文章编号:1000-5773(2009)06-0421-06

炸药颗粒压制成型数值模拟*

刘 群[1],陈 朗[1],鲁建英[1,3],张 明[2]

(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:分析炸药压药过程中细观的力学行为,能够为改进压药工艺和提高炸药元件质量提供理论依据。建立了模压条件下炸药颗粒压制成型的计算模型。模型中炸药颗粒被认为是直径相同的球形颗粒,并按一定规律排列。利用非线性有限元计算方法,对炸药颗粒压制成型过程进行了数值模拟计算,分析了压制过程中炸药颗粒变形、受力和温度变化情况。结果表明:药粒在压缩中存在运动和变形两个阶段。在药粒运动阶段,应力集中主要出现在颗粒与约束面的接触部分;药粒进入了塑性变形后,药粒内部压力迅速升高且压力趋于一致。压缩过程中药粒温度升高,药床接近密实状态时,药床中心处药粒温度最高。

关键词:炸药;颗粒压制;数值模拟
中图分类号:TQ560.6 **文献标识码**:A

1 引 言

把炸药压制成型是制备炸药元件的主要方法之一。分析炸药压药过程中细观的力学行为,能够为改进压药工艺和提高炸药元件质量提供理论依据。炸药压药都是在封闭的模具中进行,炸药颗粒的粒径一般在几百微米到几毫米范围,通过实验手段难以观察到药粒受力过程的细节。而传统的解析分析计算方法,只能对压药过程进行整体力学分析[1],不能描述炸药内部力学过程的细节。采用数值模拟计算方法能够计算炸药各部分力学参量变化,得到压药过程的数值物理图像。目前,对粉末颗粒压制成型的数值模拟,主要有两种方法:一种是把压制对象假设为连续介质体,忽略了颗粒之间的相互作用[2],另一种是以颗粒为计算对象,通过计算单个颗粒的受力情况,分析压制成型过程。前一种方法已在炸药压制计算中被使用[3],后一种方法已被用于在金属粉末压制成型计算分析[4]。本研究以炸药颗粒为研究对象,建立了球形炸药颗粒药床在模压条件下的计算模型,通过数值模拟计算,分析压制过程中炸药颗粒的细观力学行为。

2 数值模拟计算

2.1 炸药颗粒形状和排列方式的简化假设

炸药压药时,先是将炸药颗粒自由装填在一定形状的模具中,然后对炸药床进行压缩,直到获得具有固定形状和密度的炸药元件。实际的炸药颗粒一般为不规则形状,且各颗粒大小不同、形状各异。如果在计算中考虑每个颗粒的形状和尺寸,会产生很大的计算量。计算中假设每个炸药颗粒都是直径相同的球形。在自由装填条件下,实际炸药颗粒排列也是不规则的,如图 1 所示。如果计算中要考虑药粒

* **收稿日期**:2008-11-22;**修回日期**:2009-07-06
基金项目:国家自然科学基金(10476001)
作者简介:刘 群(1983—),男,博士研究生,主要从事冲击起爆研究. E-mail:lq0921@bit.edu.cn

各种不规则的排列方式,目前的计算条件也难以做到。为减少计算量,在模型中需要设定药粒按规则排列且药粒间有固定的接触类型,图 2 是球形药粒的矩形排列和正六边形排列方式。

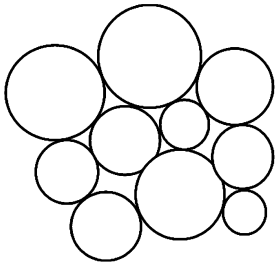


图 1 药粒不规则排列

Fig. 1 Irregular array of particles

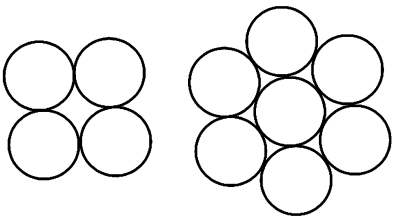


图 2 药粒规则排列

Fig. 2 Regular array of particles

2.2 计算模型

对炸药颗粒在钢模中被压制成柱形炸药进行计算。只考虑冲头压药面和模具内壁对炸药床的作用。冲头的压药面设为刚性加压面,模具内壁设为刚性约束面。图 3 是模具内壁约束面和冲头压药面的立体图。设定炸药颗粒为直径 1 mm 的球形颗粒。炸药颗粒在同一平面上按正六边形方式排列形成一层,多层炸药在竖直方向上叠加形成炸药床。图 4 是炸药颗粒组成药床的立体图。由于计算条件的限制,设定模型中炸药颗粒为 10 层,药床初始高度为 10 mm,模具圆筒内壁直径为 21 mm。计算中圆筒内壁约束面和冲头压药面采用面单元,炸药颗粒采用体单元六面体网格,网格长度为 0.1 mm。图 5是部分炸药颗粒的网格图。

