金堆城某选矿厂钼尾矿综合回收利用研究①

董燧珍[1]，杜凤梅[2]
（1.金堆城钼业股份有限公司，陕西 西安 710075；2.金堆城钼业股份有限公司矿山分公司，陕西 渭南 714102）

摘　要：为实现钼尾矿的资源化利用，针对金堆城某选矿厂钼尾矿开展了系统试验研究。在工艺矿物学研究基础上，确定采用浮选对尾矿中的有价组分进行梯级回收。结果表明，首先采用煤油+2 号油选钼，经一粗二扫浮选，可获得钼品位 0.47%、钼回收率 21.23%的钼精矿，尾矿中钼品位降至 0.008 7%；其次采用预先脱泥、TB-3 捕收剂浮选脱除云母，所得云母浮选尾矿中云母含量显著降低，为后续分选创造条件；最后对脱除云母后的尾矿进行无氟-碱法浮选分离长石与石英，在不磨矿条件下，可获得作业产率 29.23%，K_2O、Na_2O 品位分别为 7.34%、1.01%的长石产品以及作业产率 27.87%、SiO_2 品位 83.14%的石英产品。该钼尾矿具有较高的综合回收价值，推荐的钼再选、云母脱除、无氟-碱法浮选分离长石和石英联合工艺流程技术可行，能实现金属与非金属资源的同步回收。

关键词：钼尾矿；综合回收；浮选；钼；云母；长石；石英；钼精矿
中图分类号：TD923；TD981；X705　　**文献标志码**：A　　doi：10.3969/j.issn.0253-6099.2026.04.021
文章编号：0253-6099（2026）04-0140-05

Comprehensive Recovery and Utilization of Molybdenum Tailings from a Concentrator in Jinduicheng

DONG Suizhen[1], DU Fengmei[2]
(1.*Jinduicheng Molybdenum Industry Co., Ltd., Xi'an* 710075, *Shaanxi*, *China*; 2.*Mine Branch of Jinduicheng Molybdenum Industry Co., Ltd., Weinan* 714102, *Shaanxi*, *China*)

Abstract: To comprehensively utilize molybdenum tailings, experimental researches were systematically carried out for the molybdenum tailings from a concentrator of Jinduicheng Molybdenum Mine. Based on process mineralogy study, valuable components in the tailings were determined to be stepped recovered by flotation. Firstly, by adopting kerosene combined with No.2 oil, a flotation process consisting of one roughing and two scavenging resulted in 21.23% Mo recovery to the concentrate grading 0.47% Mo, and tailings with Mo grade of just 0.008 7%. Secondly, a process of pre-desliming followed by flotation with TB-3 collector was applied to remove mica, resulting in the flotation tailings with significantly reduced mica content, which laid a foundation for subsequent separation. Finally, such flotation tailings were processed by adopting fluorine-free alkaline flotation for separating feldspar and quartz therein without regrinding. As a result, feldspar products with a yield of 29.23% and K_2O and Na_2O contents of 7.34% and 1.01%, respectively, and quartz products with a yield of 27.87% and SiO_2 grade of 83.14% were successfully produced. It is shown that such molybdenum tailings exhibit great potential for comprehensive recovery. It is concluded that the proposed combined process flow consisting of re-flotation of molybdenum, mica removal, and separation of feldspar and quartz by fluorine-free alkaline flotation is technically feasible for simultaneous recovery of metallic and non-metallic resources.
Key words: molybdenum tailings; comprehensive recovery; flotation; molybdenum; mica; feldspar; quartz; molybdenum concentrate

我国钼矿常共伴生多种有价元素，但绝大部分以尾矿形式堆存于尾矿库，对尾矿进行综合回收利用，可“变废为宝”，兼具资源效益与环境效益[1-3]。

钼矿山尾矿中非金属矿物种类及其含量差别较

① **收稿日期**：2026-01-12
作者简介：董燧珍（1974—），男，甘肃平凉人，高级工程师，主要从事钼金属综合回收利用研究。E-mail：524561343@qq.com
通信作者：杜凤梅（1979—），女，陕西渭南人，高级工程师，主要从事选矿工艺研究。E-mail：178907852@qq.com

