

基于 AFA3G 组件尺寸特性的质量异常研究

张礼开 张仁东 王浩

中广核铀业发展有限公司

DOI:10.12238/etd.v6i3.14376

[摘要] 组件检查仪作为检查燃料组件尺寸数据的关键设备,对保证燃料组件的包络轮廓尺寸测量原始数据的真实性至关重要。对于AFA3G燃料组件包络轮廓尺寸测量数据是否准确,目前在现行的燃料组件产品技术规范中没有具体的量化判断标准。笔者作为一名长期从事燃料组件质量监督的监造人员,通过研究AFA3G燃料组件尺寸特性,探究出一种判定AFA3G燃料组件包络轮廓尺寸数据是否存在异常的有效方法,并实际应用到AFA3G燃料组件质量监督工作中,有效保证了燃料组件质量监造质量。

[关键词] AFA3G燃料组件; 组件检查仪; 尺寸特性; 管座平面度特征值; 0.3法则

中图分类号: TF526 **文献标识码:** A

Research on Quality Anomalies Based on the Dimensional Characteristics of AFA3G Components

Likai Zhang Rendong Zhang Hao Wang

CGN Uranium Industry Development Co., Ltd.

[Abstract] As the key equipment for inspecting the envelope profile data of fuel assemblies, FIR (FA inspection rig) is crucial to ensure the accuracy of the measurement data of the envelope profile of fuel assemblies. There is no specific quantitative judgment standard for the accuracy of AFA3G fuel assembly envelope profile data in the current technical specification of fuel assembly products. As a long-term supervisor engaged in fuel assembly quality supervision, the author has explored an effective method for determining whether there are abnormalities in the envelope profile data of AFA3G fuel assemblies by studying the dimensional characteristics of AFA3G fuel assemblies. This method has been applied in the quality supervision of AFA3G fuel assemblies, effectively ensuring the quality of fuel assembly quality supervision.

[Key words] AFA3G fuel assembly; FA inspection rig; Dimensional characteristics; Characteristic value of flatness of pipe seat; 0.3 rule

引言

AFA3G燃料组件产品技术条件中外形尺寸一共有五个质量指标^[1],分别是:各层(定位)格架的扭转、上部格架相对于上管座的扭转、燃料组件X/Y轴直线度、连续格架之间偏差、燃料组件垂直度。这些测量数据需要通过组件检查仪测量框架上12组外形测量传感器探头(以下简称:探头)测量燃料组件的包络轮廓尺寸^[2-3],并将测试数据传输到PC机后,由组件检查仪自动计算得出。

采集一次完整的燃料组件包络轮廓尺寸共120个数据,包含上管座、下管座及8层定位格架,每一层收集12个数据,分布在每层轮廓的四面上(每一面均匀分布3个探头)。为保证燃料组件包络轮廓尺寸数据的准确性,探头布局遵循两个基本原则:一是同一面上的3个探头处于同一平面上;二是两端探头尽可能处于平

面轮廓边缘,以便真实反映轮廓尺寸。这120个数据是AFA3G燃料组件外形尺寸质量指标的基础性数据。燃料组件测量值数据是否准确,在目前的燃料组件产品技术规范中没有具体的量化判断标准。而这些数据的准确性又是保证燃料组件外形尺寸数据是否正确的关键^[2-3]。

为此,本文基于AFA3G燃料组件尺寸特性进行深入分析,探究出一种判定燃料组件测量数据是否存在异常的方法,对组件检查仪探头测量值的准确性进行判定。

1 AFA3G燃料组件尺寸特性分析

AFA3G燃料组件下管座名义尺寸为214mm×214mm。组件检查仪布置探头时,应将探头布置于下管座四个面的平整区域,避开管脚、棱边、部件标识等。下管座是燃料组件包络轮廓尺寸测量的基准,四个面上12个探头测量值显示均为0;上管座、定位

格架与下管座之间的尺寸链关系, 以及部件产品自身特性, 即是本文研究重点。

1. 1 上管座尺寸特性分析

AFA3G燃料组件上管座名义尺寸为213. 5×213. 5mm。燃料组件进行包络轮廓尺寸测量时, 上管座四个面的测量值是以每个探头在上管座与下管座测量的距离差值显示的。上管座的探头应布置在四个面平整区域, 避开上管座边缘棱边、组件标识、部件标识、面号等区域。

