

基于水力旋流器分选的某银精矿双产品方案研究^①

王宇思¹, 李茂林^{1,2}, 崔瑞¹, 孙景敏³, 张硕¹, 杨哲辉¹, 赵晗¹

(1.武汉科技大学资源与环境工程学院,湖北武汉430081;2.长沙矿冶研究院有限责任公司,湖南长沙410012;3.河南省岩石矿物测试中心,河南郑州450014)

摘要:河南某银精矿的伴生金属铅品位平均约7%,未达到计价标准。为提高银精矿综合价值,对银精矿产品开展了水力旋流器分级试验,考察了水力旋流器锥角、沉砂口直径、角锥比等参数对银精矿分级富集的影响。结果表明:采用100型水力旋流器,在锥角60°、给矿压力0.2 MPa、给矿浓度(质量分数)13.89%、溢流管直径22 mm、沉砂口直径12 mm条件下,可从银精矿中分离出产率49.25%、银品位6316.29 g/t、银金属回收率79.06%、铅品位12.39%、铅金属回收率79.45%的高铅银精矿和银品位1623.36 g/t的低铅银精矿。高、低铅银精矿双产品方案优于单一银精矿方案,银精矿产品经济价值可提升687.96元/t。

关键词:水力旋流器;银精矿;伴生金属;铅;综合回收

中图分类号:TD922

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2025.01.012

文章编号:0253-6099(2025)01-0065-05

Processing Scheme of Separating a Silver Concentrate into Two Products by Hydrocyclone

WANG Yusi¹, LI Maolin^{1,2}, CUI Rui¹, SUN Jingmin³, ZHANG Shuo¹, YANG Zhehui¹, ZHAO Han¹

(1. College of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, Hubei, China; 2. Changsha Research Institute of Mining and Metallurgy Co., Ltd., Changsha 410012, Hunan, China; 3. Henan Province Rock and Mineral Testing Center, Zhengzhou 450014, Henan, China)

Abstract: A kind of silver concentrate in Henan Province has the associated lead therein with an average grade around 7%, lower than the grade for pricing. A classification test was conducted with a hydrocyclone for the silver concentrate, and effects of parameters, including cone angle, underflow orifice diameter, and angle-cone ratio, on the classification and concentration of silver concentrate were explored. It is found that by adopting a 100 model hydrocyclone with cone angle of 60°, feed in a mass fraction of 13.89% to be fed at the pressure of 0.2 MPa, overflow pipe of 22 mm in diameter, and the underflow orifice of 12 mm in diameter, a high-lead silver concentrate grading 6316.29 g/t Ag and 12.39% Pb can be obtained at corresponding recoveries of 79.06% Ag and 79.45% Pb, with a yield of 49.25%; meanwhile, a low-lead silver concentrate with silver grade of 1623.36 g/t can be obtained. This processing technique can obtain both high- and low-lead silver concentrate at the same time, leading to the economic value of the silver concentrate improved by 687.96 Yuan per ton.

Key words: hydrocyclone; silver concentrate; associated metal; lead; comprehensive recovery

河南某银矿选厂生产规模为450 t/d,产品为单一银精矿,产率约8%,Ag品位控制在3000 g/t以上。银精矿中还含有部分Pb、Au、Cu、Zn等,但因品位较低,未达到计价水平,产品综合经济价值尚未充分体现。特别是银精矿中的Pb平均品位7%左右,接近计价水平(10%)。按银精矿产量35 t/d计算,每年铅金

