

不锈钢粉末冷等静压数值模拟与实验验证

Simulation and Experiment of Cold Isostatic Pressing of
Stainless Steel Powder

杜艳迎, 史玉升, 魏青松, 刘锦辉

(华中科技大学 材料成形与模具技术国家重点实验室, 武汉 430074)

DU Yan-ying, SHI Yu-sheng, WEI Qing-song, LIU Jin-hui

(State Key Laboratory of Material Forming and Die and Mould

Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

摘要: 通过冷等静压实验获得了不锈钢粉末的压力-密度关系, 在模拟中用于表征材料的硬化特性。为了描述粉末的致密化行为, 使用了 ABAQUS 有限元软件中的 Cam-Clay 模型, 对粉末的冷等静压实验过程进行模拟, 结果表明实验的尺寸与模拟的结果符合得较好, 说明模拟中使用的参数设置是合理的。然后使用选择性激光烧结/冷等静压复合工艺制造球形制件, 并对冷等静压过程进行模拟, 结果表明制件变形比较均匀, 实验的结果与模拟的结果符合得较好, 密度的预测与实验结果比较吻合。通过模拟不仅为冷等静压工艺提供有益的指导, 也为以后复杂试样的冷等静压尺寸设计提供了重要参考。

关键词: 冷等静压; 硬化特性; 不锈钢; 模拟

中图分类号: TF124 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2010)03-0089-04

Abstract: The relationship between pressure and density of stainless steel powder has been attained by Cold Isostatic Pressing experiments. It has been used to describe hardening property of material in simulation. To describe the compaction behaviour, the Cam-Clay model of ABAQUS/Standard finite element software has been used to simulate Cold Isostatic Pressing experiments. The results of experiment and prediction are compared that show a general good agreement which implies the parameters used in simulation are appropriate. Then a ball specimen formed by Selective Laser Sintering has been subject to Cold Isostatic Pressing that is also simulated. The results show that the deformation is uniform. The results of experiment and prediction show a general good agreement. And predicted density also accord with that of experiment. The simulation can not only give a useful direction to process of Cold Isostatic Pressing, but also supply important instruction to dimension design of complex-shape parts.

Key words: cold isostatic pressing; hardening property; stainless steel; simulation

冷等静压技术(Cold Isostatic Pressing, CIP)是一种重要的粉末冶金成形方法, 可以加工常规凝固条件下难以制造的高温合金材料, 硬质合金材料, 陶瓷材料等。与铸造和锻造方法相比, 冷等静压具有制件组织均匀, 无成分偏析, 尺寸精度高, 材料利用率高, 纯度高, 在制备过程中不需要加入任何成形剂, 成本低等优点。通过 CIP 可以使制件的密度有大幅度地提高, 增加制件的强度。CIP 成形是一个非常复杂的成形过程, 粉末材料经过 CIP 后制件的密度增大。对密度和尺寸的预测, 在传统的 CIP 生产过程中, 主要通过操作人员的丰富经验, 以及反复实验的方法, 即经验性的试错法。这种方法得到制件的尺寸和性能难以保证,

而且周期长, 成本高, 需要耗费大量的人力和物力。数值模拟方法对改进 CIP 技术工艺是一种十分有效的方法, 目前这一方法已经得到了极大的关注。预测压缩后制件的形状, 以及在各个方向的收缩率, 可以提高制件的精度和质量, 从而减小切削甚至无切削, 达到一次性近净成形的目的。粉末材料与致密材料不同, 存在孔隙, 并且它的性质还受到颗粒形状、粒度分布、材料成分等的影响, 还没有一个统一的描述粉末力学行为的本构方程。粉末材料的本构方程可以分为宏观模型和微观模型两类, 微观模型由于考虑了微观性质, 参数的测量比较困难。使用较多的是宏观模型^[1-3], 它们假设材料为可压缩的连续介质, 是建立在比较成熟

的传统弹塑性力学基础上的, 公式容易理解, 而且参数的测量也比较简单。使用该模型模拟的结果与实际符合得较好^[4-6]。文献[7]对 CIP 进行模拟, 但是由于零件通过快速成形方法制造, 所以其中一个方向计算的误差较大。文献[8]对陶瓷粉末的 CIP 过程进行了模拟, 文献[9]对热等静压的致密化模型进行了较全面的描述, 对 CIP 的模拟具有一定的借鉴作用, 但对不锈钢 304 粉末材料的 CIP 过程的数值模拟还少见报道。

1 材料和实验

使用的不锈钢材料为 AISI304(北京沃德莱泰科技发展有限公司)。成分如表 1 所示。

表 1 不锈钢粉末 AISI304 的成分(质量分数/%)

Table 1 Composition of stainless steel AISI304
(mass fraction/%)

