

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2016.03.005

撞击条件下分步压装装药的点火机理^{*}

屈可朋 王晓峰 何 超 王世英
西安近代化学研究所(陕西西安,710065)

[摘 要] 利用大型落锤加载装置对不同密度分布状态的药柱进行了撞击加载试验,在分析试验前、后药柱中应力和密度分布状态变化的基础上,讨论了分步压装装药的点火机制。结果表明:药柱的力学响应与其内部密度分布情况密切相关,均匀密度药柱所能承受的最大载荷明显高于非均匀密度药柱。在撞击加载过程中,药柱内部径向密度差引起的剪切流动是导致分步压装装药点火的重要原因。

[关键词] 含能材料;分步压装装药;撞击试验;点火机理

[分类号] TJ55;O347.3

引言

分步压装装药工艺具有效率高、装药无疵病等特点,已成功应用于装填中大口径杀爆弹^[1]。分步压装是通过螺杆多次捣压后成型的工艺过程,其工艺特点决定了装药后形成的药柱沿其径向存在一定的密度差,即中心密度高、边沿密度低,这种径向密度差的存在能否保证装药的撞击安全性已成为关注的焦点。针对炸药装药的撞击安全性,国内外以往的研究主要集中于炸药配方^[2]、装药工艺^[3]、装药尺寸^[4]、装药密度^[5]以及载荷类型^[6-7]等方面,而对于药柱径向密度差对其撞击安全性的影响尚未开展深入研究。国内,王淑萍等^[5,8]从装药缺陷、装药孔隙率、装药密度分布等方面定性分析了分步压装装药的安全性,但未深入分析分步压装装药在撞击条件下的点火机理。

本研究以一种新型 RDX 基含铝炸药为对象,压制了具有一定径向密度分布的药柱,进行了撞击加载试验,在获取其动态响应特性的基础上,分析了分步压装装药在撞击条件下的点火机理,为分步压装工艺装填大口径榴弹的发射安全性分析提供参考。

1 试验部分

1.1 试验样品

RDX 基含铝炸药由西安近代化学研究所提供,其主要成分(质量分数)为:75% RDX、20% 铝粉和 5% 黏结钝感剂。

为模拟分步压装装药的径向密度差,利用“冲头直径小、模筒直径大”的压制模具,采用多次压制

的方法,制备了尺寸为 $\varnothing 40\text{ mm}\times 40\text{ mm}$ 、具备一定径向密度差的圆柱形试验样品,样品的平均密度为 1.70 g/cm^3 。为确定分次压装药柱沿径向的密度分布情况,在药柱中部锯切出 3 mm 的薄片,分别在薄片的中心、 $1/2$ 半径及边沿处锯切出 1 个小药块,并利用 GJB772A—1997 中方法 401.2 液体静力称量法测量锯出的药块密度,结果列于表 1。由表 1 可知,采用分次压制方法制备的药柱,其最大径向密度差在 6% 左右。

表 1 多次压装药柱不同部位的密度值

Tab. 1 Density values of the multiple pressing samples at different location

位置	中心	$1/2$ 半径	边缘
密度/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	1.738	1.694	1.635

为与多次压装药柱对比,采用传统模压工艺,制备了密度为 1.70 g/cm^3 的均匀密度的药柱。

1.2 试验装置和方法

试验在大型落锤加载装置上进行,试验装置如图 1 所示。

药柱安装于试验样弹中,通过自由下落的重锤撞击试验样弹的上击柱,实现对药柱的冲击加载。试验样弹装配时,各组件须依次装入套筒,以防止各组件之间残留气体的存留。试验中,所用落锤质量为 400 kg ,通过改变落锤高度,调节药柱所受到的应力载荷,观察样弹中药柱的反应情况,并利用应变式传感器记录试验过程中的应力波形。每种状态重复 3 发,取其平均值作为最终试验结果。

^{*} 收稿日期:2015-12-28
基金项目:国家重大基础研究项目(0040105)
作者简介:屈可朋(1983-),男,硕士,工程师,主要从事弹药材料动力学响应及安全性的研究。E-mail:155301498@qq.com

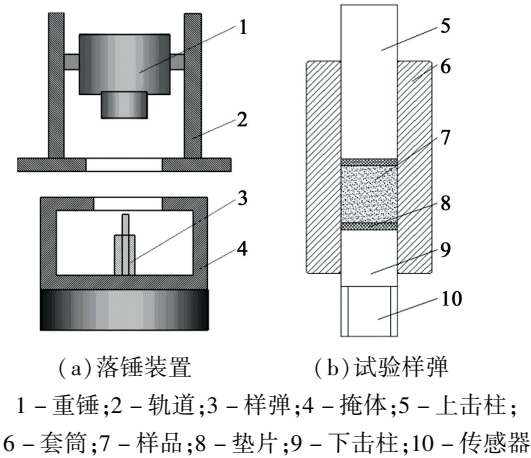


图1 试验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of the experiment device

