



## 加压搅拌浸出体系下氧气的气含率

田 磊, 刘 燕, 吕国志, 唐俊杰, 赵秋月, 张延安

(东北大学 多金属共生矿生态化冶金教育部重点实验室, 沈阳 110819)

**摘 要:** 硫化矿加压浸出体系的氧化过程主要在液相内进行, 氧气的气含率对气液固三相反应的最终效果和有价金属的提取率具有重要意义。本研究使用透明石英高压釜和高速照相机等设备, 在高温高压条件下, 研究推进式搅拌浆工作过程中气液两相混合状态和气泡在溶液中的行为规律。结果表明: 当搅拌速度从 400 r/min 上升到 550 r/min, 气含率从 0.137% 上升到 1.58%; 当温度从 363 K 增加到 423 K 时, 气含率从 1.22% 降低到 0.774%; 当氧分压从 0.2 MPa 增加至 0.8 MPa, 气含率从 0.997% 降低到 0.951%。最后, 通过对实验数据进行因次分析, 得出气含率的准数方程。

**关键词:** 硫化矿; 加压浸出; 气含率; 因次分析; 准数方程

文章编号: 1004-0609(2017)-03-0655-11

中图分类号: TF813

文献标志码: A

随着世界上有色金属产业的快速发展, 金属矿产资源消耗量也逐年增加, 目前高品位的金属资源已经供不应求, 所以一些国家不得不利用伴生资源及低品位资源进行有价金属的提炼<sup>[1-2]</sup>。而湿法冶金工艺技术特别适用于处理复杂的、共伴的和低品位的有色金属资源, 能够实现资源的综合利用。但是湿法冶金中的常压浸出过程大多是在室温或溶液沸点温度以下的条件下进行的, 浸出速率往往比较慢, 即需要较长的浸出时间, 且有价金属的浸出率偏低<sup>[3-5]</sup>。为了解决这一问题, 许多学者研究了加压浸出处理低品位矿石, 这种短流程、浸出强化、金属提取率高等特点的加压湿法冶金技术作为现代湿法冶金新兴发展的领域, 已广泛地应用于铜、锌、镍、钴、钨及多种稀贵金属提取冶金及材料制备等多个方面<sup>[6-7]</sup>。

加压浸出过程涉及气-液-固三相的反应, 属于复杂的三相浆态床体系, 相间的传质特性对于反应来说是一个非常重要的参数, 它控制着反应的速率, 直接影响反应时间与设备尺寸<sup>[8]</sup>。多相间的传质特性主要由受各相的分散状态以及体系的物性来决定, 对气体来说, 气体的分散和气含率直接关系到气体组分在液相中的传递速率和气泡对固体悬浮的影响; 固体颗粒的悬浮主要靠气体和液体的流动的影响, 气体分散均

匀与否和气含率的大小直接影响着反应器内液固相的分布; 液体的分散和气含率决定着反应器液体在径向和轴向上的浓度分布以及固体悬浮的程度<sup>[9]</sup>。因此, 为了进一步深入研究加压浸出过程中, 对相间的传质特性氧气气泡的行为规律的考察必不可少。

加压浸出体系中的氧化过程主要是在液相内进行的<sup>[10]</sup>。就此而言, 氧气的微细化程度和气含率以及氧气在液相中的溶解对氧化浸出过程十分重要。在加压反应的过程中, 气泡群的运动相当复杂, 气泡在开始上升过程中不断地凝联合并, 影响气泡大小及其分布的因素主要有压力、温度、表观气速、表观液速、表面张力、固体颗粒浓度等。增加压力会降低气泡的直径从而增加了小气泡的数量; 增加温度可以降低表面张力、液相的黏度和气泡的稳定性, 最终的结果是增加小气泡的数量; 增加表观气速会加剧气泡破碎, 也会增加小气泡的数量。离散的气泡有可能聚合成大的气泡或者大的气泡分解成离散的小气泡。气泡在液体中的微细化、分布和气含率决定了气-液-固三相间的接触程度, 进而决定了加压浸出过程中气-液-固三相反应的最终效果和有价金属的提取率<sup>[11]</sup>。因此, 研究气泡在液相中的行为规律有助于深入了解各种矿物加压浸出中现象的物理化学本质, 具有十分重要的理

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(50974035, 51074047, 51504058, 51504059); 国家自然科学基金云南联合重点基金资助项目(U1402271); 辽宁省教育厅科学技术研究项目(L2014096); 高等学校博士学科点专项科研基金课题(20120042110011); 中央高校基本科研业务费(N140204015, N130702001)

收稿日期: 2016-04-06; 修订日期: 2016-08-05

通信作者: 张延安, 教授, 博士; 电话: 024-83681563; E-mail: zta2000@163.net

论和实际意义<sup>[12]</sup>。

由于高压釜内压力和温度的限制以及搅拌的不稳定性所带来的困难,使得大多数学者<sup>[13-16]</sup>对于高温加压搅拌浸出体系下气泡在液体中的行为研究较少,仅限于无搅拌加压和常压搅拌条件下进行研究。LETZEL等<sup>[17]</sup>研究了高压对气液鼓泡塔均相泡状流动稳定性的影响。结果发现增加系统的压力,在不稳定点的气含率就会显著增加。刘燕等<sup>[18]</sup>分别讨论了中心和偏心搅拌模式下气体流量、搅拌转速等因素对局部气含率和平均气含率的影响,结果表明,中心双向搅拌和偏心单向搅拌均可显著提高气含率,且后者更有效。

在高压釜中模拟硫化矿精矿加压浸出条件下氧气气含率的研究没有报道。为找出高压釜内最佳气含率和气泡分布,从而解决高压釜加压浸出氧利用率低等问题,本文作者使用透明石英高压釜,在高温高压条件下,研究了氧气在加压浸出过程中的气含率和气泡在溶液中的行为规律。该研究有助于掌握加压浸出过程中氧气溶解调控机制,提高生产率和降低运行费用,从而指导加压浸出的生产操作。

## 1 实验

### 1.1 实验装置

本实验使用 BCFD 2-0.8 型透明石英反应釜进行水模实验研究,釜体透明,最大压力可达到 0.8 MPa,最高温度可达到 200 K,加热装置为循环油加热,透

明石英反应釜示意图见图 1。

本实验使用美国 DRS 公司生产的 LIGHT NING RDT 型高速摄像机进行气泡采集研究。图像采集卡:每秒 1000 帧,分辨率 1280×1024。图像处理机:普通 PC 机、Windows XP 操作系统。照明光源采用摄影专用卤钨灯,功率为 1300 W。使用生产过程中最常用的推进式搅拌桨。实验设备实物图如图 2 所示。

