

核电用 316H 不锈钢的蠕变性能评估

李 昂, 吴 福, 高 蔚, 张 毅

(核工业理化工程研究院 国防科技工业核材料技术创新中心 粒子输运与富集技术重点实验室, 天津 300180)

摘 要: 通过对核电用 316H 不锈钢的蠕变数据分析, 利用速率温度参数模型拟合得出材料蠕变本构方程。根据相关统计检验方法, 确定了材料的蠕变可靠度函数。结合 Z' 参数的数据分布, 分别得出 316H 不锈钢蠕变应力-RTP 参数-可靠度曲线和温度-容许应力-可靠度曲线。结合 ASME 的评价规范, 确定了 316H 不锈钢在 550~700 °C 下的容许应力。结果表明, 基于 RMB' 模型的蠕变本构方程在拟合精度方面优于其他传统模型。实测数据均位于蠕变可靠性模型预测结果的 99.7% 置信区间内。该模型可以较好地评估 316H 不锈钢的稳态蠕变性能及容许应力。

关键词: 316H 不锈钢; 蠕变性能; 速率温度参数模型; Z' 参数; 容许应力

中图分类号: TG142.71; TG111.8

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2021)02-0531-06

与传统轻水堆相比, 快中子反应堆(快堆)由于其较高的核燃料利用率(60%~70%)、对长寿命高放废物的高嬗变性及在设计上的非能动安全性等优点^[1], 是实现中国核能持续发展、闭式燃料循环的关键设施之一, 在中国核能发展“三步走”战略^[2,3]中具有重要的地位。由于快堆冷却介质的出口温度为 500~550 °C^[4-7], 传统压水堆核电厂常用的 304L、316L 奥氏体不锈钢已不能够满足在高温工况下的性能要求。美国、俄罗斯采用增加奥氏体不锈钢中碳含量的方法来提高材料的高温性能^[8]。316H 不锈钢因其良好的高温强度及抗蠕变能力而广泛应用于反应堆及其他电站的压力容器^[8-17]。

堆内构件的可靠性对反应堆在服役过程中的安全运行起到了至关重要的作用。考虑到堆内构件在服役期(设计寿命 40 年)内的不可替代性, 如何评估备选结构材料在服役条件下的长时耐温性能及可靠性, 是工程设计及材料研究者关注的焦点问题之一。Whittaker 等^[13]通过 Wilshire 公式拟合 316H 不锈钢的短时(<5000 h)蠕变数据, 外推得到了材料安全运行 10⁵ h 的许用应力。经对比, 该评估结果与利用传统 MH 模型推导的安全应力基本一致。Esposito 等^[14]综合考虑蠕变过程中的变形与损伤机制建立了 BE 蠕变速率模型, 并将其成功应用于 316H 不锈钢的蠕变研究。Davies 等^[16]基于时间相关失效评定图(TDFAD)预测了在 500 °C 下 316H 不锈钢蠕变裂纹扩展典型长度增量 $\Delta a=0.2, 0.5$ mm 时所对应的孕育时间, 发现材

料的蠕变断裂韧性与参考应力值会对蠕变裂纹的孕育时间产生较为显著的影响。Boerman 等^[15]研究了 316H 不锈钢在高于 800 °C 温度下的蠕变断裂过程, 结果表明, 材料在蠕变加速阶段的变形速率可以表示为应力、蠕变时间、激活能的函数式, 在 1000、1200 和 1300 °C 下稳态蠕变激活能计算值为 374.1 kJ/mol, 该值略高于铁原子的自扩散能; 而加速蠕变激活能为 1758.5 kJ/mol, 近似等于纯铁的升华热值。目前有关 316H 不锈钢在较宽使用条件范围内的蠕变性能(特别是稳态蠕变速率)评估方面的研究尚少有报道。

