

粉末爆炸烧结材料参数效应数值研究

张德良 王晓林

(中国科学院力学研究所 北京 100080)

摘要 用二维流体弹塑性体模型和 Euler 算法完成了粉末爆炸烧结的数值模拟;给出了爆炸烧结过程中密度分布和压力分布;研究了炸药和粉末参数对爆炸烧结的影响;讨论了几种实验装置设计方案的效果。数值模拟和实验结果作了比较,结果是令人满意的。

关键词 粉末 爆炸烧结 数值模拟

中图法分类号 TF124.1

1 引言

利用高能炸药产生瞬态高压实现粉末爆炸烧结是获得新型材料的一个重要技术途径。尤其是把一维非晶材料烧结成三维结构材料,以便在工业上广泛应用,更具有特殊的优越性^[1]。

长期以来,粉末爆炸烧结机理主要通过实验方法来研究。然而,由于粉末爆炸烧结的物理过程复杂,仅用实验方法无法完成对它的深入理解和全面分析,近年来,已逐步采用数值模拟方法来研究粉末爆炸烧结^[2]。

我们用二维流体弹塑性体模型和 Euler 算法在国内第一次完成了粉末爆炸烧结的数值模拟,给出了爆炸烧结过程中密度分布和压力分布,研究了炸药和粉末参数对爆炸烧结的影响,讨论了几种实验装置设计方案的效果。同时,把数值模拟和实验结果作了比较,结果是令人满意的。最后,我们设计了一个数据彩色图象处理的后处理程序包,这为粉末爆炸烧结数值模拟的工程应用 CAD 化打下了良好的基础。

2 数值计算模型和方法

研究粉末爆炸烧结最简便的实验方法是直接法。在薄壁金属管里装入待烧结的金属,陶瓷或非晶材料粉末,金属管的外面用均匀的高能炸药层包围。外面的炸药层从一端起爆,产生一爆轰波。它沿着金属管在炸药层内急速进行,并产生高压,使金属管受到挤压,同时,把压力均匀地加到金属、陶瓷或非晶材料粉末中去,使粉末烧结成结构材料。

为了实现上述粉末爆炸烧结动态过程的计算机数值模拟,必须作必要的简化:

(1) 整个爆炸烧结动态过程简化为一个轴对称的二维非定常爆轰波在粉末中传播过程。初始时刻所需烧结的粉末,金属管和外面包围的炸药层的设置如图1(a)所示。

(2) 忽略雷管起爆过程,假定在初始时刻($t=0$)炸药瞬时起爆,并形成一稳定的爆

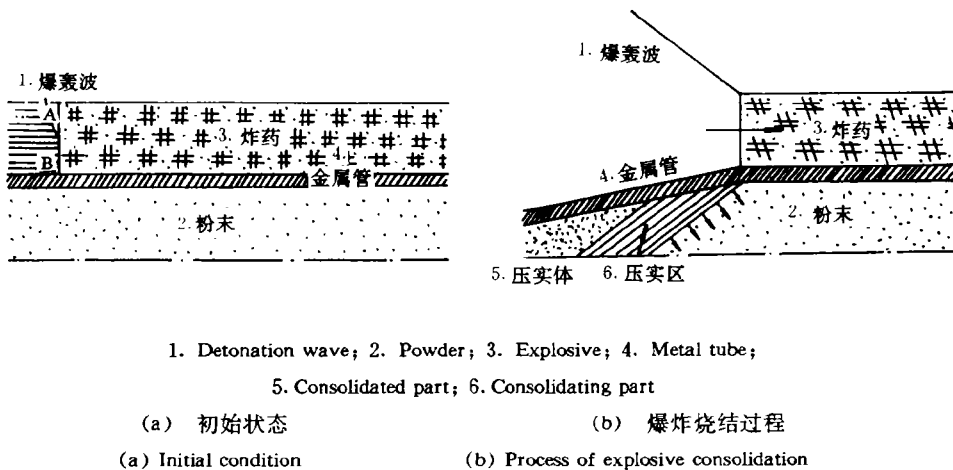


图1 爆炸烧结物理模型

Fig. 1 Physical model of explosive consolidation

轰波(AB),它以一定的爆轰波速度在炸药层内传播。

(3) 当爆轰波传到炸药层内某一位置时,就在该处炸药中引起新的爆轰,并获得一定的爆炸能量。爆炸能量是和爆轰波速有关的。

整个粉末爆炸烧结过程见图1(b)。

爆炸烧结问题中相应的状态方程是比较复杂的,因为问题中包含有三种不同的介质:铜粉、铁管和炸药。正确描述不同介质的状态特性是十分重要的,在目前计算中用下列三种不同的状态方程描述:

(1) 粉末状态方程——关于粉末状态方程目前在理论上尚不成熟,许多问题尚在探索中,我们基本上采用了一种修正的Zeldovich模型的粉末状态方程^[3]。

(2) 铁管状态方程——计算中采用人们熟知的Tillotson固体状态方程^[4]。它是一种分析形式的状态方程,有一整套参数表可供查阅,便于应用。

(3) 爆轰产物状态方程——计算中采用忽略化学反应的常数 γ 值状态方程^[5]。实验表明对于大多数固体炸药,取 $\gamma=3$ 是合适的。

粉末爆炸烧结是一个典型的流体弹塑性体的非定常运动问题,由于在粉末爆炸烧结过程中会出现多种介质的大畸变运动,因此采用欧拉算法是比较合适的。在计算中采用算子分裂思想建立差分格式。

3 数值结果和力学分析

金属粉末爆炸烧结计算已完成,通过力学分析,可得出如下几点看法。

3.1 粉末爆炸烧结的基本特征

60%理论密度的铜粉爆炸烧结数值模拟已完成,计算结果列在图2中。图2表示爆炸烧结过程中不同时刻铜粉的密度分布(g/cm^3)。

从图2中可以清楚地看到铜粉爆炸烧结的整个过程。在 $t=0$ 时刻,炸药在一端起爆,

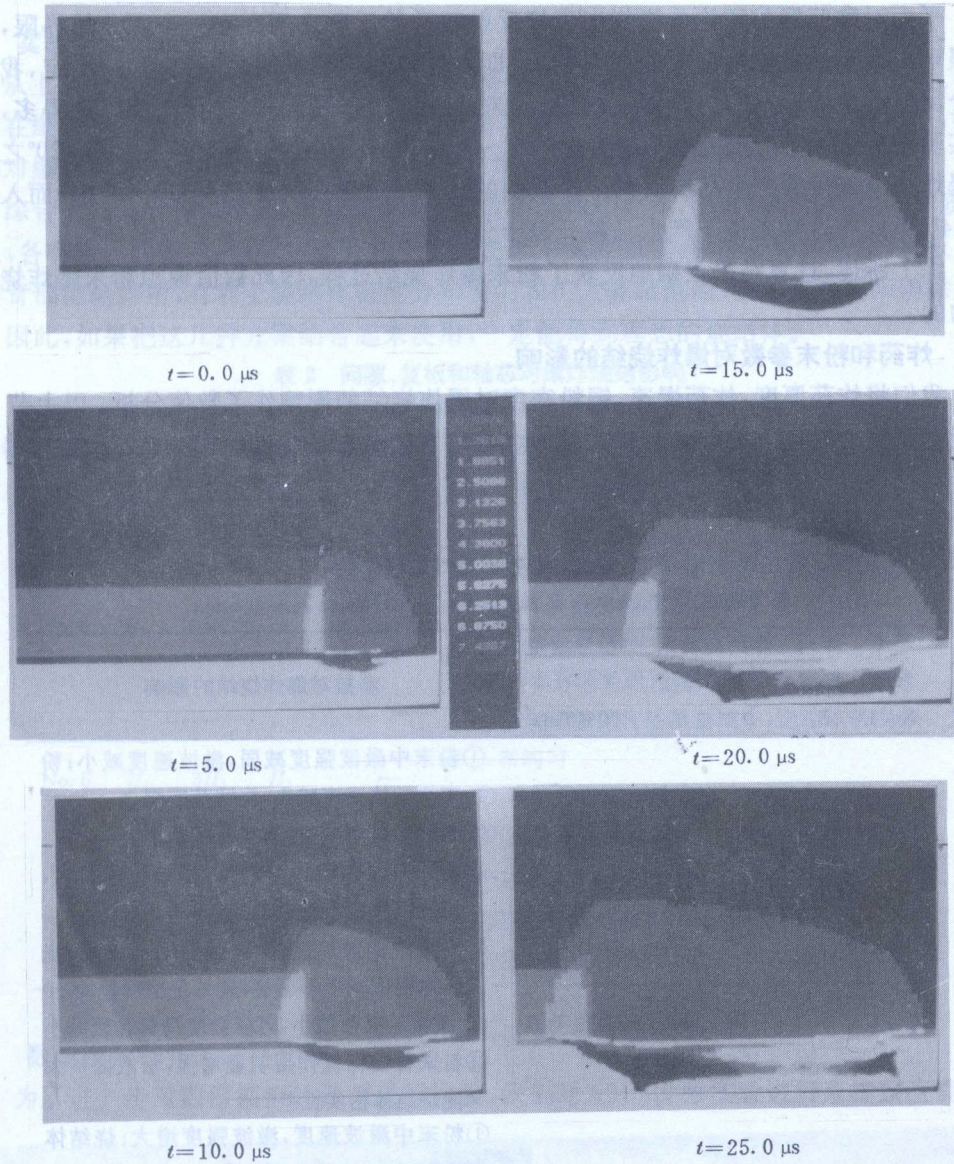


图 2 爆炸烧结后铜粉密度分布

Fig. 2 Density distributions of explosive consolidation for copper powder

一个爆轰波稳定地在炸药内传播。爆轰波后的高压直接压缩铁管，同时压缩管内铜粉，并在铜粉内形成一个激波。这个激波稳定地在铜粉内传播，并在轴芯处反射。根据不同状态可以形成正规反射(双波结构)，也可以形成马赫反射(三波结构)。如果是正规反射，则在烧结体内不会有孔穴。如果是三波结构，则在烧结体内会产生马赫孔。在目前的算例中，我们可以清晰地看到烧结体内存在马赫反射和马赫孔。

