

文章编号 : 0258-0926(2015)05-0208-03 ; doi: 10.13832/j.jnpe.2015.05.0208

重水堆燃料铍材国产化及入堆验证试验

王文利

中核核电运行管理有限公司, 浙江海盐, 314300

摘要: 为了将制造重水堆燃料棒束使用的铍材国产化, 在工艺鉴定合格的基础上, 分析国产铍材燃料棒束堆内运行的要求, 制定国产铍材燃料棒束专项生产计划, 并将生产的国产铍材燃料棒束装入秦山第三核电厂的 2 号机组反应堆中进行验证试验。结果表明: 国产铍材燃料棒束的质量和性能满足秦山第三核电厂重水堆机组运行的要求。建议后续对铍涂覆过程进行精细化控制, 使涂覆质量最佳。

关键词: 重水堆燃料; 铍材国产化; 入堆验证

中图分类号: TL291 **文献标志码:** A

Beryllium Localization and Verification Test of PHWR Fuel

Wang Wenli

CNNC Nuclear Power Operations Management Co., Ltd, Haiyan, Zhejiang, 314300, China

Abstract: In order to manufacture the CANDU fuel bundles with domestic Beryllium completely, this paper analyzed the operation requirements for the fuel bundles coating with domestic Beryllium, and developed a special production project on the basis of the process qualification, and the bundles had been loaded in the unit 2 of the third Qinshan Nuclear Power Plant for verification test. It shows that the quality and performance of the fuel bundles coating with domestic Beryllium meets the requirements of the Qinshan CANDU units. It will be the best quality to optimize the coating process control.

Key words: PHWR fuel, Beryllium localization, Verification test

1 CANDU-6 燃料棒束

秦山第三核电厂重水堆采用 37 根燃料棒构成的 CANDU-6 型燃料棒束。与压水堆燃料组件结构设计不同, 它不依靠定位格架来实现燃料棒在燃料棒束中的定位, 而是依靠燃料棒上的隔离块来实现其在燃料棒束上的定位; 重水堆燃料棒束的燃料棒采用同心圆方式排列。秦山第三核电厂有 5 种类型的燃料棒。5 种类型燃料棒的区别只是隔离块在包壳管同一圆周分布的多少和有无支承垫。支承垫和隔离块与包壳管采用钎焊方式连接^[1]; 为使钎焊温度不至于过高影响燃料包壳管钎焊部位性能, 在隔离块和支承垫相应表面上涂一层金属铍。钎焊温度低于基体金属 (Zr-4

合金) 熔点, 金属铍作为钎料, 熔合后形成铍钎合金 (熔点 965 °C), 具有良好的浸润性和较高的机械强度, 中子吸收截面也小。因包壳管壁厚 0.40 mm (名义尺寸), 结合处特别薄, 因此要特别注意焊缝的均匀性, 相应的涂铍工序要求控制好涂铍层的厚度。

2 铍材国产化

2003 年 3 月, 秦山第三核电厂 2 个重水堆机组换料中开始采用国产燃料棒束, 截止 2011 年, 所用的金属铍材均为加拿大进口。按照自主发展核电的方针, 为降低单一供货商的风险, 启动了铍材国产化工作。为确保秦山第三核电厂反应堆

的安全运行，有必要对采用国产铍材的生产工艺实施鉴定，对产品进行入堆验证试验，以确认国产铍材适用于 CANDU-6 重水堆核燃料元件生产线。

对国产铍材的复验表明，其各项指标均符合技术要求。与进口铍材相比，2 种材料成分接近，国产铍材中的铍质量分数为 99.67%，高于进口铍材的 98.93%（以 7758-C 批为例）。在工艺试验的基础上，对涂铍、厚隔离块点焊、薄隔离块点焊、钎焊相关工艺进行了鉴定。鉴定产品合格率标准定为 97%（该值是在几年生产情况总结的基础上提出的一个目标值）。

