

文章编号: 1006-9941(2010)02-0200-05

# 羧甲基纤维素叠氮化铅微装药压力与密度关系试验研究

何爱军, 严楠

(爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京理工大学机电学院, 北京 100081)

**摘要:** 微尺寸下的压药压力与装药密度的关系是微机电系统(MEMS)引信装药密度、装药量及其爆轰特性研究与设计的基础性能参数。本实验采用容积法对微尺寸 0.9 mm 和常规尺寸 5.28 mm 直径的羧甲基纤维素叠氮化铅(简称羧铅)压药压力与装药密度的关系进行了研究,分别得到两种尺寸装药的拟合公式及其关系曲线,由此得出微尺寸与一般尺寸的压药压力与装药密度关系存在不同,其原因可能为冲头与管壳配合的摩擦力不同,同时得到了两种装药孔隙率和应力之间的关系。

**关键词:** 军事化学与烟火技术; 羧铅; 装药密度; 压药压力

**中图分类号:** TJ450.1; TQ560

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2010.02.017

## 1 引言

微机电系统(MEMS)引信具有高可靠性、低成本、小体积、多功能方面的优越性能,必定成为 21 世纪引信的新宠,但普通的雷管和传爆药柱构成的起爆序列在体积和结构方面难以满足 MEMS 引信的要求,必须使用适用于 MEMS 引信的微型起爆序列。因而,国内外已经开始关注微尺寸装药的研究。微尺寸装药是指接近临界直径且能够保证爆轰波可靠传递的装药。目前,已报道的最小装药尺寸已达到 0.38 mm<sup>[1]</sup>左右。微尺寸下的压药压力与装药密度的关系研究,是 MEMS 引信装药密度、装药量及其爆轰特性研究与设计的需要,但却很少见到文献报道。

对于微尺寸装药来说,装药密度对输出威力具有非常大的影响。在微装药起爆威力实验中发现,由于微装药药量过少,约为 4~8 mg,称药误差、装药品种、装药浮药、撒药、模具间隙浮药、模具冲头和孔径之间间隙、管壳尺寸散布、压机种类、压药速度、压药压力精度等因素都会给装药威力(爆压)带来显著的影响。这常使试验人员对爆压试验数据的散差之大发生困惑。由于影响因素太多,装药过程又难以控制,有必要对微型装药的工艺条件和装药密度关系开展专门研

究,找出因素的影响规律,从而有效控制关键工序,最终达到控制装药密度一致性的目的。本试验对微尺寸装药和常规尺寸雷管装药的装药压力与装药密度关系的对比试验规律进行研究,得到了它们的变化曲线和公式,以此为微型装药密度与爆轰压力的关系研究提供重要参数,同时为小尺寸装药技术的相关研究提供参考。

## 2 装药密度的测量方法

### (1) 方法简介

国军标中给出的火炸药药柱密度测量方法是液体静力称量法<sup>[2-3]</sup>。该方法根据已知质量的试样所排开专用浸液的体积,以求出试样的密度。由于微尺寸装药的药量极少(毫克量级),国军标提供的密度测定方法已不适用。

采用的装药密度测定方法为容积法,用精密压装方法将待测药剂粉末样品压入管壳中,然后精确测量药柱体积,称量管壳和装药质量,从而得到药柱密度。

### (2) 仪器介绍

密度测量仪器由小型压药模具、高精度伺服压力机、传统手摇压力机、天平、数显游标卡尺、测量显微镜等组成;被测样品为不锈钢无底管壳、羧甲基纤维素叠氮化铅起爆药。微装药用高精度伺服压力机精度为  $\pm 1$  N、数显游标卡尺精度为 0.01 mm、天平精度为 0.1 mg、管壳内径精度为 0.01 mm、测量显微镜精度为 0.001 mm。通常尺寸的装药采用传统手摇压力机,其压力控制高精度为  $\pm 10$  N。