计算结果表明，烧结体内大部分区域密度被压实到 90%理论密度以上；在马赫孔内铜粉密度较低，形成孔穴；在铜粉背部的铁管附近，由于反射激波在自由面上产生稀疏波的作用，密度也明显下降。

平面对称问题的理论分析指出正规反射和马赫反射之间存在一个区分的界限,这个界限可以由与激波强度有关的入射角 α (即入射波和对称平面之间夹角)来确定,我们称区分反射类型的入射角为临界入射角 α 。对于粉末爆炸压实来说,情况要复杂得多,但大量实验结果表明,对于激波压力在 $2 \times 10^9 \sim 8 \times 10^9$ Pa 范围内,入射角在 $10^\circ \sim 20^\circ$ 之间粉末爆炸烧结都可能产生马赫反射。在我们的计算中激波压力大约是 6×10^9 Pa,而入射角约 14° ,因此在这种条件下产生马赫孔是十分合理的。

综上所述,计算结果正确地反映了粉末爆炸烧结过程,因此数值模拟粉末爆炸烧结是成功的。

3.2 炸药和粉末参数对爆炸烧结的影响

我们将炸药厚度,炸药爆速,铜粉密度对爆炸烧结的影响作了数值分析。以上节 60% 理论密度铜粉爆炸烧结(No. 1)作为基本参数来对照分析各参数的影响。各参数对爆炸烧结影响见表 1。

表 1 参数对爆炸烧结影响

Table 1 The effect of parameters on explosive consolidation

基本参数	炸药厚度	炸药爆速	粉末厚度	粉末密度	参数对爆炸烧结的影响
No. 1	B_1	D	B_2	60% T. D.	
No. 2	$B_1/2$	D	B_2	60% T. D.	①粉末中激波强度减弱,激波速度减小;粉末烧结体密度减小,烧结范围缩小 ②激波入射角减小,马赫孔区缩小 ③粉末背面稀疏作用增强,松散范围扩大,使烧结体密实性差
No. 3	B_1	$D/2$	B_2	60% T. D.	①粉末中激波速度,激波强度明显减小;烧结体密度减小不明显,烧结范围明显缩小 ②激波入射角减小,可能会使马赫孔区缩小 ③粉末背面稀疏作用明显增强,松散区扩大使烧结体密实性差
No. 4	B_1	D	B_2	80% T. D.	①粉末中激波速度,激波强度增大;烧结体密度增大,烧结范围扩大 ②激波入射角明显增大,马赫孔区域扩大 ③粉末背面稀疏作用减小,烧结体密实性好

注: $B_1=1.60$ cm, $D=3000$ m/s, $B_2=1.173$ cm, T. D. 表示理论密度。

综合上述因素的分析表明:

(1)无论是改变炸药爆速和炸药厚度,还是改变粉末密度和厚度,对爆炸烧结都有有利的一面,也有不利的一面。因此,不可能仅改变一个因素来得到高质量烧结体,而必须综合调配这些因素,得到一个最佳方案。

(2)在这些因素中明显看出炸药爆速是一个较重要的因素。

(3)仅仅从调配这些因素,要完全消除马赫孔是十分困难的。

3.3 实验装置设计改进

从上节分析可以看出,为了消除马赫孔,得到高质量烧结体,必须改进实验方案。为此我们在爆炸烧结装置中增添了间隙,复板和轴芯方案,并逐一对它们进行数值模拟,检验它们对爆炸烧结的影响。间隙,复板和轴芯对爆炸烧结的影响见表 2。

综合上述分析可以看出,无论是间隙,复板还是轴芯方案,都有利于提高烧结体质量,而且,各有自己的特点:间隙主要有利于增强粉末中激波强度,提高烧结体密度;复板可以减弱背部稀疏作用,有利于烧结体密度分布均匀和扩大烧结范围;轴芯主要用来消除马赫孔。因此,如果把这几种方案结合起来使用,一定能得到理想的烧结体。

