

文章编号:1006-9941(2023)04-0365-09

## 顺序凝固工艺参数对熔铸装药影响的模拟研究

牛凯博<sup>1</sup>,曹红松<sup>1</sup>,刘恒著<sup>1</sup>,史慧芳<sup>2</sup>,王兆国<sup>1</sup>,易茂光<sup>3</sup>

(1.中北大学 机电工程学院,山西 太原 030051; 2.中国兵器装备集团自动化研究所有限公司,四川 绵阳 621000; 3.重庆红宇精密工业集团有限公司研究二所,重庆 402760)

**摘要:** 顺序凝固工艺在熔铸装药中具有较大的应用需要。为探讨顺序凝固工艺参数对装药的影响,研究基于移动边界的建模方法,选用梯恩梯/黑索今(TNT/RDX,33.8/65)炸药,建立了模具入水顺序凝固过程模型,模拟研究了入水速度(0.15,0.20,0.25 mm·s<sup>-1</sup>)、水浴温度(30,40,50 ℃)、模具预热温度(60,70,80 ℃)3个主要参数对凝固过程温度场以及缩孔缺陷的影响,并基于这3个参数设计了三因素正交试验,对模拟所得缩孔体积以及其均值和极差进行了研究,得到了最优的工艺参数:模具入水速度为0.15 mm·s<sup>-1</sup>,水温50 ℃,模具预热温度60 ℃。模拟结果显示,入水速度对装药质量影响最大,其次是水浴温度和模具预热温度。相较于试验方案(模具入水速度为0.15 mm·s<sup>-1</sup>,水温50 ℃,模具预热温度70 ℃),正交设计的模拟优选方案可将缩孔体积减少74%,表明了相互匹配的工艺参数是提高装药质量的有效方法。

**关键词:** 熔铸装药;顺序凝固;正交试验法;工艺参数

中图分类号: TJ55; O64

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2022136

### 0 引言

熔铸装药工艺过程中极易产生缩孔缩松、气孔、裂纹等缺陷,影响战斗部的威力和使用安全<sup>[1-2]</sup>。为了提高装药质量,国内外学者们不断改进熔铸装药工艺,发展了分次浇注、热芯棒、顺序凝固等多种装药工艺方法<sup>[3-6]</sup>。分次浇注工艺是将药液分多次注入弹体模具中,下层的药液冷却凝固后,再浇注上一层,这样装药的每层厚度较小,凝固相对较好。热芯棒工艺是将热芯棒从冒口漏斗处插入药浆中,下层药浆凝固时,上层的补缩通道仍很顺畅,随着凝固界面的上升,控制热芯棒逐渐向上,保障药浆整个凝固过程的补缩。顺序凝固通常是控制弹体模具外的冷却液液面上升,实现药浆自下而上凝固。徐更光院士指出<sup>[7]</sup>,通过工艺控制,

顺序凝固方法可实现自下而上的凝固,相比其它方式,这种凝固方式在缺陷抑制上更具优势。目前以水浴凝固工艺为代表的顺序凝固方法能够控制药浆固相界面的生长顺序,保证弹体内药浆在凝固过程中收缩的体积得到补充,极大地降低了弹体内形成缩孔等缺陷的概率。因此,水浴顺序凝固工艺的应用需求大,为此,需要深入研究工艺参数对装药质量的影响以及工艺参数的合理匹配。

Mudryy<sup>[8]</sup>设计了动态控制冷却水液面高度的凝固工艺装置,通过控制模具内药浆固相界面的生长顺序,有效地减少了模具内部缩孔的发生,且使用仿真软件对缩孔等缺陷进行了预测,得到了与试验结果较为符合的计算结果;易茂光<sup>[9]</sup>的研究表明,水浴凝固工艺除了能实现顺序凝固外,还因为相对空气较高的热传递效率,能够缩短药浆凝固时间,从而减少沉降疵病的发生;马松等<sup>[10]</sup>发现,针对HBX-3炸药,水浴的换热效率高,其相变时间比自然冷却减少了3000 s,固化效率得到了提高,同时发现,40 ℃的水浴温度和75 ℃的冒口温度下的水浴凝固缩孔缩松也有所减少;刘雪梅<sup>[11]</sup>建立了热力学模型研究逐层凝固工艺,通过Matlab编程求解了凝固过程中温度场,分析了相变固化界

收稿日期:2022-05-23;修回日期:2022-07-08

网络出版日期:2023-01-05

基金项目:科技计划项目资助(No.2019-JCJQ-ZD-314)

作者简介:牛凯博(1992-),男,硕士研究生,主要从事装药仿真优化研究。e-mail:kaibo\_niu@163.com

通信联系人:曹红松(1967-),女,博士,教授,主要从事弹箭虚拟设计及智能化技术研究。e-mail:chs@nuc.edu.cn

引用本文:牛凯博,曹红松,刘恒著,等.顺序凝固工艺参数对熔铸装药影响的模拟研究[J].含能材料,2023,31(4):365-373.

NIU Kai-bo, CAO Hong-song, LIU Heng-zhu, et al. Simulation Study on the Effects of the Process Parameters of Sequential Solidification on the Quality of Casting Charge[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2023, 31(4):365-373.

