

文章编号:1006-9941(2024)11-1242-15

## 熔铸炸药凝固工艺与在线监测技术研究进展

张彭超,樊超,朱士富,谢中元,马宁,魏宗亮

(西安近代化学研究所,陕西西安710065)

**摘要:** 熔铸炸药的凝固过程是其开发与生产的重要环节,凝固与装药质量对产品的爆轰性与安全性起着关键作用。基于国内外研究工作,从有限元仿真、凝固成型工艺以及在线检测方法3个方面系统论述了熔铸炸药凝固成型技术的发展。总结了有限元仿真在熔铸炸药浇铸和凝固过程中流场、温度场和应力场模拟方面的发展,阐述了凝固缺陷的形成以及不同工艺对凝固的作用行为,探讨了温度、应力应变、粘度以及内部结构等在线监测技术在熔铸炸药高质量精密成型技术中的应用。熔铸炸药装药仿真方法、凝固工艺优化以及在线监测技术的发展能够为凝固装备设计研发、凝固产品质量提升等提供重要理论和技术指导。未来,熔铸炸药装药凝固技术的发展需要在设备-物料模型构建、工艺设备安全、工艺条件精准控制、实时信息监控以及在线监测与自适应调控等方面进一步完善和应用。

**关键词:** 熔铸炸药;凝固工艺;有限元仿真;缺陷控制;在线监测

**中图分类号:** TJ55;TJ41

**文献标志码:** A

**DOI:**10.11943/CJEM2024124

### 0 引言

高质量弹药研发与武器装备水平的发展对熔铸炸药装药技术和凝固工艺提出了更高的要求。在战斗部装药方面,为了满足高能量密度、高毁伤性能以及作用可靠性,装药过程需严格控制药柱凝固可能产生的疏松、缩孔以及裂纹和底隙等缺陷,而装药缺陷与熔铸炸药的凝固工艺和凝固护理密切相关,装药缺陷控制研究加快了熔铸炸药凝固成型技术和高精精密成型装备的快速发展<sup>[1-3]</sup>。

研究表明,熔铸炸药的凝固工艺参数改变和缺陷形成对其应用性能具有重要影响。通过控制不同凝固速率下药柱晶粒尺寸和内部应力的演变,可以优化炸药的毁伤效果并降低感度<sup>[4-5]</sup>。随着计算仿真技术的发展,研究熔铸炸药的凝固成型规律、缺陷形成和装药

工艺改进已从依赖试验数据和经验转向模拟仿真,有效降低了试错成本,提高了科研和生产效率。浇铸凝固工艺的传热分析,流场、应力场演化以及物质相变过程研究对凝固成型设备设计以及生产应用具有指导性意义。近二十年,国内外学者采用ANSYS-FLUENT<sup>[6]</sup>、COMSOL Multiphysics<sup>[7]</sup>以及Pro CAST<sup>[8]</sup>等仿真软件对熔铸炸药的浇铸及凝固过程进行了理论计算。以上软件分别在熔体流动、多物理场耦合以及复杂铸造工艺等方面具有独特的仿真优势<sup>[9]</sup>。充分利用数值模拟仿真技术,模拟浇铸、凝固结晶机理及其相关影响因素,并建立基于物料和设备模型的温度场-应力场-凝固缺陷仿真规律,为装药与凝固工艺的改进以及凝固质量与效率的提高提供理论支撑。

在常规凝固条件下,熔融态炸药在模具或战斗部弹体中自然冷却,凝固由外向内逐层进行。因此,在直径较大的药柱中间因体积收缩和液态补缩不及时易产生装药疵病。针对熔铸药柱中出现的粗结晶、缩孔、宏观/微观裂纹、密度不均等凝固缺陷,除了对炸药的成分设计调整外,还可以通过优化炸药装药工艺对以上缺陷进行改善<sup>[10-11]</sup>。熔铸装药工艺的优化可以从液态炸药浇铸过程改善以及弹体模具内炸药凝固过程控制两方面开展。在工艺方法创新方面,采取真空振动

收稿日期:2024-05-23;修回日期:2024-06-24

网络出版日期:2024-08-12

基金项目:西安近代化学研究所开放合作创新基金(204-J-2019-0387-1/6-18)

作者简介:张彭超(1995-),男,助理研究员,主要从事材料凝固与火炸药装药工艺研究。e-mail:18829039842@163.com

通信联系人:谢中元(1982-),男,研究员,主要从事火炸药制备工艺与装备设计研究。e-mail:408671355@qq.com

引用本文:张彭超,樊超,朱士富,等.熔铸炸药凝固工艺与在线监测技术研究进展[J].含能材料,2024,32(11):1242-1256.

ZHANG Peng-chao, FAN Chao, ZHU Shi-fu, et al. Research Progress on Solidification Process and On-line Monitoring Technique of Melt-cast Explosive[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2024, 32(11):1242-1256.

注装、加压凝固、热芯棒控温以及冒口蒸汽保温等工艺已经在一定程度上减少了凝固缺陷的产生,然而以上工艺都在实施过程中或者效果呈现上展现出各自的局限性<sup>[12]</sup>。为此,深入探索成型工艺机理,强化过程监测,实现多工艺耦合优化分析对炸药高质量精密凝固成型具有重要意义。此外,控制凝固成型工艺参数,如合理的内部温度场、冷却速率、施加压力等都有利于提高装药质量和凝固效率。总之,熔铸装药工艺的改进以及工艺参数的控制归根结底都是基于流场和温度场优化熔铸炸药凝固行为和成型质量<sup>[13]</sup>。因此,结合数值仿真模拟研究炸药成型凝固演变规律、建立多种凝固工艺和参数与装药缺陷的关联以及在线监测技术实现过程参数的自适应调控等是日后的研究重点。

为此,本研究基于国内外熔铸炸药凝固工艺研究进展,综述了熔铸炸药浇铸与凝固过程中流场-温度场-应力场的数值模拟方法,并阐述了凝固护理中不同凝固工艺流程和作用机理,进而探讨了多种在线监测手段在熔铸炸药高质量精密成型技术中的应用。总的来说,梳理了熔铸炸药在凝固成型过程中缺陷的形成以及不同工艺和工艺参数对凝固的作用规律,展望了熔铸炸药凝固的指标需求和发展方向,为新型熔铸炸药凝固系统的研究、设计和应用提供理论和技术指导。

## 1 熔铸炸药凝固成型仿真模拟与缺陷形成

数值仿真技术在金属铸造领域的成熟应用,促使熔铸炸药在装药成型过程中的相变、凝固规律模拟研究短期内获得了快速发展。为了提升熔铸装药药柱的质量,缩短新工艺探索周期以及研发成本,有必要对浇铸过程和冷却过程的流场、热场和应力场进行建模分析,通过参数调控和工艺优化指导熔铸装药技术高质量发展。

### 1.1 浇铸过程的数学模型

熔融的炸药在浇铸流程始终处于液态,属于不可压缩流体,其浇铸过程的流体流动属于流体力学的研究范畴。因此,在熔融炸药浇铸至弹体模具的过程中,流体的运动信息可以通过求解代表质量守恒、动量守恒和能量守恒这3个控制方程来实现<sup>[14]</sup>。基于此,连续性方程、Navier-Stokes方程和能量方程可以用来描述液态炸药的浇铸过程<sup>[14]</sup>。

质量守恒方程(连续性方程):

$$D = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

动量守恒方程(N-S方程):

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \rho g_x + \mu \nabla^2 u \quad (2)$$

$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \rho g_y + \mu \nabla^2 v \quad (3)$$

$$\rho \left( \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \rho g_z + \mu \nabla^2 w \quad (4)$$

能量守恒方程:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c u \frac{\partial T}{\partial x} + \rho c v \frac{\partial T}{\partial y} + \rho c w \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \alpha \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \alpha \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \alpha \frac{\partial T}{\partial z} \right) + S \quad (5)$$

上述控制方程中, $D$ 为散度, $u, v, w$ 分别为速度在 $x, y, z$ 方向上的分量; $g_x, g_y, g_z$ 分别为 $x, y, z$ 方向上的重力加速度, $\nabla^2$ 为拉普拉斯算子; $\rho, t, p$ 和 $\mu$ 分别代表密度,时间,压力和粘度系数; $c, T, \alpha$ 和 $S$ 分别表示比热,温度,导热系数以及黏性耗散项。

模拟求解混合液态炸药的自由表面问题时,需要对体积函数方程进行求解,体积函数表示方程为<sup>[15]</sup>:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + u \frac{\partial f}{\partial x} + v \frac{\partial f}{\partial y} + w \frac{\partial f}{\partial z} = 0 \quad (6)$$

式中, $f$ 为体积函数, $0 < f < 1$ 时表明存在自由液面,通过求出每个单元的液体体积分数来表征自由表面的位置和形状。

根据雷诺数 $Re$ 的大小,流体流动可分为层流和紊流。炸药熔体浇铸至较大的弹体模具时极易产生紊流流动,因此采用紊流计算模型<sup>[16]</sup>才能较为准确描述炸药在弹体中的运动状态。有限元仿真软件中含有多种紊流的计算模型可供选择,在数值计算时,常采用 $k-\varepsilon$ 方程对液态熔铸炸药浇铸时的紊流流动进行求解<sup>[17]</sup>。

紊流动能 $k$ 方程:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left[ \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right] \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \frac{\mu_t}{\rho} \left[ \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right] \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \varepsilon \quad (7)$$

紊流耗散率 $\varepsilon$ 方程:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + U_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left[ \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right] \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{c_1 \mu_t \varepsilon}{k} \left[ \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right] \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \frac{c_2 \varepsilon^2}{k} \quad (8)$$

$$\mu_t = \frac{c_\mu \rho k^2}{\varepsilon} \quad (9)$$

式中,  $c_1$ 、 $c_2$ 、 $c_\mu$ 、和  $\sigma_\varepsilon$  均为紊流经验参数,  $U_i$  和  $U_j$  分别为  $x_i$  和  $x_j$  方向时均速分量。

基于以上模型,李敬明<sup>[18]</sup>、Sanhyew<sup>[19]</sup>等均对典型熔铸炸药的浇铸过程进行模拟仿真,研究了浇铸温度、炸药粘度以及浇铸速度等工艺参量对模具内流场分布与运动规律的作用行为,为工艺条件优化提供了技术支撑。总之, $k-\varepsilon$ 模型具有计算效率高且稳定性好的特点,紊流动能耗散模型的选择需要考虑流动熔体的物理特性以及计算资源的限制等问题。此外,模型的准确性还需要实验数据进行验证和校准。

## 1.2 冷却凝固过程的传热模型

液态熔融炸药浇铸至弹体模具后进行冷却凝固,该过程涉及热量传递、动量传递、质量传递以及液固相变。准确描述炸药内部温度场分布是预测其结构缺陷和优化工艺的前提,在冷却凝固过程中,涉及的热量传递主要包括液态炸药内部温度梯度导致的热传导,冒口漏斗中药液上表面与环境的热传导,液态炸药与弹体模具的对流换热,弹体模具与环境的对流换热以及凝固潜热的释放<sup>[20]</sup>。

