



矿浆电解槽内固液搅拌对隔膜变形的影响

卢婷婷 杨润杰 刘凤琴 赵洪亮

Effect of solid-liquid stirring on membrane deformation in the slurry electrolysis tank

LU Ting-ting, YANG Run-jie, LIU Feng-qin, ZHAO Hong-liang

引用本文:

卢婷婷, 杨润杰, 刘凤琴, 赵洪亮. 矿浆电解槽内固液搅拌对隔膜变形的影响[J]. 工程科学学报, 2023, 45(7): 1205–1213. doi: 10.13374/j.issn2095-9389.2022.05.23.008

LU Ting-ting, YANG Run-jie, LIU Feng-qin, ZHAO Hong-liang. Effect of solid-liquid stirring on membrane deformation in the slurry electrolysis tank[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2023, 45(7): 1205–1213. doi: 10.13374/j.issn2095-9389.2022.05.23.008

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2022.05.23.008>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

高固含固液搅拌槽内颗粒悬浮与混合特性

Particle suspension and mixing characteristics in a solid-liquid stirred tank with high solid content

工程科学学报. 2017, 39(1): 54 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2017.01.007>

SI-FLAT板形仪检测原理的流固耦合振动分析

Analysis of fluid-structure interaction vibration based on the detection principle of SI-FLAT flatness measurement systems

工程科学学报. 2017, 39(4): 593 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2017.04.015>

利用 Na_2CO_3 处理铝电解槽炭渣的研究

Treatment of carbon residue from aluminum electrolysis cell using Na_2CO_3

工程科学学报. 2021, 43(8): 1055 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2020.11.30.007>

铝电解槽废阴极炭块电热耦合处理过程数值模拟

Numerical simulation of electrothermal coupling process for spent cathode carbon block from aluminum electrolysis cell

工程科学学报. 2020, 42(6): 731 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2019.06.10.002>

深锥固体通量与絮凝剂单耗和料浆浓度的数学关系

Mathematical relationship between the solid flux of deep cone thickener, flocculant unit consumption, and slurry concentration

工程科学学报. 2021, 43(10): 1269 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2021.01.25.002>

超声对熔盐电解法制备Al-7Si-Sc合金组织的影响

Effects of ultrasound on the microstructure of Al-7Si-Sc alloy prepared via molten salt electrolysis

工程科学学报. 2019, 41(9): 1135 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2019.09.004>

矿浆电解槽内固液搅拌对隔膜变形的影响

卢婷婷, 杨润杰, 刘凤琴, 赵洪亮✉

北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京 100083

✉通信作者, E-mail: zhaohl@ustb.edu.cn

摘 要 矿浆电解作为一种短流程湿法冶金工艺, 隔膜袋在搅拌浆搅动及矿石的磨损下会产生变形, 甚至出现破裂, 严重制约了生产效率。针对该问题, 基于单向流固耦合原理, 采用计算流体力学与固体有限元相结合的方法对矿浆电解搅拌槽内隔膜变形规律进行了全三维解析。研究发现隔膜袋两侧压差是导致变形的根本原因, 最大变形量出现在垂直高度 $y=1.2\text{ m}$ 位置处, 且搅拌转速越大, 隔膜变形所需的最佳液位差越小。当阴极区压力不足时, 隔膜袋向内挤压变形; 压力增加后, 则向两侧鼓包。隔膜最大变形量随流体域固体体积含量(SL)的增加先减小后增加, 在 $SL=15\%$ 时, 隔膜变形达到最小值 226.7 mm ; 越靠近槽下部, SL 对绝对压力的影响越大。添加框架约束后, 隔膜最大变形量减小到 0.664 mm 。通过可视化的解析, 可以为矿浆电解工业控制提供参照。

关键词 矿浆电解; 流固耦合; 隔膜变形; 计算流体力学-有限元; 压强差

分类号 TF19

Effect of solid-liquid stirring on membrane deformation in the slurry electrolysis tank

LU Ting-ting, YANG Run-jie, LIU Feng-qin, ZHAO Hong-liang✉

School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

✉ Corresponding author, E-mail: zhaohl@ustb.edu.cn

ABSTRACT As a short-process hydrometallurgical technology, slurry electrolysis (SE) collects the stirring that improves the suspension of ore, the membrane bag that acts as purifying, and the cathodic and anodic plates that promote ion migration in one tank. The stirring helps to maintain the ore suspended. As the SE tank is stirred, the membrane bag will deform and become damaged, severely limiting production efficiency. In this research, the one-way fluid-structure interaction (FSI) was used to examine the impact of the solid-liquid suspension on membrane deformation, which was based on the computational fluid dynamics (CFD) and solid finite element method (FEM). Through the full 3D quantitative analysis, the database of membrane deformation under various conditions was established. The membrane was extruded to the center during the initial stirring conditions, and the greatest deformation measured 891.66 mm . Primarily, membrane deformation was brought on by the pressure differential brought on by liquid velocity, solid concentration distribution, and liquid level. The maximum deformation of the membrane first decreased and then increased with the increased liquid level difference between the cathode and anode. With the upper fixed constraint, the maximum deformation of the membrane appears at $y = 1.2\text{ m}$. The larger the stirring speed is, the smaller the optimal liquid level difference required to minimize the membrane deformation. The stirring speed changes the overall pressure distribution by changing the dynamic pressure in the anode domain. The maximum deformation of the membrane decreases first and then increases with the increase of electrolyte density in the cathode domain. The membrane bag is extruded to the cathode domain when the pressure in the cathode region is insufficient because of the low electrolyte density in the cathode domain. When the cathode pressure increases, the membrane bag bulges to both sides, and the inner bulge is greater than the outer. With an increase in solid volume concentration (SL) in the anode domain, the maximum membrane

收稿日期: 2022-05-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51974018)

deformation first reduces and subsequently increases. When $SL = 15\%$, the membrane deformation reaches the minimum value of 226.7 mm. The closer to the bottom of the tank, the greater the influence of solid content on absolute pressure. The maximum membrane deformation is drastically decreased to 0.664 mm when the frame restrictions are considered. It can support the industrial control process via visual analysis.

