

CN9401697

CNIC-00773

SINRF-0029

中国核技术

CHINA NUCLEAR SCIENCE & TECHNOLOGY

双道中子硼表

TWO-CHANNEL NEUTRON BORON MIPER

(for ^{10}B)



原子能出版社

中国核信息中心

China Nuclear Information Centre



陈永清：中国核动力研究设计院高级工程师，
1964年毕业于四川大学物理系。

Cheng Yongqing: Senior engineer of Nuclear
Power Institute of China. Graduated from
Physics Department of Sichuan University in
1964.

CNIC-00773

SINRE-0039

双道中子硼表

陈永清 阴国玮 柴松山 邓朝平 周斌

(中国核动力研究设计院)

摘 要

双道中子硼表是一种连续测量反应堆一次冷却剂中硼浓度的在线测量仪表。在测量机理上,创造了中子泄漏补偿方法。一次测量装置采用了小硼水环、两个测量道和中心刻度环。二次仪表能远程进行刻度环和硼水的恒温控制,应用微机处理数据,实现了硼浓度的自动在线测量和刻度。因此,双道中子硼表具有精度高、响应快、用途多、体小轻便与可靠方便的优点。

TWO-CHANNEL NEUTRON BORON METER

(In Chinese)

Chen Yongqing Yin Guowei Chai Songshan
Deng Zhaoping Zhou Bin

(NUCLEAR POWER INSTITUTE OF CHINA, CHENGDU)

ABSTRACT

The two-channel neutron boron meter is a continuous on-line measuring device to measure boron concentration of primary cooling liquid of reactors. The neutron-leakage-compensation method is taken in the measuring mechanism. In the primary measuring configuration, the mini-boron-water annulus and two-channel and central calibration loop are adopted. The calibration ring and constant-temperature of boron-water can be remotely controlled by secondary instruments. With the micro-computer data processing system the boron concentration is automatically measured and calibrated in on-line mode. The meter has many advantages such as high accuracy, fast response, multi-applications, high reliability and convenience.

前 言

在核电站轻水反应堆中,广泛利用在一次冷却剂中加硼来实现反应性的补偿控制,以便展平堆功率,增加燃耗。此外,在反应堆停堆时,要利用加硼使活性区长时间保持在次临界状态。为了保证反应堆的安全运行和确定向一次冷却剂中的加硼量,需要连续测量反应堆一次水中的硼含量。

国外自六十年代以来开始研制硼浓度计。其测量原理多是基于化学分析,如甘露醇-电导法,比色法、自动电位滴定法等。这些硼浓度计存在着或是滞后时间较长,或是测量装置复杂难以维护等缺点,并且测量的是硼-10和硼-11的总量。而反应堆的控制只与硼-10有关,中子吸收法测量的正是硼-10。因此国外开展了中子吸收硼表的研制,在一些核电站实现了反应堆一次水硼浓度的在线监测。我国秦山和大亚湾核电站使用的是法国进口的中子硼表。

为了我国核电设备的国产化,1989年,我院完成了双道中子硼表的研制,申报了国家发明专利,成果能用于轻水堆核电站。

1 设计依据与技术性能

在设计中,以国外中子硼表的技术性能^[1]作为依据,在测量机理上用了“泄漏补偿的中子吸收法”,结构上采用双硼水环,加快了换样频率,提高了测量的可靠性,减小了测量装置

的体积和重量。

表1给出了双道中子硼表的主要技术性能。

表1 双道中子硼表的技术性能

测量通道		两通			
量 程		0~5000 ppm			
在线刻度选择		不靠化学支持,使用纯水和刻度环来进行全量程的在线刻度和检查			
读出方式		四位数字显示 ppm 数。			
测量误差	硼浓度(ppm)	500	1000	2000	5000
	重复性(ppm)	±2.7	±3.5	±4.5	±7.2
	95%置信度下的不确定度(%)	±3.8	±2.5	±2.0	±1.7
运行条件		压力:(1~7)×10 ⁶ Pa 温度:20~60℃ 硼水流率:0.2~1.0 L/min 环境温度:±1℃			
读数间隔		2000 ppm 以下:<200 s 5000 ppm 以下:<330 s			
滞后时间		<8 min			
读出至样品距离		≤200 m			
一次装置规格		外形尺寸:46 cm×46 cm×70 cm 重量:≤100 kg			
辐射剂量		一次装置表面1 m 外的中子 剂量当量率<25 μSv/h			

2 样机结构简介

硼表样机由一次测量装置和二次仪表两大部分组成。一次测量装置本体为一个具有保温壳的轻水桶。水桶中心源管内装有一个强度为 185 GBq 的镅-铍中子源,源管外装有能远程控制升降的在线刻度环。两个硼水环对称地安放在中子源和刻度环的两侧,BF₃ 中子探测器分别位于两硼水环中心,用来测量被硼水吸收后的热中子数。

