

文章编号: 1004-0609(2004)S1-0301-05

重水堆核电站用 CANDU-6 型燃料棒束的制造工艺^①

李冠兴, 马文军, 张 杰

(中国核工业集团公司二〇二厂, 包头 014035)

摘 要: 介绍了我国第一条重水堆核电站用 CANDU 6 燃料棒束生产线——包头核燃料元件厂的建设历程和运行状况, 描述了 CANDU-6 型燃料棒束的技术特征、制造工艺流程及主要工艺技术条件要求。

关键词: 重水堆; CANDU-6 型; 燃料棒束

Manufacturing process of CANDU-6 fuel Bundle for HWR nuclear power station

LI Guanying MA Wenjun ZHANG Jie

(State No. 202 Factory, Nuclear Company, Baotou 014035, China)

Abstract: The course of the localization and running condition of CANDU-6 fuel bundle production line for HWR Nuclear Power Station—Baotou Nuclear Fuel Plant (BNFP), is presented. The major characteristic of technology, manufacture process and technical specification of CANDU-6 Fuel bundle is described.

Key words: HWR; CANDU-6; fuel bundle

秦山三期核电站采用加拿大成熟的 CANDU-6 型重水堆核电技术, 总装机容量为 $2 \times 72.8 \times 10^7$ W, 设计年容量因子为 85%, 设计寿命 40 年。该工程于 1998 年 6 月 8 日正式开工, 2002 年 7 月 18 日开始首炉装料, 首炉装料由加拿大精密锆公司 (ZPI, 即 Zircatec Precision Industries Inc.) 提供, 12 月 31 日正式投入商业运行。

为了实现后续换料的国产化, 加快进度和更好地保证燃料元件质量, 满足秦山三期核电站换料节点要求, 1998 年 12 月 8 日经由中核原子能公司, 二零二厂与加拿大 ZPI 公司签定了 CANDU-6 型燃料棒束制造技术转让合同。包头核燃料元件厂燃料棒束制造从芯块制备工艺开始到棒束成品组装, 全套引进了加拿大 ZPI 公司包括质量文件在内的 CANDU-6 型燃料组件制造技术和组装部分关键、重要设备。部分技术人员在加拿大 ZPI 公司进行技术培训。整个技术转让过程历时 4 年。

2000 年 4 月开始土建施工、设备安装、调试、验收, 设备及工艺合格性鉴定, 生产线合格性鉴定

等阶段, 于 2002 年年底进入正式生产阶段。包头核燃料元件厂设计生产能力为 200 t/a(轴) CANDU-6 型核燃料棒束(约 10 400~10 600 个组件), 以满足秦山三期两座 72.8×10^7 W 商用核电站的年换料要求, 实现重水堆元件国产化目标。元件厂的设计寿期与秦山三期反应堆的设计寿期一样, 都是 40 年。

2002 年 11 月 17 日至 2002 年 12 月 3 日, 化工、芯块制备、棒束组装生产线批量产出合格产品 200 套, 全面通过用户(秦山三期)的生产线合格性鉴定, 2002 年 12 月 8 日获得加拿大 ZPI 公司颁发的 CANDU-6 燃料棒束生产许可证, 2003 年 1 月 7 日获得国家核安全局和国家环保总局民用核设施运行许可证。标志着 ZPI 公司技术转让过程全面完成、包头核燃料元件厂已经具备规模生产合格 CANDU-6 燃料元件的能力和水平。

1 CANDU-6 型燃料棒束

CANDU-6 型燃料棒束(见图 1)由 7 种部件组成: 高密度天然 UO_2 燃料芯块, 包壳管, 石墨涂层

① 作者简介: 李冠兴, 男, 中国工程院院士。

(涂于包壳管内壁), 端塞, 支承垫, 隔离块(厚、薄两种), 端板。每个燃料棒束有 37 根燃料单棒(元件), 用两个端板焊接在一起。37 根单棒由于所处的位置不同分为 5 种不同的组别, 见图 2。

