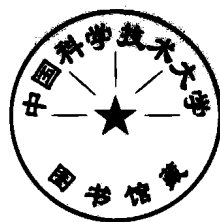


鈾及反应堆材料的金属学

Г. Я. 謝尔盖耶夫
〔苏联〕 В. В. 季托娃 編著
К. А. 鮑里索夫
陆 群 譯



內 容 提 要

本书介绍了鈾、鈾合金和建造核反应堆所用某些材料的金属学问题。书中阐述了上述材料的物理和机械性能及其结构；介绍了鈾的热处理和形变热处理，以及辐照和热循环对鈾、鈾合金和某些结构材料的尺寸稳定性及其综合的诸物理-机械性能的影响；列举了有关制造释热元件外壳材料方面的资料。这些资料对反应堆的计算、设计、运转和释热元件的生产都有一定参考价值。

本书可供从事核燃料和反应堆方面的研究人員、工程技术人员以及高等学校有关专业的师生参考。

МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ УРАНА И НЕКОТОРЫХ РЕАКТОРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Г. Я. Сергеев В. В. Титова К. А. Борисов

Атомиздат · 1960

鈾及反应堆材料的金属学

陆 群 译

上海科学技术出版社出版 (上海瑞金二路450号)

上海市书刊出版业营业许可证出 093 号

上海市印刷五厂印刷 新华书店上海发行所发行

开本 850×1156 1/32 印张 9 20/32 排版字数 254,000

1966 年 5 月第 1 版 1966 年 5 月第 1 次印刷

印数 1-1,000

統一书号 15119·1818 定价(科六) 1.70 元

目 录

緒 論	1
第 一 章 核燃料和結構材料在反应堆中的工作条件	3
第 二 章 鈾的結構和物理性能	21
1. 結構	21
2. 密度与热膨胀	27
3. 热力学性能	33
4. 导热性	36
5. 电学性能	38
第 三 章 鈾的金相学	45
1. 宏观和显微組織	47
2. 电子显微鏡技术	52
3. 高温金相学	53
4. 被輻照鈾的金相学	54
第 四 章 鈾的机械性能	57
1. 短時間試驗时的机械性能	57
2. 彈性	69
3. 持久試驗时的机械性能	72
第 五 章 鈾的塑性变形和織构	75
1. α 相的滑移系	75
2. 孪生	76
3. 断口帶的生成	81
4. 棒材的变形和再結晶織构	83
5. 板材的变形和再結晶織构	85
6. 鈾在 β 相和 γ 相內的变形	87
第 六 章 輻照对金属鈾的尺寸稳定性和物理-机械性能的影响	89
1. 鈾在輻照作用下的生长現象	90

2. 气体膨胀或肿胀	103
3. 鈾在辐照过程中持久拉伸試驗时的机械性能	105
4. 鈾在辐照下短时间拉伸試驗时的机械性能	110
5. 鈾受辐照后的物理-机械性能	111
6. 辐照对鈾的显微組織的影响	118
7. 中子和裂变碎片与金属原子的相互作用	119
8. 鈾在辐照作用下生长机理的现代概念	122
第七章 热循环对鈾的尺寸和組織稳定性的影响	126
1. 在热循环时組織对鈾生长的影响	127
2. 热循环时晶粒大小对生长的影响	130
3. 热循环参数对鈾生长的影响	132
4. 热循环对組織的影响	135
5. 在 α 相范围内热循环时鈾的生长机理	138
6. 在 $\alpha \rightleftharpoons \beta$ 和 $\beta \rightleftharpoons \gamma$ 相变温度范围内于热循环时鈾的外形变化	142
7. 辐照和热循环在鈾中引起变化的对比	143
第八章 鈾的热处理	146
1. 淬火对鈾的組織和物理-机械性能的影响	146
2. 淬火对鈾在辐照下稳定性的影响	156
第九章 鈾的形变热处理	158
1. 再結晶	158
2. 杂质对再結晶的影响	164
3. 形变热处理对鈾的机械性能的影响	166
4. 形变热处理对鈾的物理性能的影响	169
第十章 鈾合金	173
1. 鈾-鉍系合金	174
2. 鈾-鉈系合金	196
3. 鈾-鋁系合金	205
4. 鈾-硅系合金	211
5. 鈾-鎢系合金	213
6. 鈾-鈮系合金	217
7. 鈾的多元合金	220

