DOI:10.14077/j.issn.1007-7812.202508005

搅拌速率对熔混釜内熔态炸药黏性温升影响的理论计算

高　飞[1],应武江[1],江　涛[2],钟光天[1],关　通[1],刘　攀[1,2],周　霖[1],张向荣[1]
(1.北京理工大学 爆炸科学与安全防护全国重点实验室,北京 100081;2.重庆红宇精密工业集团有限公司,重庆 402760)

摘　要:针对简化的熔混过程的熔态炸药黏性温升问题,在定常、层流假设下,基于柱坐标系下的 Navier-Stokes 方程,结合 Ostwald-De Wale 幂律流非牛顿本构模型,推导了熔铸炸药在搅拌条件下的速度场及剪切应力场解析表达式;结合一维导热方程与黏性耗散通式,构建忽略自身化学能条件下的黏性温度场解析模型。借助 FLUENT 软件建立简化后的熔混数值模型,对速度及温度解析解与数值解进行了比对验证。结果表明,速度场和温度场的最大误差分别为 1.2%和 6.1%,解析解与数值结果基本一致,验证了理论模型和解析求解过程的正确性;参数分析表明黏性温升与剪切应力与应变率张量分量的乘积及固含量大小正相关;对于 DNAN/HMX 熔铸炸药体系,最大黏性温升出现在搅拌刀外侧位置;当搅拌速率从 120 r/min 提高到 720 r/min(增大了 6 倍),该最大温升在 10 s 内增加了约 16 倍,达到 3.6 K。

关键词:物理化学;熔铸炸药;搅拌速率;黏性耗散;速度场;温度场;解析解
中图分类号:TJ55;TQ560　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1007-7812(2026)01-0097-10

Theoretical Calculation of the Influence of Stirring Rate on the Temperature Rise of Melt-cast Explosive in a Melting Mixer

GAO Fei[1], YING Wu-jiang[1], JIANG Tao[2], ZHONG Guang-tian[1], GUAN Tong[1], LIU Pan[1,2], ZHOU Lin[1], ZHANG Xiang-rong[1]
(1. State Key Laboratory of Explosion Science and Safety Protection, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;
2. Chongqing Hongyu Precision Industry Group Co., Ltd., Chongqing 402760, China)

Abstract: Regarding the viscous temperature rise issue in the simplified melting and mixing processes of melt-cast explosives, under the assumptions of steady and laminar flow, the Navier-Stokes equation in cylindrical coordinates was used together with the Ostwald-De Wael power-law model for non-Newtonian fluids. Analytical expressions for the velocity field and stress field under stirring were derived. Based on the one-dimensional heat conduction equation and the general formula of viscous dissipation, an analytical model of the viscous temperature field was built, ignoring the effect of chemical energy. A simplified numerical model was also built using FLUENT to compare with the analytical results. The results show that the maximum errors of the velocity field and temperature field are 1.2% and 6.1%, respectively, which confirms the correctness of the theoretical model and analytical method. The parameter analysis indicates that the viscous temperature rise is positively correlated with the product of shear stress and strain rate tensor components as well as the solid content magnitude. For the DNAN/HMX melt-cast explosive system, the maximum viscous temperature rise appears on the outer side of the stirring blade. When the stirring rate increases from 120 r/min to 720 r/min (a sixfold increase), the maximum temperature rise increases approximately 16 times within 10 s, reaching 3.6 K.

Keywords: physical chemistry; melt-cast explosive; stirring rate; viscous dissipation; velocity field; temperature field; analytical solution

收稿日期:2025-08-13;　　**修回日期**:2025-09-11
基金项目:国家自然科学基金(No. 11772060)
作者简介:高飞(2001－),男,硕士。E-mail:2395162527@qq.com
通信作者:张向荣(1975－),男,副教授。E-mail:zhangxr@bit.edu.cn
引用本文:高飞,应武江,江涛,等.搅拌速率对熔混釜内熔态炸药黏性温升影响的理论计算[J].火炸药学报,2026,49(1):97-106.
GAO Fei, YING Wu-jiang, JIANG Tao, et al. Theoretical Calculation of the Influence of Stirring Rate on the Temperature Rise of Melt-cast Explosive in a Melting Mixer[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants(Huozhayao Xuebao), 2026, 49(1): 97-106.

引 言

搅拌作为工业生产中基本的混合操作单元，通过外力介入实现物质间的高效传质、传热及能量传递。其中搅拌工序广泛应用于化工、食品、冶金等惰性行业[1]。搅拌速率作为搅拌过程中重要的工艺参数，直接影响搅拌器内部流体的分布情况。首先搅拌可以防止内部颗粒发生沉降[2]、团聚[3]等现象；其次可以优化搅拌器内部的混合性能[4]，但随着搅拌速率的增大会产生空泡[5]、涡流等不规则流动[6]等现象。作为一个关键工序，搅拌也在含能材料行业中得到广泛应用。以熔铸炸药装药为例，涉及搅拌的工序便是熔混，熔铸炸药通常由载体炸药与高能固相颗粒组成[7]，熔混可确保不同密度和粒径的组分均匀分布，避免分层或沉降，提高装药密度[8]。但是熔混工艺在熔铸炸药领域中的搅拌速率参数通常依赖经验界定，缺乏理论指导，难以将搅拌速率对内部温度场的影响规律描述出来，给熔铸炸药成型过程中的搅拌工艺系统设计带来巨大挑战。

目前，国内外学者在非熔铸混合炸药领域内对安全因素受搅拌速率影响方面做了深入研究，主要集中在搅拌速率过快产生剪切摩擦力大、温升、静电等现象的研究[11-14,16]。高速搅拌会导致体系内剪切摩擦力增大和黏性耗散加剧，产生显著的热量积累[10]。Zhao 等[11]使用有限元分析模拟了捏合机中推进剂浆料的混合过程。研究发现，提高搅拌速率会增加剪切应力和粘热，从而影响安全性。李敏[12]运用 VEL 软件的挤出机模块对改性双基推进剂进行模拟仿真，结果表明转速提高后由剪切作用引起的温升十分明显，这很容易造成过热而产生危险，为保证安全成型过程不宜提高螺杆转速。Rotariu 等[13]对 PBX-聚合物黏结炸药探索了一种在混合过程中涉及 pH 值和温度变化的绿色方法，其中在剧烈搅拌下温度瞬时变化较大。Li 等[14]通过开发一种用于塑料黏结炸药(PBX)的离心混合机，研究了转速、固含量等工艺参数对 PBX 模拟剂在搅拌过程中温升的影响，提出物料随着转速、固含量的增加温度急剧升高的结论。而高速搅拌也可能因物料与容器/桨叶的摩擦产生静电，若静电放电能量超过材料的最小点火能，将会引发爆炸[15]。Wang 等[16]指出在含能材料混合过程中，剪切流动使颗粒之间发生摩擦和碰撞，导致静电荷的产生和积累，可能造成安全隐患。

