锥尾平底宽度对水力旋流器分离性能的影响研究①

徐寒冰[1]，肖展航[1]，黄礼龙[2]，崔瑞[3]
（1.长沙矿冶研究院有限责任公司，湖南 长沙 410012；2.五矿有色金属股份有限公司，北京 100044；3.武汉科技大学 资源与环境工程学院，湖北 武汉 430081）

摘　要：针对 Φ838 mm 大型水力旋流器在高浓度粗粒度分级中的溢流跑粗问题，提出了一种通过截断锥体在其尾部形成圆环状小平底的结构设计。采用计算流体力学方法，系统研究了不同锥尾平底宽度对旋流器分离性能的影响。结果表明，锥尾平底宽度由 0 增至 50.28 mm 时，旋流器溢流中极粗粒级（+212 μm 粒级）产率由 49.97%降至 28.08%，而有效粒级（10～212 μm 粒级）产率由 40.64%增至 57.80%。基于相似原理建立 Φ100 mm 旋流器缩比模型并开展实验室试验，发现 Φ100 mm 旋流器分离性能随锥尾平底宽度的变化趋势与 Φ838 mm 旋流器仿真计算结果高度吻合，由此验证了高浓度、粗粒度分级条件下，锥尾平底结构可有效抑制溢流跑粗，提高有效粒级含量。

关键词：水力旋流器；锥尾平底宽度；数值仿真；相似原理；旋流器分离
中图分类号：TD921　　**文献标志码**：A　　doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2026.02.012
文章编号：0253-6099(2026)02-0083-06

Influence of Ring Width of Annular Flat Bottom of Conical Section on Separation Performance of Hydrocyclone

XU Hanbing[1], XIAO Zhanhang[1], HUANG Lilong[2], CUI Rui[3]
(1. *Changsha Research Institute of Mining and Metallurgy Co., Ltd.*, *Changsha* 410012, *Hunan*, *China*; 2. *Minmetals Nonferrous Metals Co., Ltd.*, *Beijing* 100044, *China*; 3. *School of Resources and Environmental Engineering*, *Wuhan University of Science and Technology*, *Wuhan* 430081, *Hubei*, *China*)

Abstract: To address the problem of discharged overflow carrying coarse particles during classification of high-concentrated and coarse-grained ores with a large-scale hydrocyclone (Φ838 mm), it was proposed that the cone section of a hydrocyclone was truncated and an annular flat bottom was constructed. Using computational fluid dynamics (CFD), a systematic study was conducted on the influence of different ring width of that annular flat bottom on the hydrocyclone separation performance. The results show that when the ring width increases from 0 to 50.28 mm, the yield of extremely coarse particles within the size fraction (+212 μm) in the hydrocyclone overflow decreases from 49.97% to 28.08%, and the yield of particles within the size fraction (10－212 μm) increases from 40.64% to 57.80%. A scaled-down hydrocyclone model (Φ100 mm) was fabricated based on the similarity principle, and laboratory tests were carried out with it. It is found that in variation of the separation performance of the Φ100 mm hydrocyclone with the ring width of annular flat bottom is highly consistent with the simulation results of the Φ838 mm hydrocyclone. This has verified that the classification of high-concentrated and coarse-grained ore, a hydrocyclone with its conical section structured with an annular flat bottom can effectively prevent overflow of coarse particles and increase the percentage of particles within the effective size fractions.

Key words: hydrocyclone; ring width of annular flat bottom; numerical simulation; similarity principle; hydrocyclone separation

秘鲁拉斯邦巴斯铜矿选矿厂采用“粗碎-半自磨-球磨-铜钼混合浮选-粗精矿再磨、精选”的工艺流程。其中二段磨矿分级采用球磨机与 Φ838 mm 旋流器构成闭路磨矿，旋流器给矿浓度（质量分数）大于 60%，

① **收稿日期**：2025-10-30
基金项目：国家重点研发计划（2022YFC2904602）；中国五矿科技专项计划（2022ZXB04）
作者简介：徐寒冰（1989—），男，湖北咸宁人，硕士，工程师，主要研究方向为粉体精密分级理论及复杂矿石分选工艺。E-mail：icebing417@163.com

