

溢流管直径对旋流器流场和分离影响研究*

徐冬林¹, 王长艳¹, 傅国辉¹, 张旭¹, 魏德洲²

(1. 鞍钢集团 鞍千矿业有限责任公司, 辽宁 鞍山 114043; 2. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘要: 利用 RSM 雷诺应力模型和 VOF 多相流模型, 系统考察了溢流管直径对 $\Phi 50$ mm 水力旋流器流场稳定性的影响。通过对空气柱、零速包络面、短路流及湍流强度等流场特性的分析, 确定了使流场稳定的最佳溢流管直径范围, 并通过旋流分离物理试验进一步验证了该溢流管直径条件下获得的稳定流场能有效提高分离效率。研究结果表明, 当溢流管直径过小时, 空气柱会发生中断甚至不能完整形成, 分选空间内部湍流强度较高, 底流分流比较大, 短路流量较小。随着溢流管直径的增加, 逐渐形成上下贯通的空气柱, 分选空间内部湍流强度降低, 零速包络面的对称性增强, 底流分流比逐渐降低, 流场稳定性增强, 从而分离性能增强。随着溢流管直径进一步增加, 空气柱直径增大, 短路流量增加, 流场稳定性降低, 从而分离效率下降。因此, 针对所考察的 $\Phi 50$ mm 水力旋流器最佳的溢流管直径在 $0.30 D$ 左右。

关键词: 水力旋流器; 数值模拟; 稳定流场; 空气柱; 短路流; 湍流强度

中图分类号: TD922 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-0076(2019)01-0064-05

DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2019.01.013

Study on Influence of Vortex Finder Diameter on Flow Field and Separation Performance of Hydrocyclone

XU Donglin¹, WANG Changyan¹, FU Guohui¹, ZHANG Xu¹, WEI Dezhou²

(1. Anqian Mining Co. Ltd., Anshan Iron and Steel Group, Anshan 114043, China; 2. College of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: By using RSM (Reynolds stress model) turbulence model and VOF (volume of fluid) multi-phase flow model, systematic numerical studies on the influence of vortex finder diameter on steady flow field of $\Phi 50$ mm hydrocyclone were investigated. The flow characteristics were analyzed in terms of air core, LZVV, short circuit flow and turbulence intensity. Further the range of vortex finder diameter was determined for steady flow field of hydrocyclone. Based on the physical experiments verification, the steady flow field optimized improved the separation efficiency. Results show that when the vortex finder diameter is too small, the air core cannot form completely, the turbulence intensity in the separation space is higher, the flow diversion ratio is large and the short circuit flow is smaller. With the increasing of the vortex finder diameter, the air core is gradually developing, the turbulence intensity reduces, the symmetry of LZVV is gradually enhancing and the flow diversion ratio is gradually reducing. Thus, the flow field stability and the separation performance are enhanced. With further increasing of the vortex finder diameter, the air core diameter and the short circuit flow increase, the stability of the flow field decreases inversely, consequently, the separation efficiency decreases. Therefore, a compromised optimum vortex finder diameter for the $\Phi 50$ mm hydrocyclone is around $0.30 D$.

Key words: hydrocyclone; numerical simulation; steady flow field; air core; short circuit flow; turbulence intensity

* 收稿日期: 2019-01-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51474054, 51504054)

作者简介: 徐冬林(1970-), 男, 教授级高工, 首席工程师。

水力旋流器因其结构简单、处理量大、使用成本低等优点,广泛应用于矿物加工、环保、化工、食品和药剂生产等领域。对于任一给定粒群的旋流分离作业,水力旋流器内部流场对分离结果起决定性作用。在稳定的流场条件下,被分离的颗粒沿径向及轴向有规律地分布,从而保证水力旋流器有较高的分离效率。众所周知,水力旋流器内部流场是由操作参数和结构参数共同决定的^[1,2]。通常情况下,给料流量、给料浓度等操作参数是由现场生产决定的,因而掌握结构参数变化对水力旋流器流场稳定性的影响机制是非常必要的,其中溢流管直径的影响尤为重要^[3-5]。崔宝玉的研究表明,随着溢流口直径的增大,切向速度逐渐降低,内旋流中轴向速度明显增大,而外旋流中轴向速度基本不发生变化^[6]。Ghodrat 通过对气液固多相流场的数值模拟研究,表明溢流管直径过大或过小都会影响分离精度^[7]。

