

二氧化铀粉末 513 K 下空气氧化机制和动力学研究

高家诚¹, 吴曙芳¹, 杨晓东², 畅欣²

(1. 重庆大学 材料科学与工程学院, 重庆 400030; 2. 中核建中核燃料元件公司, 四川 宜宾 644000)

摘要: 为获取壳层 O/U 比约为 2.25 而芯部仍为 UO_2 的预氧化活性粉末以进行 UO_2 芯块的低温烧结试验, 研究了 UO_2 粉末在 513 K 下于静态空气中的氧化机制和动力学。结果表明: UO_2 粉末在 513 K 下氧化, 可分为氧化前期和氧化后期; UO_2 粉末氧化后期绝对增重比率极限为 0.489%; 氧化前期反应速率受界面化学反应控制, 氧化后期反应速率受扩散控制; 氧化前期, UO_2 粉末氧化属于缩核模型, UO_2 单颗粒单位面积上氧化质量的增加量解析式为 $\Delta w/S_n = 0.104 \ 1t - 2.146 \ 67$, 氧化速率常数 $k_c = 3.49 \times 10^6 \exp(-73 \ 919.39/RT)$ 。

关键词: 二氧化铀; 缩核模型; 氧化动力学; 氧化速率常数

中图分类号: TL211.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-6931 (2010) S0-0352-07

Study on Oxidation Mechanism and Kinetics in Static Air at 513 K of Uranium Dioxide Powder

GAO Jia-cheng¹, WU Shu-fang¹, YANG Xiao-dong², CHANG Xin²

(1. College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China;

2. Yibin Nuclear Fuel Corporation, Yibin 644000, China)

Abstract: Oxidation mechanism and kinetics in static air at 513 K of uranium dioxide powder was investigated on purpose to obtain surface pre-oxidation treated active uranium dioxide powder whose O/U ratio in outer layer was approximately 2.25 while whose phase in core was still uranium dioxide so as to carry out low temperature sintering test. Oxidation process of uranium dioxide powder oxidized at 513 K is divided into the earlier period and the later period. The limitation of absolute increased mass ratio of uranium dioxide powder at 513 K in the later period is 0.489%. The reaction rate is controlled by interface chemical reaction in the earlier period and by diffusion in the later period. Oxidation mechanism of uranium dioxide powder oxidized at 513 K in the earlier period conforms to scaled core model. The functional relationship between increased mass in unit area of single uranium dioxide particle and oxidation time t can be expressed by equation $\Delta w/S_n = 0.104 \ 1t - 2.146 \ 67$, oxidation rate constant k_c in the earlier period of uranium dioxide powder is $3.49 \times 10^6 \exp(-73 \ 919.39/RT)$.

收稿日期: 2010-06-29; 修回日期: 2010-08-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50874126)

作者简介: 高家诚 (1947—), 男, 重庆人, 教授, 粉末冶金材料专业

Key words: uranium dioxide; scaled core model; oxidation kinetics; oxidation rate constant

UO₂ 粉末是制备核电站用 UO₂ 芯块的原料^[1]。UO₂ 芯块的烧结分为低温烧结和高温烧结^[2]。UO₂ 核燃料芯块通常在 1 700 °C 下于氢气气氛中烧结, 采用高温烧结工艺, 芯块密度可达 95% 的理论密度。但高温烧结能耗耗时, 且有一定的危险。寻求两段式低温烧结工艺获得高密度的 UO₂ 芯块的技术吸引了科技工作者的注意。采用低温烧结工艺, UO₂ 生坯首先在 1 100 °C 下于 CO₂ 气氛中烧结, 然后在 1 400 °C 氢气气氛中还原^[3]。

低温烧结本质是活化烧结。在超化学计量的 UO₂ 中, 铀原子的扩散速率随过剩氧量的增加呈指数增加。在 1 100 °C 时, 对于 UO_{2+x}, $X=0.000\ 01$ 时, 扩散速率 $D=3.9\times 10^{-25}$ cm/s; $X=0.03$ 时, $D=3.3\times 10^{-18}$ cm/s^[4]。UO₂ 烧结是铀原子的扩散, UO₂ 中保持一定量的过剩氧能使铀的扩散激活能降低, 扩散系数升高, 才能进行低温烧结。UO₂ 的烧结速度及烧结密度还取决于烧结期间表面能及晶界能的变化。粉末的表面积愈大, 表面能愈大, 晶界能愈高则烧结速度和烧结密度愈高, 即较高活性的粉末有利于进行低温烧结^[4]。若能采用空气氧化的方法对 UO₂ 粉末进行表面改性, 获取 O/U 比约为 2.25 的壳层^[5], 则可以满足低温烧结的条件。

