

基于流固耦合的给矿波动下的浮选机振动响应实验性研究

高 轩^{1,2,3}, 陈 强^{1,2,3}, 牛 萌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 机械工程学院, 北京 100083; 4. 天津市天河计算机技术有限公司, 天津 300457)

[摘 要] 浮选机运转工况复杂, 转速、气量以及给矿量均在实时变化, 这些变化会对内部流场产生影响, 并会造成浮选机叶轮的受力变化, 进而影响浮选机运转部件的可靠性。为此, 作者建立了能够模拟现场不同工况条件的流-固耦合实验平台, 采用了嵌入式微型压力传感器和无线数据传输模块对浮选机叶轮叶片的压力变化情况进行了实时检测, 以压力变化检测为手段, 通过数据分析揭示了给矿波动条件下的叶轮叶片压力的变化规律, 该研究对优化设计浮选机叶轮结构, 具有一定的指导意义。

[关键词] 叶轮; 流-固耦合; 给矿变化; 压力波动

[中图分类号] TD456 [文献标志码] B [文章编号] 1003-8884(2023)05-0022-12

DOI:10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2023.05.005

1 浮选机叶轮耦合特征测试系统

浮选机为旋转搅拌设备, 叶轮在电机的带动下高速旋转搅动矿浆, 传统的有线采集技术已经无法满足浮选机测试的需要, 严重制约了浮选测试技术的发展。随着智能采集和无线传输技术的发展, 在复杂的浮选机内部测试叶轮的各項微观参数成为可能^[1]。

浮选机应用工况复杂, 任何扰动均会导致浮选机内部流场的变化, 流场变化进而引起叶轮、主轴的一系列响应^[2-6]。作者通过流固耦合特征测试平台, 从宏观和微观两个角度研究边界条件发生变化时流场以及结构场的变化规律, 揭示流固耦合的作用机制。图 1 为 KYF-0.2 浮选机叶轮的实验模型, 1 点到 24 点为叶轮表面的检测点。

图 2 为给矿波动模拟测试平台, 该平台采用两

台蠕动泵, 其中一台作为循环泵以模拟实际的矿浆循环流动, 另一台泵作为给矿波动泵以模拟实际的矿浆波动流动。为保证浮选机液位保持不变, 避免液位高度的变化干扰实验数据, 所有流体在浮选机与泵之间进行循环流动。单次实验时间为 80 s, 给矿波动前计时 20 s, 第 20 s 给矿开始波动, 持续时间 20 s, 后 40 s 为稳定时间。

2 基于给矿波动特征测试系统的流固耦合响应分析

根据浮选机实际应用情况, 点 1、点 4 和点 24 是现场磨损较严重的位置, 因此, 作者选取点 1、点 4 和点 24 做为实验检测点, 分别记为 P1、P4 和 P24, 监测三点分别在 195 r/min、255 r/min、315 r/min 和 345 r/min 的转速条件下浮选机波动给矿 20 L/min、30 L/min 和 45 L/min 时的压力情况, 并对数据进行了处理分析。

2.1 P1 点迎浆面的压力变化情况

图 3~图 6 为 P1 点处迎浆面分别在 195 r/min、255 r/min、315 r/min 和 345 r/min 的转速条件下的不同给矿波动条件下的压力变化曲线。

对波动前后的数据进行了平均, 具体数值如表 1 所示。

从图 3~图 6 为可以看出, P1 点迎浆面压力在

[收稿日期] 2023-06-22

[第一作者] 高轩(1991—), 男, 河北沧州人, 工程师, 硕士, 主要从事矿物加工设备及工程转化方面的研究工作。

[基金项目] 国家自然科学基金资助(51504026)

[引用格式] 高轩, 陈强, 牛萌. 基于流固耦合的给矿波动下的浮选机振动响应实验性研究[J]. 有色设备, 2023, 37(5): 22-33.

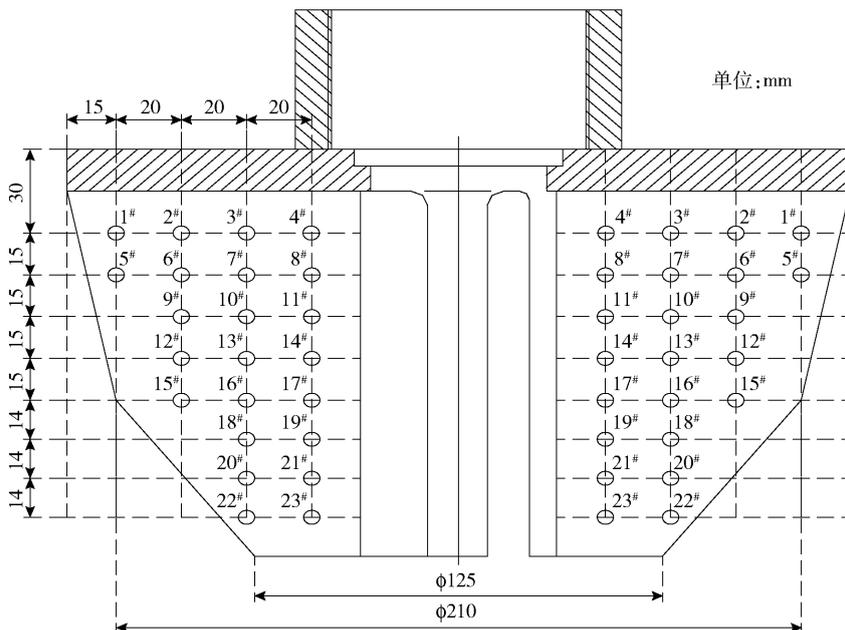


图 1 叶轮检测点设置

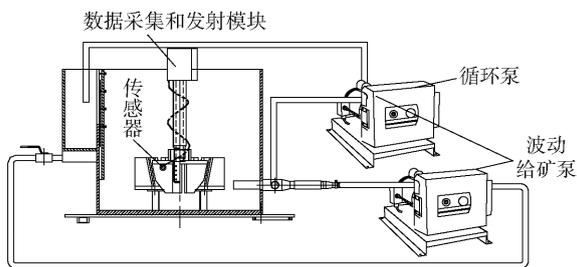


图 2 给矿波动实验平台

给矿增加时呈现轻微下降的趋势。从表 1 可以看出, P1 点迎浆面压力变化幅值与转速的关系不大, 压力值仅随给矿波动量的增加而增加。

2.2 P4 点迎浆面的压力变化情况

图 7 ~ 10 为 P4 点处迎浆面分别在 195 r/min、255 r/min、315 r/min 和 345 r/min 的转速条件下的不同给矿波动条件下的压力变化曲线。

对波动前后的数据进行了平均, 具体数值如表 2 所示。从表中可以看出, 给矿量突然增加时, P4 点迎浆面的压力有下降趋势, 各转速条件下的给矿波动压力幅值变化均比较小且随着转速的增高压力变化幅值没有明显增加。在同一转速条件下, 波动压力变化幅值随着给矿波动量的增加而增加。

