文章编号:1674-2869(2025)03-0331-07

新型溢流管分离器流场及分离性能研究

马学良,赵 翔,汪 威*,林 纬,喻九阳
武汉工程大学机电工程学院,化工装备强化与本质安全湖北省重点实验室,湖北 武汉 430205

摘 要:针对现有固-液分离器颗粒捕捉能力弱、结构优化不足、分离效率低的现状,设计了两种新型溢流管结构的水力旋流器。采用计算流体力学(CFD)技术和实验等方法,研究了不同溢流管结构对旋流器流场、空气柱形成、压力分布、能量损失、速度场以及分离精度的影响。结果表明:渐缩型(b型)和渐扩型(c型)溢流管有效抑制了循环流和短路流,减少了能量损失,并显著提高了分离精度。尤其是c型旋流器,其溢流管底部的收缩结构抑制了短路流,显著提高了低密度颗粒的分离效率,避免了"溢流跑粗"现象。与传统旋流器(a型)相比,新型旋流器在提高回收率和分离效率方面表现出更好的性能,在处理细颗粒时更为明显。试验进一步证明了新型溢流管设计在提高固-液分离效率方面的优势。

关键词:固-液分离;旋流器;溢流管结构;计算流体力学;分离效率
中图分类号:TH12;TQ051.8 **文献标识码**:A **DOI**:10.19843/j.cnki.CN42-1779/TQ.202501013

Study on flow field and separation performance of hydrocyclones with novel overflow tube designs

MA Xueliang, *ZHAO Xiang*, *WANG Wei**, *LIN Wei*, *YU Jiuyang*
College of Mechanical and Electrical Engineering, Wuhan Institute of Technology,
Hubei Provincial Key Laboratory of Chemical Equipment Intensification and Intrinsic Safety, Wuhan 430205, China

Abstract: To address the limitations of current solid-liquid separators, including poor particle capture capability, suboptimal structural design, and low separation efficiency, this study proposed two novel overflow tube configurations for hydrocyclones. Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations and experimental methods were employed to systematically investigate the effects of these designs on flow field characteristics, air column formation, pressure distribution, energy loss, velocity profiles, and separation precision. Results demonstrated that both the converging (Type b) and diverging (Type c) overflow tubes effectively suppress recirculating and short-circuit flows, reduce energy dissipation, and significantly enhance separation accuracy. Notably, the Type c hydrocyclone features a converging structure at the overflow tube base, which mitigates short-circuit flow, markedly improving the separation efficiency of low-density particles, and preventing the "coarse particle overflow" phenomenon. Compared with conventional hydrocyclones (Type a), the novel designs exhibited superior performance in recovery rate and separation efficiency, particularly for fine particle processing. Experimental validation confirmed the advantages of the optimized overflow tube geometries in advancing solid-liquid separation efficiency, offering valuable insights for industrial separation applications.

Keywords: solid-liquid separation; hydrocyclone; overflow tube design; computational fluid dynamics; separation efficiency

收稿日期:2025-01-25
基金项目:湖北省技术创新专项基金(2021BEC025)
作者简介:马学良,硕士研究生。Email:439414371@qq.com
***通信作者**:汪 威,博士,副教授。Email:wangwwit@163.com
引文格式:马学良,赵翔,汪威,等.新型溢流管分离器流场及分离性能研究[J].武汉工程大学学报,2025,47(3):331-337.

水力旋流器作为一种理想的非均相液体混合物分离装置,广泛应用于分级、浓缩、分离、洗涤等作业中[1-2]。为应对矿产资源浮选需求的不断提高[3],必须提高旋流分离设备的分离效率,实现对分离产品“多收少跑”。

目前,对于旋流器的研究主要集中在工艺与结构优化等方面。Zhang等[4]利用计算流体力学(computational fluid dynamics,CFD)技术研究了振动工况下水力旋流器内流场特性,随着螺杆泵转速增加,旋流器分离效率降低。Liu等[5]针对“溢流跑粗”现象设计了一种混合螺旋结构溢流管,通过数值模拟发现,此结构能显著减少粗颗粒外排,提高溢流液质量。Cavalcante等[6]利用CFD研究过滤式水力旋流器内流场分布,对比常规水力旋流器发现,在圆柱区液体占比更高,锥形区有更高的固体浓度,更有利于固-液分离。Liu等[7]针对金属研磨过程中存在的“底流夹细”问题,开发了一种注水式水力旋流器,综合分级效率从69.22%提高到73.03%,缓解了中细颗粒夹带的现象。