然而针对熔铸炸药成型中的熔混过程，研究搅拌速率对熔混釜内熔态炸药温升方面的研究却鲜有报道。肖磊等[17]设计并研发了熔铸炸药增材制造装置，装置中涉及的熔混搅拌模块采用了温度传感器加装在熔混釜夹套内，进行温度实时监测，但该方法仅获得传感器测点处的温度，无法识别釜内其他区域的温度，缺乏釜内数据的连续性。同时也没有进一步研究搅拌速率对内部炸药的温升影响；Mishra 等[18]研究了基于 NTO、FOX-7 和 DNAN 基熔铸炸药配方，提及了为保证搅拌的均匀性，以适当的搅拌速率进行搅拌，但没有关注混合速度对内部炸药温升的影响。综上，目前针对熔混釜内熔态炸药在搅拌作用下的温升规律缺乏关注，有待进一步深入研究。

对此，本研究提出了一种解析方法，基于一维层流简化流场，推导熔态炸药黏性温升随搅拌速率变化的解析公式。相比于实验及数值模拟手段，解析法以其理论优势展现出独特的研究价值[19]，相较于离散化的数值结果具有更为直观的数学表征与可视化呈现，同时也可避免三维流场建模和程序编写所需的巨大工作量[20]。具体推导过程及后续研究思路为：首先在 Navier-Stokes 动量守恒方程和 Ostwald-De Wale 幂律模型本构上求解径向速度和剪切应力的解析解；然后通过一维导热方程和黏性耗散通式获得二维搅拌下的黏性温升解析式；最后采用 FLUENT 软件对简化的熔混过程进行数值计算，并对解析解与数值解进行比对验证，在此基础上，揭示搅拌速率对 DNAN 基熔态炸药黏性温升的影响规律。

1 流场解析解

1.1 同轴环形空间搅拌模型及基本假设

如图 1 所示，在半径为 r_2 的空心圆柱内，有一半径为 r_0 的同轴实心圆柱(作为环形刀的搅拌轴)；介于 r_0 与 r_2 之间，有一半径为 r_1 的同轴的环形刀(环形刀起搅拌浆作用；本研究用环形刀代替搅拌浆便于理论推导流场解析解)，在 r_0 与 r_1、以及 r_1 与 r_2 之间充满了黏性流体。半径为 r_1 的环形刀以等角速度 ω 绕轴旋转。

针对上述几何模型内的流动问题，本研究作如下假设：

(1)环形刀的搅拌过程近似为层流流动；

(2)假设半径为 r_2 的空心圆柱为无限长，可忽略两端影响；

(3)轴对称流动，且流动仅沿周向运动；

(4)搅拌过程看作定常、不可压缩流动；

(5)搅拌过程不考虑重力作用；

(6)壁面满足无滑移边界条件。

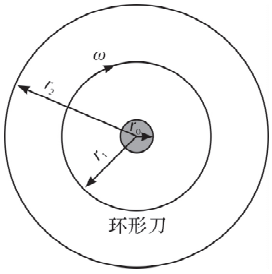


图 1　同轴环形空间搅拌模型

Fig. 1　Coaxial annular space mixing model

1.2　速度及剪切应力解析解推导

基于 1.1 节假设(5)，用于描述熔铸炸药熔混过程的 Navier-Stokes[21] 方程可表示为：

$$\frac{\mathrm{D}\boldsymbol{u}}{\mathrm{D}t}=\frac{1}{\rho}\nabla\cdot\boldsymbol{\sigma} \tag{1}$$

式中：$\boldsymbol{u}$ 为流体速度矢量；$\boldsymbol{\sigma}$ 为应力张量；ρ 为密度；“∇”为哈密顿算子，且$\nabla\cdot\boldsymbol{\sigma}$ 代表应力张量的散度。

搅拌过程的矢量方向图如图 2 所示。

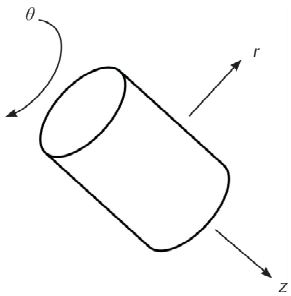


图 2　矢量方向示意图

Fig. 2　Vector direction diagram

由图 2 矢量方向图可知，搅拌过程在 θ 方向上进行，因此将方程(1)在 θ 方向上展开可得：

$$\frac{\partial u_\theta}{\partial t}+u_r\frac{\partial u_\theta}{\partial r}+\frac{u_\theta}{r}\frac{\partial u_\theta}{\partial\theta}+\frac{u_\theta u_r}{r}+u_z\frac{\partial u_\theta}{\partial z}=\frac{1}{\rho}\left(\frac{2\sigma_{r\theta}}{r}+\frac{\partial\sigma_{r\theta}}{\partial r}+\frac{1}{r}\frac{\partial\sigma_{\theta\theta}}{\partial\theta}+\frac{\partial\sigma_{\theta z}}{\partial z}\right) \tag{2}$$

根据 1.1 节中的基本假设有：

(a)据假设(1)、(2)中搅拌过程是层流，且为无限长圆柱，那么 $u_r=0$，$u_z=0$，$\partial/\partial z=0$；

(b)据假设(3)中搅拌过程是轴对称过程，那么 $\partial/\partial\theta=0$；

(c)据假设(4)中搅拌过程看作定常流动，那么 $\partial/\partial t=0$。故式(2)可以化解为：

$$\frac{2\sigma_{r\theta}}{r}+\frac{\mathrm{d}\sigma_{r\theta}}{\mathrm{d}r}=0 \tag{3}$$

式(3)为一阶线性微分方程，可解得：

$$\sigma_{r\theta}=\frac{C_1}{r^2} \tag{4}$$

$\sigma_{r\theta}$ 即为该同轴环形空间搅拌过程下的剪切应力分布函数，式中 C_1 为常数；为确定式(4)中的常数 C_1，可利用熔铸炸药的本构模型。一般地，熔铸炸药可用剪切变稀的 Ostwald-De Wale 幂律流体模型来描述[23]：

$$\begin{cases}\boldsymbol{\tau}=\eta(\dot\gamma)\dot{\boldsymbol{\gamma}}\\ \eta(\dot\gamma)=\zeta\dot\gamma^{n-1}\end{cases} \tag{5}$$

式中：$\boldsymbol{\tau}$ 为应力偏张量；$\eta(\dot\gamma)$ 为黏度函数；ζ 为一致性指数；n 为流动指数；$\dot\gamma$ 为剪切速率，定义为：

$$\dot\gamma=\sqrt{\frac{1}{2}\dot{\boldsymbol{\gamma}}:\dot{\boldsymbol{\gamma}}} \tag{6}$$

式中：“:”表示双重点积，$\dot{\boldsymbol{\gamma}}$ 为应变率张量，定义为：

$$\dot{\boldsymbol{\gamma}}=\nabla\boldsymbol{u}+(\nabla\boldsymbol{u})^{\mathrm{T}} \tag{7}$$

