

基于正交试验的赤泥沉降槽中心桶结构优化

李秋龙^{1,2}, 李 茂^{1,2}, 雷 波^{1,2}, 周 天^{1,2}, 周子民^{1,2}

(1. 中南大学 能源科学与工程学院, 长沙 410083;

2. 中南大学 流程工业节能湖南省重点实验室, 长沙 410083)

摘 要: 为提高中心桶内固含浓度在 60~70 g/L 范围内料浆的体积分数, 以正交试验和数值模拟的方法对沉降槽中心桶的 5 个结构参数进行数值仿真试验。设计一个 5 因素 5 水平的 $L_{25}(5^5)$ 正交试验方案, 采用仿真软件 FLUENT 对不同结构参数组合的沉降槽进行数值模拟计算, 分析沉降槽中心桶的结构参数对中心桶内固含分布的影响规律, 用极差分析和方差分析法对计算结果进行数理统计分析, 得出 5 个因素对试验指标影响的主次顺序和显著性, 从而得到中心桶结构参数的优化组合。结果表明: 中心桶内固含分布的主要影响因素是进料射流管的直径, 沉降槽中心桶的最佳组合结构参数为中心桶直径为 3 m, 中心桶深度为 5 m、射流管直径 d_1 、 d_2 和 d_3 分别为 0.8、0.48 和 0.36 m, 环形挡流板离进料管下沿高度为 0.22 m, 喉嘴距为 0.18 m; 优化工况下, 中心桶内处于最佳絮凝固含浓度范围内的料浆体积所占中心桶体积的体积分数变为基础工况的 4.8 倍, 显著地提高沉降槽的絮凝沉降效率。

关键词: 沉降槽; 中心桶; 正交试验; 赤泥; 絮凝; 数值模拟

中图分类号: TF351.5; TF821

文献标志码: A

Optimization of feedwell design in red mud thickener based on orthogonal experiment

LI Qiu-long^{1,2}, LI Mao^{1,2}, LEI Bo^{1,2}, ZHOU Tian^{1,2}, ZHOU Jie-min^{1,2}

(1. School of Energy Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;

2. Hunan Key Laboratory of Energy Conservation in Process Industry, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: In order to improve the volume fraction of liquid with solid concentration of 60–70 g/L in the feedwell, a orthogonal experiment was proposed through a $L_{25}(5^5)$ orthogonal program to investigate the feedwell's performance under five different structural factors. Numerical simulation as well as customized criteria was used to conduct the experiment and evaluate the results. The effects of structure parameters on solid concentration distribution in the feedwell were analyzed, further more, the range analysis and variance analysis were also used to analyze the experiment results. The primary and secondary order sequence of the five factors and their significant effects on design index are obtained, and then, the optimal combination of the feedwell structural parameter was received. The type of the jet pipe is the primary factor, and the optimal combination of the feedwell structural parameters is diameter of 3 m, depth of 5 m, the jet pipe diameter d_1 , d_2 and d_3 , respectively, of 0.8, 0.48 and 0.36 m, the annular baffle 0.22 m below the feed pipe, throat nozzle distance of 0.18 m. Under the optimal condition, the volume fraction of the best solid concentration can be increased by 4.8 times compared with that of the base case, which significantly improves the efficiency and process of the thickener.

Key words: thickener; feedwell; orthogonal test; red mud; flocculation; numerical simulation

基金项目: 中南大学中央高校基本科研业务费专项资金资助(2012zzts086); 国家高技术研究发展计划资助项目(2010AA065201)

收稿日期: 2013-08-27; **修订日期:** 2013-12-20

通信作者: 李 茂, 副教授, 博士; 电话: 13055169363; E-mail: limao89@163.com

赤泥沉降槽是湿法冶金工艺中氧化铝生产的关键设备之一, 主要用来进行赤泥的固液分离和反向洗涤^[1-3]。在工业生产中, 由于矿石品位的持续下降, 赤泥沉降槽的分离效率和产能已经成为制约整个氧化铝生产的瓶颈, 沉降槽的沉降分离效果不好, 不仅影响固液分离的效率, 还会影响整个企业的生产产能甚至导致生产无法正常进行^[3-5]。赤泥沉降槽结构示意图如图 1 所示, 主要由进料管、中心桶、溢流管、沉降槽槽体、耙机中轴和底流管组成, 中心桶是赤泥沉降槽最主要的部件之一, HEATH^[6]将中心桶比作沉降槽的“心脏”, 其结构对沉降槽性能和沉降分离的效率具有非常关键的影响。

