

粉末冶金Fe-2Cu-0.5C钢高温拉伸变形行为

简杰, 郭彪, 李强, 李肖, 宋久鹏, 张羽, 敖进清, 黄勇

Elevated temperature tensile deformation behavior of powder metallurgy Fe-2Cu-0.5C steels

JIAN Jie, GUO Biao, LI Qiang, LI Xiao, SONG Jiupeng, ZHANG Yu, AO Jinqing, and HUANG Yong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.19591/j.cnki.cn11-1974/tf.2021080001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

WC颗粒增强对Fe-1.5Cu-1.8Ni-0.5Mo-1C粉末冶金复合材料的影响

Effect of WC particle reinforcement on Fe-1.5Cu-1.8Ni-0.5Mo-1C P/M composite
粉末冶金技术. 2019, 37(1): 40-45

冷模压制Ti-6Al-4V粉末的修正Drucker-Prager Cap本构模型

Modified Drucker-Prager Cap model of Ti-6Al-4V powders for cold die compaction
粉末冶金技术. 2018, 36(4): 261-269

陶瓷颗粒增强粉末冶金Fe-2Cu-0.6C复合材料的微观结构和力学性能

Microstructure and mechanical properties of ceramic particle-reinforced powder metallurgy Fe-2Cu-0.6C composites
粉末冶金技术. 2019, 37(1): 11-17, 22

数值仿真技术在粉末冶金零件制造中的应用及研究进展

Development and application of numerical simulation in powder metallurgy manufacturing
粉末冶金技术. 2017, 35(1): 57-67

时效处理对粉末高温合金惯性摩擦焊接头室温拉伸行为的影响

Effect of aging treatment on the behavior of room temperature tensile of P/M superalloys used for inertia friction welding joints
粉末冶金技术. 2021, 39(1): 41-48

基于内聚力模型的金属粉末压坯拉伸裂纹扩展模拟

Simulation of tensile crack propagation of metal powder green compact based on cohesive zone model
粉末冶金技术. 2017, 35(2): 94-97,102



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

粉末冶金 Fe-2Cu-0.5C 钢高温拉伸变形行为

简杰¹⁾, 郭彪^{1)✉}, 李强¹⁾, 李肖¹⁾, 宋久鹏¹⁾, 张羽¹⁾,
敖进清¹⁾, 黄勇²⁾

1) 西华大学材料科学与工程学院, 成都 610039 2) 吉凯恩(霸州)金属粉末有限公司, 廊坊 065701

✉通信作者, E-mail: biaoguo_mse@126.com

摘要 使用 Gleeble-3500 型热模拟机对粉末冶金 Fe-2Cu-0.5C 钢在变形温度 850~1000 °C、应变速率 0.1~10.0 s⁻¹ 下进行高温拉伸测试, 定量分析变形温度、应变速率对粉末冶金钢高温拉伸变形行为的影响。通过应力应变曲线计算了该粉末冶金钢高温拉伸过程的断裂功, 建立了断裂功与变形温度、应变速率的数学模型。基于 Hensel-Spittel 模型和 BP 神经网络模型建立了该粉末冶金钢的本构模型, 用于表征其高温拉伸流变行为, 并将两种模型的预测结果进行比较。结果表明: 所建立的断裂功模型能够描述该粉末冶金钢在不同变形温度和应变速率下的抗断裂能力。Hensel-Spittel 本构模型的预测值与实验值的平均绝对相对误差为 3.16%, 决定系数为 0.9743, 而 BP 神经网络模型的预测值与实验值的平均绝对相对误差为 0.17%, 决定系数为 0.9999, 说明 BP 神经网络模型的预测能力更强, 能更好地表征粉末冶金 Fe-2Cu-0.5C 钢的高温拉伸流变行为。

关键词 粉末冶金钢; 高温拉伸; 断裂功; 本构模型; Hensel-Spittel 模型; BP 神经网络

分类号 TF124.8

Elevated temperature tensile deformation behavior of powder metallurgy Fe-2Cu-0.5C steels

JIAN Jie¹⁾, GUO Biao^{1)✉}, LI Qiang¹⁾, LI Xiao¹⁾, SONG Jiupeng¹⁾, ZHANG Yu¹⁾, AO Jinqing¹⁾, HUANG Yong²⁾

1) School of Materials Science and Engineering, Xihua University, Chengdu 610039, China

2) GKN (Bazhou) Metal Powder Co., Ltd., Bazhou 065701, China

✉Corresponding author, E-mail: biaoguo_mse@126.com

ABSTRACT The elevated temperature tensile tests of the powder metallurgy (P/M) Fe-2Cu-0.5C steels at the deformation temperatures of 850~1000 °C and strain rates of 0.1~10.0 s⁻¹ were carried out by Gleeble-3500 thermal simulator. The effects of deformation temperature and strain rate on the elevated temperature tensile deformation behaviors of the P/M steels were quantitatively analyzed. The fracture work of the P/M steels during the elevated temperature tensile was calculated using the stress-strain curves. The mathematical model characterizing the relationship of fracture work, deformation temperature, and strain rate was established. The Hensel-Spittel model and BP neural network model were used to establish the constitutive equation of the P/M steels to characterize the flow behaviors during the elevated temperature tensile. The predicted results of the two models were compared. The results show that the fracture work model can describe the capacity of the P/M steels to resist fracture at different deformation temperatures and strain rates. The average absolute relative error between the predicted values of Hensel-Spittel constitutive model and the experimental values

收稿日期: 2022-02-12

基金项目: 四川省科技厅重点研发计划项目 (2022YFG0346)

DOI: [10.19591/j.cnki.cn11-1974/tf.2021080001](https://doi.org/10.19591/j.cnki.cn11-1974/tf.2021080001); <http://pmt.ustb.edu.cn>

is 3.16%, and the coefficient of determination is 0.9743. While the average absolute relative error and the coefficient of determination between the predicted values of BP neural network model and the experimental values are 0.17% and 0.9999, respectively, indicating that the BP neural network model has the stronger predictive capacity and can characterize the elevated temperature tensile deformation behaviors of the P/M Fe-2Cu-0.5C steels better.

