

可视化方法研究磷酸介质中金属粒子微团的运动

李 玲,陈金芳*,陈启明,罗 晔,张 瑞

(武汉工程大学化工与制药学院,绿色化工过程省部共建教育部重点实验室,
湖北省新型反应器与绿色化学工艺重点实验室,湖北 武汉 430074)

摘 要:结合光电显微技术和数字图像分析技术,从亚微观角度研究了磷酸介质中金属粒子微团的运动情况,经可视化实验观察,发现磷酸溶液中金属离子微团主要呈球形;采用黏性流体运动方程(Navier-Stokes 方程)分析磷酸溶液中粒子微团的速度分布和受力情况.通过设定相应边界条件,可得磷酸溶液中粒子微团的速度分布为, $u_x = V_0 x \left[\frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2}} - \frac{3a}{2(x^2 + y^2)} + \frac{a^3}{2(x^2 + y^2)^2} \right]$, $u_y = -V_0 y \left[\frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2}} - \frac{3a}{2(x^2 + y^2)} + \frac{a^3}{2(x^2 + y^2)^2} \right]$,作用在粒子微团表面上的流体压力 $0.2067 V_0 a$,作用在粒子微团表面上的剪切力为 $0.4134 V_0 a$.用粒子速度测量软件测量磷酸溶液中金属粒子微团的几何直径和运动速度,再根据上述速度分布方程计算磷酸溶液中金属粒子微团的运动速度,比较发现所得理论值与实测值基本上相符合.

关键词:可视化;磷酸;金属离子微团;溶液;N-S 方程

中图分类号:TQ021.4;O357

文献标识码:A

doi:10.3969/j.issn.1674-2869.2010.05.002

0 引 言

湿法磷酸工艺是磷酸工业生产的主要方法之一,即利用无机酸分解磷矿粉,分离出粗磷酸^[1].湿法磷酸工艺所采用的原料和工艺,使得其制取的产品主要含铝、铁、钙、镁等磷酸盐及氟硅酸盐和游离硫酸等杂质^[2],这些杂质离子的存在会对其产品性能及后续生产工艺产生不利影响.为使湿法磷酸工艺制取的产品质量符合生产工业级、饲料级、甚至食品级磷酸盐的要求,必须对湿法磷酸进行净化.国内外湿法磷酸净化方法有溶剂萃取法、化学沉淀法和结晶法、离子交换法、泡沫浮选法、电渗析法和复合净化法等^[3-7].这些方法制取湿法磷酸大都具有工艺流程简单和生产成本低的优点,但同时也存在不同的弊端,使得湿法磷酸深度净化的研究还未找到经济可行的方法,因此就有必要从微观角度对湿法磷酸深度净化进行研究.

亚微观可视化技术作为一种有效的研究手段,已应用于化工领域的实验研究^[8-10],同时还可用于研究微观状态下物质的传递过程.本实验在本课题组已有的实验装置上,在微米级视场中直观记录亚微观条件下磷酸介质中高价金属离子微团的运动情

况,然后应用黏性流体运动方程(Navier-Stokes 方程)对观察到的金属离子微团进行受力分析,得出磷酸介质中金属粒子微团的速度分布,为湿法磷酸深度净化提供科学的理论依据,以期在湿法磷酸深度净化找到经济可行的方法.

1 实验部分

1.1 材料及仪器

湿法磷酸,湖北兴发公司提供;密度瓶,25 mL;乌氏黏度计,浙江椒江市玻璃仪器厂生产;恒温水浴槽,重庆银河试验仪器有限公司生产;AL204 电子天平,上海梅特勒-托利多仪器有限公司生产.

1.2 仪器及测试方法

1.2.1 可视化装置 实验装置如图 1 所示^[11-12],该装置是本实验室自行设计组装的可观察微米级微粒运动状况的微型可视化反应器可视化装置.它主要由光学显微镜、微型反应器、摄像机、视频采集卡和计算机组成.实验时将装有研究对象的微型反应器置于载物台上,光学放大系统中的显微镜将微型反应器中的影像先进行放大,摄像机将捕获的光信号转化为数字信号后传入视频采集卡,采集的数字信号通过计算机进行电子

收稿日期:2010-01-06

基金项目:国家自然科学基金(No 20876118)

作者简介:李 玲(1983-),女,湖北云梦人,硕士研究生.研究方向:化学工艺.

