

地浸采铀注氧作业的气泡行为与流型演变研究 ——以静态混合器为例

党俊杰, 曹鸣谦, 王亚安, 原 渊

(中核矿业科技集团有限公司, 北京 101149)

摘要: 在“CO₂ + O₂”原地浸出采铀工艺的注氧过程中, 氧气在长距离输送过程中易发生气泡聚并, 导致流型恶化, 进而诱发气堵, 造成注液中中断和浸出效率下降。为揭示气泡行为与流型演变规律, 本研究针对地浸采铀中使用的静态混合器, 设计了可视化试验系统, 采用粒子阴影测速法, 结合高斯滤波、自适应阈值分割及形态学重构等图像处理技术, 实现对微气泡粒径、分布与动态行为的高分辨率原位观测。结果表明, 当加氧质量浓度从 15 mg/L 增加至 700 mg/L 时, 微气泡粒径(d_{50})由 528 μm 增至 823 μm ; 当注液流量从 0.5 cm³/h 提升至 2.0 m³/h 时, 微气泡粒径从 945 μm 降至 412 μm 。随着加氧质量浓度提高, 流型演化呈现从雾状流、泡状流、过渡流到弹状流的变化规律。在弹状流型下, 大气泡周期性溃散, 导致现场气堵问题频发, 在注氧作业中应尽量避免该流型。本研究的图像处理方法可为微气泡粒径、聚并频率与流型识别提供高可靠性数据支持, 为地浸采铀注氧作业与过程调控提供支撑。

关键词: 地浸采铀; 注氧; 静态混合器; 气液两相流; 图像处理; 流型演变; 气泡行为

中图分类号: TL212.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-8063(2026)02-0093-08

DOI: 10.13426/j.cnki.yky.2025.10.01

“CO₂ + O₂”原地浸出采铀工艺(简称地浸采铀)已成为中国砂岩型铀矿开发的主力工艺^[1-3]。在地浸采铀过程中, 氧气的利用效率直接影响铀的浸出效果^[4-6]。为实现氧气的高效利用, 确保氧气稳定输送至目标铀矿层并发生氧化反应, 在长距离输送过程中必须保证气液混合相流动的稳定性, 避免因气液流型恶化而引发工程问题^[7]。

在实际工程中, 砂岩型铀矿层埋藏较深, 且地上注氧设备至井口的水平段距离达上百米^[8]。随着注氧量的增大, 初始分散的小气泡在流动过程中易发生聚并, 逐步演化为厘米级气团或气塞, 导致气液流型失稳、注液压力剧烈波动, 甚至频繁引发气堵; 并间接造成注液注气难、浸出周期长、浸出液铀浓度低等问题^[10-11]。

气液流型失稳的本质在于气泡尺度的不可控增长。Lu 等采用直接数值模拟(DNS)发现, 大尺寸气泡具有更高的浮升速度和更强的相分离倾向, 在水平管中易迁移至顶部并聚结成气塞; 而小气泡则因浮力弱、分布均匀、抗聚并能力强, 能够

以弥散态稳定输运^[12]。因此, 精准控制气泡粒径、抑制聚并行为, 是保障气液混合相稳定输送、提升氧气利用效率的前提。

目前, 地浸矿山的注氧方式大致可分为直接注氧、曝气注氧及静态混合器注氧^[13-14]。其中, 静态混合器由于无运动部件、结构简单、压降低, 可实现气泡的高效破碎与再分散, 已成为广泛应用的注气方法^[15]。然而, 静态混合器的实际强化效果高度依赖于其下游气泡群的动态演化特性, 这些特征包括粒径分布、上升速度、聚并频率等^[16-18]。由于传统测量方法难以在近工况条件下对微小气泡进行原位、高分辨率观测, 使得对混合机制的深入研究受到限制。

为此, 本研究搭建了可视化试验平台, 结合高斯滤波去噪、自适应灰度阈值分割与形态学重构等多阶段图像处理方法, 定量分析微气泡粒径、运动轨迹及流型演化, 揭示不同操作条件下气泡尺度演化规律与流型稳定性之间的耦合机制, 为优化静态混合器结构设计、抑制气堵风险、提升地浸

