

地浸采铀矿山天然铀产品质量提升 试验研究与工业实践

张运丰¹, 李洪梅¹, 阳奕汉², 肖作学², 肖碧泉², 夏新成²

(1. 中核内蒙古矿业有限公司, 内蒙古 呼和浩特 010000;
2. 中核新疆矿业有限公司, 新疆 伊宁 835000)

摘要: 在围绕提高天然铀产品铀质量分数、降低 SO_4^{2-} 杂质含量及控制水分等方面开展试验研究的基础上, 分析了影响产品质量的主要因素, 并提出了通过提高淋洗合格液铀质量浓度、提升合格液沉淀温度、洗涤沉淀料浆、优化产品压缩气体压滤压力及风量等措施, 提升天然铀产品质量。工业应用表明, 采取综合措施后, 矿山天然铀产品中铀质量分数由60%提升至65%, 最高可达67.51%; 水分由25%~29%降低为23%~24%; SO_4^{2-} 质量分数低于10%, 满足了客户提出的天然铀产品收购要求。

关键词: 地浸采铀; 天然铀产品; 质量提升; 质量控制; 铀质量分数; 水分; SO_4^{2-} 含量; 淋洗合格液

中图分类号: TL212.1; TD868 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-8063(2026)03-0088-08

DOI: 10.13426/j.cnki.yky.2025.12.10

目前, 核能已成为全球能源转型的关键力量, 天然铀作为“核电粮仓”, 其战略价值日益凸显^[1]。铀矿冶作为核能产业链的源头和基础, 其目标是从铀矿石中提取并制备天然铀产品——重铀酸盐。高质量的天然铀产品是后续铀纯化、转化、浓缩及核燃料元件制作等环节的基础。随着铀纯化转化工艺技术的持续优化, 其对天然铀产品质量的要求也越来越高。龙洪福等采用两步沉淀+返回沉淀老浆工艺, 提升了天然铀产品质量, 将天然铀产品水分控制在26%左右, SO_4^{2-} 质量分数控制在15%左右^[2]。向秋林等开展了浆体循环与陈化黄饼沉淀工艺研究, 提出合格液沉淀(先加片碱、后加合格液)+浆体循环工艺, 该工艺通过延长晶体陈化时间提升产品质量, 但易导致沉淀料浆局部pH偏高, 细微晶体颗粒增多, 其天然铀产品水分含量约为40%^[3]。薛玉东等开展了通过强化洗涤提升铀产品质量的研究, 在沉淀浆料过滤前增加洗涤作业, 降低产品中的杂质含量, 提升产品质量^{[4]217}。

新疆某酸法地浸采铀矿山, 以硫酸为浸出剂, 采用饱和再吸附密实移动床工艺处理浸

出液, 其生产的天然铀产品各项指标均达到了《重铀酸盐技术条件》(EJ/T 803—1993)一级品标准要求, 但产品中 SO_4^{2-} 质量分数约为15%~18%。某铀业公司在生产中发现, 该产品过高的 SO_4^{2-} 含量会导致萃取水铀质量浓度超标及物料过滤困难。为此, 该铀业公司要求天然铀产品的 SO_4^{2-} 质量分数低于10%。为满足该公司生产系统需求, 笔者从提高淋洗合格液的铀质量浓度、升高沉淀温度、洗涤沉淀料浆等方面开展了提升产品质量的相关试验研究。

1 天然铀产品质量影响因素分析

该矿山采用酸法地浸采铀工艺, 饱和树脂铀容量为20 g/L(以湿树脂计, 下同)。为进一步提高树脂铀容量, 采用饱和再吸附工艺, 用低铀质量浓度淋洗液进一步处理饱和树脂, 可将树脂铀容量提升为45~50 g/L。以硝酸铵+硫酸为淋洗剂, 采用氢氧化钠沉淀淋洗合格液, 利用板框压滤机+压缩气体去除沉淀料浆中的水分, 最终获得天然铀产品。水冶生产工艺流程见图1。

