

基于 ELM 的 H 型钢组织预测专家系统

刘亚均^{1,2}, 马劲红^{1,2}, 王小巩^{1,2}

(1. 华北理工大学 冶金与能源学院, 河北 唐山 063210; 2. 华北理工大学 现代冶金技术教育部重点实验室, 河北 唐山 063210)

摘要: 采用极限学习机建立了 H 型钢组织预测专家系统, 可根据 H 型钢的化学成分、工艺参数及冷却速度来预测轧后钢种的微观组织、晶粒等级和平均冲击功。以某钢厂 H 型钢的生产数据为专家系统的数据库, 批量预测了 H 型钢的微观组织、平均冲击功和晶粒等级, 预测结果表明, 决定系数 R^2 较高, 拟合程度好; 平均绝对百分比误差较小, 精度高。为验证专家系统的可行性, 采用与预测相同钢材、相同轧制工艺参数的 H 型钢进行金相实验和夏比冲击实验, 由实验得到的微观组织占比、平均冲击功及晶粒等级与预测值基本一致。结果表明: 基于 ELM 建立的 H 型钢组织预测专家系统, 其预测结果精度高, 对实际生产有较好的参考价值。

关键词: H 型钢; 极限学习机; 专家系统; 微观组织; 平均冲击功; 晶粒等级

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.01.032

中图分类号: TG335.4⁺2

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2024) 01-0241-08

H-beam steel structure prediction expert system based on ELM

Liu Yadi^{1,2}, Ma Jinhong^{1,2}, Wang Xiaogong^{1,2}

(1. School of Metallurgy and Energy, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, China;

2. Key Laboratory of the Ministry of Education for Modern Metallurgy Technology, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, China)

Abstract: H-beam steel structure prediction expert system was established by the extreme learning machine, and based on the chemical composition, process parameters and cooling speed of H-beam steel, the microstructure, grain grade and average impact energy of the steel grade after rolling were predicted. Then, the microstructure, average impact energy and grain grade of H-beam steel were predicted in batches by the expert system with the data base from production data of H-beam steel in a certain steel plant. The prediction results indicate that the determination coefficient R^2 is high and the fitting degree is good, and the average absolute percentage error is smaller and the accuracy is high. In order to verify the feasibility of the expert system, H-beam steel with the same steel material and the same rolling process parameters as predicted was used to conduct metallographic experiment and Charpy impact experiment, and the proportion of microstructure, average impact energy and grain grade obtained by experiment are basically consistent with the predicted values. The results indicate that the H-beam steel structure prediction expert system established based on ELM has high prediction accuracy and good reference value for the actual production.

Key words: H-beam steel; extreme learning machine; expert system; microstructure; average impact energy; grain grade

H 型钢是一种截面面积分配合理、载重强、重量轻的“绿色产品”, 因其断面形状与英文字母“H”相同而得名, 被广泛应用于建筑领域、海洋平台的建设等方面。随着国民经济不断发展, 对 H 型钢的性能要求也越来越高。H 型钢轧制是在高温

下进行的大变形过程, 其变形过程较复杂, 轧后产品的组织性能受到钢种成分、轧制工艺参数、冷却工艺参数的影响, 因此, 成品 H 型钢的组织性能在实际生产前很难预测^[1-2]。同时, 由于轧后产品的金相实验观察周期长, 需要大量实验材料, 且实验操作和外界因素易产生误差导致结果发生偏差。因此, 采用人工智能手段预测 H 型钢的微观组织是十分必要的^[3]。

现阶段, 不少国内外学者采用智能学习算法预测微观组织, 其中 Abedrabbo A F 等^[4]采用有限元模拟, 使用 PSM 和 PCA 模型预测亚晶粒尺寸, 还

收稿日期: 2023-07-10; 修订日期: 2023-10-20

基金项目: 河北省自然科学基金资助项目 (E202109041)

作者简介: 刘亚均 (1998-), 男, 硕士研究生

E-mail: yydd981@163.com

通信作者: 马劲红 (1973-), 女, 博士, 教授

E-mail: majinhong@126.com

结合相似性原则预测变形芯片和机加工芯片表面的位错密度; Meade E D 等^[5]利用多尺度模型对马氏体钢 P91 的微观结构和损伤演变进行了分析, 包括在大变形条件下的损伤演化、预测晶体取向和错向分布, 并通过对比测量结果, 证明了其准确性。选取的智能算法有: 基于梯度下降的 BP 网络、基于最小二乘法的 RBF 网络和基于标准优化的 SVM 等。BP 网络的计算速度慢, 容易产生局部最小值; RBF 网络对数据库要求较高; SVM 不适合大样本计算^[6-7]。基于此, 本文采用极限学习机 (Extreme Learning Machine, ELM) 算法, 该算法是一种单层神经网络的学习方法, 处理数据更加精准、便捷。