本研究结合日本国立材料研究所(NIMS)公开的蠕变数据^[18,19], 采用速率温度参数模型^[20]评估反应堆用 316H 板材的蠕变性能, 建立基于 Z' 参数^[21]的材料蠕变可靠性模型, 分析数据分散性对性能评估结果的影响程度。对比其他形式的蠕变性能模型^[13,14,22], 验证不同蠕变模型在数据拟合及结果预测方面的准确性。结合 ASME 的评价规范^[23], 确定材料的容许应力与服役温度的关系, 完善反应堆用 316H 不锈钢耐温性能评估、构件优化设计的相关数据及理论方法。

1 蠕变模型的推导

通过分析材料的蠕变行为, 稳态蠕变速率和实验温度可以被整合为某一形式的综合参数(即速率温度参数 RTP)^[20,21], 同时这个参数被表示为应力的函数。应力函数 $P(\sigma)$ 与对应速率温度参数 RTP 拟合确定的主曲线

收稿日期: 2020-03-19

基金项目: 中核集团青年英才计划菁英项目(CNNC2019YTEP-IPCE01)

作者简介: 李 昂, 男, 1985 年生, 硕士, 高级工程师, 核工业理化工程研究院, 天津 300180, 电话: 022-58231665, E-mail: kenshin0209@sina.com

方程将被用于评估其他服役条件下材料的蠕变性能。

为了建立 316H 不锈钢的 σ -RTP 主曲线方程, 速率温度参数(RTP)选择相关研究提出的 RMB'参数^[21]。根据前期的试算结果, 应力函数 $P(\sigma)$ 确定为三阶对数应力多项式。对应 σ -RMB'主曲线方程的表达式如式 (1) 所示:

$$\frac{-\lg \dot{\epsilon}_s - \lg t_a \cdot T^{|q|-1}}{(T - T_a \cdot \langle q \rangle)^q} = a_0 + a_1 \lg \sigma + a_2 \lg^2 \sigma + a_3 \lg^3 \sigma \quad (1)$$

式中: $\dot{\epsilon}_s$ 代表材料的稳态蠕变速率 (h^{-1}); σ 代表实验应力 (MPa); T 为绝对温度 (K); $\lg t_a$ 、 T_a 、 q 、 $a_0 \sim a_3$ 均为常数项。当 $q > 0$ 时, $\langle q \rangle = q$; 当 $q \leq 0$ 时, $\langle q \rangle = 0$ 。

参照传统寿命预测方法对 Z 参数^[24]的定义, 结合速率温度参数模型, 提出了适用于材料蠕变速率可靠性分析的 Z' 参数^[21], 其具体的表达式见式 (2):

$$Z' = \text{RTP} - a_0 - a_1 \lg \sigma - a_2 \lg^2 \sigma - a_3 \lg^3 \sigma \quad (2)$$

式中: Z' 参数表征蠕变数据偏离主曲线的程度, RTP 代表对应形式的速率温度参数, $a_0 \sim a_3$ 均为常数。根据 Z' 参数值的具体分布规律可以进一步确定材料的蠕变失效函数及可靠度函数。

2 316H 不锈钢的蠕变模型

2.1 316H 不锈钢的材料状态及蠕变数据

本研究采用的 316H 不锈钢高温蠕变数据取自于 NIMS 的力学性能数据库^[18,19]。数据库中 316H 不锈钢包含 3 种材料状态, 分别为: 棒材、管材和板材。本文仅针对 316H 板材数据开展性能评估。NIMS 公开的 316H 板材蠕变数据分为 3 个批次, 每批次材料的化学成分及热处理工艺参数略有不同, 如表 1 和表 2 所示。蠕变试样的取样方向为板材挤压方向。性能评估使用的蠕变数据共 63 个, 分别取自温度范围 500~800 °C、应力范围 20~471 MPa 的蠕变实验, 具体的蠕变数据分布如图 1 所示。