指导老师:陈金芳,教授,硕士研究生导师.研究方向:化学工艺.*通信联系人

放大后以影像的形式显示出来,就能观察研究对象在微观状态下的运动情况,从而实现微观状态的可视化。图像录制后存为视频文件,研究时在已拍摄的视频文件中选择需要测量的片段,运用 Premier 软件进行剪辑,并对某些视频不够清晰画面,在不失真的条件下对其进行处理;再选择需要的图片,运用 Photoshop 软件将模糊的粒子图像进行处理使之变清晰。

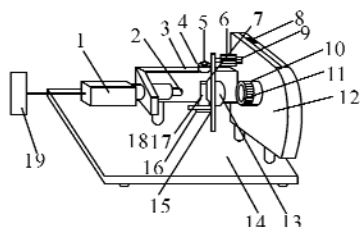


图1 亚微观级可视化微型反应器结构示意图

Fig. 1 Configuration of the sub-microcosmic condition visualization reactor

注:1. 摄像机;2. 物镜;3. 支架;4. 粗调调焦手轮;5. 微调调焦手轮;6. 载物台横向移动手轮;7. 声振荡扰动监测器;8. 带开关亮度调节旋钮;9. 载物台纵向移动手轮;10. 视场光栏转圈;11. 背景冷光源;12. 相差聚光器;13. 聚光镜;14. 底座;15. 载物台;16. 声振荡扰动发生器;17. 微型反应器;18. 物镜转换器;19. 图像采集、处理系统。

1.2.2 粒子速度测量软件 “粒子速度测量软件”是为从事粒子图像分析专门开发的一套计算机软件系统,它的基本原理是:先用视频采集卡采集的粒子运动的 AVI 图片,再对该文件进行分析和处理,并得到相关检验结果。该软件的主要功能包括速度测量和几何测量。

1.2.3 可视化观测 用注射器取 4 mL 兴发湿法磷酸溶液,沿微型反应器内壁缓慢注射其中,再将微型反应器置于可视化装置的载物台上,打开可视化装置的光源,调节光源亮度、视场光圈、孔径光圈、工作距离各光照条件,使磷酸溶液体系清晰呈现在微米级视场空间中,观察磷酸溶液中金属离子微团的运动情况。用粒子速度测量软件对金属离子微团的几何尺寸、运动速度和轨迹进行测量分析,实现测量的可视化。

1.3 密度瓶法测湿法磷酸溶液的密度 准确称量清洁、干燥的密度瓶的质量 m_1 ;将煮沸 30 min 并已冷却至 15 °C 左右的蒸馏水,慢慢地注满密度瓶(注意瓶内应无气泡),浸于 25 ± 1 °C 的恒温水浴中。当密度瓶内的温度达到 25 °C 并保持 30 min 不变时,取出密度瓶,并用滤纸擦去溢出支管外的水,擦干密度瓶外的水,迅速称出其质量 m_2 ;将密度瓶内的水全部倒出,先用乙醇,再用乙醚洗涤密度瓶数次,干燥后,用湿法磷酸溶液代替上述蒸馏水,重复上述操作

步骤,称出湿法磷酸溶液和密度瓶的质量 m_3 ;湿法磷酸溶液的密度可按式(2)计算。

$$d_4^{25} = \frac{\text{湿法磷酸溶液的质量(g)}}{\text{同体积蒸馏水的质量(g)}} \times 0.997\ 07 = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} \times 0.997\ 07 \quad (2)$$

式中: m_1 ——密度瓶的质量,g;

m_2 ——密度瓶及蒸馏水的质量,g;

m_3 ——密度瓶及液体样品的质量,g;

0.997 07——25 °C 时水的相对密度。

1.4 乌氏粘度计测湿法磷酸溶液黏度 调节恒温水浴槽温度至 25 °C,在乌氏粘度计的管 2 和管 3 的管口各套一小段橡皮管,将装有 10 mL 蒸馏水(标准溶液)的乌氏粘度计垂直浸没到水浴槽中;恒温 10 min 后,用夹子夹紧管 3 的乳胶管,用吸耳球从管 2 的乳胶管中抽气,使液面经毛细管上升到缓冲球 C 的一半时,捏紧管 2 的乳胶管,松开管 3 的夹子,让空气进入缓冲球 B,松开管 2 的乳胶管,让缓冲球 C 内的液面逐渐下降;当溶液降至 a 线时,即按下秒表计时,至溶液降至 b 线时,按下秒表结束实验;重复测量三次,使各次测定的差距不超过 0.5 s,取其平均值标准溶液流出的时间;倒出测试的标准溶液,烘干乌氏粘度计,取 10 mL 湿法磷酸溶液加入到乌氏粘度计中,重复上述步骤,根据下列公式计算湿法磷酸溶液的黏度:

$$v_{25}^i = k \times t_{25}^i = \frac{v_{25}^s}{t_{25}^s} \times t_{25}^i \quad (2)$$