KEY WORDS slurry electrolysis; fluid-solid interaction; membrane deformation; CFD-FEM; pressure difference

矿浆电解作为一种集矿石浸出、溶液净化和电解沉积于一体的湿法冶金工艺^[1], 包含了固液搅拌装置、阳极板、隔膜袋以及位于隔膜袋内侧的阴极板^[2]. 控制合适的电解质体系, 使得矿石在化学溶解、化学氧化和阳极氧化的共同作用下实现有价金属离子的浸出^[3], 离子在电场作用下穿过电解液和隔膜袋在阴极板沉积. 隔膜袋将矿浆电解槽分为阴极区和阳极区, 袋内阴极区为纯净的电解液, 袋外阳极区是流动的矿浆^[4]. 隔膜袋的作用是阻止矿浆中的精矿微粒进入阴极区, 仅使矿浆溶液中的离子通过, 保证阴极板析出金属的纯净度. 目前关于矿浆电解的研究多集中于对不同矿石浸出电解质体系^[5-8]、阴阳极区化学反应机理和反应程度等微观尺度的分析^[3, 9-10]. 但是, 矿浆电解槽内固液搅拌对反应的进程有重要的影响^[11], 隔膜袋在搅拌桨搅动及矿石的磨损下会产生变形, 甚至出现破裂^[12], 污染阴极产品纯度. 同时有研究表明, 矿浆电解过程中当隔膜受到挤压时, 会导致金属离子在隔膜上沉积, 金属提取率降低^[13]. 因此有必要对槽内隔膜的变形特点进行研究, 以推进矿浆电解的数字化生产并提高隔膜寿命.

流体与隔膜之间的交互作用称为流固耦合 (Fluid-structure interaction, FSI)^[14], 流固耦合广泛用于机械、航天以及血管流动等方面^[15-16]. 部分学者针对膜反应器, 通过计算流体力学 (CFD) 的方法研究了膜的高度、间距等条件对液体流速和膜表面剪切应力的影响, 从而优化反应器结构^[17-18], 这些研究聚焦于膜结构对流动产生的阻挡以及流动对隔膜壁面的冲击, 未考虑膜变形. Gowda 与 Wallrabe^[19] 对压电、层流和传热共同作用下隔膜形变进行研究, 通过传感器计算的隔膜折射功率, 与仿真模拟结果一致. 吴姝等^[20] 利用流固交互 (FSI) 模块, 研究外侧压力对容积泵隔膜变形的影响, 以指导稳压室隔膜的设计, 提高隔膜工作寿命. Ageze 等^[21] 通过对比风力机叶片在单向耦合和双向耦合中的受力变形, 发现单向耦合更节省计算空间, 适用于初步研究阶段. 流固耦合中网格离散包括贴体网格法和非贴体网格法, 在贴体网格的建模中, 代表性的有传统动网格模型, 计算时间较长, 常见于商

业软件的流固耦合建模中^[22]. 而基于非贴体网格的流场求解方法, 如基于笛卡尔网格的浸入边界法有效地规避了网格重构过程^[23]. 综上, 数值仿真技术对隔膜结构的研究具有较好的适用性, 且目前流固耦合研究的结构较简单.

矿浆电解采用的是酸性电解质体系, 且处于不透明状态, 无法通过探针等方法测量槽内流动及隔膜变形规律. 因此本文立足于研究宏观流动时隔膜的受力变形, 采用数值仿真技术, 基于流固耦合原理, 探究搅拌转速、阴阳极液位差、阴极液密度、阳极区固体体积含量对隔膜最大变形量的作用效果, 并提出添加框架的方式减小隔膜变形. 通过全三维的定量和可视化解析, 为矿浆电解的工业控制提供理论支撑.

1 隔膜几何模型与物理模型

为计算隔膜受力变形过程, 模型做出以下假设: (1) 只考虑流场对隔膜变形的作用, 忽略隔膜变形对流场的作用; (2) 隔膜袋厚度假设为 5 mm; (3) 忽略隔膜的多孔介质特性.

1.1 几何模型

矿浆电解槽内流体域包括两部分, 隔膜袋外侧称为阳极区, 隔膜袋内侧称为阴极区. 阳极区包含了搅拌桨和多组阳极板, 阴极区包含板状阴极, 在本研究中忽略阴极板的作用. 固体域为四个并列的隔膜袋 (图 1), 袋中包含阴极, 将距离搅拌桨较近的两个隔膜袋定义为内侧, 远离桨轴的为外侧隔膜袋, 隔膜袋长 (L)、宽 (W)、厚 (h) 等几何尺寸见表 1. 在隔膜袋上部做固定约束, 流场产生的压力通过加载的方式施加到隔膜袋上, 对稳态计算后的隔膜变形量进行分析.

1.2 物理模型

(1) 流体控制方程.

矿浆电解槽内流场主要是由固液搅拌形成, 采用双欧拉模型将固体颗粒处理为拟流体, 计算过程遵循质量守恒和动量守恒方程:

质量守恒方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_i \rho_i) + \nabla \cdot (\alpha_i \rho_i \vec{v}_i) = 0 \quad (1)$$

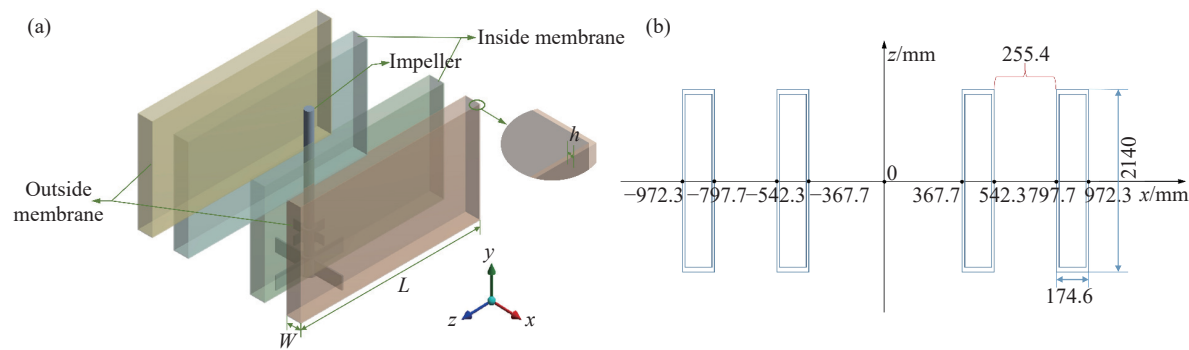


图1 隔膜几何模型。(a)三维模型；(b)隔膜俯视图

Fig.1 Membrane geometry: (a) three-dimensional model; (b) vertical view

表1 隔膜主要尺寸及物性参数

Table 1 Size and physical parameters of the membrane

Parameter	Value	Parameter	Value
Membranes' length, L/mm	2140	Nylon density/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	1140
Membranes' width, W/mm	174.6	Coefficient of thermal expansion/ $^{\circ}\text{C}^{-1}$	0.000147
Membranes' thickness, h/mm	5	Young's modulus/ Pa	1.06×10^9
Membranes' off-bottom clearance/ mm	600	Poisson's ratio	0.35
Nylon yield strength/ Pa	4.31×10^7	Bulk modulus/ Pa	1.1778×10^9
Nylon ultimate strength/ Pa	34.97×10^7	Shear modulus/ Pa	3.9259×10^8

