

引文格式: 李成, 翟华, 朱连伟, 等. 焊后奥氏体不锈钢蠕变本构模型和应力松弛效应研究 [J]. 塑性工程学报, 2025, 32 (9): 140-148. LI Cheng, ZHAI Hua, ZHU Lianwei, et al. Investigation on creep constitutive model and stress relaxation effect of post-weld austenitic stainless steel [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2025, 32 (9): 140-148.

焊后奥氏体不锈钢蠕变本构模型和应力松弛效应研究

李成¹, 翟华¹, 朱连伟², 刘琼², 刘志宏³

- 合肥工业大学 航空结构件成形制造与装备安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230009;
- 合肥合锻智能制造股份有限公司, 安徽 合肥 230601;
- 中国科学院等离子体物理研究所, 安徽 合肥 230031)

摘要: 不锈钢焊接后会产生较高的残余应力, 残余应力的消除与材料的蠕变行为紧密相关。从 304 奥氏体不锈钢焊接板材中取出试样, 在 763~783 K 时效温度和 250~380 MPa 应力条件下, 采用 RWS 电子蠕变试验机对焊接试样进行持久蠕变和应力松弛实验, 分析了在不同载荷下稳态蠕变速率的变化趋势。采用包含双曲正弦函数的 Arrhenius 方程, 对蠕变数据进行拟合分析, 建立了与温度和应力关联的蠕变本构模型, 并验证了本构方程的有效性和准确性。基于 ABAQUS 建立了考虑蠕变本构方程的应力松弛仿真模型, 分析了不同载荷下的应力松弛变化趋势。结果表明, 依据本构方程计算出的稳态蠕变速率与实验结果的平均误差为 3.74%, 且应力松弛仿真结果的平均误差为 2.65%。

关键词: 奥氏体不锈钢; 稳态蠕变速率; 蠕变本构模型; 应力松弛; 有限元方法

中图分类号: TG142 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2012 (2025) 09-0140-09

doi: 10.3969/j.issn.1007-2012.2025.09.013

Investigation on creep constitutive model and stress relaxation effect of post-weld austenitic stainless steel

LI Cheng¹, ZHAI Hua¹, ZHU Lian-wei², LIU Qiong², LIU Zhi-hong³

- Anhui Province Key Lab of Aerospace Structural Parts Forming Technology and Equipment, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;
- Hefei Metal Forming Intelligent Manufacturing Co., Ltd., Hefei 230601, China;
- Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: Significant residual stresses are induced after the welding of stainless steel. The mitigation of residual stress is closely related to the creep behavior of the material. Specimens were obtained from 304 austenitic stainless steel welded plates. The persistent creep and stress relaxation experiments were carried out under condition of aging temperatures from 763 K to 783 K and stress from 250 MPa to 380 MPa using RWS electronic creep tester. The variations of steady creep rate under different loads were analyzed. The data were fitted and analyzed to establish the temperature and stress-dependent creep constitutive model based on Arrhenius equation incorporating hyperbolic sine functions. The validity and accuracy of constitutive equation were verified. Furthermore, stress relaxation simulation models considering the creep constitutive equation were developed using ABAQUS to analyze the trend of stress relaxation under varying loads. The results demonstrate that the average error of the steady creep rate between the constitutive equation and the experimental results is 3.74%, while the average error of stress relaxation simulation is 2.65%.

Key words: austenitic stainless steel; steady creep rate; creep constitutive model; stress relaxation; finite element method

基金项目: 国家重点研发计划 (2024YFE03120000); 安徽省重点研究与开发计划项目 (202304a05020074; 202304a05020004); 重点实验室开放课题 (PA2025GDSK0072)

通信作者: 翟华, 男, 1973 年生, 博士, 教授, 主要从事高端装备制造研究, E-mail: jxzhaihuajx@hfut.edu.cn

第一作者: 李成, 男, 1996 年生, 博士研究生, 主要从事不锈钢蠕变效应研究, E-mail: lc115743@163.com

收稿日期: 2025-03-05; **修订日期:** 2025-07-08

引言

蠕变时效成形技术是在一定温度和应力（通常小于屈服强度）作用下，利用金属的蠕变特性，将成形与热处理同步进行的一种先进制造技术^[1-2]。蠕变时效过程中，构件会释放成形产生的残余应力，并产生时效强化效应，进而能够实现形性一体化协同制造，在航空航天轻质薄壁结构件领域应用广泛^[3]。研究表明，金属材料的蠕变温度需要在 $0.3T_m$ 以上（ T_m 为材料的熔点），如碳钢大于300~500℃、合金钢大于300~400℃和轻合金大于50~150℃就可能产生蠕变^[4]。影响金属蠕变速率的因素较为复杂，包括蠕变的温度、应力、微观组织、时间和材料性能等，蠕变曲线数学表达式的建立有助于更进一步地理解和利用材料的蠕变行为，因此深入探究蠕变本构模型的发展具有重要的理论意义。YU W等^[5]研究了2A14铝合金的蠕变时效行为，并讨论了蠕变变形机制。ZHAN L等^[6]开发了一组统一的蠕变时效本构方程，并根据7055铝合金的实验数据进行校准，用于模拟蠕变诱导的沉淀硬化演变。SHEN W等^[7]研究了低合金钢在400、500和620℃下的应力松弛行为，并基于Norton定律拟合出蠕变本构方程。TAKAZAWA H等^[8]研究了400~700℃下合金钢的蠕变应变随时间的变化，建立了Norton和Norton-Bailey蠕变本构模型，并讨论了不同本构方程对应力松弛预测的效果。刘厚吉等^[9]讨论了高温合金在不同载荷下的应力松弛效应，并采用三次延迟函数建立了用于描述应力松弛的分段蠕变本构方程。郑启朋等^[10]研究了7B50铝合金在拉伸和压缩两种状态下的应力松弛效应，发现拉应力下前期的松弛速率更快，而后期速率逐渐降低。WANG B等^[11]针对Ti62A合金开发了基于Arrhenius方程的蠕变方程，并分析了应力松弛过程中等效蠕变应变的变化。

