

冲击加载条件下金属粉末的动态力学性能分析

罗晓龙, 刘 军[✉], 胡仙平

宁波大学机械工程与力学学院, 宁波 315211

[✉]通信作者, E-mail: liujun@nbu.edu.cn

摘 要 为研究金属粉末在冲击加载过程中, 粉末预压力对压坯动态力学响应的影响, 设计了基于分离式霍普金森压杆装置 (split Hopkinson pressure bar, SHPB) 的金属粉末高应变率冲击加载实验, 并结合一维应力波理论对预压后粉末压坯的力学性能进行分析。结果表明: 在冲击过程中, 金属压坯会表现出较为明显的应变率效应; 加载率越大, 材料的应变能越大, 预压力越大, 应变硬化率越大; 在相同的加载条件下, 预压力越大, 压坯临界位移越小。

关键词 冲击加载; 金属粉末; 应变率; 预压力; 霍普金森压杆

分类号 TF124; TF03+1

Analysis on dynamic mechanics performance of metal powders by impact loading

LUO Xiao-long, LIU Jun[✉], HU Xian-ping

Faculty of Mechanical Engineering & Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China

[✉]Corresponding author, E-mail: liujun@nbu.edu.cn

ABSTRACT A split Hopkinson pressure bar (SHPB) test system was designed to study the dynamic mechanics performance of metal particle by impact loading. The powder mechanical properties were analyzed by one-dimensional stress wave theory. The results show an obviously strain rate effect in the impact compaction process. As the pre-pressure increases, the faster loading rate results in the larger material strain energy, and the strain hardening rate is higher. The critical displacement of green-compacts is decreased with the increase of pre-pressure under the same loading condition.

KEY WORDS impact loading; metal powder; strain rate; pre-pressure; Hopkinson pressure bar

高速压制 (high velocity compaction, HVC)^[1-3] 技术是一种新型的粉末成型技术, 由瑞典的装备制造厂商 Hydropulsor AB 及粉末制造商 Hoganos AB 公司共同开发。高速压制技术^[4]是通过液压驱动的重锤产生高频的冲击波, 在 0.02 s 内将压制能量从压

机传递到粉末压坯当中, 从而实现压坯致密化。

瑞典皇家理工大学的 Azhdar 等^[5-6]对聚合物粉末进行高速压制研究, 发现在粉末体的上方以及下方分别加装一段辅助冲头, 有助于改善所得制品的性能及表面质量。北京科技大学的王建忠^[7]、易明

收稿日期: 2017-09-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (11372148)

DOI: 10.19591/j.cnki.cn11-1974/tf.2018.02.006; <http://journals.ustb.edu.cn>

军等^[8]分别对电解铜粉、水雾化铁粉进行了高速压制实验,分析了总能量、压制次数对压坯相对密度、最大压制力及脱模力的影响;同时还分析了压制速度、应力波、压制力、脱模力等因素对生坯密度的影响。合肥工业大学的王德广^[9]采用分离式霍普金森高速撞击法对粉末压制过程进行了实验研究,并采集到撞击时的应力波波波形。宁波大学的吴斌等^[10]利用有限元原理,对高速压制过程进行了数值模拟,发现了模壁摩擦因数对压坯密度分布的影响规律。实验研究证明,高速压制技术可以用于生产高密度大质量的压坯,并且与常规压制技术相比,压坯密度可以得到显著提高^[11-12],并且该技术还可以与模壁润滑、温压或者复压复烧等技术相结合,使其应用领域进一步拓宽^[13]。高速压制技术凭借其高密度、高强度、高精度和低成本的特点,已广泛应用于金属、陶瓷和聚合物等材料的研究生产之中^[14]。

高速压制之所以能获得更高的压坯密度,主要源于冲击加载,所以金属粉末在冲击加载条件下的动态响应是该技术的主要难点及热点。本文尝试利用一维应力波理论,选取铁粉、铜粉、铝粉三种粉末作为实验材料,先对其进行不同程度的预压,然后利用分离式霍普金森压杆技术,在不同加载条件,对预压后的压坯进行高速撞击实验,研究预压后粉末颗粒的动态力学性能。

