

文章编号: 1004-0609(2004)08-1318-06

装粉方式对钛粉压制成形影响的数值模拟^①

欧阳鸿武, 何世文, 韦 嘉, 刘 咏
(中南大学 粉末冶金国家重点实验室, 长沙 410083)

摘 要: 用 MSC. Marc 软件模拟了 3 种不同装粉方式下钛粉压制成形过程中粉末的流动情况及压坯的密度分布规律。结果表明: 粉末装粉方式对粉末压制过程及压坯密度有较大的影响, 与平式装粉方式相比, 采用凸式装粉, 试样的烧结坯密度提高了 6%, 孔隙分布的均匀性也得到相应的改善。

关键词: 钛粉; 粉末压制; 数值模拟; 装粉方式

中图分类号: TG 146.23

文献标识码: A

Numerical simulation on influence of loading ways of powder on titanium powder compaction

OU YANG Hong-wu, HE Shi-wen, WEI Jia, LIU Yong
(State Key Laboratory for Powder Metallurgy,
Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: With the aid of MSC. Marc Software, the numerical simulation of compaction on titanium powder loading in three different kinds of ways was carried out. The results show that the loading ways of powder greatly affect the density and porosity distribution, the sintered density of samples by the way of convex powder loading increases by 6% than that of flat way. The uniformity of porosity distribution has also been improved.

Key words: titanium powder; powder compaction; numerical simulation; way of powder loading

粉末冶金材料性能与其最终密度密切相关, 影响粉末冶金材料密度及均匀性的因素为压制和烧结过程的参数, 同时还受粉末充模状况及粉末迁移过程的影响。许多科研人员研究了粉末的压制和烧结过程^[1-6], 但对装粉方式的研究较少。

装粉工艺直到目前才受到重视^[7], 欧洲 Modnet 工程的研究已经证明它对最终的零件密度有复杂的影响。文献[8]对装粉时模腔内的粉末流动进行了系统研究, 并揭示了流动的复杂性以及颗粒运动与空气位移间的相互作用, 还提出了一些力学方面的基本见解, 用以改进装粉过程中的粉末流动。文献[9]通过空气动力学, 开发一个模腔内液化基

床来实现粉末流动。实践表明, 改进装粉均匀性显著提高了产品的最终压制质量。

数值模拟方法是公认的未来研究粉末压制行为最先进有效的手段, 已成为粉末冶金全行业研究的热点^[10, 11]。MSC. Marc 是著名的高级非线性有限元通用软件之一, 体现了 30 年来有限元分析的理论方法和软件实践的完美结合^[12]。

本文作者使用 MSC. Marc 2001 软件对钛粉的单向压制过程进行数值模拟研究。其目的是探索装粉方式对压制过程的影响, 希望找到一种较理想的装粉方式, 促进压制过程中粉末的各向流动性, 获得更合理的密度分布, 进而制备出更高品质的钛制品。

① 基金项目: 国家高技术研究发展计划资助项目(2001AA332010)

收稿日期: 2003-12-05; 修订日期: 2004-03-04

作者简介: 欧阳鸿武(1964-), 男, 教授, 博士。

通讯作者: 欧阳鸿武, 电话: 0731-8836264; E-mail: hsw0530@sina.com

1 钛粉压制成形数值模拟过程

1.1 3 种不同装粉方式对压制过程的数值模拟

利用 Marc 强大的功能, 选取的材料模型为 Shima, 参量选择值如下: 模腔直径为 10 mm, 填粉高度为 15 mm, 填粉的初始相对密度为 0.60, 摩擦因子为 0.2, 压制终了高度为 10 mm, 对钛粉(粒径小于 75 μm)压制成形进行数值模拟。取圆柱体其中一个径向截面作为研究对象, 将问题简化为平面应力问题。设定平式装粉算例的几何模型和网格划分, 装粉高度为 15.00 mm(图 1(a)); 凸式装粉锥顶高度为 16.25 mm, 锥底高度为 13.75 mm(图 1(b)); 凹式装粉锥顶高度为 13.75 mm, 锥式高度为 16.25 mm(图 1(c))。