2.3 P24 点迎浆面的压力变化情况

图 11 ~ 14 为 P24 点处迎浆面分别在 195 r/min、255 r/min、315 r/min 和 345 r/min 的转速条件下的

不同给矿波动条件下的压力变化曲线。

对波动前后的数据进行了平均, 具体数值如表 3 所示。

从图 11 ~ 14 可以看出, 在给矿量突然增加时, P24 点迎浆面叶轮表面压力也会随之升高。从表 3 可以看出, 该点对给矿波动响应迅速, 压力值随着波动量的增加逐渐增加, 压力值增长范围在 540 ~ 1 540 Pa, 转速越高, 压力值增加越明显, 在 345 r/min 转速和 45 L/min 的给矿波动时, 该点压力增长至 1 540 Pa, 压力增加显著。

综合对比来看, 可以得到以下三条结论。

1) 同一转速下, P1 和 P4 点迎浆面压力随着给矿量的增加而轻微减小, P24 点迎浆面的压力随着给矿量的增加而增加。

2) 同一给矿量下, P1 点迎浆面的压力随着转速的增加而增加, 但是 P4 和 P24 点迎浆面的压力随着转速的增加而减小。

3) 同一转速, 同一给矿下, P1 点的压力最大, P24 压力值最小。

3 基于 CFD 的浮选机给矿波动下流固耦合振动特性研究

浮选过程是一个十分复杂的物理化学变化过程, 目前尚无十分完善的科学理论予以解释。就浮选机而言, 利用 CFD 可视化方法直观的揭示浮选机

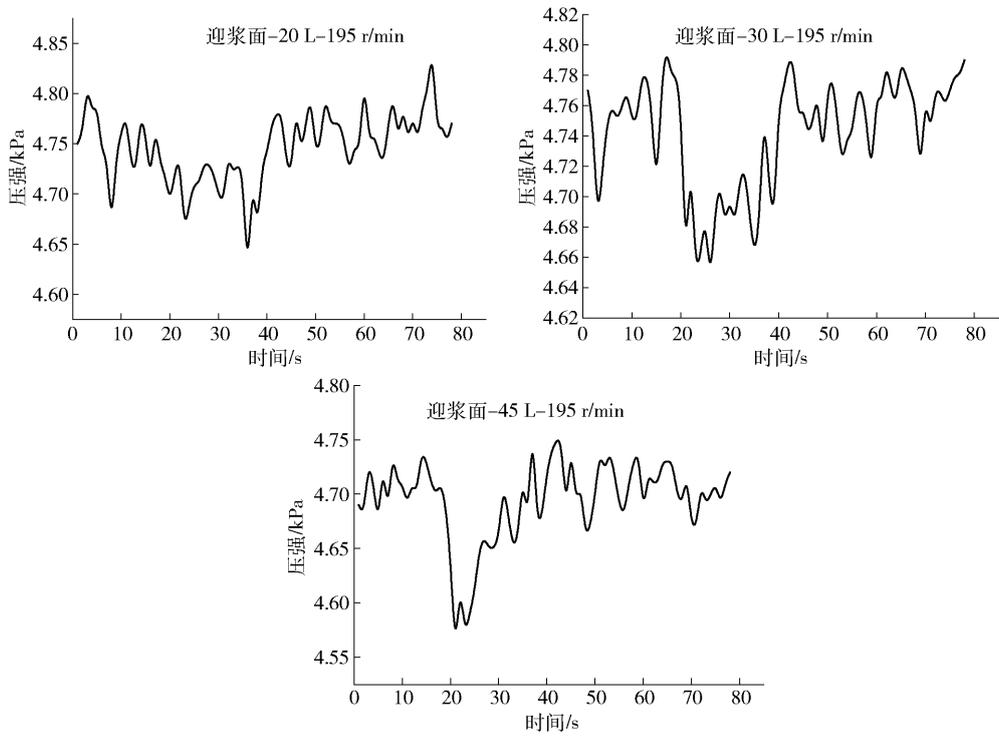


图 3 195 r/min 条件下不同给矿波动的迎浆面 P1 点压力变化

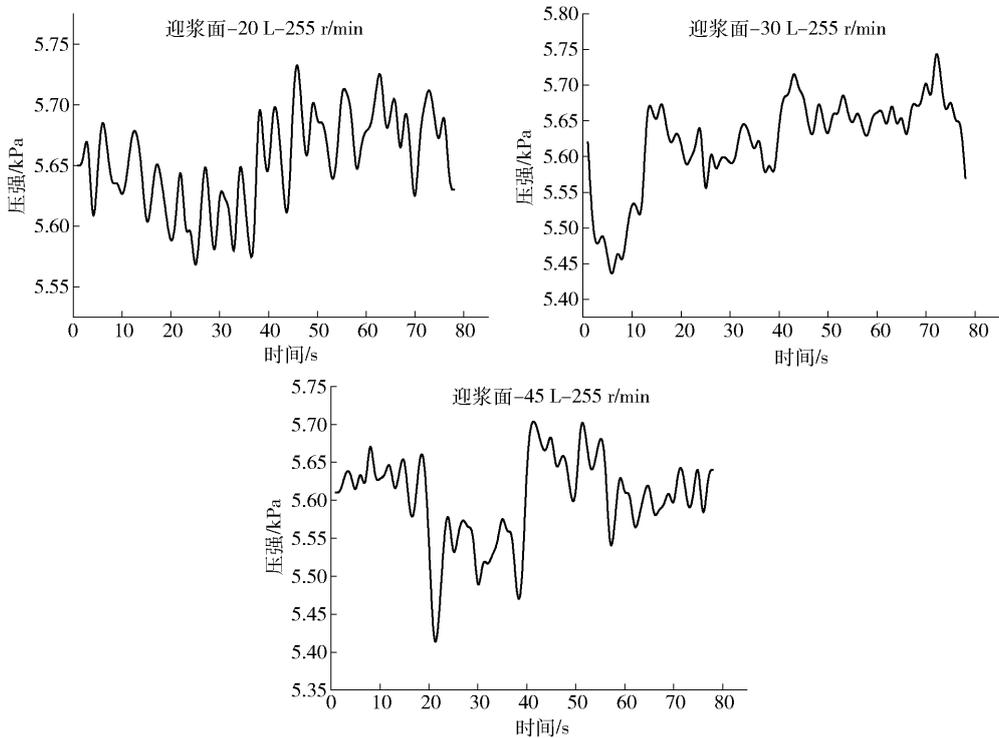


图 4 255 r/min 条件下不同给矿波动的迎浆面 P1 点压力变化

