

我国压水堆核电燃料元件的发展

陈宝山

(宜宾核燃料元件厂, 四川 宜宾 644000)

摘要: 概述了我国压水堆核电燃料元件发展历程及世界压水堆燃料元件发展趋势, 并对我国核电燃料元件发展提出了见解。

关键词: 核电站; 燃料元件; 发展

中图分类号: TL352.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-6931(2003)S0-0010-05

Development of Nuclear Fuel Element for PWR in China

CHEN Bao-shan

(Yibin Nuclear Fuel Element Plant, Yibin 644000, China)

Abstract: The paper presents the history of PWR fuel element development in China and the trend of PWR fuel assembly development in the world and offers the author's opinion on the development of nuclear fuel elements in China.

Key words: nuclear power plant; fuel element; development

核电是现代能源供应最重要组成之一。目前, 世界上核电总装机容量已超过 3.51×10^5 MW, 438 座不同类型的核电机组在运行, 其中, 压水堆机组 252 座, 占核电机组的 58%。我国核电起步较晚, 但进步比较迅速, 随着对能源需求日益增加以及火电带来的严重的环境问题, 决定了核电发展的广阔前景。

核电燃料元件是反应堆的核心部件。核电站靠核燃料在反应堆中进行核裂变释放能量进行转化发电, 核燃料被制成精密的燃料元件(组件)在反应堆中使用。由于反应堆安全运行的特殊要求, 决定了燃料组件复杂的设计、精密的制造以及高可靠性的质量保证。根据国情, 我国从开始发展核电就同步建立自己的燃料供应

体系, 既满足了营运核电站装料的需要, 也为中国核电的发展提供了核燃料的保障。

核燃料元件研究、设计、制造、堆内运行和乏元件后处理是一系统工程。我国核电以压水堆为主, 决定了压水堆核燃料元件的迅速发展。目前, 核燃料元件相关技术成熟, 完全满足我国核电站供料需求, 具有中国自己的特色, 燃料元件质量已达到国际先进水平。

1 我国压水堆核电燃料元件发展回顾

1) 自行研制 300 MW 燃料元件, 为我国大陆第一座核电站提供装料。

我国自行研究、设计、建造的第一座核电站——秦山核电站在其启动建设的同时, 与之

收稿日期: 2003-01-22; 修回日期: 2003-04-18

作者简介: 陈宝山(1941—), 男, 辽宁黑山人, 研究员级高级工程师, 核材料工程专业

配套的核电燃料元件制造工程随之开始,秦山核电站 300 MW 核燃料组件由上海核工程研究设计院设计,宜宾核燃料元件厂(YFP)承担制造攻关。

燃料组件制造涉及核化工转化、粉末冶金、精密机械加工、多种复杂精细的焊接以及大量的检测分析。YFP 针对化工转化进行了分步沉淀、重铀酸铵喷雾干燥、脱氟还原等工艺研究,掌握了陶瓷型 UO_2 粉末制备工艺,攻克了 UO_2 芯块制造、因科镍钎焊格架制造以及燃料元件棒电子束焊接、 ^{235}U 富集度无源式 γ 扫描检测及燃料组件组装等关键技术,并使芯块、格架、燃料棒、骨架等先后通过了“合格性鉴定”。

1986 年,我国建成了宜宾核燃料元件生产线,这是我国自行设计建造的第一条压水堆核电站燃料元件生产线。1987 年 10 月投产,仅用两年多时间,完成了秦山核电站首炉装料 3 种富集度共 125 组燃料组件和控制棒组件、可燃毒物组件和中子源组件的制造。于 1990 年 12 月将组件运抵秦山现场,保证了电站于 1991 年 12 月 15 日并网发电,从此打破了我国大陆无核电的历史。

