

**CNIC-01550**  
**SINRE-0092**

**U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>-Al 弥散型燃料元件的特点及其应用**  
**PROPERTIES OF U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>-Al DISPERSION FUEL**  
**ELEMENT AND ITS APPLICATION**  
*(In Chinese)*

**中国核情报中心**  
China Nuclear Information Centre

CNIC-01550  
SINRE-0092

## U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>-Al 弥散型燃料元件的特点及其应用

尹昌耕

(中国核动力研究设计院, 成都, 610005)

### 摘 要

详细地描述了铀硅燃料的性能。介绍了 U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>-Al 弥散型燃料的性能, 包括 <sup>235</sup>U 装载量, 燃料板芯体与包壳间结合质量, 燃料芯体几何尺寸。讨论了铀分布均匀性与“狗骨”现象, 最小包壳厚度, 芯体气孔率以及燃料芯体抗水腐蚀能力等。还描述了 U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>-Al 弥散型燃料元件的制造工艺, 燃料板的无损检测, 燃料元件的组装工艺以及 U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>-Al 燃料元件在国内外的应用情况。

**Properties of  $U_3Si_2$ -Al Dispersion Fuel  
Element and Its Application**  
*(In Chinese)*

YIN Changgeng  
(Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610041)

**ABSTRACT**

The properties of  $U_3Si_2$  fuel and  $U_3Si_2$ -Al dispersion fuel element are introduced, which include U-loading; the banding quality, U-homogeneity and “dog-bone” phenomenon, the minimum thickness of cladding and the corrosion performances. The fabrication technique of fuel elements, NDT for fuel plates, assemble technique of fuel elements and the application of  $U_3Si_2$ -Al dispersion fuel elements in the world are introduced.

## 引言

1978 年美国能源部为了防止核扩散政策提出了降低研究和试验反应堆用燃料富集度研究计划 (RERTR)，后由国际原子能机构支持协助该计划的实施。RERTR 的主要任务是开发一种技术，以满足在研究堆中用低浓铀 (LEU) 燃料取代目前使用的高浓铀 (HEU) 燃料，并对反应堆的性能、经济性和安全性方面没有明显的影响。关键的技术是如何增加燃料芯体中铀的装载量。经多年努力研究后发现  $U_3Si_2$ -Al 弥散型燃料既具有较高的铀密度，又有良好的抗辐照性能。特别是橡树岭研究堆全堆芯论证成功以后，于 1988 年美国核管会正式批准在研究堆中应用铀密度达  $4.89 \text{ g/cm}^3$  的  $U_3Si_2$ -Al 弥散型燃料。

目前全世界约有 330 座正在运行的研究试验堆，在这些反应堆中，约 90% 可以使用低浓铀  $U_3Si_2$ -Al 弥散型燃料，因此  $U_3Si_2$ -Al 弥散型燃料因其高铀密度、稳定的辐照性能而广泛地应用于研究堆燃料元件。

## 1 燃料系统

硅化铀燃料系统的发展类似于早期  $UAl_x$  燃料系统的发展，在铝包壳的燃料板芯体内，用  $U_3Si_2$  取代  $UAl_x$  来作为铝基体中的弥散燃料。表 1 给出了一些铀化合物密度的比较。可以看出，硅化物的铀密度明显高于其它铀化合物。但 LEU 燃料芯体内使用高体积百分比含量 (40%~50%) 的燃料。表 2 为体积分数为 45% 的燃料芯体相对应的铀密度。这大大超过 HEU 燃料的装载，也就促使研究人员特别要考虑燃料板的制造工艺的改进。由于制造弥散型燃料板采用了高体积百分比含量，这就会出现“狗骨”现象、最薄包壳厚度和燃料粒子杂散等问题，采用适当的工艺是可以解决这些问题的。

表 1 各种铀化合物密度比较

化合物	$UO_2$	$U_3O_8$	$UAl_2$	$UAl_4$	USi	$U_3Si_2$	$U_3Si$	UC	UN
铀密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	10.96	8.4	6.8	6.0	10.86	12.2	15.6	13.6	14.3

表 2 铝基弥散型燃料中各种铀化合物密度 (体积分数为 45%)

化合物	$UAl_x$	$U_3O_8$	$U_3Si_2$	$U_3Si$	UN
铀密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	2.1	3.2	5.1	6.6	6.1