式中：$\nabla\boldsymbol{u}$ 为速度梯度，在柱坐标系下[22]表示为：

$$\nabla\boldsymbol{u}=\begin{pmatrix}\dfrac{\partial u_r}{\partial r} & \dfrac{1}{r}\dfrac{\partial u_r}{\partial\theta}-\dfrac{u_\theta}{r} & \dfrac{\partial u_r}{\partial z}\\ \dfrac{\partial u_\theta}{\partial r} & \dfrac{1}{r}\dfrac{\partial u_\theta}{\partial\theta}+\dfrac{u_r}{r} & \dfrac{\partial u_\theta}{\partial z}\\ \dfrac{\partial u_z}{\partial r} & \dfrac{1}{r}\dfrac{\partial u_z}{\partial\theta} & \dfrac{\partial u_z}{\partial z}\end{pmatrix} \tag{8}$$

根据式(7)、(8)以及 1.1 节中的同轴环形空间下的搅拌假设可得柱坐标系下的应变率张量 $\dot{\boldsymbol{\gamma}}$ 为：

$$\dot{\boldsymbol{\gamma}}=\begin{pmatrix}0 & \dfrac{\mathrm{d}u_\theta}{\mathrm{d}r}-\dfrac{u_\theta}{r} & 0\\ \dfrac{\mathrm{d}u_\theta}{\mathrm{d}r}-\dfrac{u_\theta}{r} & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0\end{pmatrix} \tag{9}$$

根据式(6)及(9)可得剪切速率 $\dot\gamma$ 为：

$$\dot\gamma=\left|\frac{\mathrm{d}u_\theta}{\mathrm{d}r}-\frac{u_\theta}{r}\right| \tag{10}$$

由于搅拌是在 θ 方向上，且由式(9)可得分量：

$$\dot\gamma_{r\theta}=\frac{\mathrm{d}u_\theta}{\mathrm{d}r}-\frac{u_\theta}{r} \tag{11}$$

据式(5)有 θ 方向上分量 $\tau_{r\theta}$ 为：

$$\tau_{r\theta}=\zeta\mathrm{sgn}\left(\frac{\mathrm{d}u_\theta}{\mathrm{d}r}-\frac{u_\theta}{r}\right)\cdot\left|\frac{\mathrm{d}u_\theta}{\mathrm{d}r}-\frac{u_\theta}{r}\right|^n \tag{12}$$

其中 $\mathrm{sgn}\left(\dfrac{\mathrm{d}u_\theta}{\mathrm{d}r}-\dfrac{u_\theta}{r}\right)$ 代表符号函数，有以下定义：

$$\mathrm{sgn}\left(\frac{\mathrm{d}u_\theta}{\mathrm{d}r}-\frac{u_\theta}{r}\right)=\begin{cases}1, & \dfrac{\mathrm{d}u_\theta}{\mathrm{d}r}-\dfrac{u_\theta}{r}>0\\ 0, & \dfrac{\mathrm{d}u_\theta}{\mathrm{d}r}-\dfrac{u_\theta}{r}=0\\ -1, & \dfrac{\mathrm{d}u_\theta}{\mathrm{d}r}-\dfrac{u_\theta}{r}<0\end{cases} \tag{13}$$

其中应力张量 $\boldsymbol{\sigma}$ 与应力偏张量 $\boldsymbol{\tau}$ 的关系为：

$$\boldsymbol{\sigma}=\boldsymbol{\tau}-p\boldsymbol{I} \tag{14}$$

式中：p 为压力；$\boldsymbol{I}$ 为单位张量，故有 $\sigma_{r\theta}=\tau_{r\theta}$。

联立式(4)、(12)可得：

$$u_\theta = \left[-\frac{n}{2} \cdot \mathrm{sgn}(C_1) \cdot \left(\frac{|C_1|}{\zeta} \right)^{1/n} \right] \cdot r^{1-\frac{2}{n}} + C_2 r \tag{15}$$

u_θ 即为该同轴环形空间搅拌过程下的速度分布函数，式中，C_2 也为常数。为确定式(15)中的常数 C_1 和 C_2，可利用 1.1 节假设(6)中的壁面无滑移边界条件，即：

$$\begin{cases} u(r = r_1) = \omega r_1 \\ u(r = r_m) = 0 \end{cases} \tag{16}$$

由于内壁 r_0 和外壁 r_2 均遵守无滑移边界条件，这里可令 $m = 0, 2$。

将边界条件(16)代入式(15)速度分布函数中可得常数 C_1、C_2 值：

$$\begin{cases} C_1 = \zeta \left[\dfrac{2\omega (r_1 r_m)^{\frac{2}{n}}}{n(r_1^{\frac{2}{n}} - r_m^{\frac{2}{n}})} \right]^n \quad (r_1 > r_m) \\ C_1 = -\zeta \left[\dfrac{2\omega (r_1 r_m)^{\frac{2}{n}}}{n(r_m^{\frac{2}{n}} - r_1^{\frac{2}{n}})} \right]^n \quad (r_1 < r_m) \\ C_2 = \dfrac{\omega r_1^{\frac{2}{n}}}{r_1^{\frac{2}{n}} - r_m^{\frac{2}{n}}} \end{cases} \tag{17}$$

将常数 C_1、C_2 代入式(4)和式(15)中可得同轴环形空间搅拌下的熔态炸药径向速度和剪切应力解析解为：

$$u_\theta = \frac{\omega r_1^{\frac{2}{n}} r_m^{\frac{2}{n}}}{r_m^{\frac{2}{n}} - r_1^{\frac{2}{n}}} r^{\frac{n-2}{n}} - \frac{\omega r_1^{\frac{2}{n}}}{r_m^{\frac{2}{n}} - r_1^{\frac{2}{n}}} r \tag{18}$$

$$\sigma_{r\theta} = \begin{cases} \dfrac{\zeta}{r^2} \left[\dfrac{2\omega (r_1 r_m)^{\frac{2}{n}}}{n(r_1^{\frac{2}{n}} - r_m^{\frac{2}{n}})} \right]^n \quad (r_1 > r_m) \\ \dfrac{-\zeta}{r^2} \left[\dfrac{2\omega (r_1 r_m)^{\frac{2}{n}}}{n(r_m^{\frac{2}{n}} - r_1^{\frac{2}{n}})} \right]^n \quad (r_1 < r_m) \end{cases} \tag{19}$$

其中 $m = 0, 2$。

1.3 定常流场中的温度解析解推导

熔态炸药在搅拌下的黏性温升规律可通过求解能量守恒方程得到，其中一维导热方程[23]为：

$$\rho C \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \boldsymbol{u} \cdot \nabla T \right) = k \nabla^2 T + Q_{\mathrm{react}} + Q_\varepsilon \tag{20}$$

式中：ρ 为物料密度；C 为比热容；T 为温度；k 为导热系数；方程左侧代表流场的内能变化率，右侧代表传热项和热源项；Q_{react} 为化学能项；Q_ε 为黏性耗散项。