1.3 试验结果

2种密度分布状态的药柱在落锤撞击作用下的动态响应结果列于表2。可以看出,药柱的响应情况与其密度分布情况密切相关,均匀密度药柱所能承受的最大载荷明显高于非均匀密度药柱,均匀密度药柱在应力达到1 160 MPa的作用力下仍可保持不燃不爆,而非均匀密度药柱在应力为907 MPa时,即发生了爆炸反应,这可能是由于2种密度分布状态药柱的点火机制不同。

表2 试样在落锤冲击作用下的力学响应结果

Tab.2 Mechanical reponse results of samples under the drop hammer impact loading

试样状态	落高/ mm	应力/ MPa	应力上 升时间/ ms	反应情况
均匀密度	2 200	1 080	2.59	未燃未爆
	2 500	1 160	2.56	未燃未爆
非均匀密度	1 800	872	3.10	未燃未爆
	2 200	907	2.74	爆炸

2 分析与讨论

药柱中密度分布状态的差异可能导致其在撞击过程中内部应力分布的差异,而药柱中的应力分布状态直接影响到热点的形成机制,从而使不同密度分布状态的药柱在同等的加载条件下表现出不同的响应特性。为弄清径向密度差对药柱点火机制的影响,从加载过程中药柱内部应力分布及密度变化两方面进行了分析。

2.1 应力分布状态

由于目前的测试手段难以对药柱内部应力分布情况进行直接测量,所以本研究中采用数值模拟方法对其进行分析。由于难以获得大量的不同密度装药的本构参数,所以将密度不均匀的分步压装药柱

假设为3层复合装药,其中,内层装药的直径为8 mm,密度为1.74 g/cm³;中间层的外径为18 mm,密度为1.70 g/cm³;最外层装药的密度为1.64 g/cm³,则计算出的平均密度约为1.70 g/cm³,与样品的测量值基本相符。

利用ANSYS/LS-DYNA仿真软件分别建立图1(b)的仿真模型。其中,炸药采用分段线性塑性模型Mat_Piecewise_Linear_Plasticity描述,聚乙烯垫片采用弹塑性随动硬化模型,落锤、套筒及活塞所用材料均为T 10钢,采用Johnson-Cook(J-C)模型描述,各类材料的物理参数列于表3。为得出药柱沿轴向及径向的应力分布数据,在药柱模型上设置若干观测点,如图2所示。

表3 材料的物理参数

Tab.3 Physics parameters of materials

材料	密度/ (g·cm ⁻³)	弹性模 量/GPa	泊松比	屈服强 度/MPa
T 10钢	7.85	207.0	0.30	1 620
聚乙烯	0.95	1.1	0.42	
炸药	1.64	3.6	0.38	
炸药	1.70	4.1	0.38	
炸药	1.74	4.7	0.38	

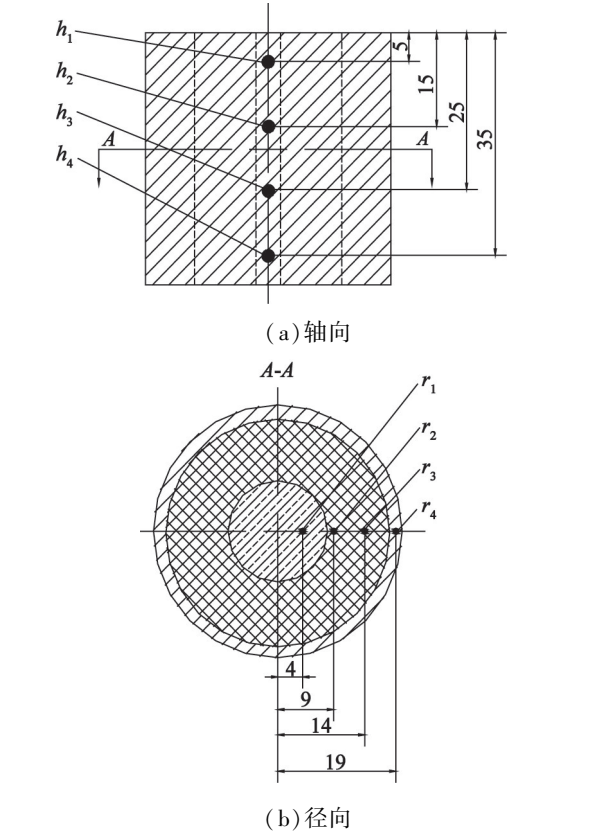


图2 试样观测点布局图(单位:mm)