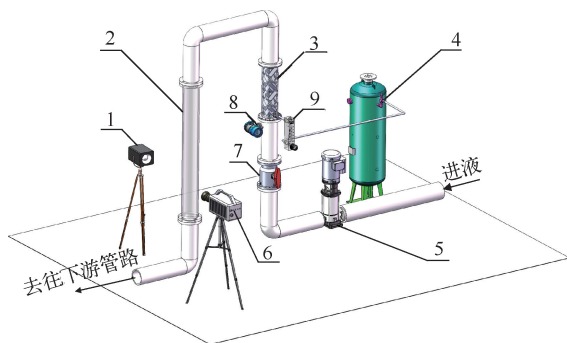
收稿日期: 2025-10-01; **修回日期:** 2025-10-24

基金项目: 中核集团青年英才项目(地浸采铀高效注氧溶氧技术研究)

采铀工艺效率提供支撑。

1 试验装置和方法

为探究地浸采铀注氧作业的气泡行为与流型演变规律,本研究在新疆某“CO₂+O₂”矿山集控室内搭建了可视化试验系统(图1)。试验液相介质为矿山真实吸附尾液,尾液主要相关离子及其浓度: $\rho(\text{Ca}^{2+})=27.7\text{ mg/L}$, $\rho(\text{Mg}^{2+})=48.3\text{ mg/L}$, $\rho(\text{CO}_3^{2-})=314\text{ mg/L}$;气相介质为O₂与CO₂,由矿山现场液化气储罐供应(纯度 $\geq 99\%$),经减压阀与转子流量计调节进气流量。静态混合器型号为矿山采用的SV型, DN32, 长度500 mm, 内部设置波纹板。将静态混合器的下游通过一段1 m长的UPVC弯管与有机玻璃观测管连接。通过有机玻璃观测管(DN32、长1.2 m、壁厚6 mm), 可实现气液两相流的高分辨率、原位动态观测。此外, 试验系统上游依次设有电磁流量计、球阀和转子流量计, 用于调整注液流量和进气流量。气液两相流经静态混合器充分混合后, 通过弯管进入观测段, 完成流型记录与图像采集, 最终导向下游注液孔。



1—LED灯;2—有机玻璃观测管;3—静态混合器;
4—液态氧气罐;5—立式泵;6—拍摄相机;
7—球阀;8—电磁流量计;9—转子流量计。

图1 试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental system

试验流程:当电磁流量计流量稳定后,通过转子流量计加入恒流量的氧气;待气液两相流型趋于稳定(约1~2 min)后,启动高速摄像系统,记录气液混合过程。摄像参数设置:帧率60 fps,快门速度1/8 000 s,分辨率1 920×1 080。每组工况重复试验3次,每次截取10帧具有代表性的流型图像,用于后续气泡粒径统计与流型识别分析。

拍摄所用相机为Nikon ZF,镜头为Nikkor 105 mm f/2.8 VR S,空间分辨率约20 $\mu\text{m}/\text{pixel}$,可实现对气泡的清晰成像。试验参数范围:注液流量(Q_l)为0.5~2 m³/h,进气流量(Q_g)为0.1~10 L/min,该工况可完整覆盖雾状流、泡状流、过渡流及弹状流的流型转变区间。

2 图像处理与气泡参数提取

基于粒子阴影测速法(Particle Shadow Velocimetry, PSV)的图像处理流程见图2。在气泡动态观测过程中,原始图像不可避免地受到环境光照波动、相机传感器噪声、镜头散射光及背景干扰等因素影响,导致气泡边缘模糊、灰度分布不均(图3a),影响后续粒径识别精度。为提升图像质量与气泡特征提取的可靠性,构建了多阶段图像预处理流程,依次通过高斯滤波去噪、自适应灰度阈值分割、形态学重构处理,最终实现清晰、完整、无缺陷的气泡轮廓提取。

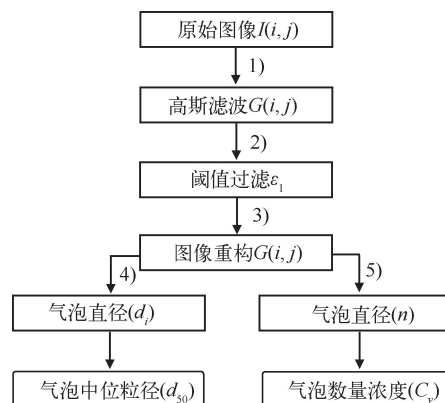


图2 图像处理与气泡参数提取流程

Fig. 2 Flowchart of image processing and bubble parameter extraction

2.1 高斯滤波去噪

为抑制图像中的高频噪声,首先对原始灰度图像 $I(i,j)$ 进行高斯平滑滤波处理。该方法基于局部像素加权平均,在有效保留边缘信息的同时降低噪声干扰。高斯滤波的计算式为^[19]

$$G(i,j) = \sum_m \sum_n I(i+m,j+n) \cdot G_\sigma(m,n), \quad (1)$$

$$G_\sigma(m,n) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{m^2+n^2}{2\sigma^2}\right), \quad (2)$$

