

堆外核测量用裂变电离室铀膜均匀性研究

孙光智¹ 任 才¹ 毛从吉² 张 宓² 李树成³ 刘文臻³ 曾 乐¹ 邱顺利¹

程 辉¹ 冯红艺¹ 徐 玲¹ 王益元¹

1(武汉第二船舶设计研究所 武汉 430064)

2(生态环境部核与辐射安全中心 北京 100082)

3(国核自仪系统工程有限公司 上海 200241)

摘要 堆外核测量用裂变电离室铀膜厚度的均匀性对其测量准确性影响甚大,因此有必要探索适当的电镀工艺及检验方法,本文在对堆外核测量用裂变电离室铀膜厚度及分布特性研究的基础上,建立了一套能够用于裂变电离室圆筒形电极内壁铀膜厚度分布测量的装置,并利用该装置测量了采用竖直静置和水平动态两种工艺电镀的电极内部的铀膜厚度分布情况,对比分析了两种电镀工艺下铀膜成膜机理及分布差异原因,理论分析与实验结果吻合,可用于指导裂变电离室的生产工艺控制。

关键词 裂变电离室, 电镀, 铀膜厚度, 半导体探测器

中图分类号 TL816+.3

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2019.hjs.42.090603

Study on uranium film distribution of fission chamber used in nuclear instrumentation system

SUN Guangzhi¹ REN Cai¹ MAO Congji² ZHANG Mi² LI Shucheng³ LIU Wenzhen³

ZENG Le¹ QIU Shunli¹ CHENG Hui¹ FENG Hongyi¹ XU Ling¹ WANG Yiyuan¹

1(Wuhan Secondary Institute of Ships, Wuhan 430064, China)

2(Nuclear and Radiation Safety Center, Beijing 100082, China)

3(State Nuclear Power Automation System Engineering Company, Ltd, Shanghai 200241, China)

Abstract [Background] The uniformity of uranium film thickness in fission chamber used in nuclear instrumentation system (NIS) has a great influence on its measurement accuracy. [Purpose] This study aims to explore appropriate plating process and test method. [Methods] Based on the study of the distribution of uranium foil in the fission chamber of the NIS system, an instrument which can measure the thickness of uranium film on the inner surface of cylinder electrode of the chamber was set up. Two fission chamber samples, one was coated with a vertical electrodepositioning techniques and the other was coated with a horizontal electrodepositioning techniques, were measured by the instrument. The difference between them was analyzed and the mechanism of uranium film formation and causes of distribution differences were investigated. [Results] The results of the experiment are coincident with theoretical analysis. [Conclusion] This study can be used to guide the production process control of fission chamber.

Key words Fission chamber, Electrodeposition, Uranium film, PIPS detector

国家科技重大专项课题(No.2019ZX06002012)资助

第一作者: 孙光智, 男, 1981年出生, 2009年于兰州大学获博士学位, 高级工程师, 现从事核探测器及核测量技术研究

收稿日期: 2019-05-07, 修回日期: 2019-06-20

Supported by National Science and Technology Major Project (No.2019ZX06002012)

First author: SUN Guangzhi, male, born in 1981, graduated from Lanzhou University with a doctoral degree in 2009, senior engineer, focusing on nuclear detector and NIS

Received date: 2019-05-07, revised date: 2019-06-20

裂变电离室由于有较高的 n - γ 甄别能力,在核反应堆等有强 γ 辐射本底条件下中子通量的测量中倍受用户的青睐。裂变电离室可以在脉冲、坎贝尔和电流三种模式下工作,其中,脉冲和坎贝尔模式下, γ 射线均对测量结果影响较小^[1]。当核反应堆出现热启堆工况,即反应堆在高工况下急停后迅速重新启堆时,反应堆残余 γ 放射性非常强,裂变电离室较其他中子探测器有明显的优势^[2-4]。

基于裂变电离室的上述优点,在堆外核测量系统中,通常用于中间量程的中子探测器,作为几乎覆盖反应堆操作全部量程范围内的热中子通量监测。但裂变电离室采用的热中子灵敏材料U-235的热中子截面并不是非常高,如 $\sigma_f(\text{U-235})=682\text{ b}$,而 $\sigma_a(\text{He-3})=5\,327\text{ b}$, $\sigma_a(\text{B-10})=3\,837\text{ b}$ 。因此,裂变电离室要有较高的灵敏度,需要有一定的灵敏体积。目前堆外核测量用裂变室应用较多的是圆筒形结构的电极,长径比较大,长度在1 m左右,直径仅几个厘米。铀被电镀到圆筒形电极内壁,作为热中子接收材料。由于电极长度较长,而铀属于放射性物质,操作环境苛刻^[5],因此电镀时均匀性的控制和测量是电镀成功与否的关键。为了更好地检测裂变电离室中铀膜的质量,本工作根据裂变电离室电极结构特点,建立了一套可用于圆筒内壁铀膜厚测量的检测装置,可快速对圆筒内各个位置的铀膜厚度进行快速检测,给出膜的厚度分布图,为分析裂变电离室不同位置热中子灵敏度、控制裂变电离室的质量提供参考。

