

# $U_3Si_2$ -Al 燃料元件板力学性能试验研究

庄红权<sup>1</sup>, 徐 勇<sup>1</sup>, 王习术<sup>2</sup>

(1. 清华大学 核能技术设计研究院, 北京 100084; 2. 清华大学 工程力学系, 北京 100084)

**摘要:**对研究堆使用的不同规格的  $U_3Si_2$ -Al 弥散型复合燃料板元件的力学性能参数进行了试验研究和分析, 同时结合板型燃料组件的结构特点对燃料板在组件运行期间可能受到的拉、压、弯的承载能力进行了测试研究。研究结果表明:国内生产的板状元件在其拉伸性能、结构抗力等方面基本达到了国外类似燃料的水平, 满足了研究堆的设计要求。

**关键词:**  $U_3Si_2$ -Al 板状燃料组件;  $U_3Si_2$ -Al 复合燃料板; 力学特性

**中图分类号:** TB302.3

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6931(2002)06-0514-05

## Mechanical Properties of $U_3Si_2$ -Al Fuel Plate

ZHUANG Hong-quan<sup>1</sup>, XU Yong<sup>1</sup>, WANG Xi-shu<sup>2</sup>

(1. Institute of Nuclear Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Department of Engineering Mechanics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** In the paper, the mechanical properties of  $U_3Si_2$ -Al fuel meats with different sizes which are used in research reactors are investigated and analyzed, at the same time the carrying capacity of tensile, bending and compress of this fuel meat in the fuel assembly during the operation are also investigated and analyzed. The experimental results indicate that the performance, such as tensility, carrying capacity of this fuel meat produced in China can meet the design needs of research reactors.

**Key words:**  $U_3Si_2$ -Al plate-type fuel assembly;  $U_3Si_2$ -Al fuel meat; mechanical properties

弥散体燃料用于研究堆已近 50 年, 有的燃料以不锈钢为基体, 更多是以铝为基体。以铝为基体的弥散体燃料, 经历了 3 个阶段: 1) 上世纪 50 年代的铀铝合金; 2) 60 年代研究的  $UAl_x$ -Al 燃料和  $U_3O_3$ -Al 燃料; 3) 80 年代的铀硅化合物燃料。对于  $U_3Si_2$ -Al 燃料, 美国阿贡国立实验室 (ANL) 在其低浓化 (RERTR) 计划中做了大量的研究与开发工作<sup>[1]</sup>, 经过十多年

的努力已取得决定性进展。ANL/RERTR/TM 系列报告中收录了大部分的研究结果, 主要集中在  $U_3Si_2$  热物性和辐照性能上。到目前为止还没有对  $U_3Si_2$ -Al 力学性能进行过研究<sup>[2]</sup>。我国对  $U_3Si_2$ -Al 板状元件曾做过一些研究<sup>[3]</sup>, 但未见有关燃料板力学性能的研究报导。本工作根据我国试验堆板状燃料组件研制的急需, 在无参考资料可予借鉴的情况下进行

收稿日期: 2001-09-06; 修回日期: 2001-11-09

作者简介: 庄红权 (1976—), 男, 浙江舟山人, 在读硕士研究生, 核能科学与工程专业

试验研究,以为板状燃料组件的设计、研制和运行提供试验根据。

1 板状元件的受力状态和力学试验模型

目前采用的板状燃料组件通常是把 20 或 21 块平板平行地固定到两边的侧板上,然后将燃料板与侧板采用滚压结合的方式组合起来。标准燃料组件结构示于图 1。

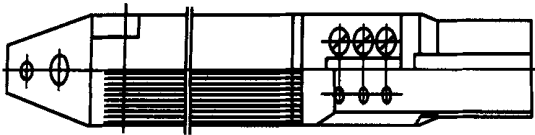


图 1 标准燃料组件的结构  
Fig. 1 Configuration of standard fuel groupware

燃料板与侧板及同一组件中不同燃料板之间均存在温差,在这种自限式组件结构中,燃料板整体必然受到拉或压的温度应力影响;燃料组件中的流道为平行流道,相邻流道间将产生一定的压差,燃料板将受到弯曲的影响;此外,燃料板与侧板的滚压结合程度对燃料组件的运行可靠性也有较大影响。针对上述问题,设计了以下不同的试样。

