

基于可靠度的 Incoloy800H 管材蠕变性能分析

李 昂, 张 毅, 高 蔚, 吴 福, 陈开媛

(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: 结合蠕变特征量-温度参数模型, 研究了 Incoloy800H 管材在 600~1050 °C 下的蠕变行为, 拟合得出材料稳态蠕变速率、蠕变断裂时间、蠕变第 3 阶段起始时间的可靠性方程, 并建立了管材容许应力与服役温度、可靠度的关系。结果表明, 确定的蠕变特征量可靠性方程可以较好地预测 Incoloy800H 管材稳态蠕变速率、蠕变断裂时间、蠕变第 3 阶段起始时间的变化行为。长时蠕变数据均位于对应蠕变方程在可靠度 0.997 条件下的预测区域内。与 ASME 推荐的容许应力值相比, 蠕变特征量可靠性方程可以提供更为准确的容许应力评估结果。

关键词: Incoloy800H 管材; 可靠度; 蠕变性能; 蠕变特征量-温度参数; 容许应力

中图分类号: TG142.25

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2022)02-0675-07

由美国 Inco-Corporation 公司开发的 800 系列合金属于铁镍铬系耐蚀合金, 是一类极其重要的高温结构材料。通过增加碳含量、控制晶粒度 (5 级或更粗)、添加 Ti、Al 元素等措施, Incoloy800H 在整个 800 系耐蚀合金中具有更为优良的高温稳定性、蠕变性能及耐晶间腐蚀能力, 被广泛应用于核电、化工、动力工程等领域^[1-3]。

在第 4 代核能系统国际论坛确定的 6 种重点研发方案中, 超临界水冷堆、钠冷快堆和铅冷快堆冷却剂的出口温度可达 550 °C, 而熔盐堆、气冷快堆、超高温气冷堆堆芯出口温度分别可达 800、850、1000 °C 以上^[4,5]。Incoloy800H 合金是上述某些反应堆中承压构件 (诸如: 蒸汽发生器、热交换器、燃料包壳材料) 的备选材料之一^[6-8]。针对高可靠性、高安全性的反应堆设计要求, 构件材料的长期寿命性能评估尤为重要。国内外学者和机构对于 Incoloy800H 合金的蠕变行为开展了大量的研究工作。结合 850 °C 下的拉伸及蠕变实验, Abd El-Azim 拟合得出 Incoloy800H 拉伸性能与蠕变行为的关系式, 并成功预测了材料在 26~75 MPa 条件下的蠕变行为^[9]。Kolluri 研究了超高温反应堆换热器用 800H 合金的蠕变-疲劳行为^[6], 计算得到 800 °C 下材料蠕变疲劳的实际损伤积累值, 结合双线性损伤累积准则, 提出 800H 合金的服役温度有望突破 760 °C。Kim 等采用 CT 试样确定了 800 °C 下 800H 合金的蠕变裂纹扩展速率方程^[10], 结果表明, 与 617 合金相比, 800H 合金的蠕变裂纹扩展更快。ASME(American society of mechanical engineering)指出 Incoloy800H 合金在服役温度

760 °C 时的使用寿命仍可维持在 35 年左右^[11], 而如何在考虑寿命数据分散性的情况下准确评估材料在更高温度下的蠕变性能、合理确定其服役寿命有待进一步研究。

本研究根据日本国立材料研究所 (NIMS) 公开的蠕变持久数据^[12], 结合蠕变特征量-温度参数模型, 考虑批次间的蠕变性能差异性, 建立基于可靠度的 Incoloy800H 蠕变性能方程。采用统计分析方法及补充数据, 评估并验证 Incoloy800H 管材蠕变性能方程的准确性。综合 ASME 在蠕变评估方面的指标要求^[13], 引入可靠度的概念, 系统地评价 Incoloy800H 管材在稳态蠕变速率、持久断裂时间、蠕变第 3 阶段起始时间等方面的性能变化及服役条件容许上限。参照不同温度下材料的容许应力推荐值, 比较不同方法评估结果的差异性。