C	Si	Mn	Cr	Ni	O	Fe
0.15	0.80	0.20	17.5-18.5	9-10	< 0.2	Bal

粉末的粒度组成-200 目。制件为圆柱体, 如图 1 所示。首先将粉末装入纸制的包套中, 振动、摇实后密封。然后使用冷等静压机, 分别施加 100, 200, 300, 400, 450, 630 MPa 六种不同的压力, 使制件致密化, 并且测量加压前后制件的尺寸和质量, 得到制件加压前后的密度。图 2 为 CIP 后的圆柱体试样。

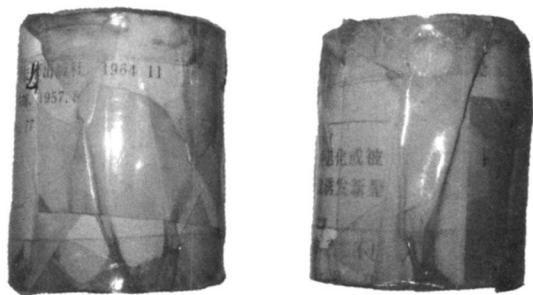


图 1 CIP 前的圆柱体试样
Fig. 1 Column before CIP



图 2 CIP 后的圆柱体试样
Fig. 2 Column after CIP

得到圆柱体摇实密度为 3.9 g/cm^3 , 致密不锈钢 AISI304 的密度为 8.0 g/cm^3 , 制件的初始相对密度为粉末材料的初始密度与相应致密材料密度之比, 即 0.49, 实验得到的压力与相对密度曲线如图 3 所示。

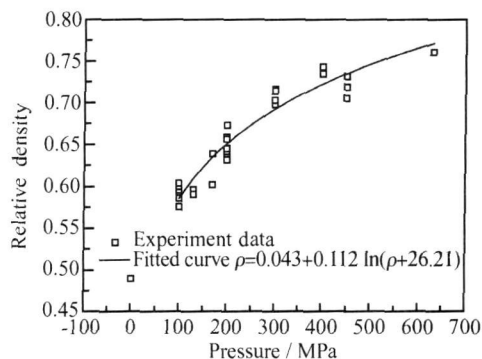


图 3 摇实密度下的压力-相对密度曲线
Fig. 3 Pressure-relative density curve at tap density

2 数值模拟

为了预测制件 CIP 后的尺寸和密度, 从而达到减少实验次数和降低成本的目的, 本工作将在 ABAQUS 软件平台上, 使用 Cam-Clay 模型进行数值模拟。

2.1 本构模型

Cam-Clay 模型最初用于描述岩土材料的屈服面, 由于岩土材料与金属粉末材料类似, 都是多孔性材料, 在静水压力作用下发生体积收缩, 所以该模型被扩展用来描述金属粉末的屈服面。Cam-Clay 模型的表达式^[10]如式(1)所示。

$$\frac{1}{\beta} \left[\frac{p}{a} - 1 \right]^2 + \left[\frac{t}{Ma} \right]^2 - 1 = 0 \quad (1)$$

式中: p 是静水压力; t 是应力偏量第二不变量和应力偏量第三不变量的函数; M, β, a 是常数。 a 具有硬化的意义, 本工作假设忽略偏应力第三不变量的影响, 这时 $t = q, q$ 是 Mises 应力。

2.2 研究对象

以上述 CIP 实验过程中的一个试样为研究对象, 首先对粉末的 CIP 实验过程进行模拟。圆柱体尺寸为 $\phi 40 \text{ mm} \times 45.96 \text{ mm}$, 初始密度为 3.9 g/cm^3 。由于粉末加包套的方法只适用于简单的形状, 对于曲面如球形和复杂形状的制件, 包套的制作比较困难。本文将使用选择性激光烧结与 CIP 结合的方法成形球形零件。得到 CIP 前球体制件的直径为 14.6 mm , 初始密度为 3.6 g/cm^3 。由于圆柱体和球体均为轴对称结构, 所以使用二维的轴对称单元进行模拟, 可以减小计算量。使用 4 节点双线性轴对称四边形单元 CAX4R 对实体进行网格化。在 ABAQUS 中进行计算。

2.3 CIP 模拟结果与分析

首先对 CIP 实验中的圆柱体进行模拟。粉末受到 630MPa 的压力。使用实验得到的硬化方程(如图 3 所示)作为硬化曲线,其他参数来自文献[11]。圆柱体实验和模拟后的尺寸如表 2 如示。由表 2 可以看出,模拟结果与实验结果的相对误差小于 3.1%。产生误差的主要原因是,同一批圆柱体经过 CIP 后的收缩是不完全相同的,测量时存在尺寸误差,模拟所用的圆柱体是其中的一个制件,所以不能代表该压力下的平均值,再加上模拟过程中的计算误差等,所以 3.1% 的误差是合理的。模拟得到的压力-相对密度关系如图 4 所示,其中的实验结果数据点与图 3 的压力-相对密度数据相同,实验和模拟的数据点趋势基本相同,说明模拟和实验的结果符合得较好。