本课题组由 UO₂ 粉末的热分析实验发现: UO₂ 粉末在流动干燥空气中于 513 K 和 633 K 下氧化有两个放热峰^[6]。本工作研究 UO₂ 粉末在 513 K 下于静态空气中的氧化机制和氧化前期与氧化后期的氧化动力学规律^[7-10], 为 UO₂ 芯块低温烧结用粉末的制备提供有益参考。

1 试验

1.1 材料及方法

试验中所用的 UO₂ 粉末由中核建中核燃料元件公司提供, 其主要性能列于表 1。杂质含量为: C, 15 μg/g; F, 80 μg/g。折算的初始 O/U 比为 2.177。

将 10 g 经真空还原处理的 UO₂ 粉末分别装入 12 个带盖陶瓷坩埚中。将带盖陶瓷坩埚放入 SX-5-12 箱式电阻炉中, 在 513 K 和 633 K 下于静态空气中氧化保温。每隔 60 min, 将装有

已还原 UO₂ 粉末的带盖陶瓷坩埚取出, 并冷却至室温。用 FA-2004 电子天平称量冷却后的装有 UO₂ 粉末的带盖陶瓷坩埚, 用差量法计算 UO₂ 粉末氧化前、后质量的变化。

1.2 热分析试验

热分析试验在德国 NETZSCH 公司生产的 STA449C 型综合热分析仪上进行。

图 1 所示为升温速率分别为 20、10 °C/min 时, UO₂ 粉末的差示扫描量热-热重 (DSC-TG) 分析曲线。由 UO₂ 粉末于流动干燥空气中的热分析试验结果可知: 在 240、382 和 815 °C 下, UO₂ 粉末的差热分析曲线出现 3 个放热峰。

1.3 XRD 试验

用日本理学 D/MAX-3C X 射线衍射仪对 UO₂ 粉末于 240、382 和 815 °C 温度下预氧化处理后的氧化产物进行物相分析, 其 XRD 谱示于图 2。结果表明: UO₂ 粉末于 240 °C 下保温 8 h 后的氧化产物以 UO₂ 粉末为主。另外, 出现了 U₃O₇ 的特征峰, 即表面氧化使表层 O/U 比约达到 2.33。UO₂ 粉末在 382、815 °C 下保温 8 h 后的氧化产物均为 U₃O₈。

然后, 建立 UO₂ 粉末氧化动力学模型和缩核模型, 研究 UO₂ 粉末在 513 K 下于静态空气中的氧化机制和氧化前期与氧化后期的氧化动力学规律^[7-10]。

2 试验结果及讨论

2.1 UO₂ 粉末氧化动力学模型

根据气固相反应动力学原理, 可假定 UO₂ 的氧化^[11-13]由以下 3 个步骤组成: 1) 气相中的 O₂ 分子通过气相边界层扩散到产物层表面; 2) O₂ 分子通过产物层向反应表面扩散; 3) 在反应表面发生氧化反应生成 U₃O₇。因此, UO₂ 粉末的氧化反应可分为 3 个阶段: 氧化前期为化学反应控速阶段, 氧化中期为混合控速阶段, 氧化后期为扩散控速阶段。因为在氧化前期, 反应产物层很薄, O₂ 分子直接或很快通过产物薄膜与 UO₂ 发生反应, 此时, 氧化速度受化学反应控制; 随着氧化反应的进行, 产物层逐渐增厚, O₂ 分子通过此层向 UO₂ 粉末表面扩散的阻力加大, 此时, 表面化学反应速度与扩散速

度共同控制氧化过程；在氧化后期，由于产物层的加厚，使 O_2 分子扩散的路径加长，扩散的

阻力加大， O_2 分子要通过产物层扩散后才能进行反应，此时，氧化速度便受扩散环节控制。

表 1 原始二氧化铀粉末的主要物理性能

Table 1 Main physical properties of original uranium dioxide powder

O/U 比	^{235}U 丰度/%	比表面/ ($\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$)	松装密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	振实密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	基体/ (%T.D.)	粒度/ μm	水分/%
2.10	87.45	2.65	1.54	2.87	98.13	1.3	0.14