### (1) 热传导

液态炸药凝固过程中的热传导由傅里叶定律来描述<sup>[20]</sup>:

$$q = -\alpha \frac{\partial T}{\partial n} \quad (10)$$

### (2) 对流换热

热对流现象存在于流体与固体的接触面之间,此过程由牛顿冷却定律来表达<sup>[20]</sup>:

$$q = h(T_w - T_f) \quad (11)$$

式中,  $q$  为热流密度,  $W \cdot m^{-2}$ ;  $h$  为对流换热系数,  $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ;  $\partial T / \partial n$  为温度沿法线方向的导数,  $K \cdot m^{-1}$ ;  $T_w$  和  $T_f$  分别为弹体壁温度和炸药流体温度,  $K$ 。

在炸药的實際凝固监测过程中,其主要的传热方式为热传导。因此对于液态炸药在弹体模具中的不稳定传热,采用不稳定导热偏微分方程来描述<sup>[20]</sup>。

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (\alpha_x \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\alpha_y \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (\alpha_z \frac{\partial T}{\partial z}) + Q_L \quad (12)$$

式中,  $\alpha_x$ 、 $\alpha_y$ 、 $\alpha_z$  分别为  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向上的传热系数,  $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ;  $Q_L$  为内热源,  $W \cdot m^{-3}$ 。

### (3) 结晶潜热

对材料凝固过程中的结晶潜热,一般采用热焓法进行热焓变换,其公式为<sup>[20]</sup>:

$$H = H_0 + \int_{T_0}^T c dT + (1 - f_s)L \quad (13)$$

通过求导转换可得:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial H}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t} = (c - L \frac{\partial f_s}{\partial T}) \frac{\partial T}{\partial t} \quad (14)$$

最终液态炸药在弹体模具中的导热偏微分方程为:

$$\rho \frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (\alpha_x \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\alpha_y \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (\alpha_z \frac{\partial T}{\partial z}) \quad (15)$$

式中,  $H$ 、 $H_0$ 、 $L$  分别为热焓, 初始温度热焓, 凝固潜热,  $kJ \cdot kg^{-1}$ ;  $f_s$  为固相体积分数。

从上述模型出发, Ji<sup>[21]</sup>等采用热焓模型和达西定律模拟壳体内熔铸炸药的相变过程和糊状区, 采用 SIMPLER 算法求解质量、动量和能量方程获取内部温度场, 分析了传导和对流对凝固的影响。此外, Chen 等<sup>[22]</sup>建立了等效热容模型, 研究相变过程中温度的变化和相变界面的位置。并以 TNT 为相变材料进行了实验和仿真, 验证了模型的准确性。在实际仿真过程中, 应结合流体流动模型、传热模型、凝固模型以及多相流等模型预测熔铸过程的温度场分布以及液固界面的推进规律, 优化熔铸炸药装药凝固工艺。

## 1.3 装药缺陷的形成机理

### 1.3.1 缩松与缩孔的形成

熔融的液态炸药注入弹体模具中自然冷却时, 由于弹壁较高的导热与对流换热系数, 凝固往往是由外及里发生。一般而言, 材料液相密度小于固态密度, 在凝固过程中若药柱内部没有液态炸药补充体积收缩, 则会使凝固药柱产生孔洞。其中体积大而集中的孔洞表现为大的缩孔, 分散且细小的孔洞则为缩松<sup>[23]</sup>。

与常规液固相变相同的是, 熔铸炸药在装药凝固过程中也会经历液态收缩、凝固收缩和固相收缩 3 个阶段。在初始凝固阶段, 由于凝固收缩以及重力的影响, 模具内装药的上表面会收缩且下凹, 表现为缩凹现象。随着传热不断进行, 药柱上表面温度降低到液相线温度以下并发生凝固, 而凝固层下方的液态炸药因热传导而液相收缩、液固相变收缩, 导致表面凝固层下方出现内部缩孔。在凝固后期, 因药柱内残余液态炸药的温度梯度和冷速较小且熔体无法流动, 因此该条件下凝固后形成了缩松缺陷<sup>[18]</sup>, 如图 1 所示。

预测凝固缩松缩孔的方法包括等温曲线法、温度梯度法、流导法、临界固相率和补缩距离相结合的方法<sup>[24]</sup>。熔体在模具中冷却凝固, 其补缩过程可以理解熔体在枝晶间流动。结合达西定律以及凝固收缩引



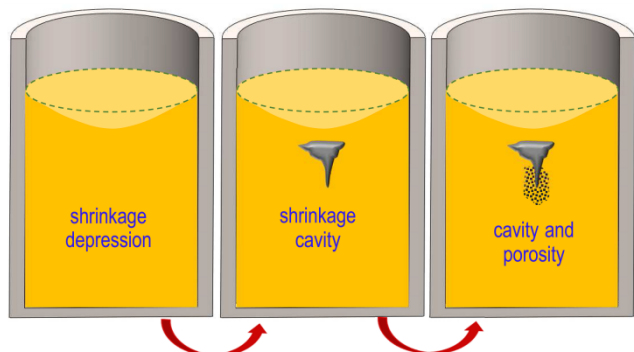


图1 装药缺陷演化<sup>[18]</sup>

Fig.1 Evolution of charge defects<sup>[18]</sup>

起熔体流动的速度分量,铸件缩松、缩孔大小和位置的预测模型可表示为<sup>[25]</sup>:

$$\frac{G}{\sqrt{R/\Delta p}} = \sqrt{\frac{\beta \mu g_L \Delta T}{K}} \quad (16)$$

在压力条件下的缩松判据可以表示为<sup>[25]</sup>:

$$G_{sc} / \sqrt{R_{sc}/p_{sc}} < K_c \quad (17)$$

式中, $G$ 为温度梯度, $K \cdot m^{-1}$ ;  $R$ 为冷却速率, $K \cdot s^{-1}$ ;  $\Delta P$ 和  $\Delta T$ 分别为压差(Pa)和温差(K),凝固收缩率 $\beta$ 、动力粘度 $\mu$ (Pa·s)和渗透率 $K$ ( $\mu m^2$ )均为熔体性质参数。体积液相率 $g_L$ 和 $\Delta T$ 则与枝晶中位置有关; $G_{sc}$ 、 $R_{sc}$ 和 $p_{sc}$ 分别为缺陷生成的临界温度梯度、临界冷速和临界压差。凝固过程中当两相区的凝固率达到临界凝固率时液体停止流动,补缩通道堵塞。若铸造的实际压差 $\Delta p > p_{sc}$ ,此时熔体将在压力下进行补缩,不产生缩松。反之,熔体停止流动,当其进一步收缩时,药柱产生缩松。

一方面,缩松缩孔缺陷的形成降低了装药密度,减弱了战斗部的能量密度与能量水平;另一方面且更为关键的是,缩松缩孔可使药柱形成热点,降低了炸药的临界点火压力,提高了其冲击感度,影响运输与使用安全。在装药过程中,是否产生缩松缩孔除了与炸药成分的物理性质相关,还与装药工艺与工艺参数紧密相连。比如,液态炸药的浇铸温度越高,炸药凝固后收缩体积越大,越容易形成缩孔。在熔铸炸药的装药与凝固过程中,除了采用分次注装与控制晶次外,设计合理的冒口漏斗进行保温与补缩控制等方式也是改善缩松与缩孔的有效方式<sup>[26]</sup>。

### 1.3.2 气孔的形成

液态炸药中存留的气体在凝固前未完全排出就会在药柱凝固后形成气孔,其一般分散于药柱的上部或表面区域。气孔的数量和尺寸超出一定规定后,会降低

低战斗部装药的机械强度,这也是引起弹药发射时发生膛炸的原因之一。

根据气孔产生的原因,弹药凝固后主要有卷入性气孔、反应性气孔以及析出性气孔<sup>[27]</sup>。(1)卷入性气孔。熔铸炸药在熔混过程中,表面吸附气体的高能固态炸药颗粒加入载体炸药熔体中以及混合过程中不断搅拌卷入的外界气体都会导致气孔的生成。除此之外,液态炸药浇铸过程中引起的药液飞溅以及浇铸速度过快都会带来气体并使其难以排出。特别是对于粘度较大的高固熔铸炸药,卷入的气体难以克服上升阻力而被包裹在液相中,凝固后形成气孔。(2)反应性气孔。由于熔铸炸药的液相温度较高,会与弹体模具中的杂质反应生成气体;模具中可能会含有水分和低熔点油脂,在与高温融态炸药接触时,水和油脂余热产生蒸汽,若无及时排出则形成气孔。(3)析出性气孔。熔铸炸药载体融化会引起气体被吸收或溶解,在凝固结晶的不断进行,残余液相中气体聚集区浓度提升至超过饱和浓度时,固-液界面即析出气泡形成气孔。

气孔缺陷的最终形成不仅与装药过程中弹体模具内的气体杂质有关,也受装药的压力环境所影响。气体析出的平衡总压力大于装药环境总压力时气泡才能形成析出,可表示为<sup>[28]</sup>:

$$p_t = p_a + H\rho_l + 2\sigma/r \quad (18)$$

式中, $p_t$ 和 $p_a$ 分别为总压力和大气压力,Pa; $H$ 和 $\rho_l$ 为气泡以上液态炸药高度(m)和密度( $kg \cdot m^{-3}$ ), $\sigma$ 和 $r$ 分别是液态炸药表面张力( $N \cdot m^{-1}$ )和气泡半径(m)。

基于弹药气孔产生的原因,在装药工艺和生产中采用以下措施来减小或消除气孔以提高装药质量。(1)炸药熔混时应缓慢搅拌,不仅减少了卷入气体的体积,而且有利于吸附在固态炸药颗粒表面的气体溢出;(2)液态炸药浇铸时应缓慢细流,注入弹体后可缓慢搅拌,将气泡引出;(3)设计冒口漏斗充分考虑排气问题;(4)采用真空振动混药、注药,减少气体引入且有利于排出。

### 1.3.3 铸造应力的产生

液态炸药在冷却凝固过程中,药柱在某一方向上的尺寸会发生变化,若此过程受到阻碍,则会在药柱中产生铸造应力。铸造应力大于药柱的抗拉强度,则会在相应位置产生裂纹;如果小于药柱的抗拉强度,则在该处形成残余应力,如不消除也会影响炸药性能。

铸造应力按形成原因主要可分为热应力和相变应

力。装药凝固时,弹体中心的温度最高,往弹壁方向温度梯度降低,因此冷却凝固时径向不同尺寸的药柱收缩量不同,这种因温度不均而引起的铸造应力即为热应力。炸药药柱在冷却过程中因发生液固相变时间不一致使各部分变形不均匀而产生的应力称为相变应力。

熔铸炸药凝固时若要控制裂纹的生成,则需要保证炸药药柱的抗拉强度 $\sigma_e$ 大于凝固药柱所受到的最大铸造应力,因铸造热应力对药柱凝固质量的影响较大,因此采用注药热应力 $\sigma_{\max}$ 代表最大铸造应力<sup>[29]</sup>,即:

$$\sigma_e > \sigma_{\max} = K \frac{Ea}{1-\nu} \Delta T \quad (19)$$

式中, $E$ 为药柱的弹性模量,MPa; $a$ 为线膨胀系数, $K^{-1}$ ; $\nu$ 为材料泊松比; $\Delta T$ 为装药中心与边缘温度的差值, $K$ ;  $K$ 是与浇铸环境和弹体模具相关的常数。由式(19)可知,热应力与药柱的弹性模量、线膨胀系数以及温差成正比,而凝固药柱温差与弹体半径、药柱导热系数、冷却速率以及凝固顺序有关。弹体半径越大以及炸药材料的导热系数越小,热应力越大。

