

某核燃料元件生产线职业病危害控制效果评价

Assessment of control effect on occupational hazards in a production line of nuclear fuel elements

马跃峰, 薛向明, 武晓燕

(中国辐射防护研究院, 山西 太原 030006)

摘要: 通过现场调查、检测检验法确定某核燃料元件生产线上生产过程中职业病危害因素, 评价其防护措施的防护效果。该生产线主要危害为放射性物料产生的辐射危害, 以及氟化氢 (HF)、噪声和高温等非放射性危害。经现场监测并估算得出放射工作人员个人剂量水平在 $0.51 \sim 3.64$ mSv/年, 主要岗位 HF 最高接触浓度为 0.1 mg/m^3 , 个体噪声 8 h 等效声级最高为 79.9 dB (A), 工作场所高温 WBGT 指数最高为 22.2°C 。该生产线放射人员个人年有效剂量控制在管理目标值以下, 职业病危害因素检测结果均满足职业接触限值要求, 工程采取的职业病危害防护措施是有效的。

关键词: 核燃料元件; 辐射危害; 辐射防护; 评价

中图分类号: R135 **文献标识码:** B

文章编号: 1002-221X(2016)02-0149-03

DOI: 10.13631/j.cnki.zggyyx.2016.02.027

核电事业是现代能源供应最重要组成之一。我国核电事业起步较晚, 但进步比较迅速, 随着对能源需求日益增加以及火电带来的严重环境问题, 决定了核电发展的广阔前景^[1]。根据国家核电中长期发展规划及调整目标, 在 2015 年前后, 所需核燃料元件将达 1600 tU/年。为此某核燃料元件有限公司新增 400 tU/年的核燃料元件生产能力, 满足今后一段时期我国核电发展对燃料元件的需求。本文对该工程生产过程中存在的职业病危害因素及防护措施进行了分析与评价, 对未达到职业病危害防护要求的系统或单元提出补充对策和建议, 从源头控制或消除职业病危害, 保护劳动者健康。

1 内容与方法

1.1 评价目的

以某核燃料元件生产线为对象, 通过现场调查和相关资料分析, 确定运行过程中产生的职业病危害因素种类和危害程度, 评价该工程采取的防护措施是否有效。

1.2 评价依据

以《中华人民共和国职业病防治法》(中华人民共和国主席令[2011]第52号, 2011年12月31日修正案)、《工业企业设计卫生标准》(GBZ1—2010)、《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871—2002)等法律、法规、标准, 以及项目初步设计、防护设施设计专篇等工程资料为评价依据。

1.3 方法

检测数据由中国辐射防护研究院和北京市化工职业病防治院提供, 检测时间为 2015 年 3 月 13—15 日。监测项目包括表面污染、 γ 剂量率、HF、高温和噪声, 采用的监测仪器有 LB124 α 、 β 表面污染测量仪、FH40G-10+FHZ672E-10 型 x- γ 辐射剂量率仪、PHSJ-5PH 计、噪声频谱分析仪和 WBGT 热指数仪。

1.4 评价范围和内容

某核燃料生产线化工转化厂房、燃料棒生产及组件制造一体化厂房投产运行后工作场所存在的职业病危害因素及其对作业人员健康的影响、职业病危害防护设施或措施及其防护效果。

2 结果

2.1 工艺分析

本生产线分为化工转化和燃料棒生产及组件制造两个建筑单体。

2.1.1 化工转化 采用综合干法 (IDR) 工艺, 原料 UF_6 经气相水解, 得到 UO_2F_2 微粒, 与水蒸汽、 H_2 逆流接触, 在一定温度下发生脱氟和还原反应, 生成 UO_2 粉末。再经稳定化、均匀化等过程, 制得合格的 UO_2 粉末。

2.1.2 燃料棒生产及组件制造 合格的 UO_2 粉末经混合、均匀化、轧片制粒后压制成型, 再经高温烧结、磨削、淋洗、烘干制成合格的芯块。 UO_2 芯块装入包壳管, 焊接上、下端塞, 经芯块间隙、丰度、检漏、外观、称重等检查后制备成燃料棒。燃料棒与组件骨架装配、焊接, 装配成燃料组件, 入库贮存。

