

UO₂ 芯块制造关键工艺研究

张李新, 蔡贵川, 李春冬, 何非凡
中广核铀业发展有限公司, 广东 阳江 529500
DOI:10.61369/ERA.2025070025

摘要 : UO₂ 芯块是目前商用压水堆使用最广泛的核燃料, 是发生裂变反应提供能量的核心。本研究通过中广核集团首条自主核燃料芯块研制生产线, 验证了制备 UO₂ 芯块的工艺路线, 成功制备了符合预期的 UO₂ 芯块。

关键词 : UO₂ 芯块; 制造关键工艺; 研究

Research on Key Processes for Manufacturing UO₂ Core Blocks

Zhang Lixin, Cai Guichuan, Li Chundong, He Feifan
CGN Uranium Industry Development Co., Ltd., Yangjiang, Guangdong 529500

Abstract : UO₂ pellets are currently the most widely used nuclear fuel in commercial pressurized water reactors and are the core that provides energy for fission reactions. This study verified the process route for preparing UO₂ pellets through the first independent nuclear fuel pellet development and production line of China General Nuclear Power Group, and successfully prepared UO₂ pellets that meet expectations.

Keywords : UO₂ core block; key manufacturing processes; study

引言

UO₂ 芯块制造生产线主要包含混料、制粒、压制、烧结、磨削等工序, 各工序的主要内容包括:

混料采用单锥双混料器将 UO₂ 粉末、造孔剂、润滑剂均匀混合;

制粒采用轧辊制粒机与双锥混料器制备较大尺寸的球形团粒;

压制采用旋转成型压机制备特定尺寸的 UO₂ 生坯;

烧结采用推舟炉将 UO₂ 生坯进一步致密化制备为烧结 UO₂ 芯块;

磨削采用无心外圆磨床将烧结 UO₂ 芯块制备为成品 UO₂ 芯块。

本研究先进行原始粉末基体密度及添加剂降密系数测定, 进一步计算得出添加剂配比, 然后按照配比结果在生产线进行批量生产, 最后通过抽样检测 UO₂ 芯块密度、几何尺寸、微观结构及孔隙率等各项指标进行验证和优化。

一、UO₂ 芯块制备关键工艺

(一) 降密系数实验

为测得草酸铵与阿克蜡的降密系数, 采用控制变量法进行不同添加剂配比试验, 具体配比如表1、表2所示:

表1 草酸铵降密系数测试成分配比

编号	Y3C0.0 A0.2	Y3C0.2 A0.2	Y3C0.4 A0.2	Y3C0.6 A0.2	Y3C0.8 A0.2
阿克蜡 /wt%	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
草酸铵 /wt%	0	0.2	0.4	0.6	0.8

表2 阿克蜡降密系数测试成分配比

编号	Y3C0.0 A0.2	Y3C0.0 A0.4	Y3C0.0 A0.6	Y3C0.0 A0.8
阿克蜡 /wt%	0.2	0.4	0.6	0.8
草酸铵 /wt%	0.2	0.2	0.2	0.2

将以上具有不同添加剂配比的粉末分别进行混料、制粒、压制、烧结与磨削, 分别测试样品的几何密度, 研究草酸铵与阿克蜡对芯块基体密度的影响, 并计算出二者对于 UO₂ 芯块的降密系数。

(二) 模拟配比实验

为了使生产线产品的密度控制更加精准, 根据原始粉末性能及添加剂降密系数, 计算得出添加剂的配比, 将 UO₂ 粉末与添加剂根据理论配比混合, 按相同的工艺制备样品, 测量样品的几何密度, 以验证配比的可行性。

(三) 生产线工艺实验

为验证生产工艺需进行生产线工艺实验, 根据模拟配比实验结果, 确定草酸铵与阿克蜡的配比。同时根据生产经验, 确定 UO₂ 芯块制造工艺参数, 具体工艺如表3所示。

表3 UO₂芯块制备工艺参数

单锥混料时间	轧辊压力	球化时间	烧结条件
30min	35~45 KN	20min	1730℃, 7h, 氢气气氛

为探究不同生坯密度样品的生产情况，控制生坯密度分别为 $5.70 \pm 0.05 \text{g/cm}^3$ 与 $5.80 \pm 0.05 \text{g/cm}^3$ ，两批样品分别命名为 D1 与 D2。

二、结果分析

（一）降密系数实验结果分析

草酸铵与阿克蜡降密实验结果如图2所示，对于草酸铵而言，随着其含量的不断提升，UO₂陶瓷芯块基体密度逐步下降，不添加草酸铵时，UO₂陶瓷芯块的平均几何密度达到96.3 %T.D（T.D为UO₂芯块理论密度， 10.96g/cm^3 ），当其含量增加到0.8 wt%时，芯块的几何密度仅为92.6 %T.D。根据结果计算得每添加1 wt%的草酸铵，其降密系数约为5 %。与草酸铵类似，阿克蜡含量增加也会使芯块密度下降^[1]，根据结果计算得，每添加1 wt%的阿克蜡，其降密系数约为6 %。