面的生长规律。高丰等<sup>[12]</sup>针对改性B炸药,利用ProCAST软件开展了低比压顺序凝固工艺过程的仿真研究,通过测试试验中的药浆温度,验证了顺序凝固过程温度场仿真的有效性。综上所述,对于顺序凝固过程,众多学者不仅通过建模仿真的方法研究了温度变化规律、固相界面生长规律,还对效率以及仿真建模方法进行了深入研究,而针对工艺参数对装药质量的影响以及工艺参数匹配的研究较少。

为此,本研究利用ProCAST软件,通过移动边界建模对顺序凝固工艺进行了研究,模拟分析了模具入水速度、水温、模具预热温度3个主要参数对药浆凝固过程温度场以及缩孔缺陷的影响,采用正交试验法研究了工艺参数与装药质量的关联关系,为提升熔铸装药工艺提供参考。

## 1 顺序凝固工艺过程分析

图1是熔铸装药顺序凝固工艺示意图。该工艺是将刚注完药的模具缓慢放入冷却液中(或控制冷却液面缓慢上升),利用冷却液相对较低的温度以及较高的热量传递效率,使模具进入冷却液的部分快速冷却,同时配合冒口保温等措施,保证补缩通道始终通畅,药浆固相界面以“U”或“V”字型随着冷却液面上升而逐渐向上生长,实现自下而上的顺序凝固。实际工作中,主要利用模温机提供循环冷却液,并将水温控制在20~70℃;利用带减速器的卷扬机或步进电机等设备使模具以0.05~0.6 mm·s<sup>-1</sup>的速度缓慢匀速下落;整个工艺过程一般在保温箱内进行,利用热风机等温控设备对箱体通85~95℃热风,控制箱体内温度,使未入水部分模具内部的药浆保持液态或熔融态。

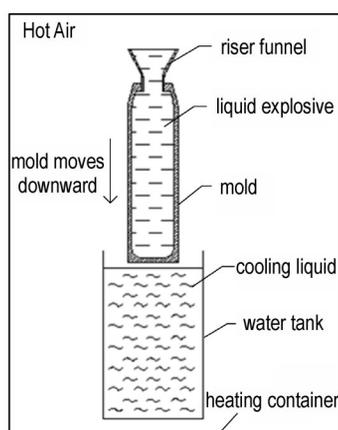


图1 熔铸装药顺序凝固工艺示意图

Fig.1 Schematic diagram of sequential solidification process of cast explosives

## 2 顺序凝固工艺模拟建模

### 2.1 传热模型

顺序凝固工艺主要涉及2个基本物理过程:其一是热量从药浆通过模具向外界的传递,其二是药浆凝固相变阶段结晶潜热的释放。为此,主要采用瞬态热传导方程<sup>[13]</sup>进行描述:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \nabla^2 T + Q_L \quad (1)$$

式中, $\rho$ 为密度,kg·m<sup>-3</sup>;  $t$ 为时间,s;  $c_p$ 为比热,J·kg<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>;  $T$ 为温度,℃;  $\lambda$ 为导热率,W·m<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>;  $Q_L$ 为潜热源项,W·m<sup>-3</sup>。

为实现对式(1)的求解,还需补充初值条件以及边界条件。其中,初值条件是药浆、模具初始时刻的温度场;边界条件是指药浆与模具、模具与环境等不同物质界面之间的热交换,在这里主要通过流体与固体壁面的对流换热条件予以描述<sup>[13]</sup>:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_r = h(T_i - T_j) \Big|_r \quad (2)$$

式中, $\Gamma$ 表示边界条件, $T_i$ 与 $T_j$ 表示2种物质的界面温度,℃;  $h$ 为对流换热系数,W·m<sup>-2</sup>·K<sup>-1</sup>。

### 2.2 基于移动边界的顺序凝固工艺建模

顺序凝固工艺模拟建模中,关键点之一是要实现换热对象由空气向冷却液转换的过程,目前主流方法是对弹体模具外壁逐层配置耦合了运动及热力学信息的跳转曲线<sup>[9-10]</sup>,但该方法存在建模过程繁琐庞杂,建模参数对耦合度高等问题。因此,本研究采用了一种基于移动边界的顺序凝固工艺建模方法,该方法自动化程度高,建模过程简单直接,且能够模拟模具动态入水,符合顺序凝固工艺过程。

首先,对TNT/RDX(33.8/65)装药的顺序凝固工艺进行3D几何建模,得到图2。除了常规的冒口、模具、药浆模型外(如图2a~2c),还需要额外建立水浴模型,该模型包含1个水托盘(图2d)以及1个中空的筒状水浴(图2e),该模型用于模拟图1所示的冷却液。模具和冒口的材质选择铝,模具长径比4:1。表1、2为材料热物性参数表和模型尺寸表,其中,水托盘直径、筒状水浴内径与模具外径相同。在网格无关性测试基础上,利用ProCAST软件中的Mesh模块对模型进行网格划分:三角形面网格数为230400,四面体体网格数为2703484。

然后,设置模具入水运动边界条件。在软件的Translate<sub>x</sub>( $t$ )中定义水托盘及模具的位移曲线,位移数据如表3所示,建立移动边界,模拟模具动态入水的

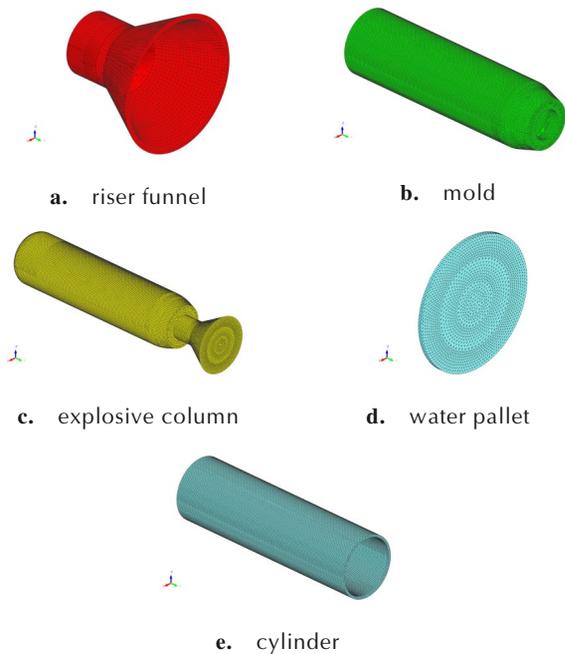


图2 顺序凝固工艺模型3D图

Fig.2 3-Dimensional model diagrams of sequential solidification process

表1 材料热物性参数表<sup>[14]</sup>

Table 1 Table of material thermophysical parameters<sup>[14]</sup>

	mold	riser funnel	explosive
material	Al	Al	TNT/RDX(33.8/65)
$\lambda / W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	240	240	0.26
$\rho / kg \cdot m^{-3}$	2700	2700	1710(25 °C) 1640(90 °C)
$c_p / kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	0.9	0.9	1.181
$H / kJ \cdot kg^{-1}$	-	-	37.5
$T_m / ^\circ C$	-	-	80

Note:  $H$  is latent heat of phase change.  $T_m$  is melting temperature.