1 一维杆上应力波传播理论

一维长杆应力波传播理论是基于均质、各向同性和弹性杆这几个基本假设,忽略杆的横向变形,假设整个长杆的材料是一致的,且不发生弥散。根据假设,杨氏模量(E)和质点密度(ρ)不会随着杆的长度而变化,传统的一维波动方程如式(1)所示^[15]。

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (1)$$

式中: c_0 为杆的波速, $c_0 = (E/\rho)^{1/2}$; x 是质点坐标; u 为质点位移。用达朗贝尔原理可求得式(1)的通解:

$$u_1(x, t) = f(x + c_0 t) + g(x - c_0 t) = u_r + u_i, \quad (2)$$

式中: f 和 g 分别是左行和右行波的随机函数, c_0 为杆的波速, u_r 是反射波在杆中的位移, u_i 是入射波在杆中的位移。式(2)仅适用于与试件接触的入射杆。对于透射杆,只有一个右行波,公式如式(3)所示。

$$u_2(x, t) = h(x - c_0 t) = u_t \quad (3)$$

式中: h 是右行波的随机函数, u_t 是透射波沿杆上的

位移。

分离式霍普金森压杆装置(split Hopkinson pressure bar, SHPB)如图1所示,包括撞击杆、入射杆、透射杆以及夹在入射杆和透射杆之间的试件。压缩空气在快放阀的作用下释放出来,驱使撞击杆高速撞击入射杆,产生弹性压缩波;部分压缩波经试样透射到透射杆上,另一部分则以反射波的形式反射回入射杆上。假设杆中的弹性应力波没有发散,则杆上应变片(距离杆与试件接触处一段距离)测得的波可作为试件与杆界面处的波。依据一维应力波理论可以用应变片上测得的应变来确定试件的响应。

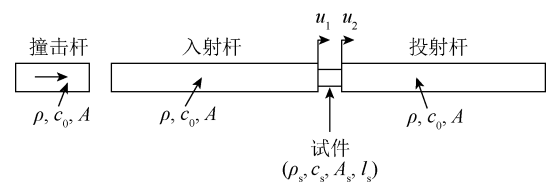


图1 传统霍普金森压杆示意图

Fig.1 General arrangement of a conventional split Hopkinson pressure bar

文中入射杆和透射杆为同一种材料,有相同的截面积(A),密度(ρ)及波速(c_0),试件两个端面分别用下标1和2表示,下标i、r、t分别表示入射、反射、透射, ρ_s 、 A_s 、 l_s 、 c_s 分别表示样品的密度、面积、长度和样品中的波速。计算过程中,应力(σ)取压为正,应变(ε)取收缩为正,速度(v)取向右为正。入射杆和透射杆中的应变由微分方程式(2)和式(3)中关于 x 的方程确定,如式(4)和式(5)所示。

$$\frac{\partial u_1}{\partial x} = f'(x + c_0 t) + g'(x - c_0 t) = \varepsilon_r + \varepsilon_i \quad (4)$$

$$\frac{\partial u_2}{\partial x} = h'(x - c_0 t) = \varepsilon_t \quad (5)$$

将同一方程组对时间求导得到式(6)和式(7)。

$$v_1 = \frac{\partial u_1}{\partial t} = c_0 f'(x + c_0 t) - c_0 g'(x - c_0 t) = c_0 (\varepsilon_r - \varepsilon_i) \quad (6)$$

$$v_2 = \frac{\partial u_2}{\partial t} = -c_0 h'(x - c_0 t) = -c_0 \varepsilon_t \quad (7)$$

式中: v_1 和 v_2 分别代表入射杆和透射杆的速度。对于各向同性变形,试件中的应变率($\dot{\varepsilon}$)可表示为:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{v_1 - v_2}{l_s}, \quad (8)$$

式中: l_s 为试件的瞬时长度。将式(6)和式(7)代入式(8),则应变率($\dot{\varepsilon}$)如式(9)所示。

$$\dot{\varepsilon} = \frac{c_0}{l_s} (-\varepsilon_i + \varepsilon_r + \varepsilon_t) \quad (9)$$