当多相混合液通过切向入口进入旋流器时,由于切向入口的作用,混合液进入旋流腔后,产生强烈的旋转运动。因多相之间存在密度差,在离心力作用下,实现多相分离。如图1所示,旋流器内部流场[8]主要包括内旋流、外旋流、短路流和循环流。由于循环流的存在[9],使得颗粒向内旋流迁移,延长了分散颗粒在分离器内停留的时间。短路流是造成生产过程中“溢流跑粗”现象的直接原因,是影响分级效率和回收效率的主要因素。

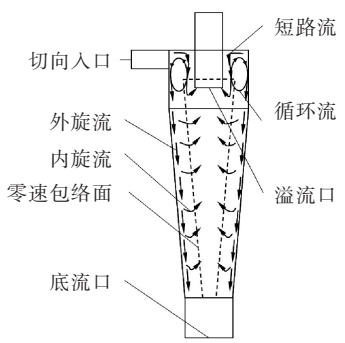


图1 水力旋流器内流体流动

Fig. 1 Fluid flow in hydrocyclone

鉴于水力分离器在多相分离中存在的不同粒径颗粒捕捉分离能力弱、结构设计优化不足、分离效率低的问题,设计并提出了一种用于固-液分离的新型溢流管水力旋流器。运用计算流体力学软件对分离器进行了结构参数与工艺参数的优选,并通过试验研究,验证了数值模拟所得出的结论。进一步提高了固-液分离效率、增强了水力旋流器分离精度。

1 模型及方法

1.1 模型结构参数

溢流管的结构形式直接关系到旋流器内流场分布,还决定了颗粒的运动轨迹和能量损失[10],其重要作用在于排出细颗粒产品、切断短路流。有研究表明,槽式溢流管结构能显著降低压力降,节约能耗[11]。设计新型溢流管水力旋流器结构如图2所示。a型为传统水力旋流器,根据溢流方向上流体空间的变化,将两种新型旋流器分别称为渐缩型溢流管水力旋流器(b型)和渐扩型溢流管水力旋流器(c型)。总体尺寸保持一致,具体结构尺寸如表1所示。

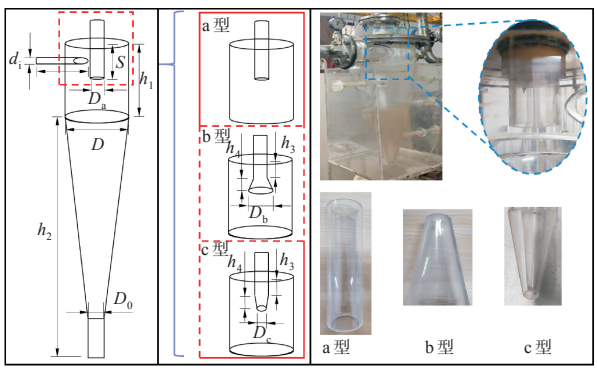


图2 水力旋流器结构

Fig. 2 Structure of hydrocyclone

表1 图2中水力旋流器结构参数

Tab. 1 Structural parameters of hydrocyclone in Fig.2 mm

结构参数	d_i	S	D	D_o	D_a	D_b	D_c	h_1	h_2	h_3	h_4
尺寸	40	140	270	32	68	88	48	200	530	50	90

1.2 数值模拟设置与验证

在CFD模拟中[12-14],气相为常温空气,液相为常温纯水,进料口设为速度入口,3 m/s;溢流口和底流口为压力出口,大气压。采用标准壁面函数,混合流体沿切向进入水力旋流器,形成强剪切湍流,使用雷诺应力模型模拟湍流[15-17]。气体体积模型处理空气柱与液相的分层流动,压力-速度耦合采用SIMPLE算法。采用不同网格数量进行网格无关性验证,如图3所示,对模型进行4种不同网格数量划分,比较其不同径向距离下切向速度的分布,最终选择67.8万个网格模型。该网格密度下,计算结果稳定且准确。a、b、c型水力旋流器均采用上述网格划分策略。