表2 模型尺寸表

Table 2 Model size table

	mold	riser funnel	explosive
$D / mm$	110 (outside)	120 (above) 55 (down)	-
$d / mm$	5	4	-
$h / mm$	426	100	-

Note:  $D$ ,  $d$  and  $h$  are model diameter, thickness and height, respectively.

表3 模具和水托盘位移数据表

Table 3 Displacement data of mold and pallet

time / s	$y_1 / mm$	$y_2 / mm$
0	0	10
1	0	0
1900	-190	-190

Note:  $y_1$  is position coordinate of pallet.  $y_2$  is position coordinate of mold.

过程。从图3所示的模具和水托盘运动过程示意图可以看出,  $t=0$ 时, 模具位于起始位置, 距离水托盘10 mm, 向下运动准备入水;  $t=1$  s时, 模具底面与水托盘接触, 水托盘开始向下移动; 当  $t=1900$  s时, 模具和水托盘向下运动190 mm, 以此得到模具入水速度  $0.1 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

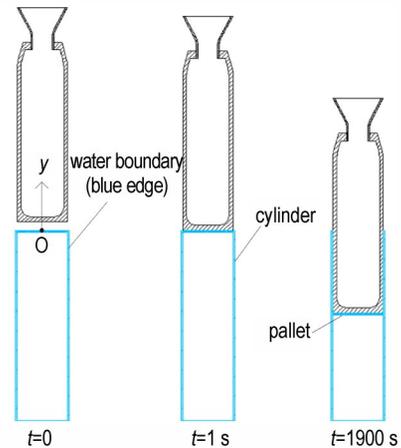


图3 模具和水托盘运动过程示意图

Fig.3 Schematic diagram of the displacement process of the mold and the pallet

最后, 设置水浴模型的温度及换热边界条件。温度设置根据工艺参数对水托盘与筒状水浴的外表面配置恒定温度; 换热边界条件的设置分为空气换热系数和水的换热系数, 其中, 空气的换热系数设置为  $10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ , 水的换热系数设置为  $1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ , 当水浴模型与模具外壁发生接触后, 模具外表面计算单元的换热对象可自动转换为冷却水, 且换热系数也随之变化。

### 2.3 模拟模型验证

为验证以上数学模型及建模的可靠性, 研究对文献[14]中的自然冷却数据, 以及文献[10]中的顺序凝固数据进行了验证。

研究首先建立了文献[14]中自然冷却法的试验模具模型(图4), 设置了与文献[14]中对应位置的温度测试点6#, 9#, 12#, 获取了自然凝固过程中3个位置的温度, 并与文献中的实验数据进行了对比, 结果如图5所示。从图5可以看出, 药浆凝固相变, 释放结晶潜热, 3个节点对应的温度曲线会出现平台期, 测试点6#先凝固, 在相变过程中, 模拟温度与参考值相对偏差较大, 最大在7%以内, 对于测试点9#和12#, 模拟结果与实验结果偏差均在5%以内, 说明模型能够反映 TNT/RDX(33.8/65)炸药的凝固规律。

进一步, 研究建立了文献[10]数据对应的模具(图6a), 针对文献[10]中水面逐渐上升的顺序凝固过

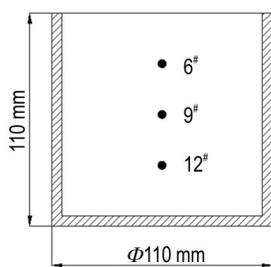


图4 自然冷却装药工艺温度测试点分布<sup>[14]</sup>

Fig.4 Distribution of temperature measurement points for charge natural cooling process<sup>[14]</sup>

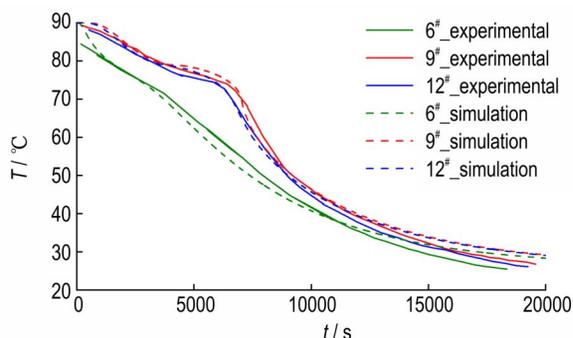
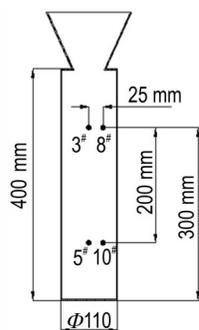
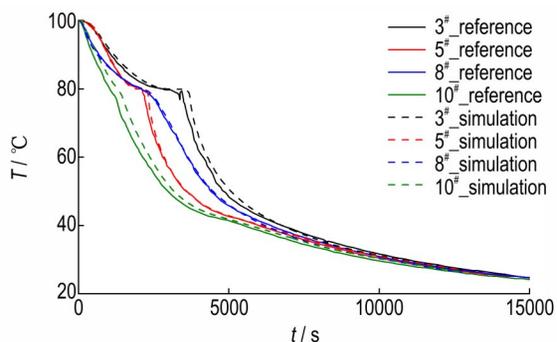


图5 自然冷却装药工艺模拟与文献[14]实验温度曲线对比图

Fig.5 Comparison between simulation and literature temperature curves for charge natural cooling process<sup>[14]</sup>



a. temperature measurement points



b. temperature curves

图6 顺序凝固工艺下模拟与文献[10]温度曲线对比图

Fig.6 Comparison of temperature curves between simulation and literature for charge sequential solidification process<sup>[10]</sup>