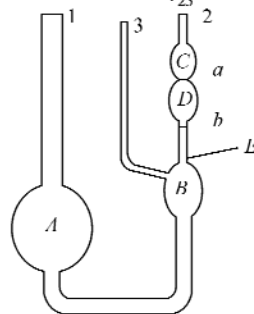


图2 乌氏粘度计

Fig. 2 Ubbelohde viscometer

式中: k ——黏度计常数;

v_{25}^i ——25 °C 时湿法磷酸溶液的运动黏度, m^2/s ;

v_{25}^s ——25 °C 时湿法磷酸溶液自粘度计流出的时间,s;

v_{25}^s ——25 °C 时标准溶液的运动黏度, m^2/s ;

v_{25}^s ——25 °C 时标准溶液自粘度计流出的时间,s。

2 结果与讨论

2.1 湿法磷酸溶液的密度和黏度

将湿法磷酸溶液按上述 1.3 和 1.4 所述方法操作,测得湿法磷酸溶液的密度和黏度如表 1。

表 1 25 ℃ 下水和湿法磷酸溶液的密度和黏度

Table 1 The density and viscosity of water and wet phosphoric acid solution on 25 ℃

物质	密度 $\rho/(\text{g}/\text{cm}^3)$	运动黏度 $\nu/(10^{-6}\text{m}^2/\text{s})$
蒸馏水	0.997 07	0.896 3
湿法磷酸溶液	1.230 14	2.674 8

液体黏度 μ 与运动黏度 ν 的关系式: $\mu = \nu \cdot \rho$, 故湿法磷酸溶液的黏度为 $3.290 4 \times 10^{-2} \text{ g/s}$ 。

2.2 磷酸溶液中金属离子微团的传递情况

2.2.1 磷酸溶液中金属离子微团的存在形式

由可视化实验观察到,粒子微团运动时磷酸溶液体系呈微循环流,对整个体系来说,粒子微团的运动应是杂乱无章的;但对某一特定区域又具有其规律性,具体说来即流体内部各粒子的相对位置基本保持恒定。

湿法磷酸的制取过程中,与磷矿伴生的金属离子在硫酸作用下进入磷酸中,铁、铝、钙、镁 3 种金属离子主要以下述几种形态存在^[13]:三价铁的主要存在形式有 $\text{FePO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, $\text{H}[\text{Fe}(\text{HPO}_4)_2] \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$, $\text{Fe}(\text{H}_2\text{PO}_4)_3$;二价铁的主要存在形式有 $\text{FeHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $\text{FeHPO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$;铝的主要存在形式有 $\text{H}[\text{Al}(\text{HPO}_4)_2]$, $\text{Al}(\text{H}_2\text{PO}_4)_3$;钙的主要存在形式 $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4) \cdot 22\text{H}_2\text{O}$;镁的主要存在形式有 $\text{Mg}(\text{H}_2\text{PO}_4)_3 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 。在溶液中,由于氢键作用,溶质分子周围会结合上水分子,形成水化离子。磷酸溶液中的 PO_4^{3-} 具有三个价键,可与钙、镁、铁、铝结合形成微团,由于微团间静电引力的作用,微团会与周围的粒子微团聚集结合成较大的微团,同时由于微团间的斥力的影响,粒子微团不可能无限量的与周围粒子微团结合。此外,金属阳离子的溶剂合数主要由溶剂分子的大小和形状以及他们的给体强度所决定,从简单的几何角度观察,可以与金属阳离子直接键合的溶剂分子数是有限的。由此可知,磷酸溶液中金属离子并非单一存在,而是以溶剂化的金属粒子微团的形式存在。在观测过程中,发现磷酸溶液体系中的粒子微团的存在形状各异,有球形(如图 3 中 a, b, d),环形(如图 3 中 d, f),柱形及其他不规则的形状(如图 3 中 g, h, i),但大都呈球形存在,这是由于粒子微团受到的表面张力使得微团的表面总是试图获得最小的光滑的面积,而球形是一定体积下具有最小表面积的几何形体。经过粒子速度测量软件中的几何测量,粒子微团的