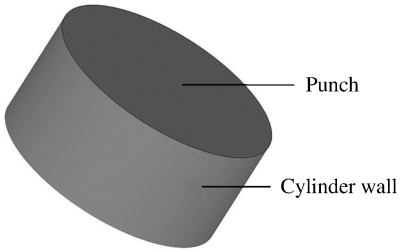


图 3 圆筒壁面和冲头立体图

Fig. 3 The picture of cylinder wall and punch

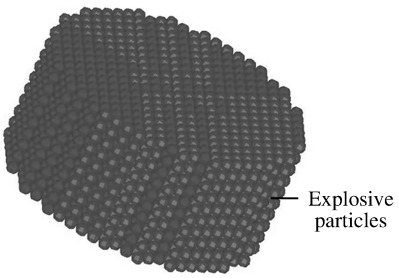


图 4 炸药颗粒药床的立体图

Fig. 4 The picture of explosive bed of particles

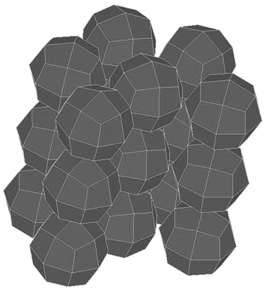


图 5 部分炸药颗粒网格图

Fig. 5 The mesh picture of part of explosive particles

采用非线性有限元方法对压药过程进行数值模拟计算[5],用塑性动力学模型描述炸药颗粒。在用塑性动力学模型描述材料应力应变关系基础上,选用各向同性热材料模型进行炸药压制过程的热分析,实现热和结构的耦合分析,计算炸药颗粒的温度变化。

模型的应力应变关系用下式表示

$$\sigma_y = [1 + (\dot{\varepsilon}/C)^{1/P}](\sigma_0 + \beta E_p \varepsilon_p^{eff}) \tag{1}$$

式中:σ_0 是初始屈服应力,ε 是应变率,C 和 P 是 Cowper-Symond 应变率参数。ε_p^{eff} 是有效塑性应变,E_p 是塑性硬化模量。由于还没有单个炸药颗粒的材料参数,本研究以表 1 中的 JO-9159 炸药材料参数作

为炸药颗粒的材料参数[6]。

表 1　材料参数

Table 1　Material parameters

Material	Density /(g/cm³)	Young's modulus /(GPa)	Poisson's ratio	Yield stress /(MPa)	Tangential modulus	Hardening modulus	C	P
JO-9159	1.89	8.4	0.224	30	0.002	0.5	0	0

3　计算结果及分析

3.1　炸药颗粒滑移和变形

图 6 至图 9 分别是在 50 MPa 压力下、不同时刻下炸药床横截面变形图。在 120 μs 时,上层炸药颗粒主要是发生移动和错位,填充药粒间的空穴,没有发生明显变形。下层药粒还没有运动,仍然保持原来的排列状态。当 195 μs 时,下层药粒也发生了移动和错位,而大部分药粒已经产生较大变形。随着炸药床体积的减小,炸药颗粒相互挤压,填充药粒间孔穴。当 350 μs 时,药床中大部分空穴已被填满,所有炸药颗粒都被压缩变形,炸药颗粒特征消失,形成密实药床,压药过程变为对药床整体的压缩作用。在压制过程中,就单个炸药颗粒而言,存在着药粒的运动和变形两个阶段,就全部药粒而言,药粒滑移和变形过程并不是同步进行,在下层药粒开始滑移时,上层药粒已经发生了大变形。经过一段时间的充分压缩后,炸药床被压缩为密实药床。