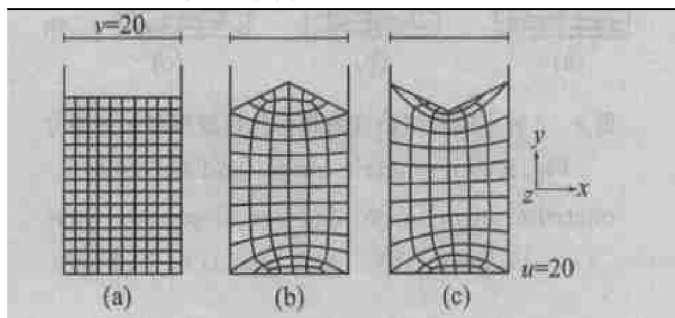


图 1 3 种不同装粉方式的几何模型和网格划分

Fig. 1 Geometric model and network partition of different ways of powder loading

(a) —Flat way; (b) —Convex way;
(c) —Concave way

根据参量的设置, 将这次模拟设计为可以压制到接近全致密, 先不考虑压制压力, 这样我们就可以观察到钛粉由松装粉末到致密金属的全过程, 从而认识压制的全过程。图 2~ 4 所示为增量粉末第 75、175、250 步的径向流动、轴向流动及密度分布图, 每一步长为 0.02 mm, 记录这些时刻的粉末流动状况和密度分布。在图片的左上方显示增量步数和工作时间, 它的下面是对照刻度尺, 底行列出了结果的名称。

Displacement x 表示粉末径向流动, Displacement y 表示粉末轴向流动, Relative density 表示相对密度。因粉末径向流动是向 x 轴的两边, 为此刻度尺设定 $\pm$ 符号, 表示粉末流动方向相反, 在图 2(a)、3(a) 和 4(a) 中用不同灰度区分。

从图 2(a) 中粉末径向流动状况可以看出, 粉末表面呈凸式时粉末的径向流动量比粉末呈平式的径

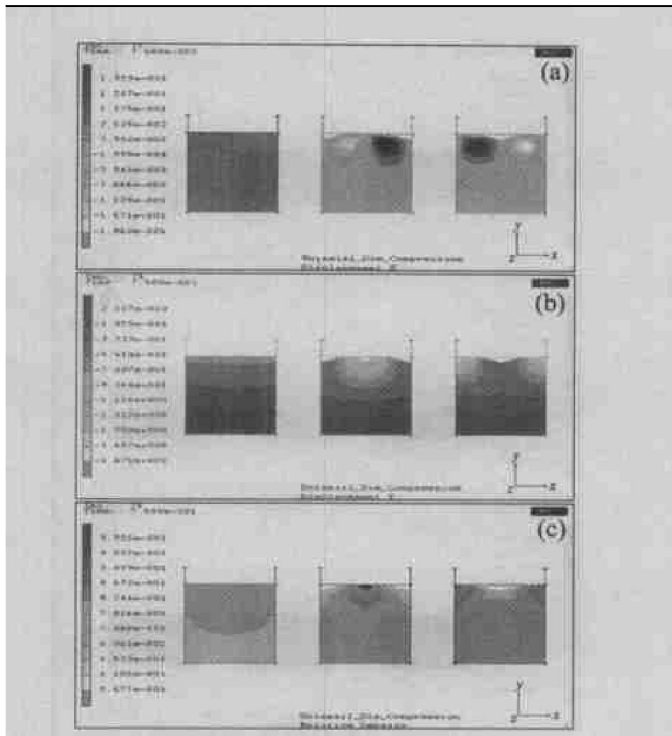


图 2 第 75 步增量粉末的径向、轴向流动及密度分布

Fig. 2 Radial flow (a), axial flow (b) and density distribution (c) of powder in the 75th increment