动量守恒方程：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_i \rho_i \vec{v}_i) + \nabla \cdot (\alpha_i \rho_i \vec{v}_i \vec{v}_i) = -\alpha_i \nabla p - \nabla p_s + \nabla \cdot \bar{\tau} + \alpha_i \rho_i \vec{g} + F_D \quad (2)$$

其中， t 为时间，s； α_i 为第*i*相体积分数，%； ρ_i 为第*i*相密度， $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ； $\vec{v}_i$ 为第*i*相速度， $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ； ∇p 为压力，Pa； ∇p_s 为颗粒压力，Pa； $\nabla \cdot \bar{\tau}$ 为应力应变张量； $\vec{g}$ 为重力加速度， $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ ； F_D 为相间曳力，N。

(2)固体控制方程。

固体部分的守恒方程可以由牛顿第二定律导出^[24]：

$$\rho_s \ddot{\vec{d}}_s = \nabla \cdot \sigma_s + \vec{f}_s \quad (3)$$

其中， ρ_s 是固体密度， $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ； σ_s 是柯西应力张量； $\vec{f}_s$ 是体积力矢量； $\ddot{\vec{d}}_s$ 是固体域当地加速度矢量。

(3)流固耦合方程。

流固耦合遵循最基本的守恒原则，在流固耦合交界面处，应满足流体与固体应力(τ)、位移(d)等变量相等或守恒，即满足如下方程^[24]：

$$\tau_f \cdot n_f = \tau_s \cdot n_s \quad (4)$$

$$d_f = d_s \quad (5)$$

其中，下标f表示流体；下标s表示固体。

流固耦合分为直接耦合法和分离解法(顺序耦合法)两种，其中直接耦合法将流体和固体的控

制方程在同一矩阵方程中求解，虽然精度较高但是收敛困难且时间消耗大；流固耦合的分离解法是按设定好的顺序分别求解流场和结构场，通过流固交界面把流体域和固体域的计算结果互相交换传递^[25]。本文基于 Workbench 平台，耦合 Fluent 与 Mechanical 模块，研究槽内固液搅拌产生的流场对隔膜变形规律的影响。隔膜袋材质为尼龙，主要物性参数如表1所示，操作压力为 101325 Pa。

1.3 网格无关性验证

整槽全部采用六面体网格，其中结构域网格沿厚度方向进行了边界层加密处理，并对耦合区域进行网格无关性验证，采用的模拟工况为：搅拌转速(N)为 $120 \text{ rad}\cdot\text{min}^{-1}$ ，固体体积含量(SL)为 12%，颗粒粒径(d)为 $74 \mu\text{m}$ ，阴极液密度(ρ)为 $1400 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。流体域(阳极区与阴极区)网格数量为 446.1 万；固体域(隔膜袋)采用节点的方式描述网格划分情况，不同节点数量下隔膜最大变形量如表2所示，综合隔膜变形情况及计算时间，固体域网格节点数量选取 983518。

2 结果与讨论

考虑单向耦合下的流场对隔膜变形的影响，隔膜变形对流场的影响暂不考虑。矿浆电解生产

表 2 网格无关性验证

Table 2 Mesh independence for the simulation

Mesh	Case1	Case2	Case3	Case4
Elements number for the fluid domain	4461000	4461000	4461000	4461000
Nodes number for the solid domain	584338	726550	983518	1107450
Maximum deformation, mm	174.47	184.49	185.07	185.13

过程中, 阴极区液面普遍高于阳极区, 一方面是控制电解液的渗透速度以提高阴极电解效率, 另一方面控制隔膜袋变形, 避免搅拌桨打到隔膜, 从而提高隔膜袋寿命, 并且避免隔膜的上浮。

2.1 搅拌转速及液位差对隔膜变形的影响规律

(1) 原始工况分析.

针对转速为 $120\text{ rad}\cdot\text{min}^{-1}$, 隔膜袋外固体体积含量 (SL) 为 12%, 隔膜袋内为纯电解质溶液 (密度为 $1227\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) 的工况, 对未改变阴阳极区液位差及密度差时矿浆电解搅拌槽中隔膜变形及原因进行分析. 其中矿石密度为 $3300\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, 据此计算阳极区混合相平均密度为 $1475\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. 图 2 为不同

视角隔膜袋变形云图, 最大变形量达 891.66 mm , 且四个隔膜袋均向阴极区挤压变形. 图 3(a) 为混合相绝对压力分布, 可以看出当阴阳极区液位齐平时, 相同高度位置处, 隔膜袋内侧压力小于外侧. 同时隔膜袋内液体受搅拌桨扰动较小, 基本处于静止状态, 由图 3(b) 看出, 越靠近搅拌桨电解质流速越高. 根据伯努利原理 (式 6) 可知, 在不改变阴极液条件下, 隔膜袋内侧压力势必小于外侧; 且阳极区含有颗粒, 使得阳极液密度大于阴极液, 综合原因导致隔膜袋内侧压力小于外侧, 隔膜向中间挤压变形. 即流体域产生的力决定了隔膜变形程度, 与文献 [26] 结果一致.

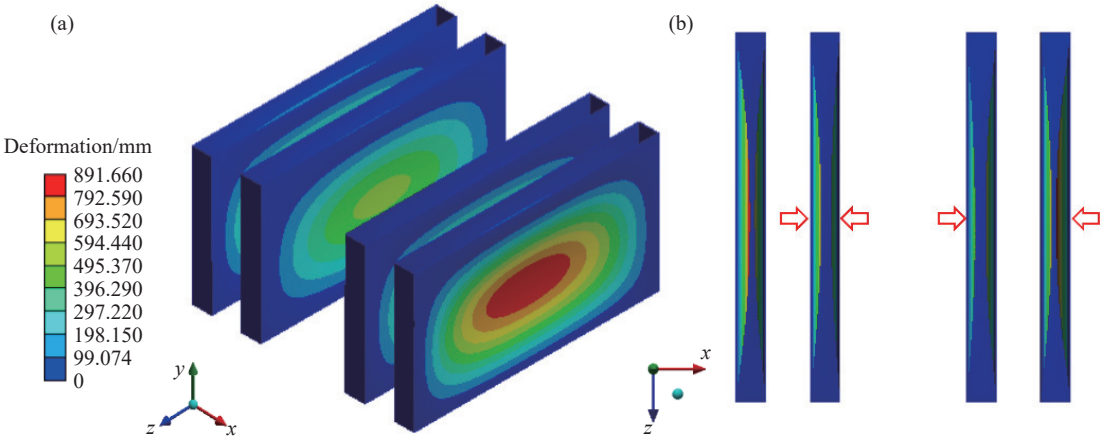


图 2 隔膜变形云图. (a) 三维视图; (b) 俯视图

Fig.2 Membrane deformation contours: (a) three-dimensional view; (b) vertical view

