

文章编号：0258-0926(2017)03-0145-04；doi:10.13832/j.jnpe.2017.03.0145

# 基于全自动振动装管装置的核燃料棒芯块装管工艺及改进

王 伟，李明华

中核建中核燃料元件有限公司，四川宜宾，644000

**摘要：**确定了全自动振动装管的振动频率等参数。由于全自动振动装管工艺易造成包壳管定位差、包壳管管口磨痕等缺陷，影响燃料棒的外观质量，通过对全自动振动装管装置及辅助工装的改进，特别是针对包壳管管口磨痕等缺陷进行了一系列的工艺优化及改进，解决了装管过程中的燃料棒表面磨痕问题，提高了全自动振动装管装置的稳定性和可靠性。

**关键词：**振动；包壳管； $\text{UO}_2$  芯块；频率；磨痕

**中图分类号：**TL374<sup>+</sup>.5 **文献标志码：**A

## Loading Technique for Nuclear Fuel Rod of $\text{UO}_2$ Pellets and Its Improvement Based on Automatic Vibrating Loading Bench

Wang Wei, Li Minghua

CNNC Jianzhong Nuclear Fuel Co. Ltd., Yibin Sichuan, 644000

**Abstract:** Vibration frequency parameters are determined. Automatic process is easy to cause the positioning error of cladding tube, the grinding marks on cladding tube end, and thus affect the surface quality of fuel rods. Fuel rods grinding problem have be solved through the improvement of the automatic vibrating loading bench and auxiliary equipment, especially for the grinding defects on cladding tube end. This improvement also increases the stability and reliability of the automatic vibrating loading bench.

**Key words:** Vibration, Cladding tube,  $\text{UO}_2$  Pellets, Frequency, Grinding

### 0 前 言

将核燃料  $\text{UO}_2$  芯块按技术要求装入包壳管内是核燃料棒制造过程中的一个重要工序。世界上的核元件制造厂采用的燃料棒芯块装管方法主要有 4 种，即手工排长装管、倾斜式装管、水平振动式装管和转鼓预装式装管。经过核元件制造技术水平的快速发展，中核建中核燃料元件有限公司当前使用免预排全自动振动装管工艺。

通过分析试验装置振动频率对  $\text{UO}_2$  芯块、包壳管外观质量及燃料棒装管效率的影响等工艺，确定了全自动振动装管的工艺参数。同时，

对全自动振动装管装置及装管工艺中存在的问题进行优化及改进，解决振动装管过程中出现的大批量燃料棒磨痕严重的问题，提高了全自动振动装管装置的稳定性和可靠性，使燃料棒装管质量和装管效率得到了提高。

### 1 全自动振动装管装置工作原理

全自动振动装管装置设备主要由：振动梁、上料/卸料平台、17×17 对中模板（25 个模孔为一个整体）、中心模孔组、9 个支撑包壳管的滚筒、带下端塞包壳管间距调整定位、夹紧系统、带下

端塞包壳管送入/退出对中模孔系统、能连接到排风系统的粉尘收集防护罩、控制平台、操作平台、电器控制柜、振动电机等组成。

其工作原理是：气爪夹住包壳管并将包壳管拨到预对齐工位，夹取机构移动将包壳管推入定位块；操作者将装有  $UO_2$  芯块的 V 型盘转运到振动梁的固定位置，通过振动电机使振动梁按照设置的频率进行振动；芯块靠振动产生前进力，从而带动芯块自动进入包壳管。全自动振动装管装置取消了芯块预排长段，只需将芯块料盘置于芯块装载区即可启动设备，具有自动化程度高、人工劳动强度低、辐射剂量小等优点。

## 2 全自动振动装管装置工艺

要使全自动振动装管装置能正常使用，需要通过试验确定振动频率等重要参数。通过对不同振动频率参数下的芯块装填效率以及燃料棒表面和棒内芯块情况的比较，从而确定适宜的振动装管工艺参数。

