

## U-Al 合金结构和组织分析

## Structure and Microstructure Analysis of U-Al alloy

卢永恒<sup>1,3</sup> 李明阳<sup>2,3</sup> 何亚斌<sup>2,3</sup>Yongheng Lu<sup>1,3</sup> Mingyang Li<sup>2,3</sup> Yabin He<sup>2,3</sup>

- 中核反应堆辐照特种元件制备工艺重点实验室 中国·内蒙古 包头 014035
- 中核新型材料研究与应用开发重点实验室 中国·内蒙古 包头 014035
- 中核北方核燃料元件有限公司 中国·内蒙古 包头 014035

- CNNC Key Laboratory on Fabrication Technology of Reactor Irradiation Special Fuel Assembly, Baotou, Inner Mongolia, 014035, China
- CNNO Key Laboratory on New Materials Research and Application Development, Baotou, Inner Mongolia, 014035, China
- China North Nuclear Fuel Co., Ltd., Baotou, Inner Mongolia, 014035, China

**摘要:** 铀铝合金是生产医用<sup>99</sup>Mo-<sup>99m</sup>Tc放射性同位素的原材料,成分采用Al-25.4wt.%U合金。合金内部的U元素尺寸及分布是一项重要指标,论文对感应熔炼制备的铀铝合金进行了OM、XRD SEM、EDS分析,结果表明,合金铸锭物相组成包括Al相、UAl<sub>3</sub>相、UAl<sub>4</sub>相,组织组成为前期包晶反应析出的规则的UAl<sub>4</sub>组织和共晶产生的Al、UAl<sub>4</sub>相间的片层组织,UAl<sub>4</sub>最大尺寸可达300μm以上。

**Abstract:** Uranium aluminum alloy is a raw material for the production of medical <sup>99</sup>Mo-<sup>99m</sup>Tc radioactive isotopes, consisting of Al-25.4wt.% U alloy. The size and distribution of U element inside the alloy is an important indicator. This paper conducted OM, XRD, SEM, and EDS analysis on the uranium aluminum alloy prepared by induction melting, the results showed that the phase composition of the alloy ingot includes Al phase, UAl<sub>3</sub> phase, and UAl<sub>4</sub> phase, the microstructure consists of the regular UAl<sub>4</sub> structure precipitated by peritectic reaction in the early stage and the lamellar structure between Al and UAl<sub>4</sub> phases produced by eutectic, the maximum size of UAl<sub>4</sub> can reach 300μ above.

**关键词:** U-Al合金; 物相; 组织

**Keywords:** U-Al alloy; phase; organization

**DOI:** 10.12346/etr.v5i2.7727

## 1 引言

铀铝合金是生产医用<sup>99</sup>Mo-<sup>99m</sup>Tc放射性同位素的原材料。文献曾报道过U-10wt.%Al和U-20wt.%Al两种铀铝合金成分<sup>[1]</sup>。U-10%Al合金得到物相为α-U相和UAl<sub>2</sub>化合物,U-20%Al合金得到的物相为α-U相、UAl<sub>2</sub>和UAl<sub>3</sub>化合物<sup>[2]</sup>。论文研究的铀铝合金为Al-25.4wt.%U合金,较文献报道的两种铀铝合金成分区别较大,前述传统的铀铝合金富铀合金,以铀为基体,铝元素含量较低。论文分析的铀铝合金富铝合金以铝为基体,主要区别在于高温相转变过程和常温相组成不同。生产医用<sup>99</sup>Mo-<sup>99m</sup>Tc放射性同位素的前提是制备满足技术要求的原材料Al-25.4wt.%U合金,要求铀铝合金中铀

元素以弥散均匀形式分布,因此,论文对感应熔炼制备的Al-25.4wt.%U合金进行结构和微观组织分析,从而为生产医用<sup>99</sup>Mo-<sup>99m</sup>Tc放射性同位素提供技术参考,是一项有意义的工作。

## 2 实验

### 2.1 Al-25.4wt.%U合金制备

采用ZG-50kg感应炉、石墨坩埚及浇注系统,浇注系统包含浇杯、分流盘、浇注环、模具。将铀、铝按照比例计算称重配料,装料时将密度较轻的铝放置于坩埚下方,铀放置于铝上方,盖上炉盖抽真空送电加热,加热后铝首先熔化,金属铀不断溶解,继续升高熔炼功率使温度升高至设定的合

【作者简介】卢永恒(1978-),男,中国辽宁葫芦岛人,硕士,正高级工程师,从事核材料研究。

金化保温温度，保温过程实施机械搅拌，保温结束后随炉降至设定温度浇铸，铸锭随炉冷却后出炉。

## 2.2 Al-25.4wt.%U 合金铸锭组织分析

采用布鲁克 D8 DAVINCI X 射线衍射仪，对合金铸锭进行物相 (XRD) 分析，采用卡尔·蔡司 Axio Observer Z1m 万能研究级金相显微镜对合金进行金相分析 (OM)，采用 VEGA 3 XMU 扫描电镜对合金进行微观组织观察 (SEM) 和微区成分分析 (EDS)，综合各项检测结果，分析铸锭的物相和组织，由此获得铀元素的存在形式及分布状况。