经过预热阶段（该阶段的持续时间取决于材料的波速以及其几何尺寸），试件可被视为达到应力平衡。因此，如果试件为各向同性变形，则试件两端的受力相等，即 $P_1 = P_2$ 。入射杆和透射杆上的力可表示为：

$$P_1 = \frac{A}{A_s} E (\varepsilon_i + \varepsilon_r), \quad (10)$$

$$P_2 = \frac{A}{A_s} E (\varepsilon_t), \quad (11)$$

式中： A 为杆的横截面积， A_s 为试件的横截面积。因为试件两端受力相等，因此可以推导出入射应变、反射应变及透射应变之间的关系，如式（12）所示。

$$\varepsilon_t = \varepsilon_i + \varepsilon_r \quad (12)$$

把式（12）代入式（9），则应变率（ $\dot{\varepsilon}$ ）可写成式（13）。

$$\dot{\varepsilon} = \frac{2c_0}{l_s} \varepsilon_r \quad (13)$$

在入射杆和透射杆上传播的压缩脉冲必须是弹性的，故试件中的应力（ σ_s ）为：

$$\sigma_s = \frac{A}{A_s} E \varepsilon_t, \quad (14)$$

对式（13）求积分，则可以确定试件中的应变（ ε_s ），如式（15）所示。

$$\varepsilon_s = \frac{2c_0}{l_s} \int_0^t \varepsilon_r dt \quad (15)$$

由式（14）和式（15）即可确定应力-应变关系，

试件应力通过透射应变确定，试件应变由反射应变得到。在使用该公式之前，需要假定试件是处于应力平衡状态，应力平衡可以通过比较试件两端的应力是否相等确定。如果应力基本一致，则可以用式（13）、式（14）及式（15）来估算试件在动态载荷下的响应。对于粉末材料而言，由于其在疏松状态下的弹性波速非常低，仅为压杆的 1/5，加之其密度很低，波阻抗也很低，很难达到应力平衡状态。因此，在试验之前先对粉末进行预压，以减少试件长度，从而达到应力平衡状态。传统的分离式霍普金森压杆理论是基于不可压缩固体以确定瞬时横截面积。本实验中，为了减小惯性效应，先将试件预压到 40%~60% 左右的相对密度，对应预压力分别为 60、90、120 MPa。

2 实验方案

试验材料为广州金属冶金有限公司生产的 48 μm 电解铜粉（纯度 $\geq 99.8\%$ ）、75 μm 还原铁粉（纯度 $\geq 98\%$ ）及 150 μm 铝粉（纯度 $\geq 99.8\%$ ），三种粉末所含主要化学成分如表 1~表 3 所示。使用 JM-B 电子天平称取粉末，试验开始前，为保证压坯高径比基本保持一致，称取铝粉 1 g，铜粉和铁粉均为 2 g，每种粉末分别称取 30 份。由于分离式霍普金森压杆实验设备为卧式安置，不适用于离散材料的实验，因此根据本次实验设备的尺寸设计了粉末套筒，套筒内径为 14.6 mm，外径为 20.6 mm，与入射杆、透射杆均属于间隙配合，如图 2 所示。

表 1 铜粉中各元素的化学成分（质量分数）

Table 1 Chemical composition of electrolytic copper powder

Cu	Fe	Pb	As	Sb	O	Bi	Ni	Sn	Zn	S	Cl	氢损
99.800	0.020	0.050	0.010	0.010	0.150	0.002	0.003	0.004	0.004	0.004	0.004	0.100