根据上管座部件结构特点, 组件检查仪在上管座每一面的探头数据大体具有“等差排列”规律, 即上管座每一面上的3个探头数值按照布置顺序有“大中小”或“小中大”的排列。

这个规律的判断依据主要来自以下两点: 一是上管座部件是正方形不锈钢件, 刚性强度大, 不易因其它部件牵扯导致变形; 二是上管座表面采用机加工方式成型, 产品精度高。上管座产品图纸中只给出了上管座相邻两个平面的垂直度指标($\leq 0. 10\text{mm}$), 对管座的平面度没有给出具体数值要求; 但上管座垂直度质量指标涉及到相邻两个面的平面度, 只有相邻两个面的平面度大大优于0. 10mm才能保证该项技术要求。

我们将处于同一面的3个探头数据进行量化处理: 采用两端探头测量值的平均值与中间探头测量值进行比较, 即二者差值的绝对值 $|(P_{9,7}+P_{9,9})/2-P_{9,8}|$ 设定为管座平面度特征值(以上管座第3面为例)。理想情况下, 管座平面度特征值为0。实际情况下, 考虑到上管座的平面度有最大0. 04mm极限公差(经验值), 同时上管座探头数值叠加了下管座平面度极限公差, 因此上管座平面度特征值控制在0. 08mm内是合适的; 该数值可作为判断上管座探头数据是否异常的判定标准。

1. 2 定位格架尺寸特性

同理, 燃料组件对定位格架的测量值也是以每个探头在格架与下管座测量值的距离差值显示的。定位格架的探头布置在平整区域, 应避开边缘、沟槽、孔洞、部件标识以及材料标识等。AFA3G定位格架条带属于轻薄器件, 容易因其它部件的牵扯变形, 因此单个格架的数据 $P_{i,j}$ 不能作为判定尺寸是否异常的依据。

AFA3G定位格架名义尺寸为213. 7mm×213. 7mm, 每层定位格架的截面尺寸数据有6组, 分别是 $P_{i,1}+P_{i,9}$ 、 $P_{i,2}+P_{i,8}$ 、 $P_{i,3}+P_{i,7}$ 、 $P_{i,4}+P_{i,12}$ 、 $P_{i,5}+P_{i,11}$ 、 $P_{i,6}+P_{i,10}$ 。定位格架截面尺寸比下管座小0. 3mm, 根据定位格架与下管座的尺寸链关系, 理想情况下定位格架截面尺寸数据为 $-0. 3\text{mm}$ ($P_{i,1}+P_{i,9}=P_{i,2}+P_{i,8}=P_{i,3}+P_{i,7}=P_{i,4}+P_{i,12}=P_{i,5}+P_{i,11}=P_{i,6}+P_{i,10}=-0. 30\text{mm}$, $i=1, 2, 3\cdots 8$, “-”表示截面尺寸比下管座尺寸小0. 30mm)。定位格架技术图纸中规定了最大允许尺寸214×214mm, 没有给出最小尺寸质量数值, 笔者多年收集到的定位格架截面尺寸数据, 没有发现存在有格架截面尺寸低于213. 5mm的情况, 表1是笔者利用骨架三坐标仪精确测量的8只定位格架的截面尺寸数据(注: 这8只格架数值采自一组骨架产品定位格架的中部位置)。

表1 定位格架截面尺寸(单位: mm)

截面尺寸	格架1	格架2	格架3	格架4	格架5	格架6	格架7	格架8
Y轴	213.628	213.604	213.619	213.614	213.611	213.564	213.603	213.547
X轴	213.603	213.616	213.622	213.618	213.644	213.549	213.594	213.553

为评价燃料组件格架尺寸特性是否存在异常, 我们认为确定合适的格架截面尺寸公差带是适宜的。通过设定有效尺寸公差带, 可对格架测量数据进行有效评价。工程实践中, 我们将格架截面尺寸公差带设定为 $\pm 0. 3\text{mm}$, 既考虑了测量误差又兼顾安全裕度。格架的有效截面尺寸数据范围为 $-0. 3 \pm 0. 3\text{mm}$, 即 $(-0. 6, 0)\text{mm}$, 我们定义这种格架尺寸特性为“0. 3法则”。

2 AFA3G燃料组件数据异常判定

2. 1 上管座采集数据异常实例分析

(1) 事件: 笔者在某核燃料制造厂从事监造工作期间, 发现一组燃料组件(组件编号: FA8)上管座的第3面(X轴正向)包络轮廓尺寸数据(数据排列依次为: $-3. 06, -3. 48, -3. 04$)不满足“等差排列”规律, 管座平面度特征值为0. 43mm($> 0. 08\text{mm}$)。

