

doi: 10.7690/bgzd.2025.08.001

熔铸装药药柱气孔疵病预置

易茂光¹, 刘景尚², 吴欣欣¹, 李绍菊¹, 赵伟¹, 李峰梅³, 郭孝海⁴

(1. 重庆红宇精密工业集团有限公司研究二所, 重庆 402760; 2. 中国人民解放军 93147 部队, 重庆 402760; 3. 重庆红宇精密工业集团有限公司研究一所, 重庆 402760; 4. 重庆红宇精密工业集团有限公司研究二工厂, 重庆 402760)

摘要: 针对如何有效研究熔铸装药药柱气孔疵病问题, 提出采用注射器向熔铸装药药柱内预置气孔的方法。通过理论分析、仿真计算、工艺试验及应用验证, 在精准控制气体注入时机时, 可稳定可靠制备含气孔疵病的装药药柱, 注入气体的体积与形成气孔体积相当。结果表明, 制备的含气孔疵病装药药柱可作为装药抗过载安定性试验的标准试验件, 对开展相关领域研究有一定指导意义。

关键词: 熔铸炸药; 装药药柱; 装药疵病; 气孔疵病; 过载安定性

中图分类号: TJ510.3⁺6 **文献标志码:** A

Presetting of Gas Hole Defect of Fusion-cast Charge Column

Yi Maoguang¹, Liu Jingshang², Wu Xinxin¹, Li Shaoju¹, Zhao Wei¹, Li Fengmei³, Guo Xiaohai⁴

(1. No. 2 Research Center of Chongqing Hongyu Precision Industry Group Co., Ltd., Chongqing 402760, China;

2. No. 93147 Unit of PLA, Chongqing 402760, China; 3. No. 1 Research Center of Chongqing Hongyu Precision

Industry Group Co., Ltd., Chongqing 402760, China; 4. No. 2 Production Branch of Chongqing

Hongyu Precision Industry Group Co., Ltd., Chongqing 402760, China)

Abstract: In view of how to effectively study the blowhole defect of the fusion-cast charge, a method of presetting blowhole into the fusion-cast charge with an injector is proposed. Through theoretical analysis, simulation calculation, process test and application verification, the charge column with porosity defects can be prepared stably and reliably when the gas injection timing is accurately controlled, and the volume of the injected gas is equivalent to the volume of the formed pores. The results show that the prepared charge column with porosity defects can be used as the standard test piece for the charge overloading stability test. It has a certain guiding significance for carrying out research in related fields.

Keywords: melt-cast explosive; charge grain; charge defect; blowhole defect; overload stability

0 引言

熔铸装药作为弹药战斗部主流工艺, 装药凝固成型控制属于熔铸成型工艺的关键过程, 若控制不当, 装药极易出现缩孔、疏松、气孔、裂纹、颗粒沉降等疵病^[1]。装药疵病会严重影响装药密度和力学性能, 使得外界刺激下缺陷引发异常响应, 导致装药内部产生能量意外释放, 引发安全事故^[2-3]。同时, 装药疵病还会影响弹药的作战效能, 装药疵病容易导致弹药飞行、侵彻过程中弹药早炸, 无法完成既定战术目标, 装药密度直接联系到战斗部装药的爆速、爆压、金属驱动能力等作战性能, 装药接近理论密度能够提升战斗部的毁伤威力; 因此, 消除熔铸装药缺陷, 提高熔铸装药成型品质, 对于战斗部综合性能优化以及保证弹药作战毁伤效能至关重要。

气孔作为熔铸装药典型疵病类型, 工程实践中

难以可靠消除, 研究装药气孔疵病对装药安定性影响规律, 制定科学战斗部装药气孔疵病的质量接收标准, 能够指导弹药战斗部装药制造质量的科学评价, 对于弹药战斗部装药制造领域具有重要意义。

研究装药气孔疵病对装药安定性的影响, 离不开大量的试验验证, 通常采用带有气孔疵病的装药药柱, 而预置有气孔疵病装药药柱的制备国内外均无公开报告。笔者探索研究一种装药药柱气孔疵病的预置方法, 制备含气孔疵病的标准药柱, 可为装药抗过载安定性试验提供基础支撑。

