铀浓缩工厂经济贫料丰度研究

孙 丹，郝婵婵，汪晋兴，金晓东

（中核陕西铀浓缩有限公司，陕西 汉中 723312）

摘要：研究了铀浓缩工厂生产成本与贫料丰度的关系。通过分析全成本模式下丰度对产量和成本的影响，计算出成本-贫料丰度的变化关系，并求解得到不同参数下经济性最好的贫料丰度，分析了通过调整贫料丰度降低成本的技术可行性，提出铀浓缩工厂生产调整建议。通过研究，确定了全成本模式下的最优贫料丰度，为统筹行业成本提供了参考。

关键词：铀浓缩；成本；贫料；丰度

中图分类号：TL21 **文献标志码**：A **文章编号**：1000-8063(2023)01-0034-06

DOI：10.13426/j.cnki.yky.2022.10.03

铀浓缩工业是核工业的重要组成部分，是保证国家安全的支撑和基石，也是支持核电发展的重要基础[1]。铀浓缩工艺过程主要是将原料通过级联分离得到所需丰度的产品，剩余部分作为贫料（或称尾料）储存起来[2]。铀浓缩工艺的原料一般为天然铀，丰度为固定值；产品由客户订制，产品丰度不能随意调整；贫料一般由工厂自己储存，贫料丰度具有一定的调整余量[3]。

铀浓缩工厂的贫料丰度一般根据分离成本与原料价格比确定。目前，铀浓缩生产的经济评价以铀浓缩活动为主，没有考虑原料的价格变化，不能真正反映整个生产过程。随着国际市场变化、分离功价格、原料价格的剧烈波动，原有的贫料指导丰度对实际生产的指导意义降低。笔者尝试在现有运作模式下，分析铀浓缩工厂生产的整体经济性，为生产调整提供参考。

1 铀浓缩生产能力

当前主流的铀浓缩生产方法为：原料运输至供取料厂房，经一定工序后供入离心级联进行一定级数的分离，平衡后精料收集至精料取料装置[4]，经一定工序后作为产品出厂；贫料收集至贫料取料装置，最终储存至贫料库。生产的调整通过分离级的组合变化实现[5]。

1.1 铀浓缩生产能力表征

铀浓缩生产能力以年度分离功[6]30计：

$$\begin{aligned}\Delta U &= P\cdot Y = P\cdot V(C_P)+\\ &W\cdot V(C_W)-F\cdot V(C_F)=\\ &\sum(P_i\cdot Y_i)=\sum[P_i\cdot V(C_{Pi})+\\ &W_i\cdot V(C_{Wi})-F_i\cdot V(C_{Fi})],\end{aligned}\tag{1}$$

式中：ΔU 为年度分离功，tSWU/a；F、P、W 分别为以年计的供料、精料、贫料量，t/a；C_F、C_P、C_W 分别为供料、精料、贫料的丰度；$V(C_F)$、$V(C_P)$、$V(C_W)$ 分别为供料、精料、贫料的价值函数，无量纲；Y 为衡量浓缩前后价值增量，无量纲。

年度分离功与设计分离功（R）有以下关系

$$\Delta U=\eta\cdot R=\sum(\eta_i\cdot R_i),\tag{2}$$

式中：η 为级联效率。

总生产过程物料守恒[6]29

$$\begin{cases}P+W=F\\ P\cdot C_P+W\cdot C_W=F\cdot C_F\end{cases},\tag{3}$$

迭代后得

$$Y=(2C_P-1)\cdot\ln\frac{C_P}{1-C_P}+\frac{C_P-C_F}{C_F-C_W}\cdot(2C_W-1)\cdot\ln\frac{C_W}{1-C_W}-\frac{C_P-C_W}{C_F-C_W}\cdot(2C_F-1)\cdot\ln\frac{C_F}{1-C_F},$$