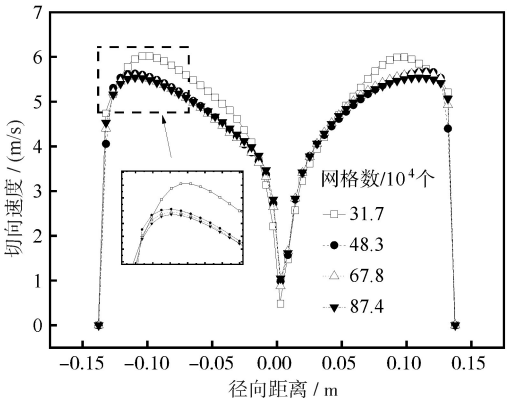


图3　不同网格数量下切向速度

Fig. 3　Tangential velocity with different mesh numbers

2　计算结果分析

2.1　流体迹线分析

切向进入的混合流体受环形壁面影响，向下旋转运动。由于底流口排放有限，部分流体受锥段挤压后，形成向上的内旋流。溢流管排放能力不足，导致管盖下方产生循环流，有助于粗颗粒的二次分离[18]。短路流发生在离散相进入溢流管时，容易被内旋流吸入。循环流和短路流不仅消耗动能，还降低分离效率。图4显示，a型旋流器外壁存在明显的循环涡，溢流管底部出现“溢流跑粗”现象；b型旋流器通过内扩溢流管有效抑制了循环流；c型溢流管抑制了短路流，显著提高了分离精度。

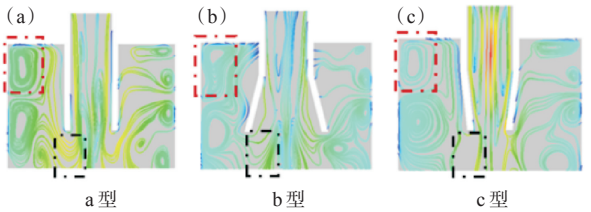


图4　不同溢流管类型旋流器内流体迹线：(a) a型，(b) b型，(c) c型

Fig. 4　Fluid trajectories in hydrocyclones with different overflow pipe types: (a) Type a, (b) Type b, (c) Type c

2.2　空气柱的形成过程

空气柱的形成是水力旋流器内流场稳定的关键标志，也直接影响旋流器的分离效率和分离精度。流体在旋流器内通过向轴心运动补偿黏性损失，将静压能转化为动能，直至静压能无法继续维持其流速增长，流速趋于稳定，最终导致气体聚集在中心形成空气柱。从图5(a)中的空气体积分布云图可以看出，空气从溢流口进入，逐渐发展并在第4秒时形成稳定的空气柱。根据图5(b,c)，不同溢流管结构下，空气柱直径顺序为b > a > c，其中a型为19.6 mm，b型为25.3 mm，c型为14 mm。空气柱的形成过程也是能量转化过程，是旋流器能耗损失的主要原因之一，其分布严重影响旋流器分离精度[19]。较小的空气柱体积，气液相混合度较低，降低了气固夹带概率，有助于固体颗粒在液相中被更好地分离；且减少了气体在液体中的停留时间，避免了液体中的气泡携带，从而提高分离效率。

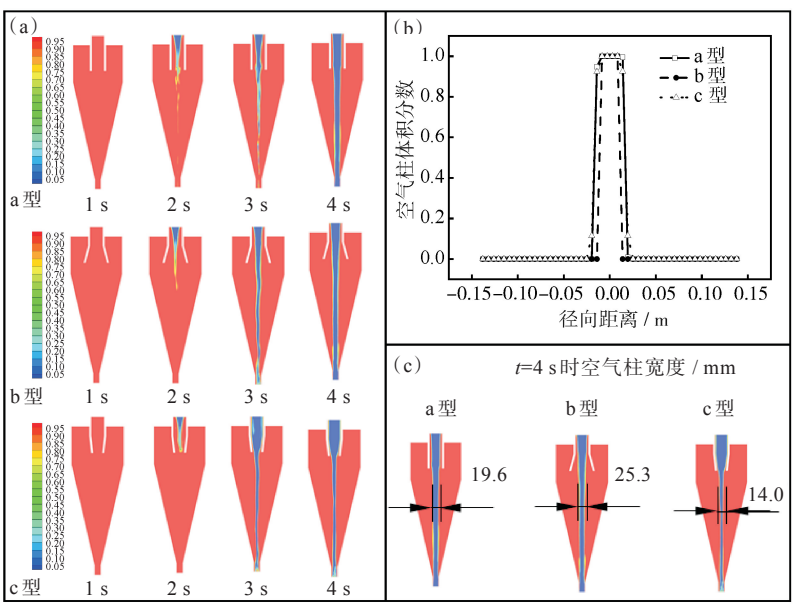


图5　不同溢流管类型旋流器空气柱形成过程对比：(a)空气柱形成过程，(b)空气柱体积分数，(c)稳定后分离器内空气柱宽度

Fig. 5　Comparison of air core formation processes in hydrocyclones with different overflow pipe types: (a) formation process of air column, (b) volume fraction of air column, (c) the air column width in the separator after stabilization