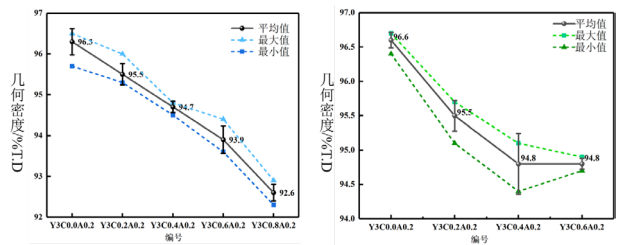


图1. 不同添加剂配比制备的 UO₂ 芯块的几何密度

（二）模拟配比实验结果分析

根据过往生产经验以及降密实验结果，选取草酸铵与阿克蜡的含量分别为0.3 wt% 与0.5 wt%，制备得 UO₂ 芯块样品几何密度如表4所示，样品平均几何密度为94 %T.D，略低于预期的95 %T.D，其原因 UO₂ 粉末原料基体密度仅为98.7 %T.D，因此通过降密系数计算得修正后的配比应为0.3 wt% 与0.35 wt%。

表4. 模拟配比实验样品几何密度

平均几何密度	最大几何密度	最小几何密度	标准差
94.0 %T.D	94.3 %T.D	93.5 %T.D	0.2339

（三）生产线工艺实验结果分析

1. 混料均匀性

混料均匀性对于成品芯块的质量有着重要影响，因此，混料后粉末具有较高的技术要求，需同时满足单值、均值以及均匀性的要求，混料均匀性的测定结果可由粉末不同区域样品的碳含量来表征^[2]，其结果如下图3所示。本实验均匀性测定先后测量单锥混料30min 后以及加入阿克蜡制粒、球化20min 以后的粉末样品的碳含量。

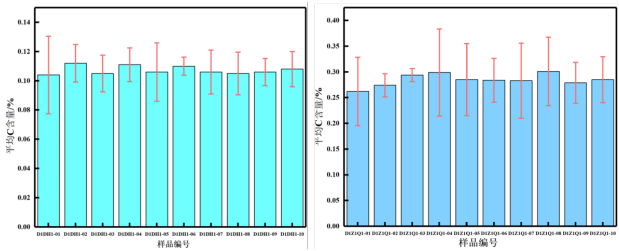


图2. 单锥混料以及球化后粉末混合均匀性

2. 几何密度与孔隙率

样品几何密度如表5所示，两批样品都具有较高的几何密度，均接近预期值（95 %T.D），由于 D2 批次样品生坯密度较高，因此所制得的样品具有相对较高的几何密度。其中，D2 批次样品的平均几何密度略高于预期值。

表5 样品几何密度（%T.D）

批次	平均值	最大值	最小值
D1	94.95	95.30	94.28
D2	95.40	95.70	94.59

样品的孔隙率与其尺寸分布如下图4所示，D1、D2两批样品的孔隙总体积占比分别为5.95 %与4.49 %，其中尺寸在2~10 μm 的孔隙占比最高，而大尺寸孔隙（10~45 μm）的占比较少，这是由于生坯具有较高的致密度，粉末之间具有较短的扩散程，在烧结过程中更有利于孔隙的缩小与球化，同时由于较高的烧结温度，促进了原子扩散，使得 UO₂ 陶瓷基体致密化程度更高，因此大尺寸孔隙占比较少。