收稿日期: 2009-05-20; 修回日期: 2009-10-10

作者简介: 何爱军(1984-),女,博士研究生,研究方向: MEMS 引信起爆序列研究与设计。e-mail: heaijun2008@163.com

通讯联系人: 严楠(1960-),男,教授,博士生导师,研究方向: 爆炸力学与安全、失效分析技术研究。e-mail: yn@bit.edu.cn

(3) 试验过程

(i) 实验前取内径  $\Phi 0.9 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$  无底管壳, 用灵敏度  $0.1 \text{ mg}$  天平称量管壳质量  $m_0$ , 用高精度伺服压力机压药, 保压时间  $3 \text{ s}$ , 称量装药和管壳总质量  $m_1$ , 得到实际装药量  $m = m_1 - m_0$ ;

(ii) 装药前先将壳体放入压药模具中, 装配好后用  $0.01 \text{ mm}$  精度卡尺测量模具总长度  $l_0$  (见图 1); 压药结束后, 测量装药后模具总长度  $l_1$  (见图 2); 最后得到药高  $l = l_1 - l_0$ ;

(iii) 用测量显微镜测试管壳中装药内径  $r$ , 得到壳体内部装药体积  $V = \pi r^2 l$ , 由此可得到所需要测试的密度  $\rho = m/V$ ;

(iv) 采用同样方法对内径  $\Phi 5.28 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$  管壳用传统手摇压机压药。

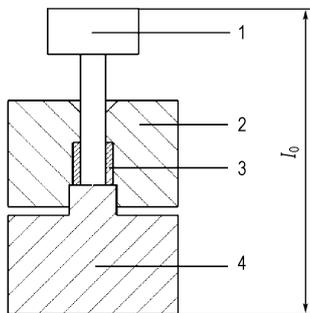


图 1 装药前压药模具

1—压冲, 2—导药模, 3—微型装药管壳, 4—模具底座

Fig. 1 Pressing die before loading

1—pressing punch, 2—guide mould, 3—micro charge capsule, 4—mould pedestal

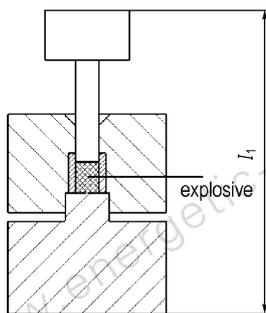


图 2 装药后压药模具

Fig. 2 Pressing die after loading

3 实验方案和测试结果

3.1 实验方案

选取  $0.9 \text{ mm}$  和  $5.28 \text{ mm}$  两种装药(羧甲基纤维

素叠氮化铅, 简称羧铅)直径下的密度测量对比试验, 其中小直径( $0.9 \text{ mm}$ )代表了微型雷管装药可能的尺寸, 大直径( $5.28 \text{ mm}$ )代表了通常情况下一般雷管尺寸。一般情况下, 雷管起爆药的装药压力为  $50 \sim 150 \text{ MPa}$ , 本实验在  $30 \sim 200 \text{ MPa}$  压力值范围内, 选取 6 个均匀分散的压力值, 该压力取值包含了通常情况下雷管的起爆药装药压力范围, 从而使密度测试结果能够适用于通常压药密度情况。因为国军标 GJB3756-99 规定当样本量  $\geq 6$  发时, 推荐采用贝赛尔法<sup>[4]</sup> 计算实验标准偏差; 当样本量  $< 6$  发时, 推荐使用极差法计算实验标准偏差<sup>[4]</sup>, 所以在每个压力下平行制作样品数量为 6 发。

3.2 测试结果

所测得的压药压力和装药密度的关系用散点图、平均值散点图表示, 如图 3~图 6 所示。通过散点图和误差分布图可以看出, 在微尺寸条件下, 部分数据点偏离平均值较大, 表现为其标准偏差较大, 在一般尺寸条件下, 压药压力在  $100 \sim 160 \text{ MPa}$  范围内, 密度偏差最小, 其余部分的散差与微尺寸条件相比较小。这种现象表明, 微尺寸装药受各种因素影响较大, 很多在一般尺寸装药条件下可以忽略的影响因素, 在此时却变得尤其明显。