2.2 基于速率温度参数的蠕变本构方程

根据 316H 不锈钢的稳态蠕变速率数据, 利用多元线性回归的方法拟合确定了主曲线方程 (1) 中的各项参数值。经整理后, 具体的蠕变本构方程参见式 (3):

$$\lg \dot{\epsilon}_s = -21.0943T^{-0.02} - (T - 567.234)^{0.98} \cdot (0.0201 - 0.0846 \lg \sigma + 0.0527 \lg^2 \sigma - 0.0125 \lg^3 \sigma) \quad (3)$$

图 2 显示了通过蠕变本构方程 (3) 计算得到的 $\dot{\epsilon}_s$ - σ 曲线, 同时也标识出各批次材料的实测蠕变速率数据。从图 2 中的数据分布情况来看, 来自不同批次的蠕变数据并未出现明显的单侧偏离现象, 全部的蠕变数据均交错地分布在对应温度下的 $\dot{\epsilon}_s$ - σ 曲线两侧。

表 1 316H 不锈钢 (板材) 的化学成分

Table 1 Chemical composition of 316H stainless steel (plate) ($\omega/\%$)

Element	Reference code		
	AaA	AaB	AaD
C	0.06	0.05	0.05
Si	0.74	0.74	0.7
Mn	1.7	1.74	1.1
P	0.038	0.035	0.034
S	0.011	0.006	0.003
Ni	13.04	11.19	12.6
Cr	17.31	17.6	17.05
Mo	2.56	2.32	2.24
Cu	0.30	0.28	0.31
Al	0.005	0.005	<0.003
N	0.0192	0.023	0.017
B	0.0011	0.0007	0.003
Nb+Ta	0.04	0.03	0.001
Ti	0.011	0.014	0.03
Fe	Bal.	Bal.	Bal.

表 2 316H 不锈钢 (板材) 的加工及热处理工艺

Table 2 Processing and heat treatment system of 316H stainless steel (plate)

Reference code	Processing	Thermal history
AaA	Hot rolled	1050 °C/40 min+water quenching
AaB	Hot rolled	1050 °C/80 min+water quenching
AaD	Hot rolled	1100 °C/30 min+water quenching

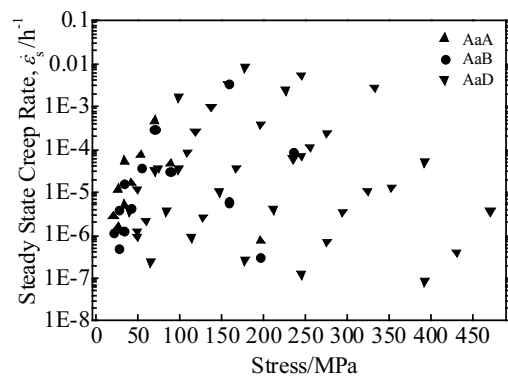


图 1 316H 不锈钢蠕变数据的分布情况

Fig.1 Distribution of steady state creep rate of 316H stainless steel

2.3 基于 Z' 参数的蠕变性能可靠性模型

采用 Anderson-Darling 检验法对 Z' 参数计算值的分布进行非参数检验。在满足正态分布的前提下, 对 Z' 参数计算值进行 Dixon 双侧离群值检验。具体的检验结果如表 3 所示。表 3 中的数据说明, 在显著性水平 0.05 的条件下, RMB'模型的主曲线偏差量数据 (Z' 参数) 满足正态分布且无异常值, 实验数据虽然取自不同的材料批

次，但材料化学成分、热处理工艺的差别并未对 316H 不锈钢蠕变数据分布造成显著的影响。

在 RMB'模型主曲线偏差量数据满足正态分布的前提下，计算确定了该材料的蠕变可靠度函数 $R(Z)$ ，其表达式如下：

$$R(Z') = 1 - \frac{1}{s\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{Z'_R} \exp\left[-\frac{(Z' - \bar{Z}')^2}{2s^2}\right] dZ \quad (4)$$

$$= \Phi\left(\frac{Z'_R - 4.11 \times 10^{-6}}{1.41 \times 10^{-3}}\right)$$

式中： Z'_R 为指定可靠度 R 对应的 Z' ，

$\Phi\left(\frac{Z'_R - 4.11 \times 10^{-6}}{1.41 \times 10^{-3}}\right)$ 为标准正态分布函数，对应的 Z'_R 值

