# 热等静压包套变形与粉末致密化的研究

侯志强,史玉升,刘国承,王基维,魏青松 (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)

摘 要:根据粉末塑性变形理论,采用 MSC Marc软件完成了 316不锈钢粉末热等净压成形过程的有限元模 拟.重点分析了热等静压成形过程中致密包套沿径向和轴向的形变过程及其内部松装粉末的致密化规律.为 了验证模拟结果,完成了测试样件的实物实验.为了更精确的结果比较,在样件的不同位置上选取了测试 点.对比分析模拟和试验对应点的研究结果表明,径向位移的模拟结果偏小,相关点误差达到 - 5.33%、 - 13.64%;而轴向位移的模拟结果偏大,相关点的误差达到了 7.43%、3.14%和 4.57%;两者变形体积的 相互抵消致使致密度模拟误差约为 4.23% ~ 6.45%。研究结果还表明,对于简单的柱状形包套采用有限元 模拟的方法.可以形象、准确描述包套的形变以及粉末的致密化过程,此方法可以为复杂结构包套的研究提 供参考,从而实现热等静压过程的精确控形.

关键词: 热等静压; 数值模拟; 验证; 包套; 粉末; 致密化 中图分类号: <sup>TF</sup>123 文献标识码: A 文章编号: 1671-6620(2011)02-0136-06

# Investigation can s deformation and densification for stain less steel powders during hot isostatic pressing

HOU Zhi qiang SHIYu— sheng LIU Guo cheng WANG Jiw ei WEIQ ing\_song (State Key Laboratory of Material Precessing and Die and Mould Technology Huazhong University of Science and Technology Wuhan 430074 China)

Ab stract According to the plastic deformation theory of powder finite element simulation of 316 stainless steel powder with hot isostatic pressing was completed by using MSC. Marc Software The car is deformation process along the radial and axial directions was called and the characteristics of the powder is shaping densification analyzed Formore accurate results test points of different location in the sample were selected From the comparison of the data the simulation results of the radial displacement are smaller the error ratio of the related point is -5.33%, -13.64%; while the simulation results of the axial displacement are slightly larger the related point error ratio reaches 7.43\%, 3.14\% and 4.57\%; the error ratio of density in the simulation is only -0.43% to 1.93%. For simple cylindrical shape components, simulation of finite element can accurate y describe the deformation of the can and the powder densification process this method can be set for the study of complex structure caused by deformation K ey words hot isostatic pressing numerical simulation verification can powder densification

热等静压(hot isostatic pressing H IP)是利用 高温高压载荷(通常为气体)来实现粉末材料的 制备和零件成形的一种工艺方法,其成形温度一 般在 1 000 ℃左右,压力通常在 100 MPa以上<sup>[1]</sup>. 采用热等静压的方法能够得到相对致密度高达 99.80%~99.99%且密度分布均匀粉末制件,更 重要的是能够生产形状复杂和近净形状的零件. 制作近净形状零件是热等静压技术的一个特长, 与一般工艺相比,热等静压技术可以使材料的利 用率由 10% ~20%提高到 50%,同时可缩短工艺 流程,节省大量机加工,从而使成本降低 50% ~ 80%.在热等静压工艺中,制品的密度、尺寸和形 状是靠正确的包套设计来保证的,包套在热等静 压的成形过程中起到了压力介质作用.由于金属

收稿日期: 2010-12-07.

基金项目: 国家 863 项目 (Nº 2007 AA03 Z115); 国家科技重大专项 (Nº 2009 ZX04005 - 041); 华中科技大学自主创新基金 (Nº 2009 Z014Y).

作者简介:侯志强 (1987—)男,湖北武汉人,华中科技大学硕士研究生. E<sup>ma</sup>il h<sup>zq</sup>—022<sup>@</sup>163.<sup>com</sup>,史玉升 (1962—),男, 华中科技大学教授,博士生导师.