1 气孔疵病预置机理分析

熔铸装药时, 熔融态炸药中气体的总压力大于外界压力总和, 残留在装药内部的气体就可能形成气孔, 可用气体排除条件方程^[4]表达:

$$P > P_a + h\rho_1 + 2\sigma/r. \quad (1)$$

式中: P 为析出气体的总压力; P_a 为大气压力; h

收稿日期: 2024-09-13; 修回日期: 2024-10-21

第一作者: 易茂光(1982—), 男, 重庆人。

为熔融态炸药高度； ρ_l 为熔融态炸药的密度； σ 为熔融态炸药的表面张力； r 为气泡的半径。

由式(1)可知，大气压力、熔融态炸药高度、熔融态炸药密度、熔融态炸药表面张力对气泡逸出呈负相关关系，气泡半径与气泡逸出呈正相关关系。

根据气体上浮速度(按照斯托克斯公式确定)方程^[5]：

$$u=2r^2(\rho_l+\rho_a)\times 0.98/9\eta。 \quad (2)$$

式中： u 为气泡上升速度； ρ_l 为药液密度； ρ_a 为气体密度； r 为气泡半径； η 为药液粘度。

由式(2)可知，气泡上升速度与药液密度、气泡密度、气泡半径均呈正相关关系，与药液粘度呈负相关关系。

对于特定产品装药来说，其熔融态炸药的药液高度、药液密度、气泡密度等通常为已知数据，气泡半径属于不确定因素，对于装药来说，消除气泡需从环境压力、熔融态炸药表面张力或粘度等方面着手进行优化，如通过抽真空措施减小环境压力，增加气体溢出动力，通过加压措施防止残留气体集聚形成气孔等。

气泡疵病预置时，需采取与消除气泡相反的措施，防止气泡溢出，即在环境压力、药液高度、炸药类型、气泡半径等确定条件下，仅可通过控制药液的表面张力或粘度。为了防止注入装药药体的气泡不溢出药体，需采取措施增加装药药液的粘度，使注入药体内的气泡有足够大的表面张力来阻止其上浮溢出。实际操作中通常采用降低装药药液温度的方法来提高药液的粘度，当粘度增大到一定程度，气泡上浮的动力不足以克服药液对其阻力时，注入的气体就会悬浮在装药药柱内部，待装药完成凝固后，悬浮在装药药柱内部的气体就会形成气孔，从而实现装药药柱气孔疵病的成功预置。找准气体注入装药药体的时机是保障气孔疵病成功预置的关键。

2 预置控制方案设计

2.1 设计方案简介

根据装药气孔疵病形成机理分析，设计加工了药柱气孔缺陷预置装置，装药药柱气孔缺陷预置结构如图 1 所示。先将浇注模具在浇注装药前进行预热，待预热完成后将已制备的悬浮态熔铸炸药药液加入模具内，然后将已装药液的模具在室温状态下自然冷却凝固，待药液凝固至适当状态时，采用注射器注入对应气孔体积大小的气体，注射气体完成

后，取出注射器，待药液完全凝固后，取下漏斗，将药柱清理至平整，然后剥开药柱或使用工业 CT 机检查装药药柱气孔疵病预置情况。

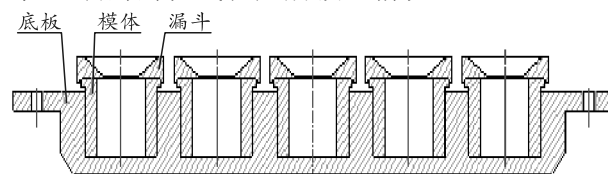


图 1 装药药柱气孔缺陷预置结构

2.2 仿真分析

由于装药药液气泡溢出与炸药粘度呈负相关关系，为确定气孔注入时机，需对装药药液凝固过程进行仿真分析。笔者采用 Fluent 软件的传热计算模块、相变模块进行了仿真分析，其基本原理是把所处理的对象划分成有限个单元，然后根据能量守恒原理求解一定边界条件和初始条件下每一个节点处的热平衡方程，由此计算出各点温度值，继而进一步求出其他相关量。按照以上确定条件，通过仿真计算，分析水浴护理控制弹药装药自下而上凝固可行性，并为工艺试验方案参数设计提供理论支撑。