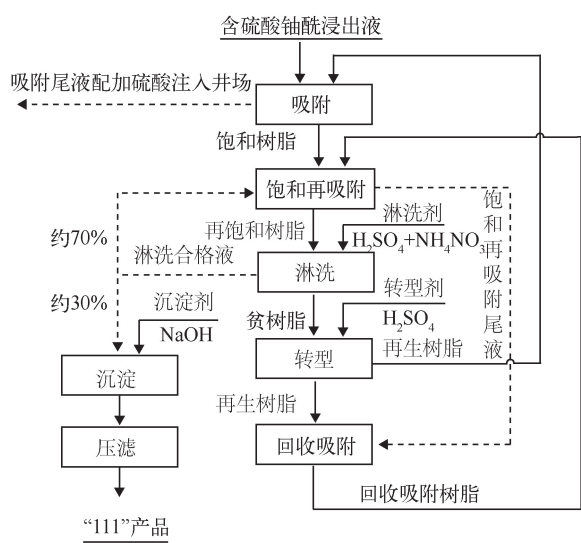


图1 水冶生产工艺流程

Fig. 1 Hydrometallurgical production process flowchart

1.1 产品硫酸根

淋洗合格液中铀的主要存在形式为 UO_2SO_4 、 $\text{UO}_2(\text{SO}_4)_2^{2-}$ 、 $\text{UO}_2(\text{SO}_4)_3^{4-}$ ，其中 $\text{UO}_2(\text{SO}_4)_3^{4-}$ 含量最高^[5]。在采用碱中和沉淀法处理淋洗合格液过程中，当体系 pH 升至 3 时，铀酰离子开始沉淀；当 pH 为 4~6 时，易生成碱式硫酸铀酰沉淀 $[(\text{UO}_2)\text{SO}_4(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}]$ ，该沉淀物与加碱中和生成的 $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ，是导致产品 SO_4^{2-} 含量超标的主要原因。为控制 SO_4^{2-} 含量，可采取以下措施：1) 控制沉淀 pH，使其快速跨过 4~6 区间，以减少碱式硫酸盐的生成；2) 洗涤沉淀料浆，以减少产品中的 SO_4^{2-} 含量；3) 对淋洗合格液进行预处理，降低 SO_4^{2-} 含量。

1.2 产品铀含量

淋洗合格液中除含有硫酸铀酰离子外，还存在一定浓度的 Al^{3+} 、 Fe^{3+} 、 SO_4^{2-} 和泥沙等杂质。在加碱中和沉淀过程中，氢氧化钠与 Al^{3+} 、 Fe^{3+} 生成的 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 和 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 沉淀物会夹带水分，并与泥沙等杂质一同进入产品，使产品杂质含量升高，铀含量降低。合格液铀质量浓度越高，沉淀试剂消耗越少，铀的沉淀效率越高，产品质量也越好^[6]。在水冶运行参数、工艺操作既定条件下，若淋洗合格液中其他组分不变，而铀质量浓度下降，将导致其他杂质含量相对升高，进而造成铀产品质量随之下降。

1.3 产品水分

在环境温度一定时，天然铀产品水分主要受沉淀料浆晶体颗粒物大小、沉淀料浆板框压滤时

间、压滤压力、压缩气体压力及气量和截留介质等共同影响。

2 试验研究与工业实践

2.1 淋洗合格液铀质量浓度对产品质量的影响

提高淋洗合格液铀质量浓度，不仅会直接增加参与沉淀反应的铀酰离子活度，提高离子活度积，使体系的过饱和度增加^[7]，促进沉淀反应的发生，提高理论收率^[8]；还可加速重铀酸钠晶体成核与生长，提高沉淀反应速率^[9]。

该地浸采铀矿山水冶系统采用三塔串联逆流淋洗模式。淋洗剂从淋洗首塔中心管底部进入，与塔内饱和树脂逆向接触，并通过串联管道依次进入二塔、末塔。淋洗液自末塔塔顶过滤网箱进入溶液储槽，其中一部分(淋洗合格液)用于沉淀，另一部分则用于饱和再吸附。在一个淋洗周期内，淋洗液铀质量浓度随时间的变化见图 2。

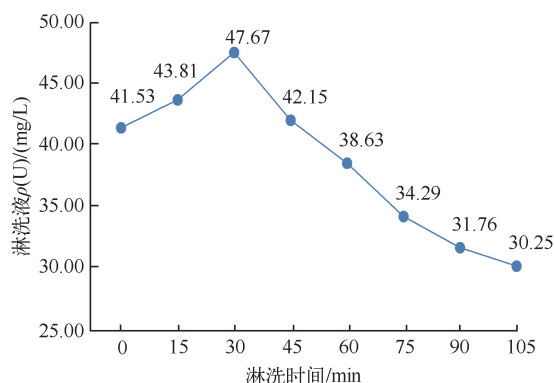


图2 淋洗液铀质量浓度变化

Fig. 2 Variation of uranium mass concentration in pregnant eluate

从图 2 可看出，在一个淋洗周期内，淋洗液铀质量浓度呈现先升高后降低趋势。分段截取淋洗液，将前 45 min 的淋洗出液用于沉淀，后续低铀浓度淋洗液用于饱和再吸附，进而有效提升沉淀部分淋洗合格液的铀质量浓度。实施该项措施前后生产现场用于沉淀的合格液铀质量浓度及产品质量变化情况见表 1。可以看出，实施淋洗液分段截取操作后，沉淀部分的合格液平均铀质量浓度由 31.36 g/L 提升至 38.44 g/L，产品平均铀质量分数由 60.37% 提升至 62.10%，平均水分由 25.07% 降至 24.67%， SO_4^{2-} 平均质量分数由 17.12% 降至 15.02%。现