燃料组件经反应堆多年运行考验,完全满足运行要求,其中,燃耗指标明显超过设计要求。卸料检查无一破损,无一变形,证明燃料组件的设计和制造都是成功的。

2) 引进、消化 900 MW 燃料组件技术,实现大型核电站燃料元件国产化。

为实现广东大亚湾核电站换料国产化,1991 年 5 月,宜宾核燃料元件厂与法国法玛通公司签订了《大亚湾 90 万千瓦核电站 AFA17 \times 17 燃料组件设计与制造技术转让合同》,从 1991 年到 1994 年,宜宾核燃料元件厂、中国核动力研究设计院开始了在 300 MW 核电燃料组件技术基础上对法国转让技术消化、吸收工作,并对生产线进行了全面改造建设。

1994 年 3 月,通过了 AFA 2G 燃料组件最终产品合格性鉴定,随后进入正式生产。最初 3 批换料燃料组件由法方监造,并承诺入堆质量担保,这样,可使中方越过组件入堆考验阶段。YFP 于 1994 年底完成了大亚湾核电站第一个换料(U_2R_1)52 个燃料组件和 64 个阻流塞组件制造任务,组件质量完全达到了法玛通

组件的质量标准,保证了大亚湾核电站第一个换料采用国产燃料组件。1995 年,又按期完成了大亚湾核电站 U_1R_2 、 U_2R_2 两批换料的组件制造,从而实现了大型核电站燃料组件国产化,使我国核电站燃料组件制造跃上了一个新的台阶。

从 1996 年开始,YFP 为大亚湾核电站制造了每年的换料组件。燃料组件质量优良,在大亚湾反应堆内运行表现良好,无异常、无破损、无变形。根据电站运行评价,燃料组件质量已达到国际先进水平。

YFP 为秦山二期 600 MW 核电站制造了首炉堆芯装料 AFA 2G 燃料组件,保证了核电站于 2002 年 2 月并网发电。

这期间,进行了多项应用研究开发,组件制造工艺技术不断改进,内在质量不断提高。 UO_2 粉末的物理化学性能、 UO_2 芯块的晶粒度与热稳定性,元件棒焊缝质量,骨架的可靠性以及组件的棒间距、垂直度等已达到世界先进水平。

3) 扩大规模,提高水平,制造高燃耗燃料组件。

为提高核电站的经济性和安全性,1998 年,大亚湾核电站提出实施高燃耗换料方案,计划从 2002 年起装入高燃耗(以金属铀计,下同)(5 500 MW \cdot d/t)长周期换料(18 个月)燃料组件。由于高燃耗涉及反应堆燃料管理、燃料制造等一系列新技术,经过国际招标,决定采用法玛通公司的高燃耗技术,相应的燃料组件为 AFA 3G——一种原 AFA 2G 的改进发展。AFA 3G 燃料组件,其 ^{235}U 富集度提高到了 4.45%。采用 $Gd_2O_3-UO_2$ 混合芯块可燃毒物棒,采用 M5 合金(Zr-1%Nb-0.12%O)作包壳管材料,加大了导向管壁厚,降低了上下管座的压降,增加 3 组带有搅混翼的半跨距中间格架,从而提高了包壳管抗辐照、耐腐蚀能力,提高了组件抗弯性能,增加了热工水力裕量,TRAPPER™下管座具有更强的防屑能力,能有效地防止外部废物碎片进入而引起燃料棒破损。燃耗深度将达 5 500~60 000 MW \cdot d/t,为用户实施最经济的换料管理方案提供了更大的灵活性。

大亚湾核电站与宜宾核燃料元件厂一起于

1998年12月与法玛通公司签定了技术转让合同。2001年, YFP成功为大亚湾核电站生产了两个机组的首批高燃耗换料组件。

为满足我国在建的秦山二期核电站(2×600 MW)、广东岭澳核电站(2×900 MW)、江苏田湾核电站(2×1 000 MW)等对燃料的需求, 从1999年起, 对YFP的生产线实施扩大生产能力、提升技术水平的改造工程。YFP购买了南非AEC公司BEVA元件厂的全套设备, 生产能力(以U组件计)从75 t/a扩大到200~250 t/a。采用自动焊接及IDR转化(一体化干法)等新工艺, 并实现了含钚可燃毒物棒制造国产化。

综上所述, 我国PWR燃料元件发展经历了3个阶段, 制造了3代产品, 为我国核电的迅速发展提供了燃料保障。高燃耗组件制造、生产能力的扩大、技术水平的提高, 标志着我国燃料组件制造进入了一个新阶段。