根据装药药柱气孔预置工作原理，建立仿真计算模型，如图 2 所示，该模型主要由漏斗、模体、药液等组成。

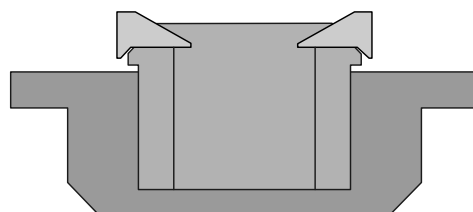


图 2 仿真计算几何模型

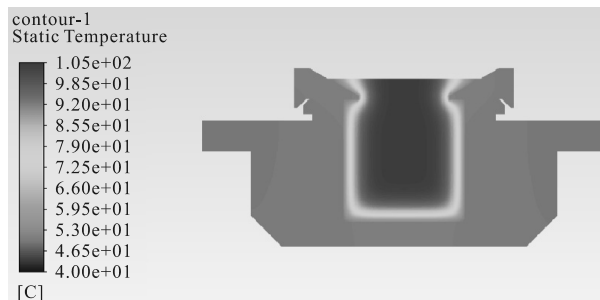
仿真计算工艺参数如表 1 所示。

表 1 仿真计算工艺参数表

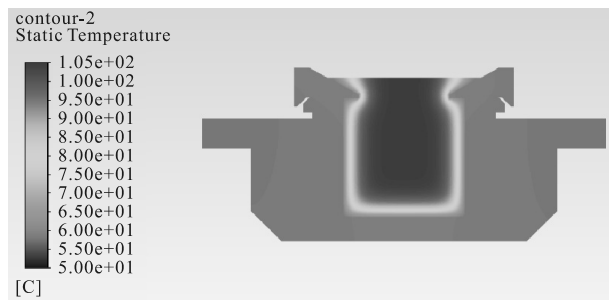
℃

工况	装药药柱模具预热温度	环境温度	药液温度
1	40	21	105
2	50	21	105

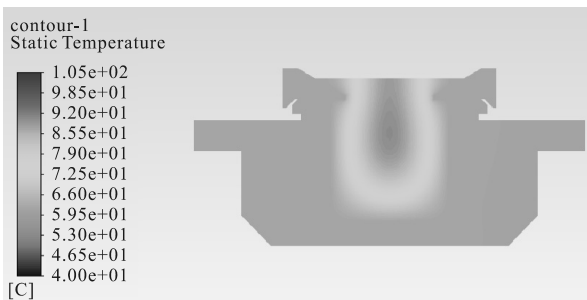
装药药柱凝固过程仿真分析温度分布梯度云图如图 3—8 所示。



(a) 工况 1

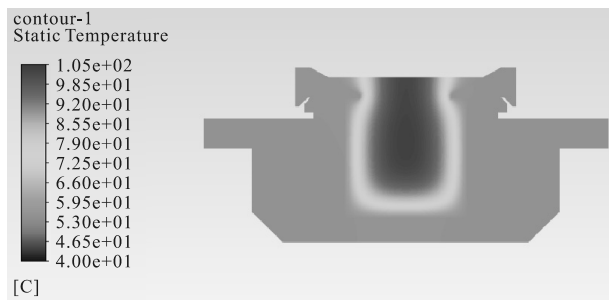


(b) 工况 2

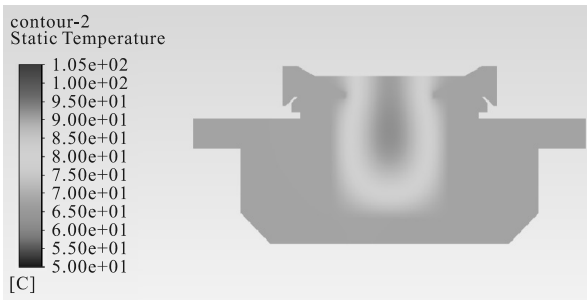


(a) 工况 1

图 3 凝固时刻 1 min 装药药柱

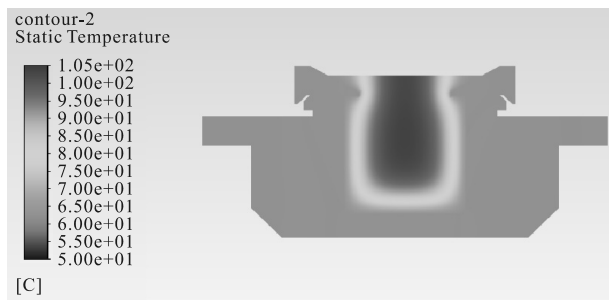


(a) 工况 1

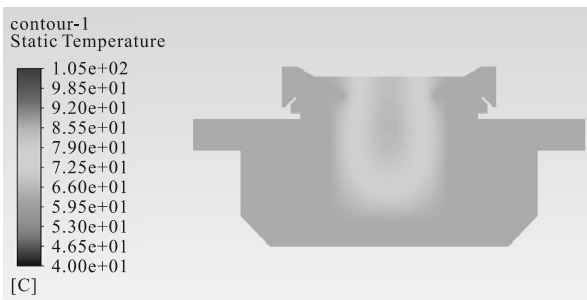


(b) 工况 2

图 6 凝固时刻 9 min 装药药柱

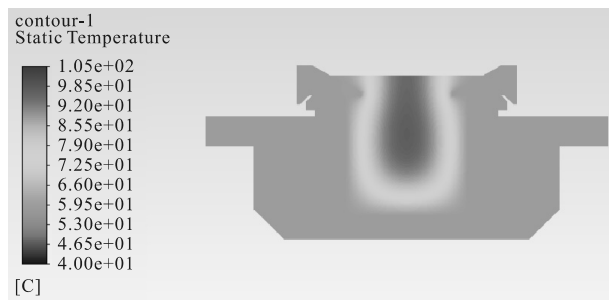


(b) 工况 2

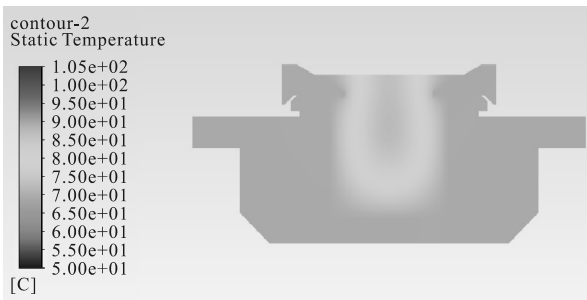


(a) 工况 1

图 4 凝固时刻 3 min 装药药柱

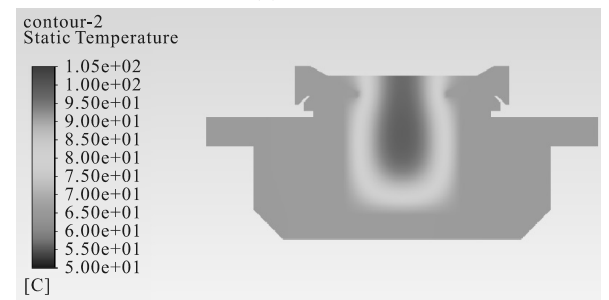


(a) 工况 1

