文章编号:1000-5773(2008)02-0113-05

药柱等静压实验和数值模拟计算*

陈 朗[1],鲁建英[1,3],张 明[2],韩 超[2],冯长根[1]

(1.北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室,北京 100081;
2.中国工程物理研究院化工材料研究所,四川绵阳 621900;
3.防化指挥工程学院,北京 102205)

摘要:进行了炸药柱等静压实验,用热电偶测量了药柱压制成型过程中的内部温度,建立了药柱在等静压下的热力耦合模型。对炸药柱保压阶段进行了数值模拟计算,得到等静压条件下药柱内部压力和温度变化,分析了药柱形变,压力和温度分布。结果表明:在等静压下药柱各表面均有明显的向里凹陷的现象,在受力过程中炸药内部温度升高,并存在温差,内部压力分布不均匀。

关键词:炸药;等静压;数值模拟
中图分类号:TQ560.6;O521.2 **文献标识码**:A

1 引 言

炸药等静压药工艺是压制特殊炸药元件的有效手段,它是利用各个方向相同的压力,把炸药粉压制成具有固定形状的密实炸药元件,以满足特殊装药要求。在等静压药过程中,炸药装药床由自由装填状态变化到接近炸药理论密度的高密实状态,炸药床经历了复杂的力学过程。深入认识压药过程中,炸药力学和热学状态变化,对改进压药工艺和控制压药质量具有十分重要的意义。

在等静压药过程中,由于需要保证各方向压力同时和等量地作用于炸药床,给实验测量带来了很大困难。因此,采用理论计算方法研究炸药等静压药过程的力学性能及其变化规律很重要。传统的解析分析计算方法[1-2],只能对压药过程进行整体力学分析,不能描述炸药内部变化的细节,另外,也不能对复杂形状炸药元件进行分析。而数值模拟计算方法能够比较准确地计算炸药内部状态参量变化,给出任意形状炸药元件压药过程的物理图像。1991 年,SaBmannshausen 等人[3]利用有限元方法分析炸药压制成型的过程,计算模型中考虑了模具壁面摩擦对炸药成型的影响,并通过有限元软件进行了二维模拟计算。1997 年,程源[4]对炸药压制中的弹塑性热耦合接触问题进行了有限元分析。从已有的研究情况看,使用数值模拟计算方法能够有效地对炸药压药过程进行理论计算和分析。

本研究进行了柱形炸药在等静压下的压药实验,建立了炸药柱在等静压中保压阶段的计算模型,采用非线性有限元计算方法对炸药形变,受力情况和温度变化进行了数值模拟计算分析。

2 炸药等静压实验

炸药等静压实验是炸药粉装入橡胶全软模具内,放入高压容器的油介质中,通过对油介质加压来压制炸药元件。由于油介质中各个方向的压力都相同,因此,能够对炸药各个表面施加相同的压力。本实

* **收稿日期**:2007-04-27;**修回日期**:2007-05-25
基金项目:国家自然科学基金(10476001)
作者简介:陈 朗(1965—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事爆轰、燃烧和动态冲击研究. E-mail:chenlang@bit.edu.cn

验在药柱内部安装了热电偶测量压制成型过程中温度变化。图 1 为压药装置和温度测量系统示意图,为将热电偶电信号从超高压容器中引出,采用了金属刚性面压紧密封与密封胶密封相结合的密封方法。引出装置内所用的导线是 T 型铠装式热电偶的本体材料,与安装在炸药内的测温热电偶所用的材料完全相同,消除了因材料不同而引起的测温误差。