属量损失约800 t,损失价值约1250万元(以铅金属1.55万元/t计)。因此,有必要进一步提高该银精矿中伴生金属品位,以提高该银精矿的经济价值。

针对精矿中伴生金属铅品位低而无法计价的问题,主要有两种解决方案:一是优化现有工艺流程,采用常压有氰酸浸^[1]或抑硫浮铅^[2]等工艺将伴生铅富

① 收稿日期:2024-08-25

作者简介:王宇思(2000—),女,湖北荆州人,硕士研究生,主要研究方向为磨矿分级工艺与装备。E-mail:1321382154@qq.com

通信作者:崔瑞(1984—),男,湖北襄阳人,副教授,主要研究方向为矿物加工粉体高效制备与精密分级。E-mail:cuirui_1984@foxmail.com

集在单一精矿中,实现金属铅的高效回收;二是在原工艺流程基础上增加尾矿脱泥^[3]或重介质浓缩^[4]等工艺,将单一产品方案改为多产品方案,回收达到计价标准的各价金属精矿。本文采用水力旋流器将银精矿分选为高铅银精矿和低铅银精矿双产品,研究不同工艺参数条件下的产品数量、质量指标,进而预测方案的经济可行性。

1 银精矿性质及试验方案

1.1 银精矿性质

银精矿化学多元素分析结果见表1。由表1可知,银精矿样品中Pb品位为7.04%,主要杂质为SiO₂。

表1 银精矿化学多元素分析结果(质量分数)

Table 1 Chemical multielement analysis results of silver concentrate %

Ag ¹⁾	Cu	Pb	Zn	SiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O
3 744.44	0.62	7.04	0.35	45.96	1.31	3.41
Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MgO	TiO ₂	TC	Au ¹⁾	S
14.02	14.53	3.86	1.15	0.60	0.34	0.125

1) 单位为 g/t。

采用筛分法测定银精矿粒度组成,并考察Pb在各粒级的分布率,结果见表2。表2结果表明,银精矿0.018~0.074 mm 粒级Pb品位相对较高,计算正累计Pb品位可以发现,若该银精矿按0.018 mm 分级,理论上可获得产率20.62%、Pb品位11.14%、Pb回收率29.13%的高铅银精矿以及产率79.38%、Pb品位7.04%、Pb回收率70.87%的低铅银精矿。

表2 筛分法测得的矿样粒度组成及Pb金属分布率

Table 2 Particle size composition determined by screening method and Pb metal distribution rate

粒级/mm	粒级产率/%	粒级Pb品位/%	正累计Pb品位/%	Pb金属分布率/%
+0.074	9.90	6.79	6.79	8.52
-0.074+0.038	6.69	14.12	9.75	11.98
-0.038+0.018	4.03	16.88	11.14	8.63
-0.018	79.38	7.04	7.89	70.87
合计	100.00	7.89	—	100.00

进一步利用七产品离心水析仪^[5](见图1),采用离心沉降法测定银精矿粒度组成,并考察Pb在各粒级的金属分布率,结果见表3。从表3可以看出,由于水力旋流器内离心强度逐渐增加,C1~C7产品粒度逐级变细(或密度变小),铅品位大体上逐渐降低。理论

上,采用离心沉降法可获得铅正累计品位13.15%、铅回收率83.79%的高品位含铅产品。

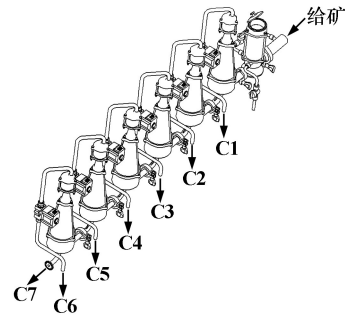


图1 七产品离心水析仪

Fig. 1 Centrifugal hydraulic analyzer with seven products

表3 离心沉降法测得的矿样粒度组成及铅金属分布率

Table 3 Particle size composition determined by centrifugal sedimentation and Pb metal distribution rate

产品编号	产率/%	铅品位/%	正累计品位/%	金属分布率/%
C1	22.67	14.50	14.50	42.61
C2	2.65	15.30	14.58	5.26
C3	7.36	14.25	14.51	13.60
C4	6.18	12.21	14.14	9.78
C5	4.42	11.27	13.85	6.46
C6	5.89	7.97	13.15	6.09
C7	50.83	2.46	7.71	16.20
合计	100.00	7.71	—	100.00