2009 年 1 月进行了国产铍材工艺合格性鉴定，宏观检验、尺寸检验、金相检验表明：

（1）涂层宏观质量、附着性能、涂层均匀性、涂覆厚度等均满足技术要求，而且与进口铍材涂覆质量接近。国产铍材对当前工艺的适用性良好。

（2）后续的点焊、钎焊工艺过程及产品检验进一步证明：在现行工艺条件下，采用国产铍材涂铍的附件进行点焊、钎焊的次组件，表观质量、尺寸检查、金相分析等检验结果均在技术要求范围内，与进口铍材涂铍组件情况一致。钎焊后的焊缝均匀性、铍铪合金厚度、气孔等与铍层涂覆有关的指标控制良好。

鉴定过程中，有一根次组件钎焊后在检验中发现了铍铪合金，对其进行了报废，分析认为这与铍材涂覆质量有关。使用进口铍材也会有铍铪合金出现。2010 年，钎焊岗位因铍铪合金的报废率为 0.2% 左右，加拿大卡梅科燃料制造厂（CFM）当时因铍铪合金的报废率是 0.48%。2011 年 CFM 公司的钎焊合格率是 98.45%，国产铍材的鉴定过程产品合格率为 99.33%。至此，通过了工艺合格性鉴定，国产铍材可以替代进口铍材用于重水堆燃料棒束的生产。

3 入堆验证试验

3.1 对国产铍材燃料堆内运行的要求

3.1.1 堆芯管理方面对燃料堆内运行的要求
燃料棒束必须能在反应堆所要求的高功率下连续运行；必须能承受运行中和换料所引起的功率变化；必须能承受燃料棒束端部注量率峰导致的功率峰。

3.1.2 燃料操作系统对燃料堆内运行的要求

燃料棒束端部必须能与装卸料机的传感器、分离器和侧部挡块相匹配；棒束必须能承受水力推力和装卸料机推杆引起的轴向联合载荷；必须能承受正常换料时的冲击载荷；必须能承受换料时的侧向流载荷；必须能承受换料时流量的增加。

3.1.3 热传输系统和燃料通道系统对燃料堆内运行的要求
正常运行下燃料元件必须能包容裂变产物；燃料元件不因棒束的变形或隔离块过分磨损而发生表面烧干；燃料元件必须能承受冷却剂的外压；棒束在所有载荷作用下必须能保持结构完整性。

3.2 入堆验证

为了保证反应堆的安全稳定运行，决定在全面采用国产铍材生产前，生产一批先导燃料。经商定，生产 230 只燃料棒束作为先导燃料进行堆内验证。整个生产制定了专项生产计划，对涉及的产品制造和质量信息均加盖“国产铍材”标注，以示区分及追溯，采用国产铍材生产的棒束编号从当年生产的棒束顺序号中截取 230 个连续号码作为该批次棒束的编号，以便在电厂的核材料管理系统中跟踪管理。

2009 年 11 月，230 只国产铍材先导燃料运抵秦山第三核电厂。在后续换料中，比照先导燃料的使用，陆续装入 2 号机组的高功率通道辐照。

3.3 入堆验证结果

3.3.1 堆内运行
2010 年 6 月 21 日，开始陆续卸出国产铍材燃料棒束，截至到 2011 年 2 月 11 日，230 只燃料棒束全部通过正常换料卸出。结果表明：反应堆没有因使用国产铍材燃料棒束出现运行异常；国产铍材先导燃料棒束在堆内没有出现破损；国产铍材燃料棒束没有发生因燃料棒束变形或其他损坏而无法顺利进入或卸出燃料通道或装卸料机的事件。

