

新型 U_3Si_2 -Al 燃料组件的工程验证试验研究

张之华¹, 钱达志¹, 徐 勇², 阮於珍³, 徐显启¹, 刘耀光¹, 米向秒¹

(1. 中国工程物理研究院 核物理与化学研究所, 四川 绵阳 621900;

2. 清华大学, 北京 100084; 3. 中国原子能科学研究院, 北京 102413)

摘要:新研制的 U_3Si_2 -Al 板状弥散型燃料组件结构复杂, 国内对该燃料组件的结构材料、制造工艺、力学性能、运行特性等均缺少经验及评定标准。为得到该新型燃料组件的各种性能参数, 开展了燃料包壳及结构材料的力学性能试验、燃料板及包壳材料的热物性及热稳定性试验、燃料板的力学性能试验、燃料板的正电子湮灭寿命试验、燃料组件的水力冲刷和解体试验等一系列的工程验证试验和专项研究, 得到的各项实验数据为燃料组件的结构设计、可靠性分析、安全审评提供了重要依据, 也为燃料组件的加工制造、堆内使用管理提供了借鉴。

关键词: U_3Si_2 -Al; 燃料; 工程; 验证试验

中图分类号: TL352; TL214

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2012)09-1112-06

Partial Engineering Validate Test Investigation of New U_3Si_2 -Al Fuel Subassembly

ZHANG Zhi-hua¹, QIAN Da-zhi¹, XU Yong², RUAN Yu-zhen³,

XU Xian-qi¹, LIU Yao-guang¹, MI Xiang-miao¹

(1. Institute of Nuclear Physics and Chemistry, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China;

2. Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract: The structure of the new U_3Si_2 -Al fuel plates subassembly is very complex, and experience and criterion of its structural material, manufacture technicality, mechanics capability and running property are lack. To attain various capability parameters of this new fuel subassembly, a series of engineering validate test and investigation were developed, concluding mechanics capability test of fuel blanket and structural material, thermal property and thermal stability test of fuel plates and blanket material, mechanics capability test of fuel plates, positron annihilate life test and waterpower erode and disassembly test of fuel subassembly, etc. The attained various test data provide important gist on structural design, dependability analysis and safety auditing of fuel subassembly, and provide reference on machining manufacture, reactor use and manager of fuel subassembly.

Key words: U_3Si_2 -Al; fuel; engineering; validate test

燃料组件是组成反应堆活性区的基本单元,是反应堆的释热部件,也是反应堆热量的来源。由于反应堆安全运行的特殊要求,决定了燃料组件结构复杂、制造精密、质量保证严格。燃料组件的安全是反应堆安全的基本保障。

为满足反应堆对燃料组件可靠性、经济性、灵活性不断提高的要求,燃料组件的研发、设计、制造一直在持续改进。研究堆燃料的发展历程是,由早期的金属燃料,到 UO_2 陶瓷芯块燃料,再到现在的弥散型燃料。为防止核扩散, U_3O_8 -Al、 UAl_x -Al 等高浓铀燃料组件相继被 U_3Si_2 -Al 和 (U-Mo)-Al 低浓铀燃料组件所代替。由于 U_3Si_2 -Al 板状弥散型燃料组件在国内是首次研制,为保证其设计的合理性、结构的可靠性、运行的安全性,其包壳及结构材料的热物性、燃料板的综合性能、燃料组件的运行特性等必须通过试验验证。

为获取铀密度为 3.02 g/cm^3 、不同工艺状态 U_3Si_2 -Al 弥散型燃料组件的相关数据,本工作进行 6061 铝合金力学性能试验、燃料板的热物性及热稳定性试验、燃料板的力学性能试验、燃料板的正电子湮没寿命谱研究、燃料组件的水力冲刷试验等多项工程验证试验和专项研究,试验数据为该燃料组件的设计、制造、安全审评等提供可靠的依据,也为以后燃料组件的运行使用提供借鉴。

