

粉末高速压制技术的发展现状

曲选辉, 尹海清

(北京科技大学 新金属材料国家重点实验室, 北京 100083)



曲选辉 教授

摘要: 粉末高速压制成形(HVC)技术在2001年由瑞典Höganäs AB公司提出,并在瑞典Hydropulsor公司生产的HVC设备上实现了速度 $\leq 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的压制成形。高速压制成形原理是通过应力波在粉体中的传播使粉末致密,该技术具有压制生坯密度高、密度分布均匀、产品综合性能优异的特点,可以通过连续多次压制实现小设备压制大零件等,所以备受青睐。多个国家的研究者开展了相应的研究工作,材料涉及铁、铜、钛及其合金、磁性材料、陶瓷材料等。高速压制的粉末致密化机理不同于传统压制,今后还有待进一步深入开展研究。

关键词: 粉末高速压制; 压制速度; 生坯密度; 多次压制; 应力波

中图分类号: TF124.36 文献标识码: A 文章编号: 1674-3962(2010)02-0045-05

Development of Powder High Velocity Compaction Technology

QU Xuanhui, YIN Haiqing

(State Key Lab. for Advanced Metals and Materials, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: High velocity compaction(HVC) technology was put forward by Höganäs AB company, Sweden in 2001 and carried out on HVC machine produced by Hydropulsor company, Sweden with the compaction velocity no greater than $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. By the propagation of the stress wave through the powders, densification of the powders was realized. Due to the advantage of high and uniform density, excellent mechanical properties and capability of multiple impacts, this technology attracted more attention. The researchers in the world carried out the investigation on various kinds of powders such as iron, copper, titanium and the alloys, magnetic and ceramic materials. The densification mechanism of HVC is waiting for further study.

Key words: powder high velocity compaction; raw blank density; multiple compaction; stress wave

1 前言

粉末冶金技术自上世纪初得到迅速发展以来,多种材料的生产技术得以突破,结构材料、功能材料和复合材料的大量产品被应用到各个领域与行业。世界经济的快速发展和日益增长的需要,对粉末冶金技术提出更高更新的要求。

自上世纪20年代以来的几十年来,粉末冶金的研究者一直在不断探索新的技术,以提高材料的致密度,从而更好地发挥制品的功能。近30年间出现的技术革新,发展了以粉末锻造、温压成形、粉末注射成形、模壁润滑、动力磁性压制、爆炸压制、放电等离子烧结等

为代表的一批新技术,使粉末冶金制品的生产在密度的提高、材料的适用性、复杂形状的实现、高性能低成本等多方面实现了突破,粉末冶金制品在越来越多的领域中得到了应用。

在技术不断突破的同时,理论研究一直在揭示各种材料粉末的压制和烧结过程的致密化规律和理论依据,对粉体成形规律提出了一系列著名的理论,如巴尔申压制方程、川北公夫压制方程、黄培云压制理论等,对粉末冶金的发展和生产起到了指导性作用,随后仍不断有研究者对压制过程做了进一步分析和细化工作^[1]。

动态压制成形是以明显高于传统静态压制的速度对粉体进行成形的技术,其压制速度为每秒几米到每秒1000米以上,动压通过冲击波或应力波在粉体中的传播使粉体迅速成形和致密化。对于动态压制成形的研究已有半个多世纪的历史,1964年Stein E M^[2]对铁粉的

收稿日期: 2009-09-07

通信作者: 曲选辉,男,1960年生,长江学者特聘教授

高速压制性能进行了较为深入的分析,中南大学陈振华^[3]在用落锤进行的动压实验中提出粉末压缩的应变推迟是动压过程导致生坯密度提高的本质因素。后来研究者使用如气枪^[4]、油气混合物燃烧、爆炸^[5]、电容放电、磁场收缩^[6]以及霍普金森杆^[7-8]、轻气炮^[9]等设备与装置进行动态压制研究。在近几十年的研究中,各种各样动态压制技术制备出许多性能出色的样品^[10-11],并在成形机理方面取得了一定进展^[12-14],但昂贵的设备和模具的寿命问题使得动态压制成形技术在工业上难于广泛应用^[15]。

2 粉末高速压制技术的原理

粉末高速压制技术(High Velocity Compaction, 简称HVC)是瑞典的Höganäs AB公司在2001年基于Hydropulsor公司生产的高速压制成形机而推介的一项新技术,通过提高粉末的生坯密度,可以提高产品性能、提高生产效率,具备用中小型设备来生产大零件的能力。