### 1.2 实验步骤

在水模试验时,先往石英反应釜中加入一定量的脱氧水,密封好釜体。然后开启循环油加热装置,根据研究需要设定加热温度,最后往水模系统充入一定量的氧气,并确保整个初始系统处于一个稳定的压力水平。通过改变温度、压力、搅拌转速及液体浓度等条件,使用高速摄像机拍照的方式,最后通过 Image-Pro-Plus 6.0 软件对拍摄图进行处理,研究了各个条件下石英反应釜内部气泡行为状态。

气含率( $\epsilon$ )的测定采用的是气泡平均总体积法-快速摄像技术,用高速摄像机对透明石英反应釜内部气泡分布进行连续高速拍照,用图像处理软件处理来获取同一截面的气泡个数,然后根据气泡的平均直径数据来求得气泡的平均总体积,从而获得气含率的平均值。即:

$$\epsilon = \frac{V_0}{V_1 + V_0} \quad (1)$$

式中:  $V_1$  为透明石英高压釜内的溶液体积, L;  $V_0$  为气泡的总体积, L。

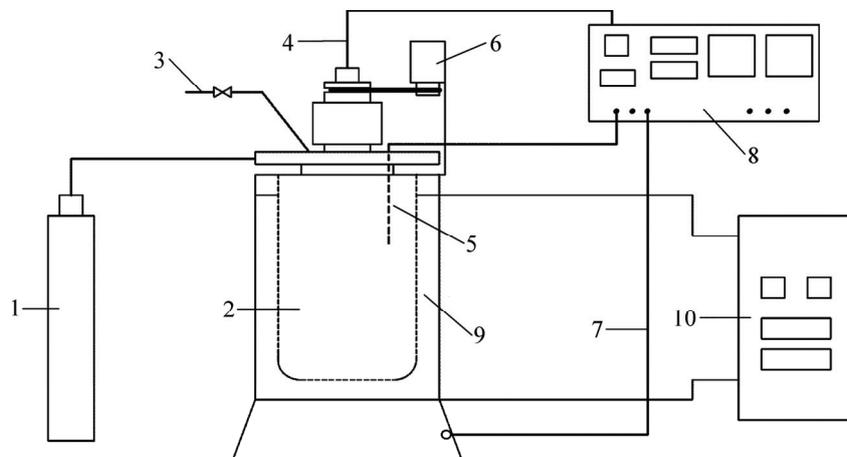


图 1 透明石英加压反应釜

Fig. 1 Transparent quartz autoclave: 1—Oxygen flask; 2—Quartz kettle body; 3—Discharging mouth; 4—Rotating speed measurement line; 5—Thermocouple; 6—Electric motor; 7—Heating wire; 8—Control cabinet; 9—Silicone oil; 10—Circulating oil bath heater



图 2 实验设备实物图

Fig. 2 Physical diagrams of experimental equipment: (a) Photo of high-speed photography; (b) Photo of floodlight; (c) Transparent quartz autoclave; (d) Three blades push type agitator

## 2 结果与讨论

### 2.1 搅拌转速对气含率的影响

考察了搅拌转速对石英透明釜内气泡总体积和气含率的影响, 实验条件为: 温度为 403 K, 总压为 0.6 MPa。用高速摄像机对实验现象进行连续拍摄, 不同条件下的静态气液混合图如图 3 所示。

对图 3 的静态图应用 Image-Pro-Plus 软件和 Origin 软件进行处理, 实验处理结果分别如图 4 和图 5 所示。

由图 4 可知, 搅拌速度对釜内气泡总体积的影响显著, 在同一温度和压力条件下, 搅拌转速越快, 石英透明釜内的气泡总体积越高。这是因为搅拌桨附近流体在叶轮的作用下作圆周运动, 所产生的离心力对

石英透明釜内部气体产生抽吸, 随着搅拌转速增加, 产生的抽吸力随之变大, 最终使得釜内气泡总体积增加。

由图 5 可见, 随搅拌转速由 400 r/min 提高至 550 r/min, 气含率不断增大, 由 0.137% 增大至 1.58%。

### 2.2 温度对气含率的影响

在不同温度条件下, 脱氧水具有不同的蒸气压值。为在设定氧分压条件下得到温度影响气含率规律的正确信息, 首先测定了不同温度条件下 1.0 L 的脱氧水在石英透明釜内的蒸气压。在对脱氧水蒸气压测定基础上, 进一步在氧分压 0.6 MPa, 搅拌速度 500 r/min 条件下, 考察了温度对石英透明釜内气泡总体积和气含率的影响, 用高速摄像机对实验现象进行连续拍摄, 不同条件下的静态气液混合图如图 6 所示。

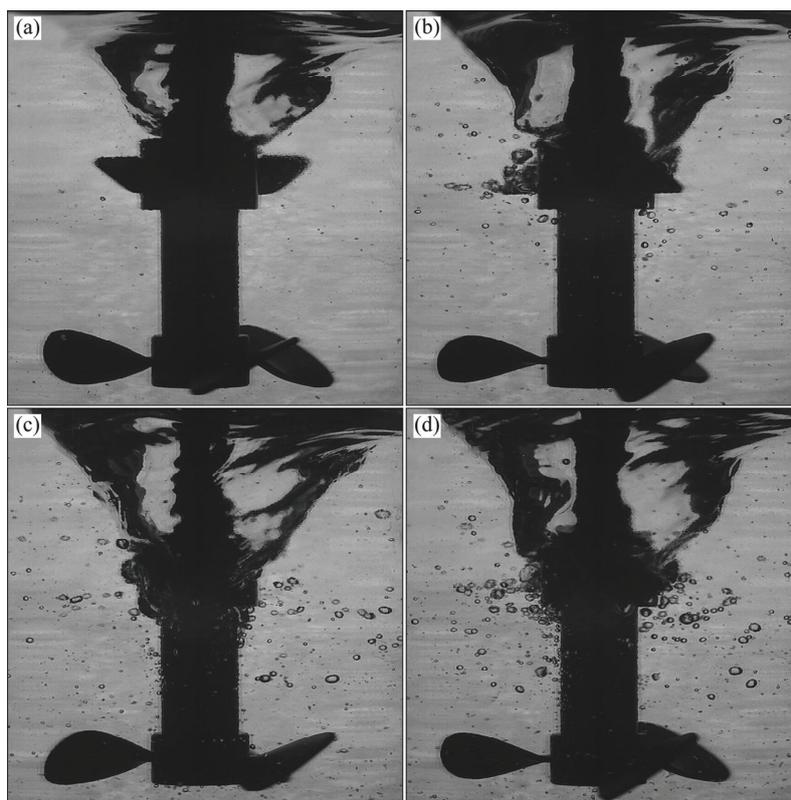


图3 搅拌速度对气含率的影响的静态图

Fig. 3 Photos of static phenomenon at different agitation rates: (a) 400 r/min; (b) 450 r/min; (c) 500 r/min; (d) 550 r/min