KEY WORDS powder metallurgy steels; elevated temperature tensile; fracture work; constitutive equation; Hensel-Spittel model; BP neural network

粉末冶金工艺 (powder metallurgy, PM) 是一种高效、绿色、环保的机械零件制造近净成形技术^[1], 被广泛应用于汽车、飞机、轨道交通等制造领域^[2-4]。然而, 经传统压制、烧结的粉末冶金制品具有一定的孔隙, 不能达到高强度零件的使用要求。烧结后的热加工可以提高粉末冶金制品的相对密度, 从而改善其力学性能^[5-6]。因此, 粉末冶金材料在高温塑性加工过程中的热变形行为受到了广泛关注。

在研究金属材料热变形行为时, 其抗断裂能力与热变形流动规律往往是关注的重点。金属材料的抗断裂能力可以通过断裂功来评估。采用拉应力-应变积分法计算的断裂功综合反映金属材料在塑性变形过程中的损伤容限。Rodriguez 等^[7]研究了应变速率和温度对 AZ31B 镁合金拉伸断裂特征的影响并计算了其断裂功, 结果发现, 在 150 °C 附近和所有应变速率下, 试样的断裂功均有明显的最大值, 这与应变速率和温度对损伤积累的影响有关。Guo 等^[8]通过单轴拉伸试验, 研究了温度和应变速率对 Al-Zn-Mg-Cu 合金断裂行为的影响, 发现应变率敏感性系数在 200 °C 显著上升, 断裂功在室温和 100 °C 时随应变率的增加而急剧波动。

本构模型作为研究材料热变形规律的一种重要方法, 能够表征材料热加工时的流变特征, 预测材料塑性变形过程的流变应力, 为有限元模拟提供重要的理论基础。构建本构模型的常用方法主要有唯象型和人工神经网络 (artificial neural network, ANN)。目前常用的唯象本构模型包括 Arrhenius 型、Johnson-Cook 型与 Hensel-Spittel 型^[9-11], 其中 Arrhenius 本构模型与 Johnson-Cook 本构模型对于研究粉末冶金材料热变形行为有着广泛的应用。Meng 等^[12]对粉末冶金制得的高温钼板进行单轴热拉伸测试, 建立了应变五阶多项式的 Arrhenius 本构模型, 得到了流变应力的预测值与实验结果吻合较好。Zhu 等^[13]采用 Arrhenius 本构模型建立了粉末冶金 TiB₂/7050A 的高温压缩流变模型, 计算了该合金热变形

激活能为 143.11 kJ/mol。Zygula 等^[14]研究了粉末冶金 Ti-10V-2Fe-3Al 亚稳态合金在大范围变形温度和应变速率下的压缩过程, 建立的 Arrhenius 本构模型较好地预测了流变应力与变形温度、应变速率的关系。Qu 等^[15]对粉末冶金 V-5Cr-5Ti 棒材进行等温压缩试验, 建立了应变补偿的 Arrhenius 本构模型与修正的 Johnson-Cook 本构模型, 对比发现, 应变补偿的 Arrhenius 本构模型能在整个变形温度范围内跟踪实验值。Wang 等^[16]对粉末冶金纯钨进行热压缩试验, 建立了基于 Arrhenius 模型、Johnson-Cook 模型、修正 Johnson-Cook 模型等多个本构模型预测纯钨在高温下的流变应力, 通过相关系数与平均绝对相对误差评价了各模型的预测精度。但利用 Hensel-Spittel 本构模型研究粉末冶金材料热变形行为的报道较少。

本文对粉末冶金 Fe-2Cu-0.5C 钢进行高温拉伸测试, 获得其在 850~1000 °C 变形温度、0.1、1.0、10.0 s⁻¹ 应变速率下的应力应变曲线, 分析其高温流变行为, 计算其断裂功, 建立断裂功与变形温度、应变速率的数学模型, 并基于 Hensel-Spittel 模型和 BP 神经网络建立其高温流变本构模型, 并对两种模型的预测精度进行评价, 以获得更准确的应力、应变速率、变形温度以及应变之间的关系。

1 实验材料及方法

将铁粉、铜粉、石墨粉混合, 并在数控液压机上压制, 得到生坯; 将生坯置于 MXQ1700-40 型氮气气氛炉中, 在 1150 °C 保温 1 h 烧结, 获得 Fe-2Cu-0.5C (质量分数, %) 粉末冶金钢烧结坯。利用阿基米德排水法测得烧结坯密度为 7.2 g/cm³。经机加工将烧结坯制成哑铃型高温拉伸试样, 在 Gleeble-3500 型热模拟机上以不同温度 (850、900、950、1000 °C) 和应变速率 (0.1、1.0、10.0 s⁻¹) 进行高温拉伸测试, 直到试样被拉断。对高温拉伸测试数据进行有限元计算辅助修正, 详细修正过程见文献 [17], 得到修正后的真应力-应变曲线和实

实际应变速率, 即 0.13、1.05、10.10 s^{-1} 。

2 结果与讨论

2.1 应力-应变曲线分析

图 1 为不同应变速率下粉末冶金 Fe-2Cu-0.5C 钢的真应力-真应变关系曲线。在热成形过程中, 金属的高温塑性流变行为取决于加工硬化与动态软化的共同作用^[18]。如图所示, 试样在同一变形温度和应变速率下, 应力值随应变逐渐增加。这是因为在热变形早期, 位错密度的迅速增加以及动态软化机制的受限, 加工硬化作用占据主导地位。随着试样变形量的增大, 试样的软化机制不断增强, 在硬化与软化的相互作用下, 曲线逐渐趋于平稳。在同一应变速率下, 试样从 850 $^{\circ}C$ 到 1000 $^{\circ}C$ 的最大应力值依次减小。这是因为金属原子的热活化程度随

着温度的升高而增强, 导致位错、空位和晶界的迁移率增强, 位错滑移和爬升也得到促进, 变形温度升高进一步增强了软化机制, 削弱了加工硬化机制, 降低了流变应力^[19]。在同一温度下, 随着应变速率的增加, 试样的应力不断增大。这是因为较高的应变速率会加快位错的增殖速度, 引起位错强化, 促使加工硬化作用增强, 应力值增加^[20]。在不同温度下, 试样的断裂应变也有差异。断裂应变是决定材料抗断裂能力的重要力学参数, 反应了金属材料的可塑性。在图 1 中, 断裂应变随应变速率的变化不大, 但随着温度的升高, 断裂应变呈现先增大后减小的趋势。这是由于变形温度的升高导致试样的动态软化作用增强, 塑性增强, 从而提高了断裂应变。但是, 一旦变形温度超过一定限度, 材料的强度降低, 使得材料容易断裂, 反而降低断裂应变。