国内外学者对不锈钢的蠕变行为和本构方程进行了深入研究。TAHAMI F V等^[12]在680、700和720℃和在200~360 MPa的初始应力下进行了恒温恒载蠕变实验，并建立了以Norton幂律形式和Prandtl定律为基础的本构方程，用来描述冷拔304L不锈钢的蠕变行为。PARK D B等^[13]研究了923~1073 K和120~250 MPa应力下奥氏体不锈钢的蠕变性能，其应力指数范围为6.0~8.6，激活能为460~485 kJ·mol⁻¹。薛河等^[14]对304不锈钢进行了不同应力下的单轴拉伸蠕变实验，基于时间硬化模型建

立了320℃下的蠕变本构方程。彭剑等^[15]对变截面316L不锈钢试样在600℃下进行蠕变实验，并结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，建立了蠕变本构模型。梁浩宇等^[16]建立了304不锈钢在600℃下的时间硬化隐式蠕变模型，并以此评估高温构件蠕变极限。SORKHABI A等^[17]在680~720℃和140~360 MPa初始应力下进行蠕变实验，建立了304L的母材、热影响区和焊材特性蠕变本构方程，指出热影响区层具有最高蠕变速率和最短的蠕变寿命。PRAVEEN C等^[18]在923 K和120~225 MPa的应力水平下，建立了双曲正弦蠕变本构方程描述316LN稳态蠕变，得到的应力指数值为4.6，这表明位错是蠕变速率控制机制。

本文开展了304不锈钢母材试样和焊接试样应力松弛实验，讨论了带焊缝试样与常规纯母材在应力松弛过程中的差异性。在763~783 K时效温度和250~380 MPa应力条件下，对304不锈钢焊接试样的蠕变和应力松弛效应开展实验研究，根据蠕变数据建立了基于Arrhenius方程的双曲正弦蠕变本构方程，并验证了本构方程的有效性和准确性。为焊后奥氏体不锈钢蠕变时效成形工艺和应力松弛效应的评估提供了理论依据。

1 应力松弛和蠕变实验

焊接接头存在显著的微观组织梯度，如熔合区、热影响区和母材区的差异，其组织性能的非均匀性对蠕变行为具有一定的影响。为了澄清焊接接头蠕变行为与母材的差异性，对母材试样和焊接试样进行了应力松弛实验，并比较了松弛速率的变化，在此基础上开展了焊接接头的蠕变实验。母材试样为304奥氏体不锈钢，而焊接试样从304不锈钢焊接板材中取出，板材长×宽×厚为300 mm×300 mm×40 mm，进行多层多道全熔透焊接。焊接过程采用双面交错法以控制焊接变形便于取样，采用ER316焊丝作为填充金属，焊丝直径为 $\Phi 2.4$ mm，焊接工艺为钨极气体保护焊（Gas Tungsten Arc Welding, GTAW），焊接时控制层间温度为150~200℃，母材和焊丝的成分如表1所示。焊接完成后对焊件进行垂直焊缝取样，两侧结构沿焊缝中心界面对称，焊缝及热影响区处于试样的工作段内。根据国标GB/T 2039—2012^[19]和GB/T 10120—2013^[20]，板状为蠕变持久试样，圆柱状为应力松弛试样，其尺寸参数如图1所示，试样的中间区域为工作段，两端为夹持区域。

表 1 母材和焊丝的化学成分

Tab. 1 Chemical composition of base metal and welding wire

Materials	C	Si	Mn	P	Cr	Ni	Fe
304	0.04	0.34	1.98	0.018	19.6	9.7	Balance
ER316	0.012	0.064	5.67	0.0063	18.88	17.33	Balance

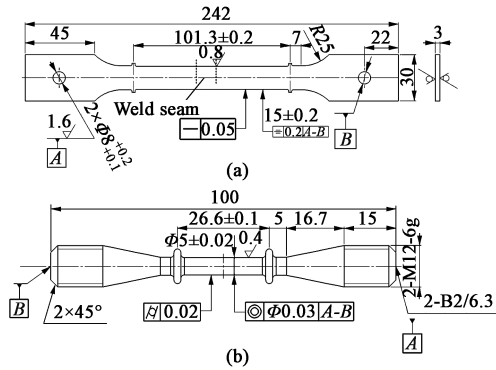


图 1 蠕变和应力松弛试样

(a) 蠕变试样 (b) 应力松弛试样

Fig. 1 Creep and stress relaxation specimens

(a) Creep specimen (b) Stress relaxation specimen

蠕变和应力松弛实验在 RWS 电子蠕变试验机上进行, 试验机如图 2 所示, 主要由加载、测量、控制和数据处理系统组成。温度由内部电阻丝进行加热, 并在试样上、中、下 3 个位置装夹热电偶采集温度信息, 实验结束后缓慢冷却至室温。