## 2 $U_3Si_2$ 弥散型燃料的性能

### 2.1 燃料芯体气孔率

在生产过程中燃料芯体内留下的气孔是有用的，它可以调节燃料内裂变产物所引起的燃料粒子肿胀。芯体气孔率随弥散在铝基体内的燃料体积的增加而增加。世界各国生产的全尺寸燃料板气孔率范围为 4%~10%。

### 2.2 热容量

燃料芯体热容量是燃料和铝基体热容量的总和。在高温下影响  $U_3Si_2$  芯体热容量的主要因素是气孔率。 $U_3Si_2$  芯体在室温下随着燃料体积含量从 0 增到 50%，热容量从 2.44 下降到  $2.13 \text{ J/cm}^3 \cdot \text{K}^{[1]}$ 。热容量随燃料体积的增加而减少是由于随着燃料体积增加，气孔率也增加的原故。

### 2.3 $U_3Si_2$ 和铝的相容性

在高温下， $U_3Si_2$  和 Al 之间出现反应，生成  $U(Al,Si)_3$ 。在温度低于 570 K 下，这种反应并不明显，但在约 890 K 温度下反应迅速，此温度高于燃料芯体基体和包壳所用铝合金的熔点。

### 2.4 腐蚀性能

在小燃料板上钻一小孔（包壳钻通达到芯体），浸在沸水中进行腐蚀实验，经过 168 h 后，在水中没有发现放射性物质。在全切开的实验中也未发现晶粒脱落<sup>[2]</sup>。如图 1 所示。

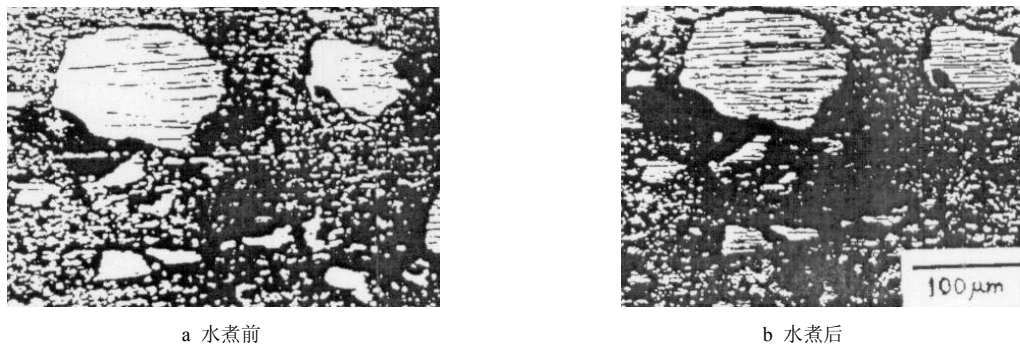


图 1 燃料板在沸水中腐蚀前后的金相照片

### 2.5 辐照性能

燃料小板和全尺寸燃料组件都已在美国橡树岭国家实验室（ORR）中辐照，并经过辐照后检查。辐照件的  $^{235}\text{U}$  燃耗高达 98%，燃料装载量达到制造上的上限制（即体积分数为 50%），实验结果表明没有发现裂变产物泄漏，燃料板无大的肿胀，没有出现弯曲、起泡或其它异常现象。从图 2（几种燃料的辐照性能曲线）中可看出，随着燃耗增加， $U_3Si_2$ 、 $USi$  和  $UAl_x$  燃料粒子都是线性肿胀行为，可以断定是稳定性燃料。然而  $U_3Si$  在燃耗为  $4 \times 10^{27}$  裂变/ $\text{m}^3$  以上时，出现破裂肿胀，因而它是不稳定的。实际上，生产的燃料粉末不可能精确地具有化学计算成分的  $U_3Si_2$ ，这种燃料粉末主要是  $U_3Si_2$ ，另外还有  $USi$  和  $U_3Si$ ，如图 3 所示。根据图 2 所示几种燃料的辐照性能，

