

· 评价与防护 ·

# AP1000 核燃料元件生产线辐射危害特点及其关键控制点探讨

## Characteristics of radioaction hazard and discussion on its key control points in AP1000 nuclear fuel component production line

薛向明, 战景明, 杨雪, 张妍

(中国辐射防护研究院, 山西 太原 030006)

**摘要:** 通过现场职业卫生调查确定 AP1000 核燃料元件生产线各工序辐射源项、职业人员接触情况、采取的辐射防护设施及措施, 通过现场检测和个人剂量估算评估辐射防护措施的有效性, 得出辐射危害关键控制点。该生产线辐射源项为铀的不同化合物, 职业人员接触途径为内照射和外照射, 工作场所  $\gamma$  剂量率处于较低水平,  $\alpha$  表面污染、空气中铀气溶胶浓度均满足控制值要求, 主要岗位个人年有效剂量均低于个人剂量约束值要求, 该生产线采取的辐射防护设施及措施合理有效。干法  $UO_2$  粉末制备、制粒成型等 8 个工序为该生产线辐射危害关键控制点, 应加强化工部分的现场防护管理, 同时进一步优化组件制造部分岗位定员、工作制度及化工部分的密封措施及自动化设计。

**关键词:** AP1000 核燃料元件; 辐射; 防护

**中图分类号:** R146 **文献标识码:** B

**文章编号:** 1002-221X (2019)03-0224-03

**DOI:**10. 13631/j. cnki. zggyyx. 2019. 03. 024

由某核燃料元件有限公司承担的 AP1000 核燃料元件生产线已建设完成, 并投入生产运行。现通过职业卫生现场调查和检测, 分析该生产线生产过程中的辐射危害特点, 并提出辐射危害关键控制点, 为辐射防护决策和管理提供技术支持, 也为今后辐射防护优化设计提供一定参考。

### 1 对象与方法

#### 1.1 对象

AP1000 核燃料元件生产线主要工艺分为芯块制备和组件制造两部分, 芯块制备以  $UF_6$  为原料生产  $UO_2$  芯块, 在芯块生产车间内完成; 组件制造部分以  $UO_2$  芯块为原料, 生产 AP1000 核燃料元件, 在元件生产车间内完成。总工艺流程见图 1。



图 1 AP1000 核燃料元件总工艺流程

#### 1.2 方法

采用职业卫生现场调查、职业卫生检测、个人剂量估算等分析方法, 调查内容包括生产工艺及布局、生产过程中的物料及产品、辐射源项及职业人员接触情况、辐射防护设施及措施等; 检测生产线运行期间工作场所  $\gamma$  剂量率、 $\alpha$  表面污

染、空气中铀气溶胶浓度, 生产线表面污染、气溶胶浓度控制值见表 1、2。根据工作场所铀气溶胶浓度和  $\gamma$  剂量率检测结果, 结合岗位人员年接触时间, 对主要岗位工作人员个人年有效剂量进行估算, 评估岗位人员受照剂量。根据《铀加工及燃料制造设施辐射防护规定》(EJ 1056—2005), 该生产线工作人员个人剂量约束值为  $10\text{ mSv/年}^{[1]}$ 。

表 1 工作场所放射性表面污染控制水平 Bq/cm<sup>2</sup>

表面类型	$\alpha$ 表面污染控制水平	
	控制区	监督区
工作台、设备、墙壁、地面	4	0.4
工作服、手套、工作鞋	0.4	0.4
手、皮肤、内衣、工作袜	0.04	

表 2 工作场所导出空气浓度

放射性核素	类型	DAC (Bq/m <sup>3</sup> )
<sup>235</sup> U 富集度为 5% 的铀	F	6.55
	M	2.02
	S	0.62