场试验还发现,合格液沉淀用工业片碱单耗由 1.66 t/tU降至 1.02 t/tU。

表 1 淋洗液分段截取实施前后沉淀部分合格液铀质量浓度及产品质量变化
Table 1 Changes in uranium mass concentration in pregnant eluate of precipitated part and product quality before and after segmented interception of eluent

序号	淋洗液分段截取实施前					淋洗液分段截取实施后				
	合格液 $\rho(\text{U})/(\text{g/L})$	天然铀产品				合格液 $\rho(\text{U})/(\text{g/L})$	天然铀产品			
		桶号	水分/%	$w(\text{U})/\%$	$w(\text{SO}_4^{2-})/\%$		桶号	水分/%	$w(\text{U})/\%$	$w(\text{SO}_4^{2-})/\%$
1	32.95	15/16	24.29	60.94	16.33	41.45	69/70	24.79	60.75	15.36
2	34.23	17/18	24.34	60.64	17.43	40.00	71/72	24.22	62.53	15.27
3	33.83	19/20	23.48	60.64	15.43	39.01	73/74	25.19	62.49	14.83
4	31.61	21/22	25.00	60.14	17.23	36.19	75/76	24.86	62.50	14.06
5	28.70	23/24	25.53	60.32	17.47	36.19	77/78	25.00	60.90	14.89
6	32.76	25/26	26.72	60.18	17.91	36.77	79/80	24.44	61.68	15.04
7	33.23	27/28	25.53	59.84	17.52	38.34	81/82	24.28	62.12	15.32
8	23.58	29/30	25.70	60.22	17.66	39.60	83/84	24.56	63.84	15.36
平均	31.36		25.07	60.37	17.12	38.44		24.67	62.10	15.02

2.2 温度对合格液铀酰离子沉淀的影响

温度对硫酸铀酰加碱沉淀过程的影响比较复杂。从热力学角度看,该过程为多相放热过程,升温会推动化学平衡向沉淀溶解方向移动^[10]。在动力学层面,升温能显著加快反应速率,缩短达到平衡所需的时间,有利于提升设备处理能力^[11]。在实际沉淀效果方面,温度偏低时生成的重铀酸钠沉淀物多为胶体状无定形细颗粒,含水率高、沉降慢、过滤性能差,产品水分偏高;适度升温则有利于形成晶体结构更完整、颗粒更粗大致密的沉淀物,改善沉降与过滤性能,提升产品质量^[12]。

分别取淋洗合格液 500 mL(U 质量浓度 45.16 g/L、 SO_4^{2-} 质量浓度 78.23 g/L)注入烧杯内,通过水浴箱调节沉淀体系温度分别为 10、15、

20、25、30、35、40 ℃。在每个沉淀温度条件下,边搅拌边加入片碱,调节 pH 为 7.0~7.5,搅拌 5 min 后停止搅拌,待母液澄清后抽去上清液;然后补加 100 mL淋洗合格液,搅拌 5 min 后再加入片碱调节 pH 为 7.0~7.5,进行第二次沉淀。重复上述操作,依次进行后续沉淀,共沉淀 20 次后,静置,每隔 5 min测量料浆沉降高度,直至料浆不再沉降。待母液澄清后,抽空母液,分析母液铀质量浓度,取烧杯中下层沉淀料浆 100 mL 进行抽滤处理,并分析抽滤后产品的铀和 SO_4^{2-} 质量分数。试验结果见表 2。可以看出,料浆的沉降速度与温度呈正相关关系。在一定温度范围内,料浆沉降速度随体系温度升高而加快,母液铀质量浓度随温度升高呈下降趋势,产品质量随温度升高有所提升。

表 2 温度对合格液沉淀的影响
Table 2 Effect of temperature on qualified solution precipitation

温度/℃	沉淀 pH	料浆沉降速率/(cm/min)	沉淀母液 $\rho(\text{U})/(\text{mg/L})$	抽滤产品	
				$w(\text{U})/\%$	$w(\text{SO}_4^{2-})/\%$
10	7.0	0.11	6.3	60.12	16.23
15	7.3	0.15	4.1	61.31	15.62
20	7.5	0.23	3.0	63.40	15.43
25	7.5	0.40	2.9	64.35	14.35
30	7.0	0.43	2.9	64.51	13.28
35	7.0	0.42	2.6	64.37	13.26
40	7.5	0.43	2.5	64.58	13.25

注:抽滤过程中利用蒸馏水对料浆进行冲洗,每份料浆均利用三倍体积的蒸馏水洗涤 1 次。

2.3 加热保温措施现场应用

冬季水冶厂房温度偏低,料浆沉降缓慢,沉淀母液夹带的料浆颗粒无法从沉淀槽内去除,合格液沉淀时间长,严重制约生产正常运行。为此,在沉淀槽外表面安装水暖管,并在槽体表面铺装