近年来,随着计算流体力学理论和高速计算机技术的发展,计算流体力学(CFD)成为研究水力旋流器内部流场的一个重要手段^[8]。目前,在溢流管直径变化对水力旋流器内部流场影响机制的数值研究和分析方面已取得一定进展,但这些研究大多是围绕旋流器内部流场的某一方面,如速度分布、静压分布等,对流场稳定性的研究,特别是对短路流及局部高强度湍流的研究相对较少^[9-11]。本文采用 RSM 雷诺应力模型计算湍流,以 VOF 多相流模型捕捉液气两相边界,对 $\Phi 50$ mm 水力旋流器内部流场稳定性进行系统研究。分别考察了溢流管直径变化对水力旋流器内部流场的空气柱直径、湍流强度、零速包络面及短路流的影响机制,从而确定保证流场稳定的最佳溢流管直径范围,并进行了旋流分离物理试验验证。

1 计算模型及研究方法

本文所探讨的 $\Phi 50$ mm 水力旋流器几何尺寸如图 1 所示,溢流管直径变化量如表 1 所示。采用六面体网格对旋流器内部空间进行离散,经网格无关性验证,网格数量取 40 万。

表 1 溢流管直径变化量列表

Table 1 Vortex finder diameters investigated in this study

参数	变化量			
溢流管直径 d	$0.18 D$	$0.24 D$	$0.30 D$	$0.36 D$

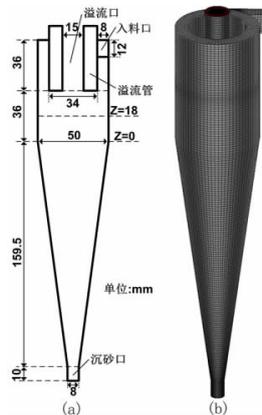


图 1 水力旋流器几何模型

Fig. 1 Geometric model in this study

RSM 雷诺应力模型已被证明能较好地预测各向异性湍流,从而得到与试验结果更接近的模拟结果^[12],故本文选用 RSM 雷诺应力模型计算湍流。同时采用 VOF 多相流模型捕捉液气两相边界。

边界条件定义如下:(1)入口采用流量入口,流量设置为 35 L/min,给水相的体积分数为 1;(2)溢流口和底流口均采用压强出口,且与大气相通,空气相在出口处回流系数均为 1;(3)固壁采用无滑移边界条件,同时采用标准壁面函数来处理边界湍流^[13]。

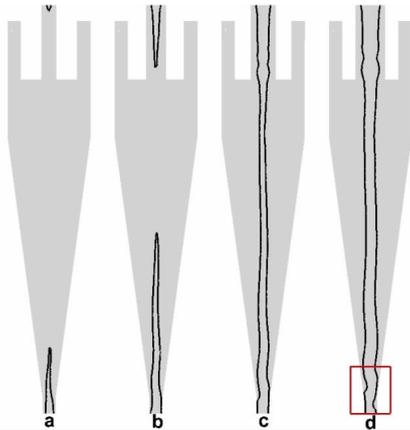
2 溢流管直径的模拟结果与分析

2.1 溢流管直径对空气柱的影响

空气柱是开放式水力旋流器中一种独特的现象,它对水力旋流器的流场和分离性能存在很大的影响。空气柱直径大小能控制溢流粒度,空气柱的中心线与水力旋流器轴线的重合程度还会影响流场的对称性,进而影响颗粒在分选空间内的规律分布。假定气体含量 90% 处为液气两相边界,计算得到的不同溢流管直径对应的空气柱形状见图 2 所示。

由图 2 可知,当溢流管直径为 $0.18 D$ 时,仅在溢流管和沉砂口处有一点空气存在;当溢流管直径为 $0.24 D$ 时,旋流器内空气含量增加,但仍不能形成完整的空气柱;当溢流管直径为 $0.30 D$ 时,形成了上下贯通的空气柱,并随着溢流管直径的进一步增加,空气柱直径增大。由于固体颗粒不能进入空气柱内部,因此随着空气柱直径的增大,旋流器内的有效分选空间减小。同时也可以看到当溢流管直径为 $0.36 D$ 时,空气柱在锥体下部出现大幅度的偏