粒径在 $12.41 \sim 68.10 \mu\text{m}$,说明粒子微团与周围粒子微团相结合的数量有限。在粒子微团运动过程中,部分粒子在运动过程中亮度发生了明显变化,出现这种情况的原因可能是磷酸溶液中部分粒子微团运动到其反射光面,反射光面对可视化装置投射到溶液中光源有反射作用,且反射光面越大粒子微团就显得越亮。

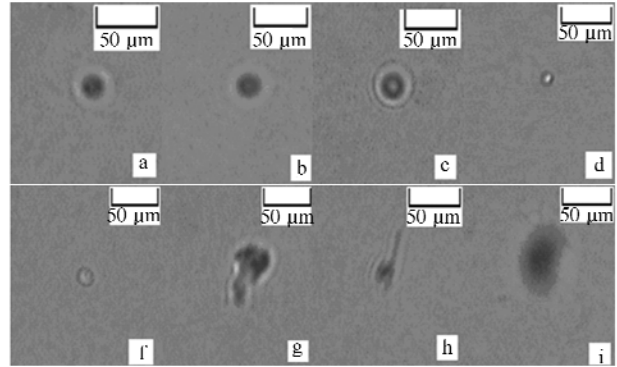


图 3 湿法磷酸溶液中金属离子微团的存在形态

Fig. 3 Micellar form of metal ions in wet phosphoric acid solution

2.2.2 磷酸溶液中金属离子微团的运动情况

在可视化装置连续观察的实验过程中,发现磷酸溶液中金属离子微团是不断运动的。磷酸溶液中金属离子微团存在两种运动方式主要有:平动和转动。在可视化实验的观察中,发现大部分金属离子微团在运动过程中没有明暗度的变化,而只产生了位移的变化,但有少部分金属离子微团在运动过程中除位移发生变化外,还可见明显的明暗度变化及微团形状的变化,这些离子微团在画面上表现为转动,说明这些金属离子微团运动过程中运动方向和受力方向不一致,导致了粒子微团平动的同时自身也在发生转动。

在进行可视化观察的最初一段时间内,画面上出现的粒子微团数量较多,粒子微团的运动方向大都向上且运动的速度极快,分析其可能原因是:用注射器取磷酸溶液于微型反应器中时,会出现细微的振荡,且产生的这种细微振荡对微型反应器中磷酸溶液体系的作用较为明显,引起磷酸溶液体系不平衡,导致磷酸溶液中粒子微团受力不均,表现为离子微团的运动速度极快。待磷酸溶液体系经过一段时间的净置后,体系基本上达到平衡,观察到画面上出现的粒子微团数量较少,运动的速度也较平缓。通过可视化实验还发现,溶液中金属离子微团在 3~5 min 内的时间里运动趋势大都向上,在接下来的 3~5 min 内运动的趋势基本向下,如此交替循环,且随着时间的继续,这

个循环周期所需的时间变长. 从粒子速度测量的轨迹图可见(图4), 粒子微团运动过程中分为直线

运动和伴随左右震动运动两种, 且通过对粒子轨迹图的比较发现大部分粒子微团运动过程中是伴随左右震动的.

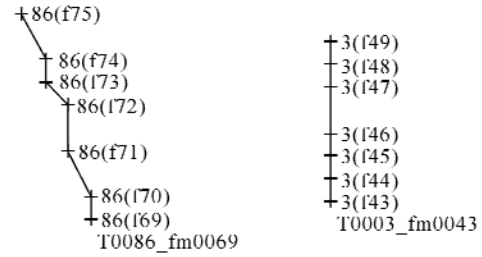


图4 粒子微团在不同运动时刻的速度

Fig. 4 The velocity of micro-particle group at different times

2.3 磷酸溶液粒子微团的速度分布及受力分析

流体中粒子微团的受力有两种类型, 一种是体力(质量力), 它与流体质点的质量大小有关并且集中作用在流体质点的质量中心. 质量力是指作用在所考察的流体整体上的外力, 在传递过程中, 仅限于考察处于重力场作用下的流体. 另一种是表面力, 它是指作用在流体微元表面上的外力, 包含压应力(压强)和切应力(剪切应力), 此种外力是由与该流体微元毗邻的外部流体而来, 由静压力和黏性力所提供^[14].

