

# 铀离心浓缩厂分离功率在线监测技术研究

吕学升<sup>1</sup>, 刘国荣<sup>1</sup>, 梁庆雷<sup>1</sup>, 郝学元<sup>2</sup>, 赵永刚<sup>1</sup>, 李井怀<sup>1</sup>, 应斌<sup>2</sup>

(1. 中国原子能科学研究院, 北京 102413; 2. 中核兰州铀浓缩有限公司, 甘肃 兰州 730030)

**摘要:** 利用研制的铀丰度在线监测装置对铀浓缩厂工艺管道中精料和贫料铀丰度进行在线监测, 同时利用孔板流量计在线监测浓缩厂精料端工艺管线  $UF_6$  精料流量, 然后利用分离功率方程计算得到分离功率。现场实验表明: 在均不考虑物料损耗情况下, 分离功率在线监测结果与铀浓缩厂分离功率申报值的相对偏差小于 2.0%。

**关键词:** 铀浓缩厂;  $UF_6$  气体; 分离功率; 在线监测

**中图分类号:** TL99      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-6931(2017)07-1342-03

**doi:** 10. 7538/yzk. 2017. 51. 07. 1342

## Study on On-line Monitor Technique of Separative Power at Uranium Centrifuge Enrichment Plant

LYU Xue-sheng<sup>1</sup>, LIU Guo-rong<sup>1</sup>, LIANG Qing-lei<sup>1</sup>, HAO Xue-yuan<sup>2</sup>,  
ZHAO Yong-gang<sup>1</sup>, LI Jing-huai<sup>1</sup>, YING Bin<sup>2</sup>

(1. *China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China;*

2. *Lanzhou Uranium Enrichment Company Limited, Lanzhou 730030, China*)

**Abstract:** A separative power on-line monitor system at gas centrifuge enrichment plant was developed including two  $^{235}\text{U}$  enrichment monitors and one uranium hexafluoride flow-meter, and a set of corresponding software was developed. The enrichment of  $UF_6$  flowing through the processing pipes in uranium enrichment plant was measured by enrichment monitors. The  $UF_6$  gas flow rate in production pipes was measured by the orifice flow-meter. Finally, the separative power was calculated by  $^{235}\text{U}$  enrichment and  $UF_6$  gas flow rate in the pipes. The results show that the maximum relative standard deviation between monitoring result and declaration value is less than 2.0%.

**Key words:** uranium enrichment plant; gaseous uranium hexafluoride; separative power; on-line monitor

分离功率代表了铀浓缩厂的生产能力, 是铀浓缩厂和离心机的核心指标, 对其进行监测是进行核材料衡算核实的关键步骤, 可判别铀浓缩厂的分离功率是否符合申报值, 还可在线

监控铀浓缩厂的生产工艺状态。目前, 未见直接在线监测得到分离功率的公开文献报道。浓缩厂均利用有关数据, 通过公式计算得到分离功率。铀浓缩厂利用电子秤对一段时期内生产

的浓缩 UF<sub>6</sub> (精料)、供料和贫料 UF<sub>6</sub> 的质量进行称重,从而分别得到该时期内精料、消耗的供料和产生的贫料的铀质量;对一段时期内生产的 UF<sub>6</sub> 精料、消耗的供料和产生的贫料进行取样,然后利用气体质谱计对这些样品进行测量,从而得到该段时期内生产的浓缩 UF<sub>6</sub>、消耗的供料和产生的贫料 UF<sub>6</sub> 的<sup>235</sup>U 丰度;最后,利用这些测量值(铀质量和丰度)中的至少 4 个数据通过公式计算得到分离功率(不考虑物料损耗),典型的为 3 个月计算 1 次,不能在线监测。本文研究铀浓缩厂分离功率在线监测技术,将铀丰度和气体流量在线测量技术结合,通过数据的自动测量、自动采集、分析、传输、计算等实现分离功率的在线监测。

### 1 基本原理

铀浓缩厂分离功率在线监测技术主要包括两部分:工艺管线中 UF<sub>6</sub> 气体铀丰度的在线监测和铀流量(质量流量)的在线监测。铀丰度在线监测是利用研制的铀丰度在线监测装置监测得到<sup>[1]</sup>。精料端工艺管线中铀质量流量在线监测是通过孔板流量计在线监测来得到。

