

纳米比亚罗辛铀矿放射性显明度研究

田宇晖, 刘志超, 师留印, 王桂硕, 贾秀敏, 李广

(核工业北京化工冶金研究院, 北京 101149)

摘要: 纳米比亚罗辛铀矿矿石品位低、矿山年处理量大, 采出的矿石夹杂部分废石, 磨矿和浸出成本较高。针对这一问题, 研究了矿石粒度及铀品位分布规律, 统计并计算了代表性矿样的放射性显明度, 绘制了放射性可选性曲线。根据边界品位确定理论分选指标: 当边界品位为 0.01% 时, 原矿石铀品位为 0.032%, 精矿铀品位为 0.047%, 尾矿产率为 33.95%, 尾矿铀品位为 0.0028%, 总回收率为 96.37%。结果表明, 纳米比亚罗辛铀矿采用放射性选矿效果较好, 矿石的可选性较高; 放射性选矿主要适用于粗粒级、极低品位矿石抛尾。放射性显明度可作为罗辛铀矿放射性选矿的理论依据。

关键词: 罗辛铀矿; 放射性显明度; 放射性选矿; 铀矿石; 铀品位; 矿石粒度

中图分类号: TD985; TD868; TL21 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-8063(2024)02-0024-07

DOI: 10.13426/j.cnki.yky.2023.10.06

罗辛铀矿(Rossing Uranium Mine)位于纳米比亚中西部^[1], 是世界上最大的白岗岩型铀矿床, 矿山年处理量达 1 000 万吨, 矿石平均铀品位(以 U_3O_8 计, 下同)为 0.03%~0.04%^[2-3]。目前开采的矿石经破磨后全部进入水冶工序, 由于矿石品位低、处理量大, 磨矿和浸出成本较高^[4-6]。通过放射性选矿技术将低品位废石抛弃, 可提高罗辛铀矿水冶前的矿石品位, 减少水冶处理量, 进而降低矿山生产成本^[7-11]。

铀矿石具有天然放射性^[12]。笔者根据矿石的放射性差异进行放射性分选和试验测定, 参照矿样单位质量矿石 γ 净值与品位的关系进行统计、计算, 研究罗辛铀矿放射性显明度, 了解铀在矿石中的分布规律, 进而评价罗辛铀矿的放射性可选性^[13-14]。

1 试验部分

1.1 试验仪器与原料

主要试验仪器与设备包括 HD-2000 型 γ 辐射仪、电子台秤、游标卡尺、振动筛分机、颚式破碎机。试验原料为罗辛铀矿生产现场经一段破碎后的矿石样品, 将矿石分为 ≥ 165 mm、100 mm ~

< 165 mm、60 mm ~ < 100 mm、30 mm ~ < 60 mm、 < 30 mm 等 5 个粒级, 分别称重、分析, 计算矿石粒度组成及铀品位分布率(表 1)。

表 1 矿石粒度组成及铀品位分布
Table 1 Particle size composition of ore and distribution of uranium grade

粒级/mm	粒级分布率/%	铀品位/%	铀分布率/%
≥ 165	32.41	0.023	22.87
100~ < 165	13.57	0.023	9.53
60~ < 100	9.87	0.027	8.11
30~ < 60	9.03	0.039	10.76
< 30	35.12	0.045	48.73
平均值		0.032	

从表 1 可看出, 矿石的平均铀品位为 0.032%, 适宜放射性分选的粗粒级矿石(≥ 30 mm), 产率为 64.88%; ≥ 165 mm 粒级占全粒级的 32.41%。经一段破碎后, 大块矿石较多, 部分矿石粒级达到 300 mm; 矿石粒度越小, 铀品位越高, 48.73% 的铀分布在 < 30 mm 粒级矿石内, 这部分矿石铀品位较高(0.045%)。铀在矿石中分布较不均匀, 有

