

应用于粉末冶金修正 Drucker-Prager/Cap 模型

王超^{1,2}, 肖磊¹, 张高翔¹, 郭建政^{1,3}

(1. 深圳市万泽中南研究院有限公司, 广东 深圳 518045)

(2. 深圳市万泽航空科技有限责任公司, 广东 深圳 518045)

(3. 中南大学 粉末冶金研究院, 湖南 长沙 410083)

摘要: 粉末冶金是金属材料成形工艺的重要环节, 但现有各种模型都无法完整模拟金属粉末在压制前后期特有的力学性能。本研究通过引入致密金属的屈服强度, 对 Drucker-Prager/Cap 模型进行修改, 将其屈服面限制在致密金属的 Von Mises 屈服面以内, 并随着压制过程, 使之无限接近 Von Mises 屈服面。通过与文献试验数据对比, 证明所提出的修正模型具有相当高的精度。最终将该模型应用于高温合金的热等静压模拟, 其变形模拟结果与实验相符, 并且应力分布比传统 Drucker-Prager/Cap 模型的计算结果更加合理。

关键词: 粉末冶金; 热等静压; FEM; 本构模型; Drucker-Prager/Cap

中图分类号: TF12

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2020)09-3115-07

粉末冶金是一种将金属粉末经过压制和烧结下加工成致密材料的过程^[1], 在此期间粉末材料会经历颗粒重排, 颗粒塑性变形, 物质扩散等变化。

由于整个过程中的这些复杂机理, 现有的材料模型很难针对金属粉末材料在压制过程的不同阶段都给出准确的模拟。针对粉末的压制过程, 比较主流的宏观模型分为两类: 以 Shima-Oyane 模型^[2]为代表的多孔金属模型和以 Drucker-Prager/Cap 模型^[3]为代表的颗粒模型。图 1 不完全地统计了这两类模型在粉末冶金仿真研究中的使用情况^[4], 其中 Drucker-Prager/Cap 模型应用较为广泛。但这 2 种模型在粉末压制的不同阶段, 都各自有其局限性, 无法精确模拟粉末在压制前后全过程的力学特性。

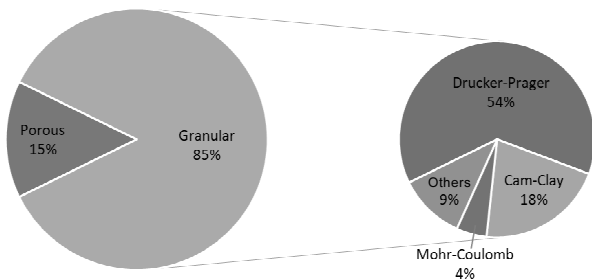


图 1 各种材料模型在粉末冶金模拟中的应用

Fig. 1 Statistics of constitutive material model used in powder metallurgy simulation^[4]

Shima-Oyane 模型^[2]是一种典型的多孔金属模型, 它是根据 Kuhn 和 Downey 的多孔金属模型^[5]发展而来的。Shima-Oyane 模型充分考虑了屈服面随相对密度的变化, 其屈服函数如下:

$$F = \frac{1}{\gamma} \left(q^2 + \frac{p^2}{\beta^2} \right)^{1/2} - \sigma_y = 0 \quad (1)$$

其中, q 是 Mises 等效应力; p 是静水压力; σ_y 是该金属致密状态下的屈服强度; γ 和 β 是材料参数, 为相对密度的函数, 其形式如下:

$$\gamma = (b_1 + b_2 \rho^{b_3})^{b_4} \quad (2)$$

$$\beta = (q_1 + q_2 \rho^{q_3})^{q_4} \quad (3)$$

其中 b_i 和 q_i 是材料拟合参数。图 2 是 Shima-Oyane 模型在子午面中的屈服面。其形状呈椭圆形, 随着压制过程中相对密度的增加, 其长宽比也随之增长, 最后无限趋近于 Von Mises 屈服准则。Lee 等人研究发现 Shima-Oyane 比 Cam-Clay 和 Drucker-Prager/Cap 等颗粒模型更适于粉末压制模拟^[6]。但 Khoei 则认为在粉末相对密度较低的情况下 (压制开始阶段), 多孔金属对粉末金属的模拟并不准确^[7]。因为早期材料呈颗粒状, 其抗拉强度与抗压强度不同, 其材料属性更接近于沙土。所以拉压同性的 Shima-Oyane 模型更加适合用来描述多孔金属, 而非金属粉末^[8]。

