

小型压水堆严重事故下一回路承压管道蠕变预测 分析模型开发

杨磊¹ 姜维维² 郝亚雷¹

1 (中国人民解放军 92609 部队 北京 100077)

2 (中国兵器工业集团第 53 研究所 济南 250000)

摘要 一回路承压管道蠕变是压水堆核电站严重事故重要现象之一。针对小型压水堆,本文基于 SCDAP/RELAP5 程序开发了严重事故分析模型,利用实验拟合方法得到了一回路主管道(SA321)、自然循环式蒸汽发生器传热管(00Cr25Ni35AlTi)两种材料蠕变预测分析模型,改进了 SCDAP/RELAP5 程序蠕变预测分析功能模块,并通过假想事故序列验证了 SA321、00Cr25Ni35AlTi 蠕变预测分析模型的合理性。为后续开展小型压水堆严重事故下一回路承压管道蠕变规律研究提供基础参考。

关键词 压水堆,严重事故,蠕变预测,SCDAP/RELAP5 程序

中图分类号 TL341, TK225, TK351⁺.6

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2017.hjs.40.050603

Creep analysis model of small PWR plant RCS pipelines under severe accident condition

YANG Lei¹ JIANG Weiwei² HAO Yalei¹

1(92609 Department of People's Liberation Army of China, Beijing 100077, China)

2(China North Industries Group Institute of 53, Jinan 250000, China)

Abstract Background: The reactor coolant system (RCS) pipelines creep is an important phenomenon during severe accident analysis of pressurized water reactor (PWR) plants. **Purpose:** This study aims to develop a severe accident analysis model focus on the RCS pipeline creep analysis for small PWR plant. **Method:** The severe accident analysis model is developed by using the SCDAP/RELAP5 code, the creep prediction formulas of RCS main coolant pipeline (SA321) and natural circulation steam generator tubes (00Cr25Ni35AlTi) materials are fitted by the experiment data, and the corresponding functions are added to the creep prediction subroutines of the SCDAP/RELAP5 code, which are finally verified by a simulation of supposed severe accident by SCDAP/RELAP5 code. **Results:** The upgraded SCDAP/RELAP5 code is finally available for the RCS pipelines creep analysis of the small PWR under severe accident condition. **Conclusion:** This provides a basic reference for the next quantify creep character analysis of the small PWR during the severe accident processes.

Key words PWR, Severe accident, Creep prediction, SCDAP/RELAP5 code

金属在持续应力作用下会发生缓慢的塑性变形,这种现象被称为蠕变。金属温度越高,所承受应力越大,蠕变引起的塑性变形越明显,最终蠕变破损/断裂。对于奥氏体不锈钢等熔点较高的金属材料,只有温度达到其蠕变温度(约 $0.3 \times T_m$, 其中 T_m

为熔化温度, K) 才能出现显著蠕变。通常碳素钢的蠕变温度在 300–350 °C, 合金钢蠕变温度在 400–450 °C。反应堆严重事故期间,堆芯过热蒸汽在压差作用下沿一回路管道向外排放,蒸汽排放时会经对流换热与辐射换热加热沿途管道,极易突破

第一作者: 杨磊, 男, 1987 年出生, 2014 年于海军工程大学获博士学位, 研究领域为舰船核反应堆安全分析

收稿日期: 2016-12-21, 修回日期: 2017-02-27

First author: YANG Lei, male, born in 1987, graduated from Naval University of Engineering with a doctoral degree in 2014, focusing on safety analysis of ship reactor

Received date: 2016-12-21, accepted date: 2017-02-27

金属材料的蠕变温度, 甚至出现非预期的管道蠕变破裂。一方面可减小高压熔堆风险, 减轻事故后果; 一方面改变事故发展预期, 增大核事故应急处置难度。本文将基于 SCDAP/RELAP5 程序, 建立小型压水堆一回路承压管道蠕变分析模型, 为后续开展典型严重事故下一回路承压管道蠕变规律研究提供基础。

1 基于 SCDAP/RELAP5 程序的小型压水堆严重事故分析模型

SCDAP/RELAP5 程序是由美国 NRC (Nuclear Regulatory Commission)发起, 由美国 INEEL (Idaho National Engineering and Environmental Laboratory)