## 3 结果与讨论

### 3.1 物相分析 (XRD)

图 1 是铀铝合金的衍射分析谱线，结果显示铀铝合金铸锭物相包括 Al 相、 $UAl_3$  相、 $UAl_4$  相，其中  $UAl_3$  相比较少。从图 2 铀铝相图上 Al-25.4wt%U 合金转变线可以看出，合金自液态冷却时，随着温度的降低至液相线点 2 (约 900°C) 时，首先在液体中析出  $UAl_3$ ，剩余液相成分不断变化；温度达到点 3 (约 731°C) 时，由固相  $UAl_3$  和液相包晶反应形成  $UAl_4$ ，随着包晶反应的进行；温度降至点 4 (640°C) 时，余下液相由亚共晶含量转变至共晶含量并发生共晶反应，同时生产 Al 和  $UAl_4$ ，铀在铝中的固溶度几乎为零，生成的 Al 相与纯 Al 接近。当铀含量较高时，实际冷却时从液相析出的  $UAl_3$  部分来不及与液相完成包晶反应生成  $UAl_4$ ，存在一定量的亚稳态  $UAl_3$ <sup>[3]</sup>，而当铝含量超过  $UAl_2$  化合物比例含量时，在合金化充分的条件下，常温不会存在 U 相。因此，Al-25.4wt%U 合金非平衡转变常温组织组成为亚稳态  $UAl_3$ 、包晶产物  $UAl_4$ 、共晶体 Al 和  $UAl_4$ ，常温相组成为 Al 相、 $UAl_3$  相、 $UAl_4$  相， $UAl_3$  相可以在稍低于共晶温度长时间加热，使亚稳态的  $UAl_3$  与铝反应形成稳定的  $UAl_4$ 。