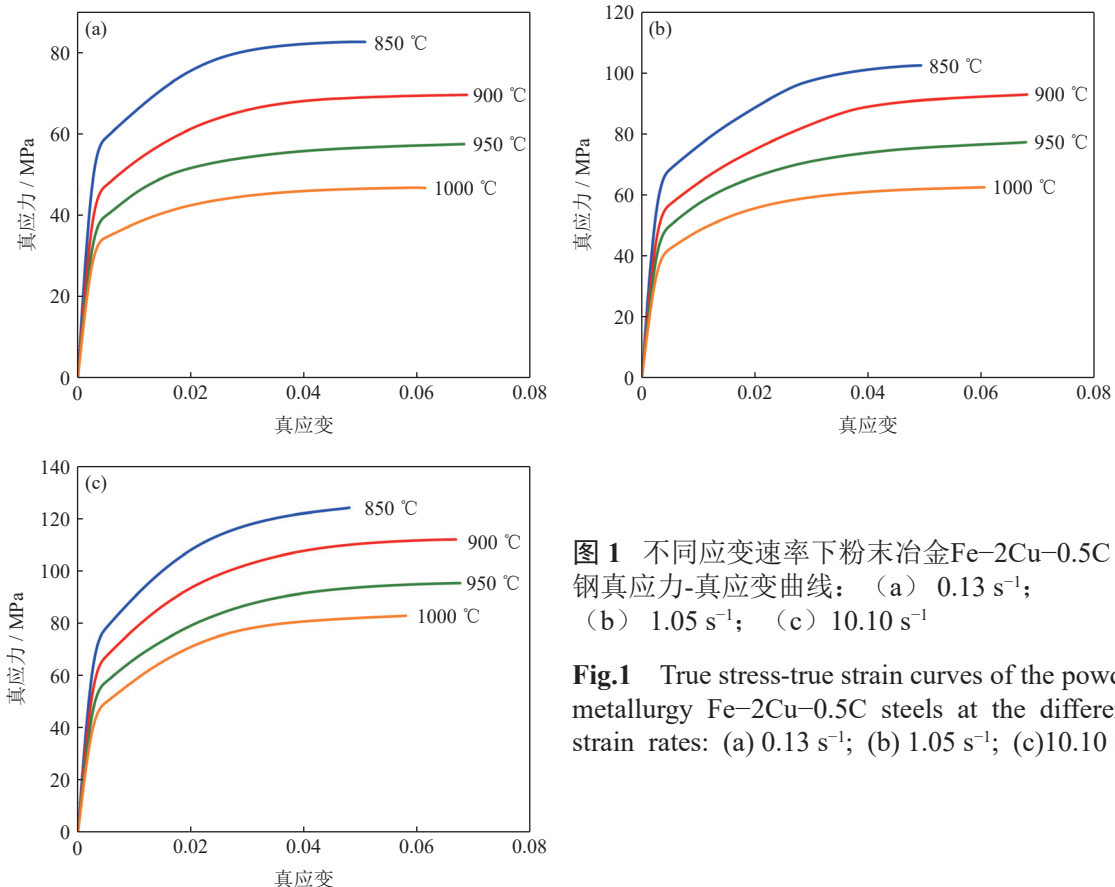


图 1 不同应变速率下粉末冶金 Fe-2Cu-0.5C 钢真应力-真应变曲线: (a) 0.13 s^{-1} ; (b) 1.05 s^{-1} ; (c) 10.10 s^{-1}

Fig.1 True stress-true strain curves of the powder metallurgy Fe-2Cu-0.5C steels at the different strain rates: (a) 0.13 s^{-1} ; (b) 1.05 s^{-1} ; (c) 10.10 s^{-1}

2.2 断裂功

断裂功是指材料在塑性变形过程中因裂纹的扩展而发生断裂时, 单位体积吸收的能量。断裂功比断裂应变更全面地反应了金属材料在塑性变形过程中的抗损伤断裂能力, 可通过真应力-真应变曲线下方的面积积分来计算^[21]。对图 1 中各曲线积分, 结果如图 2 所示。在同一应变速率下, 随着温度的

升高, 断裂功先增大后减小, 在 900 $^{\circ}C$ 时达到峰值, 此时试样的抗断裂性能最好。在同一温度下, 随着应变速率的增加, 断裂功不断增大, 这是因为较高应变速率引起的加工硬化对试样的抗断裂能力有积极作用。因此, 变形温度与应变速率对于粉末冶金钢的抗损伤断裂能力的影响不尽相同, 在所测试的应变速率和温度下, 试样在变形温度为 900 $^{\circ}C$

和应变速率为 10.10 s^{-1} 条件下表现出最好的抗断裂能力。

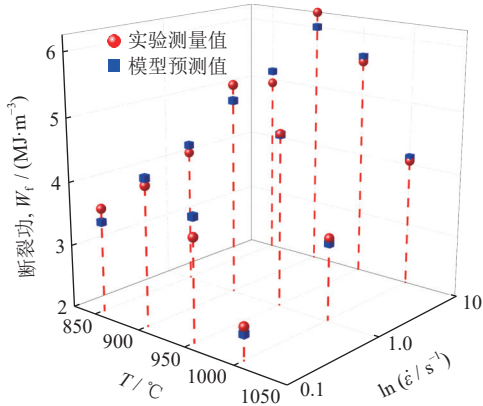


图 2 断裂功模型预测值与实验测算值

Fig.2 Fracture work values of the model prediction and the experimental calculation

基于上述分析，本文提出以下断裂功模型来描述粉末冶金 Fe-2Cu-0.5C 钢断裂功与变形温度、应变速率之间的关系，如式 (1) 所示。

$$W_f = a + bT + c \ln \dot{\epsilon} + d(\ln T)^2 \quad (1)$$

式中： W_f 为断裂功， MJ/m^3 ； a 、 b 、 c 、 d 为待求参数； T 为变形温度， $^{\circ}\text{C}$ ； $\dot{\epsilon}$ 为应变速率， s^{-1} 。将不同温度和应变速率下共 12 组数据代入式 (1) 进行拟合求解得到式 (2)。

$$W_f = -1077.6 - 0.49657T + 0.40316 \ln \dot{\epsilon} + 33.0571(\ln T)^2 \quad (2)$$

数学模型预测结果如图 2 所示。从图中可以看出，模型预测值与实验测算的结果比较吻合，该模型可以表征粉末冶金 Fe-2Cu-0.5C 钢在本测试条件下的断裂功与变形温度、应变速率之间的关系。因此，将所有温度和应变速率代入模型中计算，得到整个热变形条件下的断裂功预测结果，如图 3 所示。

3 本构模型的建立

3.1 Hensel-Spittel 本构模型

在同一应力水平下，变形温度与应变速率是导致粉末冶金 Fe-2Cu-0.5C 钢流变应力-应变曲线差异的重要因素。金属的热变形行为取决于热加工过程中硬化与软化机制的相互竞争，采用 Hensel 和 Spittel 提出的本构模型可以描述金属材料的流变应力与温度、应变速率以及应变之间的关系^[22]。Hensel-Spittel 模型如式 (3) 所示。

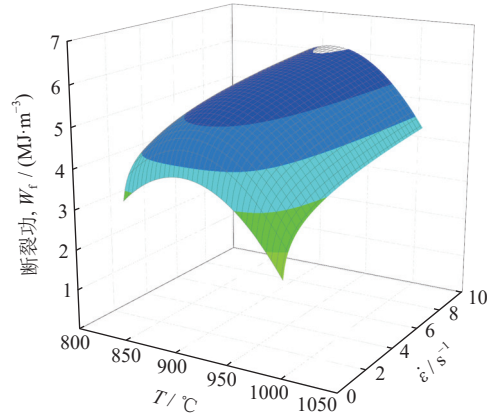


图 3 断裂功与变形温度及应变速率之间的关系

Fig.3 Relationships of the fracture work, deformation temperature, and strain rate

$$\sigma = A \exp(m_1 T) \epsilon^{m_2} \dot{\epsilon}^{m_3} \exp\left(\frac{m_4}{\epsilon}\right) (1 + \epsilon)^{m_5 T} \exp(m_6 \epsilon) \dot{\epsilon}^{m_7 T} T^{m_8} \quad (3)$$