综合以上分析,几何粒度的筛分分级方法难以获得高铅银精矿和低铅银精矿,但由此可知,各粒级铅品位不同;通过旋流场离心分级的方法分离出高质量含铅银精矿更具可行性,且指标良好。因此,本文拟利用水力旋流器考察对银精矿进行分级处理后产出高铅银精矿和低铅银精矿的可行性。

1.2 试验设备及方案

试验设备主要由100型水力旋流器、泵箱、离心泵等组成。100型水力旋流器筒体直径100 mm,锥段高度280 mm,进料口直径18~22 mm。试验过程中,通过变频器控制离心泵转速以调节旋流器给矿压力。依次考察旋流器锥角、沉砂口直径、角锥比、给矿浓度(质量分数)、给矿压力等参数对分级效率的影响,确定适宜的旋流器工作参数。最后根据银、铅计价系数,对符合生产要求的试验组结果进行经济价值计算。

2 试验结果与讨论

2.1 旋流器锥角的影响

旋流器具有按密度分选和粒度分选的双重作用,其中锥段是旋流器分离的主要区域,不同锥角对分离

效果影响较大^[6-7]。研究表明,大锥角旋流器内锥壁附近区域存在悬浮的高浓度区,能辅助矿石颗粒按密度分层,进而提升沉砂品位^[8]。在给矿压力 0.2 MPa、溢流管直径 22 mm、沉砂口直径 10 mm 条件下,考察了旋流器锥角对分级效果的影响,结果见表 4。由表 4 可知,锥角大于 60°后,旋流器沉砂中铅品位均在 12%以上,此时铅回收率 45.70%~78.48%。其他条件不变的情况下,较大锥角有利于铅品位的稳定,但同时会降低沉砂产率及回收率。适宜的旋流器锥角为 60°,此时沉砂中铅品位达到计价标准且产率、回收率高,分离效果好。

表 4 旋流器锥角对分级效果的影响

Table 4 Influence of cyclone cone angle on classification

锥角/ (°)	产品名称	浓度/ %	产率/ %	Pb 品位/ %	Ag 品位/ (g·t ⁻¹)	回收率/%	
						Pb	Ag
10	溢流	8.34	55.60	2.70	1 490.66	22.41	22.86
	沉砂	35.23	44.40	11.71	6 299.10	77.59	77.14
	给矿	12.88	100.00	6.70	3 625.37	100.00	100.00
60	溢流	8.56	51.82	2.87	1 762.67	21.52	26.99
	沉砂	26.95	48.18	12.26	5 129.31	78.48	73.01
	给矿	12.75	100.00	6.91	3 384.55	100.00	100.00
90	溢流	9.84	74.11	4.19	1 847.34	49.21	43.70
	沉砂	45.04	25.89	12.38	6 813.42	50.79	56.30
	给矿	12.70	100.00	6.31	3 132.82	100.00	100.00
120	溢流	9.97	71.25	4.35	1 655.04	46.47	38.65
	沉砂	41.77	28.75	12.42	6 511.76	53.53	61.35
	给矿	12.88	100.00	6.67	3 051.27	100.00	100.00
180	溢流	10.00	75.33	4.83	2 192.11	54.30	52.05
	沉砂	48.03	24.67	12.41	6 167.41	45.70	47.95
	给矿	12.88	100.00	6.70	3 172.82	100.00	100.00

2.2 沉砂口直径的影响

锥角 60°、给矿压力 0.2 MPa、溢流管直径 22 mm 条件下,考察了旋流器沉砂口直径对分级效果的影响,结果见表 5。由表 5 可知,随着沉砂口直径由 8 mm 增至 16 mm,旋流器沉砂产率由 38.33% 上升至 60.64%;沉砂中 Pb、Ag 品位降低,溢流中 Pb 品位变化不大、Ag 品位提高。分离试验结果表明,旋流器沉砂中铅、银均被明显富集,给矿压力 0.2 MPa、溢流管直径 22 mm 条件下,沉砂口直径 8~16 mm,沉砂中 Pb 品位均能达到计价标准。