第十一章 輻照对結構材料的組織和性能的影响·····	225
1. 碳鋼·····	226
2. 不銹鋼·····	233
3. 鋁及其合金·····	240
4. 其他金属·····	243
5. 輻照对結構材料在長時間和应力符号复变情况下的机械性能的影响·····	248
第十二章 热循环对結構材料尺寸稳定性的影响·····	249
1. 純金属和合金·····	249
2. 热循环对某些耐热鋼和高温合金的尺寸稳定性的影响·····	255
3. 热循环参数对結構材料試样形状变化的影响·····	256
4. 在热循环作用下金属和合金的显微組織的变化·····	258
第十三章 释热元件外壳的材料·····	260
1. 鋁及其合金·····	260
2. 鎂及其合金·····	266
第十四章 生产全金属芯棒释热元件的工艺要素·····	270
1. 反应堆的工作条件对释热元件及鈾芯棒的結構和性能的要求·····	270
2. 释热元件的类型·····	271
3. 生产全金属芯棒释热元件的一般工艺流程·····	279
4. 制备全金属芯棒释热元件的主要工艺形式·····	280
参考文献·····	295

緒 論

近几年来，人們对核反应堆中的核燃料和結構材料的金属学日益感到兴趣。其原因主要是当评价某种金属或合金是否适应于反应堆活性区的工作条件时，对核反应堆材料提出了較普通結構材料更多、更严格的要求。

对核反应堆材料的特殊要求可归納如下：

1. 在中子輻照作用下，鈾的生长現象不致破坏核燃料的高度尺寸稳定性和組織稳定性。

2. 在热循环的作用下，材料应具有高度的尺寸稳定性和組織稳定性。

3. 在中子輻照作用下，該結構材料应保持在需要範圍內的諸物理-机械性能。

4. 材料(核燃料或結構材料)在反应堆活性区的条件下应与它所接触的其他材料相互适应。

5. 不同材料与不同載热剂(如高压水、液体金属及合金、气体介质)应具有相互适应性。

6. 应具有相当小的热中子俘获截面。

选择反应堆材料的复杂性在于，所有的普通結構材料远不能适应上述活性区工作条件的要求。

从第一次国际和平利用原子能會議(1955年，日內瓦)开始，世界各国逐年发表了更多的有关反应堆材料金属学方面的資料。在第二次国际和平利用原子能會議(1958年，日內瓦)上又发表了很多新的資料。但是这些資料都分散于各种文献中。目前，在世界文献中仅有两本关于鈾及結構材料金属学方面的书籍^[24, 25]。这两本书籍是在第二次国际和平利用原子能會議前夕发表的。

本书的目的是綜述鈾及其合金和某些結構材料的金属学問題(包括第二次国际和平利用原子能會議上发表的及以后发表的資

料)。关于結構材料,只闡述了反应堆活性区工作条件对它們的一些特殊影响,因为已有許多专著对它們(如鋁、銻、鎂及其合金、不銹鋼)的諸物理-机械性能作了广泛的闡述。

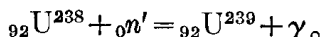
第一章 核燃料和結構材料 在反应堆中的工作条件

核反应堆是一种装置，在其中进行着可控制的鈾或鈾的核裂变鏈式反应。該反应由裂变时形成的中子增殖維持着。在核反应堆中使用的裂变物质称为核燃料。核燃料的基本类型是下列一些鈾和鈾的同位素： U^{235} 、 Pu^{239} 和 U^{233} 。它們在慢中子和快中子的作用下能够发生裂变。其中只有 U^{235} 在自然界中存在，另外两种核燃料是在核反应堆中以中子照射天然鈾或鈾时获得的。此时， U^{238} 部分轉变为 Pu^{239} ，而 Th^{232} 轉变为 U^{233} 。 U^{235} 称为初次核燃料，而 Pu^{239} 和 U^{233} 則称为次生核燃料。