1 新型 U_3Si_2 -Al 燃料组件的结构

1.1 标准燃料组件的基本参数

板型燃料组件分为标准燃料组件和跟随燃料组件两种。标准燃料组件(结构示意图示于图 1)由燃料板、侧板、提梁、梳状定位块、管座、细长销以及螺钉等零部件组成,外形尺寸为 $76.2\text{ mm} \times 76.2\text{ mm} \times 1\,150\text{ mm}$,装载 20 片燃料板。燃料板通过滚压镶嵌在侧板的凹槽中,在两块燃料板之间构成一定的冷却通道,以带走堆芯的热量。下管座与侧板通过销钉连接,在两侧板的上端装有吊装提梁。跟随燃料组件除装载的燃料板数量、组件两端的连接头与标准燃料组件不同外,其他主要的结构参数及相关性能指标与标准燃料组件类似。

1.2 燃料板的基本参数

燃料板采用框架轧制工艺制造,将 U_3Si_2 颗

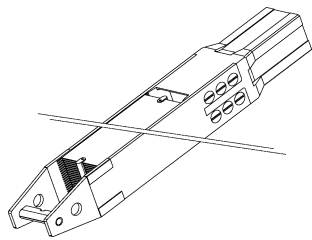


图 1 标准燃料组件

Fig. 1 Standard fuel subassembly

粒弥散在基体 Al 粉中,烧结压制成 U_3Si_2 -Al 芯体,再将芯体与包壳铝板经过轧制而冶金结合。外形尺寸为 $1.52\text{ mm} \times 71.0\text{ mm} \times 780\text{ mm}$,重 307.5 g ,其中 U_3Si_2 -Al 弥散芯体尺寸为 $0.76\text{ mm} \times 61.6\text{ mm} \times 750\text{ mm}$,重 183 g 。燃料板设计厚度为 1.52 mm ,采用富集度为 $(19.75 \pm 0.20)\%$ 的低浓铀,铀密度为 $(3.02 \pm 0.03)\text{ g/cm}^3$,孔隙率为 9.06% 。 U_3Si_2 -Al 弥散芯体设计厚度为 0.76 mm , U_3Si_2 中 Si 含量为 7.48% ;结构材料为 T6 状态 6061 铝合金;包壳为 O 状态的 6061 铝合金,设计厚度为 0.38 mm 。

2 部分工程验证试验及结果

为得到 U_3Si_2 -Al 弥散型燃料组件的相关数据,进行了多项专项工程试验,本文就其中几项主要验证试验的情况进行介绍。

2.1 燃料板包壳及结构材料的力学性能试验

铝及铝合金具有较低的热中子吸收截面、较好的抗腐蚀性能及耐辐照性能等优点,在反应堆中得到广泛应用。由于燃料组件的工作温度在 $100\text{ }^\circ\text{C}$ 以下,热点温度为 $110 \sim 120\text{ }^\circ\text{C}$,事故时温度为 $120 \sim 130\text{ }^\circ\text{C}$,热点温度约为 $200\text{ }^\circ\text{C}$ 。因此,得到燃料组件包壳及结构用 6061 铝合金材料在各种温度下的力学性能数据十分重要,是燃料组件设计的依据。

本文主要针对 T6 状态和 O 状态两种铝合金,在 $60 \sim 250\text{ }^\circ\text{C}$ 下的力学性能参数进行测量。由测量数据可知,不论是 T6 状态的板材、棒材,还是 O 状态的板材,随着试验温度的增加,其力学性能呈规律性变化。抗拉强度、屈服强度随温度增高,逐渐下降;延伸率、断面收缩率随温度增高,逐渐增大。在 $60 \sim 120\text{ }^\circ\text{C}$ 范围内,随着温度的增高,T6 状态铝材的力学指标变化

明显,而 O 状态铝材的力学性能指标变化不大;在 150 ℃以后,T6 状态和 O 状态铝材的力学性能变化趋势均略有增大,抗拉强度和屈服强度下降较快,延伸率及断面收缩率明显增大,材料的强度变低、塑性增强。

