

CNIC-01774

NFE-0019

## AFA 3G 定位格架条带技术研究

叶远东

(宜宾核燃料元件厂,成都,610002)

### 摘 要

介绍了目前国外燃料组件高燃耗、长周期、低泄漏的发展方向;阐述了研制高燃耗燃料组件定位格架的必要性和可行性。提出了定位格架研究中的主要技术指标、研究方案和实施途径。明确了定位格架条带的研制内容和模具制造中的技术难点;给出了总体实施方案,并确定了研究目标及技术性能指标。最后对格架研制中的关键技术和实施方案及格架研制中的相关配套条件进行了分析。

**关键词:** 定位格架 研究方案 研究目标 配套条件

**Research Report on Development of  
Spacer Grid Strap for AFA 3G Fuel Assembly**  
(*In Chinese*)

YE Yuandong  
(Yibin Nuclear Fuel Element Plant, Chengdu, 610002)

ABSTRACT

The current development and tendency for fuel assemblies being of low leakage, high burn-up and long cycle fuel reload in the world are presented, and the necessity and feasibility to develop the spacer grid for high burn-up fuel assembly are elaborated. Considering all the activities in implementing of spacer grid and the technical difficulties in machining of tools, the major technological processes are introduced; the research program and the approaches to develop the spacer grid while research targets and overall schedule are defined and some key technical points and applicable practices are discussed. Finally the requirements and the conditions necessary for developing of spacer grid are proposed.

**Key words:** Spacer grid, Research program, Research target, Conditions necessary

## 前 言

目前国外燃料组件的发展方向为高燃耗、长周期、低泄漏。定位格架是燃料组件中的关键部件,它对组件在堆内运行的安全性起着极其重要的作用,任何新型组件的研制或重大改进均是从定位格架开始。作为组件主要结构材料的格架必须适应这些要求,能有更高的 DNB 裕量。美国主要采用双金属格架,西屋公司的 Performance<sup>+</sup> 组件的中间格架采用抗腐蚀性能很高的 Zirlo 合金,端部格架采用因科镍 718,减少了燃料棒的振动。法马通的 AFA 2G 和 AFA 3G 组件采用的也是双金属格架,条带为 Zr-4 合金,格架弹簧为因科镍 718,其中 AFA 3G 与 AFA 2G 不同点在于前者上面四个格架之间增加了 3 个半跨距搅混格架(MSMG),改善了堆内冷却水的流动和传热条件,提高 DNB 裕量 15%以上。法国 Alliance 组件采用全锆定位格架,材料为 M5 合金,取消了因科镍弹簧,组件在 AFA 3G 的基础上提高 DNB 裕量 15%以上。此外西门子的 HIT 组件使用的也是全锆定位格架。

AFA 3G 组件定位格架共分三种:端部格架、搅混翼格架、半跨距格架。宜宾核燃料元件厂虽引进了法国的 AFA 3G 燃料组件制造技术,但由于受国内条件的限制并未引进条带冲制技术和格架组装技术。由于 AFA 3G 定位格架结构复杂,制造工艺要求严格,现仍是进口法国成品条带,再经激光焊组装成 AFA 3G 定位格架。

要实现 AFA 3G 组件的国产化,就必须实现其定位格架(包括其半跨距搅混格架)的国产化,这样有利于进行我国具有自主知识产权的高性能燃料组件的研制。目前 AFA 3G 组件的条带进口费用每组高达 6 000 多美元,并且由于国内暂时还不能生产条带,法国在提供条带时不断涨价。大亚湾核电站现有的两个堆每次换料需 80 组 AFA 3G 组件,仅其条带进口费用就高达 50 多万美元。如果“十五”末期有 6 个反应堆使用 AFA 3G 燃料组件,则每次换料组件所需的条带进口费用就会高达 300 多万美元。AFA 3G 燃料组件格架的国产化,不仅能填补国内在该项目领域的空白,而且可节约大量外汇,同时也可避免因政治、经济等方面因素引起的供料风险。

宜宾核燃料元件厂现生产的秦山一期 15×15 组件的定位格架材料为因科镍 718,生产的 AFA 2G 及 AFA 3G 组件与法马通完全一样,但国内尚不具备其条带的冲制条件,条带均是从法国进口,国内只是进行组装,这样在格架成本和知识产权上就受到了国外的制约。在条带冲制的模具研制方面,宜宾核燃料元件厂已具有丰富的经验,已经自行研制了秦山一期 15×15 组件的定位格架条带冲制模具及核动力组件格架条带的冲制模具,取得了满意的效果,基本具备了进行 AFA 3G 组件条带的冲制及定位格架的国产化研究条件。