收稿日期: 2023-10-24

基金项目: 中核集团集中研发项目(A100-8)。

第一作者简介: 田宇晖(1996—), 男, 河北唐山人, 硕士, 助理工程师, 主要从事放射性共生金属矿选矿研究。

利于放射性分选。

1.2 试验方法

矿石分级与清洗:将分级后的矿石表面粘结的细泥用水冲洗,收集清洗的细泥并入 <30 mm 粒级矿石中。

矿块质量及 γ 值测量:用 HD-2000 型 γ 辐射仪对矿块进行测量,保持 γ 辐射仪与矿块间的距离为 1 cm。每次测量矿石 γ 值前或环境变化前,均先测量 3 次环境本底值。测量每块矿石的质量及矿石的 γ 值,每块矿石的 γ 值测量 3 次,取平均值;将每块矿石的质量与 γ 值一一对应。

数据处理:根据测定的放射性显明度,绘制矿

石的放射性显明度曲线,得到理论分选指标。

2 试验结果与讨论

2.1 参照矿样特征

罗辛铀矿的矿石品位较低,综合铀品位仅为 0.03% 左右。因此在取参照矿样时,为了使拟合曲线在矿石低品位点更加密集,区间更加接近真实值,不含铀或含微量铀的矿石占比应大于 1/2。根据参照矿样的元素分析结果,得到不同粒级矿石单位质量 γ 净值(γ 净值 = 矿石 γ 测试值 - 本底值)与铀品位的多项拟合曲线(图 1),以及矿石粒级范围与品位函数的对应关系(表 2)。

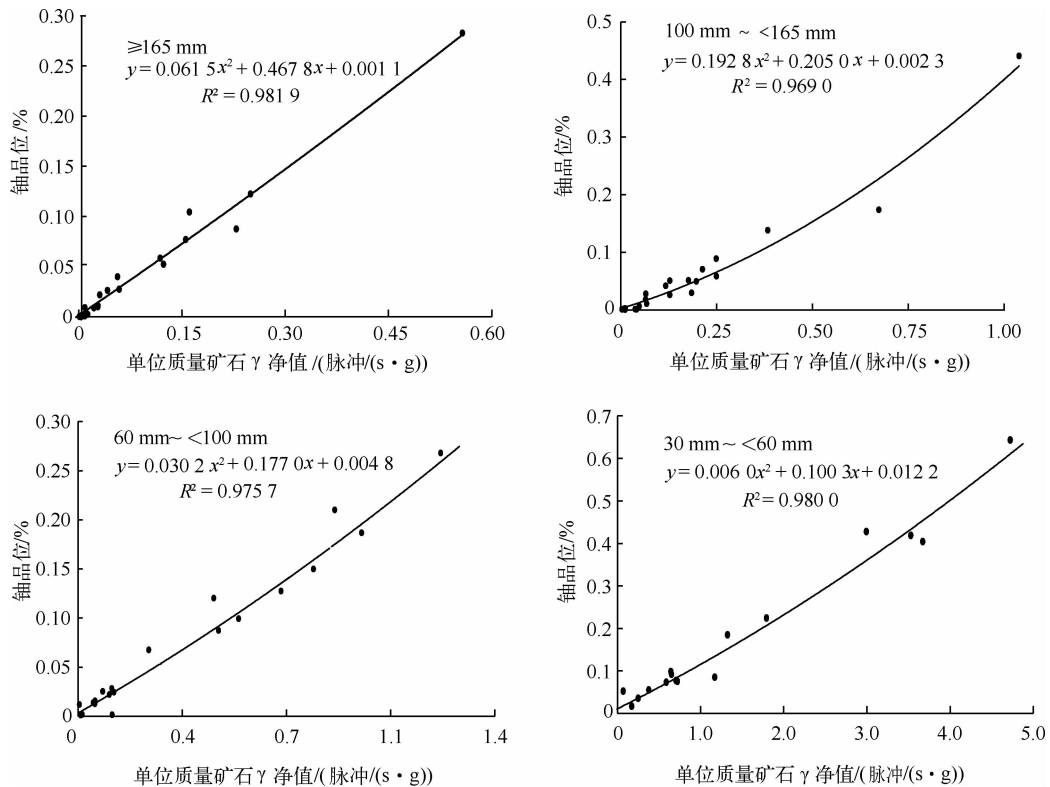


图 1 不同粒级矿石单位质量 γ 净值与品位的关系

Fig. 1 Relationship between γ value per unit mass and grade of ores of different particle grades