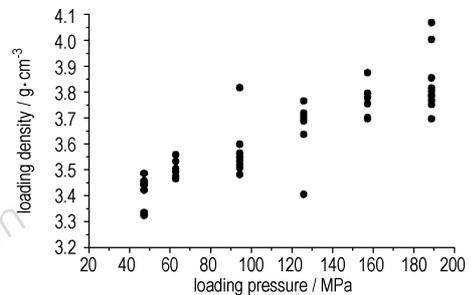


图 3 0.9 mm 直径的装药密度测试原始数据散点图

Fig. 3 Scatter plot of original data for charge density in internal diameter 0.9 mm

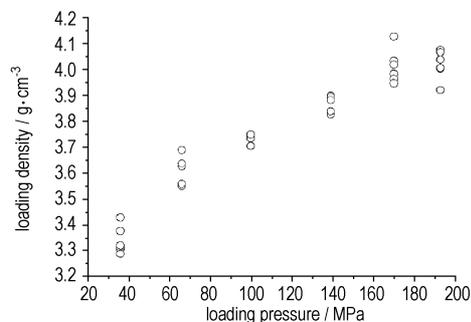


图 4 5.28 mm 直径的装药密度测试原始数据散点图

Fig. 4 Scatter plot of original data for charge density in internal diameter 5.28 mm

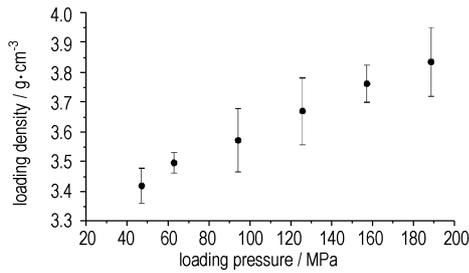


图5 0.9 mm 直径的装药密度测试误差分布图

Fig.5 Charge density error distribution in internal diameter 0.9 mm

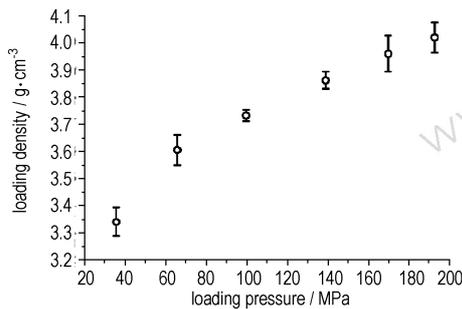


图6 5.28 mm 直径的装药密度测试误差分布图

Fig.6 Charge density error distribution in internal diameter 5.28 mm

## 4 分析和讨论

对上述实验结果做平均值处理,得到两种尺寸装药密度测试平均值散点图(见图7),该图表明两种尺寸装药的走势都非常明显,已代表了两种尺寸条件下的密度与压力关系走向。

炸药的孔隙率是指炸药装药中孔隙体积占装药总体积的百分率,也是爆轰参数估算中的重要参数之一,其与密度呈线性关系,存在关系式  $\varepsilon = 1 - \rho / \rho_p$  ( $\varepsilon$  为孔隙率;  $\rho$  为装药密度;  $\rho_p$  为理论最大密度),对于羧铅装药,取  $\rho_p = 4.9 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ [6],由此可推导出在所测方案中的压药压力下的孔隙率,得到羧铅装药应力与孔隙率平均值散点图。

### 4.1 装药密度与压药压力的关系拟合

#### 4.1.1 线性拟合规律

根据实验数据点走势,首先选用线性拟合,拟合的关系曲线见图9,拟合曲线公式为:

微尺寸装药:  $\rho = 3.30057 + 0.00288p$ ,

相关系数为0.997。

一般尺寸装药:  $\rho = 3.28044 + 0.00404p$ ,

相关系数为0.976。

式中,  $p$  为压药压力, MPa;  $\rho$  为装药密度,  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