1) 燃料板拉伸试样

参照国标 GB228-87《金属拉伸试验》和 GB6397-86《金属拉伸试验试样》设计了拉伸试样(图 2)。由于燃料板的宽度仅为 71 mm,因此,试样只能在燃料板的长度方向截取。为了弥补这方面的不足,用燃料板横向尺寸制作了代用试样,以测量燃料板的横向拉伸性能。

需要说明的是:图 2 所示试样尺寸是用 A 型燃料元件板加工的,括号内为用 B 型燃料元件的相关尺寸(下同)。

2) 燃料板抗弯试样

燃料板抗弯试样是在考虑实际燃料板的结构状态之后确定的,即在结构上近似地加了 1 个托座使试件在受弯时与在组件中受弯时的结构刚度相似(图 3)。

3) 压缩试样

压缩试验试样模拟燃料组件中一段燃料板的结构状态,即把一段燃料板的两端用滚压方法镶嵌到两端的侧板中。试样结构示于图 4

4) 燃料板与侧板结合强度试样

结合强度试样在结构上同于压缩试样,其差别在于,试验中对试样采用的加载方式不同,前者为受压,而后者为受拉。

针对两种不同规格的燃料板尺寸,采用了 A、B 两种不同规格的试样,所有试样的生产工艺与实际燃料板、燃料组件的加工工艺一致,所有试样均先做成燃料板,并经起泡试验和超声检

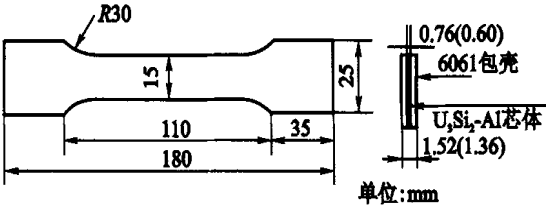


图 2 拉伸试验试样  
Fig. 2 Specimen for tensile test

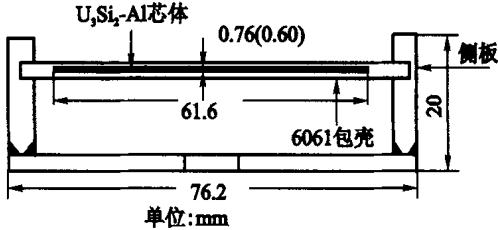


图 3 3 点弯曲试验样品  
Fig. 3 Specimen for 3 point bending test

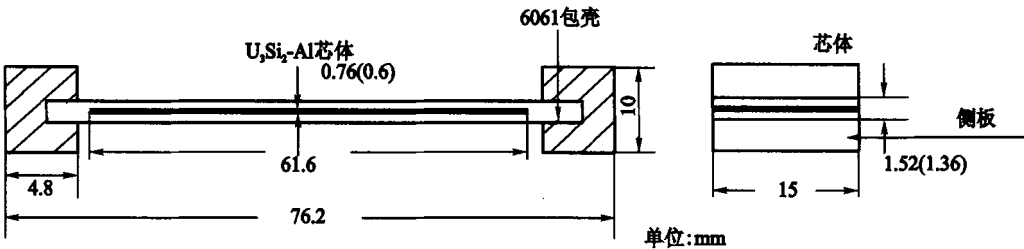


图 4 压缩失稳试验用试样  
Fig. 4 Specimen for compressive test

查,尔后测量主要性能参数。燃料板试样的主要工艺数据列于表 1。

表 1 燃料板试样的主要参数  
Table 1 Performance data of fuel plate

| 试样类型 | 燃料面密度/(mg cm <sup>-2</sup> ) |        |        | 燃料密度/(g cm <sup>-3</sup> ) | 燃料孔隙率/%    | 包壳厚度/mm | 平均燃料厚度/mm |
|------|------------------------------|--------|--------|----------------------------|------------|---------|-----------|
|      | 最大                           | 最小     | 平均     |                            |            |         |           |
| A 型  | 261.03                       | 229.8  | 243.2  | 3.04                       | 7.61~10.09 | >0.32   | 0.78      |
| B 型  | 295.49                       | 228.14 | 260.82 | 4.33                       | 9.73~10.02 | >0.32   | 0.61      |

2 试验

试验在清华大学工程力学系的日本岛津 PWG10 KN 仪器上进行,其容量为 10 KN,测试精度为 0.5%,试验温度为室温,测试仪器能够全程自动记录试样的荷载-位移特性,也可记载应力应变关系。

