

核动力工程  
*Nuclear Power Engineering*  
ISSN 0258-0926, CN 51-1158/TL

## 《核动力工程》网络首发论文

题目: 基于人工神经网络的 RPV 材料辐照脆化预测模型研究  
作者: 康靛, 孙凯, 米晓希, 吴璐, 毛建军, 张烁, 雷阳, 潘荣剑, 汤爱涛  
收稿日期: 2019-11-21  
网络首发日期: 2020-10-12  
引用格式: 康靛, 孙凯, 米晓希, 吴璐, 毛建军, 张烁, 雷阳, 潘荣剑, 汤爱涛. 基于人工神经网络的 RPV 材料辐照脆化预测模型研究. 核动力工程.  
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1158.TL.20201011.0832.002.html>



**网络首发:** 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认:** 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

# 基于人工神经网络的 RPV 材料 辐照脆化预测模型研究

康 靛<sup>1</sup>, 孙 凯<sup>2</sup>, 米晓希<sup>1</sup>, 吴 璐<sup>2</sup>, 毛建军<sup>2</sup>,  
张 烁<sup>2</sup>, 雷 阳<sup>2</sup>, 潘荣剑<sup>2</sup>, 汤爱涛<sup>1</sup>

1. 重庆大学材料科学与工程学院, 重庆, 400044; 2. 中国核动力研究设计院, 成都, 610213

**摘要:** 在分析一定量随站测试样品的基础上, 构建了具有较高精度的反应堆压力容器 (RPV) 材料韧脆转变温度 (DBTT) 预测的人工神经网络模型, 并利用模型研究了中子注量和中子注量率对 RPV 材料 DBTT 的影响。结果表明, 材料 DBTT 随着中子注量增加出现先线性上升, 然后平缓上升, 最后饱和的趋势, 而中子注量率对 RPV 材料辐照脆化的影响不明显。

**关键词:** 反应堆压力容器 (RPV); BP 神经网络模型 (BP-ANN); 辐照脆化; 韧脆转变温度 (DBTT)

**中图分类号:** TL351.6; TP183 **文献标志码:** A

## Research on Prediction Model of Irradiation Embrittlement of RPV Materials Based on Artificial Neural Network

Kang Jing<sup>1</sup>, Sun Kai<sup>2</sup>, Mi Xiaoxi<sup>1</sup>, Wu Lu<sup>2</sup>, Mao Jianjun<sup>2</sup>, Zhang Shuo<sup>2</sup>,  
Lei Yang<sup>2</sup>, Pan Rongjian<sup>2</sup>, Tang Aitao<sup>1</sup>

1. School of Material Science and Technology, Chongqing University, Chongqing, 400044, China;

2. Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610213, China

**Abstract:** On the basis of analyzing a certain amount of test samples at the station, this paper constructs a high-precision artificial neural network model for the ductile-brittle transition temperature prediction of RPV materials. Then we use the model to explore the influence of neutron fluence and neutron fluence rate parameters on the ductile-brittle transition temperature of RPV materials. It is found that the ductile-brittle transition temperature increases linearly with the increase of neutron fluence, then rises slowly and finally saturate, and the effect of neutron flux rate on the embrittlement of RPV materials is not obvious.

**Key words:** RPV, BP neural network, Irradiation embrittlement, DBTT

### 0 引 言

反应堆压力容器 (RPV) 结构的完整性直接影响核电厂的运行安全以及经济效益。在核电厂运行期间, 长期高温、高压以及快中子辐照环境下运行的 RPV 会出现辐照脆化, 主要表现为材料韧脆转变温度 (DBTT) 的上升, 从而可能诱发脆性破坏<sup>[1]</sup>。可靠的 RPV 材料辐照脆化预测模型是保证现役核电厂安全运行、延寿以及开发新的 RPV 材料的关键。目前已有的经验性的数学模型

大都基于早期的监督数据, 已经不能很好地适用于国内 RPV 的辐照监督试验<sup>[2]</sup>。近年来, 人工神经网络因其具备强大的非线性拟合能力已经在材料领域得到广泛的应用, 国外也有关于人工神经网络用于 RPV 材料以及聚变堆候选材料的辐照脆化以及硬化预测的报道<sup>[3-7]</sup>, 并取得了较好的结果。