粉末在热等静压致密化之前密度分布不完全均 匀,导致在高温高压环境中各个方向的收缩不一 致,使最终金属零件与设计的形状和尺寸存在一 定偏差,因而精确控形是热等静压近净成形方法 实施的关键技术和最大难点之一.

针对以上问题,若采用反复试验的方法,则会 增加制造成本,延长制造时间.因此,自上世纪90 年代以来,对热等静压过程进行有限元建模,并应 用计算机模拟热等静压过程成为研究热点.工业 发达国家对热等静压近净成形及其模拟研究技术 比较深入. Haggb Ad与 L<sup>i2</sup>提出了一种基于连续 介质理论的 HP微观模型,并对两种典型零件的 成形过程进行了数值模拟,预测结果与实际情况 较为吻合. Ashoka<sup>3</sup>应用热机耦合的黏塑性理论 对 HP过程进行了有限元模拟,分别考虑有无包 套、是否等温加热的影响,结果显示,在常规温度 和压力下零件并非处于等压力状态,只有在各方 向温度绝对相等的条件下才能获得等静压效果. 我国在该领域的研究起步较晚,主要偏向于用 HP方法制备材料, 而非近净成形零件, 在模拟控 形方面只有少数单位进行了初步研究. 陈平等<sup>[4]</sup> 对数值模拟技术在粉末 HP成形中的应用进行 了综述;崔小朝等<sup>[5]</sup>对 ZQ 粉体压制轴对称块体 过程进行了有限元数值模拟,并分析了粉体变形 的几何形状、应力应变场及密度分布.陈朗等[9] 进行了炸药柱等静压实验,并对炸药柱保压阶段 进行了数值模拟计算,得到等静压条件下药柱内 部压力和温度变化,分析了药柱形变以及压力和 温度分布.

为了更加准确地控制热等静压过程中的形状 变化和致密化过程,本文以 316不锈钢粉末为例 展开了研究.在完成测试样件的三维有限元模拟 的同时,针对其形状变化和致密度情况进行了实 验验证,通过与实验样件的结果比较,评估了本次 模拟的质量,为后面更进一步采取其他粉末材料 制作复杂结构样件奠定了基础.

- 1 材料与方法
- 1.1 材料与几何模型

根据包套材料的选取原则,在保证可靠的气 密性和良好的强度、塑性前提下,考虑到易加工成 形、易剥离以及良好的经济实效,本文选取 304不 锈钢作包套材料.包套由圆筒以及上下两个端盖 焊接密封而成,其中上端盖中间留一抽气孔(在 模拟中忽略不计)其半个截面形状以及相关尺 寸如图 1所示.经过震实后 316不锈钢粉末相对 致密度约为 66.7%.

1.2 热等静压工艺与实验

热等静压成形的保压温度一般为 0.5 ~ 0.7  $T_n$  ( $T_n$  为粉末的熔点)而压力一般在 147 MPa(载荷 1 500  $k^{g/cn^2}$ )以下.结合实际工况,热等静压实验,压力和温度的加载历程保持同步,即升温升压 2 h保温保压 2 h降温降压 2 h峰值压力和峰值温度分别为 100 MPa和 1 050  $^{\circ}$ .其工艺参数如图 2所示:





- 1.3 有限元模拟
- 1.3.1 有限元网格

在建立模型时充分考虑了模型的对称性.在 不影响分析精度的前提下,利用模型的对称性可 以大幅度减少网格的单元和节点数,减少计算时 间.由于包套形状的轴对称以及两端对称性.在建 立模型是选取整体的 1/8进行分析.采用八节点 六面体单元进行网格划分,包套材料采取 304不 锈钢,共划分 684个单元;粉末体采取 316不锈钢 粉末,共划分 1440个单元.

1.3.2 材料本构模型

热等静压成形属于复杂的非线性过程,主要 包括材料的非线性、边界形状的非线性、接触的非 线性等.在有限元网格建立完成后,需要对这些参数进行参数设置和控制<sup>[7 8]</sup>.对于粉末成形的描述, Marc软件中是通过 Shina屈服函数来完成的<sup>[9 10]</sup>.