二次仪表由恒温-刻度环控制单元、中子测量系统和数据采集控制与处理系统组成。恒温-刻度环控制单元用来进行刻度环升降和一次测量装置水温的远程测量与控制。中子测量系统采用国产的标准 NIM 核子仪器插件,用来对到达 BF₃ 探测器的热中子进行定数测量。数据采集控制与处理系统由 CMC-80 微型电脑构成,由测控程序控制两个测量道进行自动测量和采集数据,并按给定的数学关系计算硼浓度,最后以数字显示 ppm 数。

图 1 给出了双道中子硼表样机结构系统原理图。

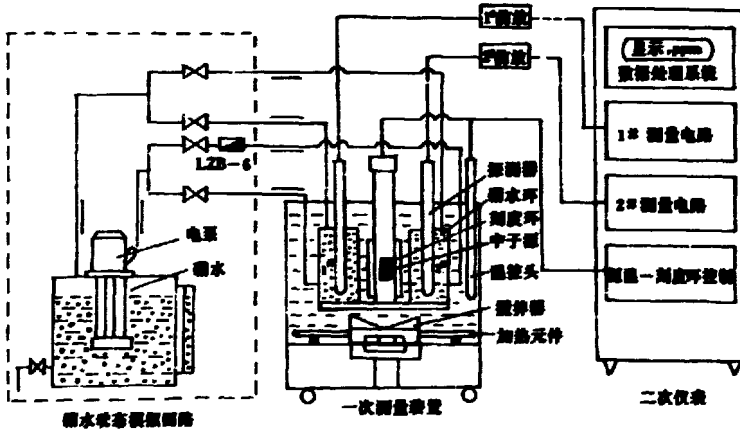


图 1 双道中子硼表样机与动态试验系统原理图

3 测量原理

在轻水中确定位置上的快中子源会在水中形成一个固定的热中子场。位于热中子场中被一层均匀等厚硼水介质包围的热中子探测器,在一定的硼浓度范围内其计数响应将随硼浓度的增加而呈指数下降。即

$$n = n_0 e^{-\beta C} \quad (1)$$

式中, n_0 和 n 分别代表在轻水慢化剂中无硼和有硼时探测器的计数率, C 为水中硼浓度 (ppm); β 为与硼-10 的热中子吸收截面和硼水厚度有关的常数。

如果 $\beta C \ll 1$, (1) 式展开后的近似表达式为

$$n_0 = n(1 + \beta C) \quad (2)$$

为了达到要求的测量精度,通常采用固定计数法。如果 N 代表预定的总计数, T_0 和 T 分别表示在零镉浓度和 C 镉浓度下达到预定计数的时间,那么, $N = n_0 T_0 = nT$, 将此关系式代入(2)式简化得到

$$C = K(T - T_0) \quad (3)$$

式中: $K = \frac{1}{\beta T_0}$, 称为测量装置的系统参数,它与测量装置的结构、中子源活度、探测器效率以及被测镉水温度有关。

(3)式是一个典型的线性方程,在推导时作了两点假设:

一是探测器被等厚度镉水包围,探测器的计数响应随镉浓度增加呈指数衰减,而实际上探测器是对称地安放在镉水环的中部,镉水环的上下两端存在未经镉水吸收的泄漏中子(图2)。因此,总的效果是,探测器的计数率比指数衰减慢。

二是假定了 $\beta C \ll 1$, 用线性衰减来代替指数衰减,这限制了测量镉浓度的范围。众所周知,线性衰减比指数衰减缓慢,幸好这个结果与镉水环存在中子泄漏的实际情况有某些吻合。因此,可以通过选择镉水环高度,调整中子泄漏补偿量来扩大(3)式测量镉浓度的线性范围。

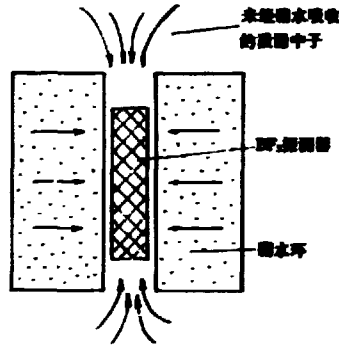


图2 镉水环的端盖泄漏中子

4 测量误差

双道中子镉表测量镉浓度的误差源有,测量方法误差 σ_m 、镉浓度标定误差 σ_c 、测量值的统计误差 σ_s 、温度附加误差 σ_t 。此外,还存在测量电路系统漂移误差 σ_d 。因此,镉浓度测量的总标准误差为:

$$\sigma_r = [\sigma_m^2 + \sigma_c^2 + \sigma_s^2 + \sigma_t^2 + \sigma_d^2]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