本文基于已收集的国内核电厂随堆辐照数据, 从材料因素、辐照环境2个方面考虑RPV的辐

收稿日期: 2019-11-21; 修回日期: 2020-08-01

作者简介: 康 靛 (1995—), 男, 硕士研究生, 主要从事人工神经网络及其在材料科学中的应用研究, E-mail:1059204078@qq.com

照脆化,通过人工神经网络模型预测的材料转变温度的特征值减去输入的材料初始转变温度特征值得到材料冲击吸收功为56 J所对应的转变温度特征量( $\Delta T_{56J}$ )、侧膨胀量为0.89 mm所对应的转变温度特征量( $\Delta T_{0.89mm}$ ),取两者变化的较大值作为材料的DBTT变化值(即 $\Delta RT_{NDT}$ ),从而得到具有高精度的RPV辐照脆化预测模型。

## 1 模型构建

误差逆向传播的神经网络模型(BP-ANN)<sup>[8]</sup>是目前应用最为广泛的机器学习模型,由输入层、隐层(中间层)以及输出层组成,不同层之间通过权值、阈值和传递函数进行连接。本文选取单隐层的BP-ANN用于描述RPV材料的辐照脆化关系,模型的输入参量为Mn、P、Cu、Ni、Si 5种元素的质量分数、中子注量、中子注量率、辐照时间、辐照温度以及冷态试样的初始转变温度特征值,模型的输出为辐照后材料的转变温度特征值( $T_{56J}$ 、 $T_{0.89mm}$ )<sup>[8-9]</sup>。BP神经网络模型示意图如图1所示。

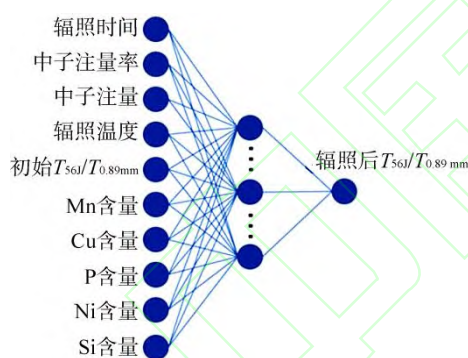


图1 BP神经网络模型示意图

Fig.1 Schematic Diagram of BP Neural Network Model

神经网络输入层不同节点之间的维度相差较大,为了保证网络的收敛性,把神经网络的输入输出数据都归一化到 $[-1, 1]$ ;输入层与隐层之间的传递函数选择  $\text{tansig}$ ,隐层与输出层之间的传递函数选择  $\text{purelin}$ ;学习函数选择贝叶斯正则化算法  $\text{trainbr}$ 。神经网络隐层节点数是影响网络性能的最重要因素,本文基于交叉验证的方法将数据分为训练集和测试集,其中训练集用于模型的构建和神经网络权值与阈值的训练;测试集用于模型泛化能力的评价,测试集不参与训练过

程,平均均方根误差(RMSE)用于衡量神经网络模型的精度。通过变化神经网络隐层的节点数,得到一系列网络模型,采取多次训练以及交叉验证的方式得到RMSE, RMSE用于评价神经网络隐层节点数对网络性能的影响。用上述方法得到的RMSE与网络隐层节点数( $N$ )之间的关系如图2所示。一般在精度相同的情况下,选取尽可能少的神经元来构建模型,可使模型更为简单从而提升其泛化能力。因此,对于RPV材料特征值 $T_{56J}$ 预测的神经网络模型隐层节点数选择15,模型结构为10-15-1,对特征值 $T_{0.89mm}$ 预测的神经网络模型隐层节点数选择19,模型结构为10-19-1。

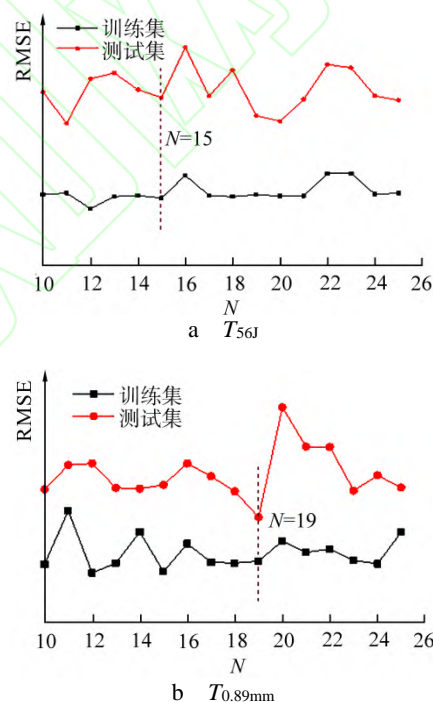


图2 训练集与测试集的RMSE随隐层节点数变化趋势

Fig.2 RMSE of Training Set and Test Set Changes with Number of Hidden Layer Nodes

