 DOI: https://doi.org/10.12349/tie.v3i9.11798

Research and Application of Micro-radiation Detection Technology in Nuclear Power Plant Construction

Yong Liu

Shenzhen Hepeng Engineering Supervision Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong, 518000, China

Abstract

Radiographic testing (RT), as a crucial non-destructive testing (NDT) technique in nuclear power plant construction projects, has limitations when employing conventional RT methods—such as extensive radiation diffusion ranges, large required safety isolation distances, and wide areas requiring on-site work suspension and cleanup—which can easily interfere with concurrent operations across multiple trades, severely hindering both project progress and on-site operational efficiency. Micro-radiation testing is a novel narrow-beam controllable radiation testing process that employs multiple protective measures—including sealed shielding structures for equipment, high-precision collimation and beam-limiting designs, back-shielding protection for workpieces, and comprehensive flexible encapsulation—to significantly reduce the radiation diffusion range, shrinking the original safety control distance of dozens of meters to only 1–3 meters; this enables the simultaneous execution of flaw detection operations alongside welding, civil engineering, and equipment installation processes. This paper systematically elaborates on the core principles, equipment systems, and testing procedures of micro-radiation testing technology, analyzes its application advantages and key considerations within the context of nuclear power plant construction, and provides technical support for enhancing the quality and efficiency of NDT in nuclear power plant construction.

Keywords

nuclear power plant construction; micro-radiation detection; non-destructive testing; weld seam inspection; radiation protection; high-shielding collimator

微辐射检测技术在核电建造中的研究与应用

刘勇

深圳市核鹏工程监理有限公司，中国 · 广东 深圳 518000

摘　要

射线检测作为核电建造工程无损检测的重要技术手段，采用常规射线检测存在辐射扩散范围广、安全隔离距离大、现场停工清场范围广等缺陷，极易干扰多工种并行施工，严重制约工程建设进度与现场作业效率，微辐射检测属于新型窄束可控辐射检测工艺，通过设备密闭屏蔽结构、高精度准直限束设计、工件背部屏蔽防护及全域柔性包覆等多重防护手段，极大压缩辐射扩散范围，将原有数十米的安全管控距离缩减至1～3米，有效实现探伤作业与焊接、土建、设备安装等工序同步开展。本文系统阐述微辐射检测技术的核心原理、设备体系与检测工艺，结合核电建造特点，分析该技术在核电领域中的应用优势与要点，为核电建造无损检测提质增效提供技术支撑。

关键词

核电建造；微辐射检测；无损检测；焊缝检测；辐射防护；高屏蔽定向准直器

1 引言

核电工程属于高精密、高安全等级的能源基建工程，建造过程中核岛设备、压力管道、安全壳构件、大型承压设备等核心结构的焊缝质量，直接决定机组运行的安全性、稳定性与使用寿命。无损检测是核电建造过程中对焊缝质量管控的核心手段，能精准排查焊缝裂纹、未焊透、气孔、夹渣等内部缺陷，是规避核电设备运行安全隐患的关键工序。对于体积性缺陷的检测，尽管与超声检测相比有缺点，但射线检测能直观、准确地显示工件内部缺陷的大小、形状和位置，同时以胶片作为记录信息可长期保存、可追溯等优势，是验证焊缝质量的最佳方式，也是其他检测技术不可替代的。

传统射线检测技术依托高活度放射源开展的无损检测，无需依赖外接电源，穿透性能优异、成像稳定性强，但探伤工艺射线发散角度大、散射辐射量大，存在一定的辐射安全风险，需在数十米处建立作业辐射管控区域，施工期间必须大范围封场停工，严重影响多工种交叉施工进度，因此只能夜间作业。随着核电建造工艺不断升级、施工集约化程度持续提升，现场多工种交叉作业常态化，传统探伤技术已无法

