

TMSR 控制棒通道套管的蠕变屈曲失稳分析

王晓艳^{1,2} 鱼荣芳^{1,2} 李林玉^{1,2} 朱世峰^{1,2} 王 晓^{1,2}

1(中国科学院上海应用物理研究所 上海 201800)

2(中国科学院先进核能创新研究院 上海 201800)

摘要 钍基熔盐堆(Thorium Molten Salt Reactor, TMSR)控制棒通道套管是典型的承受外压的高温薄壁长圆柱壳,蠕变-屈曲失稳是其主要失效模式。本文旨在利用数值模拟方法研究控制棒通道套管高温下的蠕变屈曲失稳行为。首先基于 UNS N10003 合金的高温蠕变试验数据获得了该材料的 Norton 蠕变模型及材料参数;然后利用有限元分析软件 ABAQUS 进行了 TMSR 控制棒通道套管的特征值屈曲分析与蠕变屈曲分析,并对屈曲失稳的关键因素进行了敏感性分析,获得了蠕变屈曲寿命的经验公式。分析结果表明,温度、压力、结构尺寸均会对套管的蠕变屈曲寿命产生显著影响。本文的研究结果对 TMSR 控制棒通道套管以及复杂结构与载荷条件下的高温结构的稳定性设计提供了工程指导依据,也为其他高温薄壁结构的蠕变屈曲寿命预测提供了依据。

关键词 蠕变屈曲, 钍基熔盐堆, 控制棒通道套管, 稳定性

中图分类号 TL3

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2025.hjs.48.240336

CSTR: 32193.14.hjs.CN31-1342/TL.2025.48.240336

Creep-buckling instability analysis of TMSR control rod channel tubes

WANG Xiaoyan^{1,2} YU Rongfang^{1,2} LI Linyu^{1,2} ZHU Shifeng^{1,2} WANG Xiao^{1,2}

1(Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

2(CAS Innovative Academy in TMSR Energy System, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract [Background] The control rod channel tubes of the Thorium Molten Salt Reactor (TMSR) are typical high-temperature, thin-walled, long cylindrical shells designed to withstand external pressure, with creep buckling as its primary failure mode. [Purpose] This study aims to use numerical simulation methods to study the creep buckling instability behavior of control rod channel tubes at the elevated temperatures. [Methods] Firstly, the Norton creep model and material parameters for the UNS N10003 alloy was obtained on the basis of the high-temperature creep test data. Furthermore, finite element analysis software ABAQUS was employed to assess eigenvalue buckling and creep buckling for TMSR control rod channel tubes. Sensitivity analysis was conducted on the key factors causing buckling instability, and an empirical formula for creep buckling life was obtained. [Results] The analysis results reveal that temperature, pressure, and structural dimensions significantly influence the tube's creep buckling life, and the derived empirical formulas can be used to verify the durability of the tubes. To ensure a design life of 30 a for the

中国科学院战略先导专项(No.XDA02010000)资助

第一作者: 王晓艳, 女, 1986 年出生, 2019 年于中国科学院大学获博士学位, 研究领域为熔盐堆高温结构完整性

通信作者: 王晓, E-mail: wangxiao@sinap.ac.cn

收稿日期: 2024-08-20, 修回日期: 2024-10-12

Supported by Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences (No.XDA02010000)

First author: WANG Xiaoyan, female, born in 1986, graduated from University of Chinese Academy of Sciences with a doctoral degree in 2019, focusing on high-temperature structural integrity of molten salt reactor

Corresponding author: WANG Xiao, E-mail: wangxiao@sinap.ac.cn

Received date: 2024-08-20, revised date: 2024-10-12

casing at 700 °C, the tube height needs to be controlled below 3 m. If the design life is 10 a, the tube height can be increased to 6 m. **[Conclusions]** This study offers engineering guidance for the stability design of TMSR control rod channel tubes and high-temperature structures under complex conditions, and it also serves as a basis for predicting the creep buckling lifespan of other high-temperature thin-walled structures.

Key words Creep-buckling, Thorium Molten Salt Reactor (TMSR), Control rod channel tubes, Stability

中国科学院战略性先导科技专项-钍基熔盐堆(Thorium Molten Salt Reactor, TMSR)核能系统具有安全系数高、换热效率好、环境兼容性大等特点,是第四代新型核反应堆6大堆型之一^[1-2]。TMSR反应堆设计发展过程中会面临着反应堆容器以及控制棒通道套管的结构尺寸参数增大、服役温度更高、寿命更长的现象,以适应更高的功率输出和更复杂的运行条件。如何保证高温环境下控制棒通道套管在运行寿命内的稳定性是结构设计的关键技术问题。

TMSR控制棒通道套管是典型的受外压的薄壁细长圆柱壳,在650~750 °C高温环境下长期服役最重要的特性是随时间变化的蠕变行为^[3-4]。由于蠕变应变随时间累积,只要时间超过临界蠕变屈曲时间(蠕变屈曲寿命) t_c ,壳体的承载能力便在发生屈曲时急剧下降,发生蠕变屈曲失稳现象。因此蠕变屈曲是TMSR控制棒通道套管的主要失效模式。通道套管的蠕变屈曲分析对于结构稳定性设计与寿命评价非常重要。

美国机械工程师协会(American Society of Mechanical Engineer, ASME)颁布的核设施部件建造规则第一册NH分卷-高温1级承压部件设计规范^[5]指出,对于高温一级设备的屈曲失稳评定,应保证高温结构的蠕变屈曲时间不超过设计或使用寿期。因此,在蠕变屈曲研究和稳定性设计中,需要评估最终失稳的蠕变屈曲寿命是否大于结构的设计寿命。