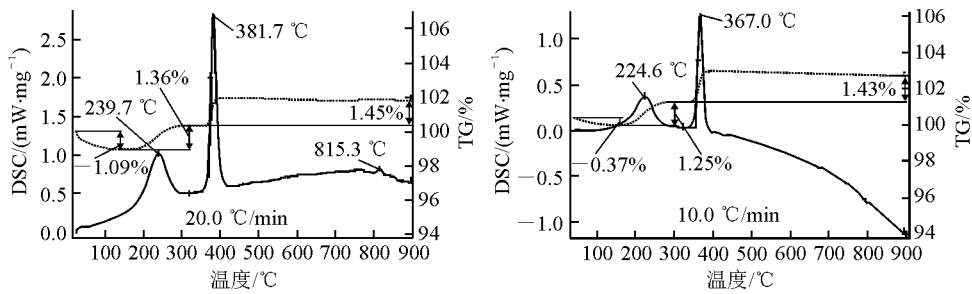


图 1 UO_2 粉末的 DSC-TG 曲线

Fig. 1 DSC-TG curves of uranium dioxide powder

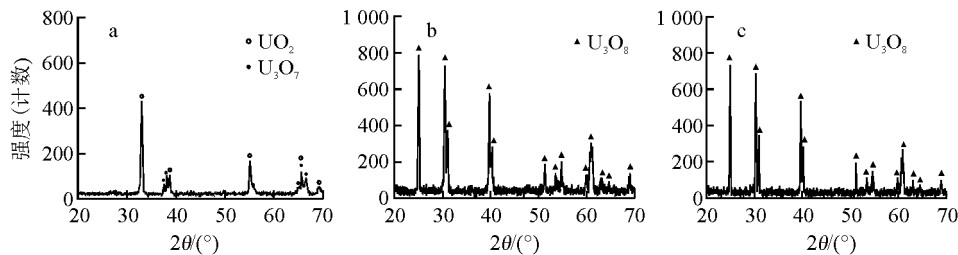


图 2 UO_2 粉末在 240 °C (a)、382 °C (b) 和 815 °C (c) 下保温 8 h 氧化产物的 XRD 谱

Fig. 2 XRD patterns of oxide of uranium dioxide powder oxidized for 8 h at 240 °C (a), 382 °C (b) and 815 °C (c)

2.2 缩核模型

根据气固反应理论，固体缩核反应后，未反应核外包围的固相产物层（即扩散层）可保持体积不变（如催化剂上的气相反应），也可随反应减小。

UO_2 粉末在 513 K、8 h 下氧化保温，由 XRD 分析可知氧化产物以 UO_2 为主，并有少量的 U_3O_7 生成^[6]。对于单颗 UO_2 粉末的氧化反应，513 K 下 O_2 分子与 UO_2 粉末的反应过程符合多孔固体缩核模型。 UO_2 颗粒沿径向可大致划分为吸附层、扩散层和内部未反应的 UO_2 核。 O_2/UO_2 反应界面介于 U_3O_7 扩散层和未反应的 UO_2 之间。

设 UO_2 颗粒的初始半径为 R_0 ，经时间 t

形成 U_3O_7 氧化层后， UO_2 颗粒的残留半径为 r ，达到饱和时颗粒中心未参加氧化反应的 UO_2 球颗粒半径为 r_1 。设氧化时间 t 后 r 和 R_0 间的球壳为 SS (spherical shell)，SS 球壳为 U_3O_7 氧化层。设 UO_2 和 U_3O_7 的密度分别为 ρ_1 、 ρ_2 。由 513 K 下 UO_2 粉末的氧化增重试验数据可知： UO_2 粉末在 513 K 下氧化保温，其质量增加但体积膨胀很小（图 3）。

分析认为，空气中氧气分子中的氧原子渗入 UO_2 晶格发生氧化反应，在 UO_2 颗粒表面形成较薄的 U_3O_7 氧化层（图 4b）^[6]，随着氧化进行， U_3O_7 氧化层变厚（图 4c），最终达到饱和（图 4c）。