1 蠕变特征量-温度参数可靠性模型

之前研究提出的速率温度参数 (RTP)^[14,15] 可以在较大应力、温度范围内的稳态蠕变速率整合到一个较窄的数据范围内, 依据数据带拟合主曲线, 实现对不同实验条件下蠕变速率的预测。材料的蠕变特征量不仅包含速率相关的变量 (例如: 稳态蠕变速率 $\dot{\epsilon}_s$) 还包含时间相关的变量 (例如: 蠕变断裂时间 t_r 、蠕变第 3 阶段起始时间 t_s)。兼顾速率温度参数 (RTP) 和时间温度参数 (TTP) 的计算需求, 提出了统一形式的蠕变特征量-温度参数模型。根据前期结果, 模型的蠕变特征量-温度参数采用 RMB 参数形式, 应力函数 $P(\sigma)$ 确定为三阶对

收稿日期: 2021-04-09

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

数应力多项式，具体模型表达式如式（1）所示。

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

式中： Y 为材料的蠕变特征量；当 Y 代表稳态蠕变速率时，单位为 h^{-1} ， $b=-1$ ，当 Y 代表蠕变断裂时间或第 3 阶段起始时间时，单位为 h ， $b=1$ ； σ 为蠕变应力，单位为 MPa ； T 为绝对温度，单位为 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， $\langle q \rangle = 0$ 。

受材料化学成分、微观组织、试样加工精度、实验控制精度等多方面的影响，蠕变性能数据通常呈现出较大的分散性，分布于拟合的主曲线两侧。状态参数 Z 表示材料蠕变性能偏离主曲线的程度，具体的表达式如式（2）所示。在 Z 参数满足正态分布的前提下，建立材料蠕变特征量偏离上限 Z_R 与可靠度 R 的关系式，蠕变特征量-温度参数可靠性模型如式（3）。

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

$$R(Z) = 1 - F(Z) = 1 - \frac{1}{s\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{Z_R} -\exp\left[-\frac{(Z - \bar{Z})^2}{2s^2}\right] dZ \quad (3)$$

式中： $F(Z)$ 为蠕变失效概率， \bar{Z} 为 Z 参数计算数据的均值， s 为 Z 参数数据的标准差。

2 Incoloy800H 蠕变性能的可靠性方程

2.1 材料状态及蠕变持久数据

Incoloy800H 合金蠕变试样取自换热器原料无缝管(退火态)^[12]，取样方向沿管材轴向。合金管材共包含 6 个批次，批次间的化学成分存在一定的差异性，具体检测结果如表 1 所示。根据表 1 的检测数据，蠕变实验批次管材的化学成分均满足 ASME SB163 的指标要求。

为了充分验证蠕变特征量-温度参数模型的普适性，选择不同实验条件下的材料稳态蠕变速率 $\dot{\epsilon}_s$ 、蠕变断裂时间 t_r 、蠕变第 3 阶段起始时间 t_s 作为分析数据。评估数据取自 600~1050 °C 温度范围内的蠕变实验，数据量分别为 45 个、105 个、45 个，其中：稳态蠕变速率的最小值为 $6.30 \times 10^{-8} \text{ h}^{-1}$ ，蠕变断裂时间、第 3 阶段起始时间的上限不超过 10^4 h 、 $4 \times 10^4 \text{ h}$ 。不同种类的材料蠕变数据分布如图 1 所示。

2.2 蠕变性能的可靠性方程

结合不同种类的蠕变数据，利用多元线性回归法计算确定了 Incoloy800H 管材稳态蠕变速率 $\dot{\epsilon}_s$ 、蠕变断裂时间 t_r 、蠕变第 3 阶段起始时间 t_s 的蠕变方程，不同方程中的参数计算值如表 2 所示。

图 2 比较了不同批次下蠕变性能曲线与实测数据的拟合情况。从图中可以看出，具有一定分散性的实测数据分布于蠕变拟合曲线的两侧。虽然管材来自不同批次，但批次间蠕变数据未见明显差异。采用式（1）求解得到的不同形式蠕变方程可以很好地拟合对应的蠕变特征量数据。根据蠕变数据偏离主曲线的程度判断，数据的分散性与蠕变特征量的种类、实验应力、温度、材料批次均有关，仅采用模型主曲线确定的评估结果可能会低估或高估材料的蠕变性能，这在一定程度上会损害反应堆构件的安全性或经济性。

表 1 Incoloy800H 管材化学成分检测结果

Table 1 Chemical composition results of Incoloy800H alloy tubes ($\omega/\%$)

