 模型及其在仿真分析中的应用[J]. 推进技术, 2019, 40(9): 2 137-2 143.
- [21] Connelly R K, Kokini J L. 3D numerical simulation of the flow of viscous newtonian and shear thinning fluids in a twin sigma blade mixer[J]. Advances in Polymer Technology, 2006, 25(3): 182-194.
- [22] Madhania S, Cahyani A B, Nurtono T, et al. CFD study of mixing miscible liquid with high viscosity difference in a stirred tank[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018(316): 012-014.
- [23] 张行程, 卢思潼, 张智博, 等. 五种含金属盐的合成及其性能研究[J]. 信阳师范学院学报(自然科学版), 2023, 36(3): 457-462.
- [24] 陆志猛, 郭翔, 李洪旭, 等. 固体推进剂装药工艺装备技术研究[J]. 新技术新工艺, 2022(11): 26-32.
- [25] 吴浩. 拉伸形变支配的固体推进剂模拟浆料连续混合技术及机理研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
- [26] 潘新洲, 陆志猛, 王小英, 等. 声共振混合在 NEPE 推进剂制备中的初步应用研究[J]. 固体火箭技术, 2022, 45(02): 269-273.
- [27] 马宁, 秦能, 蒋浩龙, 等. PBX 炸药声共振混合试验研究 I [J]. 爆破器材, 2016, 45(4): 26-29.
- [28] Bu Y, Chen C, Jiang F, et al. Experimental and numerical analysis of single screw extrusion process for thermoplastic

- PBX based on PVT properties[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2022, 47(11).
- [29] 钟婷婷. 双基推进剂螺压挤出成型工艺流变特性的数值模拟研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2015.
- [30] 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(08): 131-136.
- [31] 姜爱民, 于胜春, 邹常青. 立式捏合机混合釜内推进剂药浆混合过程数值仿真[J]. 海军航空工程学院学报, 2011, 26(4): 381-386.
- [32] 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.
- [33] 张毅铭, 马宁, 王小鹏, 等. 固液两相声共振混合数值模拟[J]. 化工进展, 2018, 37(3): 913-919.
- [34] 乌岳, 李卓. 固体推进剂药浆收缩流动数值模拟与实验验证[J]. 高分子材料科学与工程, 2019, 35(12): 99-105.
- [35] 边雷, 乔晓林, 李佳佳, 等. 一种表征固体推进剂药浆浇注过程中流动性能的新方法[J]. 固体火箭技术, 2020, 43(04): 506-510.
- [36] 乌岳, 李卓, 鲁荣. 固体推进剂花板浇注的数值模拟与实验研究[J]. 火炸药学报, 2018, 41(05): 506-511.
- [37] 黄帅鑫. 固体火箭发动机推进剂浇注实验装置设计研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2021.
- [38] Wu Y, Li Z, Ji Y chao, et al. Experimental study of rheological properties of solid propellant slurry at low-shear rate and numerical simulation[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2020, 137(42): 49 287.
- [39] 刘奔奔, 张慧, 李军强, 等. EPDM 包覆层注射成型模拟及工艺参数研究[J]. 火炸药学报, 2022, 45(01): 103-108.
- [40] 李焕, 付小龙, 王可, 等. 溶剂压伸固体推进剂驱溶工艺的数值模拟与试验研究[J]. 兵器装备工程学报, 2022, 43(7): 109-114.

关于召开 2024 弹药安全技术大会的通知

为进一步深入研讨国内外弹药安全技术领域的发展现状、趋势及关键科学技术问题, 促进我国弹药安全技术领域科技创新、人才培养和科技成果转化, 推动新形势下我国弹药安全技术创新发展与能力提升, 晋西工业集团和中国兵工学会拟定于 2024 年 5 月 22 日-24 日在山西太原举办“2024 弹药安全技术大会”。现竭诚邀请各相关专业院校、企业、研究院/所的广大科技人员积极参会。

主办单位: 晋西工业集团有限责任公司 中国兵工学会

会议时间: 2024 年 5 月 22 日-24 日

会议地点: 山西省太原市阳光国际酒店(小店区长治路 109 号)

会议主题: 弹药安全设计、性能试验与评价技术; 含能材料热化学与热安全; 火工品新技术及其应用; 引信全寿命安全控制技术; 战斗部设计毁伤效应研究; 目标易损性及毁伤评估; 新概念信息化弹药技术; 弹药制导与控制技术; 冲击载荷下材料与结构响应和防护研究; 弹药响应特性与危害缓解技术; 弹药处置、回收及利用技术; 3D/4D 打印超材料及应用研究等等。

会议论文: 凡未在国内外学术刊物和会议上发表过的论文均可投稿, 提交论文时, 须一同提交本单位的脱盲审查证明。投稿网址: <https://www.bagevent.com/event/8766800>。截止日期为 2024 年 4 月 20 日。如果无需发表论文, 可以直接注册参会。

联系人: 马燕红

联系电话: 010-68961361 15210055224 (微信请注明来意)



2024 弹药安全技术大会
中国·太原 | 2024.5.22-24

火工品新技术及其应用

主题负责人

褚恩义 陕西应用物理化学研究所
瞬态化学效应与控制全国重点实验室

陈建华 陕西应用物理化学研究所
瞬态化学效应与控制全国重点实验室

主题 (包括但不限于)

- (1) 火工元器件、单元火工品设计及集成技术
- (2) 新型火工药剂技术
- (3) 火工系统新技术、新工艺、新制造方法研究
- (4) 火工品作用过程仿真计算方法研究
- (5) 火工品性能评价技术
- (6) 火工品应用技术等技术方向

通过评审的优秀稿件, 将推荐到《兵工学报》增刊、《火炸药学报》、《兵器材料科学与工程》、《弹道学报》、《爆破器材》、《弹箭与制导学报》、《火炮发射与控制学报》、《火工品》等刊物发表。收费标准按期刊规定执行。

注册投稿
请扫描下方二维码