高压物理学报

用于描述W-Cu粉末混合物冲击压缩行为 的 *p*- α 与*p*- λ 模型适用性

高明悦 周强

***p*- and *p*- Model for Describing Shock Compressive Behavior of W-Cu Powder Mixture**

GAO Mingyue, ZHOU Qiang

引用本文:
高明悦, 周强. 用于描述W-Cu粉末混合物冲击压缩行为 的 *p*- α 与*p*- λ 模型适用性[J]. 高压物理学报, 2020, 34(1):012101. DOI: 10.11858/gywlxb.20190784
GAO Mingyue, ZHOU Qiang. *p*- and *p*- Model for Describing Shock Compressive Behavior of W-Cu Powder Mixture[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2020, 34(1):012101. DOI: 10.11858/gywlxb.20190784

在线阅读 View online: https://doi.org/10.11858/gywlxb.20190784

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

铝粒径及成型压强对Al/PTFE冲击反应的影响

Influence of Particle Size of Aluminum Powder and Molding Pressure on Impact-Initiation of Al/PTFE

高压物理学报. 2019, 33(5): 054203 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20190712

铜粉末动态压缩行为的多颗粒有限元分析

Dynamic Compaction Behaviors of Copper Powders Using Multi-Particle Finite Element Method

高压物理学报. 2019, 33(4): 044102 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20180665

高压下FeNiP的压缩性

Compressibility of FeNiP under High Pressure

高压物理学报. 2019, 33(6): 060106 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20190837

基于第一性原理计算IrSb压力相变

Pressure-Induced Phase Transformations of IrSb from First-Principles Calculations

高压物理学报. 2019, 33(5): 052203 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20190716

JB-9014钝感炸药冲击Hugoniot关系测量

Measurement of Hugoniot Relation for JB-9014 Insensitive Explosive

高压物理学报. 2018, 32(3): 033202 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20170669

爆炸烧结制备W-Al含能结构材料及其准静态压缩特性研究

Fabrication of W-Al Energetic Structural Materials by Explosive Consolidation and Investigation of Its Quasi-Static Compression Properties

高压物理学报. 2019, 33(6): 063401 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20190753

DOI: 10.11858/gywlxb.20190784

用于描述 W-Cu 粉末混合物冲击压缩行为的 p-α 与 p-λ 模型适用性

高明悦，周 强

（北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室，北京 100081）

摘要：研究了 3 种 p-α模型和 p-λ模型在预测非均质 W-Cu 混合粉末冲击压实响应的适用性。利用 Mie-Grüneisen 方法和 Barry 等压混合法，基于单质 W、Cu 粉末的 Hugoniot 关系预测了同孔隙度的 W-Cu 混合粉末的 Hugoniot 线，在高压段与实验结果符合较好，但在低压段与实验偏差较大。分别应用 3 种 p-α模型和 p-λ模型对实验结果进行拟合，发现除 p-α PL 模型外，其他模型均较好地描述 W-Cu 混合粉末的冲击压缩响应，受经验参数选择的影响，所有模型的压溃强度和压缩路径各不相同，预测功能较差。

关键词：W-Cu 混合粉末；冲击压缩；p-α模型；Hugoniot 测量

中图分类号：O347.1; TG301 **文献标识码：**A

多孔材料和粉末材料的冲击压缩一直是重点研究方向。早期研究主要通过多孔或粉末材料的冲击压缩，获得在固体材料中无法获得的热力学状态，以研究完全物态方程，此类研究关注高压区域，忽略粉末材料的自身强度[1–2]。粉末的冲击压实利用冲击波作用于非晶或纳米晶粉末，在瞬态高温高压下得到近乎致密的块体，且仍保持原始晶粒尺寸，是制备亚稳态材料的一种非常有潜力和前景的方法。为了避免高压导致的高温和裂纹问题，往往在 1～10 GPa 的低压范围内实现压实，因此，粉末在低压区的致密化行为对于粉末冲击压实研究非常重要。

粉末在低压区的冲击压实是一个复杂的过程，受到多种因素的影响，包括粉末材料的弹塑性、初始颗粒的大小和形状等[3]。为了在较宽的压力范围内更好地描述粉末的压实过程，一般将这一过程分解为弹性段和塑性段，如图 1 所示，其中：α_E、p_E 为弹性段结束时的孔隙度和压力，由于在整个压缩过程中，弹性段仅占很小部分，一般都忽略不计，多数模型取$\alpha_E = \alpha_0$；当压力超过 p_E 后，进入塑性段，随着颗粒形变和孔隙坍缩，孔隙率逐渐降低，压力达到 p_S 时，粉末完全压实，p_S 也被称为压溃强度。目前已经有较多模型描述粉末压实响应，但存在两个假设前提：(1)忽略了剪切强度；(2)在同等压力、温度条件下，粉末和固体材料的比内能是相等的。假设(1)使得模型只能描述由于孔隙闭合导致的不可逆压实；假设(2)忽略了孔隙和颗粒的表面能，更适合描述颗粒较大的粉末体系。

