力学所提出适用于描述核用钢高温循环应力松弛的新本构模型

作者：writer 来源：中国科学院

本文原地址：https://www.iikx.com/news/progress/24459.html

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

高温结构材料在先进核反应堆的发展中扮演着重要角色，因此对其进行精确的安全评估至关重要。然而，现有的弹性评估方法过于保守，难以适用于先进核反应堆的结构安全评估，亟需开发更为准确的“非弹评估方法”。非弹评估方法的核心之一是开发高温非弹本构模型，以描述结构材料在复杂加载条件下的高温变形行为。高温环境下，结构材料不仅会经历单向或循环的塑性变形，而且会受到蠕变以及蠕变与塑性变形之间相互作用的影响。虽然现有的高温本构模型能够较好地描述单独的塑性变形或蠕变，但关于蠕变与塑性变形之间的相互作用的描述仍具有挑战性。

中国科学院力学研究所研究员刘小明团队提出了在统一型本构模型框架下的新模型。该模型基于松弛过程变形机制，首次将时间因素引入随动硬化模型的静态恢复项，实现了对不同循环周次以及长周期应力松弛曲线的准确预测。此外，该工作给出了标定本构模型参数的有效方法，其成果有望应用于“非弹评估方法”。

该工作克服的难点在于如何改进已有的Chaboche本构模型，以描述不同加载周次和持续时间下的松弛现象。结构金属材料在高温松弛过程中位错会发生静态恢复，导致位错密度降低以及对应应力水平下降。在经典的Chaboche模型中，静态恢复项被用来描述应力松弛现象。然而，由于静态恢复项的参数是常数，经典的Chaboche模型无法准确描述应力松弛随着循环周次变化的关系。为了解决这一问题，前人将静态恢复项的参数变为累积塑性应变的函数，以更好地描述应力松弛的变化关系。然而，这一改进后的本构模型仍无法有效地描述长周期的松弛现象。为了克服这一挑战，该工作提出了引入时间因素的本构模型。

模型改进。在基于松弛过程的物理变形机制的基础上，研究对随动硬化方程的静态恢复项进行了改进，引入了时间的影响。金属材料在高温下的应力松弛与静态恢复密切相关，其主要物理机制包括高温下位错的攀移和热激活位错的滑移。从动力学角度来看，在位错松弛过程中的演化规律与初始位错密度有关，亦与演化时间相关。因此，在宏观力学响应方面，松弛应力与累积塑性应变相关，也与时间相关。基于此，研究将静态恢复项的参数设置成与累积塑性应变和松弛时间相关的函数。这一改进可更准确地反映金属材料在高温条件下的应力松弛行为，从而提高模型的可预测性和适用性。

参数
标定。在
本构模型中，静态
恢复相关参数的标定通常采用传统的

“试错法”。然而，该团队提出的本构模型涉及多个静态恢复相关参数，且这些参数之间相互耦合，而传统的试错法已无法满足标定的需求。因此，该团队引入了机器学习的方法，并在贝叶斯反演的框架下，利用循环应力松弛和长时间应力松弛试验的结果，获得了相应的参数值。如图1所示，通过贝叶斯反演获得的参数值能够描述不同循环次数和长周期下的应力松弛响应。这一方法能够更精确地确定模型参数，提高模型的准确性。

为了验证该团队提出的本构模型在“非弹性评估”中的适用性，科研人员将模型在多轴加载条件下的计算结果与实验结果进行比较。如图2所示，该研究使用缺口试样进行了复杂加载路径下的对比，而图3展示了棒状材料在拉伸和扭转加载下的对比结果。该工作开发的本构模型能够准确地描述材料在多轴应力状态下的高温变形行为。

相关研究成果以*Machine learning informed visco-plastic model for the cyclic relaxation of 316H stainless steel at 550°C*为题，发表在*International Journal of Plasticity*上。研究工作得到国家自然科学基金基础科学中心项目“非线性力学中的多尺度问题”和中国科学院青年创新促进会的支持。