给矿最大颗粒直径可达19.05 mm,-0.074 mm粒级占20.22%,属于典型的高浓度、粗粒度分级。对二段磨矿分级进行流程考查发现,旋流器溢流中D_{80}为260 μm,粗于设计粒度(240 μm),且粗粒级(+212 μm粒级)产率为21.75%,过粗粒级不利于后续浮选作业,导致有价成分损失到尾矿中,造成资源浪费。已有研究表明,旋流器柱型平底结构、渐缩型平底结构可提高高浓度、粗颗粒分级的大直径旋流器的分级精度,降低溢流跑粗概率[1]。但现有研究多集中于小型旋流器或单一工况条件,对具有平底结构的大直径旋流器研究极少,更缺乏对锥尾平底宽度的定量研究。本文提出一种通过截断锥体在其尾部形成圆环状小平底的结构设计,针对Φ838 mm大型水力旋流器开展锥尾平底宽度结构参数的数值仿真研究,并基于相似原理,设计一种Φ100 mm旋流器进行实验室试验以验证模拟结果,旨在为拉斯邦巴斯铜矿选矿厂设计适合高浓度、粗粒度分级的旋流器结构参数,以提高现场旋流器分级效率,减少溢流中过粗粒级含量。

1 数值模拟设置

1.1 旋流器结构参数设计

以直径D=838 mm的大型水力旋流器为研究对象,通过截断锥体在锥底形成一个圆环状的小平底,其锥尾平底宽度a从0增至0.075D,即从0增至62.85 mm。Φ838 mm水力旋流器的结构参数为:给矿口当量直径D_i为304.80 mm(实际大小为330.20 mm×220.86 mm),溢流口直径D_o为355.60 mm,锥角θ为20°,沉砂口直径D_u为241.30 mm。利用三维制图软件建立不同锥尾平底宽度的旋流器流体域的物理模型[2-3],Φ838 mm水力旋流器的设计参数见表1。

表1 Φ838 mm水力旋流器设计参数

Table 1 Design parameters of Φ838 mm hydrocyclone

旋流器高度H/mm	锥段高度h/mm	锥尾平底宽度a	锥尾平底宽度/mm
3 043.55	1 692.59	0	0
2 971.53	1 620.57	0.015D	12.57
2 899.50	1 548.54	0.030D	25.14
2 827.48	1 476.52	0.045D	37.71
2 755.45	1 404.49	0.060D	50.28
2 683.43	1 332.47	0.075D	62.87

为便于对比锥尾平底宽度变化对旋流器内部流场特性的影响,选取X=0中心平面、垂直于轴线的Y特征面以及与其相交的y特征线进行分析。Φ838 mm水力旋流器结构示意图如图1所示。

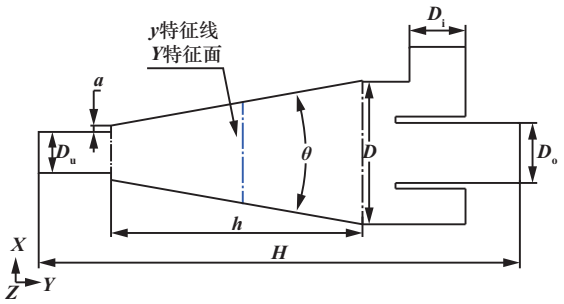


图1 Φ838 mm水力旋流器结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of Φ838 mm hydrocyclone

