铀浓缩工厂主物料搬运分析

孙 丹，郝婵婵，关成明，唐 建

（中核陕西铀浓缩有限公司，陕西 汉中 723312）

摘要：对工厂物料搬运系统进行系统化分析，详细分析了工厂专用物料的特点，明确搬运路线情况和物流条件，确定工厂物料搬运的影响因素及实用的物料搬运方法，编制工厂专用物料搬运总体方案，初步确定了各工作单元详细搬运方案，并对方案的经济因素和无形因素进行了评价分析。系统化分析为物料搬运方案的改进提供理论支持，为改建、扩建工厂物料的搬运提供了合理方案，提高了搬运效率，降低了劳动强度和劳动力需求量，为工厂降低生产成本提供了指导。

关键词：物流；系统化分析；搬运方案

中图分类号：TL93^{+}2.2；P619.14 **文献标志码**：A **文章编号**：1000-8063(2023)02-0039-07

DOI：10.13426/j.cnki.yky.2022.10.02

铀浓缩工业是国家安全的重要支撑[1]。铀浓缩工业体系繁杂且技术含量高，生产运行中主要包含铀浓缩作业，以及同位素原料、尾料、产品及其副产品的储存和运输。从铀浓缩工业的特殊性和安全性考虑，物流相关作业仍以人工作业为主，是影响人工成本和劳动强度的最重要因素。随着生产规模的扩大，物流相关作业强度和劳动力数量将进一步扩大。

物流因素在铀浓缩工厂中占有重要地位[2]，但目前国内铀浓缩工厂把主要精力集中在铀浓缩技术及物流安全性上，其物流模式仅注重物料送达的及时性和安全性，缺乏系统性，搬运效率较低。因此，有必要对铀浓缩工厂的物料搬运进行系统化分析，以期提高搬运效率和降低生产成本。

1 铀浓缩工厂物料搬运现状分析

系统搬运分析法（SHA，System Handling Analysis）[3]122-139是一种普遍采用的物料搬运系统化研究方法，适用于一切物料搬运项目。

1.1 生产工艺过程

铀浓缩工厂工艺过程总体上可分为原料存储、原料供给、浓缩、产品/尾料收集、产品均质、产品暂存、尾料储存，以及性能检测。原料、产品、尾料和副产物为铀浓缩工厂的主物料，每年的原料、产品、尾料和副产物可根据物料平衡方程和价值函数计算[4]。

采用 ASME 标准流程图例符号，绘制了千吨级能力工厂生产 2% 丰度产品时的工艺过程图[3]14-63（图 1），并标注了物流强度。可以看出，原料进入原料厂房，经过相应工序处理合格后供给专用浓缩设备；浓缩工序同时产生产品、尾料和副产物，分别收取并输送至取料厂房。收集一定量后，尾料和副产物分别送至尾料库和副产物库储存，产品送至均质厂房处理合格后暂存至产品库。原料的处理、供给、浓缩，以及产品、尾料、副产物向产品厂房的输送和收取均通过专用传输管道进行，损耗可以忽略，搬运暂不考虑。

1.2 搬运系统空间结构形式

从铀浓缩工艺过程（图 1）可以看出，物料搬运系统呈发散状态，原料经过浓缩作业，形成产品、尾料和副产物，后续不存在具备生产意义的其他阶段，物料搬运系统为单一阶段的分支型系统。

1.3 铀浓缩工厂作业单元

根据铀浓缩的工艺特点和各单元的作用，铀浓缩工厂可划分为 6 大模块，分别承担生产管理与服务、存储、供电、生产、性能测试、检修等职能。根据各单元的功能，可划分为更多的作业单元，承担主物料搬运的主要是供运站、原料厂房、取料厂