注: F、M、S 分别表示肺快速、中速和慢速吸收

### 2 结果

#### 2.1 辐射源项及职业人员照射途径

主要岗位辐射源项及照射途径见表 3。

#### 2.2 辐射防护设施及措施

该工作场所采取的防护设施: (1) 厂房平面布置将非放射性工作区域、放射性工作区域及其不同污染水平区域之间采用实体隔离的方法分开。(2) 按放射性污染程度的不同进行分区集中布置, 以减少不同区域的相互污染。如燃料棒检查和组件组装主要为外照射危害, 将其与 IFBA 芯块制备、燃料棒制造区域分开。(3) 设有三道密封屏障, 即直接接触放射性物质的工艺设备、管道, 手套箱、通风柜及其排风净化系统, 建筑物。(4) 设置机械送、排风系统, 合理组织气流, 使厂房内的气流流向从低污染区到高污染区。采用密闭厂房, 监督区比厂房外低  $10\sim 20\text{ Pa}$ , 实现厂房外气流向厂房内流动; 监督区与控制区间有实体墙隔离, 控制区比监督区低  $10\sim 20\text{ Pa}$ , 实现监督区气流向控制区流动; 控制区内气溶胶浓度比较高的岗位, 采取密闭措施, 并加强局排。(5) 辐射工作场所分为控制区和监督区。(6) 设有人流、物流专用出入口, 防止交叉污染。(7) 设置固定空气取样系统, 配备气溶胶连续检测仪、移动空气取样器、 $\gamma$  剂量率仪和  $\alpha$ 、 $\beta$  表面沾污测量仪等辐射监测设备, 定期对场所剂量率、表面污染水平及气溶胶浓度进行监测。

收稿日期: 2018-05-08; 修回日期: 2018-08-26

作者简介: 薛向明 (1986—), 男, 硕士, 助理研究员, 从事放射卫生学工作。

表 3 辐射源项及照射途径

岗位	工序	辐射源项	工作地点	工作内容	照射途径	
					外照射	内照射
干法 UO <sub>2</sub> 粉末制备	气化	UF <sub>6</sub>	气化间	30B 容器装载、卸出、冷阱补集、巡检		UF <sub>6</sub> 气体输送管道阀门、法兰密封性不严, 气化罐外微量 UF <sub>6</sub> 泄漏, 与水迅速反应生成 UO <sub>2</sub> F <sub>2</sub> 气溶胶
	转化	UF <sub>6</sub> 、UO <sub>2</sub> 粉末	转炉间	巡检	物料产生的 γ 射线外照射	转炉密封性不严致物料或反应尾气逸散, 形成放射性气溶胶
	稳定化	UO <sub>2</sub> 粉末	料斗间	取样、巡检		料斗密封性不严, 粉末状物料落料逸散, 形成放射性气溶胶
	均匀化	UO <sub>2</sub> 粉末	料斗间、均匀化间	检查料斗放料、巡检、物料分装		料斗放料、真空抽料、物料粉碎、混合及分装过程, 管道连接处或阀门等密封不严, 形成放射性气溶胶
制粒成型	混料	UO <sub>2</sub> 粉末、U <sub>3</sub> O <sub>8</sub> 粉末	混料间	料桶转运; UO <sub>2</sub> 粉末、U <sub>3</sub> O <sub>8</sub> 粉末吸料; 单锥混料		工作箱密封不严, 吸料过程放射性气溶胶逸散
	制粒	UO <sub>2</sub> 、U <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	制粒间	料桶转运; 轧片制粒; 料桶接料	物料产生的 γ 射线外照射	工作箱密封不严, 制粒机运行、双锥料桶接料的放射性气溶胶逸散
	混合球化	UO <sub>2</sub> 微粒	制粒间	料桶转运; 双锥料桶混料		当双锥料桶密闭性不严, 混合球化的放射性气溶胶逸散
	压制成型	UO <sub>2</sub> 微粒、UO <sub>2</sub> 芯块	制粒间、成型间	料桶转运; 双锥料桶放料、芯块压制; 卸舟转运		工作箱密封性不严, 放料、压制成型期间放射性气溶胶逸散
烧结	烧结	UO <sub>2</sub> 芯块	烧结间	烧结炉进料、出料、巡检	芯块外照射	烧结尾气中含有微量铀气溶胶逸散
磨削	磨削、淋洗烘干、直径检测、外检	UO <sub>2</sub> 芯块	磨削间	磨床、淋洗烘干装置、直径检测装置运行, 人工芯块外观检查	芯块外照射	芯块磨削过程中产生放射性气溶胶, 无心磨床密闭罩密封性不严时气溶胶逸散
芯块涂覆	芯块装夹 芯块涂覆	芯块	装夹间 涂覆区	芯块装夹 芯块装炉、卸炉	芯块外照射	常规芯块表面脱落尘悬浮形成放射性气溶胶, 芯块在过液槽内受挤压导致表面破碎形成微量含铀微尘
常规棒制造	芯块排长、装管 擦拭、压塞、焊接	芯块	排长工作台 常规燃料棒区	芯块排长、装管 管口擦拭、上端塞压塞、焊接	芯块外照射	常规芯块表面脱落尘悬浮形成放射性气溶胶
IFBA 棒制造	芯块排长、装管 擦拭、压塞、焊接	芯块	IFBA 制造、 密封区	芯块排长、装管 管口擦拭、上端塞压塞、焊接	芯块外照射	
燃料棒检验	称重、氦检漏	芯块	燃料棒	燃料棒称重、氦质谱检漏	芯块外照射	
	间隙度检查	芯块、 <sup>137</sup> Cs 源	检查区	燃料棒芯块间隙度检查	芯块、源外照射	
	富集度检查	芯块、 <sup>252</sup> Cf 源		燃料棒芯块富集度检查	芯块、源外照射	
	外观尺寸检查	芯块		燃料棒外观尺寸检查	芯块外照射	
燃料组件制造	预装盒、拉棒、 检查、清洗	芯块	组建装区	预装盒、拉棒、检查、清洗	芯块外照射	