Element	Reference code						ASME SB163
	fcA	fcB	fcC	fcD	fcE	fcF	
C	0.071	0.06	0.05	0.05	0.05	0.055	0.05~0.10
Si	0.71	0.43	0.52	0.56	0.5	0.56	≤ 1.0
Mn	1.28	1.12	1.14	1.2	1.34	1.19	≤ 1.5
P	0.019	0.011	0.009	0.018	0.014	0.015	-
S	0.005	0.008	0.014	0.005	0.007	0.005	≤ 0.015
Ni	32.43	32.34	32.48	32.48	31.76	32.08	30.0~35.0
Cr	20.75	21	21.06	20.65	21.05	20.65	19.0~23.0
Mo	0.03	0.002	0.005	0.03	0.012	0.03	-
Cu	0.1	0.09	0.02	0.09	0.06	0.06	≤ 0.75
Al	0.39	0.25	0.39	0.33	0.52	0.25	0.15~0.60
N	0.0206	0.022	0.0162	0.0231	0.0114	0.024	-
Co	0.32	0.54	0.32	0.24	0.028	0.37	-
Ti	0.32	0.49	0.42	0.32	0.45	0.29	0.15~0.60
Fe	Bal.						≥ 39.5

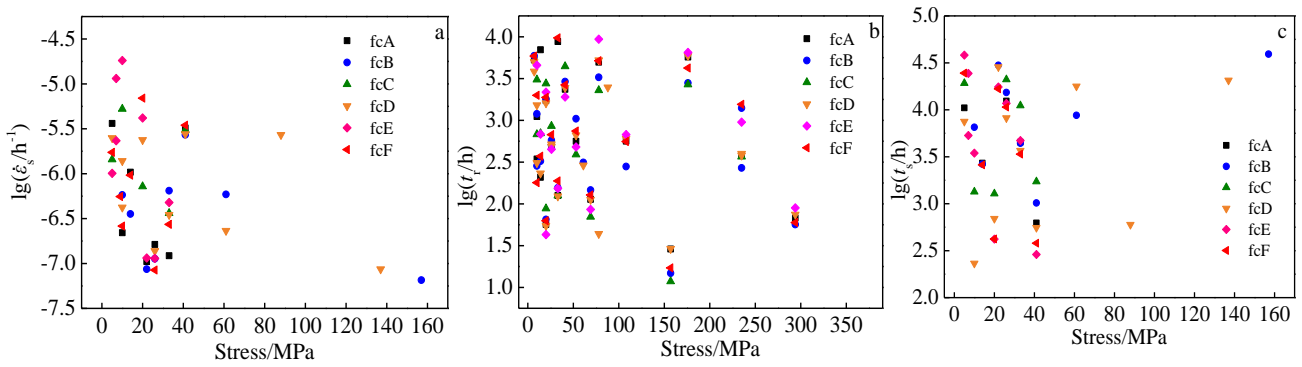


图 1 不同批次 Incoloy800H 管材的蠕变性能数据分布

Fig.1 Distribution of creep data from Incoloy800H alloy tube in various batches: (a) steady creep rate, (b) creep rupture time, and (c) initiation time of tertiary creep

表 2 蠕变性能方程的参数拟合值

Table 2 Optimized parameters in different creep equations

Creep equation	Optimized parameters						
	T_a	$\lg t_a$	q	a_0	a_1	a_2	a_3
$\dot{\epsilon}_s$	773.20	11.772	1.00	-1.2461×10^{-3}	-3.2959×10^{-2}	3.4224×10^{-2}	-1.3174×10^{-2}
t_r	581.38	10.156	1.02	-1.2333×10^{-3}	-1.7988×10^{-2}	1.2200×10^{-2}	-3.9861×10^{-3}
t_s	731.54	9.645	1.00	1.6985×10^{-3}	-2.7342×10^{-2}	2.0942×10^{-2}	-7.5694×10^{-3}