## 1 预期主要技术指标、初步研究方案及途径分析

### 1.1 主要技术指标

通过 AFA 3G 组件定位格架条带技术研究,研制出典型中间格架的高精度条带冲制模具和格架弹簧冲制模具,确定合理的条带冲制工艺和弹簧热处理工艺,实现 AFA 3G 组件定位格架条带和弹簧的国产化;确定合理的格架组装工艺,提高格架成品率,实现 AFA 3G 组件定位格架的国产化。

### 1.2 初步研究方案及途径分析

按照 AFA 3G 中间格架的技术条件要求,进行内、外条带及弹簧模具设计:首先通过调

研确定合适的协作单位,并由宜宾核燃料元件厂机械加工中心研制出相关的条带冲制模具;另外通过条带和弹簧冲制技术研究,确定合理的冲制工艺并研制出国产 AFA 3G 中间格架条带,同时完成格架弹簧的热处理工艺研究,通过焊接及组装技术研究研制出国产 AFA 3G 格架。

### 1.3 应用方向

通过 AFA 3G 组件定位格架条带技术研究,研制出中间格架的高精度条带和格架弹簧冲制模具,确定合理的条带冲制工艺和弹簧热处理工艺,实现 AFA 3G 组件格架条带和弹簧的国产化。确定合理的格架组装工艺,提高格架的成品率,实现 AFA 3G 组件定位格架的国产化。

该技术主要应用于国产 AFA 3G 组件格架的制造,并可应用于 AFA 2G 组件的制造中,此外该技术还可应用于具有自主知识产权的高性能燃料组件的格架研制中。

## 2 研究内容

AFA 3G 组件共有 11 个定位格架,分三种:端部格架、搅混翼格架、半跨距格架。由于 AFA 3G 组件中的搅混翼格架在整体结构和制造工艺难度方面最具有代表性,本课题主要研制搅混翼格架和搅混翼格架的弹簧,然后再在此基础上来实现端部格架和半跨距格架的国产化。主要研究内容包括:

(1)研制搅混翼格架需要研制高精度内、外条带冲模。内条带的总体制造方案有两种:一是采用单工序模具按既定的冲压工序将坯料一步步冲制成形;二是采用级进模冲制成形。由于级进模整体结构复杂、体积庞大,制造风险较大,加工费用昂贵,且需购买专用大吨位冲床,目前条件尚不具备,因此采用单工序模具方案。其中内条带和外条带装配细槽冲模、内条带刚凸成形模和外条带 90°折弯模。这些模具在设计 and 制造中具有很大难点:冲制装配细槽模具的难点在于如何防止冲头在工作时不折断,刚凸成形模的难点在于成形时材料不产生变形,90°折弯模的难点在于折弯后如何保证装配细槽间的位置度。

(2)研制格架弹簧需研制弹簧冲制级进模,级进模结构复杂,制造难度大,采用对外协作方式完成模具制造。

(3)确定合理的条带冲制工艺和弹簧热处理工艺。条带冲制工艺是保证成品条带质量的关键,合理的冲制工艺可以避免条带扇形变形的缺点。

(4)确定合理的格架组装工艺。正确合理的组装工艺将能提高格架组装速度,研究组装夹具,更好地保证格架外形尺寸。

(5)确定合理的格架焊接工艺,研究合理的焊接参数。

(6)完成搅混翼格架的研制。

## 3 总体实施方案

本课题总体技术方案如下:(1)确定合理的内、外条带冲制工艺,然后根据工艺设计出冲制工艺图;(2)根据工序图设计各工序模具;(3)根据模具图统计模具材料用量及螺钉、弹簧等标准件的用量,组织购买;(4)进行模具试制;(5)模具试冲,冲出合格的内、外条带及弹簧;(6)条带清洗除油;(7)研究格架组装工艺;(8)研究格架焊接工艺及焊接参数;(9)研究弹簧热处理工艺及参数;(10)完成格架研制,写出科研报告。

本课题研究的关键点是条带和弹簧的冲制工艺及模具的研制。首先按 AFA 3G 定位格架图纸和技术要求,确定研究方案,设计并研制出模具,同时对压机进行改造,使其适应 AFA 3G 格架条带及弹簧的冲制。然后使用进口条带材料进行冲制工艺研究,同时也积极与国内有关锆材厂进行合作研究,力争实现条带原材料的国产化。如果国内锆材厂能在“十五”期间研制出 Zr-4 条带材料和因科镍弹簧材料,则可用国产材料进行条带冲制技术研究,实现 AFA 3G 条带及其原材料的国产化。在此基础上同时进行弹簧热处理工艺探索和格架组装工艺研究,最终实现 AFA 3G 定位格架的国产化。

