

中国先进研究堆标准燃料组件 堆外水力稳定性试验

张应超, 刘 燕, 陈立霞, 康亚伦, 王 辉, 丁振鑫, 王 凌

(中国原子能科学研究院 反应堆工程研究设计所, 北京 102413)

摘要:中国先进研究堆(CARR)标准燃料组件由滚压在两块侧板上的 21 块燃料板组成。堆外水力试验的目的是考验在水力冲刷条件下燃料组件的结构稳定性。试验件是按照正式产品制造工艺制造的贫铀组件, 试验平均流速为 12 m/s, 是满功率运行流速的 120%。先后试验了 2 个组件, 第 1 个组件试验 60 d, 是满功率运行时间的 120%, 试验后观察到固定下定位梳的销钉松动, 下定位梳严重磨损了燃料板; 工艺改进后制造的第 2 个组件试验 120 d, 是满功率运行时间的 240%, 试验表明, 第 2 个组件结构完整。试验中对组件结构稳定性和燃料板腐蚀性能, 诸如组件的压差、燃料板振动、包壳表面腐蚀深度等进行了研究。

关键词:研究堆; 板状燃料组件; 水力稳定性试验

中图分类号: TL351

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2009)07-0622-04

Out-of-Pile Hydraulic Stability Test of China Advanced Research Reactor Standard Fuel Assembly

ZHANG Ying-chao, LIU Yan, CHEN Li-xia, KANG Ya-lun,

WANG Hui, DING Zhen-xin, WANG Ling

(China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275-64, Beijing 102413, China)

Abstract: The fuel assembly is the key part of a nuclear reactor. The China Advanced Research Reactor (CARR) standard fuel assembly consists of 21 fuel plates fixed to 2 side plates. The test objective is to research the hydraulic stability of the fuel assembly structure. Two CARR standard fuel assemblies were tested in the loop simulating CARR thermo-hydraulic conditions. The first assembly was tested for 60 days. It is found that the pin fixing lower comb damaged through the test, and severe damage of the comb as well as fuel plates are caused too. The second assembly was tested for 120 days after the improvement of the design and fabrication. The test shows that the assembly structure has good stability. At the same time, some important parameters were measured, such as the pressure difference of the fuel assembly, fuel plate vibration, the cladding surface corrosion depth, etc.

Key words: research reactor; plate-type fuel assembly; hydraulic stability test

燃料组件是反应堆的核心部件,组件质量好坏直接关系到将来堆的安全运行。中国先进研究堆(CARR)采用平板型燃料组件,由于其运行参数较高,结构复杂,又是首次选用,缺乏设计、加工、运行经验,所以,必须通过必要的堆内外试验验证组件设计和制造工艺的合理性。堆外水力稳定性试验是堆内考验之前必须进行的试验验证工作。

1 试验装置

试验回路由一次系统、二次系统和净化系统组成(图 1)。一回路系统由 2 台扬程为 90 m

水柱、额定流量为 80 m³/h 的屏蔽泵及热交换器、稳压罐、储水罐等部件组成,通过热交换器将热量传入二回路系统。二回路系统由水池、管道、泵和空冷器等组成。二次水除控制一回路系统水温外,还用于冷却主泵和进入净化系统的一次水。部分一回路水进入净化系统,经再生热交换器冷却到较低的温度,经净化后,再经再生热交换器加热,回到一回路,从而保证试验中的水质满足试验要求。