2 世界压水堆核电元件发展趋势——高性能燃料组件

1) 持续进步, 不断提高水平。

为满足核电站对燃料组件可靠性、经济性、灵活性的不断提高的要求, 组件设计与制造一直在持续改进。多年来, 燃料组件不断改进, 主要包括: 准则和设计程序; 燃料棒、格架、导向管及组件整体结构设计; 燃料组件所用材料(核燃料、结构材料、控制棒材料、可燃毒物棒材料), 使燃料组件不断向高性能发展。作为高性能组件的代表, 美国西屋公司的PERFORMANCE+组件经历了表1所列的发展过程。

表1 西屋公司PWR燃料组件的发展
Table 1 Development on PWR fuel assemblies from Westinghouse

组件	投入使用年份	批燃耗/(GW·d·t ⁻¹)	相对燃料循环费/%
标准燃料组件	1973	33	100
OFA	1977	36	95
VANTAGE5	1983	45	90
VANTAGE5H	1987	48	89
VANTAGE+	1989	50	87
PERFORMANCE+	1992	55	86

法国AFA 3G燃料组件是在早期购买西屋公司技术的因科镍格架组件(IGA)基础上经过标准燃料组件(SFA)、先进燃料组件(AFA)、第二代先进燃料组件(AFA 2G)而发展的, 设计最大燃耗为60 000 MW·d/t。法国新开发的高性能组件ALLIANCE与AFA 3G组件相似, 所不同的是, ALLIANCE组件燃料棒下端塞全部紧贴下管座, 所有材料(导向管、包壳管、格架等)全部为M5合金, 燃耗设计可达70 000 MW·d/t。预计2003年起将投入商业运行。

2) 不断研究开发。

组件研究、设计、制造、运行反馈, 各环节紧密关联, 是一系统工程, 需有明确的研究开发目的、计划、资金投入和组织协调, 尤其是新材料(如M5合金)的研究、试验、堆内考验到正式商业应用周期很长(一般需十几年, M5合金燃料棒1989年已入堆考验)。除有经费投入外, 还必须要有统一的协调组织(如组件结构设计改进、结构材料研究、PCI行为研究等)。

法玛通先进核能公司(Framatome-ANP)为燃料组件不断进步而进行长期研究, 其战略是为当前十年提供秉承法玛通-西门子现有的两种技术, 为下一个十年提供根据新技术的一系列整套产品。为此, 统一规划研究开发与创新项目, 主要包括: 增强现有工艺技术特性及其运行裕度, 建立新的工艺技术; 包壳材料和结构材料研究; UO₂芯块研究; 含钆棒束的控制棒组件使用; 后处理中的乏燃料性能研究等。

3 核电燃料元件发展与核材料技术进步相辅相成

1) 核燃料

为适应高燃耗, 重点在UO₂芯块的研究: 首先要获得活性高、可烧性能良好的优质UO₂粉末; 其次要提高UO₂芯块性能(外形尺寸、内部孔隙结构、晶粒度、肿胀行为等)。目前, 正在对制造大晶粒UO₂芯块的制造工艺及参数控制进行研究(如添加Cr₂O₃等)。为减少中子泄漏, 节省燃料, 燃料棒内装填不同富集度的芯块。为有效利用铀资源, 一些反应堆装有利用MOX芯块制成的MOX燃料元件。

2) 结构材料

以燃料棒包壳材料改进为重点,取得明显进步,才使燃料组件高燃耗成为可能。从 Zr-4 合金到优化的 Zr-4 合金、Zr-1%Nb 合金,到现在的 M5 合金、E635 合金、ZIRLO 合金等,包壳材料在不断改进。

与 Zr-4 相比,ZIRLO 合金(Zr,1%Nb,1%Sn 和 0.1%Fe)的水侧腐蚀率减少 60%,辐照生长减少 50%,辐照蠕变降低 20%,适于高燃耗组件。PERFORMANCE+ 组件的包壳管、导向管、定位格架均采用 ZIRLO 合金。