由于熔铸炸药在搅拌过程中已经近似完全转化为液相故不考虑相变潜热，因而式(20)并未包含相变潜热项。此外，本研究目前仅研究搅拌产生的黏性温升，暂不考虑炸药自身化学能释放对炸药温升的影响，则 $Q_{\mathrm{react}} = 0$。再者，对于熔态炸药搅拌过程而言，对流项强度远大于扩散项强度，即 Pelect 数远大于 1[25]，此时可忽略扩散项；另一方面，对流项 $\boldsymbol{u} \cdot \nabla T$ 在柱坐标系下表示[26]为：

$$\boldsymbol{u} \cdot \nabla T = u_r \frac{\partial T}{\partial r} + u_z \frac{\partial T}{\partial z} + u_\theta \frac{\partial T}{\partial \theta} \tag{21}$$

根据 1.1 节假设可得对流项 $u \cdot \nabla T = 0$，故导热方程式(20)在柱坐标系下简化为：

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = Q_\varepsilon \tag{22}$$

对于不可压缩流场，黏性耗散通式[27]为：

$$Q_\varepsilon = \boldsymbol{\tau} : \nabla \boldsymbol{u} \tag{23}$$

应力偏张量在柱坐标系下表示为：

$$\boldsymbol{\tau} = \begin{pmatrix} \tau_{rr} & \tau_{r\theta} & \tau_{rz} \\ \tau_{\theta r} & \tau_{\theta\theta} & \tau_{\theta z} \\ \tau_{zr} & \tau_{z\theta} & \tau_{zz} \end{pmatrix} \tag{24}$$

联立式(8)、(23)、(24)可以得到柱坐标系下的黏性耗散为：

$$\begin{aligned} Q_\varepsilon = {} & \tau_{rr} \frac{\partial u_r}{\partial r} + \tau_{r\theta} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} - \frac{u_\theta}{r} \right) + \tau_{rz} \frac{\partial u_r}{\partial z} + \\ & \tau_{\theta r} \frac{\partial u_\theta}{\partial r} + \tau_{\theta\theta} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \frac{u_r}{r} \right) + \tau_{\theta z} \frac{\partial u_\theta}{\partial z} + \\ & \tau_{zr} \frac{\partial u_z}{\partial r} + \tau_{z\theta} \frac{1}{r} \frac{\partial u_z}{\partial \theta} + \tau_{zz} \frac{\partial u_z}{\partial z} \end{aligned} \tag{25}$$

根据 1.1 节假设，式(25)可简化为如下形式：

$$Q_\varepsilon = \tau_{r\theta} \left(\frac{\mathrm{d}u_\theta}{\mathrm{d}r} - \frac{u_\theta}{r} \right) \tag{26}$$

且由式(18)可得：

$$\frac{\mathrm{d}u_\theta}{\mathrm{d}r} - \frac{u_\theta}{r} = \frac{\omega r_1^{\frac{2}{n}} r_m^{\frac{2}{n}}}{r_1^{\frac{2}{n}} - r_m^{\frac{2}{n}}} \cdot \frac{2}{n} r^{\frac{-2}{n}} \tag{27}$$

将式(19)、(27)代入式(26)中可得两种情况下的黏性耗散表达式为：

$$Q_\varepsilon = \begin{cases} \zeta \cdot \dfrac{2^{n+1} \omega^{n+1} (r_1 r_m)^{\frac{2(n+1)}{n}}}{n^{n+1} (r_1^{\frac{2}{n}} - r_m^{\frac{2}{n}})^{n+1}} \cdot r^{\frac{-2(n+1)}{n}} \\ (r_1 > r_m) \\ \zeta \cdot \dfrac{2^{n+1} \omega^{n+1} (r_1 r_m)^{\frac{2(n+1)}{n}}}{n^{n+1} (r_m^{\frac{2}{n}} - r_1^{\frac{2}{n}})^{n+1}} \cdot r^{\frac{-2(n+1)}{n}} \\ (r_1 < r_m) \end{cases} \tag{28}$$

综上所述，简化搅拌过程下的导热方程式(22)表示为：

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \begin{cases} \zeta \cdot \dfrac{2^{n+1} \omega^{n+1} (r_1 r_m)^{\frac{2(n+1)}{n}}}{n^{n+1} (r_1^{\frac{2}{n}} - r_m^{\frac{2}{n}})^{n+1}} \cdot r^{\frac{-2(n+1)}{n}} \\ (r_1 > r_m) \\ \zeta \cdot \dfrac{2^{n+1} \omega^{n+1} (r_1 r_m)^{\frac{2(n+1)}{n}}}{n^{n+1} (r_m^{\frac{2}{n}} - r_1^{\frac{2}{n}})^{n+1}} \cdot r^{\frac{-2(n+1)}{n}} \\ (r_1 < r_m) \end{cases} \tag{29}$$

根据式(29)，可以得到熔态炸药在搅拌速率 ω 下单个时间步长(Δt)累积的黏性温升为：

$$\Delta T=\begin{cases}\dfrac{2^{n+1}\omega^{n+1}(r_1 r_m)^{\frac{2(n+1)}{n}}}{n^{n+1}(r_1^{\frac{2}{n}}-r_m^{\frac{2}{n}})^{n+1}}\cdot r^{\frac{-2(n+1)}{n}}\Delta t \\ (r_1>r_m) \\ \dfrac{2^{n+1}\omega^{n+1}(r_1 r_m)^{\frac{2(n+1)}{n}}}{n^{n+1}(r_m^{\frac{2}{n}}-r_1^{\frac{2}{n}})^{n+1}}\cdot r^{\frac{-2(n+1)}{n}}\Delta t \\ (r_1<r_m)\end{cases} \tag{30}$$

其中 $m=0,2$。

2　解析解与数值解的比对

本研究推导的基于搅拌情况下的各流场分布的解析解概念清楚、表达简洁，能够很好地预测熔混釜内熔态炸药搅拌导致的黏性温升分布及内部速度场分布。为了验证本研究流场解析解的正确性，下面对该流场进行数值求解，并与解析解进行比对。

2.1　数值计算模型

针对图 1 所示的同轴环形搅拌简化模型，采用 ANSYS 有限元软件进行数值模拟，本节数值计算针对 DNAN/HMX 熔铸体系中固含量 $\Phi=60\%$ 进行计算(用于与解析解计算的 $\Phi=60\%$ 结果进行比对验证)。仿真计算模型同解析推导的同轴环形模型一致，采用 ICEM 进行建模，其中外径 $r_2=0.2$ m，内径 $r_0=0.03$ m，环形刀尺寸 $r_1=0.1$ m；在软件中选取层流—黏性加热计算模型；边界条件设置如下：环形刀设置为移动旋转壁面，绝对角速度为 12.56 rad/s，内壁和外壁为静止壁面条件。采用瞬态计算，其中计算时间步长 $\Delta t=0.001$ s，总的时间步数量为 60000 步，初始化温度为 373 K(为了保证搅拌过程流体为液态)，但不考虑热传导过程以及炸药本身释放的化学能，仅研究搅拌产生黏性温升，且该温度下的 DNAN 及固相颗粒 HMX 参数如表 1 所示，不同固含量下的参数由表 1 加权得到如表 2 所示，其中幂律模型参数采用文献[32]的数据，如表 3 所示。其中 $\Phi=0$ 一行代表纯 DNAN 载体。