收稿日期：2022-10-10

第一作者简介：孙丹（1982—），男，江苏睢宁人，学士，高级工程师，主要从事同位素分离研究。

$$\Delta U = P \cdot \left[(2C_P - 1) \cdot \ln \frac{C_P}{1-C_P} + \frac{C_P - C_F}{C_F - C_W} \cdot (2C_W - 1) \cdot \ln \frac{C_W}{1-C_W} - \frac{C_P - C_W}{C_F - C_W} \cdot (2C_F - 1) \cdot \ln \frac{C_F}{1-C_F} \right], \tag{4}$$

1.2　铀浓缩生产特点

当前主流的铀浓缩生产具有如下特点：1）以天然铀为原料，C_F 为定值；2）$C_P > C_F$，$0 < C_W < C_F$；3）在其他条件不变的情况下，提高原料供入量可提高分离功，贫料丰度随之增加；降低贫料丰度，原料消耗量降低，分离功也降低；4）用户只需精料，但价值函数显示贫料具有价值；5）传统上认为贫料属于废弃物，贫料与核设施需计提专项处理费用；6）每次生产的精料量是确定的，根据精料量安排原料与贫料；7）用户需求的精料丰度范围较大，且浓缩工厂没有调节余地；8）贫料丰度调节范围较小，但由浓缩工厂自主决定；9）级联效率一般较高，虽然其随时间下降，但短时间内较为稳定；10）主机及相关附属设备设施设计寿命期相同。

2　铀浓缩生产费用分析

生产费用包括设备折旧费、人工费、管理费、财务费、检验费、维修费、仓储物流费、能源动力费、专项计提等。使用系统分析方法[7]对各项费用进行分析。

2.1　设备折旧费

铀浓缩相关设备主要有主机及其配套设备、分离级相关设备、供取料设备及构(建)筑物。

2.1.1　主机及其配套设备折旧

主机及其配套设备主要有分离主机、供电设备、自控仪表、冷却设备及通风设备，供电、控制、冷却及通风设备均正比于主机数，故主机及其配套设备总折旧费(S_{11})正比于主机数(n)，即

$$S_{11} = k_{11} \cdot n, \tag{5}$$

在工厂初始设计中，根据总分离功(R)和单机分离功(n_0)决定主机数：

$$n = \frac{R}{n_0}, \tag{6}$$

一般商用铀浓缩工厂主机数量有几万至几十万台。

2.1.2　分离级相关设备折旧

实现分离必须将主机组合成一定的分离级，每个分离级配备相应的供电、控制及冷却设备。分离级数在设计时已确定，产品调整时通过一定的分离级组合实现。一般情况下分离级设备不存在退出，故分离级相关设备总折旧费(S_{12})正比于设计总分离级数(N)：

$$S_{12} = k_{12} \cdot N, \tag{7}$$

在工厂初始设计中，根据初设精料丰度(C_P^0)和初设贫料丰度(C_W^0)决定总分离级数：

$$N = \frac{1}{\varepsilon} \ln \left(\frac{\dfrac{C_P^0}{1-C_P^0}}{\dfrac{C_W^0}{1-C_W^0}} \right) - 1, \tag{8}$$

式中：ε—浓缩系数。一般商用铀浓缩工厂有十几至几十个分离级。

2.1.3　供取料设备折旧

供取料设备主要包括供料取料设备及配套的供电、自控仪表、冷却及通风设备，其数量正比于主机需求，故供取料设备折旧费(S_{13})正比于主机数(n)：

$$S_{13} = k_{13} \cdot n, \tag{9}$$

2.1.4　构(建)筑物折旧

构(建)筑物为上述各设备提供空间和外围防护，故构(建)筑物折旧费正比于设备数。由于分离级数远远少于主机数，故可认为构(建)筑物折旧费(S_{14})正比于主机数：

