

引文格式: 陈素文, 丁文杰, 钱家敏, 等. Monel400/Q235B 粉轧复合板本构模型研究 [J]. 塑性工程学报, 2024, 31 (12): 98–106. CHEN Suwen, DING Wenjie, QIAN Jiamin, et al. Research on constitutive model of Monel400/Q235B powder-rolled composite plate [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2024, 31 (12): 98–106.

Monel400/Q235B 粉轧复合板本构模型研究

陈素文¹, 丁文杰¹, 钱家敏¹, 郭文渊¹, 孙建亮²

(1. 燕山大学 环境与化学工程学院, 河北 秦皇岛 066004;
2. 燕山大学 国家冷轧板带装备及工艺工程技术研究中心, 河北 秦皇岛 066004)

摘 要: 利用电子万能试验机进行了不同相对密度材料的压缩实验, 建立了基于 Shima-Oyane 模型的多孔 Monel400 合金及其复合板的本构模型。利用 MSC. Marc 软件对压缩过程进行了有限元模拟, 将变形抗力本构模型的计算值与有限元模拟值和实测值对比, 最大误差均低于 10%, 验证了所建立的本构模型的准确性。实验结果显示, 多孔 Monel400 合金的屈服强度随着相对密度的增加而增加, 且将拟合线外推至致密态, 可得致密体屈服强度为 186.21 MPa, 与致密体 Monel400 合金屈服强度相符。在压缩过程中, 径向应变、体积应变随轴向应变的增加而提高。随着压缩过程的进行, 试样的直径扩张速度提高, 内部孔洞逐渐缩小, 可压缩性逐渐降低。

关键词: 粉轧复合板; Monel400/Q235B; 本构模型; 多孔金属; 数值模拟

中图分类号: TF124 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2012 (2024) 12-0098-09

doi: 10.3969/j.issn.1007-2012.2024.12.012

Research on constitutive model of Monel400/Q235B powder-rolled composite plate

CHEN Su-wen¹, DING Wen-jie¹, QIAN Jia-min¹, GUO Wen-yuan¹, SUN Jian-liang²

(1. College of Environmental and Chemical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China;

2. National Engineering Research Center for Equipment and Technology of C. S. R., Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: The compression experiments of specimens with different relative densities were carried out using electronic universal compression test machine, and the constitutive model of porous Monel 400 alloy and its composite plates based on the Shima-Oyane model was established. The finite element simulation of the compression process was carried out by MSC. Marc software, and the of calculated values and finite element simulation values deformation resistance of constitutive model were compared with the measured values, and the maximum errors were less than 10%, which verifies the accuracy of the constitutive model. The experimental results show that the yield strength of the Monel porous alloy increases with the increase of relative density, and the yield strength of the dense body is 186.21 MPa by extrapolating the fitting line to the dense state, which is consistent with the yield strength of the dense body Monel400 alloy. In the compression process, the radial strain and volumetric strain increase with the increase of axial strain. As the compression process progresses, the diameter expansion rate of the specimen increases, the internal pores gradually shrink, and the compressibility gradually decreases.

Key words: powder-rolled composite plate; Monel400/Q235B; constitutive model; porous metal; numerical simulation

引言

粉末轧制双金属复合板是一种利用不同金属粉轧复合以满足性能需求的板材, 具有经济成本低、

结构轻量化等优点, 应用前景广阔。相较于其他板材复合法, 例如苏艳妮等^[1]采用爆炸焊接方法制备的高纯铌-无氧铜复合板, 粉轧复合板能够充分利用不同金属材质特性。但是由于粉末轧制复合板材

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目 (52075473); 河北省教育厅科学研究项目 (ZD2022044)

第一作者: 陈素文 (通信作者), 女, 1986 年生, 博士, 副教授, 主要从事金属变形和粉末冶金研究, E-mail: chensw@ysu.edu.cn

收稿日期: 2023-12-28; **修订日期:** 2024-10-21

中的覆层金属为多孔金属,不适用致密体屈服理论且相对密度对其力学性能和屈服行为影响较大。王阳阳等^[2]采用数值模拟方法研究了钛合金电极块的压制过程,借助 Shima-Oyane 本构模型并结合相关实验重点对电极块压制过程中的相对密度分布、粉末颗粒的流动规律进行分析。续昊等^[3]利用多孔铍实测 Shima 型屈服准则,运行于 MSC. Marc 有限元平台,对光学用金属铍冷等静压、热等静压过程分别进行数值仿真和分析,研究表明基于实测屈服准则对铍粉末冶金过程的仿真精度完全可以满足工程要求。张宏吉等^[4]基于 Shima-Oyane 屈服准则,进行了 Cu-20%铜铁粉末异步轧制过程的有限元模拟,探究了轧制工艺参数对粉末生坯以及轧制力的影响规律,结果表明采用异步轧制技术能够有效降低轧制力并提高生坯密度分布的均匀性。李红等^[5]采用冷轧、烧结后热轧的工艺流程,实现了 Ni60 粉末与 Q235B 钢板的粉轧复合,通过对结合界面的微观形貌分析,确认了结合界面的冶金结合。华林等^[6]对各学者提出的多孔金属屈服准则进行分析后认为,在塑性加工中除了初始屈服,其后继屈服也值得关注,并由此提出了粉末烧结材料的后继屈服准则。毛华杰等^[7]基于 Shima-Oyane 模型,利用 Marc 软件对粉末冶金件表面滚压工艺进行了模拟,分析了工艺参数对工件表面性能的影响。侯深圳等^[8]研究了 2219 铝合金的热变形行为,建立了基于应变补偿的双曲正弦本构方程。