式中： σ 为流变应力， ϵ 为应变， $\dot{\epsilon}$ 为应变速率， T 为热变形温度， A 、 m_1 、 m_2 、 m_3 、 m_4 、 m_5 、 m_6 、 m_7 、 m_8 均为材料常数，其中 m_1 、 m_8 分别为温度相关系数与指数， m_2 、 m_6 分别为应变强化指数与相关系数， m_3 为应变速率相关指数， m_4 为应变弱化系数， m_5 为应变指数与温度相关系数， m_7 为应变速率相关指数与温度相关系数^[11]。为便于求解参数，将式 (3) 两边同时取对数得到式 (4)。

$$\ln \sigma = \ln A + m_1 T + m_2 \ln \epsilon + m_3 \ln \dot{\epsilon} + \frac{m_4}{\epsilon} + m_5 T \ln(\epsilon + 1) + m_6 \epsilon + m_7 T \ln \dot{\epsilon} + m_8 \ln T \quad (4)$$

为求解材料常数，在同一变形温度和应变下，将固定值 $\ln A + m_1 T + m_2 \ln \epsilon + m_4/\epsilon + m_5 \ln(\epsilon + 1) + m_6 \epsilon + m_8 \ln T$ 设为 H_1 ，故式 (4) 可表示为式 (5)。

$$\ln \sigma = H_1 + (m_3 + m_7 T) \ln \dot{\epsilon} \quad (5)$$

将 4 个温度和 3 个应变速率下应变为 0.0025~0.0700、间隔 0.0025 的应力-应变数据组代入式 (5)，绘制每个温度下 $\ln \sigma - \ln \dot{\epsilon}$ 散点图，并线性拟合，结果如图 4 所示。由图可知， $\ln \sigma - \ln \dot{\epsilon}$ 呈线性关系，直线斜率为不同应变下 $m_3 + m_7 T$ 的值。在不同应变下，绘制 $m_3 + m_7 T$ 与变形温度 T 的关系图，结果如图 5 所示，分别计算拟合直线的斜率与截距的平均值得到 m_3 与 m_7 ， $m_3 = -0.10044$ ， $m_7 = 0.00022$ 。

当应变速率、应变不变时，将常数 $\ln A + m_2 \ln \epsilon + m_3 \ln \dot{\epsilon} + m_4/\epsilon + m_6 \epsilon$ 设为 H_2 ，故式 (4) 可简化为式 (6)。

$$\ln \sigma = [m_1 + m_5 \ln(\epsilon + 1) + m_7 \ln \dot{\epsilon}] T + m_8 \ln T + H_2 \quad (6)$$

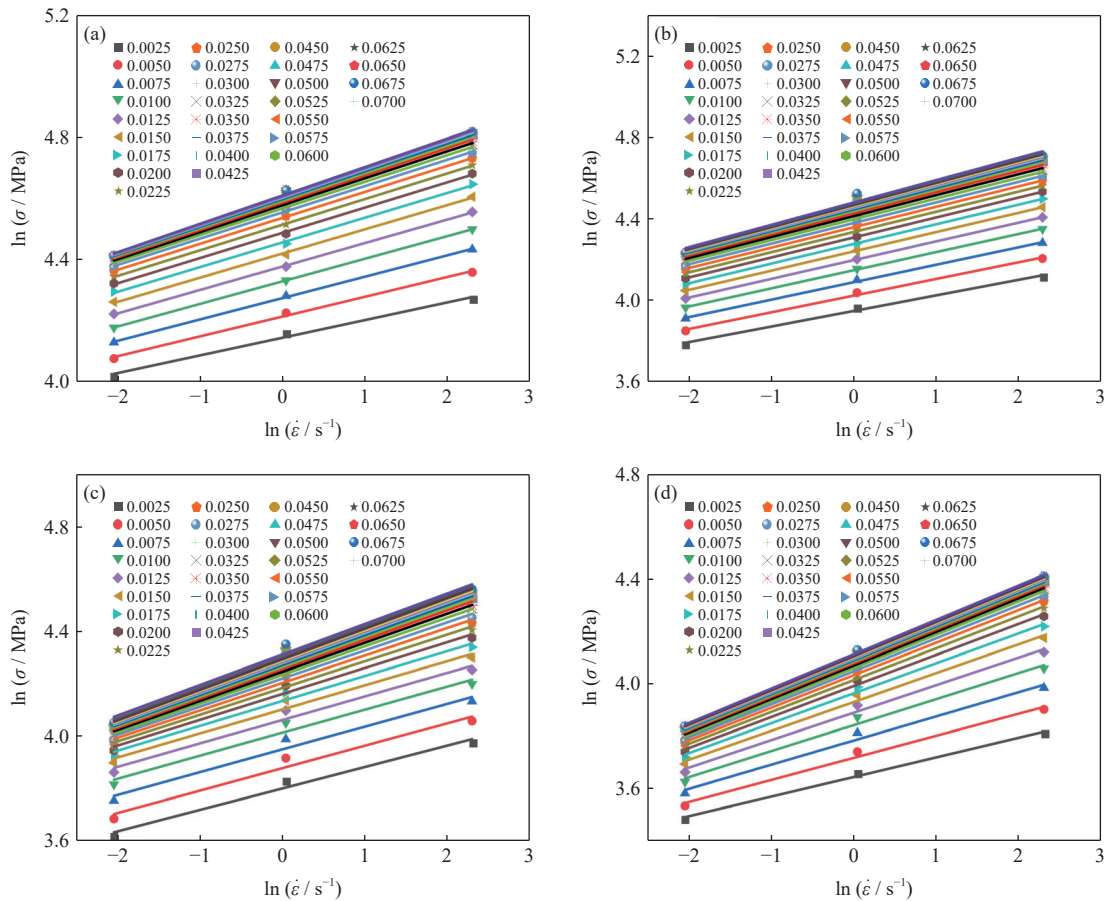


图 4 不同变形温度下 $\ln\sigma-\ln\dot{\epsilon}$ 关系曲线: (a) 850 °C; (b) 900 °C; (c) 950 °C; (d) 1000 °C

Fig.4 Relationship of $\ln\sigma-\ln\dot{\epsilon}$ at the different deformation temperatures: (a) 850 °C; (b) 900 °C; (c) 950 °C; (d) 1000 °C

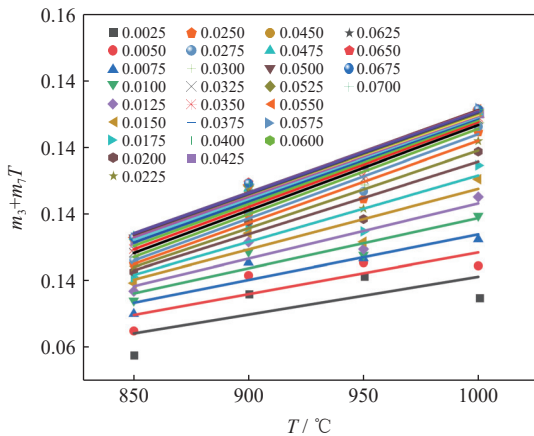


图 5 不同应变下 m_3+m_7T 与温度关系曲线

Fig.5 Relationship between m_3+m_7T and temperature under the different strains

图 6 为不同应变速率下 $\ln\sigma-T$ 关系曲线。由图可知, $\ln\sigma-T$ 呈线性关系, $m_8\ln T+H_2$ 为常数, 此时, m_8 的值可视为 0, 令 $S=m_1+m_5\ln(\epsilon+1)+m_7\ln\dot{\epsilon}$ 。不同应变速率下 S 与 $\ln(\epsilon+1)$ 的关系曲线如图 7 所示。计算拟合直线的斜率的平均值得到 $m_5=-0.00173$, 由截距算得 $m_1=-0.00321$ 。