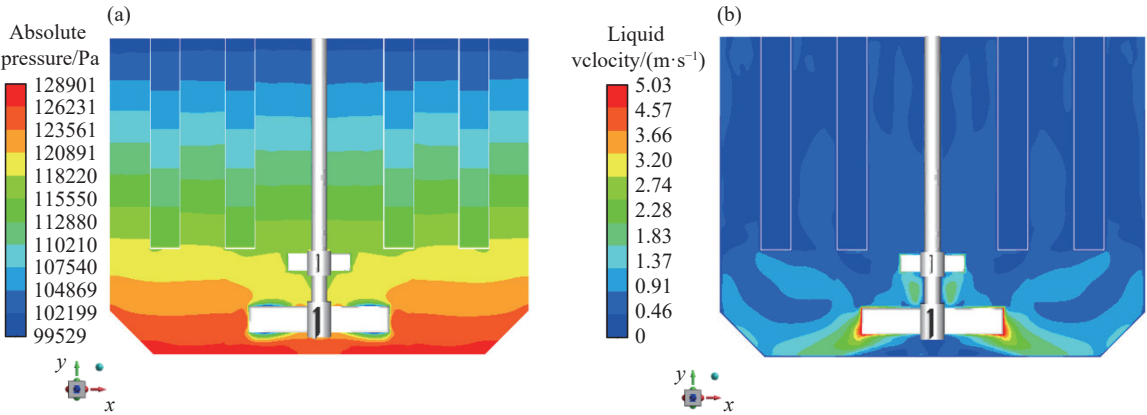


图 3 (a) 混合相绝对压力分布; (b) 槽内电解质速度分布 ($z=0\text{ mm}$)

Fig.3 (a) Absolute pressure distribution of the mixture phase; (b) liquid velocity distribution ($z=0\text{ mm}$ plane)

$$p + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho gh = C \quad (6)$$

其中, p 为流体压强, Pa; ρ 为流体密度, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$; v 为流速, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; g 为重力加速度, $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$; h 为垂直方向高度, m; C 为常数.

综上, 隔膜袋内外的速度差、浓度差是导致隔膜向内侧变形严重的主要因素. 因此本研究主要分析了搅拌转速、阴阳极区液位差、阴极区电解液密度及框架约束对隔膜变形的影响规律, 并结合生产实际对参数进行调整.

(2) 搅拌转速对隔膜变形的影响.

搅拌转速通过影响阳极区动压改变槽内压力分布, 因此对不同转速随液位差变化情况进行分析. 阴极区电解液密度为 $1227 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, 搅拌转速变化范围为 $100 \sim 150 \text{ rad}\cdot\text{min}^{-1}$. 图 4 为隔膜最大变形量随阴阳极区液位差变化曲线, 在不同转速条件下, 随着液位差的不断增加, 隔膜最大变形量均呈现先减小后增加的趋势, 因此存在使得隔膜变形量最小的液位差, 且每个工况的最小变形量随着转速的增加不断减小. 其中, $100 \text{ rad}\cdot\text{min}^{-1}$ 对应最佳液位差约为 150 mm , $150 \text{ rad}\cdot\text{min}^{-1}$ 对应的最佳液位差约为 85 mm . 主要是因为搅拌轴周围的流速随着搅拌转速增加明显提高, 压力势能减小, 从而导致隔膜向中心位置偏移变形, 并且这种变形

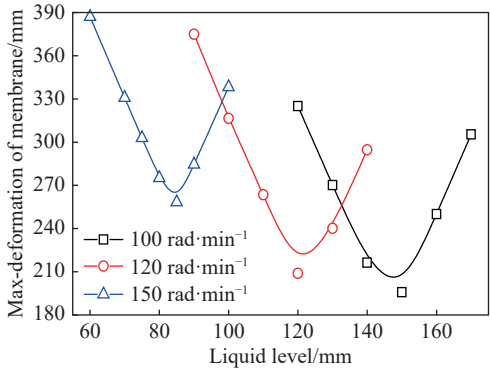
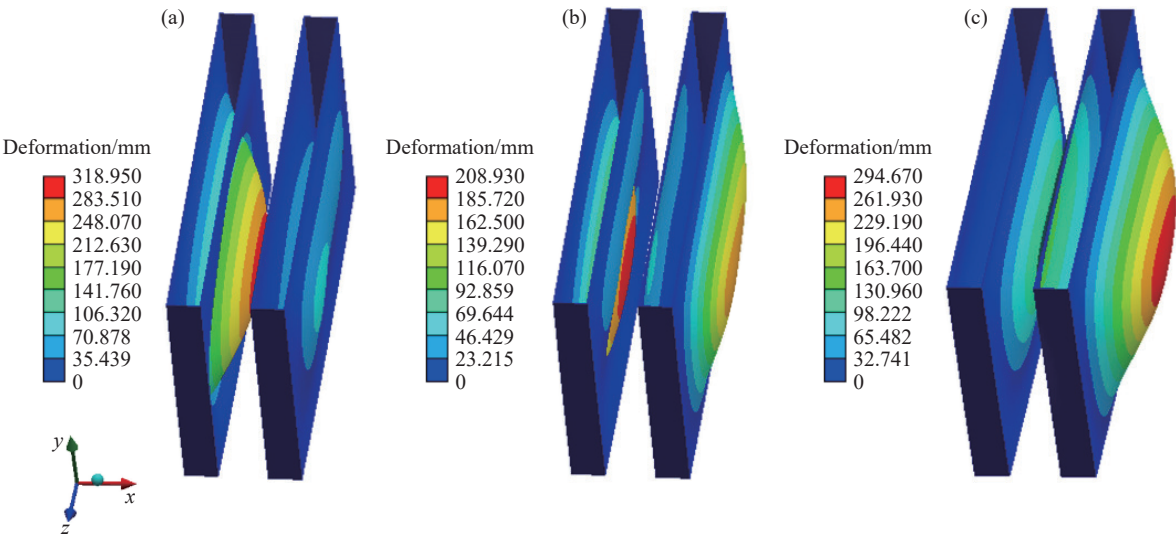


图 4 隔膜最大变形量随阴阳极区液位差变化曲线 (SL=12%)

Fig.4 Curve of the maximum deformation of membrane with the liquid level (SL = 12%)

程度对液位差的敏感度较低.