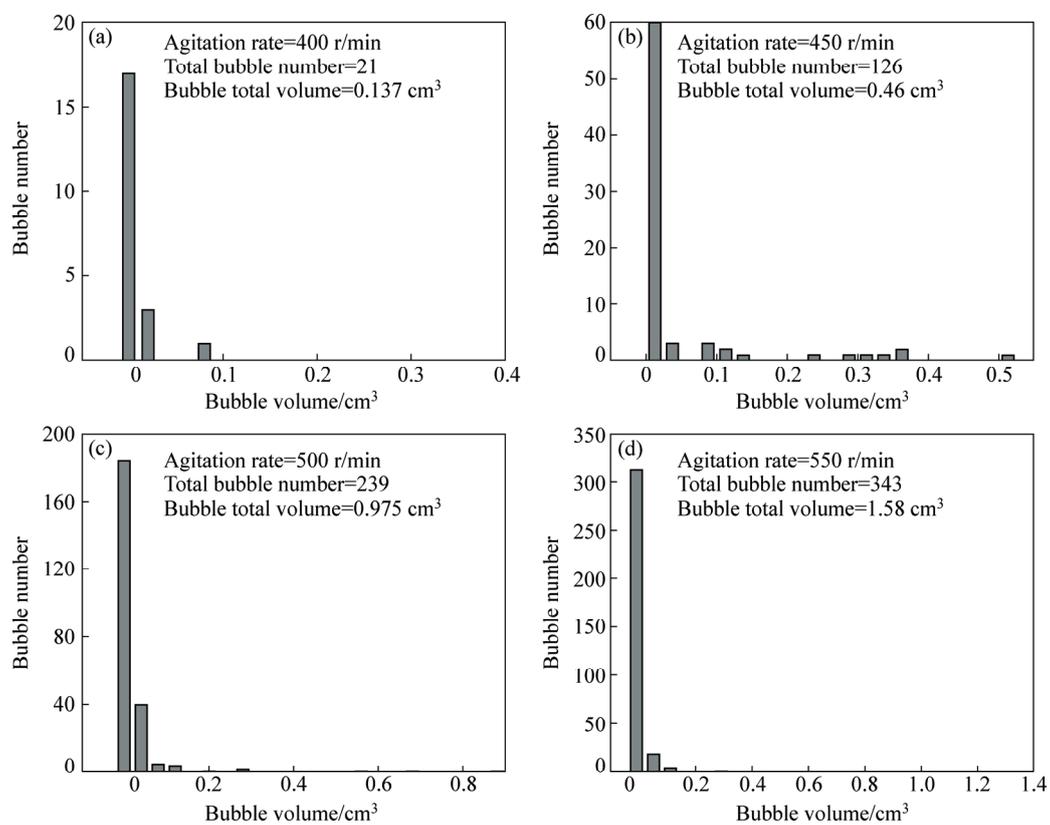


图4 搅拌速度对气泡总体积的影响

Fig. 4 Effect of agitation rate on total volume of bubbles: (a) 400 r/min; (b) 450 r/min; (c) 500 r/min; (d) 550 r/min

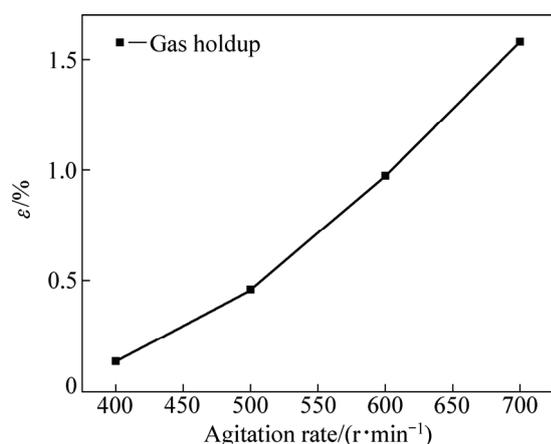


图 5 搅拌速度对气含率的影响

Fig. 5 Effect of agitation rate on gas holdup

对图 6 的静态图应用 Image-Pro-Plus 软件和 Origin 软件进行处理, 实验处理结果分别如图 7 和图 8 所示。

由图 8 可知, 在同一搅拌转速和氧分压条件下, 随着温度的升高, 石英透明釜内的气泡总体积也逐步降低, 由于温度升高, 会使溶液的黏度减小, 从而削弱搅拌桨叶轮的抽吸作用, 最终使得釜内气泡总体积

降低。

由图 8 可见, 随温度由 363 K 提高至 423 K, 气含率不断减小, 由 1.22% 降低至 0.774%。

### 2.3 氧气分压对气含率的影响

针对于实际的工业过程中, 很多都是在高压下进行, 压力是影响体系流体力学非常重要的因素之一。因此, 在温度为 383 K、搅拌速度为 500 r/min 的条件下, 考察氧气分压对石英透明釜内气泡总体积和气含率的影响。用高速摄像机对实验现象进行连续拍摄, 不同条件下的静态气液混合图如图 8 所示。

对图 9 的静态图应用 Image-Pro-Plus 软件和 Origin 软件进行处理, 实验处理结果分别如图 10 和图 11 所示。

由图 10 可知, 在同一搅拌转速和温度条件下, 随着氧分压的增加, 石英透明釜内的气泡总体积也基本不变。进一步观察图 9 中的气泡发现, 压力越小, 细小的气泡越多。这可能由于压力改变了气相密度, 增加了气液接触的动量和降低气泡稳定性, 改变了气泡间的聚并和破裂平衡, 从而影响了气泡微细化程度, 但对气含率的影响不大。