式中: $G(i,j)$ 为滤波后图像; $I(i,j)$ 为原始图像在

位置 (i, j) 的灰度值; $G_{\sigma}(i, j)$ 为标准高斯核函数; σ 为高斯核的标准差,决定平滑程度; (m, n) 表示核函数偏移量。

通过对比不同 σ 值(1.0, 1.5, 2.0)下的图像质量,确定 $\sigma=1.5$ 为最优参数。该值可在有效抑制背景噪声(PSNR 提升约 6.8 dB)的同时,保持气泡边缘锐度(边缘保留能力优于 $\sigma=2.0$),处理结果见图 3(b)。

2.2 自适应灰度阈值过滤

由于试验系统中光照条件存在局部不均,采用自适应局部阈值分割算法,基于局部邻域灰度统计特性动态确定阈值,提升分割鲁棒性。采用最大类间方差法(OTSU)与局部窗口法结合的改进策略,对图像中每个像素 (i, j) ,在其 $w \times w$ 邻域内计算局部均值(μ_{ij})与标准差(σ_{ij}),设定阈值 $T(i, j)$ 为^[19]

$$T(i, j; w) = \mu_{ij}(w) + k \cdot \sigma_{ij}(w), \quad (3)$$

式中: k 为调节系数,取 $k=1.2$,可平衡气泡与背景对比度; w 为邻域窗口大小(经验证, w 取值 31 时,分割效果最优)。

二值化图像 $B(i, j)$ 定义为

$$B(i, j) = \begin{cases} 1, & G(i, j) > T(i, j) \\ 0, & G(i, j) \leq T(i, j) \end{cases}, \quad (4)$$

该方法能有效分离出灰度值较高、成像清晰的气泡区域,同时抑制离焦气泡、液膜波动与背景杂点。处理结果见图 3(c),气泡区域被清晰提取,背景干扰显著减少。

2.3 形态学重构处理

尽管阈值分割已初步提取气泡区域,但图像中仍存在以下问题:气泡边界不连续(断点)、气泡内部存在空洞及边缘模糊。为此,引入形态学操作对二值图像进行结构化修复。具体流程包括膨胀、腐蚀和填充孔洞。

1)膨胀。使用 3×3 十字形结构元素 S 对图像 $B(i, j)$ 进行膨胀,以连接断裂边缘:

$$B_{\text{dil}}(i, j) = \bigcup_{(x, y) \in S} B(i-x, j-y). \quad (5)$$

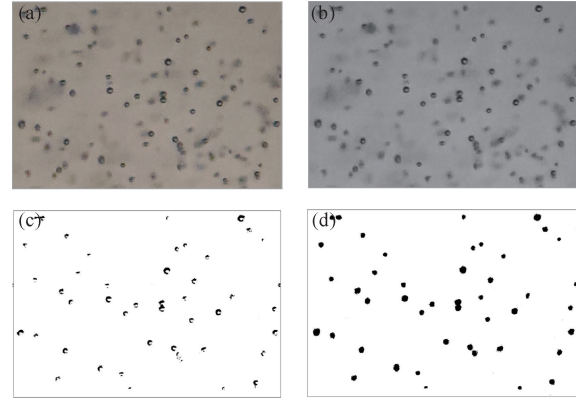
2)腐蚀。对膨胀后的图像进行腐蚀,以恢复原始气泡尺寸,避免过度膨胀:

$$B_{\text{ero}}(i, j) = \bigcap_{(x, y) \in S} B_{\text{dil}}(i+x, j+y). \quad (6)$$