粉末高速压制与传统静态刚模压制相比,从工艺上来看,在粉末充填和零件脱模等方面有很多的相似性,例如混合粉末装入锥形送料斗中,通过送粉靴自动填充模腔,压制成形后零件被顶出并转入烧结工序等^[16]。粉末高速压制的压制速度比传统的压制方法快500~1000倍,压机锤头速度可达2~30 m/s,液压驱动的锤头质量达5~1200 kg,压制压力在600~2000 MPa,粉末在0.02 s之内通过高能量冲击进行压制^[17],锤头的质量和瞬间冲击的速度决定了压制能量的大小和材料致密化程度。HVC设备还可实现在0.3~1 s的时间间隔内实现多次冲击压制,在法国CETIM的研究中达到每秒钟打击5次的频率^[18],多次冲击压制产生高能量的累积,使HVC设备具备了用中小型设备来生产超大零件的能力。HVC能够广泛用于各种粉末的压制成形,例如金属粉末、陶瓷和聚合物粉末。HVC成为粉末冶金工业寻求低成本高密度材料加工技术的又一新突破,作为大批量成形金属、陶瓷粉末的有效方法,可以突破目前粉末冶金的局限性。

3 粉末高速压制成形设备

Hydropulsor公司生产的粉末高速压制成形机,以专利技术液动力单元控制油路系统实现锤头的高速下降和提升,可实现高速的冲击压制和在极短时间间隔内多次高速压制。Hydropulsor公司可生产系列的高速压制成形机,其最初的设计冲击速度为2~30 m·s⁻¹,目前在实际使用中的最高限速为10 m·s⁻¹。目前,该公司已经生产了十余台大型设备,销售到多个国家和地区,包

括瑞典的SKF公司、Höganäs公司,美国的GARBARE公司、HAWK公司,以及意大利、法国、德国等国家,主要用于高速压制成形技术的研究。图1为北京科技大学在2008年购买的亚洲第一台高速压制成形机的实物照片,以及在该设备上实现的Höganäs公司生产的纯铁粉的单次高速压制过程的应力波形图。对应力波的特征进行分析,已成为揭示粉末高速压制致密化机理研究的重要手段之一。

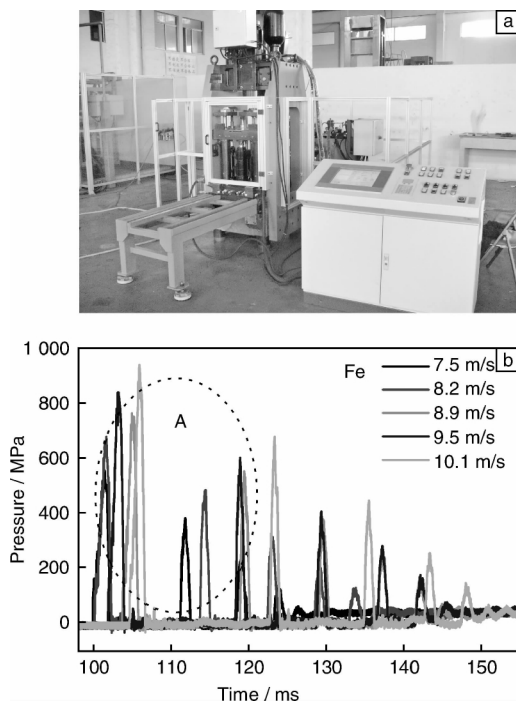


图1 HYP35-2型粉末高速压制成形机(a)及雾化铁粉在单次压制不同压制速度下的应力波的波形图(b)

Fig. 1 HYP35-2 type powder HVC forming machine (a) and the stress waveforms of atomized iron powder compacted in a single pressuring of different speeds (b)

高速压制成形设备的模具寿命依然是影响高速压制技术的工业化应用的关键因素。迟悦^[19]等认为,在高速压制过程中,上模冲吸收的能量不能忽略,在设计模具时,在满足使用要求的前提下要尽量减轻上模冲的质量,提高长径比,以提高能量的利用率,并延长使用寿命。Hinzmann等^[20]对高速压制模具设计进行了研究,使用单上模冲和多级下模冲成功地设计出可用于多级零部件高速压制成形的模具,但后期未见进一步的研究报道。

