

考虑辐照生长效应的包壳管蠕变坍塌研究

张明*, 朱亚楠, 卢勇, 罗雅云, 刘琥瀚, 厉井钢

中广核研究院有限公司, 广东 深圳

收稿日期: 2023年4月31日; 录用日期: 2023年7月7日; 发布日期: 2023年7月14日

摘要

为了保证反应堆的安全运行, 在设计阶段需验证包壳管的蠕变坍塌行为。本文基于商业有限元软件 ABAQUS 及其子程序建立了考虑辐照生长效应的三维包壳管的蠕变坍塌分析模型, 并制定了包壳管的蠕变坍塌准则, 分析了包壳管辐照生长和格架弹簧失效对蠕变坍塌行为的影响。研究结果表明辐照生长和格架弹簧失效均对包壳管的蠕变坍塌有促进作用。因此, 为增加保守性和安全性, 在燃料棒的蠕变坍塌设计时应考虑辐照生长和格架弹簧失效的影响。

关键词

包壳管, 蠕变坍塌, 辐照生长, 格架弹簧

Study on Creep Collapse Behavior of the Cladding Tube Considering the Irradiation Growth Effect

Ming Zhang*, Yanan Zhu, Yong Lu, Yayun Luo, Xiaohan Liu, Jinggang Li

China Nuclear Power Technology Research Institute Co., Ltd., Shenzhen Guangdong

Received: Apr. 31st, 2023; accepted: Jul. 7th, 2023; published: Jul. 14th, 2023

Abstract

The creep collapse behavior of the cladding tube should be verified at the fuel rod's design stage to guarantee the nuclear reactor's safe operation. In this study, commercial finite element software ABAQUS and its subroutine were utilized to model the three-dimensional creep collapse behavior with considering the irradiation growth effect. The creep collapse criterion of cladding was established and the effects of irradiation growth and grid spring failure on the creep collapse behavior

*通讯作者。

文章引用: 张明, 朱亚楠, 卢勇, 罗雅云, 刘琥瀚, 厉井钢. 考虑辐照生长效应的包壳管蠕变坍塌研究[J]. 核科学与技术, 2023, 11(3): 224-230. DOI: 10.12677/nst.2023.113024

of cladding tubes were analyzed. The results show that both irradiation growth and grid spring failure promote creep collapse of the cladding tube. The irradiation growth and grid spring failure should be considered in the design of fuel rods in order to increase conservatism and safety.

Keywords

Cladding Tube, Creep Collapse, Irradiation Growth, Grid Springs

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

锆合金包壳管的服役条件为高温、高压和中子辐照，恶劣的服役条件会引起包壳管向内的环向蠕变变形，最终可能导致包壳管的坍塌。在核反应堆燃料棒的设计阶段，需对燃料棒进行设计验证，以保证在正常工况下反应堆的安全运行。燃料棒包壳的蠕变坍塌性能分析是燃料棒设计验证的重要环节，一般采用专用软件进行包壳管的蠕变坍塌分析，常见的专用软件包括国外的BUCKLE [1]、COLAPX [2]、COVE [3]、CEPAN [4]等和我国中广核的FROCO [5]和BINE [6]。但是上述软件均采用平面应变假设，无法考虑三维情况下的燃料棒辐照生长，也无法考虑辐照生长对蠕变坍塌的影响，因此上述软件的工程应用较为受限。

辐照生长宏观上表现为包壳管轴向长度随着堆内中子辐照而伸长，寿期内包壳管的轴向辐照生长应变可达1%左右。燃料棒是燃料组件的一部分，被刚凸和弹簧限制在格架中，导致其轴向的辐照生长无法有效释放，从而影响燃料棒的蠕变坍塌性能。虽然燃料棒性能分析软件[7]耦合了包壳的蠕变和生长模型，但其模型局限于轴对称变形下的线弹性小变形假设，无法分析包壳坍塌这种三维的大变形问题，也无法定量分析辐照生长对蠕变坍塌的影响。章筱迪等[8]采用有限元软件ABAQUS，结合其子程序分别研究了包壳在蠕变和辐照作用下的变形和应力分布，表明了ABAQUS在燃料棒蠕变和辐照生长工况下的适用性，但该研究未考虑蠕变和辐照生长的耦合效应，也无法揭示辐照生长对包壳蠕变坍塌的影响规律。