表 2 铁粉中各元素的化学成分（质量分数）

Table 2 Chemical composition of reduced iron powder

Fe	Mn	Si	C	S	HCl 不溶物	氢损
>98.000	0.300	0.110	0.024	0.020	0.450	0.310

表 3 铝粉中各元素的化学成分（质量分数）

Table 3 Chemical composition of aluminite powder

Al	Cu	Fe	Si	水份
99.8000	0.0014	0.0908	0.0409	0.0100

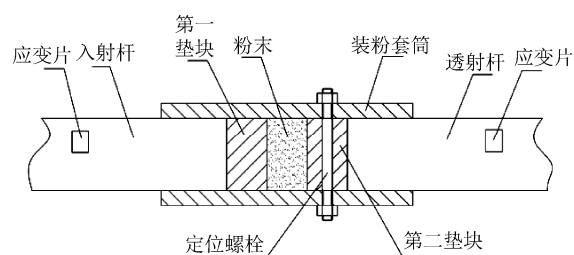


图 2 粉末装粉装置

Fig.2 Device of filling powder

使用 MTS 试验机对装填后的粉末进行预压, 预压力分别为 10、15、20 kN, 对应的压坯所受压强分别为 60、90、120 MPa, 在两种不同预压力下分别压制 10 份。采用 $\phi 14.5$ mm 分离式霍普金森压杆测试系统对预压后的粉末进行高速撞击, 入射杆长为 1000 mm, 透射杆长为 1000 mm, 子弹长为 300 mm, 弹速范围 10.17 ~ 25.94 m/s, 使用 TDS-3014C 数字示波器 (最高采样频率为 1 GHz) 记录压杆测试中输入、输出杆上的入射波、透射波及反射波。为减小套筒内壁的摩擦, 在装入试件前在套筒内壁喷一层脱模剂。压制完成后, 将套筒拿到 MTS 试验机上对压坯进行脱模。

3 结果与分析

图 3 为铁粉在 20 kN 预压后的压坯, 在 0.3 MPa 气压下进行撞击实验得到的原始波形图。由图可知, 加载段波头处的应力波波形存在一定震荡, 震荡幅值随着加载时间的增加而减弱; 透射波应力幅值较大, 且随加载时间增加而提高。

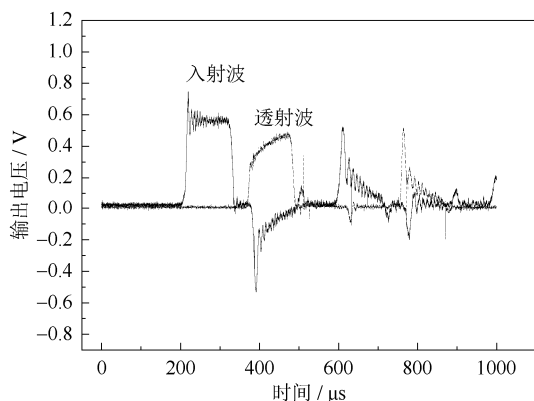


图 3 20 kN 预压后铁粉在冲击加载条件下的波形曲线

Fig.3 Original wave of ferrous powder after 20 kN precompaction under impact loading condition

采用上文所述的一维应力波理论来对实验结果进行处理。对图 3 中的曲线进行对波处理, 得到如图 4 所示的对波图, 以及图 5 所示应变率和应力时程曲线。由图可知, 入射波减去反射波得到的信号 (图中实线线段) 基本与透射波 (图中虚线线段) 重合, 说明该阶段粉末已达到应力平衡阶段。

3.1 不同材料压坯相对密度的对比

图 6 为在 20 kN 预压力的预压过程中, 铜、铁、铝三种材料的力-位移曲线。可以看出, 在压制初期曲线上升平缓, 到后期开始急剧上升。铜与铁的曲

线较为接近, 提升率明显快于铝粉。这主要由于在压制初期, 粉末颗粒间空隙较大, 压制力变化缓慢, 而到压制后期, 颗粒间孔隙逐渐被填满, 颗粒间接触力急剧增大, 压制力也显著增加。

