

doi: 10.7690/bgzd.2021.06.019

熔铸装药凝固过程温度场变化分析

张明明, 张斌宏, 王大奎, 万力伦

(重庆红宇精密工业集团有限公司, 重庆 402760)

摘要: 为消除熔铸装药缩孔, 对凝固过程内外温度场的关联工艺进行研究。分别对普通注装、冒口漏斗注装和热芯棒注装 3 种工艺熔铸装药凝固过程进行实验及结果分析, 通过检测壳体外部温度预判壳体内部温度变化, 实现壳体内部装药质量预判, 得出影响熔铸装药凝固过程的温度变化规律。结果表明: 装药凝固过程壳体内部温降随时间增加而降低, 装药外部温度随内部中心温度降低而降低, 且均呈直线变化。

关键词: 熔铸装药; 装药过程; 内外温度场; 检测

中图分类号: TJ410.3⁺3 **文献标志码:** A

Study on Temperature Field Changes During Casting Explosive Solidification Process

Zhang Mingming, Zhang Binhong, Wan Dakui, Wan Lilun

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

Abstract: For eliminating casting explosive shrinkage, research on related technique of internal and external temperature field during casting explosive solidification. Separately carry out experiment and result analysis for casting explosive solicitation process of common injection loading, feeder funnel injecting and hot mandrel. Detect shell external temperature to predicate internal temperature and realize quality predication for shell internal charging, acquire the temperature change rule which making influence on casting explosive solidification process. The results show that the shell internal temperature is higher when time increases, the charging external temperature decreases when internal center temperature decreases. The change is linear change.

Keywords: casting explosive; charging process; internal and external temperature field; test

0 引言

熔铸炸药因其装填不受药室形状影响而广泛作为战斗部主装药, 其成型技术与传统的金属浇铸相似, 凝固过程存在相变、热变及体积变化, 使装填后易形成气孔、缩孔、裂纹等缺陷。而熔铸装药的相变、热变及体积变的宏观变现为装药过程的温度变化。研究表明^[1-3]: 缺陷增多会使炸药的感度升高, 严重影响战斗部使用过程中的安全性; 同时, 炸药的缺陷还会大幅度降低炸药的爆轰性能, 影响武器的毁伤效果。

对于消除熔铸装药缩孔, 李敬明等^[4]研究了缩孔、疏松形成机理, 提出采用冒口漏斗可消除缩孔; 国内也有采用热芯棒护理工艺消除熔铸装药缩孔及疏松, 但对熔铸装药凝固过程内外温度场变化研究不足。熔铸装药凝固过程实质是装填到壳体内熔态炸药的降温过程, 张明明等^[5]研究表明, 装填到壳体内的熔铸炸药凝固放热过程满足常规稳态导热微分方程。熔铸炸药凝固过程内外温度具有一定关联关系, 因此通过间接检测壳体壁温度变化情况, 能

够检测装填内部质量, 实现装药过程质量实时检测。笔者主要研究普通注装、冒口漏斗注装及热芯棒注装等 3 种工艺条件下熔铸炸药凝固过程的内外温度变化情况。

1 工艺实验

1.1 实验材料及工装

实验材料为 B 炸药; 温度检测采用热电阻传感器, 根据测试需要分别有贴壁式、插入式 2 种传感器。数据记录采用无纸记录仪。传感器检测点位及编号见表 1 所示。装药壳体内腔深度为 550 mm。

表 1 传感器检测点位及编号对应

序号	名称	规格/mm	点位	备注
1	贴片传感器 1	单点贴壁式	—	
2	贴片传感器 2	单点贴壁式	—	
3	传感器 1	$\phi 10 \times 1000$	端点	同根
4	传感器 1	$\phi 10 \times 1000$	距端点 400 mm	
5	传感器 2	$\phi 10 \times 1000$	端点 200 mm	同根
6	传感器 2	$\phi 10 \times 1000$	距端点 400 mm	
7	传感器 3	$\phi 8 \times 1100$	端点	同根
8	传感器 3	$\phi 8 \times 1100$	距端点 200 mm	
9	传感器 4	$\phi 8 \times 1100$	端点	同根
10	传感器 4	$\phi 8 \times 1100$	距端点 200 mm	