可以通过查表的方式计算确定。

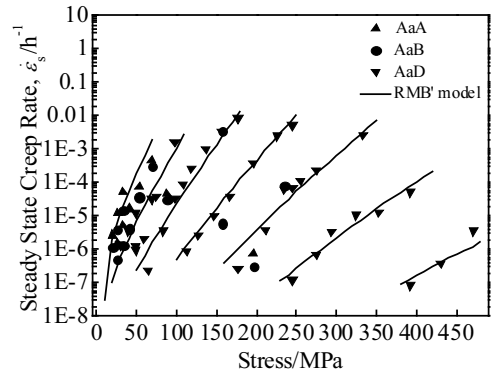


图 2 316H 不锈钢的 $\dot{\epsilon}_s$ - σ 曲线和实验数据分布

Fig.2 Creep rate versus stress curves fitted by creep data of 316H stainless steel

表 3 RMB'模型下主曲线偏差量数据的检验结果
Table 3 Test results of logarithmic difference data by RMB' model

Model	Statistic	Normality test		Outlier Test		
		P	Decision at level (5%)	Max (r_{22}, r'_{22})	$D_{0.95}$	Decision at level (5%)
RMB'	0.427	0.304	Obey	0.19	0.32	No outlier

图 3 显示了不同可靠度下计算得到的 316H 不锈钢的 σ -RTP 主曲线。随着可靠度的上升， σ -RTP 主曲线的相对位置逐渐向图中的下方（外推蠕变速率值增加的方向）移动。对比不同可靠度下主曲线与蠕变数据的相对位置，可以发现，316H 不锈钢的大部分实测蠕变速率数据位于可靠度 0.95 对应的主曲线的上方，而全部实测数据均没有落于可靠度 $3s$ (0.997) 主曲线下方。这说明可以采用建立的可靠性模型 (4) 预测 316H 不锈钢在其他实验条件下的稳态蠕变速率及许用应力。

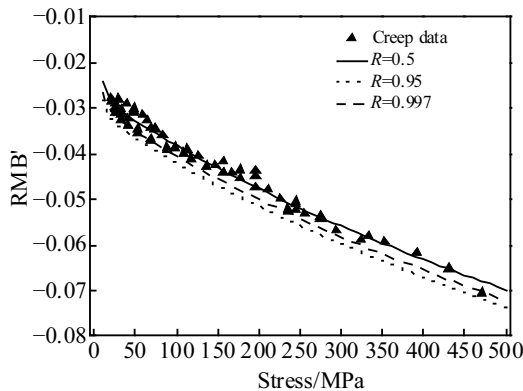


图 3 316H 不锈钢的蠕变数据与 σ -RTP- R 曲线

Fig.3 Creep rate data and σ -RTP- R curves for 316H stainless steel

3 分析与讨论

3.1 蠕变模型的拟合有效性

为了验证蠕变模型拟合数据的有效性，计算在相同蠕变实验条件下的稳态蠕变速率拟合值与实测蠕变数据的对数均方根误差 RMSE，相应的 RMSE 表达式如式 (5) 所示：

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\lg \dot{\epsilon}_{fitted,i} - \lg \dot{\epsilon}_{test,i})^2}{n}} \quad (5)$$

式中： $\dot{\epsilon}_{fitted}$ 、 $\dot{\epsilon}_{test}$ 分别代表相同条件下稳态蠕变速率的模型拟合值和实测值，单位均为 h^{-1} ； n 代表数据点的数量。

同时比较本文 RMB'模型 (1) 和文献的 Wilshire 模型 (板材) [13]、Bonora-Esposito (BE) 模型 [14]、经典 Norton 律模型 [22,25] 在拟合数据有效性方面的差异性。