(2) 原因分析。直接原因: 检查该组件测量过程, 发现探头测量上管座第3面时, 中间探头落入了管座的面号内, 导致上管座数据不满足“等差排列”规律。

根本原因: 组件检查仪探头W轴位置布置不合理。原设定的W轴位置高度设定在上管座面号附近。因组件长度公差的波动, 导致探头落入到面号中。

(3) 产品排查: 制造厂已生产及检验了该批次燃料组件32组, 如果对每组燃料组件进行重新检查, 将耗时耗力。依据第2. 1节, 我们找出8组燃料组件管座平面度特征值 $> 0. 08\text{mm}$ 的燃料组件产品。

(4) 问题处理。设备调整: 通过调整组件检查仪在上管座处W轴位置(向上移动30mm), 确保探头测量位置不会落入面号内, 处于平整区域。

重新测量: 组件检查仪探头位置重新调整后, 组件制造厂对数据异常的8组燃料组件进行重新测量, 重新测量数据的管座平面度特征值均 $< 0. 08\text{mm}$ 。

图1 显示了8组组件产品探头调整前后检测数据排列图。

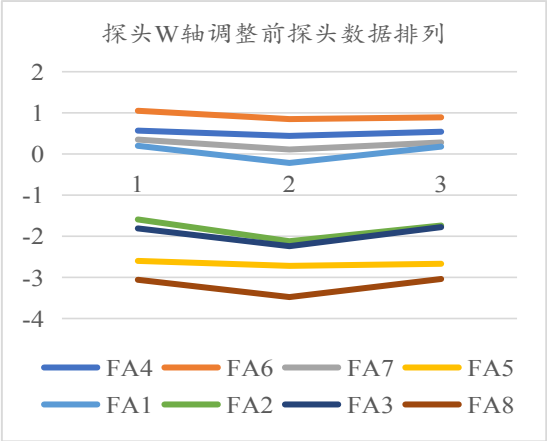


表4 燃料组件FA11外观尺寸测量表

测量面	第1面			第2面			第3面			第4面		
位置/探头	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
A8	0.67	0.87	1.06	-1.87	-1.66	-1.37	-1.39	-1.13	-0.98	1.07	1.37	1.54
A7	0.59	0.82	1.07	-2.06	-1.9	-1.77	-1.37	-1.14	-0.89	1.46	1.49	1.74
A6	0.57	0.79	0.97	-1.72	-1.6	-1.47	-1.25	-1.04	-0.87	1.18	1.3	1.44
A5	0.49	0.72	0.88	-1.37	-1.33	-1.11	-1.16	-0.99	-0.78	0.82	0.88	1.07
A4	0.48	0.74	0.92	-1.05	-0.89	-0.76	-1.18	-1.01	-0.77	0.49	0.63	0.78
A3	0.26	0.54	0.75	-0.71	-0.58	-0.45	-1.02	-0.79	-0.58	0.17	0.3	0.42
A2	-0.09	0.16	0.35	-0.41	-0.28	-0.15	-0.67	-0.39	-0.24	-0.13	0.03	0.16
A1	-0.3	-0.12	-0.04	-0.24	-0.17	-0.07	-0.3	-0.11	-0.04	-0.23	-0.12	-0.06
下管座	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

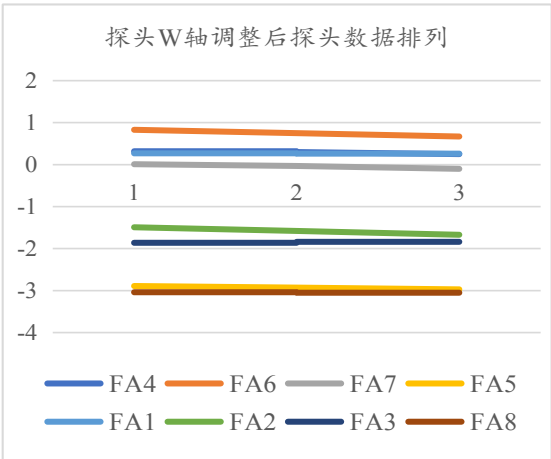


图1 W轴调整前后组件探头数据排列图

2. 2定位格架采集数据实例分析

笔者在三家不同制造厂收集到3组燃料组件外观尺寸测量数据(表2~表4), 三组燃料组件所有的质量指标均合格。那么, 这三组燃料组件的定位格架数据是否是真实可靠的呢? 根据前文所述的定位格架尺寸特性, 我们对这三组组件的测量数据可靠性进行分析。