3.3.2 水下检查
2011 年 4 月，根据卸料燃耗及在堆芯中的位置等因素，从 230 只乏燃料棒束中选取 10 只国产铍材燃料棒束，对其进行了乏燃料池内的水下目视检查。检查认为：没有发现破损和裂变产物痕迹，元件无异常，隔离块和支承垫无脱落现象，焊接热影响区未见异常。检查表明：燃料棒束没有观察到明显的变形，仍保持其结构完整性；通过与以往进口铍材生产棒束的水下检查情况对比，没有发现异常。

3.4 验证试验评价

3.4.1 堆内经历的运行工况 国产铍材燃料棒束在堆内运行经历的工况包括正常满功率(FP)运行工况,以及秦山第三核电厂2号机组第4次大修(204大修)和2010年2月的小修停堆,各种试验所需的降功率(89%FP)运行,为配合换料满足区域超功率脱扣(ROPT)裕度而降功率至96%~99%FP的功率波动,以及换料引起的局部功率波动。最大卸料燃料的燃料棒束在堆内的滞留时间达到357.47有效满功率天(EFPD)。该燃料棒束处于堆内高功率区的中心124个燃料通道之一的N10通道,其在堆内经过2个位置的滞留,分别为3号和11号位置。该棒束在堆内的滞留时间已满足设计上所要求的中心燃料通道中棒束在2个位置滞留的最大滞留时间(320EFPD)。该燃料棒束在堆内经历了反应堆1次停堆、12次降功率(幅度为89%FP)运行和其他若干功率波动。用最大燃耗燃料棒束的堆内运行数据,可作为典型例子说明国产铍材燃料所能达到的运行性能。

国产铍材燃料在堆内经历上述各种运行工况长时间运行中没有由于燃料的原因而使反应堆出现运行异常,这一结果表明国产铍材燃料满足堆芯管理方面对燃料的要求。

3.4.2 卸料燃耗 验证试验中国产铍材的燃料棒束最大卸料燃耗为9692 MW·d/t(U),接近设计的最大卸料燃耗12083 MW·d/t(U);平均卸料燃耗为7419 MW·d/t(U),高于设计卸料燃耗7186 MW·d/t(U)。以上所达到的卸料燃耗数据表明,国产铍材燃料在作为重要运行指标的卸料燃耗上已满足设计要求。

3.4.3 棒束的变形和结构完整性 正常运行时燃料在堆内受到的水力冲力载荷最大为5900 N。换料时燃料受到的水力冲力与装卸料机推杆

的联合载荷,最大可达12000 N。另外,换料中棒束在衬管横向开孔处停留时会受到横向流的载荷。按照燃料操作系统对燃料的设计要求,燃料棒束应能承受所有上述载荷而不发生影响任何燃料操作的变形和损坏。国产铍材燃料在堆内运行期间没有发生换料事故,乏燃料棒束仍能保持结构完整性,水下目视检查没有观察到损坏和明显的变形,这一结果充分说明国产铍材燃料的质量满足正常运行和正常换料下能承受上述载荷而不发生损坏和不允许变形的设计要求。

4 结论

国产铍材燃料棒束在秦山第三核电厂的反应堆内经历了高功率通道的各种运行工况,验证结果为:反应堆没有因燃料而出现运行异常;燃料没有发生破损,平均卸料燃耗超过设计要求,最大卸料燃耗接近设计要求;乏燃料仍保持其结构完整性,没有出现影响卸料的不允许的变形。上述结果表明,国产铍材制造的燃料棒束的质量和性能满足秦山第三核电厂重水堆机组运行的要求。

铍材国产化整个实施过程,包括策划、生产、入堆验证、结果评价,可为将来的类似工作提供借鉴。由于国产铍材的纯度高于进口铍材,而涂覆过程是将定量的铍材进行汽化后涂覆在支承垫和隔离块的表面,因此建议在后续的生产中对以往的定量进行精细化控制,将涂覆质量最佳,以利于钎焊的质量稳定。

参考文献:

- [1] 李冠兴,任永岗. 重水堆燃料元件[M]. 北京:化学工业出版社:176.

(责任编辑:黄可东)