裂变电离室中的铀通常是采用电沉积的方式将含铀的硝酸铀酰镀到电极内壁的,为水合聚合物或铀的氧化物形式存在。由于电镀完的工件为细长的圆筒形结构,无法采用常规的薄膜厚度测量方法,如光学法、扫描电镜切片法等^[6]。而细长形的工件在电镀过程中,不同位置的薄膜厚度难免有差别,尤其是当采用垂直方式布置电镀槽时,工件底部和顶部薄膜厚度差别会很明显,影响探测器不同位置灵敏度的一致性,进而使测量结果无法正确反映待测空间的中子通量情况。而当工件集成在裂变电离室后,由于中子具有散射的特点,很难通过点测量的方式检测探测器不同位置灵敏度的一致性,因此有必要在将工件集成到裂变电离室中之前,对不同区域的薄膜厚度进行测量,以控制镀膜的质量。

1 测量原理

由于铀属于放射性元素,自身会发射 α 粒子,只要单位面积中铀的质量确定,则相同时间内发射的 α 粒子数是确定的。知道铀中各种同位素的份额,即可对薄的铀膜厚度进行定量测量^[7]。同时,裂

变电离室中的U-235还可以和热中子发生裂变反应,释放出裂变碎片,通过测量不同位置的铀膜产生的裂变碎片的量,也可以反推出不同位置的铀膜厚度^[8]。

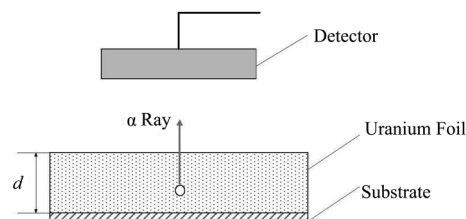


图1 铀膜厚度对 α 粒子阻挡示意图
Fig.1 The barrier of uranium film to α particle

2 模拟计算分析

电镀在探测器内壁上的铀膜存在一定的厚度,而衰变产生的 α 粒子在膜中的深度是随机分布的,位于膜内部的 α 粒子穿过铀膜时,受沿途能损的影响,能量会有所下降。当铀膜增加到一定厚度后,从铀膜深处发射的 α 粒子能量损失殆尽而无法到达探测器。为了知道到达探测器的 α 粒子数和铀膜厚度的准确关系,我们利用GEANT4模拟了平面上不同厚度的铀膜中 α 粒子到达探测器的计数率,选取探测器为 $\phi 10\text{ mm}$ 的硅半导体探测器,探测器距离镀铀平面距离为1 cm,发射 α 粒子的能量为4.5 MeV,表面镀铀厚度为:0.5~100 $\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$,粒子径迹如图2所示,探测器接收到的 α 粒子数随铀膜厚度变化曲线如图3所示。

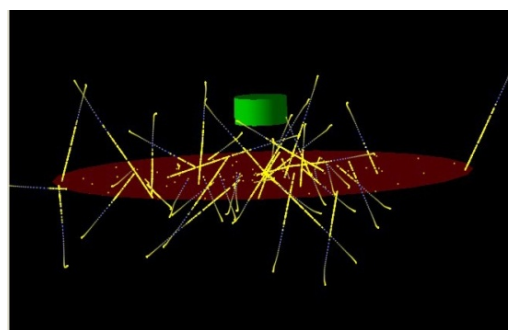


图2 α 粒子径迹图
Fig.2 α track map

由图3可以看出,当铀膜厚度小于8 $\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ 时,探测器接收到的 α 粒子数随膜厚增长近似呈线性增长。而当铀膜厚度大于8 $\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ 后,铀膜厚度变化对探测器接收到的粒子数几乎没有影响。由此可以看出,在铀膜厚度小于8 $\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ 时,可以采用测量 α 粒子的方法来测量铀膜厚度,而厚度再增加时,该方法不适用。

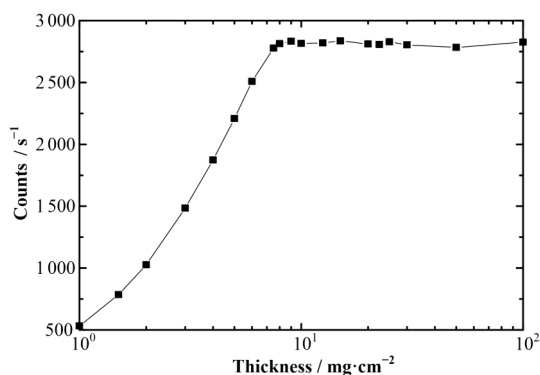


图3 探测器接收的 α 粒子数随铀膜厚度变化曲线
Fig.3 Relationship between counting rate of α particle and coating thickness of uranium foil