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。

房、均质厂房、原料库、产品库、尾料库、副产物库等 8 个作业单元。

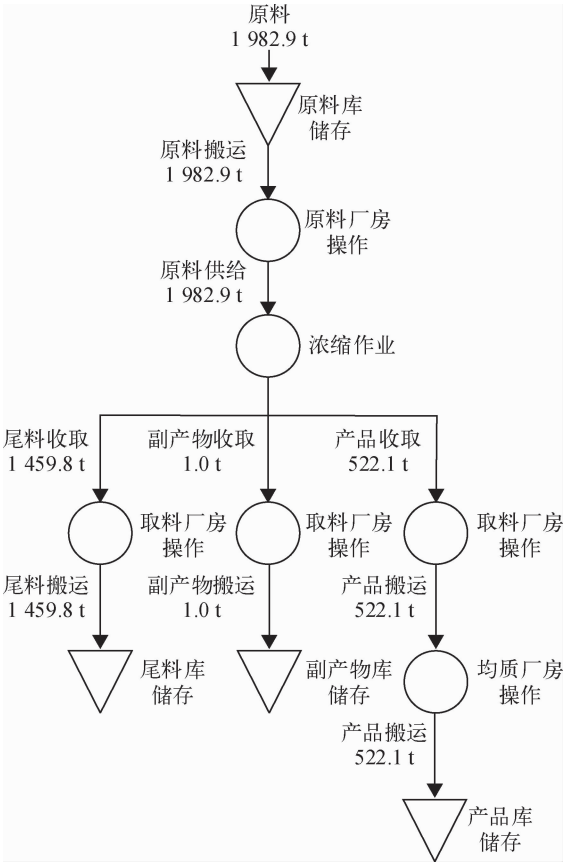


图 1 铀浓缩工厂工艺过程示意图

Fig. 1 Process diagram of uranium enrichment factory

1.4 铀浓缩工厂搬运活动

搬运系统主要由装卸搬运、厂内运输、厂内储存和物流信息等环节组成，分别承担专用物料不同厂房之间的运输、各厂房内物料的装卸搬运、原料及产品的临时储存、生产控制及物流控制等功能。

1.4.1 运输

专用物料运输是将专用物料进行空间移动，解决物资生产地和使用地间的距离问题。供运站承担外部物流和厂内物流的衔接任务，是工厂搬运的起点。原料库接收来自供运站的原料，按照工厂总体生产计划安排，将原料运输至原料供给厂房；将原料空容器运输至原料库暂存，然后适时运输至供运站出厂。产品库接收来自均质厂房处理后的产品，按工厂总体生产计划安排，将产品运输至供运站出厂；用于装载产品的空容器经供运站入厂至产品库暂存，然后适时运输至均质厂房收取产品。

取料厂房收集尾料到规定量后，运输至尾料库储存；尾料容器由供运站入厂运输至尾料库暂存，然后适时运输至取料厂房收取产品。取料厂房收集副产物到规定量后，运输至副产物库储存，然后适时将副产物运输至供运站出厂；用于装载副产物的空容器经供运站入厂至副产物库暂存，然后适时运输至取料厂房收取副产物。

1.4.2 装卸搬运

专用物料的装卸搬运与生产工艺过程紧密结合，是铀浓缩生产活动的重要组成部分。装卸搬运活动见表 1。

1.4.3 储存

专用物料储存是为了保证生产的连续性、预防突发事件打乱生产计划，以及为解决产品出厂的不同步性而设置的一定数量的物资储备，可确保企业生产的均衡有序。一般情况下，除尾料储存外，其他物料、物资存储量并不大。

表 1 装卸搬运活动

Table 1 Handling activities

作业单元	对象	作业
供运站	专用物料、产品、副产物、专用生产设备、备品备件	装上、卸下、分类、移送
原料库	专用原料	装上、卸下、分类、移送、拣选、入库、出库
产品库	产品	装上、卸下、分类、移送、拣选、入库、出库
尾料库	尾料	装上、卸下、分类、移送、入库、出库
原料厂房	专用原料	装上、卸下、移送、入库、出库
取料厂房	产品、尾料和副产物	装上、卸下、移送、入库、出库
均质厂房	产品	装上、卸下、移送、拣选、入库、出库
副产物库	副产物	装上、卸下、分类、移送、拣选、入库、出库

2　系统搬运分析

铀浓缩工厂所搬运的主物料包括原料、产品、尾料和副产物，其特征各不相同，进行搬运时所需的包装容器也各不相同。因检修物资量不多，搬运量较少，时间分散[5-8]，检修物资搬运问题暂不考虑。

铀浓缩工厂所使用的工作介质具有特殊的物理、化学性质[9]，铀浓缩工厂物料搬运系统是搬运装有工作介质的容器。每台容器装填一定量的物料，1 次搬运 1 台容器，厂内运输无须考虑外包装。因此，系统搬运分析主要考虑运输方面。

