

# UD<sub>3</sub> 的表面钝化和氧化特性研究

陈登磊<sup>1</sup>, 褚明福<sup>2,\*</sup>, 齐立柱<sup>2</sup>, 程亮<sup>2</sup>

(1. 表面物理与化学重点实验室, 四川 绵阳 621907; 2. 中国工程物理研究院 材料研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘要:** 本文研究了 UD<sub>3</sub> 的表面钝化和氧化特性。利用 XRD、激光拉曼技术观察到钝化的 UD<sub>3</sub> 表面致密保护层的主要成分为 UO<sub>2</sub>。利用量热法研究了钝化的 UD<sub>3</sub> 在空气中的氧化自燃特性, 结果显示: 当反应温度低于 110 °C 时, 钝化的 UD<sub>3</sub> 在空气中反应缓慢; 当反应温度高于 130 °C 时, 钝化的 UD<sub>3</sub> 表面保护层被破坏, UD<sub>3</sub> 在空气中剧烈氧化, 钝化的 UD<sub>3</sub> 的自燃温度约为 140 °C。

**关键词:** UD<sub>3</sub>; 表面钝化; 氧化特性; 量热法

中图分类号: O615

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2016)09-1550-06

doi: 10. 7538/yzk. 2016. 50. 09. 1550

## Research on Superficial Passivation and Oxidation Characteristic of UD<sub>3</sub>

CHEN Deng-lei<sup>1</sup>, CHU Ming-fu<sup>2,\*</sup>, QI Lian-zhu<sup>2</sup>, CHENG Liang<sup>2</sup>

(1. *Science and Technology on Surface Physics and Chemistry Laboratory, Mianyang 621907, China;*

*2. Institute of Materials, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)*

**Abstract:** The superficial passivation and oxidation characteristics of UD<sub>3</sub> were researched in this paper. The passivated UD<sub>3</sub> was analyzed by XRD and Raman measurements, and it was found that the protective layer of the passivated UD<sub>3</sub> is mainly UO<sub>2</sub>. The oxidized characteristic of the passivated UD<sub>3</sub> was performed in a thermal analyser in the air. The ignition didn't occur at room temperature. When the reaction temperature is lower than 110 °C, the passivated UD<sub>3</sub> reacts slowly in the air. When the reaction temperature is higher than 130 °C, the protective layer of the passivated UD<sub>3</sub> is damaged, and the UD<sub>3</sub> reacts violently in the air. The ignition occurs at about 140 °C.

**Key words:** UD<sub>3</sub>; superficial passivation; oxidation characteristic; thermal analyser

UD<sub>3</sub> 有独特的物理化学性质, 在国防与和平利用核能中有着重要的作用, 但其化学性质活泼, 极易受热分解和氧化燃烧, 限制了使用和存储<sup>[1]</sup>。UD<sub>3</sub> 属于立方晶系、Pm3n 结构<sup>[2]</sup>。铀在室温时即能缓慢吸 D<sub>2</sub>, 约 150 °C 时吸 D<sub>2</sub> 速度较快<sup>[3]</sup>。金属铀和 D<sub>2</sub> 受热按如下反应生

成 UD<sub>3</sub><sup>[4]</sup>:  $3D_2 + 2U \rightarrow 2UD_3$ 。随着合成温度的升高, UD<sub>3</sub> 合成率先升高至最高值而后开始降低。理论计算表明, 温度低于 525 °C 时, 固态 UD<sub>3</sub> 分子具有热力学稳定性<sup>[1]</sup>, 而实验结果表明, UD<sub>3</sub> 在温度达 347 °C 时部分分解, 在温度达到 427 °C 时全部分解<sup>[5]</sup>。UD<sub>3</sub> 热解吸的表

收稿日期: 2015-11-03; 修回日期: 2016-01-23

作者简介: 陈登磊(1988—), 男, 河北邯郸人, 硕士研究生, 核燃料循环与材料专业

\* 通信作者: 褚明福, E-mail: chumf@live.cn

观活化能为 $(26.3 \pm 0.4) \text{ kJ/mol}$ <sup>[6]</sup>。

UD<sub>3</sub>和UH<sub>3</sub>的物理化学性质相似。它们的化学性质非常活泼,可与H<sub>2</sub>O、HCl、HBr、HF、CO<sub>2</sub>等多种化合物发生反应<sup>[7]</sup>。Guyadec等<sup>[8]</sup>发现,室温下,UH<sub>3</sub>接触空气即发生气体燃烧,样品表面产生橘黄色的火焰,几秒后火焰消失退变为固体燃烧。自燃使样品体积膨胀2~3倍,生成UO<sub>2</sub>和U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>的混合物。