## 2 模型评价及应用

通过选择较优的隐层节点数得到了RPV材料 $T_{56J}$ 、 $T_{0.89mm}$ 两个DBTT特征值的预测模型,基于已有的材料成分、辐照环境与辐照后材料韧脆转变温度特征值之间的关系数据,比较了构建的BP-ANN模型预测值与法国RSEM规范中的FIS公式预测结果与真实结果之间的误差和拟合度,如表1所示。从表1中可以看出,对于现有

的辐照监督数据，相比于 FIS 公式，BP-ANN 模型拟合精度更高。

表 1 BP-ANN 与 FIS 公式拟合效果比较			
Table 1 Fitting Effect of BP-ANN and FIS Formula			
模型	RMSE	MAE	$R^2$
BP-ANN	5.36	4.23	0.82
FIS	24.07	22.22	0.69

MAE—平均绝对误差； $R^2$ —相关系数

通过在一定范围内均匀变化中子注量参数，中子注量率、Ni、Cu、P、S、Si 元素含量、辐照温度 7 个参数取数据集中相应的平均值，材料的初始转变温度特征值设定为  $-45^{\circ}\text{C}$ ，利用已构建的 2 个 BP-ANN 模型仿真得到  $\Delta RT_{\text{NDT}}$  随中子注量的变化关系，同时计算了相同参数下 FIS 预测公式的预测值，模型与公式的趋势比对如图 3 所示。从图 3 中可以看出，随着中子注量的累计，RPV 材料的  $\Delta RT_{\text{NDT}}$  呈现出先线性上升，然后缓慢上升，最后趋于平缓的趋势，在累计中子注量达到  $10^{23}\text{cm}^{-2}$  时，RPV 材料的辐照脆化趋势趋于平坦，达到辐照饱和。已有研究表明，这是由于基体缺陷在辐照到一定的程度后，空位和间隙原子的复合概率增加，同时 Cu 原子析出接近饱和，所以会出现脆化峰值。BP-ANN 的外推结果与文献[10]中提到的中子注量为  $10^{23}\text{cm}^{-2}$  时的饱和辐照剂量较为一致，同时在基于数据集各特征取均值所对应的辐照环境下，BP-ANN 模型给出的预测趋势与 FIS 公式的预测趋势较为一致。

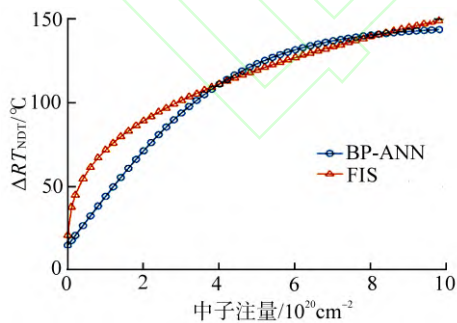


图 3  $\Delta RT_{\text{NDT}}$  随辐照时间与中子注量的关系  
Fig.3 Embrittlement Shift Variation Expressed as Function of Interactions of Irradiation Time and Flux

通过一定范围内均匀变化中子注量和中子注量率 2 个参数，其中辐照时间取中子注量与注量率的商，其他输入参数取原始数据的平均值，

然后利用训练好的模型拟合出  $\Delta RT_{\text{NDT}}$  随中子注量和中子注量率的变化趋势，如图 4 所示。从图 4 中可以看出，随着中子注量的增加， $\Delta RT_{\text{NDT}}$  先线性增加，然后逐渐趋于平缓，最后达到饱和。中子注量率对  $\Delta RT_{\text{NDT}}$  影响较小，只是略微增加 RPV 材料的脆化趋势，这与 Kasada<sup>[11]</sup>等人研究中给出的当中子注量率小于  $10^{12}\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ，中子注量率对 RPV 材料的辐照影响不明显的结论相符合。考虑到现有的商用堆辐照监督试验都是基于辐照监督管的检测报告来超前预测 RPV 材料的性能变化，为了监测其在更长运行周期内的性能变化，从中子注量率的影响来看，可以考虑适当提高监督管的超前因子。