为了精确模拟包壳管的在堆服役状态，本文将采用有限元软件ABAQUS及其子程序CREEP建立包壳管的蠕变和辐照生长模型，并定义包壳管蠕变坍塌失效准则，分析包壳管辐照生长模型以及格架弹簧失效对包壳管蠕变坍塌行为的影响规律。

2. 模型和方法

2.1. 包壳管材料本构模型

包壳管弹性阶段采用胡克定律，杨氏模量为78,000 MPa，泊松比为0.345，采用刚塑性模型模拟包壳管的塑性行为，屈服强度为160 MPa。

包壳管的蠕变本构模型采用FRAPCON软件[9]中的稳态蠕变模型，即将蠕变分为热蠕变和辐照蠕变，等效蠕变应变率的表达式分别为：

$$\begin{aligned}\dot{\varepsilon}^{th} &= A \frac{E}{T} \left(\sinh \frac{a_i \sigma_{eff}}{E} \right)^n \exp \left(\frac{-Q}{RT} \right) \\ \dot{\varepsilon}^{irr} &= C_0 \phi^{C_1} \sigma_{eff}^{C_2} f(T)\end{aligned}\quad (1)$$

其中, σ_{eff} 为等效应力, T 为温度, ϕ 为中子注量率 n/m^2s , 上式其它参数的意义和取值见表 1。

Table 1. Creep parameters (from [9])

表 1. 蠕变参数(参考文献[9])

参数	单位	数值
A	K/MPa/h	1.08×10^9
E	MPa	$1.149 \times 10^5 - 59.9 \times T$
a_i	MPa ⁻¹	$650\{1-0.56[1-\exp(-1.4E-27\Phi^{1.3})]\}$, Φ 为中子注量(n/cm^2)
n	/	2.0
Q	kJ/mol	201
R	kJ/mol/K	0.008314
C_0	$(n/m^2s)^{-c_1} MPa^{-c_2}$	4.0985×10^{-24}
C_1	/	0.85
C_2	/	1.0
$f(T)$	/	$T < 570 K$ 0.7283 $570 < T < 625 K$ $-7.0237 + 0.0136T$ $T > 625 K$ 1.4763

因织构的存在, 辐照生长表现为包壳管轴向的伸长, 但从包壳管的微观行为来看辐照生长为各向异性的恒体积生长, 其辐照生长本构描述生长应变与中子注量的关系。本文中消应力低锡铅 4 合金的辐照生长模型为:

$$\varepsilon_{grow} = 0.00075 \cdot \Phi \cdot 10^{-21} \quad (2)$$

其中, ε_{grow} 为等效辐照生长应变, Φ 为中子注量。需将(2)处理成率形式的本构关系, 即将(2)对时间求导, 有:

$$\dot{\varepsilon}_{grow} = 0.00075 \cdot \phi \cdot 10^{-21} \quad (3)$$

其中, $\dot{\varepsilon}_{grow}$ 为等效辐照生长应变率, ϕ 为中子注量率 n/cm^2s 。

2.2. 有限元网格和边界条件

包壳管外径 9.5 mm, 厚度 0.57 mm, 高度 50 mm。为了考虑包壳管的制造缺陷, 在其几何上引入初始椭圆度(长轴外径与短轴外径之差)为 0.07 mm, 轴向、环向、径向网格数分别为 40、100、4 个, 采用 ABAQUS 软件自带的 C3D8 线性单元, 其有限元网格如图 1 所示。

2.3. 包壳管的载荷史

压水反应堆堆芯的冷却剂的压力为 15 MPa, 一般燃料棒内部会预充气体 2~3 MPa, 随着裂变反应的进行, 裂变气体会逐渐释放增加内压, 但为了分析的保守性将包壳管的压力差取定值 13 MPa, 将此压力施加在包壳外表面。温度和 中子注量率历史采用某一典型工况下的值, 如图 2 所示。因温度变化较小, 未支撑段包壳管内外壁无温度梯度, 故本研究不考虑热应力的影响。