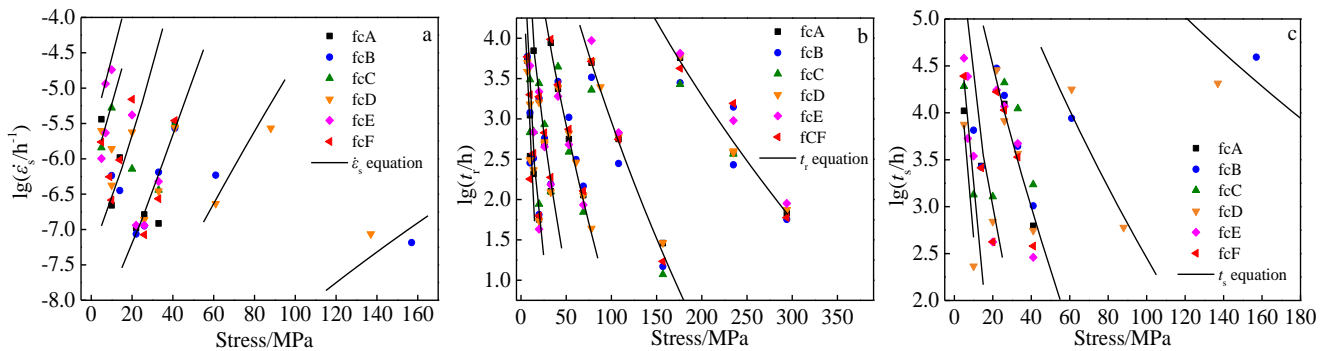


图 2 Incoloy800H 管材蠕变性能预测曲线与实测数据的对比

Fig.2 Comparison of predicted creep curves and experimental data of Incoloy800H alloy tubes: (a) steady creep rate, (b) creep rupture time, and (c) initiation time of tertiary creep

借助 Anderson-Darling 法对不同蠕变特征量的计算数据进行了正态性检验。结果表明，在显著性水平 5% 的前提下，Incoloy800H 管材稳态蠕变速率、蠕变断裂时间、蠕变第 3 阶段起始时间的 Z 值均满足正态分布。

在此基础上，计算确定了管材不同蠕变特征量的可靠性方程，具体参数如表 3 所示。对比表中数据可知，不同蠕变特征量的 Z 计算值均处于较低的数值水平，这表明蠕变数据基本上呈对称性地分布在方程的主曲线两

表 3 蠕变性能可靠性方程的检验结果和参数值

Table 3 Test results and calculated parameters in different creep equations

Creep equation	Normality test			Calculated parameters	
	Statistic	P	Decision at level (5%)	\bar{z}	$s/\times 10^{-4}$
$\dot{\epsilon}_s$	0.481	0.221	Obey	1.446×10^{-4}	8.237
t_r	0.565	0.141	Obey	-1.990×10^{-5}	2.943
t_s	0.268	0.668	Obey	1.098×10^{-8}	8.454

侧，不同方程的主曲线均未发生明显的偏移。

3 分析与讨论

3.1 蠕变方程的拟合准确性

图 3 对比了不同实验条件下蠕变实测数据与对应蠕变方程计算预测值的吻合情况。从图 3 中可以看出，相同温度下的蠕变数据分散在理想预测线的两侧，3 种蠕变特征量方程均没有出现整体高估或低估某一温度下管材蠕变性能的情况。虽然实验的温度范围较大（600~1050 °C），但 3 种蠕变特征量方程的预测值均位于理想预测线两侧 99% 的置信区间内，以上现象说明本研究确定的 Incoloy800H 管材蠕变方程具有良好的拟合准确性。

为了比较蠕变方程在不同温度下数据拟合方面的差异性，计算了不同蠕变特征量实测值与拟合值的对数均方根误差(RMSE)，具体的 RMSE 表达式参照文献[16]所示。从表 4 的统计数据来看，蠕变断裂时间方程对实测数据的总体拟合精度最高，而蠕变第 3 阶段起始时间方程的总体拟合精度较低。1050 °C 下稳态蠕变速率的 RMSE 值较小，这与实测值较少（仅有 1 个）有关。结合式 (1) 的表达式，蠕变特征量-温度参数模型的主曲线以蠕变应力作为自变量。虽然 1050 °C 下的稳态蠕变速率实测值较少，但在对应的蠕变应力附近（5~10 MPa）实测值达到了 15 个，因此并不会影响方程在该应力附近

的拟合精度。在较高温度（1000~1050 °C）下蠕变第 3 阶段起始时间方程的拟合精度明显下降，这可能与高温条件下蠕变曲线第 3 阶段拐点不明显导致的测量误差有关。结合图 3c，虽然高温条件下蠕变第 3 阶段起始时间方程的拟合精度下降，但预测值仍未超出理想预测线两侧 99% 的置信区间。在其他温度下同种蠕变方程的拟合精度没有明显的差异性。

蠕变特征量可靠性方程可以很好地表征 Incoloy800H 合金管材的蠕变行为，以上 3 种可靠性方程的 RMSE 值分别为 0.2621、0.1433、0.2992。