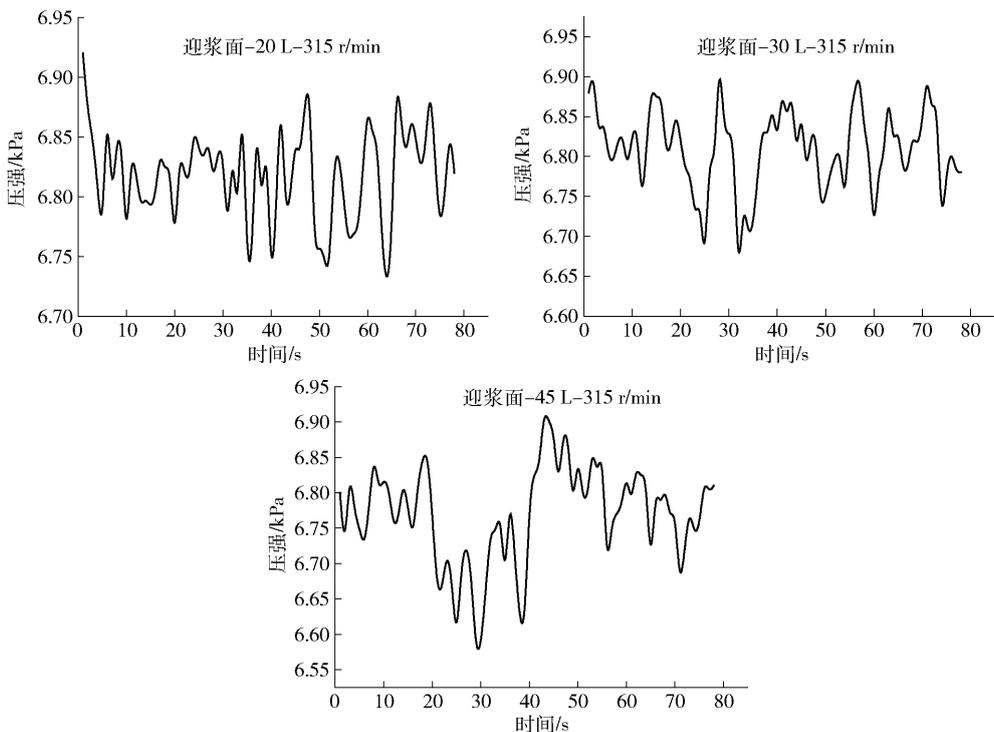


图 5 315 r/min 条件下不同给矿波动的迎浆面 P1 点压力变化

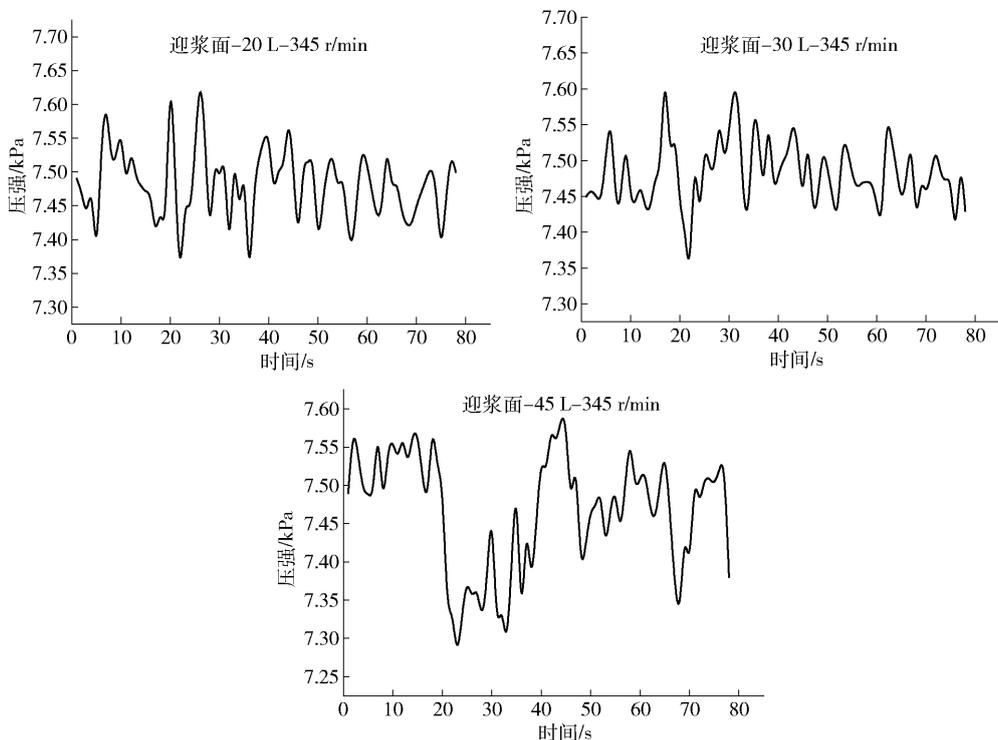


图 6 345 r/min 条件下不同给矿波动的迎浆面 P1 点压力变化

表 1 P1 点迎浆面的给矿波动前后压力均值

kPa

转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	给矿量波动量/($L \cdot \min^{-1}$)			转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	给矿量波动量/($L \cdot \min^{-1}$)		
	20	30	45		20	30	45
195	4.75	4.76	4.71	315	6.83	6.83	6.79
	4.71	4.69	4.65		6.82	6.78	6.68
	4.76	4.76	4.71		6.82	6.81	6.80
255	5.64	5.55	5.63	345	7.48	7.48	7.53
	5.62	5.60	5.53		7.49	7.49	7.37
	5.68	5.66	5.63		7.48	7.48	7.49

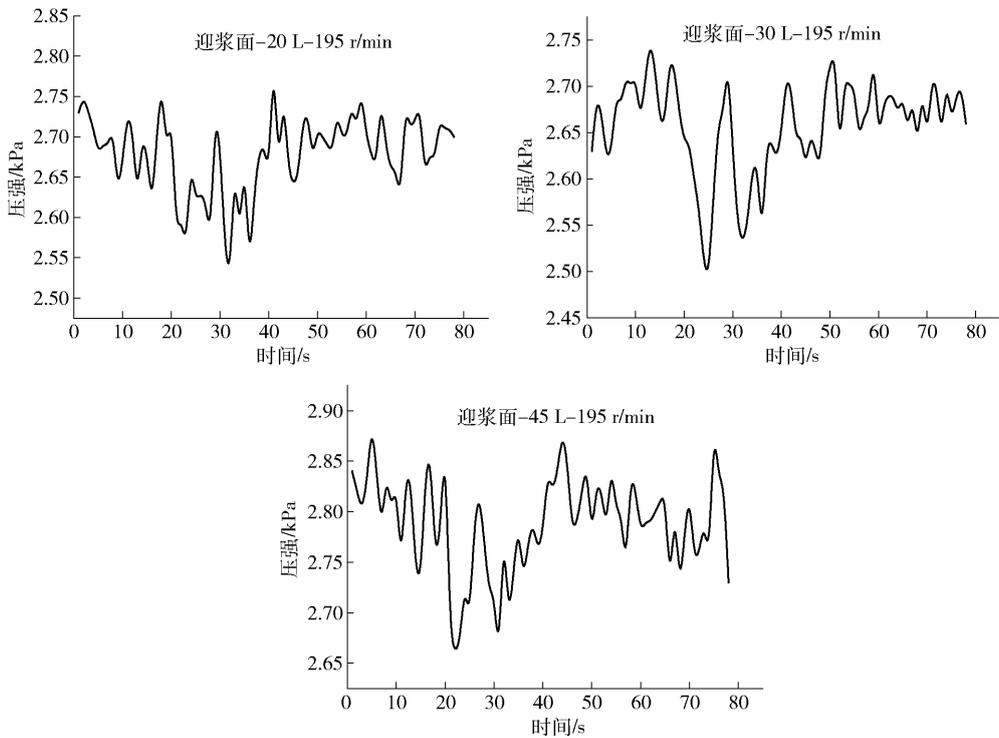


图 7 195 r/min 条件下不同给矿波动的迎浆面 P4 点压力变化

流固耦合振动机制是浮选机基础研究的重要方面。因此,本文研究了浮选机全流场流动特征和流固耦合机制,对流场波动所引起的结构场变化进行了一系列分析,对流固耦合机制进行了微观研究和量化。