故可认为： UO_2 颗粒在 513 K 下氧化过

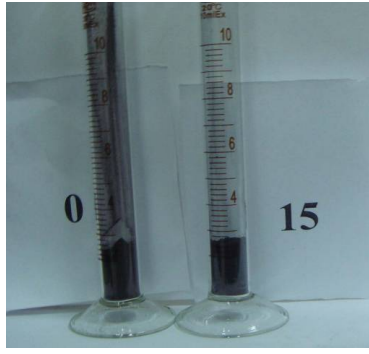


图 3 UO₂ 粉末氧化 420 min 后体积膨胀照片

Fig. 3 Image of UO₂ powder after being oxidized for 420 min

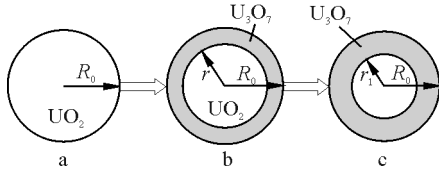


图 4 513 K 下 UO₂ 粉末氧化过程缩核模型示意图

Fig. 4 Diagram of scaled core model for UO₂ powder oxidation process

a——原始 UO₂ 颗粒；b——UO₂ 颗粒表面生成 U₃O₇ 氧化层；
c——U₃O₇ 氧化层生长最终恒定

程中，其体积几乎恒定不变。又因为 $\rho_1 < \rho_2$ ($\rho_1 = 10.96 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, $\rho_2 = 11.41 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$)，可推定 UO₂ 颗粒于 513 K 下氧化球径 R_0 恒定不变。其质量增加量 m 由 r 和 R_0 间的球壳质量的变化来提供，即：

$$m = \rho_2 v - \rho_1 v = \frac{4}{3} \pi (\rho_2 - \rho_1) (R_0^3 - r^3) \quad (1)$$

则氧化速率 v 为：

$$v = \frac{dm}{dt} = \frac{d(\frac{4}{3} \pi (\rho_2 - \rho_1) (R_0^3 - r^3))}{dt} = \frac{4\pi(\rho_2 - \rho_1)r^2 \frac{dr}{dt}}{dt} \quad (2)$$

在氧化过程中，UO₂ 粉末单颗粒单位面积氧化质量的增加量 $\Delta w / Sn$ 为：

$$\Delta w / Sn = \frac{W - W_0}{Sn} = \frac{(w - w_0)n}{Sn} = \frac{(w - w_0)}{S} = \frac{m}{S} = \frac{\frac{4}{3} \pi (\rho_2 - \rho_1) (R_0^3 - r^3)}{S}$$

$$\frac{4}{3} \frac{\pi(\rho_2 - \rho_1)}{S} R_0^3 + \frac{4}{3} \frac{\pi(\rho_1 - \rho_2)}{S} r^3 \quad (3)$$

其中： Δw 为试验所采用的 10 g UO₂ 粉末氧化时间 t 后的质量增加量； S 为氧化反应中单个 UO₂ 颗粒的表面积； n 为参加氧化反应的 UO₂ 颗粒总数； W 为氧化反应后粉末的总质量； W_0 为氧化反应前 UO₂ 粉末的初始质量； w 为单个 UO₂ 颗粒氧化时间 t 后的质量； w_0 为单个 UO₂ 颗粒的初始质量。

在氧化前期，UO₂ 粉末表面直接与空气中的氧气接触，随着温度的升高，UO₂ 粉末与表面吸附的氧气发生化学反应，此时 UO₂ 的氧化速率 v 与化学反应速率 v_c 相等，即 $v = v_c$ ^[7]，而：

$$v_c = Sk_c C \quad (4)$$

其中： k_c 为氧与 UO₂ 粉末进行反应的氧化速率常数； C 为试样表面氧的浓度。

由式 (2) 和式 (4) 可知：

$$4\pi(\rho_1 - \rho_2)r^2 \frac{dr}{dt} = Sk_c C \quad (5)$$

即：

$$4\pi(\rho_1 - \rho_2)r^2 dr = Sk_c C dt \quad (6)$$

对上式积分，得：

$$\int_0^r 4\pi(\rho_1 - \rho_2)r^2 dr = \int_0^t Sk_c C dt \quad (7)$$

$$\frac{4}{3} \pi(\rho_1 - \rho_2)r^3 = Sk_c C t \quad (8)$$

将式 (8) 带入式 (3) 有：

$$\Delta w / Sn = \frac{\frac{4}{3} \pi(\rho_2 - \rho_1)}{S} R_0^3 + \frac{\frac{4}{3} \pi(\rho_1 - \rho_2)}{S} r^3 = \frac{\frac{4}{3} \pi(\rho_2 - \rho_1)}{S} R_0^3 + \frac{Sk_c C t}{S} = \frac{\frac{4}{3} \pi(\rho_2 - \rho_1)}{S} R_0^3 + k_c C t \quad (9)$$