5 cm厚橡塑保温棉,为槽内料浆加热保温,以提高料浆温度,确保槽内料浆温度始终维持在 18 ℃左右,沉淀槽加装加热保温装置前后日淋洗合格液沉淀体积及产品质量对比见表 3、图 3。

表 3 沉淀槽加装加热保温装置前后日淋洗合格液沉淀体积及产品质量对比

Table 3 Comparison of daily precipitation volume of pregnant eluate and product quality before and after installing heating and heat devices in precipitation tank

序号	改造前					改造后				
	槽内料浆温度/℃	日淋洗合格液沉淀体积/m ³	天然铀产品			槽内料浆温度/℃	日淋洗合格液沉淀体积/m ³	天然铀产品		
			w(U)/%	水分/%	w(SO ₄ ²⁻)/%			w(U)/%	水分/%	w(SO ₄ ²⁻)/%
1	13	4.3				18	5.5	60.27	23.79	15.95
2	13	4.2				17	6.3			
3	14	4.5				18	6.5			
4	13	3.6	60.12	23.15	15.23	17	6.5	61.23	23.21	15.98
5	13	3.6				16	6.3			
6	13	3.6				18	6.7			
7	12	3.6	60.11	23.28	16.17	18	6.2	62.18	23.56	15.43
8	13	3.6				18	6.7			
9	11	3.6				18	6.8			
10	13	3.6	60.14	23.59	15.89	17	6.7	62.19	23.66	15.32
11	13	3.6				17	6.8			
12	11	3.6				18	6.8			
平均	13	3.8	60.12	23.34	15.76	18	6.5	61.47	23.56	15.67

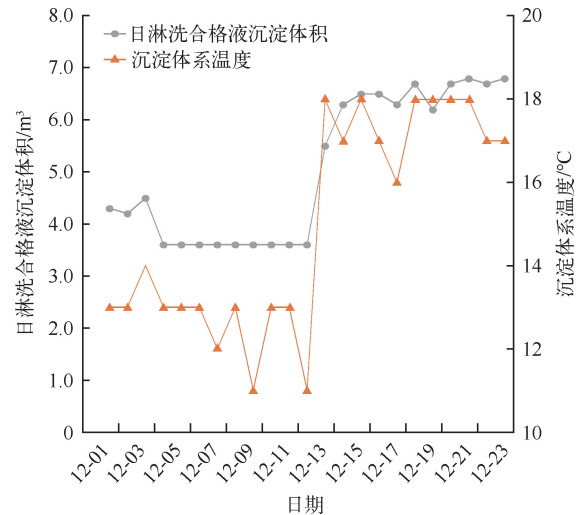


图 3 沉淀体系安装加热保温装置前后日淋洗合格液沉淀体积变化

Fig. 3 Daily precipitation volume of pregnant eluate before and after installing heating and heat devices in precipitation system

从表 3、图 3 可见,沉淀体系安装加热保温装置后,沉淀槽内料浆温度基本维持在 18 ℃左右,较改造前升高了 5 ℃;平均日淋洗合格液沉淀体积达 6.5 m³/d,较改造前增加了 2.7 m³/d,有效缓解了合格液沉淀压力,满足了生产需求。产品平均铀质量分数达 61.47%,较改造前提升 1.35%;平均水分、SO₄²⁻质量分数与改造前相当。需要说明的是,实际生产过程中,由于沉淀体系温度维持在 18 ℃左右,与小型试验的 25、30、35 ℃存在一定差距,且沉淀料浆未经过洗涤,因此产品质量提升幅度不及小型试验结果。

2.4 洗涤沉淀料浆降低产品硫酸根含量

2.4.1 沉淀料浆洗涤试验

合格液中除含有一定浓度的铀酰离子外,还含有 NO₃⁻、Fe³⁺、Al³⁺、SO₄²⁻、有机杂质离子及泥砂等,这些杂质会通过共沉淀、吸附、夹带或形成

复盐的方式进入沉淀物,降低产品质量。通过洗涤沉淀料浆去除杂质是提高产品质量的重要手段。利用杂质离子与重铀酸钠固体在溶解度、吸附力上的差异,通过液-固分离和置换,可将可溶性杂质从固相转移至液相(洗水)除去^[13]。洗涤过程主要去除沉淀颗粒表面吸附和母液夹带的可溶性杂质及以微细沉淀形式混杂的杂质或复盐^[14]。

分别取淋洗合格液 250 mL(U 质量浓度 35.63 g/L、SO₄²⁻质量浓度 75.92 g/L)注入 4 个烧杯内,启动搅拌装置,加入固态氢氧化钠,调节 pH 为 7.0~7.5,搅拌 20 min 后静置,待母液澄