表 4 显示了以上 4 种蠕变模型在不同蠕变速率范围内的 RMSE 值。对比表中的数据可知，本研究建立的 RMB'模型对于不同的蠕变速率范围内的数据均体现出较好的拟合性。随着稳态蠕变速率的降低，RMB'模型的拟合精度并没有明显的下降。这说明采用短时蠕变实验 ($\dot{\epsilon}_s \geq 10^{-4} h^{-1}$) 数据拟合的模型同样可以获得较好的拟合精度。由于在不同蠕变速率范围内的拟合精度没有明显的差异，RMB'模型在稳态蠕变速率预

表 4 不同蠕变速率范围内模型的 RMSE 值对比
Table 4 Comparison of RMSE values in different creep rate zones

Model	$\dot{\epsilon}_s \leq 10^{-6} \text{ h}^{-1}$	$\dot{\epsilon}_s \leq 10^{-5} \text{ h}^{-1}$	$\dot{\epsilon}_s \leq 10^{-4} \text{ h}^{-1}$	$\dot{\epsilon}_s \leq 10^{-2} \text{ h}^{-1}$
RMB'	0.5394	0.5571	0.5335	0.5024
Wilshire	4.3296	3.7749	3.2163	2.9165
BE	0.8697	0.6949	0.5919	0.6338
Standard Norton law	0.9108	0.8054	0.6944	0.6588

测值外推至 $\leq 10^{-6} \text{ h}^{-1}$ 的范围时仍具有一定的可信度。

在其他 3 种蠕变模型中, BE 模型、经典 Norton 律模型在全部数据范围内的拟合精度略低于 RMB'模型的拟合精度, 但是随着稳态蠕变速率的降低, 这 2 种模型的拟合精度呈现出逐渐下降的趋势, 这预示着当外推至较低的蠕变速率值时, 以上模型可能无法保证足够的预测精度。与其他模型相比, Wilshire 模型对本文所选用 316H 不锈钢蠕变数据的拟合性较差。考虑到文献的 Wilshire 模型(板材)仅针对 NIMS 的 AaA、AaB 批次蠕变数据^[13], 计算并对比了 RMB'模型及 Wilshire 模型(板材)对 AaA、AaB 批次蠕变数据的 RMSE 值。数据

显示, Wilshire 模型的 RMSE 值为 1.5330, 而 RMB'模型仍体现出良好的拟合精度, 其 RMSE 值为 0.5943。以上结果表明, 本文建立的 RMB'模型可以更好地表征 316H 不锈钢的稳态蠕变行为。

3.2 蠕变模型的预测精度

基于本文的蠕变可靠性模型(4)和文献的 Wilshire 模型(板材)^[13]、BE 模型^[14]、经典 Norton 律模型^[22,25]分别计算在 675、775、850 °C 下不同应力对应的稳态蠕变速率值, 并与 AaA、AaB 同批次试样在相同条件下的公开数据^[18]进行对比, 具体结果如表 5 所示。

从表 5 的蠕变速率数据可知, 基于 Z'参数蠕变模型在可靠度为 0.5 时的预测结果与相同实验条件下的实测数据基本一致。随着可靠度的上升, 蠕变模型在指定条件下的稳态蠕变速率预测上限值会逐步提高。在可靠度设定值为 0.95 时, 实测蠕变速率数据均未超过模型预测值, 证明基于 Z'参数蠕变模型的预测结果准确可靠。由于没有考虑数据分散性的影响, 其他模型均存在预测值小于实测结果的情况, 这将会对反应堆内构件的安全运行造成潜在的不利影响。

表 5 不同模型下 316H 不锈钢稳态蠕变速率的预测结果

Table 5 Prediction of steady state creep rate of 316H stainless steel by different creep models

