

基于多相流仿真的大型浮选机槽体结构与流体动力学优化研究

周佳刚 王伟光

诸暨创盈机电科技有限公司 浙江 绍兴 311811

【摘要】：随着矿产资源日趋“贫、细、杂”，浮选机大型化带来的流体动力学问题日益突出，传统经验设计难以揭示槽内复杂气-液-固多相流动机制，制约了分选效率与能耗表现。本研究旨在构建一套融合计算流体动力学（CFD）仿真、参数化建模与智能优化算法的数字化研发体系，对浮选机关键部件进行协同优化。通过建立高保真多相流模型，仿真揭示了原始结构存在流动“停滞区”、气泡聚并严重及叶轮功耗高等缺陷。进而，以提升气含率均匀性、降低能耗为目标，采用响应面法与遗传算法对叶轮叶片形状与角度、定子开孔率与导流角度、槽体底部轮廓等进行多目标优化。物理样机试验表明，优化后浮选机在同等处理量下，目标矿物回收率平均提升 5.8%，单位能耗降低 12.3%，气泡分布更加均匀。本研究实现了从仿真诊断、智能寻优到实验验证的完整数字化研发闭环，为大型浮选装备的高效节能设计提供了系统化范式。

【关键词】：多相流仿真；浮选机优化；流体动力学；协同优化；气泡分布

DOI:10.12417/2705-0998.25.23.081

1 引言

浮选是矿物加工的核心分离技术，其设备性能直接影响资源回收率与生产成本。浮选机大型化虽可通过规模效应降本，但并非简单几何放大，其内部三相流动更为复杂，混合、气泡分散与矿粒悬浮均匀性等问题显著加剧，易产生矿砂沉积等“尺度效应”。传统设计依赖经验与试验，研发周期长、成本高，且难以精准预测与优化放大后的流体动力学缺陷。

因此，亟需发展能够深入揭示大型浮选机内部多相流动机理并指导结构精准优化的现代设计方法。计算流体动力学（CFD）为此提供了有效工具，可通过数学模型定量获取全场信息，实现基于物理图像的“透明化”设计与诊断。本研究以 200 立方米机械搅拌式浮选机为对象，建立集成参数化建模、高精度 CFD 仿真与智能优化算法的系统性研发框架。核心目标是通过仿真量化原始设计短板，并对叶轮-定子系统及槽体进行参数化协同优化，最终通过试验验证优化效果，展示从虚拟仿真到物理实现的完整数字化创新路径，为高端选矿装备的自主研发提供可复制的技术方法。

2 多相流仿真实论基础与模型构建

2.1 多相流模型选择

浮选槽内的流动涉及连续相的矿浆（液-固混合物）和分散相的气泡，属于典型的多相流问题。为平衡计算精度与效率，本研究采用基于欧拉框架的双流体模型。在此模型中，矿浆相和气相均被视为相互贯穿的连续介质，分别求解其质量与动量守恒方程。两相间的相互作用通过相间作用力源项耦合，其中，曳力是影响气泡跟随性与气含率分布的最关键力，本研究选用适用于气泡群系统的 Schiller-Naumann 模型进行刻画。此外，还考虑了湍流弥散力对气泡扩散的影响。

2.2 湍流模型与气泡动力学

槽内流动处于高度湍流状态。RNG $k-\epsilon$ 湍流模型因其在模

拟强旋流、高应变率流动方面的优良表现而被选用，它能更好地预测叶轮附近的各向异性湍流特性。对于气泡尺寸这一关键参数，简单的均匀直径假设不符合实际。本研究引入了群体平衡模型（PBM），将气泡群视为具有尺寸分布的体系，通过求解数密度输运方程，模拟气泡在湍流作用下的破碎与聚并过程，从而更真实地预测气泡尺寸的空间分布，这对评估浮选概率至关重要。

2.3 仿真几何与计算设置

基于原始设计图纸，建立了包括叶轮、定子、槽体、主轴等在内的全三维流体域模型。为模拟实际连续生产过程，将槽体设置为进口、溢流堰出口和尾矿砂出口。计算网格采用混合网格技术，对叶轮、定子等高剪切区域进行局部加密，以确保捕捉到关键的涡旋结构和相间作用。边界条件根据实际工况设定：进口为矿浆质量流量入口，气相入口设置为叶轮下方特定区域的空气进气管，压力出口条件应用于溢流堰。仿真首先进行单相定常计算以获得稳定流场，随后以此为初场，开启多相流及瞬态计算，直至关键监测参数（如全槽气含率、功耗）达到统计稳定。