清后,抽空上清液;再注入上述合格液 250 mL,进行第二次沉淀;如此连续沉淀 20 次后,待母液澄清后抽空上清液,取烧杯内 50 mL 浆体烘干,分析其铀和 SO₄²⁻质量分数;再依次加注 100、200、300、400 mL 清水,控制清水与沉淀料浆体积比分别为 1:4、1:2、3:4、1:1,启动搅拌装置进行料浆洗涤,搅拌 20 min 后静置;待浆体澄清后抽空上清液,再分别加入上述清水,控制清水与沉淀料浆体积比(同上)进行连续洗涤,自第 6 次至第 10 次洗涤,每次洗后静置抽空上清液,并取烧杯内 50 mL 浆体烘干分析其铀和 SO₄²⁻质量分数,连续洗涤 10 次后停止试验,结果见表 4。

表 4 沉淀料浆经不同体积清水洗涤前后产品铀和 SO₄²⁻质量分数
Table 4 Product grade and mass fraction of SO₄²⁻ before and after washing precipitated slurry with different volumes of clean water

洗涤 次数	清水与料浆体积比 1:4		清水与料浆体积比 1:2		清水与料浆体积比 3:4		清水与料浆体积比 1:1	
	w(U)/%	w(SO ₄ ²⁻)/%	w(U)/%	w(SO ₄ ²⁻)/%	w(U)/%	w(SO ₄ ²⁻)/%	w(U)/%	w(SO ₄ ²⁻)/%
0	53.04	20.83	53.04	20.83	53.04	20.83	53.04	20.83
6	56.72	18.20	59.33	15.21	59.26	13.78	61.22	13.12
7	58.23	17.65	61.23	13.58	62.33	13.56	62.35	13.01
8	61.15	15.66	64.25	12.59	64.27	12.78	64.23	12.77
9	61.18	15.58	64.26	12.55	64.33	12.76	64.25	12.55
10	61.20	15.60	64.28	12.56	64.29	12.55	64.26	12.53

从表 4 可看出:沉淀料浆经清水洗涤后产品铀质量分数升高、SO₄²⁻质量分数呈下降趋势;沉淀料浆利用清水连续洗涤 8 次后,产品铀质量分数、SO₄²⁻质量分数趋于稳定;清水与沉淀料浆体积比为 1:2 较为适宜,清水用水量继续增加对产品质量提升无明显影响。清水与沉淀料浆体积比为 1:2 时,料浆连续洗涤 10 次,产品铀质量分数由洗前 53.04% 升至 64.28%,SO₄²⁻质量分数由 20.83% 降至 12.56%。

2.4.2 沉淀料浆洗涤作业生产应用

在水冶生产中增加沉淀料浆洗涤作业。具体过程:A 沉淀槽的沉淀料浆经板框压滤后,在 A 沉淀槽连续沉淀,合格液沉淀体积 4~5 m³/次,2 次/d,连续沉淀 3 d;在清水与料浆体积比为 1:2 条件下,洗涤沉淀槽内料浆,边搅拌边洗涤,搅拌时长 40 min,静置 24 h,抽空上清液,加注清水洗涤,1 次/d,连续洗涤 3 d;然后将料浆输送至板框压滤机进行压滤,得到“111 产品”,接着换 B 沉淀槽交替作业。

统计分析洗涤期间的数据,试验期间累计沉淀合格液 66 次,工业清水耗量 113.9 m³,压滤所得“111”产品水分、铀质量分数、SO₄²⁻等关键质量指标见表 5。可以看出,料浆连续洗涤 3 次、10 次后,压滤所得产品 SO₄²⁻质量分数均在 10% 左右;随洗涤次数增加,产品铀质量分数整体呈上升趋势,SO₄²⁻质量分数整体呈下降趋势,其中铀质量分数最高为 67.51%、SO₄²⁻质量分数最低为 4.33%;在压滤时间不变的情况下,产品水分基本维持在 24% 左右。整体可知,洗涤沉淀料浆可提升产品质量。

2.5 板框压滤供气系统优化

板框压滤机压滤沉淀料浆后,滤饼充满滤框,滤饼颗粒间孔隙形成的复杂毛细管网对水分产生毛细吸附作用,仅靠过滤压力难以有效降低滤饼含水率。通过引入高压气体,可进一步降低滤饼含水率^[15]。从滤板一侧通入的高压气体可在滤饼两侧形成压力差,当气体压力足以克服最大毛细管阻力时,气体开始穿透滤饼,并有效去除滤饼

中的“滞留液”,从而降低滤饼含水率^[16-17]。在一定压力范围内,压缩气体的去除水分效果与气体压力及风量呈正比^[18]。

表 5 沉淀槽料浆洗涤与压滤产品铀和硫酸根质量分数变化
Table 5 Product grade and SO₄²⁻ content for slurry washing and filter pressing in tank

