

CNIC-01408
NFE-0013

中国核科技报告

CHINA NUCLEAR SCIENCE AND TECHNOLOGY REPORT

可控微观结构二氧化铀芯块制造的压烧工艺研究

PRESSING-SINTERING PROCESS OF UO_2 PELLET OF
CONTROLLABLE MICROSTRUCTURE

(In Chinese)



中国核情报中心
原子能出版社

China Nuclear Information Centre
Atomic Energy Press

图书在版编目 (CIP) 数据

中国核科技报告 CNIC-01408, NFE-0013: 可控微观结构二氧化铀芯块制造的压烧工艺研究/伍志明等著. —北京: 原子能出版社, 1999. 11

ISBN 7-5022-2078-X

I. 中... II. 伍... III. 核技术-研究报告-中国 IV. TL-2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第48606号

©原子能出版社, 1999

原子能出版社出版发行

责任编辑: 孙凤春

社址: 北京市海淀区阜成路 43 号 邮政编码: 100037

中国核科技报告编辑部排版

核科学技术情报研究所印刷

开本 787×1092 mm 1/16 印张1 字数16千字

1999 年11月北京第一版 1999 年11月北京第一次印刷

印数: 1—150

定价: 5.00 元



伍志明：宜宾核燃料元件厂高级工程师(研究员级)。1967年毕业于中南矿冶学院。

WU Zhiming: Senior engineer of Yibin Nuclear Fuel Element Plant. Graduated from Central South Mine and Milling of Technology in 1967.

CNIC-01408

NFE-0013

可控微观结构二氧化铀芯块 制造的压烧工艺研究

伍志明 彭青山

(宜宾核燃料元件厂, 644000)

提 要

研究了重铀酸铵 (ADU) 流程得到的两种基体 UO_2 粉末的压制性和烧结性; 研究了不同添加量下各种添加剂粉末对基体粉末压制性和烧结性的改善; 重点讨论了不同添加剂对 UO_2 芯块密度、热稳定性和微观结构的影响。结果表明, 对于 ADU 流程得到的高烧结性 UO_2 粉末, 经过计算, 选择一定量的造孔剂添加, 在高生坯密度和高烧结温度条件下加工, 就可以制选出密度适当且具有良好热稳定性和微观结构的芯块。

Pressing-Sintering Process of UO_2 Pellet of Controllable Microstructure

(In Chinese)

WU Zhiming PENG Qingshan
(Yibin Nuclear Fuel Element Plant, 644000)

ABSTRACT

The authors present the pressability and sinterability of two different matrix UO_2 powders from Ammonium Diuranate (ADU) process and the improvements by adding different quantities of additives. A focal point is made in the effect of the additives on the density, thermal stability and microstructure of UO_2 pellet. It is indicated by the results that a UO_2 pellet being of proper density, good thermal stability and better microstructure can be produced using of high sinterable UO_2 powder ex ADU, adding a certain quantity of pore former through calculation under conditions of high green density and high sintering temperature.

引言

由于 UO_2 独特的优越性, 压水堆都以 UO_2 陶瓷作燃料。但在第一代锆合金包壳燃料投入运行初期, 就出现了燃料密实和包壳氢脆等水堆燃料最普遍、最严重的缺陷。为此, 国外燃料设计、制造和运行部门进行了密切而广泛的合作研究, 很快就找到了元件棒破损的原因。研究者们认识到, 芯块的显微组织是控制其尺寸稳定性最重要的参数^[1]。

法国人积累了大量的燃料运行经验, 从制造堆内稳定的芯块出发, 他们提出了大功率 (1000 MW 级) 压水堆燃料芯块的具体技术要求。除了同位素丰度、几何尺寸和化学纯度以外, 这些要求主要包括:

(1) 密度 每个富集度区的芯块几何密度应为理论密度 (T.D) 的 $95 \pm 0.5\%$ 。

(2) 热稳定性 每个富集度区芯块堆外热稳定性试验 ($1730_{\pm 30}^{\circ}\text{C}$, 24 h, H_2) 得到的芯块密度增量应 $< 1.29\% \text{ T.D.}$

(3) 金相检验 要求按截面的三个区域: 中心、中央和边缘报出晶粒尺寸; 并且按 0~2, 0~10, 0~45 μm 三种级别测定气孔率。这些检验虽不作为芯块批验收的基础, 但是, 在芯块鉴定大纲中明确规定, 如果芯块晶粒尺寸达不到 8 μm , 则堆外热稳定性试验结果应 $< 0.8\% \text{ T.D.}$

(4) 表面状况 表面状况应与所使用的芯块图纸相符合, 对芯块表面缺陷按风险程度分为 A, B 两级, 每个级别又分成几等, 并且规定了相应的合格质量水平 (AQL) 值。

为了获得显微结构优良的芯块, 严格控制芯块制造的各个环节当然是重要的。然而一条最有效的途径就是在控制 UO_2 粉末特性的基础上, 在基体 UO_2 粉末中添加造孔剂进行制块。但由于制备 UO_2 粉末的工艺流程差别很大, 得到的粉末性能亦相差甚远。如德国人认为他们用三碳酸铀酰胺 (AUC) 工艺得到的 UO_2 粉末中只要添加 U_3O_8 就可以获得孔隙结构优良的芯块; 而法国和英国主要采用干法工艺制备 UO_2 粉末, 他们在 UO_2 粉末中不仅要添加 U_3O_8 , 而且还要加进名为 Conpor 的有机造孔剂。文献[2]对上述情况有过详细介绍。