热应力和药柱裂纹的存在不仅会降低弹药毁伤威力,也影响其发射安全。为了减小凝固药柱的热应力、防止裂纹的产生,可以从炸药成分和装药工艺优化两方面进行改善。如在液态炸药中加入少量硝化棉或高分子黏合剂,不仅可以提高药柱的抗拉强度,也可以降低其弹性模量。在装药工艺方面,提高模具冷却过程中的环境温度,降低对流换热系数。如将弹体置于保温烘箱缓慢冷却或在弹体与冒口外壁施加保温夹套等都可有效减少内应力与微裂纹,提高装药质量。

相变应力是因液固相变时间不一致而使各部分变形不均匀产生的应力。因此,对弹体模具施加冒口保温,浇铸前预热弹体等可以减少热影区的范围,使各部分冷却趋于一致,从而减少相变应力<sup>[30]</sup>。此外,提高模具与芯子退让性使铸件在凝固过程更加自由收缩,在药柱成型时施加振动时效处理<sup>[31]</sup>均会降低相变应力,提高药柱整体性能。

### 1.3.4 颗粒沉降与密度不均

颗粒沉降是流体力学中的经典问题,也是造成熔铸炸药装药密度不均的主要原因<sup>[32]</sup>。在熔铸炸药成型过程中,因其炸药颗粒(RDX、HMX等)与熔铸载体(TNT、DNAN等)存在密度差,因此会产生沉降现象。颗粒沉降和密度不均会导致炸药药柱内部存在气孔和疏密区域,而这些区域会通过影响炸药的爆轰传播速

度和压力分布削减炸药的爆轰性能;此外,颗粒沉降与密度不均会导致药柱内部存在应力集中,降低炸药稳定性<sup>[32]</sup>。

目前,实验测试和数值仿真是研究颗粒沉降机理的2种方式<sup>[33]</sup>。在实验测试中,采用粒子图像测速仪(PIV)、粒子追踪测速仪(PTV)以及粒子动态分析仪(PDA)等装置获取炸药颗粒运动轨迹以及流场结构<sup>[34-35]</sup>。数值仿真方法包括拉格朗日-欧拉算法以及有限元等,其研究颗粒沉降的关键是准确描述颗粒的曲线边界。在网格划分上固体区域采用拉格朗日网格,流体部分则使用欧拉网格<sup>[36]</sup>。

为了描述球形固态炸药颗粒在熔铸载体中的沉降过程,以颗粒为坐标系建立数学模型。炸药颗粒在沉降过程中受载体曳力、浮力以及自身重力作用,其运动行为由牛顿运动方程描述,并通过非惯性体积力将其与描述流体流动的偏微分方程耦合。对于瞬态、不可压缩黏弹性熔铸载体的绝热流动,其控制方程包括连续性方程、动量守恒方程以及描述附加弹性应力的粘弹性本构方程<sup>[37]</sup>。

连续方程:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (20)$$

动量方程:

$$\rho \left( \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} \right) = \nabla \cdot (-\mathbf{p}\mathbf{I} + \boldsymbol{\mu}(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) + \boldsymbol{\tau}_p) + \mathbf{F} \quad (21)$$

粘弹性本构方程:

$$f_t(\boldsymbol{\tau}_p) + \lambda \overset{\nabla}{\boldsymbol{\tau}}_p = 2\mu_s f_p(\boldsymbol{\tau}_p)(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) \quad (22)$$

$$\overset{\nabla}{\boldsymbol{\tau}}_p = \frac{\partial \boldsymbol{\tau}_p}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \boldsymbol{\tau}_p - \left( (\nabla \mathbf{u}) \boldsymbol{\tau}_p + \boldsymbol{\tau}_p (\nabla \mathbf{u})^T \right) \quad (23)$$

式中, $\mathbf{u}$ 是速度矢量, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ; $\mathbf{I}$ 是单位张量, $\boldsymbol{\tau}_p$ 为附加黏弹性应力,Pa;由粘弹性流体本构方程确定, $\mathbf{F}$ 为流体在非惯性系中运动时的惯性力,N; $\lambda$ 和 $\mu_s$ 分别为松弛时间(s)和溶质黏度(Pa·s); $f_t$ 和 $f_p$ 分别为松弛函数与黏度系数,其值对应于不同的本构方程。

颗粒沉降的牛顿运动方程为<sup>[37]</sup>:

$$\mathbf{F} = m \frac{d^2 \mathbf{z}}{dt^2} = \mathbf{F}_z + \mathbf{F}_g \quad (24)$$

$$\mathbf{F}_z = \int_{\partial \Omega_s} \mathbf{n} \cdot \left( -\mathbf{p}\mathbf{I} + \boldsymbol{\mu}(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) + \boldsymbol{\tau}_p \right) \cdot \mathbf{e}_z dS \quad (25)$$

式中, $m$ 和 $\mathbf{z}$ 分别为炸药颗粒质量(kg)和位移(m); $\mathbf{F}_z$ 为流体对颗粒曳力(N), $\mathbf{F}_g$ 为颗粒重力(N); $\partial \Omega_s$ 和 $\mathbf{n}$ 分别是球形颗粒外表面积( $\text{m}^2$ )和表面的单位法向量; $\mathbf{e}_z$ 为流体运动方向单位矢量, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ , $t$ 是沉降时间,s; $\mathbf{T}$ 表示转置。

除密度差外,颗粒粒度、形状、颗粒的电荷性以及熔铸载体的流体性质都会对颗粒沉降产生作用<sup>[37]</sup>。根据 Stokes 定律<sup>[37]</sup>,假设球形炸药颗粒在熔铸载体中匀速下降时,其沉降速度  $V$  可表达为<sup>[37]</sup>:

$$V = \frac{d^2(\rho_s - \rho_l) \times 0.98}{18\eta} \quad (26)$$

式中,  $d$  是固态炸药颗粒直径,  $m$ ;  $\rho_s$  和  $\rho_l$  分别为炸药颗粒和液态载体密度,  $kg \cdot m^{-3}$ ;  $\eta$  为悬浮液粘度,  $Pa \cdot s$ 。

可见,混合悬浮液中固体炸药颗粒的沉降速度与其直径的平方和固液两相密度差值成正比,而与悬浮液的粘度成反比。悬浮液粘度受温度、浓度、颗粒粒径/形状/粗糙度、颗粒级配等因素影响。粘度增大,注药流动性降低,可有效降低颗粒沉降,同时提高装药均匀性与装药密度;但混合液态炸药粘度过大会引起装药气孔缩孔等缺陷增多、装药工艺复杂化等不利因素,因此需要结合数值仿真与实验验证研究混合炸药悬浮液粘度-沉降行为-凝固行为的匹配规律。综上,物料在浇铸过程中经历液态→固液共存→固态的物理相变过程,也会在相变过程中发生热力学和动力学转变而

影响熔铸炸药的成型过程和质量。在仿真过程中通过综合考虑影响材料熔铸过程流场和温度场的参数如:铸件结构、模具参数、物料物性参数、工艺条件参数(温度、压力等)以及网格划分参数,进而实现对浇铸成型过程多物理场的精准计算,研究不同工艺条件下物料的凝固规律与质量预测。图 2 展示了在压力铸造<sup>[8]</sup>和水浴冷却<sup>[38]</sup>两种凝固方式下的温度场、固相体积分数以及凝固缺陷的数值模拟云图,其计算结果可以对凝固缺陷进行准确预测和有效改善。最终实现装药工艺的改进与工艺参数的优化,同时输出经校核的仿真 APP 以及指导熔铸炸药装药成型的工艺包,如图 3 所示。

## 2 熔铸炸药凝固成型工艺

熔铸炸药的凝固成型是一个液固相变的过程,该工艺是将熔融态的混合炸药或悬浮体炸药浇铸至模具壳体中冷却成型的过程。优化熔铸炸药凝固成型工艺可以调控固体药柱的晶粒尺寸、缺陷分布以及整体密

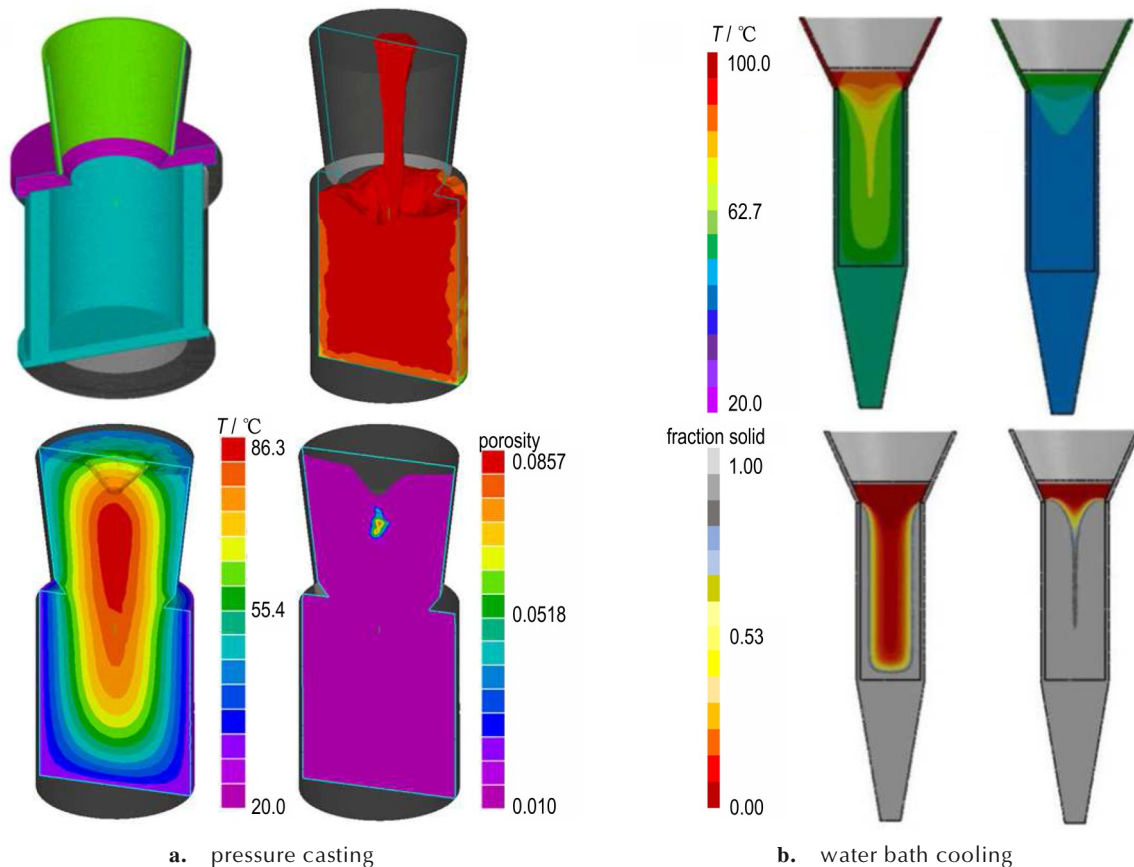


图 2 熔铸炸药凝固过程的数值仿真<sup>[8,38]</sup>

Fig.2 Numerical simulation for the solidification process of melt-cast explosives<sup>[8,38]</sup>