2.3 角锥比条件对比

旋流器的角锥比(沉砂口直径与溢流管直径的比值)对沉砂和溢流的产率分配及旋流器的分级效果有重要影响^[9]。为了进一步稳定高铅银精矿中的铅品位,在锥角 60°、给矿压力 0.2 MPa 基础上进一步优化角锥比,结果见表 6。由表 6 可知,随着角锥比

表 5 旋流器沉砂口直径对分级效果的影响

Table 5 Influence of underflow orifice diameter of cyclone on classification

沉砂口 直径/mm	产品名称	浓度/ %	产率/ %	Pb 品位/ %	Ag 品位/ (g·t ⁻¹)	回收率/%	
						Pb	Ag
8	溢流	9.46	61.67	3.05	1 581.74	25.32	27.66
	沉砂	57.75	38.33	14.47	6 655.99	74.68	72.34
	给矿	13.92	100.00	7.43	3 526.71	100.00	100.00
12	溢流	9.18	50.75	3.11	1 623.36	20.55	20.94
	沉砂	29.45	49.25	12.39	6 316.29	79.45	79.06
	给矿	13.89	100.00	7.68	3 934.48	100.00	100.00
14	溢流	9.06	44.77	3.06	1 645.60	18.02	20.66
	沉砂	24.58	55.23	11.28	5 122.20	81.98	79.34
	给矿	13.91	100.00	7.60	3 565.87	100.00	100.00
16	溢流	9.04	39.36	3.13	1 651.16	16.29	18.48
	沉砂	21.35	60.64	10.44	4 728.03	83.71	81.52
	给矿	13.90	100.00	7.56	3 517.08	100.00	100.00

表 6 旋流器角锥比对分级效果的影响

Table 6 Influence of cyclone angle-cone ratio on classification

角锥比	产品名称	浓度/ %	产率/ %	Pb 品位/ %	Ag 品位/ (g·t ⁻¹)	回收率/%	
						Pb	Ag
0.417 (10/24)	溢流	8.47	62.67	2.74	1 602.19	26.79	28.32
	沉砂	37.15	37.33	12.57	6 447.97	73.21	71.68
	给矿	12.76	100.00	6.41	3 472.93	100.00	100.00
0.455 (10/22)	溢流	8.58	61.39	2.59	1 556.23	25.24	29.21
	沉砂	40.41	38.61	12.20	6 331.14	74.76	70.79
	给矿	12.76	100.00	6.30	3 338.93	100.00	100.00
0.462 (12/26)	溢流	8.52	60.03	3.11	1 740.76	33.5	35.79
	沉砂	36.48	39.97	12.00	6 069.10	66.5	64.21
	给矿	12.88	100.00	6.13	3 211.13	100.00	100.00
0.500 (12/24)	溢流	8.32	58.85	2.86	1 666.73	26.42	28.76
	沉砂	30.44	41.15	11.39	5 905.64	73.58	71.24
	给矿	12.69	100.00	6.37	3 410.99	100.00	100.00

由 0.417 (10/24) 增加到 0.500 (12/24), 沉砂产率由 37.33% 提高至 41.15%, 但沉砂中 Pb、Ag 品位均降低, 其中, 角锥比 0.455 (溢流管直径 22 mm、沉砂口直径 10 mm) 条件下, Pb 品位超过 12%, 且铅、银回收率接近峰值。

2.4 给矿浓度条件对比

结合生产过程中银精矿浮选产品的浓度波动, 在锥角 60°、给矿压力 0.2 MPa、溢流管直径 22 mm、沉砂口直径 10 mm 条件下, 考察了旋流器给矿浓度对分级效果的影响, 结果见表 7。由表 7 可知, 旋流器给矿浓度降低(由 15.69% 降至 3.81%), 沉砂产率波动且有所下降, 但下降幅度小于其浓度的变化; 沉砂浓度下降较明显; 沉砂中铅品位有小幅波动且在 11% 以上, 回收率有所下降; 沉砂中银品位波动幅度超过 300 g/t, 回收率相对稳定。综上可知, 给矿浓度降低对溢流、沉砂浓度影响较大, 对产率、品位、回收率影响较小。