令：

$$k_c C = A, \quad \frac{4}{3} \frac{\pi(\rho_2 - \rho_1)}{S} R_0^3 = B$$

则：

$$\Delta w / Sn = At + B \quad (10)$$

上式表明：在 533 K 下， UO_2 粉末氧化前期单颗粒单位面积氧化质量的增加量与氧化时间是一次函数的关系。

2.3 氧化前期和后期的动力学分析

513 K 下氧化时间-绝对增重曲线示于图 5。由图 5 可以看出： UO_2 粉末氧化大致分为氧化前期（0~240 min）和氧化后期（240~480 min）。氧化前期质量迅速增加，氧化后期质量平稳不变。

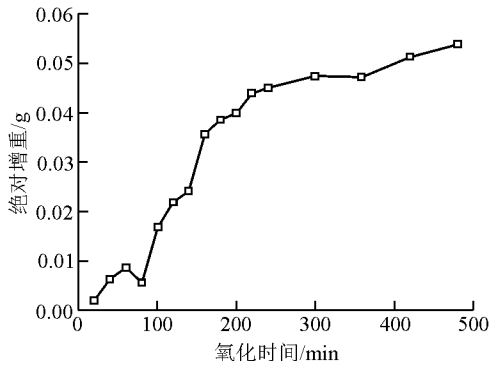


图 5 513 K 下氧化时间-绝对增重曲线

Fig. 5 Curve of oxidation time vs. absolute increased mass at 513 K

二氧化铀单颗粒单位面积氧化质量的增加量 $\Delta w/S_n$ 的计算公式为：

$$\Delta w/S_n = \frac{\Delta w}{4\pi R_0^2 \frac{m_0}{w_0}} = \frac{\Delta w}{4\pi R_0^2 \frac{m_0}{\rho_1 v_0}} = \frac{\Delta w}{4\pi R_0^2 \frac{m_0}{\rho_1 \frac{4\pi R_0^3}{3}}} = \frac{\Delta w R_0 \rho_1}{3 m_0} \quad (11)$$

其中： m_0 为实验所采用的 UO_2 粉末质量， $m_0 = 10 \text{ g}$ 。

1) 氧化前期动力学分析

表 2^[14]列出了 513 K 下氧化时间为 t 时，对应的二氧化铀粉末质量绝对增加量 Δw 和二氧化铀单颗粒单位面积氧化质量的增加量 $\Delta w/S_n$ 数据。根据表 2 数据作出 513 K 下二氧化铀粉末氧化前期的氧化动力学关系图，如图 6 所示。

从图 6 可见， UO_2 单颗粒单位面积上氧化质量的增加量与氧化时间基本上呈线性关系，符合氧化前期的动力学公式（式（10）），这表明， UO_2 粉末的氧化前期的氧化速率受界面化学反应控制。

表 2 513 K 下 t 、 Δw 和 $\Delta w/S_n$ 数据

Table 2 Values of t , Δw and $\Delta w/S_n$ at 513 K

t/min	$\Delta w/\text{g}$	$10^6 R_0/\text{m}$	$10^{-3} \rho_1/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	m_0/g	$(\Delta w/S_n)/(\text{mg}\cdot\text{m}^{-2})$
20	0.002 0	1.3	10.96	10	0.95
40	0.006 3	1.3	10.96	10	2.99
60	0.008 6	1.3	10.96	10	4.09
80	0.005 5	1.3	10.96	10	2.61
100	0.016 7	1.3	10.96	10	7.93
120	0.021 7	1.3	10.96	10	10.31
140	0.024 0	1.3	10.96	10	11.4
160	0.035 7	1.3	10.96	10	16.96
180	0.038 5	1.3	10.96	10	18.29
200	0.039 8	1.3	10.96	10	18.91
220	0.043 8	1.3	10.96	10	20.81
240	0.045 0	1.3	10.96	10	21.38