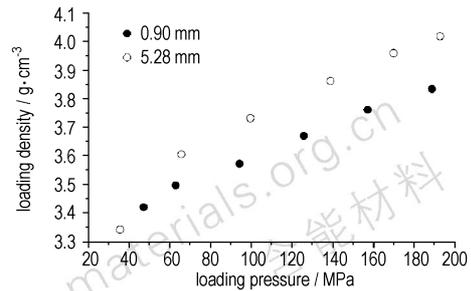


图7 两种装药密度测试平均值散点图

Fig.7 Scatter plots of the average for two types of charge densities tested

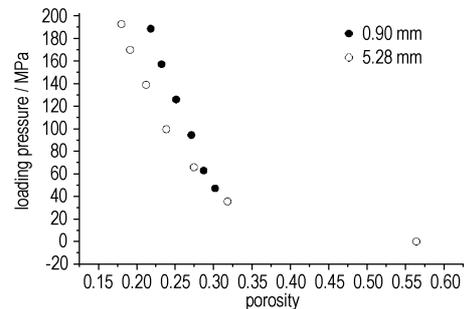


图8 两种装药应力与孔隙率平均值散点图

Fig.8 Scatter plots of the average for two types of charge porosities and stresses

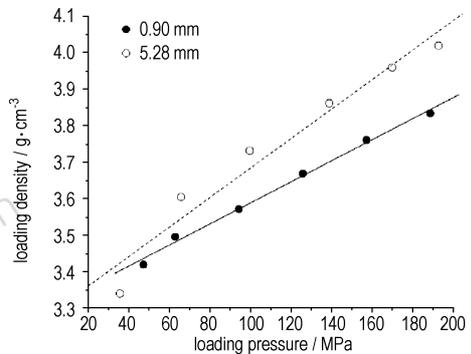


图9 两种装药压药压力和装药密度线性拟合曲线

Fig.9 Fitting curves of the linear relationship between loading pressure and loading density for two charges

#### 4.1.2 指数拟合规律

由于选用线性拟合时一般尺寸的拟合效果不好,采用指数关系对数据点进行拟合,拟合的关系曲线见图10,拟合曲线的公式为:

微尺寸装药:  $\rho = 4.83 - 1.57 \exp(p / -412.80)$ ,

相关系数为0.997。

一般尺寸装药:  $\rho = 4.225 - 1.22 \exp(p / -106.41)$ ,

相关系数为0.993。

式中,  $p$  为压药压力, MPa;  $\rho$  为装药密度,  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

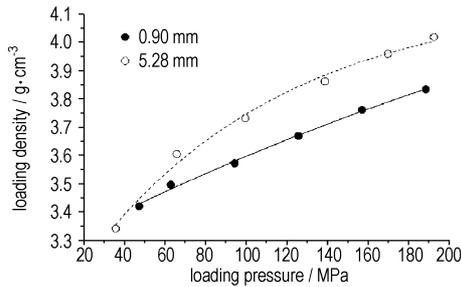


图 10 两种装药压药压力和装药密度指数拟合曲线

Fig. 10 Fitting curves of the exponential relationship between loading pressure and loading density for two charges

4.1.3 拟合公式合理性讨论

对于微尺寸装药,线性拟合和指数拟合的相关系数几乎相等。

对于一般尺寸装药,由于指数拟合的相关系数大于线性拟合,因而压药压力与密度关系更适合用指数关系来拟合。

不论是微装药还是一般尺寸装药都可优先采用指数拟合。

4.1.4 两种尺寸拟合曲线不同的可能原因分析

对两种尺寸装药进行指数拟合(见图 10),微装药走势接近于线性,而一般尺寸装药是明显的指数关系,且微装药比一般尺寸装药的装药密度普遍偏小。该现象说明微装药和一般尺寸装药在压药压力与密度实验过程中的影响因素不一样。

(1) 冲头与管壳配合精度不同。小尺寸压药模具由于装药尺寸很小,冲头和管壳孔的配合间隙与一般模具相比就相对较高,由此可能会造成摩擦力的不同。在进行装药过程中也发现,微型装药退模时用力较大;而一般尺寸装药退模比较容易,用力较小。这说明小型压药模具冲头与药剂间摩擦力要大于相对较大的压药模具间的摩擦力,这样会造成阻力偏大,从而会导致压在药剂上面的实际压力值偏小,由此可能造成密度有所不同。