2.1　物料分类

容器特征各不相同，搬运设备和搬运方法也存在很大差异，必须按一定规则进行分类，使同一类物料基本使用同一方式进行搬运。进行物料分类，不仅可以简化分析工作，也有助于将整个问题划分成若干部分逐个解决。

2.1.1　专用物料搬运系统的搬运对象

铀浓缩工厂的工作介质存在放射性和化学毒性[10]，不能直接接触。专用物料的搬运作业作用于装载有专用物料的专用容器。物料搬运时，必须使用专用的运输容器，专用运输容器有 X、Y、B、C、L 等规格。作业单元搬运对象见表 2。

表 2　作业单元搬运对象

Table 2　Handling objects of the work unit

作业单元	搬运对象
供运站	X、Y、B、C、L
原料库	X
产品库	B、C
尾料库	Y
原料厂房	X
取料厂房	X、Y、C、L
均质厂房	B、C
副产物库	L
检修站	检修物资

2.1.2　搬运对象的主要物理特征

专用运输容器的主要物理特征见表3。检修物资的包装运输应遵守相应法规。

表 3　专用容器的主要物理特征

Table 3　Main physical characteristics of special container

规格	材质	形状	尺寸/(cm×cm)	放置	用途
X 容器	碳钢	圆柱	ϕ133×300	水平	工厂内外搬运原料
Y 容器	碳钢	圆柱	ϕ133×300	水平	内部搬运、存储尾料
B 容器	碳钢	圆柱	ϕ78×300	水平	厂外运输产品
C 容器	碳钢	圆柱	ϕ133×300	水平	内部搬运、存储产品
L 容器	不锈钢	圆柱	ϕ50×50	立式	工厂内外搬运、存储副产物

2.1.3　物料的其他特征

对于铀浓缩工厂的工艺过程，搬运作业是间断式的，而铀浓缩作业是连续的。搬运容器的数量需根据专用物料的需求量进行调整；同时为了保证生产余量，需增加 2% 的富余量。实际生产中，原料、产品、尾料的搬运按一定周期进行，而副产物的周期性则不明显，产品的出厂周期性也很弱。

2.2　物料特征分析

分析影响物料可运性的各种特征，确定起主导、决定性作用的特征。进行物料分类后，编制的物料特征见表 4。

2.3　各项移动分析

分析各项移动时必须掌握的资料包括物料、路线与物流。设施布置决定了物料搬运距离，进行移动分析必须结合物料搬运作业与具体布置。物料是搬运的对象，在进行各项移动分析之前首先对物料进行分类。

2.3.1　路线

系统搬运分析用标注起点（取货地点）和终点（卸货地点）的方法标明每条路线。进行路线分析时，不仅要考虑移动的距离（每条路线从起点到终点的距离），还要考虑路线的具体情况。铀浓缩各作业单元因建设时期、法规要求，以及工厂的不同而不同；分析中假定各单元的距离均为 500 m，仅考虑物料本身的影响。物料搬运路线分析见表 5。

表 4 物料特征

Table 4 Material characteristics

物料名称	实际最小单元	单元物品的物理特征						其他特征			类别
		规格/(cm×cm)	质量/kg		形状	损伤可能性	状态	数量/台	时间性	特殊控制	
			空容器	满容器							
X 容器	单个	ϕ133×300	2 300	11 840	圆柱	放射性毒性	刚度高稳定	213	紧迫性	依法严格控制	罐装料
Y 容器	单个	ϕ133×300	1 200	10 740	圆柱	放射性毒性	刚度高稳定	158	紧迫性	依法严格控制	罐装料
B 容器	单个	ϕ78×300	780	3 057	圆柱	放射性毒性	刚度高稳定	235	经常性	依法严格控制	罐装料
C 容器	单个	ϕ133×300	3 340	10 540	圆柱	放射性毒性	刚度高稳定	158	经常性	依法严格控制	罐装料
L 容器	单个	ϕ50×50	80	130	圆柱	毒性	刚度高稳定	21	以年计	依法控制	罐装料