2.4 关键性能评价指标

为量化评估浮选机性能，定义了以下基于仿真输出的关键指标：

整体气含率及其空间分布均匀性：平均气含率反映充气能力，其标准偏差衡量分布的均匀性，是消除“停滞区”的直接指标。

单位气体输送功耗：即搅拌功率与气体流量之比，反映能量利用效率。

湍流动能耗散率分布：影响气泡破碎与矿粒-气泡碰撞效率，过高或过低均不利。

矿浆悬浮特性：通过槽体底部区域的固体体积分数评估防

止沉槽的能力。

气泡索特平均直径：结合 PBM 输出，评价气泡群的分散质量。

3 原始设计仿真分析与问题诊断

对原始设计的 CFD 仿真结果进行了可视化与定量分析，揭示了以下主要流体动力学缺陷：

3.1 气含率分布不均与流动“停滞区”

仿真结果显示，气体主要集中在叶轮区上部以及槽体中心柱状区域，形成一条明显的“气柱”。而在槽体底部边角区域以及定子与槽壁之间的环形区域，气含率显著偏低，存在大范围的流体滞留区（即“停滞区”）。这些区域矿浆流速缓慢，气泡难以到达，导致部分有用矿物颗粒无法与气泡有效接触，直接降低了回收率。流线图进一步证实，原始叶轮-定子组合产生的流场主要以径向流为主，轴向循环能力不足，特别是向下的抽吸力较弱，无法将气泡有效输送至槽体下部。

3.2 气泡聚并严重与尺寸分布不佳

群体平衡模型的计算结果表明，在叶轮的高剪切区，气泡被破碎成较小尺寸；然而，在上升过程中，由于湍动减弱和气体浓度高，气泡聚并现象显著，导致在槽体中上部气泡平均直径增大。过大的气泡不仅表面积/体积比小，携带能力弱，而且上浮速度快，停留时间短，不利于矿化。理想的气泡尺寸分布应是在全槽范围内维持较窄的适宜区间，原始设计显然未达到此要求。

3.3 叶轮功耗偏高与能量利用不合理

功率消耗监测显示，叶轮的输入功率有相当一部分转化为叶轮附近剧烈的涡旋和湍流耗散，而非有效的宏观循环与气泡分散。速度矢量图显示，从叶轮甩出的高速流体与定子叶片和槽壁碰撞后产生大量无规则的涡流，这部分能量未能被有效组织起来驱动全槽大尺度循环，造成了能量浪费，导致单位气体输送功耗指标偏高。

3.4 槽体结构对流动的负面引导

原始槽体为平底圆柱形，这种结构不利于引导底部矿浆的流动，容易在底部中心形成低速区，加剧矿粒沉积。此外，槽内缺乏有效的导流构件，未能对叶轮产生的流场进行整形和引导，使得流场紊乱，能量分布不合理。

4 基于协同优化策略的关键部件优化设计

针对以上诊断出的问题，提出了“协同优化”的设计理念：将叶轮、定子、槽体视为一个不可分割的流体动力系统，以系统整体性能最优为目标进行联合设计。

4.1 叶轮的多目标优化设计

叶轮是系统的“心脏”。优化目标是在保证足够抽吸力和

分散力的前提下，降低无谓的湍流耗散，并促进形成更有利于轴向循环的流型。

参数化模型：将叶轮叶片的主要特征参数化，包括叶片数目、弯曲形状（后弯/径向/前弯）、倾角（径向角与轴向角）、宽度以及直径比。

优化策略：采用计算实验设计方法，生成一系列具有不同参数组合的叶轮方案。通过 CFD 自动仿真计算每组方案的气含率均匀性、抽吸流量和功耗。基于这些数据，构建以功耗为约束、以气含率均匀性和抽吸流量最大化为目标的响应面模型。最后，运用多目标遗传算法在响应面上进行全局寻优，得到一组帕累托最优解。最终选择的优化叶轮采用后弯式叶片，并带有一定的轴向倾角。仿真验证表明，新型叶轮产生的流场从强径向流转变为更均衡的径向-轴向复合流，向下方的泵送能力增强，同时叶轮区的涡流强度降低，能量利用更高效。

4.2 定子的导流与稳流优化设计

定子是系统的“咽喉”，负责将叶轮产生的高速旋转流体转化为稳定、定向的宏观流动。

功能再定义：将定子的功能从单纯的“挡板”和“破碎”重新定义为“导流”与“稳流”。优化重点是调整定子叶片的导流角度，使其更匹配优化后叶轮的出流方向，平滑能量传递。

开孔率创新设计：改变了传统定子均匀开孔的模式，提出了“梯度开孔率”设计。即在定子下部区域采用较低的开孔率，以增强对向下流体的引导和阻力，迫使其更有效地流向槽底边角；在定子上部区域采用较高的开孔率，以减少对上升流体的阻碍，促进气体均匀分散。这种非均匀设计有效解决了底部气含率低的问题。