$$S_{14} = k_{14} \cdot n, \tag{10}$$

2.1.5　设备折旧费用

综合式(5)～(10)，得出设备折旧总费用正比于主机数和分离级数，设折旧期为 T，按直线折旧法计算每年的折旧费用(S_1)：

$$S_1 = \frac{S_{11} + S_{12} + S_{13} + S_{14}}{T} = \frac{k_{11} \cdot n + k_{12} \cdot N + k_{13} \cdot n + k_{14} \cdot n}{T}$$

$$= \frac{k_{11} + k_{13} + k_{14}}{T} \cdot n + \frac{k_{12}}{T} \cdot N = k_1 \cdot n + \theta_1 \cdot N = k_1 \cdot \frac{R}{n_0} + \theta_1 \cdot N, \tag{11}$$

式中：k_1、θ_1—每年设备折旧费用系数。

2.2　人工费

工厂的人员配备正比于主机数和分离级数，故

$$S_2 = k_2 \cdot \frac{R}{n_0} + \theta_2 \cdot N, \tag{12}$$

式中：k_2、θ_2—每年人工费系数。

2.3 管理费

管理费(S_3)一般正比于人工，故同样正比于主机数和分离级数：

$$S_3 = k_3 \cdot \frac{R}{n_0} + \theta_3 \cdot N, \tag{13}$$

式中：k_3、θ_3—每年管理费系数。

2.4 财务费

财务费(S_4)是为筹集生产所需发生的费用，正比于主机数和分离级数：

$$S_4 = k_4 \cdot \frac{R}{n_0} + \theta_4 \cdot N, \tag{14}$$

式中：k_4、θ_4——每年财务费系数。

2.5 检验费

检验费(S_5)来自对现有设备的检验，以及对原料与产品的检验。年度原料与产量由年度分离功按式(1)～(4)确定，年度分离功与初始设计分离功成正比。故

$$S_5 = k_{51} \cdot n + k_{52} \cdot \Delta U + \theta_5 \cdot N = k_{51} \cdot \frac{R}{n_0} + k_{52} \cdot \eta \cdot R + \theta_5 \cdot N$$

$$= (k_{51} + k_{52} \cdot \eta \cdot n_0) \cdot \frac{R}{n_0} + \theta_5 \cdot N = k_5 \cdot \frac{R}{n_0} + \theta_5 \cdot N, \tag{15}$$

式中：k_5、θ_5——每年检验费系数。

2.6 维修费

维修费(S_6)正比于主机数和分离级数：

$$S_6 = k_6 \cdot \frac{R}{n_0} + \theta_6 \cdot N, \tag{16}$$

式中：k_6、θ_6——每年维修费系数。

2.7 仓储物流费

仓储物流主要来自于原料与产品、设备维修、管理办公物资，结合式(13)～(16)，仓储物流费(S_7)同样正比于主机数和分离级数：

$$S_7 = k_7 \cdot \frac{R}{n_0} + \theta_7 \cdot N, \tag{17}$$

式中：k_7、θ_7——每年仓储物流费系数。

2.8 能源动力费

能源动力费(S_8)正比于主机数和分离级数：

$$S_8 = k_8 \cdot \frac{R}{n_0} + \theta_8 \cdot N, \tag{18}$$

式中：k_8、θ_8——每年能源动力费系数。

2.9 专项计提

铀浓缩工厂生产相关的专项计提主要有：1)按年计提未来设备退役后的处理费用，其与设备数成正比；2)预提的贫料处置费用，每年贫料量可以按式(1)～(4)确定。年度分离功与初始设计分离功成正比，所以每年的专项计提费用(S_9)为