Marc中经过修正的 Shima模型如式 (1) 所示:

$$F = \frac{1}{\gamma} \left( \frac{3}{2} \sigma_{y} \sigma_{d} + \frac{\sigma_{m}^{2}}{\beta^{2}} \right)^{0.5} - \sigma_{y} \qquad (1)$$

其中  $\sigma_y$ 是单轴屈服应力,  $\sigma_a$ 是偏应力张量,  $\sigma_m$ 是静水压力,  $\gamma$ 和  $\beta$ 是材料参数.  $\sigma_y$ 是温度和相 对密度的函数,  $\gamma$ 和  $\beta$ 仅是相对密度的函数, 可用 式 (2)和式 (3)表示 ( $\rho$ 是相对密度).

$$\gamma = (b + b \rho^{b_3})^{b_4}$$
 (2)

$$\beta = (q + q \rho^{3})^{4}$$
(3)

式中, 印 ④过单轴压缩实验获得.通过单轴压 缩实验的增量加载,可以获得  $\gamma$ 和  $\beta$ 与相对密度 的关系数据,通过数学拟合数据点可以获得  $\gamma$ 和  $\beta$ 与相对密度的函数关系,进而可以获得  $\gamma$ 和  $\beta$ 与相对密度的函数关系,进而可以获得 8个系 数 b、b、b和 9、9、9、9的数值.  $\rho$ 是相对密 度.在 Shim 模型研究的基础之上,本次模拟中, 分别取 b=0 b=1、b=1、b=2.5、9=5.9、9 =-5.9、9=1、9=-0.514,相应可以计算得到  $\gamma$ =0.223.6  $\beta$ =0.603.3

1.3.3 载荷与边界

在本项中,依次完成几何特征定义、材料特性 定义、接触条件定义、初始条件的定义、边界条件 定义、设定收敛准则并提交计算,具体细节不再赘 述.具体的材料参数设定参见文献[11~13].

2 结果与分析

2.1 包套变形模拟结果与分析

由于本次模型的对称性,为了更加方便准确 地表示其形变情况,可以将包套的变形分为轴向 变形与径向变形.随着时间步的向后推移,包套的 形状将会有一个明显的变化过程.

轴向形状随时间步的变化过程如图 3所示:

可以看出,包套的轴向位移的变化分为两个 过程:从第 1个时间步到第 100个时间步为包套 的膨胀历程,这一点可以从数值变化反映出来.这 一阶段,包套的轴向位移皆为正值,其中以包套的 顶端外缘处膨胀最厉害;在第 100个时间步,该处 膨胀量达到 0.478 mm,而端盖中心处以及端盖底 端处的膨胀量最小,基本上为 0,由第 110个时间 步的分析得到,包套顶端中心处和包套的下半部 分的位移已经为负值,轴向位移在 0到-0.391 mm 之间,也就是说明在第 100步至第 110步之间,包



## 图 3 包套在第 50, 100, 110, 200, 300, 400个时间步的轴向位移 Fğ 3 The can's axàldisplacements in the 50

100, 110, 200, 300, 400 time steps

套已经结束了由于受热而引起的体积膨胀阶段,转而随着温度的继续升高和压力的逐渐加大,转 而进入体积稳定收缩阶段;第 150步以及第 300 步为包套的稳定压缩过程,其轴向压缩量逐步增 大;第 400步也就是分析计算的最后一步,包套已 经压缩变形十分明显,最高轴向压缩量可达到 4.325 mm.

径向形状随时间步的变化如图 4所示,通过 分析. 其径向位移也可以明显的分为膨胀和收缩 两个阶段. 从第一个时间步到第 100个时间步为 径向膨胀过程, 径向膨胀最大量可达到 0. 265 mm, 转而从第 110个时间步开始出现明显的径向收 缩, 直至最后一步即第 400个时间步收缩完成, 最 大径向收缩可达到 2. 552 mm,其详细渐变过程不 再赘述.