尽管UH<sub>3</sub>的氧化活性高,但UH<sub>3</sub>的氧化存在钝化现象。Totemeier<sup>[9]</sup>在室温下尝试利用Ar+3.5%O<sub>2</sub>对被氢腐蚀的铀进行钝化处理,但未取得理想效果。Longhurst等<sup>[10]</sup>将空气缓慢通入量热仪,通过分析UH<sub>3</sub>氧化放热曲线确定UH<sub>3</sub>的自燃温度为140℃。Robinson等<sup>[11]</sup>认为UH<sub>3</sub>表面存在氧化层抑制其在室温的氧化,而140℃下保护层的特性发生改变,使UH<sub>3</sub>重新暴露在空气中继续氧化甚至自燃。Ablitzer等<sup>[12]</sup>利用TG/DTA发现,室温下,微量UH<sub>3</sub>接触空气发生适度的放热反应,伴随着微小的质量增加,随后反应结束,不再发生放热反应。他们认为UH<sub>3</sub>表面可能生成了致密的UO<sub>2</sub>保护层,从而阻止了其进一步氧化。在相同条件下,大量UH<sub>3</sub>接触空气立即自燃。

然而,关于UD<sub>3</sub>氧化的研究报道却很少。UD<sub>3</sub>的氧化活性很高,即使在-80℃的条件下,UD<sub>3</sub>和O<sub>2</sub>反应依然十分迅速,其反应敏捷性与30℃时相当<sup>[13]</sup>。Shugard等<sup>[13]</sup>和Kanouff等<sup>[14]</sup>利用计算模拟和在线气体分析发现,在室温(30~40℃)下,UD<sub>3</sub>和O<sub>2</sub>的氧化反应无钝化过程,直接生成U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>并释放出D<sub>2</sub>,反应焓为-957 kJ/mol。然而,Morrall等<sup>[15]</sup>采用ToF-SIMS发现,UD<sub>3</sub>在室温下空气中暴露3 min并未全部氧化,而是在UD<sub>3</sub>表面形成了约20 nm厚的氧化铀层。

本文利用XRD和激光拉曼分析低湿低氧储存对UD<sub>3</sub>粉表面的影响,结合量热法研究钝化的UD<sub>3</sub>与空气的氧化过程,以确定其自燃温度。

## 1 实验方法

### 1.1 样品制备和检测方法

UD<sub>3</sub>的制备原料是金属<sup>238</sup>U,首先用稀硝

酸溶解铀表面的氧化层,用酒精清洗干净后放入反应容器内,抽真空,充入足量的高纯D<sub>2</sub>,加热至260℃直至完全粉化,冷却至室温后,将反应容器密封转移至手套箱内。

激光拉曼检测采用Renishaw InVia显微拉曼光谱仪。激光功率设为6 mW,选用波长为532 nm。在手套箱内用带有可视窗的装置将UD<sub>3</sub>片密封,通过可视窗测量UD<sub>3</sub>,曝光时间为400 s,同时叠加20次。UD<sub>3</sub>与空气反应产物直接在大气环境下检测,曝光时间为10 s,同时叠加5次。

XRD检测采用DX-2007B X射线衍射仪,步长为0.02°,采样时间为1 s,检测角度为20°~70°。UD<sub>3</sub>薄片在手套箱内用聚酰亚胺胶带密封进行检测,氧化产物在大气环境下直接检测。