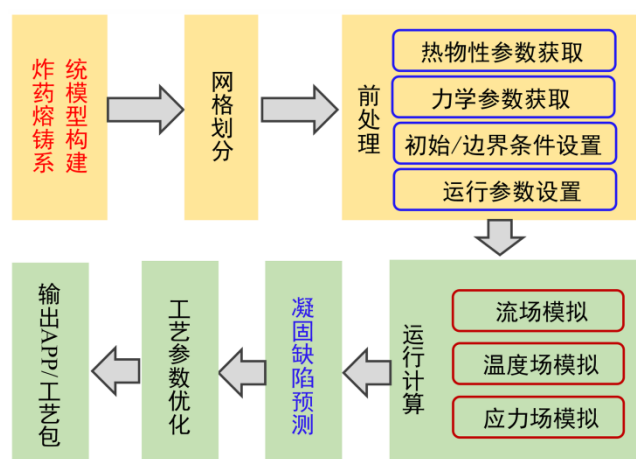


图3 熔铸装药仿真模拟流程

Fig.3 Simulation process of melt-casting charge

度等,是改善最终装药性能的关键工序。基于温度、压力、真空度等外部因素控制以及成型装药质量要求,根据成型条件与凝固特征差异,熔体浇铸成型主要可分为预制药块工艺、真空振动浇铸工艺、分次浇铸工艺、热芯棒后处理工艺、加压凝固工艺、水浴冷却凝固工艺以及冒口漏斗保温工艺等<sup>[39]</sup>。

### 2.1 预制药块工艺

预制药块工艺也称块铸法,是将预制合适大小的药球或药块以及液态炸药均匀地浇铸至弹药腔体或模具中完成冷却并凝固的方法。在冷却凝固过程中,结晶潜热除了由弹壁和冒口向外散出外,内部低温的固体药块也会吸收部分热量,缩短了凝固时间并改变了宏观上由外向内的凝固顺序。

在块铸装药工艺中,预制药块的质量影响着战斗部装药的最终成型质量。刘海青等<sup>[40]</sup>设计了预制药块水冷制备工艺,与常规自然冷却凝固相比,水冷制备

药块工艺安全性高,成型质量好,密度均匀性且凝固效率大幅提升。焦云多等<sup>[41]</sup>提出了改进的DNAN基熔铸炸药块铸装药质量控制方法,他们将药块均匀分散且保证药块不高于药液,在合适的凝固护理下消除了凝固缺陷,使得装药质量显著提升,如图4所示。预制药块工艺目前广泛应用于航弹、水雷和中大口榴弹等大型弹体装药。但由于较高的凝固速率带来的分散缩孔以及因液固药料之间较大温差而产生的局部热应力,该凝固工艺不适用于装填受膛压较大以及惯性力较大的火箭弹。

### 2.2 真空振动浇铸工艺

炸药熔体在真空条件下浇铸进弹体以及冷却凝固的整个过程中,由于炸药未接触空气,因此避免了凝固后气孔的形成,也不会造成弹体装药结构复杂处浇不足的问题,提高了药柱密度。在真空浇铸过程中或在弹体模具中冷却凝固时施加一定的振动行为称为真空振动注装工艺,其振动方式包括机械振动以及声波振动<sup>[42]</sup>等。在该工艺过程中,炸药熔体中细小的气泡在振动的作用下碰撞结合成较大气泡溢出,有效降低内部气孔生成概率,提高装药相对密度。而且,液固悬浮液中的固体颗粒在振动作用下加速运动,降低了熔体内部摩擦力和粘度,有利于气泡排出。此外,在凝固动力学角度,振动会促进晶核的形成,也会将已生长的粗晶打碎,减少了凝固药柱的缺陷并提高其机械强度。

金大勇等<sup>[43]</sup>采用正交试验法研究了多种工艺因素对MX-2炸药装药密度和均匀性的影响行为,多组实验结果表明影响程度最大的工艺因素为真空处理时间。研究同时获得了MX-2熔铸炸药装药工艺的最佳真空处理时间、真空度和药浆温度等。针对高固高黏

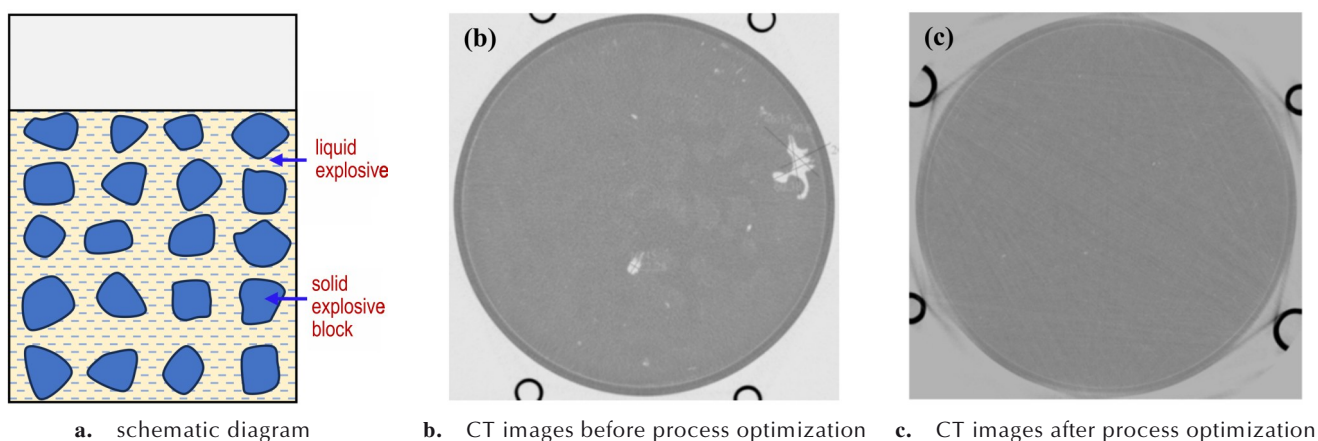


图4 块铸工艺<sup>[41]</sup>

Fig.4 Explosive block casting process<sup>[41]</sup>

炸药浇铸工艺的特殊需求,陆志猛等<sup>[44]</sup>基于偏心块优化以及振动理论计算设计了一套可前后开门的真空振动浇注装备,如图5a所示,该装备对提高高黏物料浇铸效率和质量具有重要保障。此后,彭泓铮等<sup>[45]</sup>采用真空振动和保温等装药控制工艺,使高固含量的RDX-DNAN熔铸炸药无缺陷且高致密成型,其装药密度达 $1.717\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。可见,真空振动浇铸工艺可促使气泡上浮、凝固结晶细化、提高黏稠液浆的流动性和流平性以及振动消除铸药应力等,能有效提高熔铸炸药浇铸质量。然而,真空振动浇铸工艺装备包括真空系统与液压振动系统等多套耦合系统,工艺相对复杂,需要对真空度与振动参数等进行的精确调控以优化装药质量。

### 2.3 分次浇铸工艺

分次注装法是将熔融态炸药分多次浇铸到弹体模具中,通过控制合适的时间间隔,使得下部冷却凝固收

缩部分由上层药液补充,药柱最终由下而上完成凝固。刘威等<sup>[46]</sup>基于缩孔形成因素分析和缺陷控制研究,建立了RDX/TNT熔铸炸药的分次浇铸工艺数值仿真模型,如图5b所示。仿真结果表明:控制合适的浇铸次数以及浇铸时间间隔,凝固层以漏斗状向上推移且会被上层熔体补缩,凝固药柱的缩孔率显著降低且缩孔远离药柱中心,提高了装药质量。分次浇铸工艺可以减少弹体内部因补缩不及时而产生的缩松和缩孔,也可以改善内应力避免微裂纹的产生,主要应用于大直径比、大体积战斗部的装药。分次注装法的缺点表现为多次凝固和浇铸可能会使药柱凝固后出现分层现象以及不同层之间的密度差异,因而影响注装弹药的安全和环境适应性。

### 2.4 冒口漏斗-热芯棒保温凝固工艺

在炸药凝固过程中,为了减少缩孔,及时补充熔体

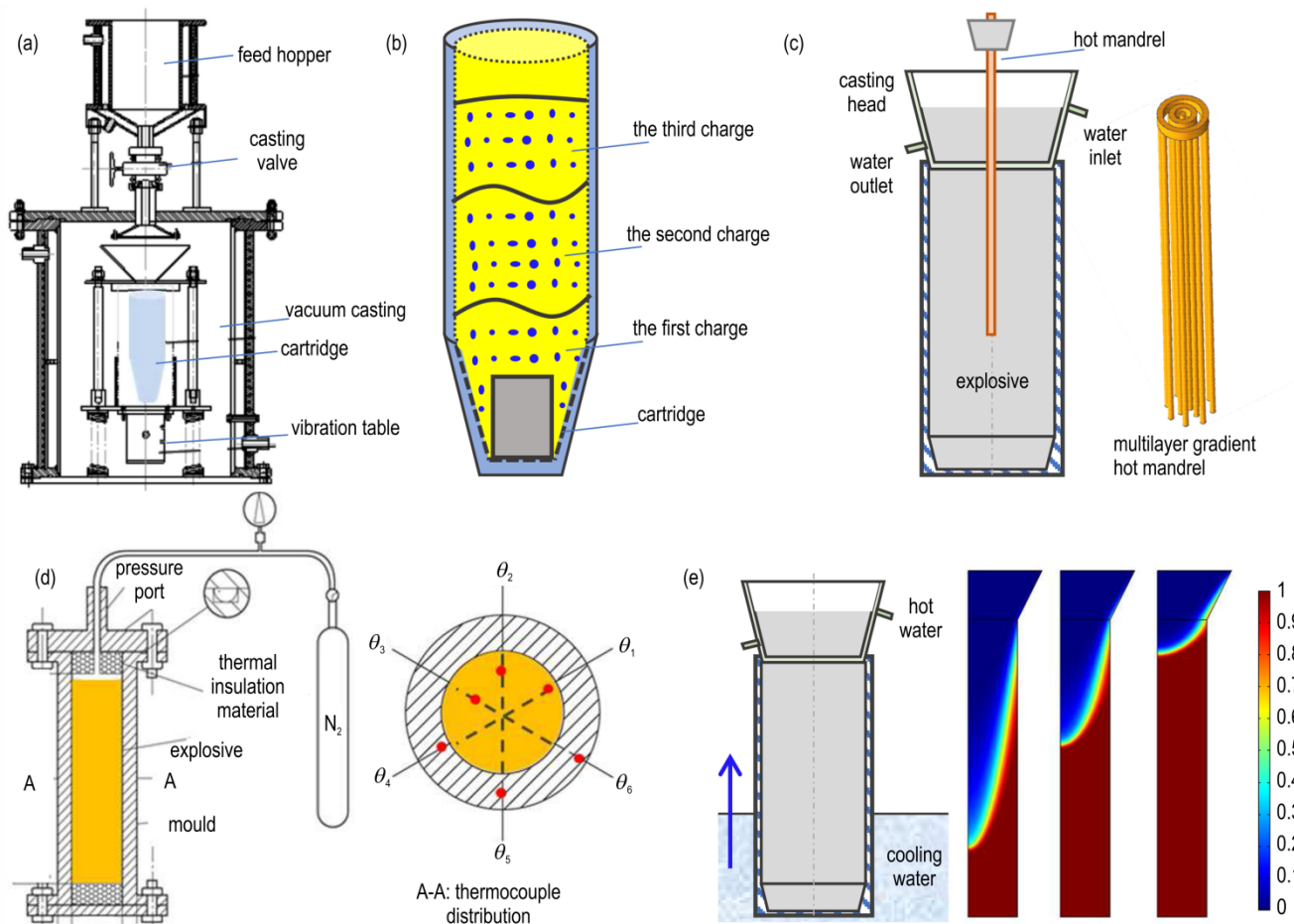


图5 熔铸装药凝固工艺图(a.真空振动浇铸工艺;b.分次浇铸工艺;c.热芯棒-冒口漏斗保温凝固工艺;d.加压凝固工艺;e.水浴冷却凝固工艺)<sup>[44,46,48,51]</sup>

