

文章编号:1673-9981(2010)04-0495-05

## 高速压制技术的研究进展和发展趋势\*

闫志巧, 蔡一湘

(广州有色金属研究院, 广东 广州 510650)

**摘 要:**高速压制(HVC)技术是一种高效率、低成本制备高性能粉末冶金零件的新技术. 综述了 HVC 技术的研究现状, 探讨了 HVC 技术的致密化机理, 指出质量能量密度是较峰值压力和冲击能量等更适合 HVC 技术特点的科学表征方式, 进一步展望了 HVC 技术的发展趋势.

**关键词:**高速压制(HVC); 粉末冶金; 致密化机理; 质量能量密度

**中图分类号:** TF124.36

**文献标识码:** A

高速压制(HVC)技术是瑞典的 Höganäs 公司和 Hydropulsor 公司在 2001 年共同提出的一种高效率、低成本制备高性能粉末冶金零件的新技术. 该技术生产零件的过程与传统模压工序相同, 模具设计也相似, 所不同的是 HVC 是通过由液压控制的重锤产生的强烈冲击波实现粉末压制<sup>[1]</sup>, 具有瞬间冲击成形的绝热压制特征, 其压制速度比传统压制快 500-1000 倍, 具有成本低、压坯密度高且分布均匀、低弹性后效(比常规降低 30%)和高精度、模具使用寿命长(不少于十万次)等特点<sup>[2-3]</sup>. 高的压坯密度有利于降低烧结温度而获得晶粒细小的材料, 符合当前节能减排和低碳发展的总体需求; 低脱模力(比常规降低 30%)和低弹性后效可显著提高零件的尺寸精度; 高的模具寿命(不少于十万次)使工业应用成为可能. 从生产成本与制品密度之间的性价比考虑, HVC 是制备高密度、高性能粉末冶金零部件的一种最佳选择, 因此具有明显的技术和经济优势<sup>[4-5]</sup>. 本文综述了 HVC 技术的研究现状, 探讨了 HVC 技术的致密化机理和表征方式, 进一步展望了其发展趋势.

### 1 HVC 技术的研究现状

自 HVC 技术问世以来, 美国、瑞典和法国等国

家予以了高度重视, 大力开展了该技术的专项研究. 美国 LMC 公司的研究表明: 采用具有绝热压制特征的 HVC 技术, 可以将一些传统的粉末冶金生产用金属粉末压制成接近全密度的制品. 该技术获得了美国国防部 100 万美元的资助, 并专门用于压制致密的钛粉末冶金制品<sup>[6]</sup>. 美国的粉末冶金技术中心(CPMT)也开始了旨在通过单次压制制备“全密度”粉末冶金材料的计划, 并将 HVC 作为第一阶段的主要研究方向<sup>[7]</sup>. 瑞典的 Hydropulsor 公司用 HVC 技术显著提高了软磁复合材料的性能, 并能进行大批量生产<sup>[8]</sup>. SKF 公司用 HVC 技术大规模制备高密度、高强度的铁基和 316L 不锈钢零件, 所生产的铁基齿轮件密度可达  $7.7 \text{ g/cm}^3$ <sup>[9]</sup>, 而采用传统的粉末冶金技术, 即便如温压、复压复烧技术通常也只能得  $7.3 \text{ g/cm}^3$  左右的密度. 法国机械工业技术中心(CETIM)采用 HVC 技术成功制备了多阶零件和有内齿或沿高度方向局部有外齿的形状复杂的部件. 在这些部件中, 压坯的密度均达到了  $7.5 \text{ g/cm}^3$  以上<sup>[10]</sup>. CETIM 最新的研究表明, 采用 HVC 技术还可以一次性成形复杂的锥形和多阶零件, 且整个零件密度分布均匀.

国内近几年才开始 HVC 技术的研究. 2006 年, 瑞典的 Hydropulsor 公司和南京东部精密机械有限

收稿日期: 2010-10-14

\* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51004040)

作者简介: 闫志巧(1980—), 女, 河南许昌人, 工程师, 博士.

