

doi: 10.7690/bgzdh.2023.06.004

大长径比小口径战斗部熔铸装药工艺研究

王大奎, 张明明, 焦云多, 欧腾达

(重庆红宇精密工业集团有限公司研究二所, 重庆 402760)

摘要: 针对大长径比小口径战斗部熔铸装药容易出现缩孔的问题, 开展装药工艺研究。采用大长径比的圆筒对大长径比小口径战斗部进行等效, 提出一种自下而上顺序凝固的熔铸装药工艺方法, 并进行仿真计算及装填验证。验证结果表明, 该方法能够有效避免装药内部出现缩孔。

关键词: 大长径比; 小口径; 战斗部; 熔铸装药; 装药工艺

中图分类号: TJ410.3⁺4 **文献标志码:** A

Study on Casting Charge Technology of Small Caliber Warhead with Large Length-diameter Ratio

Wan Dakui, Zhang Mingming, Jiao Yunduo, Ou Tengda

(No. 2 Research Institute, Chongqing Hongyu Precision Industry Group Co., Ltd., Chongqing 402760, China)

Abstract: Aiming at the problem of shrinkage cavity in melt-cast charge of small caliber warhead with large length-diameter ratio, the charge technology was studied. The small caliber warhead with large length-diameter ratio was equivalent to the cylinder with large length-diameter ratio, and a casting charge technology with bottom-up sequential solidification was proposed, and the simulation calculation and charging verification were carried out. The verification results show that the method can effectively avoid the shrinkage cavity in the charge.

Keywords: large length-diameter ratio; small caliber; warhead; casting charge; charge technology

0 引言

熔铸炸药是指将固相颗粒加入熔态炸药中形成熔融态混合物后进行注装的混合炸药, 是利用熔态炸药相变转换完成装药过程的一种装药工艺^[1]。目前, 熔铸炸药依据熔态炸药的不同一般分为 TNT 基和 DNAN 基 2 类。DNAN 基熔铸炸药比 TNT 基熔铸炸药更加钝感, 使用更加安全^[2], 在炸药熔铸装药过程中由于组分热分解导致的内部温升有限^[3], 热安全性高。依据 TNT 基熔铸炸药装药过程中容易产生的气孔、缩孔、裂纹等装药疵病^[4], 结合熔铸炸药的物理性能与工艺控制, 可以判定 DNAN 基熔铸炸药装药过程中也会产生相似的装药疵病。按照炸药爆炸的热点理论, 具有装药疵病的战斗部会降低使用的安全性, 影响侵彻战斗部侵彻过程的安定性^[5]。

熔铸炸药在装药过程中会伴随物态、热量、体积 3 种变化, 这些变化是导致装药疵病出现的重要原因。为消除熔铸炸药的装药疵病, 通常以改变熔态炸药凝固顺序的方式来实现。正常情况下, 熔态

炸药的凝固顺序是由表及里进行的, 即周边的熔态炸药先凝固、中心的熔态炸药最后凝固。由于熔态炸药凝固过程中体积会收缩, 中心部位的熔态炸药凝固时没有药液补充其收缩的体积, 因而在中心部位形成缩孔。为解决缩孔问题, 需要改变熔态炸药在弹体内由表及里的凝固顺序为自下而上的凝固顺序, 同时还需要在弹体装填口增加冒口漏斗。实现熔态炸药在弹体内自下而上凝固顺序的方式有热探针法^[6-10]、水浴护理法^[11-13], 或为 2 种方法的组合。

针对大长径比小口径熔铸装药战斗部, 由于壳体长度长, 控制熔态炸药在壳体内部按自下而上的顺序进行凝固是确保装药内部不出现缩孔的关键措施。热探针法和水浴护理法虽然能实现熔态炸药自下而上的凝固顺序, 但壳体装药内腔小, 使用热探针法受限, 而水浴护理法增加了壳体防护难度, 防护不到位容易使壳体产生锈蚀。为此, 笔者采用多个保温夹套配合使用的方式并以 DNAN 为基的 RBHL-1 熔铸炸药进行装药工艺研究, 取得了良好的装填效果。