1.2 旋流器给矿颗粒相性质

试验旋流器给矿颗粒相参考现场旋流器给矿物料性质,矿石密度2.9 g/cm³,浓度(质量分数,下同)约59%。Φ838 mm旋流器给料颗粒粒度分布如表2所示。

表2 Φ838 mm旋流器给料颗粒粒度分布

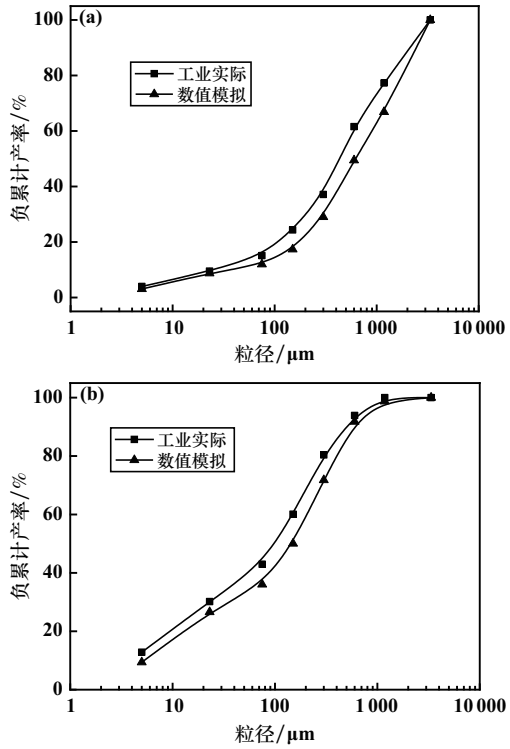
Table 2 Particle size distribution of feed material in Φ838 mm hydrocyclone

粒径/μm	平均粒度/μm	产率/%	负累计产率/%	体积分数/%
+1 700	3 350	17.75	100.00	6.011
-1 700+850	1 180	12.34	82.25	4.179
-850+425	600	20.20	69.91	6.840
-425+212	300	16.55	49.71	5.604
-212+106	150	9.55	33.16	3.234
-106+53	75	6.24	23.61	2.113
-53+10	23	11.24	17.37	3.806
-10	5	6.13	6.13	2.076
合计		100.00		33.863

1.3 模型可靠性验证

为验证数值模拟方法的可靠性,采用锥尾平底宽度a=0的旋流器,在与工业实际工况相同的条件下开展旋流器分离模拟试验。首先通入给料速度为5 m/s的清水,得到一个相对稳定的水-气流场,然后根据上述数据通入不同体积占比、不同粒径的颗粒相,并得到一个相对稳定的水-气-固多相流流场。记录各颗粒相的质量流量并计算各颗粒粒径分布,得到溢流和沉砂中颗粒的粒度分布曲线,并与工业流程考查得到的数据进行对比。Φ838 mm旋流器模拟可靠性验证结果如图2所示。结果表明,工业实际和数值模拟的沉砂和溢流粒度组成均相近,其负累计产率变化趋势基本一致。存在少许差异可能是由于模拟过程中忽略了颗粒间的碰撞,碰撞产生的作用力对分级存在一定影响,造成各粒级含量存在一定差异。综合来说,数值模拟结果与工业实际数据趋势相同,说明本文的计算模型选择和边界条件设置能够较好地模拟水力旋流器的流

场特性与分离性能。



(a) 沉砂; (b) 溢流

图 2　Φ838 mm 旋流器模拟可靠性验证结果

Fig.2　Reliability verification of Φ838 mm hydrocyclone by simulation

2　数值模拟结果

2.1　分级指标

锥尾平底宽度对旋流器分离性能指标的影响如表 3 所示,其中沉砂分流比指正常生产旋流器的沉砂产物与给矿产物的体积流量之比。由表 3 可知,随着锥尾平底宽度 a 增大,沉砂产率先增大后减小,溢流产率、溢流浓度及沉砂浓度均先减小后增大,且在$a=0.060D$时出现拐点。沉砂分流比随着锥尾平底宽度增大先增大后减小,说明沉砂中流量变化的速度大于其产品产率变化的速度,导致沉砂浓度先减小后增大。