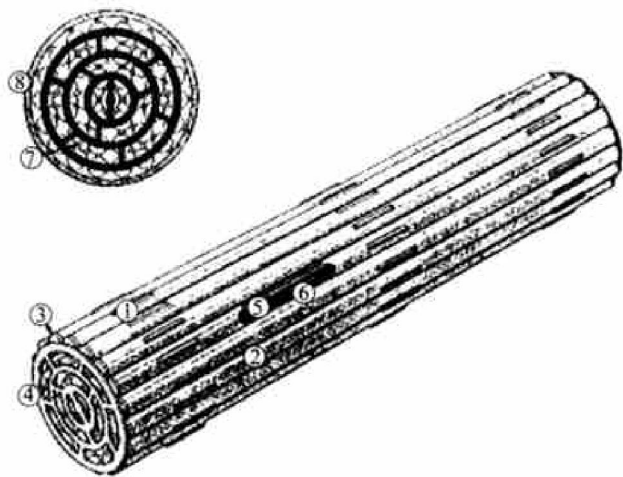


图 1 CANDU-6 型燃料棒束

1—支承垫; 2—包壳; 3—端塞;
4—端板; 5—二氧化铀芯块;

6—CANLUB(石墨)涂层; 7—隔离块; 8—压力管

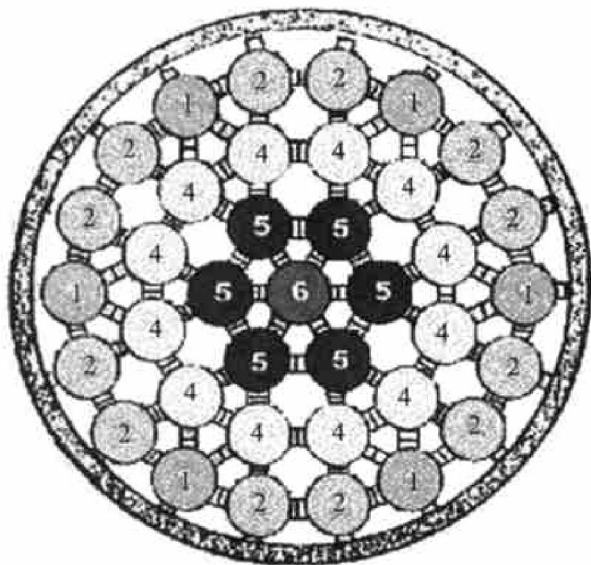


图 2 棒束的 5 种不同组别

1—第 1 组, 6 根; 2—第 2 组, 12 根; 4—第 4 组, 12 根;
5—第 5 组, 6 根; 6—第 6 组, 1 根

由于使用天然铀作燃料, CANDU-6 燃料组件的设计要求燃料组件中心含尽量多的裂变材料和尽量少的中子吸收材料。

燃料棒束的技术参数如下:

长度: (495.30 ± 0.76) mm; 直径: 102.5 mm;
棒束质量: 23.8 kg, 其中 U 含量 19.2 kg; 包壳材料: Zr-4 合金; 包壳管直径: (13.095 ± 0.025) mm;
包壳管壁厚: 0.4 mm; UO_2 芯块密度: (10.60 ± 0.15) g/cm³; UO_2 标准芯块高度: 16.50 ± 0.12