2.3 辐射检测结果

2.3.1 γ 剂量率检测 工作场所 γ 剂量率 3.47~72.10 μSv/h, 处于较低水平, 最高点为气化大厅单个空容器表面 5 cm。

2.3.2 表面污染检测 工作场所 α 表面污染监测结果均满足控制值要求, 最高值为 3.37 Bq/cm<sup>2</sup>。

2.3.3 铀气溶胶检测 主要岗位空气中铀气溶胶浓度均符合控制标准的要求, 最高值为 25.84 μg/m<sup>3</sup>。

2.4 辐射危害特点

该生产线辐射源项为原料 UF<sub>6</sub> (<sup>235</sup>U 富集度 <5%), 中间产物 UO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>、UO<sub>3</sub>、UO<sub>2</sub> 粉末以及燃料棒内的 UO<sub>2</sub> 芯块, 涉及的放射性核素铀及其衰变子体可产生一定剂量的 β、γ 辐射, 会对职业人员造成外照射危害。铀及其化合物经呼吸道等途径进入人体, 造成内照射危害和一定的化学毒性危害。芯块制备部分操作非密封源, 物料状态多为粉末状, 生产过程中极易形成放射性气溶胶, 逸散至工作场所造成内照射危害。组件制造部分由于芯块表面存在极少量松散尘, 在芯块外检、装夹、装管作业时, 悬浮为铀气溶胶, 造成内照射危害, 且该部分工序人员会较长时间直接接触芯块, 受到较强的外照

射危害; 芯块装入包壳管内形成密封源, 存在外照射危害。

根据工作场所铀气溶胶浓度和 γ 剂量率检测结果, 结合岗位人员年接触时间, 对主要岗位工作人员个人年有效剂量进行了估算, 见表 4。

表 4 工作人员个人年有效剂量估算 mSv/年

岗位	外照射(E <sub>外</sub> )	内照射(E <sub>内</sub> )	年有效剂量(E)
干法 UO <sub>2</sub> 粉末制备	1.75	0.41	2.16
制粒成型	1.22	0.18	1.40
烧结	0.11	0.05	0.16
磨削	1.15	5.10	6.25
氧化	0.39	0.25	0.64
常规燃料棒制造组	2.76	0.03	2.79
IFBA 燃料棒制造组	3.24	0.16	3.40
芯块涂覆组	7.20	—	7.20
组装组件	6.27	—	6.27
燃料棒检验	5.12	—	5.12

结果显示, 该生产线主要岗位工作人员个人年有效剂量均低于 EJ 1056—2005 中“5.2.4.1 铀作业人员的年有效剂量控制值为 10 mSv”的规定。综上, 该生产线采取的辐射防护

