

# 高温气冷堆核燃料元件生产线辐射危害关键控制点探讨

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:** **目的** 分析高温气冷堆 (HTGCR) 核燃料元件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, 为企业的辐射防护决策和管理提供技术支持。**方法** 通过职业卫生调查确定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, 并得出辐射危害关键控制点。**结果** 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 ( $0.11 \sim 6.26 \mu\text{Sv/h}$ ),  $\alpha$  表面污染 (最高  $0.02 \text{ Bq/cm}^2$ )、空气中铀气溶胶浓度 ( $0.009 \sim 0.810 \mu\text{g/m}^3$ ) 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, 采取的辐射防护设施及措施合理有效。**结论** 化工转化、核芯制备等工序为该生产线辐射危害关键控制点, 焙烧、还原、烧结工序应合理设置局部排风装置; 在生产线达到设计指标运行后, 需进一步评估辐射防护措施的有效性。

**关键词:** 高温气冷堆 (HTGCR); 核燃料元件; 辐射危害; 辐射防护

中图分类号: R145 文献标识码: A 文章编号: 1002-221X(2018)05-0360-04 DOI: 10.13631/j.cnki.zgggyx.2018.05.018

## Radiation hazards and its key control points in nuclear fuel element production line of HTGCR

XUE Xiang-ming, ZHAN Jing-ming, YANG Xue, ZHANG Yan

(China Institute for Radiation Protection, Taiyuan 030006, China)

**Abstract:** **Objective** To study the radioactive hazards characteristics of high temperature gas cooled reactor (HTGCR) nuclear fuel element production line, find the key control points of radioactive hazards, thereby provide some technical supports for decision and management of radiation protection in this kind of enterprises. **Methods** The radiation source term, workers' occupational exposure situation, facilities and measures for radiation protection in production line were cleared by occupational health investigation; the effectiveness of radiation protection measures was evaluated through on-site testing and personal dose estimation, thus the key control points of radiation hazards were obtained. **Results** The results showed that the radiative source items were different kinds of uranium compounds, the occupational personnel contact ways include internal radiation and external radiation; the  $\gamma$  dose rate was at a low level ( $0.11 \sim 6.26 \mu\text{Sv/h}$ ) in workplace, meanwhile,  $\alpha$  surface contamination ( $0.02 \text{ Bq/cm}^2$  at most) and uranium aerosol concentration in air ( $0.009 \sim 0.810 \mu\text{g/m}^3$ ) both satisfied the control value requirements. Additionally, the individual annual effective doses in key posts were all lower than that of the constraint value, which suggested that the facilities and measures for radiation protection of production line were reasonable and effective. **Conclusion** The results suggested that the chemical conversion process, core preparation process, etc. were the key control points for radioactive hazards of the production line, meanwhile, the setting of local exhaust devices at roasting reduction and sintering process should be more reasonable, and the effectiveness of radiation protection measures should be further evaluated after operation of the production line reached the design targets.

**Key words:** high temperature gas cooled reactor (HTGCR); nuclear fuel element; radiation hazards; radiation protection

高温气冷堆 (high temperature gas cooled reactor, HTGCR) 是一种先进核能系统。我国与 HTGCR 核电站配套的 HTGCR 核燃料元件生产线于 2007 年在某核燃料元件有限公司开工建设, 目前已建设完成, 并投入生产运行。本文以 HTGCR 核燃料元件生产线为对象, 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, 为企业对该生产线的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

HTGCR 核燃料元件生产线主工艺可分为化工转化、核芯制备、包覆颗粒制备、球形燃料元件制造四部分。见图 1。

### 1.2 方法

**1.2.1 职业卫生现场调查** 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。

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, 主要从事放射卫生学工作。

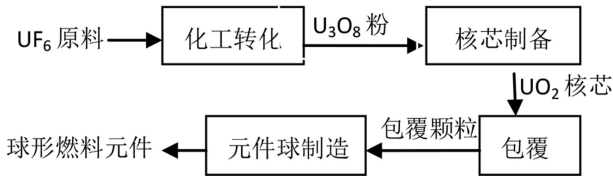


图1 HTGCR核燃料元件总工艺流程

1.2.2 职业卫生检测 检测生产线运行期间工作场所γ剂量率、α表面污染、空气中铀气溶胶浓度，以评估辐射防护设施的有效性。见表1、2。

表1 工作场所的放射性表面污染控制水平

表面类型	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		0.4

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 富集为 8.5% 的铀	F	1.31E+01
	M	4.03E+00
	S	1.24E+00