Fig.5 Solidification process diagram of melt-cast charges(a. vacuum vibration casting process, b. fractional casting process, c. hot mandrel-riser funnel thermal insulation solidification process, d. pressure solidification process, e. water bath cooling and solidification process)<sup>[44,46,48,51]</sup>



凝固收缩产生的空隙,在壳体或模具的浇铸口处安装冒口漏斗是十分必要的。冒口漏斗的尺寸和结构要与炸药的粘度、导热系数等热物理性质以及装药壳体的尺寸和口部结构相匹配。冒口漏斗保温工艺通过加热套(水蒸气或循环热水)对冒口进行加热,使冒口漏斗长时间保持较高温度,进而维持内部炸药处于熔融状态,有利于推迟炸药柱补缩通道的凝固。在炸药完全凝固后,需要对冒口机械化拆除并进行药面修整。该工艺可以将装药缺陷引入到冒口漏斗中,减小药柱内部缩孔缺陷,但对于大体积弹体装药凝固缩孔的改善是有限的。

炸药熔体浇铸至弹体模具后,在冷却而又未完全凝固前将通有循环热水或水蒸气的热芯棒从冒口漏斗处插入炸药熔体中的后处理方式称热芯棒工艺。在该工艺工程中,热芯棒周围局部凝固的炸药将重新熔化,进而对药柱中心的纵向缩孔进行补缩,提高了装药密度和装药质量。

张向荣等<sup>[47]</sup>基于数值模拟与实验验证相结合的方法,探索了冒口保温工艺对DNP/HMX熔铸炸药装药冷却凝固规律及装药缺陷的影响规律。结果表明:施加冒口预热保温条件可以控制药柱凝固顺序,保证整个凝固过程补缩通道畅通并有效降低内部缺陷。同时还发现,随装药尺寸的增大,相同冷却条件下需要更高冒口预热温度消除药柱凝固缺陷;而当装药尺寸超过临界值后,除了冒口漏斗保温外还需要其他热护理以消除内部缺陷。为提高大长径比战斗部内部装药质量,岳晓媛等<sup>[48]</sup>设计了一种优化的多层梯度控温的热芯棒,如图5c所示。为了降低药柱同一高度的径向温差,热芯棒作为内部热源需要具有由内到外的梯度温降以改变药浆的凝固顺序。结合冒口漏斗并调控优化后的热芯棒温度梯度,可以实现冒口下方的药柱缺陷完全消除。

## 2.5 加压凝固工艺

加压凝固工艺是炸药熔体浇铸到弹体模具后,使其在施加一定压力下发生凝固。根据Clausius-Clapeyron方程<sup>[49]</sup>,压力增大会导致熔体的熔点升高,在加压工艺中,炸药浇铸后其发生液固相变的时间提前,整体时间缩短,冷却速率加快。施压适当压力下,炸药熔体各部位所受压力基本相同,整个药柱体积的凝固几乎同时发生,避免了传统凝固热传导而产生的装药疵病。此外,熔铸加压成型工艺除了能有效降低药柱内部缺陷,还可以消除药柱与弹体的间隙和底隙。

Meng等<sup>[50]</sup>通过增加自由表面施加压力来减小缩

松的方法实现了DNAN/RDX熔铸炸药的压铸,并探索了压力对熔铸炸药凝固特性的影响。当铸造容器施加压力从0.1 MPa提高到0.8 MPa时,药柱凝固后缩松率显著降低,相对密度可以从92.3%提升到99.8%。此外,铸造容器的压力增加可以在明显提高凝固速率的情况下优化装药质量。朱道理等<sup>[51]</sup>为揭示加压成型工艺缩短装药凝固时间的机理,采用图5d所示的加压凝固成型工艺装备以及利用径向不同位置热电偶的全程监测,阐明了凝固成型压力增大会提高装药与模具间的界面换热系数。除此之外,黄勇等<sup>[52]</sup>也设计了配备多通道数据温度场在线采集的加压凝固装置,通过对RDX/TNT60/40炸药的凝固实验研究发现,0.6 MPa的外加压力不仅提高了凝固温度、缩短凝固时间,也有效改善了该成分熔铸炸药的装药质量。北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室基于高压凝固工艺原理,设计了一套高压熔铸成型系统<sup>[53]</sup>。该实验室关通等<sup>[53]</sup>通过对工艺参数的调控,发现熔铸代料在加载压力25.45 MPa、保压时间60 min以及加压时机80 °C工况下制备了相对密度99.9%且无缺陷的药柱。总之,今后需结合建模仿真与实验验证,探索加载压力和保压时间等工艺参数组合对典型熔铸炸药加压成型的影响规律,推进高压凝固工艺的工程应用。

## 2.6 水浴冷却凝固工艺

将装有炸药熔体的弹体模具以一定速率伸入适当温度的冷水中,或将其置于不断升高的冷水中,使其自下而上发生凝固的工艺称为水浴冷却凝固。通过改变水温、弹体与冷水交换速度来实现弹体内药柱凝固速率的调控,使其凝固界面呈现漏斗状向上推移,如图5e所示。在此过程中,不但提高了药柱热传递效率,缩短凝固时间,也减少了缩孔和固体颗粒沉降等凝固缺陷。

基于水浴护理凝固控制技术,易茂光<sup>[54]</sup>和高丰<sup>[55]</sup>利用仿真和实验验证结合的方法研究了熔铸炸药的水浴冷却液固界面推移速率和凝固成型机理。他们的结果均表明:水浴护理能控制熔铸炸药的凝固顺序由底部到口部逐层顺序凝固,该工艺不但提高了凝固速度和装药均匀性,也改善了装药密度和质量,有助于优化弹药毁伤性能及使用安全性。进一步地,杨治林等<sup>[56]</sup>采用数值模拟技术结合正交试验和关联度分析等方法,探究了梯黑炸药水浴顺序凝固工艺过程中水浴温度、水位上升速度、冒口温度对药柱凝固时间和内部缩孔缩松的作用行为。较低的水浴温度以及较高的冒口温度和水位上升速度利于装药质量的提升,且水位上

升速度是影响药柱凝固时间和缺陷体积的关键因素。同时, SANHYE等<sup>[57]</sup>通过数值仿真技术研究了内部热探针与水浴冷却相结合的熔铸凝固过程, 通过降低模具内部温度梯度而减小铸件的残余应力。

总的来说, 在实际的熔铸炸药凝固成型工艺中, 常采用多种凝固工艺的耦合, 并结合仿真技术对凝固控制参数的优化以提高成型质量, 实现熔铸炸药固体药柱的精密成型。

### 3 熔铸炸药凝固的在线监测技术

为了提高弹药使用安全性、毁伤性能以及战场生存能力, 除了对其装药成型工艺改进外, 也需要对成型过程中的演化规律和变化机制深入探索。因此, 在熔铸炸药装药凝固及成型过程中要实现工艺参数和成型质量的在线监测。炸药熔铸成型过程中, 涉及温度场、应力应变场以及流变场的动态变化, 大量研究结果表明, 这些参量的变化将显著影响炸药熔铸成型过程的凝固规律、体积收缩、缺陷形成机制和演变规律<sup>[18, 28, 41, 57]</sup>。因此, 开展温度场、应变场、流变场等参量在线监测技术研究以及凝固质量的在线监测, 有助于控制炸药熔铸成型质量, 建立与装药缺陷损伤联系<sup>[58]</sup>, 图6展示了在凝固成型过程中用于在线监测温度与应力的光纤布拉格光栅(FBG)以及监测凝固质量的 $\mu$ CT装置。

#### 3.1 粘度在线监测

粘度对混合炸药悬浮液中的颗粒沉降行为和凝固成型过程中的传热传质起决定性作用, 因此, 准确表征混合炸药熔体的粘度大小是十分有必要的。在物料浇铸后以及降温过程中, 采用振动式在线流变测试仪和

旋转式在线流变测试装置, 可获取不同温度下物料的表现粘度变化。Guillemin等<sup>[59]</sup>预测并测试了钝感熔铸炸药装药过程的流动时间模型, 建立了熔铸混合炸药粘度与固含量、最大装填密度和熔铸载体粘度之间的相关关系。蒙君熹等<sup>[60]</sup>采用数字旋转粘度计测量了DNAN/HMX熔铸炸药的表现粘度, 探索了不同HMX固含量、粒度大小、颗粒级配以及温度对悬浮液流变行为的影响。Zhu等<sup>[61]</sup>通过Haake Mars III流变仪测量并表征了DNAN基熔铸炸药的流变特性, 悬浮液的剪切稀化以及粘度演化研究为DNAN/HMX熔铸炸药配方设计和制备成型提供了重要的数据支撑。目前, 由于熔铸炸药的特殊性质以及浇铸装药复杂的工艺过程, 现有的检测技术存在一定的局限性, 如传感器与炸药熔体的接触性测量破坏弹体内稳态的传热与流场, 也容易受振动等工艺环境的干扰, 从而影响检测结果的准确性与稳定性。通过粘度超声测试技术<sup>[62]</sup>可测量超声波在被测流体中的传播时间与频率随温度的变化, 进而推算工艺过程的粘度演化。未来, 应推广超声法实现熔铸炸药粘度的在线无损检测, 确保其质量与安全性。总之, 熔铸过程粘度的精准测量需要建立基于可靠传感器技术以及模型和算法的在线监测系统, 粘度的在线监测不仅对基础研究中凝固仿真和凝固规律探索提供熔体物性和流动等数据支撑, 也是熔铸工艺优化并控制凝固质量的手段之一。

#### 3.2 温度在线监测

战斗部的壁面温度影响着内部炸药熔体的温度场变化, 而内部熔体的温度场变化决定着粘度的改变以及凝固演化行为, 最终作用于药柱的生产周期以及凝固质量。因此, 准确测量战斗部壁面温度以及内部温