表7 旋流器给矿浓度对分级效果的影响

Table 7 Influence of cyclone feed concentration on classification

给矿浓度/%	产品名称	浓度/%	产率/%	Pb品位/%	Ag品位/(g·t ⁻¹)	回收率/%	
						Pb	Ag
15.69	溢流	10.49	50.23	2.95	1 823.83	20.68	25.08
	沉砂	31.39	49.77	11.42	5 497.11	79.32	74.92
	给矿	15.69	100.00	7.17	3 652.17	100.00	100.00
10.47	溢流	6.59	48.69	3.03	1 689.93	20.45	23.22
	沉砂	23.80	51.31	11.19	5 303.48	79.55	76.78
	给矿	10.47	100.00	7.22	3 543.90	100.00	100.00
9.76	溢流	6.33	50.49	2.71	1 608.92	20.00	23.25
	沉砂	21.81	49.51	11.05	5 415.81	80.00	76.75
	给矿	9.76	100.00	6.84	3 493.86	100.00	100.00
6.74	溢流	4.48	53.45	2.89	1 664.50	22.83	26.40
	沉砂	16.03	46.55	11.22	5 328.42	77.17	73.60
	给矿	6.74	100.00	6.77	3 369.96	100.00	100.00
3.81	溢流	2.62	57.27	2.77	1 637.80	24.77	28.01
	沉砂	9.83	42.73	11.28	5 641.32	75.23	71.99
	给矿	3.81	100.00	6.41	3 348.35	100.00	100.00

2.5 给矿压力条件对比

考虑到试验时给矿泵功率的配置及生产过程中压力的波动,进行旋流器给矿压力条件试验,结果见表8。随着给矿压力从0.30 MPa降至0.10 MPa,沉砂产率下降,沉砂浓度也有所降低;沉砂中铅品位呈现小幅波动但皆在10%以上,其回收率也有所下降;沉砂中银品位随着沉砂产率变化较明显,但回收率相对稳

定。结果表明,随着给矿压力增加,沉砂产率上升但相对稳定,沉砂中银品位有所降低。其中,给矿压力0.20 MPa时,沉砂中铅、银品位高,回收率接近峰值,分离效果好。

表8 旋流器给矿压力对分级效果的影响

Table 8 Influence of cyclone feed pressure on classification

给矿压力/MPa	产品名称	浓度/%	产率/%	Pb品位/%	Ag品位/(g·t ⁻¹)	回收率/%	
						Pb	Ag
0.30	溢流	8.40	51.81	2.71	1 609.38	21.26	26.02
	沉砂	28.74	48.19	10.79	4 918.76	78.74	73.98
	给矿	12.75	100.00	6.60	3 204.21	100.00	100.00
0.20	溢流	8.56	51.82	2.87	1 762.67	21.52	26.99
	沉砂	26.95	48.18	11.26	5 129.31	78.48	73.01
	给矿	12.75	100.00	6.91	3 384.55	100.00	100.00
0.15	溢流	8.71	52.64	3.20	1 780.90	24.31	27.96
	沉砂	26.28	47.36	11.07	5 098.29	75.69	72.04
	给矿	12.75	100.00	6.93	3 352.14	100.00	100.00
0.10	溢流	8.91	53.24	3.43	1 841.79	26.50	27.54
	沉砂	25.03	46.76	10.83	5 515.89	73.50	72.46
	给矿	12.75	100.00	6.89	3 559.87	100.00	100.00

2.6 试验结果汇总

根据银、铅的计价系数,从铅、银品位及金属量两个方面对前述试验所得旋流器溢流、沉砂进行经济价值计算^[10],银和铅计价系数分别见表9和表10。其中银的价格参照上海证券交易所2#银价行情。

