

铀及其合金的水氧腐蚀机理分析

吴艳萍, 朱生发, 刘天伟, 蒲 朕, 巫泉文*

中国工程物理研究院, 四川 绵阳 621900

摘要: 铀及其合金是重要的核材料, 其水氧腐蚀研究受到广泛关注。本文系统总结了铀及其合金在真空和大气环境下的氧化反应过程、腐蚀速率和产物, 并对不同研究者提出的反应机理进行讨论分析。其中铀-氧反应过程为氧气在表面的吸附、解离, O_2^- 在晶格中进行扩散, O_2^- 在金属和氧化物界面发生反应, 其中扩散是反应速率的控制步骤。铀-水体系反应机理存在争议: 进行扩散反应的离子是 O_2^- 还是 OH^- 还没有一致的认识。铀-氧-水体系的反应是氧气和水气共同作用的结果, 反应速率介于前两种体系之间。

关键词: 铀及其合金; 氧化; 反应机理

中图分类号: TG174.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9950(2014)06-0321-06

doi: 10.7538/hhx.2014.36.06.0321

Reaction of Uranium and Its Alloy With Oxygen and Water Vapor

WU Yan-ping, ZHU Sheng-fa, LIU Tian-wei, PU Zhen, WU Quan-wen*

China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China

Abstract: The reaction of uranium and its alloy with oxygen and water vapor has attracted widely attention as an important nuclear material. The oxidation process, reaction rate and products of uranium and its alloy with oxygen, water vapor and humid oxygen has been summarized and discussed. The process of uranium-oxygen systematic reaction includes the adsorption, solution of oxygen on the surface, diffuseness in the crystal lattice which is the determinative step and reaction at the interface of the metal and the oxide. However, the reaction mechanism of uranium-water system was dispersive on the diffuse ion. The uranium-oxygen-water systematic reaction is the result combines the uranium-oxygen and uranium-water reaction.

Key words: uranium and its alloy; oxidation; reaction mechanism

铀及其合金广泛地应用于核工业领域, 但铀化学性质非常活泼, 很容易与环境气氛中的水气和氧气发生反应。在较高的湿度和温度下, 氧化会更加剧烈。严重的氧化腐蚀导致氧化层的破

裂, 使得铀腐蚀产物颗粒释放在空气中, 吸入这些颗粒会对人体健康造成威胁。

对于 $U-O_2(g)$ 体系, 因为其反应过程比较简单, 目前已开展了系统地研究。普遍认为氧化过程

收稿日期: 2014-03-31; **修订日期:** 2014-10-09

基金项目: 表面物理与化学重点实验室基金资助项目(ZDXKFZ201213)

作者简介: 吴艳萍(1984—), 女, 河南郑州人, 工程师, 材料腐蚀专业

* **通信联系人:** 巫泉文(1986—), 男, 四川内江人, 博士研究生, 核燃料循环与材料专业, E-mail: wqwase@126.com

为:氧气在金属表面的吸附、解离, O^{2-} 在晶格中进行扩散, O^{2-} 在金属和氧化物界面发生反应,氧化膜增厚,其中扩散是反应速率的控制步骤。氧化产物为致密的面心立方 $UO_{2.2}$,氧化初期,氧化速率与时间呈抛物线关系,之后呈线性关系。

对于 $U-H_2O(g)$ 体系,一般认为其反应过程和反应机理与 $U-O_2(g)$ 体系比较相似,但是对于其扩散反应的离子是 O^{2-} 或者 OH^- 存在争议。基于反应产物为疏松的面心立方 UO_2 ,反应速率远大于 $U-O_2(g)$ 体系,笔者认为 $U-H_2O(g)$ 体系的扩散离子为 OH^- 。