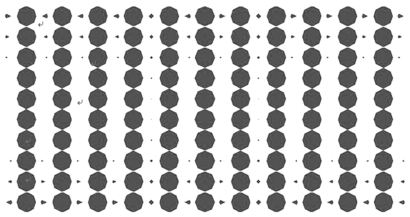


图 6　0 μs 时炸药床轴向横截面图

Fig. 6　Cross section of explosive charge at 0 μs

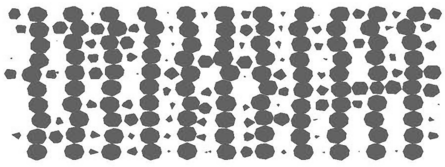


图 7　120 μs 时炸药床轴向横截面图

Fig. 7　Cross section of explosive charge at 120 μs

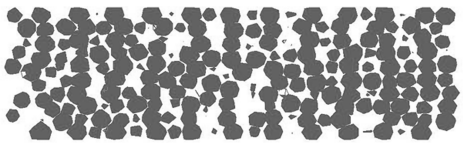


图 8　195 μs 时药床轴向横截面图

Fig. 8　Cross section of explosive charge at 195 μs



图 9　350 μs 时药床轴向横截面图

Fig. 9　Cross section of explosive charge at 350 μs

3.2　炸药受力

图 10、图 11、图 12 分别是 117、180 和 351 μs 时炸药床的应力分布。从图中看出,在 117 μs 时,上层部分药粒处于高应力状态,下层部分药粒应力较小。应力集中点主要集中在颗粒与约束面的接触部分。在 180 μs 时,药床应力集中区域在扩大,这是由于大部分药粒已发生滑移和变形,并且处于塑性变形状态。351 μs 时,药床已基本处于密实状态,但各部分应力分布仍然呈不均匀状态。

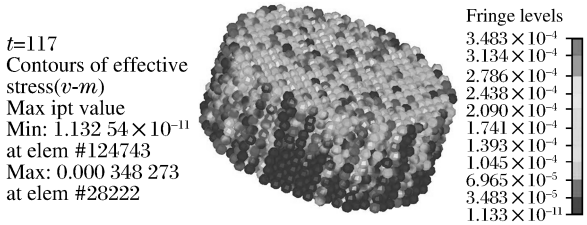


图 10　117 μs 时炸药床应力分布

Fig. 10　Stress distribution of explosive charge at 117 μs

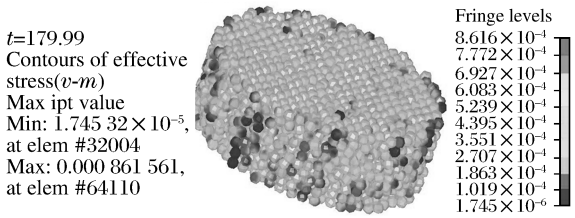


图 11 180 μs 时炸药床应力分布

Fig. 11 Stress distribution of explosive charge at 180 μs

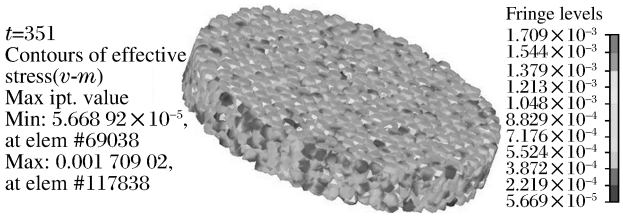


图 12 351 μs 时炸药床应力分布

Fig. 12 Stress distribution of explosive bed at 351 μs

选定单个药粒，分析药粒的顶部和侧面的受力，如图 13 所示。图 14 是药粒顶部和侧面压力变化曲线。药粒顶部和侧面压力变化趋势基本一致，在药粒受压的前段时间，顶部压力高于侧面压力。顶部压力在 120 μs 之前出现一个波峰，这是由于在 120 μs 之前药粒只是在轴向运动，只发生弹性变形，并没有侧向滑移，所以压力一直增加达到峰值。由于药粒之间空隙的存在，药粒的变形必将用来填充空隙处，这样作用于药粒上的正压力会产生侧向分力，当形变达到一定限度时，侧向分力超过药粒间静摩擦力值时，药粒就会发生滑移，顶部压力会迅速降低。在 220 μs 左右时，顶面压力出现负值，这是药粒出现了拉应力。侧面的压力曲线在 220 μs 之前也会出现压力峰值，但压力峰值没有顶部那么大，这时药粒侧面主要是受挤压力，而不是正压力。在 220 μs 以后，顶面和侧面的压力都迅速升高，压力大小和变化趋势都基本相同。这是由于药粒的运动基本结束，药粒进入塑性变形阶段，药粒之间的空隙被填满，药粒组成没有空隙的连续体，药粒内部压力迅速升高，且压力趋于一致。