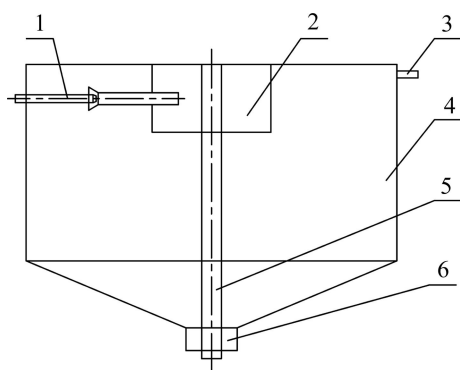


图 1 赤泥沉降槽结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of red mud thickener: 1—Feed pipe; 2—Feedwell; 3—Overflow pipe; 4—Tank; 5—Rake shaft; 6—Underflow pipe

中心桶最初主要用来耗散进料的动能, 实现进料料浆在较小动能时温和地进入沉降槽槽体并均匀地沉降, 减少或消除料浆在沉降槽内的短路流动^[7]。根据 Stokes 的沉降公式^[8], 颗粒的沉降速度与颗粒的直径呈正相关, 因此, 目前的沉降工艺中一般通过添加高分子絮凝剂来促进细小颗粒的吸附聚合, 以形成较大的絮凝颗粒团而加快沉降^[9-13]。随着高分子絮凝剂的广泛使用, 中心桶具有另外一个重要的作用, 即作为“絮凝发生器”, 絮凝剂主要是在中心桶内发挥作用, 中心桶内的流动形态和条件较适合高分子絮凝剂发挥架桥和吸附聚合作用^[14], 因此, 中心桶的结构对整个赤泥沉降槽而言至关重要, 国内外学者对沉降槽结构的研究主要放在中心桶上^[15-17]。PELOQUIN 等^[18]采用数值仿真的方法并结合工业验证, 证实了中心桶内加环形挡流板的高效作用和提高絮凝剂吸附沉降效率的有效性。HEATH^[6]提出了新型的 Vane 中心桶结构^[19], 并通过 CFD 数值仿真对比了 4 种不同结构的 Vane 中心桶, 验证了该新型中心桶结构在提高沉降槽

性能和促进絮凝效率等方面的有效作用。李茂等^[20-21]和王鸿雁等^[22]认为对赤泥沉降槽进料方式的改进研究具有重大意义, 改用射流式进料管后, 其文丘里结构能够实现部分清液的自循环, 对中心桶内的料浆进行充分混合稀释, 大幅提高沉降槽的产能和絮凝沉降效率, 在生产实践中已产生较大的经济效益。

引入絮凝剂后, 中心桶内的絮凝反应需要在一定条件下才能充分发挥絮凝剂的效果, 达不到这些条件不仅给工业生产带来新的问题, 而且还会造成絮凝剂的浪费, 只有当浆液与絮凝剂充分地混合, 絮凝剂的分子链条能充分伸展的条件下, 才能提高絮凝剂对赤泥颗粒的吸附架桥能力和絮凝化能力, 才有利于形成高质量的絮凝吸附和高效的絮凝沉降, 加快沉降速度和提高生产能力^[1, 23]。中心桶内固含浓度过高会使高分子絮凝剂的链条无法伸展, 絮凝剂的链条无法大面积接触到赤泥颗粒, 进而影响絮凝剂对赤泥颗粒的吸附和架桥连接; 固含浓度过低时, 赤泥颗粒较少, 絮凝剂无法高效地捕捉到足够的赤泥颗粒, 因此, 固含过高和过低都不利于絮凝剂发挥功效。张哲新等^[24]通过实验得出, 固含浓度为 7.5%(质量浓度)时, 沉降槽内赤泥的沉降速度会达到最佳; PELOQUIN 等^[18]通过仿真计算得出结论, 当中心桶内固含浓度均匀的分布在 50~100 g/L 时, 絮凝剂对赤泥的絮凝作用效果最好, 效率最高。房丽茹^[23]通过实验研究了沉降槽内苛碱浓度和氧化铝浓度对沉降槽内絮凝固含的影响, 当苛碱浓度和氧化铝浓度在工业生产值范围内时, 沉降槽内赤泥固含在 60~64 g/L 的范围内时可得到絮凝沉降的相对最优条件。河南某氧化铝厂通过对沉降槽进行改造, 将进料方式由直管改为射流管, 可以达成充分利用上层清液稀释料浆的目的, 且取消稀释循环泵的使用还能节约泵送动力消耗。由于沉降槽中心桶内料浆的稀释与中心桶的结构参数密切相关, 不恰当的中心桶进料结构有可能导致料浆稀释不够, 也可能使料浆被过分稀释, 降低絮凝剂的吸附沉降效率, 而且卷吸过多的上层清液对桶内料浆进行稀释会影响粗液的产能和生产效率, 且大量卷吸槽内上层清液需要额外增加进料泵的动力消耗, 经济性降低。本课题组结合实际工业生产中的矿石类型、絮凝剂的类型及矿石品位等因素, 通过现场实验和数值仿真的方法对沉降槽中心桶进行了大量研究^[20-21, 25-27], 认为当中心桶内固含浓度在 60~70 g/L 的范围内时, 最适合絮凝剂的吸附架桥作用, 絮凝效率最高。因此, 对沉降槽中心桶优化的一个重要目标是提高沉降槽中心桶内处于最适合絮凝剂发挥效能的固含浓度范围内(60~70 g/L)的料浆体积占中心桶体积的体积分数 η , 自定义的试验指