对于任意理想浓缩级联或工艺,其整个外部参数守恒,守恒方程如下:

$$FE_F = WE_w + PE_P \tag{1}$$

$$F = W + P$$

式中:P、W 和 F 分别为精料、贫料和供料的质量流量;E<sub>P</sub>、E<sub>w</sub> 和 E<sub>F</sub> 分别为精料、贫料和供料的丰度。

由上式可知,只要知道 4 个互相独立的参数,即可求出余下的两个参数。

分离功是分离单元(机器,级联乃至分离工厂)分离能力的定量量度。单位时间的分离功称为分离功率,单位为 kgSWU/a 或 tSWU/a,由下式<sup>[2]</sup>计算:

$$\Delta U = PV(E_P) + WV(E_w) - FV(E_F) \tag{2}$$

式中,V(E)为分离势函数<sup>[3]</sup>, $V(E) = (2E - 1) \cdot \ln(E/1 - E)$ ,E 为丰度。

由式(1)、(2)得分离功率:

$$\Delta U = P \left[ V(E_P) + \frac{E_P - E_F}{E_F - E_w} V(E_w) - \frac{E_P - E_w}{E_F - E_w} V(E_F) \right] \tag{3}$$

由式(3)可知,只要测量出精料端的铀丰度和质量流量、供料端的铀丰度及贫料端的铀丰度,即可计算得到分离功率。

丰度在线监测原理见文献[1]。该浓缩厂供料采用天然铀,因此其丰度认为是 0.71%。精料 UF<sub>6</sub> 气体流量由下式得到:

$$Q_m = k_k p d^2 \tag{4}$$

式中:Q<sub>m</sub> 为精料质量流量,g/s;k<sub>k</sub> 为孔板系数,g · s<sup>-1</sup> · Pa<sup>-1</sup> · m<sup>-2</sup>;p 为孔板前 UF<sub>6</sub> 气体压力,Pa;d 为孔板孔径,m。

利用刻度过的孔板系数以及相关的孔板参数,通过在线测定孔板前 UF<sub>6</sub> 气体的压力即可计算得到流量。

### 2 监测系统

装置主要由铀浓缩厂 UF<sub>6</sub> 气体铀丰度在线监测装置和孔板流量计组成。铀浓缩厂铀丰度在线监测仪安装在精料端和尾料端,用于对工艺管线中 UF<sub>6</sub> 气体铀丰度进行在线监测,其组成、性能等参见文献[1]。流量是采用安装在浓缩厂工艺管线上的孔板流量计来进行监测。

分离功率在线监测示意图如图 1 所示。

### 3 实验结果及讨论

贫料端 UF<sub>6</sub> 气体铀丰度在线监测结果示于图 2,图 2 中为连续 13 d 的贫料端铀丰度测

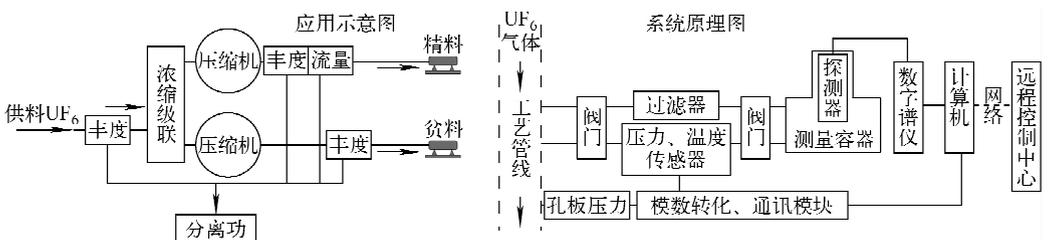


图 1 分离功率在线监测示意图

Fig. 1 Chart of separative power on-line monitor system

量数据(图中横坐标为测量次数,每次测量时间约为 5 600 s)。结果显示,监测系统对贫料端工艺管道中  $UF_6$  气体铀丰度测量算术平均值为 0.195%,工厂申报值(即同时期采用气体质谱计对贫料端管道中铀丰度测量结果的平均值)为 0.200 1%,系统对贫料端铀丰度的测量值与申报值的最大相对偏差小于 3%(图中误差线为 3%)。贫料端铀丰度测量所需时间相对较长,因为管道内  $UF_6$  气体  $^{235}U$  丰度低,其发射的 186 keV 特征  $\gamma$  射线相对贡献少,本底所占贡献多,对净计数测量干扰大,获取相同精度所需测量时间较精料端要长,一般为 2 h 左右。对精料端  $UF_6$  气体流量连续 13 d 监测,结果示于图 3,从图 3 可知,质量流量监测值非常平稳,与工厂申报流量平均值的最大相对偏差不大于 1%。