洗涤次数	耗水量/m ³	产品		
		水分/%	w(U)/%	w(SO ₄ ²⁻)/%
第 3 次	1.5	24.42	64.60	10.26
第 5 次	1.8	24.81	63.24	10.38
第 10 次	4.1	24.92	65.64	10.04
第 15 次	3.2	24.86	64.68	10.16
第 20 次	3.9	23.82	65.32	9.45
第 23 次	5.1	24.06	67.51	6.63
第 25 次	3.2	24.46	64.21	11.27
第 29 次	2.7	25.18	65.46	8.48
第 33 次	3.9	22.94	67.29	4.33
平均	3.3	24.39	65.33	9.00

该地浸采铀矿山生产中,采用板框压滤机压滤合格液沉淀料浆去除其水分。当单个沉淀槽合格液累积沉淀金属质量超 1 500 kg 时,暂停该槽沉淀作业;启动搅拌装置搅匀槽内料浆,通过料浆泵输送料浆至板框压滤机,直至滤饼充满滤框,停止进料,引入压缩气体压滤“吹风”48 h 后卸料。空压机提供的压缩空气经减压阀调节后输入板框压滤机,操作压力约 0.4 MPa。板框压滤所得产品水分为 26%~28%,且产品表面可见明水。经研究分析,主要原因是压缩气体压力偏低、风量较小,导致滤框内滤饼压滤不充分,产品水分偏高^[19]。

实施气源管路改造:气源直接输入板框压滤机,压缩气体压力升至 0.7~0.8 MPa;同时,将气源管路由 DN20 扩至 DN25,增加气体流量。在后续作业过程中,操作流程调整为:自滤饼充满滤框、滤板出水口停止出液起,持续保压 30 min,然后关闭板框压滤机气源并开启排气阀泄压;泄压完成后,关闭排气阀,开启气源,利用高压气体对滤框内滤饼进行二次压滤,至滤板出水口再次停止出液;如此重复操作 3 次,最后一次压滤结束后,关闭排气阀,开启气源供气保压 48 h 后卸料。改造气源管路并优化作业流程后,板框压滤卸料产品水分明显降低(表 6)。可以看出,板框压滤机提高气源压力、优化作业方式后,在压滤时间相同、使用滤布相同的情况下,压滤卸料产品水分明

显降低,最低为 23.35%。

表 6 板框压滤供气系统优化前后产品水分变化

Table 6 Product moisture changes before and after transformation and optimization of air supply pipeline operation method

项目	桶数	压滤时间/h	产品水分/%		
			最高	最低	平均
改造前	25	48	29.81	26.36	29.71
	23	48	28.63	27.58	28.53
	26	48	28.45	27.92	28.13
	24	48	27.87	24.05	25.94
改造后	16	48	24.99	24.62	24.34
	16	48	24.95	24.11	24.63
	20	48	24.23	23.35	23.68

2.6 石灰乳预处理沉淀合格液

使用石灰乳预处理沉淀合格液,其核心目的是在硫酸铀酰沉淀前,预先除去溶液中过量的 SO₄²⁻,防止其与产品共沉淀或形成复盐,提高产品纯度^[20]。利用石灰乳调节合格液 pH 过程中,生成 Fe³⁺、Al³⁺ 等杂质的氢氧化物絮状沉淀会吸附溶液中 SO₄²⁻ 及其他阴离子杂质,并通过共沉淀作用提高其去除效果^[21]。

取现场淋洗合格液 14.76 L,加入石灰乳悬浊液(质量分数 13%),持续强化搅拌,最大限度去除 Fe³⁺ 和 SO₄²⁻ 杂质离子并减少铀金属损失,控制合格液预处理体系 pH 为 3.0(铀酰离子开始水解沉淀的 pH 约 3.0^{[4] 218}),合格液中 Fe³⁺ 和 SO₄²⁻ 生成 Fe(OH)₃、CaSO₄ 等沉淀物;持续搅拌 40 min 后停止搅拌,静置待溶液澄清后抽空上清液,记录清液体积,分析石灰乳预处理前后溶液中的 U、SO₄²⁻、Ca²⁺ 浓度变化,结果见表 7。

于 1[#]、2[#] 烧杯内分别加入 500 mL 经石灰乳预处理后的合格液,3[#] 烧杯加入 500 mL 未用石灰乳处理的合格液,启动搅拌装置,加入固态氢氧化钠调节各体系 pH 为 7.0~7.5,搅拌 20 min 后静置,待母液澄清后抽空母液并分析母液 U 质量浓度;随后继续加入 500 mL 上述合格液进行第 2 次沉淀,如此连续沉淀 10 次后,待母液澄清后抽空母液分析母液 U、Ca²⁺ 质量浓度;取烧杯内 200 mL 浆体用真空泵抽滤,将滤饼置入烘箱恒温 107 ℃烘干 48 h,分析样品 U 与 SO₄²⁻ 质量分数(表 7)。