4 粉末高速压制技术的特点

4.1 压制速度高

目前在Hydropulsor公司的高速压制成形机上实现

的压制速度为 $2 \sim 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 压制速度比常规压制的高 $2 \sim 3$ 个量级, 是自由锻锤的速度的 2 倍以上。在对国内外不同工艺、不同公司生产的铁粉、铜粉、软磁材料等典型金属粉末进行的高速压制的研究中, 得到了如研究者所期望的相同的密度变化规律, 即随着压制速度的提高, 压制压力的增加, 生坯密度得到提高^[21-22]。北京科技大学在 HYP35-2 型设备上采用赫格纳斯公司生产的雾化铁粉以及北京有研粉末公司生产的电解铜粉进行高速压制的实验结果发现^[23-24], 生坯密度随压制速度的增大而增加较快, 当压制速度超过 $7.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 后生坯密度的增长趋缓。

4.2 压坯密度高且密度分布均匀

高速压制时压制压力由静压变成动压, 粉末体受到静压力 P 和动量 mv 的作用, 作用时间短, 瞬时冲击力 $F = mv/t$ 很大, 从而使压坯的密度相对提高。赫格纳斯公司对不同成分的铁基零件材料进行了实验, D. AE 是 $\text{Fe}_4\text{Ni}_{1.5}\text{Cu}_{0.5}\text{Mo}$ 的母合金混合粉末, Astaloy CrM 是水雾化 $\text{Fe}_3\text{Cr}_{0.5}\text{Mo}$ 的预合金粉末, HVC 使 2 种成分的材料生坯密度提高 $0.3 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。对 316L 不锈钢的实验表明, 生坯密度提高 $0.25 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。高速压制的生坯密度与其他粉末冶金工艺相比, 优势是很明显的, 比较结果示于表 1^[25]。

表 1 HVC 与其他粉末冶金工艺生产的制品的烧结密度及相对成本核算的比较

Table 1 The comparison of sintered density and the relative costs for HVC and other products produced by powder metallurgy

Powder metallurgy process	Sintered density/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	Relative cost
Compacting + Sintering	7.1	100
Thermo - Compacting	7.3	125
HVC	7.4	150
HVC + Die wall lubrication	7.6	—
HVC + Thermo - Compacting + Die wall lubrication	7.7	—
HVC twice	7.7	100
HVC + Recompacting + Resintering	7.8	150
Powder forging	7.8	200

HVC 技术不仅可以获得高密度零件, 而且密度均匀, 零件不同部位的密度差减到最小。在高速压制时压坯沿轴向的密度分布要比静压时均匀, 对于长径比为 6.7 的圆柱体零件来说, 烧结体的密度差为 $0.2 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ^[26]。

4.3 多次压制提高密度

在常规的压制条件下, 压坯的密度主要取决于压制

压力, 而高速压制的压坯密度取决于压制能量, 极短时间内的多次高速压制使压制能量得以累加, 使粉末的致密度提高, 如在 $4\,000 \text{ J}$ 能量的冲击下达到的生坯密度可以用 $2\,000 \text{ J}$ 的能量 2 次冲击来完成, 这就为使用中小型设备生产大尺寸零件提供了可能^[28]。

4.4 弹性后效低, 脱模压力小

高速压制时压坯的弹性后效低于常规压制。Ericsson 等发现, ASC100.29 水雾化粉成形的直径为 31 mm 的圆柱体, 其弹性后效较常规压制低 40% ^[27]。低的弹性后效降低了脱模压力。高速压制时的侧压系数明显低于静态压制。在一定的材料和压坯的密度条件下, 高速压制时的脱模压力比静态压制低 $1.5 \sim 2.5$ 倍^[28-29]。

4.5 优异的综合性能

提高材料密度及其均匀性是提高粉末冶金制品性能的有效措施。HVC 使粉末冶金材料的性能明显改善。Skoglund P 等的研究发现, 材料的硬度和抗拉强度随着密度的增加成比例提高, Astaloy CrM + $0.4\% \text{ C}$ 粉末最大密度值接近 7.6 g/cm^3 , 硬度为 $3\,400 \text{ MPa}$, 屈服强度和抗拉强度分别达到 800 MPa 和 $1\,150 \text{ MPa}$, 疲劳极限为 380 MPa ^[30]。如果经高温烧结和烧结硬化工艺处理, Astaloy CrM + $0.4\% \text{ C}$ 合金的屈服强度大于 $1\,200 \text{ MPa}$, 抗拉强度接近 $1\,400 \text{ MPa}$ ^[21]。对于 Astaloyb Mo + $0.2\% \text{ C}$ 粉末的最大压制密度为 7.7 g/cm^3 , 经表面渗碳 + 淬火工艺, 弯曲疲劳极限大于 550 MPa ^[21]。