本文采用某钢厂的 H 型钢现场生产数据作为专家系统的数据库, 利用 MATLAB 程序语言编写了基于极限学习机算法的 H 型钢组织预测专家系统。利用数据库的大量实际生产数据, 分析微合金元素、轧制规程及冷却速度等参数与 H 型钢组织性能之间的关系^[8], 获得微合金元素、轧制规程及冷却速度等参数与 H 型钢组织性能之间的关系函数, 利用此关系函数可预测新钢种、新工艺下的 H 型钢的组织性能。本文的研究对象为材料为 Q235B 钢和 Q355B 钢, 规格为 100 mm×100 mm×6 mm×8 mm、150 mm×150 mm×7 mm×10 mm、200 mm×200 mm×8 mm×12 mm 和 250 mm×250 mm×9 mm×14 mm 的 H 型钢。

1 H 型钢组织预测专家系统的建立

1.1 专家系统建立

本文所建立的专家系统采用 ELM 算法, 其网络

结构如图 1 所示, x_n 为给定输入、 n 为输入层个数、 L 为隐含层个数, G 为隐含层、 $f(x)$ 为输出函数、 a_i 为随机映射、 b_i 为隐含层神经元的阈值、 x 为输入。作为单隐层神经网络学习方法, 主要功能为分类和预测^[9-10]。其流程为: 给定输入层, 由随机映射生成隐含层, 通过最小二乘法得到优化参数并计算出输出层。本文选用其预测功能, 钢种、微合金元素、轧制规程、冷却工艺参数等作为输入层, 随机权重生成隐含层, 经优化预测后生成输出层。

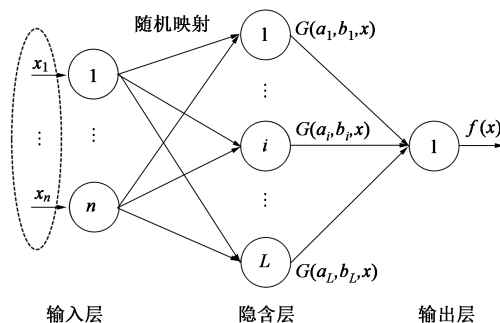


图 1 ELM 网络结构

Fig. 1 Network structure of ELM

为保证数据的合理性, 避免数据不合理对预测结果产生影响, 对数据进行归一化处理, 使所有数据在 $[0, 1]$ 之间变化, 并赋予权重, 增加预测准确性。部分归一化代码如下:

```
[X_train, inputs] = mapminmax(X_train);
```

```
X_test = mapminmax('apply', X_test, inputs);
```

```
[Y_train, outputs] = mapminmax(Y_train);
```

预测结果经过反归一化运算后得到其真实值, 部分反归一化代码如下:

```
pred = mapminmax('reverse', pred, outputs);
```

```
Y = Y_test;
```

基于此建立专家系统可视化界面, 如图 2 所示。



图 2 专家系统主界面

Fig. 2 Main interface of expert system

1.2 专家系统主界面功能

(1) 算法设定。界面如图 3 所示, 导入 Excel 表格产生数据集, 在参数定义界面进行算法设定, 选择算法有 BP、SVM、ELM 等, 其中算法为单独模块, 可后期添加其他所需算法, 本文选择 ELM 算法, 设定训练集长度为数据集的 80%, 隐含层个数为训练集长度的 5%, 传递函数为“Sig”。

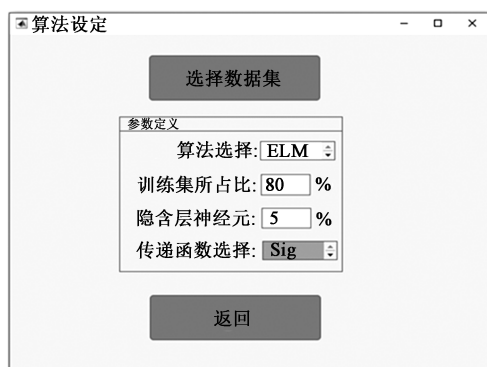


图 3 算法设定界面

Fig. 3 Algorithm setting interface

(2) 组织预测。将数据源导入已经生成的 ELM 预测模型, 将新钢种信息输入, 其中包括: 钢种、H 型钢规格、微合金元素 (Fe、Al、Cr、Cu、Co、Mn、Mo、Nb、Ni、O、Si、Ta、Ti、V、W、B、C、N、P、S、Sn) 的含量、轧制长度、轧制宽度、轧制厚度、道次压下量、开轧温度、终轧温度、冷却速度等。输入参数后点击预测, 在预测参数界面出现预测数据: 平均冲击功、铁素体含量、珠光体含量、贝氏体含量、晶粒等级。点击下一页进行钢种批量预测, 如图 4 所示。其中 R^2 为决定系数, $MAPE$ 为平均绝对百分比误差。为平均绝对导入样本数据表格, 在预测模块中分别点击组织预测功能性按键, 可在图表区中得出预测样本数据与误差图。