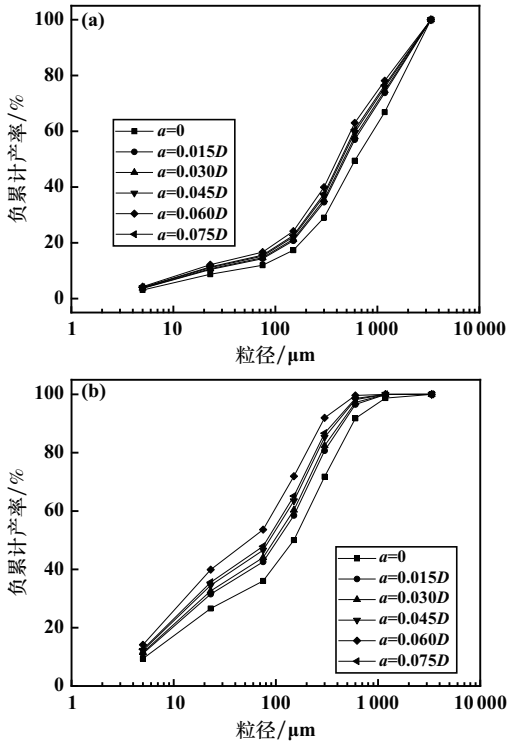
表 3　锥尾平底宽度对旋流器分离性能指标的影响

Table 3　Effect of ring widths of annular flat bottom on separation performance indicators of cyclones

锥尾平底宽度 a	浓度/%		产率/%		沉砂分流比/%
	沉砂	溢流	沉砂	溢流	
0	74.70	49.32	51.86	48.14	34.89
0.015D	71.30	45.04	66.72	33.28	48.93
0.030D	70.78	44.17	69.38	30.62	51.66
0.045D	69.97	42.76	73.17	26.83	55.68
0.060D	68.07	39.21	81.25	18.75	65.10
0.075D	69.50	42.02	75.04	24.96	57.80

2.2　分级产品粒度分布

锥尾平底宽度对分级产品粒度分布的影响如图 3 所示。由图 3 可知,随着锥尾平底宽度增加,旋流器溢流粒度整体有变细的趋势;$a=0.060D$ 时,旋流器溢流粒度达到最细;继续增大锥尾平底宽度,旋流器溢流粒度变粗。旋流器沉砂粒度组成变化趋势与溢流相同,但变化不明显。



(a) 沉砂; (b) 溢流

图 3　锥尾平底宽度对分级产品粒度分布的影响

Fig.3　Effect of ring widths of annular flat bottom on particle size distribution of products after classification

参考生产现场指标,以+212 μm 粒级为极粗粒级,10~212 μm 粒级为中间易选粒级,-10 μm 粒级为极细粒级,锥尾平底宽度对分级产品粒度组成的影响如表 4 所示。由表 4 可知,随着锥尾平底宽度由 0 增加到0.060D,旋流器溢流中极粗粒级产率由 49.97%降至 28.08%,中间易选粒级产率由 40.64%增至 57.80%,而极细粒级产率由 9.39%增至 14.12%。由此可知,锥尾平底宽度为 0.060D 时,可有效减少旋流器溢流中极粗粒级含量,提高有效粒级产率。

2.3　分级效率

锥尾平底宽度对 Φ838 mm 旋流器沉砂分离效率的影响如图 4 所示。从图 4 可以看出,锥尾平底宽度的变化对细颗粒沉砂分离效率的影响较小,主要影响粗粒级和中间粒级颗粒的沉砂分离效率。这是由于被外旋流裹挟并流向沉砂口的细颗粒含量较少。随着锥

表4 锥尾平底宽度对分级产品粒度组成的影响

Table 4 Effect of ring widths of annular flat bottom on particle size composition of products after classification

产品名称	锥尾平底宽度 a	粒级产率/%		
		中间粒级	极细粒级	极粗粒级
沉砂	0	14.26	3.08	82.66
	0.015D	17.07	3.67	79.26
	0.030D	17.51	3.77	78.72
	0.045D	18.20	3.92	77.88
	0.060D	19.91	4.28	75.81
	0.075D	18.63	4.01	77.36
溢流	0	40.64	9.39	49.97
	0.015D	47.36	11.13	41.51
	0.030D	48.81	11.52	39.67
	0.045D	51.27	12.21	36.52
	0.060D	57.80	14.12	28.08
	0.075D	52.55	12.57	34.88