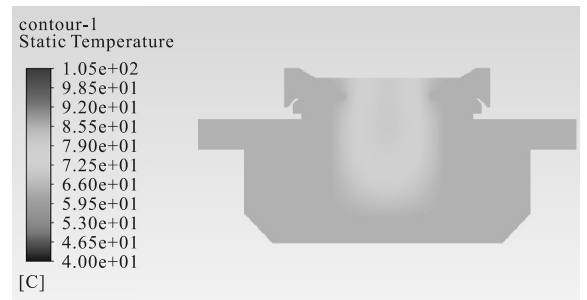


(b) 工况 2

图 7 凝固时刻 12 min 装药药柱

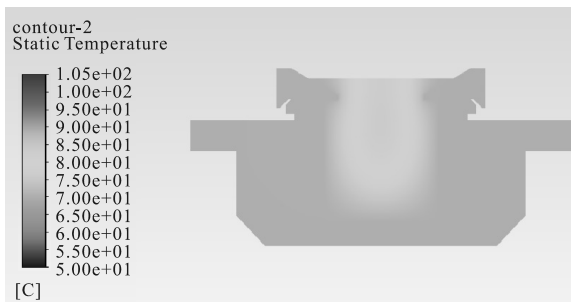


(b) 工况 2



(a) 工况 1

图 5 凝固时刻 6 min 装药药柱



(b) 工况 2

图 8 凝固时刻 15 min 装药药柱

通过仿真分析，得出结论：

- 1) 壳体预热对装药药柱凝固温度分布梯度影响不显著。
- 2) 装药药柱呈现由外及里的凝固顺序，药柱下部较上部凝固速度快，装药中上部最后凝固，气孔预置位置预计会处于装药药柱的中上部。
- 3) 装药药柱完全凝固时间在 6~9 min 范围内。
- 4) 随着预置气孔直径的不断变大，气孔受到装药药柱凝固界面的约束越来越强，直至预置气孔直径保持恒定，不随注入气体量的增加而增加。

2.3 工艺试验验证

依据装药药柱凝固过程仿真结果，设计工艺试验方案，采用某 DNAN 基含铝炸药进行装药药柱气孔疵病预置工艺试验，验证采用注入方式进行装药药柱气孔疵病预置的可行性。

根据仿真结果，确定工艺试验参数如表 2 所示。

表 2 装药药柱气孔疵病预置工艺试验参数

工况	装药药柱 模具预热 温度/℃	环境温 度/℃	药液温 度/℃	气体注入时机 (以完成药柱浇 注为基点)/min	拟预置 气孔规 格/mm	试验 样本 数量
1	50	21	105	1	8	5
2	50	21	105	3	8	5
3	50	21	105	5	8	9
4	50	21	105	6	8	9
5	50	21	105	7	8	9

工况 1 试验结果：气泡注入装药药柱内部时，所有装药药柱的气泡均出现溢出现象，剥开装药药柱后，装药药柱内部无气泡，表明此时药液粘度状态不足以阻止注入气泡的溢出。

