

# 微型中子源反应堆及其应用

◇中国原子能科学研究院 陈绍能

在一间普普通通的房间里，房屋中间有一圈半人高的铁栏杆，围着一个直径 2.7 米左右的地下水池。该水池初看起来如同一口井。水池四周也没有什么复杂的大型设备，只有一台微机 and 一张简单的操作台，在微机荧光屏上显示着变换的数据。

实际上，这并不是一口井，而是一座小型研究反应堆。反应堆本身坐落在水池底部。在满功率运行时，可以明显地看到在水池底部发出一片明亮透彻的蓝光，这便是反应堆运行时的契仑可夫辐射。这座小型反应堆由于结构简单紧凑，操作运行十分方便。全部运行工作只由一台微机控制，微机荧光屏上的数据一目了然地显示着反应堆的运行状态和实验结果。反应堆装料很少，反应堆上部又有 4 米多厚的水层，对中子和  $\gamma$  射线起到了很好的屏蔽防护作用，故可建在任何需要的地方，包括人口密集的大城市。

这种小型研究堆叫做微型中子源反应堆，简称微堆。其特点是结构简单、使用方便、运行安全、价格便宜。它是用高浓铀作燃料，轻水作减速剂和冷却剂，金属铍作反射层的优化组合成堆的临界系统。该堆具有临界质量低、物理尺寸小、中子泄漏大的特点。它的侧铍反射层内的中子通量水平与堆芯内的相当，便于引出较强的中子束流，因此它可作中子源。用于中子活化分析、少量的短寿命放射性核素的制备、中子照相、中子治疗肿瘤、科学研究、教学和人员培训等方面。

我国第一座微型中子源反应堆，即原型微堆，是由中国原子能科学研究院研制的，于 1984 年春在该院建成并投入运行。1987 年该项目获得科学进步一等奖。该堆自 1984 年 3 月达满功率运行以来到目前为止，已安全运行七年多，并开展了大量的实验研究工作。进行了多种样品的中子活化分析，测量了一系列反应堆物理参数，如控制棒效率、能谱和能谱参数、动态特性和辐照孔道内中子品质因子等，考验了一批核仪器和核探头，为商用微堆的设计、运行实验、管理和维修培训了干部。因此，引起了国内、外用户的关注和兴趣。我国深圳大学、山东省地矿局中心实验室和上海测试技术研究所先后使用了这种微堆，用户反应很好。

## 一 微型中子源反应堆简介

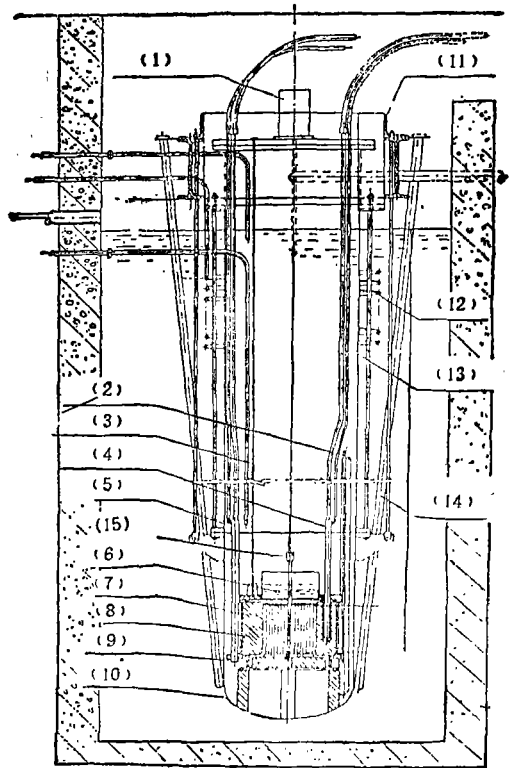
原型微堆为罐—池结合型的反应堆，其基本结构如图所示。反应堆活性区直径只有 241 毫米，高度仅