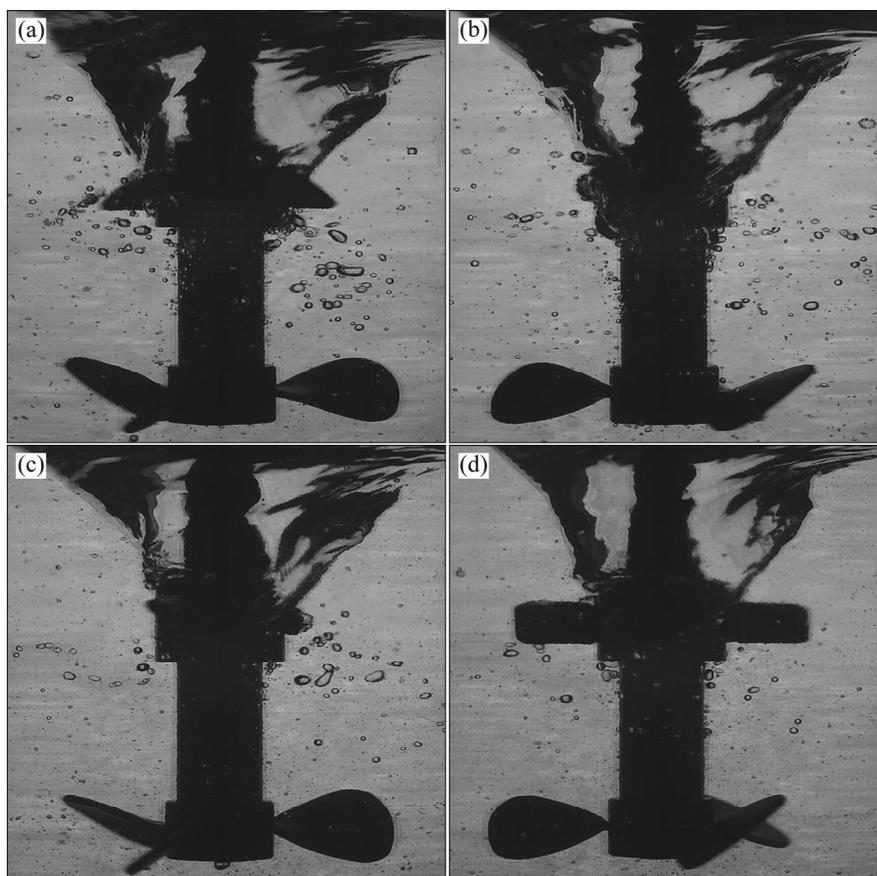


图 6 温度对气含率影响的静态图

Fig. 6 Photos of static phenomenon at different temperatures: (a) 363 K; (b) 383 K; (c) 403 K; (d) 423 K

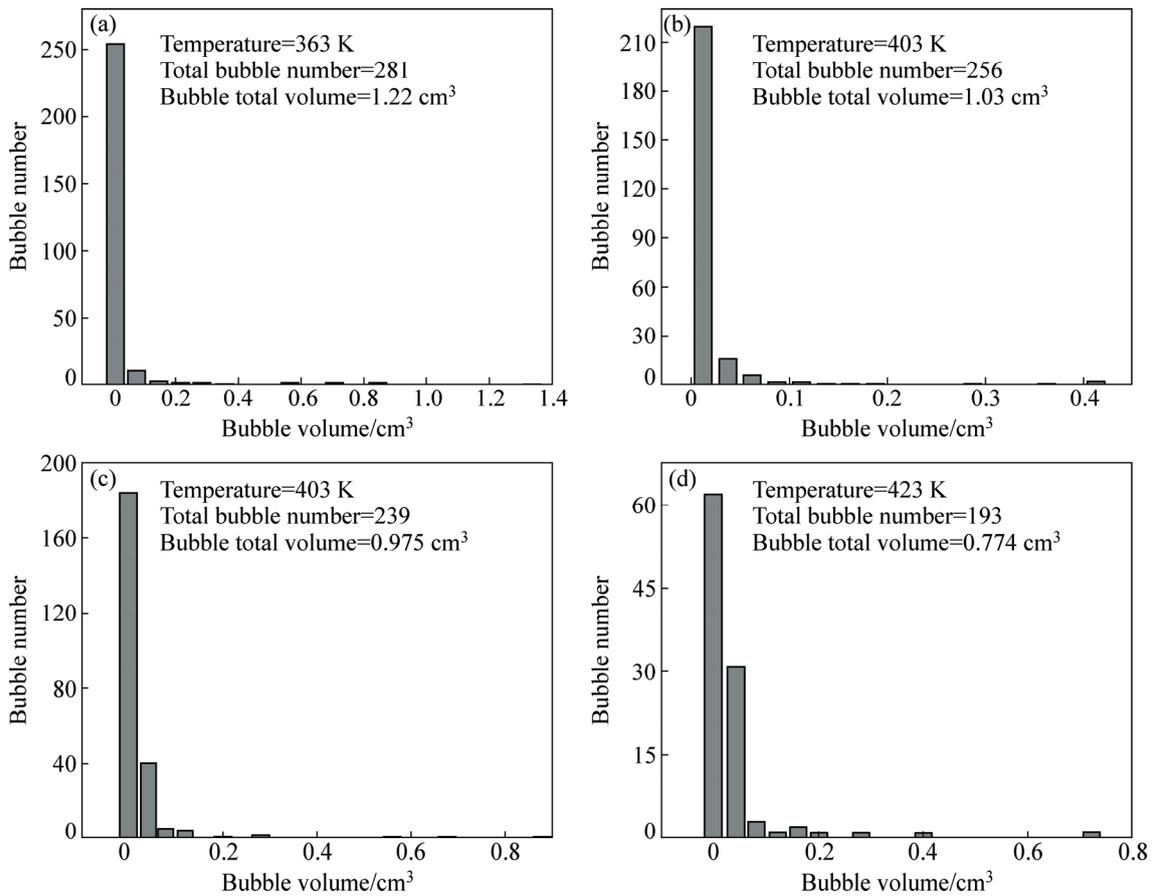


图7 温度对气泡总体积的影响

Fig. 7 Effect of temperature on total volume of bubbles: (a) 363 K; (b) 383 K; (c) 403 K; (d) 423 K

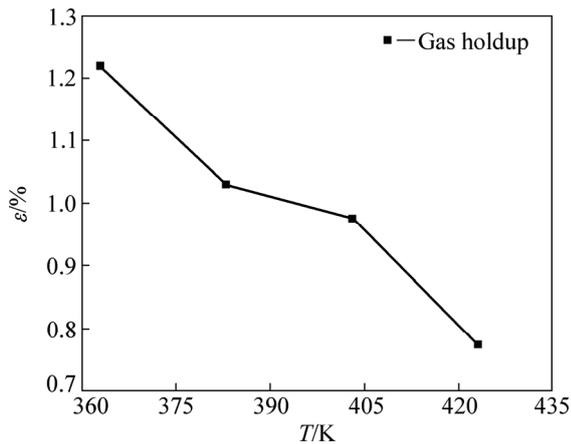


图8 温度对气含率的影响

Fig. 8 Effect of temperature on gas holdup

由图 11 可见, 随氧分压由 0.2 MPa 提高至 0.8 MPa, 气含率变化不大, 由 0.997 降低至 0.951%。

## 2.4 建立气含率数学模型

结合上述实验结果可知, 石英透明釜内气含率  $\varepsilon$

的大小主要受以下因素的影响:

1) 气含率  $\varepsilon$  随着搅拌速度  $n$  的增加而增加, 即  $\varepsilon \propto n^a$ ;

2) 气含率  $\varepsilon$  随着温度  $T$  的增加而增大, 可以写成  $\varepsilon \propto T^b$ ;