根据正常及事故工况燃料组件表面的温度,选用 T6 状态铝材作为结构支撑材料,选用 O 状态铝板作为包壳材料,能够满足设计需要。O 状态板材的力学性能曲线示于图 2。其高温力学性能能较好地满足包壳材料的需要,高温时的高延伸率性能可减缓燃料芯体膨胀压力,减小燃料板破裂的概率,避免放射性核素的大量释放。

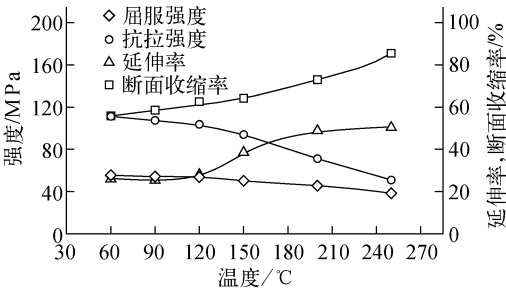


图 2 O 状态板材的力学性能曲线

Fig.2 Mechanics property of O state material

2.2 燃料板包壳及结构材料的热物性研究

燃料板包壳材料的热物性能直接影响燃料板的综合性能;结构材料的热物性影响燃料组件的整体性能。采用标准试样,对 T6 状态、棒状 6061 铝合金的热膨胀及比热进行了测量;对 O 状态、板状的 6061 铝合金进行了热扩散系数测量。得到的主要热物性参数列于表 1。6061 铝合金的热膨胀率和比热随着温度的升高而逐渐增加,热扩散系数随温度升高,缓慢减小。

2.3 燃料芯体的热物性及热稳定性研究

同样,U₃Si₂-Al 芯体的热膨胀随着温度的升高而逐渐增加。比热随温度的升高而增加,在低温时增加较快,高温时增加较慢。热扩散系数随温度升高,缓慢减小。由于 U₃Si₂-Al 弥散体中包含大量的铝,以上各项指标,6061 铝合金高于 U₃Si₂-Al 弥散芯体,U₃Si₂-Al 弥散芯体高于 U₃Si₂颗粒。

热稳定性试验:将试样放在高温真空干燥

表 1 6061 铝合金的热物性参数

Table 1 Thermophysical property of 6061 aluminium alloy

温度/ ℃	热膨胀率/ %	比热/ (J·g ⁻¹ ·K ⁻¹)	热扩散系数/ (mm ² ·s ⁻¹)
373	0.20	0.964 7	68.51
423	0.31	0.975 2	67.30
473	0.20	0.985 6	66.14
523	0.57	0.996 0	65.01
573	0.70	1.006 4	63.86
623	0.84	1.016 9	62.66
673	0.99	1.027 3	61.38

箱中,进行 30-120-30 ℃、30-250-30 ℃、30-400-30 ℃的多次升降温循环。整个试验过程中,燃料板试样的长度、宽度变化不大,均小于 1%,数据较为离散;体积略有增加,增加值随循环温度升高而加大,均小于 2%;250 ℃以下热循环试验,微型燃料板试样无明显变形;30-400-30 ℃热循环试验后,燃料板出现略有弯曲现象。个别金相样品表面有划伤,燃料 U₃Si₂颗粒外露。经 30-120-30 ℃和 30-250-30 ℃热循环的金相试样,表面及外观无变化。经 30-400-30 ℃热循环的金相试样,芯体裸露的金相试样的包壳外表面上发现有起泡现象;但在芯体不裸露的微型燃料板试样的包壳外表面,未发现起泡现象。

稳定性试验后,通过金相检查,燃料板芯体与包壳结合良好,未发现分离现象;芯体的金相组织未发生变化,芯体无开裂、无碎化现象;芯体有增厚现象,芯体的增厚幅度随试样温度的升高而增加。燃料铀硅颗粒一般在 30~40 μm 左右,个别超过 100 μm,U₃Si₂颗粒随热循环温度的升高而减小;大颗粒上存在裂纹,裂纹呈解理状;温度越高,开裂越严重,裂纹无明显方向性(图 3)。由于 U₃Si₂颗粒的脆性大,初始裂纹大多在燃料板轧制过程中产生,并沿解理面发展。在热循环的热应力下,U₃Si₂颗粒继续开裂,热循环温度越高,芯体开裂越严重。热应力和材料本身的脆性是造成后续开裂的重要原因^[1]。