尽管国内外的许多学者都提出了不同的本构模型,但将其扩展应用至其它材料时,仍需进行针对性实验以确定合适的参数,才能具备较高的准确性。因此本文以 Monel400/Q235B 粉轧复合板材^[9]作为研究对象,针对覆层 Monel400 合金,进行了不同密度试样的压缩实验,结合实验数据建立了覆层多孔合金的本构模型以及复合板整体本构模型。基于建立的多孔金属本构模型,利用 MSC. Marc 软件进行了试样单轴压缩过程的有限元模拟,对比实验及模拟数据,验证了所建立的本构模型的准确性。

1 实验

1.1 实验材料

本研究使用采购自南宫特焊焊接材料有限公司的 Monel400 合金粉末,粉末粒度为 170~400 目,其化学成分(%,质量分数)为:63%Ni,34%Cu,2.5%的 Fe,2.0%Mn,0.3%C,0.5%Si,0.024%S。拟制备 4 组相对密度分布在 0.70~0.95 范围内

的烧结^[10-13]试样作为实验材料,根据预先分组的相对密度和模具尺寸,计算装填粉末的质量。以氮化硼作为脱模剂刷于模具内壁,将粉末装填入模具后置于烧结室内,对粉末上端保持 12.5 kN 压力,在 1000 °C 下进行烧结,烧结时间为 300 s,烧结气氛为高纯氩气,升温速度为 2.5 °C·s⁻¹,降温速度为 5 °C·s⁻¹,降温至 200 °C 以下随炉冷却。制备得到初始相对密度 ρ_0 为 0.758、0.836、0.888 和 0.923 的多孔 Monel400 合金试样,其直径为 $\Phi 12.1$ mm,高度为 15.2 mm。制备的多孔 Monel400 合金试样如图 1 所示。

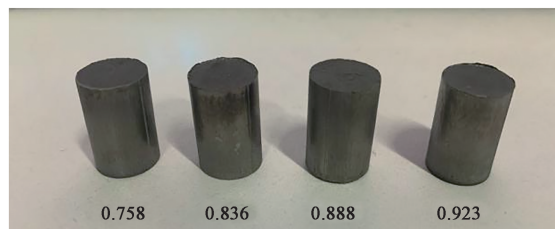


图 1 Monel400 合金烧结试样

Fig. 1 Monel400 alloy sintered specimens

1.2 实验方法

在 WDW-1006 电子万能试验机上对每组试样分别进行单轴压缩实验和屈服强度测量实验。实验采用硬脂酸锌作为润滑剂涂抹于试样和压头之间,以减少摩擦和试样的鼓形变形趋势。

(1) 分别测定烧结试样的初始相对密度 ρ_0 并记录。

(2) 对不同相对密度的试样进行相同的单轴压缩实验,记录其轴向和径向尺寸,再置入实验仪器进行压缩过程。重复上述过程 6~8 次记录轴向和径向尺寸。

(3) 对试样进行屈服强度测量实验。对 4 组不同相对密度的试样进行压缩实验,并记录不同相对密度试样的屈服强度。

2 实验结果与分析

2.1 微观形貌分析

图 2 是不同相对密度试样压缩前的微观形貌图。在相对密度为 0.758 的烧结试样中可以观察到存在大量保持球形的粉末颗粒,并且在颗粒之间存在形状不定的孔隙。随着相对密度的增大,存在清晰边界的球形颗粒逐渐减少,孔隙逐渐闭合且粉末颗粒之间的孔隙尺寸和数量均逐渐减小。