我国秦山 300 MW 压水堆核电站燃料组件的平均卸料燃耗设计为 25 GWD/TU, 大亚湾核电厂的设计平均卸料燃耗也不过 33 GWD/TU。这种燃耗水平在国际上看是偏低的。虽然我国为大亚湾 2×900 MW 压水堆燃料组件国产化部分引进了法马通公司的制造技术, 并且制造出了符合技术条件的产品^[3]。但是, 随着世界核电技术的不断发展, 我国的核燃料制造也不能停留在秦山、大亚湾的水平上。因此, 面对着国际上 UO_2 核燃料制造技术的日益进步和核电站不断加深的燃耗要求, 进一步改进燃料性能, 特别是改进燃料的微观结构是十分必要的。

本研究致力于可控微观结构 UO_2 芯块的制造, 着重于在高活性的基体 UO_2 粉末中添加一定量的有机造孔剂和 U_3O_8 粉末, 并进行压、烧工艺条件试验, 由此制备出具有良好热稳定性和微观结构的 UO_2 芯块。

1 试 验

1.1 试验用粉末

1.1.1 ADU 工艺得到的 UO_2 粉末

我国核燃料制造用的 UO_2 粉末采用的是 ADU 工艺流程。

UF_6 经气化、水解、沉淀得到的 ADU，经过过滤、淋洗、干燥，并在还原炉里分解还原成 UO_2 粉末，习惯上称为正料；而由含铀废料（块、粉、渣）经硝酸溶解、萃取、沉淀得到的 ADU，再经过上述过程得到的 UO_2 粉末，习惯上称为返料。

表 1 UO_2 粉末主要性能

编号	U 含量 %	比表面 $\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$	O/U	松装密度 d_s $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	振实密度 d_t $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	基体密度 ¹⁾ %T.D
32T9401	87.99	3.89	2.078	1.79	3.00	87.98
32T9506	87.66	3.24	2.074	1.42	2.49	94.42

1) 基体密度的试验烧结条件：1625 $^{\circ}\text{C}$ ，4 h， H_2 。

无论正料还是返料过程，当沉淀条件发生变化，得到的 ADU 结构会相应改变，结果造成各个批次的 UO_2 粉末性能，特别是粉末烧结性相差甚远。表 1 展示了两批正料粉末烧结性相差的情况。图 1a 是 UO_2 粉末的电镜观察图象。

1.1.2 U_3O_8 粉末

由废品 UO_2 芯块在空气气氛中经 550 $^{\circ}\text{C}$ 、6 h 煅烧而成。使用前， U_3O_8 粉末还要过筛（-0.15 mm）和合批。表 2 是试验用 U_3O_8 粉末的主要性能；图 1b 是它的微观形态。

1.1.3 U_RO_X 粉末

高烧结性 UO_2 粉末具有差的压制性曾经是困扰芯块生产的重要问题。为了改善这类粉末的压制性，借鉴法国人的经验，将 UO_2 粉末在 350 $^{\circ}\text{C}$ 下低温氧化成 U_RO_X 粉末，作为添加物再加入到 UO_2 粉末中。 U_RO_X 粉末性能列入表 2 中。

图 1c 是 U_RO_X 粉末的微观图象。从中可以看到 U_RO_X 粉末典型的聚团结构。

表 2 U_3O_8 和 U_RO_X 粉末主要性能

粉末	样品编号	O/U	比表面积 $\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$	松装密度 d_s $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	振实密度 d_t $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	平均粒径 μm
U_3O_8	32P86	2.665	0.42	1.66	2.51	10.5
U_RO_X	32P95R	2.660	5.99	1.11	1.83	1.3

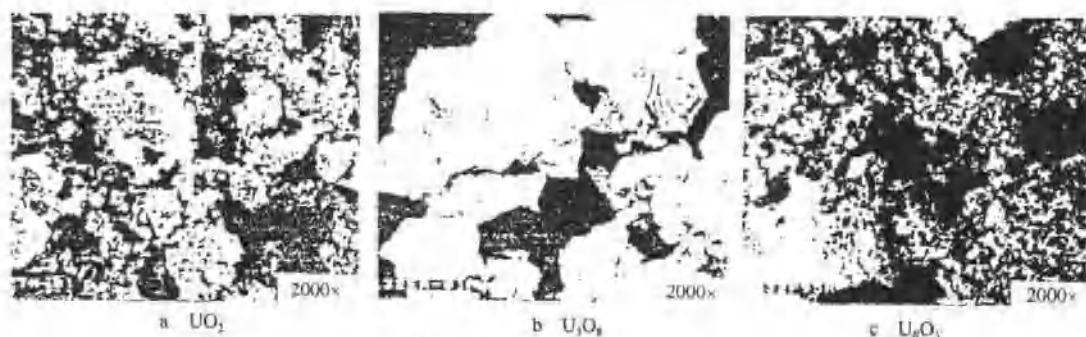


图1 三种铀氧化物的微观形态

1.1.4 草酸铵(Ammonium Oxalate)粉末

市售草酸铵的主要性能如下:

- (1) 分子式: $(\text{NH}_4)_2\text{C}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$;
- (2) 纯度: $>99.80\%$;
- (3) 水不溶物: $<0.005\%$;
- (4) 硅化物(以 SiO_4 计): $<0.01\%$;
- (5) 灼烧残渣(以硅酸渣计): $<0.001\%$ 。