表 5 物料搬运路线分析

Table 5 Analysis of material handling route

路线		距离/m	物料	路线具体情况
起点	终点			
供运站	原料库	500	X 容器	路线的直接程度和直线程度，如水平、倾斜、垂直、直线、曲线、曲折情况；道路的拥挤程度和路面情况；移动所经过的气候与环境，是否经过室内、室外、冷库、空调区、清洁卫生区域、洁净房间、易爆区；起点和终点的具体情况和组织情况，取货和卸货地点的数量和分布，起点和终点的具体布置，起点和终点的组织管理情况等
供运站	产品库	500	B 容器(空)	
供运站	尾料库	500	Y 容器(空)	
供运站	副产物库	500	L 容器(空)	
原料库	原料厂房	500	X 容器	
原料库	供运站	500	X 容器(空)	
产品库	供运站	500	B 容器	
产品库	均质厂房	500	B 容器(空)	
尾料库	取料厂房	500	Y 容器(空)	
原料厂房	原料库	500	X 容器(空)	
取料厂房	均质厂房	500	C 容器	
取料厂房	尾料库	500	Y 容器	
取料厂房	副产物库	500	L 容器	
均质厂房	产品库	500	B 容器	
均质厂房	取料厂房	500	C 容器(空)	
副产物库	取料厂房	500	L 容器(空)	
副产物库	供运站	500	L 容器	

2.3.2 物流

一般来说，物流量包含运输、库存、配送和装卸搬运等功能，运输只是物流的 1 个作业环节。但对于铀浓缩工厂来说，各处的配送、装卸工作几乎完全一样，物料搬运所进行的工作主要是物料的运输，物流量可近似等同于运输工作量。因此，主要工作是分析物流过程，其运输量＝Σ(每批货物重量×该批货物移动距离)。

对于实际搬运系统来说，只用体积或质量来衡量物流量不能真正体现可运性差别，例如同样是 Y 容器搬运，满装容器的质量近乎空容器的 8 倍，按质量计算时运输量也为 8 倍；但实际搬运过程中，两者所使用的工具、配置的人工完全一样。因此在系统分析、规划、设计过程中，必须找出合适的标准，把系统中所有的物料通过修正、折算为当量物流量，再进行比较、分析和运算。可以将其折算为“玛格数”来计量，玛格数为无量纲数，其计算公式为[11]82

$$M = A + \frac{1}{4}A \times (B + C + D + E + F),$$

式中：M—玛格数；A—玛格数基本值；B—密度修正因数；C—形状修正因数；D—损伤危险性修正因数；E—物料状态修正因数；F—物料价值修正因数。

根据物料特征(表 4)及玛格数计算方法[11]82-86计算各物料当量物流量(表 6)，由此得出物料搬运物流量分析结果(表 7)。

表 6　物料当量物流量

Table 6　Equivalent flow capacity of materials

物料	*A*	*B*	*C*	*D*	*E*	*F*	*M*
X 容器	60	1	1	1	0	1	120
Y 容器	60	1	1	1	0	1	120
B 容器	52	1	1	1	0	1	104
C 容器	60	1	1	1	0	1	120
L 容器	16	1	3	1	2	1	48

表 7　物料搬运物流量分析

Table 7　Analysis of material handling flow

路线		物料	物流量/玛格	容器数量/台	规律性	急迫性
起点	终点					
供运站	原料库	X 容器	120	213	一般	是
供运站	产品库	B 容器(空)	104	235	一般	是
供运站	尾料库	Y 容器(空)	120	158	一般	是
供运站	副产物库	L 容器(空)	48	21	无	是
原料库	原料厂房	X 容器	120	213	强	是
原料库	供运站	X 容器(空)	120	213	一般	无
产品库	供运站	B 容器	104	235	一般	无
产品库	均质厂房	B 容器(空)	104	235	一般	无
尾料库	取料厂房	Y 容器(空)	120	158	一般	无
原料厂房	原料库	X 容器(空)	120	213	强	一般
取料厂房	均质厂房	C 容器	120	75	强	是
取料厂房	尾料库	Y 容器	120	158	强	是
取料厂房	副产物库	L 容器	48	21	一般	一般
均质厂房	产品库	B 容器	104	235	强	一般
均质厂房	取料厂房	C 容器(空)	120	75	一般	一般
副产物库	取料厂房	L 容器(空)	48	21	一般	无
副产物库	供运站	L 容器	48	21	无	无

