

doi:10.3969/j.issn.2095-0411.2019.05.010

# 基于多截面试样对 316L 不锈钢高温蠕变特征研究

彭 剑<sup>1,2</sup>, 彭 健<sup>1</sup>, 李凯尚<sup>1</sup>

(1. 常州大学 机械工程学院, 江苏 常州 213164; 2. 江苏省绿色过程装备重点实验室(常州大学), 江苏 常州 213164)

**摘要:**通过多截面试样蠕变实验方法对 316L 奥氏体不锈钢 600 °C 蠕变行为进行研究,并基于多截面蠕变实验结果,结合复合时间硬化蠕变本构模型、反向有限元方法以及神经网络方法,建立了 316L 奥氏体不锈钢蠕变本构模型。该蠕变本构模型预测的蠕变曲线与标准蠕变实验方法得到的蠕变曲线吻合。多截面蠕变实验方法能够通过单根多截面蠕变实验获得多载荷下的蠕变实验结果,从而提高蠕变实验效率。

**关键词:**316L 奥氏体不锈钢;多截面试样;蠕变;反向有限元

**中图分类号:**TG 115.5

**文献标志码:**A

**文章编号:**2095-0411(2019)05-0063-07

## Creep Characteristics of 316L Stainless Steel at Elevated Temperature Based on Multi-Section Specimen

PENG Jian<sup>1,2</sup>, PENG Jian<sup>1</sup>, LI Kaishang<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Green Process Equipment, Changzhou University, Changzhou 213164, China)

**Abstract:** The creep behavior of 316L austenitic stainless steel at 600 °C was studied by multi-section creep test. Based on the experimental results, the creep constitutive model of 316L austenitic stainless steel was established by considering the combined time hardening creep constitutive model, the inverse finite element method and the neural network method. The creep curves predicted by the creep constitutive model agree with the ones obtained from the standard creep test method. Therefore, the multi-section creep test can obtain the creep results under multiple loads through a single specimen and get higher creep experimental efficiency.

**Key words:** 316L austenitic stainless steel; multi-section specimen; creep; inverse finite element method

**收稿日期:**2018-11-07。

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(51505041);江苏省高校自然科学基金项目(16KJB460002)。

**作者简介:**彭剑(1987—),男,江苏常熟人,博士,讲师。E-mail: joepengjian@163.com

**引用本文:**彭剑,彭健,李凯尚. 基于多截面试样对 316L 不锈钢高温蠕变特征研究[J]. 常州大学学报(自然科学版), 2019,31(5):63-69,86.

材料在高温下会产生与时间相关的蠕变变形行为,造成材料蠕变损伤,引起结构的蠕变失效<sup>[1]</sup>。蠕变本构模型能够定量地表征蠕变应变与温度、应力、时间三者之间的关系,可用于高温设备的设计和寿命预测。蠕变本构模型的构建需要基于多温度多载荷下的标准蠕变实验得到的蠕变应变-时间曲线计算出蠕变模型参数<sup>[2-3]</sup>。因此,为了研究材料的蠕变行为、蠕变损伤、蠕变本构模型以及蠕变寿命预测方法,蠕变实验研究是重要而基本的方法。标准蠕变实验方法通过施加恒定蠕变载荷或者恒定蠕变应力进行长时蠕变实验获得材料在特定温度以及特定载荷下的蠕变应变曲线。标准蠕变实验方法实验结果准确,数据处理简单,应用广泛。但是基于标准蠕变实验方法获得材料的蠕变特征,需要在各个应力条件下开展系统的蠕变实验,需要的实验材料多,实验周期长。