标 η 的表达式如式(1)所示:

$$\eta = \frac{V_{\text{best}}}{V_{\text{feedwell}}}$$

(1)

式中: V_{best} 为中心桶内固含在 60~70 g/L 范围内料浆的体积; V_{feedwell} 为沉降槽中心桶的体积。

射流式进料管沉降槽中心桶内流体混合作用强, 其文丘里结构能自吸入沉降槽上层清液对中心桶内的料浆进行稀释, 有利于料浆与絮凝剂充分混合而促进絮凝^[20-22]。目前, 关于中心桶及射流式进料管结构参数的设计研究数据尚为缺乏, 本文作者拟通过正交试验的方法对沉降槽中心桶和射流式进料管结构进行数值仿真研究, 以期得出最优的沉降槽结构参数组合, 提高沉降槽中心桶内的试验指标值 η , 以实现沉降槽中心桶结构的技术改造和性能提升。

1 正交试验方案的确定

1.1 试验指标

根据生产实践经验和理论分析, 沉降槽固液分离效率的高低与料浆在中心桶内的稀释程度密切相关, 中心桶内料浆的固含浓度分布对固液分离具有关键性的影响, 即固含浓度越靠近絮凝剂最佳絮凝的浓度区域, 沉降槽的固液分离效率就越佳。因此, 为寻求最佳的中心桶结构参数组合, 在正交试验设计中, 本试验以自定义的 η 作为正交试验的指标, 其值越大, 说明料浆与絮凝剂混合与稀释的效果越佳, 沉降槽的性能和沉降效果越好。

1.2 试验因素与水平的确定

结合相关的专业知识和现场调研的结果进行分析, 选取中心桶直径、中心桶深度、射流管直径(混合管直径 d_1 , 进料管直径 d_2 和喉管直径 d_3)、环形挡

流板离进料管下沿高度和喉嘴距(进料管收缩末端 d_3 距混合管 d_1 的距离 d_4)5 个结构因素研究沉降槽中心桶内的固含分布, 其相应的编号分别为: A、B、C、D 和 E, 每个因素取 5 个水平值, 各因素的水平值如表 1 所示。其中射流管尺寸示意图如图 2 所示。

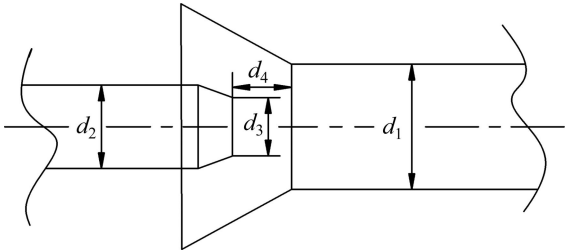


图 2 射流管主要尺寸示意图
Fig. 2 Schematic diagram of size of jet pipe

2 正交试验方案与结果分析

2.1 正交试验方案与数值计算结果

根据本试验设计的因素和水平数, 选用正交表 $L_{25}(5^5)$ 来安排试验。该正交表考虑 5 个因素, 每个因素 5 个水平, 采用仿真软件 FLUENT, 扩展的 Realizable $k-\epsilon$ 双方程湍流模型并结合 SIMPLE 算法进行数值仿真计算^[25-27], 具体计算过程详见文献 [25-27], 总共进行 25 次数值仿真试验。正交试验方案如表 2 所列。本实验的基础工况为河南某氧化铝厂的沉降槽原型, 结构组合为: 中心桶直径(因素 A)为 3 m、中心桶深度(因素 B)为 4 m、射流管直径(因素 C) d_1 、 d_2 和 d_3 分别为 0.8、0.48 和 0.36 m 的管型、环形挡流板离进料管下沿高度(因素 D)为 0.12 m、喉嘴距(因素 E)为 0.17 m。根据表 2 排好的试验方案, 按各序号规定的试验条件进行数值仿真试验, 计算的试验指标值 η 也列于表 2。由表 2 可知, 从试验指标的结果来看,