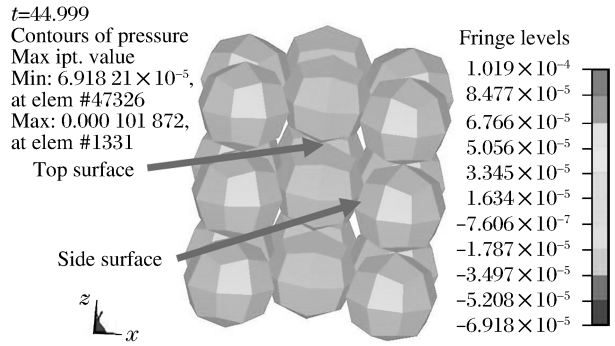


图 13 颗粒受力分析观测点

Fig. 13 Monitor points of mechanics analysis for the particle

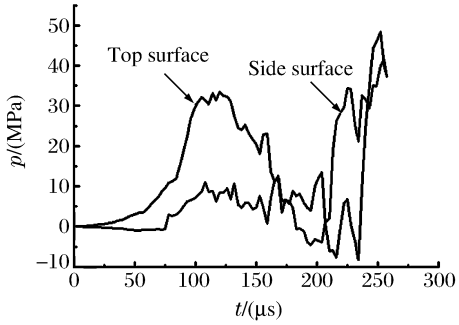


图 14 顶面和侧面压力历程曲线

Fig. 14 Pressure history curves at top and side faces

3.3 炸药温度分布

图 15、图 16、图 17 分别是 15、129、257 μs 时炸药床 y-z 截面的温度。可以看出，当 15 μs 时，上层药粒在挤压和摩擦的作用下温度升高，其它药粒由于没有受到压力影响，温度还没有变化。在 129 μs 时，大部分药粒发生了运动，药粒之间的摩擦使其温度升高，但炸药床中心附近药粒温度升高较快。在 257 μs 时，药床已接近密实状态，除药床中心附近药粒温度较高外，其余部分药粒温度基本相同。

选择药柱中心处的药粒进行温度分析。在药粒

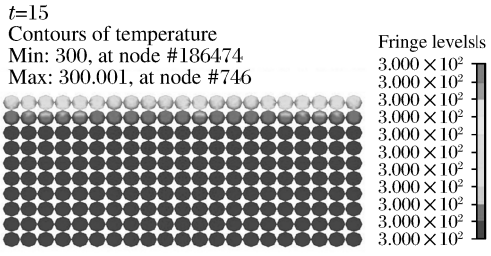


图 15 15 μs 时药粒 y-z 截面的温度分布图

Fig. 15 Temperature distribution of particles on y-z section at 15 μs

中轴线上选取 5 个观测点,图 18 是药粒横截面和 5 个观测点的位置。图 19 是计算的 5 个点上温度随时间的变化曲线。可以看出,药粒内部和表面温度在 130 μs 以前基本没有变化,此阶段药粒主要是弹性变形。当 130 μs 之后,药粒各部分温度出现不同程度的温度升高,且颗粒内部温度升高速度更快,这是药粒运动和塑性变形共同作用的结果。在药粒表面,即 1 号点和 4 号点位置的温升速率最小,这是由于药粒间存在空隙,药粒表面受力不均匀所致。药粒中心,即 2 号点位置温升速率最大,这是由于药粒中心受到的应力较大,温度上升幅度较大。3 号和 5 号点位于药粒内部 1/2 半径处,温升速率介于表面和中心点之间。255 μs 之后,由于药床被压缩为密实状态,颗粒之间的空隙已被填满,药粒各点受力迅速增加,温度也加速升高。