Reference code	Temperature/ °C	Stress/ MPa	Experimental rate data/ $\times 10^{-5} \text{ h}^{-1}$	Prediction of creep rate/ h^{-1}				
				RMB'		Wilshire	BE	Standard Norton law
				R=50%	R=95%			
AaB	675	137	4.28	5.87×10^{-5}	3.57×10^{-4}	3.43×10^{-5}	5.21×10^{-5}	1.18×10^{-4}
	775	41	2.59	1.26×10^{-5}	1.22×10^{-4}	7.55×10^{-7}	1.5×10^{-5}	1.26×10^{-5}
	850	20	1.04	3.37×10^{-5}	4.60×10^{-4}	2.03×10^{-6}	1.93×10^{-5}	4.13×10^{-6}
AaA	850	20	3.27					

3.3 316H 不锈钢的容许应力评估

为了保证部件在高温高压的环境下长期安全运行, 结合服役条件下的材料容许应力评估研究一直是国际上发展反应堆及其他高温高压设备技术的关键着眼点之一。在 ASME 提出的 BPVC 容许应力评估规范^[23]中, 蠕变速率 10^{-7} h^{-1} 对应的平均服役应力是材料在服役期内达到蠕变极限的容许应力上限。图 4 显示了采用蠕变模型(4)外推至蠕变速率 10^{-7} h^{-1} 时, 在不同可靠度下服役温度与容许应力的关系。考虑到反应堆的设计寿命为 40 年, 同样采用蠕变模型(4)求解出服役寿命期内产生 1%蠕变应变(蠕变速率为 $2.85 \times 10^{-8} \text{ h}^{-1}$)时的 $[\sigma]-T-R$ 曲线。

从图 4 中可以看出, 在相同的可靠度及蠕变速率的条件下, 316H 不锈钢的服役容许应力随使用温度的增加而显著下降。外推至稳态蠕变速率上限 10^{-7} h^{-1} , 材料在 550、600、650 °C 下的容许应力(可靠度 99.7%)分别为 182.4、98.1、45.0 MPa。在 550、600、650 °C 的温度

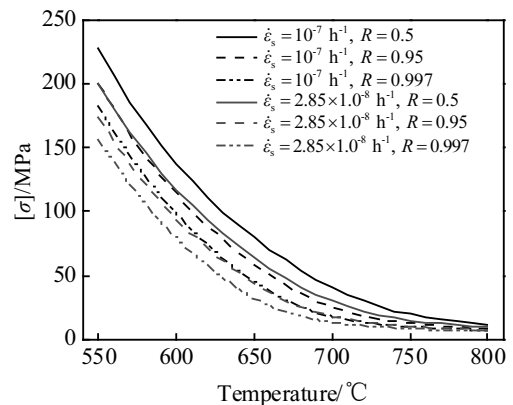


图 4 316H 不锈钢不同可靠度下在 $\dot{\epsilon}_s = 10^{-7} \text{ h}^{-1}$ 、 $\dot{\epsilon}_s = 2.85 \times 10^{-8} \text{ h}^{-1}$ 下的 $[\sigma]-T-R$ 曲线

Fig.4 Variations of elevated stress with temperature expressed by Eq. (4) at $\dot{\epsilon}_s = 10^{-7} \text{ h}^{-1}$ and $\dot{\epsilon}_s = 2.85 \times 10^{-8} \text{ h}^{-1}$ in different reliabilities for 316H stainless steel

表 6 ASME 评估规范下 316 类不锈钢在寿命期 10^5 h 的容许应力对比
 Table 6 Comparison of allowable stress results at 10^5 h of type 316 stainless steel by ASME BPVC Section II

Temperature/°C	Creep stress at $\dot{\epsilon}_s=10^{-7}$ h ⁻¹ /MPa	Creep rupture strength at 10^5 h/MPa		Allowable stress/MPa		
	Average	Average×0.67	Minimum×0.80	316H (plate)	316H (pipe)	316 (plate)
550	226.8	139.9	146.9	139	89	105
600	137.0	88.30	88.06	88	68	80
650	79.31	53.12	48.88	48	42	50
700	40.69	29.80	25.33	25	25	30
750	19.53	16.75	14.46	14	14	18