大,但基本都含有石英、钾长石、黑云母和绿泥石等矿物。目前,国内从矿山尾矿中回收非金属矿物的试验研究主要是针对石英、长石、云母、方解石、白云石、萤石和金红石的浮选[4-7]。本文以金堆城某选矿厂钼尾矿为研究对象,通过详细工艺矿物学研究与浮选试验,探索一条经济高效的综合回收技术路径,可为工业应用提供技术支撑。

1　原料性质

金堆城某选矿厂钼尾矿化学多元素分析结果见表 1。从表 1 可知,尾矿中 MoO_3 含量 0.024%,具有再回收潜力;该尾矿中同时富含 SiO_2、Al_2O_3、K_2O 等组分,回收价值较大。

表 1　钼尾矿化学多元素分析结果(质量分数)

Table 1　Multi-elemental analysis of molybdenum tailings　%

K_2O	Na_2O	Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3	CaO	MgO
6.093	0.785	13.567	62.696	5.151	3.337	2.277
P_2O_5	MnO	SO_3	TiO_2	Rb_2O	MoO_3	CeO_2
0.34	0.136	3.01	0.976	0.036	0.024	0.058

矿物组成分析结果表明,该钼尾矿中石英含量约 50%,长石(主要为钾长石)含量约 20%,云母含量约 25%,其他矿物含量合计约 5%。

钼尾矿粒度分布如表 2 所示。由表 2 可见,该钼尾矿中-0.074 mm 粒级占 50.95%,-0.038 mm 粒级占 33.54%,整体粒度偏细。

表 2　钼尾矿粒度分布

Table 2　Particle size distribution of molybdenum tailings

粒级/mm	产率/%	正累计产率/%
+0.15	25.53	25.53
-0.15+0.074	23.52	49.05
-0.074+0.038	17.41	66.46
-0.038	33.54	100.00

解离度测试结果表明,辉钼矿解离度约 85%,石英与长石解离度分别为 70%~80%和 60%~70%,石英和长石普遍连生。

2　试验方法

采用“阶段浮选、梯级回收”工艺对该尾矿中的有价组分进行回收。试验原则流程见图 1。首先采用煤油+2 号油,经一粗二扫浮选回收残留钼;然后采用预先脱泥、TB-3 捕收剂浮选脱除云母;最后采用环保的无氟-碱法浮选工艺分离长石与石英。

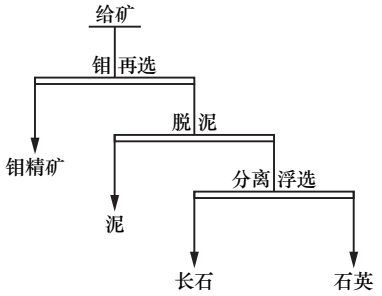


图 1　试验原则流程

Fig. 1　Basic flowchart for test

试验设备主要包括 XMQ-Φ240×90 锥形球磨机、RK/FD 3.0 L 浮选机、电子秤、烘箱、抽滤机、研磨机等。试验药剂包括调整剂硫酸和氢氧化钠(均为化学纯试剂),分散剂六偏磷酸钠(化学纯试剂),起泡剂 2 号油(工业品),活化剂 TH-1(市购),抑制剂 TY-1(市购),捕收剂煤油(工业品)、TB-1(市购)、TB-3(市购)等。

3　试验及结果

3.1　尾矿中钼再选试验

一粗二扫钼再选试验流程如图 2 所示,捕收剂煤油用量试验结果见表 3。由表 3 可知,在粗选、扫选 1、扫选 2 煤油用量分别为 75、40、20 g/t 条件下进行钼再选,可获得产率 0.50%、钼品位 0.47%、回收率 21.23%的钼精矿,其中 S 和 Fe 含量分别为 1.40%和 2.49%,对应的回收率分别为 0.59%和 0.57%,尾矿钼品位降至 0.008 7%。