试验段模拟了燃料组件下端头插入栅板的结构特点和处于堆芯某一位置的边界条件,其结构如图 2 所示。

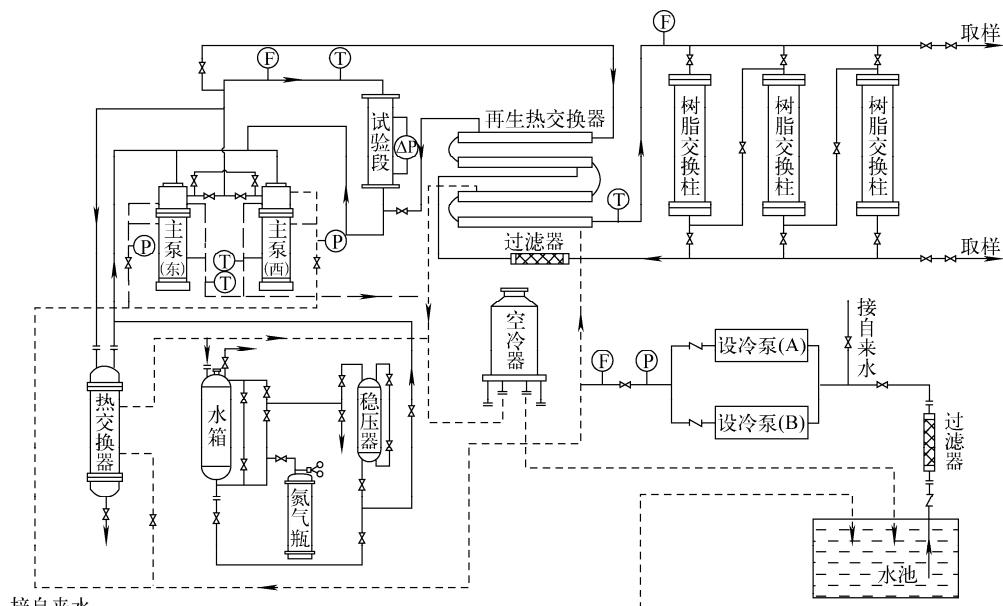


图 1 CARR 燃料组件水力稳定性试验回路示意图

Fig. 1 Flow chart of loop for hydraulic stability test of CARR standard fuel assembly

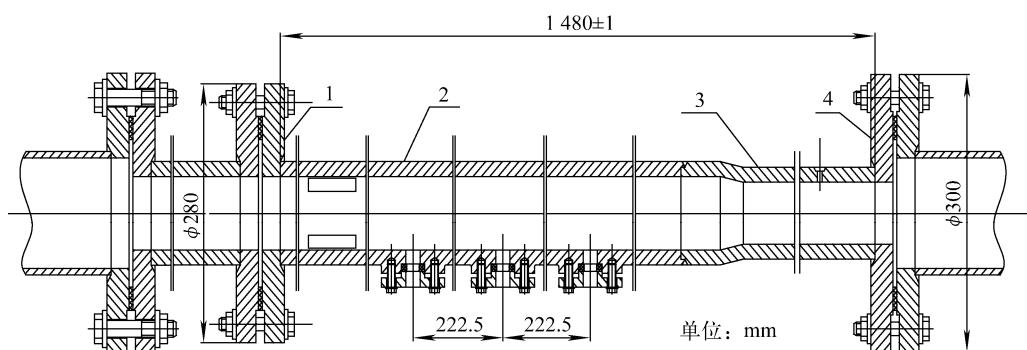


图 2 试验段结构图

Fig. 2 Structure of testing section

1—进口法兰;2—方管部件;3—方管下接头;4—出口法兰

燃料组件由 21 块燃料板组成。燃料板由 $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ 燃料芯体和 6061 铝包壳材料共挤压而成。21 块燃料板通过滚压固定在两块侧板上, 燃料板两端用定位梳保持流道宽度, 上端头的横梁用于吊装, 下端头插入栅板的方孔中以定位(图 3)。

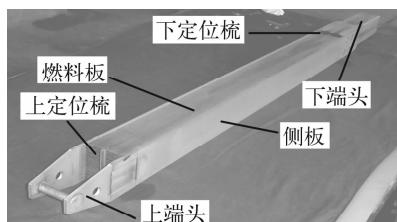


图 3 CARR 标准燃料组件照片

Fig. 3 Picture of CARR standard fuel assembly

2 试验

试验模拟 CARR 热工水力和水质条件与试验中实际运行数据的比较列于表 1、2。

对两个标准组件进行了试验。第 1 个组件试验了 60 d, 是满功率运行时间的 120%。该组件经过 60 d 水力冲刷, 下定位梳活动并磨损燃料板(图 4)。定位梳销钉加工时直径较小, 在水力冲刷下, 销钉孔越磨越大, 销钉越来越松, 定位梳不断摆动, 磨损燃料板。

