

doi:10.12068/j.issn.1005-3026.2025.20230261

多道次变形条件下V-N微合金钢的流变应力模型

周晓光, 赵金帆, 姜珊, 曹光明
(东北大学 数字钢铁全国重点实验室, 辽宁 沈阳 110819)

摘要: 为建立多道次变形条件下V-N微合金钢的流变应力模型,采用DIL805热膨胀相变仪对实验钢进行了多道次压缩实验,并绘制了应力-应变曲线。Hensel-Spittel模型高精度地模拟了实验钢在单道次变形条件下的流变应力。当变形温度和应变速率不变时,采用遗传算法优化了多道次变形条件下Hensel-Spittel模型参数。基于支持向量机(support vector machine, SVM)算法建立了变形前静态再结晶体积分数、变形前奥氏体晶粒尺寸、位错密度、变形温度和应变速率与模型参数的对应关系。结果表明,多道次变形条件下流变应力预测值与实测值吻合良好。研究结果为精准描述多道次变形条件下V-N微合金钢的流变应力提供了有力的支持。

关键词: 流变应力;遗传算法;静态再结晶;位错密度;支持向量机算法

中图分类号: TG 142.1 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2025)02-0035-07

Flow Stress Model for V-N Microalloyed Steel Under Multi-pass Deformation Conditions

ZHOU Xiao-guang, ZHAO Jin-fan, JIANG Shan, CAO Guang-ming

(State key Laboratory of Digital Steel, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: ZHOU Xiao-guang, E-mail: xiaoguangzhou@126.com)

Abstract: In order to establish the flow stress models of V-N microalloyed steel under multi-pass deformation conditions, multi-pass compression experiments were conducted on experimental steel using a DIL805 thermal expansion phase transformation tester, and the stress-strain curves were plotted. The flow stress of experimental steel was simulated with high accuracy by Hensel-Spittel model under single-pass deformation conditions. When the deformation temperature and strain rate remained constant, genetic algorithm was used to optimize the parameters of the Hensel-Spittel model under multi-pass deformation conditions. The support vector machine (SVM) algorithm was used to establish the corresponding relationships between the static recrystallization volume fraction before deformation, austenite grain size before deformation, dislocation density, deformation temperature, strain rate and the model parameters. The results show that the predicted flow stress under multi-pass deformation conditions is in good agreement with the measured values. The research results can provide strong support for accurately describing the flow stress of V-N microalloyed steel under multi-pass deformation conditions.

Key words: flow stress; genetic algorithm; static recrystallization; dislocation density; support vector machine algorithm

在钒(V)钢中添加氮(N)元素可以显著提高钢的强度、延展性和韧性,使得V-N微合金钢具有良好的力学性能和耐腐蚀性能,因此,V-N微

合金钢被广泛应用于汽车、船舶、建筑和海洋等领域。目前对于V-N微合金钢的研究主要集中在析出行为以及工艺参数对V-N微合金钢组织性

收稿日期: 2023-09-07

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFB3304800); 辽宁省科技专项项目(2022JH25/10200001); 中国博士后科学基金资助项目(2022T150205)。

作者简介: 周晓光(1978—),男,辽宁辽中人,东北大学副教授,博士生导师;曹光明(1982—),男,四川绵阳人,东北大学教授,博士生导师。

能的影响等方面^[1-4],钢中添加V,N元素可以在一定程度上抑制奥氏体再结晶和晶粒的长大,起到较弱的细晶强化作用,而V,N在相变过程中的析出则是V-N微合金钢强度提升的主要因素.在V-N微合金钢的轧制过程中,流变应力的精准预测具有重要的意义.目前研究人员已经对不同钢材在单道次变形条件下的流变应力预测做了大量的工作^[5-10].众所周知,在实际轧制过程中,多道次变形是生产工艺中不可避免的一环,然而多道次变形条件下金属流变应力的研究却少见报道.肖罡等^[11]采用克里金方法构建了6013铝合金多道次压缩流变应力模型来描述其多道次变形行为.Chen等^[12]通过迭代修正平均位错密度并考虑了累积应变的影响,对一种低合金高强钢多道次流变应力进行了预测.但在多道次变形条件下静态再结晶体积分、晶粒尺寸、位错密度、变形温度、应变速率等都会导致材料的组织发生变化,进而影响材料的流变应力,通过传统的本构方程建模方法很难对钢铁材料的多道次变形行为进行高效建模与精确预测.