3)填充孔洞。对腐蚀后图像进行区域填充,将内部空洞填充为连通区域。

上述操作通过 ImageJ 与 MATLAB 软件联

合实现,其中结构元素采用 3×3 十字形,迭代次数设置为 2。处理后图像见图 3(d),气泡边界连续完整、内部无空洞、形态规则,可为后续参数提取提供高质量输入。



(a)原始图像 $I(i, j)$; (b)高斯滤波 $G(i, j)$;
(c)二值化图像 $B(i, j)$; (d)图像重构 $G'(i, j)$ 。

图 3 图像处理示意图

Fig. 3 Image processing schematic diagram

2.4 轮廓识别与参数提取

在完成图像重构后,采用基于连通域分析的轮廓提取算法,识别每个独立气泡的投影轮廓。首先通过连通域标记法(Connected Component Labeling)对二值图像中的气泡进行编号(图 4);然后提取每个连通区域的边界像素集合 C_k ,并计算其几何参数。

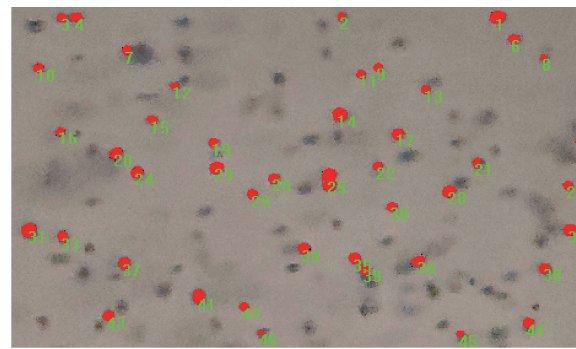


图 4 气泡编号图

Fig. 4 Bubble numbered diagram

基于测微尺,标定图像放大倍率,根据气泡投影面积(A_k),计算等效直径和质心坐标:

$$d_k = \sqrt{\frac{4A_k}{\pi}}; \quad (7)$$

$$(x_c, y_c) = \left(\frac{1}{N_{k(i,j) \in C_k}} \sum i, \frac{1}{N_{k(i,j) \in C_k}} \sum j \right). \quad (8)$$

最终,所有气泡的粒径、面积、位置、速度等参数均基于此轮廓信息进行统计分析,该方法可为气泡参数获取、流型识别、聚并事件判定与传质性能计算提供可靠抓手。

3 结果与讨论

3.1 流型演化规律

本试验在新疆某地浸采铀试验基地现场进行,注液系统操作压力为0.6 MPa(表压),液相温度为13℃,气相温度为8℃。对于地浸采铀注氧作业环节,在静态混合器作用下,气液两相流型随气液比呈现规律性演变(图5)。当加氧质量浓度小于60 mg/L时,流型稳定,处于雾状流,气泡以微米级(100~500 μm)为主;当加氧质量浓度增

至140 mg/L时,流型过渡至泡状流,气泡分布均匀且弥散性高,未观察到明显的气泡聚集或聚并现象,此阶段气泡间相互作用较弱,系统仍处于相对稳定状态;当加氧质量浓度提高至210 mg/L时,流型进入过渡流,气泡持续发生碰撞与聚并,形成不规则、非周期性的气团结构。管道内部出现局部气相聚集区,气泡簇分布不均,流场扰动加剧,界面波动显著增强;当加氧质量浓度达到420 mg/L时,流型演化为典型的弹状流,周期性地出现占据管道横截面70%以上的大气泡,伴随剧烈的压力脉动与界面震荡。在弹状流型下,气泡受浮力驱动快速上行并聚集于管顶,形成局部气相堵塞。当气相占据横截面比例 $\geq 50\%$ 时,液相流通面积急剧缩减,导致注液压力波动幅值显著上升,并诱发周期性压力振荡。