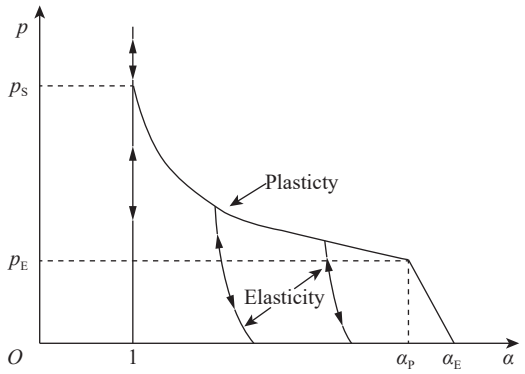

图 1 粉末或多孔材料低压区域冲击压缩行为示意图

Fig. 1 Compressive behavior of powder or porous material

* **收稿日期：**2019-05-27；**修回日期：**2019-06-11

作者简介：高明悦(1993—)，女，硕士，主要从事混合粉末冲击压缩行为研究. E-mail: 343702781@qq.com

通信作者：周 强(1983—)，男，博士，特别副研究员，主要从事材料冲击动力学、爆炸加工等方面研究. E-mail: zqpcgm@gmail.com

在众多描述颗粒或粉末材料动态压实行为的模型中，以 p-α模型[4–7] 和 p-λ模型[8] 应用最为广泛，是典型的描述型模型，这类模型结合了粉末材料本征特性，通过实验数据拟合获得模型的关键参数。尽管模型的具体形式不同，但都包含一个或者多个经验拟合参数。通常情况下这些参数与可测量的物理参数没有直接关系，只是为了使模型更好地与实验数据匹配，这种灵活性使模型可以很好地描述某种特定粉末系统的冲击压实过程。

对于由不同性质粉末组成的混合物，粉末冲击压实过程变得更加复杂。目前并没有有效的方法建立混合粉末冲击压缩方程，一般可通过 0 K 混合法则[9–10] 或质量分数加权平均法则[11–12] 先得到混合固体 Hugoniot 线，再经等容 Mie-Grüneisen 方法计算得到粉体的冲击压缩方程，但这种方法的计算过程繁琐，需要专门程序计算，而且其有效性缺乏实验验证。

本研究测量了 W-Cu 混合粉末的 Hugoniot 数据，系统分析了测量误差；然后分别应用 p-α和 p-λ等模型对测量数据进行拟合；利用 Mie-Grüneisen 方法[13] 得到同孔隙度的 W、Cu 单质粉末的 Hugoniot 线，按照 Barry 等压混合法则[14] 预测同孔隙度的 W-Cu 混合粉末的 Hugoniot 线，并与测量得到的数据进行对比，探讨 p-α和 p-λ等模型在描述混合粉末冲击压缩行为时的适用性和经单质粉末 Hugoniot 线预测混合粉末 Hugoniot 线的可行性。

1　实验测试

1.1　W-Cu 混合粉末 Hugoniot 测量实验装置

实验使用的 W 和 Cu 单质粉末均为市购，纯度均为 99.9%，粉末粒度均为 1 μm。W、Cu 粉按照质量比 76∶24 混合，经 V 型混料机混合均匀得到 W-Cu 混合粉末。图 2 为实验测量所用装置的结构示意图，将无氧铜基板和约束环依次安装于中空的 304 不锈钢套筒后，形成一个容器，再依次装入 W-Cu 混合粉末和蓝宝石窗口，并通过背板确保粉末后表面与窗口材料紧密接触。实验使用二级轻气炮进行加载，飞片使用与基板同材质的无氧铜，应用光纤位移干涉仪（Displacement interferometer system for any reflector, DISAR）[15]，通过基板背面和窗口背面设置的 4 个光纤探头，分别记录冲击波抵达粉末样品上下表面的时间，探头布置的空间位置如图 3 所示。