Fig.2 Schematic diagram of the observation points(unit:mm)

图 3 为非均匀密度药柱与均匀密度药柱不同部位等效应力峰值的统计结果。

从图3(a)可以看出,在轴向分布的4个测点中,非均匀密度药柱中的应力峰值均高于均匀密度药柱,这是因为非均匀密度药柱的中心密度高于均匀密度药柱,但两种药柱的应力峰值沿轴向的变化

趋势均相同。

从图3(b)可以看出,对于非均匀密度药柱,随着半径的增加,应力峰值逐渐减小,半径为4 mm 的测点位于密度最高的中心位置附近,其应力峰值为1 047 MPa;半径为9、14 mm 的两个测点均位于药柱中间层,其应力峰值分别为980 MPa 和968 MPa;半径为19 mm 的测点位于密度最低的药柱边沿,其应力峰值为935 MPa。而均匀密度药柱中,其应力峰值基本不变,约为965 MPa 左右。这表明,药柱径向密度差会导致其径向应力峰值出现明显的梯度,中心位置的应力峰值超出边沿位置约110 MPa。虽然仿真模型仅为3层复合装药,但也可以体现出非均匀密度药柱中应力峰值随着半径的增加而逐渐减小的趋势。

从图3(c)可以看出,药柱的密度分布状态直接影响着药柱内部的剪切应力峰值。虽然两种密度分布状态药柱的剪切应力均随半径的增加而增加,但非均匀密度药柱的剪切应力明显高于均匀密度药柱,且随着半径增加,其增幅逐渐增大。

2.2 密度分布状态

表4列出了均匀密度药柱和非均匀密度药柱试验前、后药柱不同部位密度的CT值。由表4可知,两种药柱在试验后,药柱中心、1/2半径及边沿处的密度均增大,说明药柱受到了明显的压缩作用。均匀密度药柱试验后各部位的密度增幅在1%~2%之间。而非均匀密度药柱试验后药柱中心密度增幅最小,约为3%,边沿密度增幅最大,达到了8%,说明药柱内部有物质向边沿位置移动。

为分析试验前、后药柱密度分布变化情况,计算了试验前、后药柱边沿密度较中心密度的增量,计算方法为:

增量 = (边沿密度 - 中心密度) / 中心密度 × 100%

图4为试验前、后药柱边沿密度较中心药柱的增量变化情况。由图4可见,均匀密度药柱试验前、后边沿密度较中心密度的增量基本不变,约为9.5%,说明在试验加载过程中,药柱内部各处的变

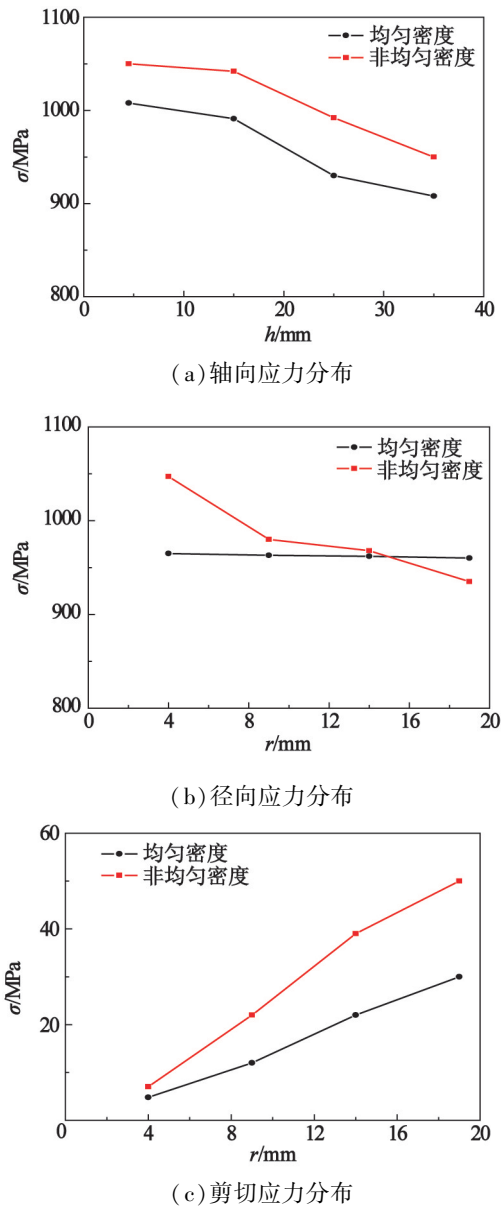


图 3 应力峰值统计结果

Fig. 3 Statistical results of the peak stress

表 4 试样冲击加载前后密度的 CT 值

Tab. 4 Density CT values of samples before and after impact loading

试样状态	中心		1/2 半径处		边沿	
	试验前	试验后	试验前	试验后	试验前	试验后
均匀密度	7 469	7 577	7 735	7 817	8 170	8 319
非均匀密度	7 457	7 645	7 522	7 895	7 883	8 521