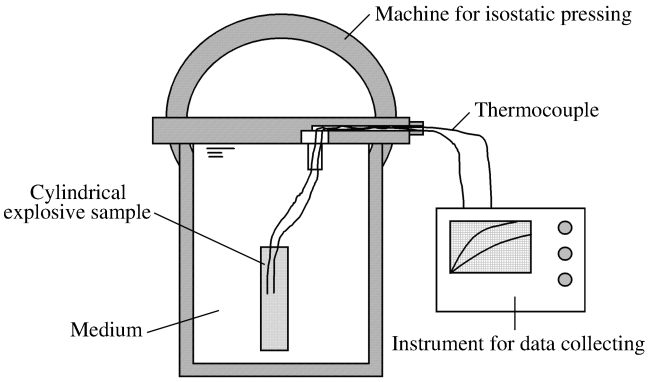


图 1 压药装置和温度测量系统示意图

Fig. 1 Sketch of isostatic pressing settings and temperature measurement system

实验升压速率为 17.5 MPa/min,保压压力为 140 MPa。实验中采用造形粉替代炸药,造形粉为惰性材料,其物理特性与炸药粉相似,在压制实验中常被用作模拟炸药的代用材料。实验结果显示,压制成型的药柱各个表面均有明显的向里凹陷现象。到保压阶段,药柱内部两个测量点的温度都上升 7 ℃。

3 药柱等静压成型数值模拟

压药过程时间缓慢,在升压过程中,炸药由松散状态压制成密实态。在模拟计算过程中,对松散状态炸药压制过程的计算结果显示,由于这个阶段炸药受力较小,不对密实状态炸药受力情况产生实质性影响。因此,主要分析炸药在初步成型达到密实态后,在保压阶段即恒定的压力 140 MPa 时的变形和力学过程,直接建立药柱等静压下受力模型,采用基于非线性有限元流体动力学方法的 LS-DYNA3D 软件[5],对药柱等静压成型的保压段进行热力耦合的三维数值模拟。图 2 给出了药柱等静压物理模型示意图。

对炸药选用塑性动态材料模型

$$\begin{cases}\sigma = E\varepsilon & \sigma < \sigma_s \\ \sigma = E_t\varepsilon & \sigma \geqslant \sigma_s\end{cases} \tag{1}$$

在加载段应力 σ 与应变 ε 保持线性,当应力大于屈服应力 σ_s 时,材料进入塑性,此后如果继续加载,应力应变关系仍然为线性,但是斜率发生变化,卸载曲线与加载段曲线斜率相同,当完全卸载后,材料中将保留塑性变形 ε_p。

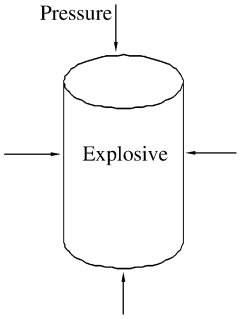


图 2 药柱等静压物理模型示意图

Fig. 2 Sketch of physical model of cylindrical explosive isostatic pressing

在一维条件下,如果结构的应力达到屈服应力,材料进入塑性阶段;在三维条件下,判断材料是否进入塑性使用 VMISE 屈服准则,即

$$\frac{1}{2}s_{ij}s_{ij} - \frac{1}{3}\sigma_s^2 = 0 \tag{2}$$

式中:$s_{ij} = \sigma_{ij} - 1/3(\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33})\delta_{ij}$,为斜应力张量,当等效应力等于屈服应力时,材料开始进入塑性变形。

考虑热效应,在模型中增加了一种各向同性热材料本构,假设炸药材料在各个方向的热传导性能相同,材料温度变化根据材料的热容和热传导率来计算。药柱材料模型参数见表 1。

药柱等静压成型前已经有一定的初始温度,需要定义热初始条件,即在所有的节点和节点组上施加初始温度。药柱几何尺寸为⌀70 mm×200 mm。

表 1 药柱材料模型参数

Table 1 Material model properties of cylindrical explosive

Mass density ρ/(kg/m^3)	Young's modulus E/(GPa)	Poisson's ratio	Yield stress σ_s/(MPa)	Tangent modulus E_t/(GPa)	Heat capacity /[kJ/(kg·K)]	Thermal conductivity /[W/(K·m)]
1730	1.5	0.3	40	0.2	1.155	0.25

4　计算结果及讨论

图 3 给出了药柱等静压作用下,在不同时刻中心剖面上压力分布图。从图中可以看出,药柱在各方向同时和等量地压力作用下发生了变形。药柱上下表面和柱面中心均向内陷。药柱上下表面中心区域位移达到 2 mm,侧面达到 1.5 mm。随着时间的变化,作用在药柱上的压力先从外表面向中心传播,然后又由中心向外反射,压力波在药柱内部叠加,当压制 49 μs 时,药柱内部压力最高可达 290 MPa。当压制 270 μs 后,药柱内部压力分布基本不变。药柱内部和表面压力基本维持在 140 MPa 左右。