公司联合组建 HVC 设备,为国内开展 HVC 技术的研究提供了良好的试验平台。目前 HVC 技术的研究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。北京科技大学开展了成形性好的 Fe 粉<sup>[11-12]</sup>、Cu 粉<sup>[13-14]</sup>的高速压制研究,得到了 95% 以上致密度的压坯;华南理工大学<sup>[15]</sup>开展了模壁润滑高速压制成形 Fe 基粉末的研究;广州有色金属研究院开展了传统模压难成形的 Ti 粉的高速压制研究,获得了致密度为 96% 的纯 Ti 压坯和致密度为 97.4% 的含 0.3 wt% 润滑剂的压坯<sup>[16]</sup>。何世文等室温模压纯 Ti 粉所制备的压坯致密度为 80.7%, 130℃ 温压时致密度提高至 82.7%<sup>[17]</sup>。显然, HVC 成形 Ti 粉的效果显著优于传统压制和温压。美国 Dynamet 公司开发的 CHIP(冷等静压→真空烧结→热等静压)技术制备钛基复合材料时,经冷等静压、真空烧结后材料的致密度约为 95%<sup>[18]</sup>,而采用 HVC 成形、未经烧结的 Ti 粉压坯致密度即与之相当。因此, HVC 技术有望解决传统粉末冶金方法难成形高硬化速率粉末(如 Ti 和 Mo)的问题,在低成本制备高性能粉末冶金材料方面极具潜力。除金属材料外, HVC 技术在成形 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷<sup>[19]</sup>、超高分子量聚乙烯(UHMWPE)<sup>[20]</sup>时也表现出了显著优于传统成形方法的效果。

## 2 HVC 技术的致密化机理

关于 HVC 致密化机理的研究,国内外学者进行了大量工作。黄培云院士认为 HVC 压坯之所以具有高密度,主要有以下几个原因<sup>[21]</sup>:首先,当压制压力由静压变成动压时,粉末体不仅受到静压力的作用,还受到动量的作用,速度越大,动量越大。由于冲击时间很短,粉末体所受的冲击力比静压时所受的压力要大,所以成形效率高。其次,粉末体的变形速度很快,一般大于粉末体因受静压作用所产生的加工硬化速度,此时粉末体变形不受加工硬化的影响,因而粉末成形时变形所需要的应力比静压时要小。同时,粉末体是以大量的点、线接触为主的复杂接触,当受到外力冲击作用时,接触区域因迅速变形而放出大量的热量,这种瞬时放出的热量必然使接触部分的温度升高,导致粉末的塑性增加而易于变形。

果世驹等<sup>[22]</sup>对高速压制致密化机制进行了探讨,提出“热软化剪切致密化机制”,并通过实验研究

和理论分析,推导出通用的高速压制方程:

$$\ln\varphi = k_1 \Delta H_L / k_2 \exp[k_2(1 - P/\Delta H_L)] + C \quad (1)$$

式中  $k_1, k_2$  均为系数;  $\Delta H_L$  为粉末材质的熔化潜热, J/g;  $\varphi$  为压坯的孔隙度;  $P$  为能量密度, J/g;  $C$  为常数。并根据该方程推导了铁粉压制方程,对铁基压坯则有:

$$\ln\varphi = 65.5 \exp[0.119(1 - P/\Delta H_L)] - 72.3 \quad (2)$$

高速压制过程中会产生应力波,因此,研究应力波在粉体材料中的传播规律,是揭示 HVC 致密化机理的重要手段。易明军等<sup>[23]</sup>初步研究了 HVC 过程中应力波波形的基本特征和对压坯质量的影响,结果表明,应力波为锯齿波形,其持续时间受加载速率的影响,并且应力波在自由面反射时产生的拉应力在颗粒结合强度不大时导致压坯上表面出现分层和剥落。但由于所产生的应力波受粉末特性、压制条件等多方面的影响,使得 HVC 的致密化机理十分复杂。

## 3 HVC 技术的表征方式

高速压制时会产生应力波,这是它与传统压制的根本区别。为和传统压制效果进行对比,习惯采用第一个冲击波的峰值压力表征 HVC 的成形效果。以峰值压力作为表征方式,SETHI 等<sup>[24]</sup>发现,当 HVC 的峰值压力与传统压制压力相同时,所获得压坯致密度反而较低。而 TROIVE 等<sup>[25]</sup>的结果表明,相同的压制条件下,高速压制的压坯密度比传统压制高 0.5%。用压制压力对比高速压制和传统压制得到了相矛盾的结果。而且峰值压力不能表征多次压制的效果。