### 2.1 试验方案

按表 1 给出的振动频率参数组合进行振动装管试验。前 5 组为一次装管满载测试，使用满载 25 支燃料棒进行振动装管。一次装管后倒管芯块若无破损，按原参数组合继续进行二次装管试验。一次装管后倒管如发现某参数组合下有芯块破损，二次装管可不用进行。

表 1 后 3 种为非满载测试（偏载测试），测试量为 5 支燃料棒，测试位置分别位于平台的左、中、右部，验证全自动振动装管装置振动平台在非满载即偏载时的稳定性。装管前检查包壳管表

表 1 振动装管试验参数

Table 1 Parameter of Vibration Bench Test

组合序号	装配批棒数/支	振动频率/HZ			备注
		启动	低速	高速	
1	25	20	18	26	—
2		30	20	32	—
3		35	25	37	—
4		38	28	40	—
5		40	30	44	—
6	5	—	—	—	棒位于平台左边
7		—	—	—	棒位于平台中间
8		—	—	—	棒位于平台右边

面质量和芯块外观质量；每组芯块（装配批）在装管前取 5 块检测芯块强度。每一装配批完成装填后，对比检查每支包壳管表面及管口质量。将燃料棒内芯块缓慢倒出，检查芯块外观质量，并取 5 块芯块检测芯块强度。

### 2.2 振动频率的影响

2.2.1 对装管效率及芯块外观质量的影响 不同频率组合下的装管效率及装管前后芯块外观对比结果见表 2。表 2 结果表明：

（1）低速振动频率过低时（低于 20 Hz）无法正常启动振动装管流程；装管正常启动后，装管效率随频率的增加而提高。

（2）使用振动频率（启动频率、低速频率、高速频率）参数组合 2、3、4 组进行一次装管，倒管后未发现芯块破损的情况；但是参数组合 4 中部分棒芯块上开始有粉末出现，说明芯块已开始出现一定程度的磨损。

（3）使用参数组合 2 与组合 3 进行二次振动装管，均未发现芯块破损；但是组合 4 已开始出现芯块破损的现象。

表 2 芯块外观质量对比结果

Table 2 Comparison of Quality of Pellet Surfaces

组合序号	装管前芯块外观	一次装管后破损情况	二次装管后破损情况	装管时间/min	备注
1	—	—	—	—	低速振动频率 18 Hz 过低，设备无法正常运行
2	合格	无破损	无破损	25	芯块外观合格
3	合格	无破损	无破损	15	芯块外观合格
4	合格	无破损，第 5 支棒与第 12 支棒，芯块面上有少量粉尘	第 1 块破损，第 7 支棒距上端第 45 块	14	一次装管倒管后，芯块出现少量粉尘。二次装管倒管后，芯块出现碎屑，并有破损
5	合格	无破损（粉尘加重）	—	10	一次装管倒管后，芯块出现较多粉尘，故不再进行二次装管
6	合格	无破损	无破损	15	—
7	合格	无破损	无破损		—
8	合格	无破损	无破损		接收器信号受干扰

(4) 参数组合 3 (35 Hz、25 Hz、37 Hz) 比组合 2 单组用时减少了近 10 min, 参数组合 3 的装管效率更高。

(5) 用参数组合 3 对振动装管装置进行振动偏载试验, 全自动振动装管装置振动平台动作平稳; 5 支燃料棒内芯块质量均没有明显影响; 当用燃料棒位于装管平台右侧进行振动装管时, 设备接收信号受到干扰, 只能人为给信号; 因此在实际生产中需要采用部分加装燃料棒装管时, 燃料棒位置不能位于平台右侧进行加载。

2.2.2 对芯块强度的影响 将不同频率组合下装管前后芯块强度变化进行对比, 结果显示: 经过二次装管的芯块, 装管前后芯块强度无明显的下降趋势。

2.2.3 对包壳管外观质量的影响 将不同组合振动频率下装管前后包壳管的外观质量对比情况汇总于表 3。由表 3 结果显示:

表 3 包壳管表面及管口质量对比  
Table 3 Comparison of Quality of Cladding Tube Surfaces and Ends

组合序号	装管前	一次装管后 破损情况	二次装管后 破损情况	备注
1	—	—	—	—
2	合格	较参数组合 3 磨痕加重	较参数 3 磨痕加重	合格
3	合格	不超差的轻微磨痕	不超差的轻微磨痕	合格
4	合格	与参数组合 3 相当	与参数 3 相当	合格
5	合格	与参数组合 3 相当	—	合格
6	合格	与参数组合 3 相当	与参数 3 相当	合格
7	合格	与参数组合 3 相当	与参数 3 相当	合格
8	合格	与参数组合 3 相当	与参数 3 相当	合格

(1) 在所有振动频率下, 均会对管口产生磨痕。磨痕的位置均位于管口与中心定位模孔直端的接触面上; 磨伤程度随频率的增加未出现明显的加重; 但当装管时间加长时磨痕出现了明显的加重。综合比较结果为参数组合 3 的管口磨伤最小。

(2) 与夹具的接触区域未发现明显的磨伤, 与固定轮接触区域有轻微的摩擦亮点。即该工艺除造成了管口磨伤外, 对包壳管的其余部分几乎没有影响。

(3) 部分加载与满载 (25 支) 相比, 振动装管对包壳管质量的影响没有明显变化。

振动频率对包壳管外观无明显影响。振动装管频率参数组合 3 能在兼顾效率的情况下, 保证

芯块质量。最终确定的全自动振动装管工艺参数如下: 振动装管启动频率为 35 Hz、低速频率为 25 Hz、高速频率为 37 Hz。

### 3 全自动振动装管装置工艺改进方案

全自动振动装管装置自动化程度相对较高, 减少了人为不确定因素。但在应用全自动振动装管新工艺时, 也存在着“包壳管定位不准、包壳管管口磨痕、包壳管表面划伤”等燃料棒表面质量的问题, 尤其是包壳管管口大量存在的磨痕等缺陷, 不仅影响到燃料棒产品外观质量, 也直接影响燃料棒芯块振动装管效率, 甚至影响到全自动振动装管新工艺。

针对全自动振动装管装置及新工艺的固有缺陷制定了如下改进措施:

#### 3.1 扩展轮端料架改进

扩展轮是将前期备好的 25 支包壳管均匀排列于装管装置预装平台的辅助装置。由于扩展轮料架 (前段) 属于单悬臂固定, 在设备振动过程中其悬空段 (前段) 稳定性较差, 容易晃动造成包壳管定位不准, 经常会出现因包壳管定位不准而无法顺利进入中心定位模孔的现象。

改进措施为: 将扩展轮的悬空段与燃料棒传输线料架连接起来作为一体, 增加设备扩展机构的稳定性, 改进后包壳管进入模孔的准确性大大增加。

#### 3.2 辅助支撑料架改进

燃料棒包壳管在空载时, 设备与传输线上原有的料架足以支撑, 但是完成芯块装填后, 由于包壳管上端一侧悬空较长, 因其自重下塌致使整支燃料棒不在同一平面内, 造成燃料棒装管区域退出时表面因剧烈碰撞产生划伤。