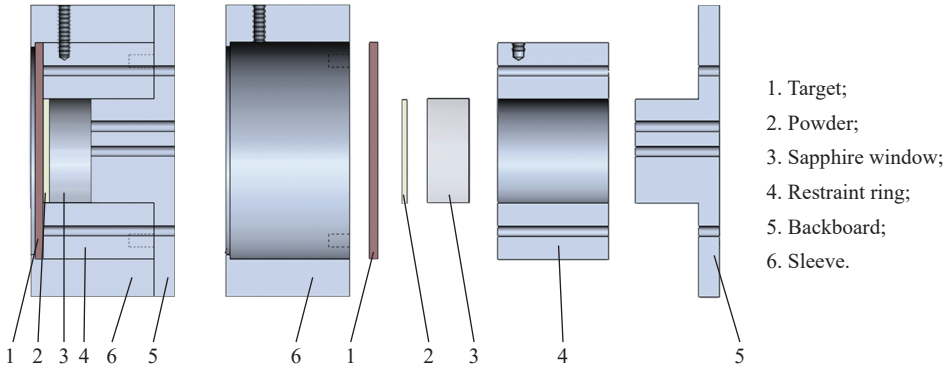

图 2　零件拆分及装配图

Fig. 2　Parts split diagram and assembly diagram

2　参数测量及误差分析

2.1　粉末初始密度

粉末初始密度ρ_{00}主要通过调整粉体厚度来控制，粉末厚度由组装件整体厚度减去基板中心、蓝宝石窗口及背板厚度计算得到。厚度测量精度为 10^{-4} mm，粉末质量称量精度为 10^{-3} g。每组取多次测量的平均值，并在初始密度的不确定度分析中加入了每个位置测量的方差。粉末中存在局部的不均匀

性, 但无法确定不均匀部位的位置和范围, 因此初始孔隙密度ρ_{00}的测量误差取最大值, 即直接取粉体厚度测量的最大值和最小值来确定。初始密度的测量误差会在阻抗匹配计算中传递, 对 Hugoniot 参数 (u_P, p 和 V) 的测量误差影响较大。

2.2　飞片速度

飞片速度 v_I 由炮口的电磁线圈测量得到, 该系统的测量误差为 0.5%。由于飞片在炮膛中会发生偏转, 形成的倾角可由图 3 中 1、2 号探针确定后扣除。

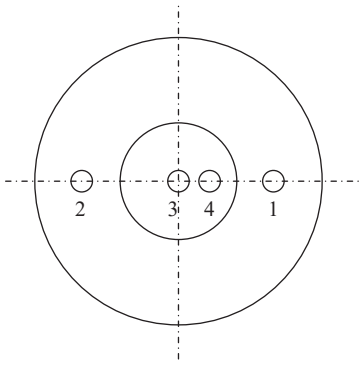

图 3　探针位置

Fig. 3　Probe location

2.3　冲击波速度

冲击波速度 u_S 根据冲击波分别到达图 3 中 1、2 号探针和 3、4 号探针记录的时间和粉末厚度计算得出, 即 $u_S = \Delta x_i/\Delta t_i$, 其中$\Delta x_i$和$\Delta t_i$分别是粉末厚度和冲击波传播时间。粉末厚度的标准差为 $\delta(\Delta x_i) = (\delta x_B^2 + \delta x_W^2)^{1/2}$, 其中 x_B 表示基板位移, x_W 表示粉末厚度[16]。Δt_i即冲击波分别抵达 1、2 号探针和 3、4 号探针的时间差, 其标准差为$\delta(\Delta t_i)$。图 4 所示为粉体上下表面处探针的 DISAR 信号。由于飞片飞行过程中会发生偏转, 1、2 号探针信号存在时间差, 也会导致冲击波速度测量误差, 这一误差也体现在$\delta(\Delta t_i)$中。在两个标准差范围内一个实验的平均冲击速度总误差为

$$\frac{\delta u_S}{u_S} = \left[\sum_i 2\left[\frac{\delta(\Delta x_i)}{\Delta x_i}\right]^2 + \sum_i 2\left(\frac{\delta(\Delta t_i)}{\Delta t_i}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}} \tag{1}$$