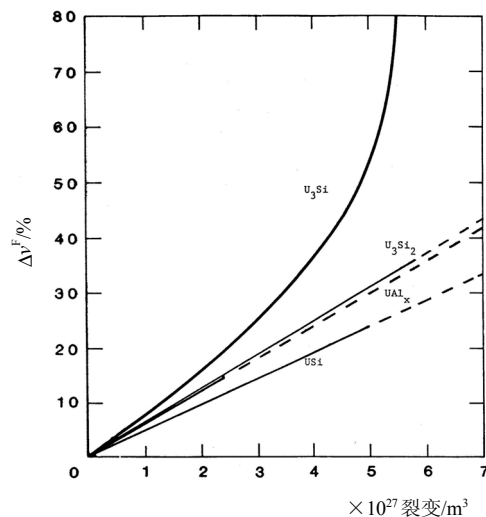


图 2 辐照性能曲线

化合物  $U_3Si$  是不希望存在的，但  $USi$  却是无害的。因此，制备  $U_3Si_2$  时配制成分最好是偏离高硅这边。

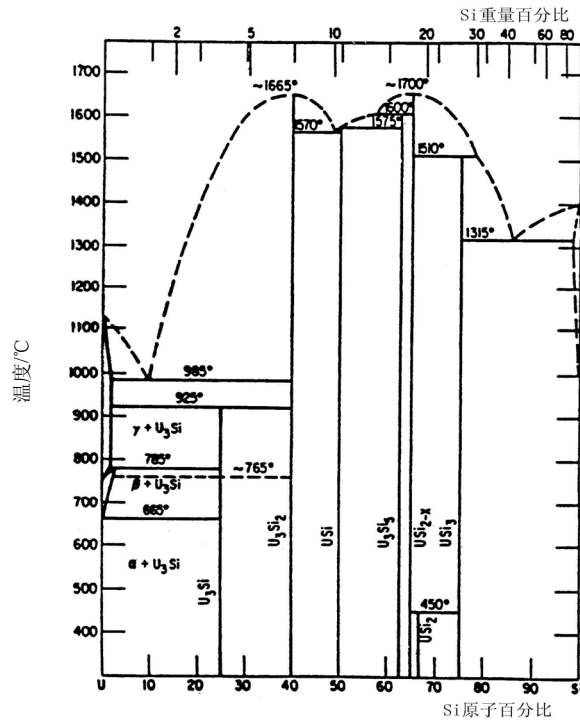


图3 U/Si 相图

图4和图5分别给出了  $U_3Si_2$  和  $U_3Si$  在高燃耗下的裂变气泡形态。从图中可以看出， $U_3Si_2$  的稳定肿胀性能可以归因于燃料内形成的小气泡，即使在高燃耗下，它仍然是独立的小气泡，只是气泡密度增大。另一方面，可以看到气泡聚集是  $U_3Si$  燃料非稳定性肿胀的原因。

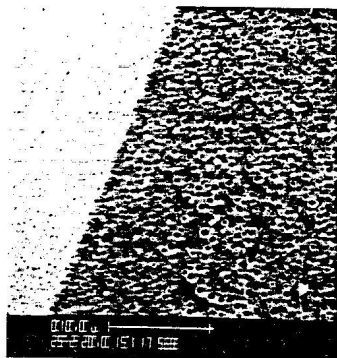


图4  $U_3Si_2$  在 90% 燃耗下裂变气泡形态

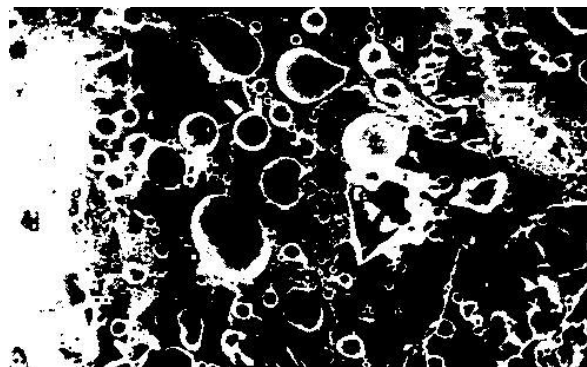


图5  $U_3Si$  在 90% 燃耗下裂变气泡形态

### 3 U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>-Al 燃料元件的制造工艺

核动力研究设计院十多年来对 U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>-Al 弥散型燃料元件进行了大量的研究工作。现制备工艺已经成熟，并建立起一条生产线和一套可靠的质保与质控体系。这条生产线从 1990 年起生产低浓铀 U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>-Al 弥散型燃料元件，其中一些元件已在堆内正常运行了近四年时间。

U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>-Al 弥散型燃料元件的制造工艺特点及产品的主要性能如下所述。