程,基于移动边界法建立了模拟模型,同样设置了4个与文献[10]中位置一致的温度测试点3#,5#,8#,10#,获取了凝固过程中4个节点的温度变化规律,绘制曲线如图6b。因为测试点10#靠近底部偏壁面,首先进入相变状态,相变阶段,模拟的温度与文献参考值的相对偏差在9%左右,对于测试点3#,5#和8#,模拟温度的相对偏差在6%~7%,说明研究采用的移动边界建模方法模拟顺序凝固工艺合理可行。

### 3 工艺参数对装药质量的影响

#### 3.1 顺序凝固工艺过程模拟

顺序凝固工艺过程中,影响装药质量的因素有药浆初温、水温、模具预热温度、模具入水速度等。药浆初始温度过高,会导致凝固时间过长,易形成缩孔缺陷,本研究采用的炸药参数与文献[14]相同,因此,选取药浆初温时参考了文献[14];在药浆凝固初期,模具预热措施利于药浆充分凝固,由于工艺中对模具未入水部分通热风保温,因此,选取模具预热温度不宜过高;随着药浆逐渐凝固,药浆、模具和水的温度趋于平衡,又因为水的换热效率高,因此,水温选取应高于环境温度,不宜超过模具预热温度;本研究模拟装药质量为5.826 kg,根据换热量与比热容、质量、温差的关系可预估药浆凝固时间,同时本研究选取模具入水速度时参考文献[9]。综合以上分析,研究将初始工况的工艺参数设置如表4所示。

表4 初始工况的工艺参数表

Table 4 Process parameters at initial working conditions

parameters	$T_1$ /°C	$T_2$ /°C	$T_3$ /°C	$T_4$ /°C	$T_5$ /°C	$v$ /mm·s <sup>-1</sup>	$t$ /h
numerical values	40	20	90	87	60	0.2	2

Note:  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ ,  $T_4$  and  $T_5$  are water temperature, ambient temperature, riser funnel temperature, explosive initial temperature and mold-preheating temperature, respectively.  $v$  is mold water entry speed.  $t$  is riser funnel temperature holding time.

考虑到药柱传热的对称性,在轴截面的一侧分别沿轴向、径向等间距选择取样点做温度变化曲线,如图7所示。在图7中,从轴心上1#,2#,3#点到达固相线的先后顺序可以看出药浆是由底部到顶部,逐层顺序凝固的;由于药浆在凝固过程中发生相变,释放结晶潜热,轴心上3个点与4#,5#,6#点均有不同程度的温度滞后现象,但顶部的1#,4#点滞后明显;药浆由外向内凝固且与模具换热效率高,因此和模具相接触的7#,8#,

9#点的温度降低速度比中心区域快。图8是初始工况的温度场云图。从图8可以看出,等温面以V字型向上迁移, $t=4000$  s时,过渡区的4#,5#,6#点温度在固相线以下, $t=8000$  s时,1#附近区域温度高于固相线温度,需要较长时间凝固,因此说明凝固顺序是自下而上的,与温度曲线的结论一致。图9是初始工况的缩孔分布图。从图9可以看出,缺陷集中在2#,3#点中间区域,缩孔体积为 $1.280\text{ mm}^3$ 。

### 3.2 模具入水速度对装药质量的影响

在初始工况(入水速度 $v$ 为 $0.2\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ )的基础上,分别对模具入水速度 $v$ 为 $0.05\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $0.35\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$

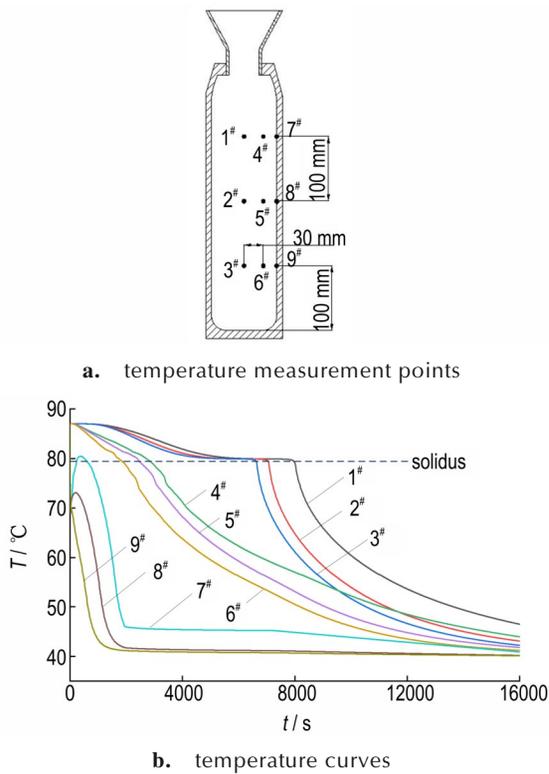


图7 初始工况的温度测试点和温度曲线  
Fig.7 Temperature measurement points and temperature curves at initial working conditions

