



N36特征化燃料辐照考验及性能评价

张坤, 陈平, 邢硕, 庞华, 彭航, 蒲曾坪, 何梁, 张林, 秋博文

Irradiation Test and Performance Evaluation of N36 Characteristic Fuel

Zhang Kun, Chen Ping, Xing Shuo, Pang Hua, Peng Hang, Pu Zengping, He Liang, Zhang Lin, and Qiu Bowen

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13832/j.jnpe.2021.05.0110>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[CENTER燃料组件堆内辐照考验燃耗计算研究](#)

Study on Burnup Calculation of CENTER Fuel Assembly Irradiation Test in HFETR

核动力工程. 2018, 39(5): 26–28

[核-气联合循环发电系统性能仿真分析](#)

Simulation Analysis of Performance of Nuclear–Gas Combined Cycle Power Generation Systems

核动力工程. 2019, 40(3): 159–164

[锆合金包壳和GH4169镍基合金的微动摩擦磨损性能研究](#)

Fretting Friction Wear Behavior of Zircaloy and Ni–Based GH4169 Alloy

核动力工程. 2020, 41(4): 85–90

[数值拟合方法评价燃料芯块制造参数对燃料棒性能的影响](#)

Evaluation of Effect of Fuel Pellet Manufacturing Parameters on Fuel Rod Performance by Numerical Fitting Method

核动力工程. 2021, 42(3): 80–85

[小批量国产自主化燃料组件入堆辐照策略研究](#)

Study on Fuel Management Strategy for Irradiation of Small Batch of CF3

核动力工程. 2019, 40(2): 171–175

[破损燃料组件热室检查技术研究](#)

Technology for Examination of Failed Fuel Element in Hot Cell

核动力工程. 2018, 39(4): 71–74



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 0258-0926(2021)05-0110-04; doi:10.13832/j.jnpe.2021.05.0110

N36 特征化燃料辐照考验及性能评价

张 坤, 陈 平, 邢 硕, 庞 华, 彭 航,
蒲曾坪, 何 梁, 张 林, 秋博文

中国核动力研究设计院核反应堆系统设计技术重点实验室, 成都, 610213

摘要: N36 合金是我国自主研发的先进锆合金, 将作为华龙一号反应堆燃料元件的包壳材料。为了研究 N36 合金包壳的堆内性能, 验证其用于燃料元件包壳的可行性, 以 N36 合金为包壳设计了 N36 合金特征化燃料组件, 在秦山二期核电厂反应堆内进行了辐照考验, 并在每循环末通过池边检查获取堆内性能数据, 基于堆内数据对 N36 合金包壳的性能进行了分析和评价。本文研究提供了 N36 合金特征化燃料的辐照考验方案、N36 合金特征化燃料的设计、堆内性能数据的获取方式以及 N36 合金与 Zr-4 合金堆内性能对比结果。

关键词: N36 合金; 特征化燃料; 池边检查; 性能分析

中图分类号: TL352 **文献标志码:** A

Irradiation Test and Performance Evaluation of N36 Characteristic Fuel

Zhang Kun, Chen Ping, Xing Shuo, Pang Hua, Peng Hang,
Pu Zengping, He Liang, Zhang Lin, Qiu Bowen

Science and Technology on Reactor System Design Technology Laboratory, Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610213, China

Abstract: N36, a kind of advanced zirconium alloy developed independently in China, will be adopted as the cladding material of fuel assembly in HPR1000. In order to study the N36 alloy cladding performance in a reactor and verify the feasibility of using this alloy for cladding, the N36 characteristic fuel assembly with the N36 alloy cladding is designed and loaded in the reactor of Qinshan NPP Phase II for irradiation test. The pool side examination is performed at the end of each cycle to collect the in-core performance data of this fuel assembly. Then, the performance of N36 alloy cladding is analyzed and evaluated based on these data. For this sake, this study provides the irradiation test scheme, design and in-core performance collection method of the N36 characteristic fuel, and compares the in-core performance of N36 alloy and Zr-4 alloy.