【作者简介】刘勇（1976–），男，仡佬族，中国贵州石阡人，本科，工程师，从事核电建造金属焊接及无损检测研究。

满足现代化核电建造的高效、安全、精细化施工需求。

为解决传统探伤工艺的现场应用局限，国内外逐步发展出窄束可控微辐射成像工艺，美国 QSA Global,Inc. 生产的 SCAR、英国 Safe Rad Ltd 开发的近距离放射成像（Close Proximity Radiography）技术以及国内的 MRT 技术均属于微辐射检测技术。该技术是在常规射线检测基础上优化迭代的新型无损检测技术，依托屏蔽结构优化、精密准直控束、全域防护包覆与智能源体闭锁结构，实现辐射场高度收敛与可控化，大幅降低辐射外泄剂量风险与施工干扰，缩小作业管控区域，可实现日间常态化施工，满足核电建造复杂施工现场，是近年来在核电无损检测领域重点推广的安全、高效、新型探伤技术。

2 微辐射检测技术核心理论与设备体系

2.1 技术核心原理

微辐射检测技术核心依托精准屏蔽、窄束辐射约束、封闭式源控原理，对传统射线探伤的辐射泄漏问题进行根本性优化。该技术通过改造探伤设备结构，将射源封闭在机体密闭腔体内，在预设曝光窗口通过安装高屏蔽准直器将释放的射线调整为极窄射线束，杜绝全方位辐射外泄。探伤作业时，射线束穿透待检构件焊缝区域，未被构件吸收的残余射线将通过工件背部专用铅板屏蔽，设备外围搭配铅橡胶整体包覆结构，全面阻挡散射线泄漏，最终将作业辐射管控范围压缩至极小区域，实现微辐射、低风险探伤作业。作业完成后，放射源可自动复位至密闭安全腔体，从源头杜绝放射源丢失、滞留辐射等安全事故，大幅提升作业安全性。

相较于常规射线探伤，该技术摒弃了大范围空旷作业的施工要求，通过结构屏蔽替代空间防护，彻底解决了传统探伤依赖大场地、长防护距离的痛点，可满足核电施工现场密集化、复杂化的作业环境。

对额定装载量 ≤100Ci 的硒 -75 源设备，表面泄漏剂量率＜ 20μSv/h，1 米距离处泄漏剂量率 ≤2μSv/h，辐射泄漏量远低于常规探伤设备；设备重量仅 11.6kg，体积小巧，便于核电现场高空、狭窄舱室等特殊区域转运与固定；操作距离 1 ~ 12 米，可适用于不同作业空间；射线源焦点精度高，可保障微小缺陷成像辨识度，完全满足核电核级构件无损检测精度规范。此外，该设备支持模式切换，可兼顾微辐射精准检测与常规大厚度构件探伤，设备通用性极强。

2.2 放射源选型

放射源选型直接决定微辐射的检测精度、屏蔽难度与作业适配性，结合核电建造薄壁构件、精密焊缝的检测需求，主要选用硒 -75、铱 -192 放射源。硒 -75 射线源能量范围为 66 ~ 401keV，平均能量 206keV，适用于检测 5 ~ 40 mm 厚度钢铁构件透照检测，完全覆盖核电绝大多数管道、小型承压构件壁厚检测需求。

同时，硒 -75 源射线能量更低、射线束均匀性更好，成像清晰度与缺陷检测灵敏度显著优于铱 -192 源，能够精准识别核电焊缝微小裂纹、浅层夹渣等高危隐蔽缺陷。低能量射线特性也大幅降低了屏蔽防护难度，可有效控制设备体积与辐射泄漏剂量，契合微辐射探伤的技术核心要求。而铱 -192 源能量偏高、射线硬度大，屏蔽难度高，仅适用于核电大型厚壁构件特殊检测场景，极少应用于常规微辐射探伤作业。

2.3 微辐射控束屏蔽核心机制

微辐射探伤与传统探伤的核心差异并非成像原理，而是通过系统化屏蔽与限束设计，实现辐射场精准可控，是实现小范围、低剂量、安全作业的关键。

2.3.1 源机内置全封闭屏蔽腔

探伤主机是通过改造探伤设备结构，将放射源封闭在高密度加厚屏蔽腔体，放射源仅能在密闭短程通道内移动，在预设曝光窗口通过安装高屏蔽准直器将释放的射线调整为极窄射线束输出射线，设备其余方位采用高密度铅或贫化铀材料全封闭屏蔽，从源头抑制射线的全方位泄漏问题。