Drucker-Prager/Cap 模型^[2]在粉末压制的模拟中也有较为普遍的应用。它是基于 Mohr-Coulomb 模型,

收稿日期: 2019-12-11

基金项目: 广东省重点领域研发计划(2019B010943001); 国家科技重大专项 (2017-VI-0009-0080)

作者简介: 王超, 男, 1984 年生, 博士, 深圳市万泽中南研究院有限公司, 广东 深圳 518045, E-mail: wangchao1234142@hotmail.com

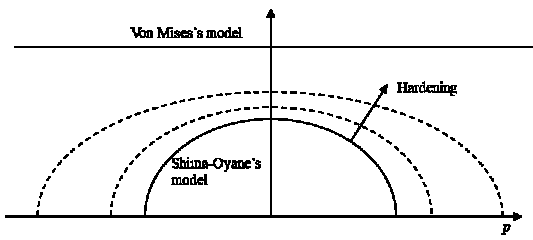


图 2 Shima-Oyane 模型的屈服面

Fig.2 Yield surface of Shima-Oyane model

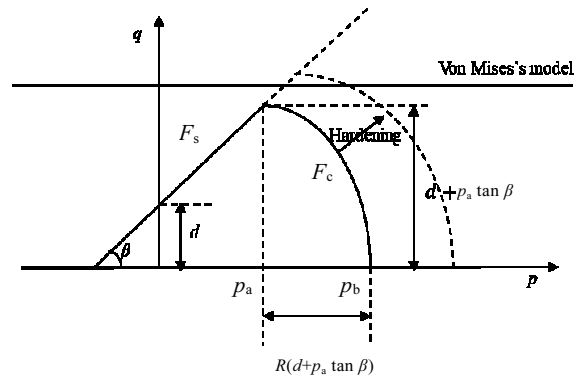


图 3 Drucker-Prager/Cap 模型的屈服面

Fig.3 Yield surface of Drucker-Prager/Cap model

定义屈服面时考虑了粉末颗粒材料的内摩擦角。同时用 Cap 模型限制其强度在高围压下强度的无限增大 (图 3)。该模型多用于岩土、混凝土等拉压强度显著不同的颗粒材料。其屈服函数有:

Drucker-Prager 屈服函数:

$$F_s = q - p \tan \beta - d = 0 \quad (4)$$

Cap 屈服函数:

$$F_c = \sqrt{[p - p_a]^2 + [Rq]^2} - R(d + p_a \tan \beta) = 0 \quad (5)$$

其中, q 是 Mises 等效应力, p 是静水压力, d 是粘聚力, β 是材料参数。 R 是 cap 的形状控制参数, p_a 是 2 个屈服面的交汇点强度。为描述材料的硬化, 还需测定静水压力 p_b 与塑性体积应变 $\epsilon_{v,01}^m$ 的关系。图 3 展示了 Drucker-Prager/Cap 模型的屈服面及其硬化过程。Wikman^[9]和 Khoei^[10, 11]等人使用 Drucker-Prager/Cap 对金属粉末的压制过程进行了模拟, 并与实验进行对比。此外, 其它颗粒模型, 如 Cam-Clay 模型等, 也有用于粉末冶金工艺的模拟^[12, 13]。虽然 Drucker-Prager/Cap 模型解决了压制开始阶段粉末材料拉压比不同的问题。然而由于形状控制参数 R 为常数, 随着粉末的致密化, Drucker-Prager/Cap 模型的屈服面会被高估, 甚至超出致密金属的 Von Mises 屈服面, 而与实际情况不符, 所以该模型在金属压制过程的后期产生很大误差。同时, 对于像热等静压这样的粉末冶金工艺, 金属会从粉末材料转变为块体材料, Drucker-Prager/Cap 模型就更难预测了。

为了解决上述模型所存在的问题, 学者们提出了各种基于以上模型的改进模型。如 Lee 和 Kim^[14]在 Drucker-Prager/Cap 模型的基础上, 对 Cap 屈服面进行修正:

$$q + A(\rho) \cosh\{B(\rho)p\} = C(\rho) \quad (\text{压制前期}) \quad (6)$$

$$q + \cosh\{B(\rho)p\} = C(\rho) \quad (\text{压制后期}) \quad (7)$$

其引入了 3 个与相对密度相关的拟合函数 $A(\rho)$, $B(\rho)$ 和 $C(\rho)$, ρ 为相对密度。该模型准确地描述了粉末压

制各个阶段的 Cap 屈服面, 但也引入了太多参数, 并且将屈服准则分成前后 2 个阶段的混合, 工程应用不便, 另外 Lee 的模型无法反映 Drucker-Prager 屈服面在挤压过程中的变化规律。Han 等人^[15]提出了通过少量试验测定 Drucker-Prager/Cap 模型所需的材料参数的方案, 从而通过实验数据描述材料在不同相对密度下的屈服面变化, 但对模型并无修改, 且没有建立起粉末材料和致密材料间的联系。此外, Abouaf^[16-18]、Kuhn^[19]和 Kim^[20]等人针对金属粉末的热等静压过程, 各自提出以蠕变模型描述材料致密化过程, 但这些模型多用于预测与时间、温度相关的变形, 无法描述材料本身的其它力学特性。Nguyena^[21]和 Abdelhefeza^[22]等人分别将蠕变模型与多孔金属模型和粉末颗粒模型相结合, 对金属粉末的热等静压过程进行模拟, 研究表明蠕变模型的引入加快了材料致密化, 并得到更加准确的密度分布。此外, 还有通过离散单元法 (DEM)^[23-25]、分子动力学 (MD)^[26]等方法对粉末冶金过程进行计算, 从微观尺度模拟了金属粉末颗粒在压制过程中经历的物理变化, 但这些微观方法计算成本较高, 不适合工业应用。

为补充现有宏观理论模型的不足, 将粉末材料的力学特性与相应致密材料的 Von Mises 屈服准则相关联, 在尽可能少引入其它参数的情况下, 通过修改 Drucker-Prager/Cap 模型, 提出能够同时描述金属粉末在压制不同阶段下力学特性的新本构模型。最终将该模型应用于镍基高温合金热等静压过程的模拟。

1 模型开发

为了准确地模拟材料在热等静压各个环节下的变化, 需要一种能同时兼顾材料在疏松和致密前后 2 个阶段特点的新型模型:

- 1) 在金属粉末压制前期, 新模型应具有 Drucker-

Prager/Cap 模型的颗粒化特征；

2) 在金属粉末压制后期，新模型的屈服面应当限制在相应致密金属的 Von Mises 屈服面以内，且随致密化过程，可无限接近于 Von Mises 屈服面。

所以在 Drucker-Prager/Cap 模型的基础上进行以下修改：

(1) 假设在子午面中，Drucker-Prager 屈服面延长线与 Von Mises 屈服面的交点 A (p_y, q_y) 固定不动 (图 4) ；

$$p_y = \frac{q_y - d_0}{\tan \beta_0} \quad (8)$$

(2) 由于 Drucker-Prager 和 Cap 屈服面不能超过 Von Mises 屈服面，则 $q_a \leq q_y$ ，即 $p_a \leq p_y$ 。所以，

在初始时刻： $\frac{p_a}{p_y} = \frac{p_{a0}}{p_y}, \frac{p_b}{p_b} = \frac{p_{a0}}{p_{b0}}$ ，当金属粉末完全

致密化后： $p_a \rightarrow p_y, p_b \rightarrow \infty$ ，所以 $\frac{p_a}{p_y} \rightarrow 1$ ，

$\frac{p_a}{p_b} \rightarrow 0$ 。

假设 $\frac{p_a}{p_y}$ 和 $\frac{p_b}{p_b}$ 为线性关系 (如图 5)，则：

$$p_a = \frac{p_{a0} p_b p_y}{p_{a0} p_b + p_{b0} p_y - p_{a0} p_{b0}} \quad (9)$$