对于 $U-O_2(g)-H_2O(g)$ 体系,反应比较复杂,反应过程和反应产物也都有差异。反应速率介于前边两种体系之间,反应机理的争议主要在于反应中水和氧的作用,有些研究者认为是铀与氧的反应,水气起催化作用;有些研究者认为是铀与水的反应,氧气起抑制作用;还有认为是氧气和水气共同反应,两者共同贡献。本文作者认为此体系中氧化反应是氧气和水气与金属铀共同作用的结果。

铀及其合金的腐蚀不仅对操作人员的健康带来危害,还会造成工件的力学性能下降,甚至导致部件的失效,因此对铀及其合金的腐蚀行为的研究是一项很重要的工作,可以为工程应用提供数据支撑。本文系统地对 $U-O_2(g)$ 、 $U-H_2O(g)$ 、 $U-O_2(g)-H_2O(g)$ 体系反应开展了比较全面的调研,并对相关结果进行讨论。

1 铀-氧反应

国内的铀腐蚀性能研究主要集中于中国工程物理研究院,1983 年开展了贫铀的抗腐蚀真空热氧化膜研究,实验采用法国产的 B60 型的热天平,测量真空加热过程中试样质量的微小变化。实验依照 Petit 的报道^[1]设定。在实验中制备了两种铀的真空热氧化膜:一种是在真空条件下,将表面具有咖啡色氧化膜的铀试样在 625 °C 保温 1 h,使表面生成一层银白色的氧化物薄膜,推测为铀氧化物和铀的氧碳化物混合物;另一种是在真空条件下,通入微量的氧,在 625 °C 处理 1 h,获得各种厚度的蓝色氧化铀薄膜^[2]。采用显微拉曼光谱和原子力显微镜原位研究了铀与干燥空气的反应过程,发现加热后首先出现活性腐蚀亮斑,逐渐积累长大。经过恒温加热,光谱强度略有增加,并逐渐趋于稳定不变。升温到 200 °C 后,随着反

应时间的延长,表面白色斑点慢慢变为钉状灰色突起物,突起氧化物逐渐长大,并连接成片^[3]。

采用 X 射线光电子谱(XPS)分析贫铀与干燥氧气反应的氧化膜成分,由表及里依次为: UO_{2+x} 、 UO_2 和碳氧化铀 UC_xO_{1-x} ,认为立方密排结构的碳氧化铀相的存在是延缓铀在大气中腐蚀的关键因素^[2]。采用 XPS 原位研究了铀铌合金在干氧气氛中的初始氧化反应产物发现:氧气在铀铌合金表面吸附解离后迅速与表面的铀铌原子结合生成 UO_2 、 UO_{2+x} 和 NbO ,进一步氧化导致 NbO_2 和 Nb_2O_5 产生;原位氧化过程中,生成 UO_2 和 NbO 时,铀向表面偏析,随着 Nb_2O_5 增加,铌向表面偏析^[4]。

对贫铀的氧化动力学也进行了研究,椭圆偏振光谱技术(SE)研究了 45~95 °C 和 500~50 000 Pa 氧气动力下贫铀的氧化膜厚度,发现贫铀氧化初期的氧化层厚度随时间变化呈抛物线动力学规律;高碳铀在纯氧中的氧化速率随着温度的升高而迅速增加,氧气压力对氧化速率影响不大^[5]。数值模拟方法研究了铀表面初始阶段的氧化物形成过程,计算得到的活化能为 42.266 6 kJ/mol,并得到了实验验证^[6]。

国际上,贫铀与氧气的反应集中于美英等国家,美国的研究^[7]主要采用微天平、四极质谱等设备。反应系统可以通入干燥氧气、水蒸气、潮湿氧气,采用计算机程序自动测定试样的质量、系统内总压力和试样温度,间隔几个小时可以采用四极质谱仪取气体进行分析。测定由于生成氧化物而致的总增重,计算出总的反应速率,实验结束后,移去加热炉,抽去系统内气氛,把样品取出可以对反应生成氧化物进一步研究。