不可压缩黏性流体的运动方程(Navier-Stokes方程)如下:

$$\begin{aligned}\rho \frac{Du_x}{Dt} &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \rho X + \mu \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial z^2} \right) \\ \rho \frac{Du_y}{Dt} &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \rho Y + \mu \left(\frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial z^2} \right) \\ \rho \frac{Du_z}{Dt} &= -\frac{\partial p}{\partial z} + \rho Z + \mu \left(\frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \right)\end{aligned}\quad (3)$$

该方程式的左端是流体微团运动的惯性力, 右端是作用其上的外力, 依次是压力、重力及黏性力.

通过粒子速度测量软件对磷酸溶液中粒子微团的速度测量, 知粒子微团在磷酸溶液中缓慢运动. 假设半径为 a 的小球在充满不可压缩黏性流体的无界空间中以缓慢速度 V_0 做等速运动. 在低雷诺数流动中, 不考虑质量力. $Re < 1$, 表明这种流体的惯性力相对于黏性力可以忽略. 根据定常条件下流体绕球体的轴对称, 选用球坐标 (r, θ, ϕ) 进行描述, 则有 $\frac{\partial(\cdot)}{\partial t} = 0$, $\frac{\partial(\cdot)}{\partial \phi} = 0$, $U_\phi = 0$. 因此, 忽略惯性力项, 则采用球坐标系将连续性方程和上述 Navier-Stokes 方程可以简化为

$$\frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \frac{2u_r}{r} + \frac{u_\theta \cot \theta}{r} = 0$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial p}{\partial r} &= \mu \left(\frac{\partial^2 u_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_r}{\partial \theta^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{\cot \theta}{r^2} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} - \right. \\ &\quad \left. \frac{2}{r^2} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} - \frac{2u_r}{r^2} - \frac{2\cot \theta}{r^2} u_\theta \right) \quad (4) \\ \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta} &= \mu \left(\frac{\partial^2 u_\theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial \theta^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial r} + \frac{\cot \theta}{r^2} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \right. \\ &\quad \left. \frac{2}{r^2} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} - \frac{u_\theta}{r^2 \sin 2\theta} \right)\end{aligned}$$

相应边界条件为:

(1) 在球体表面上, $r = a, u_r = 0, u_\theta = 0$;

(2) 在离球体无穷远处, $r \rightarrow \infty, u_r = V_0 \cos \theta, u_\theta = -V_0 \sin \theta$.

采用变量分离解得粒子微团的速度分布及压力分布

$$u_r = V_0 \left[1 - \frac{3}{2} \times \frac{a}{r} + \frac{1}{2} \left(\frac{a}{r} \right)^3 \right] \cos \theta$$

$$u_\theta = -V_0 \left[1 - \frac{3}{4} \times \frac{a}{r} - \frac{1}{4} \left(\frac{a}{r} \right)^3 \right] \sin \theta$$

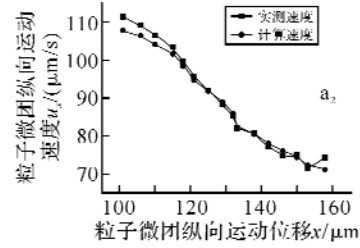
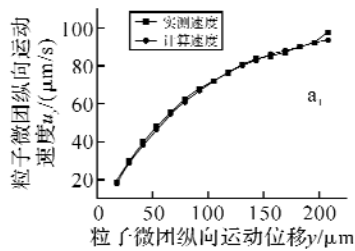
$$\rho = \rho_0 - \frac{3}{2} \times \frac{\mu V_0}{a} \left(\frac{a}{r} \right)^2 \cos \theta$$

由于本实验所测的数据是用直角坐标表示的, 将上述速度分布方程换成实验所对应直角坐标方程 ($z = 0$):