表 2 矿石粒级范围与品位函数的关系

Table 2 Relationship between the ore size range and the grade function

矿石粒级范围/mm	品位函数
≥ 165	$y = 0.0615x^2 + 0.4678x + 0.0011$
100 ~ <165	$y = 0.1928x^2 + 0.2050x + 0.0023$
60 ~ <100	$y = 0.0302x^2 + 0.1770x + 0.0048$
30 ~ <60	$y = 0.0060x^2 + 0.1003x + 0.0122$

由图 1、表 2 可看出,不同粒级的矿石,单位质量矿石 γ 净值与品位的关系适用不同的函数。放射性选矿主要适宜粗选,采用多段接力式 γ 测量装置来减少误差。因此可认为本次试验得到的拟合曲线是可用的,该结果是罗辛铀矿放射性显明度研究的重要依据。

在试验中发现,因部分 ≥ 165 mm 粒级的矿石

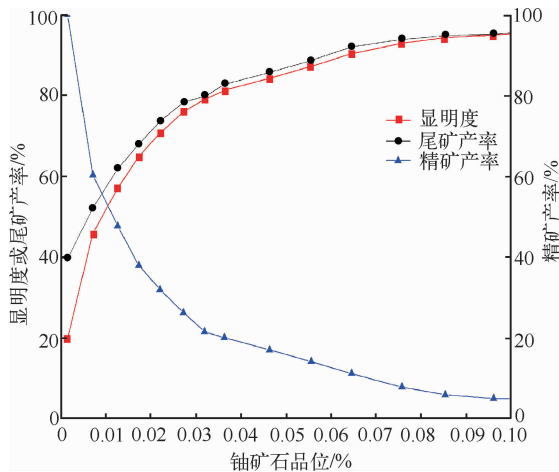


图 2 罗辛铀矿放射性可选性曲线
Fig. 2 Radioactivity selectivity curve of Rosing Uranium Mine

从表 3 可看出,罗辛铀矿的矿石中,铀品位 <0.01% 的矿石约占全粒级可入选矿石总质量的 52.27%,综合品位为 0.002 8%,这部分矿石品位极低,可作为尾矿抛弃;铀品位 >0.5% 的矿石约占全粒级可入选矿石的 0.16%,综合品位为 0.886 3%,高品位矿石较少,矿石铀品位多集中在 0.01%~0.03% 之间。罗辛铀矿中的铀分布不均匀,极低品位的废石超过一半,可选性较好;可在原矿石经一段破碎后,通过放射性选矿提高水冶前的矿石品位。

当分选边界品位设定为 0.01% 时,精矿产率为 47.73% (铀品位 0.0504%),尾矿产率为

52.27% (铀品位 0.002 8%);当分选边界品位设定为 0.005% 时,精矿产率为 60.40% (铀品位 0.041 3%);尾矿产率为 39.60% (铀品位 0.001 5%)。因本研究是在实验室静态测量环境下,对铀矿放射性可选性进行的粗略评价,边界品位设定较低;在工程应用中,需考虑细化动态测量精度与仪器设备灵敏度的适应性。

2.3 不同粒级放射性显明度研究

为探究分级分选适应性,将每个粒级的矿石分别按照品位进行分组,计算粒级分布率、品位、回收率。 ≥ 165 mm、 $100 \sim < 165$ mm、 $60 \sim < 100$ mm、 $30 \sim < 60$ mm 的放射性显明度见表 4~表 7。

在 ≥ 165 mm 矿石中,铀品位 <0.01% 的矿石约占 ≥ 165 mm 矿石总质量的 54.55%,这部分矿石综合铀品位为 0.002%,铀分布率仅占 4.81%,可作为尾矿抛弃。 $100 \sim < 165$ mm 的矿石大多不含铀或含微量铀,铀品位 <0.01% 的矿石约占该粒级矿石总质量的 61.65%,这部分矿石的综合品位为 0.003 7%,铀分布率占 10.19%,可作为尾矿抛弃。在 $60 \text{ mm} \sim < 100 \text{ mm}$ 的矿石中,铀品位 <0.01% 的矿石约占该粒级矿石总质量的 57.94%,这部分矿石的综合品位为 0.003 6%,铀分布率占 7.84%,可作为尾矿抛弃。 $30 \sim < 60 \text{ mm}$ 的矿石仅有少量不含铀或含微量铀,铀品位 <0.01% 的矿石约占该粒级矿石总质量的 24.21%,这部分矿石的综合品位为 0.004 3%,可作为尾矿抛弃。