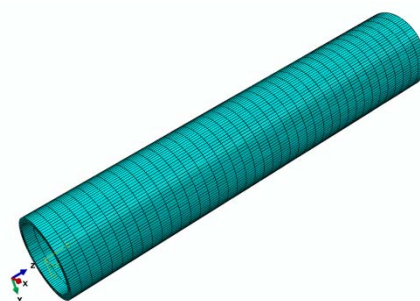
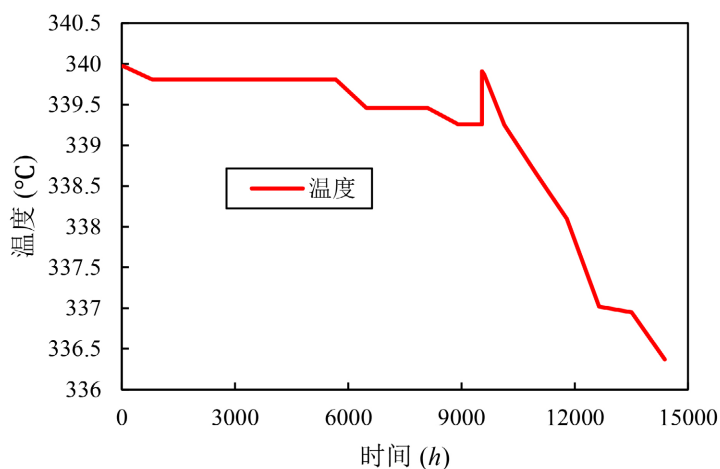
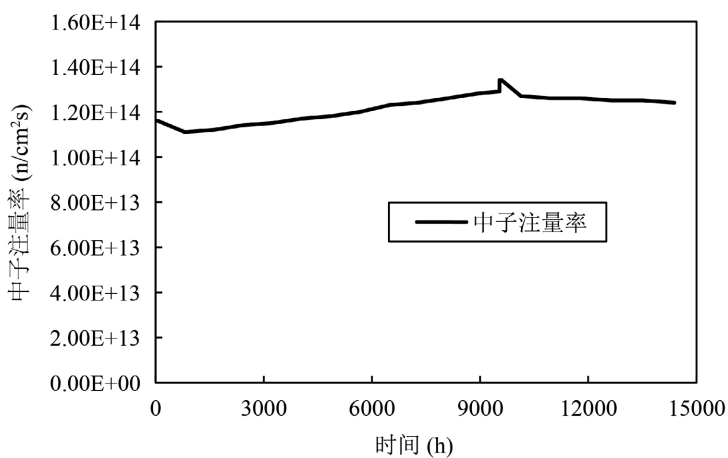


Figure 1. Mesh of the cladding tube
图 1. 包壳管有限元网格



(a) 温度历史



(b) 中子注量率历史

Figure 2. (a) Temperature history and (b) Flux history of the cladding tube
图 2. 包壳管的(a) 温度史和(b)中子注量率史

2.4. 包壳管蠕变坍塌失效准则

为了衡量压水堆包壳管蠕变坍塌性能的优劣,需要定义其蠕变坍塌失效准则。考虑压力为 0~15 MPa 范围,包壳管不会发生瞬时的坍塌失稳,因此在文献[6]准则中删除与弹性失稳有关的准则,本文采用的

蠕变坍塌失效准则如下:

1) 强度准则: 包壳管的等效应力始终小于其极限应力, 本文所选包壳管材料极限应力为 250 MPa。

2) 椭圆度变化率准则: 考虑到在蠕变的三个阶段中, 初级蠕变作用有限, 稳态蠕变率较为平缓, 而三级蠕变率较为剧烈, 包壳管椭圆度快速增加直到坍塌失效, 因此将包壳管的椭圆度变化率作为蠕变坍塌的判断准则, 本文取 0.001 mm/h。

3. 结果和讨论

3.1. 辐照生长对包壳管蠕变坍塌的影响

本小节均采用两端固定的边界条件, 以说明考虑和不考虑辐照生长对包壳管蠕变坍塌的影响。由于蠕变, 包壳管椭圆度随时间的变化情况分别如图 3 所示: 不考虑生长时, 包壳管椭圆度变化率超限, 蠕变坍塌临界时间为 4148.8 h, 此时最大等效应力为 189.5 MPa; 而考虑辐照生长时, 包壳管蠕变坍塌临界时间为 3833.00 h, 此时最大等效应力为 195.1 MPa。可见辐照生长对包壳管的蠕变坍塌有促进作用, 将失效时间提前了 278.65 h (6.72%), 如图 3 所示, $t = 3833.0$ h 不考虑生长的椭圆度为 0.341 mm, 考虑生长时椭圆度为 0.442 mm, 生长的引入将椭圆度增加了 29.6%。