因此,本研究采用实验与机器学习相结合的方法来建立V-N微合金钢在多道次变形条件下的流变应力模型.通过多道次压缩实验确定实验钢静态再结晶体积分和晶粒尺寸,基于传统物理冶金学模型确定了实验钢静态再结晶和晶粒尺寸模型中的参数.本文选择经典的Hensel-Spittel模型作为基本架构,采用遗传算法(genetic algorithm, GA)对第二道次流变应力的模型参数进行了优化,采用支持向量机(SVM)算法建立了变形前静态再结晶体积分、变形前奥氏体晶粒尺寸、位错密度、变形温度、应变速率与模型中关

键系数(a, b, c)的对应关系,最终实现了实验钢多道次变形条件下流变应力的精准预测.研究结果为V-N微合金钢制备过程中流变应力的预测提供了新的思路.

1 实验材料及方案

实验用钢的化学成分(质量分数,%)为:C 0.172, Si 0.370, Mn 1.230, V 0.100, N 0.011, P 0.011, S 0.009, Al 0.024, Fe 余量.多道次压缩实验在DIL805热膨胀相变仪上进行,将坯料加工成尺寸为 $\phi 5 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 的圆柱形相变仪试样.实验钢变形前的静态再结晶体积分模型和奥氏体晶粒尺寸模型是建立多道次变形条件下的流变应力模型的基础.

1)为了建立实验钢的静态再结晶体积分数学模型,设计了双道次压缩实验.将试样以 $20 \text{ }^\circ\text{C/s}$ 的速度加热到 $1150 \text{ }^\circ\text{C}$ 保温 300 s ,然后以 $10 \text{ }^\circ\text{C/s}$ 的速度分别冷却到 $900, 950, 1000, 1050 \text{ }^\circ\text{C}$,保温 10 s 后进行第一道次压缩,真应变为 $0.1, 0.2, 0.3$,应变速率为 $1, 5, 10 \text{ s}^{-1}$,分别保温 $1, 5, 10, 20, 50, 100, 400 \text{ s}$ 后进行第二道次的压缩,第二道次的真应变及应变速率与第一道次相同,最后以 $50 \text{ }^\circ\text{C/s}$ 的速度冷却至室温.

2)为了建立变形前奥氏体晶粒尺寸数学模型,设计了淬火实验,具体工艺如下:变形温度为 $1050 \text{ }^\circ\text{C}$,应变速率为 5 s^{-1} ,共进行三道次的压缩,每道次压缩真应变分别设为 0.15 和 0.20 ,保温时间为 50 s ,在各个道次压缩之前进行淬火.淬火实验示意图如图1所示.

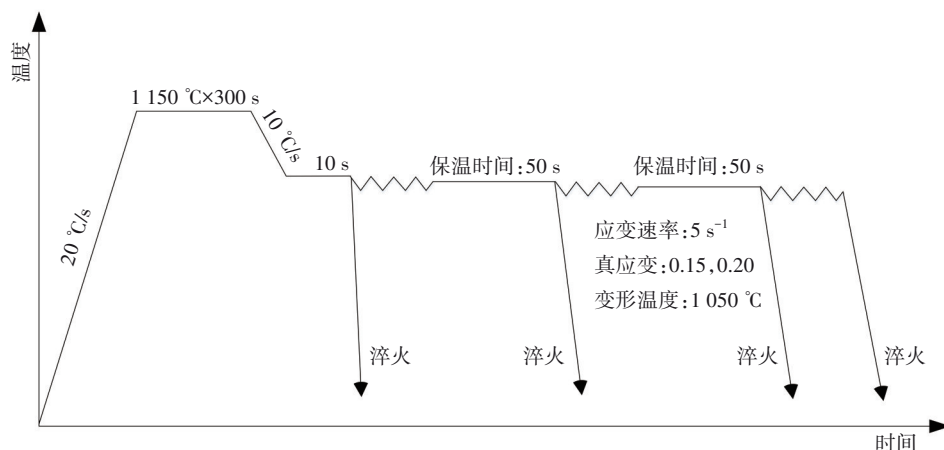


图1 奥氏体淬火实验示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the austenite quenching experiment