草酸铵易于结晶,故使用前必须过筛(-0.2 mm)。对试验用的草酸铵粉末进行过物理性能测量,结果为:

- (1) 松装密度(d_s): 0.39 g/cm^3 ;
- (2) 振实密度(d_t): 0.64 g/cm^3 ;
- (3) 干筛分分析: $0.1\sim0.2\text{ mm}$ 颗粒占 88.8% 。

1.1.5 硬脂酸锌粉末

硬脂酸锌粉末在 UO_2 芯块制造中通常作为一种润滑剂使用。它在坯块烧结之前发生分解、气化和挥发,并在烧结块里残留一些孔隙,本研究主要考察它对芯块微观结构的贡献。市售硬脂酸锌粉末的主要性能如下:

- (1) ZnO 含量: $13\%\sim15.5\%$;
- (2) 游离硬脂酸: $<0.5\%$;
- (3) 水溶性盐: $<0.5\%$;
- (4) H_2O : $\leq 1.0\%$;
- (5) (真)比重: 1.095 g/cm^3 。

经测定,试验用硬脂酸锌粉末的物理性能为:

- (1) 松装密度(d_s): 0.112 g/cm^3 ;
- (2) 振实密度(d_t): 0.202 g/cm^3 ;
- (3) 干筛分结果: $+0.2\text{ mm}$ 粉末达 95.4% ,经观察,发现筛分时粉末严重结团。

1.2 试验装置与设备

本试验研究采用下列主要工艺装置与设备:

- (1) WE-300B 型万能液压式材料试验机;
- (2) FHD 型推舟式烧结炉;
- (3) Degussa 型推舟式烧结炉;
- (4) MT1040A 型无心磨床。

试验过程中, 对粉末和芯块各项性能的测量采用标准方法; 所有计量器具和仪表都在检定有效期内。

1.3 试验流程

在工艺试验室进行的试验流程见图 2。由于工艺试验的内容有别, 故有时也只用试验流程的某些步骤而不是全部。

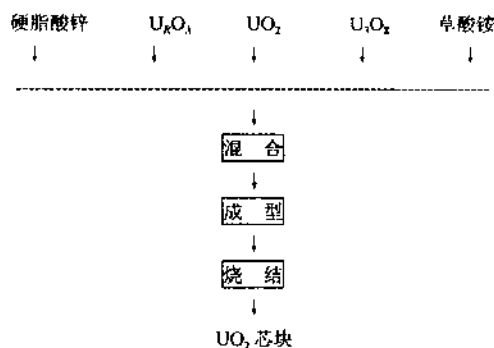


图 2 试验工艺流程图

2 结果与讨论

2.1 试验粉末的压制

2.1.1 基体 UO_2 粉末的压制

在粉末冶金技术里, 粉末压制性是粉末压缩性和成形性的综合。粉末压缩性用粉末的压制特性曲线(即不同压力下的坯块密度)和/或压缩比(即坯块密度与粉末松装密度之比, d_g/d_s)来表示。粉末的成形性可用坯块的压溃强度或 Rattle 试验结果来表达。

本研究详细测定了两种烧结性相差甚远的正料 UO_2 粉末(32T9506 和 32T9401)的压制特性曲线和它们的 Rattle 值。由图 3 和图 4 可见, 试验条件下的 UO_2 生坯密度与成形压力呈 $Y = A \cdot X^n$ 所示的幂函数关系; 而生坯 Rattle 试验结果值与生坯密度之间则呈 $Y = A \cdot e^{BX}$ 所示的指数函数关系。

比较它们的压制特性, 图 3 表明, 当成形压力加大时, 每种粉末的压坯密度都在增大; 但烧结性好的 32T9506 粉末的压坯密度明显高于烧结性差的 32T9401 粉末。显然, 32T9506 粉末的压缩性差。也就是说, 压到相同的生坯密度, 32T9506 粉末需要更大的成形压力。