Key words: N36 alloy, Characteristic fuel assembly, Pool side examination, Performance analysis

0 引言

我国自主研发的 N36 合金已进入科研转工程的关键阶段, 大量的堆外试验证明其综合力学性能及腐蚀性能均优于 Zr-4 合金, 但作为燃料元件包壳材料, 唯有堆内试验数据才更能表明其性能。开展 N36 合金堆内性能试验是研发关键环节,

一般来说, 燃料元件包壳研发的路线是通过堆外试验完成基本数据的获取和选型, 在研究堆上进行包壳材料辐照后性能研究, 再装入燃料后在商业堆内验证其堆内综合性能。按照传统的技术路线, 下一步应开展研究堆辐照以研究辐照后性能, 最后再进行商业堆内的燃料辐照, 但由于研究堆

收稿日期: 2020-07-27; 修回日期: 2021-03-20

基金项目: 国家自然科学基金 (U1867219)

作者简介: 张 坤 (1984—), 男, 高级工程师, 现主要从事反应堆燃料元件设计工作, E-mail: zk_330@163.com

客观条件限制，难以完全模拟商业堆内的运行工况及辐照环境，辐照考验后所获得的数据类型有限，且代表性不强。此外，传统技术路线将极大地延缓 N36 合金的研发进程，为此，需要新的堆内试验技术方案。

1 辐照考验方案设计

为了满足华龙一号工程化应用的需求，N36 合金需满足在燃料组件燃耗达到 $52000 \text{ MW} \cdot \text{d}/\text{t}(\text{U})$ 的条件下，保持其结构完整性的要求。因此，堆内试验应对 N36 合金包壳在以下几方面进行验证：①中子辐照导致的包壳材料力学性能变化和辐照生长；②高温高压水环境下的锆水反应产生的腐蚀问题；③燃料元件内芯块的肿胀及热膨胀，燃料元件内外压差共同作用给予包壳的力学冲击；④辐照裂变产物对包壳材料的侵蚀。

为符合堆内试验的要求，辐照考验方案的制定应能实现上述考验条件。一般来说，在研究堆上进行燃料元件的辐照考验试验，通过短管或片状试样进行包壳材料的考验，设计短棒进行燃料元件的模拟考验。这些考验试样置于辐照孔道内，通过辐照到一定中子注量以研究其材料性能或燃料元件性能由于辐照损伤带来的影响。这种考验方法的优点在于反应堆有专门用于辐照考验的试验通道，因此试验安全性可靠性较高，并易于操作。而其缺点在于很难模拟考验对象的目标应用环境，如中子学条件、水化学条件、堆内考验温度等；且由于考验孔道空间有限，难以进行原型考验，通常以典型结构特征进行考验。由于在试样结构、试验环境上均与目标应用环境存在较大

差异，因此考验效果具有一定的片面性，且存在由于一些关键性能的考验不充分出现考验结果相反的风险。

综上，研究堆上进行的辐照考验并不能满足 N36 合金包壳的辐照考验需要。为了真实模拟 N36 合金包壳的应用环境，设计采用 N36 合金包壳的特征化燃料在商业堆上进行辐照考验是最具代表性的方案。通过燃料管理策略的设计和论证可实验辐照考验燃耗要求；选择国内具有相当水化学条件要求的反应堆，可基本上满足水化学条件的要求；通过采用 N36 合金包壳的燃料元件可满足考验燃料元件综合作用的要求。

在成熟燃料组件中配插特征化燃料棒进行商业堆内的随堆考验，可以实现对 N36 合金包壳的堆内辐照考验。

2 N36 合金特征化燃料设计

为了实现 N36 合金包壳的堆内辐照考验，且达到预期的考验目标，需设计安全可靠的燃料元件结构。燃料元件设计验证采用自主研发的设计分析软件 FUPAC^[1]，由于 N36 合金是国内自主研发的新锆合金，尚未完全建立 N36 合金堆内行为模型，基于 N36 合金包壳的堆外试验结果，N36 合金综合力学性能、抗腐蚀性能等均优于 Zr-4 合金，因此，为了保证 N36 特征化燃料元件安全性及可靠性，设计时采用 Zr-4 合金模型，并考虑一定裕量，保守地进行 N36 合金特征化燃料元件的设计。