也有研究采用冲击能量对 HVC 进行表征。ERIKSSON 等<sup>[26]</sup>采用 335 J 的冲击能量高速压制纯 Ti 粉,所成形直径为 14 mm、质量为 3.0 g 的圆柱试样的致密度为 93.5%。闫志巧等<sup>[16]</sup>采用 3804 J 的冲击能量高速压制纯 Ti 粉,所成形质量为 56.5 g、内径和外径分别为 30 和 60 mm 的圆环试样的致密度仅为 88.8%。进一步的试验表明,冲击能量为 1217 J 时,所成形质量为 10.3 g、直径为 20 mm 的圆环试样的致密度为 96.0%。三种压制效果存在明显差异。这是由于高速压制的压坯密度不仅取决于施加于其上的冲击能量,而且与压坯质量有很大关系。这与常规压制有着很大不同。在常规压制下,压坯的横截面积被确定以后,压坯高度增加会增加密

度分布的不均匀性,但压坯的密度主要取决于压制压力,而与压坯的质量变化不大.因此,应该采用既能体现冲击能量又能反映压坯质量对压坯密度影响的量.为此,采用质量能量密度的概念,即单位质量的压坯在压制过程中所受到的冲击能量,单位:J/g.采用质量能量密度的概念,ERIKSSON等<sup>[26]</sup>在质量能量密度为112 J/g时,所获得的压坯致密度为93.5%.闫志巧等<sup>[16]</sup>在质量能量密度为118 J/g时,所获得的压坯致密度为96.0%.即在相近的质量能量密度下,所获得的压坯质量相近. DOREMUS等<sup>[27]</sup>最近的研究也发现,为达到一定的密度,所需要的冲击能量与粉末质量成正比.因此,质量能量密度是较峰值压力和冲击能量等更合适 HVC 技术特点的科学表征方式.

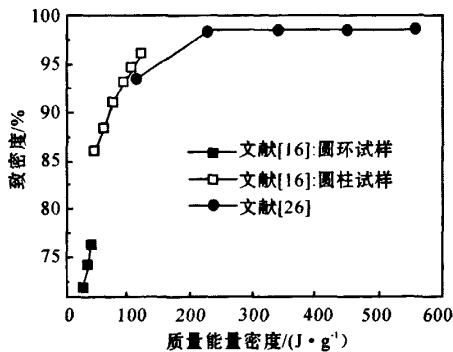


图1 用质量能量密度对比文献[16]和[26]的结果

## 4 HVC 技术研究的发展方向

虽然国外已用 HVC 技术大规模生产铁基及不锈钢粉末冶金零部件,但作为近十年才出现的一种新技术,其相关基础研究还不够深入,尤其是应深化以下几方面的研究:

### 4.1 润滑条件对 HVC 过程的影响

与传统模压成形相比,HVC 成形时可显著减少润滑剂的添加量,甚至是无润滑剂也可以高密度成形.但润滑剂对其成形效果的影响尚未见报道.高速压制 Ti 粉时发现,含 0.3% 润滑剂的 Ti 粉在 50 mm 的冲程时仍能成形,且压坯无明显的宏观缺陷;而纯 Ti 粉末在 35 mm 的冲程时即出现分层(图 2)<sup>[28]</sup>,表明少量的润滑剂能显著提高 HVC 的成形

能力,从而获得更高的压坯密度.这对于粉末冶金结构零件而言是有重大意义的.如铁基粉末冶金零件,当密度达到  $7.2 \text{ g/cm}^3$  后,其硬度、抗拉强度、疲劳强度、韧性等都会随密度的增加而呈几何级数增大.因此,研究润滑剂对 HVC 成形效果的影响对进一步提高材料性能具有重要意义.

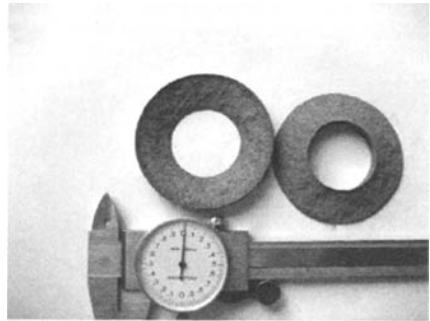


图2 纯 Ti 粉末高速压制时的分层<sup>[28]</sup>

由于 HVC 的致密化机理与传统压制有本质区别,传统意义上的润滑剂不一定能完全发挥 HVC 技术的优势,开发新型的润滑剂是 HVC 技术的一个方向.此外,基于 HVC 所达到的高密度与润滑剂的脱除之间的矛盾,应综合研究润滑剂的种类、含量、对压坯密度和脱脂过程的影响.