1.3 专家系统功能介绍

功能 1: 本专家系统可实现对不同钢种的微观组织、平均冲击功和晶粒等级进行预测, 通过已知微合金元素和轧制规程, 预测并得到主要的微观组织占比。

功能 2: 本专家系统可采取多种智能算法, 通过改变选取数据集比例、智能算法的核函数等, 优化预测结果, 更具有实际意义。

功能 3: 组织预测模块可进行单条数据预测和批量预测。单条数据预测时将已知参数输入, 点击预测即可得到预测结果; 批量预测时导入 Excel 格,

点击预测可获得预测结果及误差图。

2 H 型钢组织预测专家系统的预测结果

利用某钢厂生产的 H 型钢进行微观组织预测, 分别预测 4 种不同元素成分的 H 型钢, 其翼缘厚度分别为 8、10、12 和 14 mm, 预测结果如图 5 所示。

批量预测结果如图 6 所示。其中, 铁素体、珠光体、贝氏体占比的单位为%, 平均冲击功单位为 J。

为了验证 ELM 专家系统的实用性, 将某钢厂的生产数据作为预测模型的数据库, 并进行误差精度分析, 为保证预测误差的可靠性, 采用决定系数 R^2 (式 (1)) 和平均绝对百分比误差 $MAPE$ (式 (2)) 进行分析。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_j - \hat{y})^2}{\sum (y_j - \bar{y})^2} \quad (1)$$

式中: y_j 为第 j 个实际值; \hat{y} 为回归预测值; \bar{y} 为实际值均值。

$$MAPE = \frac{1}{Q} \sum_{k=1}^Q \frac{|X_{testk} - X_{simk}|}{X_{testk}} \times 100\% \quad (2)$$

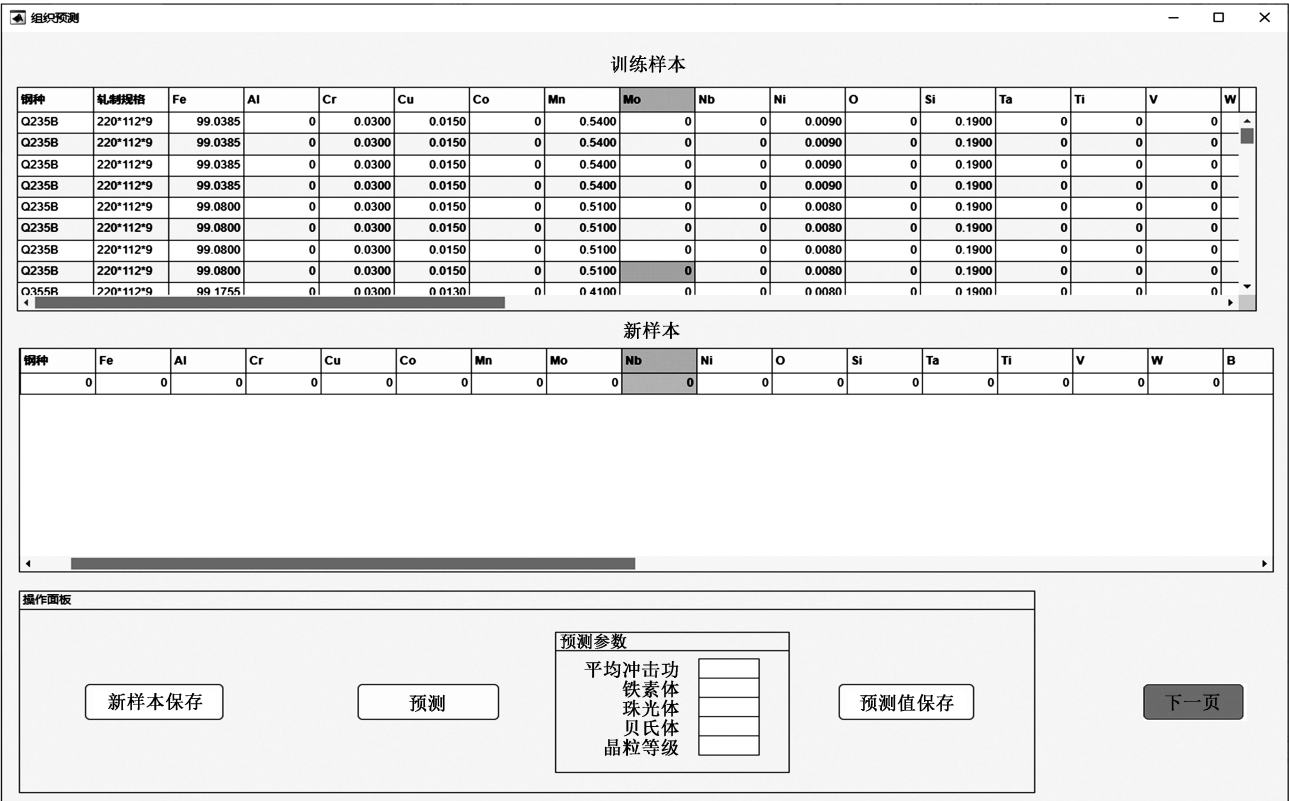
式中: Q 为样本数量, $k=1, 2, 3, \dots, Q$; X_{testk} 为测试集的第 k 个样本数据; X_{simk} 为第 k 个预测结果。