转速为 $120 \text{ rad}\cdot\text{min}^{-1}$ 条件下的隔膜变形如图 5 所示, 因搅拌桨两侧隔膜袋对称, 因此取搅拌桨左半部分两个隔膜进行分析. 可以看出, 液位差 (Δl) 为 100 mm 时, 外侧隔膜袋整体向搅拌桨位置发生变形, 内侧隔膜袋变形不明显; 当 $\Delta l = 120 \text{ mm}$ 时, 内侧隔膜袋发生鼓包现象, 隔膜最大变形仍然位于外侧隔膜袋; $\Delta l = 140 \text{ mm}$ 时, 内侧隔膜袋鼓包加剧, 外侧隔膜袋向桨轴位置处偏移情况消失, 隔膜最大变形位于内侧隔膜袋. 整体上, 内侧与外侧隔膜袋满足最小变形所需的液位差存在差异.



The membrane on the left part of the impeller; $N = 120 \text{ rad}\cdot\text{min}^{-1}$; SL = 12%; $d = 74 \mu\text{m}$; $\rho = 1227 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$

图 5 隔膜变形量随液位差变化云图. (a) $\Delta l = 100 \text{ mm}$; (b) $\Delta l = 120 \text{ mm}$; (c) $\Delta l = 140 \text{ mm}$

Fig.5 Contours of membrane deformation versus liquid level : (a) $\Delta l = 100 \text{ mm}$; (b) $\Delta l = 120 \text{ mm}$; (c) $\Delta l = 140 \text{ mm}$

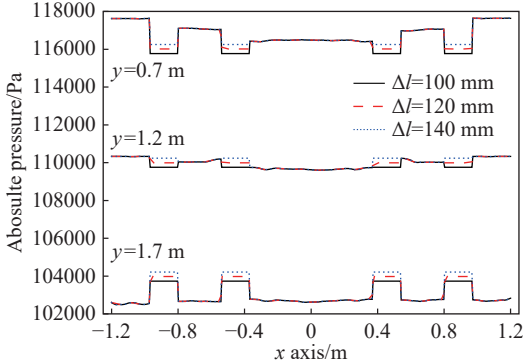
为进一步探究液位差影响隔膜变形的原因, 对图 5 工况, 做绝对压力沿不同高度变化曲线, 如图 6 所示, 离底位置越高, 绝对压力值越小. 当直

线垂直高度 $y=0.7 \text{ m}$, 隔膜袋内侧压力小于外侧; 随着离底高度的增加, 靠近隔膜袋中间位置处 ($y=1.2 \text{ m}$), 隔膜袋内外侧压力差值减小; 在距离液

面较近位置 ($y=1.7\text{ m}$) 时, 整体压力接近大气压 (101325 Pa), 隔膜袋内侧压力大于外侧, 呈现向外膨胀的变化. 同时受隔膜袋上方的固定约束, 由上向下 (沿 y 轴方向), 隔膜袋做外力逐渐减小的加速变形过程, 在隔膜袋中间位置处几乎达到变形最大量, 继续向下移动, 隔膜受力方向指向阴极区, 从而出现图 5(b) 所示的向外鼓包的变形特征. 液位差的作用在于通过改变隔膜袋内部压力, 从而减小内外侧压力差值, 主要是利用压差平衡了搅动所带来的压力势能和动能的变化.

2.2 阴极液密度对隔膜变形的影响

为探究阴阳极区流体密度对隔膜变形的影响, 选择了 $SL = 12\%$ 、 $N = 100\text{ rad}\cdot\text{min}^{-1}$ 的工况, 根据生产实际液位差一般为 50 mm , 通过改变阴极区电解质密度达到控制隔膜袋变形的目的. 隔膜袋变形随阴极区电解质密度变化如图 7 所示. 随阴极液密度的增加, 阴极区与阳极区密度差逐渐