国内外学者针对承受外压的圆柱壳开展了一系列蠕变屈曲实验和数值模拟研究。Zhao等^[6]基于塑性力学中的变形理论,建立了高温环境下过热器管蠕变变形的非线性本构关系,建立了一个受外压载荷的过热器管蠕变屈曲的计算公式,用于剩余寿命预测。Combescure等^[7]研究发现薄壁圆柱壳体的蠕变屈曲时间主要由“模态”缺陷振幅驱动。使用基于弹性屈曲模态形状的最大振幅初始缺陷的标准设计预测的蠕变屈曲时间并不安全。Jo等^[8]对圆柱形不锈钢管在高温下承受径向外压载荷的蠕变屈曲行为进行了实验研究,探讨了外压与蠕变屈曲失效时间之间的关系以及管子的几何缺陷和高温材料性能对

蠕变屈曲特征的影响。徐佳伟等^[9]利用实验与模拟方法开展了外压圆柱壳的蠕变屈曲寿命预测,发现几何缺陷会减弱圆柱壳的承压能力。

除了圆柱壳体,国内外学者也开展了柱状、板状、成形封头等各种结构形式的蠕变屈曲行为研究。Zhang等^[10]、Wang等^[11]以及Zhang等^[12-13]学者针对Q690高强钢柱钢柱、铝合金7050加筋板、316不锈钢翅片管等高温金属结构的蠕变屈曲行为开展了试验和仿真研究。Liu等^[14]采用壳理论分析了具有几何缺陷的黏弹性球壳的非线性蠕变屈曲行为,构建了恒压加载的缺陷灵敏度图。郭育豪等^[15]研究了Ti80钛合金球形封头的耐压壳结构的蠕变力学行为以及初始缺陷幅值、载荷以及蠕变时间的影响。Liu等^[16]针对蠕变范围内的316L椭圆封头,开发了一种基于外压图的蠕变屈曲设计方法。Zhou等^[17]基于K-R蠕变损伤本构模型对聚甲基丙烯酸甲酯压力容器的蠕变屈曲行为进行数值模拟,提出了双重失效准则来判断是否发生蠕变屈曲。研究结果一致表明,考虑初始几何缺陷的非弹性蠕变屈曲数值模拟是预测外压薄壁壳体一种准确可行的寿命预测方法;蠕变屈曲寿命与材料、温度、载荷、结构尺寸参数密切相关。然而,国内外学者并未针对高温镍基合金UNS N10003(国产牌号GH3535)的蠕变屈曲行为开展过相关研究,且研究对象主要是短圆柱壳或其他结构形式,并不包括细长圆柱壳结构。在TMSR工程设计阶段,亟须探索基于UNS N10003合金蠕变本构模型的非线性蠕变屈曲分析方法的适用性,以及高温环境下细长薄壁圆柱壳结构外压稳定性设计的影响因素。

本文利用数值模拟方法研究TMSR控制棒通道套管的蠕变屈曲寿命及敏感性因素。根据蠕变屈曲数值分析结果获得了控制棒通道套管在不同温度、压力,以及不同结构尺寸参数与蠕变屈曲寿命之间的经验公式。本文研究的技术路线图如图1所示。本文的研究为TMSR控制棒通道套管的稳定性设计提供参考,同时也对其他复杂结构及载荷下的高温结构稳定性设计具有重要的指导意义。

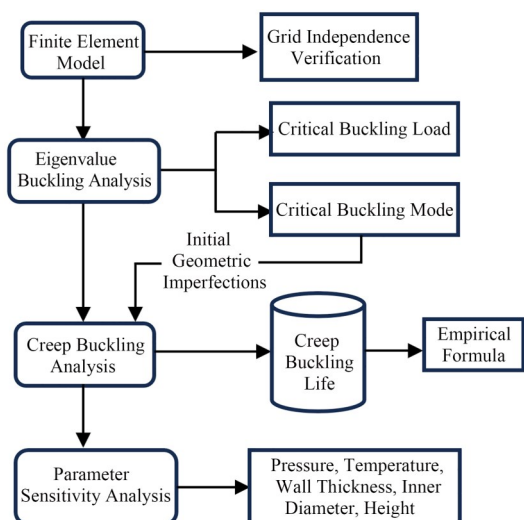


图1 技术路线图

Fig.1 Technical roadmap

1 结构介绍

TMSR 控制棒通道套管位于堆容器内部, 提供为控制棒上下运行的通道, 起着隔绝熔盐、提供设备空气运行环境的作用。正常工况下, 其外壁下部暴露在熔盐冷却剂中, 承受液体压力, 外壁上部暴露在覆盖气中, 承受覆盖气压力。通道套管是一个典型的细长薄壁圆柱壳体结构, 上端焊接在堆容器法兰端面, 下端是一个平封头; 套管的结构与位置示意图见图2。

控制棒通道套管设计内径 $\varnothing=60\sim 100\text{ mm}$, $\delta=1\sim 2\text{ mm}$, $H=3\sim 8\text{ m}$, 承受外压 $0.25\sim 0.5\text{ MPa}$, 最高运行

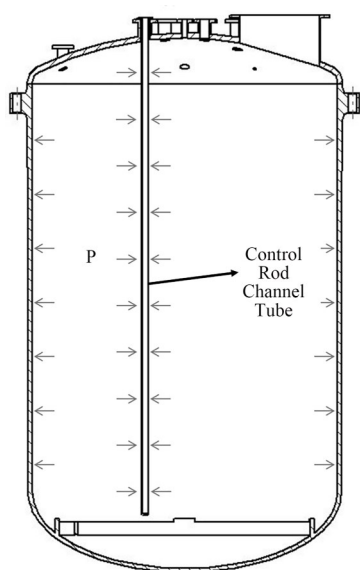


图2 TMSR 控制棒通道套管结构与位置示意图

Fig.2 Schematic diagram of TMSR control rod channel tube structure and location

温度达 $650\sim 750\text{ }^{\circ}\text{C}$, 设计寿命 $10\sim 30\text{ a}$ 。TMSR 液态燃料实验堆控制棒与通道套管内壁面之间的间隙为 10 mm ; 控制棒通道套管在高温外压载荷作用下会出现蠕变屈曲失稳行为; 当径向屈曲变形超过 10 mm 时, 会对控制棒的下落造成严重影响。因此开展控制棒通道套管的蠕变屈曲分析对于结构的稳定性至关重要; 这也是核安全局审评重点关注的问题之一。