进一步比较它们的 Rattle 值(见图 4), 可以发现, 32T9401 这种烧结性差的粉末,

相对于烧结性好的 32T9506 而言坯块强度更好。也就是说，它不但压缩性好，而且成形性也好。

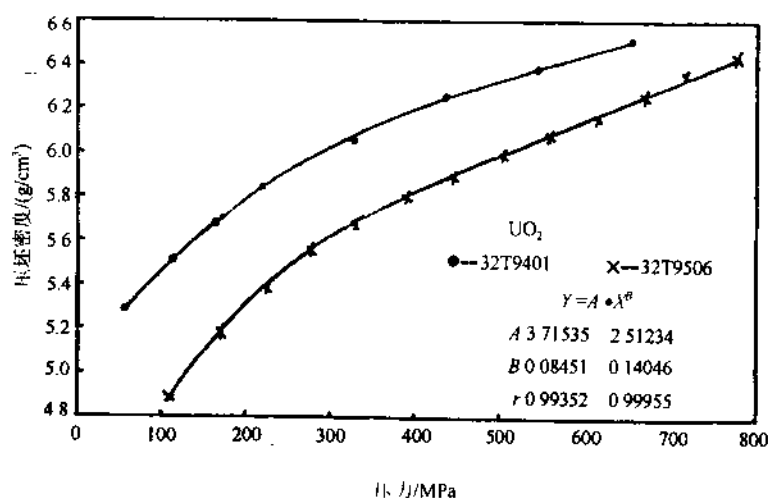


图3 两种粉末的压制特性曲线

可见，对于 ADU 转化的 UO_2 粉末，烧结性好的压制性不一定好。但从芯块制造的角度看，我们追求的则是既好烧又好压的原料 UO_2 粉末。

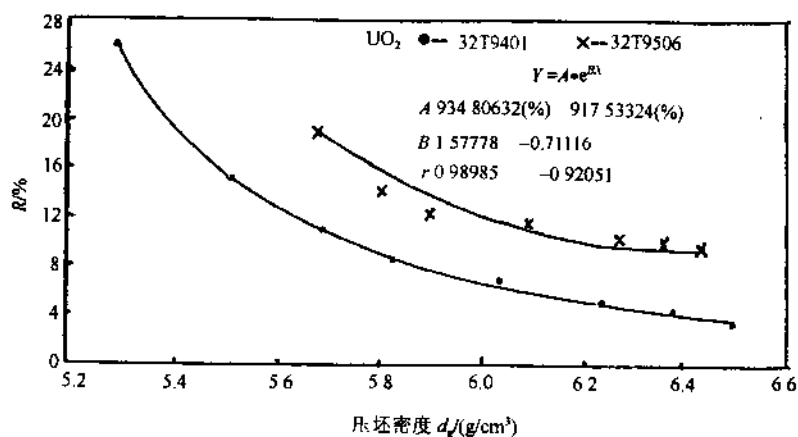


图4 两种粉末的坯块强度

2.1.2 添加 U_3O_8 粉末后的压制

在基体 UO_2 粉末中添加 U_3O_8 粉末，不同添加量得到的混合粉末其生坯密度与成形压力测量数据见图 5。图 5 表明试验条件下，它们同基体 UO_2 粉末一样，生坯密度与成形压力之间亦符合 $Y = A \cdot X^B$ 所示的幂函数关系。在最大添加量为 20% 的范围内，随着 U_3O_8 添加量的增加，混合粉末的压缩性得到不同程度的改善。本试验未测定添加 U_3O_8 粉末后坯块的 Rattle 值，但有资料表明，在一定范围内，添加 U_3O_8 也可使混合粉末的成形性变好。

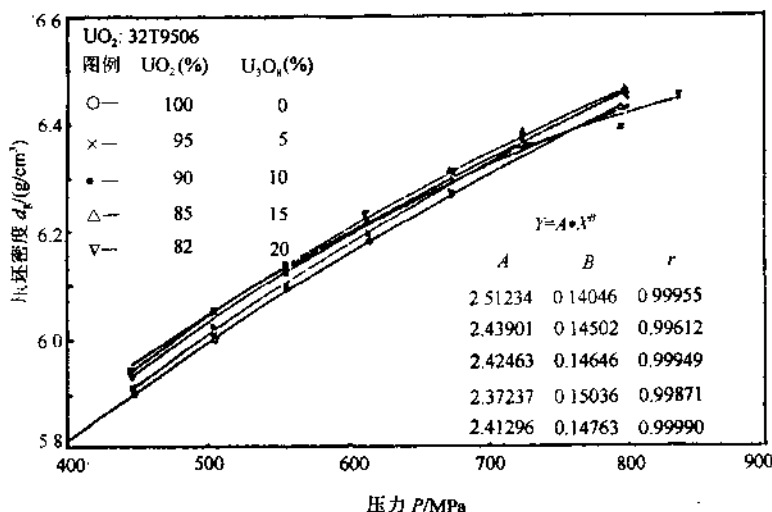


图5 添加U₃O₈以后的混合粉末压制特性曲线

添加U₃O₈同时使以UO₂为基的混合粉末压缩性和成形性改善,这是U₃O₈作为添加剂的一个重要特点。这个特点应当归结于它的颗粒特征,诚如图1所示,U₃O₈粉末的单个颗粒粒径虽大,但不是UO₂粉末那样的大量小颗粒形成的聚团结构,单个颗粒镶嵌于UO₂粉末聚团中,改进了混合粉末的颗粒充填状态和机械联结。

2.1.3 添加草酸铵粉末后的压制

添加草酸铵(简称A.O)粉末后,测得不同添加量下UO₂混合粉末在不同压力时的生坯密度见图6。回归计算的结果表明,试验条件下的混合粉末压制特性同样符合 $Y=A \cdot X^B$ 所示的幂函数关系。与添加U₃O₈所不同的是,添加草酸铵粉末会使混合粉末的压缩性变差,并且随着添加量的加大这种作用更显著。本试验未测量添加草酸铵粉末后的坯块Rattle值,但有资料表明,少量添加草酸铵粉末可使生坯的强度变好。

