

不锈钢金属多孔材料固相烧结热变形特性研究

杜艳迎, 刘 凯

(武汉理工大学, 湖北 武汉 430070)

摘 要: 烧结工艺对多孔材料性能有很大的影响, 为了获得最佳的力学性能和需要的零件形状, 有必要对烧结的热变形过程进行研究。基于 SVOS 粘塑性本构模型, 采用热力耦合计算不锈钢多孔材料在烧结过程中宏观变形。通过自由烧结实验和弯曲实验, 使用 4 阶 Gauss 函数对烧结应力、体积和剪切粘度等模型参数进行了拟合。讨论了相对密度、线性收缩率等随烧结时间和温度的变化规律。结果表明: 模拟过程与实验符合得较好, 验证了模型的合理性。不同升温速率下, 材料的线性收缩曲线变化不大, 因此, 升温速率对烧结过程影响较小。升温速率对计算时间影响比较大, 升温速率很慢或很快时, 计算不容易收敛, 计算时间比较长。对模压生坯零件的烧结模拟结果表明, 由于初始密度分布不均匀性导致最终密度分布的不均匀, 但是密度变化范围不大。

关键词: 烧结; 数值模拟; SVOS 模型; 致密化

中图分类号: TH164

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2022)07-2552-08

粉末冶金能够大量生产结构复杂零件, 节省劳力、材料, 并可达到全致密度, 同时改善纯度和显微组织, 材料颗粒细小, 力学性能, 特别是疲劳强度高。因此, 粉末冶金材料及产品在国民经济中起到越来越大作用。

粉末冶金工艺过程包括成形和烧结 2 个主要工序^[1,2], 如图 1 所示, 烧结是将粉末成形压坯在低于材料主要组分熔点以下进行长时间高温处理, 使粉末压坯中粉末颗粒由机械啮合的聚集体变为原子结合的聚集体, 获得接近完全致密的零件。烧结工艺对烧结零件的最终致密度、尺寸、性能起着决定性作用。

传统烧结工艺主要依靠经验, 产品从设计到生产需要进行多次尝试和修正, 成本很高而且存在盲目性。近年来, 随着烧结理论的成熟和计算机技术、智能化制造的迅猛发展, 可以对尽可能接近实际情况的复杂物理模型进行系统地模拟。烧结过程需要很长的时间, 消耗大量的能源, 数值模拟能够提高研究效率, 节省能源消耗, 同时, 可以深入理解固相烧结机理, 并加强对微观结构演化过程的控制。压坯烧结过程的计算机模拟在各国已成为烧结理论研究的热点之一。

粉末烧结模型可以分为 2 类: 宏观力学模型^[3,4]和微观力学模型^[5]。微观力学模型从粒子-粒子间的相互作用中推导出相应的公式^[6,7], 能更明确地反映基本

粒子的物质扩散路径, 便于研究烧结现象的微观物理机制, 如分子动力学法、离散元法等^[8,9]。但是, 该方法需要巨大的计算量, 模型参数或者定量模型的获得比较困难, 难以实现大规模颗粒体系烧结过程的模拟。宏观力学模型基于连续介质力学本构关系^[10], 使用宏观尺度的材料参数和少量微观参数, 应用广泛, 方法成熟, 并且材料参数容易获得。因此, 在本研究中采用宏观力学模型。

粉末烧结的宏观力学模型比较多, 如 Riedel 和 Svoboda 基于简单的二维六边形晶粒结构, 假设边界的局部应力与宏观应力相平衡, 应用各向同性线粘性本构方程描述的粒子边界扩散的模型。Riedel 模型考虑了孔洞尺寸分布效应对烧结过程的影响^[11]。Hansen^[12]基于一般流动方程和原子流动方程, 推导出适合于整个烧结过程的烧结模型, 包括 3 个阶段: 初始, 中间和最后阶段。全阶段模型相对于其它模型, 能够模拟较大的致密度范围, 但是该模型与 Riedel 模型的参数都较多, 模型参数的确定比较困难, 特别是与尺度相关参数, 主要原因是尺度参数的物理意义不明确。Olevsky 和 Skorohod^[13]发展了一种表象型的烧结模型, 该模型包含了烧结的流变理论, 模型参数较少, 大多数参数有清晰的物理意义, 可以较容易地从实验中得到。孔祥吉^[14]使用 Olevsky 模型模拟自由烧

收稿日期: 2021-07-03

基金项目: 国家自然科学基金(U1806221)

作者简介: 杜艳迎, 女, 1977 年生, 博士, 讲师, 武汉理工大学交通与物流工程学院, 湖北 武汉 430070, 电话: 027-86551180, E-mail: jenny_dyy@whut.edu.cn