表9 银计价系数

Table 9 Pricing coefficients of silver

2#银价格/(元·g ⁻¹)	不同Ag品位(g/t)精矿的计价系数/%										
	[1 000,1 500)	[1 500,2 000)	[2 000,2 500)	[2 500,3 000)	[3 000,3 500)	[3 500,4 000)	[4 000,4 500)	[4 500,5 000)	[5 000,5 500)	[5 500,6 000)	[6 000,∞)
[3.50,4.00)	68.7	71.7	73.7	75.7	77.2	79.2	81.2	82.2	83.2	84.0	84.3
[4.00,4.50)	72.7	75.7	77.7	79.7	81.2	82.2	83.2	84.2	85.2	86.0	86.3
[4.50,5.00)	74.2	77.2	79.7	82.2	83.2	84.2	85.2	86.2	87.2	88.0	88.3
[5.00,5.50)	76.7	79.7	81.7	83.7	84.7	85.7	86.7	87.7	88.7	89.5	89.8
[5.50,6.00)	80.7	82.7	83.7	84.7	85.7	86.7	87.7	88.7	89.7	90.5	90.8
[6.00,6.50)	81.7	83.7	84.7	85.7	86.7	87.0	88.7	89.7	90.7	91.5	91.8
[6.50,7.00)	82.7	84.7	85.7	86.7	87.7	88.7	89.7	90.7	91.7	92.5	92.8

表10 铅计价系数

Table 10 Pricing coefficients of lead

铅品位/%	单价/(元·t ⁻¹)
[10,15)	2 500
[15,20)	3 000
[20,30)	6 700
[30,40)	8 350
[40,∞)	协商计价

以100型旋流器在给矿压力0.2 MPa、锥角60°、沉砂口直径12 mm、溢流管直径22 mm条件下所得产品为例,按100 t原银精矿计,即给矿100 t,可分别获得

低铅银精矿(溢流)50.75 t、高铅银精矿(沉砂)49.25 t,当日(2023年4月13日)银价5.663元/g,产品价值估算结果见表11。可见,利用旋流器从目前的银精矿中分离出铅品位大于12%的高铅银精矿是可行的。

围绕试验要求,高铅银精矿铅品位应大于12%,根据旋流器条件试验结果,结合生产实际,银精矿浮选泡沫浓度(质量分数)10%~15%,再对比吨精矿价格变化,确定100型水力旋流器的结构参数和操作参数为:锥角60°、给矿压力0.2 MPa、给矿浓度(质量分数)13.89%、溢流管直径22 mm、沉砂口直径12 mm、角锥比0.455。在该条件下,可从银精矿中分离出产率

表 11 产品价值估算结果

Table 11 Estimated value of products

产品名称	产量/t	Pb 品位/%	Pb 单价/(元·t ⁻¹)	Pb 总价/元	Ag 品位/(g·t ⁻¹)	Ag 计价系数/%	Ag 单价/(元·g ⁻¹)	Ag 总价/元	总价(Pb+Ag)/元
溢流	50.75	3.11	—	0	1 623.36	82.7	4.683	385 811.39	385 811.39
沉砂	49.25	12.39	2 500	15 255.19	6 316.29	90.8	5.142	1 599 559.39	1 614 814.58
给矿	100.00	7.68	—	0	3 934.48	86.7	4.910	1 931 829.68	1 931 829.68

49.25%、铅品位 12.39%、铅回收率 79.45%、银品位 6 316.29 g/t、银回收率 79.06%的高铅银精矿和银品位 1 623.36 g/t的低铅银精矿。相较于单一银精矿方案,高、低铅银精矿双产品方案产品经济价值可提升 687.96 元/t。

3 结论

1) 银精矿中 Pb 品位为 7.04%,主要杂质为 SiO₂;样品粒度细,其中-18 μm 粒级占比 79.38%;理论上采用离心沉降法可获得铅正累计品位 13.15%、铅回收率 83.79%的高品位含铅产品。