4.6 生产率高, 可经济成形大型零件

HVC 整个压制过程实现全自动化, 极大地提高了生产效率。由于压坯的高密度可以缩短烧结时间, 所以进一步有利于晶粒度的控制, 进而提升制品的性能, 并降低了成本^[31]。由表 1 的生产成本与制品密度之间的性价比来看, 对制备高密度、高性能的 P/M 零部件来说, HVC 一次压制在成本与性能之间找到了最佳结合点。HVC 2 次压制和粉末锻造工艺相比具有成本优势。因此 HVC 有着广泛的应用前景, 适用于制备阀门、简单齿轮、气门导管、主轴承盖、轮毂、齿轮、法兰、轴套与轴承套圈和凸轮凸角机构等产品。

5 粉末高速压制技术的研究现状

目前世界上多个国家的研究者对粉末高速压制技术产生了极大的热情并纷纷投入到研究的行列。CETIM 公司^[32-33]实现了每秒 5 次, 最高压制速度为 $11 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 最大压制能量为 20 kJ 的对粉末的高速压制。与传统模压相比, HVC 金属样品的弹性后效由 28% 降低至 18% , 尺寸精度提高至原来的 3 倍^[22], 烧结后尺寸精度略有提高。 Al_2O_3 陶瓷的压制密度提高 $8\% \sim 9\%$, 压

制压力极限可以提高至 1 200 MPa^[12]。Bruska A 等对有机物粉末的高速压制致密过程中弹性后效梯度、滑动摩擦等因素和现象进行了分析和模拟,法国的 Yann Le Guennec 等采用 HVC 对含 WC 的铁基粉末及含 1.43% (w) 的 Co 基合金粉末分成上下两层压成圆柱体,并对界面进行了分析,发现压制过程由于润滑剂温度的提高使摩擦系数降低,但并未明显改善粉末的压制性能^[34]。Christer Aslund^[35]将 HVC 应用于雾化 316L 不锈钢粉末,发现气雾化粉末 HVC 的生坯密度高于水雾化粉末,与在传统压制时的规律性相反。German 以及 D. Souriou^[36]等对 HVC 过程与传统压制工艺及材料的性能进行了较为深入的分析, D. Souriou 发现在高于 550 MPa 的压力下 HVC 对提高生坯密度有贡献,但在相同的压制压力下 2 种工艺得到的 Al₂O₃ 烧结组织无明显差别。然而, G. Sethi^[37]在 HYP35-40 高速压制成形机上采用水雾化 Fe-0.85Mo-2Ni-0.25C 合金加 0.7% (w) 的润滑剂进行的实验结果与传统压制结果的对比中,得到了迥异的结果,即压制压力相同时 HVC 的生坯密度和硬度均低于传统压制,对于铁基成分合金,当峰值压力低于 1 100~1 400 MPa 时, HVC 无提高密度的优势。

目前由于 HVC 配套模具尚无法实现带台阶的多级零件的成形,因此研究都集中在无高度差的高密度零件的成形。

国内在粉末高速压制技术的研究工作目前主要集中在北京科技大学、华南理工大学和广州有色金属研究院 3 个单位,而北京科技大学因其有高速压制实验机因而在国内的研究中走在前列。

粉末高速压制技术发展至今,迈出了关键的一步,已经成功地应用于实际生产,然而粉末的致密化机理仍然是困扰许多研究者的关键问题之一。彭建祥等用 YL12 铝合金致密材料,在研究霍普金森杆和轻气炮试验不同应变率下的应力-应变曲线时发现,材料的弹性模量基本不受应变率的影响,而屈服强度与应变率有关,轻气炮试验得到的屈服强度高于霍普金森杆试验的结果^[38]。在速度远低于爆炸压制的粉末高速压制技术, G. Sethi^[37]认为 HVC 过程中无冲击波产生,北京科技大学在 HYP35-7 和 35-2 高速压制成形机上对铁粉、铜粉、钛粉等多种粉末的压制中证明了 HVC 过程中温升现象的存在,但无绝热剪切现象的发生,因此爆炸压制成形、霍普金森杆等高压制速度、高应变率下的机理分析无法套用在目前 10 m·s⁻¹ 压制速度内的研究分析,对 HVC 压制机理的分析将成为今后研究的重点和热点之一。