2.3 压力分布及压降分析

图6(a)为水力旋流器柱-锥交界处沿径向的静压分布,3种旋流器的静压分布相似,从侧壁到轴心方向逐渐递减,并呈中心对称分布。3种旋流器壁面附近最高压力分别为36.6、39.1、48.5 kPa,b型和c型旋流器的器壁附近压力相较a型提升6.83%、32.5%。c型旋流器通过溢流管的渐扩结构,抑制了空气柱的形成,减少了能量耗散,压力提升明显。b型旋流器的溢流管下部渐缩结构挤压了流体空间,导致压力提升。随着压力快速下降,b型和c型溢流管结构为流场提供了更大的动能,优化了分离效果。图6(b)显示,b型溢流管结构的能量损耗最大,主要由于其扩展部分对流体运动产生阻碍,导致较大动能损耗。溢流管的扩展部分不仅增加了流体的流动阻力,还使得空气柱的直径扩大,从而进一步加剧了能量的损失。相比之下,c型溢流管的渐扩结构有效减少了能耗,提高了能量转换效率。

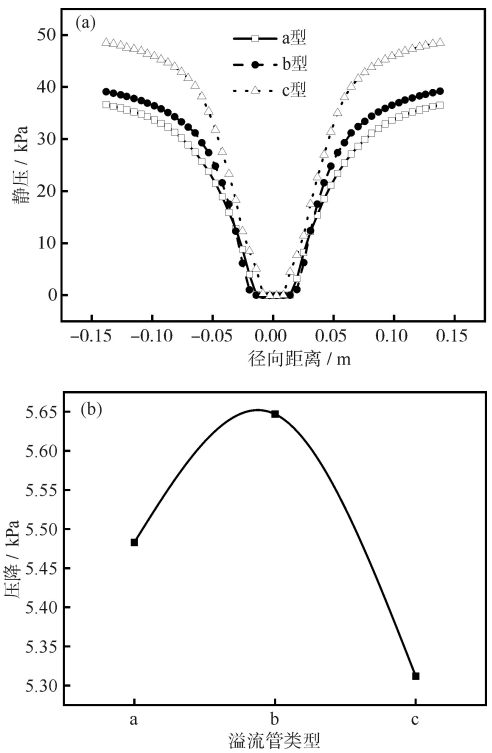


图6 不同溢流管类型旋流器压力分布及压降对比:(a)压力分布,(b)压降对比

Fig. 6 Comparison of pressure distribution and pressure drop in hydrocyclones with different overflow pipe types: (a) pressure distribution, (b) pressure drop comparison

2.4 速度场分析

图7(a)展示了3种水力旋流器柱-锥交界处沿径向的切向速度和轴向速度,不同结构的水力旋流器内部切向速度具备相似变化趋势。与传统a型溢流管结构相比,b型和c型溢流管结构在各个位置上的切向速度明显更高,其中c型溢流管结构的切向速度提升最为显著,较a型提高约41.2%。

$$I = \frac{u_\theta^2}{gr} \tag{1}$$

根据离心强度计算公式(1),其中,u_θ为流体的切向速度,m/s;g为重力加速度,m/s²;r为流体距离旋转中心的径向距离,m。距轴心30 mm处的离心强度分别为90.82、118.68和121.51,b型和c型水力旋流器的离心强度比传统a型上升了30.6%和33.7%。这表明在新型水力旋流器中,颗粒受到更大的离心力作用,能够有效抑制颗粒向内旋流区域的运动,提高回收效率。

图7(b)展示了3种水力旋流器在柱-锥交界面沿径向的轴向速度分布。轴向速度沿器壁向轴线方向逐渐上升,达到最大值后迅速下降,形成内外旋流的交界点,并在轴心处达到负向最大值。b型溢流管底部直径较大,导致轴向速度明显降低;c型溢流管底部直径较小,压缩了内旋流的排出空间,使得c型溢流管附近的轴向流速较大。与a型水力旋流器相比,b型水力旋流器则下降了17.3%;c型水力旋流器的内旋流最大轴向速度提