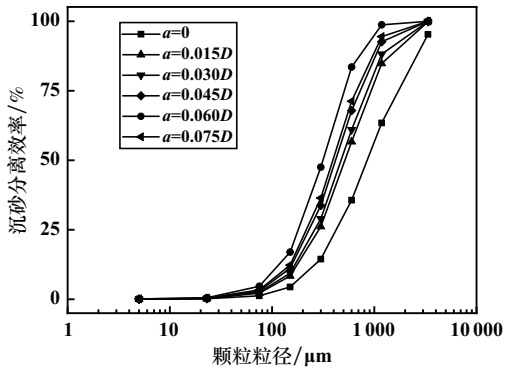


图4 锥尾平底宽度对 Φ838 mm 旋流器沉砂分离效率的影响

Fig.4 Effect of ring widths of annular flat bottom on yield of underflow from Φ 838 mm hydrocyclone

尾平底宽度增大,沉砂产品中粗颗粒和中颗粒的分离效率均先增大后减小,其变化拐点在 $a=0.060D$ 处,说明合适的锥尾平底宽度有助于提高分级效率。

为进一步分析锥尾平底宽度对分离性能的影响,采用清晰度指数 M、不完整度 I 来评价分离效率曲线[4],计算公式为:

$$M=\frac{d_{75}}{d_{25}} \tag{1}$$

$$I=\frac{d_{75}-d_{25}}{2d_{50}} \tag{2}$$

式中:d_{25}、d_{50}、d_{75} 分别表示分离效率曲线上分配率25%、50%、75%对应的颗粒粒度,μm。

清晰度指数 M 越趋近1,表示旋流器的分离效果越好;不完整度 I 越趋近0,表示旋流器分离精度越高。锥尾平底宽度对 Φ838 mm 旋流器分离效率指标的影响如表5所示。由表5可知,随着锥尾平底宽度增大,分离粒度 d_{50}、清晰度指数 M、不完整度 I 均呈现先减小后增大的趋势,在锥尾平底宽度 $a=0.060D$ 时均达到最小值,说明锥尾平底宽度0.060D的平底旋流器分离效果更好、分离精确度更高。

表5 锥尾平底宽度对 Φ838 mm 旋流器分离效率指标的影响

Table 5 Effect of ring width of annular flat bottom on separation performance indices of Φ838 mm hydrocyclone

锥尾平底宽度 a	分离粒度 d_{50}/μm	清晰度指数 M	不完整度 I
0	817	4.281	0.888
0.015D	514	2.862	0.523
0.030D	471	2.840	0.523
0.045D	418	2.895	0.537
0.060D	316	2.651	0.486
0.075D	394	2.902	0.541

3 实验室验证试验

3.1 基于相似原理的关键参数计算

采用 Φ838 mm 大型旋流器在实验室进行试验存在较大难度,基于相似准则和相似流体特性,利用 Φ100 mm 水力旋流器开展实验室缩比试验,以此来验证锥尾平底宽度能否改善溢流产品质量的模拟结果。

3.1.1 几何相似性主导缩放

水力旋流器的缩比试验需遵循几何相似准则[5],使其内部流场结构相似,以实现相似的分离效果。设置相似倍数 λ,即直径比例因子:

$$\lambda=\frac{D}{D'}=\frac{838}{100}=8.38 \tag{3}$$

式中 D'为 Φ100 mm 旋流器的直径。

将旋流器参数给矿口当量直径、溢流管直径、沉砂管直径、旋流器高度及锥段高度均按比例缩小,锥尾平底宽度亦从 $a=0$ 增至 $a=0.075D'$,即从0增至7.5 mm。旋流器锥角20°不变,以确保流体在旋流器内的螺旋运动轨迹相似。