3.2 蠕变可靠性方程的预测有效性

采用计算确定的蠕变可靠性方程研究了不同温度下 Incoloy800H 管材的长时蠕变行为，如图 4 所示。考虑到批次间数据的分散性，图 4 分别列出了可靠度 R 为 0.95、0.997 时的实验应力-蠕变特征量曲线。对比图 4 中不同可靠度的曲线可知，随着可靠度 R 的提升，相同实验条件下的材料稳态蠕变速率逐渐增加、蠕变断裂时间及第 3 阶段起始时间逐渐降低。

采用 NIMS 公开的同批次管材长时蠕变数据^[12]来验证蠕变可靠性方程计算预测结果的准确性，其中稳态蠕变速率处于 $3.32 \times 10^{-8} \sim 5.65 \times 10^{-8} \text{ h}^{-1}$ 的范围内，蠕变断裂时间及第 3 阶段起始时间分别分布于 $1.06 \times 10^5 \sim 1.4 \times 10^5$ 、 $4.08 \times 10^4 \sim 8.7 \times 10^4 \text{ h}$ 的范围内。对比图 4 中实测数据与预测曲线的位置可知，绝大多数的长时蠕变数据均未超过

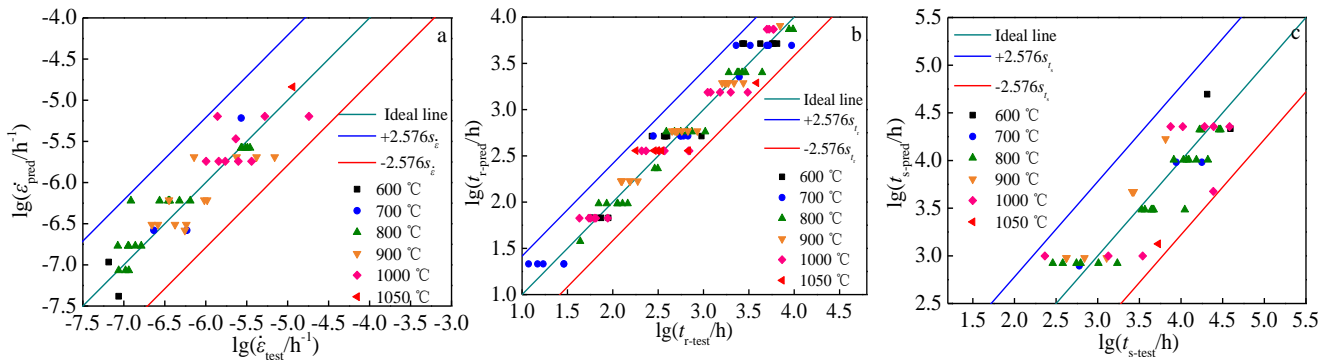


图 3 Incoloy800H 管材蠕变方程预测值与实测蠕变数据的对比

Fig.3 Comparison of actual experiments and predicted data of Incoloy800H alloy tubes by different creep equations: (a) steady creep rate, (b) creep rupture time, and (c) initiation time of tertiary creep

表 4 不同温度下蠕变性能方程的 RMSE 值

Table 4 RMSE values of creep equations at different temperatures

Creep equation	Test temperature/°C						600~1050
	600	700	800	900	1000	1050	
$\dot{\epsilon}_s$	0.2731	0.2874	0.2208	0.2831	0.3099	0.1010	0.2621
t_r	0.1577	0.1630	0.1196	0.0868	0.1582	0.2120	0.1433
t_s	0.3264	0.1707	0.2243	0.2836	0.4236	0.6013	0.2992