收稿日期: 2021-02-10; 修回日期: 2021-03-28

作者简介: 张明明(1983—), 女, 安徽人, 硕士, 高级工程师, 从事装药工艺设计及应用研究。E-mail: zhmm.2007@163.com。

1.2 实验方案

1) 普通注装法工艺。

如图 1 所示，将贴壁式及插入式传感器分别固定在测试壳体内部及外部，并使内外部测温点处于同一高度，炸药凝固过程不使用冒口漏斗。壳体在 50~60 °C 环境中预热 1 h，将已熔混完成的 B 炸药注入壳体内，开启数据记录仪，检测炸药凝固过程内外温度。

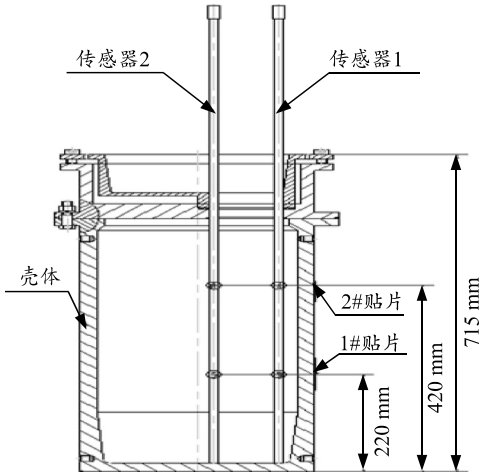


图 1 普通注装工艺装置

2) 冒口漏斗注装工艺。

如图 2 所示，将贴壁式及插入式传感器分别固定在测试壳体内部及外部，并使内外部测温点处于同一位置，炸药凝固过程使用冒口漏斗。将已熔混完成的 B 炸药注入壳体内，开启数据记录仪，检测炸药凝固过程内外温度。

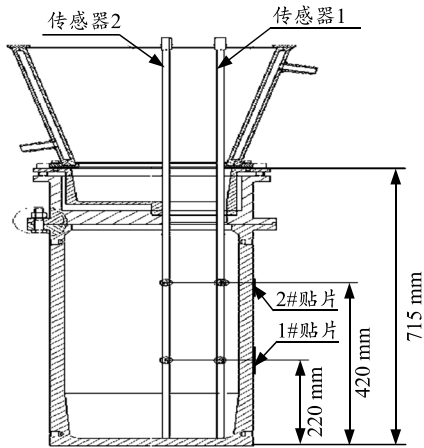


图 2 冒口漏斗注装工艺装置

3) 热芯棒注装工艺。

如图 3 所示，将贴壁式及插入式传感器分别固定在测试壳体内部及外部，并使内外部测温点处于同一位置，炸药凝固过程使用冒口漏斗。将已熔混完成的 B 炸药注入壳体内，开启数据记录仪，检测

炸药凝固过程内外温度。

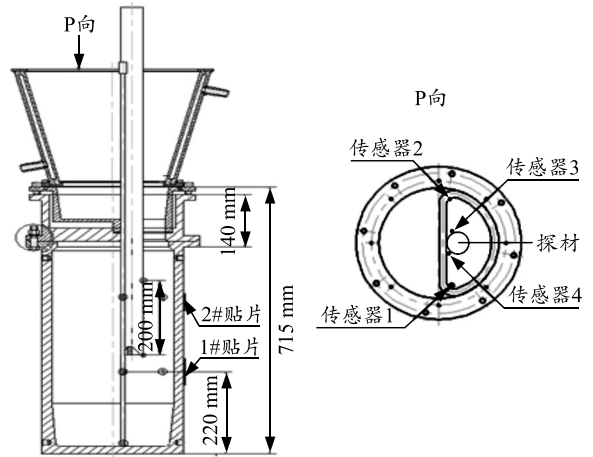


图 3 热芯棒注装工艺装置

1.3 结果与分析

根据 1.2 节 3 种工艺，分别进行装填过程温度变化检测，依据检测结果分别绘制了温度-时间变化关系曲线，如图 4—6 所示。其中，中 200 为处于壳体中间距底部 200 mm 位置检测点，中 400 为处于壳体中间距底部 400 mm 位置检测点，内壁 200 为处于壳体内壁距底部 200 mm 位置检测点，内壁 400 为处于壳体内壁距底部 400 mm 位置检测点，贴壁 200 为处于壳体外壁与中 200 等高位置检测点，贴壁 400 为处于壳体外壁与中 400 等高位置检测点。

