**背景介绍**

镍基高温合金具有优异的耐高温、抗氧化、耐腐蚀性能，在航空航天中被广泛使用。涡轮盘、叶片、燃烧室机匣及火焰筒等关键结构普遍采用GH4169材料制造。电子束焊接（EBW）技术具有能量密度高、效率高的特点，因此，其在航空发动机燃烧室机匣、火焰筒等关键结构中得到了广泛的应用。GH4169焊接接头通常在高温和交变载荷的工况下服役，有必要对其疲劳性能进行研究。然而，在焊接过程中，缺陷的存在是不可避免的，许多研究表明，缺陷作为疲劳裂纹源决定了材料的疲劳强度。缺陷的存在会显著降低材料、结构的抗疲劳性，并导致疲劳寿命分散性的显著提升。因此，如何将缺陷的影响考虑到结构的寿命评估中是焊接结构寿命评估的难点之一。

机器学习作为一种数据分析、处理的方法，在疲劳领域内的应用也越来越广泛，纯数据驱动方法被显示出研究复杂工程问题的潜力，特别是在多变量影响和多因素耦合情况下识别关键特征方面。许多机器学习（Machine learning, ML）模型，如人工神经网络（Artificial Neural Network, ANN）、随机森林（Random Forests, RF）、支持向量机（Support Vector Machine, SVM）等已初步应用于疲劳寿命预测。本研究采用SVR模型对GH4169焊接接头疲劳寿命进行预测。

**模型介绍**

支持向量回归（SVR）是一种监督学习算法，它是基于支持向量机（SVM）分类模型的扩展，专门用于回归问题[39]。相比其他回归方法，SVR在泛化能力方面具有更大的潜力，特别是在处理小样本训练数据时。这种策略使得SVR在处理具有复杂结构和噪声的数据时表现出色。该算法的结构如图2所示，图中展示了SVR在建模过程中的基本架构。通过利用支持向量，SVR能够更好地捕捉数据的复杂关系，使其成为处理非线性回归问题的有力工具。

****

Fig. 1. The structure of the SVR model.

作为一种优化算法，SVR通常定义一个e区域，以最小的结构风险和经验风险组合获得最平坦的超平面，同时平衡模型复杂度，SVR模型的标准形式为：



其中，*x*为输入特征向量，*ω*为权重向量，*b*为偏移项。

目标函数，即结构风险和经验风险，可以表示为：

****

****

其中，*xi* 为输入特征向量，*yi*为回归函数估计的输出向量，*ω*为权重系数*，b* 为偏置项，*Φ(xi)*为非线性函数，*C*为正则化系数，*ε* 为不敏感损伤函数，*ζi , ζi\**为松弛变量。

根据Karush-Kuhn-Tucker条件，由拉格朗日函数转化为对偶优化问题：





其中*αi, αi\**为拉格朗日乘数，引入*κ(xi, xj)*为核函数，得到SVR回归函数：



本研究采用高斯径向基函数（RBF）核进行非线性支持向量回归（SVR）建模[32]，该核函数的表达式如下：



SVR中有三个需调整的超参数，即正则化系数*C*、损耗系数*ε*和径向基函数参数*γ*，选择适当的超参数对模型训练效果很重要，后面将在模型训练过程中介绍。

**模型训练过程**

首先对输入变量进行归一化处理，将数据集输入变量标准化为[0,1]区间内，以消除原始数据集的范围的差异。



其中，*X*为归一化后的参数值，*X*max和*X*min是输入参数的最大值和最小值。数据集的输出变量为疲劳寿命*N*，其分布范围在103-106之间，将其取对数，有助于机器学习模型进行分析，并与后续模型预测的寿命进行比。



其中，*N*为取对数后的疲劳寿命值，*Nf*是初始的疲劳寿命值。

本研究将数据集的70%划分为训练集和验证集，30%作为测试集。为确保实验的可重复性，所有模型都使用相同的Random state参数，保证同一类型的拆分组合对应相同的随机状态参数。

在训练过程中，使用K折交叉验证划分训练集和验证集。采用贝叶斯优化算法结合K折交叉验证对超参数即*C*、*ε*和*γ*进行优化，防止ML模型过度拟合，以确保预测模型的准确性和泛化性能。模型首先在训练集上进行拟合，以优化模型中的超参数，随后，验证集被用于调整超参数，并对训练数据集上的模型拟合提供无偏评估。在获得最佳的超参数后，在独立测试数据集上检查模型，以评估训练后的SVR模型的泛化能力。

**模型评价指标**

为了从多个角度对模型的预测结果评估和比较，引入决定系数R2、平均误差MAE、均方误差MSE、均方根误差RMSE对模型预测性能进行量化。以下为模型公式：

1. 决定系数（R2）



1. 平均误差（MAE）



1. 均方误差（MSE）



1. 均方根误差（RMSE）



其中，*yi*为实验寿命，*y*为预测寿命，为实验寿命的平均值，*N*为样本的数量。决定系数R2越接近1，表示模型预测精度越高，MAE值则反映了预测值和实验值的总偏差、MSE值反映了模型的泛化能力、RMSE反映预测误差的波动。将实验获得的疲劳寿命与模型预测得到的寿命进行对比分析，主要采用上述评价指标中的R2值和MSE值，这两项指标分别反映了模型的预测结果的准确性和模型的泛化能力。

**模型预测结果**

SVR模型对GH4169焊接接头的寿命预测结果如图2所示，2倍误差带以外的点有2个，决定系数R2为0.8995。



Fig. 2 Predicted results of SVR model.