图 4 给出了不同时刻药柱中心剖面上的温度分布图。药柱受压后,药柱表面温度首先升高,随着压制的进行,药柱内部温度逐渐升高。在 49 μs 时,药柱内部高温区域达到 318 K,随着时间的增加,内部温度有所降低,温度分布不断变化,当 292 μs 后,药柱内部温度分布基本不再改变,高温区域主要集中在药柱中心轴线上。



$t=49$ μs　　$t=270$ μs

图 3　中心剖面不同时刻压力分布图

Fig. 3　Contours of pressure on central section plane of cylindrical explosive at various times



$t=49$ μs　　$t=272$ μs

图 4　中心剖面不同时刻温度分布图

Fig. 4　Contours of temperature on central section plane of cylindrical explosive at various times

在药柱中心剖面上取不同的单元来分析其压力、温度变化情况,单元位置如图 5 所示。

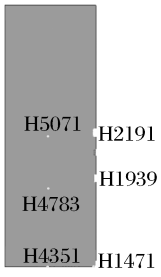


图 5　单元位置图

Fig. 5　Elements' position in the explosive

图 6、图 7 分别给出图 5 所示单元的压力-时间和温度-时间曲线。图 6 显示在药柱初始受力阶段,药柱外表面单元 4351、1471、2191 压力基本维持在 140 MPa,而药柱内部单元 5071 压力高达 270 MPa,几乎是所加静压力的两倍。随着药柱受压时间的增加,内部压力与药柱表面压力趋于一致。药柱内部压力增加说明压力在向药柱内部传递过程中发生了波的叠加,导致内部单元压力高于药柱表面单元压力。随着时

间的增加,压力波在药柱内部叠加达到平衡,各部分压力区域一致。同样,在初始阶段药柱各单元温度差别大,药柱内部温度高达 315 K,表面温度 306 K,如图 7 所示。随着时间的增加,药柱内外温度差别减小,当达到平衡后,药柱温度基本在 306 K 左右。与药柱受压前初始温度 300 K 相比,中心轴上的单元 4783 温升为 7 ℃,表面单元 1939 温升为 5.57 ℃。与温度测量实验结果基本一致。

图 8 和图 9 为药柱不同单元的径向和轴向位移随时间变化曲线。圆柱面上单元径向最大位移 1.75 mm,最小 1 mm。底面中心最大位移 1.9 mm,边缘位移 1 mm。说明药柱上下表面和柱面明显向里凹陷。