$$S_9 = k_9 \cdot \frac{R}{n_0} + \theta_9 \cdot N, \tag{19}$$

式中：k_9、θ_9——每年专项计提系数。

2.10 生产费用

根据式(10)～(19)，生产费用(S)正比与于主机数与分离级数，即

$$S = k \cdot n + \theta \cdot N = k \cdot \frac{R}{n_0} + \theta \cdot N =$$

$$k \cdot \frac{\Delta U}{\eta \cdot n_0} + \theta \cdot N。 \tag{20}$$

3 铀浓缩最佳经济性探讨

对于一个经济体来说，总是追求经济效益的[8-9]，即：

利润总额＝销售利润＋投资净收益＋营业外收入－营业外支出，

销售利润＝产品销售收入－生产成本－其他费用－税金及附加费用。

传统方式下，工厂最佳经济性就是利润最大化；但对于铀浓缩行业来说，投资净收益、营业外收入、营业外支出、其他费用、税金及附加费用，以及产品定价均不由自身掌控，对铀浓缩工厂有意义的是产量与生产成本：

$$p = D_P \cdot \Delta U - S - M, \tag{21}$$

式中：p—每年利润；D_P—产品分离功单价；M—原料成本；其余同上。

铀浓缩工厂主要采用来料加工模式，不同统计方式下的经济性并不相同。

3.1 传统模式

在传统模式下，铀浓缩工厂不计入原料成本：

$$p = D_P \cdot \Delta U - S$$

$$= D_P \cdot \Delta U - k \cdot \frac{\Delta U}{\eta \cdot n_0} - \theta \cdot N$$

$$= \left(D_P - \frac{k}{\eta \cdot n_0}\right) \cdot PY - \theta \cdot N。 \tag{22}$$

3.1.1 各参量对成本的贡献

由式(22)可看出：1)在满足生产的情况下，分离级数(N)越小越好。一般柔性级联级数远多于刚性级联，其经济性较差。2)级联效率(η)越高，

经济性越好，提高每个工况的级联效率，可以有效降低成本。通常情况下柔性级联效率低于刚性级联，其经济性较差。3）生产费用系数（k、θ）直接影响成本，降低单位成本对总体降本有决定性意义。

3.1.2　参量求解

根据式（4）及式（8），分离级数（N）为常量，级联效率（η）近似为常量，且精料量（P）由客户确定，同一核算模式下 D_P、k、θ 均为常量，因此函数 Y 最大时，利润（p）最大，故问题转化为求解函数 Y 的最大值。根据式（4）分析的函数 Y 的各参量，式中：原料丰度（C_F）、精料丰度（C_P）为定值；贫料丰度（C_W）由工厂自己确定，为变量。函数 Y 与 C_W 的关系如图 1 所示。可以看出，在满足产品产量（P）和本度（C_P）要求时，贫料丰度（C_W）越低总利润越高。

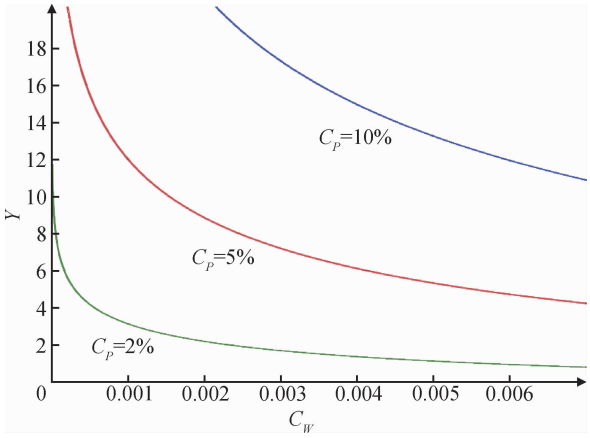


图 1　函数 Y 随 C_W 的变化关系

Fig. 1　The function Y with respect to C_W

3.1.3　经济贫料丰度分析

对函数 Y 求导[10]得

$$\frac{\mathrm{d}Y}{\mathrm{d}C_W}=\frac{C_P-C_F}{(C_F-C_W)^2}\cdot(2C_W-1)\cdot\ln\frac{C_W}{1-C_W}+\frac{C_P-C_F}{C_F-C_W}\cdot 2\ln\frac{C_W}{1-C_W}+\frac{C_P-C_F}{C_F-C_W}\cdot(2C_W-1)\cdot\frac{1}{C_W(1-C_W)}-\frac{C_P-C_F}{(C_F-C_W)^2}\cdot V(C_F)。\tag{23}$$