3.1 浮选机网格划分技术

物理模型的网格化对于 CFD 流场模拟而言是十分基础却又非常关键的工作,某种程度上直接决定了计算的可靠性,甚至会直接影响到数值求解的问题。网格离散方法可以分为四面体网格、六面体

网格以及混合网格三种。六面体网格适应性差,在很多复杂零件是很难用六面体网格离散的,四面体网格技术对复杂物理结构的适应能力很强,可以满足任意的物理结构,考虑到浮选机的复杂的结构特点和工况条件,选用四面体网格划分方法对浮选机进行网格划分。

浮选机四面体网格化的难点在于如何避免在局部狭小区域出现网格畸变,特别是在叶轮叶片、定子区域的网格尺寸突变所引起的畸变。采用差异化网格尺寸处理方法,根据区域结构特点,根据局部位置

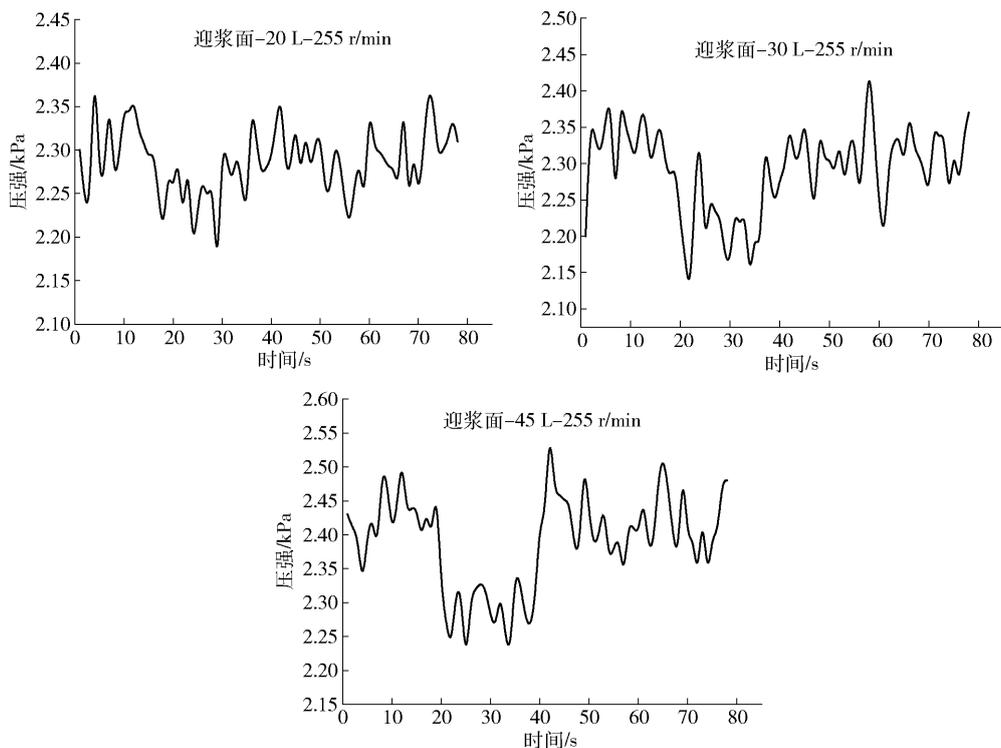


图 8 255 r/min 条件下不同给矿波动的迎浆面 P4 点压力变化

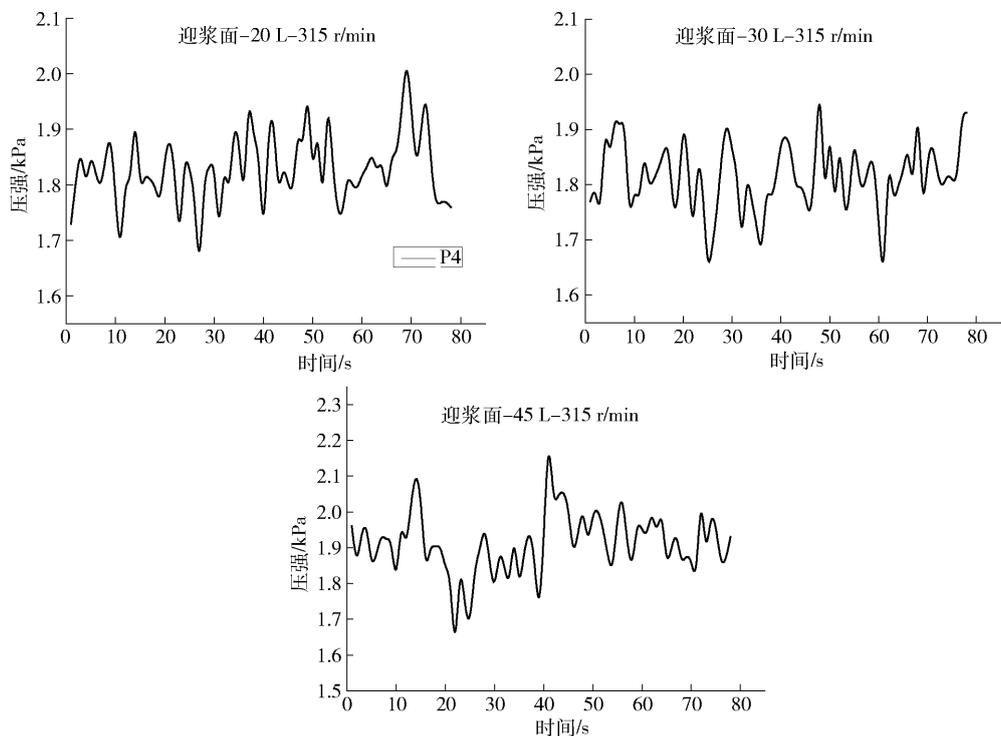


图 9 315 r/min 条件下不同给矿波动的迎浆面 P4 点压力变化

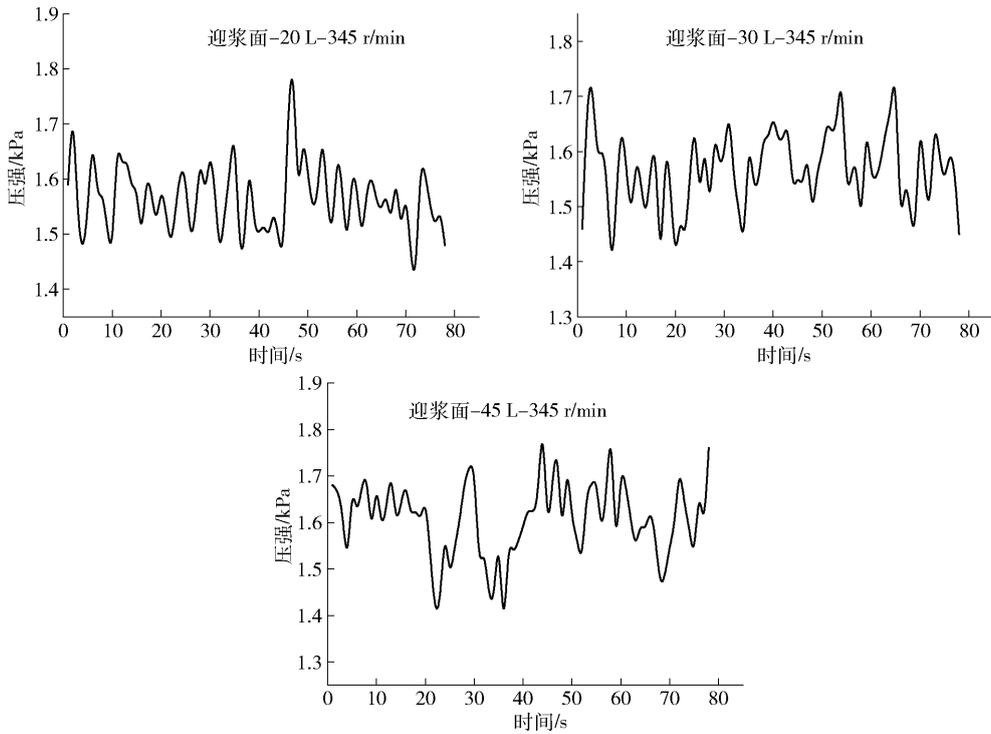


图 10 345 r/min 条件下不同给矿波动的迎浆面 P4 点压力变化

表 2 P4 点迎浆面的给矿波动前后压力均值

kPa

转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	给矿量波动量/($L \cdot \min^{-1}$)			转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	给矿量波动量/($L \cdot \min^{-1}$)		
	20	30	45		20	30	45
195	2.69	2.68	2.81	315	1.81	1.82	1.93
	2.63	2.60	2.74		1.82	1.79	1.83
	2.70	2.67	2.80		1.84	1.82	1.95
255	2.30	2.32	2.43	345	1.58	1.56	1.64
	2.26	2.22	2.29		1.56	1.55	1.54
	2.30	2.31	2.42		1.56	1.58	1.63

的结构复杂性采用不同的网格尺寸对结构进行网格划分,各区域之间通过建立的交界面进行数据传递。这种方法大大提高了四面体网格在浮选机仿真过程中的适应性,解决了绝大多数叶轮、定子系统的网格划分问题。

3.2 网格数量和质量的影晌

较好的网格质量和合适的网格数量对 CFD 预测的准确性、可靠性以及计算成本等都非常重要。课题组对 KYF-0.2 浮选机网格质量进行了网格敏

感性分析。实验型 KYF-0.2 浮选机采用全四面体网格,对比分析了网格数量在 586 589, 682 996, 796 830 情况下的流场数据,检测点设置在距离叶轮盘上部 5 cm 处,提取沿径向的液相速度值大小分布,以此来分析网格数量对速度预测结果的影响。从图 15 中不难看出,网格数量的变化会造成预测结果的波动,当网格数量在 682 996 与 796 830 时,预测结果的波动较小,控制在 5% 以内,故选用 682 996 的网格。