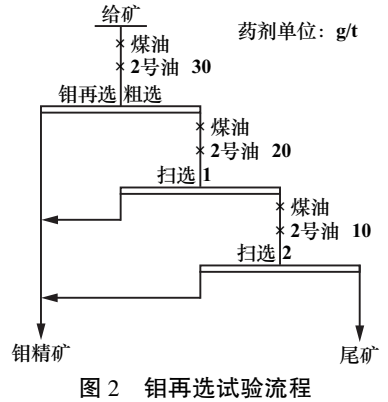


图 2　钼再选试验流程

Fig. 2　Process flowchart for molybdenum re-flotation

3.2　云母浮选试验

该钼尾矿粒度整体偏细,细泥会对矿物浮选产生不利影响。在六偏磷酸钠用量 100 g/t,粗选、扫选 TB-3 用量分别为 150、75 g/t 条件下,进行了脱泥和不脱泥浮选对比试验,结果见表 4。脱泥-浮选试验流程见图 3。

表 3 煤油用量试验结果

Table 3 Test results of kerosene dosage

煤油用量/(g·t^{-1})	产品名称	产率/%	品位/%			回收率/%		
			Mo	S	Fe	Mo	S	Fe
粗选 25	钼精矿	0.78	0.32	1.32	2.60	21.00	0.88	0.87
扫选 1 15	尾矿	99.22	0.009 6	1.19	2.34	79.00	99.12	99.13
扫选 2 5	给矿	100.00	0.012	1.19	2.34	100.00	100.00	100.00
粗选 50	钼精矿	1.20	0.15	1.44	2.06	17.30	1.63	1.24
扫选 1 25	尾矿	98.80	0.008 9	1.05	1.99	82.70	98.37	98.76
扫选 2 10	给矿	100.00	0.011	1.05	1.99	100.00	100.00	100.00
粗选 75	钼精矿	0.50	0.47	1.40	2.49	21.23	0.59	0.57
扫选 1 40	尾矿	99.50	0.008 7	1.18	2.19	78.77	99.41	99.43
扫选 2 20	给矿	100.00	0.011	1.18	2.19	100.00	100.00	100.00
粗选 100	钼精矿	0.66	0.25	1.43	2. 14	12.39	0.90	0.75
扫选 1 50	尾矿	99.34	0.011	1.05	1.89	87.61	99.10	99.25
扫选 2 25	给矿	100.00	0.013	1.05	1.89	100.00	100.00	100.00

表 4 脱泥与不脱泥浮选试验结果对比

Table 4 Comparison of flotation with and without desliming

试验方案	产物名称	产率/%
不脱泥	云母	11.02
	尾矿	88.98
	给矿	100.00
脱泥	细泥	19.99
	云母	19.66
	尾矿	60.35
	给矿	100.00

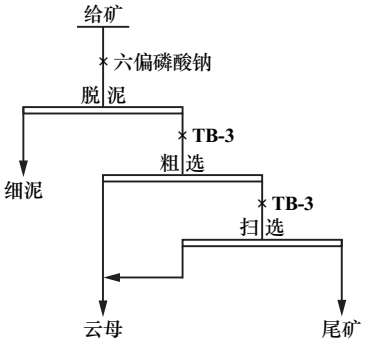


图 3 脱泥-浮选试验流程

Fig. 3 Flowchart of desliming and flotation

脱泥试验在不磨矿的情况下采用静置、虹吸的方式进行。从表 4 可以看出,不脱泥时,云母产率为 11.02%;脱泥后,云母产率为 19.66%,浮选效果有明显提升。

按照图 3 所示流程,在六偏磷酸钠用量 100 g/t,粗选、扫选 TB-3 用量分别为 200、100 g/t 条件下,进行了脱泥-浮选试验,结果见表 5。采用脱泥-一粗一扫浮选,可获得产率 21.25%的云母产品。要想彻底回收云母,需增加精选作业。细泥中 K_2O 品位为 6.24%,高于给矿的 K_2O 品位,可见脱泥过程有部分云母流失。