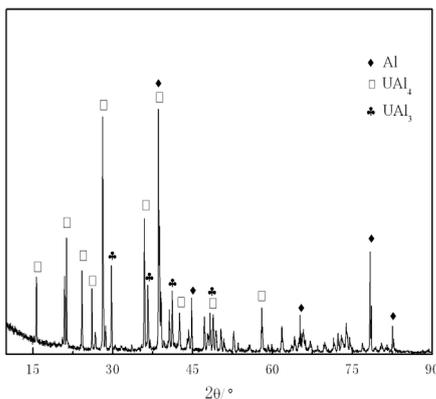


图 1 Al-25.4wt%U 合金衍射谱线

### 3.2 金相分析 (OM)

合金铸锭金相如图 3 所示，铸锭的组织中分布着形状较为规则的第二相，第二相形状包括菱形、回字形，箭头形，最大尺寸达到了 300μm 以上。

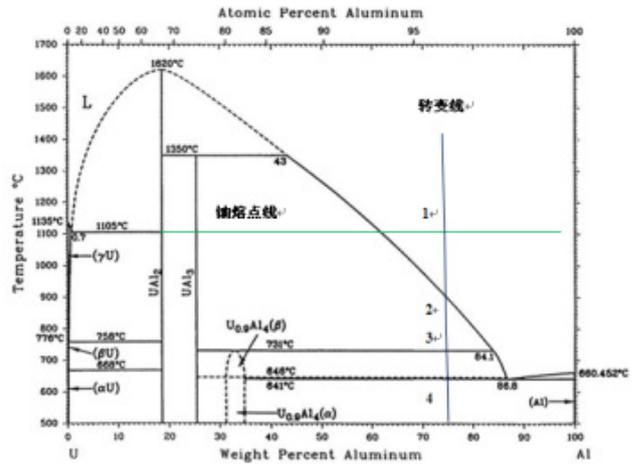


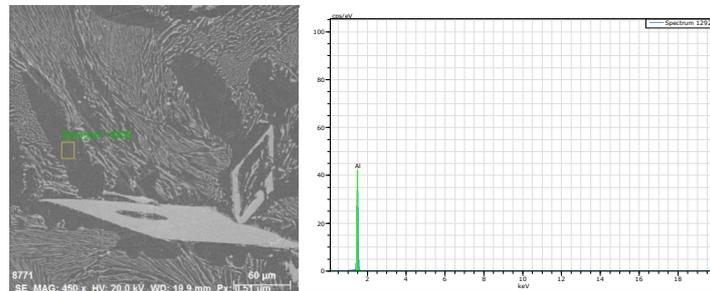
图 2 铀铝相图与 Al-25.4wt%U 合金转变线



图 3 1000°C、1200°C 保温下铀铝金相组织效果图

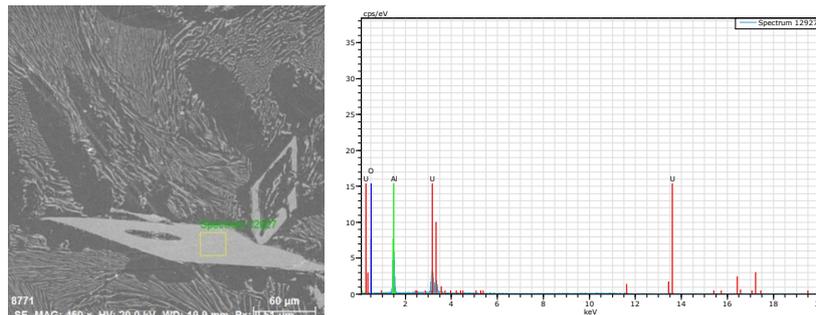
### 3.3 微观组织和微区成分分析 (SEM、EDS)

图 4~图 6 是分别是合金铸锭的 SEM 和同一视场不同区域的 EDS 分析，通过 SEM 背散射图像看出，铸锭中包括 3 种物质，一种为黑色物质，EDS 分析元素为铝，其余两种均为白色物质，EDS 分析主要元素为铝、铀和少量氧元素，少量氧元素应为样品处理时铀铝化合物区域微量氧化增加。进一步观察，两种白色物质存在形态具有明显区别，一类为图像中的条纹状白色物质，其亮度稍低，尺寸较小，在合金中片层状分布；另一类为图像中的规则形状存在的尺寸较大的白色物质，尺寸较大，与金相观察结果一致。能谱分析原子比显示，第一类白色物质区域铀铝原子比接近 1 : 6，铀与铝最高价化合物  $UAl_4$  原子比为 1 : 4，此区域原子比达到 1 : 6 主要是因为条纹状白色物质尺寸较小，分析时扫描区域包括了周边部分黑色区域，而第二类规则白色物质铀铝原子比接近 1 : 4。结合前面的相图分析、金相照片和衍射分析，综合判断，合金铸锭内黑色物质为铝基体，白色物质为铀铝化合物，条纹状尺寸较小的白色物质为共晶反应时析出的层片状  $UAl_4$ ，规则的尺寸较大的白色物质应为前期析出的  $UAl_3$  与 Al 反应生成的  $UAl_4$ ，因其析出生长，因此呈现出规则的形状且尺寸较大，而合金中存在少量的  $UAl_3$  相在组织中难以分辨。



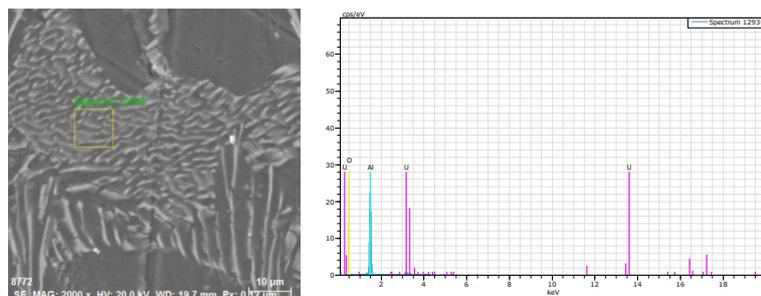
Element	Weight%	Atomic%
Al 13 K-series	100.00	100.00
Total:	100.00	100.00

图4 1000℃熔炼铀铝铸锭黑色区域 SEM 效果图和能谱分析



Element	Weight%	Atomic%
U 92 M-series	70.35	20.83
Al 13 K-series	28.70	76.97
O 8 K-series	0.95	2.2
Total:	100.00	100.00

图5 1000℃熔炼铀铝铸锭白色块状区域 SEM 效果图和能谱分析



Element	Weight%	Atomic%
U 92 M-series	65.35	14.69
Al 13 K-series	33.62	83.53
O 8 K-series	1.03	1.78
Total:	100.00	100.00

图6 1000℃熔炼铀铝铸锭白色条纹区域 SEM 效果图和能谱分析

#### 4 结语

论文对感应熔炼制备的 Al-25.4wt%U 合金进行了组织分析, 得出了以下结论: 合金铸锭物相组成包括 Al 相、 $UAl_3$  和  $UAl_4$  相, 组织组成为前期包晶反应析出的规则的  $UAl_4$  组织和共晶产生的 Al、 $UAl_4$  相间的片层组织,  $UAl_4$  最大尺寸可达 300 $\mu$ m 以上。

#### 参考文献

- [1] 李冠兴,武胜.核燃料[M].北京:化学工业出版社,2007.
- [2] 连培生.原子能工业[M].北京:原子能出版社,2002.
- [3] 中核北方核燃料有限公司冶金研究所.核反应堆燃料元件冶金与加工[M].内部书籍,2012.