为了验证 GEANT4 模拟结果的可靠性,我们采用 SRIM 软件模拟,以作对比分析。从图4可以看出,4.5 MeV 的 α 粒子在金属铀中的射程约为 7.45 μm ,对应的质量面密度大于 12.5 $\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$,但穿过金属铀层的 α 粒子还需要穿过一定厚度的空气后才能抵达探测器表面,图5展示了4.5 MeV 的 α 粒子在穿过两种厚度厚铀层后在空气中的射程图。在

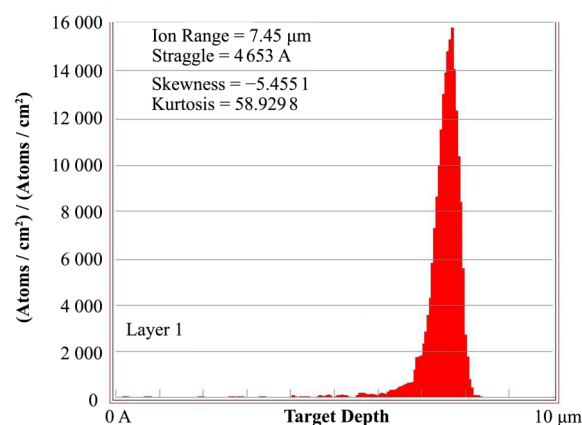


图4 4.5 MeV 的 α 粒子在金属铀中的射程图
Fig.4 Range diagram of 4.5 MeV α particles in metallic uranium

GEANT4 模拟计算中,探测器距离铀层表面的距离设置为 10 mm,因此 α 粒子的总射程应超过 10 mm,因此,依照如图5所示,在考察的数据范围内,最佳的铀层厚度为 4.2 μm ,对应质量面密度也为 8 $\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$,这与 GEANT4 模拟计算结果相符。

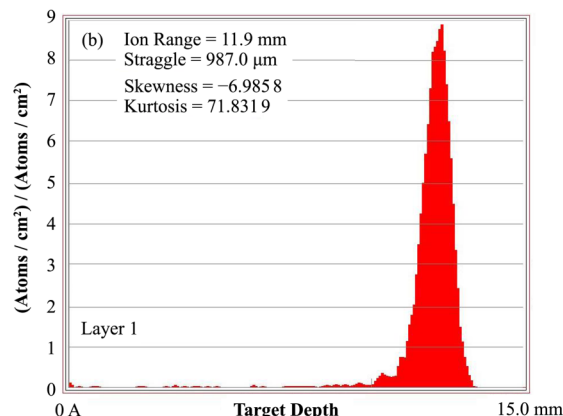
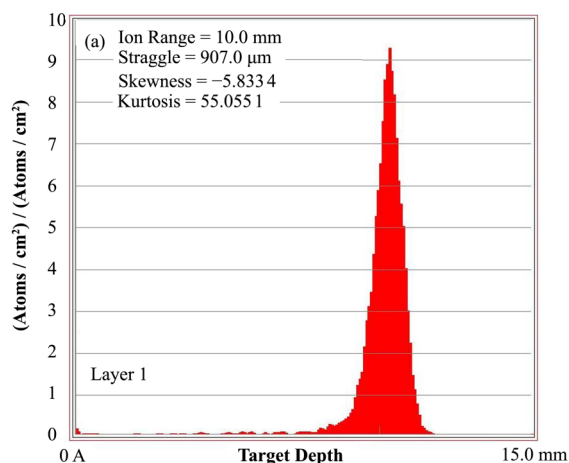


图5 4.5 MeV 的 α 粒子在穿过 4.7 μm (a)和 4.2 μm (b)厚铀层后在空气中的射程图
Fig.5 Range diagram of 4.5 MeV α particles in the air after passing through the uranium foil of 4.7 μm (a) and 4.2 μm (b)

3 实验方案

基于§2所述原理,我们搭建了一套可用于圆筒形电极内壁铀膜厚度的测量装置,采用可测量 α 粒子的钝化注入平面硅(Passivated Injected Planar Silicon, PIPS)半导体探测器作为探测器,将其安装在可移动的滑块上,滑块固定在一横向丝杆上,丝杆位于圆筒电极的轴线上,丝杆两端通过有轴承的支架支撑,这样利用丝杆一端的摇柄旋转丝杆,探测器就可以随着滑块在丝杆上前后自由移动,这实现了精细地控制探测器在圆筒形电极筒周向的相对位置。丝杆置入待测电极内,通过调节合适的电极筒