表 5 脱泥-浮选试验结果

Table 5 Test results of desliming and flotation

产品名称	产率/%	品位/%		回收率/%	
		K_2O	Na_2O	K_2O	Na_2O
细泥	19.73	6.24	0.68	20.08	18.25
云母	21.25	7.14	0.55	24.75	15.90
尾矿	59.02	5.73	0.82	55.17	65.85
给矿	100.00	6.13	0.74	100.00	100.00

3.3 无氟-碱法浮选分离长石和石英

脱泥-浮选的尾矿用于长石和石英浮选分离的给矿。该给矿中基本只有长石和石英两种矿物,拟采用无氟-碱法的浮选工艺进行长石和石英的分离,试验流程如图 4 所示,捕收剂 TB-1 用量试验结果见表 6。随着捕收剂 TB-1 用量增加,石英作业产率增大,石英产品中 K_2O 和 Na_2O 品位先减小后增大。综合考虑,适宜的 TB-1 用量为 200 g/t。

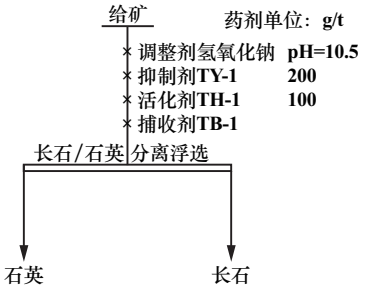


图 4 长石和石英分离试验流程

Fig. 4 Flowchart for feldspar and quartz separation

表 6 捕收剂 TB-1 用量试验结果

Table 6 Test results of TB-1 dosage

TB-1 用量/(g·t^{-1})	产品名称	作业产率/%	品位/%		作业回收率/%	
			K_2O	Na_2O	K_2O	Na_2O
100	石英	17.86	3.25	0.47	10.16	10.11
	长石	82.14	6.24	0.91	89.84	89.89
	给矿	100.00	5.71	0.83	100.00	100.00
200	石英	22.61	3.14	0.45	12.39	12.26
	长石	77.39	6.49	0.94	87.61	87.74
	给矿	100.00	5.73	0.83	100.00	100.00
250	石英	24.36	3.15	0.45	13.51	13.05
	长石	75.64	6.49	0.97	86.49	86.95
	给矿	100.00	5.68	0.84	100.00	100.00
350	石英	33.10	3.73	0.53	21.70	21.93
	长石	66.90	6.66	0.93	78.30	78.07
	给矿	100.00	5.69	0.80	100.00	100.00

在条件试验基础上,进行了磨矿与不磨矿的长石/石英分离浮选对比试验,试验流程如图 5 所示,结果见表 7。该钼尾矿中长石和石英解离度较低,不磨矿(-0.074 mm 粒级占 50%)情况下,可以获得作业产率 29.23%、K_2O 和 Na_2O 品位分别为 7.34%和 1.01%的长

石;磨矿细度-0.074 mm 粒级占 60%时,可得到作业产率 25.24%、K_2O 和 Na_2O 品位分别为 8.35%和 1.18%的长石产品;磨矿细度-0.074 mm 粒级占 70%时,可得到作业产率 19.64%、K_2O 和 Na_2O 品位分别为 8.87%和 1.23%的长石产品。随着磨矿细度增加,长石作业产率减小,品位变化不大。磨矿不仅会提高成本,而且会加剧矿石泥化,造成有价矿物浪费,从成本与收益权衡,推荐不磨矿直接分选。该条件下,可获得作业产率 27.87%、SiO_2 品位 83.14%的石英产品,其中 K_2O 和 Na_2O 品位分别为3.83%和 0.55%。