论文链接

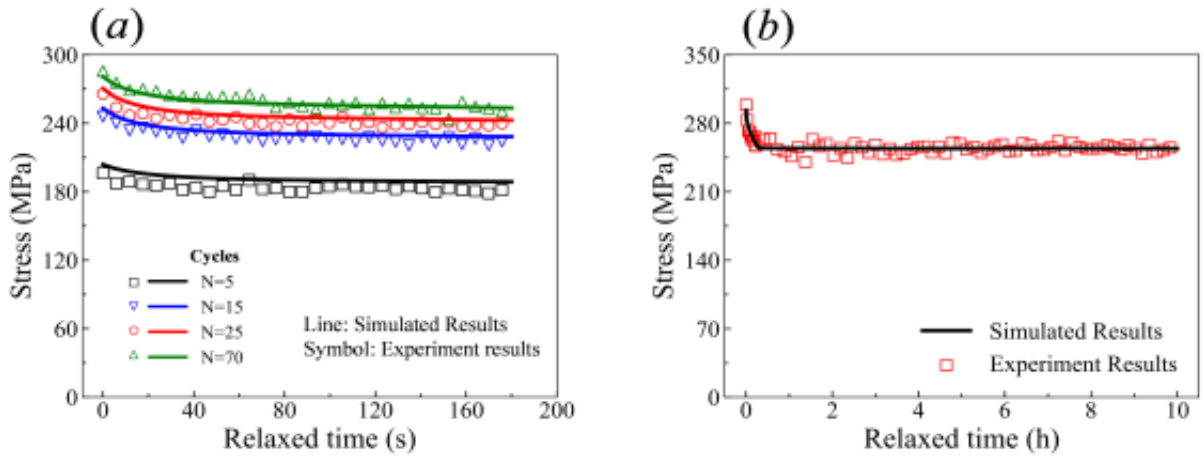


图1. 模型与试验结果对比：（a）循环保载下不同循环周次的松弛曲线；（b）200周次低周疲劳后长时松弛曲线。

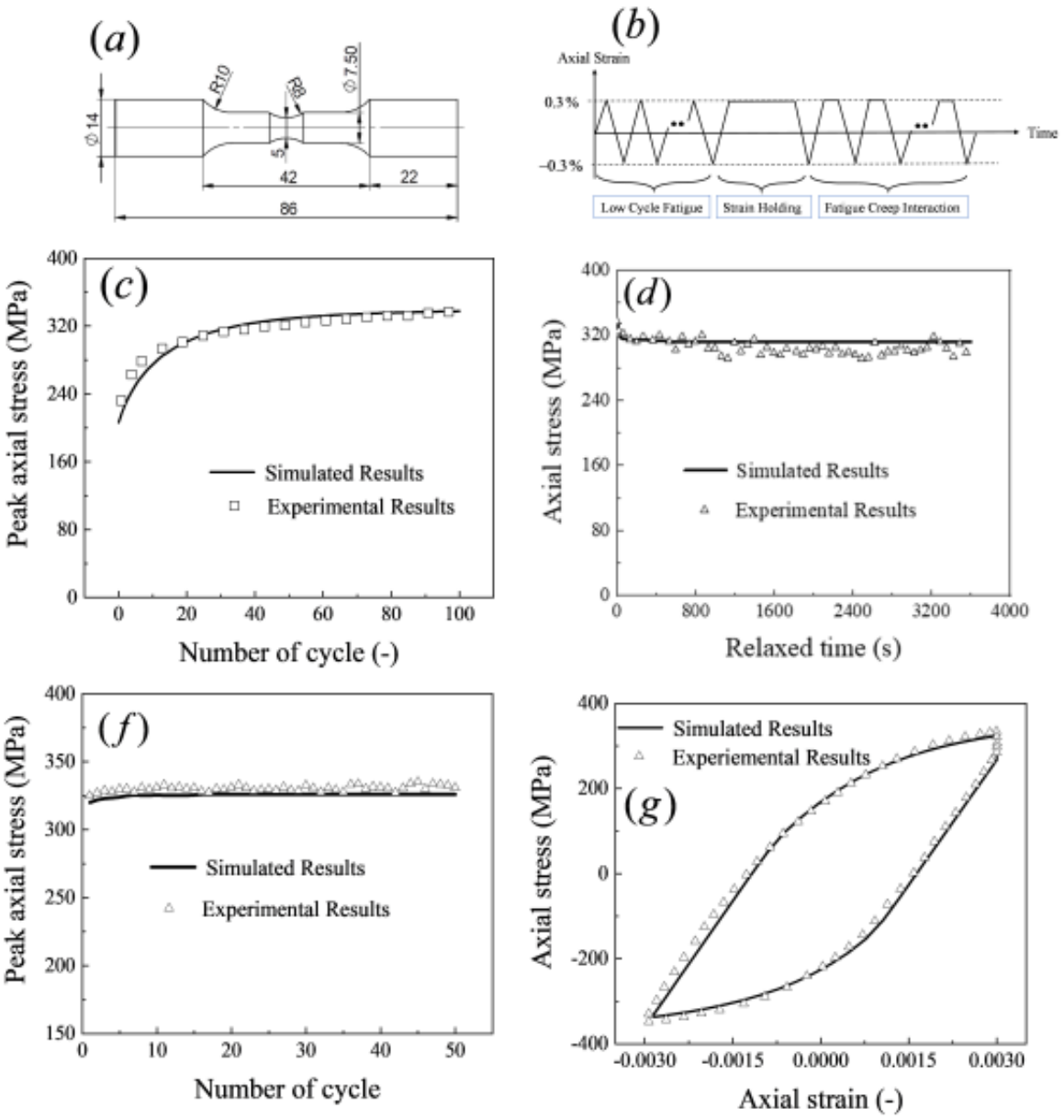


图2. 缺口试样模型与试验结果对比：（a）试样尺寸；（b）加载条件；（c）低周疲劳阶段峰值应力演化；（d）长时保载阶段应力松弛；（f）循环保载阶段峰值应力演化；（g）循环保载阶段稳定时滞回曲线。