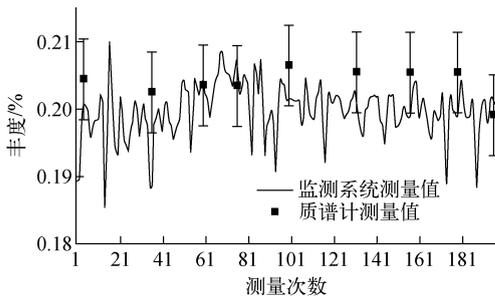


图 2 贫料端铀丰度测量值与申报值比较

Fig. 2 Enrichments of depleted  $UF_6$  by monitor system and mass spectrometry

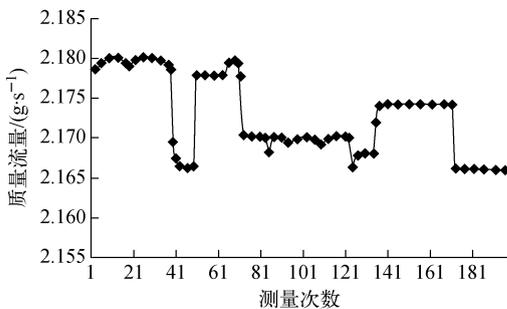


图 3 精料端  $UF_6$  气体铀质量流量监测结果

Fig. 3 Uranium flow rate measurement results of enriched  $UF_6$  gas by monitor system

铀浓缩厂申报的精料端  $UF_6$  气体平均质量流量为 3.201 g/s(铀质量流量约为 2.163 6 g/s),同时期精料端管道中  $UF_6$  气体铀丰度质谱计测量值为 4.456 4%,贫料端的  $^{235}U$  丰度申报值为

0.200 1%;供料丰度采用天然铀丰度(即 0.71%),浓缩厂最终利用这 4 个数据计算得到分离功率(即申报值)为 518.36 tSWU/a。

图 4 为连续 13 d 的分离功率监测数据,每个分离功率监测数据所需时间以贫料端铀丰度测量时间为准,即约 1.6 h。从图 4 可知,连续 13 d 的分离功率监测平均值为 528.89 tSWU/a,与申报值比较,相对偏差  $\leq 2.0\%$ ;监测到的分离功率不是恒定值,而是在不断变化,即实际的生产工艺与理想工艺不同,是处于波动变化过程中的,这与工厂的实际情况吻合很好。这也表明,分离功率监测可用来对铀浓缩工艺状态进行监测。

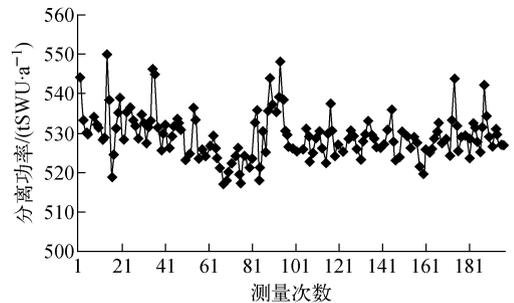


图 4 分离功率监测结果

Fig. 4 Measurement results of separative power

## 4 结论

分离功率在线监测系统在铀浓缩厂进行了实际应用,结果表明,在均不考虑物料损耗的情况下,分离功率在线监测结果与工厂计算值的相对偏差小于 2.0%。同时,该系统能实时反映浓缩设施工艺状况变化。

## 参考文献:

- [1] 吕学升,刘国荣,金惠民,等. 铀浓缩厂铀丰度在线监测装置研制[J]. 原子能科学技术,2013,47(6):1 060-1 063.
- LV Xuesheng, LIU Guorong, JIN Huimin, et al. Development of on-line uranium enrichment monitor of gaseous  $UF_6$  for uranium enrichment plant[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2013, 47(6): 1 060-1 063(in Chinese).
- [2] COHEN K. The theory of isotope separation as applied to the large scale production of  $^{235}U$ [R]. New York: McGraw-Hill, 1951.
- [3] VILLANI K. Topics in applied physics: Uranium enrichment[M]. New York: Springer-Verlag, 1979.