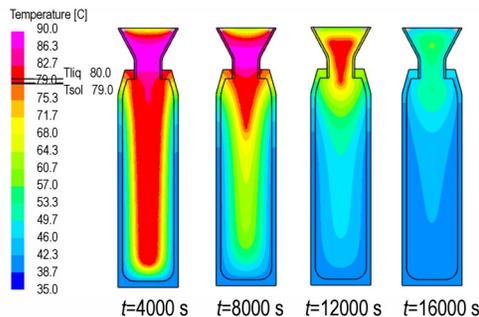


图8 初始工况的温度场云图  
Fig.8 Temperature contours at initial working conditions

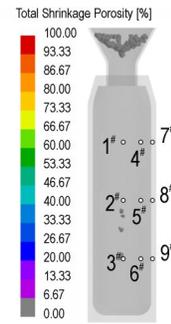


图9 初始工况的缩孔分布图  
Fig.9 Shrinkage distribution at initial working conditions

的情况进行了装药模拟。由于轴心处的药浆最后凝固,易形成缺陷,从图9中也可看出缩孔缺陷集中在2#和3#测试点区域,因此选择这2个点的温度规律进行分析。图10是第2#,3#点在不同模具入水速度条件下的温度曲线。由图10可以看出,模具下降速度越快,温度拐点越靠前,相变潜热的平台期越短,当 $v=0.05\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,温度下降的最慢,与 $v=0.20\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ , $v=0.35\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 的曲线相差较远,中心药柱需要更长时间才能凝固。图11是不同模具入水速度在1150 s和12000 s时的炸药固相率分布;图12为不同模具入水速度下缩孔分布图。由图11可以看出,3种速度下,炸药的固相界面都向上不断生长。当 $t=1150\text{ s}$ , $v=0.35\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 的情况下,模具全部入水,入水速度过快导致模具上半部分的药浆由外向内快速凝固,凝固顺序不合理,易产生缩孔缺陷;当 $t=12000\text{ s}$ 时,对于 $v=0.05\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 的情况,由于模具下降速度过慢,导致补缩通道提前关闭,模具内形成孤立的液相区,极易形成缩孔,此模具入水速度参数不合理,结合图12缩孔的大小和分布也可以证明, $v=0.05\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 的情况下,由图12得到,缺陷超过 $30\text{ mm}^3$ ; $v=0.35\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 的情况下,由图12得到缩孔缺陷的体积是 $3.673\text{ mm}^3$ 。

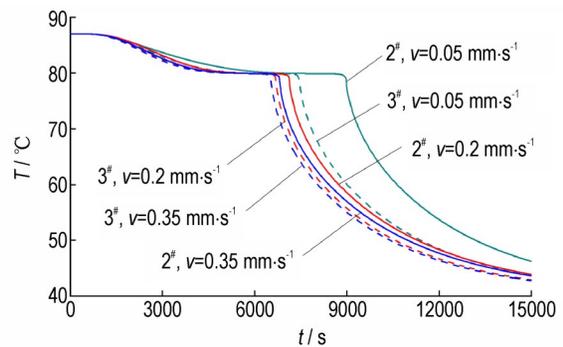


图10 第2#,3#点在不同模具入水速度条件下的温度曲线  
Fig.10 Temperature curves of points 2# and 3# at different water injection speeds

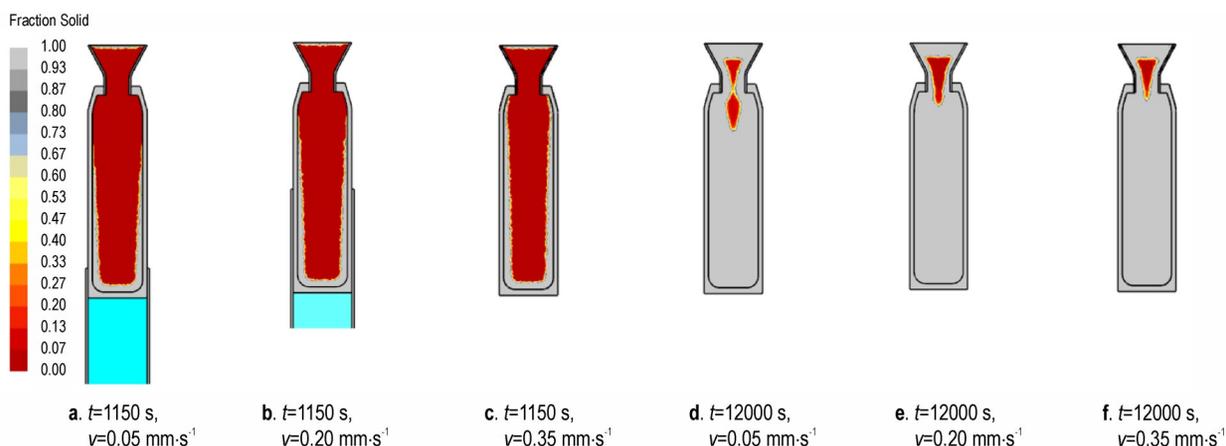


图 11 不同模具入水速度在 1150 s 和 12000 s 时的炸药固相率分布

Fig.11 Distribution of solid phase ratios of explosives at 1150 s and 12000 s with different water injection speed ( $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ )

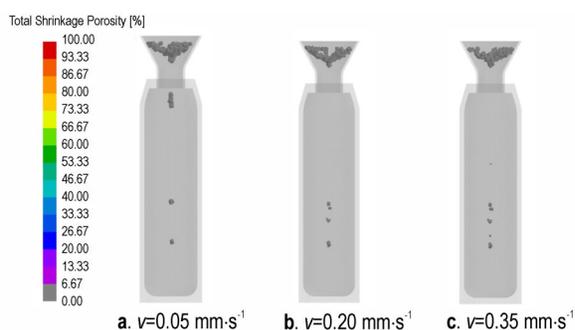


图 12 不同模具入水速度下缩孔分布图

Fig.12 Distribution of shrinkage cavities at different water injection speeds

### 3.3 水温对装药质量的影响

在初始工况(水温为  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ )基础上,对水温  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  的情况进行了装药模拟。图 13 是 2<sup>#</sup>, 3<sup>#</sup> 点在不同水温条件下的温度曲线。由图 13 可以看出, 3 种水温条件下, 轴心上 2<sup>#</sup>, 3<sup>#</sup> 点在  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$  附近出现温度滞后现象, 这是因为 3<sup>#</sup> 在模具下部, 对应的模具外壁区域先接触水, 而 2<sup>#</sup> 位置相对入水晚, 降温速率相对较慢。对于水温是  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  的情况, 曲线过平台期后温度下降速率最快, 不利于药浆充分凝固, 易形成缩孔缺陷, 对于水温是  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  的情况, 温度曲线平台期相对最长且平台期后温度下降平缓。模拟结果显示水浴温度在  $25, 40, 50\text{ }^{\circ}\text{C}$  情况下, 缩孔缺陷体积分别为  $1.592, 1.280, 1.328\text{ mm}^3$ 。不同水温缩孔分布如图 14, 从图 14 中可以看出, 水温为  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  时, 缩孔缺陷的分布有所变化。以上均说明水温对装药质量有一定影响。