图 2 蠕变试验机

Fig. 2 Creep testing machine

蠕变实验在 763~783 K 下进行, 并包含多组不同应力载荷的实验。实验基本过程为: 试样装夹后先升温 1~2 h 到预设温度, 再保温 0.5~1.0 h, 使得试样整体温度分布均匀, 然后在 2~10 min 内加载到预设

载荷。蠕变和应力松弛实验时长为 30 h, 如果在 30 h 内断裂则提前结束。蠕变实验中, 需要保持应力不变, 并测量试样伸长量的变化。应力松弛实验中, 保持试样长度不变, 通过调整载荷维持应变不变的应力松弛条件, 载荷衰减量表示应力松弛效应强烈程度。

2 结果分析与本构方程

2.1 应力松弛结果分析

为澄清不锈钢焊接试样和母材试样应力松弛效应差异, 开展 773、873 K 和 250、300 MPa 下的应力松弛实验。图 3 是温度和应变时间历程曲线, 由图 3a 可知, 温度从室温快速增长, 在接近预设温度时进行温度控制, 温度波动误差保持在 ± 2 K 以内。升温并保温一段时间后, 进行应力加载, 经过约 2 min 到达预设的应力松弛初始载荷。图 3b 给出了应变控制的效果, 这是应力松弛的必要条件。在初始阶段由于加热膨胀效应而产生热应变, 随后进行应力加载, 热应变归零并开始计算拉伸应力产生的弹塑性应变, 在到达预设载荷后, 保持应变不变直至实验结束。

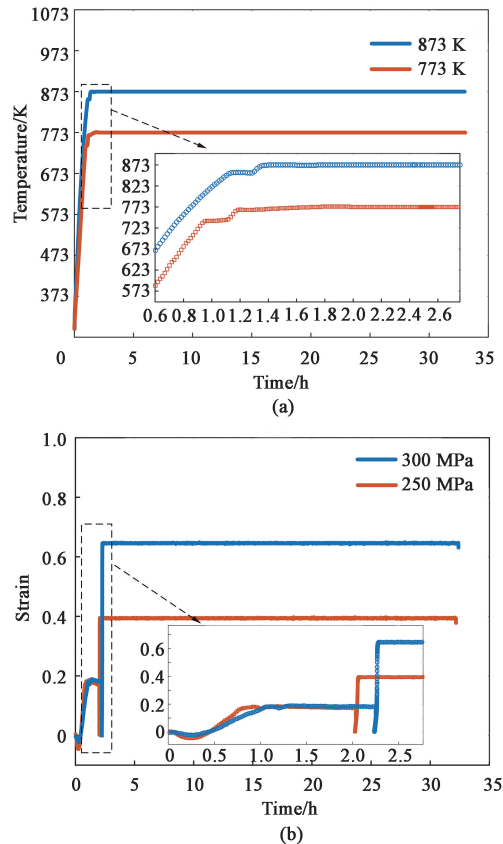


图 3 温度和应变时间历程曲线

(a) 温度 (b) 应变

Fig. 3 Temperature and strain history curves

(a) Temperature (b) Strain

图 4 给出了焊接试样和母材试样在 873 K 和 300 MPa 下的应力松弛曲线，可以发现，应力松弛分为两个阶段，第 1 个阶段是快速非线性下降阶段，这一阶段应力大幅下降，第 2 个阶段是平稳线性下降阶段，应力松弛速率明显变缓。比较发现，母材试样的松弛速率更快，松弛量也更大。实验时间为 2 h 时，焊接试样的松弛量比母材试样降低 7.88%，而在 10 h 时，二者松弛量相差 12.57%。可见，采用母材试样建立本构模型会高估焊接接头的应力松弛效应。此外，母材试样松弛曲线数据分布的均匀性更好，而焊接试样的数据分散性较为显著，这与焊缝及其附近组织力学性能的非均匀性密切相关。图 5 给出了应力松弛 30 h 过程中的应力-应变曲线，可以看出，在加载阶段母材试样的伸长量更大，说明其强度可能弱于焊接试样，这使得蠕变更容易发生。在应力松弛阶段，应变不变而应力直线下降，下降的高度代表了最终的松弛量，也可直观看出母材试样的松弛量更大一些。为建立更加准确的本构模型，在后面的研究中均采用焊接试样进行实验研究，建立适用于描述焊接接头的蠕变本构方程。