收稿日期: 2023-02-01; 修回日期: 2023-03-05

作者简介: 王大奎(1969—), 男, 重庆人, 高级工程师, 从事装药工艺设计及应用研究。E-mail: 498278776@qq.com。

1 研究方案设计

1.1 熔态炸药凝固规律

在不采取任何措施的情况下，加入壳体内部的熔态炸药首先是从弹壁处开始结晶凝固，并按由表及里的凝固顺序逐层进行，其中心部位的熔态炸药最后凝固。熔态炸药凝固时的体积收缩由尚未凝固的熔态炸药来补充，但最后凝固的中心部位因无熔态炸药补充而形成集中缩孔，如图 1 所示。针对大长径比小口径战斗部，由于壳体长度长，可将壳体等效为圆筒，按熔态炸药在壳体内部的凝固规律，加入壳体内部的熔态炸药在凝固时不会产生集中缩孔，而是沿壳体轴心线附近产生间断的缩孔，如图 2 所示。

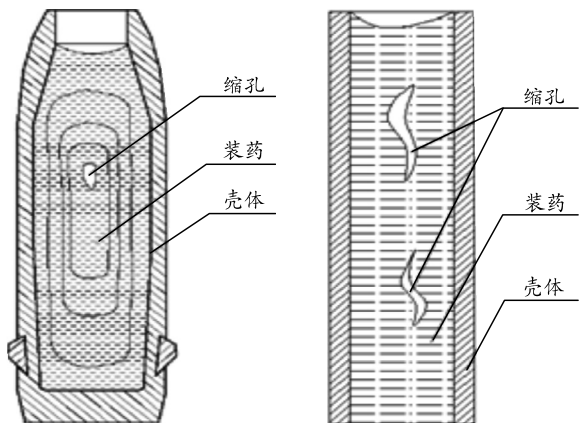


图 1 普通壳体

图 2 大长径比壳体

1.2 研究方案

针对大长径比小口径战斗部熔态炸药凝固的特殊性，采取在壳体外表面使用多层多段棉布保温、装填口部使用保温漏斗保温的措施来实现熔态炸药自下而上的凝固顺序，进行了某圆筒产品的装药；但由于棉布保温效果差，在圆筒装药内部仍然存在多处缩孔，如图 3 所示。图中，距上端面(装填口端面)255、270、380、430、680 mm 等断面处均产生

了缩孔。

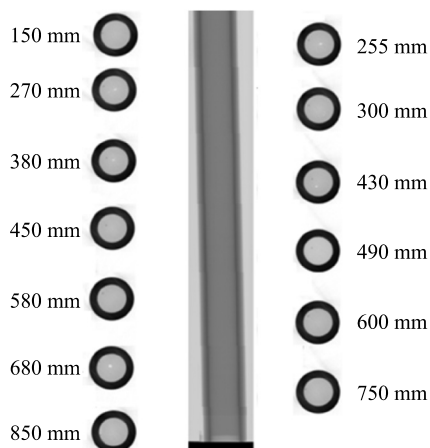


图 3 某圆筒产品 CT

为避免大长径比小口径战斗部装药内部缩孔的产生，以圆筒产品装药为代表进行等效研究。为确保保温效果，将棉布保温更换为保温夹套保温，如图 4 所示。按照保温夹套保温时间长短、圆筒壁厚、保温夹套内是否通入冷却水进行研究方案的设计，共设计 6 种工况，如表 1 所示。表 1 中保温冷却是指直接断开保温夹套内通入的蒸汽，水冷是指断开保温夹套内的蒸汽并向保温夹套内通入自来水。