2.2 危害因素分析

2.2.1 辐射源项及辐射危害

2.2.1.1 正常运行条件下的辐射源项及危害^[2] 本工程辐射源项为生产工艺过程中富集度 $<5\%$ 铀的不同化合物。其次是燃料棒检验时使用的 ^{241}Am 密封源和 ^{252}Cf 密封源产生的 γ 、中子射线。接触辐射危害的岗位主要包括干法生产线运行、制粒、压制成型、高温烧结、磨削、外检、氧化、回收、燃料棒制造、燃料棒检验、组件组装和组件检查。

铀在衰变过程中主要释放 α 、 γ 射线以及 ^{241}Am 和 ^{252}Cf 密封源产生的 γ 、中子射线, 会对操作人员造成一定的外照射危害。化工转化、芯块制备等过程若设备密封不严, 会使工作场所产生含铀气溶胶, 工作人员吸入后造成内照射危害。

2.2.1.2 事故情况下辐射源项及危害 (1) UF_6 气体泄漏事故: 当 30B 容器与 UF_6 气体输送管道连接不当, 或阀门、法兰损坏时可能发生 UF_6 泄漏。此时辐射源项主要是 UF_6 及 UF_6 与空气中的水蒸汽形成的 UO_2F_2 气溶胶, 造成气化间铀

气溶胶浓度升高,工作人员吸入和表面沾污会产生内、外照射危害,同时 UF₆ 对肾脏和肝脏还产生化学损伤。(2) 转炉氢气爆炸事故:转炉内为氢气氛围,若空气进入反应管则可能引起转炉内爆。爆炸时炉管内的混合气体与粉尘将冲破泄爆板进入局部排风系统。事故时不会有放射性物质泄漏至转炉间。事故释放的有害物质包括高温 UF₆ 气体、高温蒸汽、高温 HF 气体及铀化合物粉尘。(3) U₃O₈ 或 UO₂ 粉末物料洒落事故:物料洒落事故发生部位为 U₃O₈ 或 UO₂ 粉末料桶与预混单锥双螺旋混料器连接处。此时辐射源项为泄漏的 U₃O₈ 或 UO₂ 粉末,造成厂房污染及铀气溶胶浓度升高。工作人员吸入和表面沾污会产生内、外照射危害。(4) 烧结炉氢气爆炸

事故:烧结炉以氢气为还原剂,当氢气供应不足,可能导致空气进入发生爆炸,此时辐射源项为 UO₂、U₃O₈ 粉末。事故发生后会造厂房污染及铀粉尘和气溶胶浓度升高,对工作人员造成一定内外照射。(5) 核临界事故:本工程操作的含铀物料丰度<5%有临界风险。当临界控制措施遭到破坏时,将发生临界事故。此时辐射源项为瞬发中子、瞬发 γ 射线,以及裂变气体与裂变核素。主要辐射危害为较强的外辐射,以及吸入气态裂变产物产生的内照射和裂变产物产生的污染。

2.2.2 非放射性危害因素及接触方式 该工程生产过程中存在的主要非放射性职业病危害因素有氟化氢、高温、噪声,分布及人员接触情况见表 1。

表 1 非放射性职业病危害因素分布

岗位	工作场所	非放射性职业病危害因素	接触方式
干法生产线	气化间	氟化氢、高温、噪声	装卸 30B 容器、巡检
	转炉间	氟化氢、高温、噪声	监控转炉运行,控制反应过程
	氢氟酸暂存间	氟化氢、噪声	巡检
	尾气处理间	氟化氢、噪声、高温	巡检
	热室间	氟化氢、高温	巡检
	风机房	噪声	巡检
制粒岗位	粉末制粒间	噪声	粉末料桶转移,装料
压制成型	压制成型间	噪声	工艺过程监控,芯块取样及密度测量
高温烧结	烧结区	高温	人工辅助烧结炉进、出料,巡检
磨削、外检	磨削区	噪声、高温	工艺监控,芯块外检,料盘转运和暂存
氧化、回收	高温复烧炉间	噪声、高温	物料转移,氧化炉进料,氧化过程监控
燃料棒制造	芯块装管间	噪声	装管上料,监控上端塞压塞、焊接
组件组装	组件组装区	噪声	在燃料棒组装工作台进行组装

2.3 防护措施评价

2.3.1 辐射防护措施

2.3.1.1 辐射工作场所分区 将气化间、高温复烧炉间、燃料棒及组件制造区域等划分为控制Ⅰ区;将铀气溶胶浓度较大区域和 γ 辐射水平较高的区域,如转炉间、粉末制粒间、烧结区、芯块烘干间等划分为控制Ⅱ区。将 HF 酸暂存间、理化分析间、自控设备间等划分为监督区。