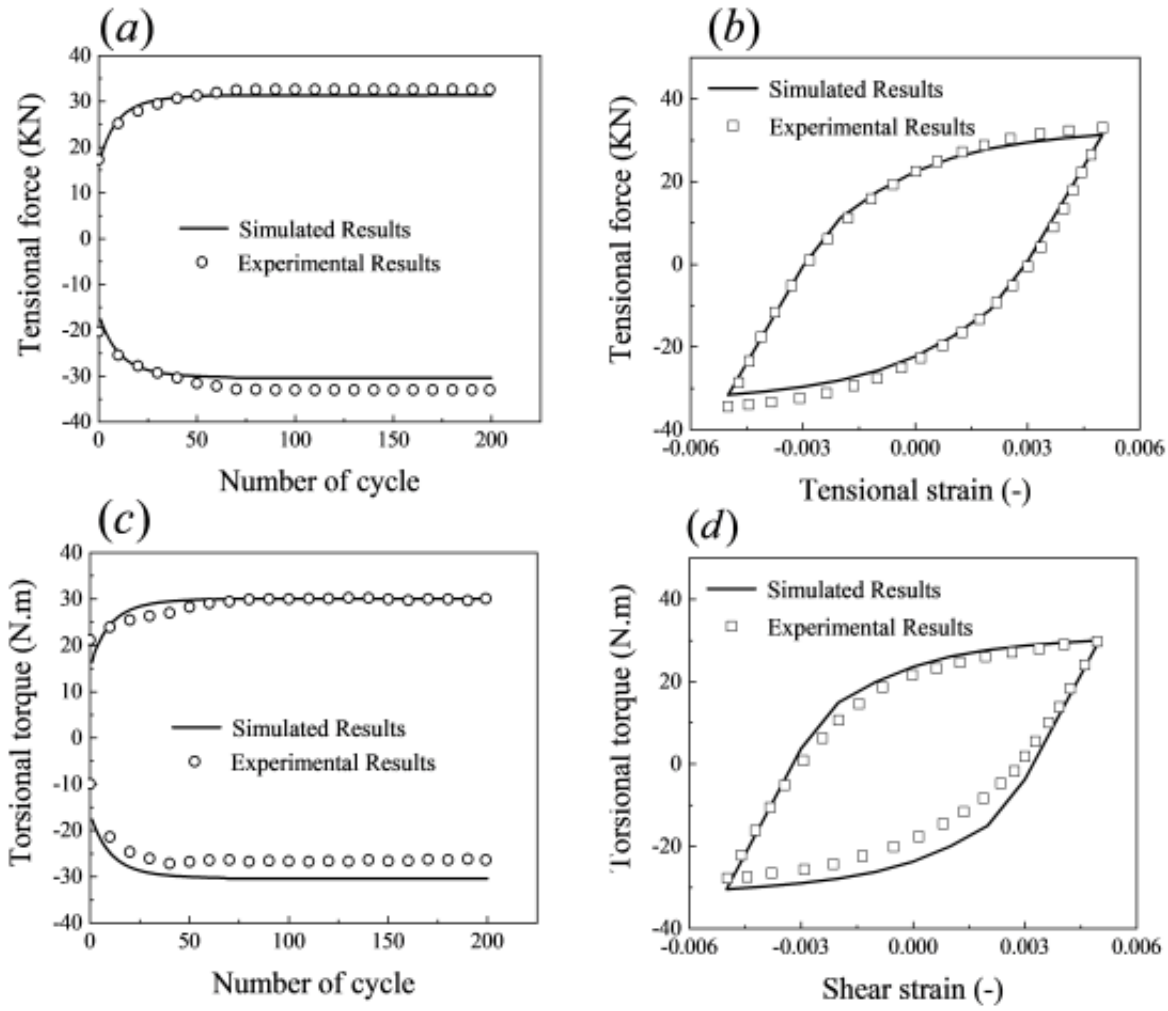


图3. 循环拉扭加载模型与试验结果对比：（a）轴向加载峰谷值演化；（d）轴向稳定时滞回曲线；（c） 扭向加载峰谷值演化；（g）扭向稳定时滞回曲线。

研究团队单位：力学研究所

更多 科学进展 请访问 https://www.iikx.com/news/progress/

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，爱科学iikx.com转发