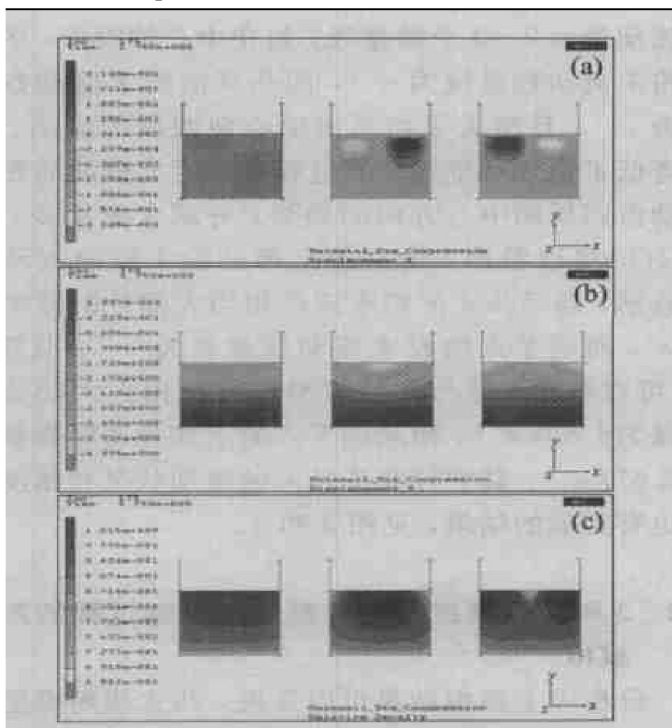


图 3 第 175 步增量粉末的径向、轴向流动及密度分布

Fig. 3 Radial flow (a), axial flow (b) and density distribution (c) of powder in the 175th increment

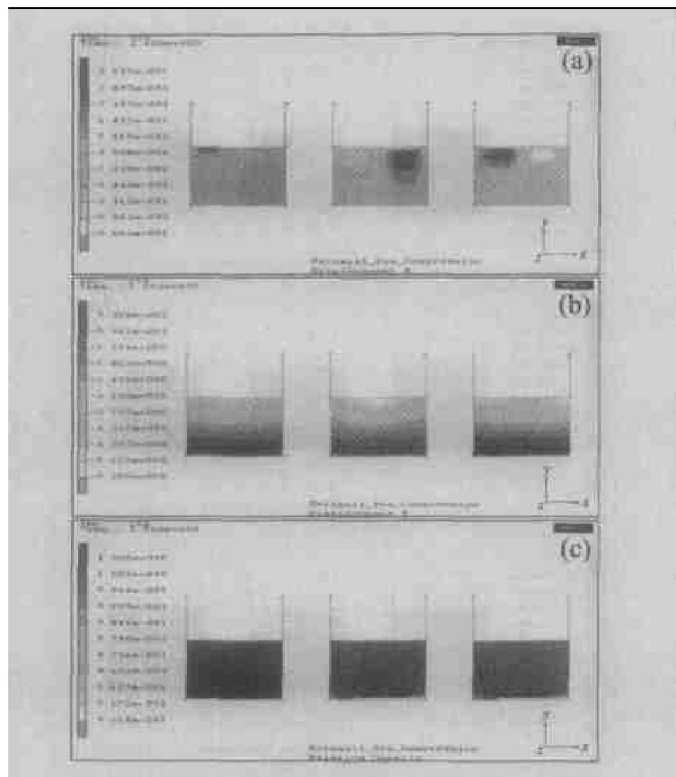


图 4 第 250 步增量粉末的径向、轴向流动及密度分布

Fig. 4 Radial flow (a), axial flow (b) and density distribution (c) of powder in the 250th increment