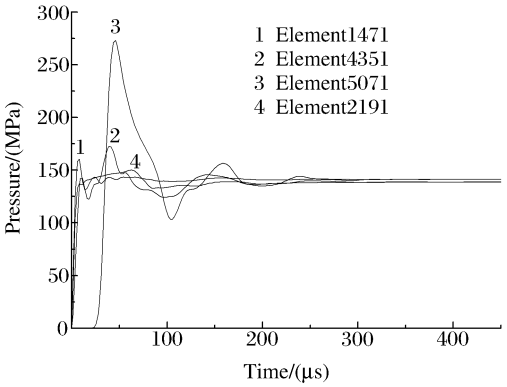


图 6 药柱不同单元的压力-时间曲线图

Fig. 6 Pressure versus time for different elements in explosive

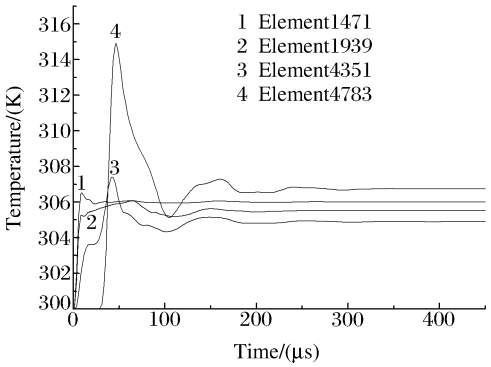


图 7 药柱不同单元的温度-时间曲线图

Fig. 7 Temperature versus time for different elements in explosive

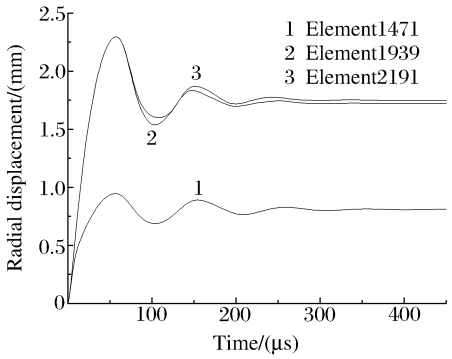


图 8 药柱不同单元的径向位移-时间曲线图

Fig. 8 Radial-displacement versus time for different elements in explosive

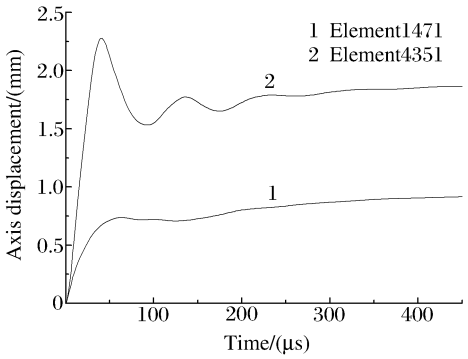


图 9 药柱不同单元的轴向位移-时间曲线图

Fig. 9 Axial-displacement versus time for different elements in explosive

5 结 论

在等静压中,作用在炸药柱上的压力先从外表面向中心传播,然后又由中心向外反射,炸药柱各个表面均有明显的向里凹陷的现象,与实验现象一致。

从压力随时间的变化曲线可以看出,随着时间的变化,炸药在升压过程中均出现内部压力瞬时高于表面压力的现象,药柱中心部分的压力升高幅度较大。这与炸药内部压力波的叠加有关。

从温度随时间的变化曲线看,炸药在升压过程中均出现内部温度瞬时增高的现象,达到平衡后,炸药内部存在温差。对柱形炸药,在 140 MPa 下内部轴心处温升最大为 7 ℃,表面温升 5.5 ℃。与实验结果基本吻合。

References:

[1] Huang H J, Zhang D S. The Kinematics Behavior of Plastic Bonded Explosive Molding Powder in Charged [R]. GF-B903960011, 1997.
黄亨建,张德三. PBX 造型粉在等静压成型过程中的运动行为 [R]. GF-B903960011, 1997.

[2] Zhang D S. Investigation of Isostatic Pressing Procedure for Explosive JB9014e [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 1998, (3): 19-21.
张德三. 等静压成型 JB9014e 工艺研究 [J]. 火炸药学报, 1998, (3): 19-21.

[3] SaBmannshausen U, Essig W, Osswald T A. The Density Distribution in Pressed Charges: An Analytical Approach [J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 1991, 16(2): 73-80.

[4] Chen Y. Finite Element Analysis of Stress Distribution in the Explosive Being Mould-Pressed [R]. GF-A0055070G, 1997.
程　源. 炸药耦合热接触问题研究 [R]. GF-A0055070G, 1997.

[5] LS-DYNA User's Manual (Nonlinear Dynamic Analysis of Structures in Three Dimensions) [Z]. University of California, Lawrence Livermore National Laboratory. Version 960, 2001.

Experiment and Numerical Simulation of Cylindrical Explosive Isostatic Pressing

CHEN Lang[1], LU Jian-Ying[1,3], ZHANG Ming[2],
HAN Chao[2], FENG Chang-Gen[1]

(1. *State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing* 100081, *China*;
2. *Institute of Chemical Materials, CAEP, Mianyang* 621900, *China*;
3. *The Institute of Chemical Defence, Beijing* 102205, *China*)

Abstract: The experiments of cylindrical explosive isostatic pressing were carried out. The internal temperatures in pressed explosives were measured by thermocouples. A thermal/structural coupled model of the explosive isostatic pressing was set up. The numerical simulations of cylindrical explosive were conducted. The calculated pressures and temperatures in explosives were given. The deformations, pressures and temperatures distribution were analyzed. The calculated results indicated that each surface center of the cylindrical explosive was sunken by isostatic pressing. During the isostatic pressing of cylindrical explosive, the internal temperature of the explosives increases, and the temperature and pressure are not uniform.

Key words: explosives; isostatic pressing; numerical simulation