为了提高蠕变实验的效率,研究人员开发了一些新型的蠕变实验方法来研究材料的蠕变行为。目前,以小冲孔方法和纳米压痕法为代表的微试样方法在蠕变研究中得到了应用。Chakrabarty 等<sup>[4]</sup>和 Yang 等<sup>[5]</sup>提出了小冲孔实验载荷与变形的理论模型,并建立了小冲孔蠕变试样中心变形与等效应变的关系及小冲孔施加载荷与等效应力的关系。纳米压痕测试方法<sup>[6-8]</sup>可以在不破坏服役构件的前提下获得压头加载和卸载时的载荷和位移数据,并且在微小蠕变行为的研究中具有优势。但微试样的制备比常规试样困难,存在的影响因素较多,并且无法直接通过实验获得蠕变应变与时间的关系。研究人员<sup>[9-10]</sup>通过相续蠕变方法利用单根蠕变试样的阶梯加载获得不同载荷下的蠕变应变时间曲线,可以有效提高实验效率。但该方法无法获得恒定载荷和温度下完整的蠕变曲线,且试验后的试样无法进行微观分析。钟万里等<sup>[11]</sup>提出一种变应力金属高温时效老化测试方法,这种方法利用变截面试样研究材料在高温时效老化试验后各截面微观组织的变化规律,实现了利用单根试样获得不同载荷水平的微观组织演化规律。但是该方法仅分析了材料的微观组织变化,尚未涉及通过多截面试样获取材料的蠕变力学特征。

由于在多截面蠕变实验过程中包含了多种载荷下的蠕变行为,因此将各载荷的蠕变曲线从总蠕变变形曲线中进行分解是需要解决的关键问题。文章以 316L 奥氏体不锈钢作为研究对象,分别采用标准蠕变实验方法和多截面蠕变实验方法进行蠕变实验研究。在此基础上结合复合时间硬化蠕变本构模型以及反向有限元方法构建 316L 的蠕变本构模型。最后将基于蠕变本构模型预测的蠕变曲线与标准蠕变实验结果进行对比,验证其有效性。

## 1 高温蠕变实验与实验结果

标准蠕变试样与多截面蠕变试样结构如图 1 所示,实验材料为 316L 奥氏体不锈钢。标准蠕变试样符合蠕变实验标准 GB/T 2039—1997《金属拉伸蠕变及持久试验方法》的要求。多截面蠕变试样的特点是试样由 4 个不同截面的平行段组成,各截面面积为:45,33,27,39 mm<sup>2</sup>,平行长度均为 20 mm,每段之间用半径为 25 mm 的圆弧过渡。实验过程中对试样两端施加一定的载荷,由于横截面积的不同,各截面所受到的应力产生差别,从而实现了单根试样获得不同应力的蠕变特征。实验试样利用线切割进行加工,线切割后对试样进行去应力退火热处理,去除试样在加工中产生的残余应力。并对试样的表面利用砂纸进行打磨去除热处理过程中产生的薄氧化层,同时也减少了试样表面因粗糙度不一致而产生的应力集中现象。

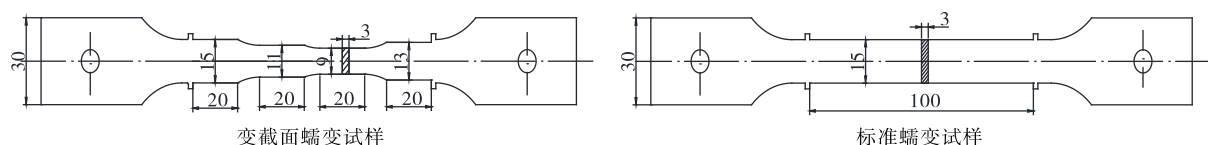


图 1 变截面试样与标准蠕变试样结构

多截面试样蠕变实验在电子式高温蠕变持久实验机上进行。为了在高温实验过程中试样各部分保持在恒定的温度进行,加载前需要保温 60 min。加载过程以恒定位移速率(0.6 mm/min)进行加载,当到达目标载荷后,开始高温蠕变实验。通过光栅尺记录蠕变实验过程中试样整体的蠕变位移-时间曲线。

在 600 °C 以及外加载荷 7 125 N 作用下,多截面试样的蠕变位移-时间曲线如图 2(a)所示,其中纵坐标是试样端部两光栅尺构架支撑之间的蠕变位移。可以发现,316L 奥氏体不锈钢多截面试样产生了显著的蠕变行为。需要注意的是本实验方法得到的蠕变位移-时间曲线与标准蠕变试样得到的蠕变应变-时间曲线不同,它包含了 4 种截面所对应的蠕变应变曲线的总和,如何将多截面试样的蠕变位移曲线中各截面的蠕变应变时间曲线分解出来获得各应力下的蠕变应变-时间曲线是需要解决的问题。