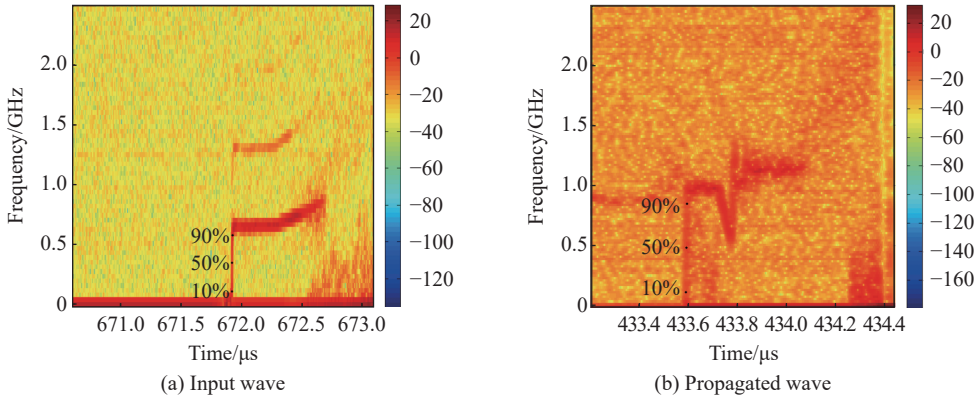

图 4　典型的入射波(a)和传播波(b)的 DISAR 轮廓曲线(显示了结构化波形, 以及 50% 的均衡到达时间和 10%、90% 的不确定到达时间, 用于计算冲击波速度)

Fig. 4　Typical extracted profile for input (a) and propagated waves (b) that illustrating structured waveforms (Locations of 50% equilibrium time of arrival and 10% and 90% uncertainty arrival times used for calculation of shock velocity are also marked.)

2.4　粒子速度

粉末的粒子速度 u_P 使用阻抗匹配法计算, 计算原理和误差分布如图 5 所示。根据文献 [17], 粒子速度的总误差是系统误差和实验误差之和, 即$\delta u_P = \delta u_P^E + \delta u_P^S$。粉末粒子速度的系统误差是

$$\delta u_P = \left[\left(\delta u_{P,I-B}^S\right)^2 + \left(\delta u_P^S\right)^2\right]^{1/2} \tag{2}$$

式中: $u_{P,I-B}^S$表示靶板 Hugoniot 误差, u_P^S表示靶板等熵线上的误差。实验误差为

$$\delta u_P^E = \left\{[\delta u_P(u_S)]^2 + [\delta u_P(v_I)]^2 + [\delta u_P(\rho_{00})]^2 + [\delta u_P(\rho_{0I})]^2[\delta u_P(\rho_{0B})]^2\right\}^{1/2} \tag{3}$$

式中: ρ_{0I}和ρ_{0B}分别是飞片和基板的初始密度。

2.5 压　力

压力的初始值 p_0 和粉末初始速度 u_0 等于零，则粉末中的压力 p 可直接由下式计算

$$p=\rho_0(u_S-u_0)u_P \tag{4}$$

压力的误差 $\delta p/p$ 也包括系统误差和实验误差。由于 p 是 ρ_{00}、u_S、u_P 的函数，因此，压力 p 的系统误差为

$$\frac{\delta\sigma}{\sigma}=\frac{\delta\rho_{00}}{\rho_{00}}+\frac{\delta u_S}{u_S}+\frac{\delta u_P}{u_P} \tag{5}$$

实验误差为[17]

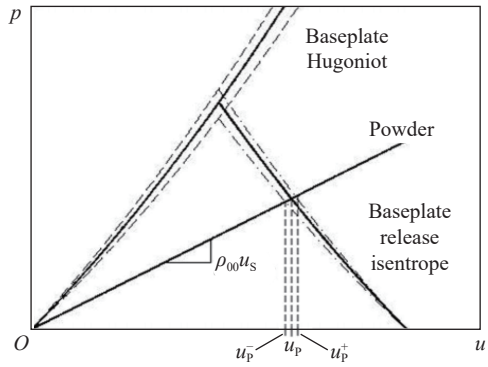

图 5　计算原理和误差分布

Fig. 5　Calculation principle and error distribution

$$\left(\frac{\delta\sigma}{\sigma}\right)_E=\left\{\begin{array}{l}\left(1+\frac{u_S}{u_P}\frac{\partial u_P}{\partial u_S}\right)^2\left(\frac{\partial u_S}{u_S}\right)^2+\left(1+\frac{\rho_{00}}{u_P}\frac{\partial u_P}{\partial\rho_{00}}\right)^2\left(\frac{\partial\rho_{00}}{\rho_{00}}\right)^2+\left[\frac{\partial u_P(v_1)}{u_P}\right]^2+\\ \left(\frac{\partial u_P(\rho_{0I})}{u_P}\right)\left[\frac{\partial u_P(\rho_{0I})}{u_P}\right]^2+\left(\frac{\partial u_P(\rho_{0B})}{u_P}\right)\left[\frac{\partial u_P(\rho_{0B})}{u_P}\right]^2\end{array}\right\}^{\frac{1}{2}} \tag{6}$$