2.3.2 窄束精密准直技术

设备曝光窗口安装不同型号的高屏蔽准直器结构，为了避免其它方向射线剂量过大，在作业前，需根据检测管道的管径，选择合适的高屏蔽准直器，使其只能在特定的角度范围内有射线存在，达到射线精准覆盖检测区域，使用柔性铅板（0.5mm）对主射线进行屏蔽，大幅减少无效散射射线产生，从传播路径上控制辐射扩散范围。

2.3.3 工件背侧刚性屏蔽

在探测器背部加装定制铅质防护板材，充分吸收穿透工件的主射线能量，消除工件后侧远距离辐射场，有效缩小作业安全管控范围。

2.3.4 全域柔性铅橡胶包覆

对探伤主机、工件焊缝两侧实施全覆盖铅橡胶包裹，有效阻挡工件产生的二次散射射线，将作业外围环境辐射剂量稳定控制在 ≤2.5μGy/h 的限值范围内。

2.3.5 源回收自锁安全结构

曝光作业完成后，放射源可完全退回屏蔽罐体，设备机械结构自动闭锁锁定，杜绝丢源、卡源、误出源等安全隐患，从设备结构层面保障放射性作业安全。

3 核电建造微辐射检测工艺

结合核电建造高标准、严规范的施工要求，微辐射探伤需执行标准化、流程化作业工艺，兼顾检测质量、辐射安全与施工效率，具体作业流程分为前期准备、工艺验证、正式探伤、收尾管控四大阶段。

3.1 作业前期准备

作业前依据核电施工图纸、待检构件管径、壁厚、材质参数，编制专项检测工艺方案、工作程序、作业指导书，明确相应的高屏蔽准直器型号、曝光参数、屏蔽厚度、作业控制区范围、安全管控标准相关要求。提前清理待检焊缝表面杂物、锈蚀，保证检测面平整洁净，避免影响成像精度。同时配齐铅板主屏蔽、铅橡胶包覆、剂量率巡测仪、警示标

识、应急防护物资等设备，对作业人员开展专项技术交底与安全培训，所有作业人员需持证上岗，熟练掌握设备操作、辐射监测与应急处置流程。

3.2 现场工艺验证

正式作业前必须确保工作票生效且开展工艺验证试验，根据放射源活度、构件规格测算主屏蔽铅板厚度，确定 2 米半径标准安全管控区域。在作业区域设置警戒线与电离辐射警示标识，安排专职监护人员与辐射巡测人员全程值守。严格按照标准化流程完成设备组装、窗口调试、构件固定、屏蔽包覆工作，全程监测作业区域边界空气比释动能率，确保边界剂量率 ≤2.5 μ Gy/h，完全符合核电辐射安全标准后，方可确认工艺合格，启动正式探伤作业。

3.3 标准化探伤作业

作业时依次完成设备封罩锁紧、控制系统对接、曝光窗口固定，对待检焊缝进行划线分段，精准放置标记带、像质计与检测胶片。在胶片后侧固定主屏蔽铅板，采用铅橡胶对设备与构件对接区域整体严密包覆，彻底阻断散射线外泄。操作人员撤离至安全区域后启动曝光作业，全程通过剂量率巡测仪实时监测辐射剂量，发现剂量异常立即停止作业、排查隐患。

单段曝光完成后，及时复位放射源至安全腔体，确认设备闭锁机构完全锁定后，方可移动设备开展下一段检测。全程严格执行核电无损检测质量规范，保证每一处焊缝检测全覆盖、无遗漏，成像数据清晰可追溯。