条件下,与蠕变速率 10^{-7} h⁻¹对应的平均服役应力上限相比,蠕变速率 2.85×10^{-8} h⁻¹对应的平均服役应力上限分别下降 12.2%、14.8%及 19.9%。蠕变数据的分散性会对材料容许应力的评估产生比较明显的影响,外推蠕变速率 10^{-7} h⁻¹对应的 $[\sigma]$ - T 曲线($R=0.95$)与蠕变速率 2.85×10^{-8} h⁻¹对应的平均服役应力-温度曲线基本重合。

采用 ASME 的相关规范^[23],计算并确定了 316H 不锈钢在不同服役温度下的容许应力,具体结果如表 6 所示。采用 NIMS 公开的同批次蠕变断裂数据,结合时间温度参数(TTP)模型计算得到了表 6 中服役寿命期 10^5 h 对应的蠕变断裂强度值。表 6 同时列出了 ASME 材料手册中 316H(管材)和 316(板材)的容许应力数据^[23]。对比表 6 中的数据可知,当服役温度处于 550~700 °C 的范围内,316H(NIMS 实验用板材)的耐温性能明显优于 ASME 手册中同类材料的管材性能。当温度高于 700 °C 时,2 种状态的材料容许应力完全一致。与 ASME 手册中 316(板材)性能数据相比,316H(NIMS 实验用板材)在低于 650 °C 时的耐温性能超过 316 不锈钢的耐温性能,在高于 650 °C 时的容许应力略低于 316 不锈钢容许应力。

4 结 论

1) 根据 NIMS 公开的蠕变数据,利用速率温度参数 RMB'模型拟合确定了 316H 不锈钢(板材)的蠕变本构方程。计算结果显示,与其他蠕变模型相比,本研究确定的蠕变方程拟合精度较高,其 RMSE 值为 0.5024。

2) 基于 Z' 参数的概念,通过统计分析的方法确定了 316H 不锈钢(板材)的蠕变可靠性模型。经检验,实测蠕变数据均位于蠕变可靠性模型预测结果的 99.7%置信区间内。

3) 结合蠕变可靠性模型,外推至稳态蠕变速率上限 10^{-7} h⁻¹,316H 不锈钢(板材)在 550、600、650 下的容许应力(可靠度 99.7%)分别为 182.4、98.1、45.0 MPa。

4) 参照 ASME BPVC 的相关规范,计算并确定了 316H 不锈钢(板材)在 550~700 °C 下的容许应力。当服役温度处于 550~700 °C 的范围内,NIMS 实验用板材的耐温性能明显优于 ASME 手册中同类材料的管材性