对压缩后的试样进行线切割,观察其横截面的微观形貌。图 3 为不同相对密度试样在进行室

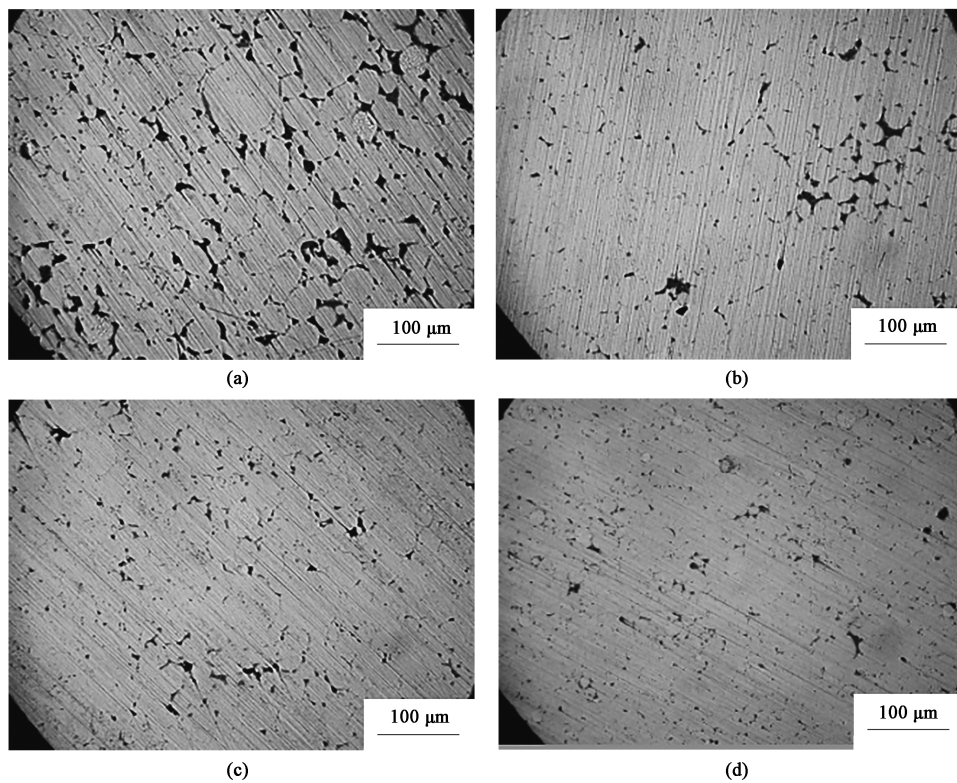


图 2 不同相对密度试样压缩前的微观形貌图

(a) 0.758 (b) 0.836 (c) 0.888 (d) 0.923

Fig. 2 Microscopic morphology diagrams of samples with different relative densities before compression

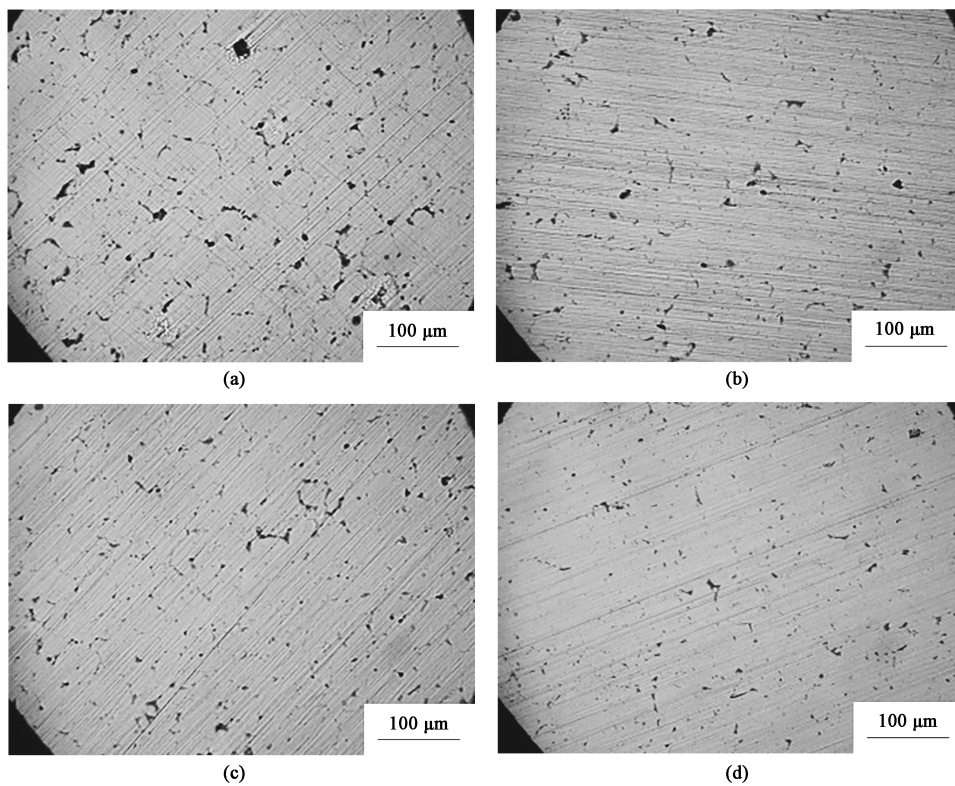


图 3 不同相对密度试样压缩后的微观形貌图

(a) 0.758 (b) 0.836 (c) 0.888 (d) 0.923

Fig. 3 Microscopic morphology diagrams of samples with different relative densities after compression

温压缩后的微观形貌图。在经历压缩过程后, 孔隙大小和数量均出现了不同程度的减小和减少现象, 孔隙收缩的直观程度随相对密度的增大而逐渐降低。

2.2 多孔 Monel200 合金压缩变形过程

对制备的多孔 Monel400 合金试样进行单轴压缩实验, 测量不同初始相对密度的烧结试样相对密度、径向应变和体积应变与轴向应变 ε_1 的关系。实验结果如图 4~图 6 所示。从图 4 中可以看出, 试样初始相对密度越高, 压缩后试样的相对密度越大。初始相对密度越高, 随着轴向应变的增加, 相对密度的增大速度减缓。从图 5 和图 6 可以看出, 径向应变和体积应变随轴向应变的增加而提高, 随着压缩过程的进行, 试样的内部孔洞逐渐缩小, 可压缩性逐渐降低。