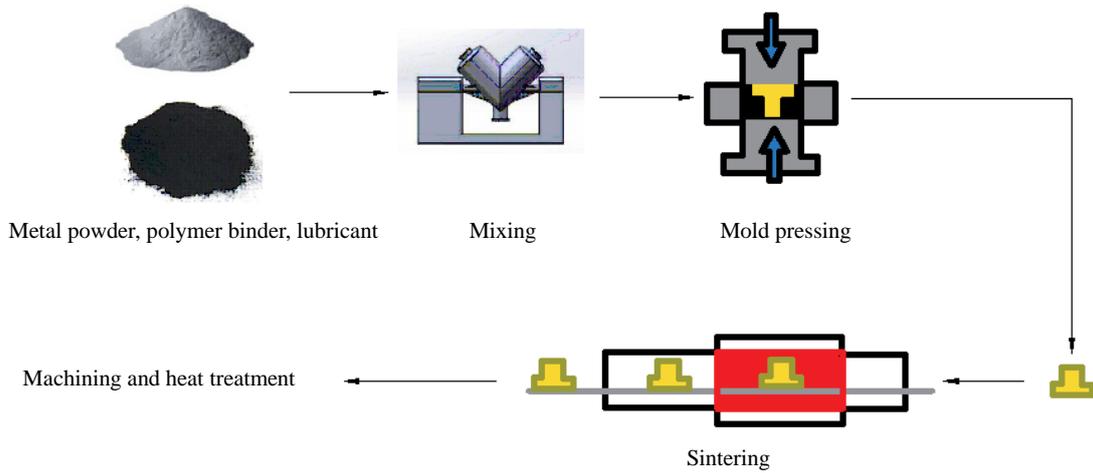


图 1 烧结过程示意图

Fig.1 Schematic diagram of sintering process

结过程，将烧结过程分为 2 个阶段，对方程中的材料参数分别进行标定，实现了对 316L 不锈钢粉末烧结过程中的收缩率、相对密度等的计算，计算结果与实验数据相吻合。宋久鹏^[15]编写了适用于 316L 不锈钢粉末的烧结模型的子程序，考虑了坯件重力、非均匀初始密度分布以及坯件支承体之间的摩擦力等因素的非均匀收缩和变形，将 Olevsky 模型与 Coble 扩散蠕变模型结合在一起，引入了粉末颗粒半径参数来计算整个烧结过程的烧结应力，将烧结过程分为 3 个阶段，分别标定相应的参数，得到与实验结果比较符合的计算模型。在计算过程中，如果将模型分为多段函数来处理，得到的模型与实验结果会比较符合，但是由于函数的不连续性，可能造成在函数的不连续处出现结果的跳跃，也会给计算带来麻烦。

本研究采用 ABAQUS 有限元软件为研发平台，基于 Olevsky 宏观烧结模型，建立用于不锈钢多孔材料的单一的、连续的自由烧结模型，用来分析烧结过程，并与实验结果进行了比较。

1 实验

成形过程如图 1 所示，采用气雾化 AISI316L 不锈钢粉末为原料，主要化学成分如表 1 所示，平均粒径为 3.4 μm，粒度分布以及微观形貌如图 2 所示。金属粉末与少量粘结剂、润滑剂组成的复合粉末经过模压后得到的生坯是多孔材料，在脱脂炉中脱除粘结剂，然后在卧式高真空烧结炉中进行烧结，试样在 120 min 内由室温加热至 600 °C，保温 30 min 进行预烧结，再升温至 1350 °C 保温 2 h，升温速率为 15 °C/min，最后试样以 15 °C/min 的速率冷却至室温。生坯在烧结前的初始相对密度为 0.65。

表 1 AISI316L 不锈钢化学成分

C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S	Fe
0.03	2.00	1.00	17.0	12.0	0.0045	0.03	Bal.

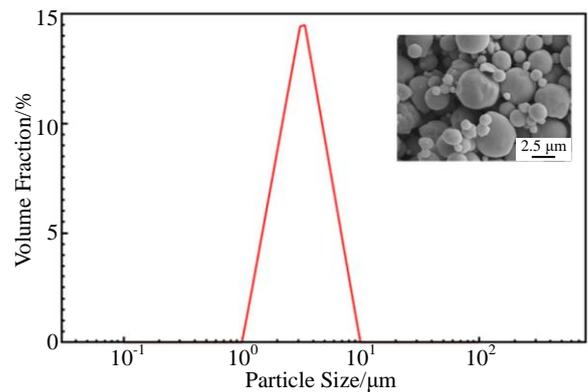


图 2 AISI316L 不锈钢粉末微观形态及粒度分布

Fig.2 Microstructure and particle size distribution of AISI316L stainless steel powder

烧结后的试样加工成拉伸棒，按照国标 GB/T228-2002 进行拉伸实验，拉伸实验采用的设备为 SANS-CMT4000 系列电子式万能试验机，引伸计标距 25 mm，试验温度 20 °C，载荷加载速率为 1 mm/min。

2 烧结模型和模型参数标定实验

2.1 烧结模型

金属粉末经过模压和脱脂后的生坯件主要由粉末和孔隙组成，视为可压缩连续体，假设材料各向同性。这种多孔连续体具有高的表面能。随着温度的升高，原子或分子运动加剧，体内的表面能减少，为烧结提供了驱

动力。基于烧结理论和连续介质力学原理，采用 SVOS (Skorohod-Olevsky viscous sintering)^[5]粘塑性模型来描述生坯件在烧结过程中的塑性变形、相对密度等结果。总应变率张量由弹性应变率、粘塑性应变率和热应变率 3 部分组成：

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}^e + \dot{\epsilon}^p + \dot{\epsilon}^{th} \quad (1)$$

