

爆炸压实火药粉末数值模拟

银焱海, 韩体飞, 夏治园, 马刘博, 胡坤伦

(安徽理工大学化学工程学院, 安徽 淮南, 232000)

摘要: 为研究火药粉末爆炸压实过程, 借助 ANSYS/AUTODYN 软件对其进行数值仿真, 研究分析了压实过程中粉末材料的运动状态和密度分布情况。结果表明: 粉末粒子速度经突跃增长后急速衰减, 之后趋于稳定, 整个过程约 200 μ s。压实件底部材料密度高于顶部, 中心区域高于边缘区域, 且随着装药厚度的增加, 材料回弹加剧, 易导致密度不均, 对比发现在药厚 15cm 左右可取得较好的压实效果。

关键词: 火药粉末; 爆炸压实; 数值模拟; 密度分布

中图分类号: TQ562 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2021.02.014

Numerical Simulation of Gunpowder Powder Compaction by Explosion

YIN Yi-hai, HAN Ti-fei, XIA Zhi-yuan, MA Liu-bo, HU Kun-lun

(Institute of Chemical Engineering, Anhui University of Technology, Huainan, 232000)

Abstract: Aimed at explosive compaction process of gunpowder powder, the numerical simulation was carried out by use of ANSYS/AUTODYN software, the motion state and density distribution of the powder materials were studied and analyzed. The results show that the speed of the powder particles decreases rapidly after a sudden increase, and then tends to be stable, the entire process is about 200 μ s. The density of the material at the bottom of the compact is higher than that at the top, and the density in the center area is higher than that in the edge area. As the thickness of the charge increases, the rebound of the material increases, which easily leads to uneven density. It is found that the charge thickness of about 15cm would result in better compaction effect after comparison.

Key words: Gunpowder powder; Explosive compaction; Numerical simulation; Density distribution

爆炸粉末压实是利用炸药爆轰产生的能量绝热压缩金属或非金属粉末, 促使粉末材料瞬间致密并烧结的一种材料加工新技术^[1]。由于爆炸压实的瞬时性, 组成相之间没有发生扩散, 压实件具有超细的晶粒结构和非平衡性结构, 且压实试验的环境要求简单, 可压制包括高温陶瓷材料、纳米晶材料和复合材料等多种稀缺工艺材料, 具有广泛的应用前景。在爆炸压实相关研究课题中, 国内外诸多学者进行了大量的理论分析和试验研究。李晓杰^[2]采用数值模拟的方法还原

了爆炸压实孔隙坍塌过程。李金平^[3]研究了轴对称钢管爆炸压实的能量分布与变形情况。闫安军^[4]研究了 Mo-Ti 合金的热爆炸压实。桑圣军^[5]研究了纳米铝粉的爆炸烧结工艺及压实件的材料性能。陈翔等^[6]通过爆炸压实法制备了钨铜合金材料。

在常规的烟花生产过程中, 常采用自动化机械压实的方法对火药粉进行加密、除湿, 制备出性能良好的火药粉柱。通过对火药粉柱压实工况进行数值模拟, 可以有效地对各项工艺参数进行修正, 以达到最

佳压实效果和高质量压实件。本文基于 Lagrange-SPH 耦合算法，结合 AUTODYN 商用软件，对火药粉末（黑火药粉末）爆炸压实过程进行了数值仿真，对比分析了粉末粒子的运动状态和密度分布规律。

1 计算模型与参数

1.1 算法简介

光滑粒子流体动力学法 (SPH) 的基本思想是将整个流场的物质离散为一系列具有质量、速度和能量的粒子，每个粒子具有不同的力学特征，通过核函数进行积分、估值，进而求得流场中不同时刻、不同位置的动力学量，能广泛模拟爆炸冲击、连续体解体碎裂等大变形问题，且无须网格重构，可保证计算精度^[7]，同时该算法可有效表征粉末材料颗粒间的运动状态，还原粒子间相互碰撞、挤压和沉积机制，解决粉末材料大塑性变形的计算问题。

1.2 有限元模型

建立火药粉爆炸压实有限元模型，如图 1 所示，考虑到计算效率，只建立 1/4 轴对称圆柱模型，并施加对称边界条件。模型内部由上而下依次为炸药、不锈钢片和火药粉，外围有不锈钢空心圆柱外壳，鉴于爆炸压实过程激波聚合后产生强烈的拉伸波，导致颗粒间的结合受到破坏，因此仿真计算中不采用高爆速炸药，而选用硝铵炸药 (ANFO) 作为主装药，单位制选取 cm-g-μs。模型几何参数及材料如表 1 所示。

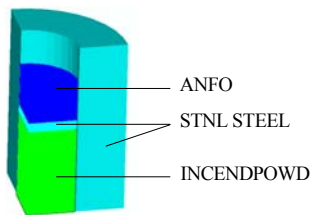


图 1 有限元模型
Fig.1 Finite element model

表 1 模型几何参数与材料

模型组分	材料	算法	几何参数/cm
炸药	ANFO	SPH	直径 5cm，高 5cm 实心圆柱
火药粉	INCENDPOWD	SPH	直径 5cm，高 10cm 实心圆柱
不锈钢片	STNL STEEL	SPH	直径 5cm，厚 1cm 实心圆柱
不锈钢外壳	STNL STEEL	LAGRANGE	外径 20cm，内径 10cm，高 40cm 空心圆柱

1.3 材料状态方程及本构参数

在 AUTODYN 软件进行爆炸冲击相关数值仿真

计算中，炸药材料模型选用 MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN，状态方程选用 JWL 方程，即：

$$p = A(1 - \frac{\omega}{R_1 V})e^{-R_1 V} + B(1 - \frac{\omega}{R_2 V})e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V} \quad (1)$$

式 (1) 中：E 为比内能；V 为比容；A、B、R₁、R₂、ω 为常数。ANFO 材料具体参数如表 2 所示。

表 2 ANFO 材料参数

Tab.2 ANFO material parameters

材料	密度 / (g·cm ⁻³)	爆速 / (m·s ⁻¹)	A / GPa	B / GPa	R ₁	R ₂	ω
ANFO	0.931	4160	49.46	1.891	3.907	1.118	0.333

火药粉末材料 (INCENDPOWD) 采用 Compaction 状态方程与 MO Granular 本构方程加以描述。材料压力定义为：

$$P = C(\epsilon_v) + \gamma T(\epsilon_v) E \quad (2)$$

式 (2) 中：ε_v 为体应变，ε_v = ln(v/v₀)，其中，v 为材料比容，v = 1/ρ，ρ₀ 为初始比容；E 为内能。材料方程中需填入 10 组对应的 ε_v 和 P 值，用于反映材料的 P—v 关系，材料参数中体应变由密度表征。

表 3 INCENDPOWD 材料参数

Tab.3 INCENDPOWD material parameters

密度 / (g·cm ⁻³)	1.02	1.258	1.45	1.60	1.75	1.9	2.05	2.165	2.245	2.289
P/GPa	0	0.0001	0.008	0.02	0.036	0.6	0.1	0.15	0.2	0.25

不锈钢片和不锈钢外壳选用 SHOCK 状态方程 Johnson-Cook 本构模型，其具体材料参数如表 4 所示。

表 4 STNL STEEL 材料参数

Tab.4 STNL STEEL material parameters

材料	密度 / (g·cm ⁻³)	尼森系数	C ₁	S ₁	剪切模量 / GPa	屈服应力 / GPa
STNL STEEL	7.86	1.67	0.461	1.73	73	0.689

2 计算结果分析

2.1 火药粉末运动状态分析

选取 ANFO 药厚 5cm 计算模型，并在火药粉模块沿 Z 轴方向，每隔 2cm 设置 1 个 Gauge 点，如图 2 所示。

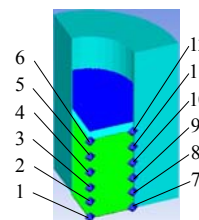


图 2 Z 轴 Gauge 点分布图

Fig.2 Gauge point distribution of Z axial

Guage 点 1 处 Z 方向速度曲线如图 3 所示。由图 3 可知, Guage 点 1 处粒子在约 $135\mu\text{s}$ 时受到上层粒子的压缩作用, Z 轴负向速度发生突跃变化, 达到约 $-0.02\text{cm}\cdot\mu\text{s}^{-1}$, 之后粒子在周围物质约束作用下, 速度快速衰减, 并在 $145\mu\text{s}$ 时产生 Z 轴正向速度, 约为 $0.0046\text{cm}\cdot\mu\text{s}^{-1}$, 之后速度呈波状变化, 并逐渐趋于 0。

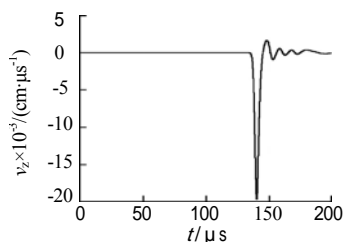


图 3 Guage 点 1 的 Z 方向速度
Fig.3 Z direction velocity of Gauge point 1

对比分析不同时刻火药粉压实形态, 如图 4 所示。由图 4 可知, 不锈钢片受到炸药爆炸冲击作用向下垂直压缩火药粉末, 粉末柱顶部开始被压实, 粒子密集程度明显提高, 随着爆炸逐渐趋于完全, 火药粉药柱被完全压实, 形成致密的火药柱。

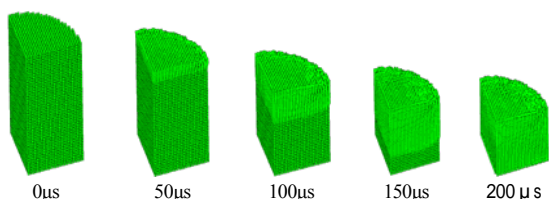


图 4 不同时刻火药粉柱压实形态
Fig.4 Compaction of powder column at different times

2.2 火药粉末密度分布分析

进一步提取 Guage 点 6 处密度变化曲线, 如图 5 所示。

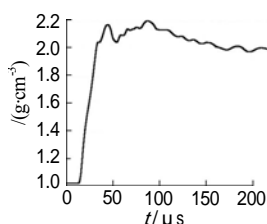


图 5 Guage 点 6 处密度变化曲线
Fig.5 Density change curve of Gauge point 6

由图 5 可知, 在爆炸冲击作用下, Guage 点 6 处的火药粉末由初始密度 $1.02\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 快速增长到约 $2.2\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 之后粉末材料发生少许的回弹, Guage 点处密度略微减小至约 $2.0\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 并趋于稳定。提取 1~12 号粒子最终密度进行对比分析, 如表 5 所示。

由表 5 可知, 在垂直方向上, Guage1~6、7~12

处密度呈下降趋势, 药粉柱底部密度相较于顶部略高, 由此可见药柱顶部受材料回弹作用更为明显, 实际工艺生产中可进行简易的二次压实进一步提高药粉柱质量。水平方向上, 比较 Guage1 和 7、2 和 8 等处的粒子密度可以发现, 相较于药粉柱中心区域, 边缘部分粒子密度相对较低, 易影响压实件的整体质量。由于材料间初始间隙的存在以及不锈钢外壳受粉末材料挤压产生部分变形, 导致边缘处材料往外溢散, 密度下降, 现场实验过程中应着重减小材料间隙并采用高强度金属外壳加以约束。

表 5 1~12 Guage 点粒子密度
Tab.5 Particle density of 1~12 Gauge points

编号	密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	编号	密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)
1	2.00	7	1.92
2	1.92	8	1.65
3	1.98	9	1.70
4	1.94	10	1.75
5	1.95	11	1.80
6	1.94	12	1.84

2.3 压实效果与装药厚度相关性分析

进一步对比 ANFO 厚度为 5cm、10cm、15cm、20cm、25cm 和 30cm 等 6 组不同模型中粉末材料的密度差异, 提取相同位置 1~6 号 Guage 点最终密度, 如图 6 所示。

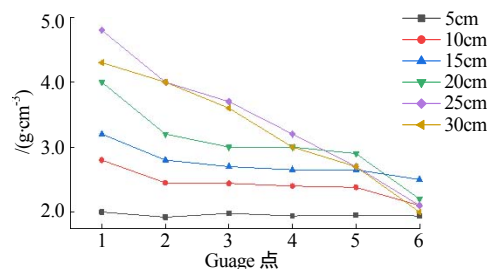


图 6 不同药厚条件下 Guage 点密度
Fig.6 Gauge point density under different charge thickness conditions

由图 6 可知, 随着 ANFO 厚度的增加, 1~4 号 Guage 处的粉末密度明显提高, 最高可达到 $4.6\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 药厚达到 30cm 时, 各测点密度与药厚 25cm 时较为接近, 可以确定 25cm 左右药厚基本达到压缩极限。由 25cm 和 30cm 药厚计算结果可以看出, 1~6 号 Guage 点处密度呈现明显的减小趋势, 密度梯度增大。分析可知, 随着药厚的增加, 火药粉末受压缩作用加剧, 材料回弹更为明显, 因此药柱底端密度增大而顶部密度缩小, 药柱均匀程度下降。经过对比分析, 选取 15cm 左右药厚进行爆炸压实试验可有效得

到相对密实且均匀的火药粉柱。

3 结论

(1) 爆炸压实火药粉过程中, 测点粉末粒子运动速度突跃式增长, 达到 $-0.02\text{cm}\cdot\mu\text{s}^{-1}$ 后急速衰减, 最终趋于稳定, 此过程耗时约 $200\mu\text{s}$, 火药粉末完全被压实, 形成致密的火药粉柱。

(2) 对比火药粉柱顶部、底部可以发现, 由于材料的回弹作用, 顶部粉末密度相比底部较低。进一步对比中心区域与边缘区域的材料密度可以发现, 边缘区域密度相对较低, 现场压实试验中可以通过减小初始间隙, 增强外壳强度加以解决。

(3) 对比不同药厚情况下火药粉柱的密度分布情况, 发现在 ANFO 为 15cm 时可取得密度分布均匀的压实件, 装药过厚易导致材料回弹加剧, 使材料密度不均, 影响压实件质量。

参考文献:

- [1] 王金相, 张晓立, 付艳, 等. 钨钛混合粉末爆炸压实的数值仿真[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2010, 6(31): 582-586.
- [2] 李晓杰, 陈翔, 闫鸿浩, 等. 基于 SPH 方法的爆炸压实孔隙塌缩模拟[J]. 工程爆破, 2016, 22(03): 1-5.
- [3] 李金平, 罗守靖, 纪松, 等. 轴对称钢管爆炸压实的能量与变形[J]. 兵器材料科学与工程, 2002(05): 48-51.
- [4] 闫安军. Mo-Ti 合金的热爆炸压实[J]. 稀有金属快报, 2000(11): 22-24.
- [5] 桑圣军. 纳米铝粉的爆炸烧结工艺及其性能研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2018.
- [6] 陈翔, 李晓杰, 缪玉松, 等. 爆炸压实/扩散烧结法制备钨铜梯度材料[J]. 爆炸与冲击, 2019, 39(01): 131-139.
- [7] 石少卿, 汪敏, 孙波, 等. 工程动力分析及应用实例[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.

2021 碳纳米材料在含能材料中的发展与应用国际会议通知

由中国兵工学会和西安近代化学研究所主办, 燃烧与爆炸技术重点实验室、燃烧、热结构与内流场重点实验室、应用物理化学重点实验室和微纳含能器件工业和信息化部重点实验室联合承办的“2021 碳纳米材料在含能材料中的发展与应用国际会议(2021 International Conference on Development and Application of Carbon Nanomaterials in Energetic Materials)”将于 2021 年 8 月 18 日至 20 日在山东威海举办。本次会议将围绕碳纳米材料在含能材料中的发展与应用展开讨论。

(一) 组织架构

主办单位: 中国兵工学会、西安近代化学研究所

承办单位: Defence Technology (防务技术) 编辑部

联合承办单位: 燃烧与爆炸技术重点实验室; 燃烧、热结构与内流场重点实验室; 应用物理化学重点实验室; 微纳含能器件工业和信息化部重点实验室; FirePhysChem 编辑部; 《火炸药学报》编辑部; 《火工品》编辑部。

(二) 大会主题

1. 碳纳米材料发展趋势研究; 2. 碳纳米材料设计技术研究; 3. 碳纳米材料制备及工艺研究; 4. 碳纳米材料性能研究; 5. 碳纳米材料在含能材料中的应用研究。

(三) 会议时间: 2021 年 8 月 18 日至 2021 年 8 月 20 日

(四) 会议地点: 山东省威海市

(五) 大会网站: <https://www.bagevent.com/event/7077379>