

CNIC-00960
FRDINI-0010

CN9502573

中国核科技报告

CHINA NUCLEAR SCIENCE
AND TECHNOLOGY REPORT

核燃料元件单棒焊缝的射线探伤

RADIOGRAPHY INSPECTION OF WELD
FOR NUCLEAR FUEL ROD



中国核情报中心
原子能出版社

VOL. 2 No. 4 China Nuclear Information Centre
Atomic Energy Press



张 凯：高级工程师，核工业第五研究设计院工业设备研究设计所主任工程师。1964年毕业于重庆大学机械制造及工艺设备专业。

Zhang Kai; Senior engineer and chief engineer of Industrial Equipment Research Department, Fifth Research and Design Institute, CNNC. Graduated from Chongqing University in 1964, majoring in machinery and technological equipment.

核燃料元件单棒焊缝的射线探伤

张凯 张锡昌

(核工业第五研究设计院, 郑州)

摘 要

介绍了射线探伤的概况、主要方法的优缺点及应用场所。着重阐述了自行研制的核燃料单棒焊缝 X 射线探伤检查装置的结构和功能、装置的动作程序、以及一些重点机构的结构和功能, 并对它们的动作原理进行了分析。该装置经过长期运行的考验, 证明装置运行稳定, 动作可靠, 自动化程度较高, 探伤灵敏度高, 能一次同时完成直径 10 mm 以下的 25 个核燃料单棒在线的 X 射线检查, 满足了核燃料单棒大生产的需要。

RADIOGRAPHY INSPECTION OF WELD FOR NUCLEAR FUEL ROD

(In Chinese)

Zhang Kai Zhang Xichang

(THE FIFTH RESEARCH AND DESIGN INSTITUTE OF
NUCLEAR INDUSTRY, ZHENGZHOU)

ABSTRACT

The survey of radiography inspection, advantages, disadvantages and application places of main kinds of radiography inspection methods are presented. Emphasis is put upon the structure and functions of X-ray flaw detecting device for nuclear fuel rod welds, the actuating program of the device, as well as the structure of some key mechanisms and the functions of them are given, and the analysis is made upon the actuating principles. Finally, the test of long-term operation proves the device to be stable in operation, reliable in action, to possess high level of automation and high sensitivity and it can simultaneously perform on-line X-ray inspection of 25 nuclear fuel rods with a diameter less than 10 mm, and meet the requirement of large-scale production of nuclear fuel rods.

前言

随着世界经济的发展,各国对能源的需求量也越来越大,因而核电的发展也受到越来越多国家的重视。据1993年6月底统计,世界上33个国家和地区已运行核电站415台机组,总功率为328308 MW,我国也正在加快核电的发展步伐,已运行3台机组,总功率为2100 MW。由于核电的快速发展,对核燃料元件的需求量也越来越大。目前世界各国,除加强对核燃料元件制造工艺的研究和改进外,还大力提高燃料元件加工厂设备机械化和自动化的水平,以满足对核燃料元件质量和产量方面的要求。我们研制的核燃料元件单棒焊缝X射线探伤检查装置,实现了自动化,取代了原来的手工操作,满足了核燃料元件单棒生产的需要。

1 射线探伤检查

1.1 射线探伤检查概述

目前,射线探伤已广泛地应用于各工业部门作为检查物体材料内部和焊缝内部缺陷的行之有效的必要手段,特别是用于锅炉,压力容器以及一些重要结构件焊缝质量的检验更为普遍。射线探伤具有如下优点:

- a. 射线探伤检查几乎适用于所有材料,而且对探伤件的形状及其表面粗糙度均无严格的要求,如对钢件探伤厚度可达0.5 m,而对薄如纸的树叶、邮票及纸币等也可检查其内部质量。
- b. 射线探伤能直观地显示缺陷的影象,便于对缺陷的定性、定量和定位。
- c. 射线探伤能将探伤的部位进行照相,如实记录,其底片能长期保存,一旦发生事故,便于分析事故的原因。