表 4 ≥ 165 mm 矿石的放射性显明度测定结果

Table 4 Results of radioactivity visibility for ≥ 165 mm ores

铀品位分组	平均铀品位	粒级分布率	铀分布率	累计铀品位
<0.005	0.001 5	49.18	3.24	0.001 5
0.005~<0.01	0.006 7	5.37	1.57	0.002 0
0.010~<0.015	0.012 7	8.12	4.52	0.003 4
0.015~<0.020	0.017 1	3.68	2.77	0.004 2
0.020~<0.025	0.021 9	6.05	5.81	0.005 6
0.025~<0.030	0.027 3	6.32	7.56	0.007 4
0.030~<0.040	0.035 7	2.87	4.48	0.008 4
0.040~<0.050	0.046 6	2.50	5.11	0.009 5
0.050~<0.060	0.055 4	3.63	8.82	0.011 4
0.060~<0.070	0.064 9	5.09	14.48	0.014 3
0.070~<0.100	0.079 5	3.51	12.25	0.016 7
0.100	0.182 8	3.67	29.39	0.022 8
合计	0.022 8	100.00	100.00	

表 5 100~<165 mm 放射性显明度测定结果

Table 5 Results of radioactivity visibility for 100~<165 mm ores

%

铀品位分组	平均铀品位	粒度分布率	铀分布率	累计铀品位
<0.005	0.002 4	43.42	4.58	0.002 4
0.005~<0.01	0.007 0	18.23	5.61	0.003 7
0.010~<0.015	0.012 6	6.65	3.69	0.004 6
0.015~<0.020	0.018 0	6.28	4.98	0.005 7
0.020~<0.025	0.021 9	5.36	5.19	0.006 8
0.025~<0.030	0.028 2	2.04	2.53	0.007 4
0.030~<0.040	0.035 1	5.22	8.08	0.009 0
0.040~<0.050	0.046 0	1.96	3.98	0.009 8
0.050~<0.060	0.056 5	2.92	7.27	0.011 3
0.060~<0.070	0.064 8	1.64	4.68	0.012 2
0.070~<0.100	0.087 1	1.54	5.90	0.013 5
0.100	0.208 5	4.73	43.51	0.022 7
合计	0.022 7	100.00	100.00	

表 6 60~<100 mm 放射性显明度测定结果

Table 6 Results of radioactivity visibility for 60~<100 mm ores

%

铀品位分组	平均铀品位	粒度分布率	铀分布率	累计铀品位
<0.005	0.000 5	31.16	0.58	0.000 5
0.005~<0.01	0.007 2	26.78	7.26	0.003 6
0.010~<0.015	0.012 4	8.95	4.17	0.004 8
0.015~<0.020	0.017 3	5.85	3.81	0.005 8
0.020~<0.025	0.023 3	4.76	4.18	0.006 9
0.025~<0.030	0.027 6	1.48	1.54	0.007 2
0.030~<0.040	0.034 9	4.20	5.52	0.008 6
0.040~<0.050	0.046 1	4.16	7.21	0.010 4
0.050~<0.060	0.056 3	1.31	2.76	0.011 1
0.060~<0.070	0.062 0	1.91	4.46	0.012 2
0.070~<0.100	0.084 6	2.92	9.29	0.014 4
0.100	0.200 5	6.52	49.22	0.026 6
合计	0.026 6	100.00	100.00	