支撑高度,可确保探测器固定丝杆和电极筒均处于水平方向,避免探测器移动时,和电极筒的距离发生变化。为了避免环境光线干扰 PIPS 探测器,我们将整个测量装置置于暗室内。为了避免温度与湿度对测量结果造成影响,我们使暗室内空气的温度与湿度保持稳定。为了减小斜射的 α 粒子造成的边缘效应,我们还在探测器前方加装了 α 粒子准直栅,试验装置布置如图6所示。

由于测试时需要移动 α 粒子探头,为了方便测量,测试过程在空气中进行。同时,为了尽量减少 α 粒子在空气中的能量衰减,PIPS 半导体探测器尽可能设置在贴近管壁附近,试验装置如图7所示。

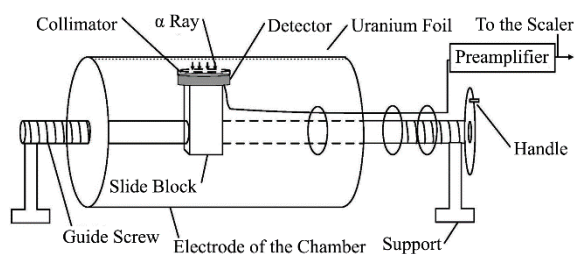


图6 试验装置示意图

Fig.6 Experimental set-up for measuring uranium film distribution of fission chamber

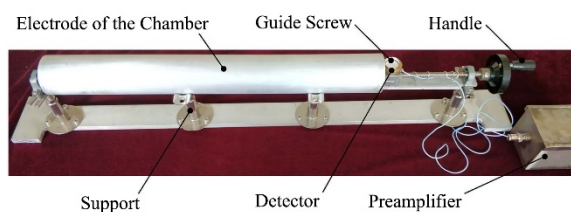


图7 试验装置

Fig.7 Photograph of experimental set-up

利用该装置测量采用电镀通常使用的竖直布置的电镀槽^[9-10],在50 cm长圆筒内壁镀膜后的电极筒不同深度 α 粒子计数率变化如图8所示,平均膜厚控制在 $2 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。由该曲线可以看出,薄膜厚度随深度增大明显呈上升趋势,分析为电镀时间较长,电镀过程中铀离子发生沉降,导致电镀液底部铀离子浓度高于顶部。

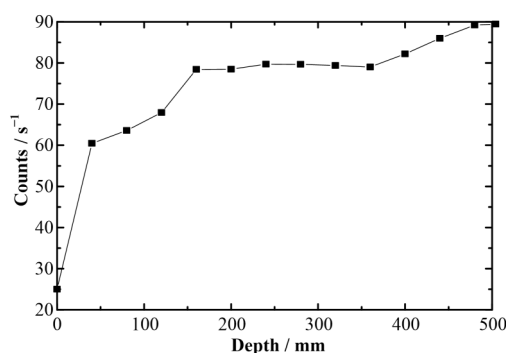


图8 竖直电镀槽镀膜厚度分布

Fig.8 Uranium foil thickness distribution of coating in vertical electrodeposition techniques

图9为改用横向电镀工艺,使电极处于水平方向,同时电镀过程中,利用电机使电镀池始终保持缓慢转动的状态下的电镀样品,样品长度及薄膜平均厚度和图8中完全一致,利用该方法测量的薄膜厚度分布。由该曲线可以看出,与采用垂直电镀工艺相比较,采用横向电镀工艺的铀膜分布更加均匀,不同深度的 α 粒子计数率几乎相同。由于两种镀膜方式中,采用的电极均为圆柱体,因此默认铀膜厚度在电极筒内壁周长方向是均匀分布的,如果需要测量铀膜在周长方向上的分布,转动电极筒即可实现。

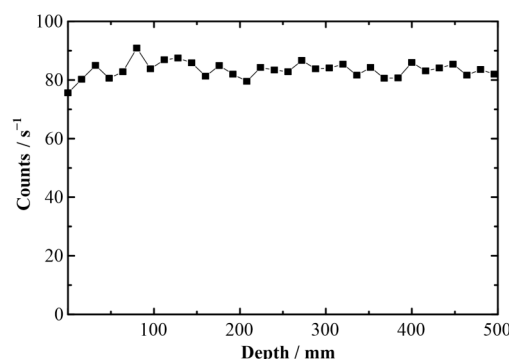


图9 水平电镀槽镀膜厚度分布

Fig.9 Uranium foil thickness distribution of coating in horizontal electrodeposition techniques

4 实验结果分析

4.1 垂直电镀工艺实验结果分析

溶液中带电粒子在电场中的漂移示意图见图10,由于铀离子较重,且容易与其它分子形成原子团,因此在电镀过程中,既受到电极之间的电场力的作用,同时还存在重力、液体粘滞力的作用,本文将原子团看作带电的微粒。