250 毫米。整个活性区位于一个直径 2.7 米、深 6.5 米的小池底部。活性区上部的水层约 4.7 米左右，这层水对中子、 $\gamma$  射线可起到很好的屏蔽防护作用。在满功率运行时，厂房周围任何部位的辐射剂量水平均低于剂量仪器的最小可探测限。

反应堆燃料采用 U-Al 合金，U-235 的富集度为 90%。每炉燃料的装载

量为 0.915 公斤，可供运行 10 年。活性区反射层为金属铍。控制棒为一根包有不锈钢外壳的镉棒，有效直径只有 3.7 毫米，位于活性区中央。因为整个活性区都在水池内，燃料裂变产生的热量采用自然对流传热方式导出，这样就省去了一般核反应堆复杂冷却系统。

由于堆芯有较大的负反应性，温度系数和空洞效应，即因某种原因使反应堆功率向上飘移，堆功率升高，平均堆温升高并局部产生气泡现象，使堆的反应性下降，堆功率也随之下降。这是一个负反馈效应，它能使反应堆具有很好的自稳性。



(1) 控制棒传动机构 (2) 入口水温测量装置 (3) 出口水温测量装置 (4) 内照射装置 (5) 外照射装置 (6) 上铍调节片 (7) 堆芯(燃料元件) (8) 侧铍环 (9) 下铍盘 (10) 堆体下筒节 (11) 支承框架 (12) 池水冷却器 (13) 堆体上筒节 (14) 中子探测器导管 (15) 中央控制棒

原型微堆示意图

反应堆在满功率运行时,内照射座内中子通量为 $1 \times 10^{12}$ 中子/厘米<sup>2</sup>·秒,外照射座内通量为 $5 \times 10^{11}$ 中子/厘米<sup>2</sup>·秒。

## 二 微型反应堆的应用

### 1. 中子活化分析

微型堆的主要应用是利用它作为中子源进行中子活化分析。由于中子活化分析具有灵敏度高,准确度高,特异性强,非破坏性,多元素同时测量,无试剂空白等优点,加上微堆运行操作方便,可实现无人看管运行,更有助于中子活化分析工作的开展。我们在原型微堆上,已进行了160多个中子活化分析课题的研究。涉及的领域包括材料科学、生物医学、药理学、环境科学、法学、地质科学、宇宙科学、考古、营养、食品、工业制品和农作物等。已分析的金属样品有铝合金、钛合金、碳素钢等;生物样品有血清、血液、毛发、指甲、粪便、眼球、肿瘤和药材等;宇宙化学和地球化学样品有陨石、洋底锰核、铬铁矿、稀土矿、水系沉积物等;环境样品有煤飞灰、桃叶、土壤、水、大气样品等。将这些样品放在堆内照射,经过不同的照射时间、冷却时间、测量时间的组合,已经得出了60多种元素的定量分析结果。

### 2. 生产短寿命放射性核素

由于微型堆功率较低(20几个千瓦),不能用它来生产长寿命的放射性核素,但可以生产一部分中短寿命的放射性核素,供附近的科研部门和医院作学术研究,获得示踪剂和进行教学培训等。由于该堆的启动、反应堆功率的提升运行方式的调整、反应堆的停闭都非常方便自如;又因取、放样品十分简便,不需经过一套复杂的传送系统,可建造在大、中城市内,因而使短寿命核素就地使用成为可能。