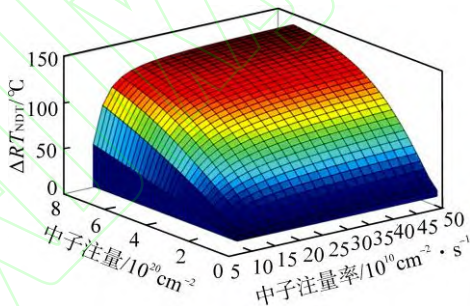


图 4 随中子注量与中子注量率的关系  
Fig.4 Embrittlement Shift Variation Expressed as Function of Interactions of Fluent and Flux

### 3 结 论

本文利用已有的国内核电厂的辐照监督数据，通过参数优化的神经网络方法，建立了中子注量、注量率、辐照时间、辐照温度、材料原始成分等因素与材料的韧脆转变温度特征值  $T_{56J}$  和  $T_{0.89\text{mm}}$  关系的 BP-ANN，模型结构分别为 10-15-1 和 10-19-1。基于现有的数据集，相比于经验公式 FIS，BP-ANN 模型预测精度有了很大的提升，RMSE 为 5.36，MAE 为 4.23， $R^2$  为 0.82，实现了对现有的数据较好的拟合。同时，通过模型分析了不同辐照因素对 RPV 材料  $\Delta RT_{\text{NDT}}$  的影响，发现 RPV 母材  $\Delta RT_{\text{NDT}}$  随着中子注量的增加呈现出上升—平缓—饱和的趋势，而中子注量率的影响不明显，为核电厂的延寿以及 RPV 材料的辐照监督给出了一定的参考价值。

参考文献：  
[1] 孙凯，冯明全，李国云，等. 反应堆压力容器材料中



- 
- 子辐照脆化研究[J]. 核动力工程, 2017, 38(S1): 125-128.
- [2] 佟振峰, 林虎, 宁广胜, 等. 低铜合金反应堆压力容器钢辐照脆化预测评估模型[J]. 原子能科学技术, 2009, 43(S1): 103-108.
- [3] MATHEWA J, PARfITTA D, WILFORD K. Reactor pressure vessel embrittlement: Insights from neural network modelling[J]. Journal of Nuclear Materials, 2018, 502(S1): 311-322.
- [4] CASTINA N, MALERBAA L, CHAOUADIA R. Prediction of radiation induced hardening of reactor pressure vessel steels using artificial neural networks[J]. Journal of Nuclear Materials, 2011, 408(S1): 30-39.
- [5] COTTRELL G A, KEMP R. Neural network analysis of Charpy transition temperature of irradiated low-activation martensitic steels[J]. Journal of Nuclear Materials, 2007, 367-370(SPEC. ISS.): 603-609.
- [6] KEMPA R, COTTRELL G A, BHADSHIA H K D H. Neural-network analysis of irradiation hardening in low-activation steels[J]. Journal of Nuclear Materials, 2006, 348(S1): 311-328.
- [7] MATHEWA J, PARfITTA D, WILFORD K. Reactor pressure vessel embrittlement: Insights from neural network modelling[J]. Journal of Nuclear Materials, 2018, 502(S1): 311-322.
- [8] 潘文婵, 刘尚东. BP 神经网络的优化研究与应用[J]. 计算机技术与发展, 2019, 29(05): 74-76, 101.
- [9] 蒋国富, 伍晓勇, 李国云, 等. 秦山第二核电厂 1 号机组压力容器材料辐照脆化评价[C]. 中国核学会核材料分会 2007 年度学术交流会论文集. 北京: 中国核学会核材料分会中国核学会, 2007.
- [10] 王荣山, 徐超亮, 刘向兵, 等. 反应堆压力容器钢辐照脆化的影响因素分析[J]. 中国冶金, 2014, 24(7): 7-11, 32.
- [11] KASADA R, KUDO T, A KIMURA. Effects of neutron dose, dose rate, and irradiation temperature on the irradiation embrittlement of a low copper reactor pressure vessel steel[J]. Journal of ASTM International, 2005, 2(3): 1-11.
- (责任编辑: 张明军)