利用决定系数可知预测值与样本数据的拟合程度, 根据式 (1) 可知: 其值在 0~1, 当拟合程度越接近 1 时, 表示预测值与样本数据的相关性越高, 预测结果可信; 相反, 当拟合程度接近 0 时, 表示相关性极低。而平均绝对百分比误差表示预测模型的训练精度, 根据式 (2) 可知, 当 $MAPE$ 值越趋近于 0 时, 预测模型的精度越高^[11]。

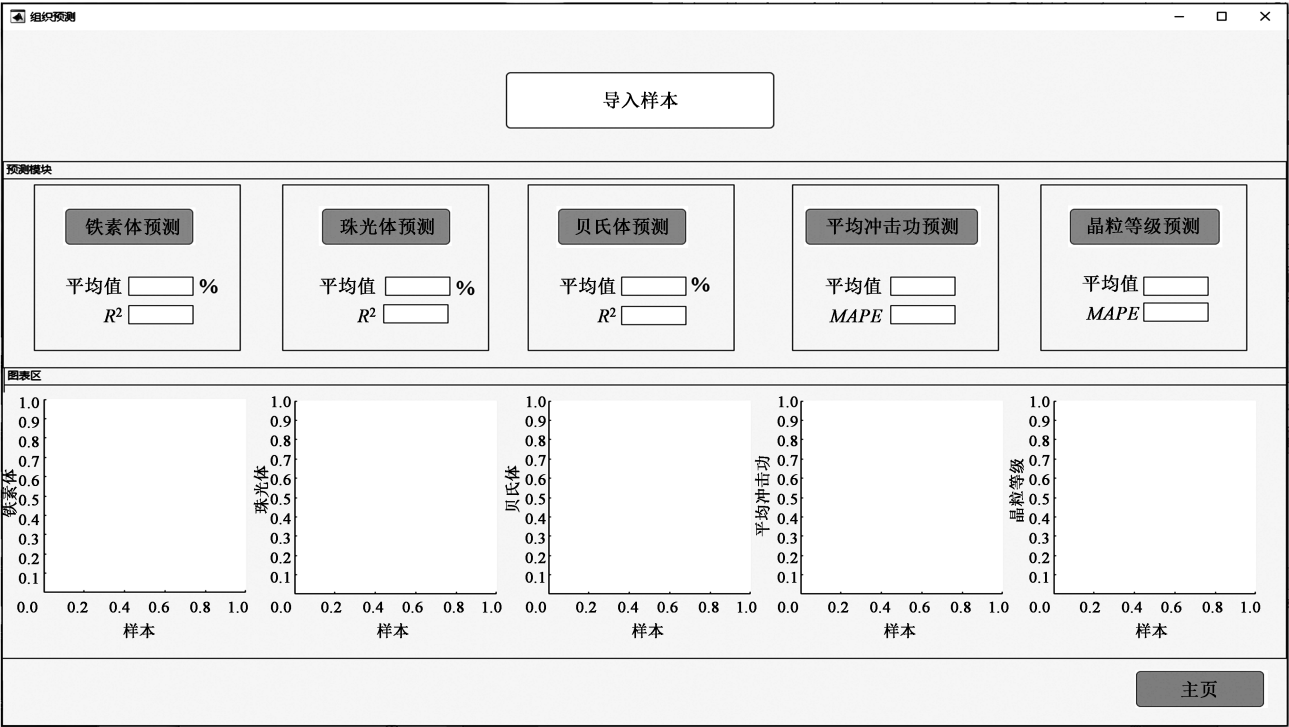
经专家系统预测, 得出测试样本的微观组织平均占比、平均冲击功和平均晶粒等级, 其中, 珠光体占比和贝氏体占比的拟合程度分别达到了 0.81 和 0.86; 平均冲击功和晶粒等级的精确度分别达到 0.07 和 0.06。可根据精确的预测结果对其性能进行分析^[12], 为实际生产提供参考。

3 实验验证

选用专家系统预测的同元素 H 型钢为实验材料, 将其微合金成分转换成质量百分比, 如表 1 所示。选取翼缘试样并制作尺寸为 10 mm×10 mm 的样品, 经砂纸打磨后, 采用抛光机机械抛光, 再用酒精清洗后选用体积比为 4% 硝酸酒精进行腐蚀, 腐



(a)



(b)

图 4 组织预测界面
(a) 单条数据预测 (b) 批量数据预测

Fig. 4 Structure prediction interface
(a) Single data prediction (b) Batch data prediction