用 Origin7.5 对 513 K 下 UO_2 粉末氧化前期的 UO_2 单颗粒单位面积上氧化质量 $\Delta w/S_n$ 的增加量与氧化时间 t 进行线性拟合有：

$$\Delta w/S_n = 0.104 1 t - 2.146 67 \quad (12)$$

同理，可计算 633 K 下的单个 UO_2 颗粒单

位面积上氧化质量为 $\Delta w/S_n$ ：

$$\Delta w/S_n = 2.768 23 t - 181.12 \quad (13)$$

由式（12）可知，图 6 中直线的斜率即为 UO_2 粉末在 513 K 下氧化前期的氧化速率常数 k_c 。因此， $k_{c, 513 \text{ K}} = 0.104 1 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{min}^{-2}$ ；

同理, k_c 633 K = $2.768\ 23\ \text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{min}^{-2}$ 。

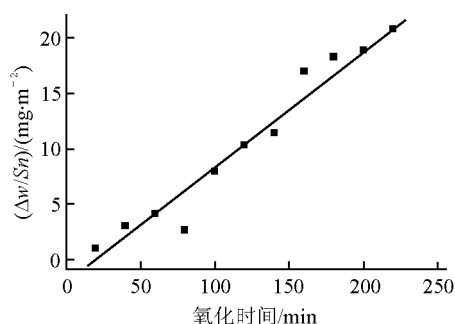


图6 513 K 下 UO_2 粉末氧化前期的氧化动力学关系

Fig. 6 Oxidation kinetics of uranium dioxide powder in earlier period at 513 K

根据 Arrhenius^[10]提出的 k - T 关系经验公式 $k=A\exp(-E_a/RT)$, 可推出 $\ln k=\ln A-E_a/RT$, 对 UO_2 粉末氧化前期的氧化增重数据进行处理。其中, k 为反应速率常数, A 为指前因子(给定反应的特征常数), E_a 为反应活化能, T 为热力学温度, R 为摩尔气体常数, $R=8.314\ 41\ \text{J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$ 。氧化前期反应速率常数与氧化温度的关系示于图 7。图 7 中直线的斜率为 $-E_a/R$, 纵坐标截距为 $\ln A$ 。由此, 氧化前期, $E_a=73\ 919.39\ \text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$, $A=3.49\times 10^6\ \text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$ 。

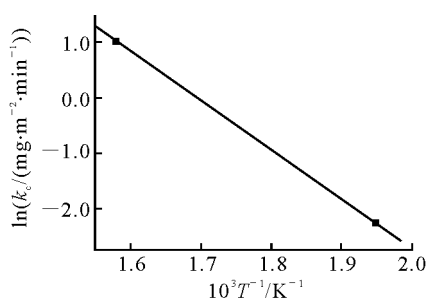


图7 氧化前期反应速率常数与氧化温度的关系

Fig. 7 Relationship between reaction rate constant and oxidation temperature in earlier period

根据 UO_2 粉末在氧化前期的反应活化能及指前因子, 得到 UO_2 粉末氧化前期氧化速率常数 k_c 和温度 T 的经验关系式:

$$k_c=3.49\times 10^6\exp(-73\ 919.39/RT)$$

2) 氧化后期氧化动力学分析

在本试验条件下, UO_2 粉末在 513 K 的氧化后期, 随着氧化时间的延长, 氧化时间-绝对

增重曲线走向平缓, 趋于水平, 质量的增加量趋于恒定, 并不遵循抛物线规律。

513 K 下 UO_2 的氧化后期(240~480 min)质量平稳, 尽管平台特征不如 633 K 下显著, 但从曲线趋于水平的特征可以推测, 若延长氧化时间, 曲线也会与 633 K 下那样逐渐趋于水平。

计算 UO_2 粉末氧化 240、300、360、420 和 480 min 绝对增重的平均值为 0.048 9 g, 由此可推测, UO_2 粉末在 513 K 下氧化保温, 其绝对增重的极限比率约为 0.489%。

3 结论

1) UO_2 粉末在 513 K 下氧化可分为氧化前期和氧化后期: 氧化前期(0~240 min)质量迅速增加; 氧化后期(240~480 min)随着氧化时间的延长, 氧化粉末质量基本不再增加, 趋于恒定。513 K 下 UO_2 粉末氧化后期绝对增重比率极限为 0.489%。