但射线探伤也有它的局限性。例如检查厚度不够大;难以发现垂直于射线方向的薄层缺陷;检查费用较高;射线对人体有害,需作特殊防护等。因此,射线探伤方法常与磁粉、渗透或超声等探伤方法联合使用。随着计算机与电子科学的发展,射线探伤的自动化检查技术已指日可待。

1.2 射线探伤的种类和特点

目前工业部门的射线探伤,常规的方法大体上有三种,一是X射线探伤;二是 γ 射线探伤;三是电子加速器探伤;三种方法分别在不同场合下采用。另外中子照相技术也在发展和得到应用,逐渐成为常规无损检查方法的重要补充,特别是它对于检查含氢的物质和重金属所组成的物体特别有效,有时它能获得用其它检查方法难以得到的信息。随着中子照相技术的发展,它的应用范围将会更加扩大,并将成为重要的探伤方法之一。

1.2.1 X射线探伤

X射线是由高速行进电子在真空管中撞击金属靶后产生的,其能量和强度均可调节,其穿透能力的强弱决定于电子从阴极飞往阳极的运动速度,即决定于射线管的管电压,目前管电压可达420~500 kV,其穿透能力较低,X射线的能量利用率很低,一般为1%~2%,其余约98%的能量变为热能。这些热能集中在阳极靶的一小块面积上,因此需对系统强行冷却。靶的材料需选用高熔点、原子系数大的材料,故该法的使用受到场地限制,被探伤件的厚度较薄。

1.2.2 γ 射线探伤

目前 γ 射线源是由核反应堆生产的放射性同位素制成的，其放射性由物质内部原子核的衰变而来，其能量不能改变，衰变几率也不能控制，穿透能力强，探伤件厚度较厚，铜件最厚可达 0.3 m。由于在透照过程中不用水和电，因而可在高空、水下与野外等场合工作；也可在 X 射线探伤仪及加速器无法达到的狭小部位工作；设备简单，便于操作；其能量比 X 射线高，可达 2 MeV。不足之处是半衰期短的 γ 源更换频繁，对射线的防护要求严格；对缺陷的发现灵敏度一般略低于 X 射线探伤。

由于科学和技术的发展，它的优点得到发挥，而缺点已逐渐克服。目前据估计， γ 射线探伤仪数量已接近携带式 X 射线探伤仪。

1.2.3 加速器探伤

加速器发射出的射线束是最强的射线，其特点是：射线束定向性好，利用率可达 70%；射线束的能量、强度与方向均可精确控制；操作及检修方便，并可因随时停止射线的发射，故工作中放射性污染危险性小，使用较安全；穿透能力最强、透照厚度厚，铜件厚度可达 0.5 m；焦点小、探伤灵敏度高，因此应用较广泛。

2 核燃料元件单棒焊缝的射线探伤

核燃料元件单棒在生产过程中，其端塞与铀管的焊接，目前国外采用两种方法：一种是采用氩弧焊或电子束焊；另一种是压力电阻焊。这是两种不同的工艺路线，采用前一种方法工艺路线较长，为保证焊缝质量，还需采用射线探伤的方法来检查焊缝，目前采用这种方法的国家仅多。后一种方法工艺路线较短，其中省掉了焊缝的射线探伤。我国燃料元件单棒的生产，采用真空电子束焊接的方法，故不需采用射线探伤来检查焊缝的质量。单棒的焊缝有两种型式：一是铀管两端与端塞焊接的两个环焊缝，另一个是将端塞上小孔堵塞的塞焊缝。这两个焊缝其厚度均很小，故均采用 X 射线检查，X 射线检查分两次完成，一次检查一个环焊缝，另一次检查环焊缝和塞焊缝。