#### 3.1 工艺特点

U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>-Al 弥散型燃料元件的工艺流程如图 6 所示。

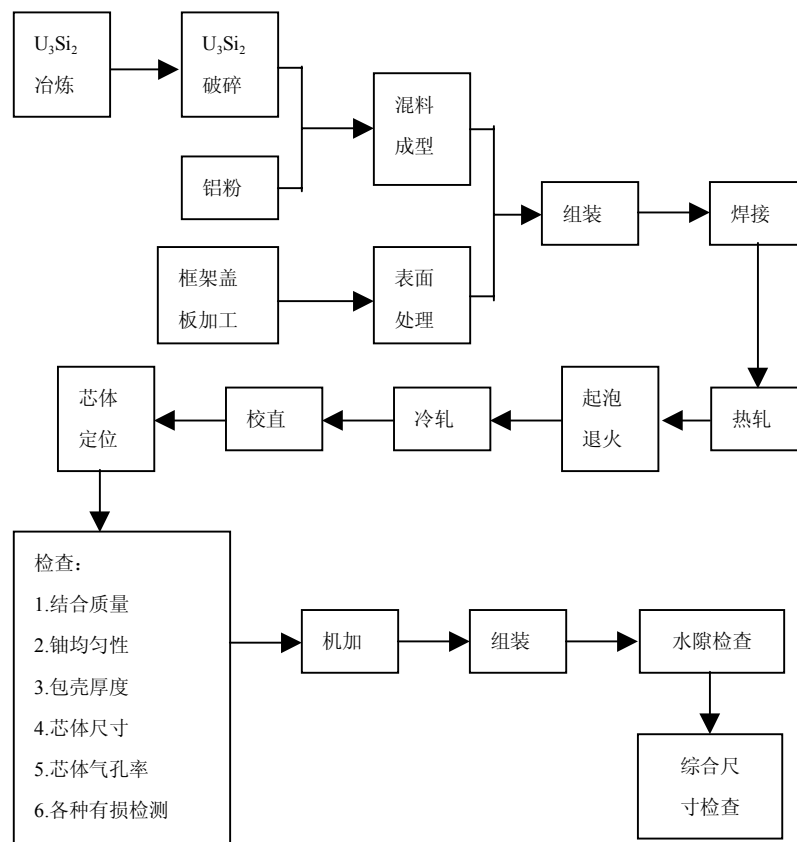


图 6 燃料元件的工艺流程图

燃料板仍采用传统的框架轧制方法。但由于 U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub> 易氧化、易燃烧和包壳材料采用较耐腐蚀的 LT24 铝合金等原因，在燃料板的制备过程中遇到“狗骨”严重，最小包壳厚度不合要求，出现严重“白点”等缺陷，加之 LT24 铝合金结合困难，U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub> 颗粒在热加工中易氧化成粉末等一系列技术难题。解决这些难题成为各国研究者的主要攻克对象。中国核动力院在解决上述难题中也形成了自己独特的工艺方法，并获国家专利两项。

## 3.2 产品性能与分析

### 3.2.1 燃料单板 $^{235}\text{U}$ 装载量偏差

每个芯块的  $\text{U}_3\text{Si}_2$  粉和铝粉都是单独称量的，它的最终  $^{235}\text{U}$  装载量是根据芯块装入框架前的重量按  $\text{U}_3\text{Si}_2$  与铝粉的配比计算出来的。这就消除了混料、压型和除气中物料损失所引起的误差。大量燃料板的统计数据表明： $^{235}\text{U}$  装载量的波动可控制在额定装载量的  $\pm 0.2\%$  之内，远小于技术标准规定的  $\pm 2\%$  的要求。

### 3.2.2 结合质量

LT24 铝合金具有良好的抗腐蚀能力，通常被选作框架与盖板材料，但在  $450\sim 500\text{ }^\circ\text{C}$  的热轧温度下表面很快被氧化，严重影响燃料板的冶金结合。中国核动力院则独立发展了一种全新的 LT24 铝合金表面处理方法。经这种方法处理过的框架与盖板在热轧后的燃料板气泡试验和超声扫描检验中证明结合质量良好。

### 3.2.3 芯体形状和尺寸

采用改良后的框架结构和装配技术轧制出的燃料板芯体的两个端边较平齐，它的两个侧边也很直。燃料板的厚度可以精确的控制要求的范围之内。

### 3.2.4 铀分布均匀性与“狗骨”

燃料板的铀分布均匀性是使用  $\gamma$  射线吸收法测量的，结果表明铀分布是相当均匀的，通常变化在  $\pm 10\%$  之内，X 射线照片也看出铀分布无条纹状或鱼鳞状不均匀现象。