能。当温度高于 700 °C 时,2 种状态的材料容许应力完全一致。

参考文献 References

- [1] Aoto K, Dufour P, Yang H Y et al. *Progress in Nuclear Energy* [J], 2014, 77: 247
- [2] Xu M. *Engineering Sciences*[J], 2007, 5(4): 76
- [3] Yan Chunguang(燕春光), Li Yaping(李雅平), Wang Mingzheng(王明政). *Journal of Iron and Steel Research(钢铁研究学报)*[J], 2018, 30(12): 935
- [4] Forsberg C. *Progress in Nuclear Energy*[J], 2005, 47(1): 32
- [5] Hahn D, Kim Y I, Lee C B et al. *Nuclear Engineering and Technology*[J], 2007, 39(3): 193
- [6] Aoto K, Uto N, Sakamoto Y et al. *Journal of Nuclear Science and Technology*[J], 2011, 48(4): 463
- [7] Lee K L, Ha K S, Jeong J H et al. *Nuclear Engineering and Technology*[J], 2016, 48(5): 1071
- [8] Xu Haitao(徐海涛). *Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering(核科学与工程)*[J], 2008, 28(2): 129
- [9] Warren A D, Griffiths I J, Harniman R L et al. *Materials Science and Engineering A*[J], 2015, 635: 59
- [10] Evans M. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*[J], 2011, 88: 449
- [11] Fan Z C, Smith D J, Chen X D et al. *Acta Metallurgica Sinica*[J], 2011, 24(2): 132
- [12] Chen B, Smith D J, Flewitt P E et al. *Materials at High Temperatures*[J], 2014, 28(3): 155
- [13] Whittaker M T, Evans M, Wilshire B. *Materials Science and Engineering A*[J], 2012, 552: 145
- [14] Esposito L, Bonora N, Vita G D. *21st European Conference on Fracture*[C]. Oxford: Elsevier, 2016: 927
- [15] Boerman D J, Zhu J H. *Materials Science and Engineering*[J], 1984, 67: 221
- [16] Davies C M, O'Dowd N P, Dean D W et al. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*[J], 2003, 80: 541
- [17] Davies C M, Dean D W, Yatomi M et al. *Materials Science and Engineering A*[J], 2009, 510-511: 202

- [18] NIMS. *NRIMS Creep Data Sheet No.14B*[R]. Japan: National Institute for Materials Science, 1988: 1
- [19] NIMS. *NRIMS Creep Data Sheet No.42*[R]. Japan: National Institute for Materials Science, 1996: 1
- [20] Li Ang(李 昂). *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2020, 30(2): 308
- [21] Li Ang(李 昂), Gao Wei(高 蔚), Wu Fu(吴 福) *et al. Atomic Energy Science and Technology*(原子能科学技术)[J], 2020, 54(4): 709
- [22] Douglas J, Dennis R, Spindler M. *2007 Proceedings of the ASME Pressure Vessels and Piping Conference-8th International Conference on Creep and Fatigue at Elevated Temperatures*[C]. Washington: Savannah River Company LLC, 2007: 399
- [23] The American Society of Mechanical Engineers. *2015 ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section II Materials*[M]. New York: ASME, 2015: 386
- [24] Zhao Jie(赵 杰), Li Dongming(李东明), Fang Yuanyuan(方园园). *Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2009, 45(7): 835
- [25] Hares E A, Mostafavi M, Bradford R *et al. International Journal of Pressure Vessels and Piping*[J], 2018, 168: 132

Creep Data Prediction for Type 316H Stainless Steel Served in Nuclear Power Plant

Li Ang, Wu Fu, Gao Wei, Zhang Yi

(Innovation Center of Nuclear Materials for National Defense Industry, Science and Technology on Particle Transport and Separation Laboratory, Institute of Physical and Chemical Engineering of Nuclear Industry, Tianjin 300180, China)

Abstract: Creep life prediction is an important issue for components used for nuclear breeders at high temperature. Through analysis on creep data of 316H stainless steel served in reactor vessels, the steady state creep rate equation was obtained by rate temperature parameter model. Reasonable statistical test results supported the reliability function of creep property. σ -RTP- R curves and T - $[\sigma]$ - R curves were proposed for 316H stainless steel based on the distribution of Z' -parameter in this research. The allowable stresses in service temperatures from 550 °C to 700 °C are also obtained according to the standard methods specified in ASME BPVC. The results demonstrate that RMB' model has not only good precision in comparison of other existent creep models, but also high prediction accuracy. The experimental creep data completely drop into the 99.7% confidence interval of predicted results by reliability function. The steady state creep behavior and allowable stress of 316H stainless steel in experimental conditions can be well evaluated by the present model.

Key words: 316H stainless steel; creep property; rate temperature parameter model; Z' parameter; allowable stress

Corresponding author: Li Ang, Master, Senior Engineer, Institute of Physical and Chemical Engineering of Nuclear Industry, Tianjin 300180, P. R. China, Tel: 0086-22-58231665, E-mail: kenshin0209@sina.com