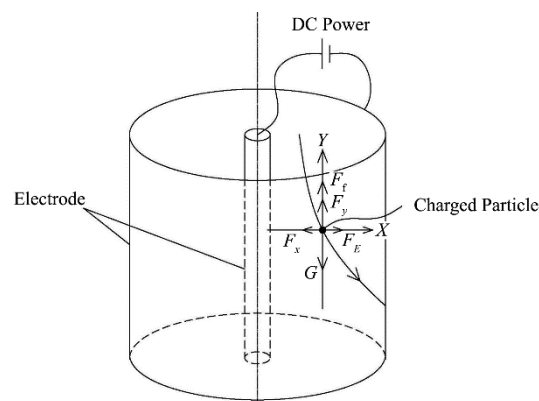


图10 悬浊液中带电粒子在电场中的漂移示意图

Fig.10 Diagram of the drift of charged particles in turbid liquid in an electric field

设中心电极半径为 a ,外筒内部半径为 b ,电极之间加载的电压为 U ,则两电极之间的电场强度分布为^[11]:

$$E(r) = \frac{U}{\ln \frac{b}{a}} \cdot \frac{1}{r} \quad (1)$$

设 F_f 为浮力, F_e 为电场力, G 为重力, F_x 为微粒受到的粘滞阻力在 x 轴方向的投影分量, F_y 为微粒受到的粘滞阻力在 y 轴方向的投影分量,由于悬浊液中的微粒运动缓慢,因此忽略粒子的加速度。根据受力平衡原理、斯托克斯公式^[12]得:

$$x \text{ 轴方向: } F_x = F_e; y \text{ 轴方向: } F_f + F_y = G$$

又:

$$F_E = q \cdot E(r) = \frac{qU}{b} \cdot \frac{1}{r} F_x = 6\pi\eta r_p V_x$$

$$F_y = 6\pi\eta r_p V_y F_f = \frac{4}{3} \pi r_p^3 g \rho_0 G = \frac{4}{3} \pi r_p^3 g \rho_p$$

式中： q 为微粒携带电荷； V_x 为微粒运动速度矢量在 x 轴方向的投影分量； V_y 为微粒运动速度矢量在 y 轴方向的投影分量； r_p 为微粒半径； ρ_0 为水密度； ρ_p 为微粒密度； g 为重力加速度； η 为液体的粘滞系数。

因此，微粒漂移到壁面上前下沉的距离为：

$$D(r_0) = k \cdot (R - r_0)^2 / \ln \frac{R}{r_0} \quad (2)$$

式中： $k = \frac{4}{3} \pi r_p^3 g \cdot (\rho_p - \rho_0) \cdot \ln \frac{b}{a} / qU$ ； r_0 为微粒距离圆筒中心的距离； R 为圆筒内半径。

为了简化计算，此处仅做定性分析，令 $k=1$ ，代入试验设备参数： $R=0.0225\text{ m}$ ；用MATLAB软件对式(2)作图(图11)。

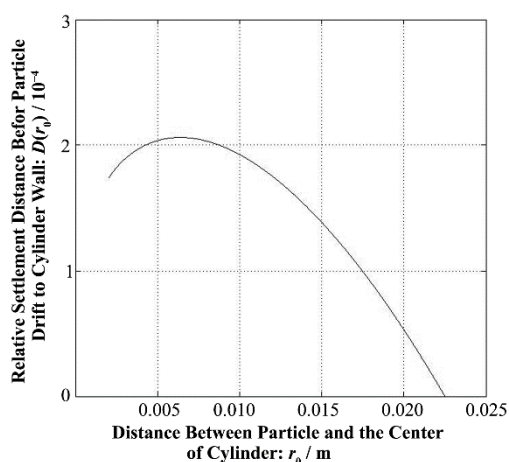


图11 处于同一水平面微粒的沉降深度示意图

Fig.11 Diagram of settlement depth of particles in the same horizontal plane

液体中微粒集体沉降示意图如图12所示，经分析发现：在某一深度处的微粒吸附密度与该深度水平直线穿过阴影区域长度成正比。现举例说明关键数据点：

$$D_0 \text{ 处的密度: } \rho(D_0) = c \cdot (R - x_3)$$

$$D_1 \text{ 处的密度: } \rho(D_1) = c \cdot (R - x_2 + x_1)$$

$$D_2, D_3 \text{ 处的密度: } \rho(D_2) = \rho(D_3) = c \cdot R$$

式中： c 为转换系数。

微粒吸附密度随深度变化关系如下：随着离液面的距离增加，刚开始时，微粒吸附密度跟深度近似呈正比关系；随后，微粒吸附密度增量与深度增量之间的比例逐渐变小，当达到深度 D_0 时，微粒吸附密度增量与深度增量之间的比例突然增大，然后比例逐渐减小，当深度超过 D_2 后，微粒吸附密度不再随深度变化。该趋势与图8所示实验结果基本相符。