2.3.1.2 三道密封屏障 第一道密封屏障,反应或输送放射性物料的设备和管道均密闭;第二道密封屏障,气化罐、手套箱、通风柜等操作系统均密闭;第三道密封屏障,放射性厂房为密闭厂房,可将放射性物质控制在厂房内,减少对外界环境的污染。

2.3.1.3 通风与净化 放射性厂房设有全面通风、局部排风和事故排风系统,排风经净化设施处理后排放。

2.3.1.4 密封放射源辐射防护措施 燃料棒芯块富集度检查装置(内装两枚²⁵²Cf 密封源)由置源通道、燃料棒通道、中子慢化层及辐射生物防护层等组成,可有效屏蔽 γ 和中子射线。芯块间隙检查装置(内装一枚²⁴¹Am 密封源),自带屏蔽体为 30 mm 厚的铅+5 mm 厚钢板,可有效屏蔽 γ 射线。

2.3.1.5 自动控制措施 在各生产操作位设就地控制盘,在中央控制室设置分散控制系统(DCS)。实现人员远距离操作,仅在加料、物料转运、巡检过程短间接接触放射性物质。

2.3.1.6 个体防护措施 工作人员佩戴口罩、手套、工作服、工作鞋等个体防护用品。

2.3.1.7 辐射监测 工作场所辐射监测包括放射性气溶胶监测、外照射剂量率监测和表面污染监测;个人剂量监测包括外照射个人剂量监测和内照射个人剂量监测。外照射个人剂量监测采用热释光个人剂量计,由工作人员佩戴在左胸前,监测周期为 3 个月。内照射个人剂量监测采用 MUA 微量铀分析仪测量尿中的铀含量,监测周期为 1 年。

2.3.2 非放射性危害因素防护措施

2.3.2.1 氢氟酸防护措施 热室间、尾气处理间和氢氟酸暂存间设氢氟酸泄漏报警装置,并与事故风机联锁,房间内各设 1 套喷淋洗眼装置;尾气处理间和氢氟酸暂存间设置围堰和过渡间,放置个人防护用品;所有液体贮槽均设液位监测装置;工作人员进入尾气处理间和氢氟酸暂存间必须穿戴防酸服、戴防毒面具。

2.3.2.2 噪声防护措施 选择低噪声设备并设消声处理。产生噪声的辅助设备集中布置,运转振动较大的设备如磁力泵等布置在厂房一层;不能布置在一层的,设置减振措施。

2.3.2.3 高温防护措施 气化间供料管道、蒸汽管道、转化炉、烧结炉、氧化装置均设有保温层,保温层外表面温度低于 50℃。厂房设有送排风系统。设值班室供人员休息,并提供清凉饮料等。

2.4 职业病危害因素检测与综合评价

2.4.1 辐射危害评价

2.4.1.1 工作场所 γ 监测结果 工作场所人员操作位 γ 剂量率较低, 在 0.3~2 $\mu\text{Sv/h}$ 之间; 而 30B 容器、气化罐、检查料斗、物料桶等附近 γ 剂量率较高, 最高值达 43.5 $\mu\text{Sv/h}$ (距空 30B 容器表面 0.05 m)。燃料棒制造、燃料组件制造等岗位 γ 剂量率主要受元件数量影响, 剂量率较高的外观尺寸检查工作台、组件组装/翻转平台和组件库, 剂量率分别为 10.4、10.6 和 37.7 $\mu\text{Sv/h}$ 。

2.4.1.2 工作场所表面污染监测结果 对该工程地面、墙面、工作台、设备进行了 α 表面污染监测, 监测结果均合格。最高值为均匀化出料小室地面 2.87 Bq/cm^2 , 低于控制要求 4 Bq/cm^2 。

2.4.1.3 工作场所铀气溶胶监测结果 主要岗位空气中铀气溶胶浓度均符合控制标准的要求。

2.4.1.4 个人剂量估算 根据工作场所辐射监测结果对工作人员个人年有效剂量进行估算^[3], 结果见表 2。

表 2 工作人员年个人有效剂量估算结果 mSv/年

岗位	外照射个人 剂量	内照射个人 剂量	年个人有效 剂量
干法生产线	2.10	1.5400	3.64
制粒	1.11	0.0562	1.17
压制成型	1.15	0.0562	1.21
高温烧结	0.46	0.0562	0.51
磨削、外检	2.17	0.0401	2.21
氧化、回收	1.58	0.6660	2.25
燃料棒制造	0.42	0.1610	0.58
燃料棒检验	1.79	—	1.79
组件组装	0.83	—	0.83
组件检查	1.36	—	1.36