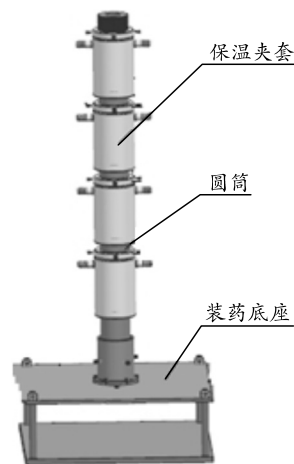


图 4 圆筒装配

表 1 工况及条件

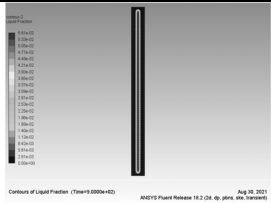
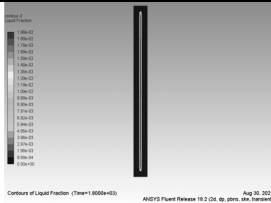

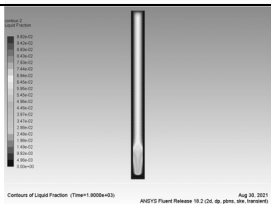
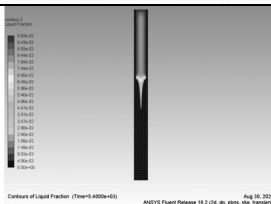
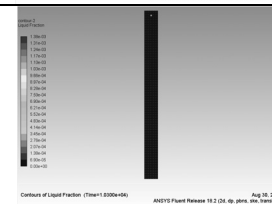
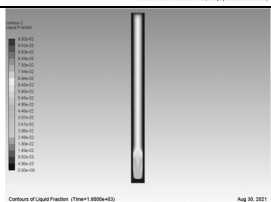
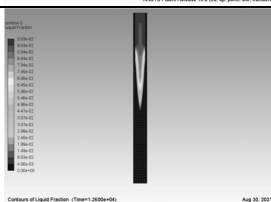
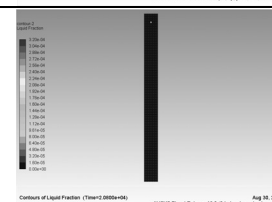
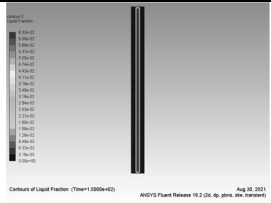
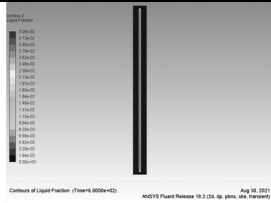
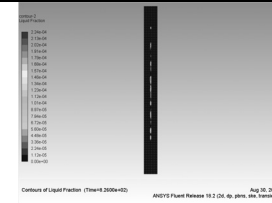
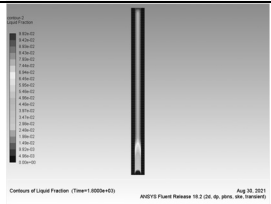
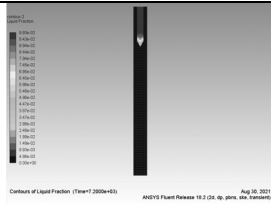
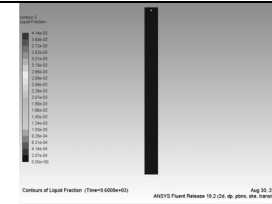
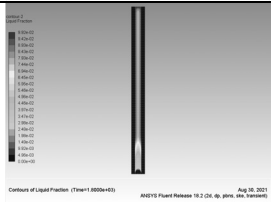
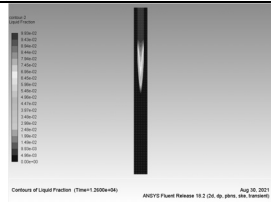
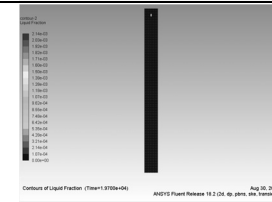
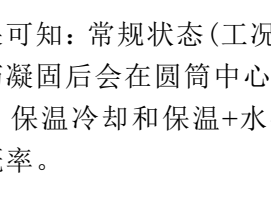
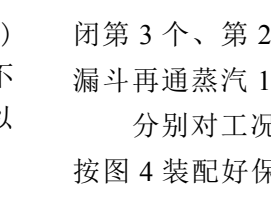
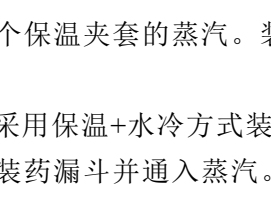
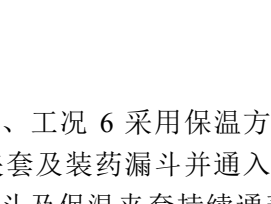
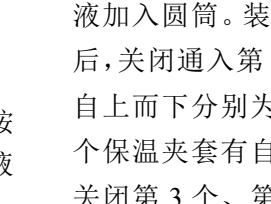
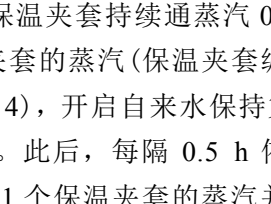
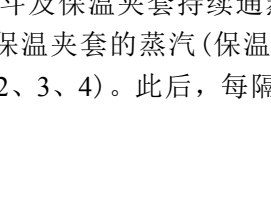
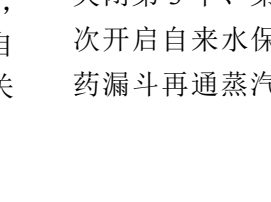
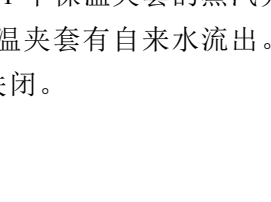