于是，Cap 的形状控制参数 R 不再是常数：

$$R = \frac{p_b - p_a}{p_a \tan \beta + d} \quad (10)$$

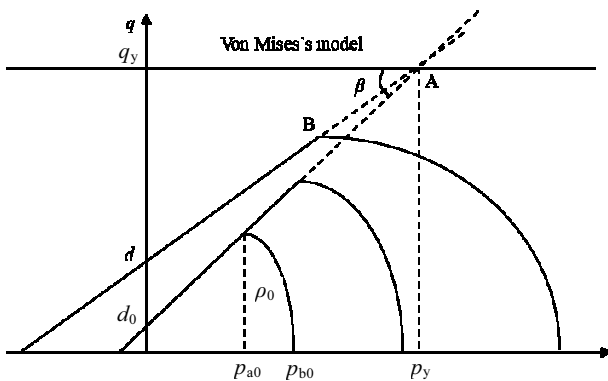


图 4 修正的 Drucker-Prager/Cap 模型

Fig. 4 Modified Drucker-Prager/Cap model

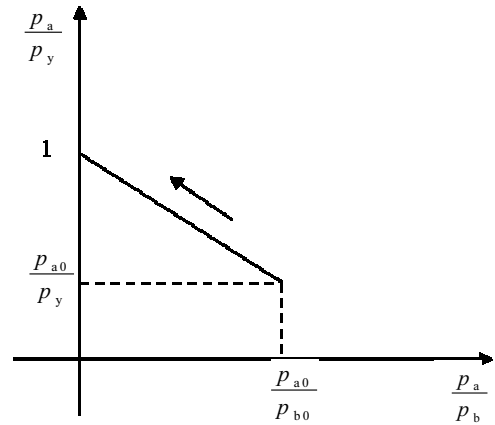


图 5 $\frac{p_a}{p_y}$ 和 $\frac{p_b}{p_b}$ 关系

Fig.5 Relationship between $\frac{p_a}{p_y}$ and $\frac{p_b}{p_b}$

(3) 与岩土材料不同，随着粉末压制过程中的塑性变形，颗粒间相互咬合，粘结力 d 会逐渐增加^[15]。

特别是在高温下，由于物质扩散引起颗粒融合，粘结力 d 会逐渐趋向于 Von Mises 屈服强度。这是一个与温度、时间和致密度相关的复杂动态过程 $d=d(T, t, \rho)$ 。为简化模型，可假设其仅为密度的函数 $d = d(\rho)$ 。

Drucker-Prager 屈服面绕 A 点旋转， β 角为：

$$\beta = \arctan \left(\frac{\sigma_y - d}{p_y} \right) \quad (11)$$

参照公式 (4) 和 (5)，修改过后的 Drucker-Prager/Cap 模型可由以下方程描述：

$$F_s = q - p \tan[\beta(\rho)] - d(\rho) = 0 \quad (12)$$

$$F_c = \sqrt{[p - p_a(\rho)]^2 + [R(\rho)q]^2} - R(\rho) \cdot \{d(\rho) + p_a(\rho) \tan[\beta(\rho)]\} = 0 \quad (13)$$

其中：

$$R(\rho) = \frac{p_b(\rho) - p_a(\rho)}{p_a(\rho) \tan[\beta(\rho)] + d(\rho)}$$

$$p_a(\rho) = \frac{p_{a0} p_b(\rho) p_y}{p_{a0} p_b(\rho) + p_{b0} p_y - p_{a0} p_{b0}}$$

$$\tan[\beta(\rho)] = \frac{q_y - d(\rho)}{p_y}$$

$$p_{a0} = \frac{p_{b0} - R_0 d_0}{1 + R_0 \tan \beta_0}$$

$$p_y = \frac{q_y - d_0}{\tan \beta_0}$$

与 Drucker-Prager/Cap 模型一样，应力满足 Drucker-Prager 准则时为非关联流动，塑性势为：

$$Q_s = \sqrt{\{[p_a(\rho) - p] \tan \beta(\rho)\}^2 + [R(\rho)q]^2} \quad (14)$$

应力满足 Cap 准则时为关联流动，塑性势与屈服准则相同。

所需要的参数有：初始角度 β_0 ，初始形状控制参数 R_0 ，硬化曲线 $p_b(\rho)$ ，粘聚力变化曲线 $d(\rho)$ 以及相应致密金属屈服强度 σ_y (即 q_y)。由于金属颗粒的硬化作用，致密金属的强度在屈服后仍会有很大的增长，因此在实际使用中 σ_y 可适当高于致密金属屈服强度值。如果是室温压制， $d(\rho)$ 的变化不会太大，则 $d(\rho) = d(\rho_0) = d_0$ 。此时，与未修正的 Drucker-Prager/Cap 模型相比，修正模型仅增加了致密金属屈服强度 σ_y 一个参数。图 4 显示了修正的 Drucker-Prager/Cap 模型的屈服面变化情况。随着材料的相对密度趋近于 1，Cap 屈服面越来越接近于 Von Mises 屈服面，Drucker-Prager 屈服面与 Cap 屈服面的交点 B 也逐渐趋近于 A 点。

2 模型验证

根据 Lee 等人^[14]的试验数据： $\rho_0 = 0.6$ 、 $d = d_0 = 0$ 、 $\beta_0 = 63.4^\circ$ 和 $R_0 = 0.275$ ， $p(\rho)$ 由公式(7)及文献[14]所提供的参数计算获取。不考虑粘聚力 d 的变化，假设 $\sigma_y = 450$ MPa。经过上述方法计算，结果如图 6 所示。比较试验数据和模型计算，可以发现：

- (1) 模型在临界应力和偏应力为 0 的状态下，屈服面和实验结果基本保持一致，在中间应力状态下，仍存在一定误差；
- (2) 相对于传统的 Drucker-Prager/Cap (R 取 0.3) 模型，两者在压制初期差别不大，但新的模型在高致密度下的预测结果有了很大改善；
- (3) 与 Lee 提出的模型相比，在所需参数大大减少的情况下，仍能保持相当精度。