不可压缩流的连续性方程可表述如下：

$$\nabla\cdot\boldsymbol{u}=0 \tag{31}$$

动量守恒方程为：

$$\rho\left(\frac{\partial u}{\partial t}+\boldsymbol{u}\cdot\nabla\boldsymbol{u}\right)=-\nabla p+\mu\nabla^2\boldsymbol{u}+\boldsymbol{f} \tag{32}$$

式中：$\boldsymbol{f}$ 为体积力，且能量守恒如下：

$$\rho C\frac{\partial T}{\partial t}+\rho C(\boldsymbol{u}\cdot\nabla)T=k\nabla^2 T+\Phi \tag{33}$$

式中：Φ 为黏性加热项，定义为：

$$\Phi=2\eta(\dot{\gamma})\left[\boldsymbol{D}:\boldsymbol{D}-\frac{1}{3}(\nabla\cdot\boldsymbol{u})^2\right] \tag{34}$$

式中：$\boldsymbol{D}$ 为应变速率张量。

表 1　DNAN 及 HMX 参数

Table 1　DNAN and HMX parameters

sample	ρ/(kg·m^{-3})	C_V/(J·kg^{-1}·K^{-1})
DNAN	1544[28]	1305[29]
HMX	1903[30]	1580[31]

注：ρ 为密度；C_V 为比热；下表同

表 2　不同固含量 DNAN/HMX 下的参数

Table 2　Parameters under different solid contents

Φ/%	ρ/(kg·m^{-3})	C_V/(J·kg^{-1}·K^{-1})
10	1579.9	1332.5
20	1615.8	1360.0
30	1651.7	1387.5
40	1687.6	1415.0
50	1723.5	1422.5
60	1759.4	1470.0

表 3　不同固含量 DNAN/HMX 悬浮液幂律模型参数

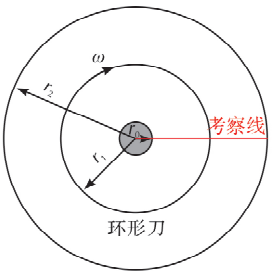
Table 3　Power law model parameters of DNAN/HMX suspension with different solid contents

Φ/%	ζ/(mPa·S^n)	n
0	7.8	0.9828
3	10.8	0.9797
10	51.5	0.8207
20	108.6	0.7203
30	214.6	0.6819
40	485.9	0.6369
50	1024.2	0.6011
60	2299.2	0.5608

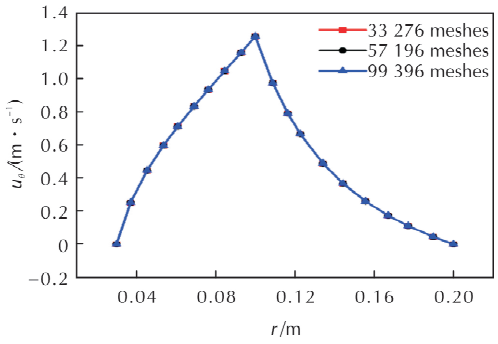
注：ζ 为一致性指数；n 为流动指数

2.2　网格尺寸敏感性验证

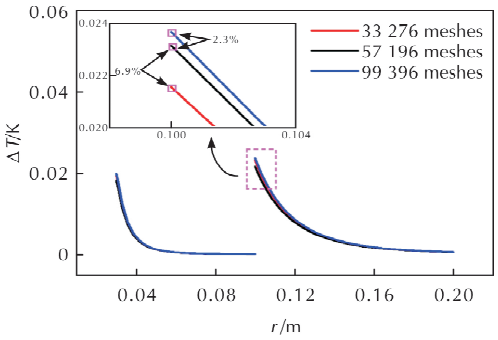
首先进行网格依赖性分析。对比了 3 种网格数量的数值结果：(1)粗网格，共 33276 个网格；(2)中网格，共 57196 个网格；(3)细网格，共 99396 个网格。图 3 给出了从点(0.03,0)到点(0.2,0)考察线上的速度及温度分布，考察线如图 3(a)所示。



(a) Schematic diagram of inspection line



(b) velocity distribution



(c) temperature distribution

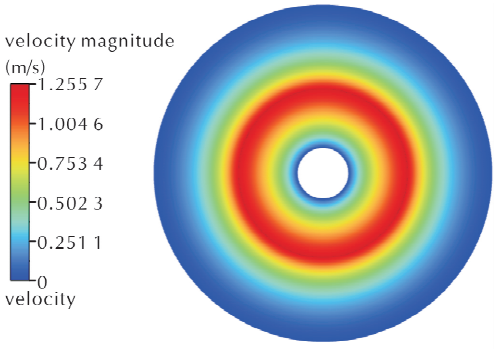
图 3 考察线示意图及网格依赖性分析

Fig. 3 Schematic diagram of inspection line and mesh dependency analysis

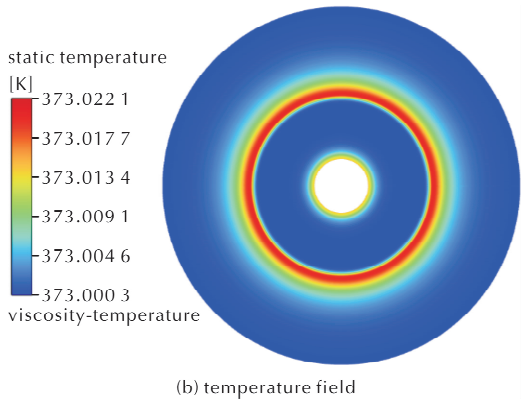
对于速度场，3 种网格下的计算结果趋于一致，但对于温度场，粗网格与中网格的计算结果最大相差超过 6.9%，而中网格与细网格的计算结果最大相差小于 2.3%。从计算效率和计算精度两方面考虑，本研究采用中网格进行后续数值计算。

2.3 计算结果及验证

图 4(a)为简化后的熔混数值模型计算的速度场图，搅拌刀位置的速度最大达到 1.255 m/s，且以搅拌刀向外速度逐渐衰减为零。图 4(b)简化后的熔混数值模型计算的为温度场图，在搅拌刀外侧位置产生了最大温度积累，达到 0.022K，且由内壁至搅拌刀内侧及由搅拌刀外侧至外壁温升逐渐衰减为零。