### 1.2 实验方法

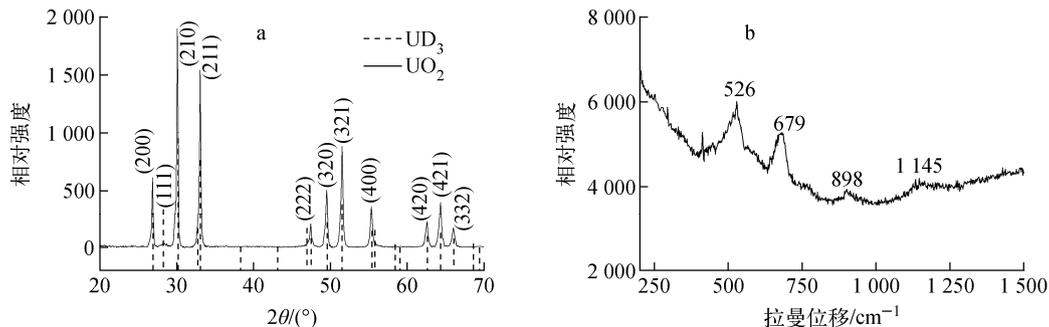
在低氧低湿(O<sub>2</sub>体积含量<2 ppm,H<sub>2</sub>O体积含量<20 ppm)气氛下,从反应容器中取出UD<sub>3</sub>粉敞口储存2个月。在手套箱内利用压片机将约0.5 g的UD<sub>3</sub>在30 MPa压力下保压20 min挤压成 $\phi 10 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 的薄片。采用激光拉曼和XRD在隔绝空气的条件下研究UD<sub>3</sub>在低氧低湿环境中的钝化。

利用RD496-2000微热量仪对不同温度下UD<sub>3</sub>与空气的氧化过程进行研究。温度依次为30、60、80、90、100、110、130、140和150℃。取1 g UD<sub>3</sub>粉用反应容器密封转移至微热量仪,在30℃下保温1 h,待量热曲线平稳后打开密封装置,每次通入20 mL空气,观察并记录反应放热曲线。通入过量的空气使反应充分进行,待通入空气后不再出现放热峰即停止该温度的反应,取出少量的反应产物进行XRD和激光拉曼检测。将剩余反应产物用反应容器密封放回微热量仪,依照上述实验方法进行下一温度的UD<sub>3</sub>氧化实验。另取1 g UD<sub>3</sub>粉依照上述实验方法在30℃下反应完成后,将反应温度直接升至150℃进行UD<sub>3</sub>氧化实验。

## 2 结果与讨论

### 2.1 UD<sub>3</sub>的钝化分析

$\phi 10 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$  UD<sub>3</sub>薄片的XRD和激光拉曼分析结果如图1所示。图1a的XRD谱几

图1 手套箱内UD<sub>3</sub>片的XRD谱(a)和拉曼谱(b)Fig. 1 XRD pattern (a) and Raman spectrum (b) of UD<sub>3</sub> flake in glove box

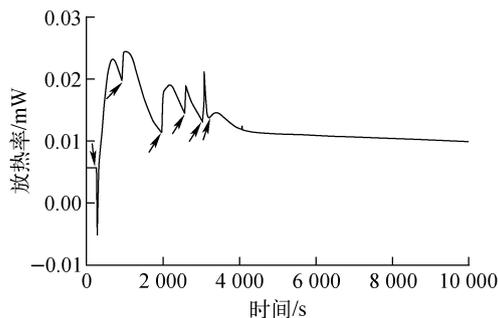
乎全为UD<sub>3</sub>的衍射峰,相对强度很高;而UO<sub>2</sub>的衍射峰相对强度很低,仅在2θ为28.3°时出现很弱的UO<sub>2</sub>(111)面衍射峰,说明试样中UO<sub>2</sub>相对含量很少。从图1b可看出,激光拉曼检测到UD<sub>3</sub>的特征峰出现在526 cm<sup>-1</sup>和679 cm<sup>-1</sup>处,而吕俊波等<sup>[16]</sup>检测到UD<sub>3</sub>的特征峰出现在518 cm<sup>-1</sup>和661 cm<sup>-1</sup>处,两者的检测结果基本相符。在898 cm<sup>-1</sup>处的峰为检测装置的本底,在1145 cm<sup>-1</sup>处的峰是UO<sub>2</sub>的特征峰(文献<sup>[16]</sup>中为446 cm<sup>-1</sup>和1150 cm<sup>-1</sup>处)。

在拉曼检测过程中发现UD<sub>3</sub>片表面几乎全被氧化铀覆盖,即使在裸露的UD<sub>3</sub>点也检测到较弱的UO<sub>2</sub>的特征峰。在通风柜内将UD<sub>3</sub>粉暴露于空气中,UD<sub>3</sub>粉末自燃,XRD检测发现其衍射峰与图1a相似,但UO<sub>2</sub>的相对含量增加。