$\mathrm{d}Y/\mathrm{d}C_W$ 函数如图 2 所示。从式（23）及图 2 可看出，贫料丰度趋向 0 时，函数 Y 趋向无穷大，且 $\mathrm{d}Y/\mathrm{d}C_W$ 始终小于 0，故不存在最优贫料丰度（C_W）能使得利润最大；但贫料丰度能达到的极限由初始设计的分离级数决定，不可能无限降低。而且考虑级联效率（η）的影响，级联效率降低也会导致成本增大，总利润降低。

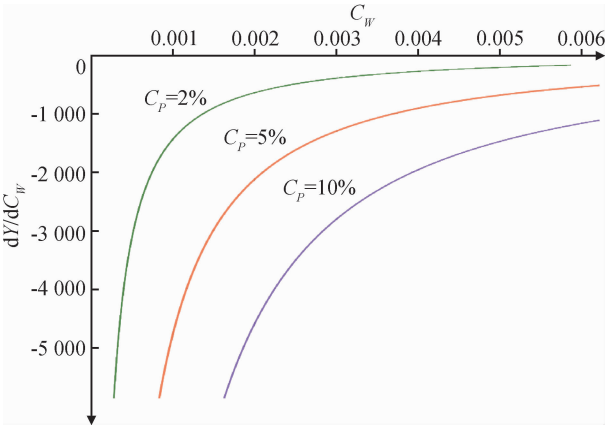


图 2　$\mathrm{d}Y/\mathrm{d}C_W$ 函数图

Fig. 2　The function of $\mathrm{d}Y/\mathrm{d}C_W$

一般来说，在铀浓缩工厂初始设计时，会设定一个贫料丰度（C_W^0），然后针对此丰度进行设计优化，使级联效率达到最大。故当（$C_W=C_W^0$）时，经济性最好。

3.2　全成本模式

进行全成本[11]核算时，不仅需要考虑生产相关费用，还应考虑原料的费用[12]。虽然用户不需要贫料，但贫料本身具有价值，计算铀浓缩总成本时应去除贫料的价值。则利润

$$p=p_P+p_W-S-D_F\cdot F=D_P\cdot P+D_W\cdot W-S-D_F\cdot F=D_P\cdot P-S',\tag{24}$$

$$S'=S-D_W\cdot W+D_F\cdot F,\tag{25}$$

式中：D_F、D_W ——原料、贫料单价。

3.2.1　全成本公式解析

对于铀浓缩工厂来说，精料的单价和产量是明确的，为使利润最大化，就需要使 S' 最小。将式（3）和式（22）代入式（25），可得式（26），式中 s 为单位分离功成本。

当（$\dfrac{\mathrm{d}S'}{\mathrm{d}C_W}=0$）时，$S'$ 最小。对式（26）求导得式（27）。将式（27）进一步化简[13]后得式（28）。

$$S' = k \cdot \frac{P \cdot Y}{\eta \cdot n_0} + \theta \cdot N - D_W \cdot \frac{C_P - C_F}{C_F - C_W} \cdot P + D_F \cdot \frac{C_P - C_W}{C_F - C_W} \cdot P$$
$$= s \cdot P \cdot Y + \theta \cdot N - D_W \cdot \frac{C_P - C_F}{C_F - C_W} \cdot P + D_F \cdot \frac{C_P - C_W}{C_F - C_W} \cdot P, \tag{26}$$

$$\frac{\mathrm{d}S'}{\mathrm{d}C_W} = \frac{C_P - C_F}{(C_F - C_W)^2}\left\{ s \cdot \left[\begin{array}{l} (2C_W - 1) \cdot \ln \dfrac{C_W}{1 - C_W} + (C_F - C_W) \cdot 2\ln \dfrac{C_W}{1 - C_W} + \\ (C_F - C_W) \cdot (2C_W - 1) \cdot \dfrac{1}{C_W(1 - C_W)} - V(C_F) \end{array} \right] - D_W + D_F \right\}, \tag{27}$$