注：F、M、S 分别表示肺快速、中速和慢速吸收。

1.2.3 个人剂量估算 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估算，以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)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，该生产线工作人员个人剂量约束值为 10 mSv/年<sup>[1]</sup>。

## 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职业人员照射途径见表3。

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
湿法	气水解	原料 UF <sub>6</sub> 、水解反应得到的 UO <sub>2</sub> F <sub>2</sub> 水溶液	气化间	接通软管, 工艺参数控制, 巡检	物料产生的 β、γ 外照射	UF <sub>6</sub> 容器泄漏释放至工作场所, 与工作场所空气中水反应生成 UO <sub>2</sub> F <sub>2</sub> 气溶胶
	沉淀过滤	UO <sub>2</sub> F <sub>2</sub> 水溶液、沉淀反应得到的中间产品 ADU	化工转化间	工艺参数控制, 巡检		液状物料发生跑冒滴漏, 在空气中形成放射性气溶胶
	干燥煅烧	中间产品 ADU、产品 U <sub>3</sub> O <sub>8</sub> 粉末及干燥煅烧产生放射性尾气		出料操作, 工艺参数控制, 巡检		干燥机、破碎机、回转电炉、管链、出料工作箱等出现密封不严时, 粉末状物料逸散至工作场所形成气溶胶
	溶解	U <sub>3</sub> O <sub>8</sub> 粉末、硝酸铀酰水溶液	核芯制备间	称重、向溶解槽投料, 工艺参数控制, 巡检	物料产生的 β、γ 外照射	U <sub>3</sub> O <sub>8</sub> 粉末加料会产生微量的放射性粉尘, 管道跑冒滴漏对作业场所造成污染, 均对工作人员造成内照射危害
	溶胶分散	硝酸铀酰、溶胶液、多铀酸铵凝胶球		煮胶, 增稠剂的熬制, 工艺参数控制, 巡检		当含铀物料发生跑冒滴漏, 对作业场所造成污染, 进而会对工作人员造成内照射危害
	陈化、洗涤、干燥	多铀酸铵凝胶球		投料, 按产品容器出料, 工艺参数控制, 巡检		当设备密封性不良, 干燥过程会向场所释放微量放射性气溶胶
干法	焙烧、还原、烧结	ADU 凝胶球、UO <sub>3</sub> 微球、产品 UO <sub>2</sub> 微球及尾气	焙烧还原烧结间	布料器上料、下料操作, 焙烧炉、还原炉上料、下料操作	物料产生的 β、γ 外照射	微球表面附着的少量松散污染在布料过程中会形成极少量的放射性气溶胶
	包覆	UO <sub>2</sub> 燃料核芯、包覆过程产生的放射性尾气	包覆间	向包覆炉加料, 工艺参数控制	物料产生的 β、γ 外照射	包覆过程产生的尾气逸散至工作场所会对工作人员造成内照射危害
穿衣	穿衣	UO <sub>2</sub> 包覆颗粒	穿衣间	穿衣, 穿衣颗粒的筛分、优选	包覆颗粒外照射	
元件成型	压制、车屑、X 光检查	UO <sub>2</sub> 包覆颗粒和 X 光检查装置开机运行产生的 X 射线	球形燃料元件制备车间	车床操作, X 光检查装置操作	包覆颗粒、X 射线外照射	

## 2.2 辐射防护设施及措施

2.2.1 厂房布局 将非辐射工作场所、辐射工作场所及其不同污染水平区域之间采用实体隔离的方法分开布置。

2.2.2 工艺设备布置 按工艺流程的顺序及相互关

系, 保证工艺流程的水平方向及垂直方向的连续性, 进行工艺设备布置。放射性污染较严重的设备尽量布置在排风侧, 有利于合理组织气流, 实现上送下排, 从低污染区流向高污染区的送、排风原则。初级包容不完备的工艺设备置于安全装置内, 如手套箱、通风

柜或排风罩。按工序放射性污染程度的不同,分区集中布置,以减少不同放射性区域的相互污染,有利于放射性生产的组织管理。为了操作及管理的方便,厂房内设置了集中控制室,设置了分布式控制(DCS)系统及就地编程智能终端。

**2.2.3 密封措施** 设有三道密封屏障,第一级为直接接触放射性物质的工艺设备、管道,第二级为手套箱、通风柜及其排风净化系统,第三级为建筑物。

**2.2.4 通风与净化** 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→高污染区。采用密闭厂房,监督区比厂房外低10~20 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10~20 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。