表 7 30~<60 mm 放射性显明度测定结果

Table 7 Results of radioactivity visibility for 30~<60 mm ores

%

铀品位分组	平均铀品位	粒度分布率	铀分布率	累计铀品位
<0.005	0	11.35	0	0
0.005~<0.01	0.008 1	12.86	2.67	0.004 3
0.010~<0.015	0.012 7	21.50	6.97	0.008 2
0.015~<0.020	0.017 1	14.14	6.20	0.010 3
0.020~<0.025	0.022 6	7.26	4.20	0.011 7
0.025~<0.030	0.027 8	5.17	3.67	0.012 8
0.030~<0.040	0.034 1	8.52	7.44	0.015 1
0.040~<0.050	0.046 2	4.15	4.91	0.016 6
0.050~<0.060	0.054 8	2.33	3.27	0.017 6
0.060~<0.070	0.063 2	1.18	1.90	0.018 2
0.070~<0.100	0.081 5	4.76	9.93	0.021 4
0.100	0.280 7	6.80	48.84	0.039 1
合计	0.039 1	100.00	100.00	

矿石分级后的放射性显明度结果表明, ≥ 60 mm的矿石大多不含铀或含微量铀,可采用放射性分选; $30 \sim < 60$ mm的矿石品位较高,为0.039 1%,达到罗辛铀矿水冶品位,且铀品位 $< 0.01\%$ 的矿石仅占该粒级矿石总质量的24.21%,占全级的2.19%,放射性选矿抛尾率不高,因此可直接水冶。

罗辛铀矿在边界品位为0.01%时, < 30 mm粒级的矿石品位较高,可直接合并至精矿;对 ≥ 30 mm粒级的矿石进行分选。分选后全粒级矿石加权平均品位为0.047%,尾矿产率为

33.95%,尾矿品位为0.002 8%,精矿总回收率为96.37%。放射性选矿具有一定的效果,矿石的可选性较高,主要适用于极低品位矿石抛尾,而高品位矿石分组效果较差。不同粒级在分选边界品位(0.01%)下的理论分选指标见表8。

罗辛铀矿适用于放射性选矿,可根据水冶铀品位需求,将一段破碎后的 ≥ 30 mm或 ≥ 60 mm的矿石进行放射性选矿,抛弃一部分不含铀或含微量铀的矿石。鉴于罗辛铀矿的年处理量较大,为提高分选效率,可先分级,再选矿。

表8 放射性选矿理论分选指标统计

Table 8 Statistics of theoretical separation index of radioactive mineral processing

粒级/mm	粒级分布率	铀品位	铀分布率	占本级(分界品位0.01%)						占全级		
				尾矿产率	尾矿品位	尾矿回收率	精矿产率	精矿品位	精矿回收率	尾矿产率	精矿产率	精矿回收率
≥ 165	32.41	0.022 8	22.87	54.55	0.002 0	4.81	45.45	0.047 8	95.19	17.68	14.73	30.85
$100 \sim < 165$	13.57	0.022 7	9.53	61.65	0.003 7	10.19	38.35	0.053 1	89.81	8.37	5.21	12.19
$60 \sim < 100$	9.87	0.026 6	8.11	57.94	0.002 1	4.54	42.06	0.060 3	95.46	5.72	4.15	9.42
$30 \sim < 60$	9.03	0.038 5	10.76	24.21	0.004 3	2.67	75.79	0.050 2	97.33	2.19	6.85	8.79
< 30	35.12	0.044 9	48.73									35.12
≥ 30	64.88	0.025 5	51.27	52.27	0.002 8	5.80	47.73	0.050 4	94.20	33.95	30.93	61.25

3 结论和建议

3.1 结论

对一段破碎后 ≥ 30 mm的矿石进行放射性选矿,在边界品位为0.01%时,选前平均品位为0.032%,选后精矿平均品位为0.047%,尾矿产率为33.95%,尾矿品位为0.002 8%,总回收率为96.37%,放射性选矿具有一定的效果。

罗辛铀矿石的可选性较高,可在原矿石经一段破碎后,放射性分选出极低品位矿石抛尾;因罗辛铀矿石高品位矿石较少,放射性选矿对高品位矿石的分组效果较差。

3.2 建议

罗辛铀矿适于放射性选矿,可根据水冶铀品位需求,将一段破碎后 ≥ 30 mm或 ≥ 60 mm的矿石进行放射性选矿。一段破碎后的大块矿石,对放射性选矿探测设备的灵敏度要求较高,测量误