#### 4 研究目标及技术性能指标

通过 AFA 3G 组件定位格架条带技术研究,研制出搅混翼格架的高精度内、外条带冲制模具和搅混翼格架弹簧冲制级进模,确定合理的条带冲制工艺,冲制出的条带和弹簧满足 AFA 3G 组件格架条带和弹簧的技术条件。确定格架组装工艺,研究弹簧热处理工艺,最终完成了格架焊接工艺研究,研制出合格的搅混翼格架和搅混翼格架弹簧,达到搅混翼格架和弹簧总图所要求的尺寸及技术要求,提高格架的成品率达 99% 以上,实现 AFA 3G 组件定位格架的国产化,使宜宾核燃料元件厂具备新型定位格架的研制能力。

主要技术性能指标为:

(1)内条带主要技术性能指标

条带装配槽宽 ( $0.48 \pm 0.04$ ) mm                                  装配槽间距 ( $12.595 \pm 0.04$ ) mm

刚凸高度 ( $1.18 \pm 0.03$ ) mm    条带长度 ( $211.8 \pm 0.1$ ) mm

条带宽度 ( $18 \pm 0.04$ ) mm

(2)外条带主要技术性能指标

端部栅员间距 ( $11.2 \pm 0.04$ ) mm    装配槽宽度 ( $0.5 \pm 0.03$ ) mm

凹坑凸起高度 ( $0.24 \pm 0.03$ ) mm

(3)弹簧主要技术性能指标

弹簧高度 ( $1.92 \pm 0.04$ ) mm    弹簧成形表面不允许出现裂纹

弹簧成形形状放大 50 倍应与标准图吻合

(4)格架主要技术性能指标

格架外形         $213.3(\text{最大}) \times 213.3(\text{最大})$                                   刚凸间距 ( $9.8 \pm 0.2$ ) mm

条带间焊接质量达到适用技术条件要求                                  搅混翼至刚凸距离 ( $8.22 \pm 0.5$ ) mm

(5)条带冲制成品率达 95%

(6)条带弹簧冲制成品率达 98%

#### 5 关键技术及实现途径分析

本课题研究中的关键技术为内、外条带冲模和弹簧成形模的研制,其中弹簧成形模为两套级进模,是模具制造中的难点,需部分外协加工。同时宜宾核燃料元件厂将对机械加工中心的部分设备进行改造,使其与外协部分配套,从而完成级进模的研制。对于内、外条带冲模,由宜宾核燃料元件厂的机械加工中心进行了研制。格架条带所需原材料为 Zr-4 合金带材,弹簧材料为因科镍 718,本次科研所需原材料在采用法国进口材料的同时,也将与国内的专业锆材厂和有关研究所合作,进行锆条带原材料和弹簧原材料的国产化研究,如果在研

制周期内国内相关厂家能提供合格的铍条带和弹簧原材料,则选用国产材料进行研究。

## 6 配套条件(包括技术、人才、软硬件条件、协作)及措施分析

### 6.1 课题承担单位配套条件分析

本课题由宜宾核燃料元件厂机械加工中心承担。该机械加工中心曾先后完成了秦山核电站首炉燃料组件定位格架及模具、AFA 2G 定位格架及模具的研制工作,同时还完成许多堆内考验组件定位格架及其模具的研制工作。该中心拥有慢走丝线切割机床、精密电火花成形机等高精模具加工设备,另配有光学曲线磨、成形磨等设备(见表 1),设备加工能力满足 AFA 3G 格架条带技术研究的要求。

表 1 机械加工中心关键设备

序号	设备名称	型 号	台数	制造厂
1	CNC 线切割机	A500W	1	日本 Sodick
2	CNC 电火花机	AQ35LR	1	日本 Sodick
3	CNC 镗铣床	MCV-760AR	1	中国台湾丽伟
4	CNC 车床	Vturn26	1	中国台中精机
5	数显成形磨	540L	1	德国 JONES
6	光学曲线磨	M9017A	1	中国上海第三机床厂
7	精密平面磨	C4-4161-00-00	1	德国 BRAND
8	万能工具显微镜	MLD	1	日本 KOGYO
9	投影仪	GV-MTR-5001-1000	1	意大利 S. P. A
10	高温真空钎焊炉	L1213 II -5/ZM	1	中国北京七星华创
11	激光焊机	JK701	1	英国 LUMONICS