## 2.2 钝化的UD<sub>3</sub>在不同温度下的氧化结果

30℃下钝化的UD<sub>3</sub>粉与空气反应的放热曲线示于图2。由图2可知,在30℃时,向反应容器中通入空气,因为空气温度为室温(25℃左右),低于反应温度,所以放热曲线先降低,而后缓慢上升,出现明显的放热峰。钝化的UD<sub>3</sub>与空气接触发生微弱的氧化放热反应,继续通入空气不发生放热反应,仅有7.528 J的热量放出。对氧化产物进行XRD和激光拉曼检测,结果如图3所示。XRD衍射图谱(图3a)与图1a相似,只是UO<sub>2</sub>的(111)峰的相对强度与图1a相比有所增强。在30℃时,钝化的UD<sub>3</sub>与空气氧化的产物是UO<sub>2</sub>,但仍有大量UD<sub>3</sub>未被氧化。图3b的拉曼谱峰形接近UO<sub>2.607</sub>的<sup>[16]</sup>,证明氧化产物表面有U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>存

在。因此,在30℃下钝化的UD<sub>3</sub>与空气氧化的产物的内层为UD<sub>3</sub>,外层为不同价态的氧化铀的混合物。



箭头表示通入定量的空气,余图箭头含义同此

图2 30℃下钝化的UD<sub>3</sub>粉与空气反应的放热曲线Fig. 2 Exotherm of passivated UD<sub>3</sub> powder under flowing air at 30℃

其他温度下钝化的UD<sub>3</sub>粉与空气反应的放热曲线示于图4。

由图4可知,当反应温度在60~110℃时,向反应容器中通入定量空气,量热曲线先降低而后缓慢升高至通空气前的高度,但未观察到放热峰。这是由于在30℃下UD<sub>3</sub>表面生成的氧化铀保护层隔绝了空气,从而抑制了其氧化。当反应温度升至130℃时,通入空气后,观察到强烈的放热峰。当温度升至140℃时,再次观察到放热峰,峰高与130℃相比有所降低。当温度升至150℃时,没有放热峰出现。将30℃下的氧化产物的反应温度直接升至150℃,如图5所示,通入空气即有陡峭的放热峰出现。通入等量的空气,150℃下的放热峰高度约为

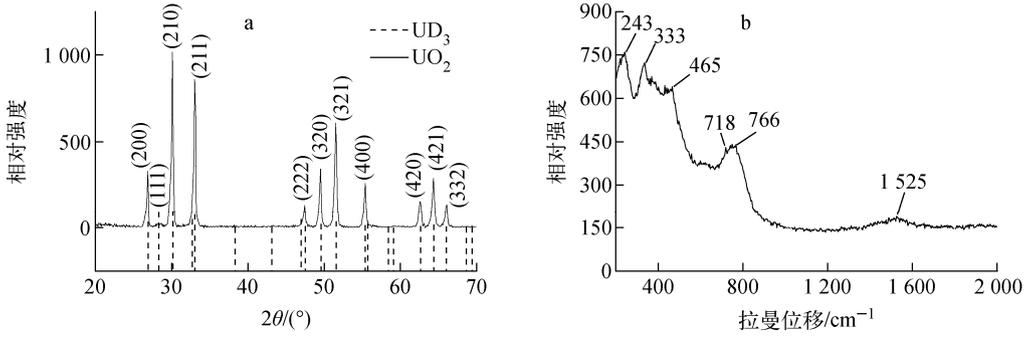


图3 钝化的UD<sub>3</sub>粉在30℃下与空气充分反应的氧化产物的XRD谱(a)和拉曼谱(b)

Fig. 3 XRD pattern (a) and Raman spectrum (b) of passivated UD<sub>3</sub> powder oxidized with air at 30 °C

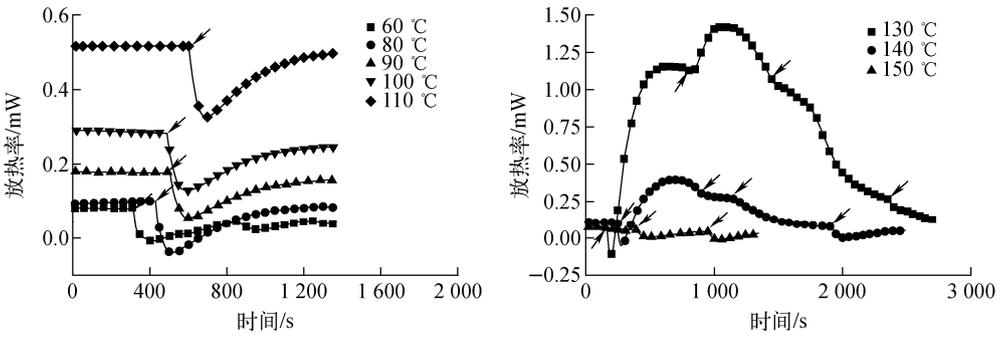


图4 不同温度下钝化的UD<sub>3</sub>粉与空气反应的放热曲线

Fig. 4 Exotherm of passivated UD<sub>3</sub> powder under flowing air at different temperatures