### 3.4 模具预热温度对装药质量的影响

在初始工况(模具预热温度为  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ )的基础上, 对模具预热温度为  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$  的情况进行了装药模拟。图 15 是 2<sup>#</sup>, 3<sup>#</sup>, 9<sup>#</sup> 点在不同模具预热温度条件下

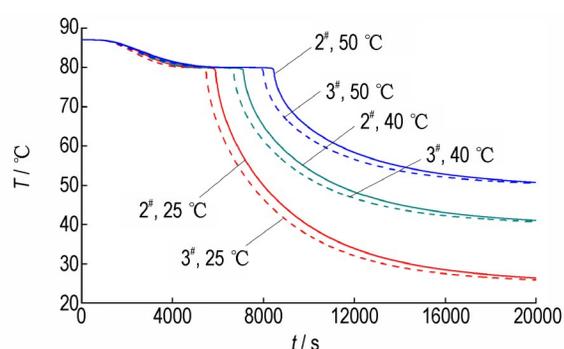


图 13 第 2<sup>#</sup>, 3<sup>#</sup> 点在不同水温条件下的温度曲线

Fig.13 Temperature curves of points 2<sup>#</sup> and 3<sup>#</sup> at different water temperatures

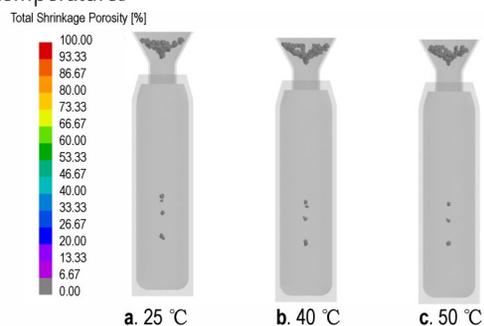


图 14 不同水温条件下的缩孔分布图

Fig.14 Distribution of shrinkage cavities at different water temperature conditions

的温度曲线。由图 15 可以看出, 对于 2<sup>#</sup>, 3<sup>#</sup> 点, 3 种预热温度下的温度曲线基本重合, 温度变化趋势一致; 对于 9<sup>#</sup> 点, 3 种预热温度下的温度曲线在  $t=1000\text{ s}$  以后基本重合,  $t=8000\text{ s}$  以后, 模具、药浆和水的温度趋于平衡。图 16 是不同模具预热温度条件下的缩孔分布图。由图 16 可以看出, 缩孔缺陷的分布位置基本不变, 模具预热温度为  $30, 60, 80\text{ }^{\circ}\text{C}$  的情况下, 缩孔缺陷的体积是  $1.509, 1.280, 1.368\text{ mm}^3$ , 说明模具预热温度对装药质量有一定影响。

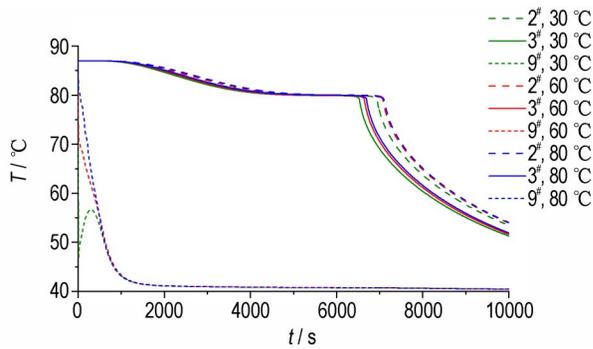


图 15 第 2#, 3#, 9# 点在不同模具预热温度条件下的温度曲线  
 Fig.15 Temperature curves of points 2#, points 3# and 9# at different preheating temperatures of mold

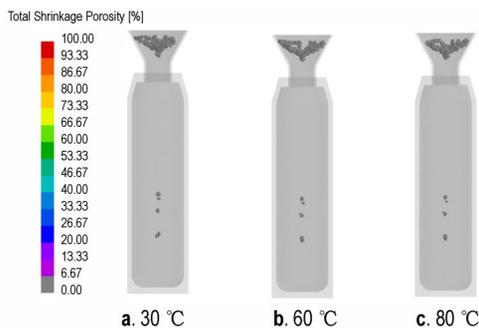


图 16 不同模具预热温度条件下的缩孔分布图  
 Fig.16 Shrinkage cavity distribution under different preheating temperatures of mold

### 4 基于正交试验法的工艺参数优选

#### 4.1 正交试验设计

针对入水速度、水温以及模具预热温度进一步设计 3 个核心因素 3 水平正交试验, 具体工艺参数见表 5, 利用 ProCAST 软件对 9 个方案开展模拟研究。

表 5 试验因素与水平

Table 5 Test factors and levels of orthogonal tests

levels	factors A	factors B	factors C
	$T_1 / ^\circ\text{C}$	$T_2 / ^\circ\text{C}$	$v / \text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$
1	60	30	0.15
2	70	40	0.20
3	80	50	0.25

Note: 1)  $T_1$  is mold-preheating temperature. 2)  $T_2$  is water temperature. 3)  $v$  is mold water entry speed.