4.3 槽体的主动流场整形设计

槽体是系统的“容器”，其形状应主动引导而非被动容纳流动。

底部轮廓优化：将平底改为带一定角度的锥斗形或抛物面形底部。这种结构能自然引导矿浆向中心低压区汇集，便于被叶轮再次卷吸，从根本上避免了固体颗粒的长期沉积，增强了底部区域的流动活性。

导流挡板的配置：在槽壁特定高度加设少量弧形导流板。这些导流板并非传统的径向挡板，其作用是温和地引导壁面附近的下降流，加强全槽的轴向大循环，抑制短路流，并将能量更均匀地分配至整个流场。

5 优化方案仿真预测与实验验证

5.1 优化方案的整体仿真预测

将优化后的叶轮、定子与槽体模型重新进行全三维 CFD 仿真。对比结果显示，系统性能得到显著改善：

流场结构：形成了清晰、稳定的双循环流场（上部顺时针，

下部逆时针)，全槽流速分布更均匀，“停滞区”体积减少了约70%。

气含率分布：整体平均气含率保持稳定，但分布均匀性指标提升了40%。槽体底部和边角区域的气含率明显提高，实现了气体的全槽区覆盖。

气泡尺寸：得益于优化的流场和湍流耗散分布，气泡聚并受到抑制，全槽气泡索特平均直径分布范围收窄，更接近理想浮选尺寸。

能量效率：在达到相同充气量和更好混合效果的前提下，模拟搅拌功率降低了约15%，单位气体输送功耗显著改善。

5.2 物理样机试验验证

为验证仿真优化的可靠性，按照优化方案制造了一台缩比工业试验样机，并在相近的弗劳德数条件下，与原始设计样机进行对比试验。

试验方法：采用清水充气试验测量全槽平均气含率及沿径向、轴向的分布；采用功耗仪测量电机输入功率；在工业试验平台上，使用标准矿石进行闭路浮选对比试验，持续运行72小时。

试验结果与分析：

流体动力学参数：实测气含率分布曲线与CFD预测趋势高度吻合，优化机型底部气含率提升显著。实测功耗较原设计降低13.5%，与仿真预测（15%）误差在工程可接受范围内。

工艺性能指标：在给矿品位、药剂制度相同的条件下，优化机型的精矿中目标金属回收率平均提高了5.8个百分点。泡沫层更为稳定、均匀。吨矿处理能耗降低了12.3%。

参考文献：

- [1] 刘艳飞.浮选机流场模拟及矿浆流体动力学研究[D].江西:江西理工大学,2017.
- [2] 沈政昌,刘万峰,史帅星,等.680m³超大型浮选机在铜矿工业试验中的应用[J].铜业工程,2019(3):33-35.
- [3] 武涛,刘利敏,杨文旺,等.超大型浮选机智能控制系统设计与开发[J].有色金属(选矿部分),2019(4):81-86.
- [4] 史帅星,孙传尧,沈政昌,等.粗颗粒矿物在矿浆相中的悬浮特征[J].有色金属(选矿部分),2018(5):88-95.
- [5] 任博文,沈政昌,史帅星,等.基于试验与仿真的XCF浮选机性能研究[J].有色金属(选矿部分),2022(2):129-136.

相关性分析：试验数据强有力地证实了CFD仿真预测的准确性。性能的提升直接归因于流体动力学状态的改善：更均匀的气含率分布和矿浆悬浮增加了颗粒-气泡碰撞概率；更佳的气泡尺寸分布提高了附着效率；更优的能量利用降低了运行成本。

6 结论

本研究构建并实践了一套“仿真驱动、协同优化、实验验证”的大型浮选机数字化研发体系，主要结论如下：

首先，高精度CFD仿真是诊断与优化浮选机的有效工具。基于欧拉多相流模型、群体平衡模型和RNG k- ϵ 湍流模型的仿真框架，能够准确揭示槽内气-液-固三相流动规律，精准识别原始设计在气含率分布不均、气泡聚并严重及能耗偏高方面的缺陷。

其次，叶轮-定子-槽体协同优化是性能提升的关键。通过将三者视为整体流体系统进行协同设计，采用参数化建模、响应面法与遗传算法进行多目标优化，最终得到后弯叶片叶轮、梯度开孔率定子与导流型槽体的优化组合。该组合共同塑造了更合理的双循环流场，显著改善了气相分散与固体悬浮。

最后，数字化研发流程实现了从理论到工程的有效跨越。物理样机试验验证了仿真预测的可靠性，优化后浮选机在同等处理量下，目标矿物回收率平均提升5.8%，吨矿能耗降低12.3%，气泡分布均匀性显著改善。本研究为大型浮选装备的高效节能设计提供了系统化范式，对解决设备放大中的“尺度效应”具有普适指导意义。未来可进一步融合机器学习，拓展至更复杂工况，推动选矿装备向智能化方向发展。