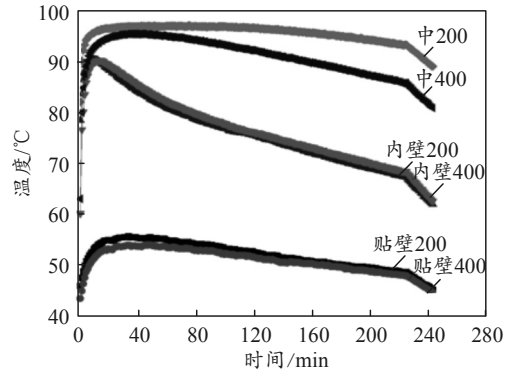


图 4 普通注装装药凝固过程温度-时间变化

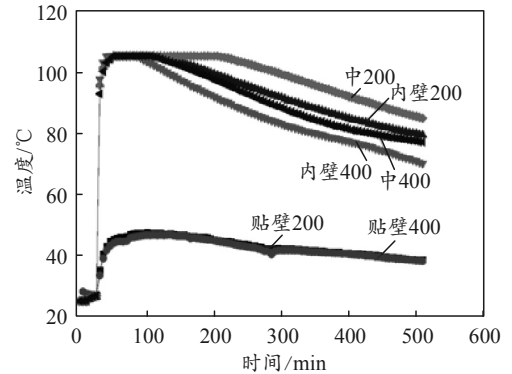


图 5 冒口漏斗注装药凝固过程温度-时间变化

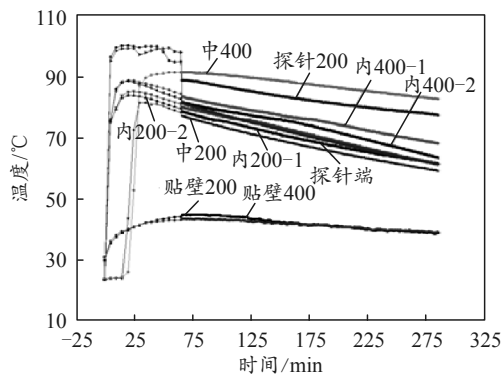


图 6 热芯棒装药凝固过程温度-时间变化

由图 4—6 可知：各装药工艺条件下，熔铸装药凝固过程中的壳体外壁与装药内部炸药温度变化趋势一致，远离中心部位沿轴向的温度变化基本一致，与熔铸炸药的由外及内的凝固顺序一致。如图 4 所示，在相同壳体及炸药种类条件下，不使用冒口漏斗时，壳体内最后凝固部位在壳体中下部，中 200 部位的测试点温度最高。如图 5 所示，使用装药漏斗时，在 500 min 前中 200 位置温度高于中 400，但在 500 min 后，两者的温差逐渐缩小，且中 200 温度降低幅度明显大于中 400，说明装药最后凝固部位在向上迁移，漏斗内药液更易于进行补缩，利于装药质量的提高；使用热芯棒及漏斗时，中 400 处药液温度最高，中 200 处温度在探针护理开始 1 h 后显著降低，靠近壳体内壁药液温度轴向变化一致，降温幅度与中间部位一致，满足炸药由内及外的固化要求。由图 5、图 6 可知，在冒口保温条件下，壳体内炸药凝固时，壳体壁与内部温度差为 20~25 °C。壳体内炸药降温速度逐渐平缓，主要由于液态炸药凝固时，放出的结晶热和冷却热是通过壳体壁和不断增厚的炸药凝固层传出去的^[6-7]，壳体壁导热性能好，传热阻力最大的是凝固的炸药层。随着凝固的进行，炸药凝固层越来越厚，使炸药凝固的速度越来越慢，即温降越来越慢。

为进一步研究炸药凝固过程内外部温度变化情况，根据 1.3 节测试结果，分别绘制了如图 7—9 的壳体内炸药凝固过程温度差-时间变化曲线。中壁 200 为距壳体内底端 200 mm 处中心部位温度与壳体壁位置温度差，中壁 400 为距壳体内底端 400 mm 处中心部位温度与壳体壁位置温度差，内壁 200 为距壳体内底端 200 mm 处内部位温度与壳体壁位置温度差，内壁 400 为距壳体内底端 400 mm 处内部位温度与壳体壁位置温度差。