作为对照组,本研究基于标准蠕变实验方法对 600 °C 下,3 种应力水平下的标准蠕变试样进行了实验研究,实验条件与多截面试样的蠕变实验相同。标准蠕变实验获得的各应力条件下的蠕变应变-时间,如图 2(b)所示。从图中可以发现,600 °C 下 316L 不锈钢在各应力水平下的蠕变现象显著,并且蠕变特征与施加的应力大小存在正相关性。标准蠕变实验结果将用于验证多截面蠕变实验方法的有效性。

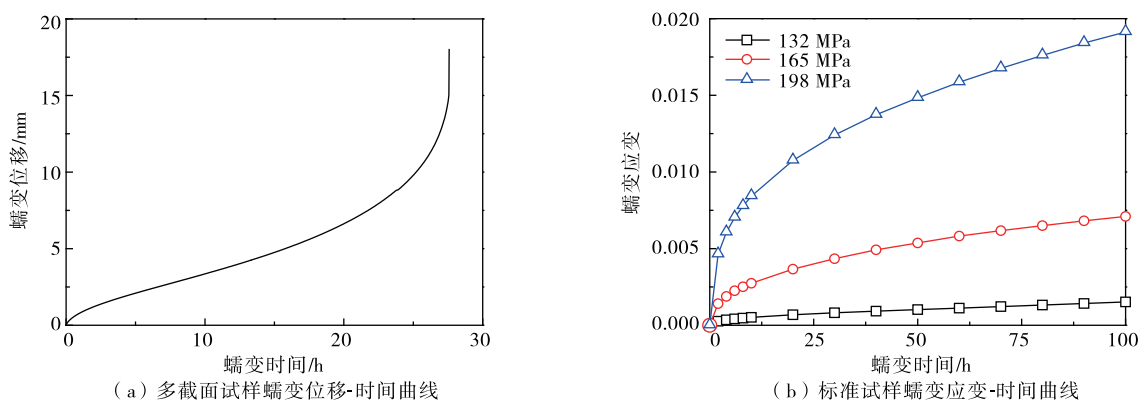


图2 基于2种蠕变方法的实验结果

## 2 基于多截面试样 316L 蠕变本构模型的构建

通过对 316L 奥氏体不锈钢的多截面蠕变实验研究虽然获得了蠕变位移-时间曲线,但是仍未能得到各应力下的蠕变曲线。为了解决这个问题,将采用反向有限元方法进行研究,获得 316L 的蠕变本构参量,然后通过蠕变本构模型预测各应力水平下的蠕变应变-时间曲线,最后将基于多截面试样获得的蠕变曲线与标准试样的蠕变曲线进行对比,从而验证方法的有效性。

### 2.1 多截面试样蠕变行为的反向有限元分析

反向有限元法是将未知的输入参量构造一系列参量的组合,然后根据这些参量的组合进行大量的有限元仿真,得到各组合参量对应的有限元仿真结果,并且结合神经网络方法得到有限元仿真结果与输入参量的对应关系,最后基于实验数据与有限元仿真结果进行比对,反向确定出有限元的输入参量<sup>[12-13]</sup>。

多截面试样蠕变行为反向有限元分析的目的是获取材料蠕变本构模型参量,因此在有限元仿真过程中需要选择合适的蠕变本构模型。蠕变行为主要包含 3 个蠕变阶段,即蠕变减速第 1 阶段、蠕变稳态第 2 阶段和蠕变快速失效第 3 阶段,在工程中蠕变第 2 阶段应用较广泛。为了简化分析过程,在研究过程中选择蠕变第 1 和第 2 阶段进行分析,并采用复合时间硬化模型进行有限元仿真。该模型综合了时

间硬化模型对于蠕变第 1 阶段的描述和 Norton 模型对于蠕变第 2 阶段的表征,如式(1)

$$\epsilon = C_1 \sigma^{C_2} t^{C_3+1} \exp(-C_4/T)/(C_3+1) + C_5 \sigma^{C_6} t \exp(-C_7/T) \quad (1)$$