![](_page_2_Figure_21.jpeg)

图 4 包套在第 50、100、110、200、300、 400个时间步的径向位移 F8 4 The carr s radial displacements in the 50 100, 110, 200, 300, 400 time steps

#### 2.2 粉末致密化模拟结果与分析

伴随这包套体积收缩的进行,粉末也完成了 致密化.粉末的致密度变化过程如图 5所示.

若将 85% 致密度作为一个界限的话,可以分 析得出粉末材料是如何从 66.7% 的致密度达到

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

![](_page_3_Figure_1.jpeg)

95%左右的.在第 150个时间步中,模型中还没有 任意一点致密度达到 85%;在第 200个时间步 中,粉末体大部分致密度已经达到 85%,只有顶 部靠近端盖的一小部分致密度还未达到 85%,其 交界处形状呈"<sup>V</sup>"形;在第 250个时间步中,粉末 体的大部分致密度已经到 87.5%以上,同样,只 有端盖附近一小部分致密度比较低,此时" <sup>V</sup>"形 区域已经消失:在第 300个时间步中,粉末体大部 分致密度已经达到 90%以上,靠近端盖处以及端 盖下方一封闭区域致密度较低,大概在 87.5%到 90%之间;在第 350个时间步中,粉末体的致密度 可以明显分成两部分," <sup>V</sup>"形区的内部致密度相 对较低,在 90% 到 92.5% 之间; "V" 形区外部致 密度相对较高,已经达到 92.5%以上;在第 400 个时间步 (即最后一步)中,除了外缘很小一部分 区域,粉末的整体致密度已经趋于稳定,达到 92.5%以上,根据以上致密化分析可以看出,粉末 的致密化过程是一个从外到内(径向),从中间到 两端(轴向),逐渐致密的过程.

图 6为粉末成形后致密度的分布,可以看出, 模拟结果显示的致密度并不是均匀分布的,其密 度分布区间为 92.9% ~95.1%,致密度由粉末体 中心向端盖处递减,密度分布区间呈不规则"<sup>V</sup>" 形;图 7为随机抽取的第 1621号节点随时间步的 致密化曲线,可以看出,在第 100个时间步之前, 其密度是逐渐下降的,这是由于包套随着温度的 变化产生体积膨胀造成的;在第 100个时间步之 后,特别是第 100到第 200个时间步之间,粉末的 致密度突然上升,此时温度和压力的升高发挥作 用,粉末颗粒塑性流动能力增加,加速致密;随着 温度和压力的下降,致密化速度有所缓和,最终该 点致密度可达到 94.2%.

![](_page_3_Figure_4.jpeg)

# 2.3 实物试验与模拟误差分析

热等静压前后零件如图 8所示.包套的形状 发生了明显的变化,主要形貌特征表现为:端盖处 的向内塌陷,以及包套直径方向上的收缩;包套整 体变形比较平滑,并没有出现明显的裂纹,包套与 粉末间界面颜色发灰,可较为明确区分;同时经过 排水法测试,粉末的致密度也达到了 93.3%.

为了准确的描述包套的形状变化, 在样件选 取了 A B C D 4个测试点, 如图 9中所示, 通过 比较 4个点处热等静压前后的相关位移量, 来反 映模拟结果和试验结果的形状变化尺寸. 其中 A 点为端盖最上端 (即包套外缘最上端)处节点, 记 录其径向位移 A 以及轴向位移 A b B点为端盖 上表面中心处节点, 由于对称性, 其径向位移可以 忽略不计, 只记录其轴向位移 Bb C处为模型 1/2 高度处最缘处节点, 记录其径向位移 C 以及轴向 位移 C D D 处为包套对称面处最缘处节点, 由于 对称性, 其轴向位移可以忽略不计, 只记录其径向 位移 D;r在模拟分析中, 可以通过节点的 history 选项得到以上数据; 节点处的实验数据是由游标 卡尺的测量得到的. 具体数据对比如表 1所示;