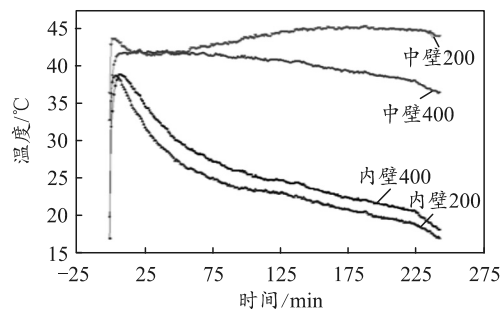


图 7 普通注装药凝固过程温度差-时间关系

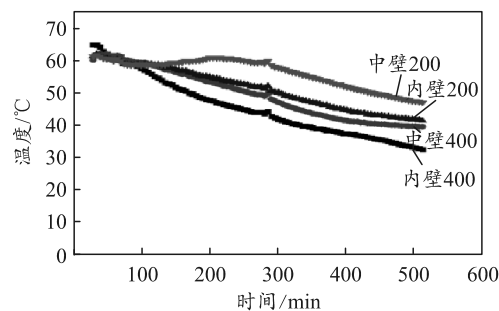


图 8 冒口漏斗注装药凝固过程温度差-时间曲线

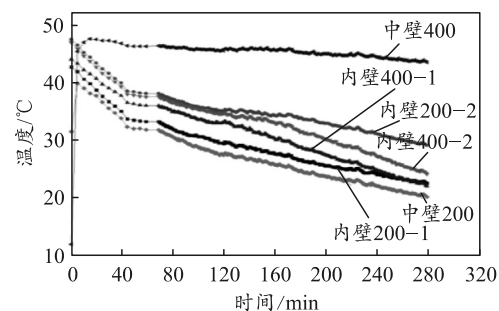


图 9 热芯棒注装药凝固过程温度差-时间曲线

由图 7—9 可知：普通注装工艺装药凝固过程，中心部位与壳体壁的温度差随时间延长小幅下降，而壳体壁附近温度与壳体壁温度差下降幅度较大，由此可知壳体内部中心部位药浆凝固较晚，根据温度变化，在壳体中下部易出现装药缩孔，与常规疵病出现位置一致。对比图 7、图 8 可知：采用冒口保温能够降低壳体内部药液与壳体壁面温度差，且温度差随时间延长而降低，呈直线关系。采用热芯棒护理工艺，炸药凝固温度差中心部位由下而上逐渐增大，外侧部位由下而上逐渐增加，当壳体内炸药全部凝固后趋于稳定，进一步验证了采用热芯棒及冒口能够消除装药内部疵病；同时，通过检测壳体壁面温度能够判断装填内部疵病。根据这一思路绘制了如图 10、图 11 的中 200、400 °C 冒口注装及热芯棒注装过程内部/外壁温度与中心温度关系。如图 12 所示，装填产品质量均无异常 (CT 检测精度为 0.25 mm)。

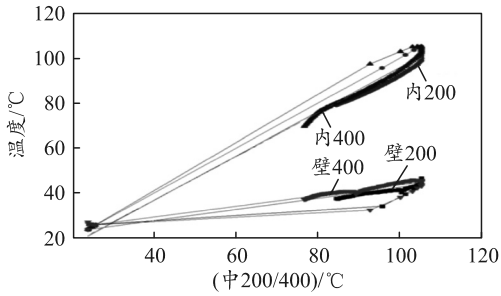


图 10 冒口注装凝固过程温度-中心温度关系

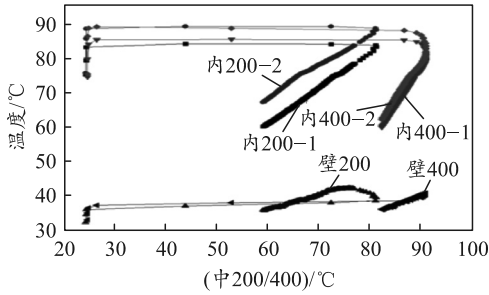


图 11 热芯棒注装凝固过程温度-中心温度关系

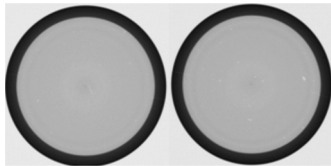


图 12 冒口及热芯棒装填产品 CT(400 mm 位置)