经改进销钉加工、热处理和定位梳安装工艺, 制造了第 2 个组件。考虑到 CARR 燃料组

表 1 热工水力要求和实际运行数据

Table 1 Required and operational thermo-hydraulic parameters

项目	入口压力 / MPa	水温 / °C	流量 / ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)
要求参数	0.68±0.05	120±3	157±3
运行参数	约 0.80	117~123	约 160

注: 试验流量是设计流量($130 \text{ m}^3/\text{h}$)的 120%, 相应设计流速为 10 m/s, 试验流速为 12 m/s

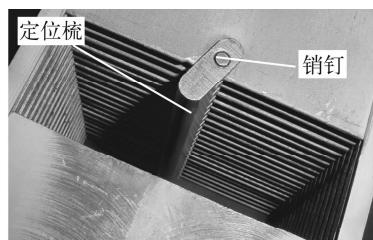


图 4 下定位梳损坏照片

Fig. 4 Picture of damaged lower comb

件进一步加深燃耗和半功率运行的可能性, 燃料组件可能在堆内运行时间加倍, 为此, 这个组件冲刷试验了 120 d, 是设计寿期的 240%。

试验中将测量组件的水力阻力、燃料板及侧板的振动振幅及频率、燃料板腐蚀厚度。试验后测量组件流道宽度并与试验前进行比较, 对组件进行解体和检验, 测量燃料板与侧板的结合强度。

3 试验结果及讨论

试验和检验表明, 经改进的标准燃料组件结构完好, 证明组件有很大的潜力和安全裕量, 为 CARR 组件将来提高燃耗、延长寿命及反应堆低功率长时间运行奠定了试验基础。

燃料板加工后, 在侧板上开槽, 将燃料板两边放进槽中, 然后在槽旁边滚压, 夹紧燃料板。侧板与燃料板夹紧程度称为结合强度。图 5 示出试验前后结合强度测量值。结合强度随试验时间的延长而降低。如果结合强度降低为零, 燃料板有可能移位, 组件的结构稳定性有可能受到破坏。澳大利亚试验堆板状燃料组件就发生了燃料板移位事故^[1]。

燃料板与侧板结合强度的降低归因于燃料板和侧板的振动作用。图 6 示出测量的最外燃料板振动按频率的分布情况。组件平均流速为 12 m/s 时, 主振频率约为 10 Hz 的振动对结合强度降低起主要作用。

表 2 水质要求和实际运行数据

Table 2 Required and operational parameters of water quality

项目	电导率 / ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	pH	固体物总量 / ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	Cl^- 浓度 / ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	F^- 浓度 / ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	铜浓度 / ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
要求参数	≤2.0	5.5~6.5	≤5.0	≤0.1	≤0.1	≤0.05
运行参数	1.0~2.0	5.5~6.5	2.05	<0.01	—	0.01

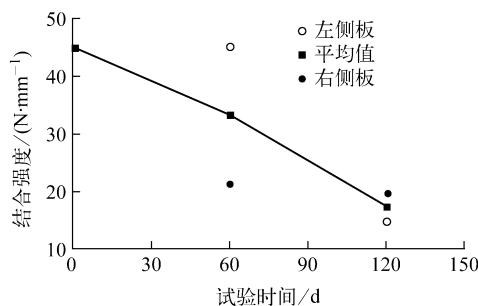


图 5 燃料板与侧板的结合强度

Fig. 5 Joint strength between fuel plate and side plate

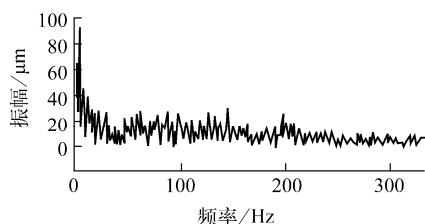


图 6 燃料板振幅与频率关系

Fig. 6 Vibration amplitude vs. frequency of fuel plate

图 7 示出铝包壳腐蚀厚度。在两组件冲刷试验结束后,采取金相检查法测量多个样品,每样品测量多个点的氧化膜厚度,求平均值,再按氧化膜/铝=1.4 的关系折合成铝腐蚀厚度。图中曲线对应于 6061 铝。由下式计算腐蚀厚度^[2]:

$$X = 0.060 \cdot 8t^{0.2578} \exp(-1340/T)$$

式中: X 为包壳腐蚀厚度, mm; T 为燃料板表面温度, K; t 为在燃料板表面温度 T 下所腐蚀的时间, h。

从图 7 可看出,CARR 燃料板包壳腐蚀厚度在设计寿期(50 d)内不会超过 20 μm, 寿期延长 1 倍, 不会超过 29 μm, 约为包壳厚度的 12%。试验未考虑辐照对腐蚀的影响。

图 8 示出组件压差与平均流速的关系。在设计额定流速 10 m/s 下, 组件压差为 0.275 MPa, 图 8 中实心圆点为日本 JMTR 组件压差测量结果^[3], 在 10 m/s 流速下为 0.243 MPa。JMTR 组件结构与 CARR 组件类似, 仅长度比 CARR 组件短约 10 cm, 所以, 压差略小。

4 结语

第 1 个组件在超设计流速 20% 和 120 °C 水温条件下经 60 d 冲刷试验观察到下定位梳及其固定销钉松动, 下定位梳、销钉、燃料板间产生严重磨蚀。经设计和制造工艺改进后制造的第 2

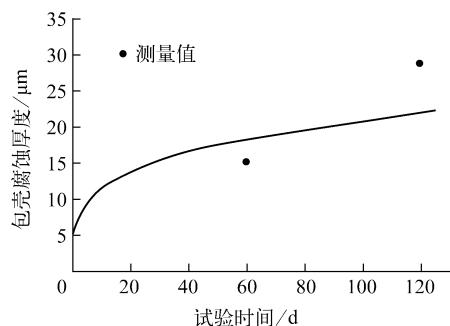


图 7 包壳铝腐蚀厚度

Fig. 7 Cladding corrosion thickness

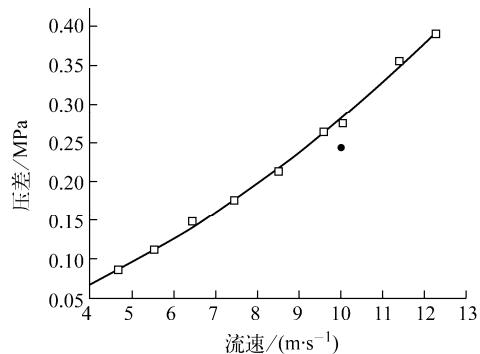


图 8 组件压差与平均流速关系

Fig. 8 Pressure difference vs. averaged velocity

个组件, 经 120 d 的冲刷试验, 结构完整。

因燃料板振动, 燃料板与侧板的结合强度会随试验时间的延长而降低, 降低速率与时间和流速有关。

张建伟、李俊荣、柯慧敏、高永光、陈忠民、穆忠范、齐鹏、王瑞茂、马树椿、高秀清等参加了试验或给予了帮助, 顺致谢意。

参考文献:

- [1] Arpansa receives submission from ansto for modified fuel for opal reactor [EB/OL]. (2008-01-11). http://www.arpansa.gov.au/news/MediaReleases/mr1_110108.cfm.
- [2] HANSON G H. ATR-ETR rates of oxide film formation on aluminum fuel plats[C]// Annual Meeting, Volume 18. US: ANS Transaction, 1974.
- [3] KOMORI Y, SAITO J, DAKAI H, et al. Properties measurement of silicide fuels for JMTR safety evaluation[C]// Proceeding of the 16th International Meeting on Reduced Enrichment for Research and Test Reactors, JAERI-M 94-042. Oarai, Japan: JAERI, 1993: 308.