M5 合金已证明具有非常好的耐腐蚀性能。与低锡 Zr-4^[1]相比,高燃耗下的氧化膜厚度仅为 Zr-4 的 1/3,吸氢量为 Zr-4 的 1/6,辐照生长减少 2 倍。法玛通公司将在新一代 ALLIANCE 中将包壳管、导向管、仪表管、格架等均应用 M5 合金,以提高组件在高燃耗下的性能。图 1 给出了两种材料在高燃耗下表现出的抗腐蚀性能。

3) 中子吸收材料

控制棒所用中子吸收材料,现在多为银-铟-镉(Ag-In-Cd)和碳化硼(B₄C),法国在考虑今后使用铪(Hf)棒的经济可行性。

对于可燃毒物材料,西屋公司研究使用 IFBA,即 ZrB₂ 一体化可燃毒物(在芯块柱面涂以 25 μm ZrB₂)。这种可燃毒物使用寿命末期毒物残留量少,经济性好,布置灵活。法玛通公司等研究用 Gd₂O₃-UO₂ 混合芯块(含钆芯块)装在包壳管中作为可燃毒物棒,优点是含钆芯块制造系统类似于 UO₂ 芯块,可燃毒物棒布置灵活。TVEL 的 VVER-1000 可燃毒物原为铝基硼弥散体芯块(CrB₂ + Al),现已部分改为 Gd₂O₃-UO₂。

各大公司均致力于材料技术的改进,以促进元件技术的发展。

4 对我国压水堆元件发展的思考

鉴于对能源的迫切需求和人类环境保护的需要,核电在我国将持续快速发展。根据我国核电发展方针和技术现状,国际合作必不可少。核燃料供应可靠保障和完整的燃料循环体系建立是我国核电可持续发展的重要基础。一切以用户为关注焦点,形成高水平的核电燃料制造

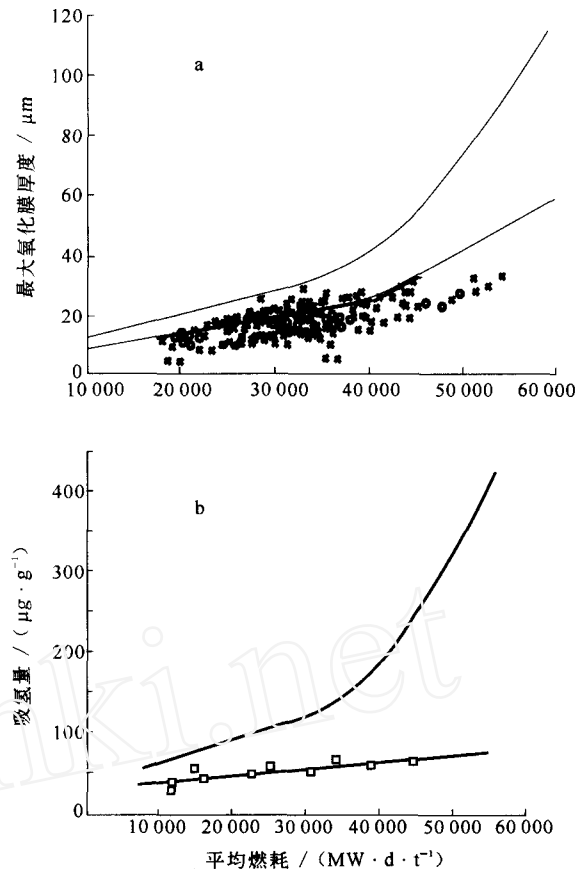


图 1 高燃耗下氧化膜厚度(a)和吸氢量(b)

Fig. 1 Thickness of oxidized layer (a) and hydrogen absorbing (b) under high burn-up

a: ×——M5 涡流; ○——M5 金相;