机械加工中心拥有经验丰富的模具设计人员和较强的模具研制能力,采用计算机辅助设计技术,并引进当今先进的模具设计软件,有多台条带冲制压力机,自主进行秦山等工程定位格架条带的冲制,取得了满意的效果,积累了较丰富的条带研制经验。相关的条带冲制和焊接工艺已获国家专利。

### 6.2 关键设备应用分析

#### 6.2.1 成形磨削技术

主要设备:数显成形磨、光学曲线磨。零件可磨削成由各种曲线和圆弧组成的封闭轮廓,由于磨头可绕 X、Y 和 Z 轴回转一定角度,所以足可磨削在纵截面上带斜度的零件,如拼块凹模斜面。磨削面表面粗糙度可达  $R_a 0.2$ ,加工精度可达  $0.003 \sim 0.005$  mm,一般砂轮可磨出  $0.08$  mm 的圆角半径。

成形磨削技术在模具研制中,主要用于磨削冲头、凹模拼块、凹模镶件等。

#### 6.2.2 坐标磨削技术

在模具研制中,CNC 坐标磨床是关键设备,坐标磨削可消除热处理变形误差,加工精度可达  $5 \mu\text{m}$ ,表面粗糙度可达  $R_a 0.2$ ,主要用于定位销装配孔、定位钉装配孔和其他精密孔系的磨削。由于采用坐标磨削,模具定位销孔,导向钉孔均可在热处理前预留磨量。热处理后进行精密磨削,可消除热处理变形误差,提高模具精度。

### 6.2.3 慢走丝线切割加工技术

慢走丝线切割机在模具加工中起着重要的作用,使用的是 $\phi 0.1$  mm铜丝,一次性使用,不上下来回往复。一个零件一般要切割3次,最多可切割5到6次,其加工精度可达 $2\ \mu\text{m}$ ,表面粗糙度可达 $R_a 0.4$ 。主要用于模具中如凹模板、卸料板、固定板中各种复杂型孔,其切割精度高,并可在热处理后进行,从而避免了热处理变形误差。由于可采用慢走丝线切割工艺,所以精密模具的卸料板可设计成整板结构,从而可保证模具的精度。

### 6.3 协作单位配套条件分析

成都宏明双新精密模具零件有限责任公司,于2000年7月由宏明电子股份有限公司和成都双新实业开发有限责任公司合资成立。拥有精密模具和精密零件两个生产制造部门,主要从事精密硬质合金级进模和型腔模的设计制造以及精密零件冲压加工等业务。

该公司先后从瑞士、德国、美国等引进一流的CNC制模加工设备,采用CAD/CAM/CAE技术,积极推进高精度、高品质、高效率模具的开发和研制。并引进当今世界一流的高速冲床和包装设备,建立精密五金件冲压加工基地,采用超声波清洗,编带包装,生产局部镀金、银、锡及全镀镍等精密零件。公司产品广泛用于通讯、家电、汽车及办公自动化设备等领域。

该公司强化质量管理,积极推行5S管理,于2001年3月通过ISO9001认证,产品先后被评为国家优质模具特等奖、国际优质模具等。

成都宏明双新精密模具零件有限责任公司关键设备列于表2。

表2 成都宏明双新精密模具零件有限责任公司关键设备

序号	设备名称	型号	台数	制造厂
1	CNC线切割机	AGIEAC-100D+F	1	瑞士AGIE
2	CNC光学曲线磨	UPFS-150-CNC	1	瑞士DOEBELI
3	CNC坐标磨	G18-CNC-1000	1	美国MOORE
4	CNC成形磨	JA-415	1	德国DECKEL
5	CNC镗铣床	FP4CC/T	1	德国DECKEL
6	数显坐标磨	3GB	1	日本三井精机厂
7	数显成形磨	M9116	1	咸阳机床厂
8	精密平面磨	MG7132;MM7120A	各1	杭州机床厂
9	真空淬火炉	EC-62A	1	首都机床厂
10	万能工具显微镜	19GC	2	上海光学仪器厂
11	投影仪	JT3-500	1	新天仪器厂

## 7 结论

针对AFA 3G定位格架内、外条带及弹簧的结构进行了分析,重点分析了内、外条带及弹簧的制造难点,制定了研制方案。并通过对本科研项目承担单位以及协作单位的相关配套条件分析,证明本科研项目可自行研制完成。