其中， $\dot{\epsilon}^e$ 是弹性应变率， $\dot{\epsilon}^p$ 是粘塑性应变率， $\dot{\epsilon}^{th}$ 是热应变率。弹性应变率 $\dot{\epsilon}^e$ 在外力去除后会回复，并且弹性应变率在由热能引起的粘塑性变形中影响很小。另外，在编制子程序中如果考虑弹性变形，会导致公式的复杂性。因此，这里忽略弹性变形的影响。热应变率 $\dot{\epsilon}^{th}$ 主要取决于热膨胀，可以表达为：

$$\dot{\epsilon}^{th} = \alpha \Delta \dot{T} \mathbf{I} \quad (2)$$

其中， α 为热膨胀系数， $\Delta \dot{T}$ 为升温速率， \mathbf{I} 为二阶单位张量。

粘塑性应变率 $\dot{\epsilon}^p$ 使用 SVOS 模型，可以表达为：

$$\dot{\epsilon}_{ij}^p = \frac{\sigma'_{ij}}{2G} + \frac{\sigma_m + \sigma_s}{3K} \delta_{ij} \quad (3)$$

其中， $\dot{\epsilon}_{ij}^p$ 是粘塑性应变率张量分量， σ'_{ij} 是应力偏张量分量， σ_m 是应力张量的迹， δ_{ij} 是 Kronecker 符号， $i=j$ 时， $\delta_{ij}=1$ ， $i \neq j$ 时， $\delta_{ij}=0$ ， σ_s 是烧结应力。烧结应力是烧结的主要驱动力，是由孔隙结构中局部毛细应力产生的等效静水压力形成的，烧结应力可以表达为：

$$\sigma_s = \frac{\partial F}{\partial V_T} \quad (4)$$

其中， F 是多孔材料单位质量的自由能， V_T 是单位质量的总体积。 G 和 K 分别是烧结过程中多孔体的剪切粘度模量和体积粘度模量。式(3)右端第 1 项决定了生坯件在烧结过程的变形，第 2 项决定了生坯件烧结过程中的收缩。

剪切粘度模量和体积粘度模量可以从广义 Hooke 定律类比分析得到：

$$\begin{cases} G = \frac{\eta_p}{2(1+\nu_p)} \\ K = \frac{\eta_p}{3(1-2\nu_p)} \end{cases} \quad (5)$$

其中， η_p 是多孔材料的单轴粘度， ν_p 是粘塑性泊松比。

致密化过程是一个质量守恒过程， $m=\rho V$ ，其中， ρ 是材料的相对密度， V 是体积，因此：

$$dm = d\rho \cdot V + \rho \cdot dV = 0 \quad (6)$$

$$d\rho / \rho + dV / V = 0 \rightarrow d\rho / \rho + d\epsilon_v^p = 0$$

其中， ϵ_v^p 是体积塑性应变， $\epsilon_v^p = \epsilon_1^p + \epsilon_2^p + \epsilon_3^p$ ，其中 ϵ_1^p 、 ϵ_2^p 、 ϵ_3^p 为 3 个主方向的塑性应变，它是相对密度的函数，将上式积分后得到由粘塑性变形引起的变形后密度与初始密度的关系：

$$\rho = \rho_0 \exp(-\epsilon_v^p) \quad (7)$$

其中， ρ_0 是材料的初始相对密度。

2.2 模型参数标定

参数 η_p 通过弯曲实验确定，如下式所示^[16,17]：

$$\eta_p = \frac{1}{\delta} \cdot \frac{5\rho_a g L_s^4}{32h^2} \quad (8)$$

其中， δ 是试样中间位置的偏转率， ρ_a 是表观密度； g 是重力加速度， L_s 和 h 分别是弯曲实验中试样两支点间距和试样厚度。

通过自由烧结实验测量单轴收缩率 $\dot{\epsilon}_1$ 。参数标定实验在立式热膨胀仪中进行，采用 15 °C/min 升温速度，使温度上升到 1400 °C。由于烧结变形过程主要发生在高温，测量高温段（1000~1400 °C）的实验参数。

$$\dot{\epsilon}_1 = \frac{\dot{L}}{L} = \dot{\epsilon}_1^p + \dot{\epsilon}_1^{th} \quad (9)$$

其中， L 为试样的初始长度， $\dot{L} = \frac{\partial L}{\partial t}$ 为长度的瞬时变化率，单轴收缩率 $\dot{\epsilon}_1$ 为轴向的总应变率，即热应变率 $\dot{\epsilon}_1^p$ 与粘塑性应变率 $\dot{\epsilon}_1^{th}$ 之和。

图 3 和图 4 分别是在膨胀仪中进行弯曲实验和自由

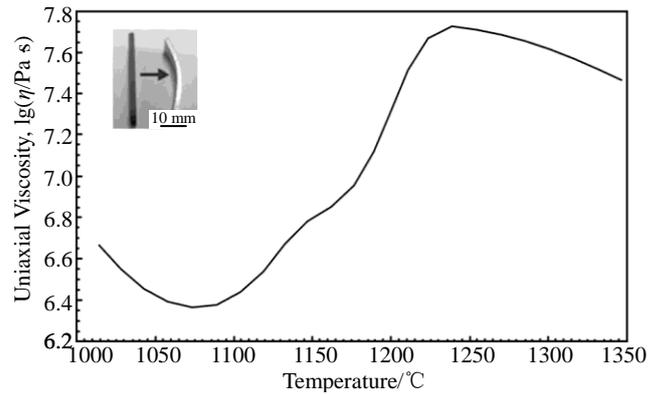


图 3 弯曲实验得到的单轴对数粘度与温度曲线

Fig.3 Curve of uniaxial logarithmic viscosity vs temperature through bending experiments

