doi: 10.7690/bgzdh.2013.11.014

分步压装装药工艺参数对装药密度及密度分布的影响

刁小强，王彩玲，赵省向，封雪松，李文祥
（西安近代化学研究所第二研究部，西安 710065）

摘要：用模拟药和可退模开合弹对不同分步压装装药工艺参数进行实验，并对装药密度和轴径向密度分布进行检测，分析分步压装工艺参数变化对最终装药密度和密度分布的影响。试验结果表明：随着螺杆直径的增大，周边和平均装药密度均呈上升的趋势；装药过程中初始压力越高，越有利于提高装药密度和密度分布，当压力达到一定值后，装药密度趋于一致；螺杆距弹体底部间距越小，底部越容易压实，密度越高；螺杆每次带入的进料量越少，压制次数越多，密度均匀性越高。该研究为加快分步压装装药工艺的推广应用打下了基础。

关键词：分步压装；工艺参数；压力；螺杆；密度分布
中图分类号：TJ410.5^{+}2　　**文献标志码**：A

Effect of Step-Press-Loading Charges Technological Parameter for Charge Density and Density Distribution

Diao Xiaoqiang, Wang Cailing, Zhao Shengxiang, Feng Xuesong, Li Wenxiang
(*No*. 2 *Research Department*, *Xi'an Modern Chemistry Research Institute*, *Xi'an* 710065, *China*)

Abstract: Analog explosive and unmoulded shot were employed to experiment the different parameters, and detection density distribution of charges and axes radial, analyzed the effect of step-press-loading technological parameter for finally charge density and density distribution. The results show that, the effects on charge density and density distribution of step-press-loading charge technology are observed obviously. The average charge densities are enhanced with the increasing screw diameters, charge quality and density distributions are also improved with the increasing pressures. When the bottom gap of shot decreases, shot bottom can be pressed more easily, and the charge density can be improved at the same time. The press frequency and density uniformity can be promoted with the decreasing charge quantity. This research will promote the use of the step-press-loading charges technological.

Key words: step-press-loading charges; technological parameter; pressure; screw; density distribution

0　引言

分步压装工艺[1-3]是一种通过螺杆对每一份炸药进行冲压、使炸药颗粒向弹体内腔挤压装药的工艺。该装药工艺具有装药密度分布均匀、装药质量高等优点[4]，从装药工艺上为炸药装药的安全性奠定了基础，目前已经应用于榴弹装药[5]。

研究表明：分步压装装药工艺参数对装药密度和密度分布影响显著[6]，主要相关工艺参数包括：弹体口径与螺杆直径之间的关系、油压大小、进料量、螺杆距弹体底部最小间距等。

笔者利用模拟药和可退模开合弹，通过改变不同的工艺参数进行试验，并对装药密度和轴径向密度分布进行检测，从而研究分步压装工艺参数的变化对最终装药密度和密度分布的影响。

1　试验

1.1　试验准备

试验用药：模拟 A-Ⅸ-Ⅱ炸药，理论密度 1.83 g/cm^3；

设备：2915 型分步压装机；

固定参数：转速 360 rad/min；

装药模具：高度 700 mm 左右，形状为肚大口小型的可退模开合弹。

1.2　试验方法

1) 不同螺杆直径下的装药试验：在压力 6 MPa、螺杆距弹体底部最小间距 28 mm、进料量为 1/2 处半进料的工艺条件下，利用 Φ43 mm、Φ60 mm 螺杆进行。

2) 不同压力下的装药试验：采用 Φ60 mm 螺杆，在螺杆距弹体底部最小间距 28 mm，进料量为 1/2 处半进料的工艺条件下，进行压力分别为 6 MPa、8 MPa 和 9 MPa 的装药试验。

3) 不同螺杆距弹体底部间距下的装药试验：在采用 Φ60 mm 螺杆，压力 9 MPa，进料量为 1/2 处半进料的工艺条件下，分别进行间距分别为 28 mm、34 mm 和 22 mm 的装药试验。

收稿日期：2013-05-18；**修回日期**：2013-06-17
作者简介：刁小强(1981—)，男，陕西人，本科，工程师，从事混合炸药配方及制备工艺研究。