**2.2.5 辐射工作场所分区** 将辐射工作场所分为控制区和监督区。

**2.2.6 人、物流出入控制** 燃料元件生产车间为全封闭厂房,设有人流、物流专用出入口,防止交叉污染。

**2.2.7 辐射监测** 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、 $\gamma$ 剂量率仪及 $\alpha$ 、 $\beta$ 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。

## 2.3 辐射检测结果

**2.3.1  $\gamma$ 剂量率检测** 工作场所 $\gamma$ 剂量率0.11~6.26  $\mu\text{Sv/h}$ ,处于较低水平,最高点为化工转化车间 $\text{U}_3\text{O}_8$ 粉末料桶表面。

**2.3.2 表面污染检测** 工作场所 $\alpha$ 表面污染监测结果最高为0.02  $\text{Bq/cm}^2$ ,满足控制值要求。

**2.3.3 铀气溶胶检测** 主要岗位空气中铀气溶胶浓度0.009~0.810  $\mu\text{g/m}^3$ ,满足控制值(F类:28.0  $\mu\text{g/m}^3$ ,M类:8.6  $\mu\text{g/m}^3$ ,S类:2.6  $\mu\text{g/m}^3$ )的要求。

## 2.4 辐射危害特点

该生产线为非密封源工作场所,涉及的放射性物质主要是铀化合物,工作人员受照途径包括外照射和内照射。正常运行时,生产线采用密闭的生产设施、负压通风的作业条件,放射性物料和气溶胶释放到作业场所很少,引起的内照射危害较小。但在密闭设施、负压、通风设施出现故障时,放射性气溶胶会释放到作业场所,表面污染物经皮肤、消化道进入人体内亦会造成内照射危害。铀辐射特性以 $\alpha$ 射线为主,伴有少量的 $\beta$ 、 $\gamma$ 辐射,人员近距离及直接接触放射

性物料时 $\beta$ 、 $\gamma$ 外照射较强,在放射性物料量较大的生产设备附近和贮存场所内 $\gamma$ 外照射较强。检修作业时,由于放射性物料沾污设备、工具和地面,以及工作人员的活动和操作使沉降的放射性粒子再悬浮于空气中,导致工作场所空气污染,检修人员因吸入铀污染的空气而引起内照射。检修过程中操作人员直接操作或近距离操作,放射性物质直接接触到皮肤,容易造成表面沾污,受到 $\beta$ 射线的照射。

该生产线化工转化部分采用湿法工艺,正常运行过程中,物料密闭在容器或管道内,主要造成外照射危害。当操作过程中设备或管道密封性不严导致液状物料发生跑冒滴漏时,会在空气中形成放射性气溶胶,人员吸入或沾污后造成内照射危害。核芯制备工序包括湿法工艺和干法工艺。湿法工艺放射性物料始终密闭在设备及管道内,工作人员不直接接触,正常情况下对工作人员主要造成外照射危害;干法工艺主要包括焙烧、还原、烧结、筛分、优选等工序,除受到物料产生的外照射危害外,微球表面附着的少量松散污染在布料过程中形成的放射性气溶胶,对工作人员造成内照射危害。包覆颗粒制备部分工作人员主要受到外照射危害,包覆颗粒表面附着的松散污染形成放射性气溶胶,清洗、筛分、振动筛选、混合均匀化在各自工作箱内完成,箱内维持一定负压,降低工作人员受到的内照射危害。球形燃料元件制造主要包括穿衣、元件压制、车削、炭化、纯化、X光检查等工序,各工序并未对 $\text{UO}_2$ 包覆颗粒进行化学或物理改变,主要为 $\text{UO}_2$ 包覆颗粒产生的外照射危害。

根据工作场所气溶胶浓度和 $\gamma$ 剂量率监测结果,结合各岗位实际年接触时间,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  $\text{mSv/年}$

岗位	外照射	内照射	年有效剂量(E)
湿法	0.85	$1.38 \times 10^{-2}$	0.86
干法	0.42	$1.53 \times 10^{-2}$	0.44
包覆组	1.98	$5.98 \times 10^{-2}$	2.04
穿衣组	0.25	—	0.25
元件成型	0.23	—	0.23