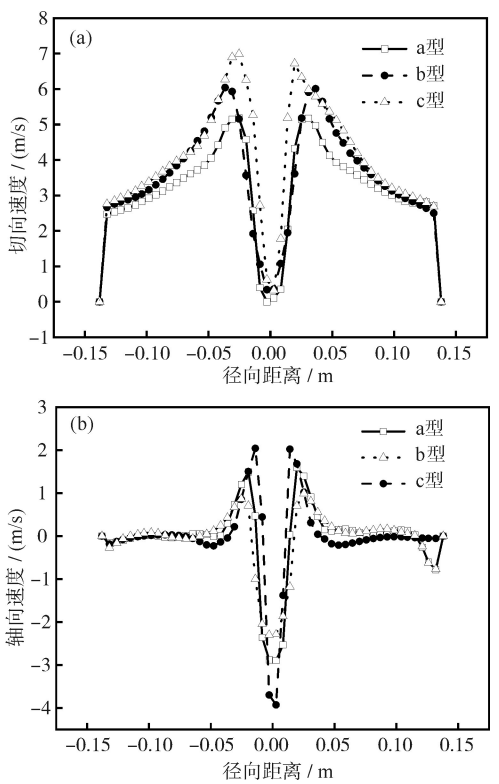


图7 不同水力旋流器内速度分布:(a)切向速度,(b)轴向速度

Fig. 7 Velocity distribution in varied hydrocyclones: (a) tangential velocity, (b) axial velocity

升了36.6%，较大的轴向速度有助于流体沿旋流器理想流线进行流动，减少了短路流动；促进细颗粒的分离和粗颗粒的沉降；改善了溢流液质量，提高了分离效率。

2.5　分离精度分析

零速包络面（locus of zero vertical velocity，LZVV）指的是在旋流器内部，流体的速度为0、用以区分内外旋流的区域，通常位于旋流器的中心轴附近。图8（a）是3种水力旋流器的轴向速度分布云图，图中绿色部分为LZVV。通过对比发现，a、b型水力旋流器LZVV面积没有明显差异；c型水力旋流器LZVV面积明显降低，表明c型旋流器中向底流口运动的外旋流在流体域中的空间占比较大，有利于粗颗粒的分离，避免了“溢流跑粗”现象。

图8（b）显示了不同水力旋流器对不同粒径颗粒的分离效率。3种旋流器的分离效率随着颗粒粒径增加呈上升趋势，符合一般规律。当颗粒粒径小于25 μm时，c型旋流器的分离效率最高，为39.42%。因为其溢流管底部收缩结构有效减少了短路流，避免了“溢流跑粗”现象。然而，随着颗粒粒径增大，a型和b型旋流器的分离效率较快上升，当颗粒粒径达到25~40 μm时，a型和b型的分离效率略高于c型，当颗粒粒径达到50 μm时，3种溢流管结构旋流器分离效率均接近90%。

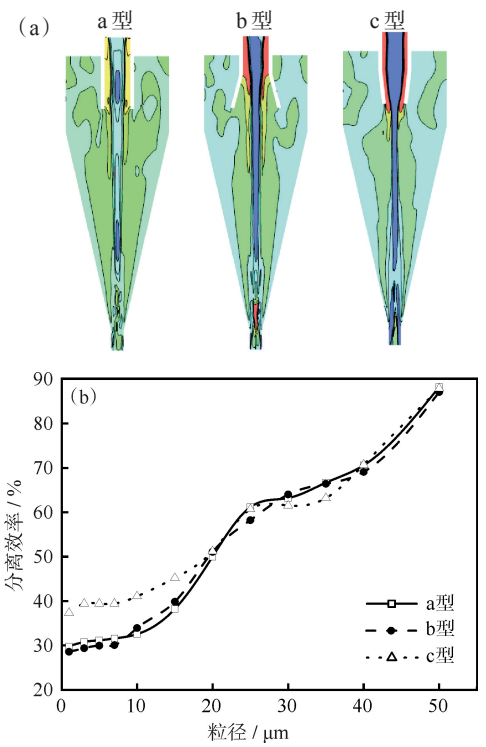


图8　不同溢流管类型旋流器LZVV分布及分离精度对比：（a）LZVV分布，（b）分离精度对比

Fig. 8　Comparison of locus of zero vertical velocity and separation accuracy in cyclones with different overflow pipe types: (a) locus of zero vertical velocity distribution, (b) separation accuracy of different hydrocyclones