(a) velocity field

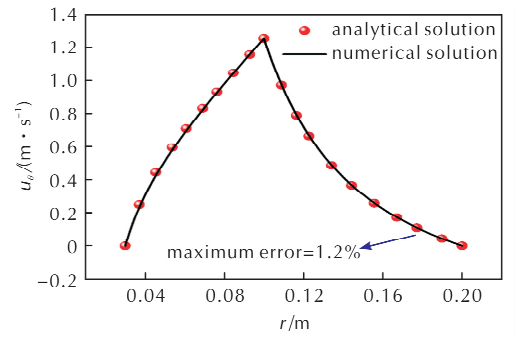


(b) temperature field

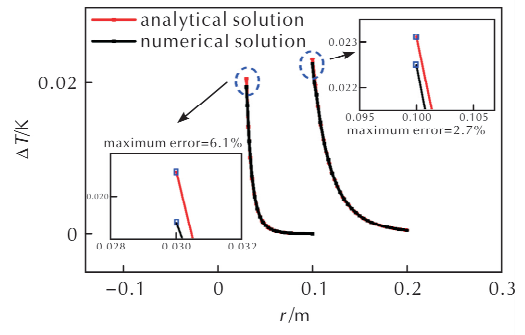
图 4 数值计算结果

Fig. 4 Numerical calculation results

对考察线上的解析与数值计算的速度及温度变化规律进行对比验证(计算 $\Phi = 60\%$)。图 5(a)为速度对比图，分析可以发现速度流场解析解与数值解吻合度较高，最大相对误差仅为 1.2%；由式(30)可计算搅拌 60 s 后的黏性温升，并与数值模拟比对可得到图 5(b)，分析可得搅拌产生的黏性温升解析解与数值解最大相对误差为 6.1%。因此对比后可以认为误差均在可以接受范围内，验证了本研究提出的搅拌环形空间下的流场解析方法具有一定的参考意义。



(a) velocity comparison diagram



(b) temperature contrast diagram

图 5 解析解与数值解的对比

Fig. 5 Comparison of analytical and numerical solutions

图 5 仅对速度和温度进行了解析解与数值解的比对验证，而剪切应力解析解与数值解的比对并未

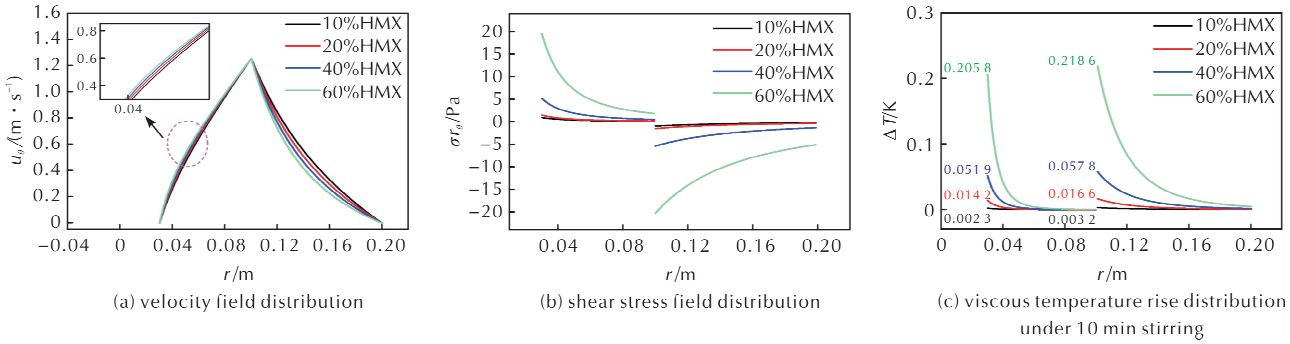
在图中呈现出来。这是因为，在 FLUENT 后处理中仅有压力场结果，而不直接提供流场内部剪切应力的计算结果。虽然可以通过 UDF 进行二次开发，将剪切应力的计算结果显示出来，但本研究目前尚未开展这方面的工作。尽管如此，由于温度（图 5b）的计算涉及到剪切应力，因而温度解析解与数值解的比对验证，实际上也间接地对剪切应力进行了比对验证。

3　搅拌速率对 DNAN 基熔铸炸药流场分布的影响规律

前面针对在 DNAN/HMX 熔铸体系中固含量 Φ = 60 % 搅拌下的简化流场，进行了解析解和数值解的比对验证。下面基于已验证的解析方法，进一步分析 DNAN 基熔铸炸药在搅拌下的简化流场。

考虑固含量（HMX 颗粒质量分数）为 10 % ～ 60 % 的情形，采用搅拌速率为 120、360、720 r/min 进行流场影响规律研究。其中一致性指数 ζ、流动指数 n 采用表 1 数据，各固含量下的密度和比热数据通过表 2 代入。

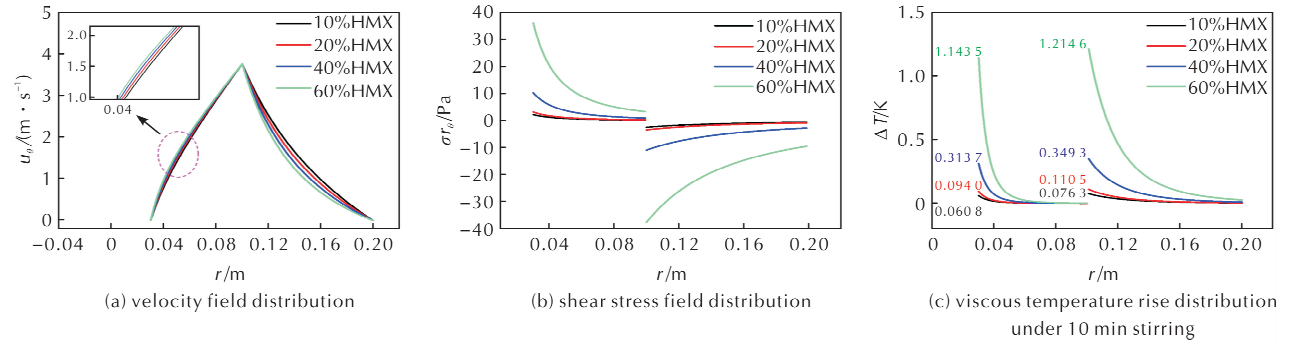
将以上参数代入到解析式（18）、（19）及（30）中可得 120、360、720 r/min 下不同固含量的速度场分布、剪切应力场分布及搅拌 10 min 产生的黏性温升分布图，结果见图 6～图 8。



(a) velocity field distribution　(b) shear stress field distribution　(c) viscous temperature rise distribution under 10 min stirring