3) 气含率  $\varepsilon$  随着氧分压  $P_g$  的增加而增大, 可以写成  $\varepsilon \propto P_g^c$ ;

4) 总结前人对气泡的研究还发现, 气含率和釜内直径  $d$ 、液面高度  $H$ 、气体密度  $\rho_g$ 、气体黏度  $\mu_g$ 、气液表面张力  $\sigma_{g-l}$ 、液体密度  $\rho_l$  和液体黏度  $\mu_l$  等因素有关, 但它们在本实验中为定值, 所以不再讨论。

为了将热力学温度  $T$  转化到  $L$ - $M$ - $T$  量纲系统中, 需要将热力学温度转换为统计力学温度  $\beta$ 。根据  $\beta$  的定义式可知其量纲为能量量纲的倒数, 即:

$$[\beta] = M^{-1} L^{-2} T^2 \quad (2)$$

式中:  $M$  为质量的量纲, 单位 kg;  $L$  为长度的量纲, 单位 m;  $T$  为时间的量纲, 单位 s。

因此, 如果采用统计热力学温度来描述物体的冷

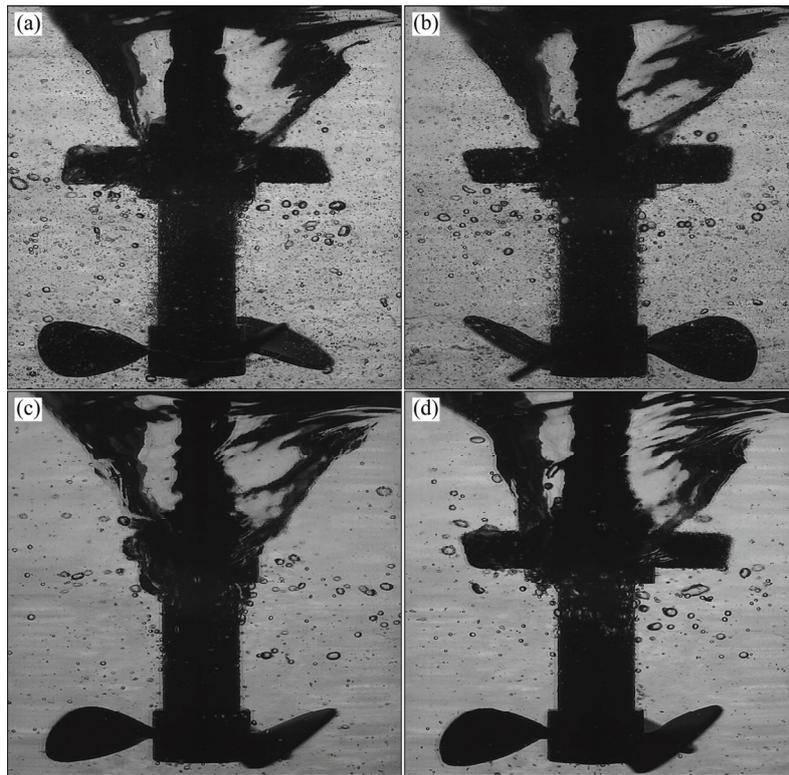


图 9 氧分压对气含率的影响的静态图

Fig. 9 Photos of static phenomenon at different oxygen partial pressures: (a) 0.2 MPa; (b) 0.4 MPa; (c) 0.6 MPa; (d) 0.8 MPa

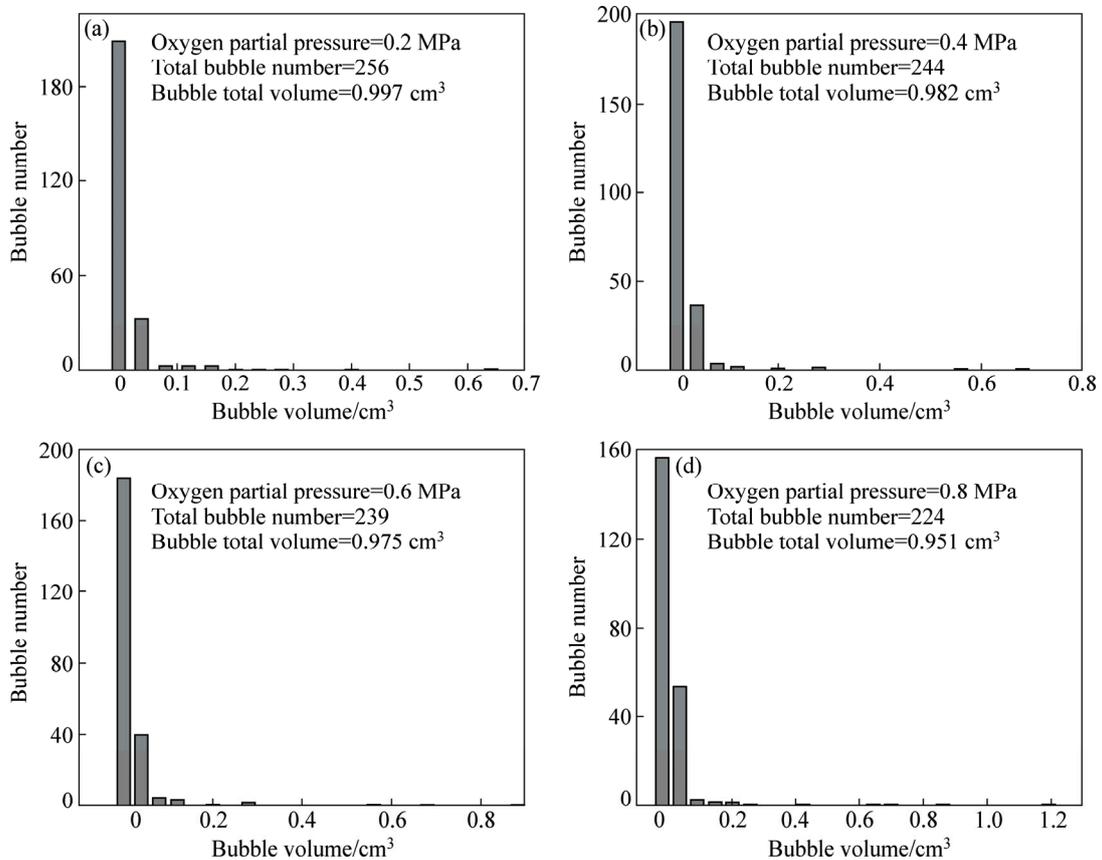


图 10 氧分压对气泡总体积的影响

Fig. 10 Effect of oxygen partial pressure on total volume of bubbles: (a) 0.2 MPa; (b) 0.4 MPa; (c) 0.6 MPa; (d) 0.8 MPa