3 核燃料元件单棒 X 射线探伤装置的结构、作用及动作程序

X 射线装置的具体结构参见图 1。

装置大体可分为两大部分：一部分是探伤室；另一部分是单棒输送装置。前一部分的作用是屏蔽射线，完成射线探伤检查并拍片。后一部分的作用则是完成对单棒焊缝进行射线检查时，单棒所需的各项运动的程序动作。

X 射线探伤装置的动作程序：预选管电压、管电流及曝光时间→打开 X 射线探伤室的顶盖→装入胶片暗盒和生产管理所需的各项数据→关闭探伤室的顶盖→上下料机构动作→扫描机构动作→主动拖轮、传动机构动作（单棒被推进探伤室补偿块内）→X 光机启动胶片第一次曝光、时间到后又关闭→摆动机动作→胶片移动机构动作→X 光机启动，胶片第二次曝光，时间到后，关闭→摆动机松开单棒，退回原位，然后压紧单棒，再动作→胶片移动机构动作→X 光机启动，胶片第三次曝光，时间到，关闭→摆动机退出对单棒的压紧状态，回到原位→主动拖轮、传动机构动作，胶片移动机构动作退回原位→上下料机构动作，探伤室顶盖打开→取出底片盒，换胶片，将底片盒装到胶片移动机构上→关闭探伤室顶盖，整个装置进入下一工作循环按上述程序动作。

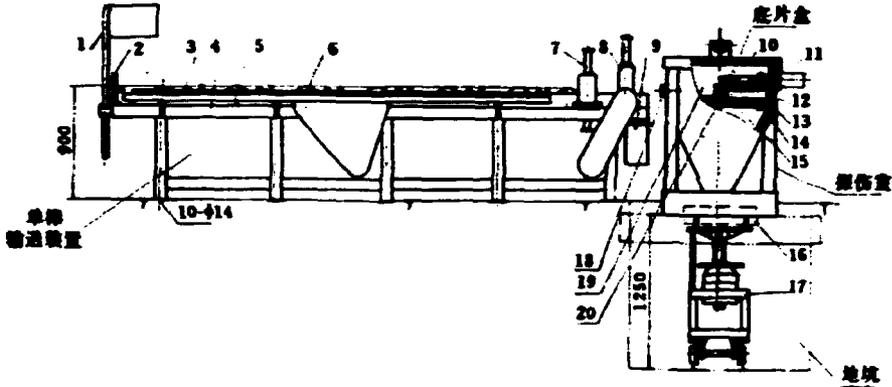


图1 X光探伤装置简图

1. 扫描机构; 2. 光控管组; 3. 上下料机构 (本机架内安装); 4. 机架; 5. 托轮;
6. 主动托轮; 7. 摆动机; 8. 传动机构; 9. 气动组件; 10. 顶盖; 11. 胶片移动机构; 12. 屏蔽板;
13. 支承板; 14. 支承架; 15. 补偿块; 16. X光机; 17. 升降车; 18. 挡板; 19. 铅容器; 20. 象质器。

3.1 探伤室的主要结构和作用

探伤室由顶盖、胶片移动机构、屏蔽板、支承板、支承架、补偿块、X光机、升降车、挡板、铅容器、象质器等零部件组成 (详见图1)。

顶盖打开便于更换胶片和管理数据, 关闭则可防止射线外漏, 起防护作用, 顶盖的关闭与X光机的启动和关闭联锁。胶片移动机构是使胶片依次进入曝光区, 照相拍片。屏蔽板屏蔽射线, 使曝光区和非曝光区分开, 支撑补偿块和象质器。支承板支撑屏蔽板。支承架支撑支承板。补偿块是使单棒到位准确, 补偿圆形工件由于厚度差造成对射线的影响。X光机是X射线探伤的射线源。升降车是安装X光机的机座, 便于X光机进入探伤室内工作, 退出探伤室, 便于检修X光机。挡板挡住铅容器上未装单棒的孔, 避免射线外漏。铅容器屏蔽射线, 起防护作用。象质器是评定底片影象的指示器。