### 4.2 多次压制对 HVC 效果的影响

传统压制的压坯密度主要取决于压制压力,并不随压制次数的增加而显著提高.在高速压制下,压制设备将能量在很短的时间通过模具传递给粉末,并使之致密化,该能量是可以累加的,即随着压制次数的增加压坯密度可以不断地提高,这就为使用中小型设备生产大尺寸零件提供了可能.研究认为,HVC 过程的能量具有叠加性,可以通过多次小冲击能量的压制得到与一次大冲击能量压制相同的效果,即在 4 kJ 能量的冲击下达到的压坯密度与用 2 kJ 冲击两次相同<sup>[3]</sup>.但王建忠等<sup>[11]</sup>多次高速压制 Fe 粉时发现,在总冲击能量相同的情况下,分两次压制制备的压坯密度最大,分三次压制的最小,一次压制的居中,这显然与经验相悖.而且研究发现,两次高速压制时,部分压坯出现分层,即使是宏观无分层的压坯烧结后会出现肿胀(图 3)<sup>[28]</sup>.因此,深入研究多次高速压制的效果和特点,对于中小型设备是否能实际生产超大零件具有重大意义.

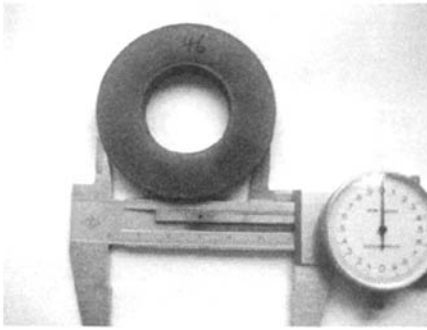


图3 两次压制压坯烧结后出现膨胀<sup>[28]</sup>

#### 4.3 HVC 压坯的烧结致密化机制

HVC 是一种瞬间绝热成形高密度压坯的过程,颗粒之间发生粘结甚至熔焊,颗粒则因内部含有较多的缺陷(如位错、空位和晶格畸变)而处于高能状态,其烧结制度和传统成形方法制备的压坯势必有较大差异,需要综合研究 HVC 压坯的烧结条件. ERIKSSON 等<sup>[26]</sup>采用 HVC 技术制备了致密度为 98.5% 的钛/羟基磷灰石复合压坯,在 500℃ 的低温即可实现材料的烧结,而压坯的烧结致密化机理未有详细报道.

## 5 结 语

HVC 技术为低成本、高效率制备高性能粉末冶金零件提供了一种极具优势的成形方法,是符合节能减排和低碳发展的材料制备新技术.但目前该技术主要用于生产形状相对简单的零件,其致密化机理、表征方式、润滑条件等也尚缺乏系统深入的研究,后续的烧结制度更是鲜有报道.因此,进一步加大该技术的专项研究,将有利于深化对 HVC 过程特征的认识,对实现其在国内的推广应用具有重大意义.