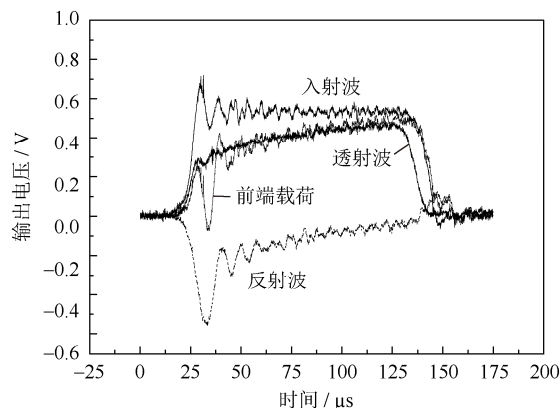


图 4 Fe 粉试样的对波图

Fig.4 Stress equilibrium history for ferrous powder

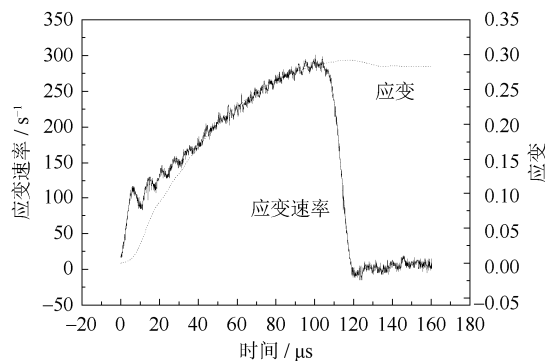


图 5 应变率及应力时程曲线

Fig.5 Strain and strain-rate histories of ferrous powder

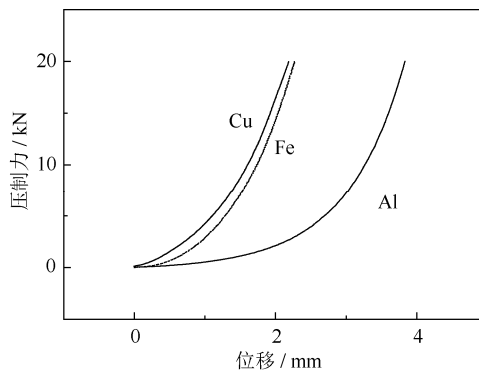


图 6 预压过程中三种材料的力-位移曲线

Fig.6 Force-displacement of three materials curve during precompaction

为研究不同材料在冲击加载情况下致密化程度的差异, 本文利用排水法测量了冲击加载后压坯的密度, 得到了铝粉和铜粉在不同加载条件下的相对密度, 如图7所示。图中分别表示铝粉和铜粉经过10、15 kN的预压后, 压坯相对密度与入射气压的关系。可以看出, 随着子弹入射气压的增大, 压坯相对密度逐步增加。同时, 预压力越大, 压制后的相对密度也越大。对比观察铜与铝的相对密度, 同样是在0.2~0.5 MPa加载范围内, 铜粉的相对密度在0.60~0.75之间, 而铝粉的相对密度已经达到了0.82~0.90, 说明材料刚度对金属粉末的致密化过程有很大的影响, 随着刚度的提升, 致密化程度降低。

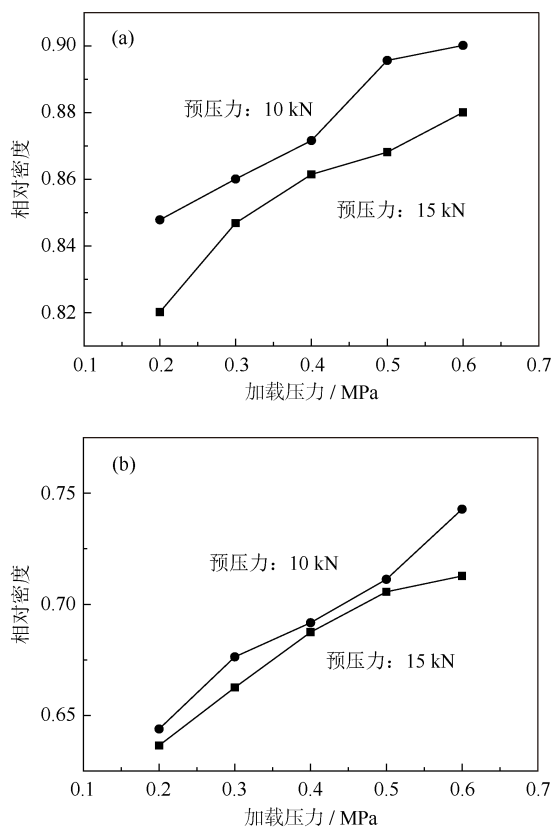


图7 铝粉(a)和铜粉(b)压坯相对密度变化情况

Fig.7 Relative density of aluminium powder (a) and copper powder (b)

3.2 应力应变曲线分析

2 g 铜粉经15 kN预压后, 用300 mm子弹进行高速撞击实验, 加载气压为0.2~1.0 MPa, 子弹速度在10.25~25.94 m/s之间, 其应力应变曲线如图8所示。图9为2 g铁粉在经20 kN预压后, 在相同

的加载条件下得到的应力应变曲线。可以看出, 不管是铁粉还是铜粉, 应力一直随着应变增加而显著增加, 可以推断整个过程一直处于不断压实的过程中, 宏观上表现出较强的应变率效应。