2.6 冲击压缩比容

粉末中的冲击压缩比容 V 由 $V=V_0[1-(u_P-u_0)/(u_S-u_0)]$ 计算得到，其中 $V=1/\rho$。V 的系统误差为 $(\delta V/V)_S=(\eta-1)\left|\delta u_P^S\right|/u_P$，其中 η 是粉末压缩度，$\eta=\rho/\rho_{00}$。实验误差是

$$\left(\frac{\delta V}{V}\right)_E=\left\{(\eta-1)^2\left(1-\frac{u_S}{u_P}\frac{\partial u_P}{\partial u_S}\right)^2\left(\frac{\partial u_S}{u_S}\right)^2+\left[1+(\eta-1)\frac{\rho_{00}}{u_P}\frac{\partial u_P}{\partial\rho_{00}}\right]^2\left(\frac{\partial\rho_{00}}{\rho_{00}}\right)^2+(\eta-1)^2F^2\right\} \tag{7}$$

式中：$F^2=\left[\frac{\partial u_P(V_1)}{u_P}\right]^2+\left[\frac{\partial u_P(\rho_{0I})}{u_P}\right]^2+\left[\frac{\partial u_P(\rho_{0B})}{u_P}\right]^2$

2.7 测量结果分析

实验测量的所有 Hugoniot 参数及其误差范围如表 1 所示。可以看到 u_S 的误差较大，主要是粉体厚度测量误差较大所致，也导致粉末初始密度和压缩密度误差均接近 10%。压力超过 4 GPa 后，粉体已接近致密。

表 1　实验相关参数计算结果及误差范围

Table 1　Calculated results and errors of the related experimental parameters

No.	ρ_{00}/(g·cm^{-3})	v_I/ (km·s^{-1})	u_S/(km·s^{-1})	u_P/(km·s^{-1})	p/GPa	ρ/(g·cm^{-3})
1	10.696±0.910	0.622±0.003	1.254±0.041	0.457±0.019	6.126±0.434	16.826±1.122
2	10.484±0.731	0.270±0.001	0.913±0.055	0.213±0.013	2.038±0.223	13.668±0.536
3	10.707±1.229	0.784±0.004	1.549±0.089	0.546±0.028	9.056±0.913	16.639±1.324
4	10.237±1.370	0.508±0.003	1.107±0.030	0.388±0.016	4.392±0.211	15.752±1.370

3　模型拟合

3.1　p-α模型

p-α模型被广泛用于描述均质和非均质粉末的弹塑性压实响应[18]。其中 $\alpha=V/V_S$ 是一个描述粉末膨胀程度的参数，V 是粉末的比容，V_S 是相应固体材料在相同温度 T 和压力 p 下的比容。p-α模型具有不同的表达形式，本研究仅关注其中最常见的 3 种。

3.1.1　二次改进模型(Modified quadratic, MQ)

p-α模型常用于描述动态冲击加载下塑性多孔材料的冲击特性。当应力范围较大时,要分解为弹性和塑性两部分。此模型中忽略了剪切强度的存在,并且假设在等温等压下,多孔材料和固体材料的内能相等。在低压力段,弹性压实响应决定压实行为和从部分压实状态下的释放过程。通常初始的弹性状态α_E很小,在计算中经常会忽略,或设为$\alpha_E = \alpha_0$直到达到阈值压力。

塑性变形中的α是对 Butcher 和 Karnes 方法[6] 的二次改进。一般公式如下

$$\alpha = 1 + (\alpha_E - 1)\left(\frac{p_S - p}{p_S - p_E}\right)^N \tag{8}$$

式中: N 是经验拟合参数,可以视实验具体情况改变。

3.1.2　静态球面公式(Static spherical, SS)