表 7 淋洗合格液加入石灰乳预处理前后沉淀结果
Table 7 Sedimentation results before and after adding lime milk to pre-treat pregnant eluate

烧杯 编号	沉淀料液				沉淀母液		天然铀产品	
	$\rho(\text{U})/$ (g/L)	$\rho(\text{Ca}^{2+})/$ (mg/L)	$\rho(\text{SO}_4^{2-})/$ (g/L)	$\rho(\text{Fe}^{3+})/$ (mg/L)	$\rho(\text{U})/$ (mg/L)	$\rho(\text{Ca}^{2+})/$ (mg/L)	$w(\text{U})/\%$	$w(\text{SO}_4^{2-})/\%$
1 [#]	37.11	410.8	48.56	90.8	4.3	671.6	61.23	10.39
2 [#]	37.11	410.8	48.56	90.8	4.4	707.0	61.33	10.21
3 [#]	40.69	182.0	83.17	352.2	4.7	364.1	61.31	15.39

合格液经石灰乳预处理后,其 SO_4^{2-} 质量浓度由 83.17 g/L 降至 48.56 g/L,降低了 34.61 g/L; U 质量浓度由 40.69 g/L 降至 37.11 g/L; Ca^{2+} 质量浓度由 182.0 mg/L 升至 410.8 mg/L; Fe^{3+} 质量浓度由 352.2 mg/L 降至 90.8 mg/L; 产品铀质量分数维持在 61.30% 左右、 SO_4^{2-} 质量分数由 15.39% 降至 10.21%。石灰乳预处理合格液体系中生成的粘稠状沉淀物呈浅黄色,初步分析其为重铀酸盐沉淀。合格液经石灰乳预处理,金属损失率约为 8%,且石灰乳处理合格液生成的浅黄色沉淀物,较为粘稠难以处理,因此暂未在生产中应用石灰乳预处理沉淀合格液工艺。

2.7 工艺综合优化后天然铀产品质量

通过实施高铀浓度淋洗合格液沉淀、沉淀料浆洗涤、沉淀体系加热保温等措施后,该地浸采铀矿山生产的天然铀产品质量显著提升(表 8)。天然铀产品 SO_4^{2-} 质量分数均控制在 10% 以内,最低为 4.33%; 产品铀质量分数均在 65% 以上,最高达 67.51%; 产品水分均控制在 23%~24%,满足客户要求。

表 8 工艺综合优化后的天然铀产品质量
Table 8 Quality of natural uranium products after comprehensive process optimization

产品编号	天然铀产品		
	$w(\text{U})/\%$	水分/%	$w(\text{SO}_4^{2-})/\%$
029	66.34	24.00	8.37
031	66.22	23.30	7.49
034	66.44	23.93	7.17
036	67.51	23.23	6.94
038	65.75	22.72	5.33
040	66.51	24.00	4.36
042	66.20	23.63	4.60
平均	66.38	23.58	5.37

3 结论

1) 淋洗合格液铀质量浓度与产品铀质量分数

成正相关关系。在生产过程中,根据淋洗液铀质量浓度变化趋势,自动截取高铀浓度合格液用于沉淀,可有效改善产品质量,并降低片碱消耗。

2) 提高淋洗合格液沉淀体系的环境温度可有效提升沉淀料浆的沉降速度,并改善产品质量。在一定温度范围内,沉淀体系环境温度越高,合格液沉淀效果越好。

3) 洗涤沉淀料浆是降低产品 SO_4^{2-} 质量分数的重要举措。沉淀料浆经清水洗涤后, SO_4^{2-} 质量分数降幅超 5%。工业生产过程中一般控制清水与沉淀料浆体积比为 1:2,料浆经连续洗涤,可有效控制 SO_4^{2-} 质量分数。

4) 提高板框压滤机滤饼的压缩空气压力和风量,可有效降低产品水分。

5) 用石灰乳预处理合格液,可有效降低合格液中 Fe^{3+} 、 Al^{3+} 、 SO_4^{2-} 质量浓度,有利于降低产品中 SO_4^{2-} 质量分数;但石灰乳预处理过程会造成铀金属损失(损失率达 8%),且生成的粘稠状黄色沉淀物难以处理。后续需继续开展相关试验研究,选取合适的预处理试剂,在降低沉淀合格液 SO_4^{2-} 质量浓度的同时减少或不产生铀金属损失。

参考文献:

[1] 王海峰.中国铀资源采冶技术发展现状与展望[J]. 铀矿冶,2026,45(1):10-11.
Wang Haifeng. Current status and prospect of uranium mining and metallurgy technology development in China [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2026,45(1):10-11.