向流动量大 2~3 个数量级,如在中心轴附近,平式的粉末流动数量级为 e^{-4} ,而凸式的粉末流动数量级为 e^{-1} ,且增大了粉末由中心向四周的流动。这样降低了粉末呈平式压制过程中靠近上模冲的粉末流动由四周向中心方向的趋势,并减少密度差。从图 2(b) 可以看出,模型的上部分粉末轴向流动存在差别,即呈凸式的粉末流动相当大部分的数量级为 e^0 ,而呈平式的粉末流动数量级为 e^{-1} 。从图 2(c) 可以看出,呈凸式的模型密度在相当大部分数量级为 $6.533 e^{-1}$,而采用平式的下部分密度数量级为 $5.677 e^{-1}$ 。其它计算步粉末的流动状况和密度分布也有类似的结果,见图 3 和 4。

1.2 3 种不同程度凸式装粉方式压制过程的数值模拟

分析以上模拟结果可以发现,凸式装粉模型的粉末流动尤其引人注目。无论轴向和径向,粉末都发生了比平式装粉更显著的运动,打破了平式装粉压坯粉末移动困难的局面。这种显著的粉末流动,使压坯密度沿轴向均匀分布。以第 175 步增量(图 3)为例,粉末压坯的中心部分在相当的范围内保持了均匀的高密度,其他部分的密度沿模具侧壁和底

面呈梯度变化。

对凸式装粉展开进一步的数值模拟研究。改变锥顶的高度,观察不同凸装程度对压制行为的影响,以帮助找出具体何种程度的凸装方式可以得到更好的结果。图 5 左边模型编号为(a),锥顶高度为 15.1 mm,高度差不明显;中间模型编号(b),锥顶高度为 16.25 mm;右边模型编号(c),锥顶高度为 17.5 mm。由于编号(c)的锥顶高度是一个假想值,粉末的安息角也不一定能达到 45° ,且这样的堆积状态也很不稳定,因此,本文作者将它当作一个极值进行参考。

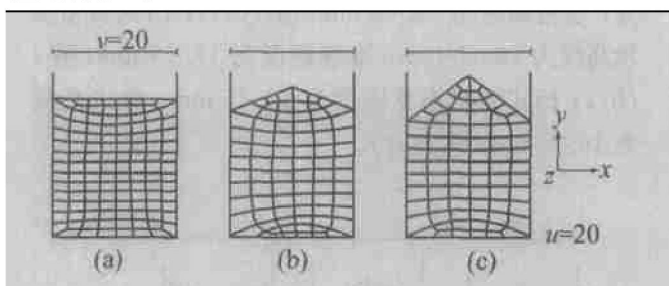


图 5 3 种不同程度凸式装粉的几何建模和网格划分

Fig. 5 Geometric model and network partition of different degrees of convex ways (a) —15.1 mm; (b) —16.25 mm; (c) —17.5 mm

将粉末增量第 175 和 225 步作为取样点,并记录这些时刻粉末的流动状况和密度分布,如图 6 和 7 所示。分析采用如图 2~4 的所示方法,当锥顶高度为 16.25 mm 时,粉末流动状况和密度分布比锥顶高度为 15.1 和 17.5 cm 的效果都好。

2 实验

为了进一步考察压制过程中粉末的流动状况,对数值模拟的结果进行验证,根据数值模拟的条件进行了平式和凸式两种装粉方式的压制实验。所用的两种粉末分别为钛粉(深色)和铝粉(浅色),钛粉与铝粉分层错开装入直径为 14 mm 的圆柱型模具中。另外,使用玻璃漏斗装入模具,使之形成锥式堆积,以实现凸式装粉,压制力均为 150 MPa。实验结果如图 8 所示。

图 8 所示为试样径向截面示意图。从图中可以看出,与平装方式相比,采用凸装粉方式时,压坯的横截面弯曲变形更明显,说明压制过程中,粉末的轴向和径向运动强度明显高于平装方式。对比图 3 和图 4 中粉末的轴向和径向流动模拟结果,发现实验结果与数值模拟的两种装粉方式下的压制结果