Carroll 和 Holt[7] 通过将多孔材料中孔洞的坍塌用一个由相同密度的空心球的压实相平衡来补充 p-α模型。假设应力张量为球形,只考虑压力 p。静态球形公式可对压实响应进行预测,因此压实响应由材料性质和孔洞的几何形状决定。假设固体材料不可压缩,将孔洞坍塌分为 3 个区域。在最初的弹塑性区,观察到在压力达到临界值前孔隙度基本没有发生变化。这使压实过程可以得到简化: 在压实过程的前两个区域,压力小于 p_E 时孔隙率的变化可以忽略不计。p_E 的大小使用下式计算

$$p_E = \frac{2}{3} Y \ln \frac{\alpha_0}{\alpha_0 - 1} \tag{9}$$

式中: Y 是固体材料的屈服强度,α_0是初始孔隙度。压力大于 p_E 时为第 3 个阶段,材料塑性变形,压实由孔洞坍塌造成,此时的孔洞坍塌关系可以用下式简化

$$\alpha = \left(1 - \mathrm{e}^{-3p/2Y}\right)^{-1} \tag{10}$$

静态球面的 p-α模型只考虑了与速率无关的屈服特性,因此可能不适用于高速率敏感粉体材料的压实响应,而且此模型忽略了颗粒形态可能造成的影响。

3.1.3　幂律公式(Power law, PL)

Brown 等[19] 的 p-α模型与前两种不同,他们用同一种机制描述弹塑性压实,直接描述了脆性微粒系统的动态压实,并没有将弹塑性机制分开研究。幂律公式的表达式如下

$$\alpha = (P_S / p)^{\frac{1}{n}} \tag{11}$$

式中: P_S 是压碎强度,n 是经验参数。

3.2　p-λ模型

p-λ模型明确地将单个成分的物质属性包含在一个非均匀混合物中[20]。与 p-α模型类似,该模型使用单内部状态变量 λ 描述压实过程并忽略粉末混合物的剪切强度,只考察了一般的 p-V 响应。该模型分为 3 个不同的区域: 一端为不平衡的弹性响应,另一端为单个分量的压力平衡状态,两者之间为过渡区。假设压力较小时变形是弹性的。使用两种不同的附加模型定义混合物的体积弹性模量 K 和弹性响应: 等压和等应变。等压响应是混合模量的下限,等应变响应是上限。在选择合适的混合模量后,通过应变的定义确定了非平衡弹性区混合物的 p-V 响应; 在原方程的基础上,提出了一个简单的质量分数加性方程。在过渡区,假定材料以非平衡弹性状态和压力平衡状态的某种组合形式存在。材料在给定压力值下的相对量通过变量 k 来分配,k 定义为完全压实状态下的物质质量分数。λ 取值 0～1。当材料完全处于不平衡的弹性状态下 $\lambda = 0$; 当材料处在压力平衡状态时,$\lambda = 1$。λ 的具体函数关系为

$$\lambda = 1 - \mathrm{e}^{-(p/Y)^n} \tag{12}$$

式中: p 是组件的局部压力差异; Y 是固体的屈服强度,当混合物屈服时,会同时在混合物中引发屈服和压实; n 无法从单个组件属性中进行定义。

3.3　拟合结果

为了检验测量数据与模型拟合的精度，必须给出混合粉末的 Hugoniot 线，当压力超过粉体的致密压力后，测量数据点应该落在计算的粉末 Hugoniot 线上。本研究粉末的 Hugoniot 线使用等容 Mie-Grüneisen 方法计算得到。首先，基于 W、Cu 固体 Hugoniot 数据计算得到相同孔隙度的 W、Cu 粉体 Hugoniot 线，再经由 Barry 提出的两相混合 Hugoniot 原理计算得到 W-Cu 混合粉末的 Hugoniot 线。该原理主要存在两个基本假设：

(1)各组分压力相等；

(2)$V(p)=\sum_{i=1}^{n} m_i V_i(p)$, $E_C(V)=\sum_{i=1}^{n} m_i E_{Ci}(V)$, $\sum_{i=1}^{n} m_i=1$, E_C 是材料比内能。

对于 p-α模型，孔隙度α可由 N 和 n 的值经拟合得到，p_E 是从弹性压缩转为塑性压缩的临界值，α_E是相应的孔隙度，p_S 由实验数据和 Mie-Grüneisen 粉末状态方程的交点确定。p-λ模型中的曲线拟合与上述方法类似。混合物的屈服强度 Y 采用体积分数平均法计算。压力计算基于飞片和靶板材料的状态方程(EOS)。所用参数在表 2 中给出，其中 C_0 和 S 是线性冲击状态方程 $u_S=C_0+Su_P$ 参数，γ_0 是 Grüneisen 常数。符合最佳拟合结果的数据在表 3 中给出。

表 2　组分和混合物的相关冲击和材料特性

Table 2　Relevant shock and material properties of constituents and mixtures

Material	ρ_0/(g·cm^{-3})	C_0/(km·s^{-1})	S	γ_0	V_0/(cm^3·g^{-1})	Y/GPa
W	19.35	4.064	1.204	1.78	0.052 0	1.700
Cu	8.93	3.910	1.510	1.97	0.112 1	0.065
W-Cu	15.117	4.027	1.277	1.83	0.066 4	1.030