工况	圆筒内径/mm	圆筒外径/mm	冷却方式	有无保温夹套	保温夹套断开时间间隔/h
1	60	80	自然冷却	无	—
2	60	80	保温+水冷	有	0.5
3	60	80	保温冷却	有	1.0
4	40	80	自然冷却	无	—
5	40	80	保温+水冷	有	0.5
6	40	80	保温冷却	有	1.0

2 仿真分析

针对大长径比产品熔铸装药在装药内部容易出现缩孔的不利情况，通过圆筒保温并逐段断开以避

免缩孔产生，利用 Fluent 软件按表 1 所列工况对圆筒内熔态炸药凝固过程进行了仿真计算，得到了各工况下不同时刻液相分布云图，如表 2 所示。

表 2 各工况不同时刻液相分布云

工况	时刻	液相分布	时刻	液相分布	时刻	液相分布
1	15 min		30 min		35.45 min	
						
						
2	0.5 h		1.5 h		2.86 h	
						
						
3	0.5 h		3.5 h		5.78 h	
						
						
4	2.5 min		10 min		13.7 min	
5	0.5 h		2 h		2.67 h	
6	0.5 h		3.5 h		5.47 h	

通过仿真结果可知：常规状态(工况 1、工况 4)自然冷却下，装药凝固后会在圆筒中心部位出现不连续的线状缩孔；保温冷却和保温+水冷方式可以减小缩孔出现的概率。

3 装填验证

3.1 验证过程

分别对工况 3、工况 6 采用保温方式装填。按图 4 装配好保温夹套及装药漏斗并通入蒸汽。药液加入圆筒。装药漏斗及保温夹套持续通蒸汽 1 h 后，关闭通入第 4 个保温夹套的蒸汽(保温夹套编号自上而下分别为 1、2、3、4)。此后，每隔 1 h 依次关