表2 燃料组件FA9外观尺寸测量表

测量面	第1面			第2面			第3面			第4面		
位置/探头	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
A8	-1.19	-0.91	-1.26	0.01	0.16	-0.09	0.13	0.46	0.17	-1.04	-0.6	-0.78
A7	-0.71	-0.49	-0.85	-0.13	0.05	-0.27	-0.28	0.04	-0.26	-0.95	-0.49	-0.79
A6	-0.46	-0.23	-0.62	-0.29	-0.08	-0.38	-0.58	-0.27	-0.55	-0.79	-0.4	-0.74
A5	-0.33	-0.09	-0.49	-0.39	-0.08	-0.41	-0.63	-0.33	-0.68	-0.76	-0.33	-0.65
A4	-0.34	-0.05	-0.44	-0.45	-0.13	-0.4	-0.74	-0.43	-0.75	-0.75	-0.32	-0.67
A3	-0.35	-0.1	-0.44	-0.56	-0.19	-0.53	-0.73	-0.43	-0.77	-0.64	-0.24	-0.58
A2	-0.32	0	-0.38	-0.61	-0.28	-0.57	-0.81	-0.5	-0.86	-0.56	-0.18	-0.55
A1	-0.56	-0.17	-0.58	-0.6	-0.25	-0.56	-0.57	-0.25	-0.59	-0.56	-0.14	-0.47
下管座	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

表3 燃料组件FA10外观尺寸测量表

测量面	第1面			第2面			第3面			第4面		
位置/探头	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
A8	-0.83	-0.84	-1.03	-0.25	-0.13	0.06	0.22	0.54	0.46	-0.27	-0.29	-0.66
A7	-0.78	-0.75	-0.93	-0.32	-0.23	-0.14	0.24	0.45	0.38	-0.17	-0.14	-0.39
A6	-0.74	-0.69	-0.8	-0.36	-0.28	-0.17	0.2	0.35	0.29	-0.14	-0.1	-0.37
A5	-0.7	-0.58	-0.67	-0.42	-0.3	-0.24	0.22	0.29	0.16	-0.08	-0.04	-0.22
A4	-0.51	-0.33	-0.54	-0.29	-0.23	-0.2	-0.04	0.11	0.01	-0.19	-0.07	-0.27
A3	-0.34	-0.3	-0.53	-0.35	-0.24	-0.22	-0.2	-0.03	-0.05	-0.14	-0.05	-0.32
A2	-0.44	-0.31	-0.42	-0.37	-0.24	-0.2	-0.13	0.01	-0.11	-0.16	-0.05	-0.3
A1	-0.36	-0.23	-0.41	-0.34	-0.22	-0.25	-0.27	-0.12	-0.23	-0.29	-0.13	-0.4
下管座	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

2. 2. 1燃料组件外观尺寸分析

我们对燃料组件的定位格架截面尺寸数据($P_{i,i}+P_{i,9}$ 、 $P_{i,2}+P_{i,8}$ 、 $P_{i,3}+P_{i,7}$ 、 $P_{i,4}+P_{i,12}$ 、 $P_{i,5}+P_{i,11}$ 、 $P_{i,6}+P_{i,10}$)进行数据统计。

FA9定位格架截面尺寸数据表显示, 只有定位格架中间探头位置处测量得到的截面尺寸数据($P_{i,2}+P_{i,8}$ 、 $P_{i,5}+P_{i,11}$)满足“0. 3法则”; 另外4组定位格架截面尺寸数据(两端探头位置)均不满足。中间探头截面尺寸值的平均值比两端探头测量值小0. 65mm。显然, FA9燃料组件的定位格架的尺寸数据是存在异常的。

FA10定位格架截面尺寸数据显示, 2组探头截面尺寸数据($P_{i,3}+P_{i,7}$ 、 $P_{i,4}+P_{i,12}$)中大部分位置的格架截面尺寸值不满足“0. 3法则”, 另外4组截面尺寸数据则满足要求。显然, FA10燃料组件的定位格架的尺寸数据也是异常的。