表 3　模型拟合参数

Table 3　Model fitting parameters

Model	Parameters			
	p_S/GPa	p_E/GPa	α_E	N
p-α(MQ)	4.60	0.057 7	1.359	1.952
p-α(PL)	p_S/GPa	n		
	4.60	7.80		
p-α(SS)	Y/GPa			
	1.273 4			
p-λ	n			
	1.51			

图 6 为多个模型的拟合结果。可以看到粉末在 4～5 GPa 压力下达到致密，压力继续升高后，数据点落到计算得到的粉体 Hugoniot 线上。除 p-α PL 模型外，其他模型均较好地描述了 W-Cu 混合粉末的冲击压缩响应。但在孔隙度接近零时，预测结果均与计算的粉末 Hugoniot 线有一定偏差，这是由于 Mie-Grüneisen 方法忽略了材料强度和实验初始孔隙度测量误差所致。p-α MQ 和 p-α PL 模型中都存在压溃强度 p_S，经拟合得到 p_S=4.6 GPa；参数 N 影响曲线的曲率，N 取值大则曲率增加，p-α PL 模型受 N 取值影响较大，拟合效果较

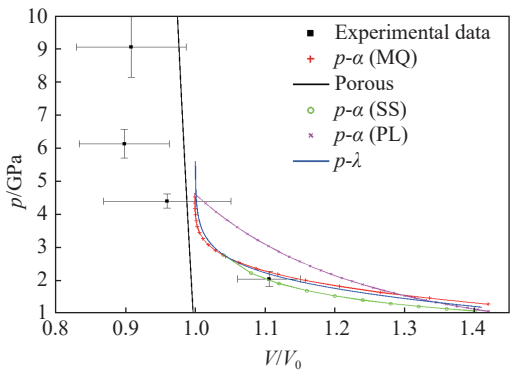

图 6　4 种模型拟合结果

Fig. 6　Fitting results of four models

差。p-α SS 模型仅受粉末的屈服强度 Y 的影响，完全忽略了粉末的微观尺度效应（颗粒形状和大小），但得到了较好的拟合结果，预测的压溃强度 p_S 为 4～5 GPa，与 p-α MQ 和 p-α PL 模型一致。p-λ模型也可以较好地描述低压段的冲击压实响应，但孔隙度无限接近于零时，在屈服强度 Y 一定的前提下，参数 n 的取值决定了曲线的曲率，当 n 减小时，曲率减小，p_S 急剧增大，而 Y 的取值影响 p_E 的值。由于低于 4 GPa 的数据点仅有一个，所以很难确定其余模型哪个更适合描述 W-Cu 混合粉末的冲击压缩响应。拟合过程中发现，所有模型通过参数调整都可以获得较好的拟合效果，是典型的描述型模型，预测性较差。如 p-α MQ 和 p-α PL 模型中的参数 p_S 无法通过实验测量，p-α SS 和 p-λ模型中的 Y 受混合颗粒特性（如颗粒的尺寸、颗粒级配和颗粒形状等）的影响显著，无法准确预测。此外，除 p-α PL 模型外，其余模型均能很好地描述粉末压缩中由弹性转塑性的行为，而 p-α PL 模型经参数调整后也可以描述这一转变，但其曲线曲率变小，如图 6 所示，与实验数据差别较大。

4　结　论

测量了 W-Cu 混合粉末的 Hugoniot 数据，系统分析了测量误差，发现粉末致密度测量精度对结果影响较大。利用 Mie-Grüneisen 方法和 Barry 等压混合法，可以利用单质 W、Cu 粉末的 Hugoniot 关系很好地预测同孔隙度 W-Cu 混合粉末的 Hugoniot 线，但由于忽略了粉体强度和粉体初始密度测量误差较大的原因，预测结果在低压段与实验偏差较大。分别应用 3 种 p-α模型和 p-λ模型对实验结果进行拟合，发现除 p-α PL 模型外，其他模型均能较好地描述 W-Cu 混合粉末的冲击压缩响应，表明这些原本用于描述单质粉末的冲击压实响应的模型对于更为复杂的混合粉末也是适用的，但所有模型的拟合精度均受经验参数选择的影响，预测能力较差。

参考文献:

[1] ALTSHULER L V, KRUPNIKOV K K, LEDENEV B N, et al. Dynamic compressibility and equation of state for iron under high pressure [J]. Soviet Physics-JETP, 1958: 34.