图 6　搅拌速率 120 r/min 下的各流场分布

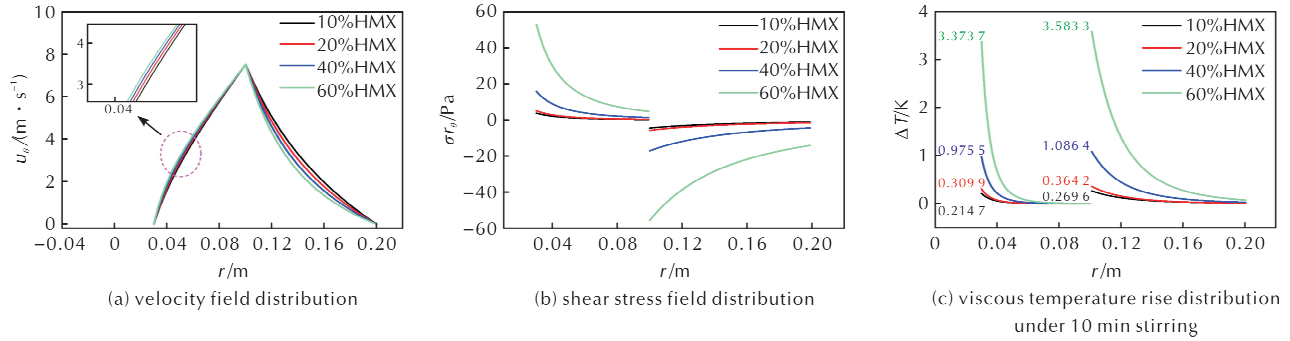
Fig. 6　Distribution of various flow fields under stirring velocity of 120 r/min



(a) velocity field distribution　(b) shear stress field distribution　(c) viscous temperature rise distribution under 10 min stirring

图 7　搅拌速率 360 r/min 下的各流场分布

Fig. 7　Distribution of various flow fields under stirring velocity of 360 r/min



(a) velocity field distribution　(b) shear stress field distribution　(c) viscous temperature rise distribution under 10 min stirring

图 8　搅拌速率 720 r/min 下的各流场分布

Fig. 8　Distribution of various flow fields under stirring velocity of 720 r/min

由图 6(a)、图 7(a)、图 8(a)速度场分布图可知：(1)不同固含量下的流场最大速度均随着搅拌速率的增加而增加，同时最大速度分布在搅拌刀的位置；(2)在不同搅拌速率下，流场速度在 0.03～0.1m 半径内随着固含量的增加(n 减小)而增大，在 0.1～0.2m 半径内随着固含量的增加(n 减小)而减小。

由图 6(b)、图 7(b)、图 8(b)剪切应力场分布图可知：(1)不同固含量下的流场最大剪切应力均随着搅拌速率的增加而增加；(2)各固含量条件下的最大剪切应力均出现在搅拌刀外侧。如式(12)和图 9 所示，剪切应力随应变率张量分量单调增加：这表明剪切应力直接受应变率分量影响，即应变率分量越大，对应的剪切应力也越大。

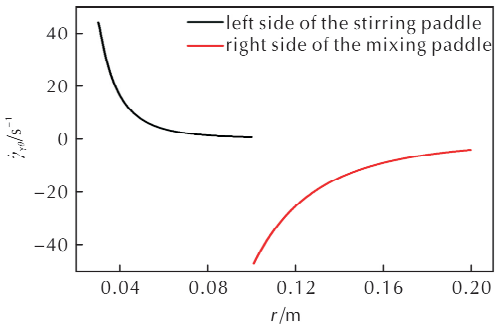


图 9 应变率张量分量 $\dot{\gamma}_{r\theta}$ 分布

Fig. 9 Shear rate distribution

由图 6(c)、图 7(c)、图 8(c)黏性温升分布图可知：(1)不同固含量下的搅拌区域的最大黏性温升均随着搅拌速率的增加而增加；(2)同一搅拌速率下，黏性温升随固含量单调增加；(3)对于 DNAN/HMX 熔铸炸药体系，最大黏性温升分布在搅拌刀外侧，参考应变率张量分量分布图 9 及剪切应力分布图 6(b)、图 7(b)、图 8(b)及式(26)可以得到黏性温升随剪切应力与应变率张量分量的乘积正相关：乘积越大，温升越高。搅拌刀外侧的剪切应力与应变率张量分量均略高于内壁处，因此两者协同作用使搅拌刀外侧形成最高的黏性温升。

其中，120、360、720 r/min 转速下搅拌 10 min 达到的最大黏性温升图如图 10 所示，可以看到对于 DNAN 基熔铸炸药的 60% 高固含量(HMX)的搅拌过程中，转速提高 6 倍后，最大黏性温升由 0.2K 达到了 3.6K，温度提高了约 16 倍，温度变化骤增。因此对于熔铸炸药熔混过程，为避免搅拌导致的温升过高而产生危险，合理的搅拌速率与固含量的匹配可为实际含能材料的温控优化提供有利价值。

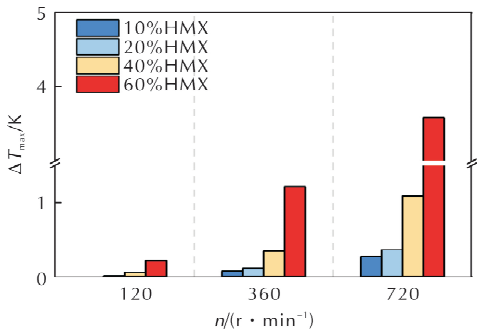


图 10 最大黏性温升与转速关系

Fig. 10 Relationship between maximum viscous temperature rise and rotational velocity

4 结 论

(1)速度场、温度场解析解与数值解的最大相对误差分别为 1.2% 和 6.1%，本研究建立的熔态炸药搅拌黏性温升模型突破了传统工艺参数依赖经验限制的局限性，同时该模型的高精度特性为熔态炸药搅拌工艺的精准调控提供了可量化的理论依据。

(2)黏性温升与剪切应力与应变率张量分量的乘积大小正相关：乘积越大，温升越高。在 DNAN/HMX 熔铸炸药体系中，搅拌刀外侧产生最高黏性温升。当转速从 120 r/min 提高到 720 r/min(增大了 6 倍)，该最大温升在 10 s 内增加了约 16 倍，达到 3.6K。

(3)推导了在熔混釜内熔态炸药搅拌流场的简化解析解，并与数值解进行了对比验证，为了将解析解扩展到更接近工程实际的复杂情况，结合实验验证的后续工作至关重要。同时该模型因忽略导热扩散项而高估黏性温升，又因未考虑化学能而低估温升，二者在低温升时相互抵消。尽管存在简化假设，此解析解仍为优化熔混釜内熔态炸药的搅拌速率提供了理论依据，其方法可推广至其他含能材料搅拌工艺研究，为解决“工艺安全-混合效率”的权衡问题提供了新思路。

致谢：在推导搅拌过程中熔态炸药速度场的解析表达式时，得到清华大学航天航空学院彭杰老师的鼎力支持，特此致谢！

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

参考文献：

[1] HAASE S, TOLVANEN P, RUSSO V. Process intensification in chemical reaction engineering[J]. *Processes*, 2022, 10(1): 99.

[2] TAO Q, ZHONG F, DENG Y, et al. A review of nanofluids as coolants for thermal management systems in fuel cell vehicles[J]. *Nanomaterials*, 2023, 13(21): 2861.