3　试验研究

改变水力旋流器的溢流管结构形式进行实验。对比3种不同溢流管结构对水力旋流器固-液分离效率的影响，验证数值计算的正确性，为后续设计提供参考。

3.1　试验流程

实验平台如图9（a，b）所示，主要由分离部分和循环回流部分组成。在分离部分，固液混合物在搅拌罐内混合均匀后由泥沙泵送至水力旋流器中实现分离，完成分离后的混合液经溢流口和底流口循环到搅拌罐内。在水力旋流器平台设置不同溢流管进行实验研究。实验所用物料为石英砂、纯水，石英砂颗粒被过滤网完全过滤以统一颗粒粒径。过滤后的颗粒与纯水按一定比例添加到混合罐中。混合液经搅拌器充分搅拌后，由泥浆泵送至水力旋流器分离。溢流管和底流管排出的混合物经循环返回至泥浆罐。本次实验设计入口流量分别为10.50、12.25、14.00、15.75、17.50、19.25 m^3/h，分离结束后分别于溢流口与底流口取样。混合物通过如图9（c）所示吸滤瓶与真空泵进行初步干燥处理，吸取其中水分，之后通过烘箱烘干剩余固体中水分并进行称重，得到分离物质量。分离效率数值计算采用如下公式[20]：

$$E = \frac{c_u Q_u - c_i Q_u}{c_i Q_i} = \frac{c_u}{c_i} F - F \tag{2}$$

$$F = \frac{Q_u}{Q_i} \times 100\% = \left(1 - \frac{Q_o}{Q_i}\right) \times 100\% \tag{3}$$

其中，E代表分离效率，F代表分流比，c_u代表底流口分散相浓度，c_i代表入口分散相浓度，Q_u代表底流口流量，Q_i代表入口流量，Q_o代表溢流口流量。

3.2　溢流管结构对旋流器分离效率的影响

图10（a）显示了不同溢流管结构水力旋流器的分离效率曲线，固-液分离效率随着入口流量的增加先快速提高，后趋于平缓。b型和c型旋流器在高入口流量条件下的分离效率明显高于a型，而在低入口流量时，b型旋流器的分离效率较低。这一差异主要源于b型旋流器溢流管底部膨胀结构的影响。在较低离心力场下，膨胀结构易导致“溢流跑粗”现象，进而降低了分离效率。然而，随着入口流量的增加，膨胀结构通过压缩溢流管周围流体空间，提升了切向速度和离心力，进而显著改