mm; UO_2 标准芯块直径: 12.207~12.235 mm;
 UO_2 芯块碟深: 最小 0.179 mm。

2 燃料棒束的制造工艺流程

燃料棒束的制造工艺主要包含 UO_2 芯块制备、燃料棒束组装等生产线, 其主要工艺流程见图 3。

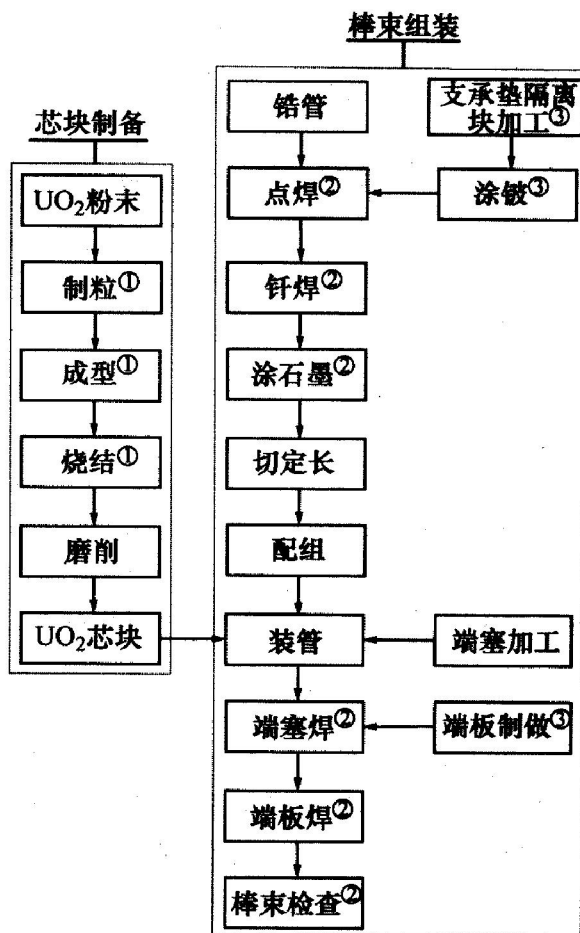


图 3 燃料棒束的制造工艺流程

1—进口设备; 2—ZPI 转让设备(整机);

3—ZPI 转让设备(部件/模具)。

3 UO_2 芯块的制备

UO_2 芯块的制备工艺由加拿大 ZPI 公司引进, 主要工艺有预压制粒、成型、烧结、磨削、排长装管等。大部分关键设备均为进口设备, 其中制粒机由德国引进, 成型压机由比利时引进, 烧结炉为美国制造。 UO_2 芯块制备是目前国际上较为先进的生产线。

3.1 预压制粒

为改善 UO_2 粉末流动性, 以适应自动压制的要求, 成型前的粉末要进行预压制粒。预压制粒的

过程如图 4 所示。 UO_2 粉末经料仓给料机构送到双对错式轧辊轧成条, 随后落到擦筛机破碎过筛, 整个过程在密闭的设备中进行, 通过设备的自动控制系统可方便地设置和调整轧辊间隙、速度和擦筛速度等参数。使得粉末密度、粒度、粒度分布以及制粒率都能较好地控制。预压制粒后的 UO_2 粉末应满足: 松装密度: $(2.28 \pm 0.18) \text{ g/cm}^3$; 颗粒尺寸: $< 1.5 \text{ mm}$ (18 目以上 $> 20\%$, 180 目以下 $< 20\%$)。