当应变速率与变形温度一定时, 将常数 $\ln A+m_1T+m_3\ln\dot{\epsilon}+m_7T\ln\dot{\epsilon}$ 设为 H_3 , 故式 (4) 可简化为式 (7)。

$$\ln\sigma = m_2\ln\epsilon + m_4/\epsilon + m_5T\ln(\epsilon+1) + m_6\epsilon + H_3 \quad (7)$$

根据式 (7), 采用 MATLAB 中的 fittype 和 fit 命令进行拟合, 得到不同变形温度和应变速率下 $\ln\sigma$ 与 ϵ 关系, 如图 8 所示。通过拟合得到不同温度与应变速率下的拟合系数, 对各系数计算平均值得到 $m_2=0.36241$, $m_4=0.00086$, $m_6=-5.6944$ 。

将实验数据和计算得到的 $m_1\sim m_8$ 代入式 (3), 即可求得在每个变形条件下的 A 值, 对所有 A 取平均值得 $A=6323.0$, 至此, Hensel-Spittel 本构模型的材料参数全部求解完成。得到粉末冶金 Fe-2Cu-0.5C 钢高温拉伸流变过程的 Hensel-Spittel 本构模型, 如式 (8) 所示。

$$\sigma = 6323.0 \exp(-0.00321T) \epsilon^{0.36241} \dot{\epsilon}^{-0.10044} \exp\left(\frac{0.00086}{\epsilon}\right) (1+\epsilon)^{-0.00173T} \exp(-5.6944\epsilon) \dot{\epsilon}^{0.00022T} \quad (8)$$

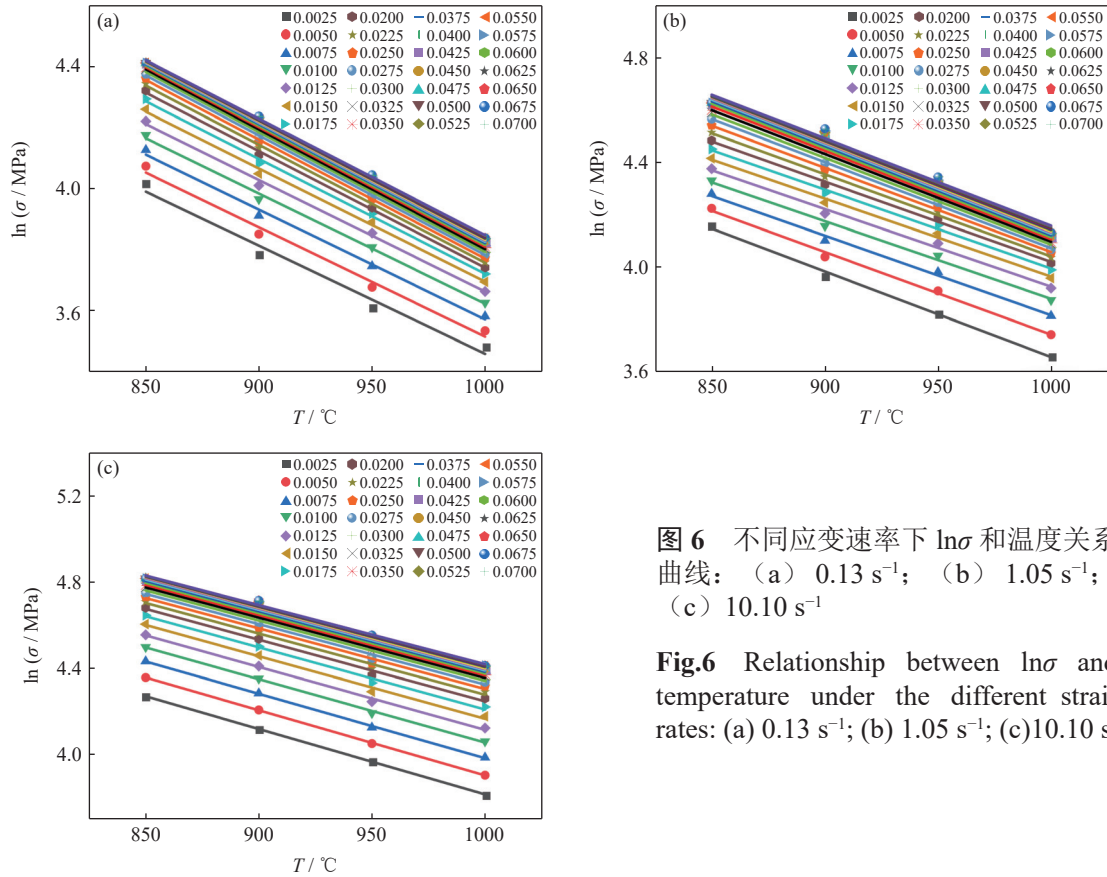


图 6 不同应变速率下 $\ln\sigma$ 和温度关系曲线：(a) 0.13 s^{-1} ；(b) 1.05 s^{-1} ；(c) 10.10 s^{-1}

Fig.6 Relationship between $\ln\sigma$ and temperature under the different strain rates: (a) 0.13 s^{-1} ; (b) 1.05 s^{-1} ; (c) 10.10 s^{-1}

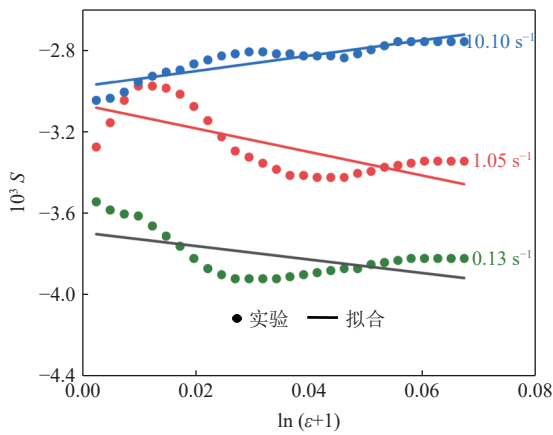


图 7 不同应变速率下 S 与 $\ln(\epsilon+1)$ 关系曲线

Fig.7 Relationship between S and $\ln(\epsilon+1)$ at the different strain rates

3.2 BP 神经网络模型

人工神经网络因强大的非线性数据处理能力可被用于材料本构模型的建立^[23-24]。采用 BP 神经网络来建立粉末冶金 Fe-2Cu-0.5C 钢的高温拉伸流变应力预测模型。BP 神经网络结构通常由输入层、隐含层和输出层组成，输入层与输出层通常各为 1 层，隐含层数量根据实际训练误差进行调整，本文的隐含层数量为 1。将温度、应变速率与应变三个参数作为 BP 神经网络的输入，应力值作为输