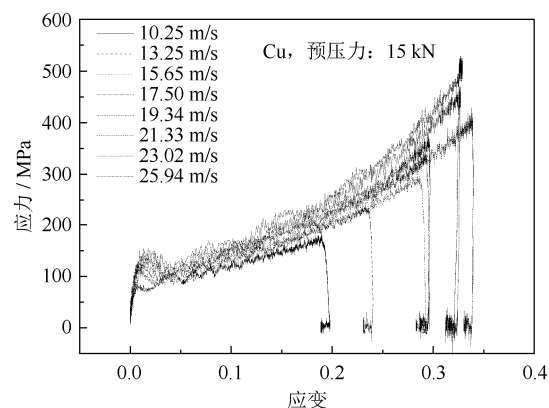


图8 15 kN预压后的铜粉在不同加载速率下的应力-应变曲线

Fig.8 Stress-strain curve of copper powder after 15 kN precompaction under different loading velocities

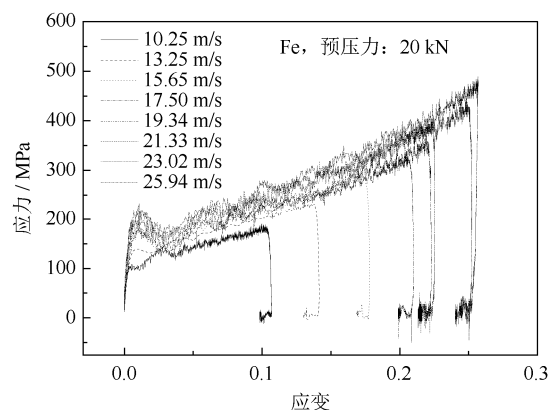


图9 20 kN预压后铁粉在不同加载速率下的应力-应变曲线

Fig.9 Stress-strain curve of ferrous powder after 20 kN precompaction under different loading velocities

采用控制变量法, 将图8中铜粉的应力应变曲线应变控制到0.1, 并将该段曲线进行积分, 积分值即为应变达到0.1时材料的应变能, 由此得到材料应变能随加载速率的变化情况, 如图10所示, 图中点为应变能, 图中实线为应变能随着加载速率变化的线性拟合结果。由图可知, 随子弹加载速度的提高, 材料的应变能呈增长趋势, 说明材料的吸能能力增强, 即加载速度的提高对材料的吸能能力起到了强化作用。

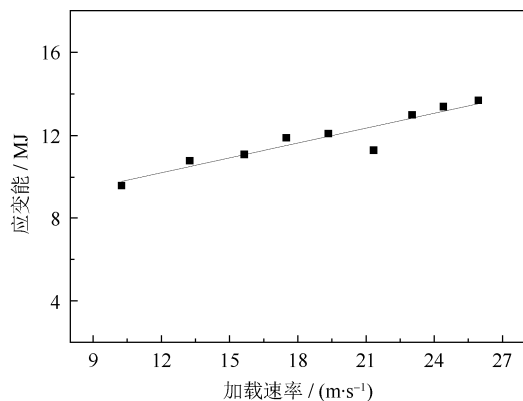


图 10 应变能随着加载速率的变化情况

Fig.10 Change of strain energy under different impact velocities

图 11 为不同预压条件下,铜粉在分离式霍普金森压杆撞击实验中获得的应力应变曲线,入射气压为 1 MPa,实曲线为 10 kN 预压后得到的力应变曲线,点划线、虚线曲线分别表示经过 15 kN 和 20 kN 预压后的应力应变曲线。由图可以看出,粉末一直处于压实阶段,应变硬化率也一直处于增加的状态,且在加载条件相同的情况下,预压力越大,应变硬化率越大。

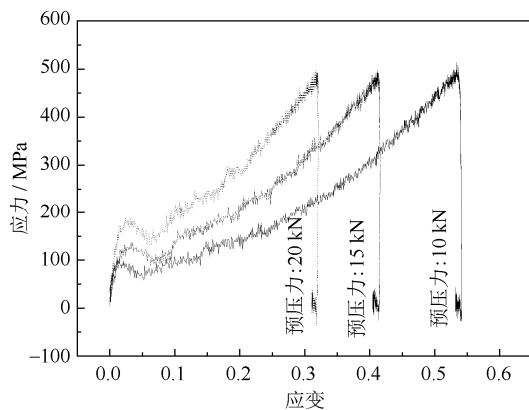


图 11 不同预压条件下铜粉应力-应变曲线

Fig.11 Stress-strain curve of copper powder under different pre-pressure condition