4) 不同进料量对装药密度影响的装药试验：分步压装工艺通过控制料仓进料口的大小来控制进料量的多少，通常选择进料口全开或者半开，进料口全开情况下进料量多，半开情况下进料量少。通过调整，在螺杆行程 1/3 处、1/2 处、2/3 处由全进料改为半进料，控制在分步压装装药过程中的进料量的变化，进行装药试验。工艺条件：*Φ*60 mm 螺杆，螺杆距弹体底部最小间距 28 mm，压力 9 MPa。

1.3　检测方法

装药完成后打开开合弹，取出药柱，称量药柱质量，并采用注水法测量弹体装药体积，计算药柱整体密度。再分别由药柱底部、中部、顶部位置截取一个横截面，厚度约 5 mm，如图 1 所示，每个截面在直径六等分处取小药块，药块尺寸大约为 2 mm×2 mm，如图 2。采用 GJB401.2 液体静力称量法测量药块密度，从而确定轴向和径向密度分布。

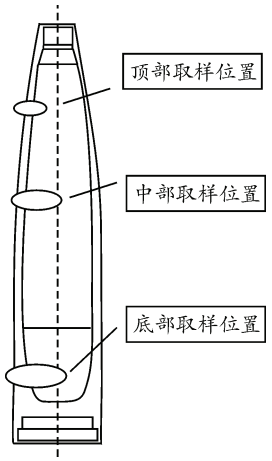


图 1　轴向密度分布示意图

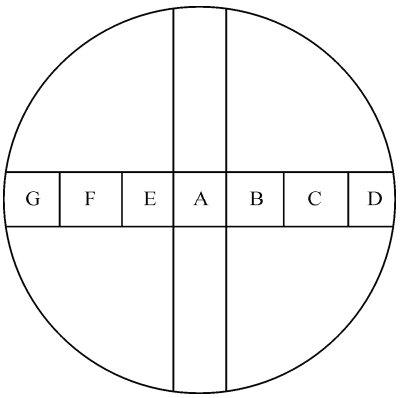


图 2　径向密度分布取样位置

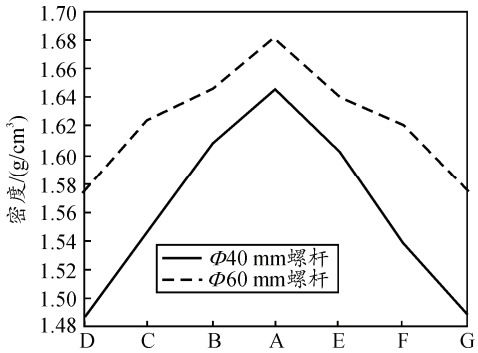
2　结果与讨论

2.1　不同螺杆直径下装药密度及密度分布测试

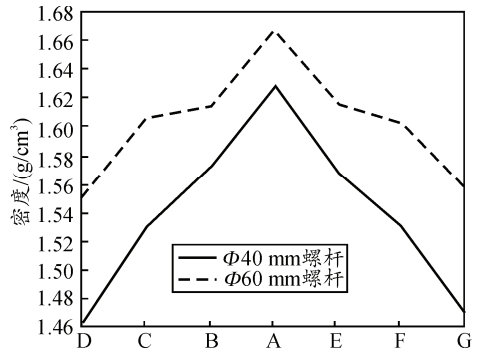
*Φ*43 mm、*Φ*60 mm 螺杆下的装药试验，装药密度测试结果见表 1，密度分布示意图见图 3。图 3 中的(a)、(b)、(c)分别表示弹体轴向底部、中部、顶部 3 处的径向密度分布。

表 1　不同螺杆下的装药密度

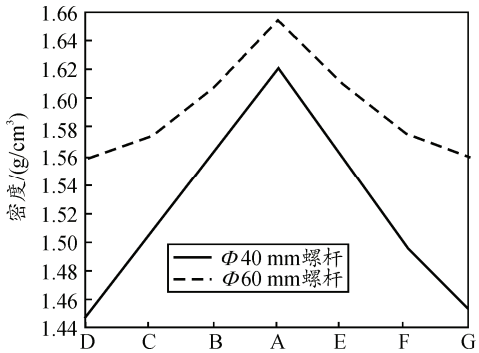
螺杆直径/mm	装药量/kg	平均密度/(g/cm³)	相对密度/%
60	7.64	1.62	0.89
43	7.52	1.59	0.87