30℃下的200倍,钝化的UD<sub>3</sub>与空气发生剧烈的放热反应甚至自燃。

结合图2、4、5可知,在30℃下,UD<sub>3</sub>表面生成氧化铀保护层,当反应温度达130℃时,UD<sub>3</sub>表面的氧化铀保护层部分破裂;当反应温度达140℃时,UD<sub>3</sub>表面的氧化铀保护层全部破裂,UD<sub>3</sub>与空气发生充分的氧化反应。

对钝化的UD<sub>3</sub>在150℃下的氧化产物进行XRD和拉曼检测,拉曼检测结果与图3b相同<sup>[2]</sup>。XRD谱如图6所示,与图1a对比可知,谱峰中存在UD<sub>3</sub>的衍射峰,2θ为28.3°的峰为UO<sub>2</sub>和U<sub>3</sub>O<sub>7</sub>的混合衍射峰。图6中,2θ为56.5°处的峰为U<sub>3</sub>O<sub>7</sub>的衍射峰,2θ为58.4°处的峰为UO<sub>2</sub>的衍射峰。对比图3b和图6的

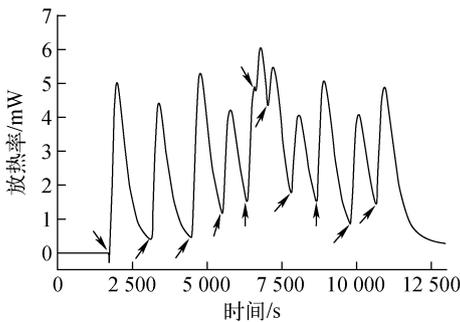


图5 钝化的UD<sub>3</sub>粉在150℃下的氧化反应放热曲线

Fig. 5 Exotherm of passivated UD<sub>3</sub> powder under flowing air at 150 °C

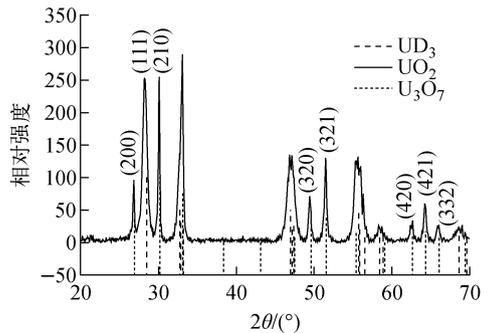


图6 钝化的UD<sub>3</sub>粉在150℃充分反应的产物的XRD谱

Fig. 6 XRD pattern of passivated UD<sub>3</sub> powder oxidized with air at 150 °C

XRD 衍射谱可知,在 30 °C 时,钝化的  $UD_3$  与空气的氧化产物主要是  $UO_2$ ,且仅少量的  $UD_3$  被氧化;当反应温度达 150 °C 时,氧化产物主要是  $UO_2$  和  $U_3O_7$ ,有少量的  $UD_3$  未被氧化。

### 2.3 讨论

在低氧低湿环境中, $UD_3$  粉缓慢氧化,在其表面逐渐形成致密  $UO_2$  层,发生钝化,这与 Ablitzer 等<sup>[12]</sup> 的设想相符。在 Ablitzer 等<sup>[12]</sup> 的实验中, $UH_3$  的质量较小,通入空气后,氧在  $UH_3$  表面的化学吸附引起的放热量较小,考虑到样品与环境的热量交流, $UH_3$  的温度几乎无变化, $UH_3$  表面生成致密  $UO_2$  保护层使其与空气隔绝,从而发生钝化。在本实验中, $H_2O$  和  $O_2$  的含量极低,以极其缓慢的速率氧化  $UD_3$ ,在  $UD_3$  表面逐渐形成致密氧化膜。因此, $UD_3$  的存储条件十分苛刻,极少量的  $H_2O$  和  $O_2$  均会使  $UD_3$  表面发生钝化,氧化活性降低。