测试弹性模量和泊松比时,试件中部粘贴了纵横两向 120 Ω 应变片,并用日本 KYOWA 公司的 UCAM-21PA 多点数据应变采集仪循环采集不同力值下的变形。为了校正弹性模量,同时采用规格为 50 mm 的引伸计进行纵向变形测试,以便精确检测材料的弹性模量和泊松比常数。主要试验内容如下。

1) 15 个试件(6 个为退火态)的纵向拉伸试验。

2) 压缩试验:每组 3 个试件;压缩试验方法与拉伸试验方法相同,加力方式为压缩;在压力载荷作用下观测力与位移间的关系,测得试

件的临界力。

3) 弯曲试验:每组 3 个试件;为测量弯曲刚度,采用千分表(百分表)及试验装置定位方式测试挠度(铅垂受力方向上的位移)与载荷间的关系,得到力与弯形之间的关系曲线。

4) 燃料板与侧板结合强度试验:每组 3 个试件;为使试验反映试件的真正结合强度,设计了一个专用辅助夹头,将拉伸力尽可能作用在试件中心。

3 主要试验结果  
3.1 拉伸试验

拉伸试验对两类燃料板的冷作状态和退火状态样品进行了测试,测试的统计结果列于表 2。在表 2 中:σ<sub>b</sub> 为拉伸强度;σ<sub>0.2</sub> 为屈服强度;σ<sub>b</sub>、σ<sub>0.2</sub> 和延伸率的置信水平均为 99.9%;E 为弹性模量,置信水平为 99.9%;μ 为泊松比。

表 2 拉伸试验结果  
Table 2 Results of tensile test

| 试样类型 |    | E/ GPa |       |       | σ <sub>b</sub> / MPa | σ <sub>0.2</sub> / MPa | μ     | 延伸率/ %  |
|------|----|--------|-------|-------|----------------------|------------------------|-------|---------|
|      |    | 平均     | 最大    | 最小    |                      |                        |       |         |
| A 型  | 冷作 | 64.0   | 87.2  | 40.7  | ≥109.69              | ≥49.5                  | 0.26  | ≥1.53 % |
|      | 退火 | 58.33  | 67.37 | 49.26 | ≥106.52              | ≥65.0                  | 0.278 | ≥3.43 % |
| B 型  | 冷作 | 65.2   | 75.9  | 54.5  | ≥115.87              | ≥50.2                  | 0.278 | ≥1.18 % |
|      | 退火 | 59     | 79.1  | 39.5  | ≥95.24               | ≥62.17                 | 0.278 | ≥3.45 % |

图 5 为由燃料板拉伸试验测得的应力-应变曲线。从图 5 可看出,退火燃料板的拉伸性能相对稳定,分散度较小。

3.2 压缩失稳试验

测试了两种燃料板的各 7 个试样。每类试

样的试验值均极其接近,不同类型试样的失稳荷载之差在 10%以内。失稳荷载的平均值为:A 型 1 040.8 N·cm<sup>-1</sup>,B 型 677.9 N·cm<sup>-1</sup>;方差为:A 型 44 N·cm<sup>-1</sup>,B 型 5.5 N·cm<sup>-1</sup>。压缩失稳曲线示于图 6。

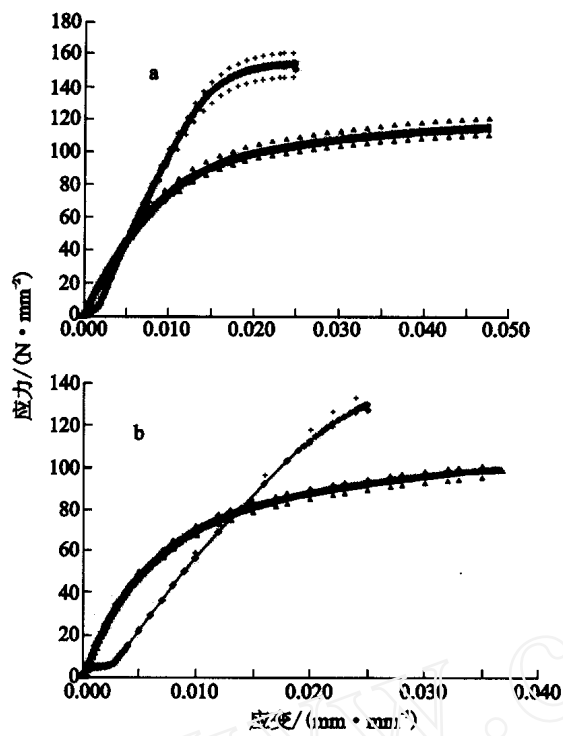


图5 燃料板-拉伸试验应力-应变曲线  
Fig. 5 Stress-strain curves for tensile test  
a—A 型试件;b—B 型试件  
+——冷作态;▲——退火态

