

金属粉体高速压制成形过程的应力—应变曲线特征分析

郑洲顺¹, 徐勤武¹, 朱远鹏¹, 曲选辉²

- (1. 中南大学 数学科学与计算技术学院, 长沙 410083;
2. 北京科技大学 材料科学与工程学院, 北京 100083)

摘要: 基于高速压制成形的工艺原理, 对金属粉体成形过程中的高应变率、粘性效应和硬化速率先上升后下降的变形特性进行分析。将非线性弹簧、线性弹簧和高应变率 Maxwell 单元并联构成复合非线性粘弹滞体, 并用来描述压制过程中金属粉体的高应变率和粘性效应特征; 将非线性弹簧的形变指数视为应变的函数, 用形变指数在压制过程中的变化来描述金属粉体硬化速率先上升后下降的变形特征, 构建金属粉体高速压制成形的本构关系。分别用线性、二次和三次函数来近似形变指数, 分析相应的应力—应变曲线。结果表明: 所构建的本构方程能描述金属粉体高速压制成形的变形特性。

关键词: 高速压制成形; 高应变率; 加工硬化; 应力—应变曲线

中图分类号: TF12

文献标志码: A

Characteristics analysis of stress—strain curves of metal powders during high velocity compaction process

ZHENG Zhou-shun¹, XU Qin-wu¹, ZHU Yuan-peng¹, QU Xuan-hui²

- (1. School of Mathematical Science and Computing Technology, Central South University, Changsha 410083, China;
2. School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Based on the mechanism of high velocity compaction, the deformation characteristics of metal powder during the forming process were analyzed, which include high strain rate, viscous effect and first increasing then decreasing characteristics of hardening velocity. The non-linear spring, linear spring and high strain rate Maxwell element were combined to form a composite nonlinear viscoelastic body, which was used to describe the high strain rate and viscous effect of metal powders. The deformation index of the term of nonlinear spring was viewed as a function with respect to strain, and the change of deformation index was used to describe the first increasing then decreasing characteristics of hardening velocity of powder in high velocity compaction. The constitutive relation of metal powder in high velocity compaction was established. The deformation function was approximated to deformation index by linear, quadratic and cubic polynomial and the corresponding stress—strain curves were analyzed respectively. The results indicate that the deformation characteristics of metal powder in high velocity compaction can be described by the constitutive equation.

Key words: high velocity compaction; high strain rate; work hardening; stress—strain curve

2001 年, 在美国金属粉末联合会上, 瑞典 Hoaganas AB 公司的 SKOGLUND^[1]提出一种高速压制

(High velocity compaction, HVC) 技术。HVC 技术是在压制压力为 600~1 000 MPa、压制速度为 2~30 m/s 的

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目(2011CB606306); 国家自然科学基金资助项目(50874123); 中南大学研究生教育创新工程项目(2009ssxt114)

收稿日期: 2010-04-23; 修订日期: 2010-07-29

通信作者: 郑洲顺, 教授, 博士; 电话: 0731-88660172; E-mail: zszheng@mail.csu.edu.cn

条件下对粉体进行高能锤击, 冲击能量在上模冲与压坯之间的传递以应力波的形式进行^[2]。HVC 技术突破了粉末冶金局限性, 是传统粉末压制成形技术一种极限式外延的结果^[3-4]。目前, 国内外对该技术的研究主要集中于铁粉^[5-8]、不锈钢粉^[9]、聚合物^[10-11]和铜粉^[12]等的实验研究, 对高速压制成形过程中的冲击能量、冲击速度、生坯密度及弹性后效等之间的相互关系的研究甚少^[13]。

为了缩短粉末压制成形的设计周期, 降低设计成本, 经验性的试错法已逐渐被计算机模拟手段取代^[13-14]。建立粉体高速压制过程的本构方程是对高速压制成形过程进行数值模拟和相关问题研究的关键。国外对粉末高速压制成形变形特征的研究主要集中于 kawakita 经验压制方程, SETHI 等^[15]基于该 kawakita 本构方程对高速压制成形与传统压制成形进行比较。果世驹等^[16]推导通用压制方程。这些压制方程给出生坯密度与压制压力的关系, 但未能描述压制过程中粉末应力—应变曲线的特征。本文作者基于金属粉体在高速压制过程中具有高应变率、粘性和硬化速率先上升后下降的特征 构造能描述粉体高速压制变形特征的本构关系并分析相应应力—应变曲线的特征 以期对粉体高速压制的数值模拟、实验和实际应用提供理论依据。

1 高速压制成形粉体的变形特征

HVC 的基本原理如图 1 所示。在 0.02 s 内完成一次对金属粉体的高速压制, 金属粉体的应变率属于高应变率。在高速压制过程中, 应力波的传播将能量传递给金属粉体使其流动, 粉体颗粒首先主要以充填和变形方式进行致密化, 粉体流动变形具有粘性流体特性。粉体在压形时的变形程度远远大于金属内耗或蠕变时的变形程度, 此时必然有粉体的加工硬化, 且硬化速率逐渐上升, 粉体应力—应变关系应有某种非线性弹滞体特征^[17]; 加工硬化速率上升的应力—应变关系在数学上表现为应力对应变的二阶导数大于 0^[18]。且随着粉体生坯密度的增加, 粉体的变形能力也大幅下降, 这时粉体的变形行为接近于线性弹性体, 粉体应力—应变关系应主要表现为线性弹性体特征。由于透射和反射应力波的持续作用以及粉体颗粒间的摩擦产生热量的积累, 粉体颗粒边界产生高温并蔓延, 粉体颗粒群大范围发生焊接, 压坯进一步密实, 导致粉体出现加工硬化速率下降现象。硬化速率下降的应力—应变关系在数学上表现为应力对应变的二阶导数小于 0^[17]。РЕЩЕТНИКОВ 等^[19]发现, 在高速压制的瞬

间, 压坯温度迅速上升, 最高可达 210 °C; 当卸除载荷后, 温度急剧下降, 然后缓慢降至室温。试验还发现, 一个质量为 18.5 g 的铁基压坯, 在 7 m/s 的压制速度下, 基体温度可达 62 °C, 在颗粒接触处温度可达 1 000 °C^[20], 这也说明高速压制过程会产生硬化速率下降现象。由此可见, 金属粉体在高速压制过程中具有高应变率、粘性和硬化速率先上升后下降的变形特征。

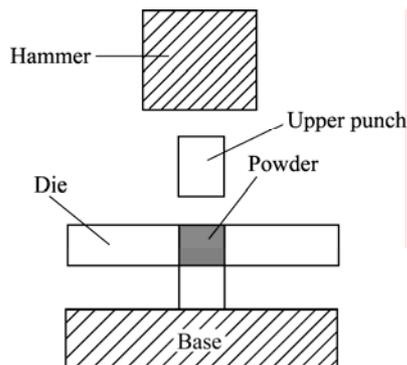


图 1 HVC 的基本原理

Fig.1 Basic principle of HVC

2 金属粉体高速压制成形应力—应变关系的建立

由于金属粉体在高速压制过程中会产生加工硬化速率先上升后下降的现象, 粉体应力—应变关系应有某种非线性弹滞体特征。最简单的非线性弹滞体如图 2 所示, 其应力—应变关系服从^[21]

$$\sigma = E_0 \varepsilon^m \quad (1)$$

式中: σ 、 ε 、 E_0 和 m 分别表示应力、应变、弹性模量和硬化指数; 当 $m > 1$ 时, 非线性弹滞体呈硬化现象; 当 $m < 1$ 时, 非线性弹滞体呈软化现象。

实际体系一般呈现先服从线性规律然后逐渐变为服从非线性规律, 在本构方程(1)中, 当 $m > 1$ 时, 若 $\varepsilon \ll 1$, 则对应的 σ 值更小, 不能描述体系一般呈现先服从线性规律的特征。描述体系的这种变形规律可用图 3 所示的由一个线性弹性体与一个非线性弹滞体并联所组成的非线性弹滞体来描述。其应力—应变关系服从

$$\sigma = E_0 \varepsilon^m + E_1 \varepsilon \quad (2)$$

当 $m > 1$, $\varepsilon \ll 1$ 时, 非线性弹滞体的作用很小, 线性弹性体起主要作用, 此时本构方程(2)呈现线性规律。这种非线性弹滞体与为数众多的实际材料比较接近^[20]; 当 $m > 1$, 本构方程(2)能够描述高速压制成形

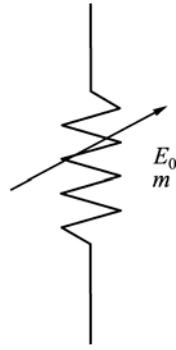


图2 非线性弹滞体模型

Fig.2 Model of nonlinear elastic body

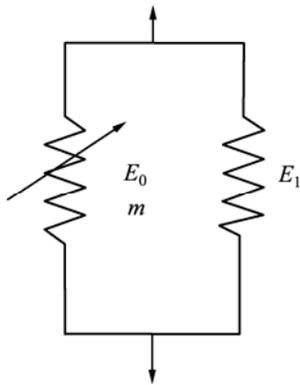


图3 复合非线性弹滞体模型

Fig.3 Model of composite nonlinear elastic body

粉体加工硬化速率上升的变形特征，但其不能描述粉体高速压制成形中高应变率、粘性和硬化速率下降的变形特性。在高速压制成形中，考虑到粉体高应变率和粘性效应的作用，在图3中并联一个高应变率 Maxwell 单元用于描述粉体的高应变率和粘性效应特性，所组成的并联单元结构称为复合非线性粘弹滞体模型，如图4所示。

设复合非线性粘弹滞体受外总应力 σ 作用后，其总应变为 ε ；非线性弹簧元件的应力为 σ_0 ，应变为 ε_0 ；线性弹簧元件的应力为 σ_1 ，应变为 ε_1 ；高应变率 Maxwell 元件的应力为 σ_2 ，应变为 ε_2 。于是，对复合非线性粘弹滞体，有

$$\sigma = \sigma_0 + \sigma_1 + \sigma_2, \quad \frac{\partial \sigma}{\partial t} = \frac{\partial \sigma_0}{\partial t} + \frac{\partial \sigma_1}{\partial t} + \frac{\partial \sigma_2}{\partial t}$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 = \varepsilon_1 = \varepsilon_2, \quad \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \frac{\partial \varepsilon_0}{\partial t} = \frac{\partial \varepsilon_1}{\partial t} = \frac{\partial \varepsilon_2}{\partial t}$$

对非线性弹簧元件，有

$$\sigma_0 = E_0 \varepsilon_0^m = E_0 \varepsilon^m \tag{3}$$

$$\frac{\partial \sigma_0}{\partial t} = m E_0 \varepsilon_0^{m-1} \frac{\partial \varepsilon_0}{\partial t} = m E_0 \varepsilon^{m-1} \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \tag{4}$$

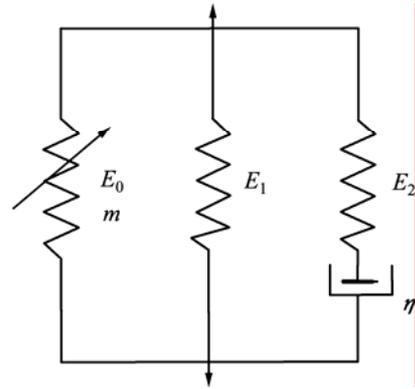


图4 复合非线性粘弹滞体模型

Fig.4 Model of composite nonlinear viscoelastic body

对线性弹簧元件，有

$$\sigma_1 = E_1 \varepsilon_1 = E_1 \varepsilon \tag{5}$$

$$\frac{\partial \sigma_1}{\partial t} = E_1 \frac{\partial \varepsilon_1}{\partial t} = E_1 \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \tag{6}$$

对高频 Maxwell 元件，有

$$\frac{\partial \sigma_2}{\partial t} = \frac{1}{E_2} \frac{\partial \sigma_2}{\partial t} + \frac{\sigma_2}{\eta} = \frac{1}{E_2} \left(\frac{\partial \sigma}{\partial t} - \frac{\partial \sigma_0}{\partial t} - \frac{\partial \sigma_1}{\partial t} \right) + \frac{1}{\eta} (\sigma - \sigma_0 - \sigma_1) \tag{7}$$

式中： η 是黏度系数。

将式(3)~(6)代入式(7)中，引入松弛时间 $\theta = \eta / E_2$ ，可得并联单元结构的本构关系：

$$\frac{\sigma}{\theta} + \frac{\partial \sigma}{\partial t} = \frac{(E_0 \varepsilon^m + E_1 \varepsilon)}{\theta} + (m E_0 \varepsilon^{m-1} + E_1 + E_2) \frac{\partial \varepsilon}{\partial t}$$

此本构关系可表示为积分形式：

$$\sigma = E_0 \varepsilon^m + E_1 \varepsilon + E_2 \int_0^t \dot{\varepsilon}(\tau) \exp\left(-\frac{t-\tau}{\theta}\right) d\tau \tag{8}$$

复合非线性粘弹滞体模型的本构方程(8)能描述高速压制成形金属粉体加工硬化效应、高应变率和粘性效应的变形特征。但是，该本构方程不能描述由于热量的积累导致粉体出现的硬化速率下降现象。因为高速压制成形中粉体具有硬化速率先上升后下降的变形特性，所以本构方程(8)中的硬化指数 m 在整个压制过程中不是一个常数， m 应随着粉体应变 ε 的改变而变化。由于本构方程(8)中的黏性项

$$E_2 \int_0^t \dot{\varepsilon}(\tau) \exp\left(-\frac{t-\tau}{\theta}\right) d\tau$$

只与时间 t 有关, 而与应变 ε 无关, 故由本构方程(8)可得

$$\frac{d^2\sigma}{d\varepsilon^2} = E_0 m(m-1)\varepsilon^{m-2} \quad (9)$$

可见, 当 $m > 1$ 时, 本构方程(8)描述加工硬化速率上升现象; 而当 $m < 1$ 时, 本构方程(8) 描述硬化速率下降现象。根据金属粉末在高速压制成形过程会产生硬化速率先上升后下降的变形特征, m 应随着粉体应变 ε 的改变从大于 1 变化到小于 1, m 为应变 ε 的函数 $m(\varepsilon)$, 称之为形变函数。于是, 由本构方程(8)得金属粉体高速压制成形本构方程为

$$\sigma = E_0 \varepsilon^{m(\varepsilon)} + E_1 \varepsilon + E_2 \int_0^t \dot{\varepsilon}(\tau) \exp\left(-\frac{t-\tau}{\theta}\right) d\tau \quad (10)$$

式中: E_0 、 E_1 、 E_2 和 θ 为材料参数, 可以由实际材料体系确定。通常情况下, 可用线性、二次和三次函数来近似函数 $m(\varepsilon)$ 。

3 金属粉体高速压制成形应力—应变曲线特征分析

通常可将应变率 $\dot{\varepsilon}$ 视为常数, 则由式(10)可得本构方程为

$$\sigma = E_0 \varepsilon^{m(\varepsilon)} + E_1 \varepsilon + E_2 \theta \dot{\varepsilon} [1 - e^{-\varepsilon/(\dot{\varepsilon}\theta)}] \quad (11)$$

下面在式(11)中分别将 $m(\varepsilon)$ 取为线性、二次和三次函数讨论分析金属粉体高速压制成形应力—应变曲线。

3.1 $m(\varepsilon)$ 为线性函数的情况

若 $m(\varepsilon)$ 为线性函数, 则本构方程(11)变为

$$\sigma = E_0 \varepsilon^{-k\varepsilon+b} + E_1 \varepsilon + E_2 \theta \dot{\varepsilon} [1 - e^{-\varepsilon/(\dot{\varepsilon}\theta)}] \quad (12)$$

本构方程(12)中各参数取值如表 1 所列, 金属粉体高速压制成形应力—应变曲线如图 5 所示。

3.2 $m(\varepsilon)$ 为二次函数的情况

若 $m(\varepsilon)$ 为二次函数, 则本构方程(11)变为

$$\sigma = E_0 \varepsilon^{a\varepsilon^2+b\varepsilon+c} + E_1 \varepsilon + E_2 \theta \dot{\varepsilon} [1 - e^{-\varepsilon/(\dot{\varepsilon}\theta)}] \quad (13)$$

表 1 本构方程(12)中各参数取值

$E_0/$ MPa	$E_1/$ MPa	$E_2/$ MPa	k	b	$\theta/$ μs	$\dot{\varepsilon}/$ s^{-1}
110.0	110.0	105.8	0.3	2.2	100	1 000

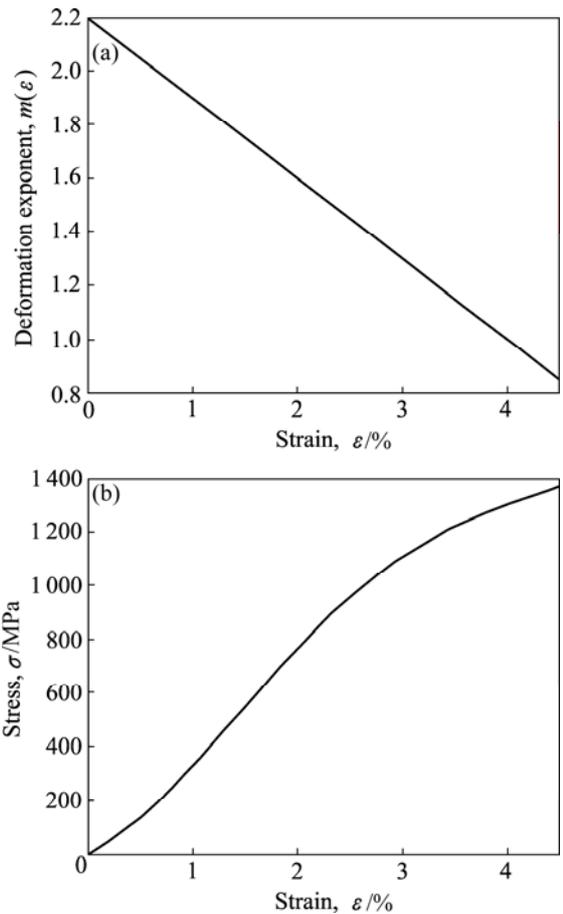


图 5 一次函数 $m(\varepsilon)$ 和应力与应变的关系

Fig.5 Relationships between linear function $m(\varepsilon)$ (a), stress(b) and strain

本构方程(13)中各参数取值如表 2 所列, 金属粉体高速压制成形应力—应变曲线如图 6 所示。

表 2 本构方程(13)中各参数取值

$E_0/$ MPa	$E_1/$ MPa	$E_2/$ MPa	a	b	c	$\theta/$ μs	$\dot{\varepsilon}/$ s^{-1}
55.0	200.0	14.0	-0.13	0.17	2.2	100	1 000

3.3 $m(\varepsilon)$ 为三次函数的情况

若 $m(\varepsilon)$ 为三次函数, 则本构方程(11)变为

$$\sigma = E_0 \varepsilon^{a\varepsilon^3+b\varepsilon^2+c\varepsilon+d} + E_1 \varepsilon + E_2 \theta \dot{\varepsilon} [1 - e^{-\varepsilon/(\dot{\varepsilon}\theta)}] \quad (14)$$

本构方程(14)中各参数取值如表 3 所列, 金属粉体高速压制成形应力—应变曲线如图 7 所示。可以看出, 当 $m(\varepsilon)$ 为三次函数时, 本构方程(14)已经非常复杂, 有 a 、 b 、 c 、 d 4 个待定参数来描述形变特征。

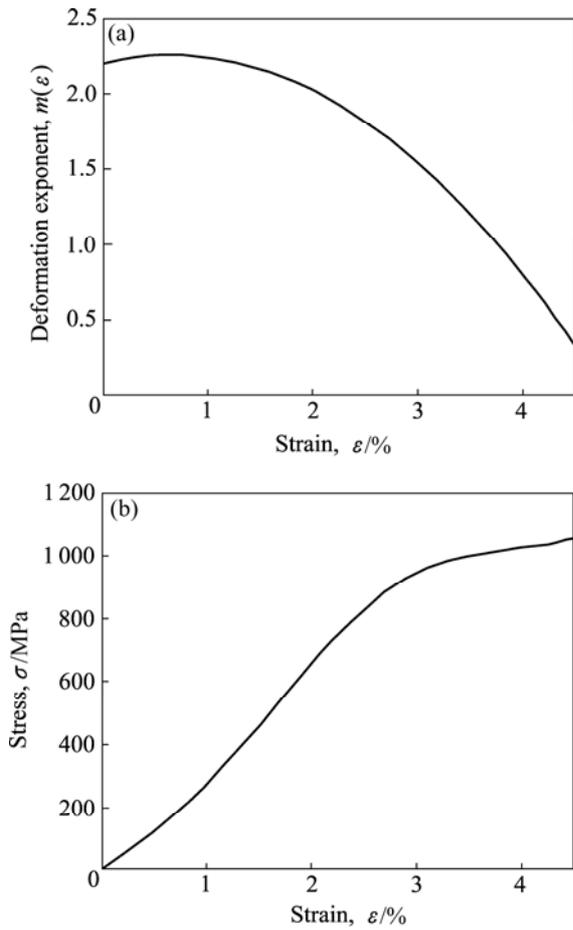


图 6 二次函数 $m(\epsilon)$ 和应力与应变的关系
Fig.6 Relationships between quadratic function $m(\epsilon)$ (a), stress(b) and strain

从图 5~7 可以看出，在形变函数 $m(\epsilon)$ 满足随应变 ϵ 的增大由大于 1 变化到小于 1 的条件下，无论本构方程(10)中 $m(\epsilon)$ 为线性、二次和三次函数，应力—应变曲线均呈现从下凹变化到上凹的过程，即应力对应变的二阶导数由大于 0 变化到小于 0，从而应力—应变曲线很好地描述粉体在高速压制成形过程中硬化速率先上升后下降的变形特征。由于本构方程(10)中还包含高应变率和黏性效应的项，因此，本构方程(10)描述了金属粉末在高速压制成形中高应变率、粘性和硬化速率先上升后下降的变形特征。

表 3 本构方程(12)中各参数取值

Table 3 Parameters values of constitutive equation (14)

E_0/MPa	E_1/MPa	E_2/MPa	a	b	c	d	$\theta/\mu\text{s}$	$\dot{\epsilon}/\text{s}^{-1}$
64.0	145.0	128.0	0.03	-0.25	0.2	2.3	100	1 000

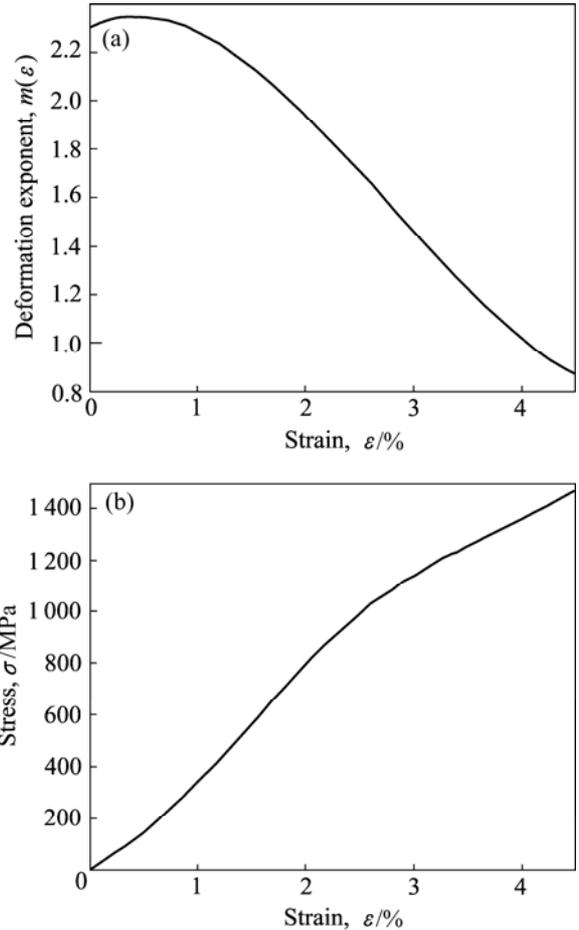


图 7 三次函数 $m(\epsilon)$ 和应力与应变的关系
Fig.7 Relationships between cubic function $m(\epsilon)$ (a), stress(b) and strain

4 结论

1) 由非线性弹簧、线性弹簧和高应变率 Maxwell 单元三者并联组成的复合非线性粘弹滞体可以用来描述 HVC 粉体高应变率、粘性效应特征。

2) 将本构方程中非线性弹簧项的形变指数 m 视为应变 ϵ 的函数 $m(\epsilon)$ ，用 $m(\epsilon)$ 随应变 ϵ 的增大由大于 1 变化到小于 1 可以很好地描述 HVC 过程中粉体硬化速率先上升后下降的变形特征，由此构建能够描述粉体的高应变率、粘性效应和硬化速率先上升后下降变形特征的金属粉体高速压制成形的本构关系。

3) 只要 $m(\epsilon)$ 随应变 ϵ 的增大由大于 1 变化到小于 1，所构建的本构方程均能很好地描述 HVC 过程中粉体高应变率、粘性效应和硬化速率先上升后下降的变形特征。

REFERENCES

- [1] SKOGLUND P. High density PM components by high velocity compaction[C]// 2001 International Conference on Power Transmission Components. Ypsilanti: MPIE, 2001: 16–17.
- [2] 迟悦, 果世驹, 孟飞, 杨霞, 张恒, 连玉栋. 粉末冶金高速压制成形技术[J]. 粉末冶金工业, 2005, 15(6): 41–45.
CHI Yue, GUO Shi-ju, MENG Fei, YANG Xia, ZHANG Heng, LIAN Yu-dong. High velocity compaction in powder metallurgy[J]. Powder Metallurgy Industry, 2005, 15(6): 41–45.
- [3] RICHARD F. HVC punches PM to new mass production limits[J]. Metal Powder Report, 2002, 57(9): 26–30.
- [4] ORBANRL. New research directions in powder metallurgy[J]. Romanian Reports in Physics, 2004, 56(3): 505–516.
- [5] BARENDVANDEN B, CHRISTER F, TOMAS L. Industrial implementation of high velocity compaction for improved properties[J]. Powder Metallurgy, 2006, 49(2): 107–109.
- [6] JONSÉN P, HAGGBLAD H A, TROIVEL, FURUBERG J, ALLROTH S, SKOGLUND P. Green body behavior of high velocity pressed metal powder[J]. Materials Science Forum, 2007, 534/536: 289–292.
- [7] 王建忠, 曲选辉, 尹海清, 周晟宇. 铁粉的高速压制成形[J]. 材料研究学报, 2008, 22(6): 589–592.
WANG Jian-zhong, QU Xuan-hui, YIN Hai-qing, ZHOU Sheng-yu. High velocity compaction of ferrous powder[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2008, 22(6): 589–592.
- [8] WANG J Z, QU X H, YIN H Q, YI M J, YUAN X J. High velocity compaction of ferrous powder[J]. Powder Technology, 2009, 192(1): 131–136.
- [9] ASLUND C. High velocity compaction of stainless steel gas atomized powder[C]// HERBERT D, RAIMUND R. Proceedings of Euro PM 2004 Conference. Shrewsbury, UK: EPMA, 2004: 533–564.
- [10] BRUSKA A, BENGT S, LEIF K. Development of a high-velocity compaction process for polymer powders[J]. Polymer Testing, 2005, 24(4): 909–919.
- [11] JAUFFRÈS O, VIGIERA L G, DORÉ F. Microstructural origin of physical and mechanical properties of ultra high molecular weight polyethylene processed by high velocity compaction[J]. Polymer, 2007, 48(21): 6374–6383.
- [12] 王建忠, 曲选辉, 尹海清, 周晟宇, 易明军. 电解铜粉高速压制成形[J]. 中国有色金属学报, 2008, 18(8): 1498–1503.
WANG Jian-zhong, QU Xuan-hui, YIN Hai-qing, ZHOU Sheng-yu, YI Ming-jun. High velocity compaction of electrolytic copper powder[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2008, 18(8): 1498–1503.
- [13] 周晟宇, 尹海清, 曲选辉. 粉末冶金高速压制技术的研究进展[J]. 材料导报, 2007, 21(7): 79–81.
ZHOU Sheng-yu, YIN Hai-qing, QU Xuan-hui. Research status of high velocity compaction in powder metallurgy[J]. Materials Review, 2007, 21(7): 79–81.
- [14] HAGGBLAD H A, HOCKAUF M, ERIKSSON M. Simulation of high velocity compaction of powder in a rubber mould with characterization of silicone rubber and titanium powder using a modified split Hopkinson set-up[J]. Powder Technology, 2005, 154: 33–42.
- [15] SETHI G, HAUCK E, GERMAN R M. High velocity compaction compared with conventional compaction[J]. Materials Science and Technology, 2006, 22(8): 955–959.
- [16] 果世驹, 迟悦, 孟飞, 杨霞. 粉末冶金高速压制成形的压制方程[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2006, 11(1): 24–27.
GUO Shi-ju, CHI Yue, MENG Fei, YANG Xia. Compaction equation for high velocity compact shaping of powder metallurgy[J]. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy, 2006, 11(1): 24–27.
- [17] 黄培云. 粉末冶金原理[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2004.
HUANG Pei-yun. The principle of powder metallurgy[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2004.
- [18] 王礼立. 应力波基础[M]. 第二版. 北京: 国防工业出版社, 2005.
WANG Li-li. Foundation of stress waves[M]. 2nd ed. Beijing: National Defence Industry Press, 2005.
- [19] РЕЩЕТНИКОВ В Ф, СВИСТУН Л И, СЕРДЮК Г Г. The temperature changes of metal powder during high velocity compaction[J]. Powder Metallurgy, 1983(1): 5–7.
- [20] СЕДЮК Г Г, САХНЕНКО А В, СВНСТУН Л Н. The experience of industry application for high velocity compaction of metal powder[J]. Powder Metallurgy, 2000(9): 108–115.
- [21] 黄培云, 金展鹏, 陈振华. 粉末冶金基础理论与新技术[M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 1995.
HUANG Pei-yun, JIN Zhan-peng, CHEN Zhen-hua. Basic theory and new technology of powder metallurgy[M]. Changsha: Central South University of Technology Press, 1995.

(编辑 李艳红)