3)为了验证多道次变形条件下流变应力的准确性,设计了三道次压缩实验,具体工艺为:将试样以20 °C/s的速度加热到1 150 °C保温300 s,然后以10 °C/s的速度分别冷却到900~1 050 °C,保温10 s后进行第一道次压缩变形,真应变为0.1~0.3,应变速率为1~10 s⁻¹,分别保温1, 5, 10, 20, 50, 100, 400 s后进行第二道次的压缩,第二道次的真应变及应变速率与第一道次相同,再分别保温1, 5, 10, 20, 50, 100, 400 s后进行第三道次的压缩,第三道次的真应变及应变速率与前两道次相同,最后以50 °C/s的速度冷却至室温。

2 建模流程及精度对比

2.1 单道次流变应力模型的建立和精度对比

为了反映材料在变形过程中应力与应变速率、变形温度和应变变量之间的关系,第一道次流变应力采用Hensel-Spittel^[13]模型进行回归,如式(1)所示:

$$\sigma = a_0 \exp(a_1 T) \dot{\varepsilon}^{a_2} \varepsilon^{a_3} \exp(a_4 \varepsilon). \quad (1)$$

式中: σ 为流变应力; T 为变形温度; ε 为真应变; $\dot{\varepsilon}$ 为应变速率; a_0, a_1, a_2, a_3, a_4 为回归参数.对第一道次的实验数据用1stOpt软件进行多元非线性回归,回归后的参数如表1所示。

表1 流变应力模型的回归参数

Table 1 Regression parameters of the flow stress model

a_0	a_1	a_2	a_3	a_4
8 119.545	-2.567	0.098	0.402	-1.171

采用Hensel-Spittel模型对单道次变形条件下的流变应力进行了预测.图2给出了预测的流变应力与实测值的比较.可以看出,模型的均方根误差(RMSE)为4.347 MPa,相关系数(R^2)为0.993,表明该模型预测的流变应力与实测值吻合良好,精度较高.本文将此模型形式作为多道次流变应力模型的基本框架。

2.2 多道次流变应力模型的建立

随着计算技术的不断发展,机器学习构建的材料本构模型为研究金属的应力-应变曲线变化提供了一种可行的方法.其中SVM算法多用于小样本的预测,而且能够弥补训练范围之外泛化能力差,以及选择隐藏层数量困难的缺点,此方法已经在很多领域被广泛应用.为了建立多道次变形条件下的流变应力模型,本文选择Hensel-

Spittel模型结构,固定应变速率及温度,通过遗传算法优化模型系数,并通过SVM算法建立了关键工艺参数与模型系数的关系.本文重点考虑了道次间隔期间静态再结晶体积分数、变形前奥氏体晶粒尺寸、变形前位错密度、变形温度和应变速率对多道次变形条件下流变应力的影响。

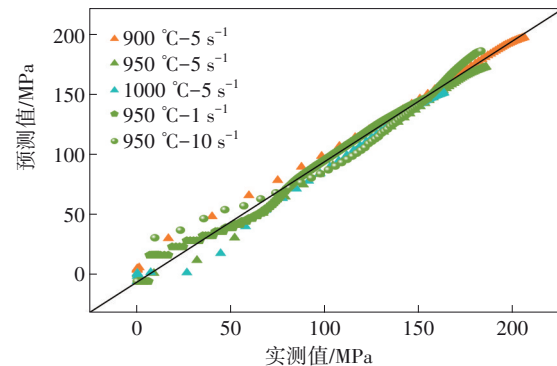


图2 Hensel-Spittel模型预测的流变应力与实测值对比
Fig. 2 Comparison of flow stress predicted by the Hensel-Spittel model with measured values

2.2.1 静态再结晶体积分数模型

测定静态软化率的方法有补偿法(真应变0.2%和2%)^[14]、后插法等.本文在测定实验钢静态软化率时采用的是2%补偿法,其公式为

$$F_s = \frac{\sigma_m - \sigma_2}{\sigma_m - \sigma_1}. \quad (2)$$

式中: F_s 为静态软化率; σ_m 为第一道次峰值应力; σ_1 和 σ_2 分别为第一和第二道次真应变为2%的屈服应力.图3给出了双道次压缩条件下真应变为0.2时的静态软化率计算示意图。