摆,这不利于流场的稳定,将影响颗粒在空间的规律性分布。



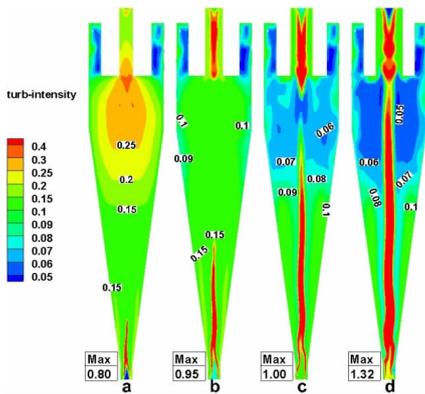
(a = 0.18 D, b = 0.24 D, c = 0.30 D, d = 0.36 D)

图2 溢流管直径对空气柱形状的影响

Fig.2 The influence of vortex finder diameter on shape of air core

2.2 溢流管直径对湍流强度分布的影响

理想状态下,在离心力与流体曳力的共同作用下,粗而重的颗粒向水力旋流器器壁迁移,细而轻的颗粒向中心区域迁移,但若连续相流体处于强湍流状态,由于流体速度的强脉动,将导致颗粒无法按序排列,或是需要更长的时间才能达到有序排列状态。因此,局部强湍流作用对于旋流器分离过程来说是不利的,它将使得颗粒呈现非均匀分布现象,从而降低分离精度。不同溢流管直径对湍流强度的影响如图3所示。



(a = 0.18 D, b = 0.24 D, c = 0.30 D, d = 0.36 D)

图3 溢流管直径对湍流强度的影响

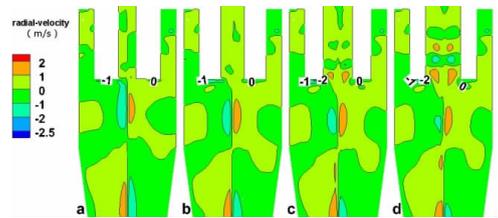
Fig.3 The influence of vortex finder diameter on turbulence intensity

由图3可知,最大湍流强度主要出现在空气柱及其附近。当溢流管直径较小时,由于空气柱并没有完全形成,因此最大湍流强度较低;但此时有效分

选空间内部湍流强度较高,均在0.15以上。随着溢流管直径的增加,空气柱逐渐形成,最大湍流强度逐渐增大;与此同时,有效分选空间内部湍流强度逐渐降低。当溢流管直径达到0.30 D后,有效分选空间内部湍流强度在0.06 ~ 0.1之间,流场的稳定性增强;但当溢流管直径达到0.36 D时,由于空气柱直径的增加,最大湍流强度快速增大,由1.00迅速增大至1.32。因此,空气柱的形成标志着流场的稳定,同时空气柱周围强湍流的存在会增加无谓的能量消耗,影响分离效果。

2.3 溢流管直径对短路流的影响

沿器壁的溢流短路流和沉砂短路流使进入流场的颗粒未经旋流分离作用而直接从出口排出,加重了分离产品中粗细夹杂现象。其中,沉砂短路流在经旋流器器壁由底流口排出的过程中,会由于流体的冲刷作用而部分回到分选空间,因此对分离效果的影响较小。溢流短路流是未经分选直接沿器壁进入溢流管的那部分流体,因此溢流管底端径向速度的大小可以定性表征短路流量,其中负值表示径向速度由器壁指向中心,正值表示径向速度由中心指向器壁。溢流管直径对径向速度的影响如图4所示。



(a = 0.18 D, b = 0.24 D, c = 0.30 D, d = 0.36 D)

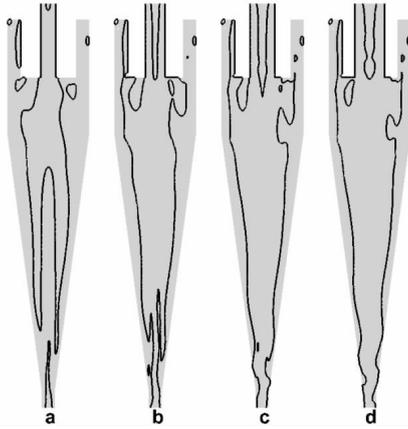
图4 溢流管直径对径向速度的影响

Fig.4 The influence of vortex finder diameter on radial velocity

由图4中可以看出,随着溢流管直径的增加,经溢流管底端进入溢流管的短路流速度增大,由-1 m/s逐渐增大至-2 m/s,从而短路流量增加。因此,在保证流场的稳定的前提下,溢流管直径越小越有利于减少短路流。