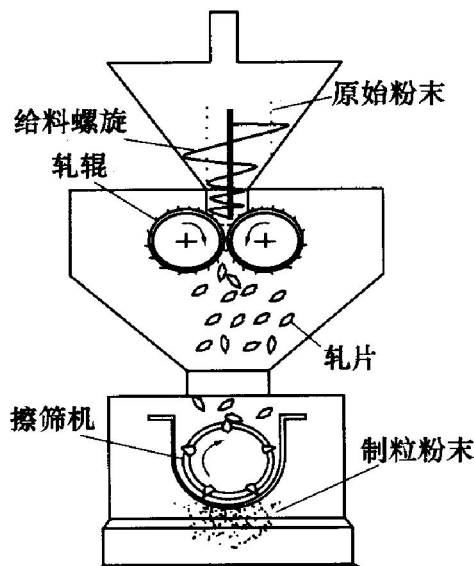


图 4 辊压制粒设备示意图

3.2 压制成型

CANDU-6 型燃料芯块尺寸较大, 为了达到高烧结密度, 要求加入的硬脂酸锌比例较小 ($0.25\% \sim 0.30\%$)。因此压制工艺相对困难, 对原始 UO_2 的可压缩性和可烧结性能要求都比较高。芯块的成型密度规定为 $5.0 \sim 5.4 \text{ g/cm}^3$ (压水堆 $5.5 \sim 6.5 \text{ g/cm}^3$) 而烧结密度要求不小于 $96.5\% \text{ TD}$ (压水堆一般为 $92\% \sim 95\% \text{ TD}$), 需达到 $(10.60 \pm 0.15) \text{ g/cm}^3$ 。芯块压制在比利时 R53UC 旋转压机上进行, 该压机共有 16 组上下冲头和模具, 压制速度为 $60 \sim 240$ 块/分, 现行工艺采用的压制速度为 $77 \sim 123$ 块/分。该压机上下冲头都有可调整的压力补偿装置, 使压制的芯块密度更加均匀。

3.3 烧结

UO_2 芯块的烧结采用连续推舟烧结方式, 烧结过程分为: 预热及可挥发组分消除、中温烧结、高温烧结和冷却阶段 4 个部分。芯块在钼舟板上卧式摆放 (见图 5) 层与层之间用钼波纹板隔开, 无料框档板。芯块轴向与烧结炉炉膛平行, 推舟方向与 H_2 流动方向相反。这样更有利于烧结气氛。烧结温度 $1650 \sim 1730 \text{ }^\circ\text{C}$, 烧结时间 $8 \sim 10 \text{ h}$ 。烧结后芯块晶

粒尺寸要求在 $(12 \pm 2) \mu\text{m}$ 范围, 开口孔率 $< 0.2\%$, 密度 $\geq 96.5\% \text{ TD}$, 为 $(10.60 \pm 0.15) \text{ g/cm}^3$ 。包头核燃料元件厂正式投产以来, 水浸密度平均值为 10.613 g/cm^3 。

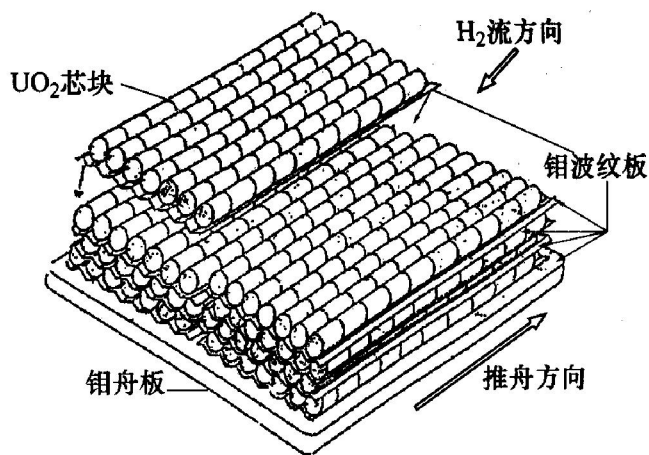


图 5 钼舟装料示意图

3.4 芯块磨削

CANDU-6 型燃料元件为坍塌式, 燃料元件在堆内运行时, 薄的包壳要向芯块方向塌陷。芯块和包壳管之间的间隙是精确设计和严格控制的, 不得大于 0.08 mm , 既需保证包壳塌陷时不形成明显轴向突起, 又需预留适当的间隙使燃料热膨胀引起的包壳保持在容许的水平内, 因此对 UO_2 芯块尺寸、表面粗糙等的要求都较压水燃料芯块严格, 芯块直径公差 $\pm 0.014 \text{ mm}$, 粗糙度 $< 0.8 \mu\text{m}$ 。为使燃料芯块达到上述要求, 烧结后的芯块要进行磨削加工, 生产线中采用高精度无心磨床, 复合粒度金刚石砂轮, 采用金刚石砂轮可以减少砂轮修整次数, 减少磨削液中磨料的进入。芯块磨削后还要经过淋洗烘干、排长等工艺, 然后装入 Zr-4 包壳管, 送组装车间。