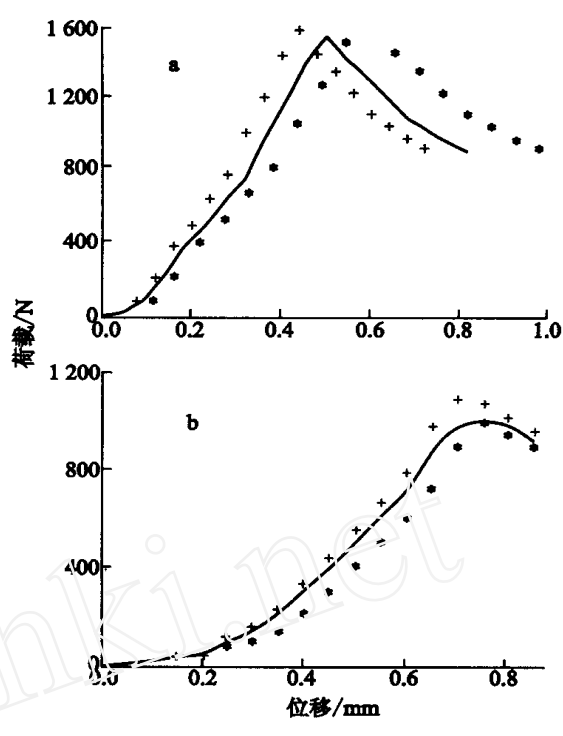


图6 燃料板压缩失稳曲线  
Fig. 6 Load-displacement curve  
for compressive test  
a—A 型试件;b—B 型试件  
+——冷作态;\*——退火态

3.3 弯曲试验

试验中,用集中载荷代替均布荷载。试验时,在试件的端部和中部贴上应变片。

根据应变片测量结果,变曲试件基本上与固定状态的薄板弯曲接近,也不排除个别燃料板弯曲试样因与侧板的结合状态而出现弹性支座情况。根据固支三点弯曲得出的不同挠度下的抗弯弹性模量和方差列于表3,弯曲试验的荷载位移曲线示于图7。

3.4 结合强度

燃料板与侧板之间通过滚压产生塑性变形和密切结合。燃料板和侧板之间的结合强度  $P_{max}$  的平均值为:A 型,450.7 N·cm<sup>-1</sup>,B 型

478.3 N·cm<sup>-1</sup>;方差为:A 型 25.8 N·cm<sup>-1</sup>;B 型 9 N·cm<sup>-1</sup>。 $P_{max}$  为拉伸试验结合松动时的最大荷载,它根据试验统计数据外推获得,其置信度为 99.9 %。由于试件的小台阶左右不很对称,拉伸时受力的均匀性不理想,影响了部分试件测试数据的重复性。

燃料板和侧板之间的结合力受燃料板厚度、侧板槽宽以及其加工公差影响,测试结果有一定离散,从多个小试件测量结果的平均值来看,够满足工程要求。从拉拔试验曲线(图8)来看,即使燃料板在槽内发生相对滑动,但结合力下降缓慢,滑动位移达 1.5 mm 时,结合力仍在 100 N 以上。

表3 燃料板抗弯变弹性模量  
Table 3 Elastic modulus of bending

| 试样类型 | $E_{0.5}$ / GPa |     | $E_1$ / GPa |     | $E_{1.5}$ / GPa |     |
|------|-----------------|-----|-------------|-----|-----------------|-----|
|      | 平均值             | 方差  | 平均值         | 方差  | 平均值             | 方差  |
| A 型  | 40.4            | 1.4 | 51          | 0.5 | 38.6            | 0.5 |
| B 型  | 41.7            | 0.6 | 41.9        | 1.2 | 38.8            | 0.1 |