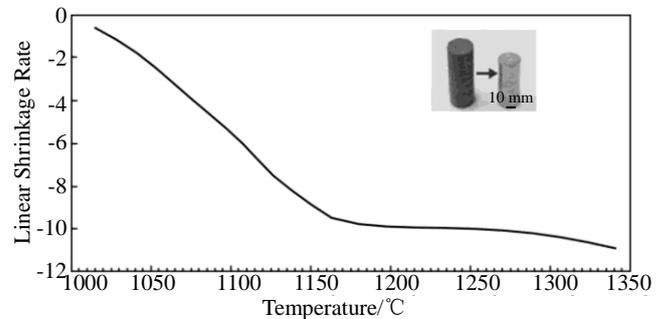


图 4 烧结实验得到的线性收缩率与温度曲线

Fig.4 Curve of linear shrinkage rate vs temperature through sintering experiments

烧结实验测得的单轴对数粘度和单轴收缩率相对于温度的变化曲线。

通过 Matlab 对烧结应力进行拟合，在自由烧结中，没有外力作用，只有烧结应力，假设材料是各向同性的，单向自由收缩率可由式 (3) 得到

$$\dot{\epsilon}_1^p = \frac{\sigma_s}{3K} \quad (10)$$

根据数据分布形状 (如图 5 所示)，使用 4 阶 Gauss 函数对实验数据进行拟合，自变量为时间 t ，得到如下式所示的拟合函数：

$$\begin{aligned} \sigma_s = & -3452 \exp\left\{-\left[(t-602.5)/51.09\right]^2\right\} \\ & + 1071 \exp\left\{-\left[(t-88.51)/155.4\right]^2\right\} \\ & + 3599 \exp\left\{-\left[(t-1274)/248.2\right]^2\right\} \\ & + 4479 \exp\left\{-\left[(t-539)/218\right]^2 + 200\right\} \end{aligned} \quad (11)$$

图 5 的横坐标为时间，纵坐标为烧结应力，表示在此等效静水应力下引起体积收缩。从图 5 可以看出整个烧结过程曲线是光滑的，避免了文献[15]中分段函数计算时的不连续性，在模拟过程中使用比较方便。

将标定的参数代入式 (3) 中，就可以得到烧结的粘塑性模型。

3 烧结过程模拟

在有限元仿真软件 Abaqus 中，通过编写蠕变子程序 (CREEP) 自定义材料的本构方程，根据标定的参数实现烧结过程模拟。对于金属材料，蠕变应变增量分为体积膨胀应变增量和单轴等效偏蠕变应变增量两部分：

$$\Delta \epsilon^{cr} = \frac{1}{3} \Delta \bar{\epsilon}^{sw} \mathbf{I} + \Delta \bar{\epsilon}^{cr} \mathbf{n} \quad (12)$$

其中， $\Delta \epsilon^{cr}$ 是蠕变应变增量矩阵， $\Delta \bar{\epsilon}^{sw}$ 是体积膨胀应变增量， $\Delta \bar{\epsilon}^{cr}$ 是单轴等效偏蠕变应变增量， \mathbf{I} 是单位矩阵， \mathbf{n} 是偏应力潜能梯度，定义为：

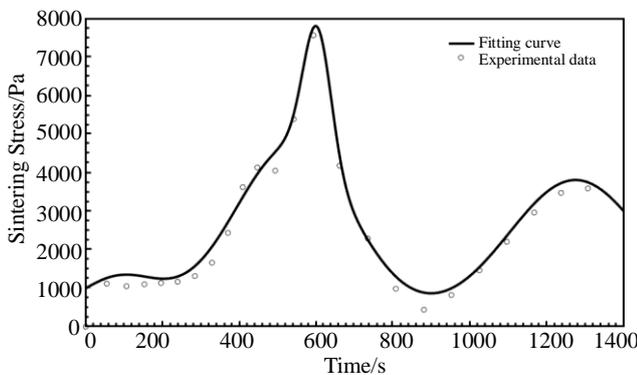


图 5 烧结应力的拟合曲线

Fig.5 Fitting curve of sintering stress

$$\mathbf{n} = \frac{\partial \bar{q}}{\partial \boldsymbol{\sigma}} \quad (13)$$

其中， \bar{q} 是等效偏应力 (Mises 应力)。

$$\bar{q} = \sqrt{\frac{3}{2} \boldsymbol{\sigma}' \boldsymbol{\sigma}'} \quad (14)$$

其中， $\boldsymbol{\sigma}' \boldsymbol{\sigma}' = \sigma'_{ij} \sigma'_{ij}$ 。

对于烧结过程，各个方向均匀收缩，没有切应变，不考虑单轴等效偏蠕变应变增量。对于式 (3)，蠕变应变的增量形式可以表示为：

$$\Delta \epsilon^{cr} = \frac{\sigma_s}{3K} \Delta t \mathbf{I} \quad (15)$$

总应变增量为：

$$\Delta \epsilon^p = \frac{\sigma_m + \sigma_s}{3K} \Delta t \mathbf{I} + \frac{\boldsymbol{\sigma}'}{2G} \quad (16)$$

上面的公式不仅可以用于自由烧结，也可以用于压力烧结。

使用子程序对烧结过程进行模拟，烧结模型为长方体，尺寸为 100 mm×20 mm×10 mm，使用 Abaqus 中的直接耦合法，进行热应力分析。因为结构对称，取 1/8 模型，定义 X, Y, Z 方向的对称边界条件，施加的温度变化与实验中完全相同。节点总数为 1077，单元总数为 160。

图 6 为模型最终变形结果，外面的矩形框是变形前的模型，里面的六面体网格为变形后的模型，可以看出产生了明显的收缩，使材料致密化。图 7 为密度随时间的变化过程曲线，实验的密度变化过程与模拟的变化过程符合得较好，说明烧结应力的拟合曲线和烧结模型是合理的，能够较好地模拟烧结的变形过程。