2002 年 11 月, UO_2 芯块制备生产线顺利通过产品合格性鉴定, 正式投入生产运行。经过近 1 年的生产实践证明, UO_2 芯块制备生产线达到预期效果, 直收率为 89.87% , 总收率为 99.09% , 产能达到每年产铀 400 t , 完全满足燃料棒束生产需求。

4 燃料棒束组装

燃料棒束组装工艺及主要设备从加拿大 ZPI 公司引进。燃料棒束组装可划分为结构件加工, 次组件加工和棒束组装 3 部分, 主要工艺有附件及结构件制造、附件涂铍、点焊、钎焊、涂石墨及真空固化、清理切定长、端塞焊接、焊瘤去除、端板焊接

等。

4.1 附件及结构件制造工艺

端板加工: 采用厚度为 1.5~1.6 mm 的 Zr-4 的合金板条冲制。

端塞加工: 原料为 Zr-4 合金棒材, 由于端塞使用数量较大, 用 3 台小型数控床加工, 分为一序、二序加工。

支承垫加工: 支承垫线材经喷砂处理后, 铣削成形。

隔离块加工: 厚薄隔离块分别用矩形、圆形截面 Zr-4 合金线材冲制而成, 隔离块冲制后也要喷砂处理。

4.2 附件涂镀工艺

支承垫与隔离块点焊定位到铅管之前要经真空涂镀工艺处理, 涂镀采用真空加热蒸发金属铍, 使铍蒸汽附着在相对温度较低工件的特定表面上, 形成铍涂层, 铍层厚度 10~15 μm 。根据工艺要求, 支承垫铍涂在底面, 隔离块铍层涂在两侧面。涂镀设备示意图见图 6。

