

CNIC-00899

IAE-0137

中国核科技报告

氢化锆固态零功率反应堆及其应用研究

ZIRCONIUM-HYDRIDE SOLID ZERO POWER
REACTOR AND ITS APPLICATION RESEARCH

(In Chinese)



原子能出版社

中国核情报中心

China Nuclear Information Centre



林生活：中国原子能科学研究所副研究员，1965年毕业于西安交通大学工程物理系反应堆物理专业。

Lin Shenghuo; Associate professor of China Institute of Atomic Energy; Graduated from Department of Engineering Physics of Xian Jiao-tong University in 1965, majoring reactor physics.

CNIC-00899

IAE-0137

氢化锆固态零功率反应堆及其应用研究

林生活 罗璋琳 苏著亭

(中国原子能科学研究院, 北京)

摘 要

介绍了建于中国原子能科学研究院的氢化锆固态零功率反应堆。该堆采用氢化锆作慢化剂, 有机玻璃作反射层, 富集度为 20% 的 U_3O_8 为燃料。首次临界后, 完成了物理特性和安全特性测量, 证明它具有稳定性好、灵敏度高等特点。应用该堆成功地进行了人员培训, 堆控仪表和实验仪器考验, 以及某些应用的预先研究。显示出了它特有的优越性。

ZIRCONIUM-HYDRIDE SOLID ZERO POWER REACTOR AND ITS APPLICATION RESEARCH

(In Chinese)

Lin Shenghuo Luo Zhanglin Su Zhuting

(CHINA INSTITUTE OF ATOMIC ENERGY, BEIJING)

ABSTRACT

The Zirconium Hydride Solid Zero Power Reactor built at China Institute of Atomic Energy is introduced. In the reactor Zirconium-hydride is used as moderator, plexiglass as reflector and U_3O_8 with enrichment of 20% as the fuel. Since its initial criticality, the physical characteristics and safety features have been measured with the result showing that the reactor has sound stability and high sensitivity, etc. It has been successfully used for the personnel training and for the testing of reactor control instruments and experiment devices. It also presents the special advantage for the pre-research of some applications.

氯化铍固态零功率反应堆是以氯化铍为慢化剂，有机玻璃为反射层，富集度为20%的 U_3O_8 粉末为燃料的热中子反应堆。由于它反应性漂移小，特别适用于进行那些对稳定性要求高的实验；对于核仪器考验和教学培训也是一个十分方便的装置。建成以后，完成了装置本身的安全特性和物理特性测量，主要包括临界质量确定、控制棒和安全棒效率刻度、相对中子通量分布测量、反应性稳定性和灵敏度测量等。并开展了人员培训；为涉外重水零功率反应堆工程和863高技术快中子零功率反应堆核仪器做了全面的考验；进行了燃料元件燃耗在线测量实验方案预先研究；开展了中子照相预研等。本文将对氯化铍固态零功率反应堆的结构和特点进行介绍，并对若干应用研究情况作简要说明。

1 反应堆结构与控制保护系统

1.1 反应堆结构

氯化铍固态零功率反应堆采用立式结构。堆本体由燃料元件、固态慢化剂、固定反射层、活动反射块、堆容器、安全棒、控制棒、探测器、气缸及支架组成。控制棒和安全棒驱动机构安装在上端支架上，用铝板做的棒体从上往下插入堆芯侧面。探测器的头部固定在探测器管道内，信号电缆及电源线从堆容器底部引出，连接到控制室的仪表屏上。