改进措施为: 在燃料棒上端悬空处, 增加一个支撑杆, 减小燃料棒在传输过程中的悬空长度, 使燃料棒平稳地流入下个工序, 减轻对燃料棒表面划伤及直线度的影响。

#### 3.3 排风罩改进

全自动振动装管装置装管区的上部粉尘收集防护罩后侧开口较大, 大量气流从该侧补入, 无法保证前侧排风风速要求, 影响到振动装管装置的稳定运行。

改进措施为: 增加挡风帘, 加装后排风效果有明显改善。

### 3.4 包壳管管口磨痕的优化改进

由于包壳管管口产生磨痕的燃料棒数量大（即使在规范操作后有磨痕的燃料棒比例仍达40%以上），严重影响到燃料棒的外观质量。包壳管表面磨痕优化改进措施如下：

（1）燃料棒夹持力优化：调整包壳管夹持膨胀气囊夹具压力，降低气囊夹具膨胀过程中的不规则膨胀变形，保证在装管过程中夹具对包壳管的有效夹持，使包壳管被夹持后的位置相对固定，从而降低夹持过程中对包壳管定位的影响。反复试验确认较优的燃料棒夹具夹持力参数为：下齿条压力为4.4 Pa，上压板压力为4.2 Pa。

（2）支撑轮与夹具对中性调整：使用优化后的夹持力将包壳管夹紧，逐一调整振动梁上的支撑轮，使其与夹具在同一中心线，以减少芯块装入后，燃料棒振动对夹具夹持区产生的扭力。

（3）包壳管与中心定位模孔对中性调整：对25个中心定位模孔装管后产生的磨痕情况进行记录，然后针对每个模孔产生磨痕位置方向，使用塞尺片对有磨痕的燃料棒所进入的模孔的上下左右间距进行调整，并根据多数同向伤的趋势调整模孔的位置，设计加工垫片对差别明显的模孔进行单独调整，逐一改善消除同轴度偏差。

（4）改进定位模孔尺寸：针对个别难于调整的位置，采取改进定位模块尺寸的方案。即：略微增大孔径（从9.56 mm增加到9.7 mm），通过适当地增大包壳管与模孔间隙，减小包壳管与模孔接触的可能性；个别难于消除的位置换上了新模块后，包壳管磨痕均得到了明显改善。为验证模孔尺寸增大对芯块质量带来的影响，对使用该模孔装管的2支燃料棒进行了倒管检查，未发现芯块有异常。

（5）中心模孔内表面打磨：观察到中心模板定位孔表面光洁度不够，采用800目金相砂纸打磨后，又用研磨膏仔细研磨，使模孔内表面的粗

糙度有了较大改善。

（6）加固V型槽紧固螺钉：装管装置自带定位中心组块的V型槽紧固螺钉材质较软，不耐磨，易变形，从而造成包壳管与设备产生相对移动，使已调整好的位置跑位。联系机加单位重新加工制作了经热处理及表面处理过的改进螺钉，新螺钉的强度及耐磨性均有较大改进，使中心组块定位模孔调整时间从不到2 d延长到1周以上。

（7）振动装管的工艺流程优化：包壳管的定位动作分为两步：尾部夹具松退回原位；中心组块处的上下夹具开始夹持空管。优化为：中心组块处夹具夹住空管；尾部夹具松开退回原位。这一改动使管口夹具压下时尾部夹具依然处于夹持状态，更好地保证了中心组块处的夹持效果。每批次芯块装管结束后，对模孔进行清洁，同时对装管后包壳管的表面状态进行自检，并记录每个模孔产生磨痕的情况，及时进行针对性调整。强化岗位人员的操作技能，提高装管效率，通过减少每批次振动装管的时间来改善磨痕情况。

## 4 结束语

本文介绍的设备调整和工艺改进方案，明显改善了燃料棒芯块振动装管的磨痕情况，大部分位置的磨痕均得到了有效消除。对于存在的少量磨痕也几乎无深度，磨痕的颜色、面积与支数进一步减少，仅为设备验收时的1/10。

自2014年11月起至2016年04月，中核建中核燃料元件有限公司已生产出合格燃料棒27.95万支，有磨痕的燃料棒比例从40%以上降低到10%以内，调整最好的时候曾有连续3~4批几乎没有一支出现磨痕，且燃料棒上的磨痕绝大多数都是非常浅的，使用清洁擦十分容易去除。

（责任编辑：王中强）