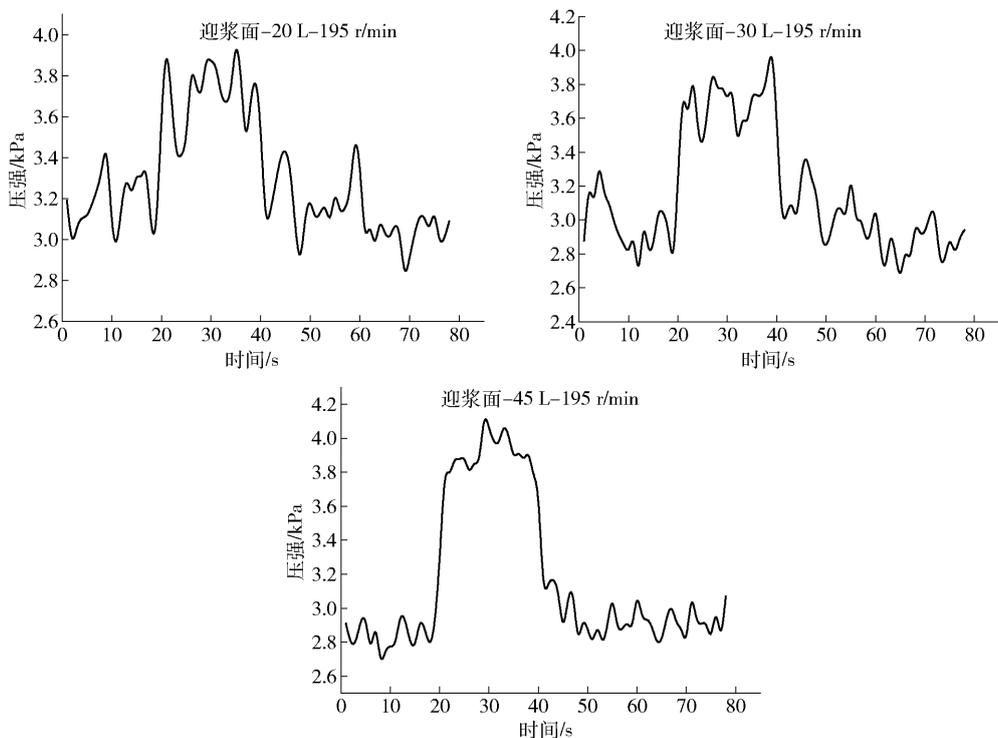


图 11 195 r/min 条件下不同给矿波动的迎浆面 P24 点压力变化

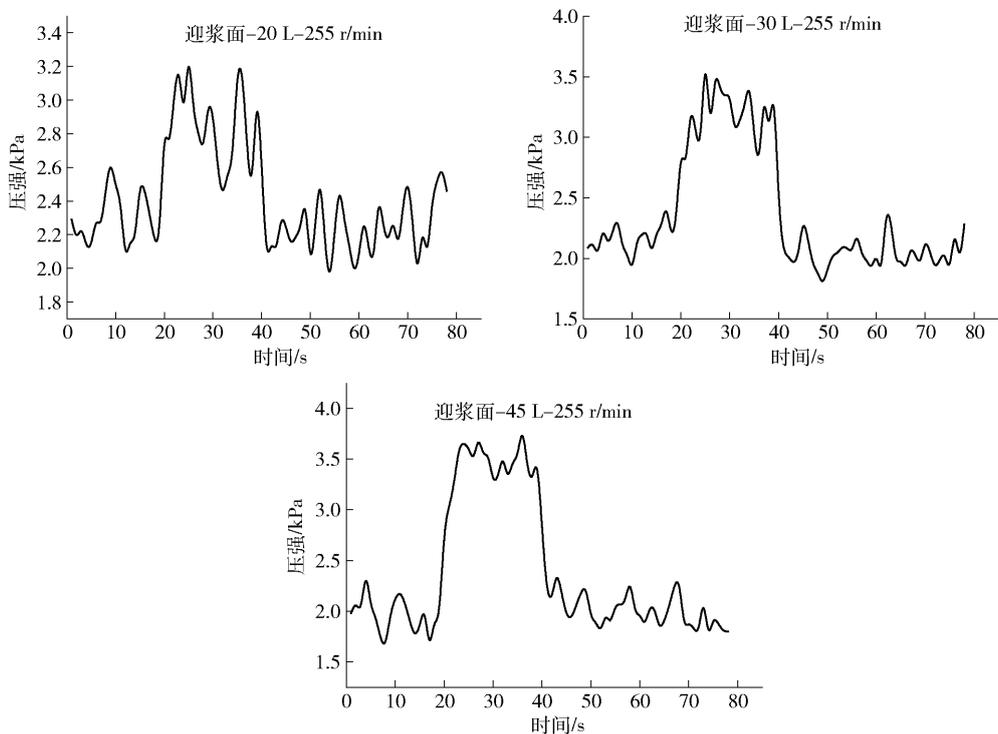


图 12 255 r/min 条件下不同给矿波动的迎浆面 P24 点压力变化

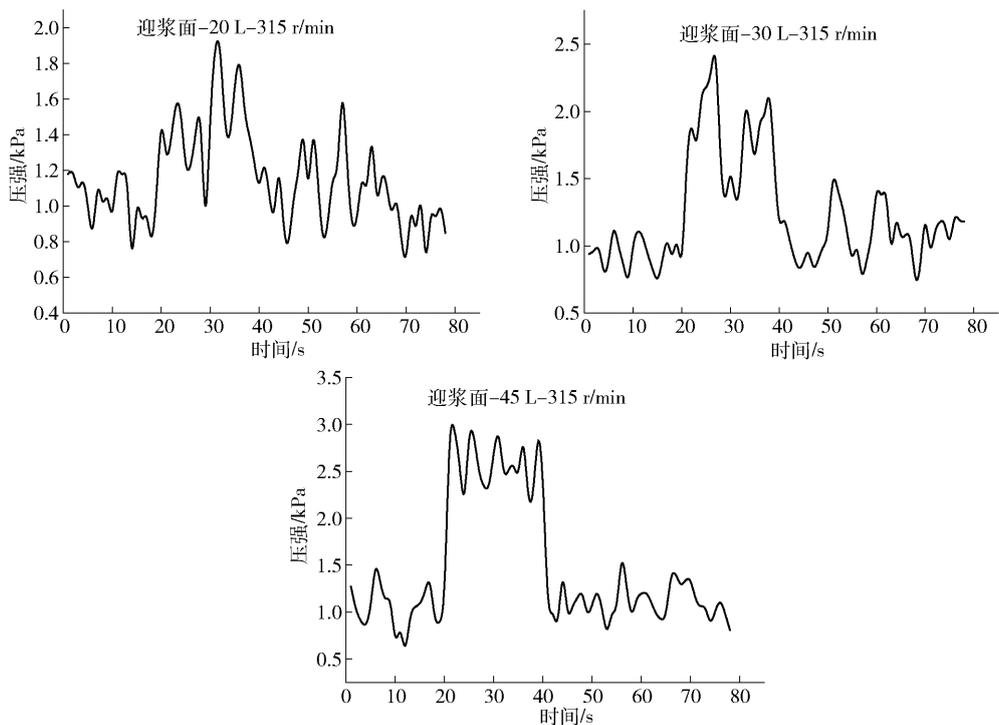


图 13 315 r/min 条件下不同给矿波动的迎浆面 P24 点压力变化

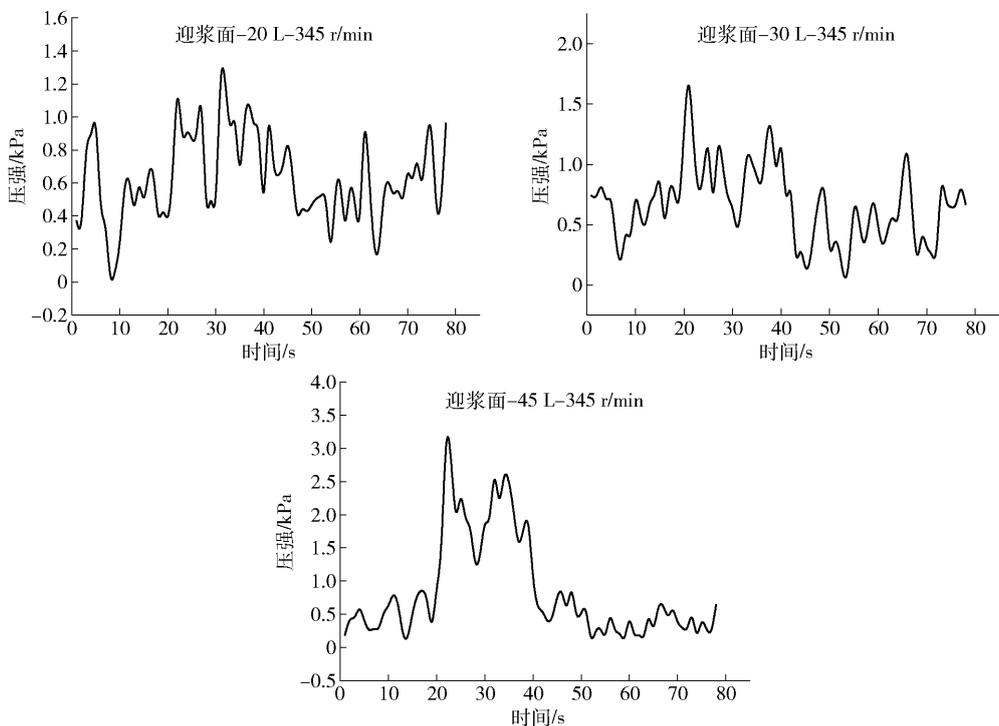


图 14 345 r/min 条件下不同给矿波动的迎浆面 P24 点压力变化

表 3 P24 点迎浆面波动前后压力均值

P24 点迎浆面压力/kPa				P24 点迎浆面压力/kPa			
转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	给矿量波动量/($L \cdot \min^{-1}$)			转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	给矿量波动量/($L \cdot \min^{-1}$)		
	20	30	45		20	30	45
195	3.18	2.97	2.84	315	1.03	0.94	1.04
	3.72	3.69	3.88		1.47	1.78	2.53
	3.13	2.98	2.96		1.05	1.08	1.14
255	2.29	2.17	1.96	345	0.49	0.62	0.47
	2.86	3.19	3.44		0.87	0.99	2.01
	2.25	2.05	2.02		0.57	0.52	0.43