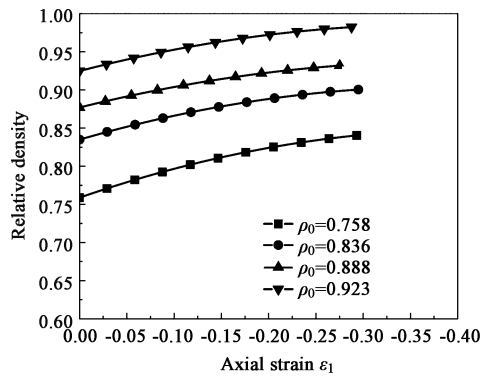


图 4 相对密度-轴向应变关系曲线

Fig. 4 Relationship curves of relative density-axial strain

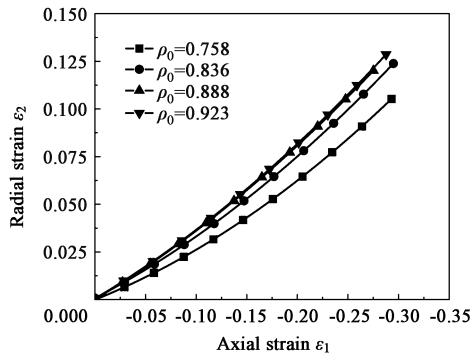


图 5 径向应变-轴向应变关系曲线

Fig. 5 Relationship curves of radial strain-axial strain

2.3 本构方程

目前大多数多孔金属材料研究所采用的屈服准则形式如式 (1) 所示。

$$F(\sigma_{ij}) = AJ_2' + BJ_1^2 - \delta\sigma_0^2 = 0 \quad (1)$$

式中: $F(\sigma_{ij})$ 为应力分量函数; A 和 B 分别为材料参数; J_1 和 J_2' 分别为应力张量第一和第二不变量; σ_0 为基体致密材料的实际屈服应力; σ 为等效屈服应力; $\delta = (\sigma/\sigma_0)^2$ 。

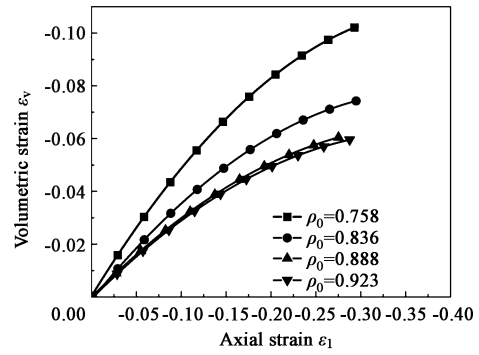


图 6 体积应变-轴向应变关系曲线

Fig. 6 Relationship curves of volumetric strain-axial strain

根据对不同材料的实验测试或者对现有屈服准则的推导修正, 学者们提出了不同形式的多孔材料屈服准则。本文采用 Shima-Oyane 屈服模型描述多孔 Monel400 合金本构关系, 如式 (2) 所示。

$$F = \frac{1}{f'} \left[\{ (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \} / 2 + (\sigma_m/f) 2 \right]^{1/2} - \sigma_0 \quad (2)$$

式中: f' 和 f 分别为应力修正因子和静水压力影响因子; σ_m 为平均主应力; σ_1 、 σ_2 和 σ_3 分别为第一、第二和第三主应力。

2.3.1 静水压力影响因子的确定

将每组实验序号记为 i , 对 4 组试样统一取固定轴向应变增量。由图 4 可确定轴向应变 ε_1^i 下对应的相对密度 ρ^i 值, 进而可确定静水影响因子 f , 如图 7 所示, 同理可由图 5 和图 6 确定与之对应的 ε_2^i 和 ε_v^i 值。

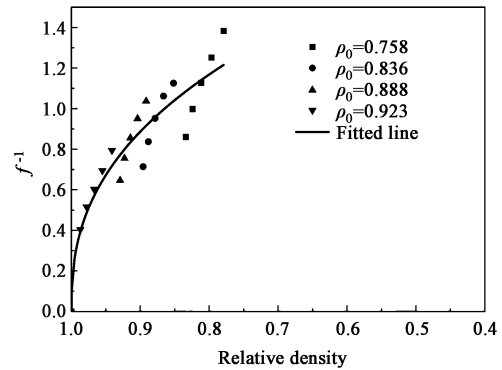


图 7 基于测量数据对 f 的确定

Fig. 7 Determination of f based on measurement data

假设 $f = a(1-\rho)^m$, (其中, a 为系数, m 为指数) 由图 7 可得 f 与相对密度 ρ 的关系, 经拟合可得:

$$f = \frac{1}{2.2899} (1 - \rho)^{-0.4069} \quad (3)$$

2.3.2 应力修正因子的确定

令 $f' = \sigma/\sigma_0 = \rho^n$, 其中 n 为指数, 可以转化为

$\sigma = \sigma_0 \rho^n$ 。将拟合线延伸至与 y 轴交点, 即为相对密度 $\rho = 1$ (致密体) 时的屈服强度, 其值即为 σ_0 。图 8 为不同初始相对密度试样的屈服强度与相对密度的对应关系图。

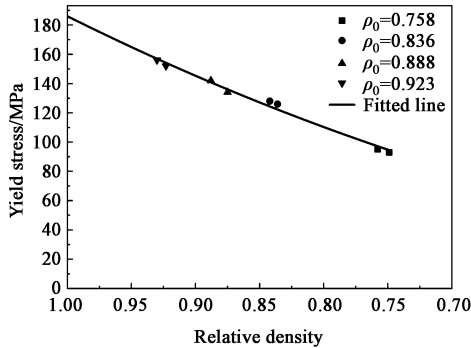


图 8 屈服强度–相对密度关系曲线

Fig. 8 Relationship curve of yield strength–relative density

将拟合线外推至 $\rho = 1$, 可得致密体屈服强度 $\sigma_0 = 186.21$ MPa, 利用幂函数拟合可得等效屈服应力与相对密度的关系为:

$$\sigma = 186.21 \rho^{2.34084} \quad (4)$$

因此可得 f' 与相对密度 ρ 的关系为:

$$f'(\rho) = \rho^{2.34084} \quad (5)$$

进而可得多孔 Monel400 合金的本构模型为:

$$\sigma_0 = \rho^{-2.34084} \left\{ \frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] + 5.2436 \sigma_m^2 (1 - \rho)^{0.8138} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