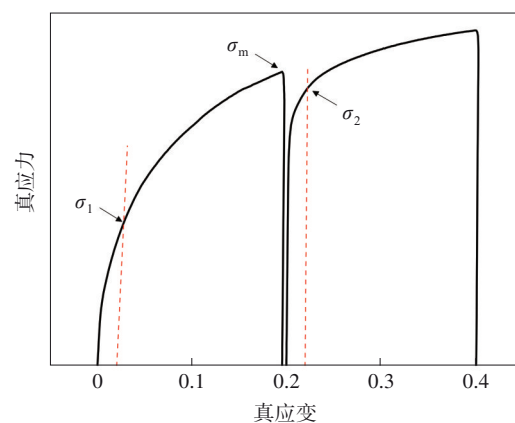


图3 静态软化率计算示意图

Fig. 3 Schematic diagram for calculating static softening rate

学者们认为,当静态软化率达到20%时,静态再结晶才会发生,因此静态再结晶体积分数公式为

$$\varphi_{\text{srx}} = \frac{F_s - 0.2}{1 - 0.2} \quad (3)$$

式中： φ_{srx} 为静态再结晶体积分数。

通常采用修正的 Avrami 方程来描述再结晶动力学,其公式为

$$\varphi_{\text{srx}} = 1 - \exp\left[-0.693\left(\frac{t}{t_{0.5}}\right)^n\right] \quad (4)$$

式中： t 为静态再结晶时间； $t_{0.5}$ 为静态再结晶体积分数达到 50% 所用的时间； n 为材料常数,经计算 n 值为 0.153 23。

$t_{0.5}$ 的表达式为^[15]

$$t_{0.5} = A\varepsilon^{n_1}\dot{\varepsilon}^{n_2}d_0^{n_3}\exp\left(\frac{Q}{RT}\right) \quad (5)$$

式中： d_0 为初始晶粒尺寸； R 为气体常数； Q 为激活能； A, n_1, n_2, n_3 都为常数.参照文献[15]的方法计算 A, n_1, n_2, n_3 和 Q 的值,如表 2 所示。

表 2 $t_{0.5}$ 公式中的参数
Table 2 Parameters of $t_{0.5}$ equation

A	n_1	n_2	n_3	$Q/(J\cdot\text{mol}^{-1})$
6.58×10^{-34}	-12.27	-1.058	3.720 97	423 057

将参数分别代入式(4)和式(5),得到静态再结晶体积分数.图 4 给出了预测的静态再结晶体积分数与基于双道次压缩实验换算得到的实测值的比较.可以看出,所建立的模型具有较高的精度。

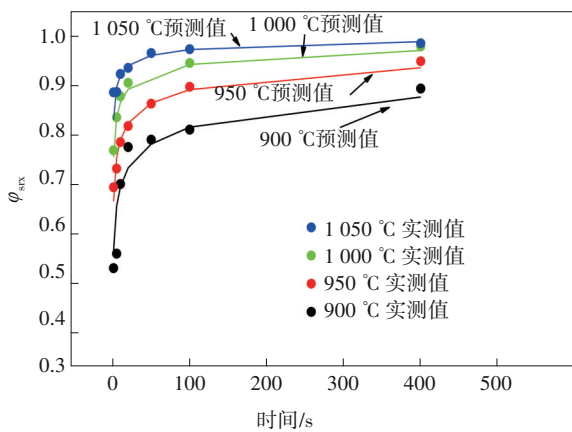


图 4 静态再结晶体积分数对比

Fig. 4 Comparison of static recrystallization volume fraction

2.2.2 晶粒尺寸模型

图 5 给出了实验钢在变形温度为 1 050 °C, 真应变为 0.2, 应变速率为 5 s⁻¹, 保温时间为 50 s 工艺条件下各道次压缩变形前的原始奥氏体组织。

如图 5 所示,在第一道次压缩之前的原始晶粒尺寸约为 80 μm;在经历了第一道次压缩并保温 50 s 后发生静态再结晶的晶粒尺寸约为 34 μm;这些静态再结晶的晶粒又经历了第二道次压缩并保温 50 s 后,再次发生静态再结晶的晶粒尺寸约为 20 μm。