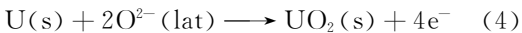
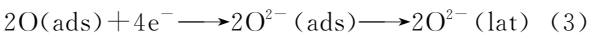
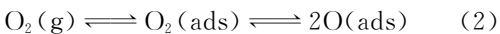
贫铀与氧气反应产物采用 X 射线衍射分析法(XRD)标定为 $UO_{2.2}$,具有面心结构,晶格参数与 JCPDS 所列标准值一致,氧化膜极致密,附着良好^[8]。贫铀与氧气在不同的温度和氧气压力下,反应速率在 $8 \times 10^{-4} \sim 6 \times 10^{-2}$ mg/(cm² · h) 范围内。其中氧气压力为 0.067~13.3 kPa,反应速率不随氧气压力变化,在反应的最初 34~36 h 内,反应速率为 6×10^{-2} mg/(cm² · h),氧化物厚度达到 55 nm 后,氧化速率为 3.2×10^{-3} mg/(cm² · h)^[9]。Weirick 等^[8]研究发现在 100 °C、931 Pa O_2 无水气条件下,铀与氧的反应呈线性变化,反应速率约为 8×10^{-4} mg/(cm² · h)。氧分压高于 931 Pa 时,反应速率与氧分压高低无关。观察到氧化曲

线起始时氧化慢慢接近线性变化,随后完全呈线性变化。McGillivray 等^[10]研究了铀与干燥空气在 40~350 ℃ 内的反应数据,提出反应初期符合抛物线型动力学,直到氧化层增长到因为应力而开裂剥落,氧化层的厚度保持不变,反应速率成为线性。计算得到反应速率方程(见式(1)), R 为反应速率,单位 $\text{mg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{h})$, T 为反应温度,单位为 K 。

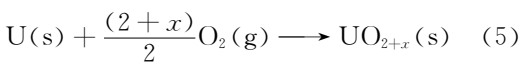
$$\ln R = 6.19 - 8\,077/T \tag{1}$$

贫铀与氧气的氧化反应初期存在以下现象:

(1) 在氧化反应初期,产物背离化学计量比,且存在氧浓度梯度;(2) 氧化速率与时间呈抛物线关系;(3) 氧化反应速率随着温度的升高而提高^[5-6,11]。根据贫铀与氧气的反应现象得到反应过程和氧化反应机理:铀与氧气的反应首先是氧的解离吸附成为 O^{2-} ,然后 O^{2-} 从铀晶格的八面体间隙向氧化物和金属的界面扩散,电子向氧气和氧化物的界面扩散, O^{2-} 在界面处与铀发生反应,总的氧化反应速率由 O^{2-} 的扩散速率决定^[11]。反应过程由以下公式表示:对氧化物结构进行标定,式中 $x=0.2\sim0.4$ ^[8]。



总的反应式为:



2 铀-水反应

铀-水反应国内的研究相对较少,熊必涛等^[12]采用热重法研究了 50~90 ℃、32%~86% 湿度范围内水气气氛与铀的腐蚀特性。实验中使用饱和 NaCl 溶液、饱和 BaCl_2 溶液、饱和 MgCl_2 溶液和饱和 NaNO_3 溶液,分别用于配制稳定的饱和水气。研究结果示于图 1。从图 1 可见:(1) 反应分为 3 个阶段:在反应的起始阶段,反应比较迅速;然后,反应速率趋于平缓;曲线最后部分的斜率又明显增大,以稳定的线性反应速率持续到腐蚀实验结束;温度越高,反应的前两个阶段持续时间越短;(2) 随着湿度增加,腐蚀增重速率增大;在氧化的起始阶段和平缓阶段,腐蚀速率随湿度稍有增大,反应后期氧化腐蚀速率随湿度增大有较大的提高。