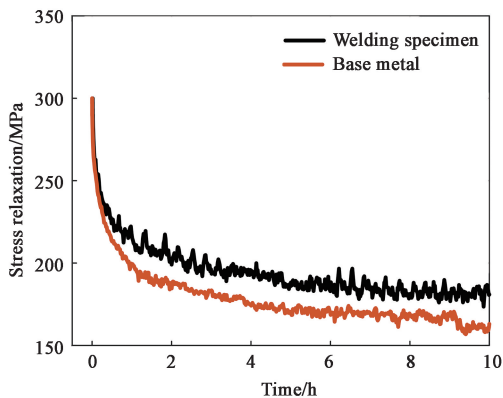


图 4 应力松弛时间历程曲线
Fig. 4 Stress relaxation history curves

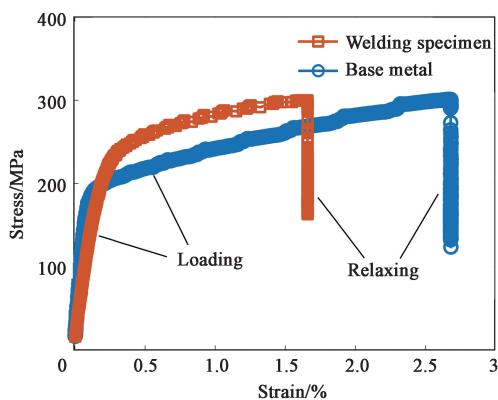


图 5 应力-应变曲线
Fig. 5 Stress-strain curves

2.2 蠕变实验结果分析

在 773 K 下进行蠕变实验，温度控制与上述应力松弛实验相同，不再赘述，而应力加载时间历程曲线如图 6 所示。可以看出，在加载阶段时，载荷呈线性快速增长，在约 2~6 min 内加载完毕，载荷越大，加载时间越长。根据实验数据，加热到预设载荷后，载荷波动误差保持在 ± 2 MPa 以内。温度和应力载荷控制的稳定性满足了蠕变实验的条件，也便于讨论和建立材料在某一温度下的蠕变本构模型。

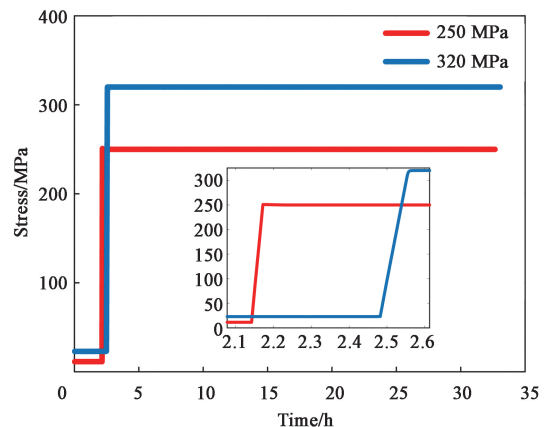


图 6 蠕变实验的应力加载时间历程曲线
Fig. 6 Stress loading history curves of creep experiment

蠕变实验结果如图 7 所示，由图 7a 可知，蠕变曲线包括减速蠕变和稳态蠕变两个阶段，减速蠕变阶段持续时间较短，而稳态蠕变持续时间较长。在 773 K 和 30 h 的蠕变过程中，250 MPa 下的蠕变变形量为 0.021%，而 380 MPa 下的蠕变变形量为 0.258%，这表明随着蠕变应力的增大，蠕变量显著增加。稳态蠕变速率是衡量金属蠕变性能的重要指标，如图 7b 所示，稳态蠕变速率随着载荷的增加呈指数型增加。

2.3 蠕变本构方程

稳态蠕变速率与应力、时间、温度和微观组织之间存在复杂的关系，基于 Arrhenius 方程的双曲正弦本构模型有效地表征了不同条件下的流变特性，并综合描述了蠕变速率 $\dot{\epsilon}_c$ 与温度 T 、应力 σ 的关系，本构方程表示如下^[21]。

$$\dot{\epsilon}_c = AF(\sigma) \exp[-Q/(RT)] \quad (1)$$

式中： A 为蠕变常数； Q 为激活能； R 为气体常数； $F(\sigma)$ 为应力函数，在不同应力水平下有相应的表达式，如下式所示^[22]。

$$F(\sigma) = \begin{cases} \sigma^n, & \alpha\sigma < 0.8 \\ \exp(\beta\sigma), & \alpha\sigma > 1.2 \\ [\sinh(\alpha\sigma)]^n, & \text{for all} \end{cases} \quad (2)$$

式中： n 为表观应力指数； α 和 β 为常数。

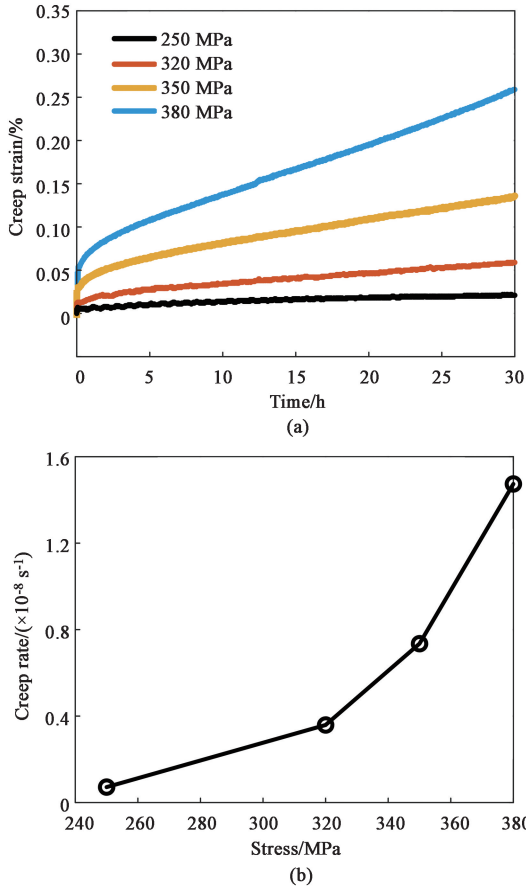


图 7 不同应力下的蠕变实验数据

(a) 蠕变应变 (b) 稳态蠕变速率

Fig. 7 Creep experimental data with different stresses

(a) Creep strain (b) Steady creep rate

结合式 (1) 和式 (2), 在低应力和高应力条件下可以获得不同蠕变本构表达式, 各项参数通过对蠕变实验数据进行拟合分析得到, 如下所示:

$$\dot{\epsilon}_c = A_1 \sigma^{n_1} \quad (3)$$

$$\dot{\epsilon}_c = A_2 \exp(\beta \sigma) \quad (4)$$

式中: n_1 、 A_1 和 A_2 为常数。

对式 (3) 和式 (4) 分别取对数可得:

$$\ln \dot{\epsilon}_c = \ln A_1 + n_1 \ln \sigma \quad (5)$$

$$\ln \dot{\epsilon}_c = \ln A_2 + \beta \sigma \quad (6)$$

n_1 和 β 分别为 $\ln \dot{\epsilon}_c - \ln \sigma$ 和 $\ln \dot{\epsilon}_c - \sigma$ 曲线的斜率。