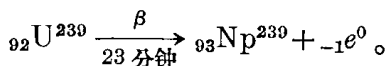
天然鈾是质量数为 234、235 和 238 的三种同位素的混合物。同位素 U^{234} 在金属总量中的数量甚微，0.006% 左右，同位素 U^{235} 的含量为 0.714%^[1, 2]。因此，在同位素的混合物中主要是 U^{238} (99.28%)。含同位素 U^{235} 較多的鈾，称为濃縮鈾。

热中子被 U^{235} 和 U^{238} 的核俘获后发生的过程，有着显著的不同。

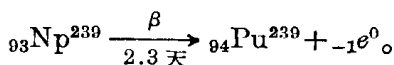
当 U^{238} 俘获中子时，发生下列核轉鏈系：



U^{239} 是不稳定的同位素，經 β 衰变 (半衰期 23 分钟) 后形成錒——电荷为 93 的元素。核反应进行如下：



錒也是 β 放射性的，它的半衰期为 2.3 天。新的超鈾元素有 94 个电荷，质量数为 239：



因此， U^{238} 經两次 β 衰变后变为 Pu^{239} 。它是比較稳定的同

位素(Pu^{239} 具有 α 放射性,半衰期为 24000 年)。

当 U^{235} 俘获中子时,形成很不稳定的同位素 U^{236} ,并分裂成两个不等的部分,称为裂变碎片。由于分裂的结果,释放出大量的能量。裂变反应伴随着飞出 2~3 个新的中子,它们形成不断放出能量的自持链式反应^[3]。

在裂变过程中形成两组中子:瞬发中子和缓发中子。瞬发中子约占中子总数的 99%,并在很短的时间内(大约 10^{-14} 秒)逸出。缓发中子在裂变反应后的几分钟内逸出。

在 U^{235} 裂变时形成的中子同样能引起新核的裂变。因此每个已消耗的中子在裂变反应过程中平均能产生 2.5 个新中子,由它们维持着链式反应。由于存在着大约 1% 的缓发中子,这就有可能控制核反应堆中的链式反应。如果没有缓发中子,则在一定质量的铀中所引起的链式反应只能具有爆炸性。因此要控制核反应堆将是不可能的。

裂变中子的能量区间很广——由 1 千万电子伏特到热能。但是大多数中子具有的能量约为 1~2 百万电子伏特。在图 1 上列有中子按能量的分布图,也就是裂变中子谱。汗安(Hahn)和斯特拉斯曼(Strassmann)发现了具有中等原子量的放射性元素(例如 Ba, La)。这有助于发现裂变过程。后来一些关于裂变过程的研究