结果分析: 宏观上看, 包套的两个主要的宏观 参数尺寸, 中心处的直径尺寸以及整体高度尺寸, 在模拟和实验中其形状都有明显的收缩. 经过计 算可得, 包套的轴向收缩率为 7%, 包套中间处径 向收缩率为 12%, 最终形状与实验结果相比较可 以看出,直径方向模拟结果偏大 1.86%,而高度 方向的模拟结果偏小 0.56%;粉末的致密度模拟 相对来说比较精确,误差在 4.23% ~ 6.45% 之间.

![](_page_4_Picture_4.jpeg)

#### 图 8 测试样件热等静压前后实物图

Fੲ 8 Test sample before and afterHP a before HP; b afterHP; c profile shape (a)-热等静压前; (b)-热等静压后; (c)-剖面图

#### 表 1测试样件实验结果与模拟结果对比

Table 1 The comparation of the experimental results and the simulation results

	参数	实验结果	模拟结果	模拟相对误差
热等静压前	中心处直径尺寸 /mm	44. 0	44. 0	—
	整体高度尺寸 / mm	100. 0	100 0	—
	粉末致密度 1%	66.7	66. 7	—
热等静压后	中心处直径尺寸 /mm	38.72	39.44	1. 86%
	整体高度尺寸 / mm	93. 00	92 48	-0. 56 <sup>0</sup> / <sub>0</sub>
	粉末致密度 1%	99. 30	92 90~95 10	4. $23\%$ ~ 6. $45\%$
Aŗ	径向位移 Arymm	-0.02	0	—
	轴向位移 Ah/mm	-3. 50	-3.76	<b>7.</b> 43%
B <b>点</b>	轴向位移 Bh/mm	-4.14	-4. 27	3. 14%
С点	径向位移 Crymm	-2.25	-2.13	-5. 33 <sup>0</sup> / <sub>0</sub> ,
	轴向位移 Ch/mm	— <u>1</u> . 97	-2.06	4. 57%
D点	径向位移 Dr/mm	-2 64	-2. 28	-13. 64 <sup>0</sup> / <sub>0</sub>

![](_page_4_Figure_10.jpeg)

图 9 测试点选取位置示意图 Fg g The pcation of test points

4个测试点处的位移量数据如表 1中所示. 在径向位移选项中,径向收缩的模拟结果普遍小 于实验结果(相对误差为负)在具体节点处,A 点处变形过小,模拟相对误差可不考虑,而 C点 和 D点处的模拟相对误差分别为 - 5.33%、 -13.64%;而轴向位移选项,轴向收缩的模拟结 果普遍大于实验结果(相对误差为正)在具体节 点处, A点、B点和 D点的模拟相对误差分别为 7.43%、3.14%和 4.57%; 两个方向模拟相对误 差的异号, 对整个体积变形起到了相互抵消的作 用, 这也导致了在相对致密度的模拟数据与实验 数据的差异.

## 3 结 论

(1)通过模拟分析得到,包套的形变遵循了 先体积膨胀后体积收缩的形变过程.在本次实验 样件的成形后,包套的轴向收缩达到了 7%,中间 处径向收缩达到了 12%;与实验结果相比较,径 向收缩的模拟结果偏小,而轴向收缩的模拟结果 偏大.

(2)伴随包套体积收缩的同时,粉末的致密 化过程也显而易见.由于包套的受热膨胀,粉末的 致密度先减小;随着包套受压,体积收缩的加剧, 粉末的致密度逐渐增大.粉末的致密遵循从外到 内,从中间到两端的致密化规律;实验完成后,经 过排水法测试,粉末的致密度可达到 99.3%;与 实验结果相比较,致密度的模拟误差在 -0.43% ~1.93%.