2.4 溢流管直径对零速包络面(LZVV)的影响

零速包络面(LZVV)是内旋流与外旋流的交界面,同时也是溢流和沉砂产品的分界线。图5为溢流管直径对LZVV形状的影响。



(a = 0.18 D, b = 0.24 D, c = 0.30 D, d = 0.36 D)

图 5 溢流管直径对 LZVV 形状的影响

Fig. 5 The influence of vortex finder diameter on shape of LZVV

由图 5 可以看出,随着溢流管直径的增加,LZVV所包含的面积逐渐增加,即底流分流比逐渐降低。同时,随着溢流管直径的增加,LZVV 的对称性逐渐增强,特别是溢流管直径为 0.30 D 和 0.36 D 时,LZVV 对称性明显变好,且边界更加圆滑,流场的稳定性增加,更利于粗细颗粒的精确分离。

3 溢流管直径的物理试验验证

在溢流管直径对流场稳定性研究结果基础上,在相同的操作条件下,针对相同结构的 Φ50 mm 水力旋流器进行赤铁矿纯矿物分离试验,旋流器给料浓度和压力分别为 15%、0.1 MPa。考察溢流管直径对其分离性能的影响规律,从而得出稳定流场与分离性能之间的关系。

经实验室测定,试验用赤铁矿纯矿物密度为 4 858 kg/m³,铁品位为 67.27%,采用激光粒度分析仪测得原矿粒度组成如表 2 所示。

表 2 赤铁矿纯矿物的粒度组成

Table 2 Particle - size composition of hematite sample

粒度/μm	累积产率/%
+25	44.19
-25 +20	53.67
-20 +15	63.49
-15 +10	73.34
-10 +7	79.69
-7 +5	84.59
-5 +3	90.49
-3 +2	93.92
-2 +1	97.52
-1	100.00

通过对水力旋流器溢流、沉砂产品的分析,以考察溢流管直径变化对产品的分流比、浓度、粒度组成和可能偏差(E_p)的影响机制,并绘制粒度分配曲线查找分离粒度 d_{50} 。其中 $E_p = (d_{75} - d_{25})/2$, E_p 值越小表明分离精度越高。表 3 和图 6 是水力旋流器溢流管直径分别为 0.24 D、0.30 D、0.36 D 时,其对分离性能的影响。

表 3 溢流管直径的影响

Table 3 The influence of vortex finder diameter

溢流管直径	0.24 D		0.30 D		0.36 D	
产品	溢流	沉砂	溢流	沉砂	溢流	沉砂
分流比/%	64.92	35.08	81.33	18.67	87.81	12.19
产品浓度/%	1.92	24.94	2.16	44.22	2.40	64.77
$E_p/\mu\text{m}$	3.31		3.26		3.47	

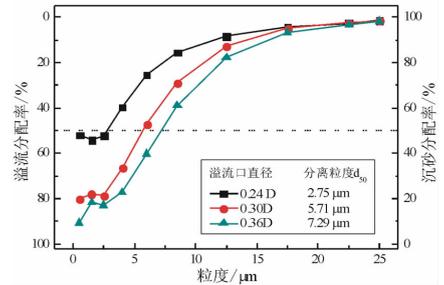


图 6 溢流管直径对分离粒度的影响

Fig. 6 The influence of vortex finder diameter on shape of cut size

由表 3 和图 6 中可以看出,随着溢流管直径的增大,溢流分流比、浓度和分离粒度均明显增大。其主要原因是溢流管直径增大,水力旋流器零速包络面所包围的内旋流区域增大,从而更多的矿浆和颗粒经由溢流管排出。同时在图 6 中可以看到,随着溢流管直径的增加, E_p 值先降低后升高,当溢流口直径为 0.24 D 时, $-d_{50}$ 粒级在底流中分布率均为 50% 左右,也就是说旋流器没有起到任何分离作用。

因此,对于所研究的 Φ50 mm 水力旋流器,最佳的溢流管直径为 0.30 D,此时水力旋流器具有最高的分离精度及较小的底流分流比。这主要是由于溢流管直径过大或过小都会由于短路流或高强度湍流的影响而降低分离精度。从而验证了流场稳定是获得高效分离效率的前提。