3.2 单棒输送装置的结构和作用

装置由扫描机构、光控管组、上下料机构、机架、托轮、主拖托轮、摆动机、传动机构、气动组件等零部件组成 (详见图1)。

扫描机构能识别燃料单棒的编号, 并输入计算机。光控管组监测25个单棒进入探伤室的补偿块内以后是否正确到位。上下机构是实现燃料单棒的上下料, 它将未检查的单棒送到单棒待检查的工作位置上, 将工作位置已检查好的单棒取下, 放到下料架上而转入下个工序。机架是该装置全部机构的安装基础。托轮是单棒在工作位置上的支撑, 能使单棒定位, 轴心位置不变。主动托轮和传动机构是使单棒能够产生往复运动的机构。摆动机是使单棒能在原位作旋转120°的机构。气动组件是气动的三大附件, 一般为分水滤器、减压

阀、油雾器，它们能使气动系统所需之气源合乎要求，能使气缸正常工作，并能延长使用寿命。

4 主要机构的结构特点和工作原理

4.1 燃料单棒输送机构

燃料单棒输送机构结构如图 2 所示。

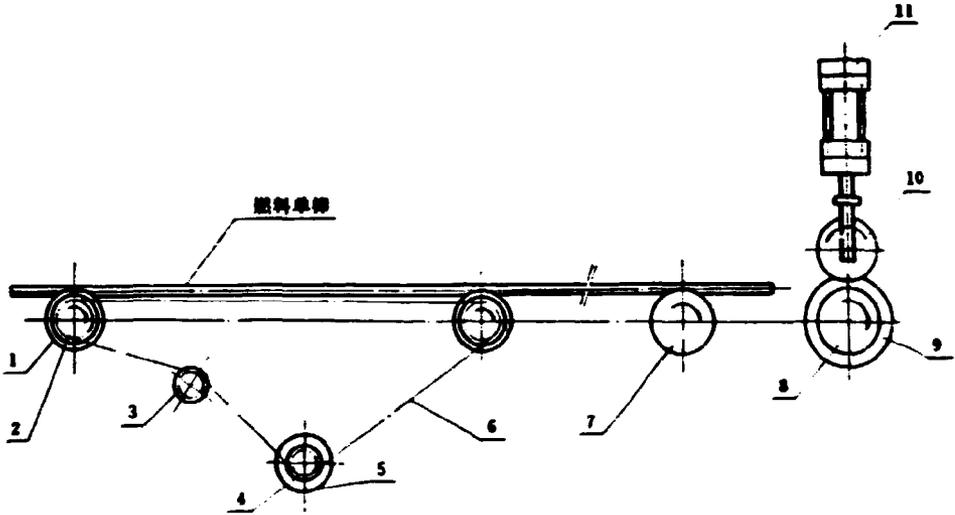


图 2 燃料单棒输送机构简图

1. 主动托滚；2. 链轮；3. 张紧轮；4. 链轮；5. 电动机；
6. 链条；7. 托滚；8. 主动轮；9. 电动机；10. 压紧轮；11. 升降气缸。

该机构的工作原理是当电机转动，通过减速器使链轮转动，通过链传动使主动托滚转动，单棒压在主动托滚上，这样由于重力产生的摩擦力使单棒直线运动，当单棒运动进入主动轮上，主动轮由电动机及减速器带动旋转，加之升降气缸动作，使压紧轮压紧单棒，即主动轮与单棒之间产生一个外加压紧力，这样主动轮旋转，由外加摩擦力使单棒继续前进。当主动轮反转，单棒后退，当后退到单棒与主动轮脱离接触，单棒由主动托滚带动单棒继续运动后退。

单棒直线运动方向由这些托滚和轮子的旋转方向而定，为避免单棒运动进入探伤室补偿块后而被顶弯，其主动轮与压紧轮之间的中心距要调整到合适位置，压紧力要适当，以避免摩擦力过大使单棒被顶弯。