(a) 装药弹体底部径向密度分布



(b) 装药弹体中部径向密度分布



(c) 装药弹体顶部密度分布

图 3　不同螺杆下密度分布示意图

从表 1 测试结果来看，与 *Φ*40 mm 螺杆装药量和整体密度相比，*Φ*60 mm 螺杆的整体密度提高 2%左右。

从图 3(a)、(b)、(c)可以看出，利用 *Φ*60 mm 螺杆装药后，在相同位置处取样的药块密度，尤其是周边位置处的药块密度，均明显高于 *Φ*40 mm 螺杆装药，密度均匀性也优于 *Φ*40 mm 螺杆装药。

分析以上结果，在相同压力下，随着螺杆直径

的增大，螺杆接触到的药粉面积增加，弹体边部药粉受力作用加大，导致周边装药密度明显提高；弹体内部中心处的药粉由于不同直径的螺杆在压制过程中都可以充分接触，因此螺杆作用力相似，装药密度近似。

分步压装工艺周边密度主要靠螺杆挤压作用形成；因此，装药平均密度及密度分布受螺杆直径影响较大。螺杆直径越大，装药过程中炸药层面受压面积越大，边部密度越高，装药密度及均匀性越高。

2.2　不同压力下装药密度及密度分布测试

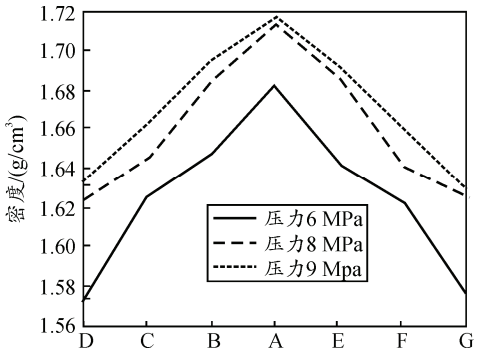
笔者在压力分别为 6MPa、8MPa 和 9MPa 下进行装药工艺试验，装药密度测试结果见表 2，密度分布示意图见图 4。

表 2　不同压力下的装药量和装药密度

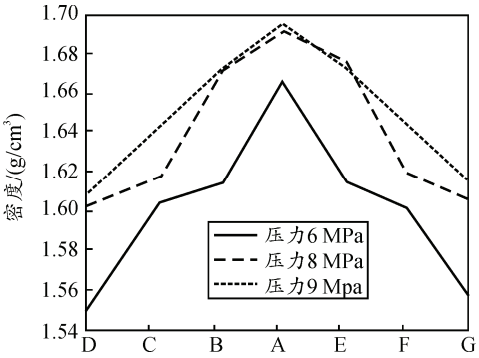
压力/MPa	装药量/kg	平均密度/(g/cm^3)
6	7.642	1.624
8	7.784	1.663
9	7.845	1.670

从表 2 可见，压力 6 MPa 时平均密度 1.624 g/cm^3，而压力为 8 MPa、9 MPa 时装药密度明显提高，达到 1.66 g/cm^3 以上，但当压力达到 8 MPa 以上时，密度增加趋势不明显。

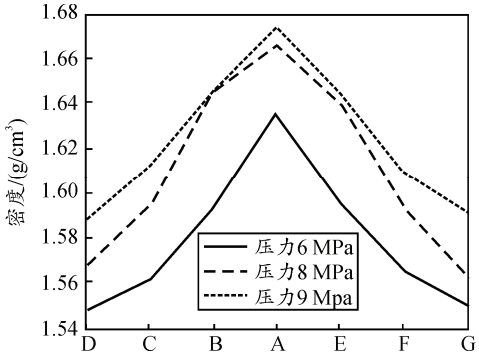
从图 4 可以看出，压力 6 MPa 时，底部、中部、顶部密度最低，径向密度差最大；压力为 9 MPa 时，各取样位置的药块密度略高于 8 MPa，但轴径向密度分布趋势基本相同。