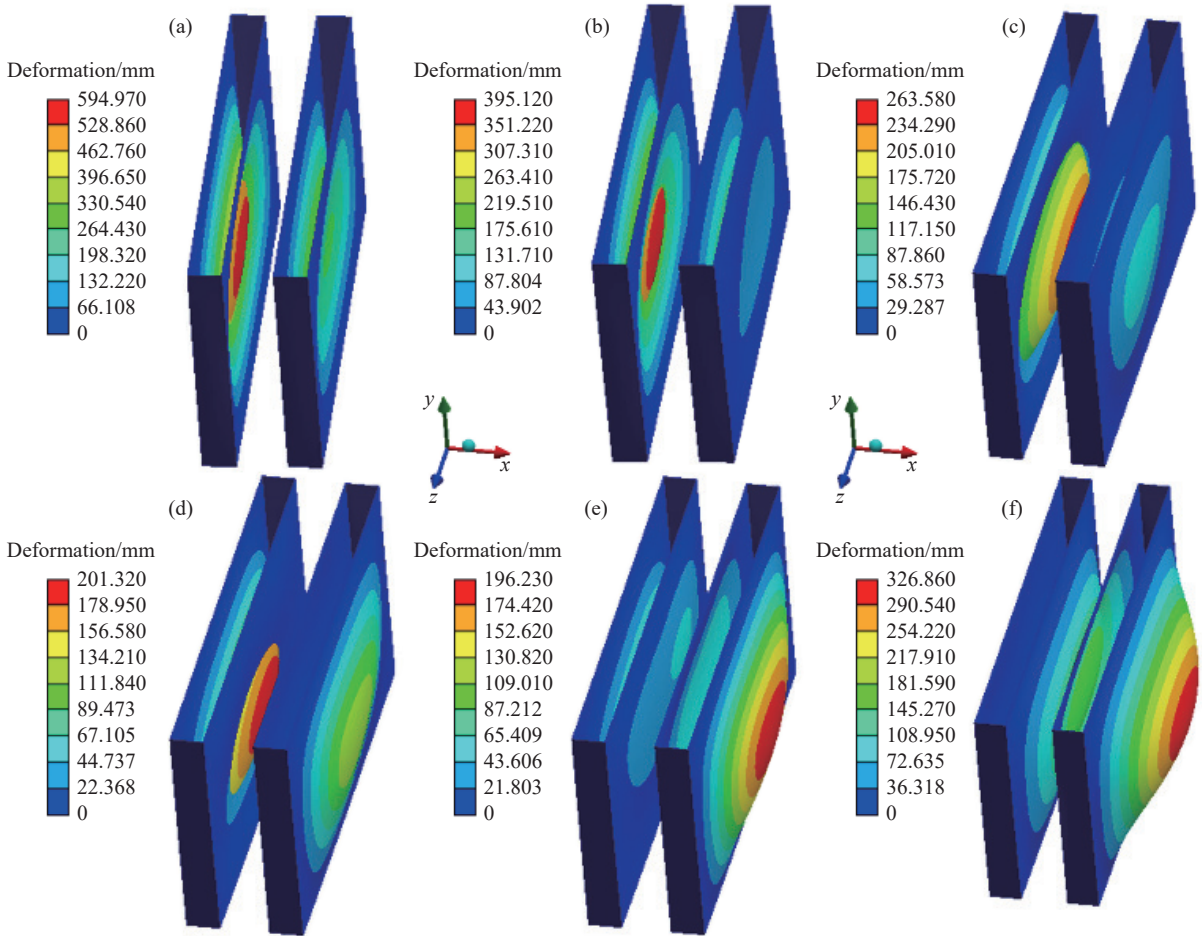


$N = 120\text{ rad}\cdot\text{min}^{-1}$; $SL = 12\%$; $d = 74\text{ }\mu\text{m}$; $\rho = 1227\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$

图 6 绝对压力随液位差变化曲线

Fig.6 Curve of absolute pressure versus liquid level

减小, 当电解液密度为 $1268\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 时, 阴极液密度明显小于外侧 ($\rho = 1475\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$), 隔膜向阴极区严重挤压变形. 继续增加密度, 内侧的变形程度逐渐减小, 当电解液密度为 $1372\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 时内侧隔膜袋



The membrane on the left part of the impeller; $N = 100\text{ rad}\cdot\text{min}^{-1}$; $SL = 12\%$; $d = 74\text{ }\mu\text{m}$; $\Delta l = 50\text{ mm}$

图 7 隔膜变形随阴极区电解质密度变化云图. (a) $\rho = 1268\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$; (b) $\rho = 1330\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$; (c) $\rho = 1372\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$; (d) $\rho = 1392\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$; (e) $\rho = 1413\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$; (f) $\rho = 1455\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

Fig.7 Contours of membrane deformation versus electrolyte density in cathode domain: (a) $\rho = 1268\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$; (b) $\rho = 1330\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$; (c) $\rho = 1372\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$; (d) $\rho = 1392\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$; (e) $\rho = 1413\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$; (f) $\rho = 1455\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

变形明显减小, 外侧隔膜袋向桨轴位置偏移. 电解液密度大于等于 $1413 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 时外侧隔膜袋整体向桨轴位置处偏移, 且远离桨轴处的壁面变形更大.

隔膜最大变形量随阴极区电解液密度的增加呈现先减小后增加的变化趋势(图8), 当电解液密度小于 $1392 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 时, 隔膜整体向桨轴位置处变形, 并且电解液密度越大, 变形越小; 当电解液密度处于 $1392 \sim 1413 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 范围内, 隔膜最大变形量达到最小值为 200 mm 左右. 结合变形云图和变形曲线, 大致可以将电解液密度对隔膜变形的影响分为三个阶段: ①阴极区压力不足, 隔膜袋向阴极区挤压变形; ②内侧隔膜袋向两侧鼓包, 外侧隔膜袋整体向桨轴位置处偏移; ③隔膜袋均向两侧鼓包, 且内侧鼓包大于外侧. 因此, 电解液密度为 $1392 \sim 1413 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 较合适.

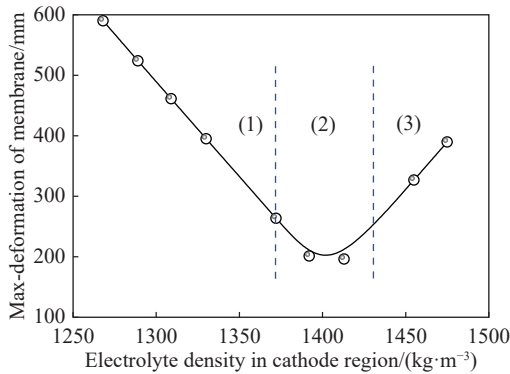
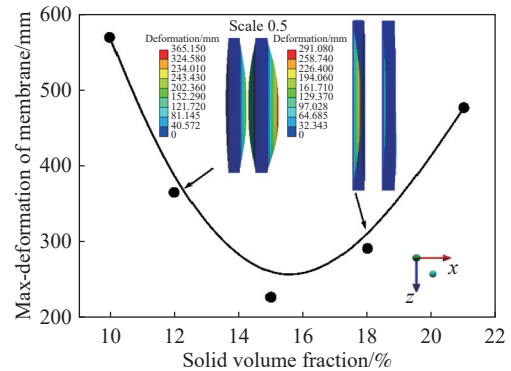


图8 隔膜最大变形量随阴极电解液密度变化曲线

Fig.8 Curve of the maximum deformation of membrane with the electrolyte density in cathode domain

2.3 固体体积含量对隔膜变形的影响

为探究固体体积含量(SL)对隔膜变形的影响, 选取转速为 $120 \text{ rad}\cdot\text{min}^{-1}$, 阴阳极区液位差为 50 mm , 阴极液密度为 $1400 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 的模拟工况. 如图9所示, 在所研究区间内, 隔膜最大变形量随流体域内固体体积分量的增加先减小后增加, 在



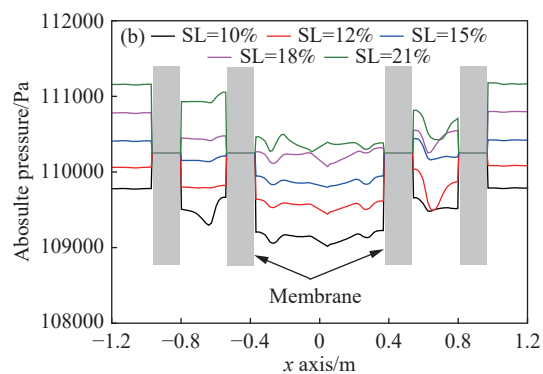
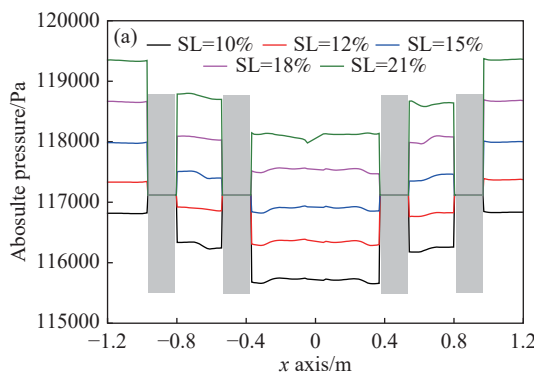
The membrane on the left part of the impeller; $N = 120 \text{ rad}\cdot\text{min}^{-1}$; $\Delta l = 50 \text{ mm}$; $\rho = 1400 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$