表 2 间隙、复板和轴芯对爆炸烧结影响

Table 2 The effect of gap, cover plate, mandrel on explosive consolidation

飞板 厚度 (H_1)	间隙 距离	复板 厚度 (铁)	轴芯 (铁)	间隙、复板、轴芯对爆炸烧结的影响
No. 5	H_1	$3H_1$	—	① 粉末中激波速度,激波强度明显增大,烧结体密度增大,烧结范围扩大 ② 马赫孔区域缩小 ③ 粉末背面稀疏区有所扩大
No. 6	H_1	$3H_1$	H_1	① 粉末背部稀疏区明显减小,烧结体密度分布均匀 ② 马赫孔区进一步缩小 ③ 烧结体密度降低
No. 7	H_1	$3H_1$	H_1	① 马赫孔区完全消失 ② 烧结体密度增加,烧结范围扩大 ③ 烧结体密度均匀

注: $H_1 = 0.225 \text{ cm}$ 。

3.4 数值模拟和实验结果比较

为了进一步对数值模拟的效果进行检验,我们对 901030 号实验进行直接数值模拟。

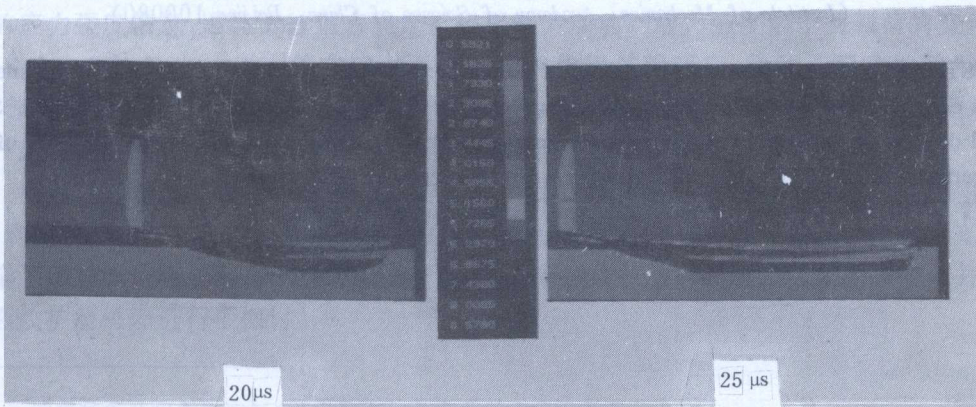


图 3 901030 号实验方案装置数值模拟结果

Fig. 3 Numerical simulation for No. 901030 experimental device

实验是对钴基非晶粉末进行爆炸烧结。在数值模拟中,用铁粉末代替非晶粉末。计算结果证实铁粉被完整压成烧结体,它的密度在 90% 以上,轴芯附近没有马赫孔穴。数值结果和实验结果基本一致。图 3 给出了铁粉爆炸烧结过程中 15, 20 μs 时刻密度分布。

4 结 论

1 用数值模拟方法来研究粉末爆炸烧结在国内尚属首次。计算结果表明,在爆炸烧结过程中炸药中爆轰波和粉末中激波传播稳定,激波在轴芯附近反射过程合理(尤其对马赫反射),因此用数值模拟方法研究粉末爆炸烧结是可行的,成功的。

2 炸药和粉末参数对爆炸烧结影响各有利弊,必须综合利用各个参数关系,才能得到最佳方案。然而,仅仅依靠调整这些参数来消除马赫孔是十分困难的。

3 在实验装置中采用间隙,复板和轴芯方案都有利于获得密实、均匀和无马赫孔的烧结体。数值模拟结果表明,综合使用间隙、复板和轴芯方案可以得到高质量的烧结体。

参 考 文 献

- 1 Gourdin W H. Dynamic Consolidation of Metal Powder. Progress in Materials Science, 1986, 30: 39~80.
- 2 张德良. 粉末爆炸压实数值模拟. 力学进展, 1994, 24(1): 37~58
- 3 Nagayama K, Murakami T. Theoretical Investigation of a Converging Shock Wave in Porous or Composite Materials. Journal of the Physical Society of Japan, 1976, 41: 1054~1061
- 4 Tillotson T H. Metallic Equations of State for Hypervelocity Impact. USA, GA-3216, 1962
- 5 章冠人, 陈大年. 凝聚炸药起爆动力学. 北京: 国防工业出版社, 1991: 129~162

THE NUMERICAL RESEARCH OF THE EFFECTS OF MATERIAL PARAMETERS ON POWDER EXPLOSIVE CONSOLIDATION

Zhang Deliang, Wang Xiaolin

(Institute of Mechanics, Academy of Science of China, Beijing 100080)

ABSTRACT The numerical simulation of powder explosive consolidation has been performed in this paper. The effects of material parameters on powder explosive consolidation are studied. Several designs of experimental device were tested. Comparing computational results with that of the experimental, it shows that the agreement are satisfactory.

KEY WORDS powder, explosive consolidation, numerical simulation