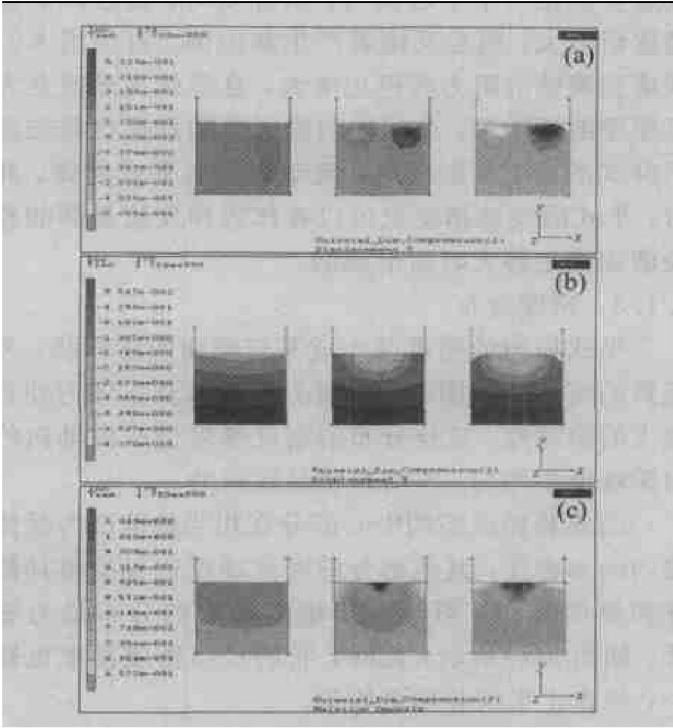


图 6 第 175 步增量粉末的径向、轴向流动及密度分布

Fig. 6 Radial flow (a), axial flow (b) and density distribution (c) of powder in the 175th increment

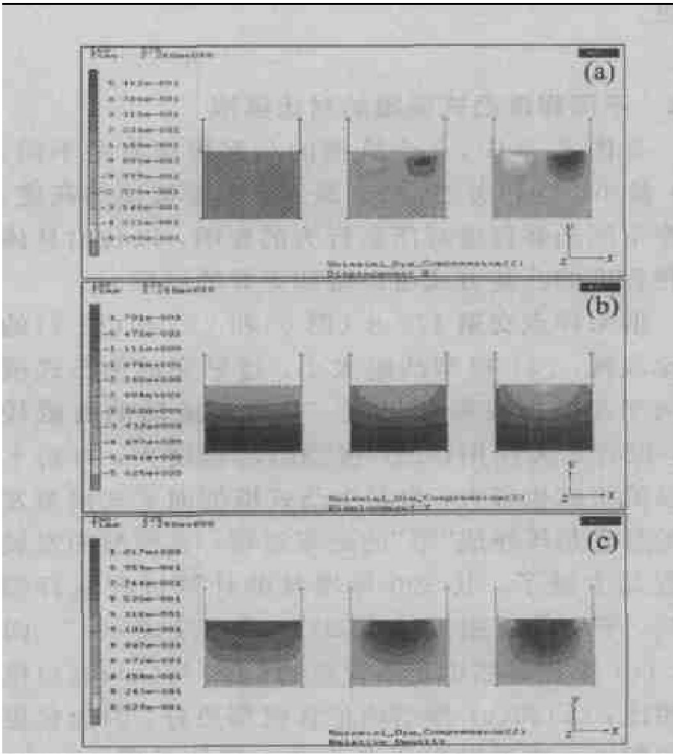


图 7 第 225 步增量粉末的径向、轴向流动及密度分布

Fig. 7 Radial flow (a), axial flow (b) and density distribution (c) of powder in the 225th increment

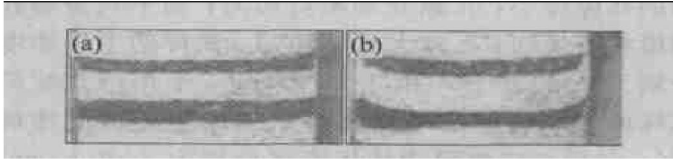


图 8 平装粉末与凸装粉末压制的实验对比

Fig. 8 Contrast experiment of titanium powder compaction in different ways of powder loading
(a) —Flat way; (b) —Convex way

相一致。

图 9 所示为钛粉(粒径小于 $75\text{ }\mu\text{m}$)采用平式装粉、凸式装粉经 500 MPa 压力压制、 $1\text{ }250\text{ }^{\circ}\text{C}$ 真空烧结 3 h 后,试样的孔隙分布图。孔隙分布图试样取为径向截面。

从图可看出,凸式装粉试样的孔隙度比平式装

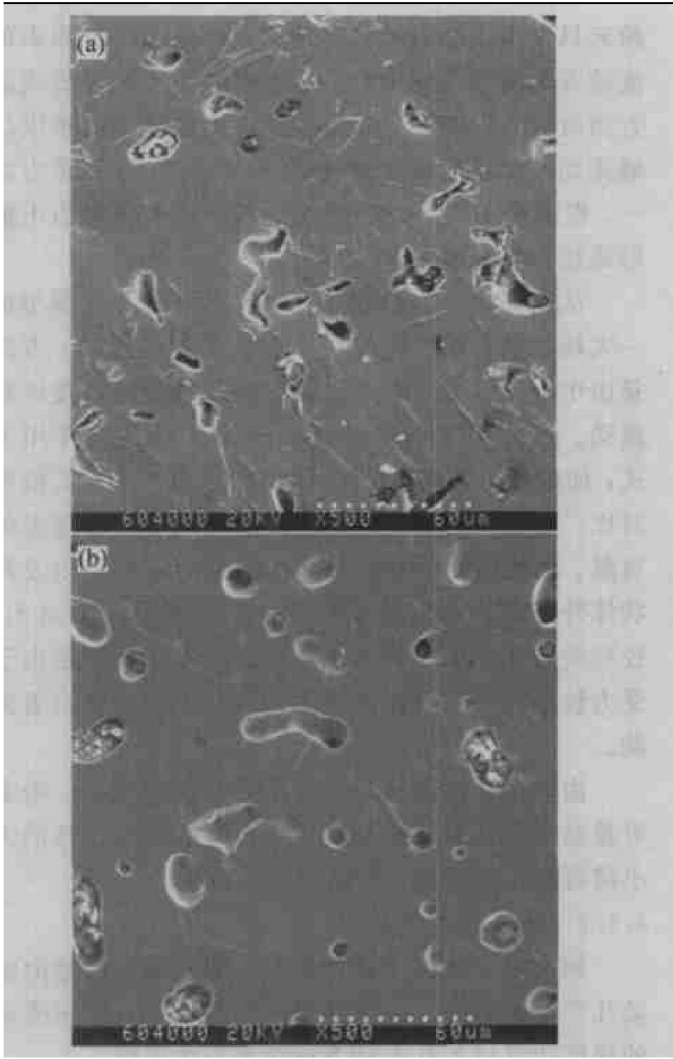


图 9 不同装粉方式下烧结样品的孔隙分布

Fig. 9 Porosity distribution of sintered sample in different ways of powder loading
(a) —Flat way; (b) —Convex way

粉的孔隙度小, 孔隙分布相对均匀; 而平式装粉孔隙形状不规则, 孔隙大且不均匀。试样的生坯密度分别为 3.40 g/cm^3 和 3.57 g/cm^3 , 采用凸式装粉试样的生坯密度比平式装粉试样的生坯密度增加 5%。经排水法测定烧结坯密度分别为 4.20 g/cm^3 和 4.45 g/cm^3 , 采用凸式装粉试样密度比平式装粉试样密度增加 6%。