3.1.2 流体动力相似性修正

流体动力相似准则要求流体在旋流器内的作用力相似[6],需满足弗劳德数(F_r)、欧拉数(E_u)等关键无量纲数匹配。弗劳德数体现了惯性力与重力的相对大小,F_r 相同可保持流体的动力特性相似,其表达式见式(4);欧拉数反映了压力与惯性力的比值,E_u 相同即压力作用效果相似,具体表达式见式(5)。

$$F_r=\frac{v}{\sqrt{gL}} \tag{4}$$

$$E_u=\frac{\Delta p}{\rho v^2} \tag{5}$$

式中:v 为流体平均流速,m/s;g 为重力加速度,m/s^2;L 为特征长度(满足几何相似),m;Δp 为给料压力,

MPa;ρ 为流体密度,kg/m^3。

保持 F_r、E_u 相同,根据式(4)~(5)计算得到,Φ100 mm 旋流器给料压力 Δp=0.009 MPa,给料流量 Q'=1.62 L/s。

3.1.3　颗粒运动相似性修正

颗粒运动相似要求流体在旋流器内的流动状态相似,主要涉及颗粒在旋流器内的运动轨迹、受力情况以及分离粒度的计算和调整[7]。由经验公式可知,θ=20°旋流器的理论分离粒度计算公式为:

$$d_{50} \approx 462\sqrt{\frac{D^{0.36}D_o^{0.64}D_i\rho^{0.5}\mu}{(\rho_s-\rho)(3D-2D_o)\Delta p^{0.5}}} \tag{6}$$

式中:μ 为流体黏度,Pa·s;ρ_s 为颗粒密度,t/m^3。

根据 Φ838 mm 旋流器相关参数,计算得到给料矿浆密度为 1.63 t/m^3、浓度为 33.2%、给料矿浆黏度为 0.0036 Pa·s。

假设 2 种旋流器的给料矿浆密度、黏度、颗粒密度都不变,由式(6)计算得到 Φ100 mm 旋流器的分离粒度 d_{50}=60 μm,则 2 种旋流器的粒径缩比倍数 α 为:

$$\alpha = \frac{d_{50}}{d'_{50}} = \frac{817}{60} = 13.62 \tag{7}$$

根据 Φ838 mm 旋流器的给料粒度分布,按照粒径缩比倍数 α=13.62,将颗粒缩比到 Φ100 mm 旋流器的给料中,以确保颗粒运动的相似性。给料颗粒粒径换算结果如表 6 所示。

表 6　给料颗粒粒径换算结果

Table 6　Conversion results of feed particle size

旋流器给料粒径/μm		Φ100 mm 旋流器粒级产率/%	
Φ838 mm	Φ100 mm	产率	负累计产率
+1 700	+129	17.75	100.00
−1 700+850	−129+64	12.34	82.25
−850+425	−64+32	20.20	69.91
−425+212	−32+16	16.55	49.71
−212+106	−16+8	9.55	33.16
−106+53	−8+4	6.24	23.61
−53+10	−4+0.76	11.24	17.37
−10	−0.76	6.13	6.13

为了更准确地描述颗粒粒度分布,采用 Rosin-Rammler 公式进行粒度拟合:

$$R(x) = 100\exp\left(-\frac{x}{x'}\right)^n \tag{8}$$

式中:x 为颗粒粒度,μm;x'为特征颗粒粒度,μm;n 为分布指数;$R(x)$为粒度大于 x 的颗粒正累计产率,%。

通过拟合 Φ838 mm 旋流器给料粒度分布数据,得到 Φ100 mm 旋流器给料颗粒的粒径分布拟合式为:

$$R(x) = 100\exp\left(-\frac{x}{63.12}\right)^{0.648\,9} \tag{9}$$

根据式(9)和粒度分布数据,得到 Φ100 mm 旋流器给料颗粒粒度分布,如表 7 所示。

表 7　Φ100 mm 旋流器给料颗粒粒度分布

Table 7　Particle size distribution of feed for Φ100 mm hydrocyclone

粒径/μm	平均粒度/μm	粒级产率/%	负累计产率/%
+150	200	5.57	100.00
−150+106	125	25.51	94.43
−106+53	75	18.33	68.92
−53+10	23	4.80	50.59
−10	5	45.79	45.79