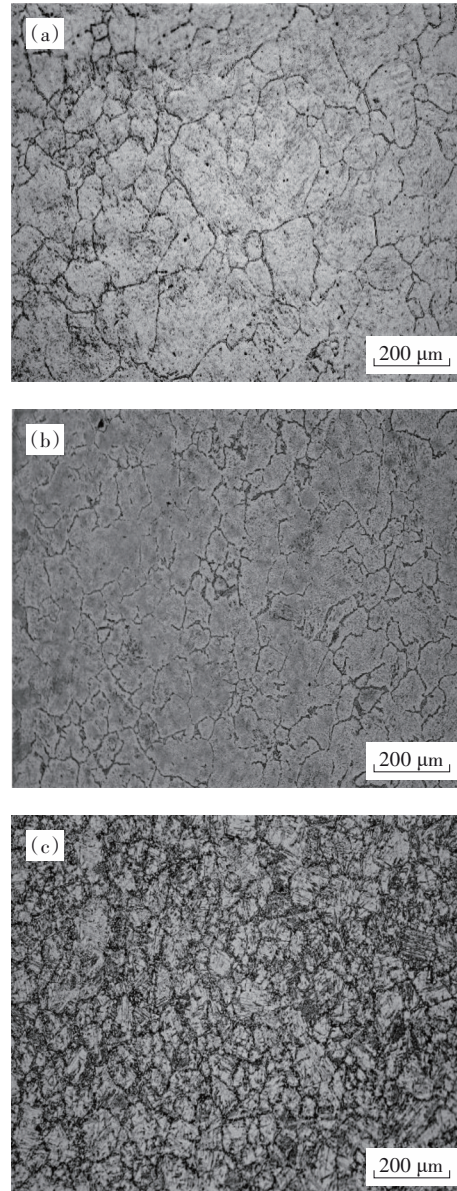


图 5 实验钢各道次变形前的奥氏体组织

Fig. 5 Austenite microstructure of experimental steel before deformation in each pass

(a) — 第一道次; (b) — 第二道次; (c) — 第三道次。

静态再结晶的晶粒尺寸可以由式(6)表示^[16]:

$$d_{\text{rex}} = id_0^j \varepsilon^k \quad (6)$$

式中： d_{rex} 为静态再结晶晶粒尺寸； i, j, k 为拟合参数.经拟合,参数 i 值为 0.110 84, j 值为 0.762 5, k

值为-1.437 3.当奥氏体未发生静态再结晶时,变形奥氏体的晶粒尺寸可以表示为

$$d_N = d_0 \exp(-\varepsilon/4). \quad (7)$$

式中: d_N 为未发生静态再结晶的晶粒尺寸.

假设钢中奥氏体静态再结晶完全发生后再结晶奥氏体才发生晶粒长大,再结晶奥氏体晶粒长大行为可由式(8)表示^[16]:

$$d^m = d_0^m + Bt_1 \exp\left(-\frac{Q_0}{RT}\right). \quad (8)$$

式中: d 为长大后奥氏体晶粒尺寸; t_1 为保温时间; Q_0 为晶粒生长的活化能; B 和 m 为材料常数.

因此,可以得到平均奥氏体晶粒尺寸为

$$d_{\text{average}} = \varphi_{\text{srx}} d + (1 - \varphi_{\text{srx}}) d_N. \quad (9)$$

式中: d_{average} 为平均奥氏体晶粒尺寸.

2.2.3 位错密度模型

材料的流变应力和位错密度息息相关,位错密度模型采用泰勒公式(10)进行描述^[17]:

$$\sigma = \sigma_y + \alpha M \mu b \sqrt{\rho}. \quad (10)$$

式中: σ_y 为屈服应力; α 为常数; M 为泰勒因子; μ 为剪切模量; b 为伯格斯矢量; ρ 为平均位错密度.

第二道次变形开始时的位错密度可以用式(11)表示^[18]:

$$\rho = \rho_1 \varphi_{\text{srx}} + \rho_2 (1 - \varphi_{\text{srx}}). \quad (11)$$

式中: ρ_1 为第一道次屈服点处的位错密度,一般取 10^{12} ; ρ_2 为第一道次变形结束时的位错密度.

2.2.4 GA 优化模型参数

采用 2.1 节的 Hensel-Spittel 模型作为预测第二道次流变应力模型架构.具体方法为将式(1)中的温度和应变速率固定,将模型形式修正为如式(12)所示.根据第二道次数据,采用遗传算法对模型参数(a, b, c)进行优化,图 6 给出了所有变形条件下用遗传算法优化参数预测的流变应力与实测值的对比.

$$\sigma = a \varepsilon^b \exp(c \varepsilon). \quad (12)$$

式中: a, b, c 为待定参数.