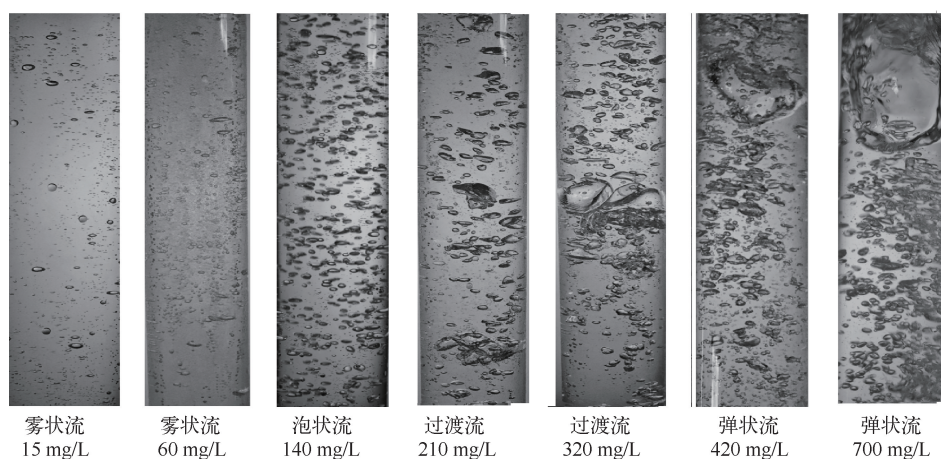


图5 不同加氧质量浓度的流型变化

Fig. 5 Flow pattern changes at different oxygenation concentrations

在弹状流工况下,气泡簇呈现“周期性堆积-溃散”行为(周期约2~5 s),易引发间歇性流动中断。新疆某地浸采铀试验基地的现场统计数据显示,在弹状流运行条件下,气堵问题发生率达 (3.2 ± 0.8) 次/周(基于5口注液井连续运行2个月的数据),间接造成浸出剂供应中断。相比之下,雾状流与泡状流中气泡粒径相对较小,分布均匀,聚并倾向低,可有效维持连续注液与高效传质,是地浸采铀注气系统理想的运行流型。

因此,后续静态混合器的结构优化应聚焦于延缓流型向弹状流的演化,通过调控剪切场分布、

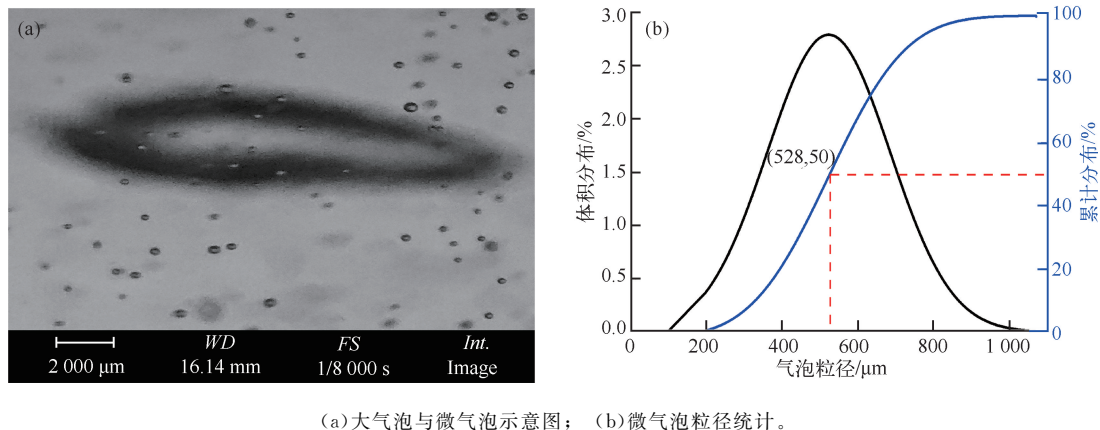
延长气泡停留时间、抑制局部聚并,构建稳定的泡状流-过渡流安全窗口,为地浸采铀系统实现高效、连续、稳定运行提供关键保障。

3.2 操作工况对微气泡粒径的影响

在所有试验工况下,视野中均能观察到直径大于1 mm的大气泡与直径小于1 mm的微气泡共存。其中,大气泡主要聚集于水相与观测玻璃界面的边界层区域,以孤立或成簇形式存在,运动轨迹清晰,边界轮廓分明;而微气泡则广泛分布于整个观测柱内部,呈现高度分散、持续生成与动态聚并的特征,见图6(a)(加氧质量浓度为210 mg/L,属

过渡流型)。在视窗内,既存在直径约3 mm的大气泡,也分布着大量 $d_{50} = 528 \mu\text{m}$ 的微气泡(d_{50} 为气泡直径中值),微气泡粒径分布见图 6(b)。

为揭示操作工况对气泡的调控机制,本节系统研究了不同进气流量与注液流量条件下,微气泡的粒径演化规律。



(a)大气泡与微气泡示意图; (b)微气泡粒径统计。

图6 典型工况的气泡示意图(加氧质量浓度 210 mg/L)

Fig. 6 Bubble diagram for typical operating conditions(oxygen mass concentration 210 mg/L)