表 1 因素水平表

Table 1 Levels for each factor

Level	Factor						
	Feedwell diameter/m, A	Feedwell depth/m, B	Jet pipe diameter/m, C			Annular baffle to feed tube distance/m, D	Throat nozzle distance d_4 /m, E
			d_1	d_2	d_3		
1	3	4	0.64	0.40	0.28	0.06	0.09
2	3.5	4.5	0.68	0.42	0.30	0.1	0.12
3	4	5	0.72	0.44	0.32	0.14	0.15
4	4.5	5.5	0.76	0.46	0.34	0.18	0.18
5	5	6	0.80	0.48	0.36	0.22	0.21

表 2 正交试验表及优化指标

Table 2 Orthogonal table and evaluation criteria

Experimental No.	Factor					Evaluation criteria (η)
	A	B	C	D	E	
1	1	1	1	1	1	0.07
2	1	2	2	2	2	0.06
3	1	3	3	3	3	0.08
4	1	4	4	4	4	0.14
5	1	5	5	5	5	0.15
6	2	1	2	3	4	0.07
7	2	2	3	4	5	0.07
8	2	3	4	5	1	0.11
9	2	4	5	1	2	0.16
10	2	5	1	2	3	0.08
11	3	1	3	5	2	0.07
12	3	2	4	1	3	0.10
13	3	3	5	2	4	0.15
14	3	4	1	3	5	0.01
15	3	5	2	4	1	0.11
16	4	1	4	2	5	0.09
17	4	2	5	3	1	0.11
18	4	3	1	4	2	0.06
19	4	4	2	5	3	0.09
20	4	5	3	1	4	0.06
21	5	1	5	4	3	0.09
22	5	2	1	5	4	0.12
23	5	3	2	1	5	0.08
24	5	4	3	2	1	0.06
25	5	5	4	3	2	0.06

由于是多重因素综合影响的结果，无法直观地得出最优的结构参数，需要运用数理统计的方法对结果进行极差分析和方差分析。

2.2 极差分析并确定因素的主次顺序

采用极差分析法对正交试验方案的计算结果进行分析，如图 3 所示，可以得出 5 个因素对试验指标影响的主次关系，初步得出沉降槽五因素五水平的优化方案。一般而言，同一因素下不同水平的极差是有差异的，这说明各因素的水平对试验结果的影响是不同的^[28]。根据表 2 安排的试验进行数值计算并结合所得到的仿真计算结果，得到同一因素在不同水平值下试验指标的平均值，平均值越大，表明试验指标值越大，该水平下工况越佳。平均值的极差越大，表示该因素的水平在试验范围内的变化会导致试验指标在数值上产生较大的变化，所以极差最大的就是对试验结果影响最大的因素，即最主要的因素，反之为次要因素。由极差分析可知，A~E 5 个因素的极差值分别为 0.018、0.018、0.064、0.042 和 0.028，故可知对沉降槽试验指标 η 影响最大的因素是射流管直径，其次是挡流环板离进料管下沿高度、喉嘴距、中心桶直径和中心桶的深度，即影响因素的主次顺序为 C-D-E-A-B。各因素水平对试验指标的影响如图 3 所示，比较各因素不同水平下的平均值大小，可以确定当中心桶直径(因素 A)为 3 m、中心桶深度(因素 B)为 5 m、射流管直径(因素 C) d_1 、 d_2 和 d_3 分别为 0.8、0.48 和 0.36 m、环形挡流板离进料管下沿高度(因素 D)为 0.22 m、喉嘴距(因素 E)为 0.18 m 时，可以获得对应因素下试