2) 采用 100 型水力旋流器,在锥角 60°、给矿压力 0.2 MPa、给矿浓度(质量分数) 13.89%、溢流管直径 22 mm、沉砂口直径 12 mm、角锥比 0.455 条件下,可从银精矿中分离出产率 49.25%、铅品位 12.39%、铅回收率 79.45%、银品位 6 316.29 g/t、银回收率 79.06%的高铅银精矿和银品位 1 623.36 g/t 的低铅银精矿。高、低铅银精矿双产品方案的价值比原银精矿价值提升了 687.96 元/t。

参考文献(References):

- [1] 王军,谭永仁,刘传泽. 银精矿全湿法处理富集贵金属的研究应用[J]. 中国有色冶金, 2019,48(5):36-39.
WANG Jun, TAN Yongren, LIU Chuanze. Research and application of total hydrometallurgical treatment of silver concentrate for enrichment of precious metals[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2019, 48(5):36-39.
- [2] 陈晓芳,吴双桥. 某含铅金精矿中回收铅的试验研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2018(5):49-52.
CHEN Xiaofang, WU Shuangqiao. Experimental research on recovery of lead from a lead-bearing gold concentrate[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2018(5):49-52.
- [3] 刘国晨. 旋流器脱泥提升某氧化铜矿浮选指标的工业试验研究[J]. 矿冶工程, 2023,43(3):89-92.
LIU Guochen. Industrial experiment on cyclone desliming to improve

flotation performance of copper oxide ore[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023,43(3):89-92.

- [4] RODRIGUEZ A N, NAVARRO R B A, HOCES D C M, et al. Laboratory-scale optimization of celestine concentration using a hydrocyclone system[J]. Applied Sciences, 2023,13(18):10206.
- [5] 褚良银,罗蓓,余仁焕. 充气水力旋流器分选过程离心力强度的研究[J]. 金属矿山, 1995(12):38-41.
CHU Liangyin, LUO Qian, YU Renhuan. Research on the centrifugal field strength in the air-sparged hydrocyclone separation process[J]. Metal Mine, 1995(12):38-41.
- [6] 卢涛,吴启明,张红华,等. 大山选矿厂一段磨矿分级旋流器优化研究[J]. 铜业工程, 2020(3):17-20.
LU Tao, WU Qiming, ZHANG Honghua, et al. Optimization of the hydrocyclones in first stage grinding and classification system in dashan concentration plant[J]. Copper Engineering, 2020(3):17-20.
- [7] 魏可峰,赵强,崔晓亮,等. 锥角对水力旋流器流场及分离性能影响的数值试验研究[J]. 金属矿山, 2019(4):147-153.
WEI Kefeng, ZHAO Qiang, CUI Xiaoliang, et al. Effects of cone angle on the flow field and separation performance of hydrocyclones[J]. Metal Mine, 2019(4):147-153.
- [8] NI L, TIAN J, SONG T, et al. Optimizing geometric parameters in hydrocyclones for enhanced separations: A review and perspective[J]. Separation & Purification Reviews, 2019,48(1):30-51.
- [9] 唐绍义,王峰,季安坤. 选矿用旋流器选型及运行参数试验研究[J]. 河南科技, 2023,42(21):41-44.
TANG Shaoyi, WANG Feng, JI Ankun. Experimental study on selection and operation parameters of cyclone for mineral processing[J]. Henan Science and Technology, 2023,42(21):41-44.
- [10] 谷海峰. 多金属矿工业指标论证:以某锌多金属矿床为例[J]. 矿业工程, 2020,18(3):4-9.
GU Haifeng. Industry index demonstration of polymetallic ore: Taking a certain zinc polymetallic deposit as an example[J]. Mining Engineering, 2020,18(3):4-9.
- 引用本文:王宇思,李茂林,崔瑞,等. 基于水力旋流器分选的某银精矿双产品方案研究[J]. 矿冶工程, 2025,45(1):65-69.
WANG Yusi, LI Maolin, CUI Rui, et al. Processing scheme of separating a silver concentrate into two products by hydrocyclone [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(1):65-69.