2 有限元分析

2.1 计算模型

利用 ABAQUS 软件建立 TMSR 控制棒通道套管的三维有限元模型。对几何模型进行网格划分, 生成六面体单元, 如图3所示。为验证本文所选网格数量计算的准确性, 先进行网格无关性验证, 为了保证足够密的网格密度, 选取了4种不同尺寸网格进行误差分析: 如图4所示, 每种网格划分方案分别考虑了径向、环向和周向单元数量的影响。4种网格划分方案与网格无关性验证结果见表1。由表1可知, 网格数量从20 900增大到39 238后, 临界屈曲寿命相差不到5%, 该网格满足无关性验证要求。因此, 本文选用网格划分方案(c)进行数值模拟, 该网格轴向为120个单元, 环向为80个单元, 径向为两层单元。

边界与载荷: 套管外表面以及底部端面施加外压载荷, 套管前端焊接在堆容器法兰面上, 边界为固定约束, 软件设置 ENCASTER, 即节点的所有自由度全部为0, 载荷与边界条件见图5所示。

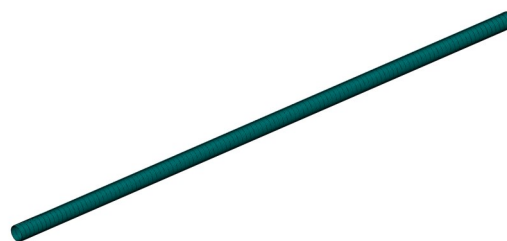


图3 TMSR 控制棒通道套管的有限元计算模型

Fig.3 Finite element model of TMSR control rod channel tube

2.2 材料本构模型与参数

TMSR 控制棒通道套管结构采用的是高温镍基合金 UNS N10003。该材料在 $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $750\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下的弹性模量 E 、泊松比 ν 见表2。套管承受的外压水平较低, 结构基本处于弹性状态, 因此忽略材料塑性的影响。UNS N10003 合金在高温下的蠕变行为符合幂率关系, 可采用 Norton 模型描述:

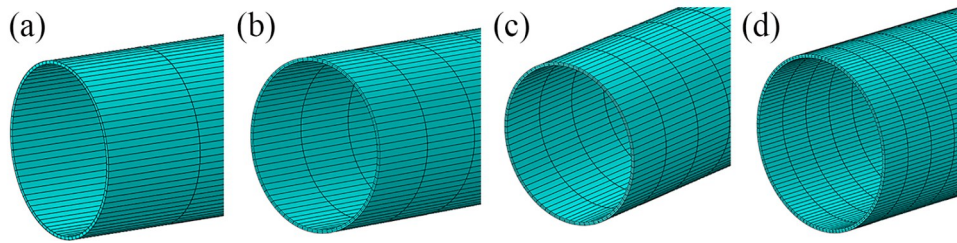


图4 网格划分方案
Fig.4 Mesh division schemes

表1 网格无关性验证
Table 1 Grid independence verification

网格划分 Mesh	方案(a) Scheme (a)	方案(b) Scheme (b)	方案(c) Scheme (c)	方案(d) Scheme (d)
三个方向单元数量 Number of elements in three directions	X1Y20Z60	X2Y20Z90	X2Y20Z120	X2Y30Z150
单元总数量 Total number of units	6 340	16 100	20 900	39 238
蠕变屈曲寿命 Creep buckling life	597	1 590	1 378	1 310

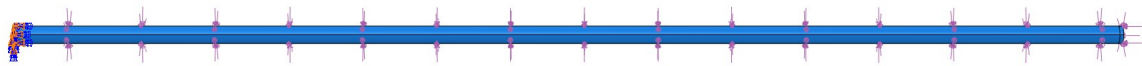


图5 TMSR控制棒通道套管的载荷与边界条件
Fig.5 Load and boundary conditions of TMSR control rod channel tube

$$\dot{\varepsilon} = B\sigma_{eq}^n \quad (1)$$

式中： $\dot{\varepsilon}$ 表示稳态蠕变率； σ_{eq} 表示等效应力； B 是反映稳态蠕变速率的材料参数， n 是稳态蠕变指数，可通过UNS N10003合金的单轴蠕变试验数据确定。利用文献[18]试验数据在对数坐标系下进行应力和蠕变率的线性拟合，拟合结果见图6。获得 B 和 n 的拟合值汇总于表2。根据UNS N10003合金的材料数据可以发现，温度越高，弹性模量越低，蠕变效应越显著。

2.3 分析方法

利用有限元软件ABAQUS对TMSR控制棒通道套管进行特征值屈曲分析与蠕变屈曲数值模拟。特征值屈曲分析是蠕变屈曲分析的基础，不仅可以获得结构的线弹性临界屈曲载荷，考察结构的屈曲模态，同时还可利用一致缺陷模态法施加初始几何缺陷，然后通过非线性蠕变屈曲分析获得结构高温下的蠕变屈曲寿命。蠕变-屈曲分析不仅考虑了材料非线性，还考虑了几何非线性（大变形），因此要设置更小的时间增量步以达到收敛的目的。其中第1个分析步进行静力分析，第2个分析步进行蠕变分析；两个分析步均打开大变形开关；蠕变分析步激活

