

doi: 10.7690/bgzdh.2024.01.004

一种注装药梯度护理凝固技术

朱锦书, 王继章, 朱德运

(安徽神剑科技股份有限公司技术保障部, 合肥 230000)

摘要: 为解决注装药气孔、缩孔等疵病, 提出一种基于逐层、顺序凝固原理的梯度护理凝固方法。通过沿装药弹体的轴向划分出小区间, 找出最易产生装药缺陷的区间, 控制冷却液面上升速度等手段来使药液在该区间内的凝固不产生疵病, 完成所有区间的药液无疵病凝固, 得到无明显装药疵病的高质量药柱; 通过一种 DNAN 基熔铸炸药的梯度护理凝固应用, 以验证该技术方案。装药结果表明: 该方案能够得到无肉眼可见缩孔、气孔等疵病的高质量药柱, 装药质量可靠。

关键词: 注装药; 装药工艺; 装药质量; DNAN

中图分类号: TJ55 **文献标志码:** A

Injection-charge Gradient Nursing Solidification Technology

Zhu Jinshu, Wang Jizhang, Zhu Deyun

(Technical Support Department, Anhui Shenjian Technology Co., Ltd, Hefei 230000, China)

Abstract: A gradient nursing solidification method based on layer by layer and sequential solidification principle was proposed to solve the defects such as gas hole and shrinkage hole of charge. By dividing a small section along the axial direction of the charge shell, find out the section most prone to charge defects, control the rising speed of the cooling liquid level and other means to make the solidification of the liquid medicine in this section free of defects, complete the defect free solidification of the liquid medicine in all sections, and obtain a high-quality grain without obvious charge defects; The technical scheme was verified by the gradient nursing solidification application of a DNAN based on melt cast explosive. The charging results show that the scheme can obtain high-quality grain without visible shrinkage, porosity and other defects, and the charging quality is reliable.

Keywords: injection-charge explosive; charging process; charging quality; DNAN

0 引言

炸药注装是指将固态炸药加热熔化后, 经处理注入弹体, 然后再冷却凝固成药柱的装药过程。在凝固过程中会发生炸药的物态、热量及体积变化^[1]。

如果工艺控制不严, 熔态炸药中携带的气泡进入弹体, 在炸药冷却凝固前没有排出, 那么在凝固后就会在药柱内形成气孔; 若没有考虑到炸药凝固过程的体积变化, 那么炸药凝固后发生的体积收缩将会导致缩孔和底隙; 若凝固过程温度控制不稳定, 则会导致药柱体积收缩不均, 可能产生应力导致药柱出现裂纹或者粗结晶。而药柱中的气孔、缩孔和裂纹等疵病会使药柱强度降低, 在弹药发射过程中, 受强惯性力的作用, 从而造成膛炸, 影响弹药的发射安全性^[2]。

针对如何提高炸药的注装质量, 消除疵病, 有关学者做了很多技术论证与研究^[3-6], 但对于如何具体应用到实际生产中, 仍缺少详细具体的介绍, 相

关的技术参数往往是装药技术人员通过持续的工艺试验不断优化调整后得出的。且由于各厂所使用的工艺设备及炸药种类各有特点、各不相同, 导致凝固过程的仿真方案受限于算法、关键数据等因素影响, 可能难以取得期望效果。

笔者基于注装药的逐层、顺序凝固原理, 建立一种简单、有效的缩孔变化模型, 应用斯托克斯公式、Tomas 粘度公式等对药柱凝固过程进行分析计算, 提出一种能够得到高质量药柱的梯度护理凝固技术方案, 给出通用的参数计算方法, 便于装药设计人员确定关键工艺参数, 从而完成工艺设计, 降低试验、仿真的时间, 提高设计效率与可靠性; 并以一种 DNAN 基熔铸炸药在某型弹药中的梯度护理凝固设计为例, 进行技术方案的阐述与验证。

1 凝固过程缩孔分析

1.1 缩孔变化模型

图 1 为部分药液从下而上凝固后(非自然凝固)