(2) 装药过程中的浮药影响。在实验操作过程中发现,采用压装方法压药在药柱上表面存有浮药,在压装一般尺寸羧铅起爆药时尤为明显,由此容易造成装药上表面压药不实,装填密度比药柱内部密度相对较小;且浮药在称量装药后管壳质量过程中容易丢失。上述原因会影响到装药质量,即影响装填密度的大小和散布。小尺寸装药虽然浮药不如一般尺寸明显,但由于小尺寸药量较小,很少的药量都会对密度测试产生较大的影响,因而也不容忽视。

综上所述,冲头与管壳配合精度以及装药过程中的浮药是微装药与一般尺寸装药密度差异的原因,在实际操作过程中应予以重视。

4.2 孔隙率与应力关系拟合

通过文献调研,发现近年来国内外对炸药的装药密度与压药压力的定量关系的研究较少,一般都为定性研究。最有代表性的文献为 2006 年祝明水<sup>[5]</sup>等人开展的火工药剂的压药压力与密度定量关系研究,利用气固两相流颗粒间应力与孔隙率之间的定量关系,得到点火药 B/KNO<sub>3</sub> 和炸药 RDX 的应力与孔隙率曲线。该文献推导的压药压力与孔隙率的拟合公式为:

$$p = -\frac{E_p}{1 - \varepsilon \varepsilon_0} \varepsilon (\varepsilon - \varepsilon_0) \exp(k_0 + k_1(\varepsilon - \varepsilon_1)) \quad (1)$$

式中,  $p$  为压药压力;  $E_p$  为压缩模量;  $\varepsilon$  为孔隙率;  $\varepsilon_0$  为自由沉降孔隙率;  $k_0, k_1, \varepsilon_1$  为常数系数。

用公式(1)对图 8 中的数据进行压药压力与孔隙率曲线拟合,结果见图 11,拟合的相关系数分别为小尺寸 0.993,一般尺寸 0.999,拟合效果较好。文献[5]的拟合曲线见图 12,拟合系数常数结果见表 1。拟合时发现,  $E_p, \varepsilon_0, k_0, k_1, \varepsilon_1$  初始参量设置改变对拟合曲线的形状和相关系数影响不大。

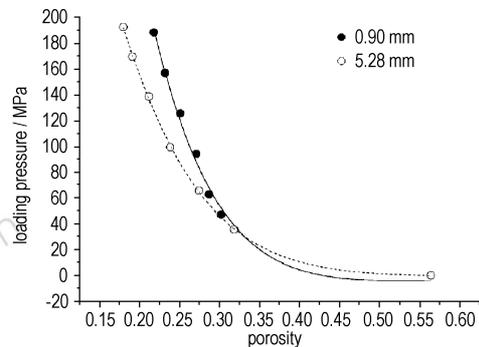


图 11 羧铅装药不同尺寸下的应力与孔隙率曲线

Fig. 11 Stress and porosity curves of different PbN<sub>6</sub> charges

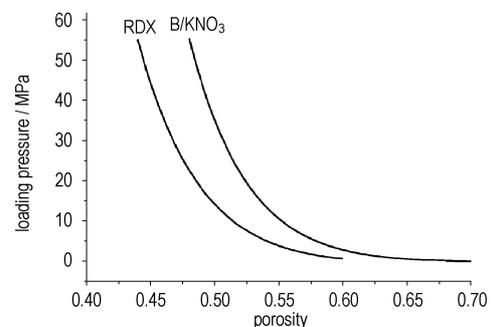


图 12 文献[5]中 B/KNO<sub>3</sub> 与 RDX 应力孔隙率曲线

Fig. 12 Stress and porosity curves of B/KNO<sub>3</sub> and RDX in literature[5]