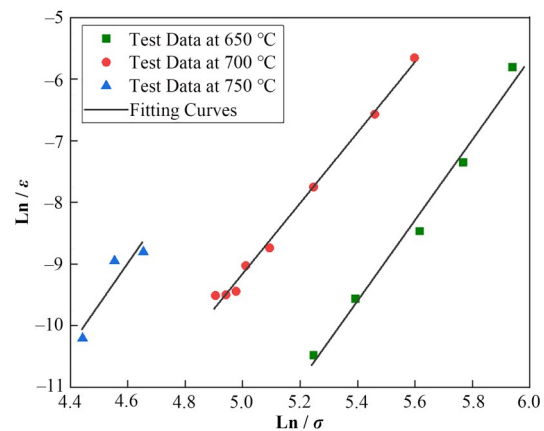


图6 UNS N10003合金的材料参数拟合
Fig.6 Material parameter fitting of UNS N10003 alloy

表2 UNS N10003合金的材料参数
Table 2 Material parameters of UNS N10003 alloy

温度 Temperature / °C	E / GPa	ν	B / $\text{MPa}^{-n} \cdot \text{h}^{-1}$	n
650	178	0.31	3.18×10^{-20}	6.536
700	175	0.31	3.98×10^{-17}	5.721
750	170	0.31	4.92×10^{-18}	6.710

非线性选项：稳定性，自动能量耗散率设为 1×10^{-7} 。对于薄壁壳体结构很小的几何缺陷也会对蠕变屈曲寿命产生很大的影响。采用一致缺陷模态法以考虑壳体初始几何缺陷对稳定性的影响，假设初始缺陷因子取0.01。

3 分析结果与讨论

3.1 特征值屈曲分析

根据特征值屈曲分析结果发现控制棒通道套管的屈曲模态是典型的椭圆波形态，其中第1、3、5阶屈曲模态与第2、4、6阶屈曲模态对称。第1阶屈曲模态为1组椭圆波；第3、5、7阶屈曲模态分别是2、3、4组正交对称分布的椭圆波。套管的屈曲模态见图7所示。

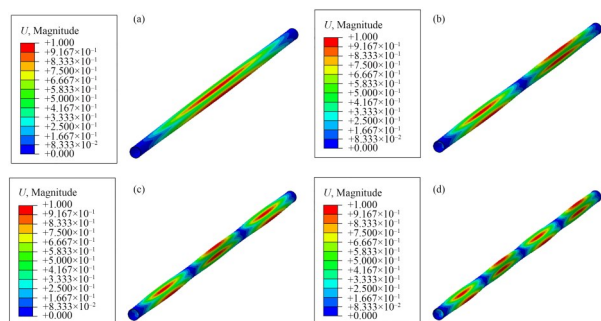


图7 TMSR控制棒通道套管的屈曲模态(彩图见网络版)
(a) 1阶, (b) 3阶, (c) 5阶, (d) 7阶

Fig.7 Buckling modes of TMSR control rod channel tube (color online)

(a) Mode 1, (b) Mode 3, (c) Mode 5, (d) Mode 7

套管的结构设计必须考虑温度 T 、内径 ϕ 、壁厚 δ 、高度 H 等尺寸参数对稳定性的要求。对于不同结构尺寸的套管分别进行了不同温度下的特征值屈曲分析，临界外压载荷与套管内径、壁厚和高度的关系曲线如图8所示。可以看出，结构尺寸参数对临界屈曲外压载荷非常敏感；随着内径与高度的增大、壁厚的减小，临界屈曲外压载荷逐渐降低。由于特征值屈曲是线弹性屈曲分析，温度仅影响材料的弹性模量，并未考虑材料长时间蠕变对临界屈曲载荷的影响，因此工程中必须进行非线性蠕变屈曲分析才能准确判断结构的寿命。

3.2 蠕变屈曲分析

针对多组不同结构尺寸的套管进行 650°C 、 700°C 、 750°C 下的蠕变屈曲分析。控制棒通道套管($\phi=80\text{ mm}$, $\delta=1.5\text{ mm}$, $H=3\text{ m}$)在 1.5 MPa 外压作用下初始时刻的等效应力强度为 32 MPa ，等效蠕变应变随时间累积，导致壳体变形逐渐增大。套管内壁