收稿日期: 2023-09-30; 修回日期: 2023-10-29

第一作者: 朱锦书(1992—), 男, 安徽人。

的无疵病装药 CT 图。

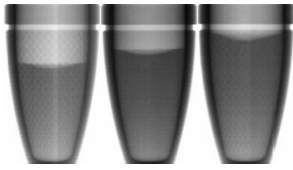


图 1 部分药液凝固后 CT

假设炸药凝固后体积收缩形成的锥形凹陷(孔洞)为规则的倒圆锥,其底面为熔态炸药液面,顶点为凝固后药柱上部凹陷位于弹体轴线的最低点,且认为弹体内熔态炸药体积近似等于其凝固后体积与形成的锥形凹陷体积之和,为:

$$V_0 = V_1 + V_2. \quad (1)$$

式中: V_0 为弹体中熔态炸药的体积; V_1 为熔态炸药凝固后的体积; V_2 为熔态炸药凝固后形成的锥形凹陷体积。

其中熔态炸药凝固后形成的锥形凹陷(倒锥形)体积为:

$$V_2 = \pi D^2 h / 12. \quad (2)$$

式中: D 为锥形凹陷底面直径, 可视为弹体内腔直径; h 为锥形凹陷的深度。

由药液凝固前后体积变化关系有:

$$(V_0 - V_1) / V_0 = (\rho_1 - \rho_0) / \rho_1. \quad (3)$$

式中: ρ_0 为熔态炸药的密度; ρ_1 为凝固炸药的密度。

通过式(1)~(3), 可得到弹体内径 D 、锥形凹陷深度 h 及药液体积 V_0 的关系式, 为:

$$D^2 h = 12(\rho_1 - \rho_0) V_0 / \pi \rho_1. \quad (4)$$

通过式(4), 结合工业 CT 灰度图片(挑选无内部缺陷样品), 测得 D 、 h 、 V_0 及 ρ_1 的值, 计算出用于装药试验的某批 DNAN 基熔铸炸药的熔态密度在 $1.57 \sim 1.60 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 之间。与之对比, 使用式(3)进行实测计算的熔态炸药密度为 $1.58 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 两值较为接近; 因此, 建立式(1)的体积模型应是较为合理的, 故通过式(4)可以进行缩孔体积变化分析。

由式(4)可知, 若装药量越多, 在凝固后补缩量会越大; 具有长窄状内腔形状的弹体一般会形成深而窄的孔洞, 宽大状内腔形状的弹体则会形成短而粗的孔洞。这与注装药实际一致, 也从侧面印证了模型的合理性。

1.2 易生成缩孔位置

依据式(4), 在从下而上的凝固过程中, 随着凝固进行, 上部熔态药液会不断对形成的锥形凹陷进行补缩, 可以视为锥形凝固界面在不断向上变化生长。而当待凝固药液难以获得充足的补缩药液时,

则会产生缩孔(疏松)。在凝固过程中, 相对较难获得充分补缩的部位, 会更易生成缩孔。故对于迫、榴弹而言, 一般在内腔直径大或者靠近弹体头弧部位置, 易生成缩孔缺陷。如图 2 所示, 某型弹药易在圆柱部与头弧交界位置附近形成缩孔(引信室下不规则灰白部分)。



图 2 装药弹体缩孔 CT

2 凝固过程气孔分析

2.1 气泡的产生

依据冶金反应工程学论述^[7], 气泡的生成首先是形成气泡核, 其形核点易出现在与熔体接触的表面, 如杂质表面、容器壁面等未被熔体填满的微孔、裂纹或缺陷内存在的气体都有可能成为气泡的形核点, 微小气泡内的压强表述为:

$$P = P_a + 2\sigma / r. \quad (5)$$

式中: P 为气泡内压强; r 为曲率半径; σ 为表面张力; P_a 为气泡表面处液体压强。

当过饱和压强超过气泡内的压强变化, 气泡将不断长大, 而当气泡浮力超过表面阻力时, 气泡将脱离形核点。

2.2 斯托克斯算式分析

气泡的上浮速度计算非常复杂, 近似按照斯托克斯公式计算, 为:

$$v = 2d^2(\rho_l - \rho_g)g / 9\eta. \quad (6)$$

式中: v 为气泡上浮速度; d 为气泡直径; ρ_l 、 ρ_g 为液体和气体密度; η 为液体粘度。

由式(6)可知, 若要计算气泡的理论上升速度, 需要知道熔态药液的粘度; 因此, 需要对熔态药液的粘度进行分析。

2.3 Tomas 粘度算式分析

炸药悬浮液粘度控制, 一般着重存在于对混合炸药的配方设计中^[8]。在实际装药过程中, 由于受生产过程药量、搅拌速度和温度等因素影响, 熔态炸药粘度值往往会有较大波动。为便于计算, 选择使用 Tomas 提出的固体粒子球形度较高的高浓度悬浮液粘度公式估算熔态炸药的理论粘度^[9]:

$$\eta = \eta_0(1 + 2.5\phi + 10.05\phi^2 + 0.00273e^{16.6\phi}). \quad (7)$$

式中： η 为悬浮液粘度； η_0 为分散介质粘度； φ 为分散相体积份数。

以某 DNAN 基熔铸炸药为例，依式(7)计算得出混合炸药在熔融态(100℃)下的粘度约为 95 mPa/s，测得其实测粘度在 19~24 s，换算成动力粘度的范围约在 81~135 mPa/s。故结合式(6)、(7)，可以近似估算熔态炸药中气泡的上升速度，进行气孔分析。