影响“狗骨”程度的因素很多，经调整各相关的参数，特别是采用了改良的框架结构和特殊的装配技术，有效的减少了“狗骨”。测量结果显示，即使铀密度达到要求时，“狗骨”也是较小的。

### 3.2.5 最小包壳厚度

国际通用的最小包壳厚度一般不小于  $0.25\text{ mm}$ 。特殊情况下也要求不小于  $0.30\text{ mm}$  的。最小包壳厚度通常出现在芯体两端的“狗骨”区。由于有效地减小了“狗骨”，最小包壳厚度通常能够达到大于或等于  $0.30\text{ mm}$ 。金相检测表明，即使在个别燃料颗粒嵌入包壳的地方，最小包壳厚度也达到了  $0.29\text{ mm}$ 。

### 3.2.6 芯体气孔率

制造时在燃料板芯体中留下的气孔，为容纳辐照前期燃料颗粒的肿胀提供了一个空间。影响气孔率的因素较多，在其它因素不变的情况下，改变燃料板的冷轧量可以适当调节气孔率大小。我们制备的燃料板，其气孔率为  $4\%\sim 6\%$ 。这是较为适宜的。

### 3.2.7 白点

白点是离开芯体区滞留在框架与盖板之间结合面上的燃料颗粒，它在 X 射线底片上呈现白点像。

技术标准要求在燃料板四周的无芯体区特别是距板边缘  $0.4\text{ mm}$  区域内不应有白点，以免它们成为不应有的热源和裂变产物释放源。如前所述，我们采用了改良框架结构，从根本上杜绝了燃料颗粒在轧制时离开芯体的可能性。所以在操作时对其它环节加以注意，很少出现白点，X 射线底片检查充分证明了这一点。

### 3.2.8 元件组装与水隙

燃料板为退火态，边板为人工时效的 LT24 铝合金，燃料板与边板采用机械滚压法组合。为了保证滚压强度和严格控制水隙公差，我们采用了一些特殊的工艺措施，并在滚



压机构上设有压力指示系统，以保证燃料板与边板的结合强度不小于  $270 \text{ N/cm}^2$ 。

采用磁阻法测量元件水隙，设备精度为  $\pm 0.02 \text{ mm}$ 。大多数元件的水隙都能满足技术要求。

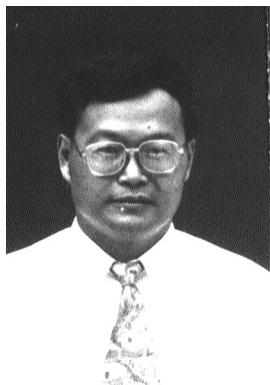
#### 4 应用情况及发展趋势

RERTR 计划从 1978 年开始运转以来，研究、开发的  $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$  弥散型燃料工艺已成熟，并具有完整的辐照数据。在全世界已完成低浓化转化的研究堆中，绝大多数采用低浓铀  $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$  燃料元件。如法国的 OSIRIS 堆，美国的 GTRR 堆，丹麦的 DR-3 堆，日本的 JRR-4 堆等。近年新建的新堆也几乎都采用低浓铀  $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$  燃料元件。因此  $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$  燃料元件正在和将广泛地应用于研究堆燃料元件。

今后的发展是研究开发  $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$  混合型高铀密度燃料相，以及改进制造工艺和改变燃料板或燃料元件的几何结构，制备出更高性能的燃料元件，以适应研究堆改进和发展的需要。

#### 参 考 文 献

- 1 IAEA. Standardization of Specification and Inspection Procedures for LEU Plate-type Research Reactor Fuels. IAEA-TECDOC-467, 1988
- 2 苗志, 孙荣先等.  $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$  弥散型燃料板在沸水中的腐蚀行为. 核动力工程, 1990, 11(4): 56~58



尹昌耕：研究员。1982年毕业于清华大学材料科学专业。现在中国核动力研究设计院材料研究所从事核燃料元件研究工作。

YIN Changgeng: Professor. Graduated from Qinghua University in 1982. Now engaged in research work of nuclear fuel elements in Nuclear Power Institute of China.