#### 4.2 正交试验结果与分析

选取药柱凝固过程后的缩孔缺陷作为质量分析的主要因素, 对于 9 组方案的模拟结果, 将空隙率大于 0.5% 的缩孔体积之和作为考核指标, 统计结果如表 6。

表 6 正交模拟试验方案及模拟结果

Table 6 Program and simulation results of orthogonal simulation tests

test	factors			sum of shrinkage cavity and void volume / $\text{mm}^3$
	A	B	C	
1	1	1	1	1.429
2	1	2	2	1.280
3	1	3	3	2.117
4	2	1	2	1.989
5	2	2	3	2.102
6	2	3	1	0.933
7	3	1	3	2.487
8	3	2	1	1.370
9	3	3	2	1.293
$k_1$	1.609	1.968	1.244	-
$k_2$	1.675	1.584	1.521	-
$k_3$	1.717	1.448	2.235	-
range R	0.108	0.520	0.991	-
factor primary→secondary C>B>A				
optimal scheme $A_1B_3C_1$				

从表 6 可以看出, 试验 6 的缩孔体积最小, 为  $0.933 \text{ mm}^3$ , 此时模具下降速度  $0.15 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 、水温  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ 、模具预热温度  $70 \text{ }^\circ\text{C}$ ; 试验 7 的缩孔体积最大, 为  $2.487 \text{ mm}^3$ , 与最小值相差 62.48%, 说明不同的工艺参数匹配对质量的影响较大。进一步对不同因素不同水平进行缩孔体积均值计算,  $k$  是因素 A、B、C 对应的水平的缩孔体积均值, 按照均值判断最优工艺参数组合为  $A_1B_3C_1$ , 即模具入水速度为  $0.15 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ , 水温为  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ , 预热温度为  $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

再对同一因素的均值计算极差如表中的  $R$ , 即因素 A、B、C 的最大水平均值与最小水平均值的差。从表 6 中看出, 模具入水速度的极差最大, 为  $0.991 \text{ mm}^3$ , 水温的极差次之, 为  $0.520 \text{ mm}^3$ , 模具预热温度的极差最小, 为  $0.108 \text{ mm}^3$ , 说明模具入水速度是缩孔缺陷形成的最主要影响因素, 水温次之, 模具预热温度影响最小。

由表 6 还可以看出, 参数组合中包含入水速度为  $0.25 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  的试验 3, 5, 7, 缺陷高于其他参数组合。对于模具先入水部分, 由于水的换热效率高, 轴心处药浆的热量会快速传递到水浴, 药浆温度降低快速达到固化温度而凝固, 如果模具入水速度快、水温低, 会导致上面的药浆不能顺利流入凝固部分产生的空隙, 不能及时补缩, 因此会导致缩孔体积增大; 相对较优的方

案中,入水速度较小,水温相对较高,能够保证轴心处药浆充分凝固,进而减少了缩孔缺陷,改善了装药质量。

### 4.3 工艺参数优选方案的模拟与分析

根据上面的分析结果,依据均值最优原则, $A_1B_3C_1$ 组合相对较优。因此进一步针对组合的工艺参数进行装药模拟,分析其对熔铸装药质量的影响。模拟得到 $A_1B_3C_1$ 方案的温度场、药浆固化过程和缩孔分布如图17~19。

优选方案的工艺参数(模具入水速度为 $0.15\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ,水温 $50\text{ }^\circ\text{C}$ ,模具预热温度 $60\text{ }^\circ\text{C}$ )是较低的入水速度和

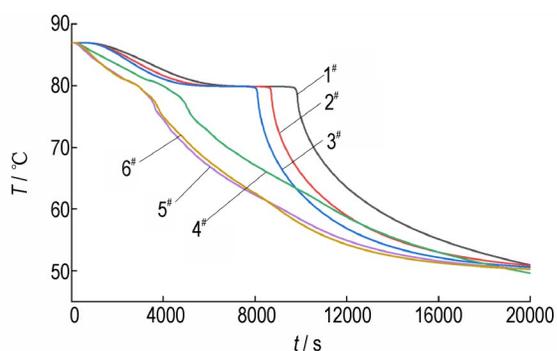


图17 优选方案的温度场曲线

Fig.17 Temperature field curves of optimized program

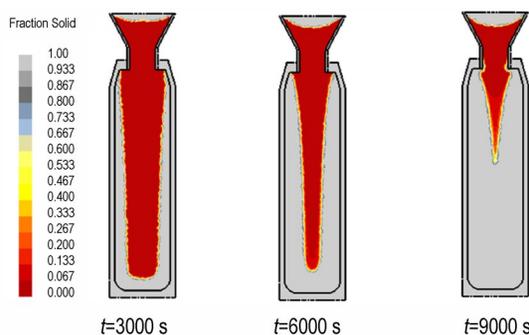


图18 优选方案的炸药凝固过程云图

Fig.18 Fraction contours of explosive solidification process of optimized program

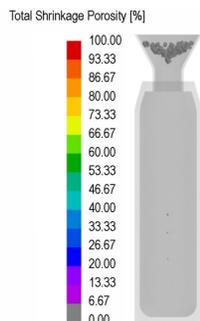


图19 优选方案的缩孔缺陷分布

Fig.19 Distribution of shrinkage cavities of optimized program

较高的水浴温度的参数组合,由如图17所示的温度曲线可以看出,6#位置的相变平台温度有明显的滞后现象,变化规律与5#接近,即药浆中部和底部的温度变化规律基本一致,同时结合图18所示的药浆固化过程也可以看出,药浆的固相界面迁移并不呈剧烈的“V”字型那么剧烈,补缩通道始终畅通,以上均说明模具下方药浆由边缘向中心层的凝固速度减慢,固化时间充足,有助于减少缩孔缺陷。从图19可以看出,在优选方案中,缺陷集中出现的2#和3#中间区域的缩孔缺陷大幅改善,缩孔体积仅为 $0.240\text{ mm}^3$ ,相较于正交试验中的缩孔最小的试验6(模具入水速度为 $0.15\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ,水温 $50\text{ }^\circ\text{C}$ ,模具预热温度 $70\text{ }^\circ\text{C}$ ),正交设计的模拟优选方案可将缩孔体积减少74%。

## 5 结论

(1)模具的入水速度过快,会导致模具上部的药浆由外向内快速凝固;速度过慢,会使模具未入水部分进行自然冷却,补缩通道提前关闭,2种情况极易造成缩孔缺陷。缩小模具、水和药浆的温差可以减少换热量,使药浆充分凝固,因此,适当升高水温,预热模具有助于减少缩孔缺陷。