式中:  $\epsilon$  为蠕变应变;  $C_1 \sim C_7$  为蠕变材料常数;  $\sigma$  为蠕变应力, MPa;  $t$  为蠕变时间, h。在此蠕变本构模型中需要确定 7 个未知蠕变参数, 这些未知参量成为反向有限元的输入参量。表 1 列出了式(1)中各蠕变参数的取值范围以及取值增量, 在各取值范围内等增量的取值。取值的间距越小, 反向有限元分析得到的参量越接近于真实值, 但随着间距的减小, 有限元的计算量增加, 需要耗费大量的计算时间建立蠕变曲线与蠕变参数的数据库。因此, 综合考虑计算精度与计算时效性, 对 7 个模型参数分别等间距取 8 个值进行分析, 则所有参数的组合共有  $8^7$  种。为了在不影响模型预测精度的前提下简化模型计算量, 采用 7 因素 8 水平的正交试验, 选择  $L_{64}(8^7)$  的正交表进行研究, 利用此正交试验方法仅需进行 64 次有限元分析即基于 64 组蠕变曲线可进行反向有限元分析。

表 1 复合时间硬化蠕变本构模型参数取值范围

参数	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	$C_6$	$C_7$
最小值	$1 \times 10^{-13}$	6.1	-0.8	11 000	$1.1 \times 10^{-15}$	6.1	31 000
最大值	$8 \times 10^{-13}$	6.8	-0.1	18 000	$1.8 \times 10^{-15}$	6.8	38 000
增量	$1 \times 10^{-13}$	0.1	0.1	1 000	$1 \times 10^{-16}$	0.1	1 000

有限元分析采用 ANSYS 有限元分析软件进行, 分析过程中考虑了材料的弹塑性本构关系即弹塑性拉伸应力应变曲线、复合时间硬化蠕变本构模型即式(1)进行多截面试样的蠕变有限元仿真。反向有限元分析过程中用到的弹塑性实验数据基于 316L 在 600 °C 下的拉伸实验获得; 反向有限元分析过程中用到的蠕变参量基于表 1 中的参量取值范围、增量以及正交试验方法进行确定。边界条件为: 在多截面蠕变试样模型一端截面施加全约束, 同时在模型另一端截面施加与蠕变实验相同的外加载荷 7 125 N, 此时试样的 4 个工作截面实际所受应力依次为: 158, 216, 264, 182 MPa。表 2 以 1 组复合时间硬化蠕变模型参数为例, 经过有限元仿真得到了多截面试样的应力云纹图和蠕变位移云纹图, 如图 3 所示。由图 3(a)可知在各截面均产生了蠕变现象, 蠕变现象的显著性与应力存在正相关, 同时由图 3(a)可知在各截面产生的蠕变现象在试样的蠕变位移中进行累积, 试样两端产生的蠕变位移为各截面蠕变位移的累加; 由图 3(b)可知不同工作截面所受的应力与理论计算的应力值保持一致。

表 2 有限元分析案例选取的蠕变模型参数

$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	$C_6$	$C_7$
$3 \times 10^{-13}$	6.3	-0.6	13 000	$1.3 \times 10^{-15}$	6.3	33 000

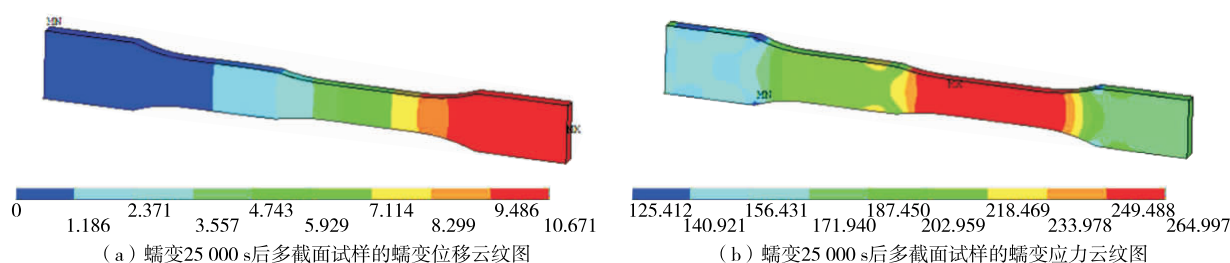


图 3 ANSYS 有限元分析结果

通过  $L_{64}(8^7)$  的正交实验方案以及表 1 的蠕变本构参数输入范围进行 64 组输入参数的多截面试样蠕变有限元分析, 可以获得与 64 组蠕变本构参量相对应的蠕变变形-时间曲线簇, 如图 4 所示, 其中每条曲线对应 1 组蠕变本构模型参量。