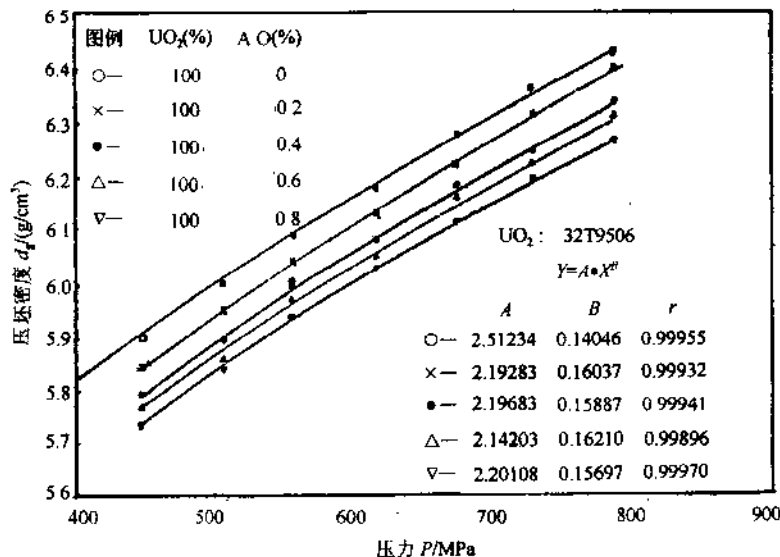


图6 添加草酸铵后混合粉末的压制特性曲线

2.1.4 添加 U_3O_8 粉末后的压制

图 7 对添加 5% U_3O_8 后混合粉末生坯密度随成形压力的变化作了回归计算, 结果证明它们之间也符合幂函数关系。正如图 7 所述, 添加 5% U_3O_8 混合粉末的压制特性曲线与基体 UO_2 粉末的压制特性曲线几乎重叠。然而, 亦如图 8 所示, 随着添加量的增加, 压到相同的生坯密度所需要的成形压力是递增的。也就是说, U_3O_8 的添加降低了基体 UO_2 粉末的压缩性, 这种降低与添加量呈线性相关。

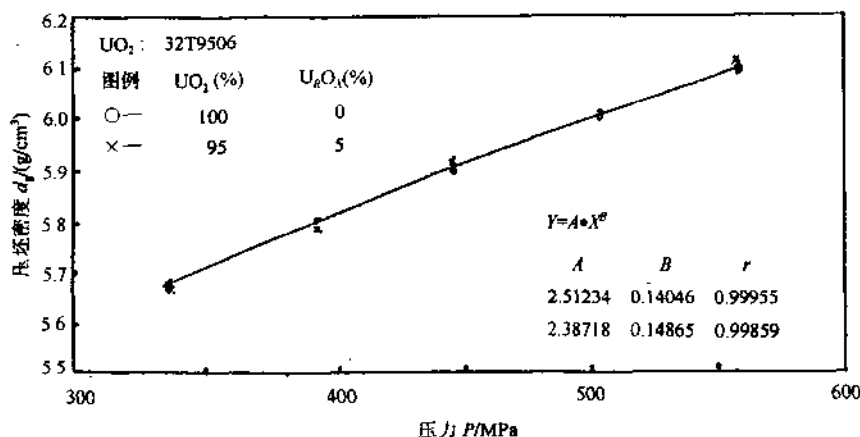


图 7 添加 5% U_3O_8 的混合粉末压制特性曲线

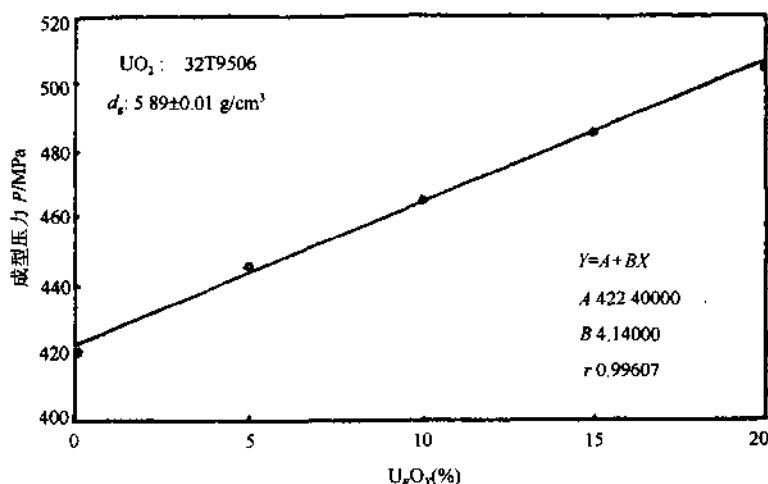


图 8 成型压力与 U_3O_8 添加量的关系

图 9 展示了不同 U_3O_8 添加量下混合粉末压到相同生坯密度时的 Rattle 值。它表明, U_3O_8 的添加改善了坯块强度。从图 1 可以看到, U_3O_8 粉末颗粒结构与 UO_2 相近, 其结团倾向亦然, 但表面更发达, 颗粒聚团更疏松 (松装密度变小)。故它的添加既有改善粉末成形性的作用, 又会使粉末的压缩性变差。 U_3O_8 的这种作用与草酸铵类似, 但在降低粉末压缩性方面远不如草酸铵那样强烈。

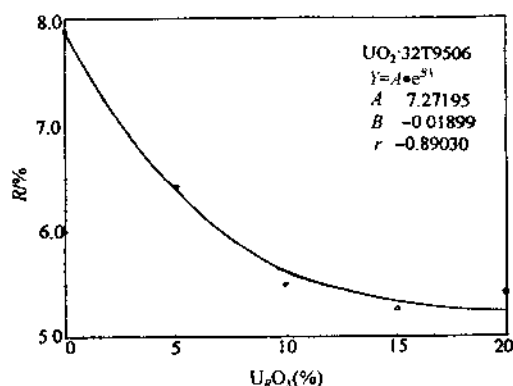


图9 不同 U_2O_5 添加量下坯块的 Rattle 值

2.1.5 添加硬脂酸锌粉末后的压制

在 UO_2 芯块制造中, 适量添加润滑剂硬脂酸锌粉末, 可以明显提高干法制粒的成粒率, 因为它可以改善粉末颗粒的结合强度。本试验未测量添加硬脂酸锌粉末后坯块的 Rattle 值, 但图 10 表明, 随着硬脂酸锌粉末添加量的增加, 将混合粉末压到相同的生坯密度需要的成形压力在提高。不管生坯成形前混合粉末是否经过制粒处理, 两种情况下, 成形压力虽略有区别, 但均与硬脂酸锌添加量呈线性增加。