表 1 两种尺寸系数常数拟合结果

Table 1 Fitting results of constants and coefficients for two scales

No.	experiment conditions	compress modulus $E_p$ /MPa	porosity of freedom settlement $\varepsilon_0$	coefficient $\varepsilon_1$	coefficient $k_0$	coefficient $k_1$
1	B/ $\text{KNO}_3$ <sup>[5]</sup> , don't know the scal	503.55	0.6973	0.3771	1.1703	-21.3423
2	RDX <sup>[5]</sup> , don't know the scal	454.49	0.6296	0.3677	1.0260	-21.8079
3	CMC-Pb( $\text{N}_3$ ) <sub>2</sub> , internal diameter $\Phi 0.9$ mm $\times 3$ mm	423.39	0.564	0.2546	0.3509	-17.0426
4	CMC-Pb( $\text{N}_3$ ) <sub>2</sub> , internal diameter $\Phi 5.28$ mm $\times 3$ mm	440.21	0.564	0.2254	0.4236	-14.2833

## 5 结 论

(1) 微尺寸装药的密度与压力关系可用指数拟合与线性拟合两种拟合方式进行拟合,而一般尺寸装药的密度与压力关系采用指数拟合较好,因而在密度与压力关系拟合过程中,推荐采用指数拟合。

(2) 对于羧甲基纤维素叠氮化铅起爆药,装药密度与压药压力的拟合公式为:直径 0.9 mm 微装药  $\rho = 4.83 - 1.57 \exp(p / -412.80)$ ,直径 5.28 mm 装药  $\rho = 4.23 - 1.22 \exp(p / -106.41)$ ; 孔隙率与应力的拟合公式为:直径 0.9 mm 微装药  $p = -\frac{423.39}{1 - \varepsilon} \frac{\varepsilon}{0.564} (\varepsilon - 0.564) \exp(0.3509 - 17.0426(\varepsilon - 0.2546))$ ,直径 5.28 mm 装药  $p = \frac{440.21}{1 - \varepsilon} \frac{\varepsilon}{0.564} (\varepsilon - 0.564) \exp(0.4236 - 14.2833(\varepsilon - 0.2254))$ 。

(3) 本试验选取压力范围 40 ~ 200 MPa,覆盖了大多数羧铅装药压药压力的情况,有良好的适用性。

### 参考文献:

- [1] Robinson H Charles. Micro-scale firetrain for ultra-miniature electro-mechanical safety and arming devices; US7055437[P], 2006.
- [2] GJB 772A - 1997 炸药试验方法[S]. 国防科学技术工业委员会. 1997.
- [3] GJB770B - 2005 火药试验方法[S]. 国防科学技术工业委员会. 2005.
- [4] GJB3756 - 99 测量不确定度的表示及评定[S]. 中国人民解放军总装备部. 1999.
- [5] 祝明水,何碧,胡美娥,等. 火工药剂压药压力与密度定量关系的研究[J]. 火工品,2006,10(5): 18 - 20.  
ZHU Ming-shui, HE Bi, HU Mei-e, et al. Study on quantitative relationship between pressure and density of pyrotechnic charges[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2006, 10(5): 18 - 20.
- [6] 劳允亮. 起爆药化学与工艺学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1997.

## Experimental Study on Relationship between Pressure and Density of CMC-Pb ( $\text{N}_3$ )<sub>2</sub> Micro-charges

HE Ai-jun, YAN Nan

(State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, School of Mechatronical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** The relationship between loading pressure and charge density is the fundamental parameters for micro-charges. It is very important to study and design the charge density, loading explosive weight, and detonation characteristics in micro-electro-mechanical systems (MEMS) fuzes. The relationships between loading pressure and loading density by volumetric method for two primer explosive lead azide carboxymethyl cellulose (CMC-Pb( $\text{N}_3$ )<sub>2</sub>) charges (micro-charge with internal diameter 0.9 mm and normal charge with internal diameter 5.28 mm) were studied. The fitting equations and relationship curves for the two charges were obtained, and the relationships between porosity and stress were got too.

**Key words:** military chemistry and pyrotechnics; lead azide carboxymethyl cellulose (CMC-Pb( $\text{N}_3$ )<sub>2</sub>); charge density; loading pressure

**CLC number:** TJ450.1; TQ560

**Document code:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2010.02.017