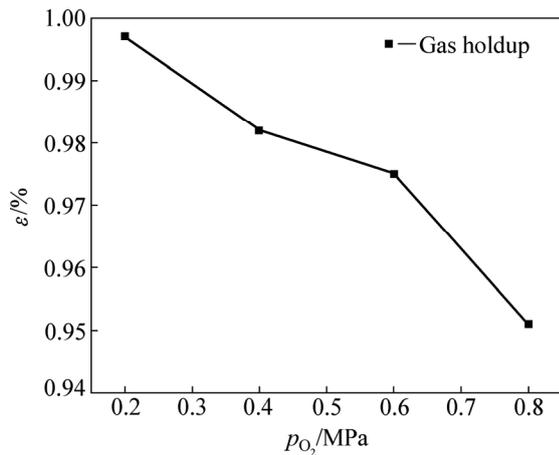


图 11 氧分压对气含率的影响

Fig. 11 Effect of oxygen partial pressure on gas holdup

热程度, 那么其量纲就可以由  $M$ 、 $L$  和  $T$  导出。统计热力学温度  $\beta$  与热力学温度的关系可以用式(4)表示:

$$\beta^{-1} = KT \quad (3)$$

式中:  $K$  为玻尔兹曼常数,  $K=1.3806505 \times 10^{-23}$  J/K。

由以上分析, 利用因次分析法, 可以得出一般的函数形式为

$$\varepsilon = f(n, \beta, P_g, d, H, \rho_g, \mu_g, \sigma_{g-1}, \rho_l, \mu_l) \quad (4)$$

或

$$f(\varepsilon, n, \beta, P_g, d, H, \rho_g, \mu_g, \sigma_{g-1}, \rho_l, \mu_l) = 0 \quad (5)$$

诸变量的因次见表 1。

表 1 变量量纲表

Table 1 Dimension of variable

	$\varepsilon$	$n$	$\beta$	$P_g$	$d$	$H$	$\rho_g$	$\mu_g$	$\sigma_{g-1}$	$\rho_l$	$\mu_l$
$M$	0	0	-1	1	0	0	1	1	1	1	1
$L$	0	0	-2	-1	1	1	-3	-1	0	-3	-1
$T$	0	-1	2	-2	0	0	0	-1	-2	0	-1

由  $\pi$  定理的分析原理可以知道, 总变量数  $n=11$ , 独立变量数  $k=3$ , 可建立  $n-k=8$  个无量纲组合量。选取  $d$ 、 $\rho_l$ 、 $\mu_l$  为独立变量, 此外  $\varepsilon$  为无量纲的量, 可直接表示, 经过分析可得, 各个无量纲的  $\Pi$  分别表示为

$$\Pi_0 = \varepsilon \quad (6)$$

$$\Pi_1 = \frac{n}{d^{-2} \rho_l^{-1} \mu_l} \quad (7)$$

$$\Pi_2 = \frac{\beta}{d^{-1} \rho_l \mu_l^{-2}} \quad (8)$$

$$\Pi_3 = \frac{P_g}{d^{-2} \rho_l^{-1} \mu_l^2} \quad (9)$$

$$\Pi_4 = \frac{H}{d} \quad (10)$$

$$\Pi_5 = \frac{\mu_g}{\mu_l} \quad (11)$$

$$\Pi_6 = \frac{\sigma_{g-1}}{d^{-1} \rho_l^{-1} \mu_l^2} \quad (12)$$

$$\Pi_7 = \frac{\rho_g}{\rho_l} \quad (13)$$

根据本实验的具体情况,  $d$ 、 $H$ 、 $\rho_g$ 、 $\mu_g$ 、 $\sigma_{g-1}$ 、 $\rho_l$ 、 $\mu_l$  都是定值, 于是可以得到:

$$f(\varepsilon, \frac{n}{d^{-2} \rho_l^{-1} \mu_l}, \frac{\beta}{d^{-1} \rho_l \mu_l^{-2}}, \frac{P_g}{d^{-2} \rho_l^{-1} \mu_l^2}) = 0 \quad (14)$$

为了得到  $\varepsilon$  的表达式, 还可以表示为显函数的形式:

$$\varepsilon = f_1(\frac{n}{d^{-2} \rho_l^{-1} \mu_l}, \frac{\beta}{d^{-1} \rho_l \mu_l^{-2}}, \frac{P_g}{d^{-2} \rho_l^{-1} \mu_l^2}) \quad (15)$$

因为准数关系式一般可以整理成幂函数的形式表述, 所以经验准则公式为

$$\varepsilon = k(\frac{n}{d^{-2} \rho_l^{-1} \mu_l})^a (\frac{\beta}{d^{-1} \rho_l \mu_l^{-2}})^b (\frac{P_g}{d^{-2} \rho_l^{-1} \mu_l^2})^c \quad (16)$$

式中:  $k$ 、 $a$ 、 $b$ 、 $c$  为待定系数。

对上式方程两边分别去对数可得

$$\ln \varepsilon = \ln k + a \ln(\frac{n}{d^{-2} \rho_l^{-1} \mu_l}) + b \ln(\frac{\beta}{d^{-1} \rho_l \mu_l^{-2}}) + c \ln(\frac{P_g}{d^{-2} \rho_l^{-1} \mu_l^2}) \quad (17)$$

将本实验中的定值  $d=0.1\text{m}$ ,  $\rho_l=1.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ,  $\mu_l=1.0050 \times 10^{-3} \text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$  代入式(17)中进行整理。基于整理后得到的线性关系, 将实验过程中得到的数据(见表 2)进行拟合, 拟合结果见图 12。

由图 12 中拟合所得到的斜率可以求得拟合系数:  $a=7.68$ ,  $b=2.82$ ,  $c=-0.031$ 。所以可以将式(16)简化为

$$\varepsilon = k_1 n^{7.68} \beta^{2.82} P_g^{-0.031} \quad (18)$$

$\varepsilon$  和  $n^{7.68} \beta^{2.82} P_g^{-0.031}$  之间的关系由图 13 得出。虽然数据点在图中表现出一定的分散性, 直线拟合的相关系数超过 0.989。因此, 从图 13 可以得到,  $k_1$  的值