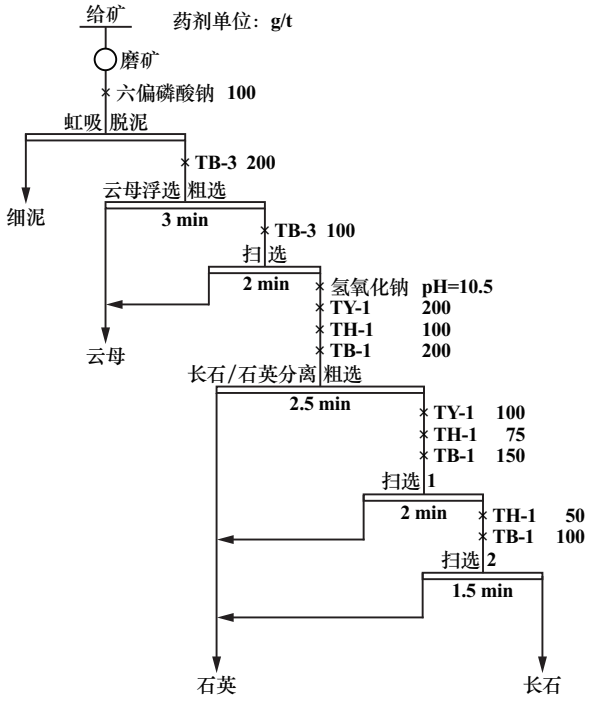


图 5　磨矿-长石/石英浮选分离试验流程

Fig. 5　Flowchart of grinding and flotation separation of feldspar from quartz

表 7　磨矿与不磨矿长石/石英浮选分离对比试验结果

Table 7　Comparative test results of feldspar and quartz separation by flotation with and without grinding

-0.074 mm 粒级占比/%	产品名称	作业产率/%	品位/%		作业回收率/%	
			K_2O	Na_2O	K_2O	Na_2O
50(不磨)	细泥	20.54	6.02	0.75	20.85	20.82
	云母	22.36	6.62	0.62	24.96	18.73
	长石	29.23	7.34	1.01	36.18	39.90
	石英	27.87	3.83	0.55	18.01	20.55
	给矿	100.00	5.93	0.74	100.00	100.00
60	细泥	24.69	6.03	0.75	25.07	24.37
	云母	23.96	6.59	0.64	26.58	20.18
	长石	25.24	8.35	1.18	35.48	39.19
	石英	26.11	2.93	0.47	12.87	16.26
	给矿	100.00	5.94	0.76	100.00	100.00
70	细泥	28.46	6.04	0.72	28.80	27.32
	云母	25.17	6.67	0.64	28.12	21.48
	长石	19.64	8.87	1.23	29.18	32.21
	石英	26.73	3.11	0.53	13.90	18.99
	给矿	100.00	5.97	0.75	100.00	100.00

3.4　酸活化分离长石和石英

氢氟酸作为活化剂分离石英和长石是很成熟且高效的方法。采用氢氟酸活化浮选工艺分离石英和长石,试验流程见图 6,结果见表 8。氢氟酸活化浮选分离石英和长石,获得了作业产率 21.54%、K_2O 和 Na_2O 品位分别为 8.95%和 1.15%的长石产品,石英产品作业产率 34.46%,K_2O 和 Na_2O 品位分别为 3.26%和 0.42%。