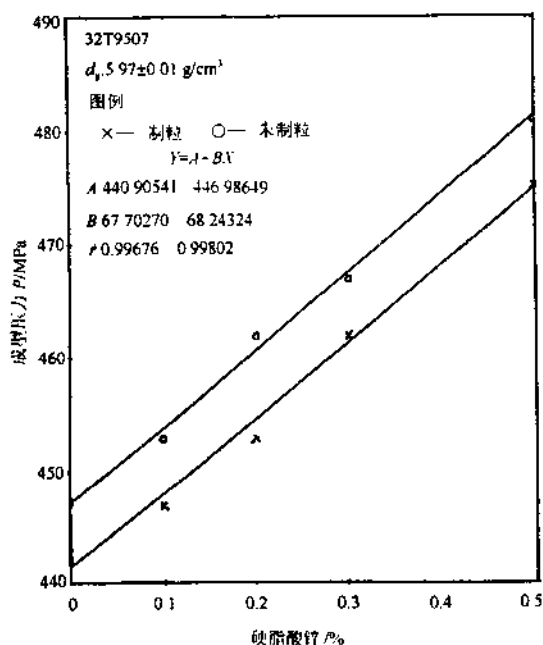


图10 不同硬脂酸锌添加量下压制到相同密度坯块需要的压力

2.2 试验粉末坯块的烧结

2.2.1 基体 UO_2 粉末坯块的烧结

图 11 描述了 32T9506 粉末压坯的烧结特性。如图所示，芯块的烧结密度随生坯密度变化的特性曲线可以分成明显的两段：当生坯密度 $< 6.0 \text{ g/cm}^3$ 时，烧结密度随生坯密度的提高直线上升；而当生坯密度 $> 6.0 \text{ g/cm}^3$ 以后，烧结密度几乎不随生坯密度的提高而变化。这一结论与我们过去的试验结果相吻合。

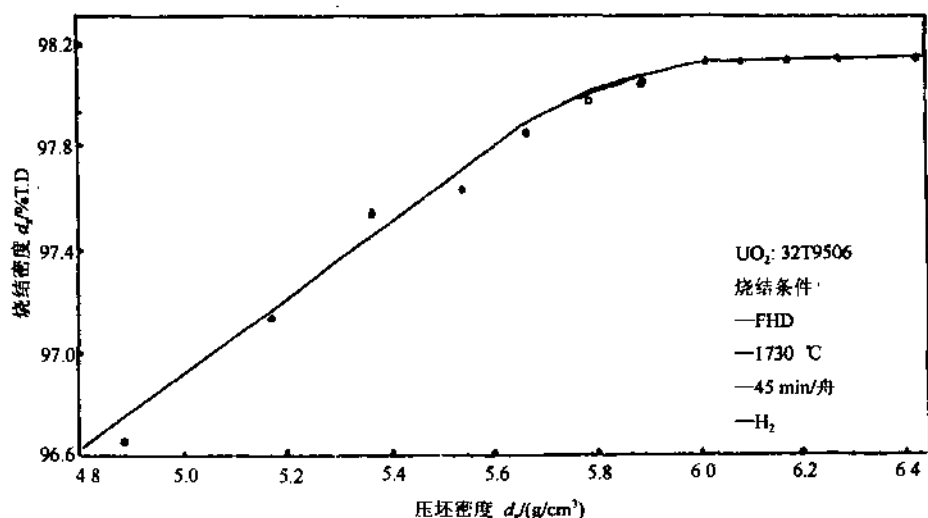


图 11 UO_2 坯块的烧结特性曲线

坯块烧结后发生的径向收缩率和轴向收缩率是随着生坯密度的提高而线性下降的，图 12 形象地描述了这种关系。测定坯块的烧结收缩是必要的，因为它是生坯成形模具设计的基础。然而，需要指出的是，烧结收缩率的变化主要是生坯密度的贡献，因为高温烧结下的芯块，最终烧结密度在宏观上并不表现出大的变化。