研究从 5 °C/min 到 30 °C/min，不同升温速度对模拟结果的影响，模型最终到达的温度都是相同的。在不同的升温速度下时间-密度变化曲线显示在图 8 中，最终的密度相差不大，相对密度为 0.91 左右。这些曲线基本上都分为 3 个阶段，从初始密度到相对密度 0.86 左右为密度的快速增加阶段。相对密度达到 0.86 时出现一个水平台

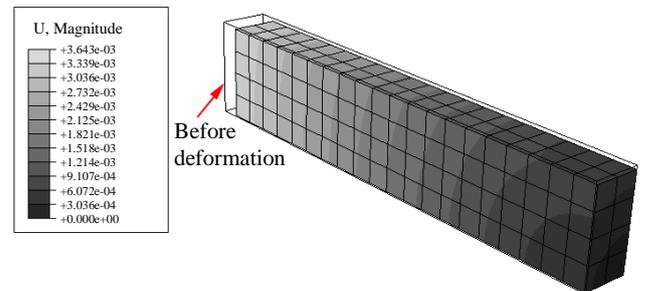


图 6 分析结束时 ($t=1306$ s) 总的位移分布云图以及变形前后模型
Fig.6 Total displacement distribution contour at the end of the analysis ($t=1306$ s), and the models before and after deformation

阶，致密化过程明显减慢，当时间继续增加或温度继续升高时，密度又会增加。当温度变化很慢时（5 °C/min），初始阶段密度变化明显减慢，曲线出现转折后水平台阶

会更长，然后密度缓慢增加。

不同升温速度下的温度-单轴线性收缩率曲线是类似的（如图 9 所示），其中 5, 10 °C/min 的实验结果来自于文献[14]。说明不同升温速率下，线性收缩率随温度的变化不大。

烧结后材料的抗拉强度为 280 MPa，屈服强度为 134 MPa，断后伸长率为 14.2%。由于材料的相对密度没有达到或接近 100%，内部仍然存在少量孔洞，所以力学性能比全致密材料有所降低。

烧结前后试样的 SEM 像如图 10 所示。烧结前试样相对密度较低（0.65 左右），颗粒间没有形成烧结颈，颗粒在模压过程中，通过颗粒重排、弹性变形、塑性变形使孔洞减小，如图 10a 所示。烧结过程中，相对密度为 0.77 时，颗粒之间已形成烧结颈，但是由于密度仍然较低，内部孔洞比较大，并且相互连通，如图 10b 所示。烧结到最后，试样相对密度 0.91 左右，孔洞明显减小，并且没有相互连通，如图 10c 所示。

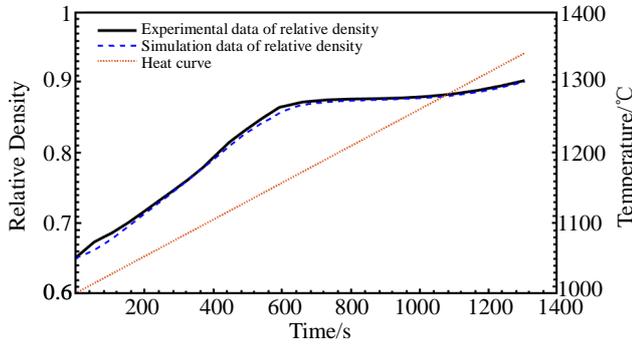


图 7 相对密度的计算值与实验结果比较

Fig.7 Comparison between the experimental results and the calculated ones of relative density