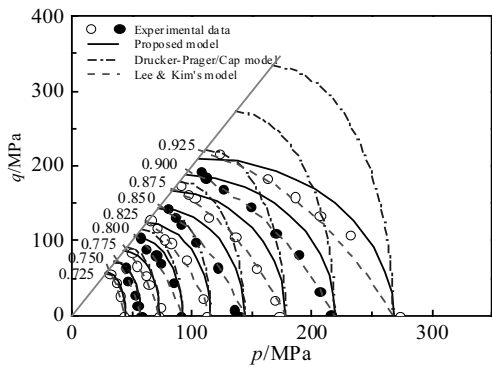


图 6 模型预测与试验数据比较

Fig.6 Comparison of model prediction and experimental data^[14]

Han 等人^[15]提出了通过少量试验测定 Drucker-Prager/Cap 模型所需材料参数的方案，并测定了粉末材料参数 d 、 p_b 、 p_a 、 β 、 R 与相对密度 ρ 间的关系。根据其试验数据， $p_b(\rho)$ (由原文提供的 $p_b - \epsilon_{vol}$ 数据及公式(19)换算得到)和 $d(\rho)$ 如图 7 所示，以及 $\beta_0 = 63.4^\circ$ 、 $R_0 = 0.58$ 、 $\rho_0 = 0.476$ ，并假设 $\sigma_y = 150$ MPa。通过本模型预测的 $R(\rho)$ 、 $p_a(\rho)$ 和 $\beta(\rho)$ 如图 8 所示。可以发现经改进的 Drucker-Prager/Cap 模型对 $R(\rho)$ 、 $p_a(\rho)$ 的变化趋势预测效果较好，但在相对密度小于 0.9 的情况下， $R(\rho)$ 的预测值存在一定程度的低估。从 $R(\rho)$ 的试验数据 (图 8a) 发现， $R_0 = 0.58$ 与其它数据点间的趋势不相符合，如根据其他数据趋势将其调整为 $R_0 = 0.7$ ， $R(\rho)$ 和 $p_a(\rho)$ 模型预测值都将更加接近试验数据。由于实验是室温压制，粘结力与致密材料的屈服应力相比，其值变化较小，所以压制过程对 $\beta(\rho)$ 的影响不大。

3 模型应用

将本模型应用于镍基高温合金粉末盘件的热等静压模拟，并与传统的 Drucker-Prager/Cap 模型分析结果进行对比。热等静压工艺是将制品放置于密闭的容器内，向制品施加各向同等的压力，同时施以高温，使制品得以致密化和烧结。与室温压制不同，在热等静压过程中粘聚力 d 将发生很大变化，最终将趋近于 Von Mises 屈服强度。由于粘聚力 d 与 ρ 的关系 $d(\rho)$ 难以确定，现将其简化表示为如图 9 所示的双折线函数：

$$d = \begin{cases} d_0 & \rho \leq \rho_t \\ \frac{\rho - \rho_t}{1 - \rho_t} (\sigma_y - d_0) + d_0 & \rho > \rho_t \end{cases} \quad (15)$$

其中， ρ_t 为粘聚力开始变化的阈值。

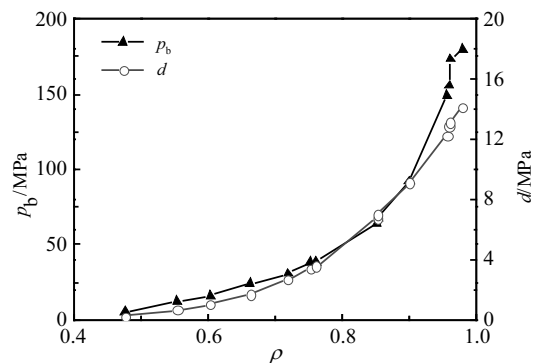


图 7 实验测得的静水压力、粘聚力与相对密度的硬化关系
Fig.7 Experimental data: relationship between hydrostatic pressure and relative density as well as relationship between cohesion and relative density^[15]