2.3.3　各项移动分析

在 SHA 中，分析各项移动的方法有流程分析法和起讫点分析法。流程分析法每次只观察一类产品或物料，并跟随它沿整个生产过程收集资料。起讫点分析法有 2 种做法：1）通过观察每次移动的起讫点收集资料，每次分析 1 条路线；2）对 1 个区域进行观察，收集进/出该区域一切物料的有关资料，编制物料进出表。

对于铀浓缩工厂物料搬运系统来说，所搬运的物料品种较少，采用流程分析法为宜。使用坐标指示图进行铀浓缩工厂专用物料搬运系统各项移动的图表化（图 2），标注物料搬运起讫点的相对位置、路线、路线长度，以及此路线的运输量。

2.3.4　搬运活动相对重要性等级

按 A（超高物流量）、E（特大物流量）、I（较大物流量）、O（普通物流量）、U（不重要的或可忽略的物流量）等级对每条路线、每类物料和每项移动的相对重要性进行标定，可以简单明了、全面了解铀浓缩工厂物料搬运系统的情况[3]127。

假定各搬运路径距离相当，各物料和各搬运路线的相对重要性等级标定见表 8。

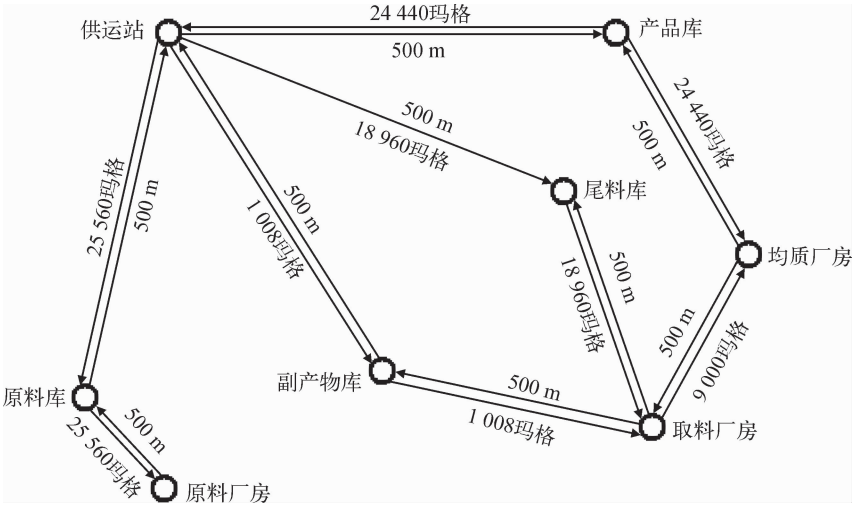


图 2　各项移动坐标示意图

Fig. 2　Indication diagram of moving coordinates

表 8 搬运活动相对重要性等级

Table 8 Relative importance level of handling activities

相对重要性等级	物料	搬运路线
A	X 容器	供运站—原料库
E	Y 容器	供运站—尾料库 尾料库—取料厂房
I	X 容器	原料库—原料厂房
	B 容器	产品库—均质厂房
O	C 容器	取料厂房—均质厂房
	B 容器	供运站—产品库
U	L 容器	供运站—副产物库 取料厂房—副产物库

2.4 初步搬运方案

铀浓缩工厂专用物料搬运系统总体方案设计的主要目标是使搬运作业人员、移动设备与容器、移动路径与设施布置形成最佳组合，建立包括人员、程序和设施布置在内的有效工作体系。

2.4.1 搬运路线系统型式

搬运系统常见的路线型式有直接型路线系统和间接型路线系统，间接型又可分为渠道型、中心型、环型等[12]。

对于铀浓缩工厂专用物料，各种主物料从起点移动至终点，时间要求各不相同，物料又具有特殊性；因此采用直接型路线系统最为经济。

2.4.2 搬运方法

搬运量大的路线为供运站—原料库，应重点控制。X、Y、B、C 容器体积大、质量大，必须使用载重设备运输；L 容器体积小，质量不大，使用轻型设备较为合适。厂内距离较近的作业站，可以选用短途搬运设备；距离较远的作业站，选用汽车运输较为合适。搬运 X、Y、B、C 容器的时间性和安全性要求较高，搬运设备必须留有足够的冗余量；L 容器的搬运要求相对低一些。

最终的搬运方案还应考虑经济性[13]，可以用差额投资回收期法[14]衡量，必要时还应考虑资金的时间价值[15]。

3 结论和不足

3.1 结论

铀浓缩工厂专用物料搬运路线应为直线型，重点物流有超高物流量和特大物流量。超高物流量为供运站—原料库搬运 X 容器，特大物流量为供运站—尾料库和尾料库—取料厂房搬运 Y 容器。搬运系统设计的重点应放在改进 X 容器和 Y 容器的搬运上，可有效保证主物料搬运。

3.2 不足

实际工程中，由于地形的限制，各点的距离可能相差很大。笔者假定各路径距离相等，对重点物流的结论会有影响。

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，2016：1-3.

