

铁粉的高速压制成形*

王建忠 曲选辉 尹海清 周晟宇

(北京科技大学材料科学与工程学院 新金属材料国家重点实验室 北京 100083)

摘要 采用高速压制技术制备铁基制品,探讨了冲击能量及冲击速度与冲击行程之间的关系,并研究了冲击能量、压制方式对生坯密度、最大冲击力、脱模力和径向弹性后效的影响。结果表明:在高速压制过程中,冲击能量与冲击行程呈线性关系,而冲击速度与冲击行程呈抛物线关系。生坯密度随着冲击能量的增加而逐渐增大。单次压制时,当冲击能量增加到 6510 J 时,生坯密度达到 7.336 g/cm³,其相对密度约为 97%。在总冲击能量相同的情况下,两次压制制备出的试样生坯密度最大,三次压制的最小。在高速压制过程中,试样的脱模力及其径向弹性后效均远低于传统压制。

关键词 材料合成与加工工艺,粉末冶金,生坯密度,高速压制,冲击能量,脱模力

分类号 TB44

文章编号 1005-3093(2008)06-0589-04

High velocity compaction of ferrous powder

WANG Jianzhong QU Xuanhui** YIN Haiqing ZHOU Shengyu

(State Key Laboratory for Advanced Metals and Materials, School of Materials Science & Engineering, University of Science & Technology Beijing, Beijing 100083)

* Supported by National 973 Program No.2006CB605207 and MOE Program for Changjiang Scholars and Innovative Research Team in University No.I2P407.

Manuscript received January 8, 2008; in revised from April 21, 2008.

** To whom correspondence should be addressed, Tel:(010)62332700, E-mail: quxh@mater.ustb.edu.cn

ABSTRACT Ferrous parts were prepared through high velocity compaction (HVC), the relationship between the impact energy, the impact velocity and the stroke length was investigated. The effects of impact energy and compaction methods on the green density, the maximal impact force, the withdraw force and the radial springback were discussed. The results showed that the impact energy was direct proportional to the stroke length and the impact velocity is parabolic to it. The green density increased with the impact energy increasing. In single impact the green density was 7.336 g/cm³, relative density about 97%, when impact energy was 6510 J. For the same total impact energy the green density of specimen processed by double impacts was the best and that of specimen fabricated by triplex impacts was the lowest. The withdraw force and the radial springback of specimen produced by HVC were all lower than that of specimen processed by traditional compaction.

KEY WORDS synthesizing and processing technics, PM, green density, high velocity compaction, impact energy, withdraw force

高速压制技术突破了粉末冶金的局限性,是传统粉末压制成形技术一种极限式外延的结果^[1,2]。高速压制是一项低成本、高效率成形高密度粉末冶金制品的新技术,因具有良好的性价比而备受关注。高速压制材料的密度高且分布均匀、脱模力小、弹性后效低等特点^[3-5]使其性能更加优良、生产更加经济化,具备用小型设备生产较大制品的能力,具有广阔的应

用前景。高速压制 (High Velocity Compaction, 简称 HVC) 的基本原理^[5,6-10],是通过液压驱动的锤头产生强烈冲击波,在很短时间内 (20 ms 左右) 将冲击能量通过压模传递到粉末上使其致密化。

目前,国内对高速压制技术的研究还处于起步阶段,国外对该技术的研究主要集中于铁粉^[3,11-13]、不锈钢粉^[14]和聚合物^[15,16]等,而对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。为此,本文以纯铁粉为原料,研究其高速压制成形过程中的工艺参数,以期获得它们之间的内在关系。

* 国家 973 计划 2006CB605207 和教育部长江学者和创新团队发展计划 I2P407 资助项目。

2008 年 1 月 8 日收到初稿; 2008 年 4 月 21 日收到修改稿。

本文联系人: 曲选辉, 教授

1 实验方法

实验用粉末原料为水雾化铁粉, 纯度为 99.5%, 颗粒尺寸为 28–150 μm , 形状为近球形.