针对 N36 合金特征化燃料元件各关键性能的设计验证，见表 1。

表 1 N36 合金特征化燃料元件各关键性能的验证

Tab. 1 Verification of Key Properties of N36 Characteristic Fuel Elements

关键性能	主要相关的包壳材料性能	N36合金包壳材料性能描述	模型
燃料温度	热导率、抗腐蚀性能	热导率与Zr-4合金相当；抗腐蚀性能较M5合金略差	基于Zr-4合金模型并考虑一定裕量
包壳温度	热导率、抗腐蚀性能	热导率与Zr-4合金相当；抗腐蚀性能较M5合金略差	基于Zr-4合金模型并考虑一定裕量
燃料元件内压	热导率、抗腐蚀性能	热导率与Zr-4合金相当；抗腐蚀性能较M5合金略差	基于Zr-4合金模型并考虑一定裕量
包壳应变	拉伸性能蠕变性能	拉伸性能优于Zr-4合金；蠕变性能优于Zr-4合金	基于Zr-4合金模型并考虑一定裕量
包壳应力	拉伸性能	拉伸性能优于Zr-4合金	基于Zr-4合金模型并考虑一定裕量
包壳自立	拉伸性能	拉伸性能与M5合金相当	基于Zr-4合金模型并考虑一定裕量
包壳坍塌	拉伸性能、蠕变性能	拉伸性能、蠕变性能与M5合金相当	基于M5合金模型并考虑一定裕量
气腔弹簧	热膨胀	热膨胀与Zr-4合金、M5合金相当	基于Zr-4合金模型并考虑一定裕量
微振磨蚀	拉伸性能	拉伸性能与M5合金相当	基于M5合金模型并考虑一定裕量
燃料元件长度	辐照生长	辐照生长与M5合金相当（同为再结晶的锆合金）	基于M5合金模型并考虑一定裕量

3 N36 合金特征化燃料池边检查

为保障 N36 合金特征化燃料辐照考验的顺利进行, 保证 N36 合金特征化燃料的安全, 在 N36 合金特征化燃料辐照期间, 每一循环结束均会进行池边检查, 对 N36 合金特征化燃料组件的外观进行检查, 以确认其结构完整性, 并根据检查情况分析特征化燃料是否具备再入堆考验的条件。更为重要的是, 通过池边检查将获取 N36 合金包壳堆内关键性能数据, 主要包含燃料棒长度、氧化膜厚度及棒径。

3.1 外观检查

(1) 检查内容

观察燃料组件整体有无可视变形, 各零部件是否完好; 观察燃料组件外观颜色, 表面附着的沉积物、水垢及其他异常物质的形态及分布状况, 可见部位材料表面损伤情况; 观察燃料棒间、格架条带与燃料棒之间、上下管座内腔等部位有无异物。对燃料组件所有格架的外条带进行检查。观察条带外表面有无磨蚀、擦挂、撞击等外力作用痕迹; 观察导向翼有无损坏和变形; 观察对接焊缝处有无撕裂、翘曲、翻边及其他可见损伤和变形。

(2) 检查方法

外观检查采用 N470 PTZ 型工业彩色摄像机, 通过移动组件的方式对燃料组件结构完整性、燃料棒表面状态(结垢情况、燃料棒表面氧化膜情况、燃料棒表面损伤)以及各定位格架外条带勾挂、磨损情况进行检查。

3.2 燃料棒尺寸测量

(1) 检查内容

测量 N36 合金特征化燃料棒的长度, 该数据反映了 N36 合金的辐照生长; 测量 N36 合金特征化燃料棒的氧化膜厚度, 该数据反映了 N36 合金的抗腐蚀性能; 测量 N36 特征化燃料棒的棒径, 该数据反映了 N36 合金的综合力学性能。