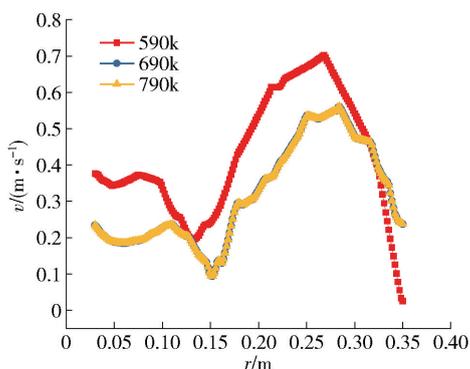


图 15 四面体网格无关性验证

3.3 给矿波动时的流固耦合振动特性分析

为了能够模拟真实状态下浮选机在给矿波动时的叶轮压力变化,采用瞬态模拟的方式对给矿波动的浮选机内部流场进行了模拟仿真。由于数据量巨大且仿真电脑计算速度的限制,将模拟时间设置为 8 s,流量由 30 L/min 在第 4 s 末突变至 40 L/min、50 L/min、60 L/min,图 16 为流量从 30 L/min 突变至 60 L/min 的速度云图。

从图 16 和图 17 可以看出,进口管高度处于叶

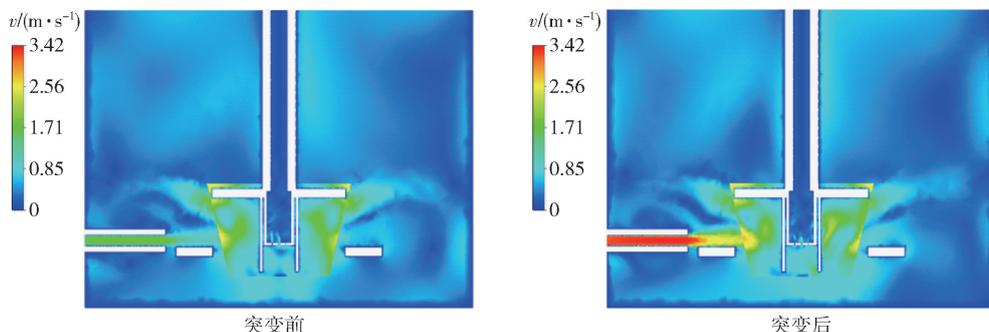


图 16 流量突变前后速度场云图

轮搅拌下循环进入叶轮搅拌区的位置,因此进口管进入的流体会被吸入叶轮搅拌区,参与到浮选机搅拌的上循环和下循环当中。

对浮选机叶轮的 1 号、4 号和 24 号点的迎浆面的压力进行了检测,图 18 为迎浆面 1、24 号点的原始检测图。

从图 18 可以看出,在给矿波动的瞬间,叶轮表面的压力值出现了明显的变化,波动幅值明显增大。但从图中明显可以看出,压力激荡的频率没有明显变化,说明给矿波动没有改变该点的振动频率,仅对振动的幅值影响较大。

为了便于观察三个检测点压力波动数值,对其中的每 1 s 的数据取平均值,图 19 和图 20 为各点趋势图。

从图 19 可以看出:1 号和 4 号点在迎浆面第 4 s 末流量增大后叶轮表面压力呈现下降趋势,这一压力变化与实验结论是吻合的。

在转速 195 r/min,循环流量为 30 L/min 的条件下,分别对波动流量为 0、10、20 与 30 L/min 的迎浆面 24 号点的压力波动值进行 FFT 变换,得到有两