为  $7.34 \times 10^{-65}$ 。

将统计热力学温度  $\beta$  换算为热力学温度后, 即可得到气含率  $\varepsilon$  与反应条件之间的经验公式:

$$\varepsilon = 13.2n^{7.68}T^{-2.82}P_g^{-0.031} \quad (19)$$

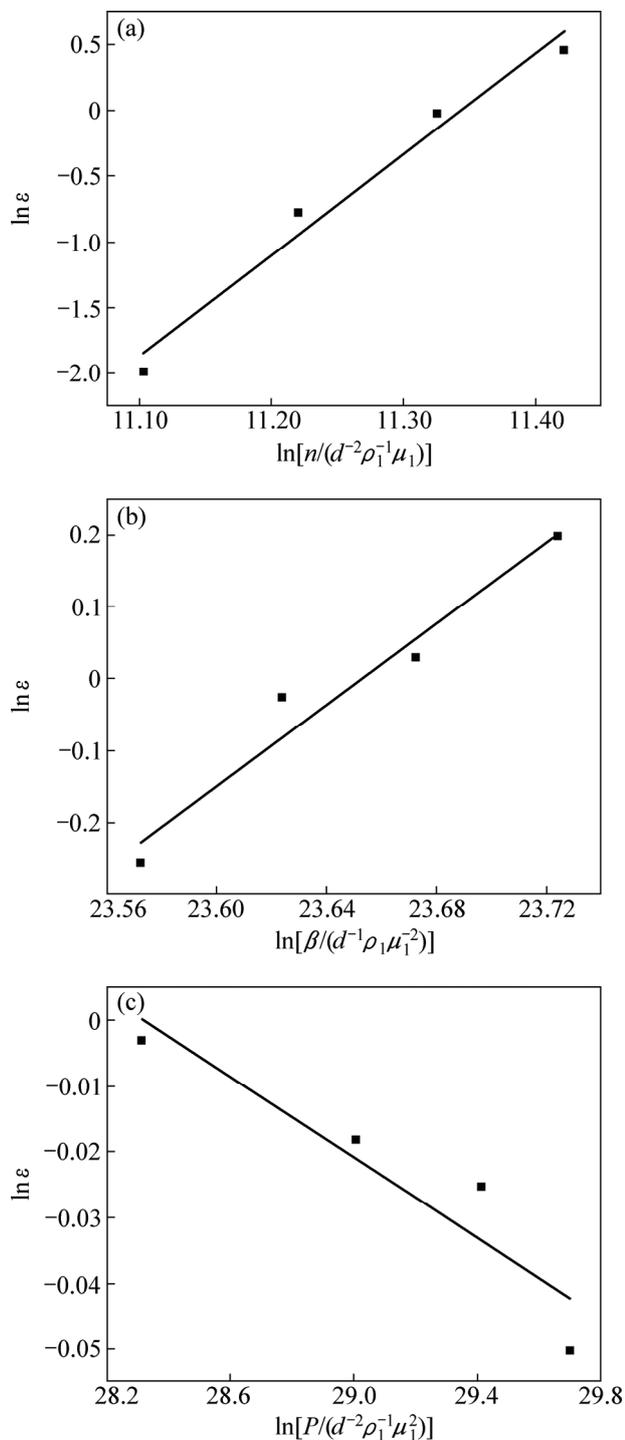


图 12  $\ln \varepsilon$  和  $\ln(n/d^2\rho_1^{-1}\mu_1)$ 、 $\ln(\beta/d^{-1}\rho_1\mu_1^2)$ 、 $\ln(P_g/d^2\rho_1^{-1}\mu_1^2)$  之间的线性关系  
 Fig. 12 Relationships between  $\ln \varepsilon$  and  $\ln(n/d^2\rho_1^{-1}\mu_1)$  (a),  $\ln(\beta/d^{-1}\rho_1\mu_1^2)$  (b),  $\ln(P_g/d^2\rho_1^{-1}\mu_1^2)$  (c)

表 2 实验数据

Table 2 Experimental data

$\varepsilon/\%$	$n/(\text{r}\cdot\text{s}^{-1})$	$\beta/(\text{kg}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^2)$	$P_g/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-2})$
0.137	6.67	$1.8 \times 10^{20}$	$6 \times 10^5$
0.46	7.5	$1.8 \times 10^{20}$	$6 \times 10^5$
0.975	8.33	$1.8 \times 10^{20}$	$6 \times 10^5$
1.58	9.17	$1.8 \times 10^{20}$	$6 \times 10^5$
1.22	8.33	$1.99 \times 10^{20}$	$6 \times 10^5$
1.03	8.33	$1.89 \times 10^{20}$	$6 \times 10^5$
0.774	8.33	$1.71 \times 10^{20}$	$6 \times 10^5$
0.997	8.33	$1.8 \times 10^{20}$	$2 \times 10^5$
0.982	8.33	$1.8 \times 10^{20}$	$4 \times 10^5$
0.951	8.33	$1.8 \times 10^{20}$	$8 \times 10^5$

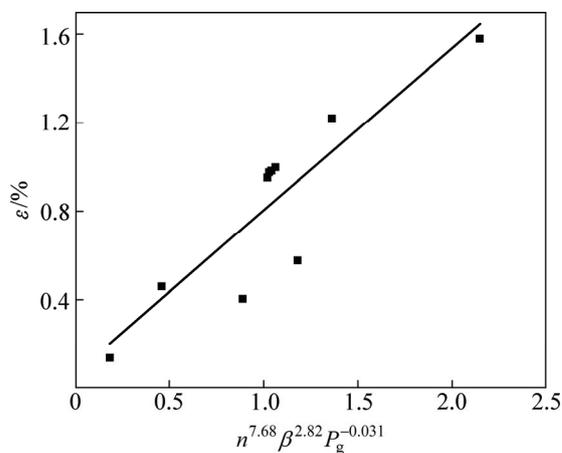


图 13  $\varepsilon$  和  $n^{7.68}\beta^{2.82}P_g^{-0.031}$  之间的线性关系  
 Fig. 13 Relationship between  $\varepsilon$  and  $n^{7.68}\beta^{2.82}P_g^{-0.031}$

### 3 结论

1) 在温度为 403 K, 氧分压为 0.6 MPa 的实验条件下, 当搅拌速度从 400 r/min 上升到 700 r/min 时, 气含率从 0.137% 上升到 1.58%。

2) 在搅拌速度为 600 r/min, 氧分压为 0.6 MPa 的实验条件下, 当温度从 333 K 提高到 423 K 时, 气含率从 1.22% 降低到 0.774%, 这是由于温度的升高, 会使溶液的黏度减小, 从而削弱搅拌桨叶轮的抽吸作用, 最终使得釜内氧气气含率降低。

3) 在搅拌速度为 600 r/min, 温度为 403 K 的实验条件下, 当氧分压从 0.2 MPa 增加至 0.8 MPa, 气含率从 0.997% 降低到 0.951%。结果表明, 氧分压的增加对氧气在水溶液中的气含率影响不大。