根据图 7 得到的稳态蠕变速率, 拟合可得到不同应力下线性关系, 如图 8a 和图 8b 所示, 根据拟合的斜率, 可得 $n_1 = 7.14$ 和 $\beta = 0.02327$ 。根据 $\alpha = \beta/n_1$, 得 $\alpha = 0.00326$ 。

针对不同条件下的应力, 蠕变本构模型可以采用双曲正弦方程表示:

$$\dot{\epsilon}_c = A [\sinh(\alpha \sigma)]^n \exp[-Q/(RT)] \quad (7)$$

对式 (7) 两边取对数, 可得到:

$$\ln \dot{\epsilon}_c = \ln A + n \ln [\sinh(\alpha \sigma)] - Q/(RT) \quad (8)$$

由式 (8) 可知, n 为曲线 $\ln \dot{\epsilon}_c - \ln [\sinh(\alpha \sigma)]$ 的斜率, 由图 8c 可以拟合出表观应力指数 $n = 5.428$ 。

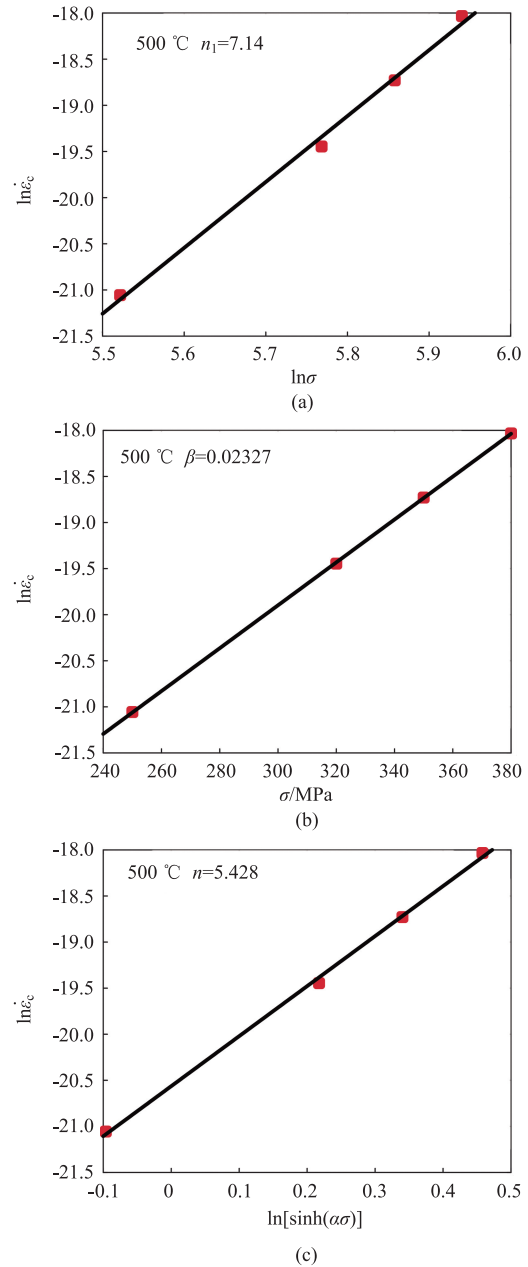


图 8 稳态蠕变速率与参数的拟合关系

(a) n_1 (b) β (c) n

Fig. 8 Fitting relationship between steady creep rate and parameters

蠕变表观激活能表示在一定的应力下, 稳态蠕变速率随温度的变化情况, 由式 (8) 可得:

$$Q = -R [d(\ln \dot{\epsilon}_c)/d(1/T)] \quad (9)$$

在 250 MPa 下, 开展了 763 ~ 783 K 的蠕变实验, 实验结果如图 9a 所示。对数据处理得到不同温

度下 $\ln \dot{\epsilon}_c - 1/T$ 关系曲线如图 9b 所示，将直线的斜率再乘以 $-R$ ，求得激活能为 $445.328 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。令 $Z = n \ln[\sinh(\alpha\sigma)] - Q/(RT)$ ，代入式 (8) 可得：

$$\ln \dot{\epsilon}_c = \ln A + Z \quad (10)$$

由式 (10) 知， $\ln A$ 为直线 $\ln \dot{\epsilon}_c - Z$ 的截距，根据图 9c 拟合结果，得 $A = 1.463 \times 10^{21}$ 。