3 结果与讨论

3.1 3 种不同装粉方式的对比模拟

从计算过程中选择具有代表意义的取样点以说明装粉方式对压制过程的影响。从图 2~4 可观察到, 装粉方式对钛粉压制过程有明显的影响, 其主要差别在于压制过程中粉末的运动状况和强度不同。

3.1.1 粉末径向流动

由图 2(a)、3(a) 和 4(a) 可见, 平式装粉模型中粉末只发生了细微的径向流动。靠近上模冲粉末的流动方向由四周向中心, 远离模冲粉末部分的流动方向由中心向四周, 都是从高密度区域到低密度区域流动。如果把密度差看作粉末流动的驱动力之一, 根据粉末成形力学理论分析, 这个驱动力不能形成较大粉末流动^[13, 14]。

从图 2(a)、3(a) 和 4(a) 可以看出, 凸式模型的一大块区域自始至终发生了较大的径向流动, 方向是由中心向四周, 也是从高密度区域到低密度区域流动。凸式模型的几何结构改变了载荷的作用方式, 使载荷力对粉末径向移动起作用。与平式模型对比, 显然不同装粉方式的贡献值远大于密度差的贡献。环状体的中心部分即压坯的中心部分以及环状体外的部分径向流动较少。中心部分受力最大, 径向受力比轴向受力要小得多。环外部分则是由于受力较小且受阴模模壁阻力的缘故不能发生显著流动。

由于凸式逐渐被压平, 受力结构改变后, 粉末有重新向平式发展的趋势, 凸式模型径向位移的大小随着压制的进行, 先增加而后减少。

3.1.2 粉末轴向流动

如果没有模壁摩擦的影响, 平式粉末的轴向流动几乎是平行的。在模壁摩擦的影响下, 轴向流动的梯度边界成为从上到下逐渐平直的弧线。

由于受载荷作用方式的影响, 凸式模型发生了剧烈的轴向流动。图 2(b)、3(b) 和 4(b) 表明, 凸式模型的轴向流动是由一点→锥顶→向外放射的, 梯

度边界就是一个个近圆形。从开始时, 这些圆的直径逐渐增大, 圆心又接着产生新的圆。直径增大的圆遇到模壁的阻力而停止增大, 且形状逐渐改变为沿模壁的近矩形。凸式轴向粉末流动发展也是先扬后抑式的。在压制后期, 流动形态向平式靠拢。此时, 平式的流动梯度也可以看作当梯度边界圆的直径增加到足够大时所形成的。

3.1.3 密度分布

平式模型的密度基本成平行底面的阶梯状, 为经典的密度分布图, 上下两个底面以及压坯内外有较大的密度差。这样分布的密度梯度造成沿轴向的力学性能不均匀, 对材料也是致命的。

凸式装粉压坯的中心部分在相当的范围内保持均匀的高密度, 其他部分的密度梯度边界沿模具侧壁和底面分布, 第 175 步增量粉末的分布最为显著, 如图 3(c) 所示。此时, 它的径向密度梯度也较小, 分布比平式装粉更均匀。

无论轴向和径向, 凸式模型的粉末都发生了比平式装粉更为显著的运动, 打破了平式装粉压坯粉末移动困难的局面。粉末材料在压制过程中, 小的横向流动是粉末成型的主要变形特征之一。这种显著的粉末流动, 最终导致了沿轴向均匀分布的压坯密度。

3.2 不同程度凸式装粉的对比模拟

在图 6、7 中, 3 个算例的凸起程度有所不同: (a) 最小, (b) 次之, (c) 最大。改变锥顶的高度, 观察不同凸装程度对压制行为的影响, 以找出具体何种程度的凸装方式可以得到更好的结果。