## 2.2 BP神经网络方法

BP神经网络方法涉及范围广且精度较高,在工程材料的拉伸本构模型研究上表现出了理论模型所不具备的快速、便捷的特点。研究人员通过BP神经网络对多种金属材料的力学性能进行了研究,包括Nb-Ti合金<sup>[14]</sup>,不锈钢<sup>[15]</sup>,X70管线钢<sup>[16]</sup>等。根据反馈的误差不断调整网络的权值和阈值,最终缩小误差并逐渐趋于理想值。BP神经网络模型属于一种典型的前向型神经网络,通常包括输入层、输出层以及处于两者之间的隐含层。如图5所示,以单隐含层的网络为例,若输入层节点数(神经元)为 $m$ ,输出层节点数为 $n$ ,则在任意情况下,单隐含层的BP神经网络可以实现任意 $m$ 维到 $n$ 维的映射<sup>[17]</sup>。此外,隐含层虽然不直接与外界发生联系,但是它的状态会影响输入输出之间的关系。也就是说隐含层节点数的取值会改变整个多层神经网络的性能,节点数目过少会导致样本识别能力差,节点数过多则会导致训练时间增加。隐含层节点数可通过经验公式获得<sup>[18]</sup>。

$$l = \sqrt{m + n} + a \quad (2)$$

式中: $a$ 为调节常数,取值范围为1~10; $l$ 表示隐含层节点数; $m$ 和 $n$ 分别表示输入层和输出层的节点数。

BP神经网络模型的执行分为两部分,即信息的正向传递和误差的反向传输。在正向传输中,当前输出可以从前一层的输出、当前与前一层的权重和阈值以及传递函数得到。输入的样本从输入层经过隐含层进行逐层处理,通过所有的隐含层之后,则传向输出层;在逐层处理的过程中,每一层神经元的状态只对下一层神经元的状态产生影响。到达输出层时,需要把当前输出和期望输出进行比较,如果当前输出不等于期望输出,则进入反向传播过程。而在误差的反向传输中,把误差信号按原来正向传播的通路反向折回,并对每个隐含层的各个神经元的权值和阈值进行调整,以实现误差最小化。BP神经网络在算法上的实质就是求误差函数的最小值,采用非线性规划中的梯度下降法,按照误差函数的梯度负方向修改权值和阈值。

## 2.3 结合反向有限元方法以及神经网络方法确定蠕变本构模型参数

离散的数据点选择不当会导致曲线的信息丢失,在神经网络分析中难以直接采用离散的曲线数据点进行分析,对曲线采用拟合的函数形式进行表征应用更加普遍。在神经网络分析过程中蠕变位移-时间曲线采用拟合函数式(3)进行表征,为

$$D = At^b \quad (3)$$

式中: $D$ 为多截面试样的蠕变位移,mm; $A$ 和 $b$ 为拟合参数; $t$ 为蠕变时间,h。拟合函数中2个参数( $A$ 和 $b$ )即可表示若干数据点组成的曲线。因此,采用拟合函数中参数 $A$ 和 $b$ 作为神经网络的输入,材料复合时间硬化蠕变本构模型的7个参量为神经网络的输出。本次实验的输入层到隐含层以及隐含层到输出层的传递函数分别选择S型函数(tansig)和线性函数(purelin),训练函数选择LM函数,迭代次数为100,期望误差为 $1 \times 10^{-5}$ ,学习率为0.01。归一化的样本数据经过训练后,可以获得神经网络模型。