4.1 测量方法误差

双道中子镉表利用 $C = K(T - T_0)$ 的线性关系来测量镉浓度,测量原理的非线性会给测量结果带来误差。在 0~5000 ppm 量程内,反复测试 $C = K(T - T_0)$ 的线性关系,对 60 个标定点的回归计算,线性相关系数 $R \geq 0.9999$ 。线性度 K 值的相对标准误差为 $\pm 0.7\%$ 。

4.2 硼浓度标定误差

在对双道中子硼表的系统参数 K 值和刻度环硼当量的标定中,使用了化学分析方法——甘露醇滴定法来标定硼水浓度。对于 100 ppm 以上的硼浓度,甘露醇滴定法测量硼浓度的相对标准误差不大于 0.1%。

4.3 测量值的统计误差

众所周知,放射性测量存在统计分布,测量值的统计误差(测量精度)随被测硼浓度和预定计数而变化。对于 1×10^6 定计数,统计标准误差 $\sigma_c = \pm [2 \cdot 2 \text{ ppm} + 0.1\% \text{ 测量值}]$ 。图 3 给出了在 281 ppm 和 2743 ppm 标准硼浓度下测量的统计分布。

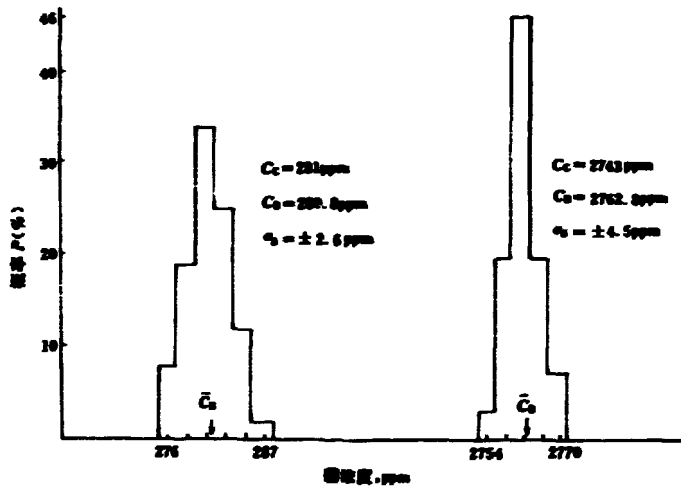


图 3 硼浓度测量的统计分布

4.4 温度附加误差

双道中子硼表一次测量装置的硼水恒温控制有 $\pm 1^\circ\text{C}$ 的误差,这会给出硼浓度的测量结果带来附加误差。实验中测量了在 3 ppm (纯水) 和 2743 ppm 硼浓度下的温度附加误差用来估算在不同硼浓度下的温度附加误差(见表 2)。

4.5 测量电路漂移误差

对于用在核电站连续运行的中子硼表,测量系统的工作稳定性非常重要。测量系统的长期稳定性主要取决于各电子部件的质量,也与硼表连续运行的时间有关。试验上测量了双道中子硼表样机在 50 小时内连续工作的漂移,达到 1×10^6 定计数的时间 T 的相对漂移小于 0.3%,由此给出硼浓度测量带来的误差 $\sigma_r = \pm (6.6 \text{ ppm} + 0.3\% \text{ 测量值})$ 。

表 2 给出了双道中子硼表的误差源和总误差,同时还给出了 95% 置信度下硼浓度测量值的不确定度。图 4 给出了硼浓度测量的总标准误差。

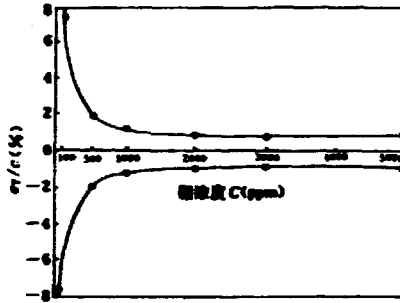


图4 浓度测量的总标准误差

表2 双道中子仪表的误差源和总误差

浓度 C (ppm)	100	500	1000	2000	3000	5000
$\sigma_{\text{sc}} (\text{ppm})$	± 0.7	± 3.5	± 7.0	± 14	± 21	± 35
$\sigma_{\text{c}} (\text{ppm})$	± 0.00	± 0.40	± 0.81	± 2.0	± 3.0	± 5.0
$\sigma_{\text{a}} (\text{ppm})$	± 2.3	± 2.8	± 3.2	± 4.2	± 5.2	± 7.2
$\sigma_{\text{r}} (\text{ppm})$	± 1.5	± 1.5	± 2.0	± 2.0	± 2.5	± 5.0
$\sigma_{\text{e}} (\text{ppm})$	± 6.9	± 8.1	± 9.6	± 12.7	± 15.7	± 21.8
$\sigma_{\text{r}} (\text{gr. cm})$	± 7.5	± 9.4	± 12.5	± 19.6	± 27	± 42.5
$\sigma_{\text{r}} / C (\%)$	± 7.5	± 1.88	± 1.25	± 0.98	± 0.90	± 0.85
95%置信度下的 不确定度%	± 15	± 3.8	± 2.5	± 2.0	± 1.8	± 1.7