[3] KARAMAN G S, URKMEZ T N. New processing route for the production of functionally graded 7075 Al/SiCp composites via a combination of semisolid stirring and sequential squeeze casting[J]. *Crystals*, 2024, 14(4): 297.

[4] ZHOU B, QIU Z, CHEN K, et al. Microstructure, properties, and numerical simulation of semi-solid aluminum alloy under planetary stirring process[J]. *Materials*, 2022, 15(9): 3009.

[5] PONGRAKTHAM K, SOMNUK K. Continuous double-step acid catalyzed esterification production of sludge palm oil using 3D-printed rotational hydrodynamic cavitation reactor [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2023, 95: 106374.

[6] CHAI X, DONG Y, QIU F, et al. Eddy current identification methods and applications in the chemical industry: A mini-review [J]. *ACS Omega*, 2024, 9(8): 8594-8600.

[7] 郝雪，叶志文，周新利. 低熔点含能化合物研究进展[J]. 火炸药学报，2023，46(1)：16-30.
HAO Xue YE Zhi-wen, ZHOU Xin-li. Research progress on low melting point energetic compounds.[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants (Huozhayao Xuebao)*, 2023, 46(1): 16-30.

[8] DUAN B, LI J, MO H, et al. The art of framework construction: Core-shell structured micro-energetic materials [J]. *Molecules*, 2021, 26(18): 5650.

[9] XIE H, ZHANG X, JIANG T, et al. Rheological behavior of DNP/HMX melt-cast explosives with bimodal and trimodal particle-size distributions [J]. *Polymers*, 2023, 15(6): 1446.

[10] LIU X, SUN X, HE J, et al. Study on the influence of working-fluid's thermophysical properties on the stirring-heating [J]. *Energies*, 2022, 15(13): 4835.

[11] ZHAO R, HUANG J, ZHUANG Z, et al. Numerical simulation of propellant slurry stirring process[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2022, 2252(1): 012029.

[12] 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 Min. Simulation reseach of the single-screw extrusion process of energetic materials [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2020.

[13] ROTARIU T, MOLDOVAN A E, TOADER G, et al. "Green" PBX formulations based on high explosives (RDX and HMX) and water-soluble pH-sensitive polymeric binders [J]. *Polymers*, 2023, 15(7): 1790.

[14] LI Y, NIU Y, JIANG F, et al. Study on the centrifugal mixing process of PBX simulants[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2024, 2891(5): 052003.

[15] HE Z, ZHANG G, XU C, et al. Construction and performance characterization of hexahydro-1, 3, 5-trinitro-1, 3, 5-triazine /Poly(3, 4-ethylene-dioxythiophene)-Poly(styrenesulfonate) energetic composites[J]. *Molecules*, 2025, 30(5): 1000.

[16] WANG J, XIE Z, LIU J. A comprehensive review on flow field properties in polymer mixing processes: a focus on applications in energetic materials[J]. *Materials Research Express*, 2024, 11(6): 062001.

[17] 肖磊，宗胡曾，郭锐，等. 基于熔融沉积成型技术的熔铸炸药增材制造装置研发与应用[J]. 新技术新工艺，2022(11)：18-25.
XIAO Lei, ZONG Hu-zeng, GUO Rui, et al. Development and application of an additive manufacturing device for melt-cast explosives based on fused deposition modeling technology[J]. *New Technology & New Process*, 2022(11): 18-25.

[18] MISHRA V S, VADALI S R, BHAGAT A L, et al. Studies on NTO-, FOX-7-and DNAN-based melt cast formulations[J]. *Central European Journal of Energetic Materials*, 2017, 14(2): 403-417.

[19] RAHMANI R, RAHNEJAT H. Enhanced performance of optimised partially textured load bearing surfaces[J]. *Tribology International*, 2018, 117: 272-282.

[20] 张伟政，于踪洋，丁雪兴. 上游泵送机械密封液膜流场近似解析计算[J]. 应用力学学报，2015，32(4)：694-698.
ZHANG Wei-zheng, YU Zong-yang, DING Xue-xing. Approximate analytical calculation of liquid film flow field on upstream pumping mechanical seal[J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2015, 32(4): 694-698.

[21] 约翰 D. 安德森. 计算流体力学基础及其应用[M]. 北京：机械工业出版社，2007.
ANDERSON J D, Jr. Computational Fluid Dynamics: The Basics with Applications [M]. Beijing: China Machine Press, 2007.

[22] VITTURI M M. Navier-Stokes equations in cylindrical coordinates[J]. 2016.

[23] PERIYADURAI K, PASCOA J C, Abdollahzadehsangroudi M, et al. Numericalmodeling of magnetohydrodynamic non-Newtonianflow in a cross-slot[J]. *Polymer Engineering & Science*, 2024, 64(5): 2157-2177.

[24] WILLIAMS J. Engineering Heat Transfer [M]. 2nd ed. New York: CRC Press, 2000.

[25] ANANDH T, GHOSE D, JAIN H, et al. Improving hp-vari-

ational physics-informed neural networks for steady-state convection-dominated problems[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2025, 438: 117797.

[26] NOOR I, IRZAMAN, SYAFUTRA H, et al. Simulation of heat transfer in cylinder husks furnace with finite difference method [J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2016, 31(1): 012013.

[27] KOLITAWONG C, KANANAI N, GIACOMIN A J, et al. Viscous dissipation of a power law fluid in axial flow between isothermal eccentric cylinders[J]. *Journal of Non-newtonian Fluid Mechanics*, 2011, 166(1/2): 133-144.

[28] 蒙君隶,周霖,曹同堂,等.2,4-二硝基苯甲醚(DNAN)基熔铸炸药研究进展[J].含能材料, 2020,28 (1): 13-24.
MENG Jun-Jiong, ZHOU Lin, CAO Tong-tang, et al. Research progress of 2,4-dinitroanisole-based melt-cast explosives[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2020, 28 (1):13-24.

[29] 赵凤起,曲文刚,高红旭,等.含能材料热动力学行为和热力学性质的研究进展[J].中国科学:化学, 2014, 44 (6): 953-963.
ZHAO Feng-qi, QU Wen-gang, GAO Hong-xu. Recent advances in the study of thermodynamic properties and thermokinetic behavior of energetic materials[J]. *Scientia Sinica Chimica*, 2014, 44(6): 953-963.

[30] 田贝贝,陈丽珍,张朝阳.HMX 分子与晶体结构性能研究进展[J].含能材料, 2019, 27 (10): 883-892.
TIAN Bei-bei, CHEN Li-zhen, ZHANG Chao-yang. Review on structural properties of HMX molecules and crystals[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2019, 27 (10): 883-892.

[31] KOSHIGOE L G, SHOEMAKER R L, TAYLOR R E. Specific heat of HMX [J]. *AIAA Journal*, 1984, 22 (11): 1600-1601.

[32] ZHU D L, ZHOU L, ZHANG X. Rheological behavior of DNAN/HMX melt-cast explosives[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2019,44(12): 1583-1589.