2.4 不同制造工艺燃料板的力学性能研究

为了解不同的制造工艺对燃料板性能的综

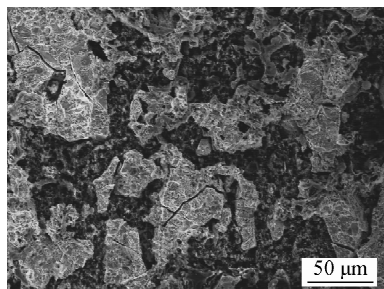


图3 U_3Si_2 颗粒的分布及解理裂纹
Fig. 3 Distribution and texture cracks
of U_3Si_2 particles

合影响,进行了冷作态、回火态、冲刷态3种燃料板的力学性能试验。得到了3种状态下燃料板横向及纵向的抗拉强度、屈服强度、延伸率等力学性能数据。通过对试验数据的分析,得到以下信息。

1) 燃料板在力学性能上,存在各向异性,横向和纵向力学性能存在差异。冷作态工艺状况下,燃料板横向力学性能较其纵向力学性能低20%~30%,回火后差异略有好转,制造过程中轧制工艺对燃料板的力学性能有较大影响。

2) 回火态燃料板拉伸性能相对稳定,分散度较小。热处理方法对材料的力学性能有较显著影响。在不改变燃料板夹层芯体 U_3Si_2 -Al 弥散体的含铀成分条件下,通过改变热处理方式,可改变材料的整体力学性能,改善燃料板的韧性,使之更适用于工程实际。

3) 冷作时效处理燃料板的拉伸极限强度高于回火热处理后燃料板的拉伸极限强度;但回火热处理后,燃料板的力学性能明显改善,其屈服强度较冷作时效处理的高。在反应堆工程中,燃料板单纯的拉伸强度和屈服强度高底不能完全说明燃料板力学性能的优劣。回火态燃料板的延伸率明显大于冷作态,且燃料板回火后,其力学性能的各向异性也略有好转,燃料板内部的应力及微观缺陷也大部分消除,回火工艺有利于燃料板综合性能的改善。

4) 冲刷态燃料板的力学试验数据表明,50 d的110℃水力冲刷实验,对燃料板是一回火和低温时效强化过程;燃料板110℃长期运行的应力损伤小于回火和低温时效的强化作用。

5) 3种燃料板的力学性能数据表明,按照回火态、冷作态、冲刷态的顺序,燃料板样品的力学性能逐渐增大,即使是最低的回火态燃料板的抗拉力学性能(125.27 MPa),仍远大于燃料板的事故工况总应力(49.851 3 MPa),燃料板安全的可靠度仍在99.998 5%以上^[2]。

2.5 燃料板的正电子湮没寿命谱研究

用正电子湮没谱仪对不同状态的3种 U_3Si_2 -Al 燃料板样品的正电子湮没寿命进行了测量及分析,得到不同工艺状况下,燃料包壳材料微观缺陷的形态及变化趋势。

从正电子在回火态、冷作态、冲刷态3种样品中的平均正电子湮没寿命看,按照回火态、冷作态、冲刷态的顺序,平均正电子湮没寿命依次增高,说明样品中的缺陷依次增加,缺陷处的平均电子密度依次减小,正电子的湮没寿命变大。回火态燃料板包壳基体中的微观缺陷以单空位的点缺陷为主,正电子湮没平均寿命约为196.84 ps,在自由基体的166 ps和空位及预空位缺陷的239 ps之间;冷作态中的缺陷以双空位、位错等为主,正电子湮没平均寿命约为265.69 ps,在空位和预空位缺陷的239 ps和空洞及大的空位团缺陷时的466 ps之间;冲刷态中的缺陷以层错、小的空位团等为主,正电子平均寿命约为287.97 ps,在空位缺陷的239 ps和空洞缺陷的466 ps之间;3种样品中均未发现影响燃料板安全的大空位团缺陷。