3.2.1 加氧质量浓度对微气泡粒径的影响

在保持注液流量($Q_l = 1 \text{ m}^3/\text{h}$)恒定的条件下,通过调节转子流量计控制氧气注入浓度,共设置 10 组氧气注入浓度工况:15、60、140、210、320、400、480、560、650、700 mg/L,对应进气流量 0.2~8.1 L/min。加氧质量浓度对微气泡粒径影响见图 7。随着加氧质量浓度的提高,微气泡的粒径随之上升,当加氧质量浓度为 15 mg/L 时,微气泡 $d_{50} = 528 \mu\text{m}$;当加氧质量浓度提升至 700 mg/L 时,微气泡中位粒径升至 823 μm 。在低加氧浓度工况下,流型处于雾状流,气相通量较低,受气泡间碰撞与聚并概率较低的限制,粒径分布集中。随着加氧质量浓度持续增加,气相通量上升,气液界面扰动加剧,液相剪切力与局部湍流强度同步增强,导致微气泡的碰撞频率显著提高,造成较大的气泡粒径出现。

3.2.2 注液流量对微气泡粒径的影响

固定进气流量 $Q_g = 0.5 \text{ L}/\text{min}$ 不变,调节注液流量为 0.5、0.8、1.0、1.2、1.5、1.8、2.0 m^3/h 。注液流量对微气泡粒径的影响见图 8。随着注液流量增加,各工况下微气泡中位粒径均随之减小,当注液流量为 0.5 m^3/h 时,微气泡中位粒径为 945 μm ;当注液流量提升至 2 m^3/h 时,微气泡中位粒径降至 412 μm 。

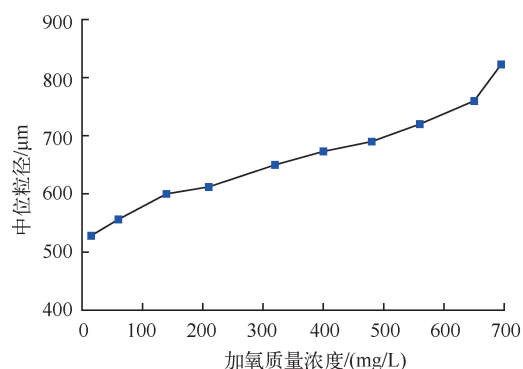


图7 加氧质量浓度对微气泡粒径的影响

Fig. 7 Effect of oxygen mass concentration on microbubble diameter

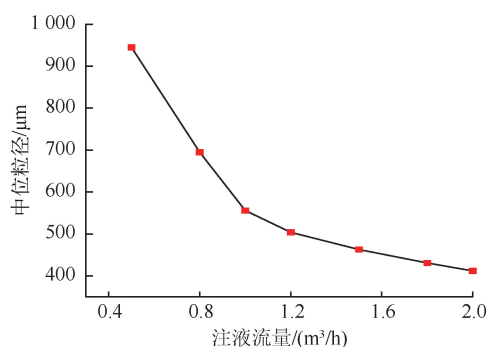


图8 注液流量对微气泡粒径的影响

Fig. 8 Effect of water flow rate on microbubble diameter

该现象可归因于液相剪切力与气泡分散能力的增强。随着注液流量增加,液相流速上升,系统雷诺数提高,剪切应力显著增强,从而有效破坏了气泡的聚并过程,抑制微气泡的合并。同时,更高的液相体积流量增强了气泡在流场中的分散性,使气泡间平均距离增大,碰撞概率降低,不利于聚并发生。此外,注液流量增加还导致气泡在流道中停留时间缩短,进一步限制气泡聚并的持续时间。因此,当现场进气流量受限,可通过“变流量注液-恒定注气”策略,间断性或持续性地提高注液流量,以维持流型稳定,避免气堵问题的发生。

4 结论

1) 基于粒子阴影测速法(PSV)与多阶段图像处理技术,实现了微气泡粒径、分布的原位识别,为气泡尺度演化与聚并行为研究提供了方法抓手。

2) 对于静态混合器设备,加氧浓度与注液流量是调控微气泡粒径与气液流型的关键参数,随着加氧浓度升高,微气泡聚并概率增加,流型从雾状流、泡状流、过渡流转变为弹状流。

3) 弹状流是地浸采铀注氧作业须规避的高风险流型。其特征为周期性气泡聚并-溃散,直接引发间歇性流动中断。因此,静态混合器的结构优化应以“抑制聚并、延缓流型恶化”为目标,通过调控剪切场分布与气泡停留时间,构建稳定的泡状流及过渡流的安全运行窗口,为地浸采铀系统实现高效、连续、稳定运行提供关键保障。