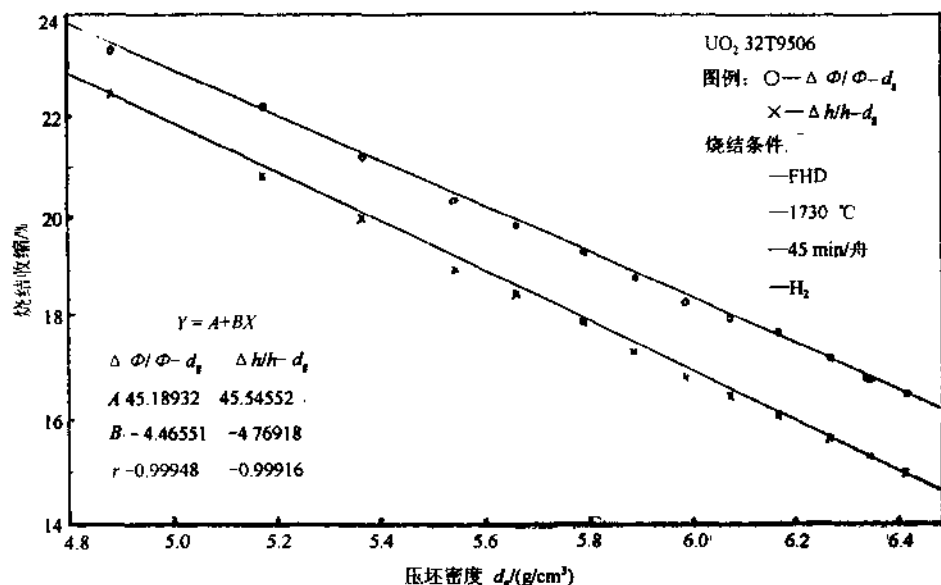


图 12 UO_2 坯块的烧结收缩

图 13 是基体 UO_2 粉末正常生坯密度 (5.9 g/cm^3) 下烧结块的微观图象。表 3 汇集了不同生坯密度的烧结块主要性能。它表明, 随着生坯密度的提高, 芯块烧结密度提高, 热稳定性变好, 晶粒尺寸增大。不过, “烧结密度随生坯密度提高” 这种典型的规律只有当生坯密度范围较大时才可以观察到。当生坯密度达到某个值 (例如, 图 11 所示的 $>6.0 \text{ g/cm}^3$) 以后, 烧结密度的变化并不大; 当然, 这时的芯块晶粒尺寸还会增大, 热稳定性进一步变好。

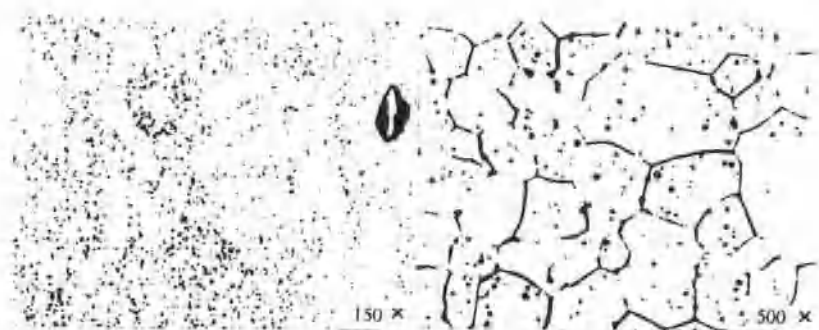


图 13 基体 UO_2 粉末 (32T9506) 得到的烧结块微观结构

正因为 UO_2 坯块有这个特点, 采用高生坯密度的工艺措施对芯块制造是很有意义的。因为由此得到的芯块不但有很好的堆外热稳定性和微观结构, 而且, 最小的尺寸收缩即意味着烧结块最小的变形, 从而为其在以后的磨削中实现严格的直径公差创造了条件。

表 3 32T9506 粉末制备的烧结芯块主要性能¹⁾

生坯密度 g/cm^3	烧结密度 %T.D	开口孔率 %	热稳定性 ²⁾ %T.D	晶粒尺寸 μm	$<2 \mu\text{m}$ 气孔 %
4.879	96.84	0.03	0.39	11.2	1.40
5.374	97.50	0.02	0.28	12.5	0.42
5.632	97.86	0.01	0.26	16.1	0.56
5.889	98.04	0.01	0.24	16.2	0.88
6.427	98.22	0.05	0.12	17.5	1.09

¹⁾ 烧结条件: FHD 烧结炉, 1730°C , 推舟速度 45 min/舟 , H_2 气氛;

²⁾ 热稳定性试验条件: 1730^{+10}°C , 24 h , H_2 。

图 14 是 32T9401 基体粉末制备的烧结芯块微观结构。表 4 列举了基体粉末和少量添加造孔剂以后得到的烧结块性能。从图 14 和表 4 我们可以看出, 由 ADU 工艺制备的 UO_2 粉末, 即使烧结性差一些, 仍然可以在高温和长时间烧结条件下获得满足技术条件要求的烧结芯块。只不过因密度太低, 无法再添加导致密度降低的添加剂, 使芯块的微观结构得到进一步改善。也就是说, 基体 UO_2 粉末的高烧结性是采用添加剂制造可控微观结构芯块的必要条件。

表 4 32T9401 粉末和少量添加草酸铵以后烧结块的性能¹⁾

加入草酸铵量	生坯密度	烧结密度	热稳定性 ²⁾	晶粒尺寸	<2 μm 气孔
%	g/cm ³	%T.D	%T.D	μm	%
0	5.99	94.49	0.73	8.43	2.46
0.2	5.97	93.49	1.10	9.03	2.44
0.4	5.94	93.03	1.10	10.50	2.95

¹⁾ 烧结条件: Degussa 烧结炉, 1750 °C, 推舟速度 50 min/舟, H₂ 气氛;