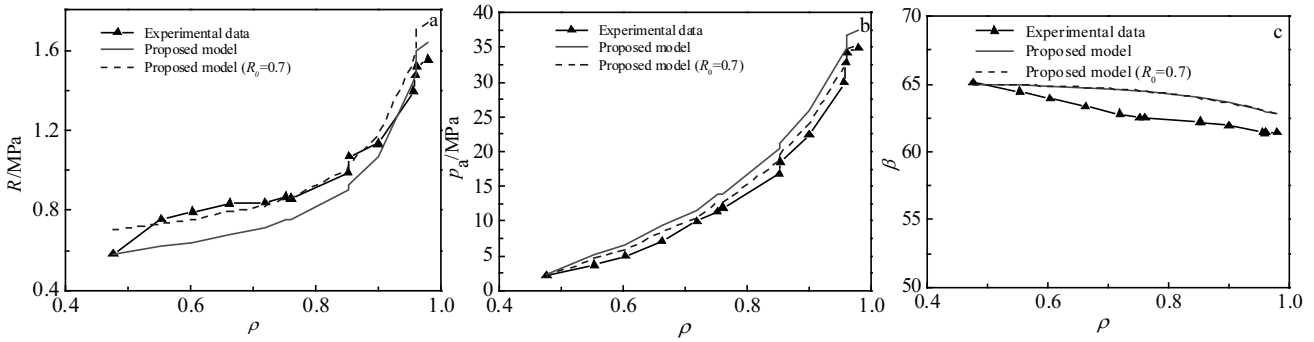


图 8 模型预测的 $R(\rho)$, $p_a(\rho)$ 和 $\beta(\rho)$ 与实验数据对比

Fig.8 Comparison of model prediction and experimental data^[15]: (a) relationship between R and ρ ; (b) relationship between p_a and ρ ; (c) relationship between β and ρ

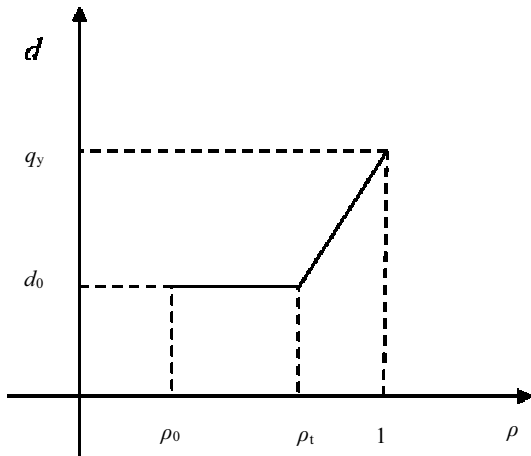


图 9 $d(\rho)$ 的双折线关系

Fig.9 Bilinear relationship between d and ρ



图 10 热等静压后变形与相对密度分布

Fig.10 Metal deformation after HIP and distribution of relative density ($\rho_r=0.8$)

金属粉末采用 FGH4097 镍基高温合金,其材料参数为 $d_0=1 \text{ Pa}$ 、 $\beta_0=70^\circ$ 、 $R_0=0.2$ 、 $\rho_0=0.57$, 致密金属屈服强度 σ_y 由实验测定, $p_b(\rho)$ 和导热系数等其它材料数据参考瞿宏^[27]等人的研究。材料模型通过用户自定义子程序实现。

金属粉末装在的圆形不锈钢包套内,在 $1200 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 150 MPa 压力下进行热等静压。模型使用轴对称缩减积分单元 (CAX4R),在 ABAQUS standard 中进行计算。

热等静压后材料变形和最终相对密度的分布如图 10 所示。可以看出,经过热等静压之后,材料形状有了很大改变,粉末材料基本压实且密度分布均匀。模拟中分别尝试了 $\rho_t = 0.7, 0.8, 0.9$,发现在这一范围内, ρ_t 值对模拟的结果影响不大。由于试样在等静压的荷载下受力,材料很少在负的静水压力下屈服,所以对金属粉末的粘结力 $d(T, t, \rho)$ 的简化对结果影响有限。粉末金属材料的径向和轴向收缩率统计如图 11 所示。

随着 ρ_t 的增加,径向收缩率(图 11a)逐渐降低,而轴向收缩率(图 11b)逐渐增加,且 ρ_t 对轴向收缩率的影响更为显著。图 11 同时对比了未经修正的 Drucker-Prager/Cap 模型的模拟结果,可以发现,修正的模型显著提高了模拟的精度,且材料模型引起的误差远超 ρ_t 的选择。

虽然在变形的模拟上,2 种模型的计算结果差别不是特别明显。但通过对比应力分布,可以发现两者的模拟结果相差很大。图 12 反映了刚进入保载阶段时金属粉末的应力分布。很明显,修正的模型将 Mises 应力限制在致密金属的屈服强度 ($1200 \text{ }^\circ\text{C}$ 时为 35 MPa) 以下;而由传统的 Drucker-Prager/Cap Model 模型计算的应力则在 4 个角落处高到 130 MPa ,超出了致密金属的屈服应力 35 MPa 很多。