分析试验结果,提出以下反应机理^[12]:(1) 反应初期,水分子在清洁的铀表面发生吸附,水分子断开一个 $\text{O}-\text{H}$ 键,留下的 OH^- 有极强的化学吸附, H^+ 结合成 H_2 逸出,这个过程持续到表面形成一个完整的氧化层;(2) 当氧化层形成之后,水分子的吸附机理完全改变;没有金属表面促进离解,水分子或氢气在氧化物晶格里与氧原子键合,在这种氢键键合层的顶部形成多层吸附水;与

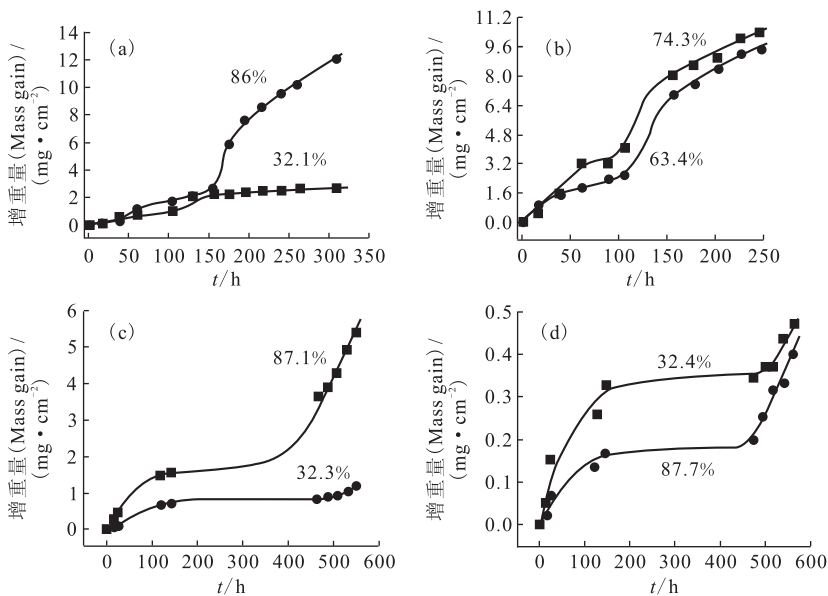
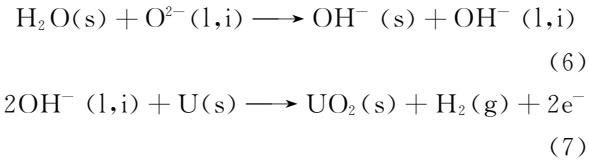


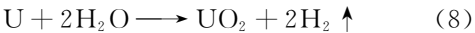
图 1 金属铀在不同温度 and 不同湿度下的氧化增重^[12]

Fig. 1 Weight gain of uranium oxidation at different temperature and humidity^[12]

表面氢键结合的水分子能借助水解反应与吸附的晶格中的氧反应而形成晶格 OH^- 和表面 OH^- ，如反应式(6)，式中 l, s 和 i 分别代表晶格、表面和间隙位置。化学吸附的 OH^- 通过氧化物晶格扩散进入体内， OH^- 的迁移能量小于 O^- 或者 O^{2-} ，发生反应见式(7)，所以铀与水气的反应速率要高于氧气；(3) 随着时间的延长，金属体相和氧化产物之间的密度不同，表面应力积累到一定程度使膜层破裂，宏观上出现起泡和掉粉现象；氧化膜破裂露出新鲜表面，水分子与新鲜表面反应加快产生更多的氧化物导致破裂，所以在反应后期会出现稳定的反应动力学。