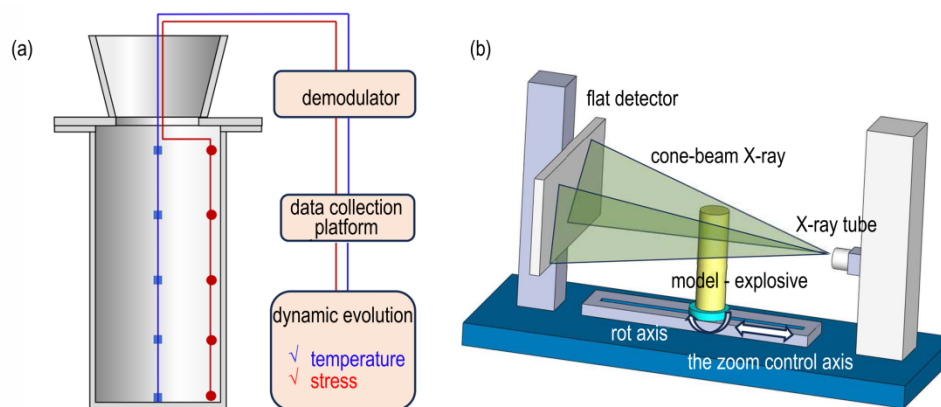


图6 熔铸炸药凝固过程中的在线监测技术(a. 用于温度和应力测量的Fiber Bragg Grating (FBG); b. 熔铸成型过程的 $\mu$ CT试验装置)  
Fig.6 On-line monitoring techniques in the solidification process of the melt-cast explosive (a. FBG for temperature and stress measurement, b.  $\mu$ CT device for melt-casting process)



度场演化是十分重要的。熔铸炸药凝固过程的温度在线监测分为接触式测量和非接触测量等,接触性测量包括热电阻、热电偶以及布拉格光栅等方法,而非接触性测量包括红外测温仪测温等措施。Kumar等<sup>[6]</sup>设计了等距分布在药柱径向的数个热电偶传感器,通过监测TNT基熔铸炸药凝固过程中冷却温度随时间和空间的变化规律,讨论了温度场对装药质量的影响。张百磊等<sup>[63]</sup>采用多点分布式Bragg光栅组,研究了PBX固化工艺过程中温度场和应力场的变化规律,为炸药药柱缺陷研究奠定了基础。上述测温方式中,热电偶法具有测温准确且测温范围广等特点,Bragg光栅具有体积小以及响应时间短的优点,然而接触式测温传感器线路布置复杂且会影响温度场分布。红外热像仪作为非接触温度测量装置,可以收集、过滤并处理弹体模具的辐射能量,最终输出装药凝固过程中弹体的热像分布图,实现单体不同区域温度场演化的在线监测<sup>[64]</sup>。未来,一方面可能会发展太赫兹时域光谱技术和红外热成像技术实现对熔铸炸药温度场的非接触式无损监测,也会采用多种传感器融合的技术,以提高温度场监测的准确性和稳定性。此外,监测数据与热-流-固多物理场耦合模拟技术的结合,也可以更准确地预测熔铸炸药凝固过程中的温度场分布与演化。总之,结合熔铸物料特性与凝固工况要求,选择并建立凝固过程中高精度的接触式或非接触式温度在线监测系统,不仅可以基于温度场调控提高产品质量,也可实现熔铸工艺过程设备健康预警与质量、安全数据溯源。

### 3.3 应力应变在线监测

浇铸过程中炸药内部应力产生及变化情况是重点关注对象,其影响着裂纹等缺陷的形成,因此,应力应变在线监测对跟踪工艺中产品高质量生产至关重要。要测量炸药药柱凝固时的内部应力,首先要测量药柱受力产生的应变。电阻应变仪是将发生的应变转变成电量改变的测量仪器,应变测量的转换元件为应变片。基于对炸药在浇铸过程中应力产生原因进行分析,考虑采用预埋应变传感器方式进行在线测量。即在炸药浇铸入模具前预先将应力测量元件埋入,待炸药浇铸入模具后将检测元件包覆。董明等<sup>[65]</sup>采用预埋的应变传感器对炸药凝固过程的热应力进行了在线监测,并介绍了浇铸过程中半桥测试法和基于铂电阻测温原理的对比比较两种应力检测方法。陈春燕等<sup>[66]</sup>基于温度补偿校正的应变片实现了浇铸炸药内部应力的准确测量,为凝固收缩应力对裂纹产生的影响研究提供了基础。此外,学者也通过埋入式光纤光栅传感器实

现对炸药凝固过程的应力应变进行测量,在实验过程中,由光纤光栅反射光波长的变化即可获得该点处药柱的应变<sup>[67]</sup>。如果在一根光纤上刻写多个中心波长不同的布拉格光栅,可以同时测量炸药药柱多点处的应变,实现空间应力应变场的测量。显然,现有熔铸炸药应力应变在线监测为接触式测量,不但对浇铸及冷却过程的温度场产生影响,也会对凝固药柱的整体性带来破坏。未来,应将基于超声等方法对材料内部应力应变的无损测量推广到熔铸炸药装药凝固的在线监测当中。也应将药柱表面易于获取的应力应变数据与成型过程中模型建立与应力场仿真计算相结合,实现药柱内部应力应变场的预测与分析。总之,选择适合典型熔铸炸药凝固过程监测的应力应变传感器,建立实时监测与数据采集系统,分析评估凝固过程中的应力分布、应变变化以及可能形成的缺陷和异常状况,调整模具设计,优化生产工艺并提高产品质量。

### 3.3 凝固质量在线监测

熔铸炸药凝固工艺与过程控制影响其最终质量,凝固工艺的优化不仅需要大量传热与相变仿真计算,也需要有效的无损在线检测方法对熔铸炸药的凝固质量进行实时监测。目前为止,国内外报道的在线无损监测方法主要包括超声监测、射线监测以及声发射等。超声监测是利用超声波在界面处的反射、折射以及在介质中的衰减能量大小来进行探伤,与界面的取向关系以及声阻抗差异有关。裴翠祥等<sup>[68]</sup>设计了一种基于激光超声技术的PBX炸药缺陷非接触无损监测方法,通过多激光束同时激励,可在保证物料安全温度范围内大幅度提高激光超声对内部裂纹和气孔的检测能力。此外,利用多通道超声波透射技术,Zhang等<sup>[26]</sup>对熔黑梯炸药凝固成型时的内部质量实现了有效监测。X射线探伤是根据材料内部正常区域和缺陷区域对射线吸收的衰减程度差异,对大体积材料内部结构进行定性和定量测试的方法。随着发展,该CT技术监测装置不断应用于熔铸炸药成型过程中密度和凝固质量演化的分析测量中。李敬明等<sup>[18]</sup>采用工业CT对TNT和RHT熔铸炸药成型的内部疏松缩孔进行监测,讨论了药柱成型过程中内部缺陷的成因和机理。除此之外,中物院化工材料所张伟斌及田勇等<sup>[69]</sup>基于微焦点CT( $\mu$ CT)技术实现了高固熔铸炸药内部结构的表征,并通过CT图像分析了凝固成型过程中缺陷形成的影响因素,提高了固体药柱的凝固成型质量。声发射(AE)是通过检测凝固后样品损伤(微裂纹、孔隙、底隙等)演化过程中释放的弹性应力波来探测缺陷的位置、



类别及其发展状况,实现在线监测。目前,声发射技术已广泛应用于材料在加载条件下反馈的声发射信息改变来衡量内部损伤情况,如Wang等<sup>[70]</sup>结合声发射和数字图像的方法,测量和评价了聚合物粘结炸药在单轴压缩下的损伤演化。与此同时,国外研究机构通过同步X射线 $\mu$ CT技术<sup>[71]</sup>、高分辨X射线监测可视化<sup>[72]</sup>以及超高电压计算机断层扫描技术<sup>[73]</sup>进行了广泛的材料无损监测与质量控制研究。而且,Hase<sup>[74]</sup>和Leksowsskij<sup>[75]</sup>分别在疲劳损伤在线监测与识别和凝固微裂纹的成核动力学研究中将声发射技术进一步推广。随着声发射技术的发展以及高精密度测量设备的开发,声发射在熔铸炸药装药凝固过程中液固界面迁移和成型质量在线监测等方面的应用将不断拓展和突破。总的来说,超声检测、X射线检测以及声发射技术都可以在无损状态下观测熔铸炸药药浆凝固过程的液固相变与缺陷形成,并不会干扰内部流场、温度场以及凝固结构。未来,需进一步提升熔铸炸药凝固无损监测过程中的扫描速率、分辨率以及成像质量等,并将实时凝固质量反馈与工艺规律相结合,实现工艺参数的自适应调控与凝固质量的主动优化。

#### 4 总结与展望

熔铸炸药作为高效毁伤威力能源在军用混合炸药中扮演着重要角色。国家军工科技的发展以及国家安全的保证既需要炸药安全保供能力,也需要先进的熔铸炸药凝固技术做支撑。长期以来,在熔铸炸药成型制备过程中存在着凝固质量问题、凝固效率问题以及工艺适应性问题。若能通过准确的成型过程仿真技术结合熔铸成型过程监测方法,建立起装药内部温度场、应变场及相界面迁移与成型工艺和装备研发的联系,则有助于深化炸药熔铸成型机理的分析,实现装药的精密成型控制,优化装药成型质量,缩短战斗部药柱凝固时间。

在熔铸成型数值仿真方面,未来将会在工艺模型精确化、多物理场耦合、仿真与试验相结合、微观尺度模拟等方面进一步发展,也将通过高通量设计以及优化算法应用,实现装药参数的自动优化,提高研发与生产效率。

在熔铸成型在线监测方面,未来将会向多参数综合监测、高精度和高灵敏度、可视化与实时反馈以及微型化与集成化等方面发展。此外,利用人工智能与机器学习算法,对监测数据进行实时分析和处理,实现熔

铸炸药凝固过程的智能化控制和优化。

总的来说,高能熔铸炸药的高质、高效以及自动化、智能化凝固成型是弹药实现高效毁伤、安全保供的关键。未来,熔铸炸药装药凝固技术的发展需要在设备-物料模型构建、工艺设备安全、工艺条件精准控制、实时信息监控以及在线监测自适应调控等方面进一步完善和应用。