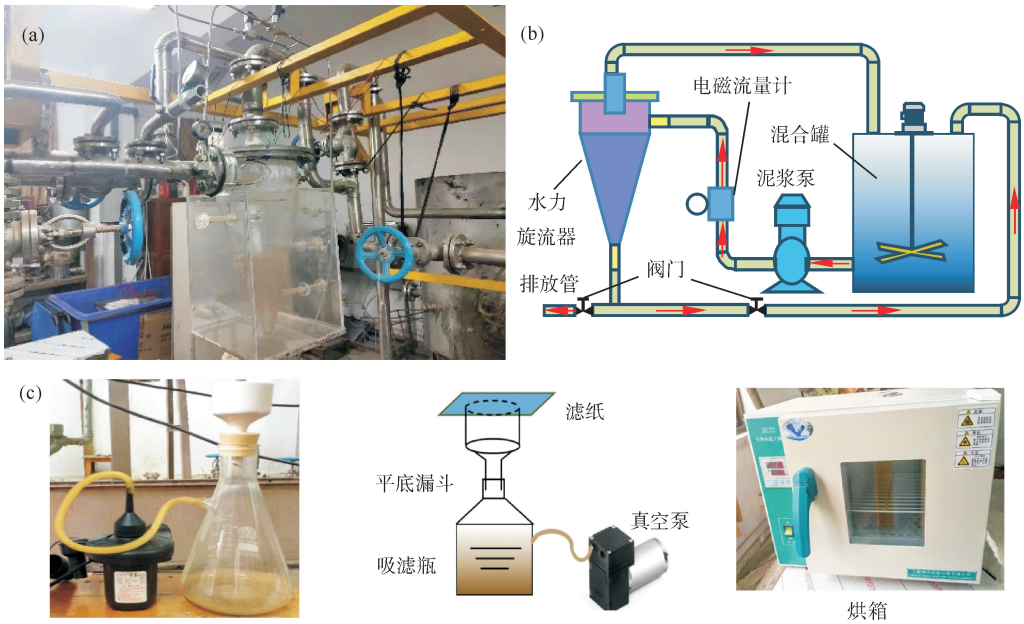


图9 试验平台及相关设备：(a)固–液分离试验平台，(b)试验平台示意图，(c)分离物脱水装置

Fig. 9 Experimental setup and related equipments: (a) solid-liquid separation test platform, (b) schematic of the experimental setup, (c) separated material dewatering unit

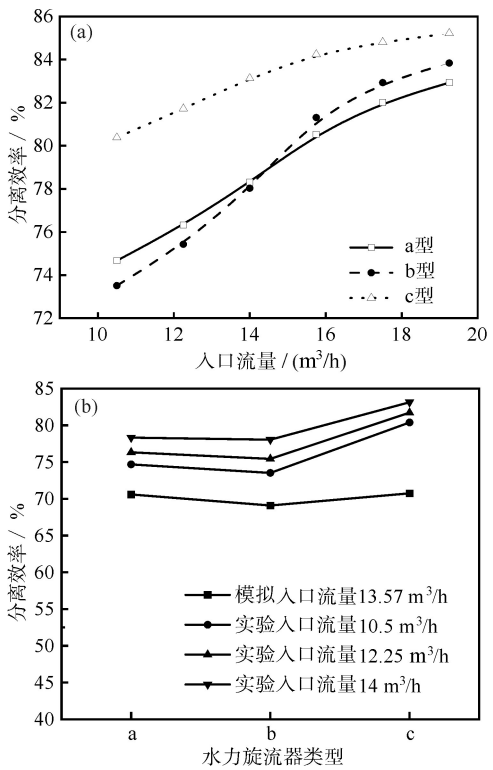


图10 溢流管结构对旋流器分离效率的影响及试验对比：(a)不同入口流量下旋流器的分离效率，(b)不同溢流管结构旋流器实验与数值模拟分离效率对比

Fig. 10 Impact of overflow pipe structure on hydrocyclones separation efficiency and experimental comparison: (a) separation efficiency under different inlet flow rates, (b) comparative analysis of experimental and numerical simulation results for hydrocyclones with varied overflow pipe structures

善了分离效率。c型旋流器由于溢流管底部的收缩结构，有效降低了能量损失，并抑制了“溢流跑粗”现象，从而在各种运行条件下始终保持超过80%的分离效率。图10(b)为不同溢流管结构水力旋流器实验与数值模拟的分离效率对比。针对40 μm粒径颗粒分离效率的数值模拟研究，基于初始条件计算其入口流量为13.57 m³/h，对比实验中不同入口流量下的分离效率，在数值和趋势上均表现出较强的相关性，分离效率均处于70%以上的较高水平，进一步验证了模拟的可靠性。

4 结 论

本文通过数值模拟和实验方法对新型溢流管水力旋流器与传统直线型溢流管水力旋流器进行对比，结论如下：

(1)b、c型溢流管结构能够有效改进旋流器内部流场分布，c型溢流管旋流器的空气柱直径最小，为14.0 mm，比a型和b型旋流器分别小5.6和11.3 mm，有助于减少气体与固体颗粒之间的相互作用，降低能量损失，提高分离精度。

(2)b型和c型水力旋流器在器壁附近压力相较a型提升6.83%、32.5%，且具有更低的压力损失，增强了能量转换。离心强度分别比传统a型旋流器提高了30.6%和33.7%，能够更有效地加速颗粒的分离，减少颗粒向内旋流区域的迁移，提高回收效率。c型水力旋流器最大轴向速度相较a型提升了36.6%，获得了更好的流动状态，减少了短路

流动，改善了溢流液质量，提高了分离效率。

（3）c型溢流管旋流器LZVV最小，更大的外旋流面积有效提高了粒子的分离空间；对于粒径小于25 μm的细颗粒，c型旋流器分离效率最高，达到39.42%，避免了“溢流跑粗”现象。

（4）实验表明，b型和c型溢流管水力旋流器在高流量下，分离效率明显提高，均优于传统直线型溢流管水力旋流器。尤其是c型溢流管旋流器表现出较高的稳定性，始终保持80%以上的分离效率。模拟与实验对比也显示出较强的相关性，验证了数值模拟的可靠性。

参考文献

[1] EKECHUKWU O M, ASIM T, HAWEZ H K. Recent developments in hydrocyclone technology for oil-in-water separation from produced water[J]. Energies, 2024, 17:3181.