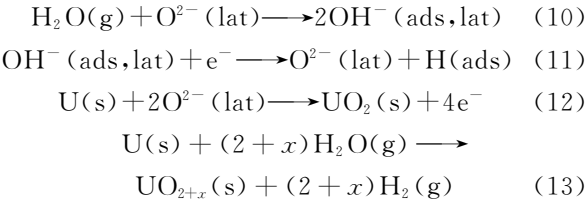
国外的铀-水体系研究较多，文献[7-8]研究了贫铀在 100 ℃ 和 U-0.75%Ti(质量分数，下同)在 140 ℃ 时，不同水气压下的氧化腐蚀。研究发现：100 ℃ 时，贫铀的反应呈现线性变化，反应速率取决于水气分压。在 0.25~2.67 kPa 范围内，U-0.75% Ti 的反应速率随着水气压力的增大而增大，在 0.25 kPa 和 2.67 kPa 计算出氧化速率分别为 $6.4 \times 10^{-3} \text{ mg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{h})$ 和 $2.3 \times 10^{-2} \text{ mg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{h})$ 。提出反应方程式如式(8)，对生成的氧化物晶格进行计算，晶格指数为 5.464 ± 0.002 ，与 JCPDS 标准卡片 UO_2 的晶格常数 5.468 对应。反应产物为 UO_2 ，面心立方结构，组织膨松，呈片状剥落。



对 $2.6 \times 10^3 \sim 1 \times 10^5 \text{ Pa}$ 水气气压，22~100 ℃ 条件下的铀-水反应进行总结，得到以下结论：在所有温度下，饱和水气压下的氧化反应速率最快，计算得到活化能为 53.34~64.68 kJ/mol，反应速率如公式(9)所示， R 为反应速率，单位 $\text{mg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{h})$ ，

$$T \text{ 为反应温度, 单位为 } \text{K}^{[13]}.$$
$$\ln R = 10.64 - 7\,725/T \tag{9}$$

利弗莫尔实验室^[10,14]依据实验结果观察到的现象如下：(1) 铀与水反应产物为氧化物和氢气；(2) 反应生成物与干燥氧气中生成的氧化物一致；(3) 氧化物的生成与时间呈抛物线关系；(4) 低温下，反应温度升高有利于反应进行。提出如下反应过程：水解离为 OH^- 并吸附在晶格中，转化为 O^{2-} ， O^{2-} 与铀反应，电子迁移到表面与 H^+ 结合，生成氢气。作者认为氧化反应过程中，跟在氧气中的反应一样是 O^{2-} 在扩散和反应，水解离为 OH^- 促进 O^{2-} 的生成，提高了反应速率，反应过程如反应式(10—12)所示，总反应如式(13)所示。



对于熊必涛等^[12]和文献[10,14]提出的反应机理，个人认为前者更为合理，原因如下：首先，其依据之一为反应生成的氧化物与干燥氧气中的一致是不成立的，因为研究表明铀与氧和水反应的反应产物不同，铀与氧的反应产物更为致密，附着力较好，而铀与水反应的产物比较疏松，与基体附着力较差^[5-6,8,11-12]；另外， OH^- 扩散所需要的能量更低， OH^- 与铀的反应比 O^{2-} 与铀的反应更为有利。

3 铀-水-氧反应

铀-水-氧的过程比较复杂，反应动力学和机理一直存在争议。中国工程物理研究院采用湿热腐蚀箱评价铀在水氧同时存在下的腐蚀，多用于铀的表面处理工艺性能的比较^[15-18]，对于腐蚀机理和腐蚀速率研究较少。杨江荣等^[19]研究了铀钚合金在大气下的氧化动力学，结果如图 2 所示，发现在温度低于 80 ℃ 时，合金表面氧化膜致密，

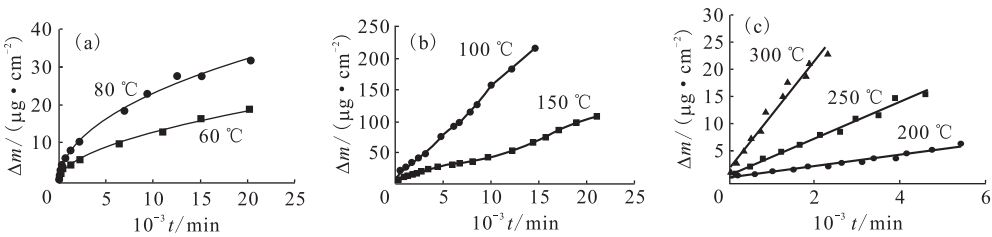


图 2 U-2.5%Nb 合金在空气中的氧化动力学曲线^[19]
Fig.2 Kinetic curves for U-2.5%Nb alloy oxidized in air^[19]