模拟误差分析:

(1) 模型参数误差:在本次模拟中,多数材料参数是参考其它文献或为经验值,且简化了 $d(\rho)$;

(2) 材料模型误差:热等静压过程中,材料性质变化是和压力、温度、时间相关的复杂过程,但为简化模型,仅假设屈服面与相对密度和温度相关。Nguyen^[21]

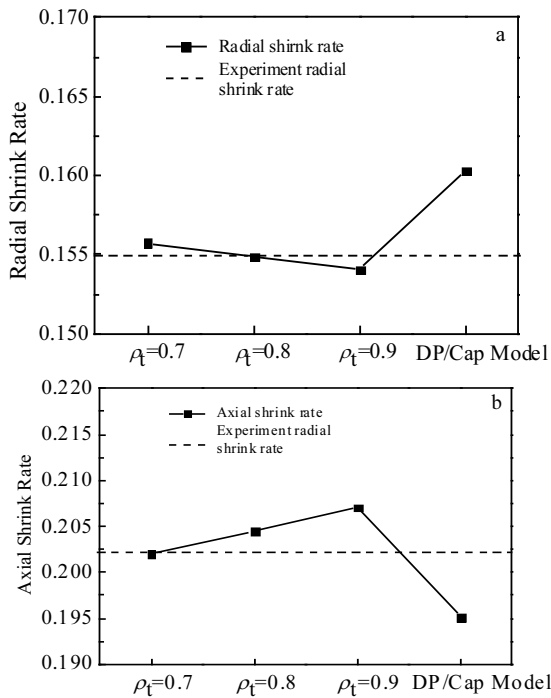


图 11 热等静压后的收缩率

Fig.11 Shrinkage after HIP: (a) radial shrinkage and (b) axial shrinkage

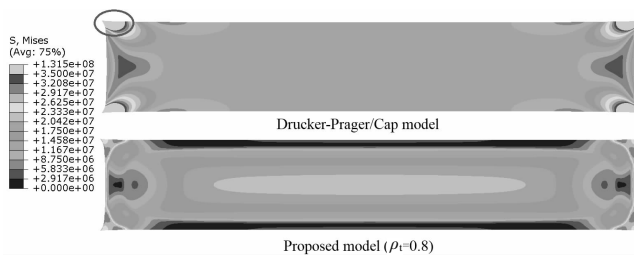


图 12 保载阶段金属粉末的 Mises 应力分布

Fig.12 Mises stress distribution of metal powder under dwell condition

和 Abdelhfeeza^[22]的研究表明,如同时应用蠕变模型,其致密度将进一步增加。但本算例主要是验证新的强度本构模型,所以并未引入蠕变模型。

(3) 初始条件误差:模型仅考虑理想初始条件。而实际上,包套焊接应力、粉末不均匀分布、包套上的附件(如抽气管等)以及其它无法预计的因素,都会对结果产生影响;

(4) 边界条件误差:模型假设在所有边界上的温度荷载分布均匀,但实际上受到加热部件结构设计的局限,边界温度分布可能并不均匀;

(5) 接触模型误差:粉末和包套在热等静压初期是分开的,应采用摩擦接触模型;在热等静压过程中,

两者逐渐焊合,此时采用绑定约束更为合理。由于缺少一个能够模拟这种前后不同力学特性的接触模型,这里只采用后一种,但经测试发现,2种接触模型对模拟结果的影响不大。

4 结 论

1) 通过引入致密材料的屈服强度参数,对 Drucker-Prager/Cap 模型中粉末材料的屈服面随着压制过程超出致密材料的 Von Mises 屈服面这一不合理现象进行了修正。

2) 对比 2 组文献的实验数据验证,提出的模型预测结果具有相当高的精度,且引入参数较少。

3) 在热等静压的有限元模拟中,提出了一个简化的粘聚力和相对密度的关系 $d(\rho)$,且发现 $d(\rho)$ 在一定程度上的差异对模拟结果影响不大。与未经修正 Drucker-Prager/Cap 模型模拟结果相比,所提出的修正模型具有更高的模拟精度,且应力分布更为合理。

参考文献 References

[1] Black J T, Kohser R A. *DeGarmo's Materials and Processes in Manufacturing, 12nd Ed*[M]. USA: Wiley, 2017: 320

[2] Shima S, Oyane M. *International Journal of Mechanical Sciences*[J], 1976, 18: 285

[3] Simulia D, *ABAQUS 6.14 Analysis User's Manual*[M]. Dassault: Dassault Systèmes, France, 2014