回火和冲刷等工艺会使燃料板包壳材料中的微观缺陷发生转变,可使燃料板内部的点缺陷得到恢复,消除了燃料板中的应力及大部分微观缺陷,有利于改善燃料板的综合性能。不同工艺状态燃料板试样的力学性能数据,与其对应的正电子湮没寿命谱数据相互印证,呈规律变化。运行工况对燃料板是一低温回火和时效处理过程,运行时的应力损伤小于回火和低温时效的强化作用,燃料板的抗拉强度提高。

2.6 燃料组件的水力冲刷和解体试验

为验证燃料组件结构的合理性、制造工艺的可行性、运行的安全性,进行了燃料组件的堆外冲刷试验和解体试验。燃料组件被安装在大型热工水力试验装置上,试验参数和条件进行了精心的控制。水温为110℃、冲刷介质为去离子水,水质电导率小于2.2 $\mu\text{s}/\text{cm}$,pH =

5.5~6.5,流动方向自上而下,冲刷试验额定流速为7 m/s,流致振动最高流速为18 m/s。累计冲刷时间为50 d后,对燃料组件的结构完整性、动水腐蚀情况等参数进行了检查。

经水力冲刷后,燃料板的包壳及侧板均发生氧化,外观呈银灰色,局部有点腐蚀的现象。侧板和管座、定位梳、定位销、紧固螺钉装配牢固,未发生松动;提梁焊缝、管座螺纹均未发生损伤。对组件3个紧固螺钉作松动试验,松动力矩定为40 N·m,其中2个螺钉直到一字口损坏后仍未松动,另一个松动。组件冲刷后,外观尺寸、形位公差、燃料板之间的间隙等均未发现明显变化。50 d的高速水力冲刷后,燃料组件结构完好。

将冲刷后的燃料组件进行解体检查。对已标记的13块燃料板进行称重,冲刷前总重4 124.20 g;冲刷后总重4 125.08 g,较冲刷前增加0.88 g,增幅0.02%,平均单板增重约0.07 g,可能是氧化膜厚度的增加所致。燃料板冲刷后氧化膜厚度最大值为10 μm ,最小值为3.6 μm ,平均值为7.3 μm ,燃料板冲刷前氧化膜厚度平均值为5.2 μm 。采用扫描电镜能谱仪对燃料板缺陷点坑表面氧化膜成分进行了分析,未发现有其他杂质元素。对冲刷后解剖出的13块燃料板进行超声检验,未发现有不贴紧面积超过3 mm²的,燃料板包壳与芯板结合良好。

冲刷后燃料板的纵向及横向力学性能较冲刷前有明显提高,分别增加16.2%和30.1%,主要原因是燃料板50 d的110 $^{\circ}\text{C}$ 水力冲刷过程,对燃料板来说实际上是低温回火和低温时效强化的过程。冲刷试验后,燃料板与侧板结合强度降低,结合强度最低为26.6 N/mm,最高为50.4 N/mm,平均结合强度降低为67%,燃料板与侧板仍结合完好,符合使用要求。燃料板与侧板结合强度降低的主要原因是:滚压槽的铝和支撑燃料板的铝台都较薄,冲刷过程中的振动使该处疲劳,造成支撑台和下压的铝夹持力降低。

在燃料板和侧板上出现的缺陷主要是点腐蚀和划痕,伴随着部分划痕有点腐蚀,缺陷最深为0.05 mm,围绕焊缝也发现了环状腐蚀(图4)。点状腐蚀的产生有两种可能的原因:一种

是6061铝材可能存在局部偏析或夹杂;另一种是冲刷过程中水质有问题。以上两种原因均可造成点状腐蚀,但水质问题对点腐蚀的影响要大一些。在水力冲刷试验进行约7 d时,曾发现水质变差,燃料组件已发生明显的点腐蚀。立即采取措施,对试验用的去离子水进行处理,严格控制其指标,发现燃料组件的点腐蚀速度明显减缓^[3]。

