

doi:10.3969/j.issn.1671-9492.2020.04.016

680 m³浮选机工业化应用过程中的动力学性能测试与分析

韩登峰^{1,2,3}, 沈政昌^{1,2}, 余 玮⁴, 刘利敏^{1,2}, 李春华⁴,
张 明^{1,2,3}, 陈金祥⁴

(1. 矿冶科技集团有限公司, 北京 100160; 2. 矿物加工科学与技术国家重点实验室, 北京 100160;
(3. 北京科技大学, 北京 100083; 4. 江西铜业股份有限公司 德兴铜矿, 江西 德兴 334200)

摘 要: 680 m³浮选机投入生产试运行已一年有余, 表现出卓越的设备稳定性和分选性。从浮选流体动力学角度出发, 对 680 m³浮选机在带矿运行过程中的充气性能、矿浆循环悬浮性能和气泡大小及其负载性能进行了测试分析。结果表明, 680 m³浮选机充气量可以达到 1.1 m³/(m²·min) 以上, 能够满足一般硫化矿大气量的生产需求, 空气分散度在 7 以上, 平均气含率约 7%; 不同深度浮选槽内矿浆浓度和粒度分布较为均匀, 无明显分层现象。气泡表面通量可达 39.20 s⁻¹, 随着气泡的上浮, 气泡负载呈现上升趋势, 最高可达 3.37 g/L。优越的浮选流体动力学特性充分地保障了 680 m³浮选机良好的分选效果。

关键词: 浮选机; 680 m³; 工业化应用; 动力学性能

中图分类号: TD456 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-9492(2020)04-088-07

Test and Analysis of Dynamic Performance of 680 m³ Flotation Machine in Industrial Application

HAN Dengfeng^{1,2,3}, SHEN Zhengchang^{1,2}, YU Wei⁴, LIU Limin^{1,2}, LI Chunhua⁴,
ZHANG Ming^{1,2,3}, CHEN Jinxiang⁴

(1. BGRIMM Technology Group, Beijing 100160, China;

2. State Key Laboratory of Mineral Processing, Beijing 100160, China;

3. Beijing University of Science and Technology, Beijing 100083, China;

4. Jiangxi Copper Company Limited Dexing Copper Mine, Dexing 334200 Jiangxi, China)

Abstract: 680 m³ flotation machine has been put into operation for more than a year, showing excellent equipment stability and separation performance. The overall aeration performance, the suspension performance of slurry and the size and load of air bubbles of 680 m³ flotation cells in the process of ore belt operation were tested and analyzed on the basis of hydrodynamics of flotation. The results show that the charging capacity of 680 m³ flotation machine can reach 1.1 m³/(m²·min) with air dispersion above seven an average gas content about 7%, which can meet the production demand of large gas volume of common sulfide ores. The pulp concentration and particle size distribution in flotation cells of different depths are relatively uniform, without obvious stratification. The bubble surface area flux can reach 39.20 per second. With the bubbles rising, the bubble load showed an upward trend up to 3.37 g/L. The excellent hydrodynamic characteristics of flotation fully guarantee its good separation effect.

Key words: flotation machine; 680 m³; industrial application; kinetic performance

收稿日期: 2020-05-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51674034); 矿冶科技集团有限公司重大基金项目(YJZ201701); 科技部创新方法工作专项(2017IM060200)

作者简介: 韩登峰(1984—), 男, 陕西蒲城人, 硕士, 高级工程师, 主要从事选矿设备研究设计及工程转化与技术推广工作。

E-mail: dongdaren@126.com

随着矿产资源的不断开采,资源禀赋越来越差,尾矿堆存量不断加大,生存、环境压力骤然增大,促使企业必须依靠技术升级来实现大规模矿产资源的集约化开发与建设。这就对超大型浮选装备的处理能力、单机性能、智能化水平提出更高的要求^[1]。

浮选机作为当前世界最主要的选矿装备,在国际间的竞争不断加剧,浮选机大型化势在必行,优势显而易见。首先,大型浮选机可减少对厂房的需求,在原有厂房空间下即可提高选矿厂的处理规模,大幅降低基建投资成本。第二,随着设备数量的减少和设备自动化程度的提高,设备的操控性和稳定性大幅提升,运行维护成本下降。第三,随着设备单机性能的提升,可有效降低每吨矿石的处理成本。国际矿业巨头 OUTOTEC、FLSMIDTH 公司等在近十年中已相继研发了 350、500、630、660 m³超大型浮选机,并着力研究自动化高效检测控制技术^[2-4]。

我国超大型浮选机研发技术相对比较落后,限制了我国的矿业安全和稳定发展。2018年由我国独立研制的 680 m³浮选机工业化测试获得成功,一举打破了国外公司在这方面的技术垄断。680 m³浮选机研制成功后随即转入了生产试运行阶段,用于对选铜尾矿的再选处理。至今,680 m³浮选机投入工业试生产已一年有余,表现出了卓越的技术性能(图 1)。680 m³浮选机分选性能的保障来源于自身的浮选流体动力学性能,本文将针对其中主要的几项动力学参数展开研究分析,以揭示其内在品质。



图 1 680 m³浮选机工业化应用

Fig. 1 Industrial application of 680 m³ flotation machine

1 680 m³浮选机技术概况

680 m³浮选机是目前世界单槽容积最大的浮选机,浮选机槽体直径 11 m,设备总高 12 m,单槽容积达到 680 m³,通过能力 30~100 m³/min,装机功率

500 kW,单位容积实耗功率小于 0.6 kW/m³,带矿空气分散度 3.0 以上,槽内矿浆循环量可达 500 m³/min,悬浮均匀,无明显的分层和沉槽现象;并实现了充气量、液位、泡沫流速、关键部件状态监测等多信息的物理融合与优化控制,满足 24 h 无人值守连续运行和千公里以上数据实时传输的超远程自动控制技术需求。

680 m³浮选机在研发过程中采用了基于多尺度流动控制机理的物质输运调控技术、基于目的矿物选别特性的动力学调控技术、基于湍流耗散率调控的气泡矿化技术、基于低精矿产率的泡沫富集调控回收技术、基于泡沫图像识别的优化控制技术和基于云平台的数据存储与远程监控技术等六项关键技术^[5],有力地保障了设备的首次研发即获成功。

2 浮选机槽内充气性能分析

2.1 充气性能测试方法

充气性能是浮选机最主要的性能,在生产过程中除了要提供与浮选工艺要求相匹配的充气量大小外,充气过程的空气分散度和气含率也是表征浮选机性能的关键参数。本次试验是在不同充气条件下,检验 680 m³浮选机槽内的空气分散度和气含率分布情况。

2.1.1 充气量与空气分散度测试

空气分散度是衡量浮选设备对于空气搅拌分散能量的一项重要参数,设备越大,分散的均匀性相对越差。而浮选机槽体内优异的流场环境可以促进空气的有效分散,提高空气分散度。680 m³浮选机为圆形槽结构,在叶轮的搅拌下,周向各点充气性能相近,差异主要体现在径向方向上。因此,在径向方向间隔分布了 6 个固定测量点,其中外泡沫区 4 个点,内泡沫区 2 个点。如图 2 所示。

充气量测试采用最新研制的自动充气量测量装置进行,工作原理是排水集气法。采用计算机进行精确控制和测量,这样充气量的测量速度更快,精度更高^[6]。

2.1.2 气含率测试

气含率能够体现出矿浆的含气状态,浮选机槽体内不同深度气含率不同。采用如图 3 所示采样装置,将取样器插入槽内不同位置,通过销轴机关迅速释放两端的堵球,将矿浆和所含气体密封在取样容器内。对容器内的矿浆体积进行测量,即可算出不同位置的气含率。

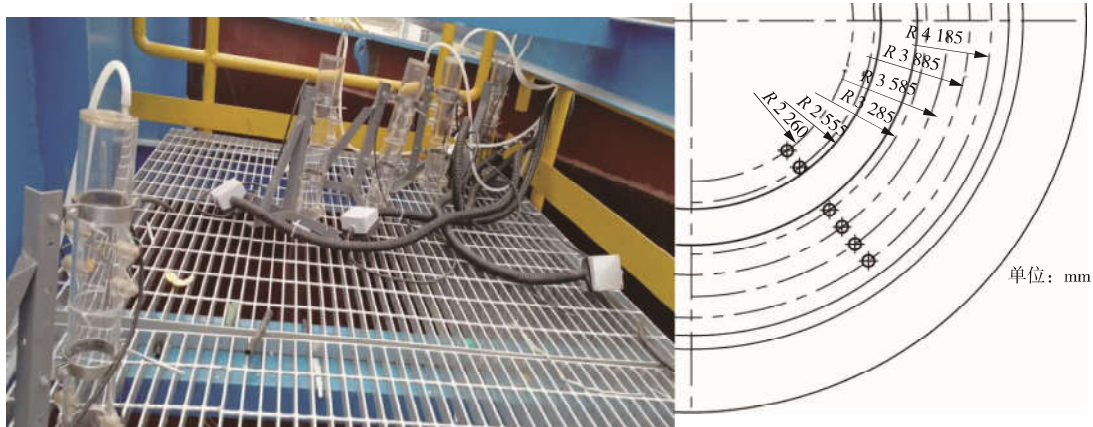


图2 充气量自动测试系统及测点分布

Fig. 2 Aeration flow rate automatic test system and distribution of measuring points

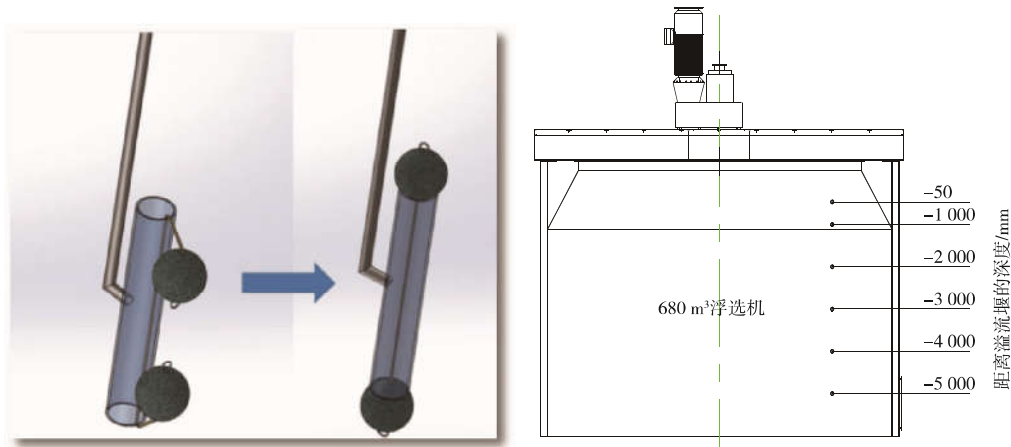


图3 气含率/深槽取样装置及测试位置

Fig. 3 Gas holdup/deep sampling device and test position

2.2 680 m³浮选机的充气性能

2.2.1 充气量分布特征

在带矿工业应用过程中,每个班次对浮选机1[#]~6[#]测点进行充气量测量,总共进行了22个班次。由图4可以看出,在工业化生产过程中,每个测点的充气量在生产工艺波动下也存在着一定的波动,但都保持在一定范围之内。生产期间最大充气量可达1.1 m³/(m²·min)以上,满足一般硫化矿对高气量的生产需求。

2.2.2 充气量与空气分散度分析

图5为带矿条件下的充气量累计平均值。经计算,在充气量约0.94 m³/(m²·min)左右的充气量条件下,空气分散度可达7以上,表现出优良的空气分散能力。

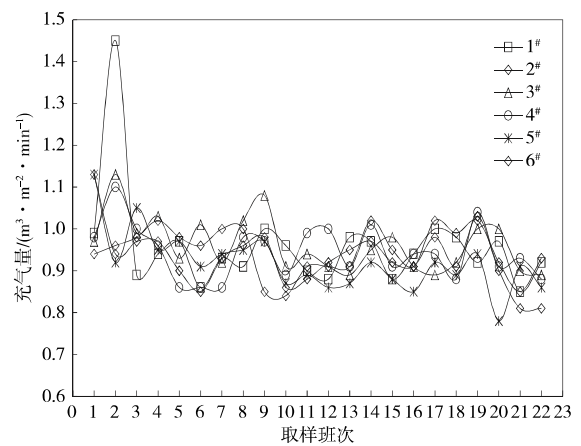


图4 带矿运行中680 m³浮选机充气量测量

Fig. 4 Measurement of aeration flow rate of 680 m³ flotation machine in ore processing

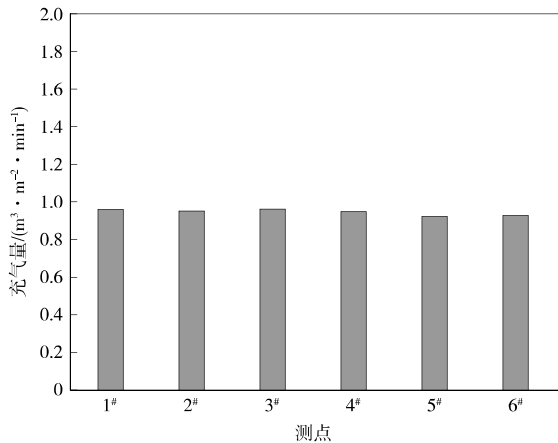
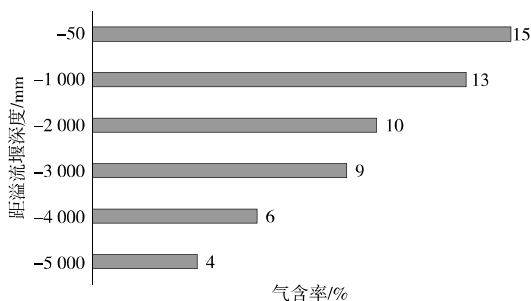


图5 充气量

Fig. 5 Aeration flow rate

2.2.3 气含率测试结果分析

气含率是指矿浆中保有气体的量的多少,也称为气体保有量。它是浮选机的一个重要参数,关系到选矿性能和浮选机的容积利用特性。由图6可以看出,整个浮选机槽体内气含率在不同深度是不同的,越靠近液面气含率越高,溢流堰以下50 mm处最高可达15%,这符合气含率在槽内的分布特征。对整个浮选槽的综合气含率进行计算可知,测试期间680 m³浮选机的综合气含率为7.06%。

图6 680 m³浮选机气含率分布Fig. 6 Gas holdup distribution of 680 m³ flotation machine

3 矿浆循环能力与悬浮性能分析

3.1 矿浆循环、悬浮性能测试方法

3.1.1 矿浆循环能力测试

叶轮循环量是反映浮选机动力学性能的关键数据,试验系统采用电磁流量计通过测量循环筒内流速获取循环量。试验中采用两个电磁流量计(A和B)对测试数据进行校核。两个电磁流量计固定在杆的一端,并深入到导流筒内,测试方向与矿浆流向方向一致。杆的另一端由浮选机槽体伸出,并

设置把手可进行抽拉旋转操作。操作杆与槽体之间的固定采用类似于浮选柱气泡发生器的锁紧装置,可以实现在线调整。同时,在操作杆中部位置增加支撑导杆,保障整个操作杆的平直,便于调节操控。如图7所示。

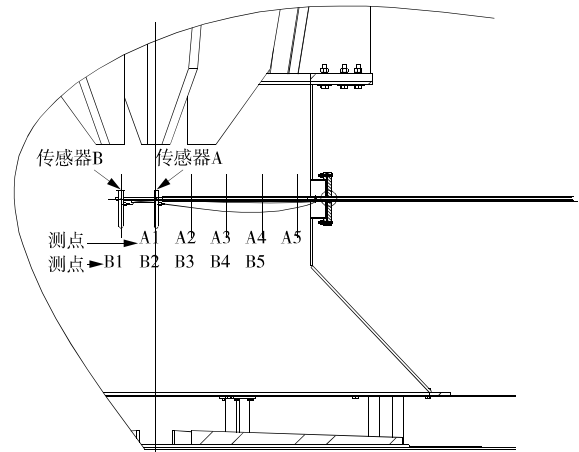


图7 循环量测量装置及测点分布

Fig. 7 Circulation measuring device and measuring point distribution

3.1.2 矿浆悬浮能力测试

深槽取样是检测浮选槽内矿物悬浮的重要手段,以往的方法多采用虹吸法通过软管将不同槽深位置的矿浆吸取出来进行分析,该方法实施起来工作量较大,精确度偏低,而常规取样敞口取样匀又无法满足深槽取样需求。悬浮测试中采用了与气含率相同的取样装置和取样点。

3.2 680 m³浮选机的矿浆循环、悬浮能力

3.2.1 矿浆循环能力分析

浮选机的循环能力决定了其对粗粒尾矿的选别能力,生产测试过程中不能出现大面积的沉槽现象,这就要求循环能力要强。在尾矿浮选工业测试过程中,浮选机转速90 r/min,充气量1.0 m³/(m²·min)条件下循环能力可达500 m³/min,强大的循环能力保障了粗粒级矿物的充分悬浮。如图8所示。

3.2.2 浓度及粒度分布特征分析

在开路试验期间,对680 m³浮选机的悬浮能力进行了测试。测试内容包括不同深度的浓度分布和粒级分布,测试结果见图9、图10。

由图9可以看出,680 m³浮选机槽内矿浆的浓度分布在30%~35%的范围内,相对来说是比较均匀的,特别是在3000~6000 mm的深层范围,浓度分布均匀性较高,没有出现浓度分层。

由图10可以看出,矿浆中-0.074+0.038 mm的粒级含量在各个深度层都比较低,这说明了

-0.074+0.038 mm 粒级的目的矿物在粗扫选作业中优先上浮。总体来看,各粒级在同一深度位置的一致性较好,说明了 680 m³ 浮选机对粒级悬浮的分布效果较好。

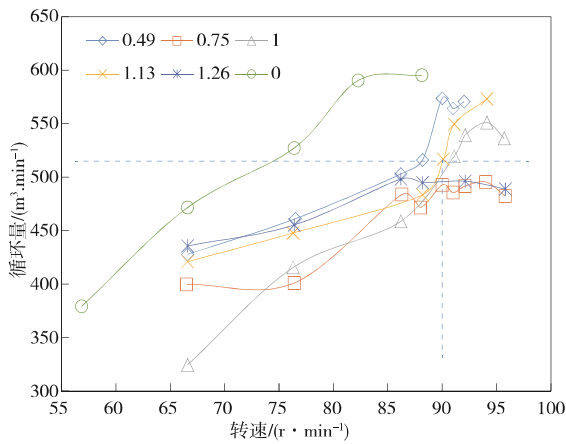


图8 不同充气量下循环量随转速变化趋势

Fig. 8 The trend of circulation quantity with rotation speed under different aeration

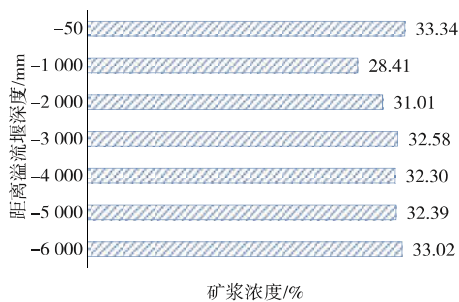


图9 680 m³ 浮选槽内矿浆浓度分布

Fig. 9 Concentration distribution of pulp in 680 m³ flotation cell

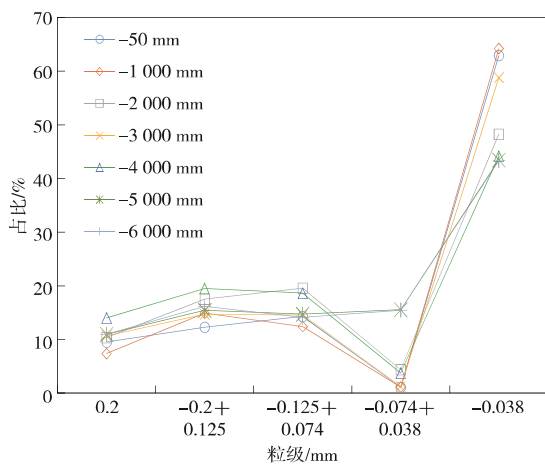


图10 悬浮粒度分布

Fig. 10 Suspended particle size distribution in 680 m³ flotation cell

4 气泡负载特性分析

4.1 气泡大小及其负载测试方法

4.1.1 气泡大小测试方法

浮选过程中疏水性矿物颗粒与气泡碰撞粘附后,在气泡浮力的作用下运输到溢流堰从而得到回收。气泡大小及其分布对浮选回收效果影响显著。因此,非常有必要对生产过程中气泡特性进行检测和诊断。

测试采用的气泡大小分析仪型号为 TMBSA-II,是一种专用于矿浆环境中气泡尺寸在线测量分析与诊断的仪器,该仪器采用图像处理技术,精确检测同一时刻大量的气泡组成情况。

将仪器的气泡导流管插入矿浆分离区,并向观察箱和气泡导流管内装满水,气泡导流管下端口堵住,测定时,将气泡导流管下端口打开,矿浆中的气泡将随气泡导流管进入气泡观察箱,待气泡进入气泡观察箱后,采用高清照相机拍摄,采用图像处理软件对气泡直径进行分析测定。如图 11 所示。

4.1.2 气泡负载测试方法

测试采用的气泡负载测量装置包括取样上导管、收集腔室、导气管和吸气泵等。该装置采用了液位动态平衡法,即通过吸气泵的抽吸功能使收集腔室内的液位保持在某一定确定位置,这就解决了测试容器内清水下流所造成的夹带和因容积小一次取样不足等问题。具有专利技术的气泡负载测试系统如图 12 所示,该测量装置的工作原理在于采用吸气泵将取样过程产生的气体不断吸出,同时控制吸气量,使收集腔室内的液位保持恒定。由于测量装置中的水不会流出,液位不会下降,使得测量过程可持续任意时间,直到取得足够的分析试样。测试过程中,由于没有水的排出,这就大大降低了水流裹挟矿化气泡或颗粒逃出测量容器的概率,使得测量精度显著提升^[7]。

气泡负载测量在溢流堰以下 1 500 mm 范围内进行,每隔 300 mm 一个取样点,共计 5 个取样点。取样位置见图 12。气泡取样图见图 13。

4.2 680 m³ 浮选机的气泡负载性能

4.2.1 气泡大小特征分布

TMBSA-II 气泡大小分析仪能够对气泡集群进行快速分析,在 680 m³ 浮选机上分别对四个不同的点进行了气泡大小测量,测量结果见表 1。由表 1 结果可知,在平均充气量为 1.30 m³/(m²·min) 条件下,气泡直径 D₃₂ 值约 3.34 mm,对应的气泡表面积通量达到 39.20 s⁻¹。

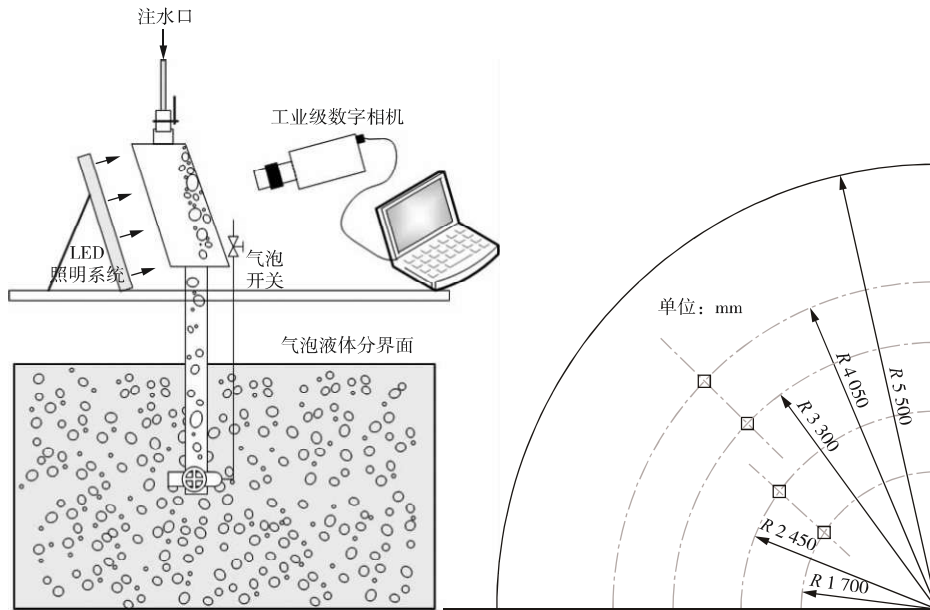


图 11 气泡大小测试原理及测点分布

Fig. 11 Bubble size measuring principle and measuring point distribution

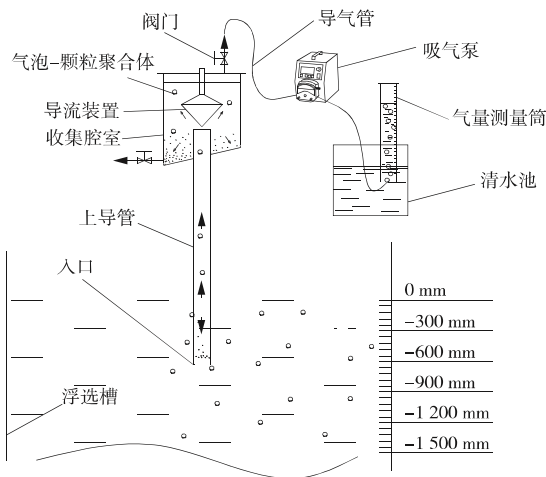


图 12 气泡负载测量原理与测点分布

Fig. 12 Bubble load measuring principle and measuring point distribution

4.2.2 气泡负载特性分析

680 m³浮选机用于处理铜扫选作业的尾矿,铜的赋存状态多以粗粒连生体颗粒和超细粒矿物为主,较难以富集,680 m³浮选机的应用主要目的在于回收其中未充分解离的粗粒连生体颗粒矿物,通过精矿再磨最终达到回收率提升目的。对 680 m³浮选机溢流堰以下 1 500 mm 范围气泡负载进行取样分析,通过图 14 可以看出,在近液面区域,气泡负载随着气泡的上浮而呈现上升趋势,最高可达 3.37 g/L。这说明了在尾矿再选过程中,浮选机近液面区具有一定的富集作用。

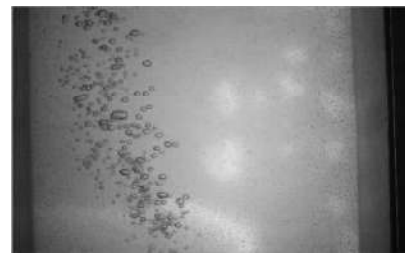


图 13 气泡取样图

Fig. 13 Bubble sampling Pattern

表 1 气泡直径测量结果
Table 1 Bubble diameter measurement results

测点	充气量/ (m ³ · m ⁻² · min ⁻¹)	气泡直径 D ₃₂ / mm	表面积通量/ s ⁻¹
1	1.36	3.28	41.47
2	1.41	3.99	35.28
3	1.39	3.34	41.58
4	1.05	2.74	38.48
均值	1.30	3.34	39.20

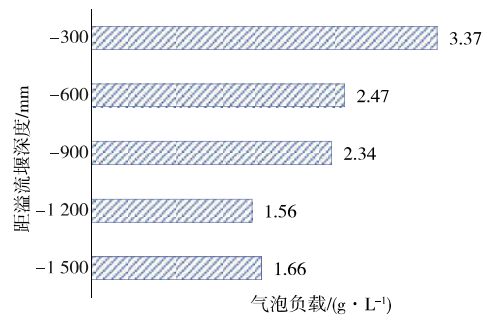


图 14 680 m³浮选机气泡负载特征分布
Fig. 14 Bubble load distribution of 680 m³ floatation machine

5 结论

680 m³浮选机作为我国目前研制的大型浮选机,其动力学性能直接影响到其分选性能,通过对680 m³浮选机浮选流体动力学性能研究,可以得出以下结论:

1)680 m³浮选机充气量可以达到1.1 m³/(m²·min)以上,能够满足一般硫化矿大气量的生产需求;

2)在带矿生产较优充气量条件下(平均0.94 m³/(m²·min)),空气分散度可达到7以上,分散效果良好。680 m³浮选机带矿条件下的平均气含率约7%,近液面区可达到15%;

3)680 m³浮选机矿浆循环量在生产转速和充气量下可达500 m³/min,悬浮测试表明,不同深度浮选槽内矿浆浓度分布均匀,各粒级分布在不同深度也较为一致。

4)在选铜尾矿再选过程中,气泡负载随着气泡的上浮而呈现上升趋势,最高可达3.37 g/L。

680 m³浮选机的成功研发使我国成为世界上拥有600 m³以上大型浮选机技术的三个国家之一,实现了我国在新的矿业形式下与国际矿冶装备巨头的同台竞争,保障了我国矿业的安全和健康持续发展,也为我国走出去的战略奠定了技术基础。同时,对其技术的进一步深入研究还将继续。

参考文献

[1] MESAD, BRITO PARADA P R. Scale-up in froth flotation: A state-of-the-art review[J]. Separation and Purification Technology, 2019, 210: 950-962.

- [2] SCHWARZ M, KOH P, WU J, et al. Modelling and measurement of multi-phase hydrodynamics in the Outotec flotation cell[J]. Minerals Engineering, 2019, 144: 106033.
- [3] MATTSSON T, MAKSIMAINEN T, GRAU R, et al. Performance of 500 m³ Tank Cell(R) at KEVITSA Cu-Ni-PGM Concentrator [J]. Mineral Engineering Conference(Mec2016), 2016, 8, 01025.
- [4] GOVENDER D, MEADOWS D, LELINSKI D, et al. Large flotation cells in copper processing, Experiences and considerations. [J]. Mining Engineering, 2014 (2): 24-32.
- [5] 沈政昌, 杨义红, 韩登峰, 等. 680 m³ 充气式机械搅拌浮选机关键技术特点及其工业应用[J]. 有色金属(选矿部分), 2020(1): 105-112.
SHEN Zhengchang, YANG Yihong, HAN Dengfeng, et al. The key technical features and industry application of the 680 m³ forced-air flotation cell [J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2020(1): 105-112.
- [6] 刘利敏, 李强, 韩登峰, 等. 浮选机充气量自动测量装置的设计与应用: 中国计量协会冶金分会 2018 年会[C], 中国安徽马鞍山, 2018.
LIU Limin, LI Qiang, HAN Dengfeng, et al. Design and application of automatic measuring device for the inflation of flotation machine: China Metallurgical Association 2018 Annual Meeting [C]. Ma' anshan, Anhui, China, 2018.
- [7] 韩登峰, 张跃军, 沈政昌, 等. 一种浮选气泡负载测量系统: CN206270114U[P]. 2017-06-20.
HAN Dengfeng, ZHANG Yuejun, SHEN Zhengchang, et al. A Flotation Bubble Load Measurement System[P], CN206270114U, 2017-06-20.