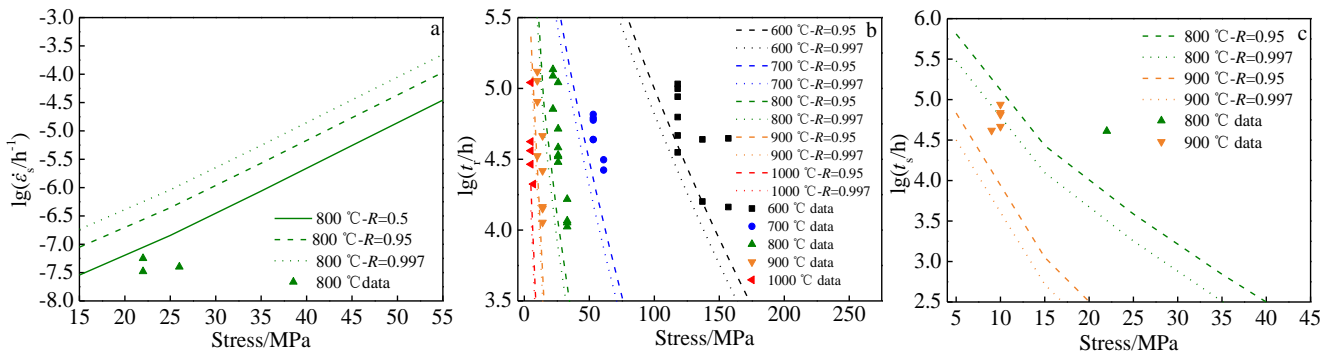


图 4 Incoloy800H 管材不同蠕变性能可靠性预测的验证结果

Fig.4 Validation for reliability prediction of creep property of Incoloy800H alloy tubes: (a) steady creep rate, (b) creep rupture time, and (c) initiation time of tertiary creep

对应蠕变方程在可靠度 0.95 条件下预测曲线确定的区域边界,其余长时数据均位于对应蠕变方程在可靠度 0.997 条件下的预测区域,以上现象说明本研究建立的蠕变特征量可靠性方程均准确有效,基于可靠度的预测结果可以满足不同设计要求下的工程需求。

3.3 基于可靠度的管材容许应力评估

材料的长时高温性能对于服役状态下承压装备的安全运行尤为重要。围绕材料蠕变容许应力的确定规则,ASME 在 BPVC Section II、Section III 分别提出了不同的最大容许设计应力指标要求。作为评估核反应堆结构材料蠕变性能的主要依据^[6],Section III 考虑从材料的蠕变变形(10⁵ h 内产生 1%应变)、断裂(蠕变断裂时间 10⁵ h)、损伤(蠕变第 3 阶段的起始时间 10⁵ h)等角度综合评估容许应力上限。结合 ASME 的相关指标要求^[13],采用本研究确定的蠕变特征量可靠性方程计算出不同评估项目下的容许应力值,具体结果如表 5 所示。

从表 5 中的数据可知,稳态蠕变速率 10⁻⁷ h⁻¹ 外推确定的容许应力值(R=0.95)始终大于相同温度下其他 2 项指标要求的容许应力值,这说明蠕变变形并不是影响评估温度下容许应力的关键因素。在服役温度低于 700 °C 的范围内,通过蠕变断裂指标确定的容许应力值较小,该值与 ASME III-NH 给出的推荐值基本一致。当温度高于 700 °C 时,综合以上 3 个项目确定的材料容许

应力值显著低于 ASME III-NH 的推荐值^[13]。结合表 4 中该温度范围内的 RMSE 值,蠕变第 3 阶段起始时间数据的较大分散性是造成材料容许应力值低于 ASME 推荐值的主要原因。该现象也说明即使服役温度低于 760 °C,构件的选材及设计也不能完全依照 ASME 规定的容许应力值,有必要结合材料性能的实际分散性开展设计校核。

考虑到新型核能系统对构件提出了更高的耐温要求,合理扩展 Incoloy800H 合金的容许服役范围是材料长时性能评估的重要工作方向之一^[17]。图 5 显示了在高温条件下管材容许应力与服役温度的关系。从图 5a 中可以看出,相同温度下服役时间 10⁵ h 对应材料产生 1%应变的推荐应力值基本位于可靠度 0.95 条件下外推至稳态蠕变速率 10⁻⁷ h⁻¹ 的容许应力曲线附近。这说明在高温条件下通过合理设置可靠度,稳态蠕变速率指标在容许应力评估方面可以达到与 ASME III-NH 1%应变指标相似的准确度。图 5b 中的 S_{avg}、S_{min} 分别代表蠕变断裂时间 10⁵ h 时材料的平均应力及最小应力^[13]。对比图中的位置可知,ASME II-D 提供的应力数据 0.67S_{avg}、0.8S_{min} 基本一致,且均位于可靠度 0.95 对应的容许应力曲线附近。参考图 2b 和图 4b 中蠕变性能的分散性,ASME II-D 推荐的应力值很难保证材料在 10⁵ h 内不会发生蠕变断裂失效。

图 6 比较了采用蠕变特征量温度参数可靠性方程确定的容许应力和 ASME 推荐值^[11,13]的差异性。可靠性方

表 5 ASME 评估规范下 Incoloy800H 管材服役 10⁵ h 的容许应力对比

Table 5 Comparison of allowable stresses for Incoloy800H tubes in ASME BPVC (boiler and pressure vessel code)