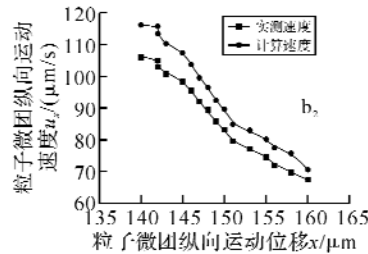
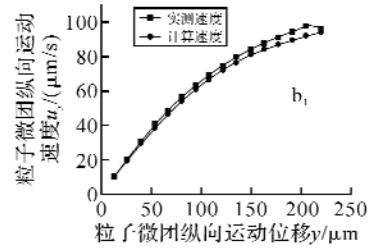
$$u_x = V_0 x \left[\frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2}} - \frac{3a}{2(x^2 + y^2)} + \frac{a^3}{2(x^2 + y^2)^2} \right] \quad (5)$$

$$u_y = -V_0 y \left[\frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2}} - \frac{3a}{4(x^2 + y^2)} - \frac{a^3}{4(x^2 + y^2)^2} \right] \quad (6)$$

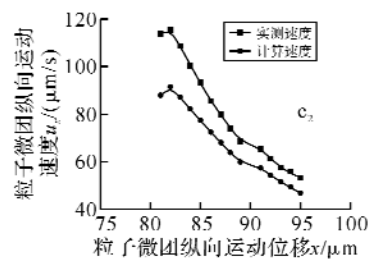
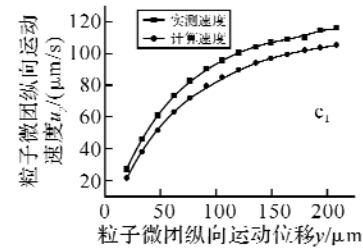
随机选取几个粒子微团, 采用公式 (5) ~ (6), 计算粒子微团的运动速度, 并将其与测量得到的粒子微团的运动速度作比较, 如图 5.



注: 观察温度为 25 ℃, 时间为 2009 年 11 月 16 日, 测得粒子直径为 15.35 μm.



注: 观察温度为 25 ℃, 时间为 2009 年 11 月 16 日, 测得粒子直径为 25.53 μm.



注: 观察温度为 25 ℃, 时间为 2009 年 11 月 16 日, 测得粒子直径为 55.52 μm.

图 5 粒子微团纵向位移和横向位移与运动速度关系图
Fig. 5 Vertical displacement and lateral displacement of metallic ion particles and micro-particle group velocity diagram

由图 5 可知, 计算所得的粒子微团的运动速度与实测速度基本上符合, 说明该方程能较好的模拟粒子微团的运动, 但计算所得的粒子微团的

运动速度较实测速度要小,其原因可能是粒径测量与速度过程中存在一定的误差造成的。

球面($r=a$)的压力分布为 $p=p_0-\frac{3}{2a}\mu V_0\cos\theta$

球面上的剪切应力分布可由下式计算

$$\tau_{r\theta}=\mu\left[r\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{u_\theta}{r}\right)+\frac{1}{r}\frac{\partial u_r}{\partial\theta}\right]$$

则有 $\tau_{r\theta}=-\frac{3}{2}\mu V_0\sin\theta\frac{a^3}{r^4}$

球面上($r=a$)得 $\tau_{r\theta}=-\frac{3}{2a}\mu V_0\sin\theta$

作用在粒子微团表面上的流体压力为

$$P=\int_0^\pi\left(p_0-\frac{3}{2a}\mu V_0\cos\theta\right)dA=\int_0^\pi\left(p_0-\frac{3}{2a}\mu\cdot$$

$$V_0\cos\theta\right)2\pi a^2\sin\theta d\theta=2\pi\mu V_0a=0.2067V_0a$$

作用在粒子微团表面上的剪切力为

$$\tau=\int_0^\pi\left(-\frac{3}{2a}\mu V_0\sin\theta\right)dA=\\ \int_0^\pi\left(-\frac{3}{2a}\mu V_0\sin\theta\right)\cdot 2\pi a^2\sin\theta d\theta=4\pi\mu V_0a=0.4134V_0a$$

3 结 语

采用可视化技术,观察了磷酸介质中金属离子的运动情况,可知磷酸溶液体系中的粒子微团大多呈球形存在;流体绕粒子微团缓慢流动,惯性力可忽略,采用黏性流体运动方程(Navier-Stokes方程)解得磷酸溶液中粒子微团的速度分布为:

$$u_x=V_0x\left[\frac{1}{\sqrt{x^2+y^2}}-\frac{3a}{2(x^2+y^2)}+\frac{a^3}{2(x^2+y^2)^2}\right],$$

$$u_y=-V_0y\left[\frac{1}{\sqrt{x^2+y^2}}-\frac{3a}{4(x^2+y^2)}-\frac{a^3}{4(x^2+y^2)^2}\right].$$