开发的机理性严重事故最佳估算分析程序, 主要由 RELAP5、SCDAP、COUPLE、MATPRO 等模块构成^[1]。程序主体是融合了 SCDAP 堆芯损坏模型和 COUPLE 下腔室模型的 RELAP5 程序, 能模拟包含严重事故下堆芯的损伤进程及压力容器下封头内熔池行为等。根据小型压水堆分散式布置和双环路结构设计特点, 对其一、二回路进行了控制体划分, 如图 1 所示, 建立了基于 SCDAP/RELAP5 程序的严重事故分析模型。

通过额定工况下一、二回路设计参数对比, 实现了对本分析模型稳态运行仿真分析能力和精度的验证, 如表 1 所示。

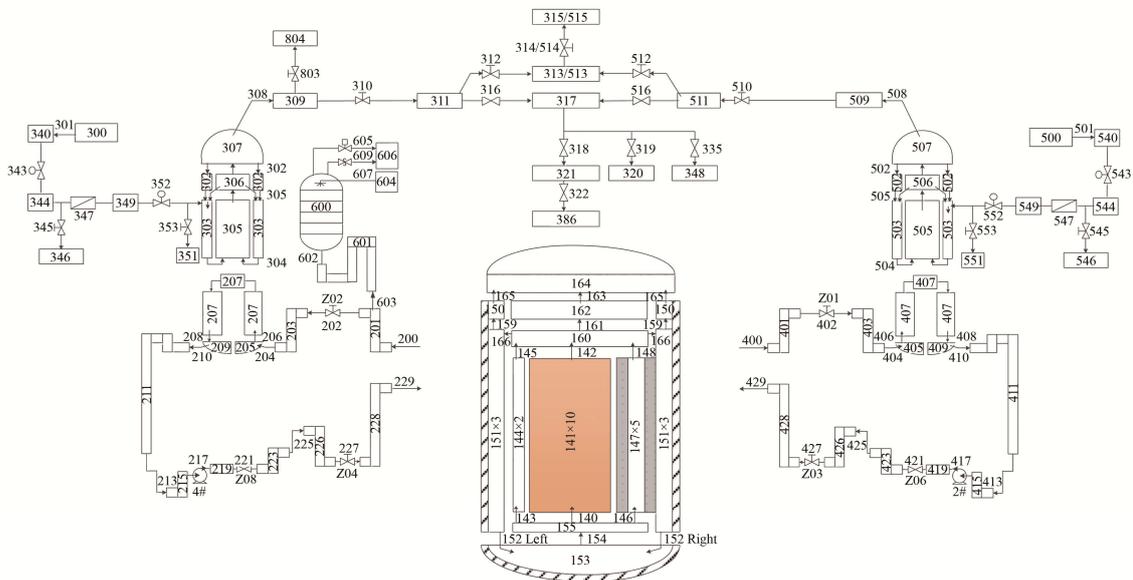


图 1 控制体模型
Fig.1 Control volume scheme.

表 1 SCDAP/RELAP5 模型稳态运行计算精度校验
Table 1 Steady state computational accuracy verification of SCDAP/RELAP5 model.

项目 Items	相对误差 Relative error / %
反应堆功率 Nuclear power	0
一回路流量 RCS flow rate	-2.16
堆芯进口温度 Core inlet temperature	-0.5
堆芯出口温度 Core outlet temperature	0.1
稳压器压力 Pressurizer pressure	0
一回路水装量 RCS coolant mass	-0.7
蒸汽发生器出口温度 SG steam temperature	-2.1
蒸汽发生器出口流量 SG steam flow rate	1.6
蒸汽发生器出口压力 SG pressure	0.2

根据核电厂严重事故研究成果^[2-4], 靠近压力容器的一回路主管道、稳压器波动管、蒸汽发生器传热管、压力容器下封头等在严重事故进程中均可能发生蠕变或蠕变破裂, 但其蠕变起始时间、蠕变速率、蠕变破裂时间不同。因此, 要整体分析一回路承压边界的蠕变失效, 还需基于 SCDAP/RELAP5 程序功能模块, 建立一回路承压管道热构件蠕变预测模型和压力容器下封头蠕变预测模型。

热构件蠕变模型基于 RELAP5 热构件模型, 在指定热构件材料、结构内外环境条件后, 即可开展结构材料的蠕变分析, 通过在源码中修改相关材料蠕变分析关系式, 可以模拟任何结构材料的蠕变进程, 具有极强的通用性。因此, 共考虑反应堆压力容器进/出口管道, 稳压器波动管、蒸汽发生器传热管共三类 7 个位置的热构件蠕变分析模型。为满足