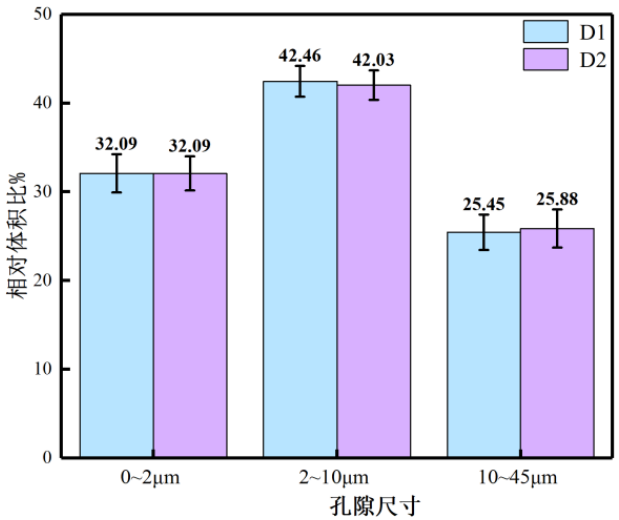


图3. 样品孔隙尺寸与分布情况统计图

3. 金相

UO₂ 芯块的金相照片如图5所示，其中 (a)、(b) 为 D1 批样品的金相照片，(c)、(d) 为 D2 批样品的金相照片，二者微观结构相似，视野白色区域为 UO₂ 陶瓷相，深色区域为陶瓷表面的凹坑与气孔，气孔的产生与压坯内添加剂的挥发有关。陶瓷基体较为致密，不存在大尺寸的裂纹与大尺寸孔洞，陶瓷晶粒较为粗大，其晶粒尺寸如表6所示。最大晶粒尺寸达到将近20 μm，其中 D1 批样品的平均晶粒度为9.60 μm，D2 样品的平均晶粒度达到9.99 μm，较大的晶粒尺寸有利于提升 UO₂ 陶瓷的高温稳定性，减

少 PCI 效应（燃料棒芯块与包壳之间的相互作用）的发生^[3]。

表6 样品晶粒尺寸

批次	边缘 (μ m)	中间 (μ m)	中心 (μ m)	平均晶粒度 (μ m)
D1	9.78	9.54	9.42	9.60
D2	10.45	9.81	9.75	9.99

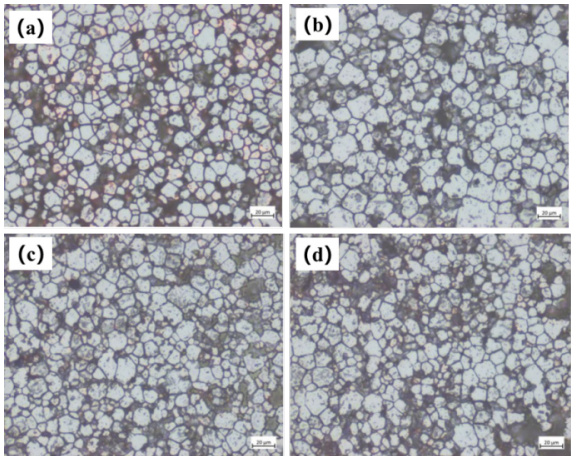


图4. UO₂金相图像：（a）、（b）D1 批样品截面金相；（c）、（d）D2 批样品金相

4. 外观与几何尺寸

由于烧结之后的 UO₂ 芯块外形尺寸、形状以及表面光洁度等无法满足预期要求，因此烧结完成后需要进行磨削，本实验 UO₂ 芯块样品采用无心外圆磨床磨削。磨削之后样品的照片如图6所示，样品表面光洁度较高，尺寸均匀度较高。样品的几何尺寸、表面粗糙度以及垂直度如表7所示。



图5. 磨削后样品照片

表7 样品几何尺寸表（mm）

	D1			D2		
	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值
直径	8.188	8.196	8.180	8.189	8.196	8.183
高度	13.36	13.57	13.36	13.41	13.77	13.24
倒角宽	0.598	0.713	0.502	0.595	0.703	0.482
粗糙度	1.533	1.827	1.291	1.536	1.946	1.219
垂直度	0.017	0.043	0.002	0.026	0.033	0.003

三、结论

实验初步验证了 UO₂ 芯块烧结添加剂草酸铵与阿克蜡的降密系数，每添加 1 wt% 的草酸铵，其降密系数约为 5 %。与草酸铵类似，阿克蜡含量增加也会使芯块密度下降，每添加 1 wt% 的阿克蜡，其降密系数约为 6 %。

通过模拟配比实验与生产线实验制得了 UO₂ 芯块样品，生坯密度分别为 $5.70 \pm 0.05 \text{g/cm}^3$ 与 $5.80 \pm 0.05 \text{g/cm}^3$ 的两批压坯，制得的 UO₂ 芯块几何密度分别达到 94.95%T.D 与 95.40%T.D，基本达到期望值 95%T.D。

两组样品平均晶粒尺寸分别为 $9.60 \mu\text{m}$ 与 $9.99 \mu\text{m}$ ，经磨削后，样品几何尺寸、表面光洁度以及垂直度符合预期，且整体具有较高的尺寸均匀度。

参考文献

[1] 吴根久，谭朝辉. 阿克蜡在 UO₂ 芯块生产中的应用研究 [J]. 机械研究与应用 . 第 4 期 ,2015.
[2] 王猛，杨光宇，李德阳. 二氧化铀粉末混富集度工艺研究 [J]. 中国新技术新产品 . 第 6 期 ,2023.
[3] 颜学明，陈晓香，王友良. 添加氧化物制备大晶粒二氧化铀芯块的研究 [J]. 全国工矿企业电力安全与节能技术优秀论文集 ,2005.