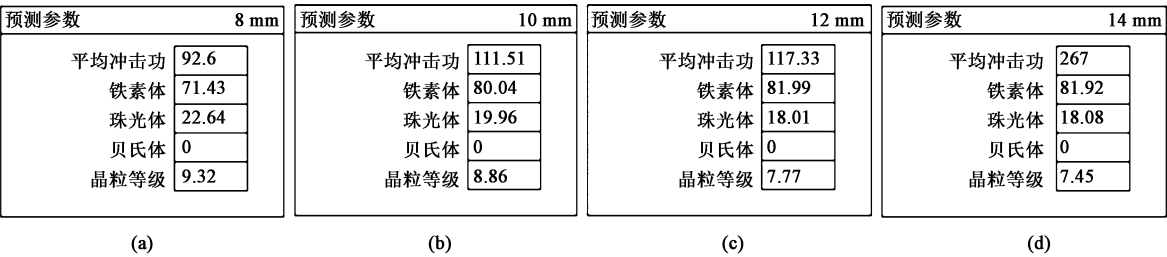


图 5 不同翼缘厚度时的预测结果
(a) 8 mm (b) 10 mm (c) 12 mm (d) 14 mm
Fig. 5 Forecast results under different flange thicknesses

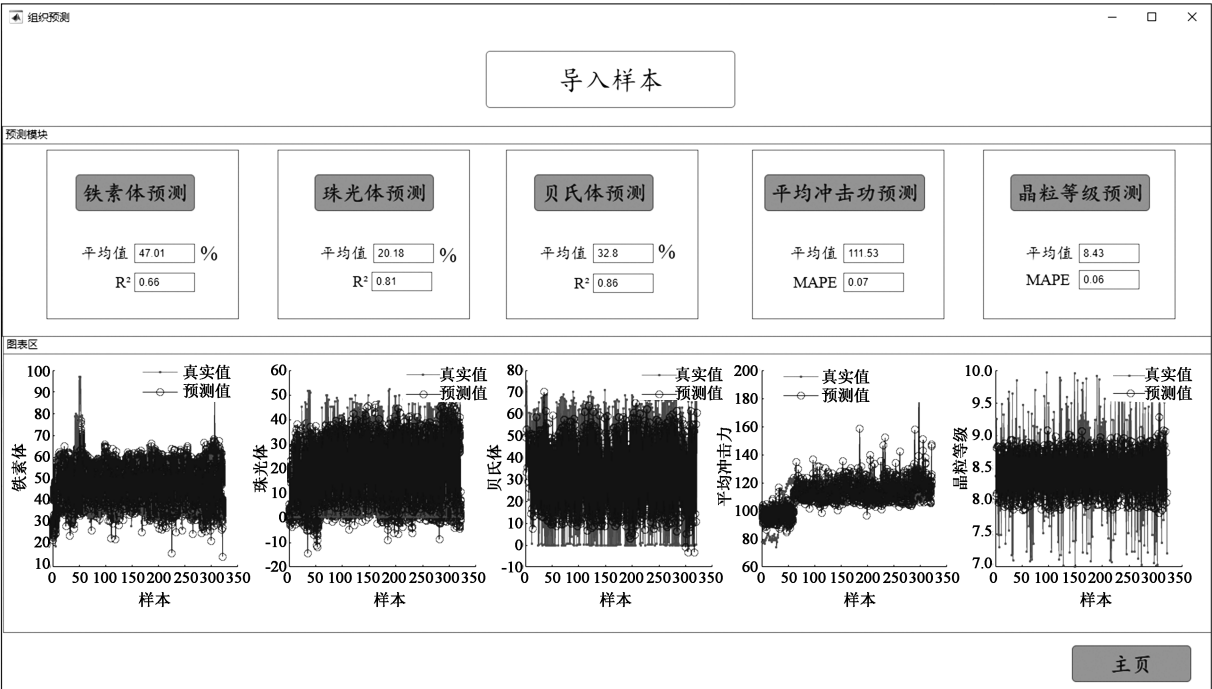


图 6 批量预测结果
Fig. 6 Batch prediction results

表 1 H 型钢的化学成分 (%, 质量分数)

Table 1 Chemical compositions of H-beam steel (% , mass fraction)

C	Si	Mn	P	S
0. 07~0. 23	0. 13~0. 32	0. 27~1. 45	0. 011~0. 045	0. 008~0. 045
V	Nb	Ti	Cr	Ni
0~0. 01	0~0. 013	0~0. 003	0. 01~0. 04	0~0. 016
Cu	Sn	Mo	B	Fe
0. 008~0. 039	0~0. 002	0~0. 01	0~0. 001	余量

蚀时间约为 40 s，用酒精清洗观测面后在金相显微镜下观测微观组织，如图 7 所示。

从图 7a~图 7d 中可以清晰地看出，4 种不同厚度的 H 型钢的翼缘组织为白色的铁素体组织和黑色的珠光体组织，采用 ImageJ 软件中的机械学习图像处理模块计算，得出微观组织占比为：图 7e 中，铁素体占比

为 79.231%，珠光体占比为 20.769%；图 7f 中，铁素体占比为 81.2%，珠光体占比为 18.8%；图 7g 中，铁素体占比为 84.612%，珠光体占比为 15.388%；图 7h 中，铁素体占比为 79.953%，珠光体占比为 20.047%。翼缘厚度为 8、10、12 和 14 mm 的 H 型钢的晶粒等级测定结果分别为 9.0 级、8.7 级、7.5 级和 7.7 级。