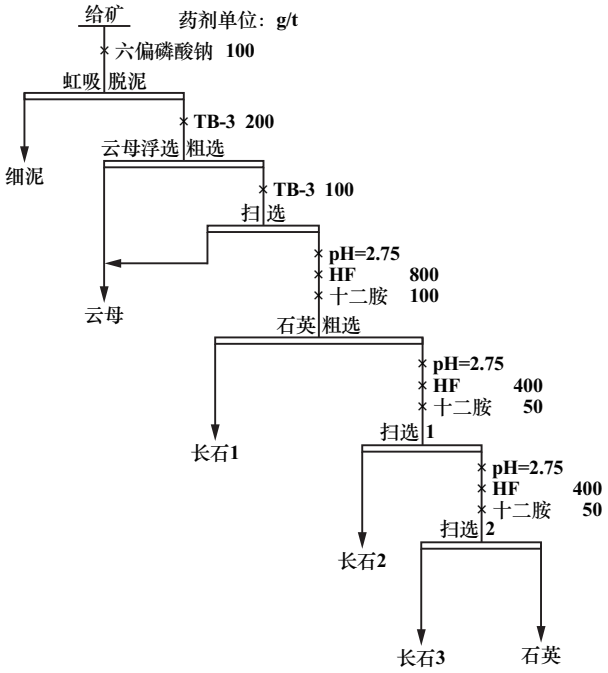


图 6　氢氟酸活化浮选试验流程

Fig. 6　Flowchart of HF-activated flotation

表 8　氢氟酸活化浮选试验结果

Table 8　Test results of HF-activated flotation

产品名称	作业产率/%	品位/%			作业回收率/%		
		K_2O	Na_2O	Fe_2O_3	K_2O	Na_2O	Fe_2O_3
细泥	21.57	6.13	0.68	5.34	22.30	21.57	23.18
云母	22.43	6.94	0.63	13.51	26.25	20.78	60.97
长石 1	9.38	11.45	1.34	2.15	18.11	18.48	4.06
长石 2	6.85	8.51	1.16	1.99	9.83	11.69	2.74
长石 3	5.31	5.10	0.79	1.85	4.57	6.20	1.98
长石	21.54	8.95	1.15	2.03	32.51	36.37	8.78
石英	34.46	3.26	0.42	1.02	18.94	21.28	7.07
给矿	100.00	5.93	0.68	4.97	100.00	100.00	100.00

与无氟-碱法浮选工艺相比,氢氟酸活化浮选所得石英产品中 K_2O 和 Na_2O 品位偏高,且 F^-对人体和环境危害较大,强酸性矿浆对设备和管道的腐蚀也较强。对比分析可见,无氟-碱法浮选工艺优势明显。

4 结论

1）金堆城钼尾矿富含石英、长石、云母等非金属矿物，残留钼具有综合回收价值。

2）采用煤油+2号油从该尾矿中浮选回收钼，可获得Mo品位0.47%、回收率21.23%的钼精矿，尾矿中Mo品位降至0.008 7%。

3）采用脱泥-一粗一扫浮选流程，可获得作业产率21.25%的云母产品，部分云母在细泥和尾矿中流失，想彻底回收云母，需进一步优化工艺或药剂制度。

4）无氟-碱法浮选分离长石和石英，工艺流程简单、无氟离子污染。在不磨矿条件下，可得到作业产率29.23%、K_2O和Na_2O品位分别为7.34%和1.01%的长石产品和作业产率27.87%、SiO_2品位83.14%的石英产品。

5）针对该钼尾矿性质，推荐的综合回收技术方案为：采用阶段浮选、梯级回收工艺，先以煤油+2号油回收残留钼，再预先脱泥后用TB-3浮选分离云母，最后采用无氟-碱法的环保浮选工艺分离长石与石英。

参考文献(References)：

[1] 马伟鸣，柴文翠，马鹏举，等. 钼尾矿中有价矿物综合回收研究进展[J]. 化工矿物与加工，2024，53(4)：33-41.
Ma Weiming，Chai Wencui，Ma Pengju，et al. Research progress on comprehensive recovery of valuable minerals from molybdenum tailings[J]. Industrial Minerals & Processing，2024，53(4)：33-41.

[2] 崔永琦，蓝卓越，王国彬，等. 用选矿方法回收钼尾矿中非金属矿物的研究现状[J]. 矿冶，2021，30(5)：119-127.
Cui Yongqi，Lan Zhuoyue，Wang Guobin，et al. Research status of recovery of nonmetallic minerals from molybdenum tailings by mineral processing[J]. Mining and Metallurgy，2021，30(5)：119-127.

[3] 徐晓衣，孟庆波，李双棵，等. 高硅型有色金属尾矿资源清洁高效综合利用研究[J]. 矿冶工程，2023，43(4)：69-72.
Xu Xiaoyi，Meng Qingbo，Li Shuangke，et al. Efficient and comprehensive green-utilization of high siliceous tailings resources[J]. Mining and Metallurgical Engineering，2023，43(4)：69-72.

[4] 秦传明，李晓瑜，王漪靖，等. 钼尾矿中非金属矿物的回收利用研究[J]. 中国钼业，2016，40(3)：9-13.
Qin Chuanming，Li Xiaoyu，Wang Yijing，et al. Recovery of non-metallic mineral in molybdenum tailings[J]. China Molybdenum Industry，2016，40(3)：9-13.