(a) 装药弹体底部径向密度分布



(b) 装药弹体中部径向密度分布



(c) 装药弹体顶部径向密度分布

图 4　不同压力下密度分布示意图

为了解压力与装药密度的关系，笔者研究了炸药在模压工艺下的准静态压力与装药密度的关系。从炸药压制压力与密度研究结果可知，装药密度随压力增大而增大，当压力增大到一定程度，密度增加趋势趋于缓和。这是由于药粉颗粒间的间隙、相对位移量在压制过程中逐渐减少，使得颗粒出现一定的压缩阻力，颗粒间的孔隙率很难进一步减小。如果再继续提高压力，此时药粉颗粒间的挤压、剪切作用增强，容易造成药粉颗粒的破碎，反而降低了炸药装药安全性。

通过改变油压压力在分步压装设备上进行分步压装药压力与装药密度关系研究试验。试验结果表明，分步压装动态油压压力与装药密度是正比关系，在一定的范围内，动态压力越大，装药密度越大。与模压作用下装药密度的变化趋势基本一致。

因此，在研究分步压装工艺参数时，应选择合理的压力范围，获得高装药密度和良好的成型性。避免压力过小，压实密度低，压制成型性差，尤其是药柱边部松散容易造成药粉脱落，或压力过大，药粉颗粒破碎，导致药柱内部产生裂纹。

2.3　不同间距下装药密度及密度分布

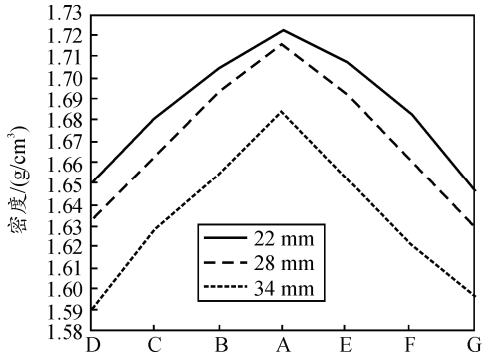
笔者研究了螺杆距弹体底部最小间距为 28 mm、34 mm 和 22 mm 的装药密度及密度分布。装药密度结果见表 3，密度分布示意图见图 5。

表 3　不同间距下的装药量和装药密度

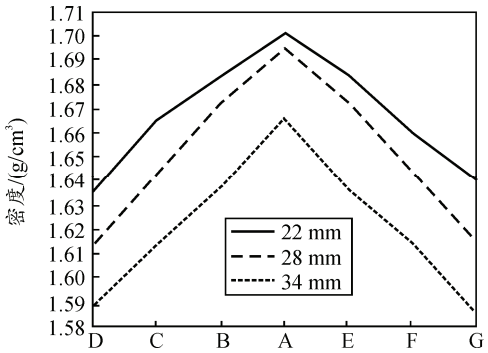
间距/mm	装药量/kg	平均密度/(g/cm^3)
22	7.850	1.672
28	7.845	1.670
34	7.802	1.664

从表 3 可以看出：间距为 22 mm 时，平均密度和装药量最高，间距为 28 mm 时，平均密度和装药量接近于前者，间距为 34 mm 时，平均密度和装药量最低。从图 5 可以看出：间距为 22 mm 时，底部

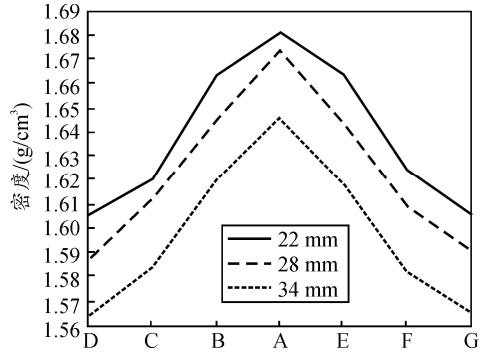
密度最高，密度差最小；间距为 28 mm 时，底部密度和密度差接近于前者；间距为 34 mm 时，底部密度最低，密度差最大。试验结果表明：间距小有利于提高装药密度和密度均匀性，当间距小至一定程度时，底部密度接近可压制密度最高值。