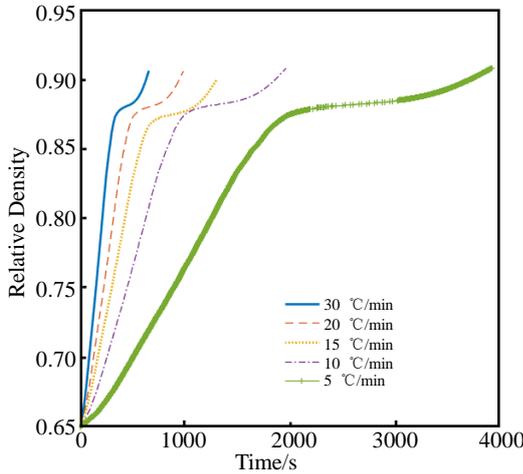


图 8 不同升温速度下密度变化曲线

Fig.8 Variation of relative density with time at different heating rates

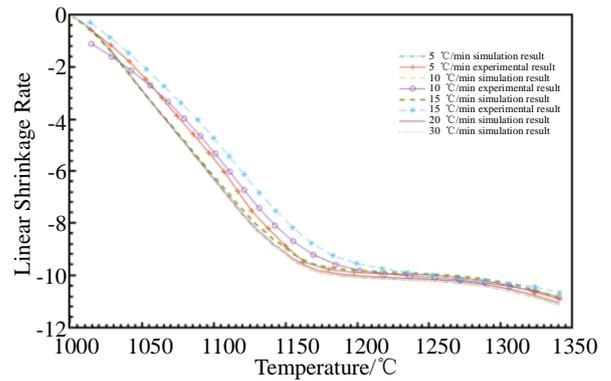


图 9 不同升温速度下温度-单轴收缩率变化曲线

Fig.9 Uniaxial shrinkage rate-temperature curves at different heating rates

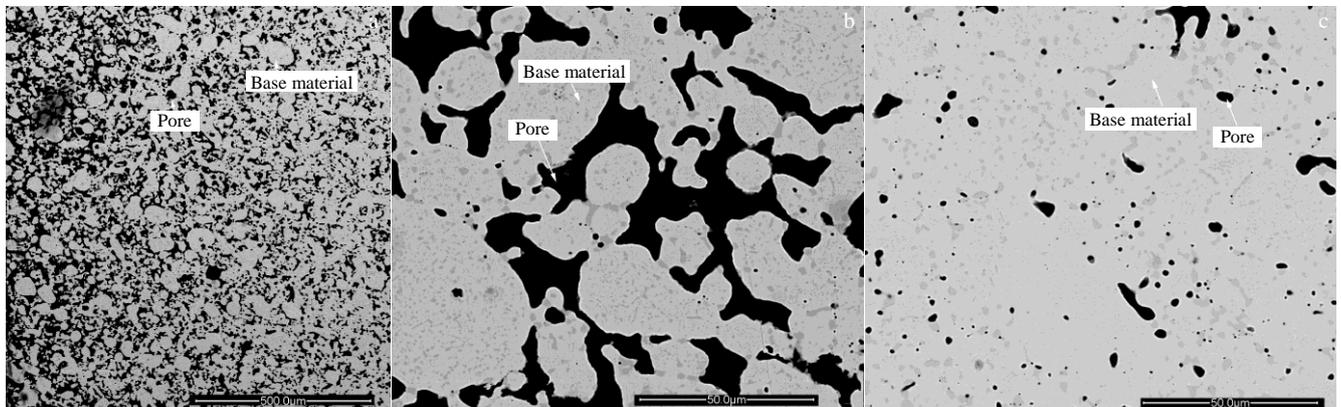


图 10 烧结前后不同相对密度试样的 SEM 形貌

Fig.10 SEM morphologies of the samples with different relative density before and after sintering: (a) 0.65, (b) 0.77, and (c) 0.91

计算过程中所用的模型是相同的，但是随着升温速度的不同，计算所用的时间差别很大。从图 11 中第 1 组烧结时间图可以看出，升温速度越快，烧结所用的时间越短，但是计算所用的时间并没有随烧结时间减小而减小。计算所用的增量步数越多，说明计算越不容易收敛，计算所用的时间也越长。从增量步数图可以看出，10, 15, 20 °C/min 增量步数较小，较容易收敛，升温速度很慢（5 °C/min）或很快（30 °C/min）时，增量步数明显增加，特别是 30 °C/min 升温速度最快，烧结时间最短（654 s），但是分析用的增量步最多，时间是最长的（53 140 s）。

根据式（3）模拟不锈钢粉末模压和烧结过程，一个二维的生坯模型被建立。由于形状对称，只考虑一半模型，使用轴对称单元，设置材料与模具之间的库伦摩擦系数为 0.3。模压后的相对密度分布云图如图 12 所示，初始相对密度为 0.381，随后模型被压缩，高度减小，密度增大。由于材料和模具之间存在摩擦，使材料内部密度分布变得不均匀。时间为 1.089 s 时，底部密度较大，顶部较小，同一高度材料的密度仍然比较均匀，密度最大差异为 0.0082。时间为 2.833 s 时，总体密度增大，但在模型的上部和底部区域，同一高度材料密度不再均匀，相对密度最大差异 0.0081。时间为 5.319 s 时，密度最大的区域集中在右下角，密度最小的区域集中在左上角，模型中部同一高度材料密度还是比较均匀的，密度最大差异 0.0086。7.460 s 时，材料进一步被致密化，密度分布

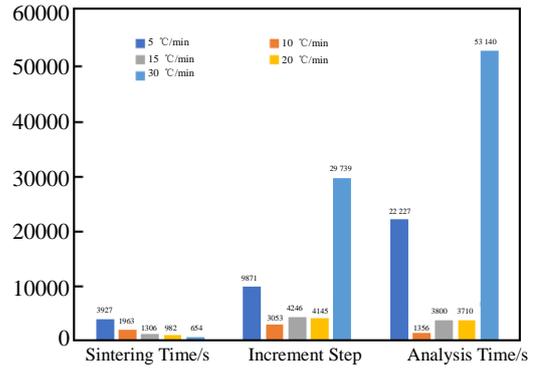


图 11 不同升温速率下烧结时间、增量步数与分析所用时间
Fig.11 Sintering time, increment steps, and analysis time at different heating rates

趋势与图 12d 类似。时间为 10 s 时，模型右下角密度最大（相对密度 0.8171），右上角密度最小（相对密度 0.8070），整个模型同一高度密度都不均匀，总体相对密度差异最大为 0.0101。

将模压的密度分布结果作为初始条件，导入到烧结模型中。烧结过程中，首先温度以 10 °C/s 匀速上升到 1340 °C，保温 3960 s，再以 10 °C/s 速度匀速降温到室温。烧结开始阶段温度比较低，烧结过程不明显，热膨胀效应大于烧结收缩效应，所以模型的体积略有膨胀，但是不明显。时间为 98.34 s 时，密度分布与模压后分布类似，如图 13a 所示。温度升高，烧结效应开始明