2.2.5 多道次变形条件下流变应力模型的建立

实验获得数据后,通过 SVM 算法建立静态再结晶体积分数、晶粒尺寸、位错密度、变形温度、应变速率和模型参数(a, b, c)的关系,图 7 为采用 SVM 算法预测流变应力的流程图.

2.3 多道次变形条件下模型精度对比

2.3.1 双道次变形条件下模型精度对比

将用 SVM 算法预测出的模型参数(a, b, c)代入式(12)中,从而预测实验钢在不同变形条件下

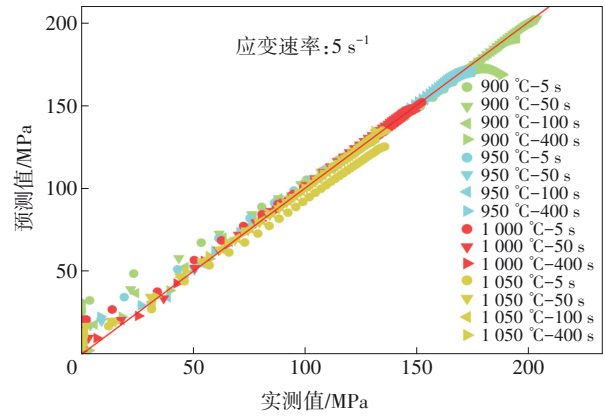


图 6 遗传算法优化预测的流变应力与实测值的对比
Fig. 6 Comparison of predicted flow stress adopting genetic algorithm optimization and measured values

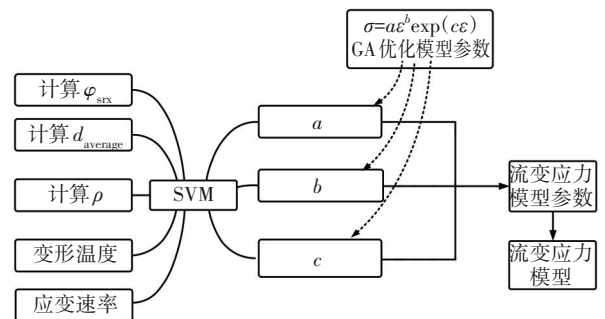


图 7 采用 SVM 算法预测流变应力的流程图
Fig. 7 Flow chart of predicting flow stress adopting SVM algorithm

的流变应力.双道次变形条件下流变应力预测值与实测值的对比如图 8 所示.模型相关系数为 0.998 2,均方根误差为 7.96 MPa.可以看出,双道次变形条件下预测流变应力与实测值吻合良好.

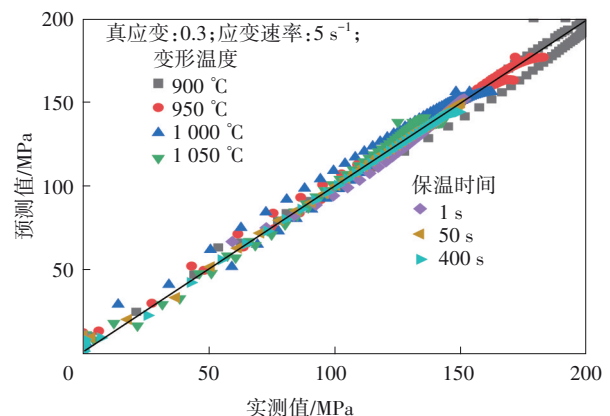


图 8 双道次变形条件下流变应力预测值与实测值的对比
Fig. 8 Comparison of predicted flow stress and measured values under double-pass deformation

2.3.2 三道次变形条件下模型精度对比

将第二、三道次静态再结晶体积分数,第三道次变形之前的晶粒尺寸,第三道次变形开始时

的位错密度代入训练好的 SVM 模型中, 预测出第三道次流变应力曲线在 Hensel-Spittel 模型中的参数 a, b, c , 并将 a, b, c 代入式 (12) 中计算出第三道次的流变应力. 图 9 给出了不同变形温度条件下的三道次变形流变应力预测值与实测值的

对比. 图 10 给出了不同工艺条件下的第三道次变形流变应力预测值与实测值的对比. 模型相关系数为 0.985 6, 均方根误差为 9.47 MPa. 可以看出, 所建立的模型具有较高的模拟精度.