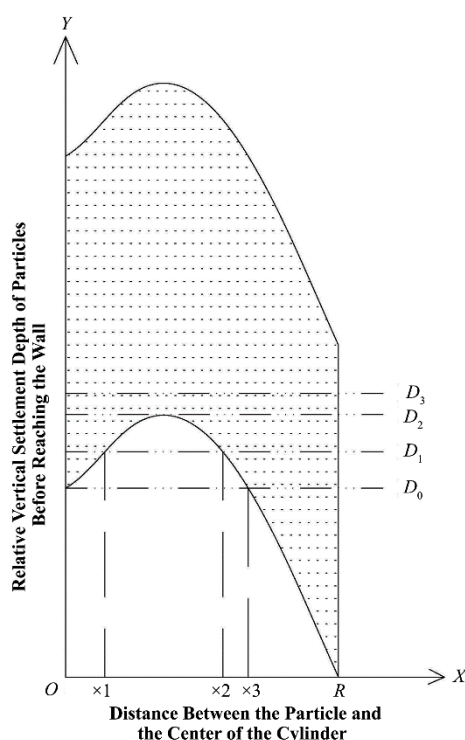


图12 悬浊液中微粒集体沉降示意图

Fig.12 Diagram of collective deposition of particles in turbid liquid

4.2 水平电镀工艺实验结果分析

为了简化分析过程，先考虑圆筒不旋转时的情形。图13为悬浊液中的微粒漂移示意图。

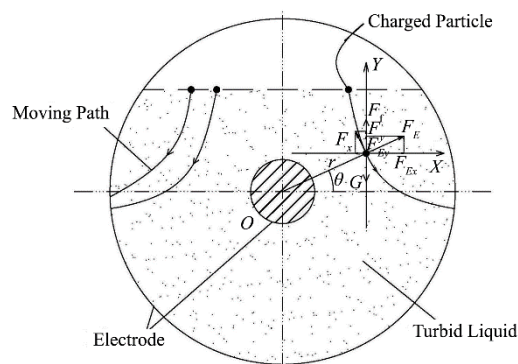


图13 悬浊液中的微粒漂移示意图

Fig.13 Diagram of particle drift in turbid liquid

液体中电场强度分布与式(1)相同，根据受力平衡原理、斯托克斯公式^[12]得：

$$x \text{ 轴方向: } F_x - F_{Ex} = 0;$$

$$y \text{ 轴方向: } F_f + F_y + F_{Ey} - G = 0.$$

为了便于分析，采用极坐标系， r 为微粒距离电极中心的距离， θ 为穿过电极中心与微粒的直线与 x 之间的夹角。

又：

$$F_{Ex} = q \cdot E(r) \cdot \cos \theta = \frac{qU}{\ln \frac{b}{a}} \cdot \frac{1}{r} \cdot \cos \theta$$

$$F_{Ey} = q \cdot E(r) \cdot \sin \theta = \frac{qU}{\ln \frac{b}{a}} \cdot \frac{1}{r} \cdot \sin \theta$$

$$F_x = 6\pi\eta r_p V_x F_y = 6\pi\eta r_p V_y$$

$$G = \frac{4}{3} \pi r_p^3 g \rho_p F_f = \frac{4}{3} \pi r_p^3 g \rho_0$$

因此:

$$V_x = k \cdot \frac{1}{r} \cdot \cos \theta$$

$$V_y = \frac{2}{9\pi\eta r_x} \pi r_p^3 g (\rho_p - \rho_0) - k \cdot \frac{1}{r} \cdot \sin \theta$$

其中:

$$k = \frac{qU}{\ln \frac{b}{a}} \cdot \frac{1}{6\pi\eta r_p}$$

$$\overline{V}_y = \frac{1}{(R - r_0) \cdot (\theta_1 - \theta_0)} \int_{r_0}^R \int_{\theta_0}^{\theta_1} V_y \cdot d\theta \cdot dr$$

$$\overline{V}_x = \frac{1}{(R - r_0) \cdot (\theta_1 - \theta_0)} \int_{r_0}^R \int_{\theta_0}^{\theta_1} V_x \cdot d\theta \cdot dr$$

漂移时间:

$$\Delta T = \Delta y / \overline{V}_y = \Delta x / \overline{V}_x$$

设 (r_0, θ_0) 为微粒初始位置, (R, θ_1) 为微粒漂移到圆筒内壁上时所处的位置。则:

$$\Delta y = r_0 \cdot \sin \theta_0 - R \cdot \sin \theta_1$$

$$\Delta x = r_0 \cdot \cos \theta_0 - R \cdot \cos \theta_1$$

$$\Delta y = \Delta x \cdot \overline{V}_y / \overline{V}_x$$

经整理得到的约束方程式为:

$$r_0 \cdot \sin \theta_0 - R \cdot \sin \theta_1 =$$

$$\frac{r_0 \cdot \cos \theta_0 - R \cdot \cos \theta_1}{\sin \theta_1 - \sin \theta_0} \cdot \left[\frac{4 \ln \frac{b}{a}}{3qU} \pi r_p^3 g (\rho_p - \rho_0) \cdot \frac{(R - r_0) \cdot (\theta_1 - \theta_0)}{\ln R - \ln r_0} - (\cos \theta_0 - \cos \theta_1) \right]$$