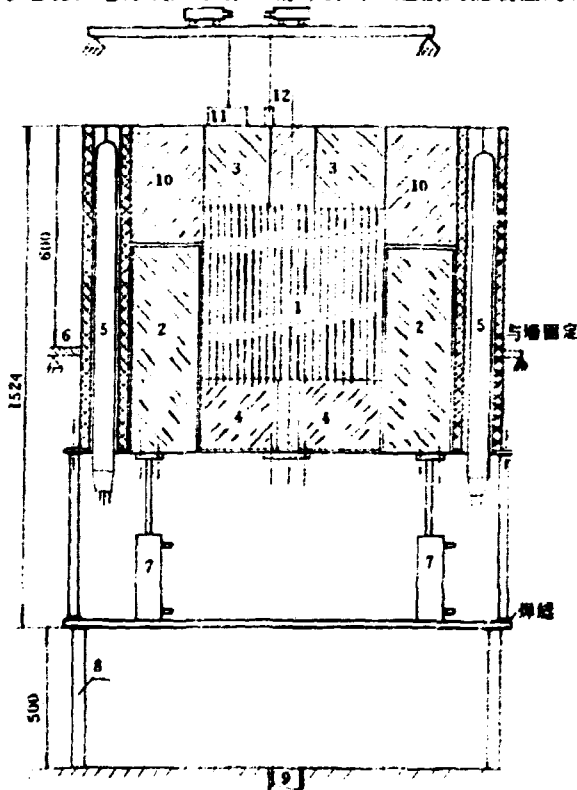


图1 反应堆剖视图

Fig. 1 Reactor cutaway view

1—堆芯； 2—东、西侧活动反射块； 3—上反射层； 4—下反射层； 5—探测器； 6—操作平台；
7—气缸； 8—底座架； 9—地漏； 10—固定反射层； 11—安全棒； 12—控制棒。

堆容器的直径 1028 mm, 高 1524 mm。在堆容器的半高度处有一个工作平台, 与堆本体和堆坑不锈钢贴面连成一体。既便于操作, 又对堆本体起固定作用。详见图 1。

本堆采用 DF-III 堆的燃料元件¹, 厚壁氯化铯管的外径为 15 mm, 内径为 7 mm, 长度有 400 mm 和 55 mm 两种。按称重法确定氢原子和铯原子的比例

$$\frac{N_H}{N_Z} = 1.70 \pm 0.01$$

式中: N_H 和 N_Z 分别代表氢和铯的原子数。为了减少中子泄漏, 在氯化铯管之间插入聚乙烯三角条。堆芯氢与铀-235 原子数之比约为 400。

1.2 控制保护系统

氯化铯固态零功率反应堆的控制保护系统有下述主要特点:

(1) 东西侧活动反射块驱动系统两套。由气源、调压阀、二位五通电磁阀、单向节流阀、气缸等气动元件组成。反射块行程 200 mm, 总效率 $-1.5 \times 10^{-2} \Delta k/k$, 断电时可快速下落, 全程下落时间小于 0.5 s。

(2) 安全棒驱动系统两套。由 10 W 可逆电动机、转轴、离合器、绳轮、钢丝绳和棒体组成。行程 600 mm, 总效率 $-1.02 \times 10^{-2} \Delta k/k$, 快速下落时间为 0.5 s。

(3) 控制棒驱动系统两套。由 10 W 可逆电动机、位置指示表、绳轮、尼龙绳和棒体组成。行程 600 mm, 总效率 $-3.56 \times 10^{-2} \Delta k/k$, 运动速度 ≤ 30 mm/s, 反应性添加率 $\leq 2.0 \times 10^{-4} \Delta k/s$ 。

2 安全特性

(1) 堆本体结构完整性强。堆芯组装在六角形的框架内, 框架固定在底板和堆容器侧面上。外侧再用钢架与堆坑的不锈钢贴面相固定, 无倒塌和散架的可能。

(2) 反应性添加方式单一。与零功率堆相比无水位变化问题, 除控制元件以外, 只能是逐根添加燃料元件这一种反应性添加方式。因此, 每次元件操作的反应性添加率小于 $1.0 \times 10^{-4} \Delta k/s$ 。

(3) 停堆系统符合四取一原则。安全棒采用两套独立的电动驱动机构; 东西侧活动反射块采用两套独立的气动驱动机构, 总的负反应性绝对值大于 $2.0 \times 10^{-2} \Delta k/k$ 。当反应堆运行工况异常时, 只要有一套驱动机构能正常工作, 即可使反应堆处于次临界状态。

(4) 后备反应性小。规程规定, 实验时剩余反应性小于 $2.0 \times 10^{-4} \Delta k/k$ 。本堆的临界燃料元件数为 686 根, 堆芯总共有 698 个燃料元件孔位。实验时, 多余的孔位用铝管堵塞, 以防止插入多余的燃料元件, 从而保证剩余反应性满足规程规定。

3 物理特性

3.1 临界质量

根据临界外推实验并用周期法测定超临界反应性, 然后内插, 求出了该堆的临界燃料元件数为 685.51 ± 0.24 根, 根据燃料密度和富集度, 换算出临界质量为 2.632 ± 0.03 kg ^{235}U 。