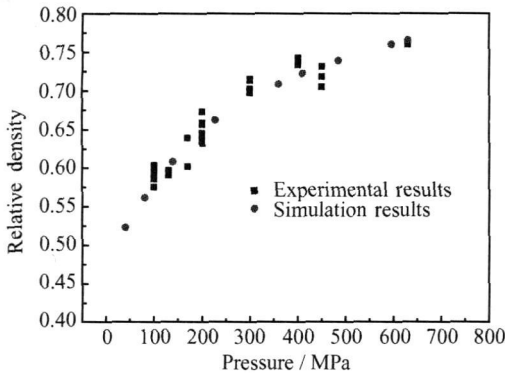


图 4 模拟结果与实验压力-相对密度图的比较
Fig. 4 Comparison of pressure-relative density data between simulation and experiments

在以上模拟的基础上对球体的 CIP 过程进行数值模拟。粉末受到 650MPa 的静水压力,边界条件、模型参数的设置与圆柱体相同。从图 5 可以看出球体的尺寸均匀地减小,只发生体积的收缩,形状没有变化。CIP 前后的尺寸如表 3 如示。

表 2 圆柱体和球体实验结果与模拟结果

Table 2 Results of experiment and simulation of the column and the ball

	Before CIP/mm	Experimental result/mm	Simulation result/mm	Shrinkage ratio ^a	Relative error ^b
Height of column	45.96	41.27	40.00	- 10.20%	- 3.08%
Diameter of column	40.35	34.67	35.11	- 14.08%	1.27%
Diameter of ball	14.6	12.5	12.2	- 14.4%	- 2.4%

a: Shrinkage ratio = (Experimental results-dimensions of before CIP)/ dimensions of before CIP× 100%; b: Relative error= (simulation results-experimental results)/ Simulation results× 100%

由表 2 可以看出,模拟和实验的相对误差为 2.4%,模拟结果与实验结果符合得较好。在 Mises 云图(如图 6 所示)中,虽然 Mises 应力不均匀,但它的绝对值非常小,只有 10⁻⁵数量级。因为 Mises 应力是表征偏应力大小的量,而偏应力又是引起制件扭曲变形的原因, Mises 应力很小,所以试样是均匀收缩的,而没有形状的扭曲。

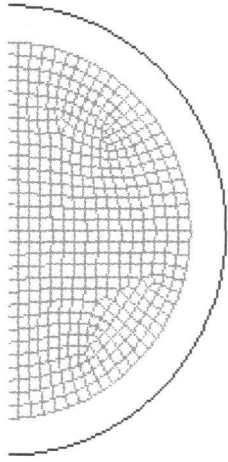


图 5 球体 CIP 前后的形状,实线为 CIP 前的形状,网格为 CIP 后的形状
Fig. 5 Shape of ball before and after CIP, solid lines is the shape before CIP and mesh is that after CIP

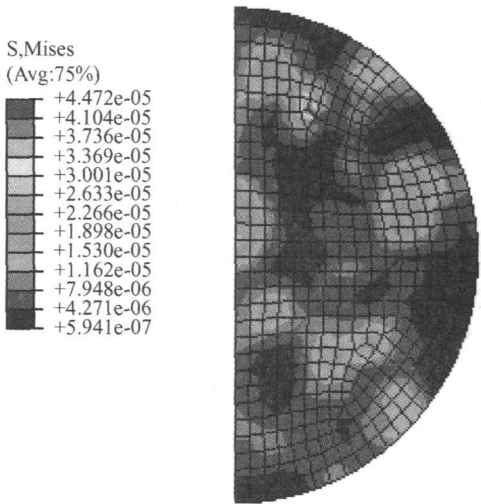


图 6 球体 Mises 应力云图
Fig. 6 Mises stress contour of ball

CIP 实验后的密度为 6.16g/cm³,模拟得到的密度为 6.141g/cm³(如图 7 所示),与实验的结果较为符合,因为在不考虑包套的情况下,制件处于完全的等静压状态,所以密度分布也是均匀的。使用该结果可以用于估计制件的平均密度。