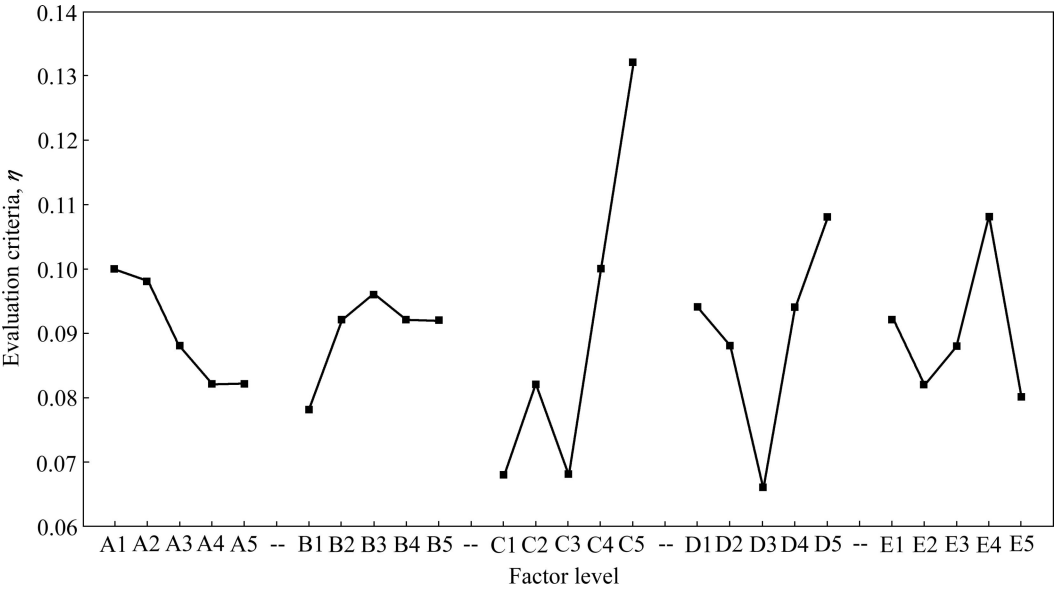


图 3 各因素水平对试验指标的影响

Fig. 3 Effect of levels for each factor on evaluation criteria

验指标的最大值,由此可以确定最优的水平组合为 $A_1B_3C_5D_5E_4$ 。

由图3可以看出,在各因素中随着水平值的变化,对试验指标 η 影响最为显著、试验指标变化最大的是射流管直径,合适的射流直径能显著提高中心桶内最佳絮凝固含浓度范围内料浆的体积所占中心桶体积的体积分数。同时,在一定范围内,随着中心桶直径的增加试验指标逐渐降低,试验指标随着中心桶深度的增加而增加,存在一个最大值,而后随着中心桶深度的增加试验指标值有所减少,即在允许的高径比范围内中心桶的深度越大,直径越小的中心桶结构更优;而环形挡流板距离进料管下沿的高度对试验指标的影响是先减少后增大,即在结构范围内,环形挡流板离进料管下沿的距离越近或越远效果更优,但远距离的效果优于近距离的效果;试验指标随喉嘴距的变化而波动变化,并不呈现出规律性,这是由于射流管的直径和喉嘴距是射流管的结构参数,二者之间具有一定的关联性,这也说明该因素对试验指标的影响不显著,是这5个因素中对试验指标影响最小的因素。

2.3 方差分析

极差分析给出了各因素对试验指标 η 影响大小的排序。而方差分析将试验中由于试验条件改变引起的数据波动同试验误差引起的数据波动区分开来,估计误差的大小^[28]。此外,对于各因素对试验结果影响的显著性程度,方差分析给以精确的数量估计,选用偏差平方和最小的列(中心桶深度因素B)作为参考误差列计算方差,进一步计算各列的偏差平方和、自由度及各列的误差列方差和方差比。采用F检验法^[28]来判

断所考察因素的作用是否显著。根据方差计算结果,得到因素中心桶直径A、射流管直径C、挡流环板离进料管下沿高度D和喉嘴距E的方差比分别为1.541、15.083、4.875和2.583,因此根据分析结果和F检验法则,可得知挡流环板离进料管下沿高度(D)、喉嘴距(E)、射流管直径(C)对试验指标均有影响,其中射流管直径因素的方差比最大,对试验结果的影响最为重大,为显著因素;挡流环板离进料管下沿高度和喉嘴距这两个因素的方差较小,但对试验结果的影响比较重要,为较显著因素;而中心桶直径(A)和中心桶深度(B)对试验指标有一定影响但不明显,为不显著但有影响因素。由此可知,射流管的直径是中心桶结构的关键,是中心桶结构优化的重点,而挡流环板离进料管下沿高度、喉嘴距、中心桶的直径和中心桶深度对中心桶性能的影响不大,在经验值范围之内即可,可以根据生产现场的实际情况,如改造和施工难易等选定结构参数。

3 优化工况与基础工况对比分析

根据正交试验分析结果,得到优化的沉降槽中心桶结构参数后,将优化后的沉降槽结构中心桶内固含分布情况与基础工况的数据进行对比分析,得出优化前后中心桶内固含分布如图4所示,以及中心桶内不同固含区间浆液所占体积分数的统计图如图5所示。由图4和5可知,在进料固含为120 g/L和其他工艺参数不变的条件下,另一方面,根据正交试验优化指标,原始的基础结构沉降槽中心桶内试验指标值 η 仅