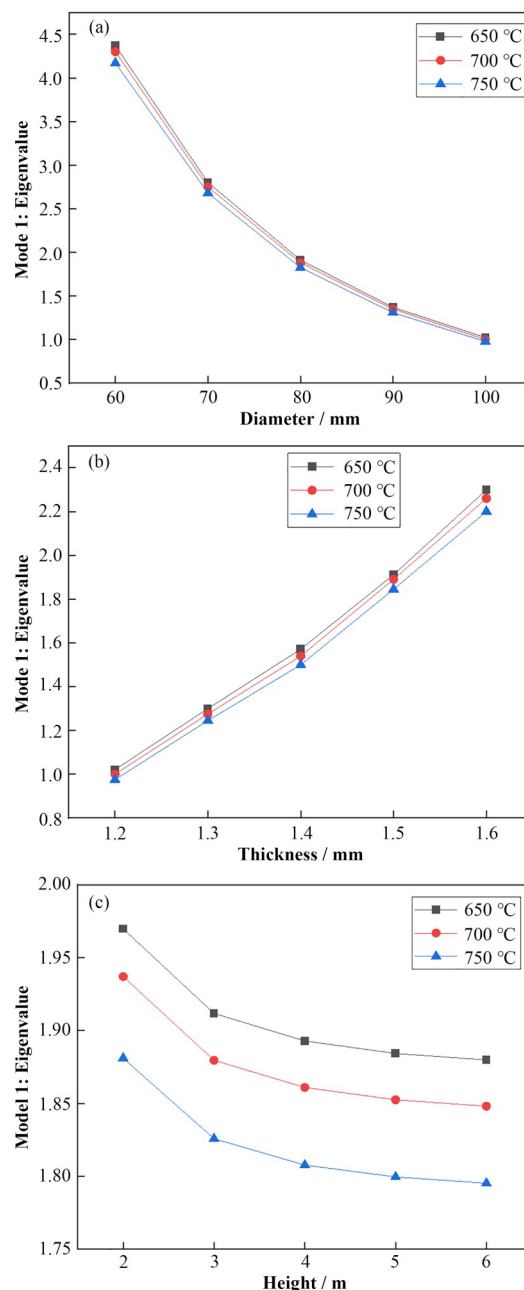


图8 不同温度下的临界屈曲载荷因子
(a) 不同内径, (b) 不同壁厚, (c) 不同高度

Fig.8 The critical buckling load factors under different structural sizes (a) Different inner diameters, (b) Different wall thicknesses, (c) Different heights

面变形导致等效应力在 $t=300\ 000\text{ h}$ 时刻达到 66.2 MPa ，但并未达到屈服强度；蠕变应变累积达到10%左右，导致结构出现不可恢复的大变形。图9是通道套管的等效应力与蠕变应变随时间的变化曲线。图10与图11是通道套管在 $t=300\ 000\text{ h}$ 时刻的等效应力与蠕变应变分析结果。

图12是 700°C 下控制棒通道套管的蠕变变形分布云图。从图12中可以看出，套管初始时刻($t=0$)最大变形为 0.157 mm ，在套管底部，主要是轴向

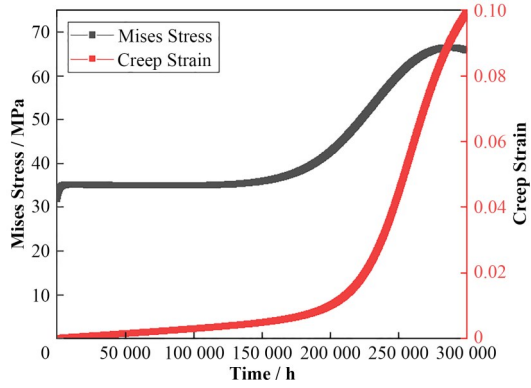


图9 TMSR控制棒通道套管的等效应力与蠕变应变随时间变化曲线(彩图见网络版)

Fig.9 Equivalent stress and creep strain curves vs. time of TMSR control rod channel tube (color online)

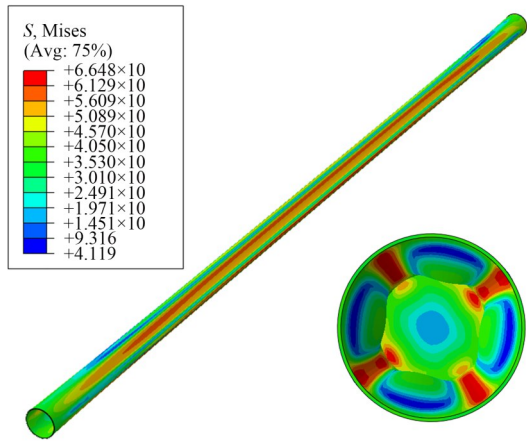


图10 TMSR控制棒通道套管的等效应力($t=300\,000\text{ h}$)(彩图见网络版)

Fig.10 Equivalent stress of TMSR control rod channel tube ($t=300\,000\text{ h}$) (color online)

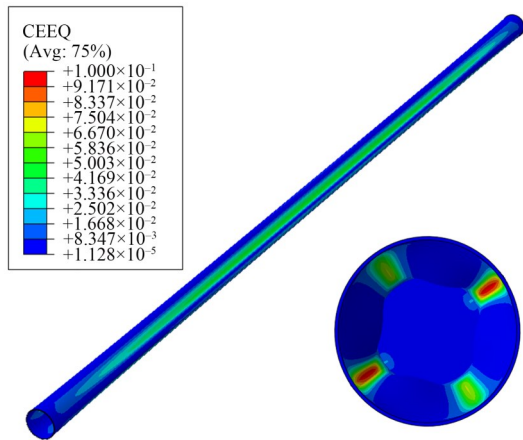


图11 TMSR控制棒通道套管的蠕变应变($t=300\,000\text{ h}$)(彩图见网络版)

Fig.11 Creep strain of TMSR control rod channel tube ($t=300\,000\text{ h}$) (color online)

压力导致的。随着蠕变时间的增加,变形逐渐转移向壳体中间区域,最终由于壳体蠕变变形过大而发生了屈曲大变形现象。假定圆柱壳屈曲最大蠕变变形值达到 10 mm(影响到控制棒下落)时为套管的蠕变屈曲寿命,则该套管结构在 700 °C 下的蠕变屈曲寿命为 300 000 h (约 34 a)。

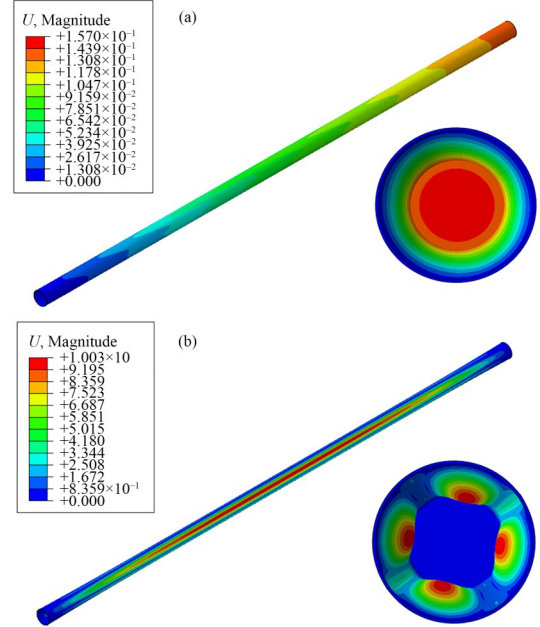


图12 TMSR控制棒通道套管的蠕变屈曲变形(彩图见网络版)