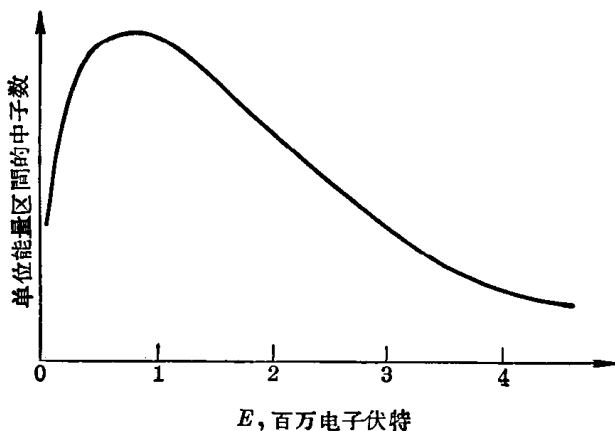


图 1 裂变中子谱

究表明，有 30 个以上不同的 U^{235} 分裂方案存在，找到了 60 个以上的裂变的初次产物。它们的质量数处于 72~158 之间。

图 2 上列有与质量数有关的裂变产物产额。因为在每个裂变之后形成两个碎片，则对所有的质量数而言，全部产额为 200%。该图的横坐标为质量数，而不是原子序数，因为很多裂变碎片是 β 放射性的，因此原子序数在不断地变化。由图可见，最可能的裂变产物是质量数为 95 和 139 的。

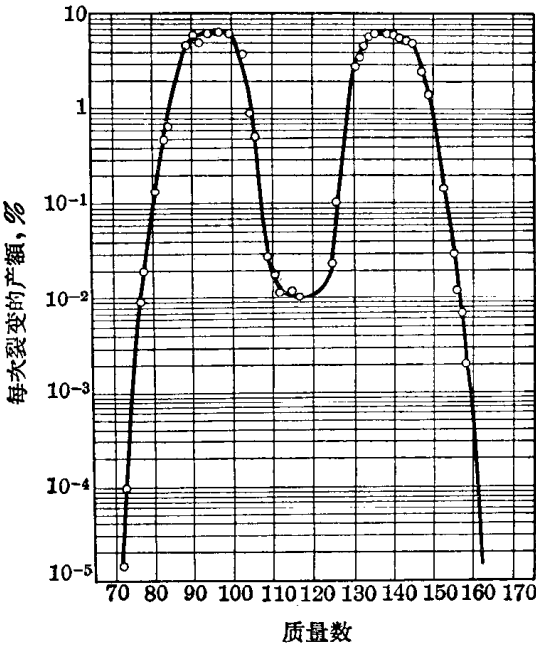


图 2 U^{235} 以热中子裂变时的产物产额

根据平均计算可以认为，铀在裂变过程中释放出的能量约 195~200 百万电子伏特。该能量的大部分（约 168 百万电子伏特）以裂变碎片的动能形式放出，部分能量（约 24 百万电子伏特）在继续放射性衰变时以 β 粒子、 γ 射线和中微子形式析出。剩下的部分能量被裂变中子和瞬发的 γ 射线带走。

裂变碎片和放射性粒子的动能几乎瞬时转变为热能，由此铀及其周围材料的温度增高。从原子动力学和核子发动机观点看

来,放出能量是裂变过程最重要的结果。

可以算出含 2.563×10^{24} 个原子的 1 公斤 U^{235} 在完全裂变时产生的能量。

因为 1 百万电子伏特 $= 3.83 \times 10^{-17}$ 千卡,则 1 公斤核燃料在完全裂变时能放出下列的能量:

$$2.563 \times 10^{24} \times 190 \times 3.83 \times 10^{-17} = 18.7 \times 10^9 \text{ 千卡}$$

或

$$\frac{18.7 \times 10^9}{860} = 21.7 \times 10^6 \text{ 千瓦小时。}$$

大约 15% 的 U^{235} 的原子俘获中子后转变为同位素 U^{236} ,而不参加裂变过程,所以实际上 1 公斤 U^{235} 燃烧时放出的能量为:

$$0.85 \times 18.7 \times 10^9 = 16 \times 10^9 \text{ 千卡}$$

或

$$0.85 \times 21.7 \times 10^6 = 18.4 \times 10^6 \text{ 千瓦小时。}$$

$$\text{在燃烧} \frac{16 \times 10^9}{7000} = 2.3 \times 10^6 \text{ 公斤标准燃料 (7000 千卡/公斤)}$$

时放出 16×10^9 千卡。在 1 公斤其他类型核燃料 (Pu^{239} 或 U^{233}) 裂变时,大约放出同样数量的能量。所以在 1 公斤核燃料燃烧时放出的能量大约比一般的燃料(煤、石油、泥煤等)多 1~1.5 百万倍。