4) 按均相原理和布金汉定理建立相似准则的关系, 然后根据实验数据和相似理论, 用数学方法推导

出了气含率的经验公式。确定式其标准方程:

$$\varepsilon = 13.2n^{7.68}T^{-2.82}P_g^{-0.031}$$

## REFERENCES

- [1] PARKER R H. An introduction to chemical metallurgy[M]. Oxford: Pergamon Press Ltd, 1978: 263-318.
- [2] 王吉坤, 周廷熙. 硫化锌精矿加压酸浸技术及产业化[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2005.  
WANG Ji-kun, ZHOU Ting-xi. Zinc sulfide concentrate pressure acid leaching technology and Industrialization[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2005.
- [3] 邱竹贤. 冶金学(有色金属冶金)[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 2001: 216-218.  
QIU Zhu-xian. Metallurgy (Non-ferrous metallurgy)[M]. Shenyang: Northeastern University Press, 2001: 216-218.
- [4] COOPER W E. Hydrometallurgy: Theory and practice[M]. Amsterdam: Elsevier, 1992: 12-16.
- [5] 马荣俊. 湿法冶金的新发展[J]. 湿法冶金, 2007, 26(1): 1-12.  
MA Rong-jun. New development of hydrometallurgy[J]. Hydrometallurgy of China, 2007, 26(1): 1-12.
- [6] HABOXI F. Pressure hydrometallurgy[J]. Metallic Ore Dressing Abroad, 2006, 43(11): 152-159.
- [7] 冯雅丽, 蔡震雷, 李浩然, 汪平, 刘欣伟, 杨志超. 循环流态化焙烧-加压浸出从极难浸石煤中提取钒[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(7): 2052-2060.  
FENG Ya-li, CAI Zhen-lei, LI Hao-ran, WANG Ping, LIU Xin-wei, YANG Zhi-chao. Extraction of Vanadium from hardest refractory stone coal using recirculating fluidized roasting and pressure leaching technology[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2007, 2012, 22(7): 2052-2060.
- [8] 谢克强, 杨显万, 王吉坤. 高铁闪锌矿精矿加压浸出的动力学研究[J]. 中国有色金属学报, 2007, 17(1): 187-194.  
XIE Ke-qiang, YANG Xian-wan, WANG Ji-kun. Kinetic study on pressure leaching of high iron sphalerite concentrate[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2007, 17(1): 187-194.
- [9] BUBAN K R, COLLINS M J, MASTERS I M. Comparison of direct pressure leaching with atmospheric leaching of zinc concentrates[C]//DUTRIZAE J E. Lead-Zinc Pittsburg, USA: TMS (The Minerals, Metals & Materials Society), 2000: 727-738.
- [10] PARKER E G. Oxidative pressure leaching of zinc concentrates[J]. CIM Bulletin, 1987, 74(829): 145-150.
- [11] TIAN Lei, LIU Yan, ZHANG Ting-an, LÜ Guo-zhi, ZHOU Shuang, ZHANG Guo-quan. Kinetics of indium dissolution from marmatite with high indium content in pressure acid leaching[J]. Rare Metals, 2017, 36(1): 69-76.
- [12] GADALLAH A H, SIDDIQUIB K. Bubble breakup in co-current upward flowing liquid using honeycomb monolith breaker[J]. Chemical Engineering Science, 2015, 131: 22-40.
- [13] 彭小奇, 陈思超, 宋彦坡, 刘涛. 悬浮流中浮升气泡运动的数值模拟[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(11): 3232-3241.  
PENG Xiao-qi, CHEN Si-chao, SONG Yan-po, LIU Tao. Numerical simulation of flotation bubble motion in suspension fluid[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(11): 3232-3241.
- [14] LIU Yan, ZHANG Ting-an, MASAMICHI S, WANG Qian, REN Xiao-don, HE Ji-cheng. Mechanical stirring for highly efficient gas injection refining[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2011, 21(8): 1896-1904.
- [15] FUKUSHI K, IGUCHI M. Wettability effect on a single bubble rising instagnant water contained in a vertical circular pipe[J]. ISIJ International, 2006, 46(5): 647-651.
- [16] IGUCHI M, KAJI M, MORITA Z. Effects of pore diameter, bath surface pressure, and nozzle diameter on the bubble formation from a porous nozzle[J]. Metallurgical and Materials Transaction B, 1998, 29(11): 1209-1218.
- [17] LETZEL H M, SCHOUTEN J C, KSHNA R. Influence of elevated Pressure on the stability of bubbly flows[J]. Chemical Engineering Science, 1997, 52(21/22): 3733-3739.
- [18] 刘燕, 张延安, 赵秋月, 王淑婵, 任晓东, 豆志河, 赫冀成. 气泡细化过程中气含率的实验研究[J]. 过程工程学报, 2009, 9(增刊 1): 97-101.  
LIU Yan, ZHANG Ting-an, ZHAO Qiu-yue, WANG Shu-chan, REN Xiao-dong, Dou Zhi-he, He Ji-cheng. Experimental research on gas holdup in bubble disintegration process[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2009, 9(Suppl 1): 97-101.

## Gas holdup in pressure agitation leaching system

TIAN Lei, LIU Yan, LÜ Guo-zhi, TANG Jun-jie, ZHAO Qiu-yue, ZHANG Ting-an

(Key Laboratory for ecological Metallurgy of Multimetallic Mineral, Ministry of Education,  
Northeastern University, Shenyang 110819, China)

**Abstract:** The oxidation process of the sulfide ore pressure leaching is mainly carried out in the liquid phase. Therefore, the gas holdup is essential for the gas-liquid-solid phase reaction and the extraction rate of valuable metals. In this study, the transparent quartz autoclave and high speed camera were used to investigate the mixture condition of the gas-liquid phase and the behavior of bubbles in the solution under high temperature and high pressure conditions. The results show that when the agitation rate increases from 400 r/min to 550 r/min, the gas holdup increases from 0.137% to 1.58%. When the temperature increases from 363 to 423 K, the gas holdup decreases from 1.22% to 0.774%. When the oxygen partial pressure increases from 0.2 MPa to 0.8 MPa, the gas holdup decreases from 0.997% to 0.951%. Finally, through the analysis of experimental data, the criterion equation about gas holdup is derived.

**Key words:** sulfide ore; pressure leaching; gas holdup; dimensional analysis; quasi-logarithmic equation

**Foundation item:** Projects (50974035, 51074047, 51504058, 51504059) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project (U1402271) supported by the Joint Funds of the National Natural Science Foundation of China; Project (L2014096) supported by the Education Department of Liaoning Province Science and Technology Research Projects, China; Project (20120042110011) supported by the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education, China; Projects (N140204015, N130702001) supported by the Central University Basic Scientific Research Business Expenses, China

**Received date:** 2016-04-06; **Accepted date:** 2016-08-05

**Corresponding author:** ZHANG Ting-an; Tel: +86-24-83681563; E-mail: zta2000@163.net

(编辑 何学锋)