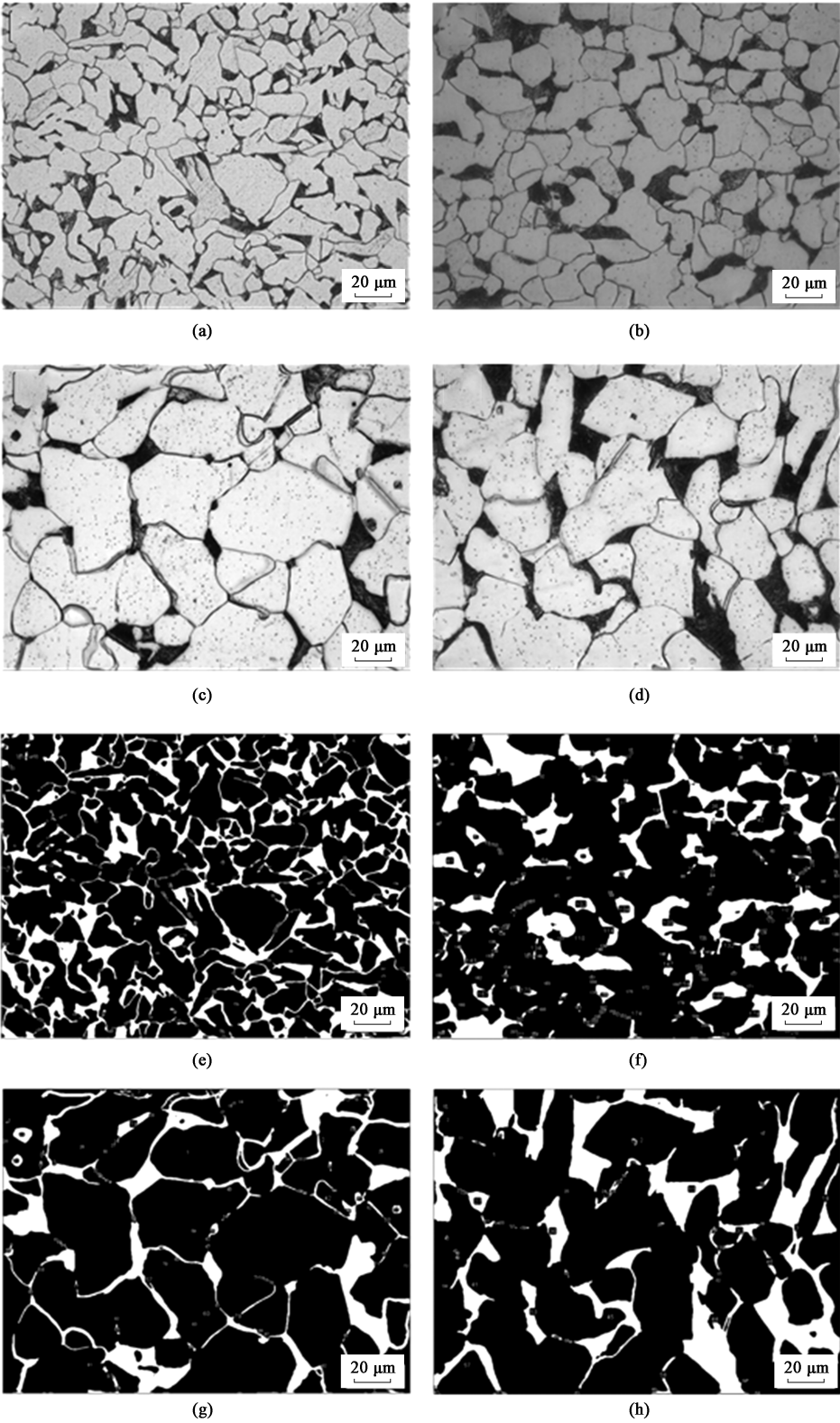


图 7 不同翼缘厚度下试样的显微组织与 ImageJ 处理图

(a) 8 mm, 显微组织 (b) 10 mm, 显微组织 (c) 12 mm, 显微组织 (d) 14 mm, 显微组织 (e) 8 mm, ImageJ 处理图
(f) 10 mm, ImageJ 处理图 (g) 12 mm, ImageJ 处理图 (h) 14 mm, ImageJ 处理图

Fig. 7 Microstructures and ImageJ processing diagrams of specimens with different flange thicknesses

(a) 8 mm, microstructure (b) 10 mm, microstructure (c) 12 mm, microstructure (d) 14 mm, microstructure (e) 8 mm, ImageJ processing diagram (f) 10 mm, ImageJ processing diagram (g) 12 mm, ImageJ processing diagram (h) 14 mm, ImageJ processing diagram

H 型钢轧制阶段，轧件长时间处在高温状态下，受到的变形量大且各个部位的应变速率不均。而在此期间影响奥氏体演变的主要因素有轧制温度、压下量、应变速率等^[13]。结合实际生产情况，H 型钢的轧制一般均在奥氏体未再结晶区进行，轧制过程中奥氏体晶粒被拉长变大，形成位错和变形带，当温度逐渐降低，奥氏体发生相变得到细小铁素体。H 型钢经过多道次轧制累积变形后，使得奥氏体更多地转变为细小的铁素体。为得到均匀细小的晶粒且不出现混晶现象，应控制开轧温度，使其在再结晶停止温度以下控轧。