由图 10、图 11 可知：采用冒口注装药凝固过程中，内部及壁面温度随壳体中心温度的降低而降低且呈直线关系；热芯棒注装药凝固过程中，壳体壁 200 mm 位置温度变化先增加再降低，主要由于壳体装填前未预热，随着壳体内炸药的不断凝固及热量传递，导致壳体壁温逐渐增加，随着凝固的进行，壳体壁热容量达到最大值，壳体壁温与炸药内部凝固放热直接相关，逐渐降低且与壳体中心部位炸药温度呈直线关系。对于笔者所用 B 炸药，装药凝固完全后，壳体壁温为 37 °C，凝固过程壳体壁温最高为 46.7 °C。

2 结论

通过上述工艺研究，得出结论如下：

1) 使用冒口及热芯棒能够有效提升装药疵病在壳体垂直方向的形成位置，装药内部温度随时间的增加而降低且呈线性关系。冒口漏斗药量不足时，在壳体上部易出现缩孔。

2) 采用冒口保温能够降低壳体内部药液与壳体壁面温度差，且温度差随着时间增加而降低，呈直线关系。采用热芯棒护理工艺，炸药凝固温度差中心部位由下而上逐渐增大，外侧部位由下而上逐渐增加，炸药凝固后趋于稳定。

3) 冒口/热芯棒注装药凝固过程中，内部及壁面温度随装药中心温度的降低而降低且呈直线关系。对于 B 炸药，装药凝固完全后，壳体壁温为 37 °C，凝固过程壳体壁温最高为 46.7 °C。

参考文献：

[1] 花成, 黄明, 黄辉, 等. RDX/HMX 炸药晶体内部缺陷表征与冲击波感度研究[J]. 含能材料, 2010, 18(2): 152-157.

[2] 黄亨建, 董海山, 舒远杰, 等. HMX 中晶体缺陷的获得及其热感度和热安定性的影响[J]. 含能材料, 2003, 11(3): 123-126.

[3] 李全俊, 张博, 史慧芳, 等. 发射药自动混同设备及工艺技术[J]. 兵工自动化, 2020, 39(2): 73-77.

[4] 李敬明, 田勇, 张伟斌, 等. 炸药熔铸过程缩孔和疏松的形成与预测[J]. 火炸药学报, 2011, 34(2): 17-20.

[5] 张明明, 万大奎, 万力伦, 等. 不同材料壳体对熔铸装药过程传热影响研究[J]. 兵工自动化, 2017, 36(7): 63-66.

[6] 温世武, 姚兰英. 装药学[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2008: 46-47.

[7] 齐铭, 肖勇, 黄求安, 等. 炸药共晶工程自动化的几种方法[J]. 兵工自动化, 2020, 39(2): 66-67.

(上接第 92 页)

参考文献：

[1] 唐卫, 赵春宇, 何滕. 火炮身管药室容积测量方法探讨[J]. 兵器试验, 2013(3): 51-54.

[2] 郝建军, 刘子涛, 蒋强. 基于机器视觉的弹体药室容积测量[J]. 四川兵工学报, 2011, 32(6): 74-76.

[3] 介骏祥, 廉永胜, 黎锐锦. 用容积比较法对地理卧式金属罐容积测量的研讨[J]. 计测技术, 2003, 30(5): 16-17.

[4] 李超, 杜秋华. 容积测量方法研究[J]. 机械设计与制造, 2014(5): 218-220.

[5] 赵澜, 张涤新, 冯焱, 等. 高精度气体微流量计工作容积测量[J]. 机床与液压, 2011, 6(11): 85-87.

[6] 张天平. 一种高精度测量容器容积的多用途方法[J]. 实用测试技术, 1999, 9(5): 9-10.

[7] ISHIB, M 刘惠民. 用气体称重法测量容积[J]. 低温工程, 1992(1): 52-56.

[8] Ю.Г.МЫЧКОВСКИЙ, 王信化. 封闭容积的测量[J]. 计量与测试技术, 1995(3): 40-42.