氧化行为遵循抛物线规律;在 100~150 ℃ 之间,氧化行为由抛物线和线性阶段组成;温度在 200 ℃ 以上,氧化行为主要为线性氧化,氧化初期观察到短暂的抛物线氧化规律。张延志等^[20]采用 XRD 研究了金属铀在不同温度湿度条件下、氧气环境中的氧化结果如下:(1) 100 ℃ 下,试样在相对湿度为 25% 和 48% 环境下的反应速率相差不大,但却比相对湿度低于 2% 的要快得多;(2) 在潮湿氧气中,氧化产物为 UO_2 ,氧化腐蚀动力学曲线初期为抛物线,后期转变为线性,氧化膜致密,与基体结合好,氧化规律与杨江荣等^[19]的在低温条件下的研究结论一致。后者在高温段未发现抛物线段,得出腐蚀动力学呈直线,原因可能是在高温下反应速率较快,测试的数据密度不够。

国外铀-水-氧气下的反应,最早系统的描述见于 Wilkinson^[21] 书中,检测反应过程中的气体压力变化(图 3),反应气体比例 $V(\text{O}_2) : V(\text{H}_2\text{O}) = 3 : 2$,反应温度为 100 ℃。铀与氧水混合气体的反应初期主要为铀与氧气反应,伴随着极少量的氢气生成,当氧气耗尽后,铀与水气迅速反应,伴随着大量氢气的生成。

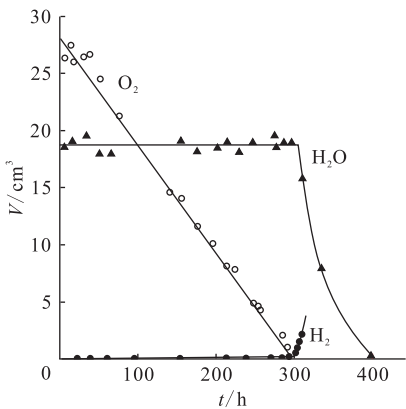


图 3 贫铀与水氧混合气体
反应过程中的气体含量变化^[21]

Fig. 3 Content of the oxygen and vapor
in the uranium-oxygen-water reaction system^[21]

随后文献[7-8]采用四极质谱和增重法联合,研究了 100 ℃ 低氧分压和低水气分压下铀的氧化。(1) 反应产物:氧分压对反应的影响,氧分压低于 6.65 Pa,反应与铀-水反应相同,反应取决于水气分压,产物为 UO_2 和 H_2 ,组织膨松,片状剥落;氧分压在 6.65~133 Pa 之间,反应为过渡状态,反应速率取决于水气分压,产物一般为 UO_2

和 H_2 ;氧分压大于 133 Pa,反应速率与水气分压和氧气分压都无关,反应速率常数 $k = 1.2 \times 10^{-2} \text{ mg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{h})$,反应产物为面心立方的 U_4O_9 ,组织致密,附着情况一般,易分层。此氧气分压对反应的影响结果与文献[14]中结果一致。(2) 反应速率(图 4):不同条件下的氧-水气环境中进行的氧化实验得到相同的实验结果,起始阶段的反应速率与最终阶段的反应速率相当于在水气中反应速率值,而中间阶段的反应速率常数为 $k = 1.2 \times 10^{-2} \text{ mg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{h})$,并与氧和水的分压无关。