5 电站上运行模拟实验

在国内尚未建成轻水堆核电站的情况下,1988年9月,利用辐水动态回路来检验双道中子仪表的连续运行性能。使用甘露醇滴定法来跟踪浓度的变化。仪表开机两小时后连续运行48小时,前24小时在固定浓度下运行,后24小时在多种浓度下运行,表3和图5给出了测量结果。连续50小时的模拟运行试验表明,只要测量电路系统处于正常状态,即使对500 ppm以下的低浓度测量,双道中子仪表的测量结果也在 $\pm 1.5\%$ 的误差范围内与甘露醇滴定法的测量结果相符合。

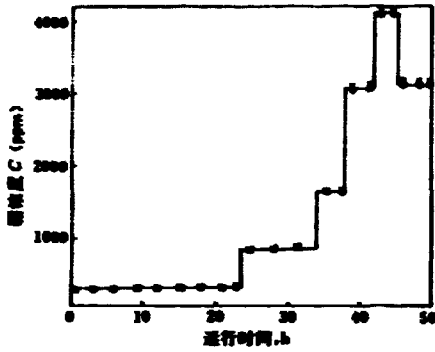


图5 中子谱表模拟运行试验记录
 ——化学标准定值；·谱表1^o测量量(10次平均)；
 ×谱表2^o测量量(10次平均)。

图6和图7分别给出了双道中子谱表换样滞后时间随翻水流量的变化和测量谱浓度阶跃变化的动态响应。从图6可以看出，翻水流量在0.5~0.8 L/min，谱表的动态响应小于2 min。

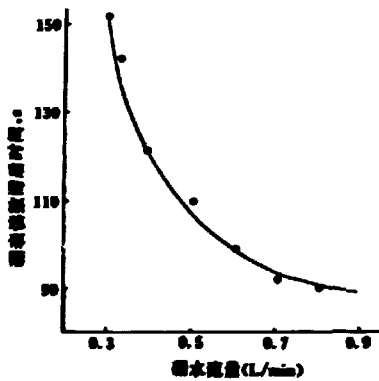


图6 谱表换样滞后时间随翻水流量的变化

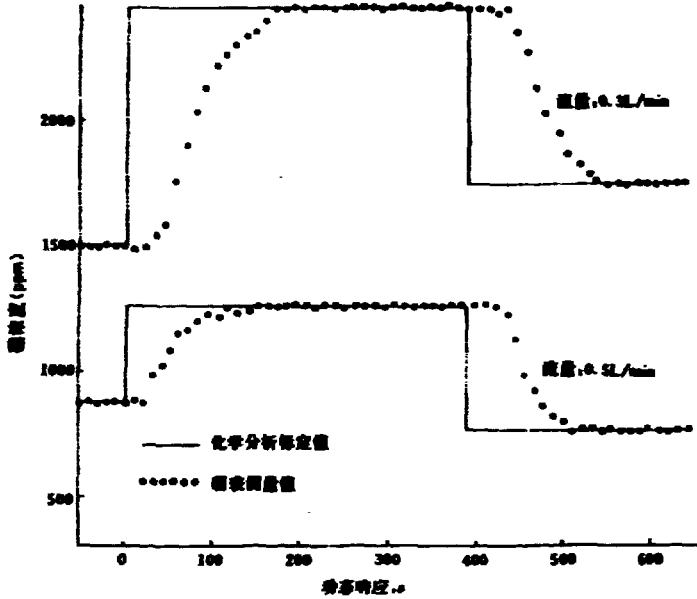


图7 测量硼浓度阶跃变化的动态响应

6 结束语

国内首次研制的双道中子硼表有独自的设计特点,具有测量精度高、准确度好、响应时间快、一次测量装置体小、轻便和多用途等优点,达到了预定的设计目标。

参加本工作的人员还有冯礼英、殷吉余、姚婷仙。此外,本工作还得到了徐林祥、刘金汇等同志的帮助,在此表示感谢。

参考文献

- [1] Development of a Boron Concentration Meter Final Report. WCAP-3690-7-III, EURAEC 2094, April 1969

C

双道中子谱表

原子能出版社出版

(北京 2108 信箱)

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 8 千字

1993 年 9 月北京第一版 · 1993 年 9 月北京第一次印刷

ISBN 7-5022-1040-7

TL · 631

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.

ISBN 7-5022-1040-7
TL • 631

P.O.Box 2103
Beijing, China

China Nuclear Information Centre