2) 在 513 K 下, UO_2 粉末氧化前期反应速率受界面化学反应控制, 氧化后期反应速率受扩散控制, 氧化前期属于缩核模型。

3) 513 K 下, UO_2 粉末氧化前期单颗粒单位面积上氧化质量的增加量解析式为 $\Delta w/Sn=0.104\ 1t-2.146\ 67$ 。

4) UO_2 粉末氧化前期的氧化速率常数 $k_c=3.49\times 10^6\exp(-73\ 919.39/RT)$ 。

参考文献:

- [1] 伍志明. 二氧化铀核燃料的粉末冶金技术[J]. 粉末冶金技术, 1996, 14: 63-68.
WU Zhiming. Powder metallurgical technology of uranium dioxide fuel pellet[J]. Powder Metallurgy Technology, 1996, 14: 63-68(in Chinese).
- [2] GAO Jiacheng, YANG Xiaodong, LI Rui, et al. Low-temperature sintering mechanism on uranium dioxide[J]. Journal of Materials Science, 2007, 42: 5 936-5 940.
- [3] BIRSEN A, BILGE A N. The possible usage of ex-ADU uranium dioxide fuel pellets with low-temperature sintering[J]. Journal of Nuclear Materials, 2000, 280: 45-50.
- [4] 杨晓东. 二氧化铀芯块低温烧结工艺研究[D]. 重

- 庆: 重庆大学, 2004.
- [5] 李锐. 二氧化铀芯块低温烧结机理研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2006.
- [6] 高家诚, 吴曙芳, 杨晓东, 等. UO_2 粉末低温氧化表面改性研究[J]. 原子能科学技术, 2008, 42(增刊): 212-215.
- GAO Jiacheng, WU Shufang, YANG Xiaodong, et al. Surface modification of uranium dioxide powder by low temperature pre-oxidation[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2008, 42(Suppl.): 212-215(in Chinese).
- [7] 李玉海, 黄晓莹, 王承志, 等. SiC 颗粒的高温氧化动力学[J]. 材料研究学报, 2009, 23(6): 582-586.
- LI Yuhai, HUANG Xiaoying, WANG Chengzhi, et al. High temperature oxidation kinetics of SiC particles[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2009, 23(6): 582-586(in Chinese).
- [8] 杨瑞成, 靳赛特, 吕学飞, 等. Ni-Cr-Mo-Cu 合金的氧化动力学研究[J]. 材料热处理学报, 2009, 30(1): 24-27.
- YANG Ruicheng, JIN Saite, LU Xuefei, et al. Oxidation kinetics of Ni-Cr-Mo-Cu corrosion resistant alloy[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2009, 30(1): 24-27(in Chinese).
- [9] 刘成雁, 李在元, 翟玉春, 等. 纳米铜粉氧化反应动力学研究[J]. 分子科学学报, 2007, 23(1): 22-27.
- LIU Chengyan, LI Zaiyuan, ZHAI Yuchun, et al. Study on oxidation kinetics of nanometer copper powder[J]. Journal of Molecular Science, 2007, 23(1): 22-27(in Chinese).
- [10] 徐秀清, 王顺兴, 周旭东. 冷轧钢板的氧化还原动力学研究[J]. 河南科技大学学报: 自然科学版, 2007, 28(2): 4-6.
- XU Xiuqing, WANG Shunxing, ZHOU Xudong. Study on oxidation-reduction kinetics of cold rolled steel plate[J]. Journal of Henan University of Science and Technology: Natural Science, 2007, 28(2): 4-6(in Chinese).
- [11] 刘俊友, 刘英才, 刘国权, 等. SiC 颗粒氧化行为及 SiC_p/铝基复合材料界面特征[J]. 中国有色金属学报, 2002, 12(5): 961-966.
- LIU Junyou, LIU Yingcai, LIU Guoquan, et al. Oxidation behavior of SiC particle and interface character of SiC_p/aluminium matrix composite[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2002, 12(5): 961-966(in Chinese).
- [12] McEACHERN R J, TAYLOR P. A review of the oxidation of uranium dioxide at temperatures below 400 °C[J]. Journal of Nuclear Materials, 1998, 254: 87-121.
- [13] NOUR W M N, KENAWY S H. Oxidation behavior of SiC-platelets and particulates-reinforced $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$ matrix composites[J]. Journal of Materials Science, 2003, 38: 1 673-1 678.
- [14] 吴曙芳. 二氧化铀粉末表面改性的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2009.