出。隐含层节点数 (p) 由经验公式 (式 (9)) 确定^[25]。

$$p = \sqrt{m+n} + l \quad (9)$$

式中： m 为输入变量个数， n 为输出变量个数， l 为 0~10 常数。不断调整 p 的大小直至网络误差达到可接受的范围。经调试，本文隐含层节点数选择 12。输入层与隐含层传递函数采用 `tansig`，隐含层与输出层采用 `purelin` 连接，训练函数使用 `trainlm`，所建立的神经网络结构如图 9 所示。

在训练网络前，为避免数据间量纲的差异，需要对数据进行归一化处理，采用式 (10) 将所有数据映射至 $[-1, 1]$ 区间。

$$X' = 2 \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} - 1 \quad (10)$$

式中： X 为包含温度、应变速率、应变 3 个参数的矩阵向量， X_{\max} 、 X_{\min} 分别为 X 最大值与最小值， X' 为归一化后的值。从粉末冶金钢高温拉伸流变应力-应变曲线的 293 组数据中随机选取 80% 的数据作为训练集，剩下作为测试集，迭代次数设为 500 次，均方误差为 10^{-5} ，收敛过程如图 10 所示。由图可知，BP 神经网络迭代 260 次后达到收敛条件。

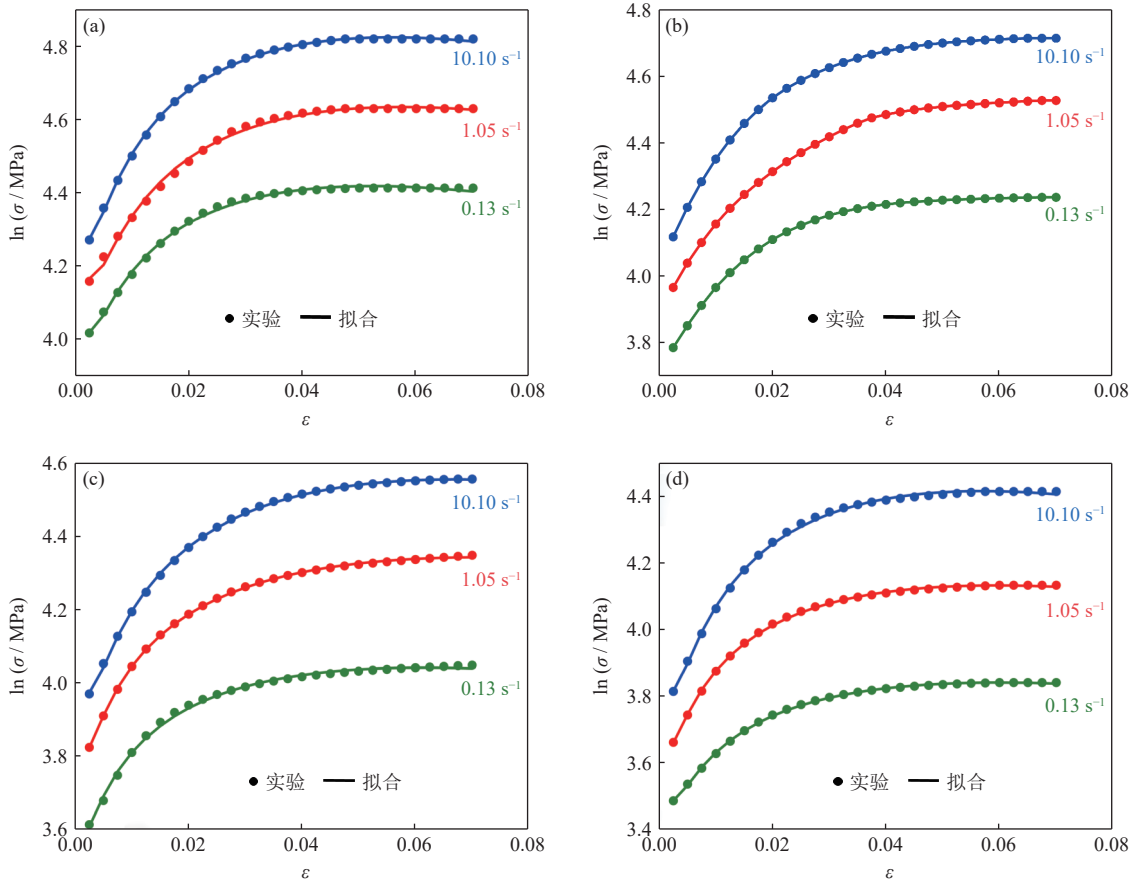


图 8 不同变形温度下 $\ln\sigma$ 与 ε 关系: (a) 850 °C; (b) 900 °C; (c) 950 °C; (d) 1000 °C

Fig.8 Relationship of $\ln\sigma$ and ε at the different deformation temperatures: (a) 850 °C; (b) 900 °C; (c) 950 °C; (d) 1000 °C

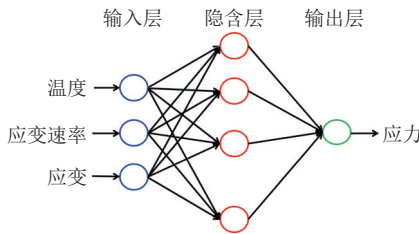


图 9 BP 神经网络结构图

Fig.9 Structure diagram of the BP neural network

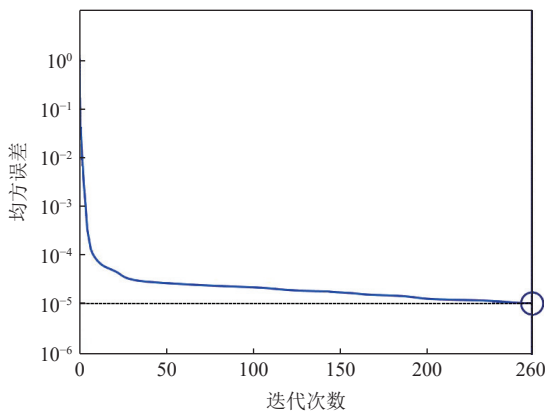


图 10 BP 神经网络收敛过程

Fig.10 Convergence process of the neural BP network

3.3 两种模型对比

Hensel-Spittel 型本构模型和 BP 神经网络模型预测的结果与实验测试结果对比见图 11。由图可知, 基于 BP 神经网络模型的应力预测值可以在整个变形温度和应变速率范围内跟踪实验值。在 900 °C 和 950 °C、应变速率为 1.05 s⁻¹、10.10 s⁻¹ 条件下, 实验值与 Hensel-Spittel 本构模型的预测值有显著的偏差。

通过决定系数 (R^2) 与平均绝对相对误差 ($AARE$) 可进一步比较两种模型的预测精度^[26]。其中 R^2 表示拟合优度, 是统计分析中使用的一种度量, 可以评估模型预测值与实验值的相关程度, 可通过式 (11) 计算; $AARE$ 是一个无偏统计量, 通过相对误差的逐项比较来计算 (式 (12)), $AARE$ 常用来判断模型预测的准确性。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{j=1}^n (E_j - P_j)^2}{\sum_{j=1}^n (E_j - \bar{E})^2} \quad (11)$$