#### 参考文献:

- [1] SKOGLUND P. High density P/M components by high velocity compaction [J]. Powder Metall, 2001, 44 (3): 15-17.
- [2] GRANT C E. Högånäs promotes potential of high velocity compaction [J]. Metal Powder Report, 2001, 56 (9): 6.
- [3] SKOGLUND P, KEJZELMAN M, HAUER I. HVC punches PM to new mass production limits [J]. Metal Powder Report, 2002, 57 (9): 26-31.
- [4] 曲选辉,尹海清. 粉末高速压制技术的发展现状 [J]. 中国材料进展, 2010, 29 (2): 45-49.
- [5] 同志巧,蔡一湘,陈峰. 粉末冶金高速压制技术及其应用 [J]. 粉末冶金技术, 2009, 27 (6): 455-460.
- [6] 孙世杰. 美国国防部资助钛粉末冶金研究 [J]. 粉末冶金工业, 2008, 18 (2): 5.
- [7] DAVER E, TROMBINO C J. State of the PM industry in North America [J]. Int J Powder Metall, 2007, 43 (4): 33-38.
- [8] ANDERSSON O. High velocity compaction of soft magnetic composites [EB/OL]. <http://www.hypulpulor.com/images/paper2.pdf>, 2006-05-04.
- [9] BARENDVANDEN B, CHRISTER F, TOMAS L. Industrial implementation of high velocity compaction for improved properties [J]. Powder Metall, 2006, 49 (2): 107-109.
- [10] DORE F, LAZZAROTTO L, BOURDIN S. High velocity compaction: overview of materials, applications and potential [J]. Mater Sci Forum, 2007, 534-536: 293-296.
- [11] 王建忠,曲选辉,尹海清,等. 铁粉的高速压制成形 [J]. 材料研究学报, 2008, 22 (6): 589-592.
- [12] WANG J Z, QU X H, YIN H Q, et al. High velocity compaction of ferrous powder [J]. Powder Technol, 2009, 192 (1): 131-136.
- [13] 王建忠,曲选辉,尹海清,等. 电解铜粉高速压制成形 [J]. 中国有色金属学报, 2008, 18 (8): 1498-1503.
- [14] YI M J, YIN H Q, WANG J Z, et al. Comparative research on high-velocity compaction and conventional rigid die compaction [J]. Frontiers of Materials Science in China, 2009, 3 (4): 447-451.
- [15] 邓三才,肖志瑜,陈进,等. 模壁润滑高速压制成形 Fe-2Cu-1C 粉末的研究 [J]. 粉末冶金工业, 2009, 19 (6): 28-32.
- [16] 同志巧,陈峰,蔡一湘,崔亮. Ti 粉的高速压制成形及表征 [J]. 金属学报, 2010, 46 (2): 227-232.
- [17] 何世文. 钛基合金温压成形技术研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2004.
- [18] ABKOWITZ S, ABKOWITZ S M, FISHER H, et al. CermeTi<sup>®</sup> discontinuously reinforced Ti-matrix composites: manufacturing, properties, and applications [J]. JOM, 2004, 56 (5): 37-41.
- [19] SOURIOU D, GOEURIOT P, BONNEFOY O, et al. Influence of the formulation of an alumina powder on compaction [J]. Powder Technol, 2009, 190 (1-2): 152-159.

- [20] JAUFFRES D, LAME O, VIGIER G, et al. 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.
- [21] 黄培云. 粉末冶金原理[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1997.
- [22] 果世驹, 迟悦, 孟飞, 等. 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.
- [23] 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[J]. *粉末冶金技术*, 2009, 27(3): 207-211.
- [24] SETHI G, HAUCK E, GERMAN R M. High velocity compaction compared with conventional compaction [J]. *Mater Sci Technol*, 2006, 22(8): 955-959.
- [25] 张富兵, 凯恩特. 高速冲击压制技术生产高密度粉末冶金产品[J]. *粉末冶金工业*, 2007, 17(6): 33-36.
- [26] ERIKSSON M, ANDERSSON M, ADOLFSSON, et al. Titanium-hydroxyapatite composite biomaterial for dental implants [J]. *Powder Metall*, 2006, 49(1): 70-77.
- [27] DOREMUS P, GUENNEC Y L, IMBAULT D, et al. High-velocity compaction and conventional compaction of metallic powders; comparison of process parameters and green compact properties[J]. *Proc IMechE Vol 224 Part E: J Process Mechanical Engineering*. Doi: 10.1243/09544089JPME306.
- [28] 闫志巧, 蔡一湘. 高速压制技术成形 Ti 粉的过程[J]. *中国有色金属学报*, 2010, 20(专辑 1): 992-996.

## Progress and trend of high velocity compaction technology

YAN Zhi-qiao, CAI Yi-xiang

(Guangzhou Research Institute of Non-ferrous Metals, Guangzhou 510650, China)

**Abstract:** High velocity compaction (HVC) is a recently developed technology for forming high density metallic parts with high efficiency and low cost. Progress in developments of HVC technology is reviewed, and its densification mechanism is discussed. Impact energy per unit mass is more suitable to characterize the features of HVC technology than conventional peak pressure and impact energy. Development trend of HVC technology is prospected further.

**Key words:** high velocity compaction (HVC); powder metallurgy; densification mechanism; impact energy per unit mass