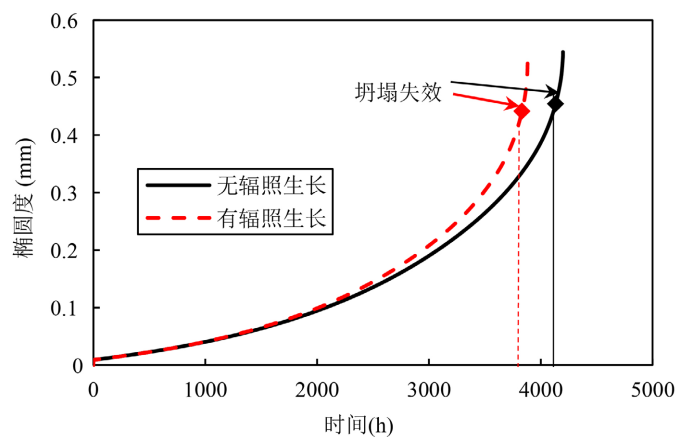


Figure 3. The influence of the irradiation growth to the ovality of the cladding tube

图 3. 辐照生长对包壳管椭圆度的影响

因为辐照生长为一种各向异性体积生长, 因此引入生长模型后, 包壳管除了产生蠕变应变外, 还会产生一定的生长应变需重新组装使得包壳管结构内部达到新的平衡状态, 这一过程则加剧了包壳管的坍塌, 因此在未显著改变应力的情况下加速了包壳管的坍塌失效。

3.2. 格架弹簧失效对蠕变坍塌的影响

压水堆燃料棒包壳被格架弹簧限制在燃料组件中, 随着反应堆的运行, 可能会发生格架弹簧的失效, 从而无法有效限制包壳管的轴向位移, 本小节将研究这一现象发生时对包壳管的蠕变坍塌行为的影响。将包壳管一端的轴向位移约束删除后, 即可模拟格架弹簧失效对包壳管蠕变坍塌性能的影响, 如图 4 所示。格架约束正常时, 如 3.1 节所述, 其坍塌失效时间为 3833.0 h; 格架弹簧失效(轴向边界条件放松)后, 包壳管椭圆率超限而坍塌失效, 坍塌时间为 3357.9 h, 格架弹簧约束丧失导致坍塌失效时间提前了 475 h (14.1%)。在 3357.9 h, 格架弹簧约束完好和失效情况下包壳管的椭圆度分别为 0.266 mm 和 0.378 mm,

弹簧约束丧失将椭圆度提高了 42%。

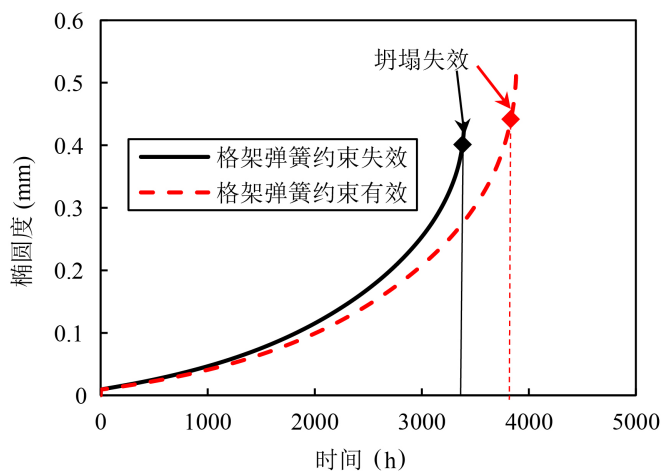


Figure 4. The influence of the grid spring failure to the ovality of the cladding tube

图 4. 格架弹簧约束失效对包壳管椭圆度的影响

当格架弹簧失效时，燃料棒包壳受到的约束减弱导致包壳管释放其轴向变形，即包壳管轴向长度会增加，而辐照生长是一种恒体积生长，轴向长度的增加将导致包壳管厚度减小，包壳管厚度变化如图 5 所示。包壳管厚度减小导致相同外压力作用下包壳管的应力增加，进而导致蠕变应变增加，最终导致包壳较快发生蠕变坍塌失效。