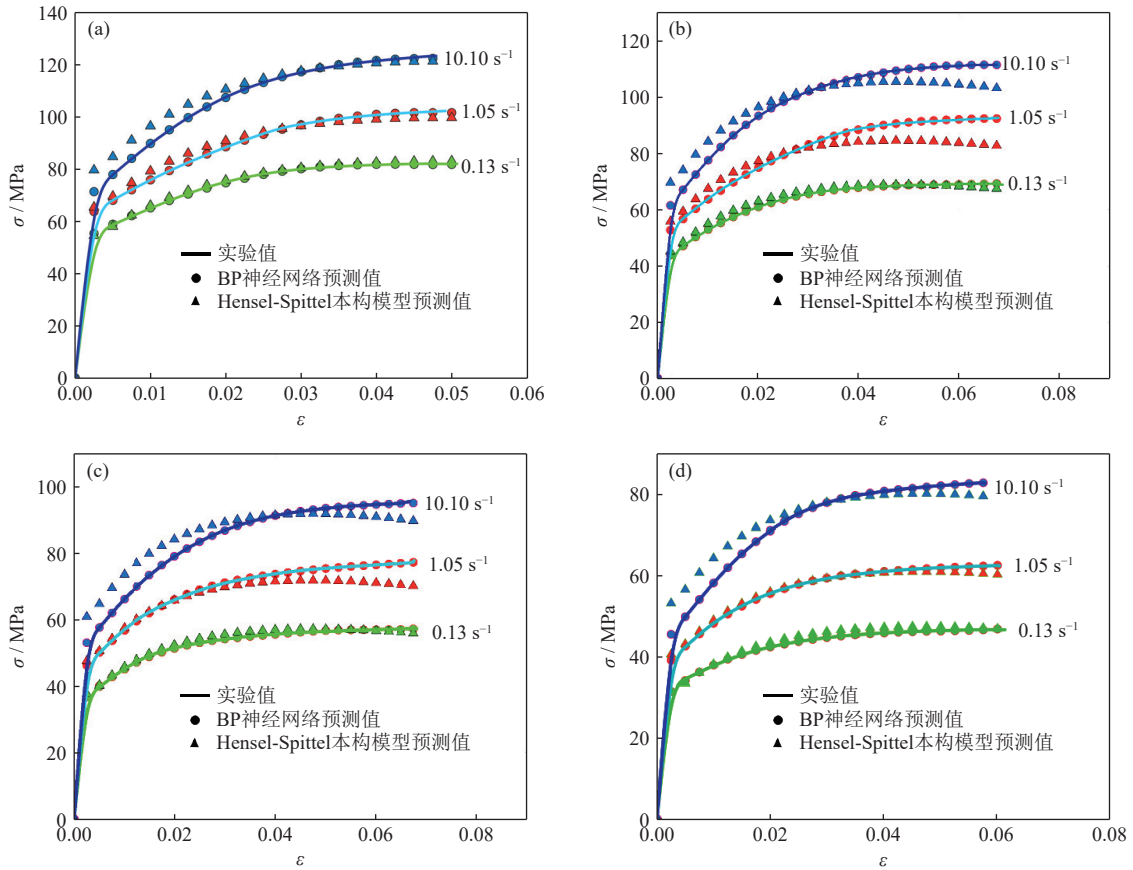


图 11 不同温度下两种模型的应力预测值与实验值：(a) 850 °C；(b) 900 °C；(c) 950 °C；(d) 1000 °C

Fig.11 Experimental stress and the predicted stress by Hensel-Spittel and BP modes at the different temperatures: (a) 850 °C; (b) 900 °C; (c) 950 °C; (d) 1000 °C

式中： E_j 为实验数据， P_j 为模型预测值， \bar{E} 为 E_j 的平均值， n 为计算数据总量。

$$AARE = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^{n_j} \frac{|E_j - P_j|}{E_j} \times 100\% \quad (12)$$

式中， E_j 为实验数据， P_j 为预测值， n 为数据总量。对两种模型的预测结果进行统计分析，结果如

图 12 所示。Hensel-Spittel 本构模型决定系数 R^2 为 0.9743，平均绝对相对误差 $AARE$ 为 3.16%，BP 神经网络模型的决定系数 R^2 为 0.9999，平均绝对相对误差 $AARE$ 为 0.17%。由此可知，Hensel-Spittel 本构模型对流变应力的可预测性相对偏低，这是由于材料在不同温度和应变速率下的热变形行为是非线性的，BP 神经网络因适合处理复杂的非线性关

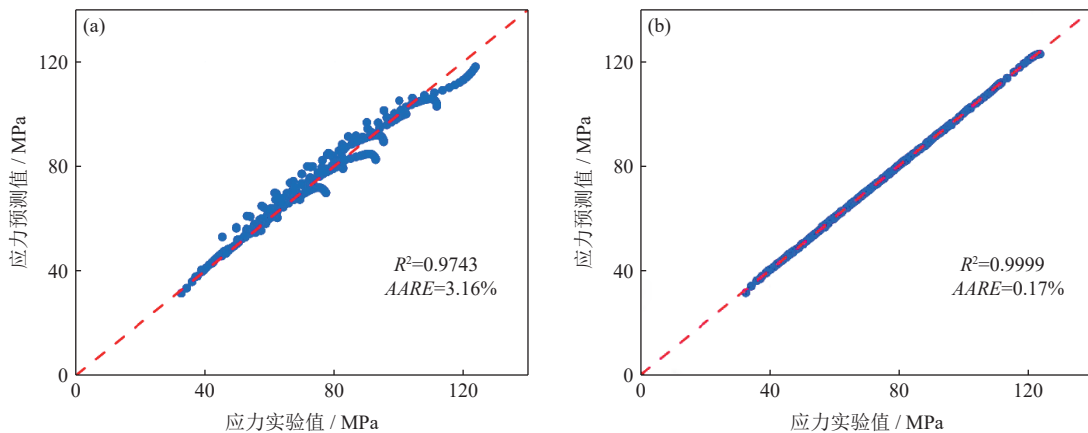


图 12 应力实验值与应力预测值线性相关曲线：(a) Hensel-Spittel 本构模型；(b) BP 神经网络模型

Fig.12 Correlation curves of the experimental and predicted stress: (a) Hensel-Spittel constitution model; (b) BP neural network model

系, 在本文中表现出更好的预测性能。

4 结论

(1) 计算了粉末冶金 Fe-2Cu-0.5C 钢的断裂功, 发现断裂功随变形温度升高呈先增大后减小趋势; 随应变速率增加不断增大, 在变形温度为 900 °C、应变速率为 10.10 s⁻¹ 附近, 材料具有最好的韧性; 建立的断裂功模型可以表征断裂功与变形温度、应变速率之间的关系。

(2) 建立了粉末冶金 Fe-2Cu-0.5C 钢的 Hensel-Spittel 本构模型, 除变形温度为 900、950 °C、应变速率为 1.05、10.10 s⁻¹ 外, 其它条件下与实验值吻合度较高。