$$f(C_W) = (2C_W - 1) \cdot \ln \frac{C_W}{1 - C_W} + (C_F - C_W) \cdot 2\ln \frac{C_W}{1 - C_W} +$$
$$(C_F - C_W) \cdot (2C_W - 1) \cdot \frac{1}{C_W(1 - C_W)} - V(C_F) + \frac{D_F - D_W}{s}。 \tag{28}$$

函数 $f(C_W)$ 如图 3 所示。令 $\mu = \dfrac{D_F - D_W}{s}$，当 $f(C_W) = 0$ 时成本最小。

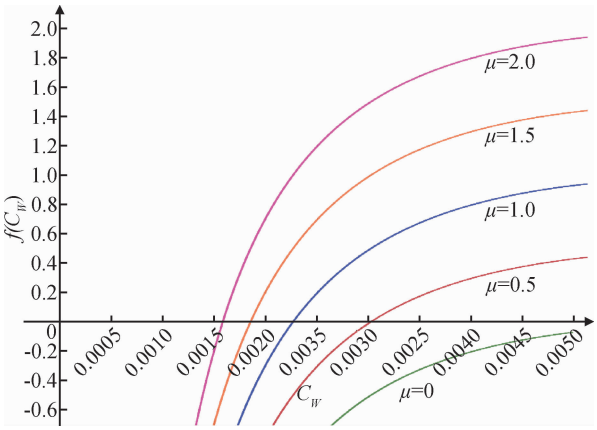


图 3 $f(C_W)$ 函数图

Fig. 3 The function $f(C_W)$

3.2.2 最优贫料丰度求解

计算一组不同 μ 值时的最优贫料丰度 C_W^*，见表 1。粗略估算时可用近似解：

$$C_W^* \approx -0.001\ 06\ln\mu + 0.002\ 29。 \tag{29}$$

表 1 最优贫料丰度

Table 1 The best abundance of lean uranium

μ	C_W^* /%
0	0.709
0.5	0.302
1.0	0.227
1.5	0.185
2.0	0.158

进行铀浓缩全成本模式核算时，无论产品丰度是多少，产量是多少，均存在最佳贫料丰度 C_W^*，实际贫料生产丰度高于或低于这个数值，生产成本都会增加。最佳贫料丰度 C_W^* 并不是一成不变的，其值与 μ 有关，μ 增大，最佳贫料丰度降低；μ 减少，最佳贫料丰度增大。μ 越大，代表原料相对分离功的价格越昂贵，降低原料消耗对整体更有利；μ 越小，代表分离功相对原料的价值更高，多消耗原料提高分离功对整体更有利。

贫料的自身价值对核算有较大影响，若贫料没有价值，需提取贫料处置费用，会增加成本；若贫料有价值，则不需要提取处置费用，可以降低成本。

3.2.3 当下市场最优贫料丰度

2022 年 10 月核燃料价格指数[14]显示，分离功为 74.9 万元/tSWU，原料价格为 102.2 万元/tU，贫料处置费为 3.5 万元/tU。根据该指数，计算当下市场最优贫料丰度，结果见表 2。

表 2 当下市场最佳贫料丰度

Table 2 The best abundance of lean uranium in the current market

	计算方式	μ	C_W^* /%
成本费用率 100%	提取贫料处置费	1.411	0.191
	不提取贫料处置费	1.365	0.195
	贫料价值达到原料的 1/10	1.228	0.205
成本费用率 90%	提取贫料处置费	1.568	0.181
	不提取贫料处置费	1.516	0.184
	贫料价值达到原料的 1/10	1.365	0.195
成本费用率 80%	提取贫料处置费	1.764	0.170
	不提取贫料处置费	1.706	0.173
	贫料价值达到原料的 1/10	1.535	0.183