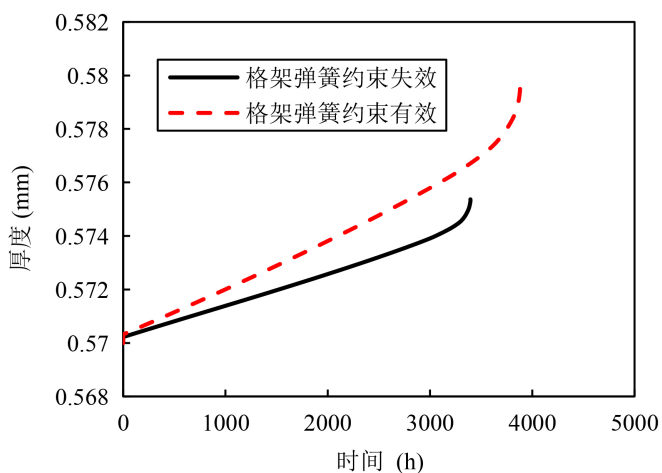


Figure 5. The influence of the grid spring to the thickness of the cladding tube

图 5. 格架弹簧约束对包壳管厚度的影响

4. 结论

本文通过商业有限元软件 ABAQUS 及其子程序建立了辐照生长和蠕变耦合的包壳管有限元模型，并分析了辐照生长和格架弹簧失效对蠕变坍塌的影响，结论如下：

- 1) 辐照生长的引入对蠕变坍塌有促进作用，在包壳管两端位移固定的约束条件下，可将蠕变坍塌失

效临界时间提前 6.72%;

2) 格架弹簧失效(轴向边界条件放松)会加速包壳管的蠕变坍塌, 可将蠕变坍塌失效临界时间提前 14.1%。

因此, 为了增加包壳管蠕变坍塌分析的保守性和安全性, 应将辐照生长模型融合到包壳管蠕变坍塌分析软件中, 并充分考虑格架弹簧功能丧失对包壳管蠕变坍塌的影响。

参考文献

- [1] Pankaskie, P.J. (1974) BUCKLE: An Analytical Computer Code for Calculating Creep Buckling of an Initially Oval Tube. *Rivista Italiana Delle Sostanze Grasse*. <https://doi.org/10.2172/4259786>
- [2] Merckx, K.R. (1974) Calculational Procedure for Determining Creep Collapse of LWR Fuel Rods. *Nuclear Engineering & Design*, **31**, 95-101. [https://doi.org/10.1016/0029-5493\(74\)90138-1](https://doi.org/10.1016/0029-5493(74)90138-1)
- [3] Mohr, C.L. (1975) COVE-1: A Finite Difference Creep Collapse Code for Oval Fuel Pin Cladding Material. Battelle Pacific Northwest Labs, Richland. <https://doi.org/10.2172/4186018>
- [4] Franklin, D.G., Lucas, G.E. and Bement, A.L. (1983) Creep of Zirconium Alloys in Nuclear Reactors. ASTM International, West Conshohocken. <https://doi.org/10.1520/STP815-EB>
- [5] 金鑫, 刘焜瀚, 卢勇, 等. 燃料棒包壳蠕变坍塌软件 FROCO 介绍[C]//中国力学大会. 中国力学大会 2017 暨庆祝中国力学学会成立 60 周年大会论文集. 2017: 1-6.
- [6] 张明, 厉井钢, 刘焜瀚, 等. 包壳管三维力学建模及其变形分析软件开发[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(29): 100-105.
- [7] Wei, X.Y., Jin, X., Deng, Y.J., *et al.* (2017) Modeling of Fuel Rod Behavior and Recent Advances of the JASMINE Code. *Proceedings of the 2017 25th International Conference on Nuclear Engineering*, Shanghai, 2-6 July 2017, 67144. <https://doi.org/10.1115/ICONE25-67144>
- [8] 章筱迪, 刘龙, 郝萌, 等. 燃料棒包壳辐照蠕变与生长行为模拟研究[J]. 核电子学与探测技术, 2016, 36(12): 5.
- [9] Geelhood, K.J. and Lusher, W.G. (2014) FRAPCON-3.5: A Computer Code for the Calculation of Steady-State Thermal-Mechanical Behavior of Oxide Fuel Rods for High Burnup. Office of Nuclear Regulatory Research & Technical Information Technical Reports, Washington.