FA11定位格架截面尺寸数据显示, 所有定位格架截面尺寸数据均满足“0. 3法则”。FA11燃料组件的定位格架的尺寸数据是正常的。

2. 2. 2定位格架数据异常原因分析

(1)FA9燃料组件。经查, 组件检查仪两端探头距离: 190mm。而AFA3G格架两端最大焊缝之间的距离: 188. 925mm($12. 595\text{mm}\times 15$)。两端探头测量位置偏凹槽焊缝中心线外0. 313mm($0. 313=[1. 7-(190-188. 925)]/2$, 其中1. 7为凹槽宽度), 考虑到探针顶部为球状, 故两端探头测量位置处于格架凹槽焊缝上, 未满足探头位置布置原则之同一面上的3个探头应处于同一平面上。

(2)FA10燃料组件。经查, 该组件检查仪两端探头距离: 200mm。两端探头测量位置距离端部6. 85mm($6. 85=[213. 7-200]/2$)。该位置从理论上讲与中间探头是处于同一平面上的。但该位置临近格架边缘, 而格架边缘存在一定圆弧过渡, 使得该组件的两端探头测量数据存在不稳定情况, 某些列数据与中间探头数据相近, 某些列数据则与中间数据存在明显差异。同样未满足探头位置布置原则: 同一面上的3个探头应处于同一平面上。

2. 2. 3定位格架数据异常对燃料组件尺寸的影响

定位格架数据异常主要对燃料组件尺寸“各层(定位)格架的扭转”质量指标造成直接影响。根据AFA3G燃料组件尺寸定义, “各层(定位)格架的扭转”是指“在同一面上每个测量位置的

测量值间的偏差不超过1.3mm”。那么格架某一面上的扭转值为： $\max(P_{i,j}) - \min(P_{i,j})$ ($P_{i,j}$ 为格架某一面上的3个测试数据)。

根据前文描述,造成FA9及FA10定位格架数据异常的原因均为探头位置布置不佳,导致定位格架某一面上的3个探头数据差值相较正常测量情况下波动更大,从而最终燃料组件尺寸报告给出的尺寸数据值也比正常值大。在定位格架数据异常情况下两组燃料组件尺寸报告结果均合格,那么实际燃料组件的真实质量数据是会比报告给出的数值更好。所以FA9及FA10两组燃料组件定位格架数据异常,不会改变燃料组件尺寸质量判定结果,但燃料组件尺寸的数据失真是存在的。

2.2.4 FA11定位格架数据正常原因分析

经查,该组件检查仪两端探头间距为:176.33mm(12.595mm×14)。该位置处于距离格架最外层的第2排中间栅元处,既最大限度保证测量格架轮廓,又避开了格架焊缝凹槽、孔洞及材料标识。

3 本方法适用条件

- (1) 组件检查设备及探头的状态正常。
- (2) 燃料组件的表面状态正常,未发生异常磕碰等情况。
- (3) 上/下管座表面探头测量位置不应存在较大缺陷,即使该缺陷满足产品技术条件要求(管座表面允许存在深度不超过0.4mm,总面积最大不超过30mm²的缺陷),但如果存在此类缺陷;本判定方法将出现较大偏差。

3 结论

- (1) 管座的平面度特征值及定位格架的“0.3法则”是一种能快速判定燃料组件轮廓尺寸数据是否失真的有效手段和方法。
- (2) 造成燃料组件数据异常的主要因素有:探头位置,包括W轴上的位置以及探头在格架平面上的位置。
- (3) 组件检查仪设备故障也是导致组件尺寸异常的一个常见原因。
- (4) AFA3G燃料组件轮廓尺寸数据真实性的判定目前还没有具体实施标准,所以出现数据异常情况时,还应结合检查设备及产品状态进行综合判定。

[参考文献]

- [1] 陈宝山,刘承新主编.轻水堆燃料元件[M].北京:化学工业出版社,2007.4(核材料科学与工程)ISBN 978-7-122-00105-4.
- [2] 兰智彬.大型核电站燃料组件包络轮廓尺寸全自动检查装置技术开发与应用[J].自动化与仪器仪表,2010年第3期,1001-9227(2010)03-0076-03.
- [3] 孙安斌,高廷,曹铁泽,等.标准核燃料组件几何轮廓校准装置的研制[J].计量学报,2024,45(4):496-502.

作者简介:

张礼开(1971--),男,汉族,重庆人,本科,高级工程师,从事核燃料质量控制及监督研究。