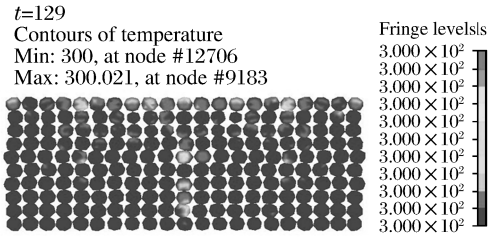


图 16　129 μs 时药粒 y-z 截面的温度分布图

Fig. 16　Temperature distribution of particles on y-z section at 129 μs

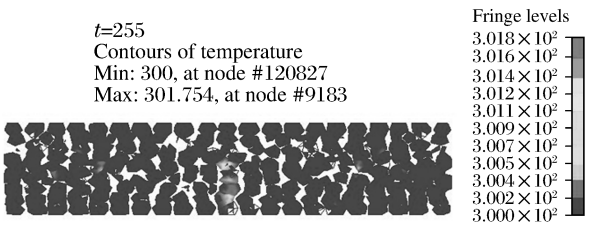


图 17　257 μs 时药粒 y-z 截面的温度分布图

Fig. 17　Temperature distribution of particles on y-z section at 257 μs

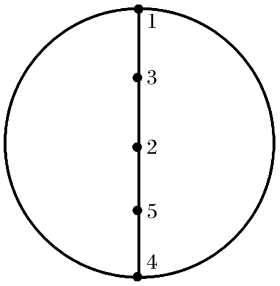


图 18　药粒横截面和 5 个观测点的位置

Fig. 18　Monitor points of temperature for a single particle

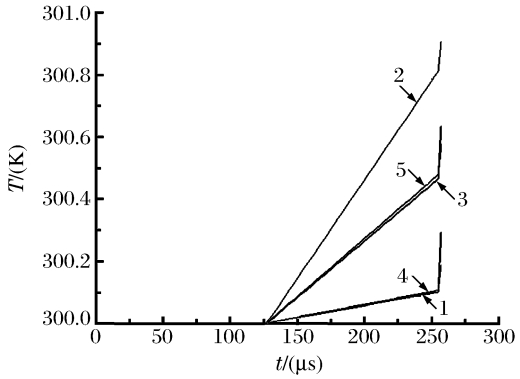


图 19　药粒不同位置的温度时间曲线

Fig. 19　Temperature history curves of different monitor points

4　结　论

基于非线性有限元方法,建立了炸药压药的细观模型,对炸药压制成型过程进行了数值模拟计算,得到了药粒的变形、受力和温度情况。药粒在被压缩中存在运动和变形两个阶段。在药粒运动阶段,应力集中主要出现在药粒与约束面的接触部分;当药粒之间空隙被填满,药粒进入塑性变形后,药粒内部压力迅速升高且压力趋于一致。药粒在压缩过程中,受到挤压和摩擦作用下温度升高。当药床接近密实状态时,药床中心处药粒温度最高。

由于受计算条件的限制,本研究只对具有规则形状和少量药粒的压缩过程进行了计算,计算结果还不能准确反映实际的压药过程。随着将来计算条件的改善,可对更复杂模型和更多数量的炸药颗粒压制过程进行计算,使之更接近真实情况。

References:

[1] Shima S, Oyane M. Plasticity Theory for Porous Metals [J]. Int J Mech Sci, 1976, 18: 285-291.

[2] Khoei A R, Shamloo A, Azami A R. Extended Finite Element Method in Plasticity Forming of Powder Compaction with Contact Friction [J]. Int J Solids Struct, 2006, 43(18): 5421-5448.

[3] Mamalis A G, Vottea I N, Manolakos D E. Fabrication of Metal/Sheathed High-T_c Superconducting Composites by Explosive Compaction/Cladding: Numerical Simulation [J]. Mater Sci Eng, 2002, 90(3): 254-260.

[4] Wu W, Jiang G, Wagoner R H, et al. Experimental and Numerical Investigation of Idealized Consolidation [J]. Acta Materialia, 2000, 48(17): 4323-4330.

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

[6] Dong H S, Zhou F F. High Explosives and Properties [M]. Beijing: Science Press, 1989: 334-340. (in Chinese)
董海山, 周芬芬. 高能炸药及相关物性能 [M]. 北京: 科学出版社, 1989: 334-340.

Numerical Simulation of Explosive Particles Compaction

LIU Qun[1], CHEN Lang[1], LU Jian-Ying[1,3], ZHANG Ming[2]

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

Abstract: Understanding the mechanics of explosives compaction can provide theoretical foundation to improve pressing technique and quality of explosive component. In this paper, a calculating model of explosive particles pressed to charge was developed. The explosive particles were considered as being the uniform diameter and arraying in order. With non-linear finite element calculating method, the numerical simulations of explosives compaction were conducted, and the deformation, mechanics and temperature of explosive particles were analyzed. The calculated results show that explosive particles compaction experiences two phases: displacement and deformation. In the displacement phase, the stress centralization appears on the contact surfaces between particles and constrained surface. In the plastic deformation phase, the stress in the particles increases sharply and tend to be uniform. The explosive particles temperature increases with pressing. When the explosive charge is close to the density of crystalline grains, the highest temperature occurs in the center of charge.

Key words: explosive; particles compaction; numerical simulation