参考文献:

- [1] 苏学斌,原渊,贾秀敏,等.我国铀水冶技术现状与展望[J].核化学与放射化学,2025,47(4):313-326.
SU Xuebin, YUAN Yuan, JIA Xiumin, et al. Review and prospect of uranium hydrometallurgy in China [J]. Journal of Nuclear and Radiochemistry, 2025, 47(4):313-326.
- [2] 牛学军,谭亚辉,苏艳茹,等.我国铀矿采冶技术发展方向和重点任务[J].铀矿冶,2013,32(1):22-26.
NIU Xuejun, TAN Yahui, SU Yanru, et al. Development direction and key task of uranium mining and metallurgy techniques in China [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2013, 32(1):22-26.
- [3] 苏学斌,杜志明.我国地浸采铀工艺技术发展现状与展望[J].中国矿业,2012,21(9):79-83.
SU Xuebin, DU Zhiming. Development and prospect of China uranium in-situ leaching technology [J]. China Mining Magazine, 2012, 21(9):79-83.
- [4] 王如意,王菁,李鹏,等.CO₂+O₂浸出工艺溶浸通道堵塞控制措施探究[J].有色金属(矿山部分),2022,74(3):59-64.
WANG Ruyi, WANG Jing, LI Peng, et al. Soluble immersion channel blocking control measures in CO₂+O₂ leaching process [J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2022, 74(3):59-64.
- [5] 闫纪帆,张渤,刘佳斌,等.某CO₂+O₂地浸采铀矿山采区浸出效果研究[J].铀矿冶,2020,39(3):185-190.
YAN Jifan, ZHANG Bo, LIU Jiabin, et al. Study on leaching effect of in-situ leaching uranium mine by CO₂+O₂ [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2020, 39(3):185-190.
- [6] 廖文胜,王立民.地浸采铀过程中抽注液量影响因素分析[J].铀矿冶,2022,41(2):104-110.
LIAO Wensheng, WANG Limin. Impact factors of production capacity during in-situ leaching uranium [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2022, 41(2):104-110.
- [7] 原渊,江国平,廖天伟,等.地浸采铀碳酸钙结垢主要影响因素研究[J].中国矿业,2019,28(11):128-130.
YUAN Yuan, JIANG Guoping, LIAO Tianwei, et al. Research on main influence factors on calcium carbonate scaling of in-situ leaching process [J]. China Mining Magazine, 2019, 28(11):128-130.
- [8] 阙为民,王海峰,牛玉清,等.中国铀矿采冶技术发展展望[J].中国工程科学,2008,10(3):44-53.
QUE Weimin, WANG Haifeng, NIU Yuqing, et al. Development and prospect of China uranium mining and metallurgy [J]. Strategic Study of CAE, 2008, 10(3):44-53.
- [9] 杜志明,牛学军,苏学斌,等.内蒙古某铀矿床CO₂+O₂地浸采铀工业性试验[J].铀矿冶,2013,32(1):1-4.
DU Zhiming, NIU Xuejun, SU Xuebin, et al. CO₂+O₂ in-situ leaching test of one uranium deposit in Inner Mongolia [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2013, 32(1):1-4.
- [10] 赵生祥,曹俊鹏,阮志龙,等.某地浸采铀矿山低流量钻孔O₂加注方式优化[J].铀矿冶,2021,40(1):31-34.
ZHAO Shengxiang, CAO Junpeng, RUAN Zhilong,