(a) $t=0$, (b) $t=300\,000\text{ h}$

Fig.12 Creep buckling deformation of TMSR control rod channel tube (color online) (a) $t=0$, (b) $t=300\,000\text{ h}$

3.2.1 压力对蠕变屈曲寿命的影响

TMSR控制棒通道套管在正常运行状态的工作压力一般不超过 0.5 MPa。按照 ASME-III-5 高温堆设计规范,要求与时间有关的屈曲系数不能小于 1.5。针对控制棒通道套管($\varnothing=80\text{ mm}$, $\delta=1.5\text{ mm}$, $H=3\text{ m}$)进行蠕变屈曲分析,分析外压($P=1.2\sim 1.7\text{ MPa}$)对临界蠕变屈曲寿命的影响。高温下通道套管的蠕变屈曲寿命与外压的关系曲线如图 13 所示。可见,不同温度下蠕变屈曲寿命的对数基本随外压呈线性递减的函数关系。在相同的压力下,温度是影响材料结构稳定性的重要因素之一。结构运行在 650 °C 时比在 700 °C 下寿命提高 70~80 倍;结构运行在 700 °C 时比在 750 °C 下的寿命提高 4~5 倍。不同温度下蠕变屈曲寿命与外压之间关系用指数函数进行拟合,可得到经验公式如下:

$$t_r = \begin{cases} 10^{(11.05 - 2.491P)} & T = 650\text{ °C} \\ 10^{(8.883 - 2.271P)} & T = 700\text{ °C} \\ 10^{(8.296 - 2.330P)} & T = 750\text{ °C} \end{cases} \quad (2)$$

保守地,按3倍的屈曲系数,当外压=1.5 MPa时,可以看出控制棒通道套管在650℃长期高温运行的蠕变屈曲寿命远远超过设计寿命;在700℃长期高温运行的蠕变屈曲寿命约34 a;在750℃长期高温运行的蠕变屈曲寿命约7 a。

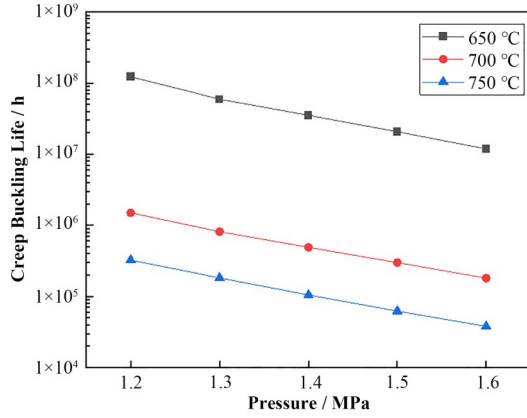


图13 不同压力下的蠕变屈曲寿命
Fig.13 Relationship between creep buckling life and external pressure at different temperatures

3.2.2 内径对蠕变屈曲寿命的影响

令 $P=1.5$ MPa (3倍屈曲系数), $\delta=1.5$ mm, $H=3$ m, 分析控制棒通道套管内径 ($\varnothing=60\sim 100$ mm) 对蠕变屈曲寿命的影响。套管内径与蠕变屈曲寿命的关系曲线见图14。

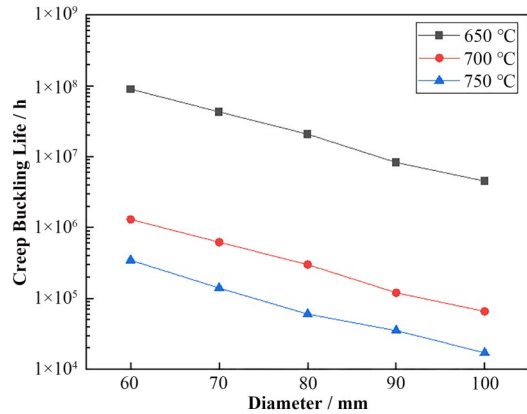


图14 不同内径下的蠕变屈曲寿命
Fig.14 Relationship between creep buckling life and diameters at different temperatures

显然,蠕变屈曲寿命的对数随内径线性递减,即屈曲寿命随内径的增大指数级减小。蠕变屈曲寿命与内径之间关系用指数函数进行拟合,可得到经验公式如下:

$$t_r = \begin{cases} 10^{(9.941 - 0.033\varnothing)} & T = 650^\circ\text{C} \\ 10^{(8.102 - 0.033\varnothing)} & T = 700^\circ\text{C} \\ 10^{(7.423 - 0.032\varnothing)} & T = 750^\circ\text{C} \end{cases} \quad (3)$$

目前设计范围内,控制棒通道套管在650℃能够保持稳定和安全运行。若控制棒通道套管在700℃稳定运行30 a,则套管内径不得大于80 mm;若套管在750℃稳定运行30 a,则套管内径不得大于60 mm。

3.2.3 壁厚对蠕变屈曲寿命的影响

令 $P=1.5$ MPa, $\varnothing=80$ mm, $H=3$ m, 分析控制棒通道套管的壁厚 ($\delta=1.5\sim 2.0$ mm) 对蠕变屈曲寿命的影响。计算得到不同壁厚下套管的蠕变屈曲变形云图见图15。显然,蠕变屈曲寿命的对数随壁厚线性递增。这是因为随着壁厚的增加,结构的刚度和稳定性都会得到显著提升,使得套管在受到相同外压载荷时更难发生屈曲。因此,蠕变屈曲寿命会呈现出一种指数级增长的趋势。