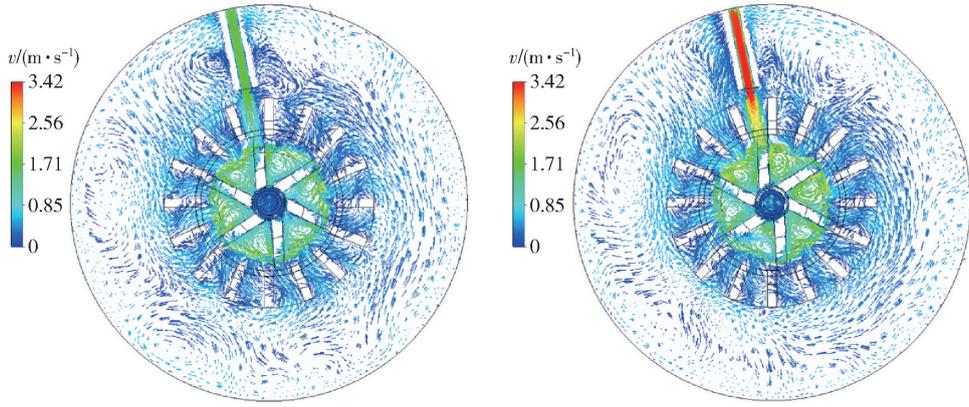


图 17 流量突变前后速度矢量图

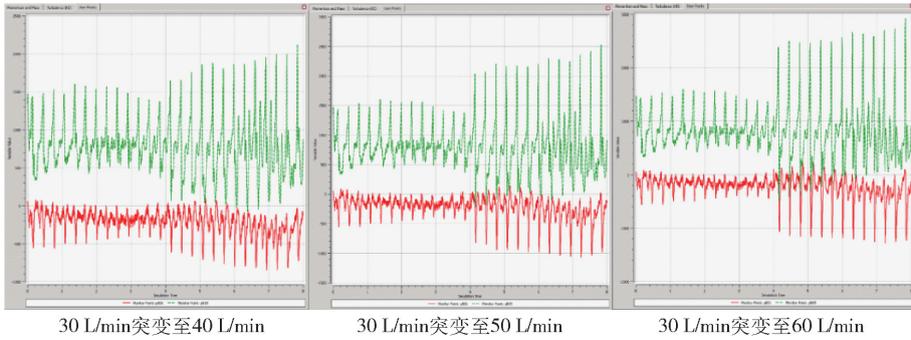


图 18 迎浆面 1#、24# 点压力检测图

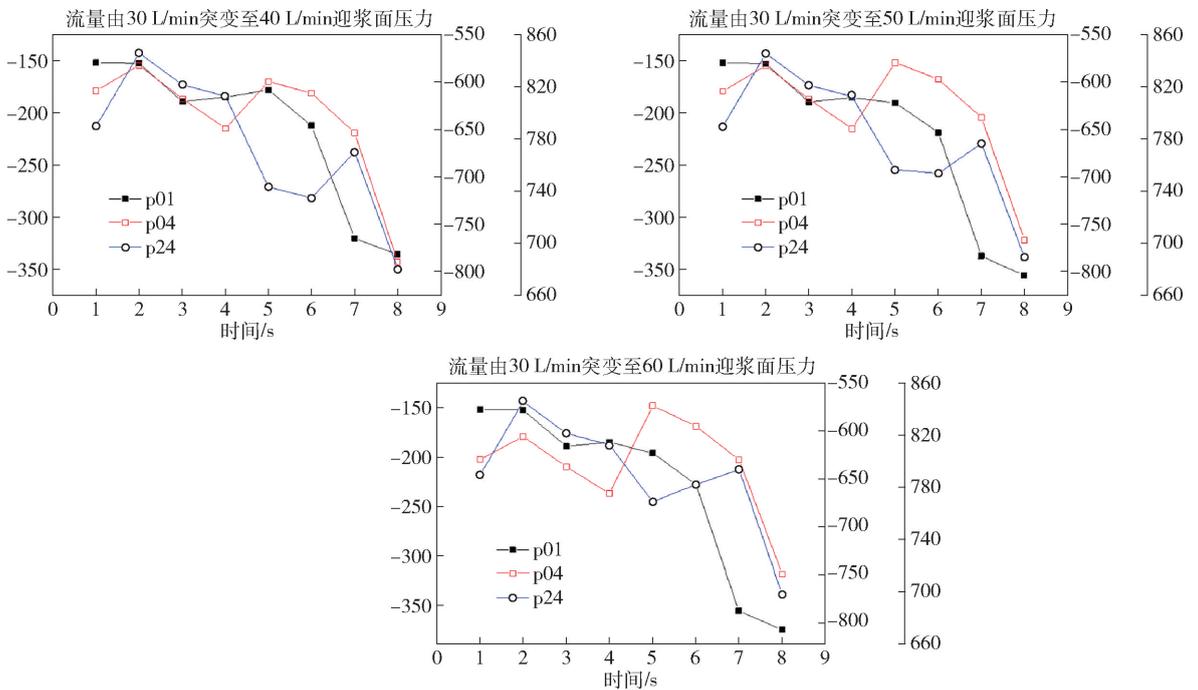


图 19 迎浆面 1#、4#、24# 点每秒平均压力变化

个幅值较高的频率,如图 20 所示:其中 $f(I) = 3.25 \text{ Hz}$, $f(II) = 6.5 \text{ Hz}$ 。

研究分析发现,频率 3.25 正好为浮选机的叶轮旋转频率。同时还发现,为便于检测浮选机,在叶轮

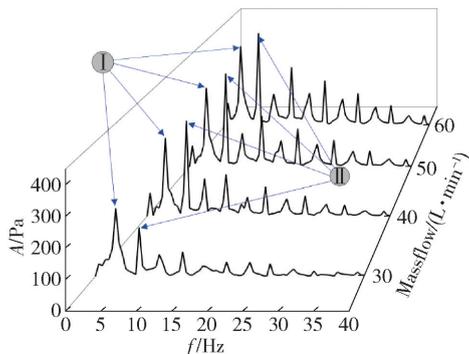


图 20 不同流量下的压力幅频曲线

的轴对称的 2 个叶片上分别设置了叶片压力安装孔。因此,可以认为是叶轮旋转过程中每秒经过的叶片个数,即在 195 r/min 的转速下,每秒通过的压力检测叶片数量为 $3.25 \times 2 = 6.5$ 。从图 21 可以发现,叶轮的振动幅值随着给矿波动量的增加而增加,由此我们可以得出结论:在外界工况条件发生变化并容易引起浮选机振动时,其叶轮发生振动的频率

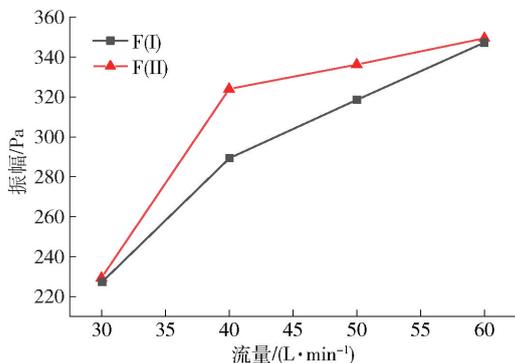


图 21 不同流量下的幅值曲线

完全由叶轮的结构决定,而振幅的大小则由工况条件的变化量决定。

4 结论

文章建立了能够模拟现场不同工况条件的流-固耦合实验平台,采用了嵌入式微型压力传感器和无线数据传输模块对浮选机叶轮叶片的压力变化情况进行了实时检测,通过数据分析揭示了给矿速度变化时叶轮叶片压力的变化规律。

1) 给矿波动对浮选机叶轮的的压力变化影响显著。

2) 在外界工况条件发生变化并容易引起浮选机振动时,其叶轮发生振动的频率完全由叶轮的结构决定,而振幅的大小则由工况条件的变化量决定。

[参考文献]

- [1] 沈政昌. 浮选机发展历史及发展趋势[J]. 有色金属(选矿部分), 2011(s1): 34-46.
- [2] 陈左一, 霍福鹏, 刘红. 转子叶片在非均匀来流条件下的流体激振特性[J]. 发电设备, 2002(2): 1-4.
- [3] 刘厚林, 徐欢, 吴贤芳, 等. 基于流固耦合的导叶式离心泵强度分析[J]. 振动与冲击, 2013, 32(12): 27-30.
- [4] 陈东, 董干国, 张建一. 大型浮选机浮选流体动力学特性探讨及设计原则研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2010(1): 33-37.
- [5] H. W. The effect of air flow rate on the kinetics of flotation [J]. Part I. Int. J. Miner. Process, 1983, (11): 203-219.
- [6] 曾克文. 浮选槽内矿浆紊流强度对浮选影响的理论及应用研究[D]. 长沙: 中南大学, 1997.

Experimental Study on Vibration Response of Flotation Machine under Feed Fluctuation based on the Fluid-Structure Interaction

GAO Xuan, CHEN Qiang, NIU Meng

Abstract: The operating condition of the flotation machine is complex, and the speed, gas volume and feeding are all changing in real time. These changes will have an impact on the internal flow field, and cause the change of the force on the flotation machine impeller, and then affect the reliability of the operating parts of the flotation machine. Therefore, the author established a fluid-solid coupling experimental platform which can simulate different working conditions on site. Embedded micro pressure sensor and wireless data transmission module were used to detect the pressure change on the impeller blade of the flotation machine in real time. The pressure change detection was used as a means to reveal the pressure change rule on the impeller blade under the condition of feed fluctuation through data analysis. The research has certain guiding significance for optimizing the structure of flotation machine impeller.

Key words: impeller; fluid-structure interaction; feed fluctuation; pressure fluctuation

▲