6 展 望

粉末高速压制成形技术以其在提高生坯压制性能上的突出优势及其新型设备的出现,今后将成为粉末冶金界研究的焦点,在研究上,研究的材料将不仅仅局限于大量的铁基材料的数据,已经有很多学者开始尝试压制铝、钛、难熔金属及其合金等,并在粉末的致密化机理上进行更加深入的探讨,同时该技术的工业化进程也将不断加快,一些工业界人士也积极尝试在高速压制设备上开展系列实验。总之,尽管还存在很多问题亟待解决,高速压制技术的应用开发已成为大势所趋,必将在粉末冶金领域成为与多种加工技术竞争的有利武器。

参考文献 References

- [1] Huang Peiyun (黄培云). *Principles of Powder Metallurgy* (粉末冶金原理) [M]. Beijing: Metallurgy Industry Press, 1995.
- [2] Stein E M, Orsdel J R V, Schneider P V. High Velocity Compaction of Iron Powder [J]. *Metal Progress*, 1964 (4): 83-87.
- [3] Chen Zhenhua (陈振华). *Metal Powder Forming Dynamic Theory* (金属粉末动态成形的理论研究) [D]. Changsha: Central South University of Technology, 1988.
- [4] Tin'kov O V, Torbichev A K, Emoshin N G. Automated Analysis of Rapid Compaction of Disperse Media by the Multimedia Method [J]. *Chemical and Petroleum Engineering*, 2005, 41 (1-2): 3-6.
- [5] Wang Jinxiang (王金相), Li Xiaojie (李晓杰). 粉末爆炸固结技术及应用 [J]. *Powder Metallurgy Technology* (粉末冶金技术), 2004, 24 (1): 49-54.
- [6] Yu H P, Li C F. Dynamic Compaction of Pure Copper Powder Using Pulse Magnetic Force [J]. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2007, 20 (4): 277-283.
- [7] Häggbald HA, Hockauf M, Eriksson M, et al. Simulation of High Velocity Compaction of Powder in a Rubber Mould with Characterization of Silicone Rubber and Titanium Using a Modified Split Hopkinson Set-Up [J]. *Powder Technology*, 2005, 154: 33-42.
- [8] Verleysen P, Degrieck J. Experimental Investigation of the Deformation of Hopkinson Bar Specimens [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2004, 30: 239-253.
- [9] She Jinhu (余金虎), Tang Wenhui (汤文辉). 压阻法在轻气炮实验上的应用研究 [J]. *Test Technology and Testing Machine* (试验技术与试验机), 2008, 48 (2): 28-31.
- [10] Zlobin S B, Pai V V, Yakovlev I V, et al. Explosive Compaction of Aluminum Powder and the Structure of Compacts [J]. *Combustion Explosion and Shock Waves*, 2000, 36 (2): 256-260.
- [11] Matsumoto H, Kondo K, Dohi S, et al. Shock Compaction of NiTi Alloy Powder [J]. *Journal of Materials Science*, 1987,