工况 2 试验结果：气泡注入装药药柱内部时，多数装药药柱的气泡存在溢出现象，注气仪器移出后，剩余的装药药柱仍出现气泡溢出现象，剥开装药药柱后，装药药柱内部无气泡，表明此时药液粘度状态仍不足以阻止注入气泡的溢出。

工况 3 试验结果：气泡注入装药药柱内部时，少数装药药柱的气泡存在溢出现象，注气仪器移出

后，剩余的少数装药药柱仍出现气泡溢出现象，剥开装药药柱后，未发生气泡溢出的装药药柱内部成功预置了气泡疵病如图 9 所示，装药药柱气孔疵病预置成功率为 20%，验证了采用注入气体方式预置装药药柱气孔疵病的方案原理可行，但该工况气体注入时机的药液粘度状态仍不足以完全阻止注入气泡的溢出。



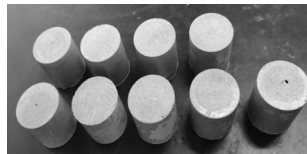
图 9 带气孔疵病药柱

工况 4 试验结果：气泡注入装药药柱内部时，未数装药药柱的气泡存在溢出现象，注气仪器移出后，少数装药药柱仍出现气泡溢出现象，装药药柱气孔疵病预置成功率达 60%，表明该工况气体注入时机的药液粘度状态仍不足以完全阻止注入气泡的溢出。

工况 5 试验结果：气泡注入装药药柱内部时，未数装药药柱的气泡存在溢出现象，注气仪器移出后，装药药柱仍未出现气泡溢出现象，装药药柱气孔疵病预置成功率达 100%，表明该工况气体注入时机的药液粘度状态足以完全阻止注入气泡的溢出，实现了装药药柱气孔疵病的成功可靠预置，如图 10 所示。



(a) 注入装药药柱



(b) 移出注气仪器

图 10 装药药柱气孔预置实物

2.4 工艺应用验证

采用研究获得的装药药柱气孔预置工艺，进行了不同规格气孔疵病装药药柱($\Phi 40\text{ mm} \times 40\text{ mm}$)的制备。装药药柱主要预置气孔规格及数量如表 3 所示，制备装药药柱 CT 检测结果如图 11 所示，根据 CT 检测结果，测量统计装药药柱预置气孔疵病实际尺寸如表 4 所示。