[2] 龙红福,阳奕汉. 返晶浆沉淀工艺在黄饼生产中的应用[J]. 铀矿冶,2009,28(1):53-55.
Long Hongfu, Yang Yihan. Application of precipitation process of returning slurry in production of yellow cake [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2009,28(1):53-55.

- [3] 向秋林,钟汝平,江浪.浆体循环与陈化黄饼沉淀工艺研究[J].铀矿冶,2006,25(1):29-33.
Xiang Qiulin, Zhong Pingru, Jiang Lang. Precipitation of yellow cake through slurry circulation and aging[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2006, 25(1):29-33.
- [4] 薛玉东,刘永涛,隋杰,等.通过强化洗涤提升铀产品质量的研究[J].山东化工,2024(53):216-218.
Xue Yudong, Liu Yongtao, Sui Jie, et al. Research on enhancing the quality of uranium products through enhanced washing[J]. Shandong Chemical Industry, 2024, 53(23):216-218.
- [5] 王德义,湛竞清,赵淑良,等.铀的提取与精制工艺学[M].北京:原子能出版社,1982.
- [6] 李开文.论我国地浸采铀技术的重大突破:新疆地浸采铀矿床的成功应用[J].中国矿业,2005,14(3):1-8.
Li Kaiwen. The great breakthrough of in-situ leaching uranium exploitation technique in China: The successful utilization of in-situ leaching uranium exploitation deposit[J]. China Mining Magazine, 2005, 14(3):1-8.
- [7] 陈茜茜.基于反应性溶质运移的酸法地浸采铀数值模拟探讨[D].南昌:东华理工大学,2020:25-26.
- [8] 徐佳丽.蒙脱石负载纳米零价铁对水溶液中铀的去除研究[D].武汉:中国地质大学,2014:13-15.
- [9] 周易如.地浸采铀矿山提升铀浸采效率的关键问题研究[D].衡阳:南华大学,2024:72-73.
- [10] 刘晓琴.化学工艺学[M].北京:化学工业出版社,2021.
- [11] 刘有智.化工过程强化方法与技术[M].北京:化学工业出版社,2017.
- [12] 李静海,欧阳平凯,袁维扬,等.化学工程手册[M].北京:化学工业出版社,2019.
- [13] 陈桂娥,俞俊,顾静芳,等.化工单元操作[M].北京:化学工业出版社,2019.
- [14] 李永秀,周雪珍.化学分离与技术[M].北京:化学工业出版社,2017.
- [15] 王振中,张利锋.化工原理[M].北京:化学工业出版社,2005.
- [16] 颜鑫.无机化工生产技术与操作[M].北京:化学工业出版社,2021.
- [17] 于文国.制药单元操作技术[M].北京:化学工业出版社,2021.
- [18] 李海生.循环流化床锅炉粉煤灰摩擦电选脱炭的研究[D].北京:中国矿业大学,2012:48-50.
- [19] 夏新成,张运丰.《降低“111”产品水分》QC 课题报告[Z].伊犁:中国核工业集团公司天山铀业公司.
- [20] 李永绣,祝文才,章立志,等.稀土冶金与环境保护[M].北京:化学工业出版社,2024.
- [21] 周亚楠.磷石膏胶结充填过程中氟化物影响机制及去除研究[D].长沙:中南大学,2023:59-62.

Experimental Research and Industrial Practice on Quality Improvement of Natural Uranium Product in In-situ Leaching Uranium Mines

ZHANG Yunfeng¹, LI Hongmei¹, YANG Yihan², XIAO Zuoxue², XIAO Biquan², XIA Xincheng²

(1. CNNC Inner Mongolia Mining Co., Ltd., Hohhot 010000, China;

2. CNNC Xinjiang Mining Co., Ltd., Yining 835000, China)

Abstract: Based on experimental research focused on enhancing the grade of natural uranium products, reducing impurity content, and controlling moisture levels, the key factors affecting product quality were analyzed. Corresponding measures were proposed, including increasing the uranium concentration of the qualified precipitation solution, elevating the precipitation temperature, improving the washing efficiency of the precipitate slurry, and optimizing the pressure and airflow during gas-presurized filtration. Industrial application demonstrated that after implementing these measures, the uranium grade of the product was raised from 60% to 65%, with a maximum of 67.51%, moisture content was reduced from 25%—29% to 23%—24%; and the sulfate (SO_4^{2-}) mass fraction was below 10%. These results fully comply with the new industry acceptance standards for natural uranium products specified by the customer.

Key words: in-situ leaching of uranium; natural uranium product; quality improvement; quality control; uranium grade; moisture content; sulfate (SO_4^{2-}) content; qualified precipitation solution