(3) 使用 BP 神经网络构建了粉末冶金 Fe-2Cu-0.5C 钢的本构模型, 计算得到其预测值与实验值的绝对平均相对误差 AARE 为 0.17%, 决定系数 R² 为 0.9999, 结果优于 Hensel-Spittel 模型。

参考文献

- [1] Feng S C, Wang Y H, Ding R F. Application and prospect of powder metallurgy in steel enterprises. *Powder Metall Technol*, 2015, 33(4): 296
(冯士超, 王艳红, 丁瑞锋. 粉末冶金在钢铁企业的应用及发展前景. *粉末冶金技术*, 2015, 33(4): 296)
- [2] Tan Z Q, Zhang Q, Guo X Y, et al. New development of powder metallurgy in automotive industry. *J Cent South Univ*, 2020, 27(6): 1611
- [3] Vasanthakumar P, Sekar K, Venkatesh K. Recent developments in powder metallurgy based aluminium alloy composite for aerospace applications. *Mater Today*, 2019, 18(7): 5400
- [4] Shang F, Zhou H X, Qiao B, et al. Application of metal powder metallurgy technology in preparation of friction materials of the railway vehicles. *Adv Mater Res*, 2011, 1334(287-290): 2987
- [5] Bao C X, Cao Y, Yi J H, et al. Preparation processes of high density iron-based powder metallurgy parts. *Powder Metall Technol*, 2011, 2022, 40(5): 458
(包崇玺, 曹阳, 易健宏, 等. 高密度铁基粉末冶金零件制备技术. *粉末冶金技术*, 2022, 40(5): 458)
- [6] Guo B, Li Q, Wu H, et al. Influences of impact energy on the densification and mechanical properties of powder metallurgical Fe-C-Cu preforms during a powder-forged process. *J Mater Res Technol*, 2020, 9(6): 13914
- [7] Rodriguez A K, Ayoub G A, Mansoor B, et al. Effect of strain rate and temperature on fracture of magnesium alloy AZ31B. *Acta Mater*, 2016, 112: 194
- [8] Guo Y, Zhou M X, Sun X D, et al. Effects of temperature and strain rate on the fracture behaviors of an Al-Zn-Mg-Cu alloy. *Materials*, 2018, 11(7): 1233
- [9] He A, Xie G L, Zhang H L, et al. A modified Zerilli-Armstrong constitutive model to predict hot deformation behavior of 20CrMo alloy steel. *Mater Des*, 2014, 56: 122
- [10] Song B, Sanborn B. A modified Johnson-Cook model for dynamic response of metals with an explicit strain- and strain-rate-dependent adiabatic thermosoftening effect. *J Dyn Behav Mater*, 2019, 5(3): 212
- [11] Yin X Y, Luo J, Zhu J. Construction of high-temperature constitutive model of HAl61-4-3-1 alloy for synchronizer ring based on Hensel-Spittel mode. *J Chongqing Univ Technol Nat Sci*, 2021, 35(1): 111
(尹小燕, 骆静, 朱杰. 基于 Hensel-Spittel 模型的齿环用 HAl61-4-3-1 合金本构模型构建. *重庆理工大学学报(自然科学)*, 2021, 35(1): 111)
- [12] Meng B, Wan M, Wu X D, et al. Constitutive modeling for high-temperature tensile deformation behavior of pure molybdenum considering strain effects. *Int J Refract Met Hard Mater*, 2014, 45: 41
- [13] Zhu H F, Liu J, Wu Y, et al. Hot deformation behavior and workability of in situ TiB₂/7050Al composites fabricated by powder metallurgy. *Materials*, 2020, 13(23): 5319
- [14] Zygula K, Wojtaszek M, Śleboda T, et al. The analysis of hot deformation behavior of powder metallurgy Ti-10V-2Fe-3Al alloy using activation energy and Zener-Hollomon parameter. *Procedia Manuf*, 2020, 50: 546
- [15] Qu F S, Dong X F, Liu J Y, et al. The research on vacuum isothermal bloom for powder metallurgy V-5Cr-5Ti alloy guiding by the constitutive models and the error analysis. *Int J Refract Met Hard Mater*, 2018, 72: 349
- [16] Wang J, Zhao G Q, Chen L, et al. A comparative study of several constitutive models for powder metallurgy tungsten at elevated temperature. *Mater Des*, 2016, 90: 91
- [17] Li Q, Guo B, Wu H, et al. Flow stress and prediction on powder sintered steel Fe-2Cu-0.5C during high temperature tensile. *Forg Stamp Technol*, 2020, 45(8): 195
(李强, 郭彪, 吴辉, 等. Fe-2Cu-0.5C 粉末烧结钢高温拉伸流变应力及预测. *锻压技术*, 2020, 45(8): 195)
- [18] Wu H, Wen S P, Huang H, et al. Hot deformation behavior and constitutive equation of a new type Al-Zn-Mg-Er-Zr alloy during isothermal compression. *Mater Sci Eng A*, 2016, 651: 415
- [19] Wang H R, Wang W, Zhai R X, et al. Constitutive equations for describing the warm and hot deformation behavior of 20Cr2Ni4A alloy steel. *Metals*, 2020, 10(9): 1169
- [20] Qiao L, Deng Y, Liao M, et al. Modelling and prediction of thermal deformation behaviors in a pearlitic steel. *Mater Today Commun*, 2020, 25: 101134
- [21] He J, Xiao Y, Liu J, et al. Model for predicting ductile fracture of SA508-3 steel undergoing hot forming. *Mater Sci Technol*, 2014, 30(10): 1239
- [22] Xu R R, Li M Q, Li H. Kinetic analysis and strain-compensated constitutive models of Ti-42.9Al-4.6Nb-2Cr during isothermal compression. *Prog Nat Sci Mater Int*, 2020, 30(2): 260
- [23] Xiao X, Liu G Q, Hu B F, et al. A comparative study on Arrhenius-type constitutive equations and artificial neural network model to predict high-temperature deformation behaviour in 12Cr3WV steel. *Comput Mater Sci*, 2012, 62: 227
- [24] Wang T X, Lu S Q, Wang K L, et al. Flow stress behavior and constitutive model base on artificial neural network of Ti60 alloy. *Spec Cast Nonferrous Alloys*, 2020, 40(9): 1019
(王天祥, 鲁世强, 王克鲁, 等. Ti60 合金的流变应力行为及人工神经网络本构模型. *特种铸造及有色合金*, 2020, 40(9): 1019)
- [25] Zhou F, Wang K L, Lu S Q, et al. Flow behavior and neural network high temperature constitutive model of Ti-22Al-24Nb-0.5Y alloy. *J Mater Eng*, 2019, 47(8): 141
(周峰, 王克鲁, 鲁世强, 等. Ti-22Al-24Nb-0.5Y 合金流动行为及 BP 神经网络高温本构模型. *材料工程*, 2019, 47(8): 141)
- [26] Murugesan M, Sajjad M, Jung D W. Microstructure evaluation and constitutive modeling of AISI-1045 steel for flow stress prediction under hot working conditions. *Symmetry*, 2020, 12(5): 782