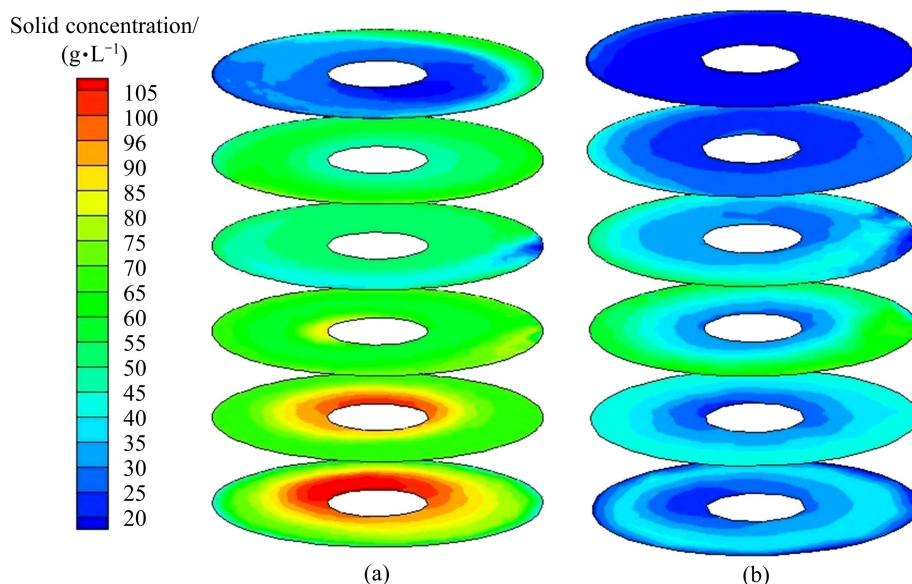


图4 最优工况与基础工况下中心桶内固含分布图

Fig. 4 CFD model prediction of solid concentration distribution in feedwell: (a) Optimal case; (b) Base case

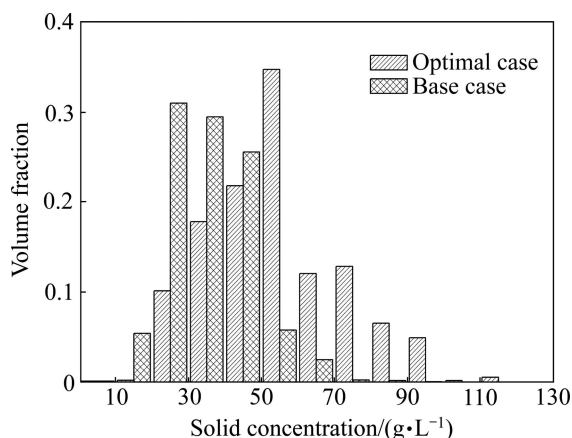


图 5 最优工况与基础工况下中心桶内不同固含区间浆液所占体积分数

Fig. 5 Volume fraction distribution of solid concentration in feedwell between optimal case and base case

为 2.5%，而优化工况中心桶内试验指标值 η 相比基础工况绝对值增加了 9.5%，达到了 12.0%，优化后的试验指标值 η 是优化前的 4.8 倍，显著地提高了优化试验指标；另一方面，从图 4 中心桶内固含分布和图 5 的固含统计数据来看，基础工况下中心桶内的固含较低，几乎整个中心桶内的固含都在最优絮凝固含范围值(60~70 g/L)之下，主要在 20~50 g/L 的范围内，这表示中心桶内的固含被过分稀释，从而导致中心桶的空间利用率不高，且还需要卷吸更多的槽内上层清液并消耗更多的泵送动力，效率低且不够经济；而优化后的中心桶结构下中心桶内固含分布相对较广，而且主要分布在最优絮凝固含范围值(60~70 g/L)左右，并且 50~60 g/L 和 70~80 g/L 范围内的料浆体积所占中心桶体积的体积分数占据绝对优势，提高了中心桶内料液的混合程度和中心桶的空间利用率，这与 PELOQUIN 等^[18]的研究相一致，而本试验指标的选取更具代表性。根据絮凝相关知识和正交试验优化指标可知，处于最佳絮凝固含范围内的料浆体积分数越大，并且固含浓度越靠近絮凝剂发挥作用的浓度区域，越有利于提高絮凝剂的吸附沉降效率，沉降槽的固液分离效率就越佳。而优化后的沉降槽中心桶结构不仅显著的提高了试验指标值 η ，而且也提高了处于最佳絮凝固含范围附近的固含区间内的料浆的体积分数，这对提高中心桶的效率和整个沉降槽的性能具有重大的意义。