图9 隔膜最大变形量随固体体积含量变化

Fig.9 Curve of the maximum deformation of membrane versus solid volume fraction

SL=15% 时, 隔膜最大变形量达到最小值 226.7 mm . 根据隔膜变形云图可以看出, 在 $SL < 15\%$ 时, 隔膜袋向两侧鼓包变形, 内侧隔膜袋位置处搅拌动能较大, 根据伯努利方程可知该位置处压力较小, 从而出现内侧隔膜袋鼓包大于外侧的情况, 但是随着 SL 增加, 最大变形量逐渐减小; 当 $SL > 15\%$, 隔膜袋外侧颗粒浓度增加, 隔膜向阴极区挤压变形, 且外侧隔膜袋的变形程度大于内侧.

为进一步明确 SL 造成隔膜变形的原因, 分析了混合相绝对压力沿水平(x)和垂直(y)方向上的分布, 如图10所示, 其中灰色区域为隔膜袋位置. 可以看出不同高度的直线上均呈现 SL 越大绝对压力越大的变化, 且不同 SL 之间绝对压力的差值随 y 值的增加而减小; 在同一水平高度上, 槽中心处($x=0$)的绝对压力值最小. 隔膜袋内侧压力只与直线垂直高度相关, 同一高度位置处, 隔膜袋内侧压力相等. 由图10(a)可知, 当 $SL > 10\%$ 时隔膜袋外侧压力大于内侧, 在接近液面处 10(c)内侧绝对压力显著大于外侧, 与图9隔膜变形规律一致.



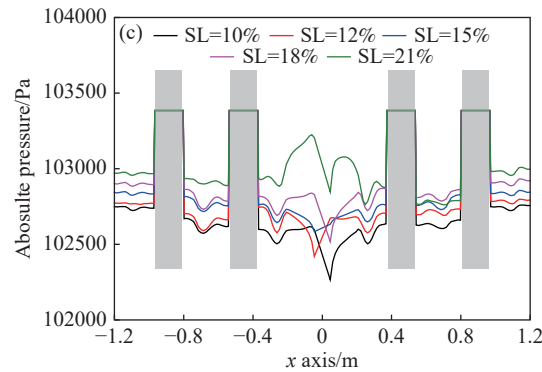


图 10 混合相的绝对压力沿 x 轴变化曲线. (a) $y=0.7$ m; (b) $y=1.2$ m; (c) $y=1.7$ m ($z=0$ m)
Fig.10 Curve of absolute pressure along x-axis: (a) $y=0.7$ m; (b) $y=1.2$ m; (c) $y=1.7$ m ($z=0$ m)

2.4 框架约束对隔膜变形的影响

由前面讨论可知, 在转速为 $120 \text{ rad}\cdot\text{min}^{-1}$, SL 为 15%, 阴阳极区液位差为 50 mm, 阴极液密度为 $1400 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 的模拟工况下, 隔膜向外鼓包且最小变形量为 226.7 mm, 根据图 1(b)可知相邻隔膜袋间距离为 255.4 mm. 这种变形会影响隔膜间流体

的运动, 因此探究添加框架约束对隔膜变形的影响. 图 11(a)为框架位置, 间隔排布在阴极外的隔膜袋上, 11(b)为该模拟条件下的隔膜变形. 框架约束对隔膜变形有明显的抑制作用, 最大变形量由 226.7 mm 减小为 0.664 mm.

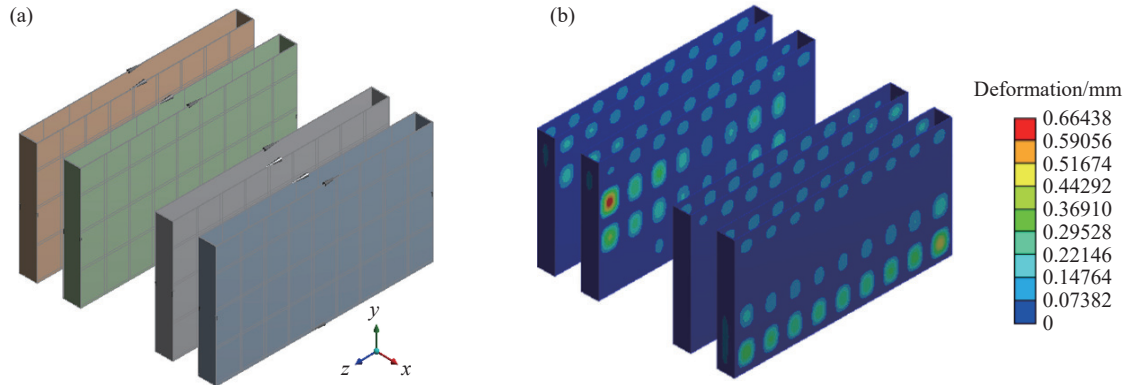


图 11 矿浆电解槽隔膜袋的框架约束. (a)隔膜框架位置; (b)隔膜变形云图

Fig.11 Fixed support on the membrane in slurry electrolysis tank: (a) location of fixed support on the membrane; (b) contour of membrane deformation

3 结论

本文以铈矿矿浆电解槽为研究对象, 通过数值仿真技术, 将流场与应力场相耦合, 对槽内固液搅拌条件下隔膜的变形规律进行三维可视化研究, 定性并定量阐明隔膜受压与鼓包的控制条件, 同时探明框架约束对变形的影响, 以延长隔膜寿命并维持阴极液的稳定, 具体结论如下:

(1) 研究发现隔膜袋两侧压差是导致变形的根本原因, 搅拌转速越高, 用于平衡搅动所带来的压力势能和动能的变化所需的液位差越小. 当阴极区电解液密度较低时, 隔膜袋向内挤压变形; 电解液密度持续增加, 则向两侧鼓包, 因此控制阴极区电解液密度在 $1392 \sim 1413 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 范围内较合适.

(2) 隔膜最大变形量随流体域固体体积含量 (SL) 的增加先减小后增加, 在 $SL=15\%$ 时, 隔膜变形达到最小值 226.7 mm; 越靠近槽下部, SL 对绝对压力的影响越大. 考虑框架约束后, 隔膜最大变形量显著减小到 0.664 mm.