取采样点交第 175 步(图 6) 和 225 步(图 7) 的对比发现: (a) 模型凸起太小, 过早完成由凸式模型向平式模型发展的过程, 对粉末流动的贡献较小, 没有太大作用; (c) 模型凸起程度大, 对粉末流动的贡献也很大, 但是由凸式模型向平式模型发展的过程是压坯成“形”的必须过程, 且模型的发展过程又太慢了。共 300 步增量的计算过程运行到 75%, 平均相对密度达到 91% 时还没成“形”, 因此, (c) 模型显然也是不合适的; (b) 与(a) 和(c) 模型相比, (a) 和(c) 模型的计算机都要好, 因为它更好的解决了成形性与粉末流动贡献的矛盾, 而(b) 模型的凸起程度介于(a) 和(c) 模型之间, 避免了(a) 和(c) 模型的不足, 且综合了两者的优点, 获得了较好的压制密度。因此, 模型凸起的高低要恰当才能充分发挥凸式装粉的作用。

4 结论

1) 使用 Marc 非线性有限元分析软件, 选取合适的模型和模型参量, 模拟了 3 种不同装粉方式对压制过程的影响, 并进行实验验证, 取得了较好的一致性。

2) 结果显示, 凸式装粉方式改善了钛粉在压制过程中的受载方式, 加强了粉末的径向流动性, 明显提高了压坯密度和密度均匀性, 试样烧结坯密度比平式装粉方式提高了 6%。

REFERENCES

- [1] Cocks A C F. Constitutive modeling of powder compaction and sintering[J]. *Process in Materials Science*, 2001, 46(3/4): 201 - 229.
- [2] Cocks A C F. The structure of constitutive laws for the sintering of fine grained materials[J]. *Acta Metallurgical Et Materialia*, 1994, 42(7): 2191 - 2210.
- [3] Doremus P, Pavier I, Kergadallan, et al. Axisymmetric part compaction data base for numerical simulation[J]. *International Journal of Powder Metallurgy*, 1999, 35(3): 63 - 69.
- [4] Cocks A C F. Inelastic deformation of porous bodies[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1989, 37(3): 693 - 672.
- [5] Akisanya A R, Cocks A C F, Fleck N A. Hydrostatic compaction of cylindrical particles[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1994, 42(7): 1067 - 1085.
- [6] Fleck N A. On the cold compaction of powders[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1995, 43(9): 1409 - 1431.
- [7] PM Modnet Research Group. Numerical simulation of powder compaction for two multilevel ferrous parts, including powder characterization and experimental validation[J]. *Powder Metallurgy*, 2002, 45(4): 335 - 344.
- [8] Wu C Y, Cocks A C F, Gillia O T. Die filling and powder transfer[J]. *The International Journal of Powder Metallurgy*, 2003, 39(4): 51 - 64.
- [9] Morimoto Y, Hayashi T, Takei T. Mechanical behavior of powder during compaction a mold with variable cross sections[J]. *The International Journal of Powder Metallurgy & Powder Technology*, 1982, 18(2): 129 - 145.
- [10] Lewis R W. Computer-aided simulation of metal powder die compaction processes [J]. *Powder Metallurgy*, 1993, 25(6): 287 - 293.
- [11] 贺峻, 康永林, 任学平. 粉末构件 CIP 成形过程有限元数值模拟[J]. *材料科学与工艺*, 1997, 7(S): 186 - 189.
HE Jun, KANG Yong-lin, REN Xue-ping. Numerical simulation of cold isostatic pressing of powder component [J]. *Material Science and Technology*, 1997, 7(S): 186 - 189.
- [12] 陈火红. Marc 有限元实例分析教程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002. 271 - 272.
CHENG Huo-hong. Example Tutorial of Marc Finite Element Analysis[M]. Beijing: China Machine Press, 2002. 271 - 272.
- [13] Gethin D T, Tran V D, Lewis R W, et al. An investigation of powder compaction process[J]. *International Journal of Powder Metallurgy*, 1994, 30(4): 385 - 398.
- [14] 王盘鑫. 粉末冶金学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1997. 120 - 124.
WANG Pan-xin. Powder Metallurgy [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1997. 120 - 124.

(编辑 李艳红)