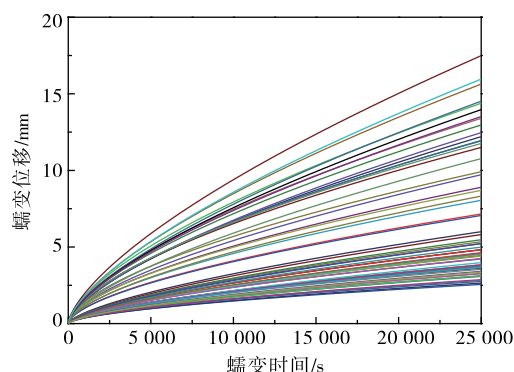


图4 不同蠕变本构模型参数组获得的蠕变位移时间曲线簇

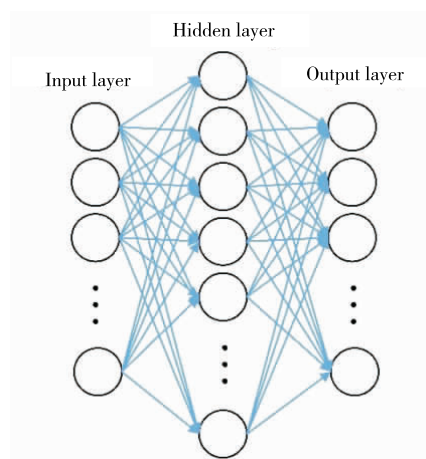


图5 单隐含层BP神经网络原理图

测试不同节点数的结果发现,当隐含层的节点数取值为 8 时,误差最小。

对图 4 中 64 组正交试验方法得到的多截面试样的蠕变有限元仿真结果进行函数化,并与其相对应的蠕变本构模型参量作为训练样本,进行 BP 神经网络的学习训练。BP 神经网络通过训练学习蠕变本构模型参量与蠕变位移-时间曲线的关系,当输入蠕变位移-时间曲线时,可以得到与这条蠕变位移曲线相对应的蠕变本构模型参数。图 2(a)得到了 600 ℃ 下 316L 奥氏体不锈钢多截面试样的蠕变位移时间曲线。根据实验得到的蠕变位移时间曲线第 1 和第 2 阶段并通过公式(3)曲线函数化方法可获得参数  $A$  和  $b$  的值;然后输入到训练好的神经网络中进行参数预测获得 600 ℃ 下 316L 奥氏体不锈钢复合时间硬化蠕变本构模型即式(1)中的蠕变本构参量,见表 3。

表 3 600 ℃ 下 316L 奥氏体不锈钢蠕变本构模型参量

$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	$C_6$	$C_7$
$2.96 \times 10^{-13}$	6.5	-0.33	15 923	$2.7 \times 10^{-15}$	6.31	34 752

2.4 基于多截面试样蠕变实验构建的蠕变本构模型验证

结合复合时间硬化蠕变本构模型即式(1)以及基于反向有限元方法获得的蠕变本构模型参量即表 3,即可获得 600 ℃ 下 316L 奥氏体不锈钢的蠕变本构模型。为了验证基于多截面试样蠕变实验构建的蠕变本构模型的有效性,本研究对 316L 不锈钢在 600 ℃ 下进行了标准蠕变实验,得到了不同载荷作用下的蠕变应变-时间曲线。图 6 将基于多截面试样蠕变实验构建的蠕变本构模型预测的蠕变曲线与标准蠕变实验方法得到的蠕变曲线进行对比。通过对比可知,蠕变本构模型预测的蠕变曲线与标准蠕变实验得到的蠕变结果相吻合。

为了从定量的角度论证蠕变本构模型预测结果的有效性,采用了相关系数和平均误差进行分析。

$$R' = \frac{\sum_{i=1}^{i=N} (\epsilon_E^i - \bar{\epsilon}_E)(\epsilon_P^i - \bar{\epsilon}_P)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{i=N} (\epsilon_E^i - \bar{\epsilon}_E)^2 \sum_{i=1}^{i=N} (\epsilon_P^i - \bar{\epsilon}_P)^2}} \quad (4)$$

$$\lambda = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{i=N} \left| \frac{\epsilon_E - \epsilon_P}{\epsilon_E} \right| \times 100 \quad (5)$$

式中:  $R'$  和  $\lambda$  分别表示两者的相关系数和平均误差;  $\epsilon_E$  和  $\epsilon_P$  分别表示标准蠕变实验的蠕变应变和基于多截面试样蠕变实验得到的蠕变本构模型预测的蠕变应变;  $\bar{\epsilon}_E$  和  $\bar{\epsilon}_P$  分别表示标准蠕变实验数据和蠕变本构模型预测数据的平均值;  $N$  表示数据数量。

表 4 给出了 600 ℃ 温度下 316L 标准蠕变实验结果与蠕变模型预测结果的相关系数和平均误差。结合图 6 的定性化比较和表 4 的量化误差分析可知,基于多截面试样蠕变实验以及反向有限元方法构建的蠕变本构模型能够合理表征 316L 的蠕变行为及其应力相关性,蠕变曲线的误差能够满足工程应用的要求。同时由表 4 可知,多截面蠕变实验方法构建的蠕变本构模型存在 8.5% 左右的误差,其误差主要来源于 3 方面:

1) 在神经网络的学习训练过程中用到了正交实验方法,学习训练样本有限,会造成神经网络输出结果的误差。

2) 在神经网络的分析过程中,将蠕变位移-时间曲线进行函数化,所用到的函数难以完整地表达蠕变位移-时间曲线,在此过程中也会产生相应的误差。

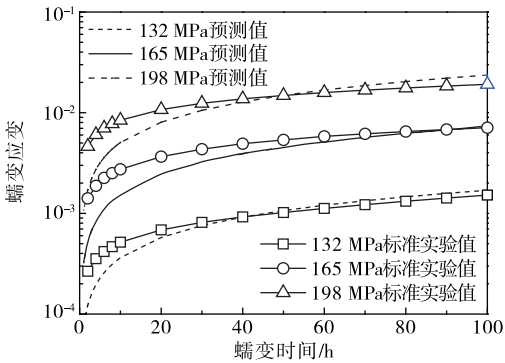


图 6 模型预测蠕变曲线与标准蠕变实验结果的对比

表 4 标准蠕变实验数据与蠕变本构模型预测数据的相关系数和平均误差

蠕变载荷/MPa	相关系数	平均误差/%
132	0.995 7	8.36
165	0.998 8	8.77
198	0.999 2	8.21

3)研究过程中用到了复合时间硬化蠕变本构模型,该模型对不同应力载荷下的蠕变行为的表征上也会存在一定误差。

结合图6的定性化比较和表4的量化误差分析可知,多截面蠕变实验方法构建的蠕变本构模型,能够合理表征316L的高温蠕变行为的应力相关性以及蠕变应变随蠕变时间的变化规律,其预测结果与标准蠕变实验结果相吻合。因此,多截面蠕变实验方法能够通过单根多截面蠕变试样获得蠕变本构模型,突破了标准蠕变实验方法仅能获得单一载荷蠕变实验结果的局限,能够提高蠕变实验的效率。

### 3 结 论

1)基于多截面蠕变实验方法对316L奥氏体不锈钢600℃的蠕变行为进行实验研究,获得了蠕变位移与时间关系曲线,该实验结果包含了多种载荷下的蠕变特征。

2)基于多截面蠕变实验结果,结合复合时间硬化蠕变本构模型、反向有限元方法以及神经网络方法,构建了316L在600℃下的蠕变本构模型。将蠕变本构模型预测的蠕变曲线与标准蠕变实验方法得到的蠕变曲线进行对比,发现两者吻合,多截面试样蠕变实验得到的蠕变本构模型合理地表征了316L蠕变行为的应力相关性。

3)多截面蠕变实验方法改善了标准蠕变实验方法仅能获得单一载荷蠕变实验结果的局限,实现了在特定温度下通过单根蠕变实验获得不同载荷下的蠕变性能曲线,提高了蠕变实验效率。

### 参考文献:

- [1]涂善东. 高温结构完整性原理[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [2]王宁, 刘洪起, 涂善东. 考虑高温蠕变损伤的2.25Cr1Mo钢的弹塑性本构模型[J]. 压力容器, 2014, 31(1):1-9, 14.
- [3]杨忠慧, 李新军, 万敏, 等. 7055 铝合金蠕变试验及本构模型建立[J]. 塑性工程学报, 2013, 20(6):89-93.
- [4]CHAKRABARTY J. A theory of stretch forming over hemispherical punch heads[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1970, 12(4):315-325.
- [5]YANG Z, WANG Z W. Relationship between strain and central deflection in small punch creep specimens[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2003, 80(6):397-404.
- [6]孟龙晖, 杨吟飞, 何宁. 纳米压痕法测量 Ti6Al4V 钛合金室温蠕变应力指数[J]. 稀有金属材料与工程, 2016, 45(3): 617-622.
- [7]罗雷, 赵西成, 刘晓燕, 等. 纳米压痕法测量超细晶工业纯钛室温蠕变速率敏感指数[J]. 稀有金属材料与工程, 2017, 46(5): 1365-1369.
- [8]姬峰, 薛松柏, 刘霜, 等. 纳米压痕法测量锌铝钎料的室温蠕变应力指数[J]. 焊接学报, 2013, 34(2): 75-78, 117.
- [9]PENG J, ZHOU C Y, DAI Q, et al. The temperature and stress dependent primary creep of CP-Ti at low and intermediate temperature[J]. Materials Science and Engineering: A, 2014, 611: 123-135.
- [10]HADID M, GUERIRA B, BAHRI M, et al. Assessment of the stepped isostress method in the prediction of long term creep of thermoplastics[J]. Polymer Testing, 2014, 34: 113-119.
- [11]钟万里. 一种变应力金属高温时效老化测试方法: 201110235484.4[P]. 2011-02-22.
- [12]秦炎锋, 冯相赛, 关凯书. 小冲杆法确定蠕变 Norton 参数[J]. 华东理工大学学报(自然科学版), 2015, 41(4): 569-574.
- [13]冯相赛. 由单个小冲杆蠕变曲线求解材料蠕变性能参数的方法[D]. 上海: 华东理工大学, 2015.