设上式对应的隐函数为: $F(\rho_0, \theta_0, \theta_1) = 0$ 。

运动初始粒子群所在的面积元为: $dS_0 = r_0 \cdot d\theta_0 \cdot$

dr_0 。

又:

$$\frac{d\theta_0}{d\theta_1} = - \frac{\dot{F}_{\theta_1} dr_0}{\dot{F}_{\theta_0} d\theta_1} = - \frac{\dot{F}_{\theta_1}}{\dot{F}_{r_0}}$$

位于某面积元内微粒数量与其最终沉降角度范围平方比,也即沉降密度与角度之间的对应关系为:

$$\frac{c \cdot \Delta S_0}{(\Delta \theta_1)^2} = c \cdot r_0 \cdot \frac{(\dot{F}_{\theta_1})^2}{\dot{F}_{\theta_0} \cdot \dot{F}_{r_0}}$$

对上式进行加权归一化处理后得:

$$\rho(\theta_1) = \left(\frac{c \cdot \Delta S_0}{(\Delta \theta_1)^2} \right) = \frac{c}{S_c} \iint_{S_c} \frac{\Delta S_0}{(\Delta \theta_1)^2} ds =$$

$$\frac{c}{S_c} \left[\int_{\sin^{-1} \frac{y_0}{R}}^{\pi - \sin^{-1} \frac{y_0}{R}} \int_0^{\frac{y_0}{\sin \theta_0}} r_0 \cdot \frac{(\dot{F}_{\theta_1})^2}{\dot{F}_{\theta_1} \cdot \dot{F}_{r_0}} \cdot r_0 \cdot dr_0 \cdot d\theta_0 + \right.$$

$$\left. \int_{\pi - \sin^{-1} \frac{y_0}{R}}^{2\pi + \sin^{-1} \frac{y_0}{R}} \int_0^{\frac{y_0}{\sin \theta_0}} r_0 \cdot \frac{(\dot{F}_{\theta_1})^2}{\dot{F}_{\theta_1} \cdot \dot{F}_{r_0}} \cdot r_0 \cdot dr_0 \cdot d\theta_0 \right]$$

式中: y_0 为液面距离电极中心之间的距离; S_c 为液体横截面面积; c 为单位面积包含的微粒数量。

从上式可看出,当圆筒静止时,微粒在不同角度吸附厚度不一致,但在轴向上无明显差别。当圆筒旋转后,控制合适的旋转速度和电流大小,则可较好地控制铀膜的均匀性。

5 结果与展望

综上所述,本工作经过模拟分析发现,裂变电离室用铀膜厚度在 $8 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$ 以下时,可采用测量薄膜表面 α 粒子活度的方法测量铀膜厚度及厚度分布。本工作发现,采用水平动态镀膜工艺可有效地改善电极筒内铀膜厚度的均匀性。

根据受力平衡原理、斯托克斯公式得:

x 轴方向: $F_x = F_E$, y 轴方向: $F_f + F_y = G$ 。

$$\text{又: } F_E = q \cdot E(r) = \frac{qU}{\ln \frac{b}{a}} \cdot \frac{1}{r} \quad F_x = 6\pi\eta r_p V_x$$

$$F_y = 6\pi\eta r_p V_y \quad F_f = \frac{4}{3} \pi r_p^3 g \rho_0 \quad G = \frac{4}{3} \pi r_p^3 g \rho_p$$

$$V_x(r) = \frac{1}{6\pi\eta r_p} \cdot \frac{qU}{\ln \frac{b}{a}} \cdot \frac{1}{r}$$

$$V_y = \frac{F_y}{6\pi\eta r_p} = \frac{G - F_f}{6\pi\eta r_p} = \frac{\frac{4}{3} \pi r_p^3 g (\rho_p - \rho_0)}{6\pi\eta r_p}$$

微粒在 x 轴方向漂移距离为: $S_x = R - r_0, r_0$ 为

微粒距离圆筒中心的距离; R 为圆筒内半径。

$$\text{漂移过程中的平均速度为: } \overline{V_x} = \frac{1}{R-r_0} \cdot \int_{r_0}^R V_x(r) \cdot dr = \frac{1}{6\pi\eta r_p} \cdot \frac{1}{R-r_0} \cdot \frac{qU}{\ln \frac{b}{a}} \cdot \ln \frac{R}{r_0};$$

$$\text{漂移时间为: } \Delta T = \frac{S_x}{\overline{V_x}} = \frac{(R-r_0)^2 \cdot 6\pi\eta r_p \cdot \ln \frac{b}{a}}{\ln \frac{R}{r_0} \cdot qU};$$