保守性要求，在建立一回路主管道蠕变失效热构件时，将管内边界设置为对流换热边界，管外表面设置为绝热边界。蠕变破损出现后，会在蠕变位置形成破口，进而导致一回路放射性物质向安全壳或蒸汽发生器二次侧释放。对于蠕变破口尺寸大小，它与核动力系统设计、管道工作条件、特定事故进程有关，没有一个通用的标准或参考依据。INEEL通过一系列蠕变失效破口实验发现，失效后纵向裂纹会向四周发散，形成 0.25-1 倍的管道流通面积破口^[5]，例如，美国 Surry 核电厂在其事故分析中将稳压器波动管的蠕变失效破口定义为管道流通面积的

1/3，其计算结果与实验结果最为接近，本模型也将采用 Surry 核电厂的试验研究结论。

2 小型压水堆一回路承压管道材料蠕变预测分析模型

小型压水堆一回路主管道材料与 SCDAP/RELAP5 程序可开展蠕变预测分析的材料 (SA508 碳钢、SA316 不锈钢、Inconel-600 合金) 不完全一致，如表 2 所示。本节将开展 SA321、00Cr25Ni35AlTi 两种材料蠕变预测分析模型研究。

表 2 小型压水堆一回路承压边界材料与 SCDAP 材料库的差异
Table 2 Material difference between the small PWR and SCDAP/RELAP5 code.

承压边界 Pressure boundary	小型压水堆 The small PWR	SCDAP 材料 Materials in SCDAP code
一回路管道，稳压器波动管 RCS pipelines, surgeline	SA321 不锈钢 SA321 stainless steel	SA316 不锈钢 SA316 stainless steel
压力容器筒体 Reactor vessel	SA508 钢 SA508 carbon steel	SA508 钢 SA508 carbon steel
蒸汽发生器传热管 SG tube	00Cr25Ni35AlTi 合金 00Cr25Ni35AlTi alloy	Inconel-600 合金 Inconel-600 alloy

绝大多数金属材料的蠕变过程基本类似，其恒温下典型的蠕变曲线如图 2 所示^[6]。可分减速蠕变阶段 (如图 2 中 *ab* 段)、恒定最小蠕变速率阶段 (如图 2 中曲线 *bc* 段)、加速蠕变阶段 (如图 2 中 *cd* 段)，直至最终产生蠕变断裂。图 2 中 *d* 点对应的 t_r 就是蠕变断裂时间， ϵ_r 是总的蠕变应变量。

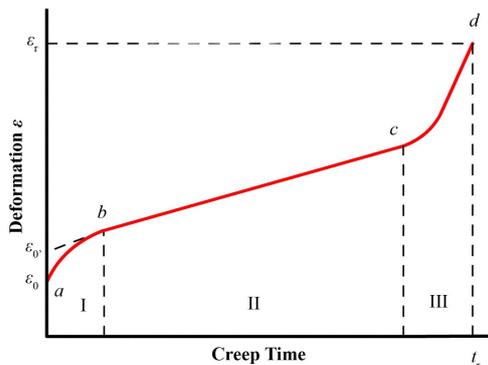


图 2 典型金属材料蠕变曲线
Fig.2 Creep curve of typical metal materials.

为了预测不同材料在复杂环境中的蠕变过程，需对图 2 中的蠕变曲线进行分析预测。目前，金属材料蠕变特性参数的获取主要是基于蠕变-疲劳试验^[7-8]，基于参考文献[9]提供的实验数据，利用 Larson-Miller Parameter (LMP)法拟合得到 SA321 蠕变预测关系式如下，拟合关系式与试验值对比如图 3(a)所示。

$$t_{tp} = 10^{\left[\frac{t_{LMP} - 20}{T} \right]} \quad (1)$$

$$t_{LMP} = 27\,763.746 - 5\,293.833 \times \log(6.895 \times \sigma) \quad (2)$$

式中： T 为结构材料平均温度，K； σ 为材料受到的拉应力，MPa； t_{tp} 为蠕变破裂时间，h。可以看出，SA321 蠕变预测关系式的与试验值基本吻合，对于 10 000 h 短期蠕变破裂分析，拟合经验关系式在同样温度下的蠕变破裂应力小于试验值，满足计算保守性要求。