(2)利用正交试验法研究模具入水速度、水温、模具预热温度3个主要工艺参数对装药质量的影响,结果发现,模具入水速度是缩孔缺陷形成的最大影响因素,水温次之,模具预热温度影响最小;模具下降速度为 $0.15\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ,水温为 $50\text{ }^\circ\text{C}$ ,预热温度为 $60\text{ }^\circ\text{C}$ 时缩孔缺陷最小。

(3)较低的入水速度和较高的水浴温度能减少缩孔缺陷,药浆中部和底部的温度变化规律一致,炸药固相界面迁移并不剧烈,使药浆能够充分凝固,进而提高了装药质量。

### 参考文献:

- [1] 智小琦. 弹箭炸药装药技术[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2011: 79-80.  
ZHI Xiao-qi. Charge technology of explosive on projectile and rocket[M]. Beijing: Ordnance Industry Press, 2011: 79-80.
- [2] 张恒志. 火炸药应用技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2010: 65-82.  
ZHANG Heng-zhi. Application technology of explosives[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2010: 65-82.
- [3] 郭朋林, 朱兴虎. 新型铸装炸药生产工艺[C]//中国工程物理研究院科技年报, 2005: 460-461.  
GUO Peng-lin, ZHU Xing-hu. Production process of new cast explosive[C]//Science and Technology Annual Report of China Academy of Engineering Physics. 2005: 460-461.

- [4] 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 technology of precise melt-casting charge with high solid contents [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2013, 2: 40-43.
- [5] 李敬明, 田勇, 张伟斌, 等. 熔铸炸药过程缩孔和缩松的形成与预测[J]. 火炸药学报, 2011, 34(2): 17-20.  
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*, 2011, 34(2): 17-20.
- [6] 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*, 2013, 21(1): 25-29.
- [7] 徐更光, 刘德润, 王廷增, 等. 熔态炸药低比压顺序凝固技术[J]. 北京理工大学学报(英文版), 1993, 2(1): 90-97.  
XU Geng-guang, LIU De-run, WANG Ting-zeng, et al. Ordered solidification technique under low pressures in the loading of molten explosives [J]. *Journal of Beijing Institute of Technology (English Edition)*, 1993, 2(1): 90-97.
- [8] MUDRY R, SANJEEV S. Modeling and simulation of melt cast explosives[C]//Insensitve Munitions and Energetic Materials Technology Symposium. NDIA, 2007.
- [9] 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.
- [10] 马松, 袁俊明, 刘玉存, 等. 水浴和自然条件下熔铸炸药凝固过程的数值计算[J]. 火炸药学报, 2013, 36(3): 54-58.  
MA Song, YUAN Jun-ming, LIU Yu-cun, et al. Numerical calculation of solidification process of melt-cast explosive in water bath and natural conditions [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2013, 36(3): 54-58.
- [11] 刘雪梅. 基于 Matlab 的熔注炸药凝固过程模拟[J]. 兵工自动化, 2013, 32(1): 84-86.  
LIU Xue-mei. Simulation for solidification of melt-cast explosives based on matlab [J]. *Ordnance Industry Automation*, 2013, 32(1): 84-86.
- [12] 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.
- [13] 崔庆忠, 刘德润, 徐培. 高能炸药与装药设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 2019.  
CUI Qing-zhong, LIU De-run, XU Pei. Explosives and charging design [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2019.
- [14] 田勇. 炸药熔铸成型过程监测评价及数值模拟研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(工程热物理研究所), 2010.  
TIAN Yong. Process monitoring /evaluation and numerical simulation during casting explosive solidification [D]. Beijing: Graduate School of China Academy of Sciences (Institute of Engineering Thermophysics), 2010.

## Simulation Study on the Effects of the Process Parameters of Sequential Solidification on the Quality of Casting Charge

NIU Kai-bo<sup>1</sup>, CAO Hong-song<sup>1</sup>, LIU Heng-zhu<sup>1</sup>, SHI Hui-fang<sup>2</sup>, WANG Zhao-guo<sup>1</sup>, YI Mao-guang<sup>3</sup>

(1. College of Mechatronics Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China; 2. Automation Research Institute Of China South Industries Group Co., Ltd, Mianyang 621000, China; 3. No. 2 Research Institute, Chongqing Hongyu Precision Industry Group Co., Ltd., Chongqing 402760, China)

**Abstract:** Sequential solidification process has a great application prospect in casting explosives. In order to study the correlation between process parameters and charge quality, a simulation study of sequential solidification process was carried out, based on the moving boundary modeling method, where TNT/RDX (33.8/65) was taken as an illustration example. The effects of process parameters, such as water injection speed (0.15, 0.20, 0.25 mm·s<sup>-1</sup>), water temperature (30, 40, 50 °C) and preheating temperature (60, 70, 80 °C), on temperature field and shrinkage defects in the solidification process were studied, based on three-factor orthogonal tests, and an optimized process parameter program was obtained. It can be seen that water injection speed has the greatest impact on charge solidification quality, followed by the water temperature and preheating temperature of mold. Compared with experimental program (water injection speed is 0.15 mm·s<sup>-1</sup>, water temperature is 50 °C), preheating temperature is 70 °C, the optimized program of orthogonal tests (water injection speed is 0.15 mm·s<sup>-1</sup>, water temperature is 50 °C, preheating temperature is 60 °C) reduces the shrinkage volume by 74%. This implies that the matching of process parameters is an effective method in improving charge solidification quality in the future. The simulation results and experimental design methods in this paper can provide references for process parameter matching optimization of charge solidification.

**Key words:** cast charge; sequential solidification; orthogonal test method; process parameters

**CLC number:** TJ55; O64

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/CJEM2022136

**Grant support:** Support for Science and Technology Projects (No.2019-JCJQ-ZD-314)

(责编: 王馨逸)