3.3 力-位移曲线分析

图 12 为铝粉经 5 kN 预压后,在不同入射气压下获得的力-位移曲线。在用分离式霍普金森压杆装置进行压制时,发现力-位移曲线起初呈线性增长,但压制到了一定位移以后,逐渐转变为加速型增长,说明颗粒间作用力发生明显变化。这主要是由于粉末颗粒从刚开始的颗粒重排和孔隙填充阶段,过渡为颗粒间机械啮合阶段(即颗粒弹塑性变

形阶段)。本文将这两个阶段的临界点所对应的横坐标称为临界位移,即压制从致密阶段过渡到变形阶段时的位移。

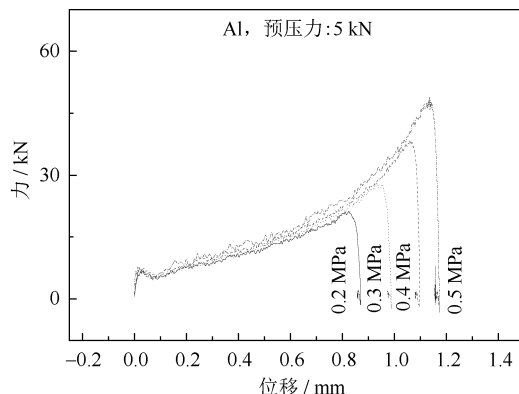


图 12 Al 粉在不同入射压力下的力-位移曲线

Fig.12 Force-displacement curve of aluminium powder under different loading condition

对经过 10 kN 和 15 kN 预压后的铝粉试件进行分离式霍普金森压杆装置撞击实验,对力-位移曲线进行分析,找到相应的临界位移,得到如图 13 所示的不同加载条件下临界位移随预压力变化的汇总图。图中 4 条曲线分别表示预压后的铝粉在入射气压分别为 0.2、0.3、0.4、0.5 MPa 条件下,其临界位移随预压力变化的曲线。如图所示,在入射气压为 0.2 MPa 的加载条件下,随着预压力的增加,临界位移从 0.66 降到 0.35,说明预压力越大,粉末压得越密实。预压力为 5 kN 时,4 条实线所对应的临界位移在 0.62~0.66 之间;预压力为 10 kN 时,临界位移则变为 0.35~0.48;预压力为 15 kN 时,临界位移为 0.18~0.35。即相同预压条件下,加载率越大,颗粒间孔隙填充所用的时间越短。

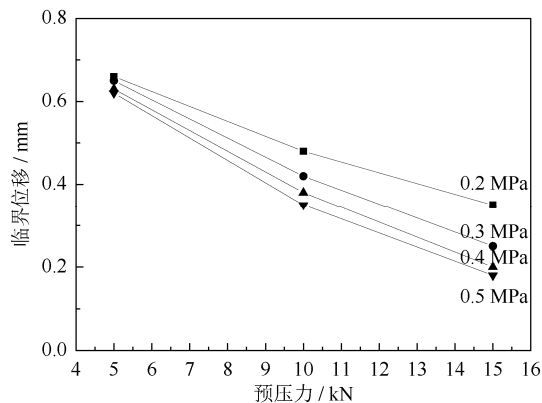


图 13 不同加载条件下临界位移随预压力的变化情况

Fig.13 Change of critical displacement with precompaction force under different loading condition

4 结论

(1) 在相同的分离式霍普金森压杆装置加载条件下, 预压力越大, 压坯的相对密度也越大。材料刚度对金属粉末的致密化过程有很大的影响, 随着刚度的提升, 致密化程度降低。

(2) 压坯在不同分离式霍普金森压杆装置加载条件下均表现出了较为明显的应变率效应, 预压力与应变硬化率正相关, 且随着加载率的增加, 材料的应变能呈现上升趋势。

(3) 通过对 Al 粉预压坯动态撞击实验力-位移曲线的分析, 发现在相同的加载条件下, 预压力越大, 孔隙填充所用时间越短; 在相同的预压条件下, 加载率越大, 其临界位移也越小。