闭第 3 个、第 2 个、第 1 个保温夹套的蒸汽。装药漏斗再通蒸汽 1 h 后关闭。

分别对工况 2、工况 5 采用保温+水冷方式装填。按图 4 装配好保温夹套及装药漏斗并通入蒸汽。药液加入圆筒。装药漏斗及保温夹套持续通蒸汽 0.5 h 后，关闭通入第 4 个保温夹套的蒸汽(保温夹套编号自上而下分别为 1、2、3、4)，开启自来水保持第 4 个保温夹套有自来水流出。此后，每隔 0.5 h 依次关闭第 3 个、第 2 个、第 1 个保温夹套的蒸汽并依次开启自来水保持对应保温夹套有自来水流出。装药漏斗再通蒸汽 0.5 h 后关闭。

3.2 结果分析

圆筒装填后进行了 DR 及 CT 检测，如表 3 所示。

表 3 装填后的 DR 及 CT 图 mm

状态	圆筒 I (装药内径 40)		圆筒 II (装药内径 60)	
保温 方式 装填	距底端 800		距底端 800	
	距底端 500		距底端 500	
	距底端 200		距底端 200	
保温 + 水冷 方式 装填	距底端 800		距底端 800	
	距底端 500		距底端 500	
	距底端 200		距底端 200	

从上表结果看，无论采取保温方式还是保温+水冷方式进行后期护理，装填后的药柱内部均无缩孔存在。药柱内部个别部位存在较小气孔，其原因为装填所用的圆筒为开合结构，药液装填后不能进行抽真空处理。

4 结论

从装填验证情况看，无论采取保温方式，还是采取保温+水冷方式，均能达到消除装药内部缩孔的装填效果。采取保温+水冷方式可大幅减少装填护理时间，同时减少药液在壳体内部的停滞时间，有利于减少熔态炸药内固相物的沉降、降低装药内部的密度差，提高装药密度的均匀性。

参考文献：

- [1] 王亲会. 熔铸混合炸药用载体炸药评述[J]. 火炸药学报, 2011, 34(5): 25-28.
- [2] 王红星, 王浩, 蒋芳芳, 等. DNAN 炸药熔铸工艺安全性分析[J]. 兵工自动化, 2014, 33(7): 72-74.
- [3] 金大勇, 王亲复, 牛国涛, 等. 一种 DNAN 基熔铸炸药铸装工艺安全性分析[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(8): 176-181.
- [4] 陈国光, 董素荣. 弹药制造工艺学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2004: 310-331.
- [5] 吕鹏博, 王伟力, 刘晓夏, 等. 含装药缺陷的侵彻战斗部穿甲过程装药安定性的数值模拟[J]. 海军航空工程学院学报, 2017, 32(4): 389-394.
- [6] 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): 151-158.
- [7] 鲍延年, 冯梅. 熔铸装药弹体后处理设备设计研究[J]. 兵工自动化, 2010, 29(4): 20-22.
- [8] 张明明, 王大奎, 冉靖, 等. 中小口径、大长径比弹药装药缩缝研究: 2014 年火炸药技术学术研讨会论文集(下册)[C]. 青岛: 火炸药专业委员会, 2014: 872-876.
- [9] 张明明, 王大奎, 万力伦, 等. 不同材料壳体对熔铸装药过程传热影响分析[J]. 兵工自动化, 2017, 36(7): 63-66.
- [10] 张明明, 张斌宏, 王大奎, 等. 熔铸装药凝固过程温度场变化分析[J]. 兵工自动化, 2021, 40(6): 93-96.
- [11] 朱锦书, 朱德运, 王继章. 一种 DNAN 基熔铸炸药的装药工艺探究[J]. 山东化工, 2020, 49(12): 84-85, 87.
- [12] 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.
- [13] 梁国祥, 曹红松. 熔铸装药过程缩孔缩松的预测及工艺优化[J]. 兵器材料科学与工程, 2014, 37(2): 47-49.