4 结论

1) 提出自定义的评价分析指标：中心桶内固含在

60~70 g/L 范围内的料浆体积分数 η ，并作为正交试验的评价指标，正交试验结果表明，按对试验指标影响程度的大小，各因素由大到小排序为射流管直径、环形挡流板离进料管下沿高度、喉嘴距、中心桶的直径、中心桶的深度。

2) 射流管直径、环形挡流板离进料管下沿高度、喉嘴距对沉降槽中心桶的试验指标均有影响，其中射流管直径影响最为显著；得到最优的结构参数组合为：中心桶直径 3 m，中心桶深度 5 m，射流管直径 d_1 、 d_2 和 d_3 分别为 0.8、0.48 和 0.36 m，环形挡流板离进料管下沿高度 0.22 m，喉嘴距 0.18 m。

3) 优化中心桶的结构参数后，桶内浆液的混合程度得到显著提高，在进料固含为 120 g/L 的条件下，中心桶内固含在 60~70 g/L 范围内的料浆体积分数 η 由原来的 2.5%提高到了 12.0%，即达到了基础工况的 4.8 倍，通过改进沉降槽中心桶的结构参数，可显著提高沉降槽的絮凝沉降效率。

REFERENCES

- [1] 杨守志, 孙德堃, 何方箴. 固液分离[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2008: 248-254.
YANG Shou-zhi, SUN De-kun, HE Fang-zhen. Solid-liquid separation[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2008: 248-254.
- [2] SENAPATI B, KUMAR S C, BANERJEE T. Improvement in capacity of high rate decanter through process modification[J]. Travaux, 2010, 35(9): 289-294.
- [3] 刘莉娜, 先 桁, 孙克萍. 氧化铝工业中沉降分离设备进步[J]. 中国稀土学报, 2008, 26(1): 970-972.
LIU Li-na, XIAN Heng, SUN Ke-ping. Technical progress on the settling and separating equipment in China alumina industry[J]. Journal of the Chinese Rare Earth Society, 2008, 26(1): 970-972.
- [4] MOHANARANGAM K, STEPHENS D W. CFD modelling of floating and setting phases in setting tanks[C]// WITT P J, SCHWARZ M P. Seventh international conference on CFD in the minerals and process industries. Melbourne: CSIRO, 2009: 1-7.
- [5] 毕诗文, 于海燕, 杨毅宏, 赵福辉, 尹中林, 翟秀静. 拜耳法生产氧化铝[M]. 北京: 北京冶金工业出版社, 2007.
BI Shi-wen, YU Hai-yan, YANG Yi-hong, ZHAO Fu-hui, YIN Zhong-lin, ZHAI Xiu-jing. Alumina production by Bayer process[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2007.
- [6] HEATH A R. Thickener feedwells by CFD—A case of more is more[J]. Outotec, 2009, 24: 9-12.
- [7] BERRES S, BURGER R. On gravity and centrifugal settling of polydisperse suspensions forming compressible sediments[J].