蠕变屈曲寿命与壁厚之间关系用指数函数进行拟合,可得到经验公式如下:

$$t_r = \begin{cases} 10^{(5.277 + 1.381\delta)} & T = 650^\circ\text{C} \\ 10^{(3.430 + 1.389\delta)} & T = 700^\circ\text{C} \\ 10^{(2.370 + 1.625\delta)} & T = 750^\circ\text{C} \end{cases} \quad (4)$$

控制棒通道套管壁厚大于1.2 mm时在650℃环境下能够保持稳定和安全运行。若套管在700℃运行30 a,则套管最小壁厚1.5 mm;若套管在750℃运行时间30 a,则套管最小壁厚1.8 mm。

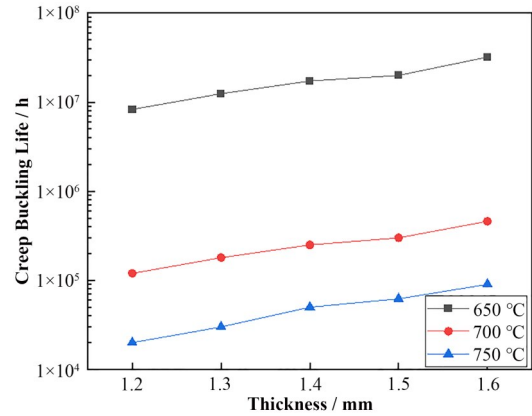


图15 不同壁厚下的蠕变屈曲寿命
Fig.15 Relationship between creep buckling life and wall thicknesses at different temperatures

3.2.4 高度对蠕变屈曲寿命的影响

TMSR控制棒通道套管属于一端固定的细长结构,高度对套管的蠕变屈曲寿命存在一定的影响。令 $P=1.5$ MPa, $\varnothing=80$ mm, $\delta=1.5$ mm, 分析高度 ($H=2\sim 8$ m) 和临界蠕变屈曲寿命的关系曲线,如图16所示。

显然,蠕变屈曲寿命的对数随高度线性递减,即屈曲寿命随高度指数减小。蠕变屈曲寿命与高度之间关系用指数函数进行拟合,可得到经验公式如下:

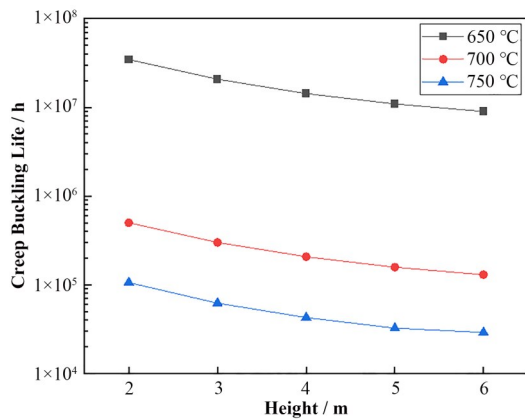


图16 不同高度下的蠕变屈曲寿命
Fig.16 Relationship between creep buckling life and heights at different temperatures

$$t_r = \begin{cases} 10^{(7.779 - 0.145H)} & T = 650\text{ }^{\circ}\text{C} \\ 10^{(5.940 - 0.145H)} & T = 700\text{ }^{\circ}\text{C} \\ 10^{(5.248 - 0.140H)} & T = 750\text{ }^{\circ}\text{C} \end{cases} \quad (5)$$

由于通道套管越高,圆柱壳的承压面积越大,越容易屈曲;蠕变屈曲的分析结果与特征值屈曲分析结果一致。因此TMSR控制棒通道套管的结构设计要关注高度对寿命的影响。若要保证套管在700 °C条件下设计寿命30 a,套管高度需控制在3 m以下,若设计寿命10 a,套管高度能提高到6 m。若套管在750 °C条件下运行,在2~6 m高度的套管的蠕变屈曲寿命在3.3~12.1 a。在给定温度环境下想要运行更长时间,结构设计需提高壁厚,减小内径与高度。

4 结语

本文基于UNS N10003合金的Norton蠕变模型,通过有限元数值模拟方法,对TMSR控制棒通道套管的蠕变屈曲寿命进行了分析。得到的主要结论如下:

1) UNS N10003合金的高温蠕变性能符合幂率关系,Norton模型能用于描述该材料的蠕变行为。温度越高,蠕变效应越显著。

2) TMSR控制棒通道套管的蠕变屈曲数值模拟结果表明温度、压力、内径、壁厚、高度等参数均对套管的蠕变屈曲寿命影响很大。通过数值模拟获得了这些参数与套管的蠕变屈曲寿命之间的经验公式,对TMSR控制棒通道套管等堆内套管的稳定性设计具有一定的工程指导意义。

3) 蠕变对外压、轴压下高温薄壁结构的稳定性有显著的影响。基于Norton模型的蠕变屈曲数值计算方法对于TMSR工程复杂结构的蠕变屈曲现象具有很好的普适性,为工程结构稳定性分析奠定了基础。

本文对控制棒通道套管的蠕变屈曲行为进行了详细的数值仿真分析,但仍存在不足之处:考虑到时间与成本问题,本文的数值仿真分析结果缺乏蠕变屈曲试验验证。另外,TMSR堆内套管数量较多,壁厚的增加会影响到控制棒的反应性价值以及燃料的利用,因此套管结构方案还需要兼顾中子物理的设计,从而给出最优方案。对于TMSR更高功率的堆型,高中子剂量导致的材料辐照效应也会对套管的屈曲行为产生显著的影响。因此,根据TMSR工程需求,未来将在高温薄壁结构稳定性方面开展更多的试验研究工作,同时考虑不同的材料、温度波动、焊缝的影响等。更进一步,将在材料辐照试验以及蠕变屈曲试验的基础上开展辐照-蠕变-屈曲、蠕变-疲劳-屈曲等方面的研究工作,为TMSR高温薄壁结构的稳定性设计提供技术保障。