(3) 对于简单的柱状形包套采用有限元模拟 的方法,可以形象地准确描述包套的形变以及粉 末的致密化过程,此方法可以为复杂结构包套的 研究提供参考,从而实现热等静压过程的精确 控形.

#### 参考文献:

- [1] 马福康. 等静压技术 [M]. 北京:冶金工业出版社, 1991 (M a Fukang Iostatic Pressing M]. Beijing Metallurgical Industry Press 1991.)
- [2] Haggb led H A Li W B A micro mechanical based constitutive model for finite element simulation of hot isostatic pressing of powder J. Comput Methods Appl Mech Engrg 1995 128 191-198
- [3] Ashoka G K J. A finite— element prediction of densification kinetics during the hot isostatic pressing of metal powder compacts J. Journal of Materials Processing Technology 1996 57 (1): 382-392
- [4] 陈平,肖志瑜,朱权力,等.数值模拟在粉末冶金中的应用概述[1].现代制造工程,2004(9).1-2.
   (Chen Ping Xiao Zhiyu Zhu Quanji et al Numerical simulation of the application in powdermetalluray[1]. Modem Manufacturing Engineering 2004(9):1-2)
- [5] 崔小朝,常红,侯丽丽,等. ZO<sub>2</sub>粉体压制轴对称块体过程 有限元数值模拟[].太原重型机械学院学报,2005.26 (01):18-22 (CuiXio-Chao, Chang Hong, Hou Liji et al Finite

element numeric sinulation of  $Z_{1}O_{2}$  powder in the process of compression of an axisymmetric block[J. Tayuan Heavy Machinery Institute 2005 26 (01): 18-22)

- [6] 陈朗,鲁建英,张明,等. 药柱等静压实验和数值模拟计算
  [J.高压物理学报, 2008(02),147-150. (Chen Lang Lu Janying Zhang Ming et al Experiment and numerical simulation of cylindrical explosive jostatic pressing
  [J. High Pressure Physics 2008(02), 147-150)
- [7] 陈火红.有限元实例分析教程[M].北京:机械工业出版 社, 2002. (Chen Huohong Finite element analysis tutorial[M]. Beijing M achinery Industry Press 2002)
- [8] 陈火红. MSC Marc/Mentat2003基础与应用实例[M]. 北京:科学出版社, 2004 (Chen Huohong MSC Marc/Mentat2003 basic and applied examples[M]. Beijing Science Press 2004.)
- [9] Oyane M, Shina S, Kono Y. Theory of plasticity for porous metals J. Bull SME, 1977, 16, 1254
- [10] Shina S O yane M Kono Y Plasic it theory for porous metallurgy J. International journal of M echanical Sciences 1976 18(6): 285-291.
- [11] Sanchez I, Ouedraogo F, Federzon I, et al New viscoplastic model to simulate hot isostatic pressing [J]. Powder Metallugy 2002 45(4): 359-365.
- [12] Jeon Y C, Kin K T, Near-net-shape forming of 316 L stainless steel powder under hot isostatic pressing [J]. International journal of Mechanical Sciences 1999 41: 815 -830
- [13] Wright— Patterson U Ş A ir Force Base A ir Force Systems Command A ir Force Materials Laboratory Aerospace structuralmetals handbook MJ. Chicago & Ohio AEML, 1971

#### (上接 131页)

- [11] Hertzman S. Highly alloyed stainless steels a Swedish perspective J. Scandinavian Journal of Metallurgy 1995 24 (4): 140-145.
- [12] 傅万堂,王正,刘文昌,等. 18<sup>Mn-18Cr-05N</sup>钢氮化 物等温析出动力学研究 [.].钢铁, 1998 33(09):45

-48

(Fu Wantang Wang Zheng Liu Wenchang et al Investigation on isothermal precipitation kinetics of nitrides in 18Mn-18Cr-0 5N steel []. Iron and steel 1998 33 (9): 45-48)