4 结论

(1)空气柱的形成是旋流器流场稳定的标志。当溢流管直径较小时,空气柱会发生中断甚至不能

完整形成;随着溢流管直径增加,有效分选空间内部湍流强度降低,流场稳定性增强。但当溢流管直径为 $0.36D$ 时,空气柱在锥体下部偏摆程度明显增强。

(2) 溢流管直径的增加会增大溢流短路流量,从而降低旋流器分离效率。在保证流场稳定的前提下,溢流管直径越小越有利于减少溢流短路流量。

(3) 随着溢流管直径的增加,LZVV所包围的内旋流区域逐渐增大,从而底流分流比逐渐降低。同时,随着溢流管直径的增加,LZVV的对称性增强,特别是溢流管直径达到 $0.30D$ 以后,流场的稳定性增加,更利于粗细颗粒的精确分离。

(4) 溢流分流比、溢流浓度和分离粒度均随着溢流管直径的增大而明显增大。随着溢流管直径的增大,分离效率逐渐降低,分离精度先降低后升高。因此,对于所研究的 $\Phi 50$ mm水力旋流器,最佳的溢流管直径为 $0.30D$,此时分离精度最高,底流分流比较小,研究结果表明旋流器内稳定的流场是获得高效分离的前提。

参考文献:

- [1] 庞学诗. 水力旋流器技术与应用[M]. 北京:中国石化出版社,2011.
- [2] 崔宝玉. 水力旋流器流场及分离过程的数值试验研究[D]. 沈阳:东北大学,2014.
- [3] Tang B, Xu Y, Song X, et al. Numerical study on the relationship between high sharpness and configurations of the vortex finder of a hydrocyclone by central composite design [J]. Chemical engineering journal, 2015, 278(S1):504-516.
- [4] Murthy Y R, Bhaskar K U. Parametric CFD studies on hydrocyclone[J]. Powder technology, 2012, 230:36-47.
- [5] Yanxia Xu, Xingfu Song, Ze Sun, et al. Numerical investigation of the effect of the ratio of the vortex-finder diameter to the spigot diameter on the steady state of the air core in a hydrocyclone[J]. Industrial and engineering chemistry research, 2013, 52(15):5470-5478.
- [6] Cui B, Wei D, Gao S, et al. Numerical and experimental studies of flow field in hydrocyclone with air core [J]. Transactions of nonferrous metals society of china, 2014, 24(8):2642-2649.
- [7] Ghodrat M, Kuang S B, Yu A B, et al. Numerical analysis of hydrocyclones with different vortex finder configurations [J]. Minerals engineering, 2014, 63:125-138.
- [8] Vakamalla T R, Kumbhar K S, Gujjula R, et al. Computational and experimental study of the effect of inclination on hydrocyclone performance [J]. Separation and purification technology, 2014, 138:104-117.
- [9] Silva D O, Vieira L, Barrozo M. Optimization of design and performance of solid-liquid separators: a thickener hydrocyclone [J]. Chemical engineering & technology, 2015, 38(2):319-326.
- [10] Yang Q, Wang H, Wang J, et al. The coordinated relationship between vortex finder parameters and performance of hydrocyclones for separating light dispersed phase [J]. Separation and purification technology, 2011, 79(3):310-320.
- [11] 牛伟. 溢流管直径对旋流器分离效率影响的数值模拟 [J]. 化工技术与开发, 2015(1):45-48.
- [12] Delgadillo J A, Rajamani R K. A comparative study of three turbulence-closure models for the hydrocyclone problem [J]. International journal of mineral processing, 2005, 77(4):217-230.
- [13] 崔宝玉,魏德洲,翟庆祥,等. 水力旋流器内部流场的数值研究 [J]. 东北大学学报(自然科学版), 2014(6):894-897.

引用格式:徐冬林,王长艳,傅国辉,等. 溢流管直径对旋流器流场和分离影响研究[J]. 矿产保护与利用, 2019, 39(1):64-68.

XU Donglin, WANG Changyan, FU Guohui, et al. Study on influence of vortex finder diameter on flow field and separation performance of hydrocyclone [J]. Conservation and utilization of mineral resources, 2019, 39(1):64-68.