(2) 检查方法

采用抗辐射摄像头结合图像测量软件测量燃料棒长度, 测量精度约 ± 1 mm; 采用差动变压式传感器(LVDT)测量燃料棒直径, 测量精度约 ± 0.005 mm; 采用 ELOTTEST 型涡流测厚仪笔式测头测量氧化膜厚度, 测量精度约 ± 0.005 mm。

(3) 检查不确定性

由于池边检查客观因素的限制, 各项检查仅

获得了一次测量结果。因此, 并不能获得测量误差, 基于燃料设计保守的角度考虑, 以测量精度作为误差保守地考虑检查带来的不确定性。

4 N36 合金特征化燃料性能评价

4.1 外观检查

N36 合金特征化燃料在堆内进行了 4 个循环的辐照考验, 最终考验燃耗约 $52000 \text{ MW} \cdot \text{d/t(U)}$, 各循环结束均对特征化燃料组件外观进行了检查, 检查结果显示^[2]: 燃料棒完整无可视变形; 螺钉连接处、定位格架外条带焊接部位和下管座滤板等未见异常, 各零部件完好无缺; 受燃料棒辐照生长及定位格架夹持力下降等因素影响, 燃料棒下端与下管座间隙变小, 但燃料棒与上管座间仍有较大间隙。

4.2 燃料元件长度

采用的 Zr-4 合金辐照生长模型计算了与 N36 合金特征化燃料元件相同工况下的 Zr-4 合金燃料元件辐照生长情况, 与池边检查获得的 N36 合金特征化燃料元件长度进行了对比, 结果见图 1, 图中数据已做归一化处理, 仅反映趋势。可以发现, Zr-4 合金在同样工况条件下的计算值明显高于 N36 合金特征化燃料元件的测量值, 鉴于 Zr-4 合金辐照生长模型可以较好地反映 Zr-4 合金的辐照生长特性, 可以认为, N36 合金辐照生长性能优于 Zr-4 合金。

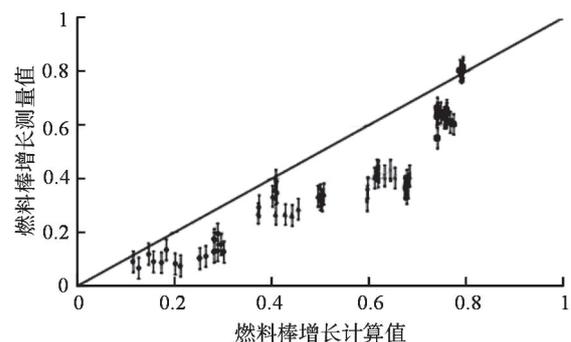


图 1 N36 合金辐照生长测量值与 Zr-4 合金模型计算值对比

Fig. 1 Measured Value of N36 Irradiation Growth vs. Calculated Value of Zr-4 Irradiation Growth Model

4.3 燃料元件直径

堆内运行期间, 寿期初由于内外压差的原因, 燃料元件包壳会向内蠕变, 直到与芯块接触, 之

后由于芯块的肿胀使得包壳外径开始变大。燃料元件外径的变化综合反映了燃料元件包壳力学性能。采用 Zr-4 合金力学模型, 模拟了 N36 合金特征化燃料元件相同工况下 Zr-4 合金燃料元件的外径变化, 与池边检查获得的 N36 合金特征化燃料元件外径进行了对比, 结果见图 2, 图中数据已做归一化处理, 仅反映趋势。可以发现, 第一循环和第二循环末, 计算值与实测值相比偏小, 在第一二循环期间, 燃料元件芯块包壳间隙尚未闭合, 燃料元件包壳由于外压的作用, 其变形趋势是向内的, 计算值偏小说明在同等工况条件下, Zr-4 合金燃料元件变化量更大, 因此, N36 合金包壳抵御变形的能力更强; 而在第三循环和第四循环末, 计算值偏大, 在这个阶段, 由于芯块包壳间隙闭合, 燃料元件包壳由于芯块肿胀导致其变形趋势是向外的, 计算值偏大, 说明同等工况条件下, Zr-4 合金燃料元件棒径变化量更大, 因此, N36 合金包壳抵御变形的能力更强。综上, N36 合金具有更强的抵御变形的能力, 可以认为其综合力学性能优于 Zr-4 合金。