2.4 融态炸药中气泡速度计算分析

假设熔态炸药在凝固前的粘度及气泡的大小不发生变化，气泡上升过程不受炸药固体颗粒影响，依国军标有关规定^[10]，将气孔直径尺寸设为 3 mm，对于该 DNAN 基熔铸炸药，由式(6)、(7)，可以计算出 100℃下，在熔融态 DNAN 基熔铸炸药中，直径为 3 mm 的球形气泡上升速度约为 81 mm/s，理论上，若凝固过程排气通畅，装药不会存在直径大于 3 mm 的气孔疵病。

实际上，因凝固过程的复杂性，尤其是悬浮态炸药，冷却过程不仅药液粘度会逐渐降低，而且固相含量也会对气泡上浮产生影响，所以其冷却后药柱中仍可能会有个别微小的气孔产生。在生产中仍要进行气孔疵病的控制，以消除和减少疵病影响。

3 梯度护理概述

通过以上分析，在装药凝固的过程中，缩孔、气孔疵病是可以消除或降低的，而裂纹疵病主要受药柱、弹壁温差影响，通过凝固环境温度差控制一般也可以消除；因此，理论上通过合理的控制手段，是可以得到高质量装药药柱。

假设熔态炸药的凝固过程是由多个待凝固区间组成(沿弹体轴向划分的高度区间)，通过不断控制每个区间的无缺陷凝固，进而实现所有区间药液的无缺陷凝固，那么最终将得到无明显疵病的高质量药柱，可将此区间称为梯度，区间内的凝固过程称为梯度护理，则基于逐层、顺序凝固原理，有以下梯度护理技术方案：

1) 装药弹体放入保温箱中，弹体从底部开始遇冷，冷却液面分梯度变速上升，且随着熔态炸药凝固界面不断向弹口方向生长，上部熔态炸药不断流入凝固炸药的空隙处进行补缩。

2) 通过在易形成缺陷的梯度区间部位，降低冷却液面上升速度，从而降低凝固界面的上升速度，延长补缩时间，使得该处熔态炸药在凝固时得到充分补缩，避免缩孔或疏松形成。

3) 在弹体口部使用带有排气设计的冒口，冒口内给予充足的熔态炸药。一方面可排出弹体内气泡；另一方面可形成对弹体内药液的静态压力，增加气泡形核难度，预防气孔生成。

4) 在凝固过程中进行弹体(冒口)持续保温，保证熔态炸药在弹体内的流动性，充分提供炸药凝固过程体积收缩所需的药液，避免底隙形成，使得凝固界面能够完全生长到离开弹体内部，缩孔被引至冒口内。

综上，梯度护理过程需要对冷却液面上升速度、梯度等参数进行控制，从而消除或降低缩孔、气孔疵病；也需要通过对弹体保温温度、冷却温度等参数进行控制从而避免底隙、裂纹缺陷的形成。需要对梯度护理过程的关键参数进行详细分析与确定。

4 参数分析

4.1 冷却液面上升速度

作为关键参数，冷却液面上升速度关系到装药质量与装药效率。

假设在凝固界面处刚刚形成的凝固炸药与即将形成固相的熔态炸药密度相等，不考虑相变产生的体积变化，且熔态炸药本身没有热对流。在只考虑径向传热的情况下，圆柱体与球体熔态炸药凝固厚度与时间的近似经验关系为^[11]：

$$\delta = R - \left[R^2 - \frac{2\sqrt{\lambda_1 \rho C_1 \tau} (T_m - T_1) R}{\sqrt{\pi} \Delta H_m \rho} - \frac{\lambda_1 (T_m - T_1) \tau}{\Delta H_m \rho} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

式中： δ 为凝固炸药层厚度； τ 为时间； R 为凝固炸药的半径； λ_1 为凝固炸药的导热系数； C_1 为凝固炸药的比热容； T_m 为熔态炸药凝固点温度； T_1 为铸型与熔态炸药的界面温度； ΔH_m 为熔态炸药结晶潜热； ρ 为凝固炸药的密度。