- et al. Optimization of oxygen injection method for low-flow borehole in leaching uranium mine[J]. *Uranium Mining and Metallurgy*, 2021, 40(1):31-34.
- [11] 任华平,柯平超,师振峰,等.微纳米溶氧技术在地浸采铀中的应用研究[J]. *铀矿冶*, 2026, 45(1):68-75.
- REN Huaping, KE Pingchao, SHI Zhenfeng, et al. Application research of micro-nano dissolved oxygen technology in in-situ leaching uranium mining[J]. *Uranium Mining and Metallurgy*, 2026, 45(1):68-75.
- [12] LU J C, TRYGGVASON G. Dynamics of nearly spherical bubbles in a turbulent channel upflow[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2013, 732:166-189.
- [13] ASGHAR F,周义朋,孙占学,等.新疆蒙其古尔矿床铀矿石 $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ 中性浸出试验[J]. *有色金属(冶炼部分)*, 2021(8):46-55.
- ASGHAR F, ZHOU Yipeng, SUN Zhanxue, et al. $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ neutral leaching experiment of uranium ore from Mengqiguer deposit in Xinjiang[J]. *Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy)*, 2021(8):46-55.
- [14] 牛庆合,何佳彬,王伟,等.基于渗流-化学-应力多场耦合的砂岩型铀矿 $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ 地浸开采的数值模拟[J]. *有色金属(冶炼部分)*, 2023(6):144-152.
- NIU Qinghe, HE Jiabin, WANG Wei, et al. Numerical simulation of $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ in-situ leaching of sandstone type uranium deposit based on multifield coupling of seepage-chemistry-stress[J]. *Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy)*, 2023(6):144-152.
- [15] 王飞. $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ 浸出工艺氧气加入及计量技术的研究与应用[J]. *中国矿业*, 2023, 32(2):150-156.
- WANG Fei. Research and application of oxygen addition and metering technology in $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ leaching process[J]. *China Mining Magazine*, 2023, 32(2):150-156.
- [16] 向勇,谢若男,张宇航,等.基于CFD模拟的掺氢天然气静态混合器混合规律研究[J]. *低碳化学与化工*, 2025, 50(9):91-99.
- XIANG Yong, XIE Ruonan, ZHANG Yuhang, et al. Study on mixing regularity of hydrogen-blended natural gas static mixer based on CFD simulation[J]. *Low-carbon Chemistry and Chemical Engineering*, 2025, 50(9):91-99.
- [17] 王修纲,郭瓦力,吴剑华.静态混合器中液液分散的实验及CFD模拟[J]. *化工学报*, 2012, 63(3):767-774.
- WANG Xiugang, GUO Wali, WU Jianhua. Experimental and numerical study on liquid-liquid dispersion in static mixer[J]. *CIESC Journal*, 2012, 63(3):767-774.
- [18] 龚斌,包忠平,张春梅,等.混合元件数对SK型静态混合器流场特性的影响[J]. *化工学报*, 2009, 60(8):1974-1980.
- GONG Bin, BAO Zhongping, ZHANG Chunmei, et al. Effect of number of mixing elements on flow field in kenics static mixer[J]. *CIESC Journal*, 2009, 60(8):1974-1980.
- [19] GONZALEZ R C, WOODS R E. Digital image processing[M]. 4th ed. London:Pearson, 2018.

Bubble Behavior and Flow Pattern Evolution of Oxygen Injection in In-situ Leaching Uranium: A Case Study of Static Mixers

DANG Junjie, CAO Mingqian, WANG Ya'an, YUAN Yuan

(China Nuclear Mining Science and Technology Corporation, CNNC, Beijing 101149, China)

Abstract: In the oxygen injection process of “CO₂ + O₂” in-situ leaching uranium, oxygen is prone to bubble coalescence and flow regime deterioration during long distance transportation, which in turn induces gas blockage, resulting in intermittent liquid injection, and decrease in leaching efficiency. To reveal the mechanism by which bubble size evolution regulates flow stability, this study designed a visualization experimental system for static mixers used in in-situ leaching uranium. Particle shadow velocimetry (PSV) was employed in combination with multi-stage image processing techniques—including Gaussian filtering, adaptive threshold segmentation, and morphological reconstruction. To achieve high resolution in-situ observation of micro bubble size, distribution and dynamic behavior. The results show that as oxygen concentration increase from 15 mg/L to 700 mg/L, microbubble diameter(d_{50}) rise from 528 μm to 823 μm . Conversely, increasing water flow rate from 0.5 m³/h to 2.0 m³/h, microbubble diameter(d_{50}) reduce from 945 μm to 412 μm , indicating significantly enhance dispersion capability. With rising oxygen concentration, the flow patterns evolve sequentially from fog flow, through bubble flow and transition flow, to slug flow. In the slug flow pattern, the big bubbles periodically collapse, leading to frequent gas blockage issues on-site. This study demonstrates that the proposed image processing method provides highly reliable data for microbubble size distribution, coalescence frequency, and flow pattern identification, offering a solid foundation for process optimization and control of oxygen injection in in-situ leaching uranium.

Key words: in-situ leaching of uranium; oxygen injection; static mixers; gas-liquid two-phase flow; image processing; flow pattern evolution; bubble behavior