同理，基于文献[10]提供的实验数据，利用 LMP 法可得 00Cr25Ni35AlTi 材料蠕变预测关系式如下，拟合关系式与试验值对比如图 3(b)所示。

$$t_{tp} = 10^{\left[\frac{t_{LMP} - 15.5}{T} \right]} \quad (3)$$

$$t_{LMP} = 29\,086.266 - 9\,000.850 \times \log(6.895 \times \sigma) \quad (4)$$

可以看出，在三个试验温度下，拟合得到的蠕变预测关系式与试验数据基本吻合，且有一定的保守裕度，温度越低，保守裕度越大，满足计算保守性要求。

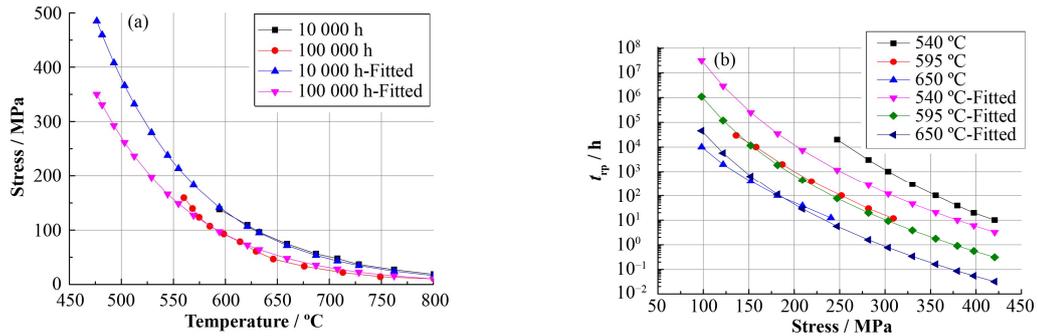


图3 小型压水堆特定材料拟合蠕变预测关系式与试验值的比较 (a) SA321, (b) 00Cr25Ni35AITi
Fig.3 Comparison between experiment curve and fitted relation curve of the small PWR.
(a) SA321, (b) 00Cr25Ni35AITi

为便于对比验证, 本文也基于文献[10]提供的实验数据, 拟合得到了 SA304 不锈钢的蠕变预测关系式。

3 SCDAP/RELAP5 蠕变模型改进分析

SCDAP/RELAP5 程序中的蠕变预测模型包括 Larson-Miller 和 Manson-Haferd, 计算时模型的调用取决于结构的材料和应力, 如表 3 所示。

表 3 SCDAP/RELAP5 程序不同材料所采用的蠕变失效模型

Table 3 Creep rupture model of different material.

	SA508-2	SA316	Inconel-600
Larson-Miller	√ (低应力区 Low stress region)	√	√
Manson-Haferd	√ (高应力区 High stress region)	—	—

程序计算时, 结构的蠕变状态由式(5)计算。如果 $D_c=0$, 表示结构未出现任何蠕变损伤; 如果 $D_c=1$, 表示结构出现了蠕变破坏。

$$D_c(t + \Delta t) = D_c(t) + \frac{\Delta t}{t_r(t)} \quad (5)$$

式中: $D_c(t)$ 为 t 时刻的蠕变状态; Δt 为 t 时刻时间步长, s; $t_r(t)$ 为当前温度应力下结构出现蠕变失效所需要的时间, s。SCDAP/RELAP5 程序有 rrupt、irrupt、trupt、caltav、ruptur 共 5 个子程序参与了蠕变分析, 它们之间的调用关系及执行流程见图 4。

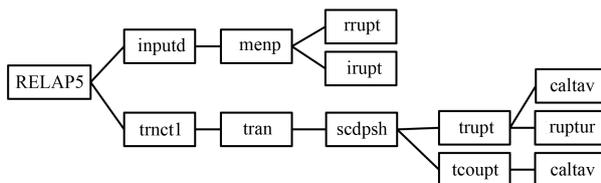


图 4 SCDAP/RELAP5 程序蠕变分析相关子程序调用关系
Fig.4 Creep calculation subroutine relations in SCDAP/RELAP5 code.

rrupt 子程序从输入卡中读取 COUPLE 网格、热构件的材料、换热边界、内外压差数据。irrupt 子程序对 rrupt 读取的数据进行检查, 打印错误信息, 初始化相关全局变量。caltav 子程序功能是计算 COUPLE 网格、热构件节点平均温度。trupt 子程序调用 caltav 后, 同时计算 COUPLE 网格、热构件材料蠕变分析所需的输入变量, 最后调用 ruptur 子程序计算、更新结构材料的蠕变状态。ruptur 子程序根据 trupt 子程序调用输入参数, 确定正在计算的材料类型、材料应力、材料温度, 调用相关蠕变破裂温度、应力函数, 计算材料的蠕变状态变化。