4.2 拨动机构

拨动机构结构如图 3 所示。

机构的工作原理是：当上下压紧气缸动作时，上下拨板离开或者靠近单棒中心位置，当单棒运动需进入或离开上下拨板所在位置时，这时上下拨板处在离开单棒中心的原始位置。当单棒停在上下拨板所在位置时，单棒进入探伤室补偿块内，这时气缸动作，上下拨板向靠近单棒中心位置运动，并夹紧单棒，此时拨动气缸动作，带动下拨板移动，从而带动连杆摆动，连杆带动下拨板运动，其方向与下拨板相反，连杆以固定铰链为支点中心，其缸

杆比为 1:1, 故上下摆板移动距离相等。由于单棒在托滚和补偿块内均限位, 轴心线不变, 加之上下摆板与单棒接触, 并压紧单棒, 这样当摆板运动, 使单棒受到一个摩擦力偶的作用, 而在原位作旋转运动。为了使单棒轴心位置不变, 安装上下气缸时, 必须调整到适宜的位置。

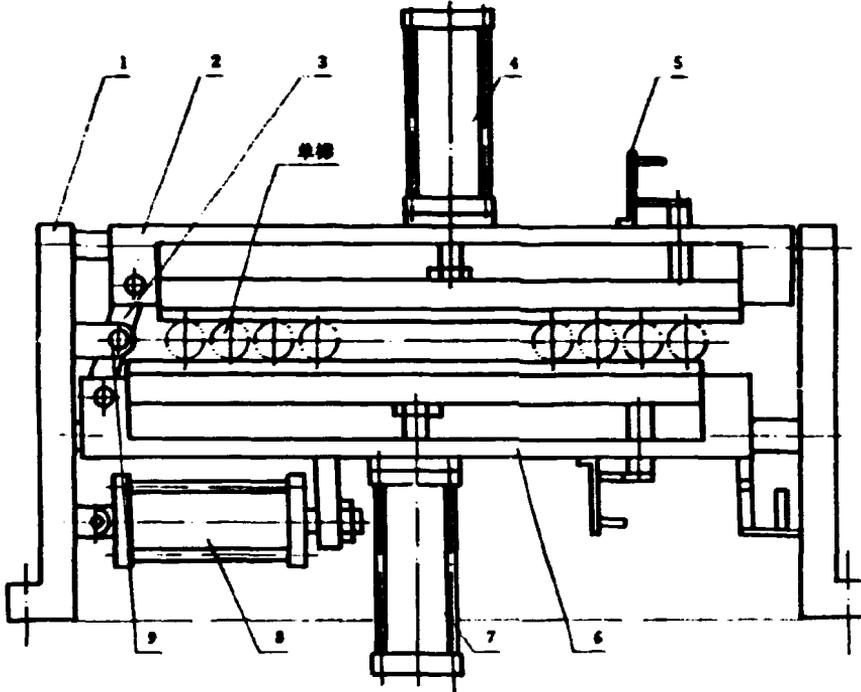


图 3 摆动机构简图

1. 支架; 2. 上摆板; 3. 连杆; 4. 上压紧气缸;
5. 光电开关; 6. 下摆板; 7. 下压紧气缸; 8. 推动气缸; 9. 校键。

4.3 上下料机构

上下料机构简图如图 4 所示。

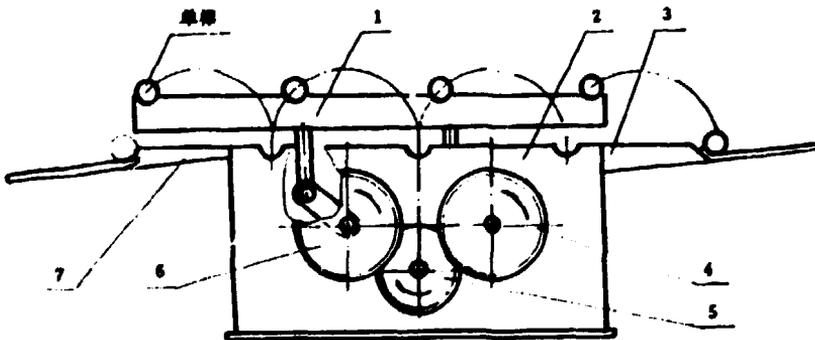


图 4 上下料机构简图

1. 机架; 2. 静架; 3. 上料架; 4. 主动齿轮; 5. 蜗轮; 6. 从动齿轮; 7. 下料架。

机构的工作原理是：主动齿轮由电动机和减速器系统带动而旋转，通过齿轮传动，使从动齿轮同向旋转，主动齿轮、从动齿轮分别带动两个偏心机构旋转，从而带动动梁作平行移动，当偏心机构每旋转一次，则动梁逐渐上升并逐渐前进，达到最高点，然后又逐渐下降并逐渐后退，达到最低点，即完成一个步进动作，实现了上下料目的。当偏心机构每旋转一次，动梁步进动作一次，也就将单棒向前移动一个节距。整个机构是一个四连杆平行四边形机构，故运动中有死点存在，为克服死点，采用定比齿轮传动，当主动齿轮转动，通过惰轮使从动齿轮同向转动，这样使得偏心机构相当有两个动力源，从而使动梁能克服死点而运动，达到上下料的目的。

5 提高射线检查质量