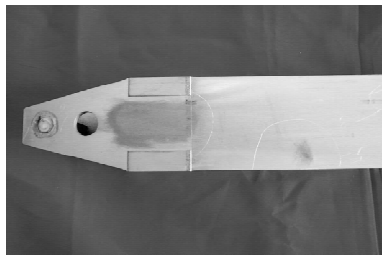


图4 燃料板的环状腐蚀

Fig. 4 Ring cauterization of fuel plate

2.7 燃料组件的其他验证试验

此外,还进行了燃料组件的抗震试验、燃料板的疲劳试验、燃料组件临界热流密度试验、燃料组件水力学特性试验、燃料组件的流致振动试验、控制棒与跟随燃料组件连接性能试验、跟随燃料组件的冲击载荷试验、燃料芯体与包壳结合强度试验、燃料板的弯曲试验等专项验证试验。

3 验证试验结果应用

以上验证试验得到了该新型 $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ 燃料组件多方面的、宝贵的工程实测数据。这些试验数据为燃料组件的完善安全分析、优化结构设计、改进制造工艺等提供了可靠的依据。

燃料包壳及燃料芯体的力学性能数据、热物性试验数据、不同工艺状态下燃料板的力学性能数据,为燃料组件的静强度计算和可靠性校核提供了关键参数。根据以上实测数据进行计算,燃料组件的强度符合使用需要。

根据燃料组件水力冲刷及解体试验的结果,对标准燃料组件的提梁进行了设计修改;根据不同制造工艺冲刷对燃料板力学性能的影响,完善了燃料板的加工制造工艺;根据燃料组件整体腐蚀和点腐蚀的数据,对燃料组件的转

运、运行管理提出了新的要求等。

4 结束语

通过以上验证试验的研究,可知 U_3Si_2 -Al 弥散型燃料是一种性能优良的核燃料,把燃料颗粒相互隔离,使基体的大部分不被裂变产物损伤,燃料颗粒被包围及束缚,允许达到较大块燃料更高的燃耗,能包容裂变产物,并保持与包壳间的良好热传导性能。 U_3Si_2 颗粒与铝基体有较好的相容性。

国内新研制的 U_3Si_2 -Al 弥散型燃料组件的结构是可行的,用 O 状态的 6061 铝合金做包壳材料是合适的。以现在的加工工艺生产的燃料组件,能在实际反应堆运行工况下、在寿期内,保持其结构的完整性、不会发生不可接受的变形;框架及包覆板组成的密封包壳在冷却剂的作用下,在寿期内的均匀腐蚀不会大于 0.05 mm;燃料组件在生产、运输及安装过程中应避免划伤;燃料芯体的裸露会导致燃料组件的堆内性能恶化;回火工艺会改善燃料板的综合性能,能减小其力学性能的各向异性,并消除燃料板内部的大部分应力及微观缺陷;反应堆的运行工况对燃料板是一低温时效处理过程,低温时效的强化作用大于运行时的应力损伤,燃料板的抗拉强度提高,燃料板在其运行周

期内是趋于安全的;反应堆运行时,芯体最高温度在 250 ℃ 以下时,燃料板不会出现起泡现象,燃料组件是安全的、可靠的、稳定的。

验证试验的相关研究为燃料组件的设计优化、完善工艺提供了第一手实验数据和可信的实验结果,也为燃料组件的运行提供了参考依据。

参考文献:

- [1] 阮於珍. 研究堆燃料板热物性及热稳定性试验[R]. 北京:中国原子能科学研究院,2002.
- [2] 徐勇,胡华伟,王习术,等. U_3Si_2 -Al 燃料板拉伸力学性能试验研究[J]. 核动力工程,2003,24(3):231-235.
XU Yong, HU Huawei, WANG Xishu, et al. Tensile mechanical properties of U_3Si_2 -Al fuel plate[J]. Nuclear Power Engineering, 2003, 24(3): 231-235(in Chinese).
- [3] 张之华,徐显启,邓玥,等. U_3Si_2 -Al 板状燃料组件冲刷试验后的解体研究[J]. 核科学与工程,2007,27(1):69-72.
ZHANG Zhihua, XU Xianqi, DENG Yue, et al. Disassembly study of U_3Si_2 -Al fuel subassembly after eroding experiment[J]. Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering, 2007, 27(1): 69-72(in Chinese).