(4) 对于金属粉末, 在进行高速压制之前进行适当的预压可以提高金属的应变硬化率, 增强粉末对冲击动能的吸收, 促进压坯的机械啮合, 缩短孔隙填充时间, 提高压坯的相对密度, 进而提高压坯强度。

参考文献

- [1] Richard F. HVC punches PM to new mass production limits. *Met Powder Rep*, 2002, 57(9): 26
- [2] He J, Xiao Z Y, Guan H J, et al. High velocity compaction behavior and sintered properties of pure Ti powder. *Powder Metall Technol*, 2016, 34(3): 178
(何杰, 肖志瑜, 关航健, 等. 纯钛粉高速压制行为及其烧结性能研究. 粉末冶金技术, 2016, 34(3): 178)
- [3] Edser C. Höganäs promotes potential of high velocity compaction. *Met Powder Rep*, 2001, 56(9): 6
- [4] Chelluri B, Knoth E. Powder forming using dynamic magnetic compaction // *4th International Conference on High Speed Forming*. Columbus, Ohio, 2010: 26
- [5] Azhdar B, Stenberg B, Kari L. Determination of dynamic and sliding friction, and observation of stick-slip phenomenon on compacted polymer powders during high-velocity compaction. *Polym Test*, 2006, 25(8): 1069
- [6] Azhdar B, Stenberg B, Kari L. Determination of springback gradient in the die on compacted polymer powders during high-velocity compaction. *Polym Test*, 2006, 25(1): 114
- [7] Wang J Z, Qu X H, Yin H Q, et al. High velocity compaction of electrolytic copper powder. *Chin J Nonferrous Met*, 2008, 18(8): 1498
(王建忠, 曲选辉, 尹海清, 等. 电解铜粉高速压制成形. 中国有色金属学报, 2008, 18(8): 1498)
- [8] Yi M J, Yin H Q, Qu X H, et al. Influence of force and stress wave on the quality of green compacts in high velocity compaction. *Powder Metall Technol*, 2009, 27(3): 207
(易明军, 尹海清, 曲选辉, 等. 力与应力波对高速压制压坯质量的影响. 粉末冶金技术, 2009, 27(3): 207)
- [9] Wang D G. *Research on High Densification and Numerical Simulation of Metal Powder Compaction Processes* [Dissertation]. Hefei: Hefei University of Technology, 2010
(王德广. 金属粉末高致密化成形及其数值模拟研究[学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2010)
- [10] Wu B, Liu J, Yang Y. The influence of the mold wall friction coefficient on HVC powder based on the finite element simulation analysis. *Powder Metall Technol*, 2014, 32(6): 442
(吴斌, 刘军, 杨勇. 基于有限元仿真分析高速压实粉末时模壁摩擦因数对压制效果的影响. 粉末冶金技术, 2014, 32(6): 442)
- [11] Skoglund P. High density PM parts by high velocity compaction. *Powder Metall*, 2001, 44(3): 199
- [12] Chi Y, Guo S J, Meng F, et al. High velocity compaction in powder metallurgy. *Powder Metall Ind*, 2005, 15(6): 41
(迟悦, 果世驹, 孟飞, 等. 粉末冶金高速压制成形技术. 粉末冶金工业, 2005, 15(6): 41)
- [13] Yang X. Research progress on densification mechanism of powder metallurgy high-velocity compaction. *Powder Metall Ind*, 2016, 26(5): 57
(杨霞. 粉末冶金高速压制致密化机制的研究进展. 粉末冶金工业, 2016, 26(5): 57)
- [14] Yan Z Q, Cai Y X, Chen F. High velocity compaction in powder forming and the promising applications. *Powder Metall Technol*, 2009, 27(6): 455
(闫志巧, 蔡一湘, 陈峰. 粉末冶金高速压制技术及其应用. 粉末冶金技术, 2009, 27(6): 455)
- [15] Wang L L. *Foundation of Stress Waves*. 2nd Ed. Beijing: National Defense Industry Press, 2005
(王礼立. 应力波基础. 2版. 北京: 国防工业出版社, 2005)