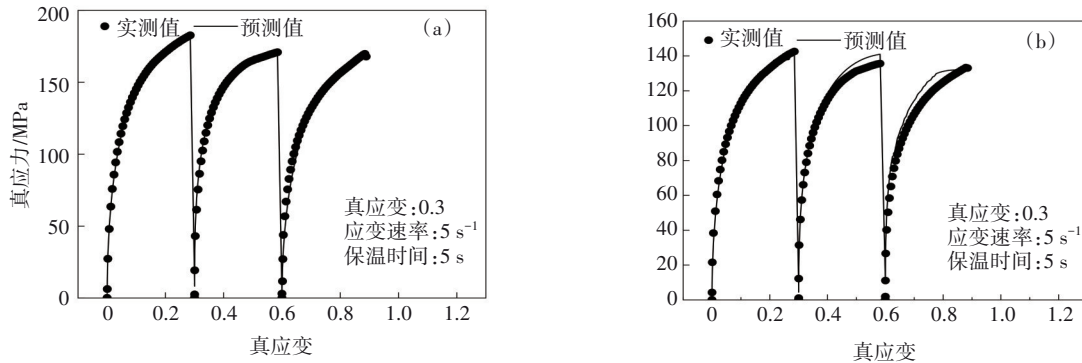


图 9 三道次变形流变应力预测值与实测值的对比

Fig. 9 Comparison of predicted flow stress and measured values for three passes deformation
(a)—950 °C 变形; (b)—1050 °C 变形.

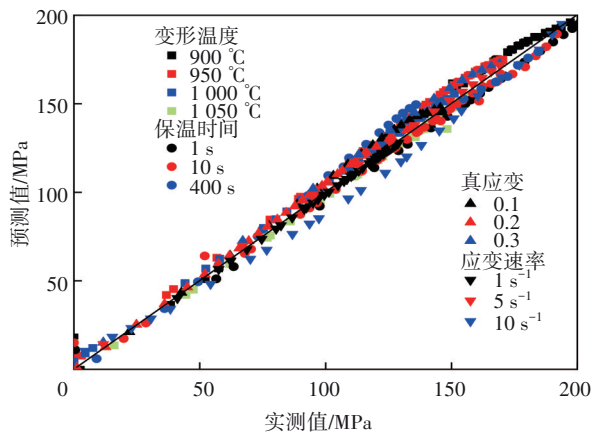


图 10 第三道次变形预测的流变应力与实测值的对比

Fig. 10 Comparison of predicted flow stress and measured values for the 3rd deformation

3 结 论

1) 采用 Hensel-Spittel 模型预测了 V-N 实验钢在单道次变形条件下的流变应力, 模型获得了较高的预测精度. 通过双道次压缩实验建立了高精度的 V-N 实验钢静态再结晶动力学模型和奥氏体晶粒尺寸模型.

2) 采用遗传算法基于 Hensel-Spittel 模型结构对多道次变形条件下的流变应力模型参数进

行优化, 并利用 SVM 算法给出了静态再结晶体积分数、晶粒尺寸、位错密度、变形温度、应变速率与模型参数之间的对应关系.

3) 通过双道次和三道次变形条件下流变应力预测值与实测值的对比, 可以看出, 多道次变形条件下的流变应力的预测值与实测值吻合良好, 表明所建立的数学模型具有较高的精度.

参考文献:

- [1] Zhao B C, Zhao T, Huang L, et al. Effect of nitrogen content on the static recrystallization and precipitation behaviors of vanadium-titanium microalloyed steels [J]. *International Journal of Materials Research*, 2024, 115 (6): 411-420.
- [2] Li N, Li L X, Wang C F, et al. Study of precipitation in the heavy plate of VN micro-alloyed HSLA steel [J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 712/713/714/715: 65-69.
- [3] Chumanov I V, Sedukhin V V. Effect of vanadium alloying on the phase composition of super duplex steel [J]. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2023(8): 1165-1169.
- [4] Kawamura M, Ogawa T, Sun F, et al. Evaluation of the tensile properties of vanadium-added steels with different ferrite and pearlite hardness ratios [J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2024, 33(13): 6816-6824.
- [5] Ashtiani H R R, Shahsavari P. Constitutive modeling of flow behavior of precipitation-hardened AA7022-T6 aluminum alloy at elevated temperature [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2020, 30(11): 2927-2940.
- [6] Gong B, Duan X W, Liu J S, et al. A physically based constitutive model of as-forged 34CrNiMo6 steel and processing maps for hot working [J]. *Vacuum*, 2018, 155: 345-357.