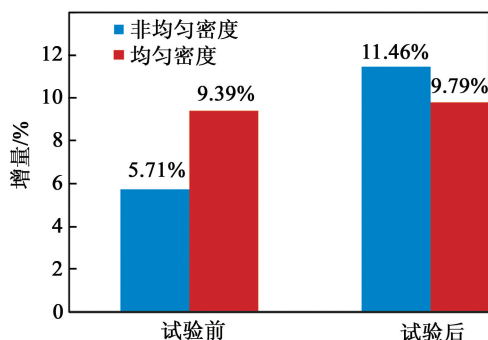


图4 试验前、后药柱密度分布的变化

Fig. 4 Density distribution changes of samples before and after the experiment

形为均匀变形,物质无明显径向移动;而非均匀密度药柱,试验加载前,边沿密度较中心密度的增量为5.71%,而试验后边沿密度较中心密度的增量明显增大,达到了11.46%,说明在试验加载过程中,药柱内部各处的变形为非均匀变形,有一部分物质由药柱的中心位置向边沿位置移动,这与王淑萍等^[8]的研究结论是一致的。

2.3 分步压装装药点火机理分析

在落锤加载过程中,药柱四周受到强约束,均匀密度的模压药柱发生轴向压缩,内部各处变形均匀,其起爆机制一般认为是由于药柱中的空隙等缺陷受到绝热压缩,从而引发局部热点形成^[9]。而分步压装药柱一般不存在肉眼可见的疵病,主要缺陷在于压制不密实而产生的一定范围的空隙率(均匀分布的微米级的细小气泡),典型的分步压装装药,其平均空隙率一般在10%左右。尽管空隙率很高,但分布相对均匀,故绝热压缩起爆机制并不能完全解释分步压装药柱的点火机制。

由试验前、后药柱内部应力及密度分布变化情况可知,分步压装药柱在受到撞击加载时,存在较大的径向应力梯度,在此径向应力梯度的作用下,药柱内部物质会趋于均匀化分布,使得中心高密度区物质向边沿低密度区流动,这会造成药柱内部的不均匀运动,进而产生剪切流动现象。而文献^[10-11]认为,材料内部不均匀的剪切流动,使得持续的变形与能量耗散向局部区域集中,从而可造成不均匀的热状态,增大了热点形成的几率,故可以认为由药柱中径向密度差引起的剪切流动是导致分步压装装药点火的重要原因。

由于分步压装装药的撞击点火是一个复杂的过程,难以直接观测到内部物质的流动,故后续需要开展相关理论研究及模型试验对其点火机制进行进一

步分析。

3 结论

1)落锤撞击条件下药柱的响应特性与其内部密度分布情况密切相关,均匀密度药柱所能承受的最大载荷明显高于非均匀密度药柱。

2)分步压装药柱在受到撞击加载时,药柱内部物质会由中心高密度区向边沿低密度区流动,产生了剪切流动现象,快速的剪切流动可能是导致分步压装装药点火的重要原因。

参考文献

- [1] 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,2009(6):43-46.
- [2] 高立龙,牛余雷,王浩,等. 典型炸药柱的400kg落锤撞击感度特性分析[J]. 含能材料,2011,19(4):428-431. GAO L L, NIU Y L, WANG H, et al. Analysis of impact sensitivity characteristics for typical explosive cylinder [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2011, 19(4):428-431.
- [3] 王世英,胡焕性. 炸药装药工艺对发射安全性的影响[J]. 火炸药学报,2003,26(1):20-22. WANG S Y, HU H X. The effect of different charging processes on the launch safety [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2003, 26(1):20-22.
- [4] 王淑萍. 撞击作用下炸药装药的尺寸效应研究[J]. 火炸药学报,2000(4):18-20. WANG S P. Study on size effect of projectile filling under the impact [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2000(4):18-20.
- [5] 王淑萍,王晓峰,金大勇. 压制密度及密度均匀性对装药撞击安全性的影响[J]. 含能材料,2011,19(6):705-708. WANG S P, WANG X F, JIN D Y. Influence of pressed explosive charges density and its distribution on impact safety [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2011, 19(6):705-708.
- [6] JOSHI V S, RICHMOND C T. Characterization of ignition threshold of PBXN-110 using hybrid drop weight-Hopkinson bar [C]//14th Detonation Symposium Proceeding. Idaho: Office of Naval Research, 2010:1254-1263.
- [7] CHEN P W, HUANG F L, DAI K D, et al. Detection and characterization of long-pulse low-velocity impact damage in plastic bonded explosives [J]. International Journal of Impact Engineering, 2005, 31:497-508.
- [8] 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.