此外，H 型钢轧制时，其翼缘的变形量小于腹板的变形量，翼缘内部回复和再结晶能量较少，其再结晶数量也远小于腹板中的再结晶数量。在冷却过程中，翼缘散热慢于腹板，且通常情况下翼缘厚度大于腹板厚度，因此，翼缘发生回复和再结晶的时间长，导致其内部微观组织不均匀，强度小于腹板^[14]。

选用与专家系统同元素、具有相同轧制工艺的

H 型钢作为实验材料，分别在 4 种厚度的 H 型钢翼缘上切取 6 个 55 mm×10 mm 冲击试样，并在中心部位开 V 型缺口，缺口角度为 45°，缺口根部半径为 0.25 mm，缺口深度为 2 mm。在室温下进行 4 种冲击试样的夏比冲击实验，所得冲击数据如表 2 所示。

表 2 夏比冲击实验数据

Table 2 Charpy impact experiment data

H 型钢翼缘厚度/mm	8	10	12	14
冲击功/J	85	91	116	271
	87	114	126	280
	86	137	124	271
	83	128	128	274
	85	144	133	270
	86	121	123	271
平均冲击功/J	85.33	122.5	125	272.83

4 结果与讨论

为了验证预测结果的准确性，将预测值与实验值进行对比。图 8 为 4 种试样的铁素体占比、珠光

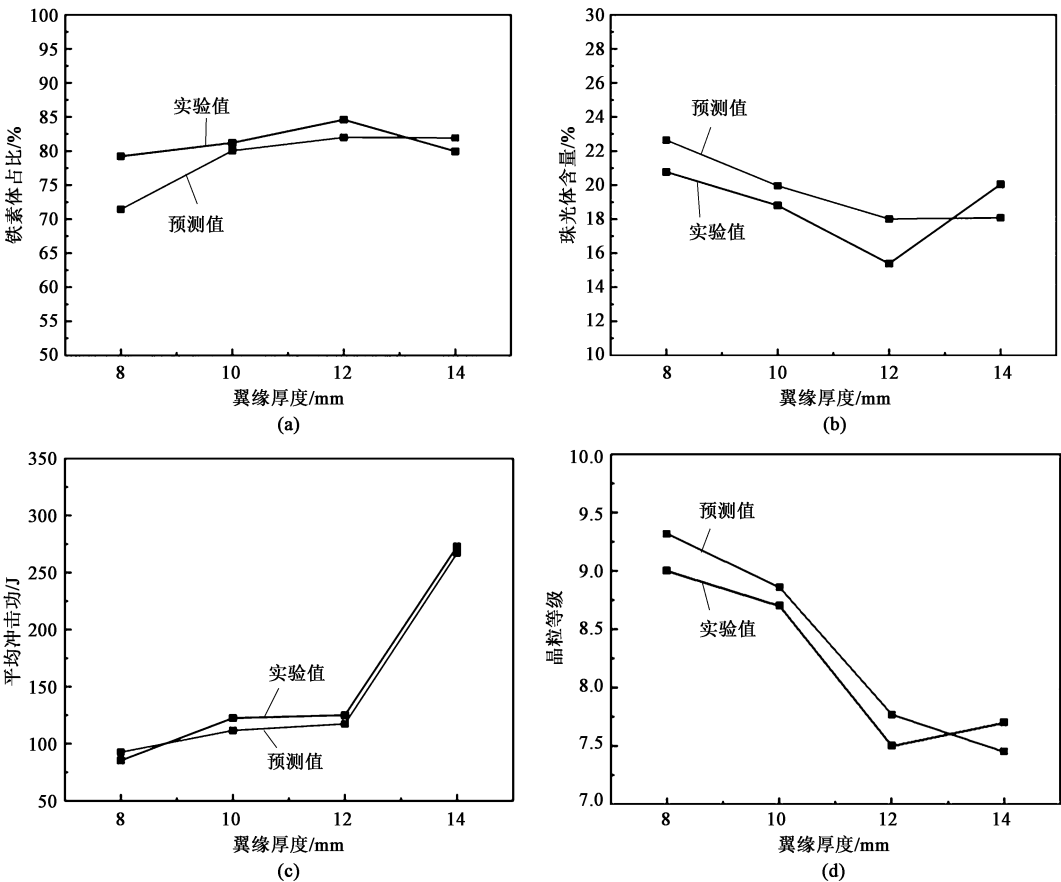


图 8 预测值与实验值的对比

(a) 铁素体占比 (b) 珠光体占比 (c) 平均冲击功 (d) 晶粒等级

Fig. 8 Comparison between predicted and experimental values

(a) Ferrite proportion (b) Pearlite proportion (c) Average impact energy (d) Grain grade