由于粒径测量和速度测量时存在一定误差,会导致计算得到的粒子微团运动速度较实际测量的粒子微团运动速度要小一些,但该方程能较好地模拟粒子微团的运动情况,基本上反映了物质的运动规律.本实验的结果显示,作用在粒子微团

表面上的流体压力为 $0.2067V_0a$,作用在粒子微团表面上的剪切力为 $0.4134V_0a$ (其中 a 表示粒子微团的半径, V_0 表示流速)。

参考文献:

- [1] 毛常明,刘晶晶,尹进华,等.湿法磷酸的工艺研究进展[J].河北化工,2005(4):14-16.
- [2] 周有英.无机盐工艺学[M].北京:化学工业出版社,1995:10.
- [3] 陈雪萍,蒋丽红.湿法磷酸净化技术进展[J].河北化工,2006,29(7):7-10.
- [4] 廉超超,孟文杰,汤德元.离子交换技术净化湿法磷酸中的镁离子[J].贵州工业大学学报:自然科学版,2008,37(1):36-39.
- [5] 杨帆,胡方峰,陈金芳.十二烷基苯磺酸乳液膜法净化湿法磷酸除镁[J].云南化工,2008,35(1):24-29.
- [6] 汤德元,胡健,胡宏.湿法磷酸中铁的泡沫浮选净化研究[J].贵州工业大学学报:自然科学版,2004,33(6):63-66.
- [7] 钟本和,陈亮,李军,等.溶剂萃取法净化湿法磷酸技术研究进展[J].磷酸盐工业,2006,1:12-16.
- [8] 唐正姣,欧阳貽德,陈金芳.液-液体系界面相厚度与接触角的可视化测量[J].化工科技,2005,13(5):5-8.
- [9] 陈启明,陈金芳,钱德涛,等.氯氟菊酯微乳液可视化研究[J].农药,2007,46(12):820-822.
- [10] 徐俊辉,张良均,陈金芳,等.硫酸烧渣制备氧化铁丝及其沉降性质的研究[J].化学与生物工程,2005,22(7):19-21.
- [11] 陈金芳,孙炜,陈中.一种微型可视化反应器:中国,CN200420064900.4[P].2005-11-23.
- [12] 陈金芳,陈启明,宋少男.一种声振荡扰动的微型可视化反应:中国,CN20052009019.7[P].2006-05-03.
- [13] 吴佩芝.湿法磷酸[M].北京:化学工业出版社,1987:83-104.
- [14] 陈晋南.传递过程原理[M].化学工业出版社,2004:76-77.

Research on movement of metallic ion particles in phosphoric acid by visualization technique

LI Ling, CHEN Jin-fang, CHEN Qi-ming, LUO Ye, ZHANG Rui

(School of Chemical Engineering and Pharmacy, Wuhan Institute of Technology, Hubei Key Lab of Novel Chemical Reactor and Green Chemical Technology, Key Laboratory of Green Chemical Process of Ministry of Education, Wuhan 430074, China)

Abstract: Combined with infrared spectroscopy and visualization technology, the movement of metallic ion particles in Phosphoric acid had been studied from the perspective of submicroscopic. Visualization experiments observed that the metal ions in phosphoric acid solution was mainly spherical micelles; Application of equation Navier-Stokes, mechanics of metallic ion particles in phosphoric acid has been analyzed. By setting the appropriate boundary conditions, velocity distribution of metallic ion particles in Phosphoric acid as follows:

$$u_x = V_0 x \left[\frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2}} - \frac{3a}{2(x^2 + y^2)} + \frac{a^3}{2(x^2 + y^2)^2} \right], u_y = -V_0 y \left[\frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2}} - \frac{3a}{(x^2 + y^2)} + \frac{a^3}{(x^2 + y^2)^2} \right], \text{ and fluid}$$

pressure that acting on the surface of micro-particles was $0.2067V_0a$, and shear stress that acting on the surface of micro-particles was $0.4134V_0a$. The metal particle velocity and geometric diameter of micro-groups in Phosphoric acid had been measured by particle velocity measurement software. According to the velocity distribution equation, the velocity of metallic ion particles had been calculated, and the result show that the calculated theoretical and measured values are basically consistent.

Key words: visualization; phosphoric acid; metallic ion particles; solution; N-S equation

本文编辑:张 瑞