

FeCrAl 包壳燃料棒辐照行为研究

高士鑫, 李文杰, 陈平, 焦拥军, 周毅, 何梁

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, 610041

摘要: 铁素体 FeCrAl 不锈钢具有成为耐事故燃料包壳材料的潜在价值。通过 FeCrAl 包壳燃料棒堆内性能的初步分析, 评估 FeCrAl 包壳的堆内性能, 并对 FeCrAl 包壳后续的研发及应用提出建议。使用 FUPAC 程序对 FeCrAl 包壳燃料棒的堆内稳态辐照行为进行了初步研究。分析结果表明, FeCrAl 包壳燃料棒的温度、内压、应力应变均低于设计限值。

关键词: 耐事故燃料; FeCrAl; 不锈钢包壳; 堆内性能

中图分类号: TL315 **文献标志码:** A

Study on Irradiation Behavior of Fuel Rods with FeCrAl Cladding

Gao Shixin, Li Wenjie, Chen Ping, Jiao Yongjun, Zhou Yi, He Liang

Science and Technology on Reactor System Design Technology Laboratory, Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610041, China

Abstract: Due to the excellent anti-corrosion performance of FeCrAl stainless steel, it has become one of the most important and leading cladding options as accident tolerant fuel (ATF) cladding material. This paper focuses on the in-pile performance analysis of fuel rods with FeCrAl cladding, and provides suggestion on the future FeCrAl study and its application. This paper makes an introduction about FeCrAl cladding background and performance model, and uses FUPAC code to make analysis on the in-pile steady state performance. The results show that the core design criteria can be satisfied.

Key words: Accident tolerant fuel (ATF), FeCrAl, Stainless steel cladding, Reactor performance

0 前言

耐事故燃料(ATF)同传统 UO_2 -锆合金燃料相比,在堆芯丧失有效冷却措施的事故下,耐事故燃料能在较长时间内一定程度上包容这类事故。另一方面,耐事故燃料/包壳方案应在正常工况、瞬态工况、设计基准事故和超过设计基准事故下,有更好的燃料性能。

铁素体 FeCrAl 不锈钢为体心立方结构,具有出色的抗高温氧化性能和良好的力学性能,尤其在事故高温下,同锆合金包壳相比具有更好的耐事故性能^[1, 2]。另外,由于 FeCrAl 不锈钢为金属材料,与目前 PWR 堆芯燃料组件结构相容性较好,已成为 ATF 包壳技术方案中最具工程应用前景的材料之一。不锈钢作为燃料包壳的缺点是:与锆合金相比,热中子吸收截面是锆的 12~16 倍,这大大降低了经济性。考虑铀装量和富集度提高

对燃料成本的影响,单个燃料组件成本将上升 15% 以上^[3]。

燃料元件的堆内辐照行为分析是燃料设计的重要工作,通过性能分析程序对燃料和包壳的重要特性随辐照时间的演变加以追踪,可预测燃料元件在各类工况下的辐照行为。由于 FeCrAl 包壳是近几年新兴的燃料包壳类型,目前并没有可用于工程计算的 FeCrAl 包壳燃料性能分析程序。建立适用于 FeCrAl 包壳的燃料元件性能分析方法,对后续 FeCrAl 包壳燃料元件设计尤为重要。文中使用 FUPAC 程序,初步建立适用于 FeCrAl 包壳的燃料性能分析方法,对 FeCrAl 包壳燃料棒的堆内稳态辐照行为进行了初步研究,可为 FeCrAl 包壳后续的研发及应用提出建议。

1 FeCrAl 辐照行为研究方法

FUPAC 是中国核工业集团公司自主开发的

用于压水堆燃料棒性能分析的程序,可分析燃料棒的堆内行为。FUPAC 适用于锆合金包壳与 UO_2 燃料的燃料棒,但不包含 FeCrAl 包壳的模型。笔者基于目前国内外 FeCrAl 不锈钢堆内外试验数据,通过对 FUPAC 进行二次开发的方法,编程添加了 FeCrAl 包壳模型选项,使 FUPAC 能够用于 FeCrAl 包壳燃料棒的辐照行为研究。添加模型包括密度、热膨胀、热导率、熔点、定压比热、泊松比、弹性模量、辐照肿胀、蠕变、屈服强度、均匀延伸率等 11 个性能模块。

作为反应堆内放射性物质的第一重屏障,根据设计要求,在正常运行及瞬态事故中,包壳应在高温、高压、强中子辐照条件下确保包容所有的裂变产物。文中对 FeCrAl 包壳的辐照行为进行了初步研究分析,以评估其堆内性能是否满足相关燃料棒设计准则。

概念设计方案:FeCrAl 包壳壁厚为 0.35 mm,芯块-包壳间隙与目前压水堆燃料棒相同,芯体半径相应增加了 0.22 mm,燃料装量有所增加。核设计分析结果表明,0.35 mm 厚的 FeCrAl 包壳燃料组件采用 4.6% 富集度 UO_2 燃料可保持与锆合金包壳 4.45% 富集度组件基本相当的循环长度。