体占比、平均冲击功、晶粒等级的预测值和实验结果的对比结果。经对比发现,预测值和实验值基本一致,其主要微观组织种类为铁素体和珠光体。图 8c 为平均冲击功预测值与实验值的对比曲线,可以看出,预测值与实验值曲线高度拟合;图 8d 为晶粒等级预测值与实验值的对比曲线,可以看出,预测晶粒等级与实验值基本一致,由此说明基于 ELM 建立的专家系统的预测结果精准,可信度高。

5 结论

(1) 采用多组样本数据进行批量微观组织预测,结果表明,微观组织预测结果的决定系数达到 0.8 以上,平均冲击功和晶粒等级的预测平均绝对百分比误差为 0.07 和 0.06,证明了预测结果的精确性。

(2) 基于 ELM 建立的 H 型钢组织预测专家系统,将其预测值与实验值对比,结果表明预测值与实验值基本一致,从而证实了本文建立的专家系统的准确性和可行性。

参考文献:

- [1] Li W, Chen H. Tensile performance of normal and high-strength structural steels at high strain rates [J]. *Thin-Walled Structures*, 2023, 184: 110457.
- [2] Liu X C, Wu X T, Wang Y, et al. Seismic performance of bolted connection between H-section beam and SST column welded with inclined braces [J]. *Journal of Building Engineering*, 2022, 61: 105270.
- [3] Dissanayake M, Nguyen H, Poologanathan K, et al. Prediction of shear capacity of steel channel sections using machine learning algorithms [J]. *Thin-Walled Structures*, 2022, 175: 109152.
- [4] Abedrabbo A F, Osorio J C, Abolghasem S, et al. Predicting subgrain size and dislocation density in machining-induced surface microstructure of nickel using supervised model-based learning [J]. *Materials Today Communications*, 2022, 30: 103162.
- [5] Meade E D, Sun F W, Tiernan P, et al. A multiscale experimentally-based finite element model to predict microstructure and damage evolution in martensitic steels [J]. *International Journal of Plasticity*, 2021, 139: 102966.
- [6] Dong X Y, Shin Y C. Predictive modeling of microstructure evolution within multi-phase steels during rolling processes [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2019, 150: 576–583.
- [7] Ling Y, Ni J Y, Antonissen J, et al. Numerical prediction of microstructure and hardness for low carbon steel wire arc additive manufacturing components [J]. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2023, 122: 102664.
- [8] Srivastava A, Sinha A N, Verma S K. A mini-review on numerical approach of microstructure prediction in eutectoid steel [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2022, 50: 2241–2248.
- [9] Chegini A M, Ghavami B, Eftekhari M. A GPU-based accelerated ELM and deep-ELM training algorithms for traditional and deep neural networks classifiers [J]. *Intelligent Systems with Applications*, 2022, 15: 200098.
- [10] Wang S, Li J, Zuo X W, et al. An optimized machine-learning model for mechanical properties prediction and domain knowledge clarification in quenched and tempered steels [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 24: 3352–3362.
- [11] Ganguly S, Wang X, Chandrashekhara K, et al. Modeling and simulation of mass flow during hot rolling low carbon steel I-beam [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, 64: 285–293.
- [12] Zhang T, Gao D Y. Tensile behavior analysis and prediction of steel fiber-reinforced-carbon/glass hybrid composite bars [J]. *Journal of Building Engineering*, 2023, 64: 105669.
- [13] 李东宽, 郭岩, 杨立新, 等. TC4 钛合金两相区的热变形行为及微观组织 [J]. *铸造技术*, 2022, 43 (2): 114–119.
Li D K, Guo Y, Yang L X, et al. Thermal deformation behavior and microstructure of TC4 titanium alloy in two-phase region [J]. *Foundry Technology*, 2022, 43 (2): 114–119.
- [14] Zhang X G, Ren Y J, Zhang J, et al. Effects of prior austenite grain size on reversion kinetics of different crystallographic austenite in a low carbon steel [J]. *Materials Characterization*, 2022, 190: 112025.

警惕不法网站, 保障投稿安全

近期, 本刊接到多名作者投诉, 网络上出现冒充《锻压技术》杂志官方网站的伪网站, 如 www.dyjszz.cn, 这些网站盗用本杂志官网内容及相关行业信息, 误导和欺骗广大投稿作者, 骗取文章版面费、套取作者文章及个人信息, 侵犯了广大作者的切身利益。

特此声明, 本刊唯一官方网站为 www.fstjournal.net, 投稿方式为网站注册登录投稿, 不接受邮箱投稿。请作者投稿时务必认准杂志官方网站, 谨防受骗。

本刊郑重警告伪网站相关人员尽快停止违法行为, 否则将严肃对待, 并将运用一切法律手段维护本刊的权利。

请广大读者协助本刊监督网络上的不法行为, 一经发现, 请联系本刊, 本刊将及时处理, 共同努力营造良好的期刊网络氛围。

《锻压技术》杂志联系方式: fst@263.net; 010-62920652。

《锻压技术》编辑部