[2] MCQUEEN R G, MARSH S P, TAYLOR J W, et al. The equation of state of solids from shock wave studies [M]. Los Alamos, New Mexico: University of California, 1970: 293–417.

[3] FREDENBURG D A. Shock compaction and impact response of thermit powder mixtures [D]. Georgia: Georgia Institute of Technology, 2010.

[4] HERRMANN W. Constitutive equation for the dynamic compaction of ductile porous materials [J]. Journal of Applied Physics, 1969, 40(6): 2490–2499.

[5] DAI C D, EAKINS D E, THADHANI N N. Dynamic densification behavior of nanoiron powders under shock compression [J]. Journal of Applied Physics, 2008, 103(9): 093503.

[6] BUTCHER B M, KARNES C H. Dynamic compaction of porous iron [J]. Journal of Applied Physics, 1969, 40(7): 2967–2976.

[7] CARROLL M M, HOLT A C. Static and dynamic pore - collapse relations for ductile porous materials [J]. Journal of Applied Physics, 1972, 43(4): 1626–1636.

[8] GRADY D, KERLEY E G I, KUHNS L D, et al. Computational modeling and wave propagation in media with inelastic deforming microstructure [J]. Journal de Physique, IV: Proceedings of International Conference, 2000, 10(9): 15–20.

[9] MEYERS M A. Shock waves: equations of state [M]. John Wiley & Sons, Inc., 2007.

[10] MCQUEEN R G, MARSH S P. Equation of state for nineteen metallic elements from shock - wave measurements to two megabars [J]. Journal of Applied Physics, 1960, 31(7): 1253–1269.

[11] ALEKSEEV Y F, AL'TSHULER L V, KRUPNIKOVA V P. Shock compression of two-component paraffin-tungsten mixtures [J]. Journal of Applied Mechanics Technical Physics, 1971, 12(4): 624–627.

[12] BATSANOV S S. Effects of explosions on materials [M]. New York: Springer, 1994.

[13] MEYERS M A. Dynamic Behavior of Materials [M]. San Diego: University of California, 1994.

[14] KRUEGER B R, MUTZ A H, VREELAND T. Correlation of shock initiated and thermally initiated chemical reactions in a

1∶1 atomic ratio nickel - silicon mixture [J]. Journal of Applied Physics, 1991, 70(10): 5362–5368.

[15] WENG J, TAN H, WANG X, et al. Optical-fiber interferometer for velocity measurements with picosecond resolution [J]. Applied Physics Letters, 2006, 89(11): 111101.

[16] FREDENBURG D A, KOLLER D D, RIGG P A, et al. High-fidelity Hugoniot analysis of porous materials [J]. Review of Scientific Instruments, 2013, 84(1): 013903.

[17] MITCHELL A C, NELLIS W J. Shock compression of aluminum, copper, and tantalum [J]. Journal of Applied Physics, 1981, 52(5): 3363–3374.

[18] FREDENBURG D A, THADHANI N N. On the applicability of the P-α and P-λ models to describe the dynamic compaction response of highly heterogeneous powder mixtures [J]. Journal of Applied Physics, 2013, 113(4): 043507.

[19] BROWN J L, VOGLER T J, GRADY D E, et al. Dynamic compaction of sand [C]//Shock Compression of Condensed Matter-2007, 2007: 1363–1366.

[20] NEEL C H. Shock compression of a heterogeneous, porous polymer composite [J]. Dissertations & Theses-Gradworks, 2010.

p-α and p-λ Model for Describing Shock Compressive Behavior of W-Cu Powder Mixture

GAO Mingyue, ZHOU Qiang

(*State Key Laboratory of Explosion Science and Technology*, *Beijing Institute of Technology*, *Beijing* 100081, *China*)

Abstract: This study investigated the applicability of three p-α models and p-λ model for predicting shock compaction response of heterogeneous W-Cu powder mixture. Mie-Grüneisen method and Barry isobaric mixing method were employed to predict the Hugoniot of W-Cu powder mixture with the same porosity based on the Hugoniot relationships. At high pressure section, the results were in good agreement with the experimental results, but it deviated greatly at the low pressure section. The p-α models and p-λ model were applied to fit the experimental results, and it was found that all the other models were able to describe the shock compression response of W-Cu powder mixture except p-α PL model. The crush strength and compression path of all models are different due to selection of empirical parameters, and they are with poor prediction function.

Keywords: W-Cu powder mixture; shock compressive; p-α model; Hugoniot measurement