为了直观体现致密程度对多孔 Monel400 合金屈服性能的影响, 在二维应力状态下, 以相对密度表征其致密程度, 绘制出不同相对密度下 Monel400 合金的屈服面形状。

二维状态应力屈服函数为:

$$\sigma_0^2 = \frac{1}{f'^2(\rho)} \left\{ \frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + \sigma_2^2 + \sigma_1^2] + \frac{(\sigma_1 + \sigma_2)^2}{9f'^2(\rho)} \right\} \quad (7)$$

分别以 σ_1 和 σ_2 为横纵坐标, 根据式 (7) 得到图 9。

由图 9 可得, 屈服面随致密程度的提升而扩张, 并趋向于 Mises 屈服面, 当相对密度达到 1, 即金属为致密态时, 由式 (7) 即可推导得 Mises 准则。

2.4 Monel/Q235B 复合板的本构模型

对于 Monel400/Q235B 粉轧复合双金属板的覆

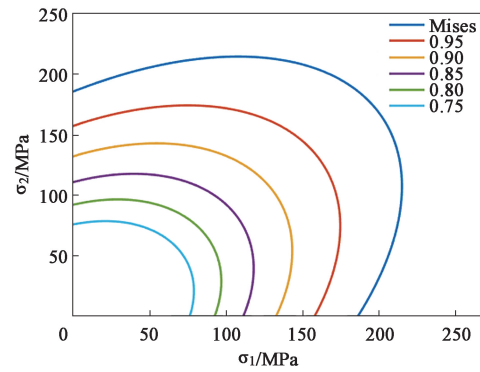


图 9 不同相对密度 Monel400 合金的屈服面

Fig. 9 Yield surfaces of Monel400 alloy with different relative densities

层 Monel400 合金, 采用上述针对多孔 Monel400 合金的本构模型, 而对于基层 Q235B 钢材, 采用适用于金属材料的 Von-Mises 屈服准则^[14-16]。建立的适用于 Monel400/Q235B 粉轧复合双金属板的本构模型如式 (8) 所示。

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_0^2 = \frac{1}{f'^2(\rho)} \left\{ \frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + \sigma_2^2 + \sigma_1^2] + \frac{(\sigma_1 + \sigma_2)^2}{9f'^2(\rho)} \right\} \\ \quad \text{(Monel 合金层)} \\ \sigma_s^2 = \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \\ \quad \text{(Q235B 钢层)} \end{array} \right. \quad (8)$$

式中: σ_s 为 Q235B 钢的实际屈服应力。

3 有限元验证

3.1 有限元模型建立

设置模型尺寸与制备试样的尺寸一致, 其直径为 $\Phi 12.1$ mm, 高度为 15.2 mm, 采用两刚体平面代替上下压头, 下平面固定约束, 上平面给定位移速度。上下两刚体平面与压缩试件间的摩擦因数取 0.3, 对试样进行压缩, 如图 10 所示。

3.2 本构模型验证

本构模型的验证一般通过预测值与实验值对比验证其准确性和可靠性^[17-19], 针对本文建立的 Shima-Oyane 本构模型的验证可从两方面进行。一是将不同相对密度试样的本构模型预测的数据与实验实测数据进行对比; 二是对比压缩实验和有限元模拟试样的变化趋势以及误差, 验证本构模型的合理性和可靠性。

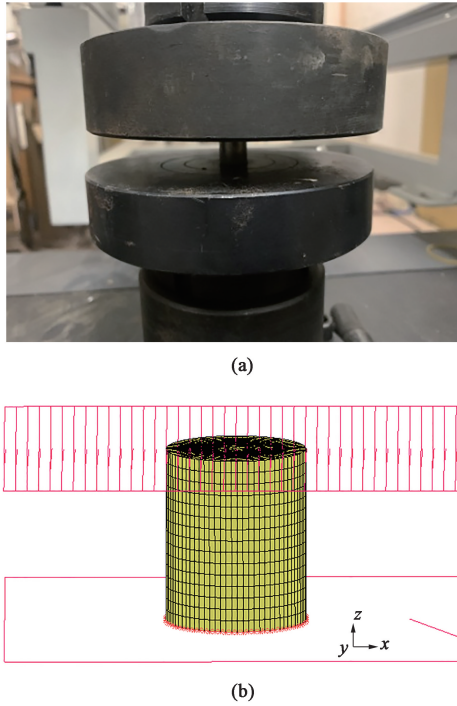


图 10 单轴压缩过程的几何模型
(a) 压缩实验 (b) 几何模型

Fig. 10 Geometric model of uniaxial compression process
(a) Compression experiment (b) Geometric model

3.2.1 压缩变形抗力曲线对比

将电子万能试验机测得的应力-应变曲线通过式 (9) 转化为真实应力-真实应变曲线。

$$\begin{cases} \sigma_{\text{true}} = \sigma_{\text{nom}} (1 - \varepsilon_{\text{nom}}) \\ \varepsilon_{\text{true}} = \ln[1/(1 - \varepsilon_{\text{nom}})] \end{cases} \quad (9)$$

式中: σ_{nom} 和 σ_{true} 分别为名义应力和真实应力; ε_{nom} 和 $\varepsilon_{\text{true}}$ 分别为名义应变和真实应变。

真实应力-真实应变曲线可通过式 (10) 转化得到塑性阶段应力-应变曲线。

$$\varepsilon_{\text{plastic}} = \varepsilon_{\text{total}} - \frac{\sigma_{\text{true}}}{E} \quad (10)$$