分析对象采用目前压水堆燃料组件通用的 17×17 棒束,FeCrAl 燃料棒外径和组件结构参数不变。FeCrAl 燃料棒包壳壁厚、包壳内径、芯块外径、燃料富集度变化见表 1。采用秦山 II 期长循环的最深燃耗燃料棒的功率分布与功率史,计算比较 FeCrAl 包壳的燃料棒(以下简称 FeCrAl 棒)与锆合金包壳的燃料棒(以下简称 Zr 棒)温度场、应力/应变、辐照生长等辐照行为的差异。由于两者的功率史和轴向功率分布相同,而单根 FeCrAl 棒具有较高的富集度和更多的 U 装载量(芯块半径较大),这样当辐照时间相同时,FeCrAl 棒的燃耗同 Zr 棒相比较低。寿期末,FeCrAl 棒的燃耗为 53963 MW·d/t(U),Zr 棒的燃

耗为 59999 MW·d/t(U)。

2 FeCrAl 辐照行为分析

2.1 芯块与包壳间隙

在寿期初的较短时间内(辐照时间小于 691 h),由于燃料芯块密实效应,芯块与包壳的间隙增大;随着辐照时间增加,在芯块密实、芯块肿胀、包壳蠕变的共同作用下,间隙减小;燃料棒轴向不同位置的间隙闭合时间也稍有差别。由于 FeCrAl 蠕变速率较小,FeCrAl 棒的间隙闭合时间同 Zr 棒相比大幅增加,直到大于 20000 h 才出现闭合。这意味着稳态下 FeCrAl 棒发生芯块-包壳力学相互作用(PCMI)的时刻同 Zr 棒相比大幅延迟。

2.2 温度场

稳态下寿期内,FeCrAl 棒同 Zr 棒燃料芯块中心温度的最大值均出现在轴向距燃料棒底端 2221 mm 处,两者峰值温度均远低于芯块熔点,满足燃料棒温度准则要求。随着辐照燃耗加深,芯块肿胀造成芯块半径增大,包壳蠕变导致直径减小,均使芯块与包壳的间隙减小,最终使芯块中心温度下降。由于 FeCrAl 蠕变速率低于 Zr 合金,与同时期 Zr 棒相比,FeCrAl 棒芯块与包壳的间隙较大,因此直到寿期中 FeCrAl 棒芯块中心温度均高于 Zr 棒。从寿期中起,随着 FeCrAl 棒芯块与包壳的间隙逐渐闭合,FeCrAl 棒同 Zr 棒的热导率成为两者芯块中心温度不同的主要原因。虽然 FeCrAl 材料同 Zr 合金热导率接近,但 2 种燃料棒的芯块热导率有所不同。芯块热导率随着燃耗增加而降低,由于 Zr 棒的燃耗更高,其芯块热导率较低,因此寿期末 Zr 棒燃料芯块中心温度高于 FeCrAl 棒。

在低燃耗[燃耗约为 10000 MWd/t(U)]时,FeCrAl 棒的燃料中心温度高于 Zr 棒。在高燃耗[燃耗约为 50000 MW·d/t(U)]时,轴向高度为 653~3004 mm 范围内 FeCrAl 棒的燃料中心温度低于 Zr 棒,而 FeCrAl 棒上、下两端的燃料中心温度则更高。

2.3 裂变气体释放和内压

在 20000 h 前,FeCrAl 棒同 Zr 棒裂变气体释放份额与辐照时间的关系基本一致,当辐照时间超过 20000 h 后,燃料棒裂变气体释放速率大幅增加。Zr 棒的裂变气体释放份额高于同时期的

表 1 FeCrAl 棒与 Zr 棒参数比较

Table 1 Comparison of FeCrAl and Zr Fuel Rod Parameters

参数	Zr 棒	FeCrAl 棒
富集度/%	4.45	4.6
包壳壁厚/mm	0.57	0.35
包壳内径/mm	8.36	8.8
芯块外径/mm	8.192	8.632
包壳芯块间隙/mm	0.084	
包壳外径/mm	9.5	

FeCrAl 棒, 这有两方面的原因。一方面裂变气体释放份额随燃耗的增加而增加, Zr 棒的燃耗高于 FeCrAl 棒; 另一方面, 裂变气体释放份额随温度的升高而增加, 从寿期中到寿期末, Zr 棒的芯块温度高于 FeCrAl 棒。