综上将各参数代入式 (7) 可得蠕变本构方程表达式为：

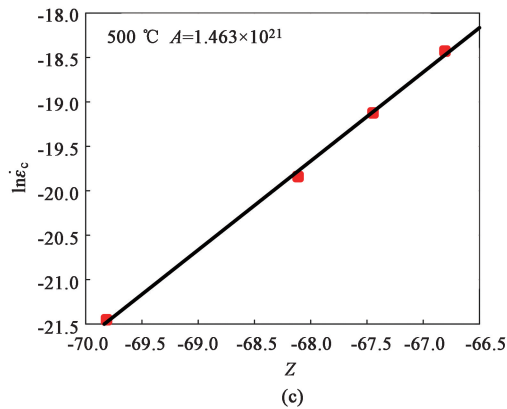
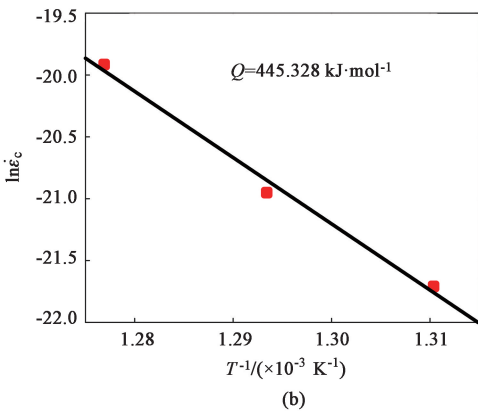
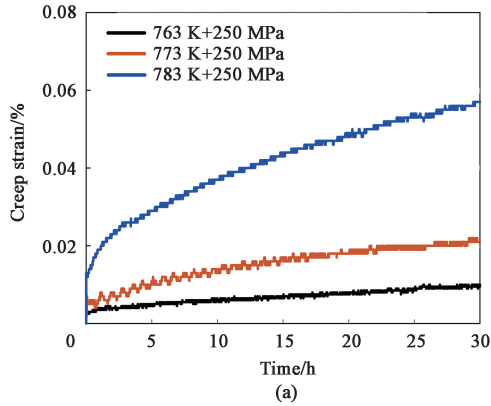


图 9 蠕变实验结果及蠕变激活能 Q 和系数 A 的确定
 (a) 温度对蠕变应变的影响 (b) Q 的确定 (c) A 的确定
 Fig. 9 Creep experiment results and determination of creep activation energy Q and coefficient A
 (a) Effect of temperature on creep strain (b) Determination of Q
 (c) Determination of A

$$\dot{\epsilon}_c = 1.463 \times 10^{21} [\sinh(0.00326\sigma)]^{5.428} \cdot \exp[-445328/(RT)] \quad (11)$$

3 蠕变本构模型的验证

3.1 稳态蠕变速率

根据式 (11) 得到的蠕变本构方程，将不同条件的参数代入后可以得到理论计算的稳态蠕变速率，将其与实验结果进行比较来验证模型的准确性。比较结果和误差如表 2 所示，可以看出，由本构方程计算得到的稳态蠕变速率和实验结果的误差在 7% 以内，所有组的平均误差为 3.74%，这表明本文在 773 K 温度下建立的 304 不锈钢焊接接头双曲正弦蠕变本构方程的有效性。

表 2 稳态蠕变速率的验证
 Tab. 2 Verification of steady creep rate

Stress/MPa	Experiment value/s ⁻¹	Calculated value/s ⁻¹	Error/%
250	7.169×10^{-10}	6.996×10^{-10}	2.41
320	3.589×10^{-9}	3.840×10^{-9}	6.99
350	7.350×10^{-9}	7.474×10^{-9}	1.69
380	1.474×10^{-8}	1.417×10^{-8}	3.87

3.2 应力松弛效应

为了验证应力松弛效应的准确性，基于 ABAQUS 建立了单轴拉伸应力松弛的仿真模型，仿真的几何模型与应力松弛实验试样相同，应力松弛时间为 30 h。材料的弹性模量和泊松比采用与温度相关的参数，应力应变模型来自于应力松弛试样的高温加载实验数据，以保证仿真与实验中焊接试样力学性能的一致性，试样网格划分如图 10 所示。



图 10 仿真模型的网格划分
 Fig. 10 Mesh division of simulation model

应力松弛的仿真结果如图 11 所示。应力加载完毕，在试样工作段存在 380 MPa 的预应力，应力分布向两端部逐渐递减。由于应力加载产生了弹性应变，其分布趋势与应力相似。在 773 K 下进行应力松弛后，应力从 380 MPa 松弛到 287 MPa，松弛率为 24.47%。松弛后试样的应力仍主要存在于试样工作段，且心部与表面具有较为接近的应力残余量。应力是弹性模量和弹性应变的乘积，而恒温下的弹性模量是不变的。因此，应力的降低必然会使得弹