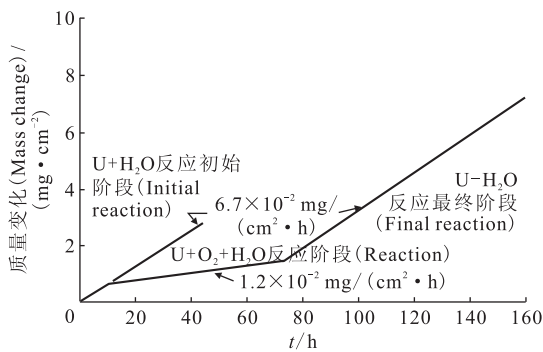


图 4 贫铀在水氧混合气体反应过程中的质量变化^[14]

Fig. 4 Mass change of uranium
in the uranium-oxygen-water reaction system^[14]

McGillivray 等^[10]研究了较宽温度和水气压力范围内铀在干空气中的氧化动力学,并利用同位素示踪技术和二次离子质谱(SIMS)技术联合使用分析了反应机理,得到了可以适用很宽范围的反应动力学公式。得到氧化机理包括:(1) O_2 的吸附、解离、扩散和反应不受添加水的影响;(2) 从干燥空气转向潮湿空气的反应速率加速是由 H_2O 的调质贡献引起的;(3) 氧气吸附改变了反应速率,是从表面上占据了水的部分吸附位置,从而减缓反应速率;(4) 氧和水均形成活性扩散粒子,是 OH^- 或者 O^{2-} 。得到了在 115~350 ℃ 和水气压力在 $0 \sim 4.7 \times 10^4 \text{ Pa}$ 均适用的氧化反应速率公式,如公式(14-17)所示。

$$r = \frac{k_1 p}{1 + k_2 p} + D \tag{14}$$

$$\ln D = 11.093 - 8\,077/T \tag{15}$$

$$\ln k_1 = 7.831 - 6\,432/T \tag{16}$$

$$\ln k_2 = -15.208 + 5\,327/T \tag{17}$$

式中: r 为总氧化反应速率; k_1 、 k_2 为铀与水反应速率, D 为铀与氧反应速率, $\text{mg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$;

T 为反应温度, K 。从反应动力学和产物分析, 作者认为在铀-氧-水系统中, OH^- 和 O^{2-} 的扩散同时发生, 氧化率由水和氧共同贡献。

4 结 论

对前期的研究结果进行整理, 得到以下结论, 提出了几个还需要深入研究的问题。

1) 铀与氧气的反应产物、反应机理和反应动力学研究都取得了共识。氧化反应过程为: 氧气在金属表面的吸附、解离、扩散, O^{2-} 在金属和氧化物界面发生反应。氧化产物为致密的面心立方 UO_{2+x} ($x=0.2\sim0.4$), 氧化初期, 氧化速率与时间呈抛物线关系, 之后呈线性关系。

2) 铀与水气反应机理主要存在以下争议: (1) 在金属-氧化物界面上发生反应的是 OH^- 还是 O^{2-} , 作者认为是 OH^- 的扩散; (2) 计算得出的活化能还有差距。从氧化物计算得到的氢气含量和测定的氢气含量存在一定的差距, 对于生成氢的精确测定也是一个难题, 有待深入研究。

3) 铀-氧-水体系的氧化反应未得到一致的结论, 反应机理的研究也有所不同, 其中跟反应的温度、湿度条件有关, 也与实验精度和数据处理有关, 作者认为此体系的反应是铀与水 and 氧共同反应的结果。在反应的初期水未完全占据表面时, 反应机理研究还不成熟。

参考文献:

- [1] Petit G S, Wright R R, Kienberger C A, et al. Formation of corrosion-resistant oxide film on uranium; K-1778[R]. US: Union Carbide Corporation, Nuclear Division, Oak Ridge Diffusion Plant, 1969.
- [2] 周萍, 汪小琳, 杨江荣, 等. 铀真空热氧化膜的 XPS 研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2008, 37: 94-97.
- [3] 褚明福, 蒙大桥, 邹乐西, 等. 金属铀氧化的显微拉曼光谱和原子力显微镜原位研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2009, 38(4): 627-631.
- [4] 付晓国, 刘柯钊, 汪小琳, 等. 铀钼合金在 O_2 气氛中氧化的 XPS 研究[J]. 核技术, 2001, 24: 848-852.
- [5] 林斯琴, 赖新春, 吕学超, 等. 采用椭偏光谱技术研究铀氧化动力学[J]. 核化学与放射化学, 2008, 30(2): 125-128.
- [6] 熊必涛, 蒙大桥, 杨维才, 等. 铀表面腐蚀初始阶段的理论模型[J]. 原子能科学技术, 2005, 39(2): 146-150.
- [7] Charles J, Weirick L J. The oxidation of uranium-0.75wt% titanium in environments containing oxygen and/or water vapor at 140 °C[J]. Nucl Mater,

- 1987, 144: 110-120.
- [8] Weirick L J. The oxidation of uranium in low partial pressures of oxygen and water vapor at 100 °C: SAND 83-0618[R]. Albuquerque, NM: Sandia National Laboratories, 1984.
- [9] Kofstad P. Initial oxide formation in high temperature oxidation of metals[M]. New York: Elsevier Applied Science Publisher, 1988: 29-50.
- [10] McGillivray G W, Geeson D A, Greenwood R C. Studies of the kinetics and mechanism of the oxidation of uranium by dry and moist air; a model for determining the oxidation rate over a wide range of temperatures and water vapor pressures[J]. J Nucl Mater, 1994, 208: 81-97.
- [11] Haschke J M, Allen T H, Morales L A. Reactions of plutonium dioxide with water and hydrogen-oxygen mixtures: mechanisms for corrosion of uranium and plutonium[J]. J Alloys Compd, 2001, 314: 78-91.
- [12] 熊必涛, 蒙大桥, 杨维才, 等. 金属铀在水气气氛中加速腐蚀的实验研究[J]. 原子能科学技术, 2005, 39(3): 226-231.
- [13] Ritchie A G. A review of the rates of reaction of uranium with oxygen and water vapor at temperature up to 300 °C [J]. J Nucl Mater, 1981, 102: 179-182.
- [14] Colmenares C A, Howell R, McCreary T. Oxidation and hydriding of uranium studied by positron annihilation; UCRL-88549 [R]. Livermore: Lawrence Livermore Laboratory, 1981.
- [15] 张广丰, 杨维才, 汪小琳, 等. 超临界 CO_2 处理后的金属铀表面氧化腐蚀和电化学腐蚀实验研究[J]. 原子能科学技术, 2003, 37(3): 233-236.
- [16] 杨江荣, 邹觉生, 王海峰, 等. 金属铀表面经 CO 处理后的腐蚀行为研究[J]. 核技术, 2003, 26: 472-475.
- [17] 鲜晓斌, 汪小琳, 郎定木, 等. 离子轰击镀对铀上铝镀层组织及防腐蚀性能的影响[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2003, 23: 299-303.
- [18] 王庆富, 刘清和, 王晓红, 等. 磁控溅射离子镀铌铪铀的电化学腐蚀行为[J]. 稀有金属材料与工程, 2008, 37: 289-293.
- [19] 杨江荣, 汪小琳, 周萍, 等. U-2.5%Nb 合金在空气中的氧化行为[J]. 核化学与放射化学, 2007, 31(3): 129-133.
- [20] 张延志, 管卫军, 王勤国, 等. X 射线衍射法研究铀在水气中的腐蚀[J]. 核化学与放射化学, 2008, 30(1): 43-46.
- [21] Wilkinson W D. Uranium corrosion and alloys[M]. New York: Uranium Metallurgy Interscience, 1962: 757-853.