设施及措施合理有效。

## 2.5 辐射危害关键控制点

根据生产线辐射危害特点、工作场所辐射检测结果、个

人剂量估算结果,经综合分析,得出该生产线辐射危害关键控制点。见表5。

表5 辐射危害关键控制点

关键控制岗位	关键控制工序	原因
干法 UO <sub>2</sub> 粉末制备	气化	30B 容器表面外照射剂量率较高,在容器拆装、转运期间近距离接触,受到较强的外照射危害;存在 UF <sub>6</sub> 气体泄漏风险
	转化	气溶胶浓度较高,造成较强的内照射危害;存在转炉氢气爆炸导致放射性物料大量逸散的风险
	均匀化	UO <sub>2</sub> 粉末料桶表面剂量率较高,近距离接触料桶,造成较强的外照射危害;均匀化出料期间,设备间铀气溶胶浓度较高,造成较强的内照射危害
制粒成型	吸料	UO <sub>2</sub> 粉末料桶、U <sub>3</sub> O <sub>8</sub> 粉末料桶表面剂量率较高,近距离接触料桶,造成较强的外照射危害;吸料作业时,工作场所气溶胶浓度较高,造成较强的内照射危害
	双锥接料	双锥料桶表面剂量率较高,近距离接触料桶,造成较强的外照射危害;接料作业时,工作场所气溶胶浓度较高,造成较强的内照射危害
	双锥放料	双锥料桶表面剂量率较高,近距离接触料桶,造成较强的外照射危害;放料作业时,工作场所气溶胶浓度较高,造成较强的内照射危害;放料期间,双锥料桶与接料工作箱接口连接脱开,造成物料粉末洒落
磨削	无心磨削	无心磨床运行时气溶胶浓度较高,造成较强的内照射危害
	芯块人工外检	手部长时间直接接触芯块,手部、眼晶体造成较强的 β 外照射危害
芯块涂覆	芯块装夹、涂覆	芯块装夹作业时,操作位剂量率较高,满负荷生产后接触时间较长,造成较强的外照射危害;涂覆装炉、卸炉作业期间,芯块量较大,剂量率较高,满负荷生产后,操作量较大,接触时间较长,造成较强的外照射危害;芯块装夹工序会产生铀气溶胶,造成内照射危害
常规棒制造	芯块排长、装管、上端塞焊接	需近距离接触芯块或燃料棒,剂量率较高,达到满负荷生产后,操作时间较长,受到较强的外照射危害;芯块排长、装管作业期间,芯块表面脱落尘悬浮于空气中可形成放射性气溶胶,造成内照射危害
IFBA 燃料棒制造	芯块排长、装管、上端塞焊接	需近距离接触芯块,场所剂量率较高,达到满负荷生产后,操作时间较长,造成较强的外照射危害
组装组件	预装盒、拉棒、组件检查、清洗、存放和组件装箱运输	需近距离接触燃料棒和组件,剂量率较高,达到满负荷生产后,操作时间较长,造成较强的外照射危害
燃料棒检验	间隙度检查、富集度检查、燃料棒外观检测	富集度、间隙度检查,燃料棒外观检查工作场所剂量率较高,达到满负荷生产后,操作时间较长,造成较强的外照射危害

## 3 讨论

该生产线化工部分物料为粉末状,物料在吸料、落料等过程中极易形成放射性气溶胶,因此,对设备及管道密封提出了较高要求。在今后的运行过程中,应加强现场防护管理,加强设备、管道密封性的定期检查,防止物料逸出,加强场所气溶胶浓度监测,使浓度在控制值以内;在今后设计中,应进一步提高吸料作业自动化操作水平,加强吸料、落料环节的密封设计,降低工作场所气溶胶浓度。

组件制造部分涂覆工序,芯块排长、装管、上端塞焊接工序,燃料棒预装盒、拉棒、组件检查、清洗、存放和组件装箱运输工序,燃料棒间隙度检查、富集度检查、燃料棒外观检测工序,均在达到满负荷生产时操作芯块量较大,工作场所剂量率较高,工作人员接触时间较长,造成较强的外照

射危害。因此,在达到满负荷生产后,应进一步优化岗位定员及工作制度,避免工作人员长时间操作,造成个人剂量超过管理目标值。

该生产线正常工况下工作人员受照剂量较低,但在检修或事故情况下,可能在短时间内受到大剂量的内、外照射危害<sup>[2]</sup>,应从检修现场防护管理、辐射监测、个体防护等方面,加强检修期间的辐射防护措施,降低辐射危害。

### 参考文献:

- [1] 姜霞,杨雪,王秀琴.某地浸采铀矿山放射性职业病危害控制效果评价[J].中国工业医学杂志,2015,28(1):61-62.
- [2] 马跃峰,薛向明,武晓燕.某核燃料元件生产线职业病危害控制效果评价[J].中国工业医学杂志,2016,29(2):149-151.