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剂量约束值(10  $\text{mSv/年}$ )。工作场所 $\gamma$ 剂量率处于较低水平, $\alpha$ 表面污染、铀气溶胶浓度均满足控制值要求。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,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/工序	原因	重点防护措施
化工转化	湿法作业,物料在密闭设备及管道内反应和输送,溶液跑冒滴漏会对场所造成污染,造成内照射危害	设备密封、局部排风系统
核芯制备湿法岗位	物料在密闭设备及管道内反应和输送,溶液跑冒滴漏会对场所造成污染,造成内照射危害	设备密封、局部排风系统
核芯制备干法岗位	无心磨床运行时气溶胶浓度较高,造成较强的内照射危害	设备密封、局部排风系统
芯块涂覆	微球表面附着的少量松散污染在布料、焙烧、筛分、振选等过程中会形成放射性气溶胶,造成内照射危害 筛分、振选、混批、产品出料均在密闭工作箱内完成,箱内设置局部排风系统,维持一定负压。焙烧、还原过程布料机上方未设置局部排风系统,布料过程放射性气溶胶浓度相对较高	局部排风系统,提高布料、给料过程的自动化水平,布料机上方设置局部排风系统
仪修岗位	生产线设备检修过程中需对设备进行拆卸、更换零部件,吸入铀气溶胶造成内照射危害	减少操作扰动引起的气溶胶释放

## 3 讨论

焙烧、还原、烧结岗位,微球表面附着的松散污染在布料过程中会形成放射性气溶胶,该岗位工作人员劳动强度大,近距离接触时间较长,建议对该工段进行自动化改造,合理设置局部排风措施,避免或减小放射性气溶胶对工作人员造成的内照射危害。

该生产线正常工况下工作人员受照剂量较低,但在对污染设备进行检修时,常需对设备进行拆卸、更换零部件,将伴有放射性气溶胶的释放。因此,应加强检修过程中的辐射防护措施,严格按程序操作,减少操作扰动引起的气溶胶释放,将辐射危害降到最低<sup>[2]</sup>。

本文检测数据为该生产线调试阶段的检测结果,鉴于该生产线达设计指标阶段运行后,辐射源项强度将发生变化,届时应制定详细的辐射监测方案,并根据监测结果,评估辐射防护措施的有效性,针对问题及时整改,确保工作场所职业病危害因素监测结果控制在职业接触限值以内,为工作人员健康保护提供保障。

### 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.

(上接第359页)

提示并建议企业建立一个更合理的换岗制度,保障企业员工的健康。倒班作业对人体健康的危害尚需进一步研究。

### 参考文献:

- [1] Song QB, Zhao Y, Liu YQ, et al. Sex difference in the prevalence of metabolic syndrome and cardiovascular-related risk factors in urban adults from 33 communities of China: The CHPSNE study [J]. Diab Vasc Dis Res, 2015, 12 (3): 189-191.
- [2] Li R, Li WC, Lun ZJ. Prevalence of metabolic syndrome in mainland china: a meta-analysis of published studies [J]. BMC Public Health, 2016, 16 (3): 296.
- [3] Nicholson PJ. Shift work and chronic disease: the epidemiological evidence [J]. Occupational Medicine, 2011, 61 (2): 78-89
- [4] Grundy SM, Cleeman JI, Daniels SR, et al. Diagnosis and management of the metabolic syndrome: an American Heart Association /National Heart, Lung, and Blood Institute Scientific Statement [J].

Circulation, 2005, 112 (17): 2735-2752.

- [5] 中国肥胖问题工作组.中国成人超重和肥胖症预防与控制指南(节录)[J].营养学报,2004,26(1):1-4.
- [6] 赵宝钰.倒班对健康的影响[J].职业与健康,2002,18(3):7-8.
- [7] 顾东风,Reynolds K,杨文杰,等.中国成年人代谢综合征的患病率[J].中国糖尿病杂志,2005,13(3):181-186.
- [8] De BD, Van RM, Clays E, et al. Rotating shift work and the metabolic syndrome: a prospective study [J]. Int J Epidemiol, 2009, 38 (3): 848-854.
- [9] Karlsson B. Is there an association between shift work and having a metabolic syndrome? Results from a population based study of 27485 people [J]. Occupational & Environmental Medicine, 2001, 58 (58): 747-752.
- [10] Hublin C, Partinen M, Koskenvuo K, et al. Shift-work and cardiovascular disease: a population-based 22-year follow-up study [J]. Eur J Epidemiol, 2010 (25): 315-323.