(a) 装药弹体底部径向密度分布



(b) 装药弹体中部径向密度分布



(c) 装药弹体顶径向部密度分布

图 5　不同间距下密度分布示意图

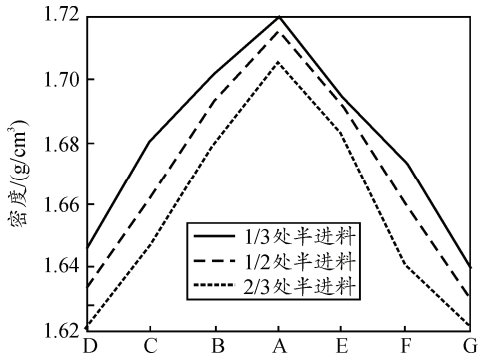
在分步压装装药过程中，物料通过螺杆的往返运动进入弹体。如果螺杆距弹体底部间距过小，螺杆直接接触弹体底部，会引起工艺安全问题；如果螺杆距弹体底部间距过大，过多的预装药粉在压制过程初期没有受力，在压制过程中不容易压实，导致底部装药密度较为疏松，在弹药发射时，由于压缩而产生底隙，炸药底隙中留存的空气在后座冲击下绝热压缩，产生局部高温，对弹药的发射安全性带来威胁；因此，螺杆距弹体底部合适的间距有利于弹药发射安全性。

2.4　不同进料量下的装药密度及密度分布测试

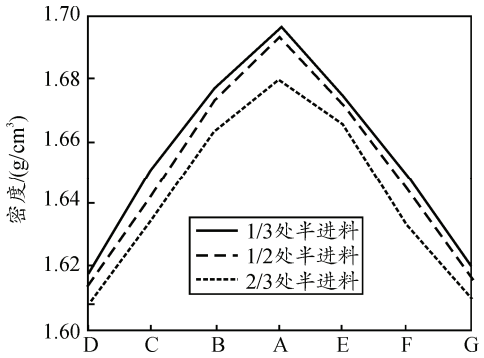
不同进料量下的压制次数和装药密度测试结果见表 4，密度分布示意图见图 6。

表 4　不同进料量下的装药量和装药密度

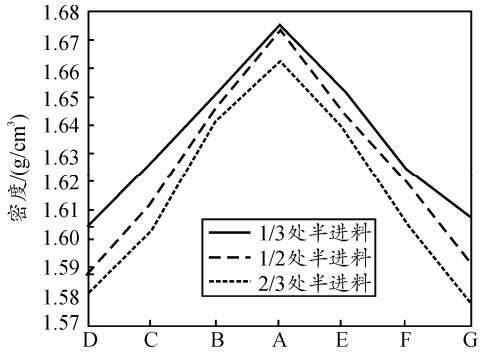
压力/MPa	螺杆行程调整位置	装药量/kg	压制次数	平均密度/(g/cm³)
9	1/3 处	7.852	131	1.676
9	1/2 处	7.845	110	1.670
9	2/3 处	7.831	101	1.664



(a) 装药弹体底部径向密度分布



(b) 装药弹体中部径向密度分布



(c) 装药弹体顶部径向密度分布

图 6　不同进料量下的密度分布示意图

从表 4 可以看出：在螺杆行程 1/3 处、1/2 处，将全进料改为半进料时，装药密度相似；在 2/3 处将全进料改为半进料后，压制密度较低；在螺杆行

程 1/3 处，将全进料改为半进料时，压制次数最多；在螺杆行程 2/3 处，将全进料改为半进料时，压制次数最少。从图 6 可以看出：在螺杆行程 1/3 处、1/2 处，将全进料改为半进料时，轴径向密度分布趋势一致；在 2/3 处，将全进料改为半进料后，轴径向密度差最大。试验结果表明：压制过程中，螺杆带入进料量的行程越小，相应的压制次数越多。冲压次数增多，药粉所受到的反复压制次数增多，使压制密度高，密度分布均匀。但由于药粉的压制成型密度有自身的极限，当达到一定的压制密实度后，颗粒间的孔隙率很小，很难再提高压制密度，再继续进行压制，颗粒间的作用由相互间的滑移转变为挤压、剪切，使颗粒破碎，产生损伤，导致弹药发射安全性降低；因此，在保证底部装药质量的前提下，尽量选择较大的间距，以减少冲压次数。