考虑系统随机误差[15]，在不提取贫料处置费用时，相对原来可以提高约 2%的产量。若贫料的价值达到原料价值的 1/10，相对原来可以提高约 5%的产量，可以极大地提高经济效益。

3.3　小结

若考虑原料价格，铀浓缩存在最佳贫料丰度，此时行业全成本最低；若不考虑原料，仅计算铀浓缩自身生产成本，不存在最佳贫料丰度。在工厂初始设计时应当预测长期的原料价格和分离功价格，算出最佳贫料丰度，设计全成本最优的的铀浓缩级联。

4　结论

传统模式下，铀浓缩工厂贫料丰度应尽可能贴近设计丰度。从铀浓缩产业全成本考虑，存在最佳贫料丰度，使得生产成本最低。按当下核燃料价格指数和行业成本率计算，最佳的贫料丰度约为 0.19%，参考该值进行级联设计，可在全成本模式下达到最佳效益。

参考文献：

[1] 周明胜，姜东君. 核燃料循环导论[M]. 北京：清华大学出版社，2016：63-96.

[2] 杨小松，张进荣，刘太珍. 电调阀在铀浓缩工艺中的应用及工艺控制优化[J]. 铀矿冶，2019，38(1)：42-47.

[3] 孙继全，赵梅，关成明. 30B 产品容器收料可行性研究及应用[J]. 同位素，2021，34(1)：405-411.

[4] 汪晋兴，孙丹，田巨云. 级联平衡时间探究[J]. 铀矿冶，2022，41(1)：57-60.

[5] 张萌. 铀浓缩级联电动调节阀研究[D]. 西安：西安电子科技大学，2019.

[6] 钟宏亮. 铀浓缩主工艺技术[M]. 北京：中国原子能出版社，2022：10-42.

[7] 钱学森，宋健. 工程控制论[M]. 北京：科学出版社，2011：8-19.

[8] 张庚淼，张仁华. 企业战略与市场营销[M]. 北京：机械工业出版社，2001.

[9] 虞晓芬，龚建立，张化尧. 技术经济学概论[M]. 北京：高等教育出版社，2018：60-62.

[10] 何素艳，万丽英，曹宏举. 微积分[M]. 北京：清华大学出版社，2020：91-102.

[11] 郝婵婵. 铀浓缩生产线全生命周期经济性探讨[D]. 北京：中国核工业集团公司，2022.

[12] 陈锡璞. 工程经济[M]. 北京：机械工业出版社，2000：9-15.

[13] 王立东，吴新星. 高等数学基础[M]. 北京：科学出版社，2022：17-40.

[14] 中国核学会. 中国核学会核燃料价格指数(试运行)[EB/OL]. (2022-10-12). http://m.ns.org.cn/site/content/8604.html.

[15] 李云雁，胡传荣. 试验设计与数据处理[M]. 北京：化学工业出版社，2017：6-9.

Research on Optimal Lean Uranium Abundance of Uranium Enrichment Plant

SUN Dan, HAO Chanchan, WANG Jinxing, JIN Xiaodong

(CNNC Shaanxi Uranium Enrichment Co., Ltd., Hanzhong 723312, China)

Abstract: The relationship between the production cost and the lean uranium abundance of uranium enrichment plant was studied. By analyzing the influencing factors of uranium abundance on yield and cost under full-cost models, the relationship between cost and lean uranium abundance was calculated, and the best economic lean uranium abundance under different models was solved. The technical feasibility of reducing costs by adjusting the lean uranium abundance was analyzed, and suggestions for production adjustment of uranium enrichment plants were put forward. Through the research, the optimal lean material abundance under the full-cost mode was determined, which provides the reference for coordinating industry costs.

Key words: uranium enrichment; cost; lean uranium; abundance