FeCrAl 棒的内压在寿期内均低于 Zr 棒, 两者均低于系统压力, 满足燃料棒内压设计准则要求。在整个寿期内, 燃料棒由于裂变气体释放和包壳向内蠕变导致的内部气腔与间隙的整体空间减小, 燃料棒的内压增大。但在寿期初的较短时间内(辐照时间小于 691 h), 由于芯块密实效应, 芯块与包壳间隙增大, 内部气腔与间隙的整体空间增大, 燃料棒的内压随时间减小。虽然在整个寿期内, FeCrAl 棒内压均低于 Zr 棒, 但是两者内压差异的主要原因在不同辐照阶段有所不同。寿期初至寿期中, 由于 FeCrAl 蠕变速率较小, 间隙变化较小, 因此 FeCrAl 棒的内压较小。从寿期中至寿期末, 两种燃料棒的芯块与包壳间隙均闭合, 但由于 FeCrAl 棒裂变气体释放份额同 Zr 棒相比较少, 因此其内压较小。

2.4 轴向生长

在初始辐照状态(辐照时间为 0 h), 包壳的轴向长度变化主要由于热膨胀作用。FeCrAl 热膨胀系数同 Zr 合金相比较, 因此 FeCrAl 包壳轴向生长也较大。随着辐照时间增加, Zr 合金包壳轴向生长逐渐超过 FeCrAl 包壳, 原因有: 由于锆合金在堆内有 FeCrAl 不具备的辐照生长的现象, 表现为包壳轴向生长; 锆合金蠕变速率较快, 蠕变也导致包壳轴向生长。

2.5 应力

FeCrAl 同 Zr 合金环向应力低于各自材料的屈服强度, 满足包壳应力准则要求。在低燃耗下, FeCrAl 包壳同 Zr 合金包壳的环向应力均为压应力, FeCrAl 应力水平较高。而在高燃耗下, 两者的应力值均下降, 但两者应力受力方向相反, Zr 包壳为拉应力。而 FeCrAl 包壳由于芯块-包壳间隙闭合时间较短, 芯块肿胀与 FeCrAl 包壳接触压力较小, 因此环向仍受压应力。

燃料棒的设计准则要求包壳应力小于其屈服强度。寿期内 FeCrAl 棒的 VON MISES 应力峰值出现在寿期末, 距燃料棒底端 3004.4565 mm, 而 Zr 棒峰值出在 23000 h 时, 距燃料棒底端

2220.6855 mm。FeCrAl 包壳的峰值应力约为 Zr 包壳的两倍, 但同各自材料的屈服相比, 两者均有约 200 MPa 的裕量, 满足设计准则的要求。需要注意的是, 寿期末 FeCrAl 棒的应力持续上升, 是由于 FeCrAl 蠕变速率较小, 包壳没有因为足够的蠕变行为而发生应力的有效释放。假如 FeCrAl 棒的设计燃耗更高, 则需充分考虑和分析寿期末 VON MISES 应力持续升高带来的影响。

3 结论

建立了 FeCrAl 包壳性能模型, 并通过二次开发的 FUPAC 程序对 FeCrAl 包壳燃料棒在正常工况下的稳态辐照行为进行初步研究。分析结果表明 FeCrAl 包壳燃料棒的温度、内压、应力均低于设计限值。

相比使用 Zr 合金包壳的燃料棒, 使用 FeCrAl 包壳的燃料棒不同之处在于: 寿期中至寿期末 FeCrAl 包壳燃料棒的芯块中心温度较低, 裂变气体释放份额较少; FeCrAl 包壳的蠕变速率较慢, 芯块与包壳间隙接触的时间大大增加, 延迟了 PCMI; FeCrAl 包壳燃料棒轴向生长较小, 一方面与上下管座接触裕量更大, 另一方面燃料棒更难发生不利于反应堆安全的变形(例如弯曲等)。

FeCrAl 包壳燃料棒工程应用最大的缺点除了经济性外, 还应充分考虑 FeCrAl 包壳的蠕变速率较慢带来的不利影响, 尤其是寿期末 VON MISES 应力持续上升对更高燃耗下 FeCrAl 包壳的使用带来一定风险。由于更高燃耗的燃料组件是未来发展的趋势, 下一步可以研究更高燃耗下 [燃料棒燃耗 75000~80000 MW·d/t(U)]FeCrAl 棒辐照行为。另外, 本文研究仅针对燃料棒在稳态下的辐照行为, 还应充分研究评价 FeCrAl 包壳燃料棒在 II 类瞬态下的行为。

参考文献:

- [1] Pint B A, Terrani K A. Severe accident test station activity report[R]. Oak Ridge National Laboratory (ORNL), 2015.
- [2] Yamamoto Y, Pint B A, Terrani K A, et al. Development and property evaluation of nuclear grade wrought FeCrAl fuel cladding for light water reactors [J]. Journal of Nuclear Materials, 2015, 467(7): 03-16.
- [3] Cohen k, Murphy G M. The Theory of isotope separation as applied to the large-scale production of U235 [M]. New York: McGraw-Hill, 1951.

(责任编辑: 王中强)