[4] Stanley G S, Darrel A Doman. *Journal of Machinery Manufacturing and Automation*[J], 2014, 3: 32

[5] Kuhn H A, Downey C L. *International Journal of Powder Metallurgy*[J], 1971, 7: 15

[6] Lee M C, Chung S H, Cho J H et al. *International Journal of Powder Metallurgy*[J], 2008, 51: 89

[7] Khoei A R. *Computational Plasticity in Powder Forming Processes*[M]. Holland: Elsevier, 2005: 44

[8] German R M. *Powder Metallurgy and Particulate Materials Processing: the Processes, Materials, Products, Properties, and Applications*[M]. Princeton: Metal Powder Industries Federation, 2005: 1

[9] Wikman B, Bergman G, Oldenburg M et al. *Structural and Multidisciplinary Optimization*[J], 2006, 31: 400

[10] Khoei A R, Shamloo A, Azami A R. *International Journal of Solids and Structures*[J], 2006, 43: 5421

[11] Khoei A R, Azami A R, Azizi S. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2007, 185: 166

[12] PM Modnet Research Group. *International Journal of Powder Metallurgy*[J], 2002, 45: 335

- [13] Armstrong S, Godby V, Rachakonda V B S *et al.* *The 1993 International Conference & Exhibition on Powder Metallurgy* [C]. Nashville, TN, USA, 1993: 165
- [14] Lee S C, Kim K T. *International Journal of Mechanical Sciences*[J], 2002, 44: 1295
- [15] Han L H, Elliott J A, Bentham A C *et al.* *International Journal of Solids and Structures*[J], 2008 45: 3088
- [16] Abouaf M, Chenot J, Raisson G *et al.* *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*[J], 1988, 25: 191
- [17] Abouaf M, Chenot J L. *International Journal of Material Forming*[J], 1986, 5: 121
- [18] Abouaf M, Raisson G, Wey E. *Proceedings of the 3rd International Conference on Hot Isostatic Pressing*[C]. London: Bellstone-Shrewsbury, 1986: 10
- [19] Kuhn L T, McMeeking R. *International Journal of Mechanical Sciences*[J], 1992, 34: 563
- [20] Kim K T, Kwon Y S, Kim H G. *International Journal of Mechanical Sciences* [J], 1997, 39: 1011
- [21] Nguyena C V, Deng Y, Bezold A *et al.* *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*[J], 2017, 315: 302
- [22] Abdelhafeeza A M, Essaa K E A. *Procedia CIRP*[J], 2016, 55: 188
- [23] Martin C L, Bouvard D. *Acta Materialia*[J], 2003, 51: 373
- [24] Martin C L, Bouvard D. *International Journal of Mechanical Sciences*[J], 2004, 46: 907
- [25] Skrinjar O, Larsson P. *Acta Materialia*[J], 2004, 52: 1871
- [26] Li J, Sarkar S, Cox W T. *Physical Review B*[J], 2011, 84: 054 103
- [27] Qu Zonghong(瞿宗宏), Liu Jiantao(刘建涛), Zhang Guoxing(张国星) *et al.* *Transactions of Materials and Heat Treatment(材料热处理学报)*[J], 2017, 38: 173

A Modified Drucker-Prager/Cap Model for Powder Metallurgy

Wang Chao^{1,2}, Xiao Lei¹, Zhang Gaoxiang¹, Guo Jianzheng^{1,3}

(1. Shenzhen Wedge Central South Research Institute Co., Ltd, Shenzhen 518045, China)

(2. Shenzhen Wedge Aviation Technology Co., Ltd, Shenzhen 518045, China)

(3. Powder Metallurgy Institute, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Powder metallurgy is an important part of the forming process for metal materials. However, most material models are not able to simulate the variation of mechanical characters during the compressing process. In this paper, the Drucker-Prager/Cap model was modified by introducing the yield strength of fully densified metal. This modified Drucker-Prager/Cap model can limit the yield strength of metal powder within the Von Mises surface of a fully densified metal. With the compressing process, the powder's surface is infinitely close to Von Mises surface. By comparing the model prediction and the published experimental results, it is demonstrated that this modified model works well in terms of accuracy. And, it is applied to the simulation of a hot isostatic pressing for a superalloy. The prediction of the deformation as well as the stress distribution by this model is more accurate than that by the traditional Drucker-Prager/Cap model.

Key words: powder metallurgy; hot isostatic pressing; FEM; constitutive model; Drucker-Prager/Cap

Corresponding author: Guo Jianzheng, Ph. D., Professor, Powder Metallurgy Institute, Central South University, Changsha 410083, P. R. China, E-mail: guo_jianzheng@qq.com