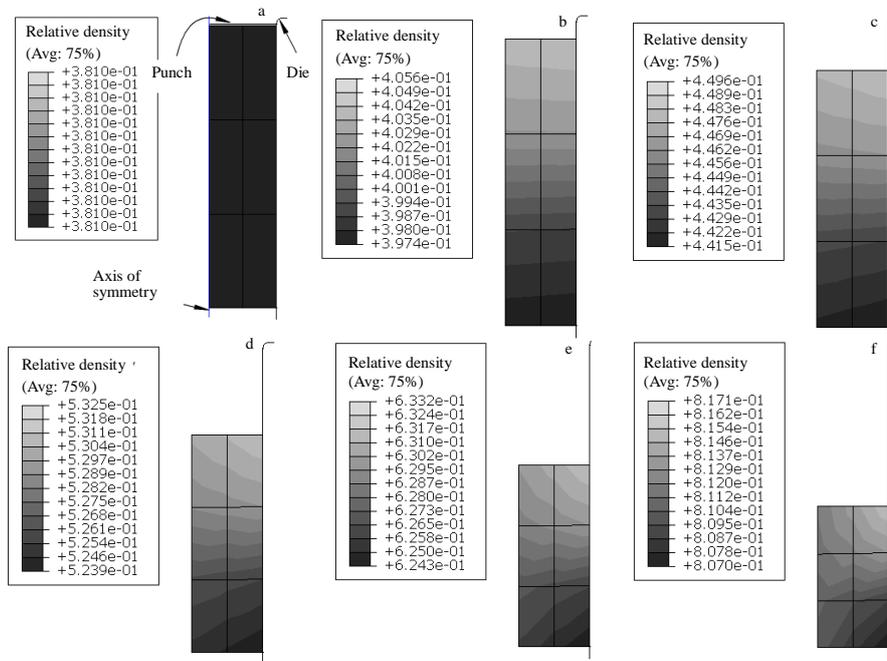


图 12 模压过程中不同时间的相对密度分布云图

Fig.12 Relative density distribution contours during die press process for the different time: (a) $t=0$ s, (b) $t=1.089$ s, (c) $t=2.833$ s, (d) $t=5.319$ s, (e) $t=7.460$ s, and (f) $t=10$ s

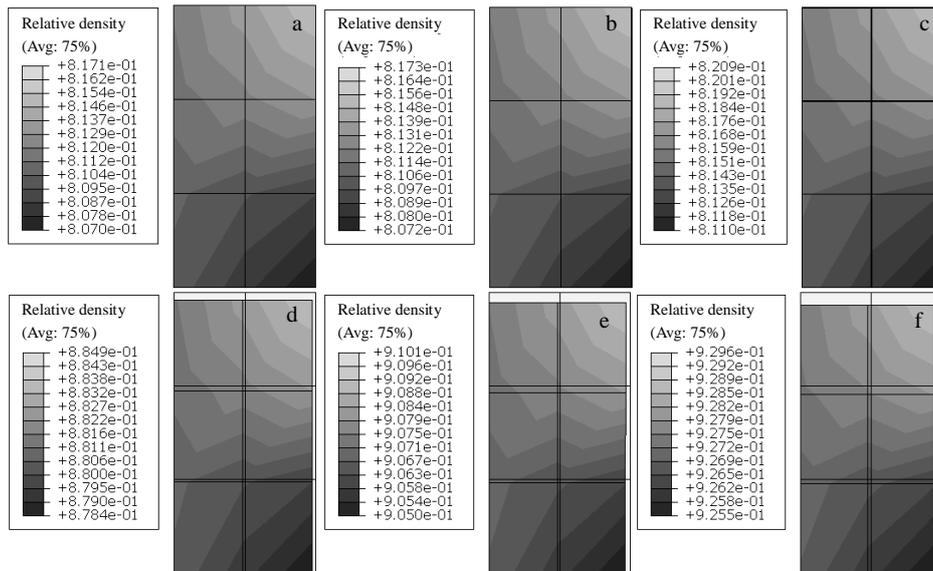


图 13 烧结过程中不同时间的相对密度分布云图

Fig.13 Relative density distribution contours during sintering process for the different time: (a) $t=98.34$ s, (b) $t=5402$ s, (c) $t=5578$ s, (d) $t=8278$ s, (e) $t=10\ 678$ s, and (f) $t=19\ 753$ s

显, 试样的体积在收缩, 时间为 5402 s 时, 密度开始增加, 密度变化范围为 0.8072~0.8173。时间为 5578 s 时, 相对密度上升到 0.8110~0.8209。时间达到 8278 s 时, 烧结收缩效应明显大于热膨胀效应, 模型的体积收缩, 如图 13d 所示, 外面较大的网格是变形前的结果, 较小的网格是变形后的模型, 相对密度为 0.8784~0.8849。云图中显示密度分布与烧结开始时略有变化, 但差别较小。时间为 10 678 s 时, 密度达到 0.9050~0.9101, 密度分布差别不大, 密度最大区域在右下角, 最小区域在右上角。烧结到最后 (时间为 19 753 s 时), 密度达到最大, 为 0.9255~0.9296。整个烧结过程中, 密度增加比较均匀, 密度分布变化不大, 主要是因为试样体积比较小, 烧结的升温、降温速度比较缓慢, 所以整个试样温度分布比较均匀, 收缩比较均匀。密度分布的不均匀性主要是由初始密度的不均匀性造成的, 最终烧结的密度分布与初始密度分布变化不大, 如图 12f 和图 13f。在保温阶段 (7920~11 880 s), 密度还在增加, 这是蠕变变形的结果, 说明蠕变方程是有效的。