垂直沉降距离:

$$\begin{aligned} D(r_0) &= \Delta T \cdot V_y \\ &= \frac{(R-r_0)^2 \cdot 6\pi\eta r_p \cdot \ln \frac{b}{a} \cdot \frac{4}{3} \pi r_p^3 g \cdot (\rho_p - \rho_0)}{\ln \frac{R}{r_0} \cdot qU \cdot 6\pi\eta r_p} \\ &= k \cdot (R-r_0)^2 / \ln \frac{R}{r_0} \end{aligned}$$

$$\text{其中: } k = \frac{4}{3} \pi r_p^3 g \cdot (\rho_p - \rho_0) \cdot \ln \frac{b}{a} / qU。$$

参考文献

- 毕道伟. 坎贝尔裂变室的高稳定性测量技术研究[J]. 核电子学与探测技术, 2016, **36**(1): 108-111. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2016.01.026.
BI Daowei. Study on high stable measurement techniques for Campbell fission chambers[J]. Nuclear Electronics and Detection Technology, 2016, **36**(1): 108-111. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2016.01.026.
- 毛欢, 熊文彬, 阙骥, 等. 核电站堆外核测量系统的原理及工程实践[J]. 核电子学与探测技术, 2014, **34**(6): 758-761. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2014.06.020.
MAO Huan, XIONG Wenbin, QUE Ji, *et al.* The principle and engineering practice of Ex-core nuclear instrumentation system in nuclear power plant[J]. Nuclear Electronics and Detection Technology, 2014, **34**(6): 758-761. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2014.06.020.
- Mounia Laassiri, El-Mehdi Hamzaoui, Rajaa Cherkaoui El Moursli. Application of nonnegative tensor factorization for neutron-gamma discrimination of Monte Carlo simulated fission chamber's output signals[J]. Results in Physics, 2017, **7**: 1422-1426. DOI: 10.1016/j.rinp.2017.04.009.
- 孟令杰, 赖伟. 电流模式下微型裂变电离室参数对探测性能的影响[J]. 核技术, 2016, **39**(12): 120402. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2016.hjs.39.120402.
MENG Lingjie, LAI Wei. Influence of parameters of micro fission chamber operated in current mode upon the detection performance[J]. Nuclear Techniques, 2016, **39**(12): 120402. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2016.hjs.39.120402.
- 杨波. 一种高灵敏度裂变室的研制[J]. 核电子学与探测技术, 2012, **32**(5): 587-589. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2012.05.020.
YANG Bo. Development of a high sensitive fission chamber[J]. Nuclear Electronics and Detection Technology, 2012, **32**(5): 587-589. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2012.05.020.
- Poenitz W P, Armani A J. Additional measurements of the ratio of the fission cross sections of plutonium-239 and uranium-235[J]. Nuclear Science and Engineering, 1972, **47**: 228. DOI: 10.13182/NSE72-A22401.
- 王玫, 林菊芳, 温中伟, 等. 小型平板铀裂变电离室研制[J]. 核电子学与探测技术, 2006, **26**(5): 666-668. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2014.09.022.
WANG Mei, LIN Jufang, WEN Zhongwei, *et al.* Micro plate fission chamber development[J]. Nuclear Electronics and Detection Technology, 2006, **26**(5): 666-668. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2014.09.022.
- 朱通华, 刘荣, 蒋励, 等. 裂变室镀层质量厚度的相对测量技术[J]. 核技术, 2009, **32**(6): 459-463.
ZHU Tonghua, LIU Rong, JIANG Li, *et al.* Relative quantifying technique to measure mass of fission plate in a fission chamber[J]. Nuclear Techniques, 2009, **32**(6): 459-463.
- 何佳恒, 陈琪萍, 党宇峰, 等. 管状电沉积铀靶的制备和检测[J]. 化学研究与应用, 2010, **22**(2): 248-252. DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2010.06.029.
HE Jiaheng, CHEN Qiping, DANG Yufeng, *et al.* Preparation and testing techniques for uranium target prepared by electro-deposition[J]. Chemical Research and Application, 2010, **22**(2): 248-252. DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2010.06.029.
- 郭硕鸿. 电动力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008: 32-33.
GUO Shuohong. Electrodynamics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2008: 32-33.
- 唐果书. 落球法测液体粘滞系数实验的研究[J]. 安徽教育学院学报, 2006, **24**(3): 22.
TANG Guoshu. Examining the experiment of measuring viscous coefficient of liquid through ball falling[J]. Journal of Anhui Institute of Education, 2006, **24**(3): 22.