因此, SCDAP/RELAP5 程序的改进将围绕 ruptur 子程序进行, 重点增加 SA321 不锈钢、00Cr25Ni35AITi 材料蠕变分析能力。改进后的 SCDAP/RELAP5 程序可开展 SA508、Inconel-600、SA304、SA316、SA321、00Cr25Ni35AITi 共 6 种材料的蠕变预测分析能力。

4 小型压水堆一回路承压管道蠕变预测模型验证计算

同一严重事故进程, 不同一回路承压管道材料的蠕变进程不同, 本节将利用基于 SCDAP/RELAP5 改进程序开发的小型压水堆严重事故分析模型, 定量评价 SA304、SA316、SA321 的耐蠕变性能, 验证所建蠕变预测模型的合理性。

选择管道蠕变现象较为明显的全厂断电事故诱发的高压严重事故进程进行对比, 暂不考虑管道蠕变破裂带来的一回路泄压效应, 暂不考虑波动管内过热蒸汽与管壁材料间的辐射换热。表 4 为几种材料的稳压器波动管蠕变进程对比, 图 5(a)为波动管管壁平均温度变化, 图 5(b)为三种不锈钢蠕变进程对比。

表 4 高压严重事故后几种材料的波动管蠕变进程对比

Fig.4 Creep process comparison between different stainless steels during the severe accident induced by high-pressure severe accident.

项目 Item		SA304	SA316	SA321
开始蠕变 Creep start	时间 Time / s	9 500	9 500	9 500
	管道平均温度 Surge line volume average temperature / K	702	702	702
蠕变状态达到 0.005 Creep damage state achieve 0.005	时间 Time / s	18 950	20 400	19 700
	管道平均温度 Surge line volume average temperature / K	1 018	1 025	1 028
蠕变状态达到 0.1 Creep damage state achieve 0.1	时间 Time / s	21 900	22 100	22 000
	管道平均温度 Surge line volume average temperature / K	1 122	1 166	1 130
蠕变破裂 Creep rupture	时间 Time / s	22 200	24 100	23 000
	管道平均温度 Surge line volume average temperature / K	1 201	1 143	1 156
蠕变状态从 0.1–1.0 时间 Time space of creep damage state from 0.1–1.0 / min		5	33	16

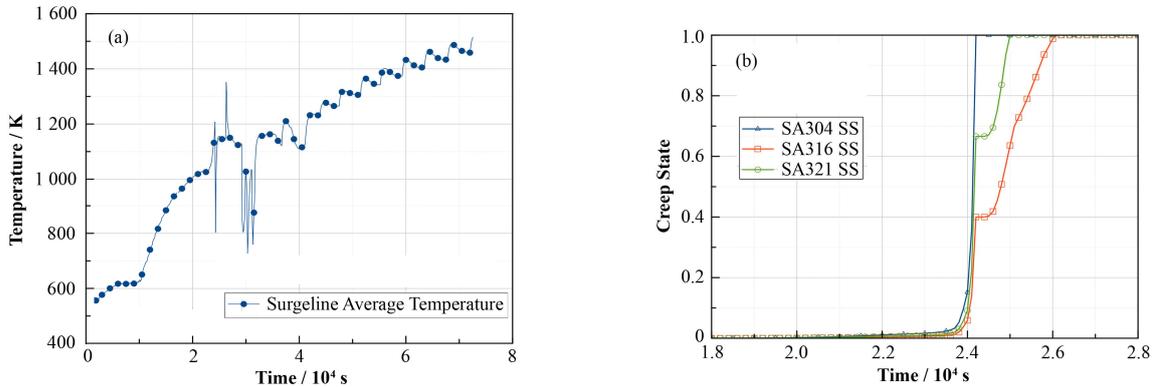


图 5 严重事故下波动管蠕变进程 (a) 波动管管壁平均温度, (b) 三种材料波动管蠕变进程
Fig.5 Creep process of surgeline during severe accident induced by SBO.