4 结 论

1) 基于 SVOS 粘塑性烧结模型通过自由烧结实验和弯曲实验分别获得 AISI316L 不锈钢生坯的剪切粘度模量和体积粘度模量曲线。使用 MATLAB 对烧结应力进行拟合, 从而对模型参数进行了标定。使用 4 阶 Gauss 函数进行拟合, 参数适合于整个烧结过程, 并且曲线是光滑的, 避免了分段函数计算时的不连续性, 使用方便。

2) 通过 ABAQUS 蠕变子程序将 SVOS 模型应用于三维的长方体模型烧结过程的模拟, 模型体积明显收缩, 密度增加。密度变化过程与实验符合得较好, 说明烧结应力的拟合曲线是合理的。研究了不同升温速度对结果的影响, 结果表明升温速度变化曲线是类似的, 对最终的密度和线性收缩曲线影响不大, 但是升温速度不同对计算效率影响很大。升温速度很慢 (5 °C/min) 或很快 (30 °C/min) 时都不容易收敛, 增量步数明显增加, 计算用的时间明显增长。升温速度中等时, 计算时间较短。

3) 对不锈钢粉末模压和烧结过程进行了模拟, 研究初始密度分布的均匀性对烧结的影响。由于模压中材料与模具之间存在摩擦, 使最终试样的密度分布不均匀, 靠近模壁下部密度较大, 模壁上部密度较小。初始密度的不均匀性导致最终烧结试样密度分布也不均匀, 最终烧结的密度分布与初始的密度分布变化不大, 最终相对密度值变化范围 0.9255~0.9296。

参考文献 References

[1] Wang Jiang, Ni Yu, Liu Kai *et al.* *Journal of the American Ceramic Society*[J], 2021, 104(9): 4408
 [2] Xiang Zhongnan(项忠楠), Li Zhanjiang(李战江), Chang Fa(常发) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2020, 49(10): 3562
 [3] Song Min, Zheng Zhoushun, Chen Dongdong *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*[J], 2017, 46(10): 2842

- [4] Ren Ke, Wang Qiankun, Lian Yulong *et al. Journal of Alloys and Compounds*[J], 2018,747: 1073
- [5] Olevsky Eugene A. *Materials Science and Engineering R: Reports*[J], 1998, 23(2): 41
- [6] Ou H, Sahli M, Gelin J C *et al. Powder Technology*[J], 2014, 268: 269
- [7] Chen Dongdong, Zheng Zhoushun, Wang Jianzhong *et al. Rare Metal Materials and Engineering*[J], 2017, 46(6): 1474
- [8] Van Nguyen Chung, Sistla Sree Koundinya, Van Kempen Stanley *et al. Journal of the Ceramic Society of Japan*[J], 2016, 124(4): 301
- [9] Häzler Johannes, Seiz Marco, Kellner Michael *et al. Acta Materialia*[J], 2019, 164: 184
- [10] Hondo Tsuyoshi, Kato Zenji, Yasuda Kouichi *et al. Advanced Powder Technology*[J], 2016, 27(3): 1006
- [11] Svoboda J, Riedel H, Zipse H. *Acta Metallurgica et Materialia*[J], 1994, 42(2): 435
- [12] Hansen James D, Rusin Richard P, Teng Mao-Hua *et al. Journal of the American Ceramic Society*[J], 1992, 75(5): 1129
- [13] Shang Haixia, Mohanram Aravind, Olevsky Eugene *et al. Journal of the European Ceramic Society*[J], 2016, 36(12): 2937
- [14] Kong Xiangji(孔祥吉), Liu Chao(刘超), Kuang Chunjiang(况春江) *et al. Powder Metallurgy Industry(粉末冶金工业)*[J], 2017, 27(6): 27
- [15] Song Jiupeng(宋久鹏), Barriere T, Liu Baosheng(柳葆生) *et al. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering(机械科学与技术)*[J], 2007, 26(8): 1045
- [16] Gasik Michael, Zhang Baosheng. *Computational Materials Science*[J], 2000, 18(1): 93
- [17] Gu Xingjian, Liu Kai, Hu Jiaming *et al. Journal of Central South University*[J], 2021, 28: 1244

Study of Thermal Deformation Characteristics of Solid Phase Sintering of Stainless Steel Metal Porous Materials

Du Yanying, Liu Kai

(Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: Sintering process has great influence on the performance of porous materials. In order to obtain the best mechanical properties and required parts shape, it is necessary to study the thermal deformation evolution of sintering. Based on coupled thermo-mechanical SVOS visco-plastic constitutive model, the macro deformation of stainless steel porous materials during sintering process was calculated. The parameters of sintering stress, shear viscosity and volume modulus were fitted by fourth-order Gauss functions based on free sintering and bending experiments. The changes of relative density, linear shrinkage rate with the sintering time and temperature were discussed. The results show that the simulated process is consistent with the experiments, validating the rationality of the model. The difference of linear contraction curves under different heating rates of material is very little. Therefore, heating rate has little influence on sintering process. The heating rate has a great influence on the calculation time. When the heating rate is very slow or fast, computations are not easy to converge, and the calculation time is longer. The sintering simulations of the green parts prepared by dry-press process show that the initial density distribution inhomogeneity causes eventually density distribution inhomogeneity, while the range of density is not large.

Key words: sintering; numerical simulation; SVOS model; densification

Corresponding author: Du Yanying, Ph. D., Lecturer, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, P. R. China, Tel: 0086-27-86551180, E-mail: jenny_dyy@whut.edu.cn