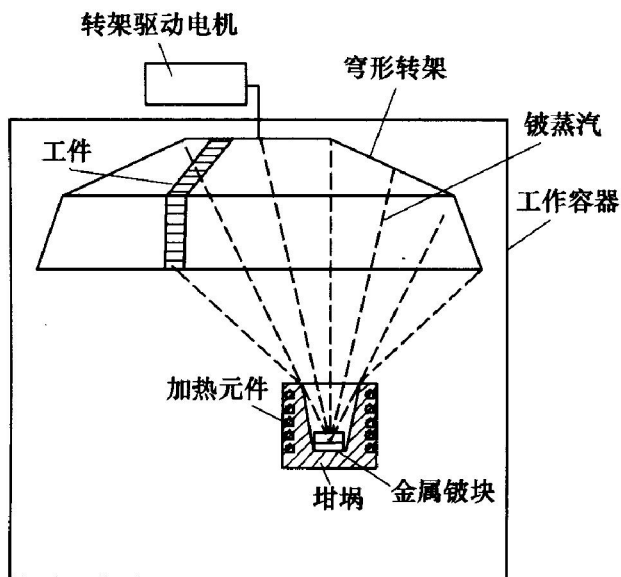


图 6 涂镀设备示意图

4.3 点焊

点焊又称定位点焊, 将支承垫和隔离块定位焊在包壳管规定位置, 采用压力电阻焊方式。点焊装置示意图见图 7。

4.4 钎焊

钎焊的作用是将涂有铍层并已点焊定位支承垫、隔离块焊接在包壳管上。该工艺采用真空感应加热钎焊的方法, 以防止焊接过程中包壳管氧化、

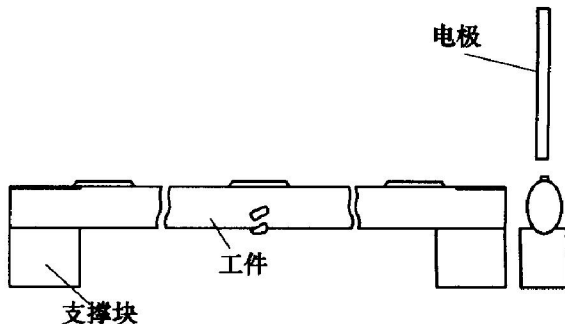


图 7 点焊装置示意图

氢化及氮化。钎焊中被焊金属包壳管与支承垫、隔离块均为 Zr-4 合金, 钎焊料为金属铍。焊接时, 先将包壳管置于真空罩内抽到预定真空度 (0.1 Pa), 通过真空罩外的感应线圈 (400 kHz) 罩内感受器交变磁场作用。包壳管产生感应电流而发热, 在一定温度下钎料与焊接面扩散结合。钎焊温度和时间都要严格控制以防止包壳管材料晶粒长大, 沿晶界形成泄漏通道导致元件在反应堆内破裂。钎焊装置示意图见图 8。

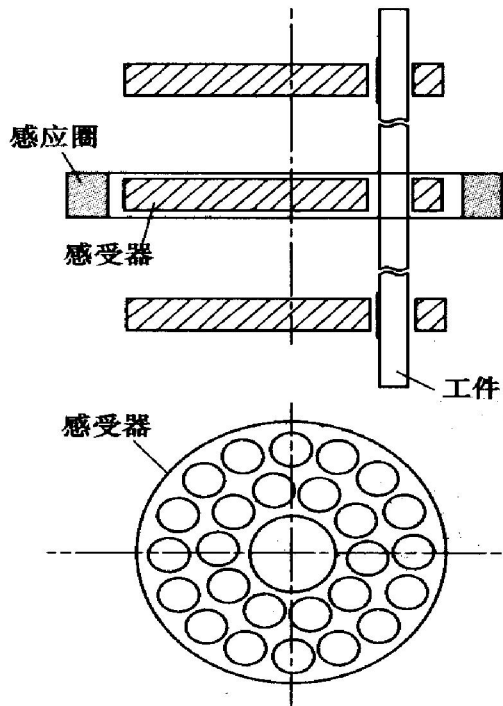


图 8 钎焊装置示意图

4.5 涂石墨

根据技术要求, CANDU-6 型燃料元件包壳管内壁需均匀涂敷一层石墨涂层, 以减小包壳与燃料芯块之间的反应, 以利于芯块装填。涂石墨工艺由涂石墨、涂层预烘干和涂层真空固化 3 部分组成。将包壳管竖直装在涂石墨设备转台架上 (见图 9), 浆体通过包壳管上方的石墨浆体喷嘴流向包壳管内壁, 然后从包壳管内壁上端下流至整个管内壁。然

后将内壁涂有石墨浆体的包壳管放入 140 °C 的烘箱内保温 1 h 进行预烘干处理, 去除未挥发完全的异丙醇等易燃易爆物质。再将已经预烘干的包壳管放入真空加热炉内, 抽真空至 1.1×10^{-1} Pa, 加热温度为 395~405 °C, 保温 1 h, 随炉冷却。

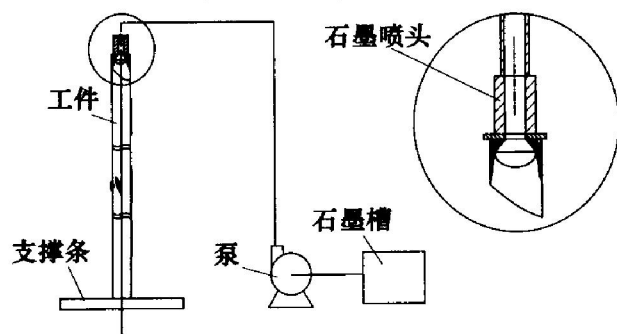


图 9 涂石墨设备示意图

4.6 清理切定长

清理切定长又称焊接准备。清理的目的是去除包壳管两端外表面距管端至少 9 mm 以内的氧化层, 以利于端塞焊接工艺过程中套爪电极与包壳管接合面之间良好的导电性; 切定长工艺的目的在于对包壳管取总长, 同时在包壳管端头开成 120° 的焊接坡口, 坡口高度为 (0.20 ± 0.12) mm, 为后续端塞焊接工艺做准备。