Temperature/ °C	Creep stress at $\dot{\epsilon}_s=10^{-7}h^{-1}$ / MPa	Creep rupture strength at 10 ⁵ h/ MPa	Stress to cause initiation of tertiary creep in 10 ⁵ h /MPa	Allowable stress by ASME
	$\sigma_{R=0.95}$	$0.67 \sigma_{R=0.95}$	$0.8 \sigma_{R=0.95}$	
621	109.2	57.2	66.5	55.4
649	78.4	43.7	46.8	44.5
677	58.7	33.3	33.6	35.6
704	45.0	25.3	24.4	28.0
732	34.6	19.1	17.6	22.6
760	26.2	14.3	12.6	17.9

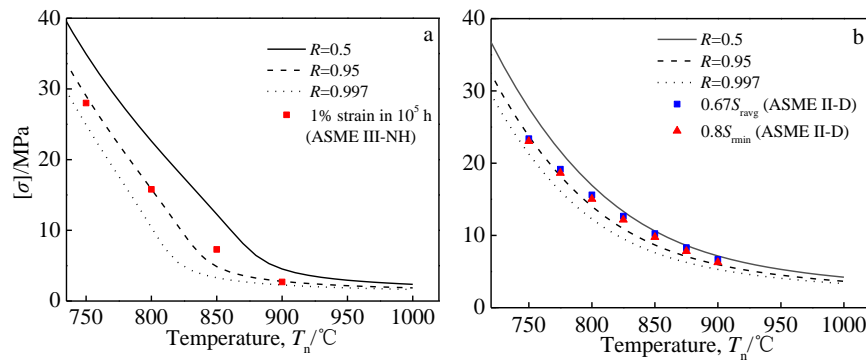


图 5 不同外推条件下 Incoloy800H 管材的容许应力与服役温度曲线与 ASME 计算应力值的比较

Fig.5 Evaluated results of $[\sigma]-T$ curves and calculated stresses in ASME codes for Incoloy800H alloy tubes in different creep criteria: (a) $\dot{\epsilon}_s=10^{-7} \text{ h}^{-1}$ and (b) $t_r=10^5 \text{ h}$

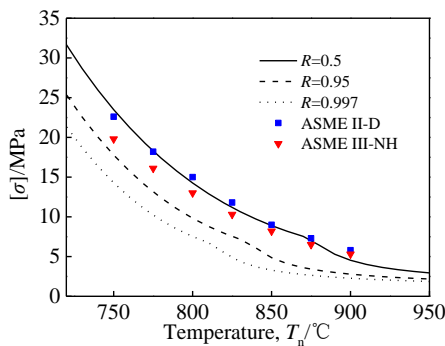


图 6 高温条件下 Incoloy800H 管材的 $[\sigma]-T$ 曲线与 ASME 容许应力推荐值的比较

Fig.6 Comparison of $[\sigma]-T$ curves of Incoloy800H alloy tubes with allowable stresses by ASME codes at high temperatures

程确定的容许应力定义为指定可靠度下 3 类数值的最小值：(1) 稳态蠕变速率 10^{-7} h^{-1} 对应的应力值；(2) 蠕变断裂时间 10^5 h 对应的应力值；(3) 10^5 h 进入第 3 阶段蠕变对应的应力值。经计算，在可靠度 0.95 的条件下 Incoloy800H 管材在 760、800、850、900 °C 时的容许应力计算值分别为 15.8、9.8、4.8、2.8 MPa。从 ASME 不同规则的容许应力值可知，BPVC Section III 对材料的耐温要求更高。但与不同可靠度下材料容许应力曲线相比，ASME II-D、ASME III-NH 规则均存在高估高温 ($\geq 760 \text{ }^\circ\text{C}$) 条件下材料容许应力的风险，建议在数据量有限的情况下结合可靠度评估材料的容许应力。

4 结 论

1) 针对不同蠕变性能指标的评估需求，推导了统一形式的蠕变特征量-温度参数可靠性模型。采用多元

线性回归法，分别确定了 Incoloy800H 合金管材的稳态蠕变速率、蠕变断裂时间、蠕变第 3 阶段起始时间的可靠性方程。

2) 蠕变特征量可靠性方程可以很好地表征 Incoloy800H 合金管材的蠕变行为，以上 3 种可靠性方程的 RMSE 值分别为 0.2621、0.1433、0.2992，补充的长时蠕变数据均位于对应蠕变方程在可靠度 0.997 条件下的预测区域内。