差较大,使用接力式探测设备可减少误差。

不同粒级的矿石,单位质量矿石 γ 净值与品位的关系适用不同的拟合函数,后续采用放射性分选,可减少每个粒级范围,得到足够多的数学模型,进而更加准确地拟合 γ 净值与品位的关系。

本放射性显明度研究是在实验室静态测量环境下,对铀矿放射性可选性进行的粗略评价,在工程应用前需进一步细化动态测量精度与仪器设备灵敏度的适应性。

参考文献:

- [1] 陈旭,范洪海,陈东欢,等. 纳米比亚罗辛地区白岗岩成因及铀成矿作用[J]. 地学前缘,2023,30(5): 59-73.
- [2] 西蒙(Simon Haikela Shanyengana). 罗辛西南矿床(ML121)矿物学、岩石学、成因及资源量研究[D]. 北京:中国地质大学(北京),2020.
- [3] 左立波,任军平,邱京卫,等. 纳米比亚罗辛铀矿床

- 地质特征、地球化学特征及成矿模式[J]. 地质找矿论丛, 2015, 30(S1): 137-145+180.
- [4] 王德荫. 罗辛铀厂[J]. 铀矿选冶, 1980(4): 21-25.
- [5] 张晓康, 聂凤军, 吴科税, 等. 纳米比亚罗辛大型白岗岩型铀矿床[J]. 矿床地质, 2015, 34(2): 423-426.
- [6] 邓寿昌. 17 型放射性分选机在南非铀矿山的应用[J]. 国外核新闻, 1981(5): 28-29.
- [7] 汪淑慧. 国外铀矿石放射性分选的现状[J]. 铀矿冶, 2013, 32(1): 31-33+52.
- [8] 汪淑慧. 铀矿石放射性分选的技术与经济[J]. 铀矿冶, 2009, 28(3): 126-130.
- [9] 汪淑慧. 铀矿选矿技术研究进展与展望[J]. 铀矿冶, 2009, 28(2): 70-76.
- [10] 崔拴芳, 杨帅. 低品位硬岩型铀矿选冶技术的新进展[J]. 铀矿冶, 2020, 39(2): 75-78+86.
- [11] 王冬阳. 基于反褶积法的铀矿石放射性分选方法研究[D]. 南昌: 东华理工大学, 2023.
- [12] 汪淑慧. 铀矿的需求与选矿[J]. 国外金属矿选矿, 2007(1): 18-20.
- [13] 强录德, 李广, 刘志超, 等. 某硬岩铀矿放射性显明度研究[J]. 铀矿冶, 2018, 37(3): 181-183+190.
- [14] 刘志超, 马嘉, 李春风, 等. 铀矿石预先抛尾—两段放射性分选试验研究[J]. 湿法冶金, 2021, 40(4): 267-271.

Study on Radioactivity Visibility of Rossing Uranium Mine in Namibia

TIAN Yuhui, LIU Zhichao, SHI Liuyin, WANG Guishuo, JIA Xiumin, LI Guang
(Beijing Research Institute of Chemical Engineering and Metallurgy, CNNC, Beijing 101149, China)

Abstract: The ore grade of the Rossing Uranium Mine in Namibia is low and the processing capacity is large. The mined ore is mixed with some waste rocks, and the grinding and leaching costs are high. To solve this problem, the distribution patterns of ore particle size and uranium grade were studied, the radioactivity visibility of representative ore samples was calculated, the radioactive selectivity curve was drawn, and the theoretical sorting index based on the cut-off grade was determined. The theoretical sorting indicators are: when the cut-off grade is 0.01%, the raw ore uranium grade is 0.032%, the concentrate uranium grade is 0.047%, the tailings yield is 33.95%, the tailings uranium grade is 0.0028%, and the total recovery rate is 96.37%. The results show that radioactive beneficiation has a certain effect and the ore selectivity is high. It is mainly suitable for tailing of coarse-grained and extremely low-grade ores. The radioactivity visibility can be used as the theoretical basis for radioactive beneficiation of Rossing Uranium Mine.

Key words: Rossing Uranium Mine; radioactivity visibility; radiometric sorting; uranium ore; uranium grade; ore particle size