实线——Zr-4, AFA 2G 界线

b: 实线——Zr-4; □——M5

能力,实现专业化、规模化,以适应加入 WTO 后国际核电市场的竞争发展需求。

今后核电燃料元件制造和发展应该重在以下 6 个方面。

1) 形成标准系列,具有自主知识产权。

堆型多,燃料组件种类多、批量小,不利于提高改进和降低制造成本。通过制造实践、科研开发及堆内运行经验反馈,借鉴国外经验,在中国核电堆型标准化的同时,对燃料组件设计标准化、系列化,形成自主知识产权。如果以 CNP1000 为标准化堆型,则燃料组件可在现有 AFA 3G17×17 组件基础上,吸收国外经验,加以改进,实现自主系列的标准组件。

2) 按专业化、规模化模式发展。

世界核电燃料元件制造均向规模化发展,

这是在竞争条件下,基于技术进步和降低制造成本的缘由。西方大国核燃料元件制造在实施强强联合,如2001年,法国法玛通公司与德国西门子公司(核部分)合并组建了新的Framatome-ANP公司;英国核燃料公司(BNFL)与美国西屋公司(核部分)在2000年合并为西屋联队WELCO。据Framatome-ANP公司统计,2001年,世界压水堆核电站燃料元件各大公司的市场份额为:Framatome-ANP,41%;WELCO,26%;TVEL,15%;MHI,6%;ENUSA,3%;其他公司,9%。

核电元件生产是个复杂的系统工程,规模化生产才有利于提高工艺技术水平,确保产品的质量,降低制造成本,增强市场竞争力。所以,美、英、法、德等全是规模化工厂。

我国核电规模很小,核电元件的目前产量只及美国西屋公司哥伦比亚厂产量的1/10,既具有发展潜力,也有发展余地。专业化、系列化、规模化生产,减少了工序调整、系统清理等非有效生产作业时间,又有利于保证产品质量,提高制造水平,显然也能降低制造成本。

3) 制造高燃耗高性能燃料组件。

继大亚湾核电站实现高燃耗换料后,岭澳、秦山核电站均可能相继实施。欲适应先进核电站对组件提出的苛刻要求,制造厂必须制造性能优异、可靠性更高的先进高燃耗高性能的燃料组件。

4) 改进制造工艺、降低制造成本。

降低燃料成本是降低电站发电成本的组成部分。近年来,我国机电一体化装备有了长足进步。应吸收外国经验,博采众长,进一步加强国产装备的研制开发和元件制造工艺改进(化工转化IDR技术、粉末冶金、压力电阻焊接、焊接超声检测等),以不断提高制造水平、降低制造成本。

5) 加强核材料研究开发和主要材料国产化。

随着离心法采用,我国已完全能够保证国产化浓缩U供应。对于燃料棒包壳管(Zr-4合金管和M5合金管等),西北锆管有限责任公司和上海高泰公司正在引进国外同类技术和装备,进行技术改造,随即可提供国产化产品,同时对因科镍、不锈钢等组件结构材料加以规划、落实,形成我国自己的材料供应保障体系。此外,借鉴国外M5、ZIRLO合金等特点,有计划地开展国内核燃料元件用合金材料性能研究与开发。材料问题,尽管加入WTO后情况有所变化,但是基于发展需要,仍需投入研究自己的材料。

6) 组建国家核燃料元件技术中心,不断推进技术进步。

优化燃料设计、制造、堆内运行、信息管理,组织有关设计、研究、制造厂和电站用户共同发展燃料组件技术。集中技术优势、合理配置资源,提高研发效率和水平。可充分利用已有资源(研究设计单位、大学、工厂),合理分工组织,加大科研开发力度,并培养高水平人才,以适应我国核电自主、持续、快速发展需要。

综上所述,我国核电燃料元件发展是伴随核电发展而建立并不断提高水平、扩大能力的过程,现已具备制造300、600、900(1000)MW核电站燃料组件的能力,实现了核电燃料元件国产化,既满足了我国核电站运行对燃料的要求,也为今后我国核电持续快速发展提供了可靠保证。

参考文献:

- [1] Mardon JP, Frichet A, Charquet D, et al. The M5 Fuel Rod Cladding [A]. TOPFUEL'99—LWR Nuclear Fuel Highlights at the Beginning of the Third Millennium[C]. Avignon, France: the French Nuclear Society, 1999. 407~411.