#### 参考文献:

- [1] WANG Su-wei, ZHANG Yu-long, WU Chao, et al. Equal-material manufacturing of a thermoplastic melt-cast explosive using thermal-pressure coupling solidification treatment technology[J]. *ACS Omega*, 2023, 8(18): 16251-16262.
- [2] SHAKEEL A R, HUANG Feng-lei. Validation of DSD relations for RDX-TNT-based cast explosives for lower diameters and Dn- $\kappa$  surface equation[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2008, 33(4): 311-315.
- [3] LIANG Fu-di, LIANG Zeng-you, DENG De-zhi. Study on the composite structure of Aluminum foam-filled thin-walled metal tube to reduce the charge overload inside the projectile during the penetration process[J]. *Shock and Vibration*, 2020, 2020: 8887893.
- [4] 刘雨荻, 曹红松, 刘胜, 等. TNT熔铸炸药内部结晶组织的数值模拟[J]. *含能材料*, 2019, 27(5): 363-370.  
LIU Yu-di, CAO Hong-song, LIU Sheng, et al. Numerical simulation of the internal crystalline structure of TNT melt-cast explosive[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2019, 27(5): 363-370.
- [5] LI Shu-rui, DUAN Zhuo-ping, GAO Tian-yu, et al. Size effect of explosive particle on shock initiation of aluminized 2,4-dinitroanisole (DNAN)-based melt-cast explosive[J]. *Journal of applied physics*, 2020, 128: 125903.
- [6] KUMAR A S, RAO V D. Modeling of cooling and solidification of TNT based cast high explosive charges[J]. *Defence Science Journal*, 2014, 64(4): 339-343.
- [7] SUSANTEZ C, CALDEIRA A B, LOIOLA B R. Natural convection effects on TNT solidification inside a shaped charge mold[J]. *Defence Technology*, 2022, 18: 1653-1661.
- [8] YUAN Jun-ming, SUN Hu, SHA Hong-bo, et al. Monitoring experiment and simulation on solidification of DNAN based melt-cast explosive with FBG sensors[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2024, 49: e202300232.
- [9] HEMANTH J. Heat transfer analysis during external chilling of composite material castings through experimental and finite element (FE) modelling[J]. *Modeling and Numerical Simulation of Material Science*, 2014, 4: 1-7.
- [10] SUN Shan-hu, ZHANG Hao-bin, XU Jin-jiang, et al. Two novel melt-cast cocrystal explosives based on 2,4-dinitroanisole with significantly decreased melting point[J]. *Crystal Growth & Design*, 2019, 19: 6826-6830.
- [11] LI J S, CHEN J J, HWANG C C, et al. Study on thermal characteristics of TNT based melt-cast explosives[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2019, 44: 1-13.
- [12] 金大勇, 王亲会, 牛国涛, 等. 一种高固相含量熔铸炸药精密铸装技术[J]. *火工品*, 2013, 2: 40-43.  
JIN Da-yong, WANG Qin-hui, NIU Guo-tao, et al. The tech-

- nology of precise melt-casting charge with high solid contents [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2013, 2: 40-43.
- [13] WEI Xu, LI Xian-long, ZHANG Lai-qi, et al. Effect of in-situ ultrasonic impact treatment on flow and solidification behavior of laser metal deposition: By finite element simulation[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2022, 192: 122914.
- [14] ZHANG Tao, YANG Jian, XU Gang-jun, et al. Effects of operating parameters on the flow field in slab continuous casting molds with narrow widths [J]. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 2021, 28(2): 238-248.
- [15] 姚宾叶, 毛红奎, 徐宏, 等. 铸造充型过程流场数值模拟现状及发展趋势[J]. *铸造技术*, 2012, 33(10): 1211-1214.
- YAO Bin-ye, MAO Hong-kui, XU Hong, et al. Status and development trend of numerical simulation of flow field in casting process[J]. *Foundry Technology*, 2012, 33(10): 1211-1214.
- [16] YAO Pei-tao, LI Gen, LI Yong, et al. Numerical study on cladding melting and melt migration behavior in lead-bismuth coolant using the improved MPS method[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2024, 229: 125727.
- [17] WANG Pi-guang, YU Wan-li, ZHAO Mi, et al. Effects of wind-wave-current-earthquake interaction on the wave height and hydrodynamic pressure based on CFD method[J], *Ocean Engineering*, 2024, 305: 117909.
- [18] 李敬明, 田勇, 张伟斌, 等. 炸药熔铸过程缩孔和缩松的形成与预测[J]. *火炸药学报*, 2011, 34(2): 17-21.
- LI Jing-ming, TIAN Yong, ZHANG Wei-bin, et al. Formation and prediction of shrinkage hole and shrinkage porosity in explosive during casting process [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants (HuozhayaoXuebao)*, 2011, 34(2): 17-21.
- [19] SANHYEW W, DUBOIS C. Simulation of the cooling and phase change of a melt-cast explosive [C]//Comsol Conference, 2015.
- [20] 孙鑫欢, 崔庆忠, 熊冰, 等. 改性B炸药凝固模拟验证[J]. *兵工自动化*, 2020, 39(1): 77-81.
- SUN Xin-huan, CUI Qing-zhong, XIONG Bing, et al. Solidification simulation and verification of modified B explosive[J]. *Ordnance Industry Automation*, 2020, 39(1): 77-81.
- [21] JI C C, LIN C S. The solidification process of melt casting explosives in shell[J]. 1998, 23(3): 137-141.
- [22] CHEN C Y, SHIUAN J H. Numerical simulation of casting explosives in shell [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 1992, 17: 20-26.
- [23] KHALAJZADEH V, CARLSON K D, BACKMAN D G, et al. A pore-centric model for combined shrinkage and gas porosity in alloy solidification [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2017, 48: 1797-1816.
- [24] ESI Group. Pro-CAST 2010.0 User's Manual [M]. Version 2009.1.US: ESI North America, 2010.
- [25] 刘金祥, 左正兴, 廖日东. 气缸盖铸件凝固过程数值模拟及缩松缩孔预测[J]. *铸造技术*, 2007, 28(2): 256-258.
- LIU Jin-xiang, ZUO Zheng-xing, LIAO Ri-dong. Solidification process simulation and shrinkage cavity prediction of cylinder head casting[J]. *Foundry Technology*, 2007, 28(2): 256-258.
- [26] ZHANG Wei-bin, TIAN Yong, ZHOU Hong-ping, et al. Process monitoring of cast explosive solidification molding by on-line multichannel ultrasonic measurement[C]//17th World Conference on Nondestructive Testing, 25-28 Oct 2008, Shanghai, China.
- [27] CALDEIRA A B, JACCOUD B R, GUEDES R C. Inverse problem for porosity estimation during solidification of TNT[J]. *Acta Scientiarum. Technology*, 2016, 38(4): 469-475.
- [28] 蒙君煲, 周霖, 金大勇, 等. 成型工艺对2,4-二硝基苯甲醚基熔铸炸药装药质量的影响[J]. *兵工学报*, 2018, 39(9): 1719-1726.
- MENG Jun-jiong, ZHOU Lin, JIN Da-yong, et al. Effect of forming process on casting quality of 2,4-Dinitroanisole-based casting explosive[J]. *Acta Armamentarii*, 2018, 39(9): 1719-1726.
- [29] CHEN Yu-hao, LIAO Dun-ming, LI Wei-dong, et al. Iterative reverse deformation optimization design of castings based on numerical simulation of solidification thermal stress [J]. *China Foundry*, 2022, 19(4): 342-350.
- [30] SARVARI M, DIVANDDARI M, SAGHAFFIAN H, et al. Effect of melt-to-solid volume ratio and preheating temperature on Mg/Al bimetals interface by centrifugal casting [J]. *China Foundry*, 2023, 20: 234-240.
- [31] LIANG X D, SHI G L, WANG G Z, et al. Welding residual stress reduction assessment in steel rings via the spectral harmonic vibration aging test[J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, 770: 012071.
- [32] CHUZEVILLE V, BAUDIN G, LEFRANCOIS A, et al. Detonation initiation of heterogeneous melt-cast high explosives [C]. Shock Compression of Condensed Matter-: Conference of the American Physical Society Topical Group on Shock Compression of Condensed Matter. 19th Biennial APS Conference on Shock Compression of Condensed Matter, 2017.
- [33] 胥会祥, 龚建良, 黄永刚, 等. 纳米铝粉在高密度碳氢燃料HF-X中的分散特性[J]. *火炸药学报*, 2019, 42(4) 352-357.
- XU Hui-xiang, GONG Jian-liang, HUANG Yong-gang, et al. Dispersion of nano-Al in the high-density hydrocarbon fuels HF-X suspension [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants (HuozhayaoXuebao)*, 2019, 42(4) 352-357.
- [34] CHRISTOPHER F T, MICHAEL J. M. Explosive particle image velocimetry in cast polydimethylsiloxane [J]. *AIP Conference Proceedings*, 2020, 2272: 060037.
- [35] 吴维新, 苗子旭, 龙佳, 等. 颗粒沉降动力学特性研究进展[J]. *金属矿山*, 2019, 516(6): 27-32.
- WU Wei-xin, MIAO Zi-xu, LONG Jia, et al. Research progress on dynamic characteristics of particle sedimentation [J]. *Metal Mine*, 2019, 516(6): 27-32.
- [36] 朱士富, 王小鹏, 陈松, 等. 低固含率下共振声分散特性数值模拟[J]. *化工进展*, 2019, 38(10): 4414-4422.
- ZHU Shi-fu, WANG Xiao-peng, CHEN Song, et al. Simulation of dispersion characteristics of resonant acoustic mixing with low solid content of powder [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2019, 38(10): 4414-4422.
- [37] 苏晓辉, 张弛, 徐志锋, 等. 黏弹性表面活性剂溶液中颗粒沉降特性研究[J]. *化工学报*, 2022, 73(5): 1974-1985.
- SU Xiao-hui, ZHANG Chi, XU Zhi-feng, et al. Study on particle settling behavior in viscoelastic surfactant solutions [J]. *CI-ESC Journal*, 2022, 73(5): 1974-1985.
- [38] WANG Dong-lei, XIE Zhi-yi, SUN Wen-xu, et al. Solidification simulation of melt-cast explosive under pressurization [J]. *Materials Science Forum*, 2012, 704-705: 71-75.
- [39] ZHANG Qiu, JIAN Hao-tian, ZHENG Guo-qiang, et al. The interaction of detonation waves by multipoint initiation under