3.2　实验室试验

在同一工况条件下,对不同锥尾平底宽度的 Φ100 mm旋流器进行实验室试验研究,Φ100 mm 旋流器分离性能指标如表 8 所示。由表 8 可知,随着锥尾平底宽度增大,实验室试验中沉砂和溢流浓度、产率等指标与模拟试验的分离性能指标变化规律相似,沉砂产率亦先增大后减小,其他指标均先减小后增大,但其数据拐点有所不同。Φ838 mm 旋流器在锥尾平底宽度为 0.060D 时达到拐点,实验室试验中 Φ100 mm 旋流器在锥尾平底宽度为 0.030D 时达到拐点。这是因为,虽然 2 种旋流器的流场特性相似,但其尺寸效应仍对分离性能具有一定影响,小直径旋流器内流体惯性力占比更高,导致最佳锥尾平底宽度比例缩小。

表 8　Φ100 mm 旋流器分离性能指标

Table 8　Separation performance index of Φ100 mm hydrocyclones

锥尾平底宽度 a	浓度/%		产率/%	
	沉砂	溢流	沉砂	溢流
0	68.53	18.69	7.48	92.52
0.015D	67.18	17.89	8.08	91.92
0.030D	64.25	17.40	9.60	90.40
0.045D	68.22	19.60	7.78	92.22
0.060D	69.11	19.32	6.49	93.51
0.075D	69.91	19.41	6.16	93.84

锥尾平底宽度对 Φ100 mm 旋流器产品粒度分布的影响如图 5 所示,沉砂分离效率曲线如图 6 所示。从图 5~6 可以看出,Φ100 mm 旋流器沉砂和溢流的粒度分布均随着锥尾平底宽度增大先变细后变粗,沉砂分离效率先增大后减小,与 Φ838 mm 旋流器模拟结果的规律一致,说明适宜的锥尾平底宽度能提高旋流器的分离效果,有效减缓溢流跑粗现象。另外,实验室缩比试验进一步验证了模拟仿真的可靠性,表明锥尾平

底宽度的结构参数对旋流器的分离性能具有重要影响,为水力旋流器的优化设计和实际应用提供了一定的理论依据。

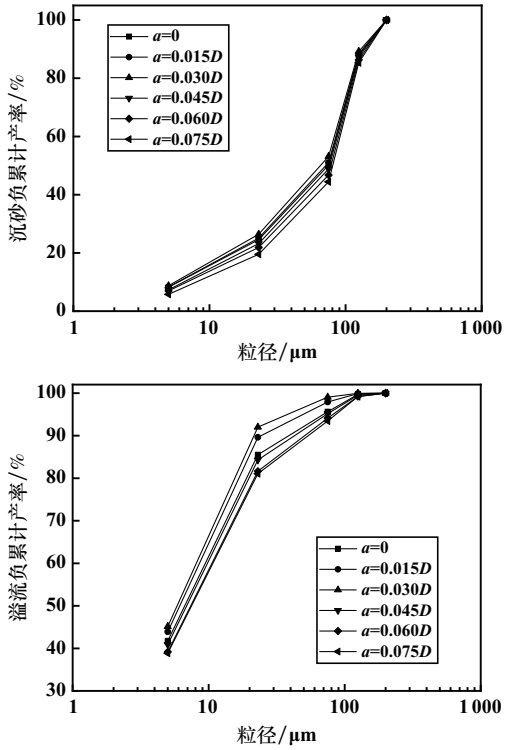


图5 锥尾平底宽度对 Φ100 mm 旋流器产品粒度分布的影响

Fig. 5 Effect of flat bottom width on particle size distribution of classification products from Φ100 mm hydrocyclone