[2] 钱学森. 论系统工程[M]. 上海：上海交通大学出版社，2006：4-5.

[3] 王家善，吴清一，周佳平. 设施规划与设计[M]. 北京：机械工业出版社，2001：14-139.

[4] 汪晋兴，孙丹，田巨云. 级联平衡时间探究[J]. 铀矿冶，2022，41(1)：53-56.

[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] 张玉春. 铀浓缩厂专用抽空系统的构建[J]. 科技创新导报，2018，15(1)：117-119.

[7] 张蒙，王尚功，吕波，等. 自控温电热带在铀浓缩工厂的应用研究[C]// 中国核学会. 中国核科学技术进展报告(第六卷)——中国核学会 2019 年学术年会论文集：第 4 册. 北京：中国原子能出版社，2019：236-240.

[8] 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.

[9] 唐任寰，刘元芳. 无机化学丛书：第十卷[M]. 北京：科学出版社，1998：144-155.

[10] 钟兴厚，萧文锦，袁启华. 无机化学丛书：第六卷[M]. 北京：科学出版社，1995：30-39.

[11] 戢守峰. 现代设施规划与物流分析[M]. 2 版. 北京：机械工业出版社，2019：82-86.

[12] 罗振璧，朱耀祥. 现代制造系统[M]. 北京：机械工业出版社，2000：131-134.

[13] 孙丹，郝婵婵，田巨云，等. 铀浓缩工厂智能化建设研究[J]. 铀矿冶，2021，40(1)：59-64.

[14] 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，2018：10-11.

[15] 陈锡璞. 工程经济[M]. 北京：机械工业出版社，2000：31-33.

Analysis of the Main Material Handling System of Uranium Enrichment Factory

SUN Dan, HAO Chanchan, GUAN Chengming, TANG Jian
(CNNC Shaanxi Uranium Enrichment Co., Ltd., Hanzhong 723312, China)

Abstract: The special material handling system of the uranium enrichment factory was systematicly analyzed, the characteristics of special materials were analyzed in detail, the handling lines and logistics conditions were defined, the influencing factors and practical handling methods were distinguished, and a viable overall scheme of the special material handling was obtained. The economic and intangible factors of the handling scheme were analyzed and evaluated. The SHA provides theoretical supports for improving the special material handling, and provides a logical handling scheme for the rebuilding and expanding plan. It improves the handling efficiency and reduces the labor intensity. It also provides a certain reference for reducing the production cost.

Key words: material flow; SHA; handling scheme

(Continued from page 38)

Study on Recovery Uranium From Uranium-beryllium Flotation Tailings

YE Kaikai[1], SU Xuebin[2], LIANG Gengyu[1], ZHANG Jiayu[1], MA Jia[1], SHU Zujun[1], KANG Shaohui[1], ZHOU Zhiquan[1], REN Yan[1]
(1. Beijing Research Institute of Chemical Engineering and Metallurgy, CNNC, Beijing 101149, China;
2. China National Uranium Co., Ltd., CNNC, Beijing 100013, China)

Abstract: In order to recover uranium from uranium-beryllium flotation tailings and reduce the content of beryllium in uranium products, the occurrence state of uranium and beryllium in uranium-beryllium flotation tailings was analyzed by process mineralogy, and uranium was leached by sulfuric acid leaching process. The effects of acid concentration, leaching time, leaching temperature and liquid-solid ratio on the leaching rate of uranium and beryllium were investigated, and the feasibility of recovering uranium from leaching solution was studied by anion exchange resin. The results show that the uranium in the uranium-beryllium flotation tailings is more easily leached by sulfuric acid, but the beryllium is not easily leached, the uranium can be recovered and the uranium-beryllium can be separated by ion exchange method.

Key words: flotation tailings; beryllium; uranium; leaching; ion exchange