- International Journal of Solids and Structures, 2003, 40(19): 4965–4987.
- [8] 温金德, 杜善国. 液固分离的动态理论与新型沉降槽[C]// 第十四届全国氧化铝学术会议论文集. 焦作: 中国有色金属学会, 2004: 274–276.
- WEN Jin-de, DU Shan-guo. New settlement theory and the new type deep cone & high wall settler[C]// The Fourteenth National Conference on Alumina. Jiaozuo: The Nonferrous Metals Society of China, 2004: 274–276.
- [9] FAWELL P D, FARROW J B, HEATH A R, NGUYEN T V, OWEN A T, PATERSON D, RUDMAN M, SCALES P J, SIMIC K, STEPHENS D W, SWIFT J D, USHER S P. 20 Years of AMIRA P266 “improving thickener technology”: How has it changed the understanding of thickener performance? [C]// RICHARD J R, FOURIE A, BARRERA S. Proceeding of the 12th International Seminar on Paste and Thickened Tailing. Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2009: 59–68.
- [10] CONCHA F, BURGER R. Thickening in the 20th century: A historical perspective[J]. Minerals & Metallurgical Processing, 2003, 20(2): 57–67.
- [11] ASLAN N, SHAHRIVAR A A, ABDOLLAHI H. Multi-objective optimization of some process parameters of a lab-scale thickener using grey relational analysis[J]. Separation and Purification Technology, 2012, 90: 189–195.
- [12] GLADMAN B J, USHER S P, SCALES P J. Understanding the thickening process[C]// JEWELL R J, LAWSON S, NEWMAN P. Paste 2006. Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2006: 5–12.
- [13] FARROW J B, SWIFT J D. A new procedure for assessing the performance of flocculants[J]. Int J Miner Process, 1996, 46(3): 263–275.
- [14] MOHANANANGAM K, YANG W, SIMIC K. Application of ultrasonic velocity profiler (UVP) in the minerals industry[C]// Proceedings of the 17th Australasian Fluid Mechanics Conference. New Zealand: University of Auckland/Australasian Fluid Mechanics Society, 2010: 765–768.
- [15] KAHANE R B, SCHWARZ M P, JOHNSTON R M. Residue thickener modelling at Worsley alumina[C]// Inter Conf on CFD in Mineral & Metal Processing and Power Generation. Clayton: CSIRO Australia, 1997: 109–117.
- [16] KAHANE R, NGUYEN T, SCHWARZ M P. CFD modelling of thickeners at Worsley alumina Pty Ltd[J]. Applied Mathematical Modelling, 2002, 26(2): 281–296.
- [17] OWEN A T, NGUYEN T V, FAWELL P D. The effect of flocculant solution transport and addition conditions on feedwell performance in gravity thickeners[J]. International Journal of Mineral Processing, 2009, 93(2): 115–127.
- [18] PELOQUIN G, BAXTER H, SIMARD G, KOCAEFE D, BUI R T. Improving red mud flocculation at aughinish alumina limited[C]// Proceedings of the 6th International Alumina Quality Workshop. Brisbane: International Alumina Quality Workshop, 2002: 288–293.
- [19] TRIGLAVCANIN R. Mineral processing Introducing ‘next generation’ feedwells[J]. Filtration & Separation, 2008, 45(7): 34–34.
- [20] 李 茂, 周子民, 李秋龙, 周 天, 雷 波. 一种双进料管平底沉降槽: 中国, 201310168902.1[P]. 2013–05–09.
- LI Mao, ZHOU Jie-min, LI Qiu-long, ZHOU Tian, LEI Bo. A kind of thickener with double feed pipe: China, 201310168902.1[P]. 2013–05–09.
- [21] 李 茂, 金立业, 蒋 炜, 潘加裕, 段亚甫, 韦治江, 齐道润, 雷 波. 一种固液分离沉降槽: 中国, 201220116708.X[P]. 2012–11–21.
- LI Mao, JIN Li-ye, JIANG Wei, PAN Jia-yu, DUAN Ya-fu, WEI Zhi-jiang, QI Dao-run, LEI Bo. A kind of solid-liquid separation thickener: China, 201220116708.X[P]. 2012–11–21.
- [22] 王鸿雁, 李明福, 门新强. 拜耳法赤泥沉降槽的技术改造[J]. 有色设备, 2005(6): 9–11.
- WANG Hong-yan, LI Ming-fu, MEN Xin-qiang. Technical innovation of red mud precipitation tank in Bayer process[J]. Non-ferrous Metallurgical Equipment, 2005(6): 9–11.
- [23] 房丽茹. 赤泥絮凝颗粒致密性的研究[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2008.
- FANG Li-ru. The study on the compact performance of the red mud flocculent grain[D]. Shenyang: Shenyang Ligong University, 2008.
- [24] 张哲新, 尹周澜, 温金德, 刘福刚. 高效沉降槽在烧结法氧化铝厂生产中的应用[J]. 山东冶金, 2005, 27(5): 20–23.
- ZHANG Zhe-xin, YIN Zhou-lan, WEN Jin-de, LIU Fu-gang. Application of high-efficient precipitation tank in alumina production with sintering process[J]. Shandong Metallurgy, 2005, 27(5): 20–23.
- [25] 雷 波. 赤泥分离沉降槽固液分离的数值模拟与优化[D]. 长沙: 中南大学, 2013.
- LEI Bo. Numerical simulation and optimization on solid-liquid separation in the red mud thickener[D]. Changsha: Central South University, 2013.
- [26] ZHOU Tian, LI Mao, ZHOU Chen-Q, ZHOU Jie-min. Numerical simulation and optimization of the red mud separation thickener with self-dilute feed[J]. Journal of Central South University, 2014, 21(1): 344–350.
- [27] 李 茂, 雷 波, 周 天, 李秋龙. 赤泥分离沉降槽进料管结构的数值模拟和优化[J]. 轻金属, 2013(6): 9–14.
- LI Mao, LEI Bo, ZHOU Tian, LI Qiu-long. Numerical simulation and optimization on the feed pipe structure of the red mud thickener[J]. Light Metals, 2013(6): 9–14.
- [28] 李志西, 杜双奎. 试验优化设计与统计分析[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- LI Zhi-xi, DU Shuang-kui. Optimization experiment design and statistical analysis[M]. Beijing: Science Press, 2010.

(编辑 李艳红)