²⁾ 热稳定性试验: 随炉再烧结。

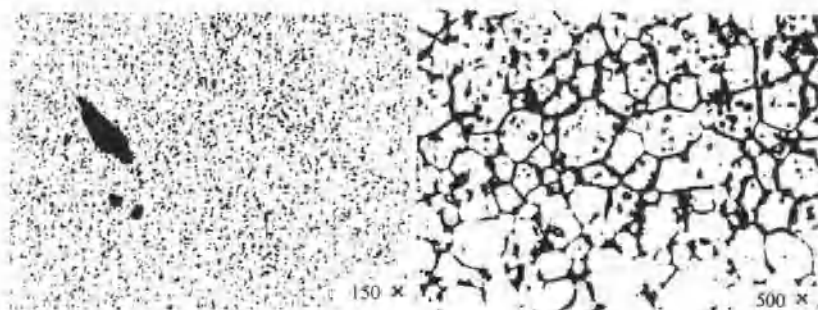


图 14 基体 32T9401 粉末得到的烧结块微观结构

2.2.2 添加 U₃O₈ 粉末后的坯块烧结

以下的试验是在高烧结性 32T9605 粉末条件下进行的。

图 15 表明, 在几乎相同的生坯密度下, 烧结密度的降低与 U₃O₈ 的添加量线性相关。

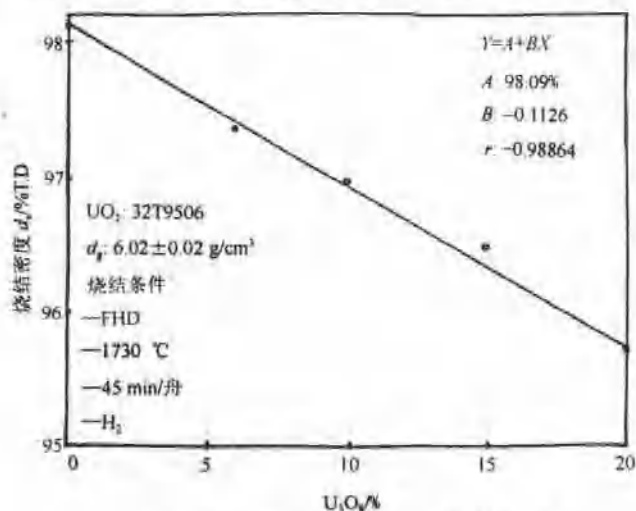


图 15 烧结密度与 U₃O₈ 添加量的关系

图 16 是正常 U₃O₈ 添加量(10%)时烧结芯块的典型微观图象。可以看出, U₃O₈ 的添加在烧结芯块中造成了一些微孔。

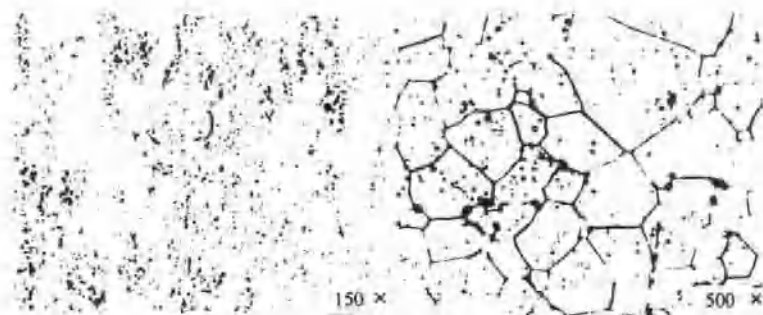


图 16 添加 U_3O_8 以后烧结块的微观结构

表 5 不同添加物混合粉末制备的芯块性能 (UO_2 : 32T9506)

混合粉末组成/%			生坯密度	烧结条件	烧结密度	热稳定性 ¹⁾	晶粒尺寸	<2 μm 孔
UO ₂	U ₃ O ₈	Al ₂ O ₃	g/cm ³		%T.D	%T.D	μm	%
100	0	0	5.90	1# ²⁾	98.04	0.24	16.2	0.88
95	5	0	5.91		97.38	0.30	15.8	1.39
90	10	0	5.92		96.89	0.39	15.2	1.65
85	15	0	5.94		96.47	0.26	15.3	1.98
80	20	0	5.94		95.63	0.92	12.6	1.81
100	0	0.2	5.95	1# ²⁾	97.43	0.09	16.3	0.92
100	0	0.4	5.98		96.71	0.15	15.6	0.67
100	0	0.6	5.88		95.80	0.30	16.5	1.09
100	0	0.8	5.94		95.11	0.20	16.8	1.15
U ₃ O ₈								
95	5	0	5.93	2# ³⁾	97.30	0.33	15.4	0.67
90	10	0	5.98		96.52	0.38	14.5	0.27
85	15	0	5.88		95.97	0.21	13.9	0.27
80	20	0	5.90		95.52	0.48	13.8	0.48

¹⁾ 热稳定性试验条件: $1700^{+20}^{\circ}C$, 24 h, H_2 ;

²⁾ 1#烧结条件: FHD 烧结炉, $1730^{\circ}C$, 推舟速度 45 min/舟, H_2 ;

³⁾ 2#烧结条件: FHD 烧结炉, $1720^{\circ}C$, 推舟速度 45 min/舟, H_2 ;

表 5 列出了不同 U_3O_8 添加量下 UO_2 芯块的热稳定性、晶粒尺寸和孔隙分布。与基体 UO_2 粉末制造的芯块相比, 随着 U_3O_8 的添加, 芯块晶粒尺寸有减小的趋势。虽然热稳定性仍然是好的, 但 $<2 \mu m$ 的气孔率有所增加, 总孔隙率则增加较多。它说明 U_3O_8 对芯块孔隙的贡献是各个级别孔隙率的同时增加。或者说, 添加 U_3O_8 得到的芯块, 其孔隙是基体 UO_2 粉末造成的孔隙与 U_3O_8 造成的孔隙的迭加。