[2] LIU X D, QIU J, LYU X J. Purification with hydrocyclone on low grade sodium-bentonite from Xinjiang, China[C]// E3S Web of Conferences: EDP Sciences, 2024:02009.

[3] UYSAL M T, ENISOGLU F, KARA Y. Proceedings of the 10th World Congress on Mechanical, Chemical, and Material Engineering, August 22-24, 2024 [C]. Barcelona: International Academy of Science, Engineering, and Technology, 2024.

[4] ZHANG X G, YU F, JIN Y, et al. Study on flow field characteristics of gas-liquid hydrocyclone separation under vibration conditions[J]. PLOS ONE, 2024, 19(7):e0307110.

[5] LIU P K, FU W X, JIANG L Y, et al. Effect of the position of overflow pipe with mixed spiral structures on the separation performance of hydrocyclones[J]. Separations, 2023, 10(2):84.

[6] CAVALCANTE D C M, MAGALHÃES H L F, NETO S R F, et al. Hydrodynamic evaluation of a filtering hydrocyclone for solid particle/water separation[J]. Membranes, 2024, 14:171.

[7] LIU P K, GAO Z Z, YANG X H, et al. A study on the classification performance of water-injection hydrocyclone [J]. Physicochemical Problems of Mineral Processing, 2024, 60(5):194539.

[8] 魏德洲，张彩娥，高淑玲，等.水力旋流器内部流场及分选过程的研究进展[J].金属矿山，2015(2):12-19.

[9] 郑小涛，龚程，徐红波，等.圆柱段长度对水力旋流分离性能的影响[J].武汉工程大学学报，2015, 37(1):20-24.

[10] WANG Y C, HAN H, LIANG Z T, et al. Analysis of the effect of structural parameters on the internal flow field of composite curved inlet body hydrocyclone [J]. Processes, 2024, 12:2654.

[11] CHEN S X, LI D L, LI J Y, et al. Optimization design of hydrocyclone with overflow slit structure based on experimental investigation and numerical simulation analysis[J]. Scientific Reports, 2024, 14:18410.

[12] VARAVVA A I, VERSHININ V, TRAPEZNIKOV D V. Numerical modeling of the degassing process of a gas-liquid mixture in hydrocyclone[J]. Tyumen State University Herald Physical and Mathematical Modeling Oil Gas Energy, 2019, 5(3):213-229.

[13] OLALEYE O E, OMBELE B V, LI X X, et al. CFD modeling analysis of a vertical gas liquid separator [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2022, 216:110733.

[14] LI F, GAO J M, XING L, et al. Proceedings of the International Field Exploration and Development Conference 2020[C]. Singapore:Springer, 2021.

[15] LIU B, LI L C, WANG H J, et al. Numerical simulation and experimental study on internal and external characteristics of novel hydrocyclones [J]. Heat and Mass Transfer, 2020, 56:1875-1887.

[16] LI S, LI R N, NICOLLEAU F C G A, et al. Study on oil-water two-phase flow characteristics of the hydrocyclone under periodic excitation[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2020, 159:215-224.

[17] ADEWOYE A, HOSSAIN M, ISLAM S Z, et al. Proceedings of the 4th World Congress on Momentum, Heat and Mass Transfer: Materials Science 2019 Conference [C]. Rome: International Academy of Science, Engineering and Technology, 2019.

[18] LIU P K, XU X X, YANG X H, et al. Effect of column segment diameter ratio on flow field and separation performance of the composite column-cone hydrocyclone [J]. Physicochemical Problems of Mineral Processing, 2025, 61(1):200063.

[19] ZHANG B L, TIAN S B, HAO Y K, et al. The influence of a novel air column regulating device on the separation performance of hydrocyclones [J]. Intelligent Equipment and Special Robots, 2024, 53:244-249.

[20] 田金乙，倪龙，赵加宁.底流管直径对旋流防阻机性能的影响[J].化工学报，2016, 67(10):4219-4224.

本文编辑：张　瑞