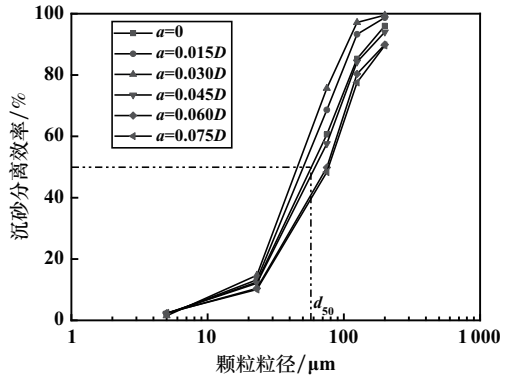


图6 Φ100 mm 旋流器沉砂分离效率曲线

Fig. 6 Underflow separation efficiency curve of Φ100 mm hydrocyclones

4 结论

1) 通过对不同锥尾平底宽度 Φ838 mm 水力旋流器进行仿真分析,发现锥尾平底宽度由0增至50.28 mm(0.060D)时,旋流器溢流粒度依次变细,分离效率依次提高,锥尾平底宽度超过50.28 mm后,旋流器溢流粒度变粗,分离效率降低。

2) Φ838 mm 旋流器最佳锥尾平底宽度为0.060D(50.28 mm),对比常规旋流器,旋流器溢流中极粗粒级(+212 μm)产率由49.97%降至28.08%,而有效粒级(10~212 μm)产率由40.64%增至57.80%。由此可知高浓度、粗粒度分级条件下,采用合适的锥尾平底结构可有效缓解旋流器溢流跑粗,提高溢流中有效粒级含量。

3) 采用基于相似准则的缩比试验方法,利用 Φ100 mm 旋流器开展了实验室试验,验证了 Φ838 mm 旋流器模拟结果的可靠性。

参考文献(References):

[1] 王书礼,王磊,崔宝玉,等. 平底结构对水力旋流器流场特性及分离性能影响[J]. 有色金属(选矿部分), 2022(6):141-146.
WANG Shuli, WANG Lei, CUI Baoyu, et al. Effect of flat bottom structure on flow field characteristics and separation performance of hydrocyclone[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2022(6):141-146.

[2] SU T L, ZHANG Y F. Effect of the axially inserted solid rod on the flow field characteristics and separation performance of a hydrocyclone[J]. ACS Omega, 2022,7(28):24208-24218.

[3] LAMSKOVA M I, FILIMONOV M I, NOVIKOV A E, et al. Modeling the classification ability of filtering hydrocyclone[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020,577(1):012011.

[4] 庞学诗. 水力旋流器理论与应用[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2005.
PANG Xueshi. Theory and application of hydrocyclones[M]. Changsha: Central South University Press, 2005.

[5] 曹传辉,黄雄林,刘石梅,等. 采矿船甲板上旋流器多维运动仿真研究[J]. 矿冶工程, 2021,41(4):41-43.
CAO Chuanhui, HUANG Xionglin, LIU Shimei, et al. Multi- dimensional motion simulation for hydrocyclone on the deck of mining vessel[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2021,41(4):41-43.

[6] 韩硕,蒋仲安,邓权龙. 矿井防尘供水管网水力特性的相似性研究[J]. 煤矿安全, 2017,48(6):40-43.
HAN Shuo, JIANG Zhongan, DENG Quanlong. Similar experimental study on hydraulic characteristics of mine dustproof water supply network[J]. Safety in Coal Mines, 2017,48(6):40-43.

[7] 马斌,张子良,猴文娟,等. 弗劳德数及雷诺数对泄洪洞高速水流掺气的影响[J]. 水资源与水工程学报, 2024,35(6):110-120.
MA Bin, ZHANG Ziliang, GOU Wenjuan, et al. Effect of Froude number and Reynolds number on aeration of high-speed flow in spillway tunnel[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2024,35(6):110-120.

引用本文:徐寒冰,肖展航,黄礼龙,等. 锥尾平底宽度对水力旋流器分离性能的影响研究[J]. 矿冶工程, 2026,46(2):83-88.
XU Hanbing, XIAO Zhanhang, HUANG Lilong, et al. Influence of ring width of annular flat bottom of conical section on separation performance of hydrocyclone[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(2):83-88.