核燃料的燃耗率可理解为已燃烧的原子数与原子总数之比。例如,若反应堆用天然铀作燃料,在其中 U^{235} 占 0.714%,则并不是所有的 U^{235} 的核都进行裂变,进行裂变的只是其中的一部分,假设为 10~40%,这约为原子总数的 0.07~0.29% 或每吨装料铀的 0.7~2.9 公斤。有时燃烧单位以兆瓦·天/吨铀表示。要使燃料单位为公斤/吨,则必须以 $\frac{\text{兆瓦} \cdot \text{天}}{\text{吨}}$ 除以变换系数 790。例如燃耗率为 1580 $\frac{\text{兆瓦} \cdot \text{天}}{\text{吨}}$,则相应的为 $\frac{1580}{790} = 2$ 公斤/吨。

积累是核反应堆工作的另一个重要特性。积累可理解为由于 U^{238} 原子核俘获中子而形成的新核燃料—— Pu^{239} 的数量。假设反应堆以天然铀为燃料,则 1000 个 U^{235} 核子裂变结果约放出 2500

个中子；其中 1000 个中子用于維持鏈式反应的正常进行，700 个中子将要在反应堆活性区中被不同材料所吸收或逸出反应堆以外，剩下的 800 个中子将被 U^{238} 吸收并轉变为 Pu^{239} 。 Pu^{239} 与 U^{235} 一样，也是一种貴重的核燃料，在燃燒 1 公斤/吨时，积累量将是 800 克/吨鈾。

核裂变机理可借以下模型說明(图 3)。

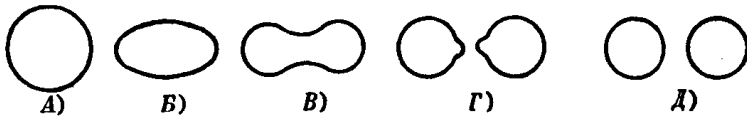
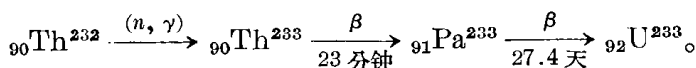


图 3 以液滴模型說明鈾的裂变

在某些情况下，原子核可視為不可壓縮的液滴。在表面張力作用下，液滴极力保持已有的球形。原子核的情况与此类似^[3]。在原子核的质子与中子間作用有核力。液滴在外力作用下处于动荡状态，并且变了形，如图 3 (B) 所示。如果能量不足以克服表面張力，則液滴恢复到原始状态；如果能量超过一定的数值，則液滴具有哑鈴形状(B)。由此液滴不可能再恢复到原始状态，并分成两部分——状态(D)和(E)。对原子核而言，当它俘获中子时，其过程与此基本相同。如果能量尚不足以使原子核成为哑鈴形时，則它可恢复到原来的状态，而剩余的核能以放射性粒子或 γ 射綫的形式放出。如果核能在俘获中子后足以使它成为哑鈴状，則此时静电排斥力能克服核子結合力，原子核分成两个部分。因此对裂变过程來說，必須有一定的激活能使原子核由原始状态 A 轉变为状态 B，此后裂变过程就不可避免了。

U^{235} 無論在俘获具有 0.025 百万电子伏特能量的慢(热)中子或俘获具有小的有效截面的快中子时，都发生裂变。 U^{238} 只有在俘获能量不少于 1.1 百万电子伏特的快中子时才能发生裂变。如上所述， U^{238} 在俘获慢中子时轉变为 Pu^{239} 。 Pu^{239} 的核子性能与 U^{235} 相近，在俘获快中子或慢中子时均可发生裂变。除 U^{235} 和 Pu^{239} 外，同位素 U^{233} 在俘获热中子时也可发生裂变。 U^{233} 是在