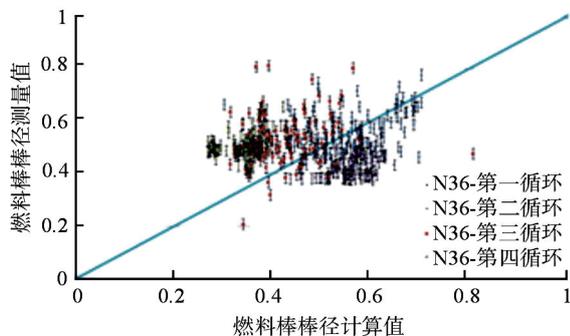


图 2 N36 合金外径测量值与 Zr-4 合金模型计算值对比
Fig. 2 Measured Value of N36 Outer Diameter vs. Calculated Value of Zr-4 Model

4.4 燃料元件氧化膜厚度

锆合金包壳腐蚀性能受到腐蚀温度和时间极大的影响, 在反应堆内, 直观地表现为受到了燃料消耗的影响。因此, 锆合金腐蚀性能在一定程度上直接影响了燃料元件的经济性指标, 能否满足高燃料使用要求, 需重点关注其腐蚀性能是否满足设计要求。采用 Zr-4 合金腐蚀模型^[3]模拟了同等工况条件下 Zr-4 合金燃料元件的腐蚀表现, 与池边检查获得的 N36 合金特征化燃料元件氧化膜

厚度进行了对比, 结果见图 3, 图中数据已做归一化处理, 仅反映趋势。可以看到, 在高燃料消耗下, 即氧化膜厚度较大的区域, Zr-4 合金燃料元件的氧化膜厚度预测值要大于 N36 合金特征化燃料元件的氧化膜厚度测量值, 鉴于 Zr-4 合金腐蚀模型能较好地模拟 Zr-4 合金的腐蚀性能, N36 合金腐蚀性能优于 Zr-4 合金。

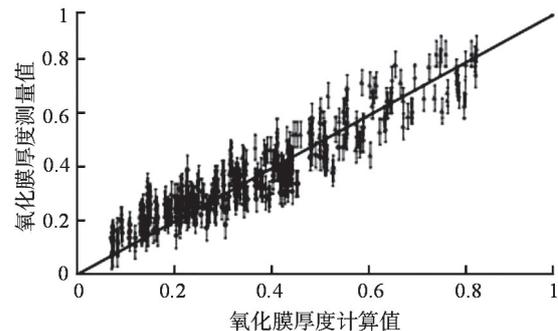


图 3 N36 合金包壳氧化膜厚度测量值与 Zr-4 合金模型计算值对比
Fig. 3 Measured Value of N36 Cladding Oxide Film Thickness vs. Calculated Value of Zr-4 Model

5 结论

燃料元件最终将应用于商业堆, 在商业堆实际运行条件下开展辐照考验试验真实模拟了新锆合金材料在反应堆内的工况及运行条件, 因此, 池边检查获得的数据是其堆内性能真实反映, 该技术路线充分利用了商业堆资源, 极大缩短了新锆合金研发周期。基于池边检查获得的数据所开展的分析表明, 在堆内性能方面, N36 合金辐照生长、综合力学性能及腐蚀性能均优于 Zr-4 合金, 后续工作中将进一步积累数据, 建立 N36 合金性能分析模型, 全面评价 N36 合金包壳的燃料元件性能。

参考文献:

- [1] 陈平, 焦拥军, 周毅, 等. CF3 燃料组件入堆辐照主要性能研究[J]. 核动力工程, 2016, 37(6): 155-158.
- [2] 周毅, 陈平, 张林, 等. 燃料棒性能分析软件 FUPAC 的研发[J]. 中国核电, 2014(7): 219-222.
- [3] 张坤, 郭兴坤, 刘振海, 等. Zr-1Sn-1Nb-0.3Fe 合金腐蚀模型研究[J]. 核动力工程, 2015, 36(S2): 93-96.

(责任编辑: 邱彦)