- 329-336.
- [3]鹿玲,姚建涛,顾伟栋,等.基于 Kane 方程的冗余驱动 5UPS/PRPU 并联机床动力学分析[J].农业机械学报,2016,47(6):365-372.
- [4]CODOUREY A. Dynamic modeling of parallel robots for computed-torque control implementation[J]. The International Journal of Robotic Research,1998,17(2):1325-1336.
- [5]KRUT S,COMPANY O,NABAT V,et al. Heli4:A parallel robot for SCARA motions with a very compact traveling plate and a symmetrical design[C]// Proceedings of International Conference on Intelligent Robots and Systems. New York: [s.n.],2006:1656-1661.
- [6]LI M,HUANG T,MEI J P,et al. Dynamic formulation and performance comparison of the 3-DOF modules of two reconfigurable PKMs—the tri-variant and the tricept[J]. ASME Journal of Mechanical Design, 2005, 127(6): 1129-1136.
- [7]DASGUPTA B,MRATHYUNJAYA T S.A ewton-euler formulation for the inverse dynamics of the Stewart platform manipulator[J]. Mechanism and Machine Theory,1998,33(8): 1135-1152.
- [8]PANG H,SHAHINPOOR M. Inverse dynamics of a parallel manipulator[J].Journal of Robotic Systems, 1994, 11(8):693-702.
- [9]WANG J, GOSSELIN G M. A new approach for the dynamic analysis of parallel manipulators[J].Multibody System Dynamics,1998,2(3):317-334.
- [10]黄真,赵永生,赵铁石.高等空间机构学[M].北京:高等教育出版社,2006:89-210.
- [11]张利敏.基于动力学指标的 Delta 高速并联机械手集成优化设计方法研究[D].天津:天津大学,2011.
- [12]ZHAO Y J, GAO F. Inverse dynamics of the 6-dof out-parallel manipulator by means of the principle of virtual work [J].Robotica, 2009, 27(2):259-268.
- [13]杨廷力,刘安心,罗玉峰,等.机器人机构拓扑结构设计[M].北京:科学出版社,2012.
- [14]蔡自兴.机器人学基础[M].北京:机械工业出版社,2015.
- [15]张劲夫.高等动力学[M].北京:科学出版社,2004.
- [16]哈尔滨工业大学理论力学考研室.理论力学[M].北京:高等教育出版社,2009.
- [17]石端伟,王晓笋,刘照,等.机械动力学[M].北京:中国电力出版社,2012.

(责任编辑:李艳)

【上接第 69 页】

- [14]WU S W, ZHOU X G, CAO G M, et al. The improvement on constitutive modeling of Nb-Ti micro alloyed steel by using intelligent algorithms[J]. Materials & Design, 2017, 116(15): 676-685.
- [15]RAZAVI S A, ASHRAFIZADEH F, FOOLADI S. Prediction of age hardening parameters for 17-4PH stainless steel by artificial neural network and genetic algorithm[J]. Materials Science and Engineering: A, 2016, 675(15): 147-152.
- [16]王迎娜,梁志芳,李午申. X70 管线钢环焊接头 CTOD 断裂韧性的神经网络[J].压力容器,2007,24(6): 6-9, 16.
- [17]曾卫东,舒滢,周义刚.应用人工神经网络模型预测 Ti-10V-2Fe-3Al 合金的力学性能[J].稀有金属材料与工程,2004,33(10): 1041-1044.
- [18]黄志斌,万敏,伍惠,等. TC4 钛合金神经网络本构模型及在有限元模拟中应用[J].塑性工程学报,2013,20(1): 89-94.

(责任编辑:李艳)