3) 结合 ASME 的相关指标要求，采用蠕变特征量可靠性方程求解出 Incoloy800H 管材的容许应力。当服役温度低于 700 °C 时，可靠性方程确定的容许应力值与 ASME III-NH 给出的推荐值基本一致。

4) 综合稳态蠕变速率、蠕变断裂时间、蠕变第 3 阶段起始时间的计算结果，在可靠度 0.95 的条件下，Incoloy800H 管材在 760、800、850、900 °C 时的容许应力计算值分别为 15.8、9.8、4.8、2.8 MPa。ASME II-D、ASME III-NH 规则均存在高估高温 ($\geq 760 \text{ }^\circ\text{C}$) 条件下材料容许应力的风险。

参考文献 References

[1] Tan L, Rakotojaona L, Allen T R *et al.* *Materials Science and Engineering A*[J], 2011, 528: 2755
 [2] Almostaneer H, Schrijen H, Barai K *et al.* *Advances in Materials and Processing Technologies*[J], 2015, 1(1-2): 56
 [3] Xiao Jiangchu(肖将楚), Zhang Maicang(张麦仓), Peng Yichao(彭以超) *et al.* *Transactions of Materials and Heat Treatment(材料热处理学报)*[J], 2015, 36(4): 121
 [4] Yan Changqi(阎昌琪), Cao Xinrong(曹欣荣). *Engineering of Nuclear Reactors(核反应堆工程)*[M]. Harbin: Harbin Engineering University Press, 2004: 155
 [5] Zhu Jizhou(朱继洲), Xi Shuren(奚树人), Yang Zhilin(杨志林)

- et al. Nuclear Reactors Safety Assessment*(核反应堆安全分析)[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2004: 125
- [6] Kolluri M, Pierick P T, Bakker T. *Nuclear Engineering and Design*[J], 2015, 284: 38
- [7] Lee K S. *Nuclear Technology*[J], 1984, 66(2): 241
- [8] Grierson D S, Cao G, Brooks P *et al. Metallurgical and Materials Transactions E*[J], 2017, 4: 13
- [9] Abd El-Azim M E. *Journal of Nuclear Materials*[J], 1996, 231(1-2): 146
- [10] Kim W G, Kusuma I N C, Sah I *et al. Transactions of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting*[C]. Goyang, Korea: The Korean Society of Mechanical Engineers, 2019
- [11] Swindeman R W, Swindeman M J, Robert B W *et al. ASME Standards Technology*[R]. New York: LLC, 2008: 29
- [12] NIMS. *NRIMS Creep Data Sheet No.26B*[M]. Japan: National Institute for Materials Science, 1998: 1
- [13] American Society of Mechanical Engineers. *ASME Boiler and Pressure Vessel Code, an International Code*[M]. New York: ASME, 2004: 386
- [14] Li Ang(李 昂). *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2020, 30(2): 308
- [15] 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
- [16] Li Ang(李 昂), Wu Fu(吴 福), Gao Wei(高 蔚) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2021, 50(2): 531
- [17] Swindeman R W, Swindeman M J, Ren Weiju. *Proceedings of PVP2006-ICPVT-11. ASME Pressure Vessels and Piping Division (Publication)*[C]. Canada: Vancouver, BC, 2006: 521

Analysis on Creep Property of Incoloy800H Tube by Reliability Concept

Li Ang, Zhang Yi, Gao Wei, Wu Fu, Chen Kaiyuan

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

Abstract: In order to take full advantage of Incoloy800H alloy, the creep behavior of Incoloy800H alloy tubes at temperatures ranging from 600 °C to 1050 °C was investigated based on creep character-temperature parameter models. The reliability equations of steady creep rate, rupture time and initiation time of tertiary creep were obtained by multiple linear regression. The effective relationships among allowable stress, service temperature and reliability were established. The results demonstrate that the creep reliability equations make the prediction for creep behavior of Incoloy800H alloy tubes more accurately. The long-term creep data are completely located in the 0.997 confidence band of predicted results by corresponding reliability equations. In comparison with recommended allowable stresses by ASME, the creep reliability equations can provide more reasonable evaluated results.

Key words: Incoloy800H alloy tube; reliability; creep property; creep character-temperature 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