Morrall 等<sup>[15]</sup> 发现暴露于空气中的  $UD_3$  的表面至内层中  $UO_2^+$  浓度逐渐降低。结合本实验的 XRD 和拉曼检测结果推测,钝化的  $UD_3$  暴露于空气后,从其表面至内层的构成依次为  $UO_{2+x}$ 、 $UO_2$ 、 $UD_3$ 。

在反应温度低于 110 °C 时, $UD_3$  表面的致密保护层抑制了其氧化速率,当反应温度达 130~140 °C 时,钝化的  $UD_3$  表面致密保护层遭到破坏,内层  $UD_3$  与空气剧烈反应并使反应充分进行。因此,推测钝化的  $UD_3$  的自然温度为 140 °C,这与钝化的  $UH_3$  的自然温度 140~160 °C<sup>[12]</sup> 基本相符。

钝化的  $UD_3$  与空气氧化生成不同价态的氧化铀的混合物,主要包括  $UO_2$ 、 $U_3O_7$  和  $U_3O_8$ ,其中  $U_3O_8$  分布在氧化产物颗粒表层且含量较少(XRD 未检测到  $U_3O_8$ )。在 150 °C 的氧化产物中仍有少量  $UD_3$  未被氧化,这与 Guyadec 等<sup>[8]</sup> 的实验中  $UH_3$  的自然产物中有  $UH_3$  残留的结果相符。此现象可能与通气方式有关,本实验与 Guyadec 等<sup>[8]</sup> 的实验均将空气通入反应容器内,从而导致底层样品在自燃过程中与空气接触困难,当反应结束时,温度降低,样品表面氧化层抑制其继续氧化,因此,氧化自燃后会有  $UD_3$  或  $UH_3$  残留。 $UH_3$  在空气中的自燃产物为  $UO_2$  和  $U_3O_8$ ,当加热至

300 °C 左右时, $UO_2$  氧化生成  $U_3O_8$ <sup>[8,12]</sup>。当加热至 200 °C 时, $U_3O_7$  作为  $UO_2$  氧化生成  $U_3O_8$  的中间相出现, $UO_2$  粉生成  $U_3O_7$  的激活能为 96 kJ/mol, $U_3O_7$  也可能是在  $UH_3$  自燃时产生的<sup>[12,17]</sup>。在 Shugard 等<sup>[13]</sup> 的实验中, $O_2$  以穿透的方式通过  $UD_3$ , $O_2$  和  $UD_3$  反应大量放热使其温度迅速升高,过量的  $O_2$  和较高的温度使  $UD_3$  氧化生成的  $UO_2$  和  $U_3O_7$  进一步氧化生成  $U_3O_8$ 。在本实验中,较低的反应温度和不连续的通气方式抑制了样品温度的升高,未达到  $UO_2$  和  $U_3O_7$  进一步氧化生成  $U_3O_8$  的反应温度。因此通入过量的空气,其主要氧化产物仍是  $UO_2$ 、 $U_3O_7$  和  $U_3O_8$ ,且  $U_3O_8$  含量相对较少。

### 3 结论

低湿低氧( $O_2$  体积含量 < 2 ppm,  $H_2O$  体积含量 < 20 ppm)环境下, $UD_3$  粉缓慢氧化,逐渐在其表面生成致密保护层,从而发生钝化现象,致密保护层主要成分为  $UO_2$ 。

在 30 °C 下, $UD_3$  与空气反应表面生成主要成分为  $UO_2$  的保护层。当温度低于 110 °C 时,致密氧化层未破坏,其与空气反应缓慢;当温度达 130~140 °C 时, $UD_3$  表面致密氧化层遭到破坏,其与空气反应剧烈并大量放热。钝化的  $UD_3$  的自然温度约为 140 °C。当反应温度低于 150 °C 时,钝化的  $UD_3$  与空气反应的氧化产物为  $UO_2$ 、 $U_3O_7$  和  $U_3O_8$ ,其中  $U_3O_8$  的含量极少。

$UD_3$  粉在低氧低湿环境下的钝化机理以及  $O_2$  和  $H_2O$  在其钝化过程中所起的作用有待进一步实验验证。 $UD_3$  粉不宜长期储存,长期储存会降低其反应活性。