式中: $\varepsilon_{\text{plastic}}$ 为塑性阶段应变; $\varepsilon_{\text{total}}$ 为试验总应变。

不同初始相对密度下多孔 Monel400 合金在塑性阶段的应力-应变曲线如图 11 所示。

对初始相对密度为 0.758、0.836、0.888 和 0.923 的试样塑性阶段的变形抗力曲线进行拟合, 其应力与应变的关系如式 (11)。

$$\begin{cases} \sigma_{0.923} = 175.86 + 1303.64\varepsilon - 1478.84\varepsilon^2 \\ \sigma_{0.888} = 161.88 + 1175.58\varepsilon - 1231.26\varepsilon^2 \\ \sigma_{0.836} = 152.87 + 902.99\varepsilon - 825.61\varepsilon^2 \\ \sigma_{0.758} = 102.71 + 724.88\varepsilon - 831.61\varepsilon^2 \end{cases} \quad (11)$$

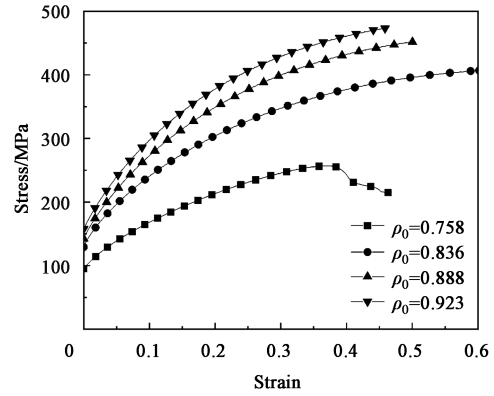


图 11 不同初始相对密度下 Monel400 合金在塑性阶段的变形抗力曲线

Fig. 11 Deformation resistance curves of Monel400 alloys with different initial relative densities at plastic stages

式中: $\sigma_{0.923}$ 、 $\sigma_{0.888}$ 、 $\sigma_{0.836}$ 和 $\sigma_{0.758}$ 为不同相对密度试样对应的变形抗力。

通过 Matlab 平台构建快速响应模型, 采用差值法计算某一相对密度试样的变形抗力曲线, 差值计算公式如式 (12) 所示。

$$\begin{cases} \sigma_c = \sigma_l + \left(\frac{\rho_c - \rho_l}{\rho_h - \rho_l} \right) (\sigma_h - \sigma_l) \\ \sigma_{cs} = 186.21\rho_c^{2.34084} \end{cases} \quad (12)$$

式中: ρ_c 、 ρ_h 和 ρ_l 分别为预测相对密度、高值相对密度和低值相对密度; σ_c 、 σ_h 和 σ_l 分别为预测变形抗力、高值变形抗力, 和低值变形抗力; σ_{cs} 为预测屈服强度。

在 Matlab 中输入预测多孔金属 Monel400 的相对密度后进行计算。由于式 (11) 的塑性变形抗力计算公式为拟合得出, 其在塑性变形较小时变形抗力值偏高, 因此试样的屈服强度由式 (10) 计算, 在塑性变形初期对计算所得变形抗力进行系数修正以获得更为合理的数值。取塑性应变增量步为 0.02, 设置所需预测的多孔金属 Monel400 试样相对密度为 0.906、0.875 和 0.824, 对其变形抗力曲线进行计算预测, 其塑性阶段变形抗力曲线如图 12 所示。

基于 Matlab 预测的变形抗力曲线为离散数据拟合, 与实测变形抗力曲线误差在 10% 左右, 建立的多孔 Monel400 合金本构模型中的应力修正因子具有一定的准确度。

由于相对密度为 0.758 的多孔 Monel400 合金试样在较大应变值时 (>35%) 发生压溃, 因此相对密度为 0.758 的多孔 Monel400 合金基于拟合曲线计算所得的塑性应变到 0.4 为止。

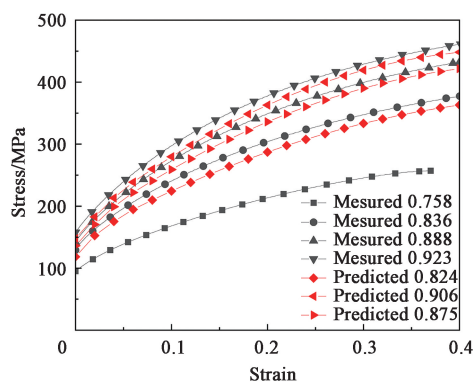


图 12 变形抗力曲线实测值和预测值对比

Fig. 12 Comparison of measured and predicted deformation resistance curves

3.2.2 有限元结果与实验结果对比

将试样变形抗力曲线导入 Marc 软件中, 进行单

轴压缩过程的模拟, 设置有限元模拟中上压板的位移进给速度为 $2 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, 取有限元模型中间位置一节点, 读取试样进入塑性阶段后应力随时间的变化曲线, 与实测曲线进入塑性阶段后应力变化曲线对比如图 13 所示。

4 组不同相对密度模拟试样压缩过程中应力随时间的响应曲线与实测压缩试样的应力响应曲线变化趋势基本一致, 模拟数据与实测数据的最大误差分别约为 9.1%、6.2%、7.7% 和 7.9%。这是由于在实际实验时, 对试样压缩会导致其内部孔隙收缩坍塌, 致密化程度变小, 而模拟是基于连续介质理论, 只考虑了相对密度的影响, 未考虑到孔隙的数量以及分布, 从而导致模拟数值略高于实测值。