将 0.5%(质量分数) 的硬脂酸锌与铁粉混合, 在 HYP35-7 型高速冲击成形压机上压制圆环试样, 其外径为 60 mm, 内径为 30 mm. 用排水法测量试样的生坯密度.

2 结果与讨论

2.1 冲击能量与冲击行程之间的关系

高速压制时的冲击能量为锤头力所做的功与锤头重力势能之和, 即

$$E = W_F + E_G \quad (1)$$

其中 E 为冲击能量 (J), W_F 为锤头力所做的功 (J), E_G 为锤头重力势能 (J).

而 W_F 和 E_G 分别为

$$W_F = Fh \quad (2)$$

$$E_G = mgh \quad (3)$$

其中 F 为锤头力 (kN), h 为锤头冲击行程 (mm), m 为锤头质量 (kg), g 为重力加速度 (10 N/kg).

而锤头力 F 为

$$F = PA \quad (4)$$

其中 P 为油压压强 (MPa), A 为油压对锤头作用的有效面积 (cm^2).

对于 HYP35-7 型高速冲击成形压机: $P=28$ MPa, $A=31 \text{ cm}^2$, $m=135 \text{ kg}$. 以冲击行程 h 为 50 mm 为例, 则由式 (1)–(4) 得: $W_F=4.34 \text{ kJ}$, $E_G=0.0675 \text{ kJ}$. 由此可以看出, E_G 远小于 W_F , 可以忽略, 则式 (1) 可改写为

$$E = W_F = Fh \quad (5)$$

式 (5) 表明, 冲击能量与冲击行程之间呈线性关系.

2.2 冲击速度与冲击行程之间的关系

高速压制时的冲击速度是锤头与上模冲第一次接触时的速度. 根据能量守恒定律, 由式 (5) 得

$$E = W_F = Fh = \frac{1}{2}mv^2 \quad (6)$$

其中 m 为锤头质量 (kg), v 为冲击速度 (m/s). 由式 (6) 可见: $v = \sqrt{2Fh/m}$, 即高速压制时的冲击速度与冲击行程之间呈抛物线关系.

2.3 生坯的密度

从图 1 可以看出, 随着冲击能量的增加, 生坯密

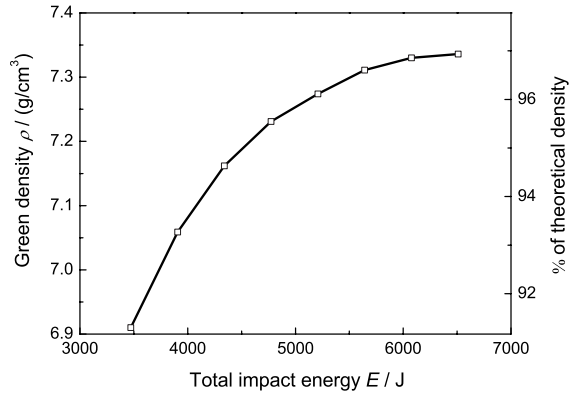


图 1 冲击能量对单次压制生坯密度的影响

Fig.1 Effects of impact energy on green density (Single impact)

度逐渐增加. 当冲击能量为 3472 J 时, 生坯密度仅为 6.910 g/cm^3 , 而当冲击能量增加到 6510 J 时, 生坯密度达到 7.336 g/cm^3 , 其相对密度约为 97%. 但是, 随着冲击能量的增加, 生坯密度增加的速率逐渐减小. 当冲击能量从 3472 J 增加到 3906 J 时 (增加量为 434 J), 生坯密度从 6.910 g/cm^3 增加到 7.059 g/cm^3 , 增加量为 0.149 g/cm^3 ; 而当冲击能量从 6076 J 增加到 6510 J 时 (增加量为 434 J), 生坯密度从 7.330 g/cm^3 增加到 7.336 g/cm^3 , 增加量仅为 0.006 g/cm^3 . 可能的原因是: 原始粉末中存在 50%–90% 的孔隙, 而且颗粒间因搭架形成的“拱桥”现象使得局部区域存在较大孔隙^[17,18]. 因此充填时所需的冲击能量较小, 粉末颗粒很容易充填到原始粉末的孔隙中去. 其结果是, 在压制初期粉末颗粒主要以充填孔隙的方式进行致密化, 生坯密度随着冲击能量的增加而增加较快. 随着冲击能量的增加, 粉末颗粒发生变形, 并产生加工硬化现象. 出现加工硬化现象后, 粉末颗粒产生变形所需能量逐渐增加, 因此生坯密度的增加速率逐渐降低.

图 2 表明, 不论以哪种方式压制粉末, 生坯密度都随着冲击能量的增加而逐步增加. 在总冲击能量相同的情况下, 两次压制制备的生坯试样密度最高, 三次压制的最低. 在单次压制时, 冲击能量在很短的时间内一次性传递到粉末颗粒上使其致密化. 由于作用时间短, 粉末颗粒之间残留的少量气体形成孔洞. 在这部分孔洞的充填过程中发生绝热压缩, 这使得致密化存在一定困难. 同时, 粉末颗粒之间相互充填和变形也不能得到彻底进行, 使得粉末颗粒只是机械地结合在一起. 两次压制时, 冲击能量分两次传递到粉末颗粒上使其致密化. 第一次压制相当于对粉末颗粒进行预压, 起到排气、颗粒充填等作用, 使粉末颗粒成为具有一定密度的生坯; 随后进行的第二次压制

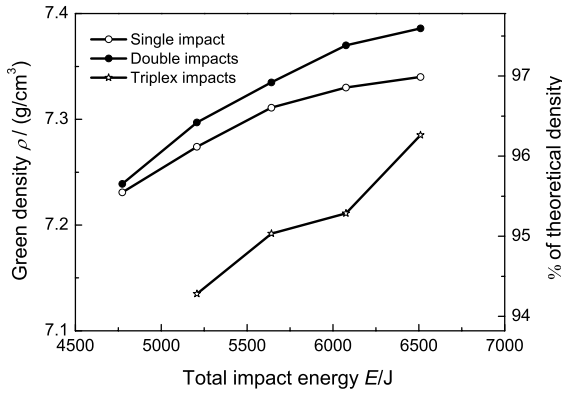


图2 冲击能量对不同压制方式生坯密度的影响

Fig.2 Effects of impact energy on green density-single impact and double impacts (the first impact energy is 1302 J) and triplex impacts (the first impact energy is 868 J; the second impact energy is 1736 J)

使得粉末颗粒充填和变形进行的更加彻底,导致生坯密度进一步提高。三次压制时,冲击能量分三次传递到粉末颗粒上使其致密化。第一次压制也相当于预压;第二次压制使得试样生坯密度进一步提高;经过前两次压制后,粉末颗粒成为具有一定密度的多孔体,而第三次压制的冲击能量较低,而且冲击波在多孔体内的传播速度较高,导致大部分能量在多孔体与上、下模冲界面处发生透射而耗散,使得多孔体自身吸收的能量减少。而吸收的冲击能量不足以使粉末颗粒的变形和碎裂彻底进行,从而导致生坯密度增加幅度反而比单次压制的低。

2.4 最大冲击力和脱模力

随着冲击能量的增加,最大冲击力逐渐增大(图3),而脱模力在50~70 kN之间变化,约为最大冲击力的3.0%~5.5%。随着冲击能量的增加,试样的生坯密度逐渐增大,粉末颗粒逐渐压制为具有一定密度的多孔体。因此冲击波在多孔体内的传播速度逐渐增大,使得最大冲击力逐渐增大。

对于不同的压制方式,随着冲击能量的增加,最大冲击力逐渐增大(图4)。当总冲击能量相同时,两次压制时的最大冲击力最高,单次最低。可能的原因是:单次压制时,冲击能量主要耗散于颗粒之间的摩擦、孔隙充填和颗粒变形等;两次压制时,第一次的冲击能量对粉末颗粒进行预压,使得粉末成为具有一定密度的多孔体,而第二次压制时,冲击波在多孔体内传递时受到的阻力减小,导致冲击力较高;三次压制时,冲击能量分三次传递到粉末上,使得冲击力介于单次压制和两次压制之间。从图4中还可以看出,脱模力仍然在50~70 kN之间变化,比传统压制的低。

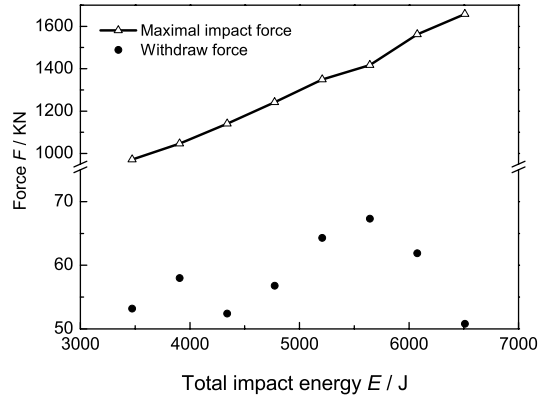


图3 冲击能量对最大冲击力和脱模力的影响(单次压制)

Fig.3 Effects of impact energy on maximal impact force and withdraw force (Single impact)

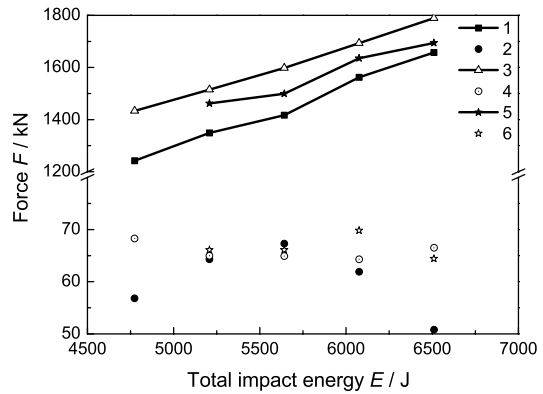


图4 冲击能量对最大冲击力和脱模力的影响(不同压制方式)

Fig.4 Effects of impact energy on maximal impact force and withdraw force -single impact (1 and 2) and double impacts (3 and 4) and triplex impacts (5 and 6)

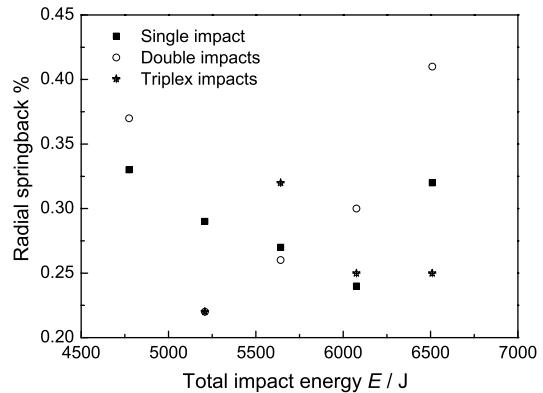


图5 冲击能量对不同压制方式径向弹性后效的影响

Fig.5 Effects of impact energy on radial springback-single impact and double impacts (the first impact energy is 1302 J) and triplex impacts (the first impact energy is 868 J; the second impact energy is 1736 J)

2.5 径向弹性后效

从图 5 可以看出, 试样的径向弹性后效在 0.2~0.45% 之间变化, 远远低于传统压制^[4]. 低径向弹性后效的优点是脱模力比较低.

3 结 论

在高速压制过程中, 冲击能量与冲击行程之间呈线性关系; 冲击速度与冲击行程之间呈抛物线关系. 随着冲击能量的增加, 生坯密度和最大冲击力均逐渐增大. 在总冲击能量相同的情况下, 两次压制的生坯试样密度最高, 最大冲击力最大. 在高速压制过程中, 脱模力和径向弹性后效都比较低.

参 考 文 献

- 1 F.Richard, HVC punches PM to new mass production limits, *Metal Powder Report*, **57**(9), 26(2002)
- 2 R.L.Orban, New research directions in powder metallurgy, *Romanian Reports in Physics*, **56**(3), 505(2004)
- 3 CHI Yue, GUO Shiju, MENG Fei, YANG Xia, ZHANG Heng, LIAN Yudong, High velocity compaction in powder metallurgy, *Powder Metallurgy Industry*, **15**(6), 41(2005) (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, *粉末冶金工业*, **15**(6), 41(2005))
- 4 SHEN Yuanxun, XIAO Zhiyu, WEN Liping, PAN Guoru, LI Yuanyuan, Principle, characteristics and status of high velocity compaction in powder metallurgy, *Powder Metallurgy Industry*, **16**(3), 19(2006) (沈元勋, 肖志瑜, 温利平, 藩国如, 李元元, 粉末冶金高速压制技术的原理、特点及其研究进展, *粉末冶金工业*, **16**(3), 19(2006))
- 5 ZHOU Shengyu, YIN Haiqing, QU Xuanhui, Research status of high velocity compaction technology in powder metallurgy, *Materials Review*, **21**(7), 79(2007) (周晟宇, 尹海清, 曲选辉, 粉末冶金高速压制技术的研究进展, *材料导报*, **21**(7), 79(2007))
- 6 P.Skoglund, in 2001 International conference on Power Transmission Components, High density PM components by high velocity compaction, edited by A.Volker, Chu Chulung, F.William, J.Jandeska, (Ypsilanti, Metal Powder Industries Federation, 2001) p.16
- 7 P.Skoglund, High density PM parts by high velocity compaction, *Powder Metallurgy*, **44**(3), 199(2001)
- 8 P.Skoglund, in Advance in Powder Metallurgy & Particulate Materials-2002, High-Density PM Components by High Velocity Compaction, edited by A.Volker, Chu Chulung, F.William, J.Jandeska, (New Jersey, Metal Powder Industries Federation, 2002) p.1
- 9 E.Caroline, Höganäs promotes potential of high velocity compaction, *Metal Powder Report*, **56**(9), 6(2001)
- 10 F.Dore, L.Lazzarotto, S.Bourdin, High velocity compaction: overview of materials, applications and potential, *Materials Science Forum*, **534-536**, 293(2007)
- 11 E.Torsten, L.Ppetri, Residual stresses in green bodies of steel powder after conventional and high speed compaction, *Materials Science Forum*, **407**(404), 77(2002)
- 12 B.Barendvanden, F.Christer, L.Tomas, Industrial implementation of high velocity compaction for improved properties, *Powder Metallurgy*, **49**(2), 107(2006)
- 13 P.Jonsén, H-A.Hägglad, L.Troive, J.Furuberg, S.Allroth, P.Skoglund, Green body behavior of high velocity pressed metal powder, *Materials Science Forum*, **534-536**, 289(2007)
- 14 C.Aslund, in Euro PM 2004 Conference Proceedings, High velocity compaction (HVC) of stainless steel gas atomized powder, edited by D.Herbert, R.Raimund, (Shrewsbury UK, EPMA, 2004) p.533
- 15 A.Bruska, S.Bengt, K.Leif, Development of a high-velocity compaction process for polymer powders, *Polymer Testing*, **24**(4), 909(2005)
- 16 D.Jauffrès, O.Lame, G.Vigier, F.Doré, Microstructural origin of physical and mechanical properties of ultra high molecular weight polyethylene processed by high velocity compaction, *Polymer*, **48**(21), 6374(2007)
- 17 HUANG Peiyun, *Principles of Powder Metallurgy* (Beijing, The press of Metallurgical Industry, 1997) p.170 (黄培云, 粉末冶金原理, (北京, 冶金工业出版社, 1997) p.170)
- 18 WU Chengyi, ZHANG Liying, *Mechanical principles of Powder Forming* (Beijing, The press of Metallurgical Industry, 2003) p.6 (吴成义, 张丽英, 粉末成形力学原理, (北京, 冶金工业出版社, 2003) p.6)