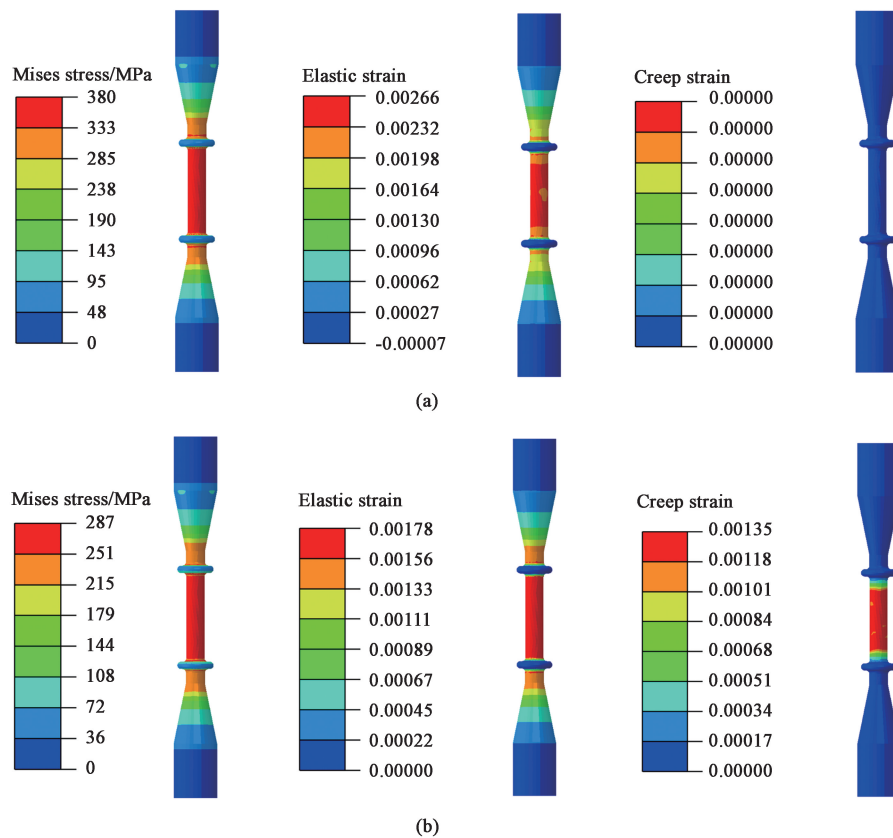


图 11 应力松弛的仿真结果

(a) 加载阶段 (b) 松弛阶段

Fig. 11 Simulation results of stress relaxation

(a) Loading stage (b) Relaxation stage

性应变降低。观察到弹性应变减少了 0.00088，根据国内外学者的研究，弹性应变的减少主要转化为蠕变应变。根据等效蠕变应变的仿真结果，产生了 0.00135 的等效蠕变应变。比较发现，蠕变应变产生的数值比弹性应变减小的数值更大。这说明除去弹性应变转化成为的蠕变应变之外，应力松弛过程也会“主动”产生部分蠕变应变，共同组成了蠕变应变总和。这也使得在应力加载完成之后，系统的总应变仍会因蠕变行为有所增大。

图 12 给出了 773 K、不同应力下的松弛实验与仿真结果的对比，初始应力分别为 260、300 和 380 MPa。在低应力下，基于蠕变本构预测的应力松弛量偏小，而在高应力下，预测应力松弛量偏大，但松弛 30 h 的平均误差为 2.65%，可以说明这对不同应力的应力松弛过程都具有良好的预测效果。另外从时间历程看，当应力水平较低时，松弛的第 1 阶段不明显，仿真和实验结果倾向于线性下降，而随着应力水平提高，逐渐过渡出较为明显的两个松弛阶段。在低应力水平下，应力松弛的位错运动、

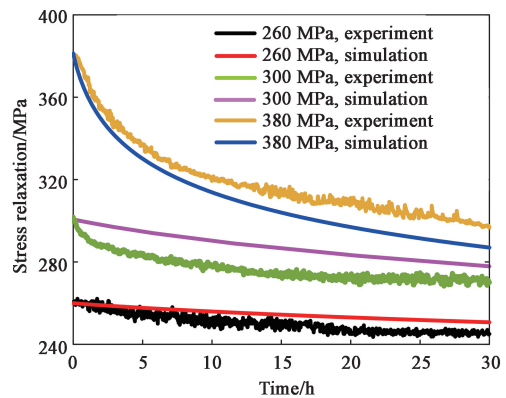


图 12 不同应力下的松弛曲线

Fig. 12 Relaxation curves with different stresses

晶界滑动和内部缺陷等微观耦合机制在前期更为显著，而蠕变方程主要考虑稳态阶段的蠕变速率，导致低应力下的前期偏差明显。在后期稳态阶段，蠕变方程对材料行为的描述能力提升，偏差减小。在高应力水平下，蠕变更快地过渡到稳态阶段，在前期吻合性较好，但高应力持续作用会加速材料内部复杂微观结构的演化，而有限元计算基于理想化假

设, 使得后期出现一定的偏差。

4 结论

(1) 讨论了焊接试样和母材试样在应力松弛过程中的差异性, 焊接试样松弛速率较慢, 实验时间为 2 h 时, 焊接试样的松弛量比母材试样低了 7.88%, 而在 10 h 时, 二者松弛量相差 12.57%。

(2) 开展了焊接试样在 763~783 K 时效温度和 250~380 MPa 下的蠕变实验, 通过线性拟合参数, 得到基于 Arrhenius 方程的双曲正弦蠕变本构模型, 其应力指数为 5.428, 激活能为 445.328 kJ·mol⁻¹。

(3) 由本构方程的理论计算和实验结果, 比较了不同应力下稳态蠕变速率, 平均误差为 3.74%。进行了焊接试样的应力松弛仿真分析, 结果表明, 考虑蠕变本构的应力松弛仿真与实验的平均误差为 2.65%, 验证了蠕变本构模型的有效性和准确性。

参考文献:

- [1] 湛利华, 许晓龙, 贾树峰, 等. 7055 铝合金加筋板蠕变时效成形有限元仿真 [J]. 中国有色金属学报, 2013, 23 (8): 2104-2109.
ZHAN Lihua, XU Xiaolong, JIA Shufeng, et al. Finite element simulation for creep age forming of 7055 aluminum alloy stiffened pane [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23 (8): 2104-2109.
- [2] 徐凌志, 宋莹, 刘春辉, 等. 高强筋壁板压弯-蠕变复合成形技术研究: 本构建模与仿真 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2023, 54 (10): 3895-3906.
XU Lingzhi, SONG Ying, LIU Chunhui, et al. Research on bending-creep composite forming technology of panel with high strength ribs: Constitutive modeling and simulation [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2023, 54 (10): 3895-3906.
- [3] 湛利华, 谢豪, 杨有良, 等. 考虑各向异性的回转曲面件蠕变时效成形数值模拟与实验 [J]. 塑性工程学报, 2024, 31 (4): 208-218.
ZHAN Lihua, XIE Hao, YANG Youliang, et al. Numerical simulation and experiment of creep aging forming of rotary curved surface parts considering anisotropy [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2024, 31 (4): 208-218.
- [4] 郭广平, 丁传富. 航空材料力学性能检测 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2017.
- [5] YU W, ZHAN L, XU Y, et al. Temperature-dependent creep aging behavior of 2A14 aluminum alloy [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 19: 1343-1354.
- [6] ZHAN L, LIN J, DEAN T A, et al. Experimental studies and constitutive modelling of the hardening of aluminium alloy 7055 under creep age forming conditions [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2011, 53 (8): 595-605.
- [7] SHEN W, ZHANG C, ZHANG L, et al. Stress relaxation behaviour and creep constitutive equations of SA302Gr. C low-alloy steel [J]. High Temperature Materials and Processes, 2018, 37 (9-10): 857-862.
- [8] TAKAZAWA H, YANAGIDA N. Effect of creep constitutive equation on simulated stress mitigation behavior of alloy steel pipe during post-weld heat treatment [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2014, 117: 42-48.
- [9] 刘厚吉, 谢健, 李祎曼, 等. GH3536 镍基变形高温合金的应力松弛行为与蠕变本构方程 [J]. 塑性工程学报, 2023, 30 (7): 110-117.
LIU Houji, XIE Jian, LI Weiman, et al. Stress relaxation behavior test and creep constitutive equation of GH3536 nickel-based wrought superalloy [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2023, 30 (7): 110-117.
- [10] 郑启朋, 湛利华, 徐永谦, 等. 拉压应力下 7B50 铝合金应力松弛时效行为研究 [J]. 塑性工程学报, 2021, 28 (5): 26-34.
ZHENG Qipeng, ZHAN Lihua, XU Yongqian, et al. Stress relaxation aging behavior of 7B50 aluminum alloy under tensile and compressive stress [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2021, 28 (5): 26-34.
- [11] WANG B, ZHOU L, CAO Y, et al. Analysis of residual stress relief for Ti62A alloy welded joints by post weld heat treatment considering creep effect [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 24: 7462-7474.
- [12] TAHAMI F V, DAEL-SORKHABI A H, BIGLARI F R. Creep constitutive equations for cold-drawn 304L stainless steel [J]. Materials Science and Engineering: A, 2010, 527 (18-19): 4993-4999.
- [13] PARK D B, HONG S M, LEE K H, et al. High-temperature creep behavior and microstructural evolution of an 18Cr9Ni3CuNbVN austenitic stainless steel [J]. Materials Characterization, 2014, 93: 52-61.
- [14] 薛河, 崔英浩, 赵凌燕, 等. 压水堆一回路环境中 304 不锈钢的蠕变特性分析 [J]. 西安科技大学学报, 2018, 38 (1): 156-161.
XUE He, CUI Yinghao, ZHAO Lingyan, et al. Creep characteristics analysis of 304 stainless steel in pressured water reactor primary circuit [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2018, 38 (1): 156-161.
- [15] 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.
PENG Jian, PENG Jian, LI Kaishang. Creep characteristics of 316L stainless steel at elevated temperature based on multi-sectional specimen [J]. Journal of Changzhou University (Natural Science Edition), 2019, 31 (5): 63-69, 86.
- [16] 梁浩宇, 段滋华. 304 不锈钢构件的高温蠕变特性分析 [J]. 太原理工大学学报, 2013, 44 (3): 308-311.
LIANG Haoyu, DUAN Zihua. High-temperature creep numerical simulation of 304 stainless steel component [J]. Journal of

- Taiyuan University of Technology, 2013, 44 (3): 308-311.
- [17] SORKHABI A, VAKILI-TAHAMI F. Experimental study of the creep behavior of parent, simulated HAZ and weld materials for cold-drawn 304L stainless steel [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2012, 21: 78-90.
- [18] PRAVEEN C, CHRISTOPHER J, GANESAN V, et al. Constitutive modelling of transient and steady state creep behaviour of type 316LN austenitic stainless steel [J]. *Mechanics of Materials*, 2019, 137: 103122.
- [19] GB/T 2039—2012, 金属材料 单轴拉伸蠕变试验方法 [S].
GB/T 2039—2012, *Metallic materials—Uniaxial creep testing method in tension* [S].
- [20] GB/T 10120—2013, 金属材料 拉伸应力松弛 试验方法 [S].
GB/T 10120—2013, *Metallic materials—Tensile stress relaxation—Method of test* [S].
- [21] 尹旭妮, 湛利华, 赵俊. 2219 铝合金稳态蠕变本构方程的建立 [J]. *中国有色金属学报*, 2014, 24 (9): 2250-2256.
YIN Xuni, ZHAN Lihua, ZHAO Jun. Establishment of steady creep constitutive equation of 2219 aluminum alloy [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2014, 24 (9): 2250-2256.
- [22] 湛利华, 李杰, 黄明辉, 等. 2524 铝合金的蠕变时效行为 [J]. *中国有色金属学报*, 2013, 23 (2): 320-326.
ZHAN Lihua, LI Jie, HUANG Minghui, et al. Creep ageing behavior of 2524 aluminum alloy [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2013, 23 (2): 320-326.