### 参考文献:

- [1] 安民,何彬,左广霞,等. 氟化铀分子的结构及热力学稳定性[J]. 核技术, 2011, 34(8): 618-621.  
AN Min, HE Bin, ZUO Guangxia, et al. Structure and thermodynamic stability of  $UD_3$  and  $UT_3$  molecules[J]. Nuclear Techniques, 2011, 34(8): 618-621(in Chinese).
- [2] BARTSCHER W, BOEUF A, CACIUFFO R,

- et al. Neutron diffraction study of  $\beta$ -UD<sub>3</sub> and  $\beta$ -UH<sub>3</sub>[J]. Solid State Communications, 1985, 53 (4): 423-426.
- [3] 黄刚,龙兴贵,梁建华,等. 铀吸、放氘/氚的热力学同位素效应[J]. 原子能科学技术, 2010, 44(增刊): 102-105.  
HUANG Gang, LONG Xinggui, LIANG Jianhua, et al. Thermodynamic isotope effects of D<sub>2</sub> and T<sub>2</sub> reaction with uranium[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2010, 44 (Suppl.): 102-105(in Chinese).
- [4] ABRAHAM B M, FLOTOW H E. The heats of formation of uranium hydride, uranium deuteride and uranium tritide at 25 °C [J]. Journal of the American Chemical Society, 1955, 77(6): 1 446-1 448.
- [5] IMOTO S, TANABE T, UTSUNOMIYA K. Separation of hydrogen isotopes with uranium hydride[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 1982, 7(7): 597-601.
- [6] 黄刚,龙兴贵,梁建华,等. 氘/氚化铀热解吸的动力学同位素效应[J]. 原子能科学技术, 2010, 44(8): 926-929.  
HUANG Gang, LONG Xinggui, LIANG Jianhua, et al. Kinetic isotope effects of desorption for uranium deuteride and uranium tritide [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2010, 44(8): 926-929(in Chinese).
- [7] SCHNAARS D D, WU G, HAYTON T W. Reactivity of UH<sub>3</sub> with mild oxidants [J]. Dalton Transactions, 2008, 44: 6 121-6 126.
- [8] GUYADEC F L, NIN G X, BAYLE J P, et al. Pyrophoric behaviour of uranium hydride and uranium powders [J]. Journal of Nuclear Materials, 2010, 396(2-3): 294-302.
- [9] TOTEMEIER T. Characterization of uranium corrosion products involved in a uranium hydride pyrophoric event [J]. Journal of Nuclear Materials, 2000, 278(2): 301-311.
- [10] LONGHURST G R, HEICS A G, SHMAYDA W T, et al. Experimental evaluation of the consequences of uranium bed air-ingress accidents [J]. Fusion Science and Technology, 1992, 21: 1 017-1 023.
- [11] ROBINSON S, THOMAS G. Uranium hydride formation and properties: A review with commentary on handling and disposition, SAND96-8206[R]. Albuquerque: Sandia National Laboratory, 1996.
- [12] ABLITZER C, le GUYADEC F, RAYNAL J, et al. Influence of superficial oxidation on the pyrophoric behaviour of uranium hydride and uranium powders in air [J]. Journal of Nuclear Materials, 2013, 432(1-3): 135-145.
- [13] SHUGARD A D, BUFFLEBEN G M, KANOUFF M P, et al. Rapid hydrogen gas generation using reactive thermal decomposition of uranium hydride, SAND2011-6939[R]. Albuquerque: Sandia National Laboratory, 2011.
- [14] KANOUFF M P, GHARAGOZLOO P E, SALLOUM M, et al. A multiphysics numerical model of oxidation and decomposition in a uranium hydride bed [J]. Chemical Engineering Science, 2013, 91: 212-225.
- [15] MORRALL P, PRICE D W, NELSON A J, et al. ToF-SIMS characterization of uranium hydride [J]. Philosophical Magazine Letters, 2007, 87 (8): 541-547.
- [16] 吕俊波,李赣,郭淑兰. 非理想化学计量比氧化铀的拉曼和红外光谱 [J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(2): 405-409.  
LV Junbo, LI Gan, GUO Shulan. Raman and infrared spectra of non-stoichiometry uranium oxides [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014, 34(2): 405-409(in Chinese).
- [17] MCEACHERN R J, DOERN D C, WOOD D D. The effect of rare-earth fission products on the rate of U<sub>3</sub>O<sub>8</sub> formation on UO<sub>2</sub> [J]. Journal of Nuclear Materials, 1998, 252(1-2): 145-149.