[5] 王国标. 某铜钼尾矿回收长石的试验研究[J]. 黄金，2017，38(2)：66-69.
Wang Guobiao. Experimental research on recovery of feldspar from copper-molybdenum tailings[J]. Gold，2017，38(2)：66-69.

[6] 吕兵超，方娴. 从福建某铜钼尾矿中综合回收长石的试验研究[J]. 矿产综合利用，2018(5)：122-125.
Lyu Bingchao，Fang Xian. Experimental study on comprehensive recovery of feldspar from a copper-molybdenum tailings in Fujian[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources，2018，39(5)：122-125.

[7] 高文博，陆长龙，肖骏，等. 某钼尾矿浮选回收钾长石试验研究[J]. 中国钼业，2016，40(3)：4-8.
Gao Wenbo，Lu Changlong，Xiao Jun，et al. Experimental study on the beneficiation of potassium feldspar from a molybdenum floatation tailings[J]. China Molybdenum Industry，2016，40(3)：4-8.

引用本文：董燧珍，杜凤梅. 金堆城某选矿厂钼尾矿综合回收利用研究[J]. 矿冶工程，2026，46(4)：140-144.
Dong Suizhen，Du Fengmei. Comprehensive recovery and utilization of molybdenum tailings from a concentrator in Jinduicheng[J]. Mining and Metallurgical Engineering，2026，46(4)：140-144.

(上接第139页)

[2] 杨玮，李文香，王倩，等. 某铅锌矿选矿废水回用于铅锌浮选的效果研究[J]. 矿冶工程，2022，42(1)：53-56.
Yang Wei，Li Wenxiang，Wang Qian，et al. Effect of lead-zinc ore dressing wastewater recycled into Pb-Zn flotation[J]. Mining and Metallurgical Engineering，2022，42(1)：53-56.

[3] 陈文胜，刘旭，薛珂，等. 混凝沉淀-吸附法处理萤石选矿废水的正交试验研究[J]. 矿冶工程，2021，41(5)：68-70.
Chen Wensheng，Liu Xu，Xue Ke，et al. Orthogonal experimental investigation of coagulation-sedimentation and adsorption approach for fluorspar flotation wastewater treatment[J]. Mining and Metallurgical Engineering，2021，41(5)：68-70.

[4] 王英姿，罗良飞，宋鑫，等. 袁家村铁矿再磨-强磁选脱泥-反浮选新工艺研究[J]. 矿冶工程，2022，42(4)：78-81.
Wang Yingzi，Luo Liangfei，Song Xin，et al. New process of regrinding-high intensity magnetic separation for desliming-reverse flotation for Yuanjiacun iron mine[J]. Mining and Metallurgical Engineering，2022，42(4)：78-81.

[5] 李贤，吴承优，罗良飞. 袁家村微细粒难选磁赤混合铁矿石提铁降硅试验研究[J]. 金属矿山，2024(1)：197-201.
Li Xian，Wu Chengyou，Luo Liangfei. Experimental study on silicon reduction and iron increasing of a micro-fine refractory magnetite-hematite mixed iron ore in Yuanjiacun[J]. Metal Mine，2024(1)：197-201.

[6] 刘宇彤，印万忠，盛秋月，等. 细粒滑石对孔雀石硫化浮选的影响[J]. 东北大学学报(自然科学版)，2022，43(5)：709-717.
Liu Yutong，Yin Wanzhong，Sheng Qiuyue，et al. Effect of fine talc on sulfurized flotation of malachite[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science)，2022，43(5)：709-717.

引用本文：沈平，魏宇峰，李嵘超. 袁家村铁矿选矿循环水处理技术研究[J]. 矿冶工程，2026，46(4)：136-139.
Shen Ping，Wei Yufeng，Li Rongchao. Recycle water treatment for mineral processing of Yuanjiacun iron mine[J]. Mining and Metallurgical Engineering，2026，46(4)：136-139.