在射线检查中，要想达到检验的目的，即得到合乎要求的底片，除要考虑胶片的特性和暗室的处理等因素外，在设计装置和具体操作上应考虑以下几点：

(1) 在射线探伤中，要求射线对物体有一定的穿透力，而射线对物体的穿透能力取决于射线能量的高低。射线波长的长短，也决定了所得图象衬度的高低。一般在工业射线照相中，希望主因衬度尽量高些，以便发现微小的缺陷，即要求射线要软些，也就是 X 射线管电压要低。因此在材料和检查要求的标准确定之后，力求选用适当低的管电压。我们在操作时一般控制在 280 kV。

(2) 减少几何不清晰度，提高焦距（即增大焦点至底片的距离）和选用小焦点。我们选用焦距为 1 m、小焦点尺寸为 1.5 mm×1.5 mm 的 X 光机。考虑到胶片与物体紧贴，在设计装置时，根据结构需要，我们把胶片与补偿块之间距离尺寸控制在 3 mm。

(3) 减少 X 射线散射的影响。我们在生产实际中，设计的是锥形铅容器，它的发光点在锥形容器锥底，即与锥形光阑相适应。在胶片后安装一铅板作为屏蔽板吸收反向散射，另外使曝光区和非曝光区分开，这些措施大大减小了射线散射的影响，提高了照片的清晰度。

(4) 采用增感屏。在 X 射线照相中，X 射线进入胶片而被吸收的能量小于 1%，即有 99% 的能量不能参与照相过程。因此将浪费的能量利用起来，而又不使工艺过程复杂化的任何措施都将是十分有意义的。目前解决这个问题的方法是采用某些物质在射线作用下发光或产生次级效应（主要是光电效应），对胶片进行增感，即采用增感屏。我们在生产实践中，采用金属屏（即用铝箔制作的暗袋）作为增感屏，将胶片装入暗袋，从而使得胶片在 X 射线的作用下增感，这样就减少了射线散射的影响，大大提高了照片的清晰度。

(5) 采用补偿块。如图 5 所示。

我们要进行射线检查的工件，即燃料单棒，其断面形状是圆形的，厚度差大，造成了对射线强度衰减的影响，这样就使得在同一曝光时间内，薄的部分可能曝光过度，厚的部分可能曝光不足，影响了一次透照质量。为此我们采用了如图 5 所示的矩形断面补偿板（与检查单棒焊缝处材料相同）作为补偿块，这样就补偿了圆形工件厚度差造成的对射线强度衰减的影响，使射线穿透物体厚度一致，不影响曝光，一次透照成功，从而保证了底片质量。