参 考 文 献

[1] Qiu D F. The characteristics of slurry electrolysis and research background. *Min Metall*, 1998, 7(4): 40
(邱定蕃. 矿浆电解的特点和研究背景. *矿冶*, 1998, 7(4): 40)
[2] Wang C Y, Yin F, Chen Y Q, et al. *A Slurry Electrolysis Device*: China Patent, 202968719U. 2013-06-05
(王成彦, 尹飞, 陈永强, 等. 一种矿浆电解装置: 中国专利, 202968719U. 2013-06-05)

- [3] Yang X W, Zhang Y J, Deng L H, et al. Leaching mechanism of slurry electrolysis. *Eng Sci*, 2000, 2(6): 49
(杨显万, 张英杰, 邓纶浩, 等. 矿浆电解过程的浸出机理. *中国工程科学*, 2000, 2(6): 49)
- [4] Chen Y Q, Liu Y, Wang C Y, et al. Continuous expanding test on slurry electrolysis of As-rich antimonite gold concentrate. *Nonferrous Met Extr Metall*, 2015(12): 5
(陈永强, 刘勇, 王成彦, 等. 高砷锑金精矿矿浆电解连续扩大试验. *有色金属(冶炼部分)*, 2015(12): 5)
- [5] Wang C Y, Qiu D F, Jiang P H, et al. Slurry electrolysis medium selection for jamesonite treatment. *Nonferrous Met*, 2002, 2: 35
(王成彦, 邱定蕃, 江培海, 等. 矿浆电解法处理脆硫锑铅矿的介质体系选择. *有色金属*, 2002, 2: 35)
- [6] Wang C Y, Qiu D F, Yin F, et al. Slurry electrolysis of ocean polymetallic nodule. *Trans Nonferrous Met Soc China*, 2010, 20: 60
- [7] Li F F, Chen M J, Shu J C, et al. Copper and gold recovery from CPU sockets by one-step slurry electrolysis. *J Clean Prod*, 2019, 213: 673
- [8] Zhang Y L, Wang C Y, Ma B Z, et al. Extracting antimony from high arsenic and gold-containing stibnite ore using slurry electrolysis. *Hydrometallurgy*, 2019, 186: 284
- [9] Wang C Y, Qiu D F, Jiang P H, et al. Foramtion and oxidation mechanism of sulfur in the process of slurry electrolysis on bismuthinite. *Nonferrous Met Extr Metall*, 2002(6): 2
(王成彦, 邱定蕃, 江培海, 等. 辉铋矿矿浆电解过程硫的形成及氧化机理. *有色金属(冶炼部分)*, 2002(6): 2)
- [10] Zhang Y L, Qiu D F, Wang C Y, et al. Anodic process of stibnite in slurry electrolysis: The direct collision oxidation. *Chin J Chem Eng*, 2022, 41: 466
- [11] Lu T T, Shen H, Na G Y, et al. CFD simulation of suspension characteristics in a stirred tank for slurry electrolysis. *Metall Mater Trans B*, 2022, 53(3): 1747
- [12] Zhang Y L, Wang C Y, Chen Y Q, et al. Plant practice of slurry electrolysis of high arsenic gold-bearing stibnite concentrate. *Nonferrous Met Extr Metall*, 2014(11): 16
(张永禄, 王成彦, 陈永强, 等. 高砷锑金精矿矿浆电解生产实践. *有色金属(冶炼部分)*, 2014(11): 16)
- [13] Yang D Z. *Laboratory Amplification for Metals Recovering From WPCBs by Slurry Electrolysis* [Dissertation]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2019
(杨德泽. 矿浆电解从WPCBs中回收金属的实验室放大工艺研究[学位论文]. 绵阳: 西南科技大学, 2019)
- [14] Heners J P, Radtke L, Hinze M, et al. Adjoint shape optimization for fluid-structure interaction of ducted flows. *Computational Mechanics*, 2017, 61(3): 259
- [15] Khalafvand S S, Ng E Y K, Zhong L. CFD simulation of flow through heart: A perspective review. *Comput Methods Biomech Biomed Eng*, 2011, 14(1): 113
- [16] Zhu H, Sun Q L, Liu X F, et al. Fluid-structure interaction-based aerodynamic modeling for flight dynamics simulation of parafoil system. *Nonlinear Dyn*, 2021, 104(4): 3445
- [17] Yang M, Wei Y S, Zheng X, et al. CFD simulation and optimization of membrane scouring and nitrogen removal for an airlift external circulation membrane bioreactor. *Bioresour Technol*, 2016, 219: 566
- [18] Jin Y, Liu C L, Song X F, et al. Computational fluid dynamics simulation as a tool for optimizing the hydrodynamic performance of membrane bioreactors. *RSC Adv*, 2019, 9(55): 32034
- [19] Gowda H G B, Wallrabe U. Simulation of an adaptive fluid-membrane piezoelectric lens. *Micromachines*, 2019, 10(12): 797
- [20] Wu S, Song J W, Wei X H, et al. Deformation characteristics of stable pressure chamber diaphragm for pumps of plant protection machinery. *J Vib Shock*, 2019, 38(7): 257
(吴姝, 宋俊伟, 魏新华, 等. 植保机械用泵稳压气室隔膜变形特性研究. *振动与冲击*, 2019, 38(7): 257)
- [21] Ageze M, Hu Y F, Wu H C. Comparative study on uni- and Bi-directional fluid structure coupling of wind turbine blades. *Energies*, 2017, 10(10): 1499
- [22] Tezduyar T E, Sathe S, Pausewang J, et al. Interface projection techniques for fluid-structure interaction modeling with moving-mesh methods. *Comput Mech*, 2008, 43(1): 39
- [23] Sotiropoulos F, Yang X L. Immersed boundary methods for simulating fluid-structure interaction. *Prog Aerosp Sci*, 2014, 65: 1
- [24] Zhang L, He H Y, Zhang X W, et al. One way fluid and structure interaction numerical analysis of vertical axis tidal turbine. *J Huazhong Univ Sci Technol Nat Sci*, 2014, 42(5): 80
(张亮, 何环宇, 张学伟, 等. 垂直轴水轮机单向流固耦合数值研究. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2014, 42(5): 80)
- [25] Liu H L, Xu H, Wu X F, et al. Strength analysis of a diffuser pump based on fluid-structure interaction. *J Vib Shock*, 2013, 32(12): 27
(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. *振动与冲击*, 2013, 32(12): 27)
- [26] Shahrestani A B, Alshuraiaan B, Izadi M. Combined natural convection-FSI inside a circular enclosure divided by a movable barrier. *Int Commun Heat Mass Transf*, 2021, 126: 105426