3.4 作业收尾管控

单日探伤作业完成后，及时更换设备安全窗口，清理作业现场物资，拆除警示标识与防护设施，做到工完场清。将放射源规范运回专用源库储存，做好设备运维、放射源领用归还登记，同步整理检测影像数据、辐射监测记录、作业台账，形成完整的核电检测档案，满足工程质量追溯与安全监管要求。

4 在核电建造中的应用优势

4.1 辐射安全等级大幅提升，管控难度显著降低

传统射线探伤安全防护距离需数十米，作业时需大范围清场、停工隔离，极易干扰整体施工进度。微辐射探伤技术通过全封闭屏蔽结构，将安全防护距离压缩至 1 ~ 2 米，辐射泄漏剂量极低，将设备安装好后，对 1.3 米附近的计量进行测量，均小于 2 μ Sv/h，作业风险可控，可有效规避核电施工现场人员密集、设备密集带来的辐射安全隐患，杜绝放射源安全事故。

4.2 作业时间不受限制，大幅提升施工效率

常规射线探伤因辐射风险，仅能在夜间全员停工后开展，作业时长有限、工期压力大。微辐射探伤技术可实现日间常态化作业，支持 24 小时轮班施工，无需大范围清场，可与焊接、安装等其他工种交叉作业，彻底解决探伤工序制约整体工期的行业痛点，大幅缩短核电建造施工周期。

5 当前技术应用存在的问题

5.1 厚壁构件检测适配性不足

微辐射探伤技术依托低能量硒 -75 放射源开展作业，最优透照厚度为 5 ~ 40mm，仅适配核电薄壁管道、小型承压构件检测。针对核电反应堆厚壁容器、大型承压壳体、厚钢构等大厚度构件，射线穿透能力不足，检测成像清晰度大幅下降，无法满足厚壁构件的缺陷检测要求，应用场景存在明显局限性。

5.2 智能化水平偏低

当前现场应用的微辐射探伤设备多以人工操作为主，曝光参数调试、设备固定、辐射监测、缺陷识别均依赖人工完成，自动化、智能化程度较低。人工操作易受经验、状态影响，存在参数设置偏差、屏蔽包覆不严密、缺陷漏判误判等风险，同时数据记录、归档效率偏低，难以适配核电数字化建造的发展趋势。

6 结论

微辐射探伤检测技术凭借低辐射、高安全、高精度、高效率、场景实用性强的核心优势，解决了传统射线探伤作业风险高、工期受限、场景实用性差、交叉施工干扰大等痛点，高度契合核电建造高安全、高效率的施工要求。该技术通过结构屏蔽与窄束辐射控制的技术革新，实现了核电无损检测从“空间防护”向“设备防护”的升级，有效降低了核电施工现场辐射安全风险，大幅提升了探伤作业效率，对保障核电建造工程质量、缩短施工工期、降低施工成本具有重要现实意义。

当前该技术仍存在厚壁构件适配不足、标准化体系不完善、智能化程度偏低等问题，后续需通过设备迭代优化、标准体系构建、智能技术赋能等多措并举，持续完善技术体系。随着核电建造技术的不断升级，微辐射探伤检测技术将逐步实现全场景、标准化、智能化应用，成为核电建造无损检测领域的核心主流技术，为核电工程安全、高质量建设提供坚实技术保障。

参考文献

[1] 国家卫生健康委员会. GBZ 117-2022 工业探伤放射防护标准[S]. 北京:中国标准出版社,2022.

[2] 国家能源局. NB/T 47013-2015 承压设备无损检测[S]. 北京:中国标准出版社,2015.

[3] 李刚,王强. γ 射线微辐射探伤技术在石化工程中的应用研究[J]. 无损探伤,2021,45(03):45-48.

[4] 张磊,刘军. 窄束屏蔽 γ 探伤技术的辐射场仿真与优化[J]. 工业安全与环保,2022,48(06):89-92.

[5] 陈宇. 微辐射可控 γ 探伤工艺在船舶狭小空间的应用[J]. 船舶工程,2023,45(02):112-115.

[6] 王浩,周明. 工业 γ 射线探伤屏蔽技术研究进展[J]. 无损检测,2020,42(08):78-82.