### 3. 微型堆是潜在的中子治疗肿瘤的理想中子源

随着医学的不断发展,许多疾病得到了根治。但如何治疗肿瘤,仍是当代医学面临的重大课题。

从1932年发现中子后不久,首先由L. Locher提出:利用中子来治疗疾病,并设想用它治疗肿瘤。1951年,W. H. Sweet首先应用硼中子俘获疗法(简称BNCT)于脑胶质细胞瘤的治疗。把<sup>10</sup>B注入肿瘤组织内部,因为<sup>10</sup>B的热中子俘获截面很大(达3800巴),经中子照射后,<sup>10</sup>B和中子反应生成<sup>7</sup>Li和 $\alpha$ 粒子。它们有高的能量和短的射程, $\alpha$ 粒子在组织内的射程为 $9\mu\text{m}$ ,<sup>7</sup>Li为 $5\mu\text{m}$ ,同生物细胞的直径很接近。由于<sup>10</sup>B附在瘤组织上在中子照射下产生的<sup>7</sup>Li和 $\alpha$ 粒子可将瘤细胞杀死。H. Hatanaka自1967年以来,一直从事BNCT的工作。从1968年8月在日本用BNCT技术治疗第一例病人开始,到1987年8月,共治疗脑瘤病人97例。经治疗存活5年以上的约占30%,比其他方法治疗效果提高4倍。对此种疗法在国际上引起了重视,1984年成立了国际BNCT协会,并于1983、1985、1988年召开了三次国际会议,交

流了近100篇论文。美国还专门开过数次会议,研究BNCT技术。

硼中子俘获疗法的主要设备为中子源、准直器、 $\gamma$ 过滤器、辐照室等。典型的中子源为反应堆、加速器和放射性核素。目前世界各国在BNCT中所用的中子源,大部分为反应堆。

硼中子俘获疗法对中子源的基本要求为:(1)热中子通量: $(1\sim 10) \times 10^9 \text{n/cm}^2 \cdot \text{s}$ 或积分通量: $(0.25\sim 1.2) \times 10^{13} \text{n/cm}^2$ 快中子通量: $\leq 1 \times 10^6 \text{n/cm}^2 \cdot \text{s}$ 。(2) $\gamma$ 剂量:按照射1小时计算,约50Rad。(3) $\gamma/\text{n} \leq 1\%$ (剂量当量比)。(4)准直孔:直径为 $(10\sim 15)\text{cm}$ 。只要将微型堆作适当调整,就能满足上述要求,例如稍稍增加燃料装载量,调节活性区的直径和高度以及堆内的 $N_{\text{H}}/N_{\text{U}}$ 核子数之比等,因为堆内的<sup>1</sup>H和<sup>235</sup>U的总核数一改变,整个堆的临界质量、慢化性能和能谱情况都起了变化,在原有基础上将堆功率提高几倍是完全可能的。这样就可把微型反应堆设计成硼中子俘获疗法治疗肿瘤的理想中子源。

### 4. 开展中子照相技术

中子照相已在飞机工业、兵器工业、液体燃烧装置、印刷技术、表面腐蚀的探测等方面获得广泛应用,成为当代的热门科学。例如对飞机发动机气缸内燃烧情况的测试,飞机凹凸不平处焊缝质量的检查、封闭着的油箱内表面或两块金属板之间内表面腐蚀的观察,印刷电路板的检查,金属外套爆炸装置的检查,金属结构部件有无缺陷,海关和司法部门的侦探活动等,用中子照相技术是非常理想的。只要将微型反应堆在原有基础上将功率稍加提高,活性区作些变更,就能满足中子照相的要求。特别是当现场设备不能搬动,又无法拆卸,不能将它们移到反应堆旁作中子照相时,微型堆更显示出它的优越性。因为微型堆体积小、重量轻,可将它设计成移动式的,什么地方需要中子照相,就可将它装在卡车上拉到现场进行中子照相。

### 5. 低温供热

利用微堆发出的功率向某些特殊楼宇和边远地区进行低温供热也是微堆的一大潜在用途。而低温供热的关键在于反应堆要安全、简单、操作方便、价格能与烧煤相比。而这些正是微型反应堆所固有的特点,可以预见微堆可能在这方面发挥一定的作用。

## · 简讯 ·

### “宇宙中的暗物质”国际研讨会在京召开

由中法共同赞助的“宇宙中的暗物质”国际研讨会于1992年9月在中科院高能所召开。来自法国、意大利、中国和美国的一些知名学者就暗物质理论和实验研究的一系列专题作综合性评述报告。本刊负责人吴水清参加会议举行的科技记者招待会。(秋浦)