- small-size charge condition[J]. *Physics of Fluids*, 2023, 35: 117105.
- [40] 刘海青, 彭继武, 孙晓乐, 等. DNAN基高品质药块制备研究[J]. *兵工自动化*, 2023, 42(5): 11-14.  
LIU Hai-qing, PENG Ji-wu, SUN Xiao-le, et al. Study on preparation of high quality DNAN-based drug block[J]. *Ordnance Industry Automation*, 2023, 42(5): 11-14.
- [41] 焦云多, 曾晓华, 陈洋, 等. 大当量DNAN基熔铸炸药装药质量控制方法[J]. *兵工自动化*, 2019, 38(8): 23-26.  
JIAO Yun-duo, ZENG Xiao-hua, Chen Yang, et al. Method of charge quality control for large equivalent DNAN-based melt cast explosive[J]. *Ordnance Industry Automation*, 2019, 38(8): 23-26.
- [42] KIM S, HWANG J, RYU J, et al. Prediction of vibration-mode-induced noise of structure-acoustic coupled systems[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12: 10496.
- [43] 金大勇, 王红星, 牛国涛, 等. 正交试验法研究DNAN基熔铸炸药的装药工艺[J]. *含能材料*, 2014, 22(6): 804-807.  
JIN Da-yong, WANG Hong-xing, NIU Guo-tao, et al. Charge process of DNAN based melt cast explosive by orthogonal experiments[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2014, 22(6): 804-807.
- [44] 陆志猛, 温常琰, 孙涛, 等. 热固型火炸药药浆真空振动浇注系统[J]. *兵工自动化*, 2019, 38(2): 89-92.  
LU Zhi-meng, WEN Chang-yan, SUN Tao, et al. Vacuum vibration casting system for thermosetting explosive[J]. *Ordnance Industry Automation*, 2019, 38(2): 89-92.
- [45] 彭泓铮, 杨友友, 万力伦, 等. 非TNT基高固含量熔铸炸药致密成型工艺研究[J]. *兵工自动化*, 2019, 38(4): 84-87.  
PENG Hong-zheng, YANG Feng-you, WAN Li-lun, et al. Study on molding process of melt-casting explosive based on non-TNT with high solid content and density[J]. *Ordnance Industry Automation*, 2019, 38(4): 84-87.
- [46] 刘威, 曹红松, 张虎成, 等. 分次浇铸工艺对熔铸药柱缩孔的影响研究[J]. *机电技术*, 2015, 103(6): 122-125.  
LIU Wei, CAO Xue-song, ZHANG Hu-cheng, et al. Research on the effect of separate casting process on the shrinkage holes of melt-casting powder columns[J]. *Mechanical & Electrical Technology*, 2015, 103(6): 122-125.
- [47] 张向荣, 温永昕, 蒙君熨, 等. DNP/HMX熔铸炸药成型工艺研究[J]. *北京理工大学学报*, 2023, 43(3): 252-258.  
ZHANG Xiang-rong, WEN Yong-xin, MENG Jun-jiong, et al. Research on the forming process of DNP/HMX melt-cast explosives[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2023, 43(3): 252-258.
- [48] 岳晓媛, 张会锁, 韩雪莲, 等. 大长径比熔铸装药热芯棒凝固工艺优化仿真[J]. *高压物理学报*, 2021, 35(1): 1-8.  
YUE Xiao-yuan, ZHANG Hui-suo, HAN Xue-lian, et al. Process of improved hot mandrel for large length-diameter ratio warhead melting cast[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2021, 35(1): 1-8.
- [49] BI Wen-rong, LIU Shi-jie, RONG Xing, et al. Vapor pressure and enthalpy of vaporization of guanidinium methanesulfonate as a phase change material for thermal energy storage[J]. *Materials*. 2024, 17(11):2582.
- [50] MENG Jun-jiong, ZHOU Lin, ZHANG Xiang-rong, Effect of pressure of the casting vessel on the solidification characteristics of a DNAN/RDX melt-cast explosive[J]. *Journal of Energetic Materials*, 2017, 35(4): 385-396.
- [51] 朱道理, 周霖, 张向荣, 等. 加压成型工艺提高熔注炸药凝固冷却速率的机理研究[J]. *北京理工大学学报*, 2018, 38(8): 797-801.  
ZHU Dao-li, ZHOU Lin, ZHANG Xiang-rong, et al. Mechanism of the increase of solidification and cooling rate of melt-casting explosive by increasing the pressure of the casting vessel[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2018, 38(8): 797-801.
- [52] 黄勇, 郑保辉, 谢志毅, 等. 熔铸炸药加压凝固过程研究[J]. *含能材料*, 2013, 21(1): 25-29.  
HUANG Yong, ZHENG Bao-hui, XIE Zhi-yi, et al. Pressured solidification process of melt-cast explosive[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2013, 21(1): 25-29.
- [53] 关通, 张向荣, 温永昕, 等. 工艺参数对惰性代料高压熔铸成型质量的影响[J]. *火炸药学报*, 2023, 46(10): 920-927.  
GUAN Tong, ZHANG Xiang-rong, WEN Yong-xin, et al. Effect of process parameters on the casting quality of high-pressure molding simulant composites[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants(HuozhayaoXuebao)*, 2023, 46(10): 920-927.
- [54] 易茂光, 张明明, 冉靖, 等. 弹药熔铸装药水浴护理凝固控制技术[J]. *兵工自动化*, 2019, 38(8): 14-18.  
YI Mao-guang, ZHANG Ming-ming, RAN Jing, et al. Solidification control technology of melt-casting charging under water bath curing[J]. *Ordnance Industry Automation*, 2019, 38(8): 14-18.
- [55] 高丰, 黄求安, 王冠一. 熔注炸药低比压顺序凝固界面生长规律研究[J]. *兵器装备工程学报*, 2020, 41(8): 126-130.  
GAO Feng, HUANG Qiu-an, WANG Guan-yi. Effect of solidification temperature on charge density[J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2020, 41(8): 126-130.
- [56] 杨治林, 李昂, 余瑶, 等. 战斗部顺序凝固装药过程数值模拟研究[J]. *兵器装备工程学报*, 2022, 43(9): 193-200.  
YANG Zhi-lin, LI Ang, YU Yao, et al. Research on numerical simulation of sequential solidification charge process of warhead[J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2022, 43(9): 193-200.
- [57] SABHYE W, DUBOIS C. Numerical modeling of the cooling cycle and associated thermal stresses in a melt explosive charge[J]. *AIChE Journal*, 62(10): 3797-3811.
- [58] AMITESH M, YONG H, FOWZIA Z, et al. In-situ monitoring of flow-permeable surface area of high explosive powder using small sample masses[J]. *Propellants, Explosive, Pyrotechnics*, 2015, 40: 419-425.
- [59] GUILLEMIN J P, BRUNET L. A flow time model for melt-cast insensitive explosive process[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2007, 32(3): 261-266.
- [60] 蒙君熨, 周霖, 金大勇, 等. DNAN/HMX熔铸炸药的流变特性[J]. *含能材料*, 2018, 26(8): 677-685.  
MENG Jun-jiong, ZHOU Lin, JIN Da-yong, et al. Rheological properties of DNAN/HMX melt-cast explosives[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2018, 26(8): 677-685.
- [61] ZHU Dao-li, ZHOU Lin, ZHANG Xiang-rong. Rheological behavior of DNAN/HMX melt-cast explosives[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2019, 44: 1583-1589.



- [62] FLAUD P, BENSALAH A. Blood viscosity measurement: an integral method using Doppler ultrasonic profiles[J]. *The European Physical Journal - Applied Physics*, 2005, 32(3): 213–221.
- [63] 张百磊, 常双君, 袁俊明, 等. 一种浇注PBX固化过程的实验与数值模拟[J]. 含能材料, 2015, 23(3): 232–237.  
ZHANG Bai-lei, CHANG Shuang-jun, YUAN Jun-ming, et al. Experiment and numerical simulation of curing process of cast PBX[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2015, 23(3): 232–237.
- [64] CHU Chun-yu, ZHANG Wei, HUA Wei-zhuo, et al. A new emissivity measuring apparatus based on infrared thermal imager[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2023, 129: 104565.
- [65] 董明, 鲍延年. 炸药浇铸过程中应力的两种测试方法[J]. 兵工自动化, 2009, 28(5): 69–72.  
DONG Ming, BAO Yan-nian. Two methods for stress test during explosive casting [J]. *Ordnance Industry Automation*, 2009, 28(5): 69–72.
- [66] 陈春燕, 王晓峰, 徐洪涛, 等. 固化温度对浇注PBX固化应力的影响[J]. 含能材料, 2014, 22(3): 371–375.  
CHEN Chun-yan, WANG Xiao-feng, XU Hong-tao, et al. Effects of temperature on curing stresses of casting plastic bonded explosives[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2014, 22(3): 371–375.
- [67] CHENG Lei, TONG Xing-lin, WEI Jing-chuang, et al. Highly accurate differential pressure FBG gas flow sensor[J]. *Optical Fiber Technology*, 2023, 75: 103189.
- [68] 裴翠祥, 弋东驰, 刘文文, 等. PBX内部缺陷激光超声无损检测数值模拟[J]. 含能材料, 2017, 25(10): 822–828.  
PEI Cui-xiang, YI Dong-chi, LIU Wen-wen, et al. Numerical simulation of laser ultrasonic nondestructive testing of internal defects in PBX[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2017, 25(10): 822–828.
- [69] 张伟斌, 田勇, 韩敦信, 等. HMX基混合炸药的声学特性研究[J]. 四川兵工学报, 2001, 22(1): 21–24.  
ZHANG Wei-bin, TIAN Yong, HAN Dun-xin, et al. Study on acoustic characteristics of HMX-based mixed explosives [J]. *Journal of Sichuan Ordnance*, 2001, 22(1): 21–24.
- [70] WANG Xian, MA Shao-peng, ZHAO Ying-tao, et al. Observation of damage evolution in polymer bonded explosives using acoustic emission and digital image correlation [J]. *Polymer Testing*, 2011, 30: 861–866.
- [71] SCHARF J, CHOUCANE M, FINEGAN D P, et al. Bridging nano- and microscale X-ray tomography for battery research by leveraging artificial intelligence [J]. *Nature Nanotechnology*, 2022, 17: 446–459.
- [72] RICHARD A K, GERARDO J I, Nondestructive high-resolution visualization and measurement of anisotropic effective porosity in complex lithologies using high-resolution X-ray computed tomography[J]. *Journal of Hydrology*, 2005, 302: 92–106.
- [73] LEBERT J B, NORTON M G, BAHR D F, Examination of crystal defects with high-kV X-ray computed tomography[J]. *Materials Letters*, 2005, 59: 1113–1116.
- [74] HASE A. Early detection and identification of fatigue damage in thrust ball bearings by an acoustic emission technique [J]. *Lubricants*, 2020, 8(3): 1–14.
- [75] LEKSOWSKI A M, BASKIN B L. Some aspects of nucleation and evolution of microscopic and mesoscopic cracks and quasi-brittle fracture of homogeneous materials[J]. *Physics Solid State*, 2011, 53: 1223–1233.

## Research Progress on Solidification Process and On-line Monitoring Technique of Melt-cast Explosive

ZHANG Peng-chao, FAN Chao, ZHU Shi-fu, XIE Zhong-yuan, MA Ning, WEI Zong-liang

(Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 7100655, China)

**Abstract:** The solidification process of melt-cast explosive is a significant step during its research and manufacture. Solidification, and related charge quality play key roles in the detonation performance and safety of explosives. Based on domestic and foreign research works, the development of solidification techniques of the melt-cast explosive is systematically summarized from three aspects: finite element simulation, solidification process and on-line detection methods. The application of the finite element simulation in flow-temperature-stress field simulation during casting and solidification process of the melt-cast explosive is reviewed. The formation of defects during the solidification process and the effects of different techniques on solidification are elucidated. Furthermore, the application of on-line detection of temperature, stress-strain, viscosity, and internal structure in the high-quality precision forming techniques of melt-cast explosive is discussed. The development of numerical simulation, solidification process optimization and on-line detection technique in melt-cast explosive can provide vital theoretical and technical guidance for the design and development of the solidification equipments and the quality improvement of solidified charges. In the future, the improvement of the charge and solidification technique requires further development and application in aspects such as model construction of equipment-material, safety of process equipment, precise control of process conditions, real-time information monitoring, on-line detection and adaptive regulation.

**Key words:** melt-cast explosive; solidification process; finite element simulation; defect control; on-line monitoring

**CLC number:** TJ55; TJ41

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/CJEM2024124

**Grant support:** Xi'an Modern Chemistry Research Institute Open Cooperation Innovation Fund(204-J-2019-0387-1/6-18)

(责编:姜梅)