3 结论

根据上述对工艺参数影响因素的分析，可得出以下结论：

1) 选择分步压装装药工艺参数时，尽量利用直径较大的螺杆进行装药，从而提高装药密度和密度均匀性。

2) 装药过程中压力越高，越有利于提高装药质量，但压力达到一定值后，密度增加趋势缓和。因此，在满足弹药装药密度的前提下，尽量选择较小的压力，有利于保证压药过程的安全性。

3) 在保证底部装药质量的前提下，尽量增加间距，减少冲压次数，提高装药工艺安全性。

4) 需通过反复试验确定合适的每次进料量，在保证装药质量的前提下减少压制次数。

参考文献：

[1] 陈熙蓉, 许丽云, 陈书言, 等. 炸药性能与装药工艺[M]. 北京: 国防工业出版社, 1988.

[2] 吴涛, 直小松, 孙强. 分步压装高能混合炸药在战斗部装药中的应用研究[J]. 国防技术基础, 2006(6): 43-46.

[3] 肖川, 胡焕性, 陶孟君. 弹药分步压装装药技术简介[C]//中国宇航无人飞行器学会战斗部与毁伤效率专业委员会第七届学术年会论文集. 西安: 西安近代化学研究所, 2001.

[4] 李琳琳, 张欲立, 张宏光, 等. 分步压装药工艺及装药参数的实验研究[J]. 兵工自动化, 2009, 28(10): 37-39.

[5] 张恒忠, 王天宏. 火炸药应用技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2010(3): 33-39.

[6] 王淑萍. 分步压装装药的安全性分析[J]. 火炸药学报, 2006, 29(2): 23-25.

****

（上接第 51 页）

则 $P = P_\alpha P_\beta \leqslant P_C P_W = 0.83$。

7) 评估等级 λ 和评估等级隶属度 δ 的确定。

若对于给定的阈值 $k = 0.02$，则好与很好的模糊区间为[0.8−k, 0.8+k]=[0.78, 0.82]。

则评估值 $\theta = 0.784$ 隶属于好与很好的模糊区间。

则隶属于好与很好的隶属度为：$\delta_{好} = 0.5 + \dfrac{0.8-0.784}{0.02\times 2} = 0.9$，$\delta_{很好} = 0.5 - \dfrac{0.8-0.784}{0.02\times 2} = 0.1$。

综上所述，求得系统实体抗毁能力的效能信度为：$\begin{Bmatrix} \gamma & P & \lambda & \delta \\ 0.784, & 0.83, & 好, & 0.9 \\ & & 很好 & 0.1 \end{Bmatrix}$，其定性表述为：实体抗毁能力评估值为 0.784，评估结果置信度为 0.83，抗毁能力隶属于好与很好之间，总体评价为好，隶属于好的隶属度为 0.9，隶属于很好的隶属度为 0.1。

3 结束语

针对效能评估问题，笔者提出了一种基于信度理论的效能评估方法，给出了效能信度的定义，采用效能信度四元组作为其评估指标，指标描述更为科学、合理、全面，提出并建立了效能信度各指标的评估模型，从而使得评估更为可信；笔者介绍的基于向量相似度评估模型，通过向量相似度表征系统效能，避免了大量建模的麻烦，理论上科学严谨，方法简单实用，便于从宏观上计算系统效能，具有较强的可操作性。

参考文献：

[1] 卡尔斯. 现代精算风险理论[M]. 北京: 科学出版社, 2005.

[2] 郭亚军, 潘德惠. 多属性综合评价的一种新方法[M]. 系统工程与实践, 1996, 6(9): 58-62.

[3] 郭齐胜. 装备效能评估概论[M]. 北京: 国防工业版社, 2005.

[4] 王莲芬, 许树柏. 层次分析法引论[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 1990.

[5] 胡道生, 常健永. 基于模糊综合评判的军事装备维修费绩效管理评估[J]. 兵工自动化, 2012, 31(3): 35-37.

[6] 焦利明. 一种评价 C3I 系统效能的新方法[J]. 电光与控制, 2006, 5(3): 18-23.

[7] 邵强, 李友俊. 综合评价指标体系构建方法[J]. 大庆石油学院学报, 2004, 28(3): 74-78.

[8] 刘曙阳, 程万祥. C3I 系统开发设计[M]. 北京: 国防工业版社, 2000.