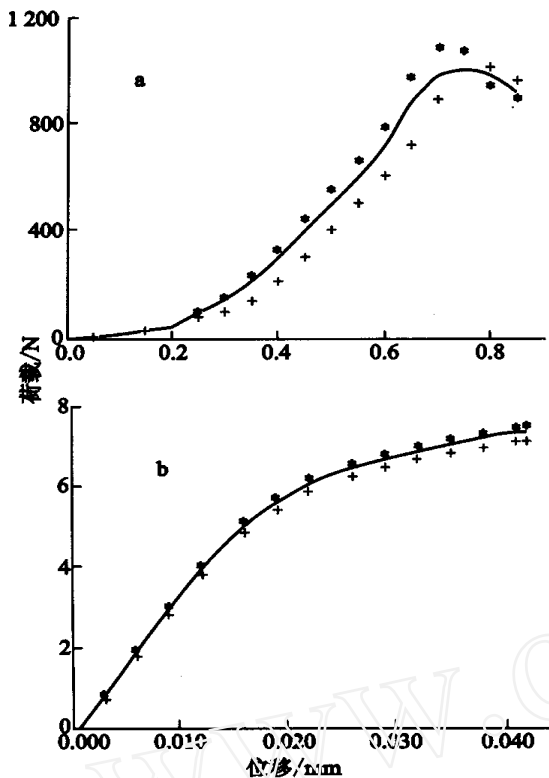


图 7 燃料板固支弯曲应力应变曲线

Fig. 7 Stress-strain curves for bending test

a—A 型试件;b—B 型试件  
\* ——冷作态; + ——退火态

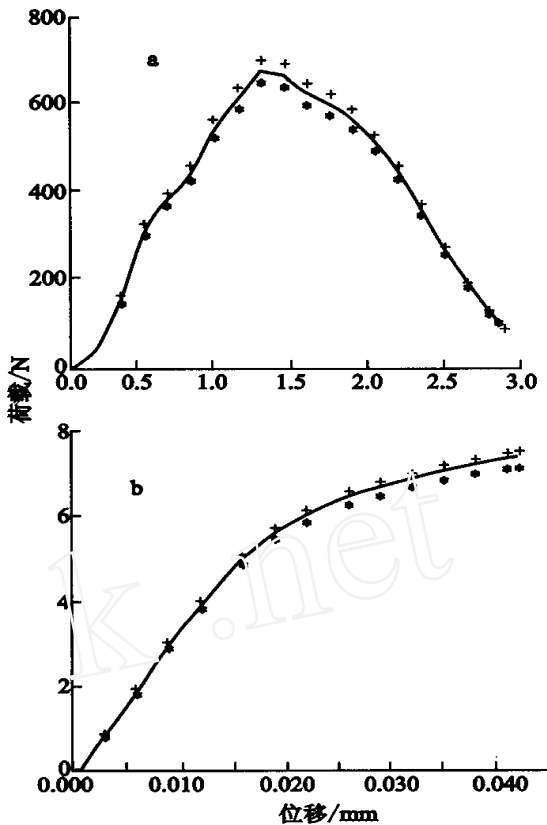


图 8 燃料板结合强度曲线

Fig. 8 Curves of binding intensity

a—A 型试件;b—B 型试件  
+ ——冷作态; \* ——退火态

#### 4 结论

1) 燃料板的拉伸试验结果表明:燃料板的强度指标与国外  $U_3Si_2-Al$  相近,但延伸率明显偏低,拉伸断口是脆性的,工艺上的改进有一定潜力。

2) 弯曲试验表明:燃料板与侧板之间的结合强度基本是固支状态。

3) 结合强度和燃料板压缩失稳载荷偏低,这对燃料组件设计是安全的,有利于防止先失稳后脱落、堵塞流道的事件发生。

4) 从结合强度试验结果来看,即使燃料板在组件的侧板内有滑动,但不会因此而导致燃

料板在组件内的结构失效,燃料板之间在结构上是相对可靠的。

#### 参考文献:

[1] Wiencek TC. Summary Report on Fuel Development and Miniplate Fabrication for the RERTR Program: ANL/ RERTR/ TM15 [ R ]. USA: ANL , 1988.

[2] BRT 弗罗斯特. 核材料(第 1 部分):材料科学与技术丛书(第 10A 卷) [ M ]. 周帮新等译. 北京:科学出版社,1999. 43 ~ 99.

[3] 孙荣先.  $U_3Si_2-Al$  弥散型板状燃料元件 [ J ]. 核动力工程,1990,11(2):70 ~ 74.