- 22: 581–586.
- [12] Bengisu M, Inal O T. Densification and Mechanical Properties of Shock-Treated Alumina and Its Composites[J]. *Journal of Material Science*, 1994, 29: 4 824–4 833.
- [13] Matsumoto H, Kondo K. Various Microstructures Suggesting Possible Shock Compaction Mechanisms[J]. *Journal of Material Science*, 1989, 24: 4 042–4 047.
- [14] Bondar M P. Explosive Compaction: the Type of Microstructure of Contact Boundaries Produced by Formation of a Strong Bond [J]. *Combustion Explosion and Shock Waves*, 2004, 40(4): 489–497.
- [15] German R, Myers N, Mueller T, et al. *An Analysis of Approaches to High-Performance Powder Metallurgy. Advances in Powder Metallurgy and Particulate Materials*[R]. Princeton NJ: Metal Powder Industries Federation, 2004, 76–88.
- [16] Paul Skoglund. HVC Punched PM to New Mass Production Limits[J]. *Metal Powder Report*, 2002, 26–30.
- [17] Zhou Shengyu(周晟宇), Yin Haiqing(尹海清), Qu Xuanhui(曲选辉). 粉末冶金高速压制技术的研究进展[J]. *Materials Review*(材料导报), 2007, 21(7): 79–81.
- [18] Dore F, Lazzarotto L, Bourdin S. High Velocity Compaction: Overview of Materials, Applications and Potential[J]. *Material Science Forum*, 2007, 534–536: 293–296.
- [19] Chi Yue(迟悦), Guo Shiju(果世驹), Meng Fei(孟飞), et al. 粉末冶金高速压制成形技术[J]. *Powder Metallurgy Industry*(粉末冶金工业), 2005, 15(6): 41–45.
- [20] Hinzmann G, Sterkenburg D. High-Density Multi-Level PM Components by High velocity Compaction[J]. *Powder Pressing Euro PM*, 2004: 541–545.
- [21] Skoglund P, Mikael K, Ingrid H. High Density PM Parts by High Velocity Compaction[J]. *Powder Metallurgy*, 2001, 44(3): 199–210.
- [22] Andersson O. High Velocity Compaction of Soft Magnetic Composites[J]. *Advances in Powder Metallurgy & Particulate Materials*, 2002, 14: 1–13.
- [23] Wang Jianzhong, Qu Xuanhui, Yin Haiqing, et al. High Velocity Compaction of Ferrous Powder[J]. *Powder Technology*, 2009, 192(1): 131–136.
- [24] Wang Jianzhong(王建忠), Qu Xuanhui(曲选辉), Yin Haiqing(尹海清), et al. 电解铜粉高速压制成形[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报), 2008, 18(8): 1 498–1 503.
- [25] Skoglund P. High-Density PM Components by High Velocity Compaction [J]. *Powder Metallurgy*, 2001, 44(3): 199–210.
- [26] Skoglund P. Hogonas Promote Potential of High Velocity Compaction[J]. *Metal Powder Report*, 2001, 6.
- [27] Ericsson P, Luukkonen. Residual Stresses in Green Bodies of Steel Powder after Conventional and High Speed Compaction[J]. *Materials Science Forum*, 2002, 407(404): 77–82.
- [28] Wang J Z, Qu X H, Yin H Q. Effect of Particle Size Distribution on Green Properties During High Velocity Compaction[J]. *Frontier of Materials Science in China*, 2008, 2(4): 392–396.
- [29] Jonsen P, Haggblad H A, Troive L, et al. Green Body Behaviour of High Velocity Compaction of Metal Powder[J]. *Material Science Forum*, 2007, 534–536: 289–292.
- [30] Skoglund P, Kejzerman M, Hauer I. High Density PM Components by High Velocity Compaction[J]. *Advances in Powder Metallurgy and Particulate Materials*, 2002, Part4: 85–95.
- [31] Hagemeyer J W, Regalbuto J A. Dynamic Compaction of Metal Powders with a High Velocity Impact Device[J]. *International Journal of Powder Metallurgy*, 1968, 4(3): 19–25.
- [32] Bruska A, Bengt S, Leif K. Determination of Springback Gradient in the Die on Compacted Polymer Powders During High-Velocity Compaction[J]. *Polymer Testing*, 2006, 25(1): 114–123.
- [33] Bruska A, Bengt S, Leif K. Determination of Dynamic and Sliding Friction, and Observation of Stick-Slip Phenomenon on Compacted Polymer Powders During High-Velocity Compaction [J]. *Polymer Testing*, 2006, 25(8): 1 069–1 080.
- [34] Yann Le G, Pierre D, Didier L. The Multiple Layers of High Velocity Compaction[J]. *Metal Powder Report*, 2009, 64(1): 25–26, 28.
- [35] Christer Aslund. High Velocity Compaction of Stainless Steel Gas Atomised Powders[C]//*Euro PM 2004 Conference Proceedings*. Shrewsbury UK: EPMA, 2004: 553–557.
- [36] Souriot D, Goeuriot P, Bonnefoy O, et al. Comparison of Conventional and High Velocity Compaction of Alumina Powders [J]. *Advances in Science and Technology*, 2006, 45: 893–898.
- [37] Sethi G, Hauck E, German R M. High Velocity Compaction Compared with Conventional Compaction[J]. *Materials Science and Technology*, 2006, 22(8): 955–995.
- [38] Peng Jianxiang(彭建祥), Li Yinglei(李英雷), Zhang Lin(张林), et al. 多种应力状态下铝合金本构行为的实验研究 [C]//*Proceedings of 4th National Conference on Explosion Mechanics and Experimental Technology*(第四届全国爆炸力学实验技术学术会议文集). Fujian Wuyi Mountain: Chinese Academy of Engineering Physics, 2006: 120–124.