照射釷时按下列反应形成的：



以天然鈾作燃料的反应堆是不可能无减速剂条件下工作的，因为在共振峰处 U^{238} 具有很大的俘获中子截面。裂变中子的能量平均为 1 百万电子伏特。在此能量时，天然鈾的散射截面约为 4 靶，而裂变截面约为 0.015 靶。因此，在用天然鈾作燃料的反应堆中，大部分裂变中子将被散射，直到能量相应于 U^{238} 共振区的能量为止。然后，它们未能引起 U^{235} 的继续裂变即被吸收。可用浓缩天然鈾 U^{235} 法或中子减速法来避免这种现象。鈾的裂变截面由 1 百万电子伏特能量时的 0.015 靶增长到当热中子能量时的 3.9 靶。因此， U^{238} 的俘获中子将缩减到最低值，并由于当热能时裂变截面很大，链式反应就成为可能的了。因为慢中子比快中子引起裂变过程的可能性大几百倍，所以在核反应堆中采用中子减速法。能有效地减慢快中子的物质称为减速剂；中子速度降低的过程称为减速。

中子在任何介质的分子中间移动时，经多次散射碰撞之后，其能量约等于该介质的平均动能。该能量与介质的温度有关，所以称为热能。能量减少到热能范围内的中子称为热中子。在室温 ($\sim 27^\circ\text{C}$) 时热中子速度等于 2200 米/秒，与该速度相应的能量是 0.026 电子伏特。

最好的减速剂是重水 (D_2O)，但缺点是价格太贵。石墨、铍或氧化铍、天然水也均可作为减速剂。

核燃料在反应堆中以释热元件的形式存在。释热元件 (TBЭЛ) 是反应堆活性区的主要部件，它是获得 Pu^{239} 、 U^{233} 和热能的源泉。

释热元件是由不同浓缩程度的金属鈾、金属钚或它们的合金制成的核燃料芯棒组成，或者是由金属陶瓷的组合物 (氧化物、氮化物、碳化物等) 组成。在生产钚的反应堆中使用的全金属芯棒的释热元件常称为鈾块。由于核燃料的耐蚀性很低以及为了防止放

射性材料被載熱劑帶走，因而將釋熱元件的芯棒包以外殼使它与周圍的載熱劑（水，氣體，液體金屬）隔絕。為了使外殼与芯棒有良好的熱接觸和防止芯棒与外殼間的相互作用，在芯棒表面上加以某種塗層。

在現代文獻中常按下列特征進行核反應堆的分類

按引起裂變的中子能量分類

- (1) 熱中子堆，如果中子能量低於 1 電子伏特；
- (2) 中能中子堆，如果中子能量變化於 1~1000 電子伏特之間；
- (3) 快中子堆，能量高於 1000 電子伏特。

由於反應堆的類型不同，使用的結構材料也有所不同。因為它們吸收熱、快中子的程度不同。

在中子通過物質時，或者發生散射，或者被吸收。而在可裂變材料中也可能發生裂變。中子散射過程幾率的度量是有效散射截面 σ_s ，而吸收過程幾率的度量是有效吸收截面 σ_a 。散射和吸收截面並不与核的幾何截面相應。例如對氘而言，吸收截面幾乎為核截面的 $\frac{1}{240}$ ，而對 Xe^{135} 而言， σ_a 將為核截面的一百萬倍以上。中子只有在進入以核為中心、假定半徑為 r ($r = \sqrt{\frac{\sigma}{\pi}}$) 的球內的情況下，才會与核發生作用。

截面可用厘米²或靶表示：

$$1 \text{ 靶} = 10^{-24} \text{ 厘米}^2。$$

許多元素的吸收截面隨中子能量的增加而顯著地減小。在表 1 中列出了某些對核子技術有意義的材料的热中子和快中子有效吸收截面的數值。

在姆萊 (Murray, R. L.) 的著作中^[7]舉出了元素的原子和核子的特性方面較完全的数据。

快中子反應堆對動力系統是適宜的，對運輸工具尤其適宜。因為反應堆外形尺寸小且易于選擇材料。為了利用慢中子，必須把快中子的能量降低到熱中子的能量，也就是在反應堆結構中必