(a) Volume average temperature of surgeline, (b) Creep processes of surgelines with three different materials

由表 4 和图 5 可以看出：

1) 不同材料的波动管出现明显蠕变(≥ 0.1)的时间基本接近,耐蠕变性能 SA316>SA321>SA304,因此以 SA316 蠕变预测关系式分析 SA321 的蠕变进程得到的结论是不满足保守性要求的;

2) 从材料学角度来看,SA321 与 SA304 同属 Ni-Cr-Mo 型奥氏体不锈钢,力学性能非常相似,但由于 SA321 加入了金属钛,其耐晶间腐蚀性、高温强度、高温应力破断性能、高温抗蠕变性能均优于 SA304,这也与分析模型计算结果保持一致,从侧面证实了所建立蠕变预测模型的合理性;

3) 从事故缓解的角度来看,小型压水堆严重事故下,一回路承压管道的加速蠕变阶段(即从出现明显蠕变到蠕变破裂)的时间较短,如不能在蠕变开始前对堆芯和一回路管道降温,极可能出现管道蠕变破裂。

5 结语

为建立小型压水堆一回路承压边界蠕变分析模型,本文开展了以下工作: 1) 基于 SCDAP/RELAP5

程序开发了小型压水堆一、二回路严重事故分析模型,具备了开展严重事故仿真分析的能力; 2) 基于实验拟合方法研究建立小型压水堆一回路 SA321、00Cr25Ni35AlTi 两种承压管道材料蠕变预测分析模型; 3) 基于 SCDAP/RELAP5 程序代码结构改进了蠕变分析功能模块,使其具备开展 6 种材料的蠕变预测分析能力; 4) 通过设计假想事故序列,开展了小型压水堆一回路承压管道蠕变预测模型验证计算,侧面验证了所建 SA321、00Cr25Ni35AlTi 蠕变预测分析模型的合理性。基于本文工作,后续将进一步开展典型严重事故序列下一回路承压边界蠕变现象分析。

参考文献

- 1 The SCDAP/RELAP5 Development Team. SCDAP/RELAP5/MOD3.2 code manual Vol.II: damage progression model theory[R]. Idaho: INEEL, 1997.
- 2 Marc Kenton. A review of recent NRC-sponsored station blackout analyses[R]. Idaho, 2007.
- 3 Argonne National Laboratory. Behavior of PWR reactor coolant system components, other than steam generator

- tubes, under severe accident conditions - Phase I final report[R]. NUREG/CR-6792, Cass Avenue Argonne, 2003.
- 4 陈宝文, 毛欢, 孔翔程, 等. 全厂断电引发的严重事故下蒸汽发生器传热管蠕变失效风险研究[J]. 原子能科学技术, 2014, **48**(6): 1026–1030.
CHEN Baowen, MAO Huan, KONG Xiangcheng, *et al.* Risk analysis for steam generator tube creep rupture under severe accident induced by station blackout[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2014, **48**(6): 1026–1030.
 - 5 The SCDAP/RELAP5 Development Team. SCDAP/RELAP5/MOD3.2 code manual Vol.V: developmental assessment[R]. Idaho: INEEL, 1997.
 - 6 Seruga D, Fajdiga M, Nagode M. Creep damage calculation for thermo mechanical fatigue[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, **57**(5): 371–378.
 - 7 陈云翔, 杨柯, 单以银. 超超临界火电机组用铁素体耐热钢持久性能的预测方法[J]. 广东电力, 2015, **25**(4): 5–8.
CHEN Yunxiang, YANG Ke, SHAN Yiyin. Forecast method for creep-rupture property of ferritic heat resistant steel used for ultra super-critical thermal power generating unit[J]. Guangdong Electric Power, 2015, **25**(4): 5–8.
 - 8 Aggen G, Akstens F W, Allen C M, *et al.* ASM handbook Vol.11: failure analysis and prevention[M]. USA: The Materials Information Company, 2015: 1530–1553.
 - 9 Sandmeyer Steel Company. 321 & 347 (UNS S32100) & (UNS S34700)[EB/OL]. 2016. www.sandmeyersteel.com.
 - 10 Sandmeyer Steel Company. 304 Chromium-nickel [EB/OL]. 2016. www.sandmeyersteel.com.
 - 11 谭晓惠, 马建中, 刘宇杰, 等. 316 不锈钢蠕变-疲劳试验及规范研究[J]. 核技术, 2013, **36**(4): 040642. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2013.hjs.36.040642.
TAN Xiaohui, MA Jianzhong, LIU Yujie, *et al.* Experimental investigation and ASME code study of creep-fatigue interaction correlation for 316 stainless steel[J]. Nuclear Techniques, 2013, **36**(4): 040642. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2013.hjs.36.040642.