作者贡献声明 王晓艳负责制定论文框架和研究思路、分析实验数据并进行仿真分析、编制论文稿件;鱼荣芳负责修改稿件、数据处理;李林玉负责完善结构设计方案,提供计算模型;朱世峰负责指导研究工作方法、完善研究方案;王晓负责指导完善研究思路 and 提供理论指导、审阅修订稿件。

参考文献

- Dai Z M. 17 Thorium molten salt reactor nuclear energy system (TMSR) [J]. Molten Salt Reactors and Thorium Energy, 2017: 531 - 540. DOI: 10.1016/B978-0-08-101126-3.00017-8.
- Zohuri B. Molten salt reactors and integrated molten salt reactors: integrated power conversion[M]. London: Academic Press, 2021.
- 王晓艳, 王晓, 张小春, 等. 基于损伤力学的TMSR-LF1堆容器接管非弹性蠕变损伤分析[J]. 核技术, 2019, 42(1): 010601. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2019.hjs.42.010601.
WANG Xiaoyan, WANG Xiao, ZHANG Xiaochun, et al. Inelastic creep damage analysis of RPV nozzle in TMSR-LF1 based on damage mechanics[J]. Nuclear Techniques, 2019, 42(1): 010601. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2019.hjs.42.010601.
- Wang X Y, Wang X, Zhang X C, et al. Creep damage characterization of UNS N10003 alloy based on a numerical simulation using the Norton creep law and Kachanov - Rabotnov creep damage model[J]. Nuclear Science and Techniques, 2019, 30(4): 65. DOI: 10.1007/s41365-019-0586-2.
- ASME. Class 1 Components in elevated temperature,

- Rules for Construction of Nuclear Facility Components ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III, Division 1-Subsection NH[S]. New York: American Society of Mechanical Engineers, 2017.
- 6 Zhao C, Xiong Y, Liu Y X, *et al.* Creep buckling of long-term-serving super-heating pipes in boilers subjected to high temperature loading[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2022, **200**: 104822. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2022.104822.
- 7 Combescure A, Jullien J F. Creep buckling of cylinders under uniform external pressure: Finite element simulation of buckling tests[J]. International Journal of Solids and Structures, 2017, **124**: 14 – 25. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2017.05.025.
- 8 Jo B, Okamoto K, Kasahara N. Creep buckling of 304 stainless-steel tubes subjected to external pressure for nuclear power plant applications[J]. Metals, 2019, **9**(5): 536. DOI: 10.3390/met9050536.
- 9 徐佳伟. 轴压不锈钢圆筒蠕变屈曲寿命预测的实验与模拟研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2022.
XU Jiawei. Experimental and simulation study on creep buckling life prediction of axial compression stainless steel cylinder[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2022.
- 10 Zhang L B, Xu L, Wang W Y. A method of simulating creep buckling behaviour of steel columns at elevated temperatures[J]. Fire Technology, 2023, **59**(4): 1421 – 1448. DOI: 10.1007/s10694-023-01385-9.
- 11 Wang W Y, Zhou H Y, Xu L. Creep buckling of high strength Q460 steel columns at elevated temperatures[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2019, **157**: 414 – 425. DOI: 10.1016/j.jcsr.2019.03.003.
- 12 Zhang Y, Jiang L, Kuang L Y, *et al.* Long-term creep buckling analysis and assessment method research of a finned tube at high temperature[J]. Strength of Materials, 2021, **53**(4): 646 – 653. DOI: 10.1007/s11223-021-00327-6.
- 13 张瀛, 卞临源, 姜露, 等. 高温翅片管的长时蠕变屈曲分析及评定方法研究[J]. 原子能科学技术, 2022, **56**(7): 1356 – 1363. DOI: 10.7538/yzk.2021.youxian.0328.
ZHANG Ying, KUANG Linyuan, JIANG Lu, *et al.* Long-term creep buckling analysis and assessment method research of finned tube at high temperature[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2022, **56**(7): 1356 – 1363. DOI: 10.7538/yzk.2021.youxian.0328.
- 14 Liu T Z, Chen Y Z, Hutchinson J W, *et al.* Buckling of viscoelastic spherical shells[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2022, **169**: 105084. DOI: 10.1016/j.jmps.2022.105084.
- 15 郭育豪, 刘刚. 深潜器钛合金耐压壳蠕变屈曲强度评估方法研究[J]. 中国造船, 2024, **65**(2): 25 – 36. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4882.2024.02.003.
GUO Yuhao, LIU Gang. Research on assessment method of creep buckling strength of titanium alloy pressure shell for deep-sea submersible[J]. Shipbuilding of China, 2024, **65**(2): 25 – 36. DOI: 10.3969/j. issn. 1000-4882.2024. 02.003.
- 16 Liu F, Gong J G, Gao F H, *et al.* A creep buckling design method of elliptical heads based on the external pressure chart[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2019, **141** (3): 031203. DOI: 10.1115/1.4043009.
- 17 Zhou F, Du Y, Chen Z P, *et al.* Creep buckling analysis of PMMA (polymethyl methacrylate) pressure vessels for application in neutrino detectors[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2019, **169**: 170 – 176. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2018.12.009.
- 18 Shrestha S L, Bhattacharyya D, Yuan G Z, *et al.* Creep resistance and material degradation of a candidate Ni-Mo-Cr corrosion resistant alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2016, **674**: 64 – 75. DOI: 10.1016/j.msea.2016.07.032.