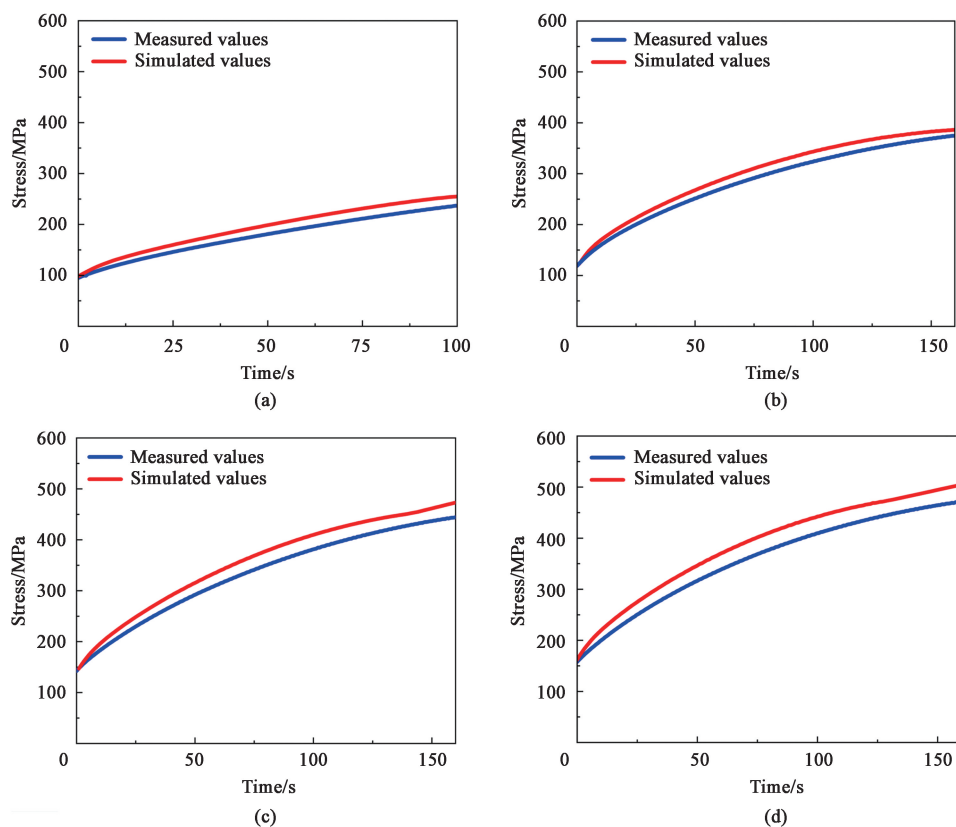


图 13 不同初始相对密度试样模拟与实测应力变化曲线对比

(a) 0.758 (b) 0.836 (c) 0.888 (d) 0.923

Fig. 13 Comparison of simulated and measured stress change curves of samples with different initial relative densities

4 结论

(1) 针对覆层多孔 Monel400 合金屈服行为及力学性能区别于致密态金属的问题, 基于 Shima-Oyane 本构模型, 建立多孔 Monel400 合金本构模型, 较为

准确地分析了多孔 Monel400 合金在塑性阶段的变形行为。

(2) 基于实验建立的多孔 Monel400 合金的本构模型与 Von-Mises 屈服准则存在相通性, 在相对密度为 1 时两者保持一致, 多孔 Monel400 合金本构模型具体形式如下:

$$\sigma_0 = \rho^{-2.34084} \left\{ \frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] + 5.2436 \sigma_m^2 (1 - \rho)^{0.8138} \right\}^{\frac{1}{2}}.$$

对于复合板整体而言, 其本构模型为:

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_0^2 &= \frac{1}{f^2(\rho)} \left\{ \frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + \sigma_2^2 + \sigma_1^2] + \frac{(\sigma_1 + \sigma_2)^2}{9f^2(\rho)} \right\} \\ &\quad (\text{Monel 合金层}) \\ \sigma_s^2 &= \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \\ &\quad (\text{Q235b 钢层}). \end{aligned} \right.$$

(3) 对多孔 Monel400 合金的压缩过程进行了有限元模拟和压缩实验。模拟与实验的应力对比结果显示, 数据最大误差均小于 10%, 证明了所建立的本构模型具有可信度, 为粉轧 Monel/Q235 复合板提供了更为准确的力学支撑。

参考文献:

- [1] 苏艳妮, 薛少博, 王国栋, 等. 热处理温度对高纯铌-无氧铜爆炸焊接复合板材组织及性能的影响 [J]. 稀有金属, 2022, 46 (10): 1306-1313.
SU Yanni, XUE Shaobo, WANG Guodong, et al. Microstructure and properties of high-purity niobium and oxygen-free copper explosive welded composite plate with different heat treatment temperatures [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2022, 46 (10): 1306-1313.
- [2] 王阳阳, 赵小花, 雷强, 等. 钛合金 VAR 熔炼用电极块压制过程模拟研究 [J]. 钛工业进展, 2021, 38 (6): 1-5.
WANG Yangyang, ZHAO Xiaohua, LEI Qiang, et al. Simulation study on the pressing process of electrode blocks for VAR smelting of titanium alloys [J]. Titanium Industry Progress, 2021, 38 (6): 1-5.
- [3] 续昊, 何力军, 李志年, 等. 光学用铍材冷、热等静压成形数值模拟 [J]. 稀有金属, 2022, 46 (2): 185-194.
XU Hao, HE Lijun, LI Zhinian, et al. Numerical simulation of cold and hot isostatic pressing forming of beryllium materials for optics [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2022, 46 (2): 185-194.
- [4] 张宏吉, 彭文飞, 李贺, 等. Cu-20%Fe 粉末异步轧制有限元模拟及工艺参数影响规律 [J]. 材料导报, 2023, (3): 1-13.
ZHANG Hongji, PENG Wenfei, LI He, et al. Finite element simulation of asynchronous rolling of Cu-20%Fe powder and the influence of process parameters [J]. Materials Reports, 2023, (3): 1-13.
- [5] 李红, 刘益民, 高楠, 等. 镍基合金粉末复合板轧制工艺技术研究 [J]. 辽宁科技大学学报, 2020, 43 (4): 259-263.
LI Hong, LIU Yimin, GAO Nan, et al. Research on rolling technology of nickel-based alloy powder composite plate [J]. Journal of Liaoning University of Science and Technology, 2020, 43 (4): 259-263.
- [6] 华林, 秦训鹏. 粉末烧结材料屈服条件研究和进展 [J]. 武汉理工大学学报, 2004, (4): 1-5.
HUA Lin, QIN Xunpeng. Research and progress on yield conditions of powder sintered materials [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2004, (4): 1-5.
- [7] 毛华杰, 沈小燕. 粉末冶金件表面滚压塑性变形强化过程的数值模拟 [J]. 热加工工艺, 2010, 3 (11): 110-114.
MAO Huajie, SHEN Xiaoyan. Numerical simulation of rolling plastic deformation strengthening process on the surface of powder metallurgy parts [J]. Hot Working Technology, 2010, 3 (11): 110-114.
- [8] 侯深圳, 蔡玉俊, 董晓传, 等. 2219 铝合金热压缩流变应力及本构方程 [J]. 塑性工程学报, 2022, 29 (12): 135-141.
HOU Shenzhen, CAI Yujun, DONG Xiaochuan, et al. 2219 Rheological stress and constitutive equation of hot compression of aluminum alloy [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2022, 29 (12): 135-141.
- [9] 田玉婷, 高楠, 白云波, 等. 蒙乃尔金属粉末与钢板复合轧制技术研究 [J]. 鞍钢技术, 2019, (2): 24-28.
TIAN Yuting, GAO Nan, BAI Yunbo, et al. Preparation and structural characteristics of porous Monel alloy [J]. Anshan Iron and Steel Technology, 2019, (2): 24-28.
- [10] 郭超群, 汪天尧, 袁天祥, 等. 多孔蒙乃尔合金的制备及其结构特性 [J]. 稀有金属材料与工程, 2020, 49 (8): 2630-2635.
GUO Chaoqun, WANG Tianyao, YUAN Tianxiang, et al. Preparation and structural characteristics of porous Monel alloy [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2020, 49 (8): 2630-2635.
- [11] 白云波, 李红, 高楠, 等. 蒙乃尔 400 粉末轧制复合板工艺技术研究 [C] // 第十一届中国钢铁年会. 北京, 2017: 66-70.
BAI Yunbo, LI Hong, GAO Nan, et al. Research on Monel 400 powder rolled composite plate technology [C] // The 11th China Iron and Steel Annual Conference. Beijing, 2017: 66-70.
- [12] VAJPAI S K, DUBE R K, KANWAT A, et al. Synthesis and characterisation of Cu-W nanocomposite strips [J]. Materials Science and Technology, 2013, 29 (3): 285-293.
- [13] VENTRELLA V A, BERRETTA J R, ROSSI W. Micro welding of Ni-based alloy Monel 400 thin foil by pulsed Nd: YAG laser [J]. Physics Procedia, 2011, 12: 347-354.
- [14] 周海兰. 多孔表层 Ti2448 种植体在颌骨内应力分布的研究 [D]. 遵义: 遵义医科大学, 2022.
ZHOU Hailan. Study on stress distribution of porous surface Ti2448 implant in jaw [D]. Zunyi: Zunyi Medical University, 2022.
- [15] 刘辉. 非均质材料动力及非线性分析的多尺度有限元方法研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
LIU Hui. Research on multi-scale finite element method for dynamic and nonlinear analysis of heterogeneous materials [D].

- Dalian; Dalian University of Technology, 2014.
- [16] 牛文娟. 多孔钛及其合金的制备及性能研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
- NIU Wenjuan. Study on preparation and properties of porous titanium and its alloys [D]. Chongqing: Chongqing University, 2011.
- [17] 林莉, 张耀月, 肖新科. 受火后 6060-T6 铝合金材料性能研究及本构模型标定 [J]. 振动与冲击, 2023, 42 (16): 56-65.
- LIN Li, ZHANG Yaoyue, XIAO Xinke. Study on properties and constitutive model calibration of 6060-T6 aluminum alloy after fire [J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42 (16): 56-65.
- [18] MINJIAO Z, HONGFA Y, JINHUA Z, et al. Finite element analysis of stress-strain relationship and failure pattern of concrete under uniaxial compression considering freeze-thaw action [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2023. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2023.109520.
- [19] 温飞娟, 温奇飞, 龙樟, 等. TC17 钛合金热变形行为及本构模型 [J]. 机械工程材料, 2023, 47 (8): 86-92, 99.
- WEN Feijuan, WEN Qifei, LONG Zhang, et al. Thermal deformation behavior and constitutive model of TC17 titanium alloy [J]. Journal of Mechanical Engineering Materials, 2023, 47 (8): 86-92, 99.