- LI R Z, HUANG Z C, SI R J. Influence of environmental temperature on gas explosion pressure and its rise rate [J]. Explosion and Shock Waves, 2013, 33 (4): 415-419.
- [14] 路林, 常铭, 苗海燕, 等. 天然气在不同初始温度和初始压力下的燃烧特性研究 [J]. 工程热物理学报, 2009, 30(10): 1771-1774.
- LU L, CHANG M, MIAO H Y, et al. Combustion characteristics of natural gas at various initial temperature and pressure [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2009, 30 (10): 1771-1774.
- [15] RAZUS D, MOVILEANU C, OANCEA D. The rate of pressure rise of gaseous propylene-air explosions in spherical and cylindrical enclosures [J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, 139(1): 1-8.

Experimental Research on Methane-air Mixtures Explosion Pressure under Normal and Elevated Initial Temperatures

GAO Na^①, HU Yiting^①, ZHANG Yansong^②

①School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science & Technology (Jiangsu Nanjing, 210094)

②Chongqing Research Institute of China Coal Technology & Engineering Group Corporation (Chongqing, 400037)

[ABSTRACT] The influence of initial temperature on the explosion pressure of methane-air mixtures was experimentally investigated at different initial temperature from 298 K to 473 K under the constant initial pressure of 0.1 MPa. Experiments were performed in a closed spherical 20 L vessel with the ignition electrode at the center, which could heat the experimental gas. The results show that the maximum explosion pressure of methane-air mixtures decreases along with the rise of initial temperature. When the initial temperature increases from 298 K to 473 K, the maximum explosion pressure drops from 0.783 3 MPa to 0.501 2 MPa, decreased by 35.89%. Higher initial temperature accelerates the reaction rate, so the reach time of the maximum explosion pressure is shortened from 127.1 ms at 298 K to 85.0 ms at 473 K. In the experimental temperature range, the maximum pressure rise rate $(dp/dt)_{\max}$ increases at elevated initial temperature, but the increase is not large, which is only 9.16%. So the explosion eigen value K_c also increases. During the period from the beginning of the reaction to the time reaching the maximum pressure, the rising rate of explosion pressure, to a certain extent, can reflect the change of the methane-air explosion reaction rate.

[KEY WORDS] initial temperature; methane-air mixtures; the maximum explosion pressure; rising rate of explosion pressure; reach time of the maximum explosion pressure

(上接第 25 页)

- WANG S P. The safety analysis of the step-press-loading charges [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2006, 29(2): 23-25.
- [9] 梁增友. 炸药冲击损伤与起爆特性 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.
- [10] KRZEWSKI B, BLAKE O, LIEB R, et al. Shear deformation and shear initiation of explosives and propellants [C]// Proceedings of the 12th International Detonation Symposium. San Diego, California, USA, 2002: 1548-1556.
- [11] FIELD J E, PALMER S J P, POPE P H, et al. Mechanical properties of PBX's and their behavior during drop weight tests [C]// Proceedings of the 8th International Detonation Symposium. Albuquerque, New Mexico, 1985: 635-644.

Ignition Mechanism of Step Press Loading Charge under Impact Loading

QU Kepeng, WANG Xiaofeng, HE Chao, WANG Shiying

Xi'an Modern Chemistry Research Institute (Xi'an, 710065)

[ABSTRACT] Impact tests of explosive samples with different density distributions were carried out using drop hammer. Based on the analysis of stress and density distribution before and after impact tests, ignition mechanism of step press loading charge was discussed. The results show that the mechanical response of explosive samples are dependent with the inner density distribution, uniform density sample with uniform density distribution can endure bigger load stress than sample with non-uniform density distribution. Shear flow caused by the radial density difference is one of the important reasons causing step press loading charge ignition during the impact loading.

[KEY WORDS] energetic materials; step-press-loading charge; impact test; ignition mechanism