注: “—” 表示这些岗位芯块完全密封在燃料棒内, 不会产生放射性气溶胶, 因此未对该场所气溶胶浓度进行监测, 亦未对工作人员内照射剂量进行估算。

由表 2 可见, 本工程放射人员个人剂量水平在 0.51~3.64 mSv/年之间, 平均值为 1.56 mSv/年, 低于建设单位规定的个人剂量管理目标值 8 mSv/年。

2.4.2 非放射性职业病危害评价

2.4.2.1 化学毒物 对气化间、转炉间、尾气处理间、氢氟酸暂存间空气中 HF 浓度检测结果显示, 最高值为 0.1 mg/m^3 ,

低于 HF 最高容许接触浓度 (2 mg/m^3)。

2.4.2.2 噪声 对该工程各岗位人员个体噪声强度进行检测, 结果显示 8 h 等效声级最高为 79.9 dB (A) (磨削岗位), 小于职业接触限值 85 dB (A) 的要求。

2.4.2.3 高温 检测结果显示, 可能存在高温的作业场所 WBGT 指数最高为 22.2℃, 低于 25℃。但本次高温检测的时间是 3 月, 并非夏季最热月份, 预计 7~9 月 WBGT 指数会有所增高。

2.5 职业卫生管理分析与评价

建设单位设置了职业卫生专业管理部门, 负责全公司职业卫生日常管理工作。取得了 OHS18000 职业健康安全管理体系认证, 建有职业卫生管理相关的规章制度。其管理制度的建立和执行情况符合《工作场所职业卫生监督管理规定》(国家安监总局令第 47 号) 的要求。

建设单位制定有《职业健康检查管理规定》, 并委托具有资质的医院每年进行 1 次体检, 包括常规检查和职业健康检查。2014 年职业健康体检未发现疑似职业病及职业禁忌证者。评价单位对该工程不同岗位人员职业健康体检项目与标准规定必检项目进行对照分析, 发现接触 HF 岗位人员体检项目不符合要求。

3 讨论

该工程辐射源项为生产工艺过程中铀的不同化合物。正常工况下工作人员同时受到内、外照射的剂量较低, 但在检修或事故情况下, 工作人员可能在短时间内受到大剂量的内、外照射。根据受照剂量不同, 可能发生不同程度的辐射健康损害。非放射性危害因素包括氢氟酸 (高毒)、噪声、高温等。该工程属于职业病危害严重的建设项目。检测结果显示, 工作场所辐射水平满足控制要求, 放射人员个人年有效剂量能够控制在管理目标值以下; 非放射性危害因素均低于职业接触限值。因此该工程采取的职业病危害防护措施是有效的。

现场调查发现该工程工艺自动化水平较高, 防护设施完善, 但在职业卫生管理上存在一定不足。建议 (1) 加强化工转化工作人员对氢氟酸泄漏事故的应急培训, 特别是防护用品的正确使用, 加强工作人员事故应急救护处理能力; (2) 体检项目不全, 应按照《职业健康监护技术规范》(GBZ188—2014) 补充氢氟酸接触人员的健康监护指标。

参考文献:

[1] 陈宝山. 我国压水堆核电燃料元件的发展 [J]. 原子能科学技术, 2003, 37 (1): 10-14.
[2] 马跃峰, 薛向明, 姜霞. 某低、中放固体废物处置场防护措施控制效果评价 [J]. 中国辐射卫生, 2014, 23 (5): 453-455.
[3] 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.

(上接第 129 页)

[5] Jing Tong, Xiang Yi, Robert Luxenhofer, *et al.* Conjugates of superoxide dismutase 1 with amphiphilic poly (2-oxazoline) block copolymers for enhanced brain delivery: synthesis, characterization and evaluation in vitro and in vivo [J]. Mol Pharm, 2013, 10 (1):

360-377.

[6] Madrala A L, Langvardt P W, Nitschke K D, *et al.* In vitro kinetics of styrene and styrene oxide metabolism in rat, mouse and human [J]. Arch Toxicol, 1993, 67 (1): 18-27.