3.2 中子通量密度分布

采用锰-镍合金 Mn80Ni20 片作为探测材料, 测定了中子通量密度的轴向和径向相对分布。轴向测量采用 $\phi 5 \times 0.2$ mm 的锰-镍合金片放在 $\phi 6 \times 1$, 长 600 mm 的铝管里, 片与片之间用 $\phi 5 \times 10$ mm 或 $\phi 5 \times 20$ mm 的铝棒隔开; 径向采用 $11.5 \times 2 \times 0.3$ mm 的锰-镍合金片粘在聚乙烯三角条上, 再插入测量点的位置上。探测片活化后用半自动测量装置测量其 β 放射性, 然后按最高点的平均值归一, 所得结果如图 2、图 3 所示。从图 2 可见, 轴向中子通量密度下端较高。最大中子通量密度偏向下端, 这是由于下端有 175 mm 厚的反射层, 而上端没有加有机玻璃反射层, 只有 25 mm 厚的氧化铝反射层所致。从图 3 可见, 径向通量密度分布曲线是呈贝塞尔分布, 是与堆芯的物理中心相对称的。

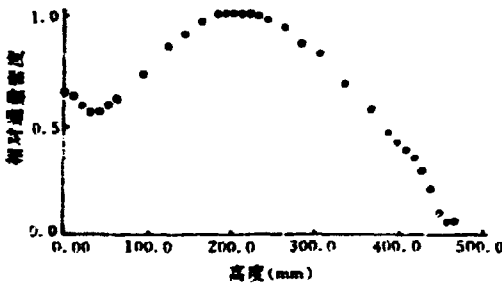


图 2 轴向通量密度分布图

Fig. 2 Axial flux distribution diagram

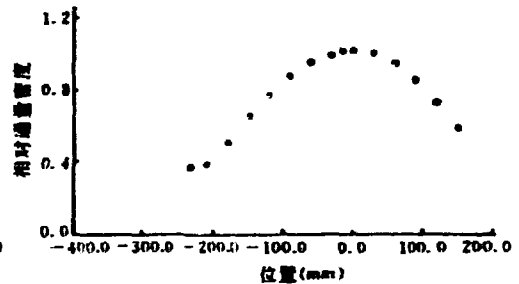


图 3 径向通量密度分布图

Fig. 3 Radial flux distribution diagram

3.3 各部件反应性值

为配合实验, 保证安全运行, 对各类活动部件的反应性值进行了实验测量。活动部件包括东西侧活动反射块、安全棒、控制棒和边缘燃料元件。测量结果列于表 1。

表 1 各部件反应性值

Table 1 Reactivity worth of each subassembly

部件名称	反应性值 / $\frac{\Delta k}{k}$	方法
东西侧活动反射块	$(1.50 \pm 0.31) \times 10^{-1}$	外推法
两根安全棒	$(1.02 \pm 0.18) \times 10^{-1}$	外推法
两根控制棒	$(3.56 \pm 0.11) \times 10^{-1}$	周期法
边缘单根燃料元件	$(2.54 \pm 0.09) \times 10^{-1}$	周期法

3.4 径向燃料元件反应性值分布

为了获得径向燃料元件反应性值分布, 测量了从活性区边缘至中心 17 根燃料元件的反应性值, 数据列于表 2。从表中的数据可见, 1 号位燃料元件的效率较 2 号位的略高, 这是由于前者更靠近反射层, 中子价值权重略有增高所致; 靠近堆芯中央的几根燃料元件的效率相近, 差别较小。

表 2 径向燃料元件反应性分布

Table 2 Reactivity worth of each fuel element radial distributed

燃料元件位置(从边缘起点)	反应性值/ $10^{-4} \frac{\Delta k}{k}$
1	2.54 ± 0.38
2	2.30 ± 0.35
3	2.56 ± 0.42
4	2.94 ± 0.42
5	3.91 ± 0.34
6	4.71 ± 0.37
7	5.48 ± 0.17
8	6.45 ± 0.19
9	7.61 ± 0.15
10	8.59 ± 0.14
11	9.57 ± 0.10
12	10.14 ± 0.29
13	10.90 ± 0.01
14	11.26 ± 0.01
15	11.38 ± 0.22
16	11.51 ± 0.37
17	11.81 ± 0.01

3.5 1号控制棒的S曲线

为了方便实验运行,测量了1号控制棒的S曲线,参见图4。从图中可见,该棒的灵敏段在300~120 mm行程之间。

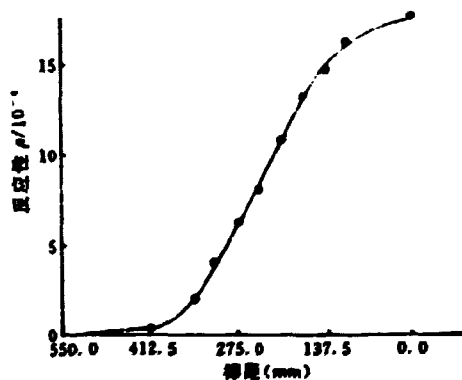


图4 1号控制棒S曲线

Fig. 4 S curve of No.1 control rod

3.6 反应堆稳定性和灵敏度

(1) 稳定性 氟化铀固态零功率反应堆的特点之一是它的稳定性好,可以满足某些特殊实验的需要。为此,我们专门测定了反应堆的稳定性。零功率堆的稳定性用反应性标准偏差来描述。在运行工况不变的条件下,运行期间反应性的偏差越小,稳定性越好。在堆芯燃料元件装载,几何结构完全不变的情况下,每隔一小时,用周期法测量此工况的反应