由于模拟过程中考虑了卸载,所以在尺寸设计中并没有考虑弹性效应引起的尺寸胀大值。根据反推得

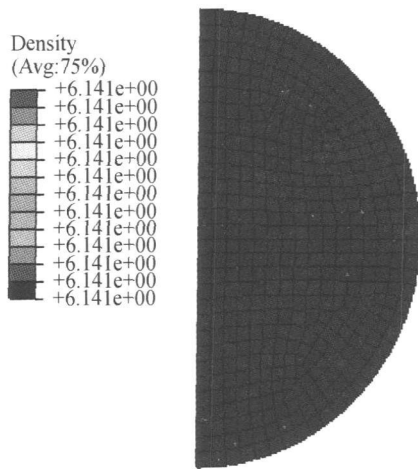


图 7 球体 CIP 后的相对密度云图

Fig. 7 Relative density contour of ball after CIP

到的原形件尺寸进行模拟,以验证原形件尺寸的准确性,如果模拟的结果不理想,还可以继续修正尺寸,再进行模拟,这个过程可能需要反复几次才能获得满意的结果。

3 结论

(1) 通过 CIP 实验获得了摇实密度下不锈钢粉末的压力-密度曲线,为不锈钢粉末 CIP 数值模拟提供了重要的材料参数。

(2) 以 CIP 实验的圆柱体试样和选择性激光烧结的球体试样为研究对象,在 ABAQUS 中对 CIP 过程进行数值模拟。

(3) 模拟的结果与实验结果基本吻合(误差小于 3.1%),说明 Cam-Clay 模型能够反映不锈钢材料的 CIP 过程,从而为零件的尺寸设计和制定合理的工艺参数提供参考。并且为以后更加复杂零件的 CIP 过程模拟奠定了基础。

参考文献

[1] GU Y, HENDERSON R J, CHANDLER H W. Visualizing isostatic pressing of ceramic powder using finite element analysis

[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2006, 26: 2265-2272.
 [2] SZANTO M, BIER W, FRAGE N, et al. Experimental based finite element simulation of cold isostatic pressing of metal powders [J]. International Journal of Mechanical Science, 2008, 50: 405-421.
 [3] YUAN W X, MEI J, SAMAROV V, et al. Computer modelling and tooling design for near net shaped components using hot isostatic pressing [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 182: 39-49.
 [4] KIM K T, LEE S C, RYU H S. Densification behavior of aluminum alloy powder mixed with zirconia powder inclusion under cold compaction [J]. Material Science and Engineering A, 2003, 340: 41-48.
 [5] WIKMAN B, SVOBODA A, HÄGGBLAD H A. A combined material model for numerical simulation of hot isostatic pressing [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2000, 189: 901-913.
 [6] PARK H, KIM K T. Consolidation behavior of SiC powder under cold compaction [J]. Materials Science and Engineering, 2001, A299: 116-124.
 [7] 史玉升,任丽花,魏青松,等. 选择性激光烧结制件冷等静压形变模拟与试验[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2007, 35(12): 91-94.
 [8] 贺峻,康永林,任学平. 数值模拟在陶瓷粉末材料冷等静压过程中的应用[J]. 材料科学与工程, 2002, 10(1): 97-99.
 [9] 韩凤麟. 热等静压(HIP)工艺模型化发展[J]. 粉末冶金工业, 2005, 15(1): 12-25.
 [10] HIBBITT B. ABAQUS Theory Manual [M]. Netherland: Elsevier Science Ltd, 1996.
 [11] 孙雪坤,苗雨阳,王国栋. 金属粉末的模压致密化特性[J]. 中国有色金属学报, 1999, (S1): 239-241.

基金项目: 国家 863 项目(2007AA03Z115); 中国博士后基金项目(2000410277)

收稿日期: 2009-01-12; 修订日期: 2009-12-15

作者简介: 杜艳迎(1977—),女,博士研究生,从事选择性激光烧结与等静压复合成形模拟方面研究工作,联系地址: 湖北武汉市青山区和平大道 945 号武钢集团国际经济贸易公司工矿备件部 邹亮转(430080), E-mail: jenny_dyy@sina.com

(上接第 28 页)

[14] ZHANG X, VAN DEN BOSCH, SLOOF W G, et al. Comparison of the morphology and corrosion performance of Cr(VI) and Cr(III)-based conversion coatings on Zinc [J]. Surface & Coatings, 2004, (5): 1-13.
 [15] SIMON P, BUIN, DABOSI F, et al. X-ray photoelectron spectroscopy study of passive layers formed on lead-tin alloys [J]. Journal of Power Sources, 1994, 52: 31-39.
 [16] 孙杰,齐国超,于晓中,等. 镀锡钢板铬酸盐钝化膜中铬的 X 射线光电子能谱分析[J]. 冶金分析, 2007, 27(1): 17-20.

[17] JOHN F M OULDER. Handbook of X-ray Photoelectron Spectroscopy [M]. Minnesota: Physical Electronics, 1995. 213-242.

收稿日期: 2008-09-19; 修订日期: 2009-06-02

作者简介: 孙杰(1971—),男,副教授,博士,从事腐蚀科学与防护新技术、耐热耐磨涂层、电磁功能材料的制备与应用研究等,联系地址: 沈阳理工大学环境与化工学院(110168), E-mail: jiersun2000@yahoo.com.cn