因传热缓慢，熔态炸药凝固界面向上生长的速度小于冷却液面的上升速度，假设冷却液面上升速度与凝固界面上升速度呈正相关，则在易形成缺陷处，结合式(4)，在梯度区间内建立凝固界面匀速(倒锥形)生长的模型，在不产生缩孔疵病要求下，则有下式近似计算该处冷却液面上升速度：

$$v_{液} = 12(\rho_1 - \rho_0) V_0 k / (\pi \rho_1 D^2 \tau) \quad (9)$$

式中： D 为内腔直径； τ 为该处药液的凝固时间； V_0 为该处药液的体积； k 为冷却液面速度系数，大于 1，与炸药、弹体、药室涂层导热系数相关。

结合式(8)、(9)，可以解得在易形成缺陷梯度位置的冷却液面上升速度与冷却液面速度系数的关系。

4.2 梯度划分

从式(9)可以看出，冷却液面上升速度与内腔直径及药液体积等有关，不同的梯度位置应有其对应的冷却液面上升速度。着重于控制易生产缺陷处梯度位置，一般可将迫、榴弹划分为 3 个梯度过程：尾部、圆柱部、头弧部。根据梯度划分结果，则可确定不同梯度对应的冷却液面上升速度。

4.3 冷却液面保持时间

极限情况下，为保证梯度内熔态炸药得到完全彻底的凝固，冷却液面上升速度可为 0，为在某位置处保持不动的一段时间，稍大于该处药液的凝固时长。依据式(8)，可近似计算熔态炸药在该位置的完全凝固时长，从而估算到冷却液面保持时长。但式(8)并未考虑混合炸药中固相含量对凝固时间的影响，因此实际凝固时间会比计算值小。对于该 DNAN 基熔铸炸药，经观察，实际凝固时间亦小于计算时间，即在计算时间内可以确保熔态炸药的完全凝固，符合技术方案的要求。也可实测易生成缺陷位置附近的凝固时长，从而得到更加合理的参数。

4.4 弹体保温时间

凝固过程中，冷却液面上部应保持一定温度一段时间，以保证补缩通道畅通，使缩孔能被完全引出弹体。其时长应短于最终冷却液面所处位置药液的凝固时长，用以保证最后弹口附近药液的顺序凝固，确保缩孔被引至冒口内。

4.5 温度参数

由炸药本身性质决定，冷却液面温度一般在 30~40℃ 间，弹体保温温度应高于熔态炸药的凝固温度，以保证补缩与防止药柱裂纹。

4.6 冒口药量

冒口内熔态炸药的药量应超过弹体内药液的最大补缩量；另一方面，考虑到炸药损耗，冒口药量还应与回用药量的比例相匹配。

5 应用验证

5.1 方案设计

以某 DNAN 基熔铸炸药(部分参数见表 1)在某

型弹药中的梯度护理凝固设计为例，方案如下：

1) 第 1 阶段，尾部。

弹体保持一定温度，恒温冷却液面由弹体底部上升至弹体圆柱部。

2) 第 2 阶段，圆柱部。

冷却液面由弹体内腔圆柱部底端慢速上升至圆柱部和头弧部交接处，并在交接处位置保持一段时间，过程中弹体仍然进行保温。通过式(8)解得该处熔态炸药凝固时间，从而初步确定冷却液面保持时间。

3) 第 3 阶段，头弧部。

冷却液面慢速上升至口螺纹底部(冒口底部)并保持一段时间，上升过程弹体保温，当冷却液面上升到到位后，弹体不再保温，利用余温进行药液补缩凝固，将缩孔从弹口引出。通过式(8)解得弹口处熔态炸药凝固时间，初步确定该处弹体保温时间。

表 1 某 DNAN 基熔铸炸药部分参数

比热容/ (J/kg/K)	凝固温 度/℃	结晶潜热/ (J/kg)	导热系数/ (W/m/K)	药柱密度/ (kg/m ³)
1 200	90	41 500	0.23	1 640

5.2 速度系数 k 值确定

该 DNAN 基熔铸炸药在该型弹药中易生成缺陷处(圆柱部与头弧部交界处)有 ρ_1 、 ρ_0 、 V_0 、 D 、 τ ，分别为 1.65 g/cm³、1.58 g/cm³、290 cm³、62 mm、1 600 s，依据式(8)、(9)，计算其该处冷却液面上升速度为：

$$v_{液} = 0.013k \quad (10)$$

通过 DNAN 基熔铸炸药梯度护理冷却液面上升速度试验^[12]，当 $v_{液} = 0.125$ mm/s 时，装药无肉眼可见缩孔等缺陷，液面上升速度较快，装药效率较高。故对于该 DNAN 基熔铸炸药或其他导热系数接近其导热系数的炸药，冷却液面速度系数 k 均可取为 9.6。

5.3 参数

参照方案要求，通过参数分析与确定，考虑生产的控制方便，DNAN 基熔铸炸药在该型弹药中梯度护理凝固的部分参数如表 2 所示。

表 2 部分梯度护理凝固参数 mm/s

梯度位置	冷却液面上升速度
尾部	0.13
圆柱部	0.13
头弧部	0~0.13