性。为完成此项实验，连续运行 12 小时，共测量 11 次，结果列于表 3。表 3 给出在 12 小时运行中，不同测量仪器，不同测量量程，反应性的平均值及标准偏差。其标准偏差主要源自中子水平的涨落、测量仪器本身的漂移，及测量人员测周期时的测量误差。

(2) 灵敏度 在氯化铍固态零功率反应堆的中心燃料元件孔道中，利用长度不同的铀样品进行了灵敏度测量。单位质量的²³⁵U 引起的反应性变化为 $4.5 \times 10^{-7} \frac{\Delta k}{k} / \text{mg}$ 。利用稳定性的实验结果可以估算得出，当反应堆功率在 1 W 左右时，氯化铍固态零功率反应堆中心燃料元件孔道对²³⁵U 的灵敏度约为 15.6 mg。

表 3 反应堆稳定性测量结果

Table 3 Measuring results of stability in the reactor

功率 测量仪 量程/A	1号功率测量仪		2号功率测量仪	
	平均反应性	反应性 标准偏差	平均反应性	反应性 标准偏差
	$\bar{\rho}/10^{-4} \cdot \frac{\Delta k}{k}$	$\Delta \bar{\rho}/10^{-4} \cdot \frac{\Delta k}{k}$	$\bar{\rho}/10^{-4} \cdot \frac{\Delta k}{k}$	$\Delta \bar{\rho}/10^{-4} \cdot \frac{\Delta k}{k}$
10 ⁻⁶	10.50	±0.27	10.30	±0.17
10 ⁻⁵	10.44	±0.11	10.25	±0.08
10 ⁻⁴	10.45	±0.12	10.28	±0.07

4 应用研究

(1) 核仪器考验与人员培训。氯化铍固态零功率反应堆设有各种中子探测装置，可提供各种中子通量密度信号，并考验各类中子监测仪器。中子通量密度的变化范围可以从很小开始直到 $10^6 \text{ n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 。实验运行方便，因此该堆已实际用于重水零功率反应堆和快中子零功率反应堆控制系统和实验仪器的全面考验，并先后利用该堆培训了多名国内外反应堆工程技术人员。

(2) 高温气冷堆燃料元件燃耗反应性的在线测量方案预先研究。

(3) 中子照相研究。中子照相技术有广泛的用途。尤其是对于氢原子富集的弹药，导火索等内部质量的无损检查是非常适用的。我们在氯化铍固态零功率反应堆上开展了中子照相探测导火索内部缺陷的预研，取得了初步的结果。

5 结束语

氯化铍固态零功率反应堆建成后通过各种性能测试，证明它具有稳定性好，灵敏度高等特点，可以满足某些特殊实验的需要。对堆用仪表性能的考验和反应堆工程技术人员培训是一个安全、可靠、方便的装置。对开展的若干应用研究也取得了较好的结果。

参加本课题研究工作的还有姚世贵、阎凤文、赵品台、史永谦、叶长源、胡定胜、郭文元、李京喜、王文升、白维清、成文华、许汉铭等。

参 考 文 献

- [1] 罗璋琳、杨大华等。氯化铍零功率反应堆实验装置。原子能科学技术，1981，2：18

(京)新登字 077 号

图书在版编目 (CIP) 数据

氯化锆固态零功率反应堆及其应用研究 = ZIRCONIUM-HYDRIDE SOLID ZERO POWER REACTOR AND ITS APPLICATION RESEARCH / 林生活等著. — 北京: 原子能出版社, 1994. 10

ISBN 7-5022-1308-2

I. 氢… II. 林… III. 氯化锆-反应堆, 零功率堆 (临界装置)-应用-研究 IV. TL411

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (94) 第 11290 号



原子能出版社出版发行

责任编辑: 孙凤春

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 11 千字

1994 年 10 月北京第一版 · 1994 年 10 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.

ISBN 7-5022-1308-2



9 787502 213084 >

P.O.Box 2103

Beijing, China

China Nuclear Information Centre