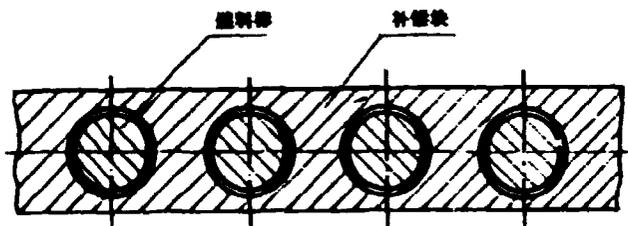


图5 补偿块

6 结 论

在我国核燃料元件单棒生产中，单棒焊缝的 X 射线探伤检查原来为手工操作，产品质量不易保证，生产率低。现在采用我们研制的 X 射线探伤检查装置，在生产线上已稳定运行一年多，为我国的核电站提供了合格的燃料组件，保证了核电站的安全运行。

X 射线探伤检查装置，通过在生产线上长期运行的考验，证明其性能满足了工艺要求，各机构动作运行稳定可靠；过程的控制采用 PC 机，自动化程度较高；生产管理实现了计算机化，生产率较高，一次可检查 25 个单棒；更换补偿块，可适应检查不同直径的单棒，检查灵敏度高，能发现直径为 0.25 mm 以下的缺陷；防护性能好，对周围环境没有影响，能适应单棒在线检查，满足了大生产的需要。

但此装置还存在一些需要进一步完善的地方，一是单棒进入补偿块内的到位监测系统还不够理想，控制不够精确，特别是当单棒长度差别大时，控制不准确。如将监测系统设置在被检查这端，使单棒到位后直接监测效果更好些。另外单棒转角的监测，现采用人工示记号来实现自动监测，此项工作仍需进一步完善。

参加该装置设计的还有李立康、李家仁，参加调试的有李文兴和重庆自动化所的同志，在此向他们表示感谢。

参考文献

- [1] 李海河等. 苏联压水堆核电站燃料组件制造技术考察总结, 1990. 12
- [2] 梁庆等, 周益年, 梁应龙. 英国压水堆燃料元件生产考察总结, 1983. 12
- [3] 核工业核电科技情报网. 核电工程与技术, 1993. 4
- [4] 中国机械工程学会无损检测学会. 射线检测. 北京, 机械工业出版社, 1988. 10

(京)新登字 077 号

图书在版编目 (CIP) 数据

**核燃料元件单棒焊缝的射线探伤—RADIOGRAPHY
INSPECTION OF WELD FOR NUCLEAR FUEL ROD
/张烈等著. —北京: 原子能出版社, 1995. 5**

**I. 核… II. 张… III. 核燃料棒-焊接-射线探伤-研究
N. TL352. 23**

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (95) 第 02491 号



原子能出版社出版发行

责任编辑: 孙凤香

社址: 北京市海淀区阜成路 43 号 邮政编码: 100037

中国核科技报告编辑部排版

核科学技术情报研究所印刷



开本 787×1092 1/16 · 印张 1/2 · 字数 13 千字

1995 年 5 月北京第一版 · 1995 年 5 月北京第一次印刷

CHINA NUCLEAR SCIENCE & TECHNOLOGY REPORT

This report is subject to copyright. All rights are reserved. Submission of a report for publication implies the transfer of the exclusive publication right from the author(s) to the publisher. No part of this publication, except abstract, may be reproduced, stored in data banks or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior written permission of the publisher, China Nuclear Information Centre, and/or Atomic Energy Press. Violations fall under the prosecution act of the Copyright Law of China. The China Nuclear Information Centre and Atomic Energy Press do not accept any responsibility for loss or damage arising from the use of information contained in any of its reports or in any communication about its test or investigations.