4.7 端塞焊接

端塞焊接是将装有芯块的包壳管两端通过压力电阻焊方法焊上端塞, 形成元件单棒(见图 10)。焊接前先充氦气, 包壳管的氦气量需达到 80%。端塞焊时也用氦气作保护气体, 防止焊缝氧化。为了保证焊接质量, 每次启动设备开始焊接前和工作一定时间后, 都要对焊接试样进行检测和评价, 合格后方可开始正式焊接。端塞焊完成后, 还要用专用设备去除焊接墩粗部分(焊瘤), 然后对焊缝进行涡流检测检查焊接质量。

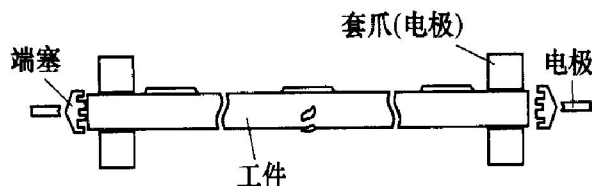


图 10 端塞焊示意图

4.8 端板焊接

端板焊接又称棒束组装焊接, 是将 37 根元件单棒与端板焊到一起, 形成最终棒束。端板焊是用一专用的定位-工装将元件棒分组按同心圆排列,

从外到内层数量分别为 18, 12, 6, 1 根。最后在端板焊机上逐点将 37 根元件棒与端板点焊在一起。端板焊是成品棒束的组装焊接, 其焊接质量直接决定成品棒束的质量。开始焊接前和间隔一定焊接件后需对焊接试样进行焊接性能检测, 此外, 还要定期抽取一定数量的成品棒束肢解端板进行检验以验证焊接质量。端板焊设备原理示意图见图 11。棒束组装焊接完成后, 整体棒束要经过氦质谱检漏, 各种尺寸、相对位置检查、称量、表面污染测量及水腐蚀试验等一系列成品检验。

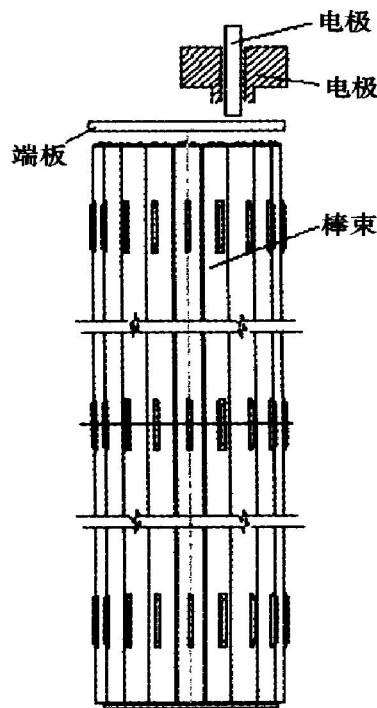


图 11 端板焊示意图

燃料棒束组装生产线通过大量的试验, 不断改进和完善设备, 探索得到最佳工艺参数, 最终顺利通过设备及工艺合格性鉴定。目前, 该生产线工艺稳定, 达到设计生产能力。

5 结语

在完成产品合格性鉴定, 获得加方及用户认可后, 包头核燃料元件厂于 2002 年年底开始, 进入正式生产阶段。2003 年 3 月 22 日包头核燃料元件厂生产的首批核燃料棒束发往秦山三期, 3 月 27 日国产燃料棒束入堆。截至 2003 年 10 月 10 日, 包头核燃料元件厂已生产棒束 7800 只, 发往秦山三期 5320 只, 已入堆 2642 只, 目前堆内运行状态良好。标志着秦山三期重水堆核电站燃料元件国产化已经实现。

(编辑 龙怀中)