表 1 某些材料的热中子和快中子的吸收截面^[4, 5, 6]

元素符号	吸收截面, 靶	
	对 ~ 0.025 电子伏特的热中子	对 > 1.0 百万电子伏特的快中子
H	0.329	5×10^{-5}
H ²	0.00046	—
Be	0.01	—
B	752	—
C	0.0045	1×10^{-5}
O	0.0002	—
Na	0.5	6.26×10^{-3}
Mg	0.059	—
K	1.97	—
Fe	2.43	5×10^{-3}
Al	0.215	—
Zr	0.18	—
Mo	2.4	—
Cd	2400	—
Xe	35	—
Xe ¹³⁵	3.5×10^6	—
Hg	380	—
Pb	0.162	—
Bi	0.033	3.4×10^{-3}

須加入减速剂。

按减速剂与核燃料的相对位置分类 可分为非均匀堆和均匀堆。在非均匀堆中, 核燃料以释热元件的形式置于减速剂内組成規則的棚格, 即由核燃料和减速剂形成不均匀的系統。在均匀堆中, 核燃料和减速剂以原子的, 分子的, 混合好的显微弥散混合物形式出現。目前, 两种类型的反应堆都在使用, 因此, 由于使用两种不同类型的核燃料和反应堆的工作条件不同而产生的金属学問題也有所不同。

按减速剂的类型分类 在反应堆中用来降低中子能量的主要材料是石墨、普通水、重水、鈹和氧化鈹。

按用途分类 核反应堆可分为下列几类:

- (1) 动力反应堆——获得电能用的；
- (2) 生产反应堆——生产新的裂变和热核材料 (Pu^{239} 、 U^{233} 、 H^3) 用的；
- (3) 两用反应堆(双重目的)——用于生产新的裂变材料或热核材料,同时又能生产电能；
- (4) 运输动力反应堆(核子发动机)；
- (5) 生产放射性同位素的反应堆,这些同位素用于物理和化学的研究、生物学、医学以及生产工艺过程中的检验等；
- (6) 各种研究和实验用的反应堆——研究材料和整个结构在中子场中的性状,研究反应堆中的各种物理过程,例如裂变、吸收、散射截面的测定,以及研究中子照相、中子光谱等。

按载热剂的类型分类 为了排除铀或钍裂变时产生的热量,使用下列载热剂:

- (1) 低和高参数的天然水或重水；
- (2) 气体,例如空气、氦气、氮气、碳酸气、氘气等；
- (3) 液体金属和合金 (Na 、 K 、 $\text{Na}+\text{K}$ 的共晶体、 Pb 、 Bi 、 $\text{Bi}+\text{Pb}$ 的共晶体、 Li 、 Hg 等)；
- (4) 高沸点的有机化合物。

水是容易得到而又经济的载热剂。它已被充分地研究过。同时它也可作为减速剂。但由于水的沸点很低,在压力提高不大时不可能使从反应堆出来的载热剂有较高的温度。如果要提高水压,则使反应堆的结构更加复杂。使用水作为载热剂的反应堆可分为两类:铀-石墨反应堆,其中水是载热剂,而石墨是减速剂;水-水反应堆,其中水作为减速剂和载热剂。

在水冷式的反应堆中,以工艺管道(在其中放有释热元件)或以反应堆外壳承担水压。苏联某原子发电站的反应堆,就是以石墨为减速剂和带有加压水的反应堆^[8]。反应堆置于安装在混凝土基础上的钢制金属外壳内。活性区由128根工艺管道组成,它们之间充有石墨。下面举出可以代表该反应堆的一些参数: