

应用 LS-DYNA 进行爆炸压实爆轰过程的数值模拟

赵铮, 闫鸿浩, 李晓杰, 欧阳欣

(大连理工大学工程力学系工业装备结构分析国家重点实验室, 大连)

摘 要: 本文对粉末材料爆炸压实的加载参数进行了研究。利用粉末材料的冲击 Hugoniot 数据, 提出了一种新的计算方法来确定粉末完全压实所需的加载压力, 该方法适用于所有粉末材料的爆炸压实。此外通过对仅考虑分子间排斥作用的凝聚体炸药状态方程进行拟合得出 LS-DYNA 模拟所需的 JWL 状态方程参数。最后利用 LS-DYNA 进行爆炸压实爆轰过程的数值模拟, 计算得到爆炸压实的加载压力及压力持续时间。

关键词: 爆炸压实 LS-DYNA JWL 状态方程

1 引言

LS-DYNA 是美国 LSTC 公司推出的非线性动力分析有限元程序。该程序主要采用中心差分法进行显示分析, 避免了刚度阵求逆, 适合求解高速碰撞、侵彻、爆炸、金属成型等非线性动力学问题。LS-DYNA 包含近 200 种材料模型和 16 种单元, 可以针对各种材料进行二维或三维分析。其中的炸药模型, 特别适合求解爆炸力学问题, 因此 LS-DYNA 在工程爆破和爆炸加工领域有着广泛的应用。

粉末爆炸压实是利用炸药爆轰产生的冲击波来形成柱面聚合激波作用于粉末, 在几微秒左右的时间内完成 1~50GPa 高压和近 6000℃ 高温的加载卸载。在柱面聚合激波作用下, 粉末颗粒产生较大的塑性变性, 造成孔隙塌缩甚至形成射流。同时颗粒的摩擦能与微动能沉积于表面, 使表层局部温度升高。由于冲击波加卸载的瞬时性, 热量来不及传递到颗粒内部, 所以只是在颗粒的表层产生局部熔化焊接, 之后快速冷却形成相对密度在 90% 以上的致密压实体。因此爆炸压实是压实与烧结的统一。利用爆炸压实技术可以制取多种优质合金及陶瓷材料, 例如 Cu-Cr^[1]、Al₂O₃-Cu^[2]、Nd-Fe-B^[3]、Ti-Al^[4]、Al-B₄C^[5]、Cu-Mo^[6]、Y-TZP^[7]、HSS^[8]等。本研究采用直接法进行爆炸压实, 实验装置如图 1, 该方法装置简单、工艺简便、成本低廉、易于放大生产, 有着良好的应用前景。

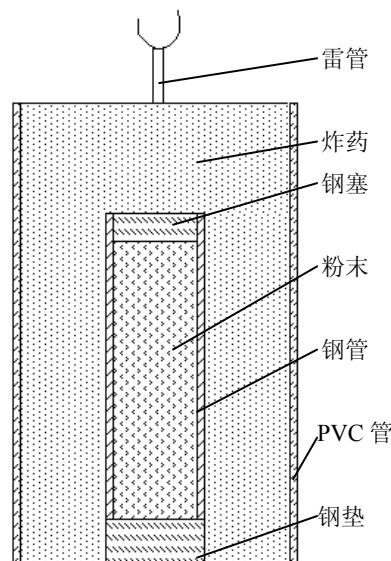


图 1. 直接法爆炸压实装置

2 药爆压的选择

采用直接法进行粉末的爆炸压实时，对于特定的粉末材料来说，粉末初始密度 ρ_{00} 、粉末的加载压力 P 和压力持续时间 τ ，是最重要的三个参数，直接影响最终的压实效果。由于本方法炸药直接作用于粉末，因此可以近似认为粉末加载压力 P 等于炸药的爆压 p_H 。这样就可以根据粉末材料的 Hugoniot 数据^[9]，确定出所需要的爆压。

在冲击波作用下，粉末颗粒速度 U_p 和冲击波传播速度 U_s 近似存在如下线性关系^[9]：

$$U_s = a + bU_p \quad (1)$$

同时根据粉末材料的质量守恒、动量守恒方程

$$\rho_{00} / \rho = (U_s - U_p) / U_s \quad (2)$$

$$P - P_0 = \rho_{00} U_s U_p \quad (3)$$

计算出，当 $\rho = \rho_m$ 时（粉末材料被完全压实，理论密度达到 100%）所需爆压为：

$$p_H = P = a^2 \rho_{00} \left(1 - \frac{\rho_{00}}{\rho_m} \right) \left/ \left(1 - b - b \frac{\rho_{00}}{\rho_m} \right) \right.^2 \quad (4)$$

ρ_{00} —粉末初装密度； ρ_m —材料实体密度； P_0 —粉末初始压力，近似 $P_0 = 0$ 。

通过（4）式确定炸药爆压 p_H 后，根据由“仅考虑分子间排斥作用的凝聚体炸药状态方程^[10]以下简称 k 方程：

$$\begin{cases} p = \frac{A}{v^k} \\ e = \frac{A}{(k-1)v^{k-1}} \end{cases}, \quad v \text{——炸药比容, } v = 1/\rho$$

导出的爆轰波阵面上参数关系

$$\rho_H = \frac{k+1}{k} \rho_0, \quad v_H = \frac{k}{k+1} v_0, \quad p_H = \frac{1}{k+1} \rho_0 D^2 \quad (5)$$

k —炸药绝热指数

根据 ρ_0 ， D ， p_H 的关系来选择炸药的密度 ρ_0 和爆速 D ，从而确定采用何种炸药用于实验。

3 炸药 JWL 状态方程的参数确定

LS-DYNA 中的炸药材料模型采用 JWL 状态方程，不支持 k 方程。因此需要根据 k 方程拟合出炸药 JWL 状态方程的参数。

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

V ——炸药相对体积, $V = v/v_0$; E ——炸药内能。

A , B , R_1 , R_2 , ω 为待拟合参数;

根据 k 方程及利用爆轰波阵面参数可以求得 $A = p_H v_H = \left(\frac{k}{k+1} v_0 \right)^k \frac{\rho_0 D^2}{k+1}$

将 $p = \frac{A}{v^k}$ 中的 v 用 JWL 中的相对体积 V 来表示: $v = v_0 V$

则

$$p = \frac{A}{(v_0 V)^k} = \frac{A \rho_0^k}{V^k} = \frac{M}{V^k} \quad (6)$$

M ——常数, $M = A \rho_0^k$

最后可以根据公式 (6) 拟合出 JWL 方程的参数, 用于 LS-DYNA 进行数值模拟。

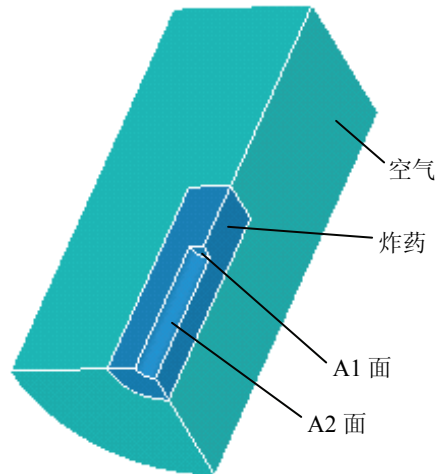


图 2 炸药和空气的 1/4 圆柱模型

4 LS-DYNA 计算爆炸载荷

利用 LS-DYNA 对爆炸压实的爆轰过程进行数值模拟, 计算爆炸载荷。建立只包含炸药和空气的 1/4 圆柱模型 (如图 2 所示)。采用欧拉网格, 炸药和空气定义为多物质。空气外表面和上表面定义为透射边界, 模拟无限空气域。A1 面为粉末顶端钢塞上表面, A2 面为包裹粉末的钢管外表面, A1、A2 均定义成固壁面, 即近似认为钢塞和钢管只传递压力而不发生变形。炸药采用 $\rho_0 = 1.0 \text{ g/cm}^3$,

$D = 3900 \text{ m/s}$, $p_H = 4.4 \text{ GPa}$ 的黑索金, 用公式(6)拟合出 JWL 参数 $A = 0.01$, $B = 0.34$, $R_1 = 8.00$,

$$R_2 = 3.18, \quad \omega = 0.11。$$

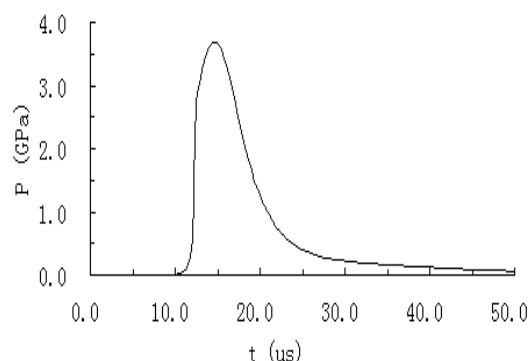


图 3 A1 面压力

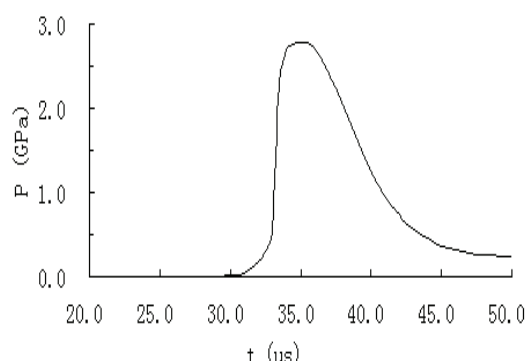


图 4 A2 面压力

LS-DYNA 计算得到 A1 面承受的最大压力为 3.66GPa，压力持续时间约为 5 μ s（如图 3 所示）；A2 面承受的最大压力为 2.78GPa，压力持续时间约为 5 μ s（如图 4 所示）。可见粉末所承受的压力低于炸药理论爆压，这是因为炸药尺寸较小（只有 10cm 长），爆轰产物向空气中飞散产生的稀疏波严重影响爆轰波导致了压力的降低。另外 A1 面所受压力为爆轰波正向入射压力。而 A2 面所受压力为滑移爆轰时，爆轰波作用于侧壁的压力。因此 A1 面压力大于 A2 面压力符合爆轰理论。压力持续时间为 5 μ s 表明爆炸压实的加卸载速率约为 7×10^{14} Pa/s，这是其他加工方法所无法比拟的，因此爆炸压实作为一种特殊的粉末成型工艺具有较高的研究价值。

5 结论

- 可以利用粉末材料的冲击 Hugoniot 曲线，来确定完全压实所需要的炸药爆压。
- 可以利用仅考虑分子间排斥作用的凝聚体炸药状态方程来拟合得到炸药 JWL 状态方程参数。
- 利用 LS-DYNA 对爆炸压实的爆轰过程进行数值模拟，可求出粉末的加载压力及压力持续时间，可以以此为依据来设计实验装置，选择实验参数。

参考文献：

- [1] 李晓杰, 赵铮, 曲艳东, 等. 爆炸烧结制备 CuCr 合金. 爆炸与冲击, 2005, 25(3): 251–254
- [2] 李晓杰, 赵铮, 闫鸿浩. 纳米 Al₂O₃ 增强铜基复合材料的爆炸压实技术. 金属材料研究, 2004, 30(2): 46–49
- [3] S Guruswamy, M K McCarter, J E Shield. Explosive compaction of magnequench Nd–Fe–B magnetic powders. J. Appl. Phys. 1996, 79(8): 4851–4853
- [4] E Szweczek, J Paszula, A V Leonov. Explosive consolidation of mechanically alloyed Ti–Al alloys. Materials Science and Engineering A, 1997, A226–228, 115–118
- [5] G M Bond, O T Inal. Shock compacted Aluminum/Boron Carbide composites. Composites Engineering, 1995, 5(1): 9–16
- [6] V I Mali, T S Teslenko. Structure and properties of explosively compacted Copper–Molybdenum. Combustion, Explosion, and Shock Waves. 2002, 38(4): 473–477
- [7] Elisabeth Djurado, Florence Boulc'h, Alla Pivkina. Cold isostatic and explosive isodynamic compaction of Y–TZP nanoparticles. Solid State Ionics, 2002, 154–155: 375–380
- [8] L E G Cambronero, E Gordo, J M Torralba. Comparative study of high speed steels obtained through explosive compaction and hot isostatic pressing. Materials Science and Engineering, 1996, A207: 36–45
- [9] Stanley P Marsh. LASL shock hugoniot data, 1980

[10] 张守中. 爆炸与冲击动力学. 北京: 兵器工业出版社, 1993, 1

Numerical modeling of the detonation process of explosive compaction using LS-DYNA

ZHAO Zheng, YAN Hong-hao, LI Xiao-jie, OU Yang-xin

(Department of Engineering Mechanics, Dalian University of Technology, The State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian 116023, China)

Abstract: This paper is intended to calculate loading parameters of explosive compaction for powder materials. A new calculating method to determine loading pressure required by entirely compaction is proposed, and the method is appropriate to all kinds of powder materials. Furthermore, parameters of JWL equation of state are obtained through fitting the equation of state of condensed matter explosive unconsidered repulsive force between molecules. Finally, loading pressure and pressure duration are obtained by modeling the detonation process of explosive compaction using LS-DYNA.

Keywords: explosive compaction; LS-DYNA; JWL equation of state