

# 静止流体中颗粒污垢沉积模型数值模拟

徐志明<sup>1</sup> 孙 美<sup>1</sup> 张一龙<sup>2</sup>

(1. 东北电力大学, 吉林 吉林 132012; 2. 华北电力大学, 北京 102206)

**摘 要:** 为了研究静止流体中颗粒污垢沉积规律, 基于固液两相流理论以及扩散理论建立了颗粒沉积模型, 采取数值模拟的办法, 分析研究了颗粒沉积速度、浓度及沉积量随沉积过程的变化, 得到了适用于粒径大于 5 μm 的颗粒沉积规律: 颗粒沉积速度、浓度以及沉积量均呈现渐进型趋势, 颗粒最终以恒定的沉降速度沉底; 越靠近底端, 沉积时间越短; 越靠近表面浓度变化越快。分析对比模拟值与实验值, 在误差允许的范围内认为两者吻合较好。

**关 键 词:** 颗粒污垢; 沉积; 数值模拟; 实验验证; 静止流体

中图分类号: TK124 文献标识码: A  
DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2014.06.006  
符号说明

- $C$ ——悬浮颗粒浓度 /  $g \cdot L^{-1}$ ;
  - $C_D$ ——阻力系数;
  - $D$ ——扩散系数 /  $m^2 \cdot s^{-1}$ ;
  - $d$ ——颗粒粒径 /  $\mu m$ ;
  - $F_w$ ——流体中考虑浮力后球形颗粒所受重力 /  $N$ ;
  - $F_R$ ——固体表面阻力 /  $N$ ;
  - $H$ ——烧杯高度 /  $m$ ;
  - $h$ ——重力沉降距离 /  $\mu m$ ;
  - $J$ ——网格编号  $J=1, 2, \dots, M1$ ;
  - $m$ ——污垢沉积量质量 /  $g$ ;
  - $Re$ ——颗粒运动雷诺数;
  - $T$ ——悬浮液温度 /  $K$ ;
  - $t$ ——时间 /  $s$ ;
  - $\Delta t$ ——时间步长 /  $s$ ;
  - $v$ ——颗粒沉积速度 /  $m \cdot s^{-1}$ ;
  - $\rho$ ——密度;
  - $\omega$ ——泥沙沉降速度 /  $m \cdot s^{-1}$ ;
  - $\epsilon_s$ ——泥沙扩散系数;
  - $\mu$ ——流体动力粘度 /  $Pa \cdot s$ ;
  - $z$ ——统计平均位移 /  $\mu m$
- 下角标
- $s$ ——颗粒;
  - $f$ ——流体(水)

## 引 言

污垢是指在与流体相接触的固体表面上逐渐积

聚起来的那层固态或软泥状物质<sup>[1]</sup>。颗粒污垢是污垢的一种<sup>[2]</sup>, 它是流体中悬浮的固体颗粒在换热面上的积聚。

国内外在颗粒污垢方面已经做了大量的研究工作。文献 [3] 研究强化管中液侧颗粒污垢的形成机理, 首次基于扩散和惯性机制提出半理论模型, 较好的预测不同粒径及浓度范围内的颗粒污垢沉积机理。文献 [4] 重点研究了颗粒污垢的形成过程, 表明其沉积机理主要有: 布朗运动、湍流扩散和重力或惯性力, 且颗粒的沉积量与流体介质粘性有关。文献 [5] 基于湍流猝发理论, 提出了以易测参数表述的污垢热阻预测模型, 其形式类似于 Kern-Seaton 模型得到的结果, 但待定系数少、所需参量更易测量, 文献 [6] 利用这一模型研究了管壳式换热器管内微粒污垢的积聚特性<sup>[6]</sup>, 发现模型中引入的输运速度经验公式在输运机制发生变化时误差较大。文献 [7-8] 对悬浮颗粒垂向浓度分布的连续性假设及随机模型等传统理论进行综合分析和比较, 讨论颗粒浓度分布的一般性提出研究重点。并探讨了影响泥沙扩散系数的影响因素。文献 [9] 借助于层流区阻力系数与雷诺数之间的关系, 建立了粒径与最终沉降速度之间关系的 Stokes 公式, 提出颗粒在液体中只能达到最终沉降速度的 99%, 且这个过程十分短暂。并给出重力沉降过程中浓度变化计算式, 用来衡量不足斯托克斯直径的颗粒所占的份额。此研究在沉积速度变化过程及沉积量上并没有深入。

实际情况中, 浓度的分布不均匀, 且随着污垢沉积的过程浓度减小。模型中引入的输运速度的经验公式在输运机制发生变化时存在较大误差, 因此, 本研究中要做的就是重新引入颗粒运动模型和浓度分布变化模型。本研究借鉴固液两相流理论, 从颗粒受力的角度建立起沉积运动模型, 从悬浮泥沙扩散理论建立起颗粒分布模型。

收稿日期: 2014 - 01 - 22; 修订日期: 2014 - 03 - 03

基金项目: 国家自然科学基金 NO. 51076025)

作者简介: 徐志明(1959 -), 男, 吉林九台人, 东北电力大学博士生导师, 教授。

# 1 模型的建立

## 1.1 物理模型

研究对象为烧杯内颗粒静沉积。假设烧杯内颗粒初始分布均匀,各处沉积规律一样,那么只需取竖直方向上单位尺寸模型进行研究,建立一维模型。表 1 为颗粒及流体的参数以及模拟的工况。图 1 为研究对象实物图,烧杯高  $H=0.13\text{ m}$ 。

为了简化和突出氧化镁颗粒污垢沉积规律,做如下假设:

- (1) 氧化镁颗粒粒径均匀且为球形刚体;
- (2) 颗粒沉降能达到最终的沉降速度;

(3) 颗粒与颗粒之间的作用力忽略不计。实验研究表明<sup>[9]</sup>,悬浮液的体积浓度限制在 0.01% - 1.0% 之间时即可忽略颗粒之间的影响,本研究体积浓度在此范围内;

(4) 氧化镁颗粒极微溶于水,与水反应生成的氢氧化镁也是难溶物,且量非常少,对实验研究不产生影响。



图 1 研究对象

Fig. 1 Object of study

表 1 颗粒及流体参数和模拟工况

Tab. 1 Parameters of the particles and fluid and conditions being simulated

	密度 $\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	颗粒直径 $d/\text{m}$	颗粒运粘度 $\mu/\text{Pa}\cdot\text{s}$	悬浮颗粒浓度 $C/\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$
颗粒 (MgO)	$1.74 \times 10^3$	$12 \times 10^{-6}$	-	0.4
流体 (water)	$1.0 \times 10^3$	-	$0.549 \times 10^{-3}$	-

## 1.2 数学模型

### 1.2.1 颗粒运动模型

由文献 [9] 颗粒沉降过程中主要受重力、浮升力及表面阻力的共同作用,给出任意牛顿流体中的固体颗粒运动计算模型:

$$m_s g - m'_t g - F_D = m_s \frac{dv_s}{dt} \tag{1}$$

其中  $F_w$  为流体中考虑浮力后球形颗粒所受到的重力:

$$F_w = m_s g - m'_t g = \frac{1}{6} \pi d_s^3 g (\rho_s - \rho_f) \tag{2}$$

$F_D$  是流体作用于固体表面的阻力,  $N$ ; 它与流体和固体颗粒的相对运动速度有关:

$$F_D = \frac{1}{8} \pi d_s^2 \rho_f C_D |v_f - v_s| (v_f - v_s) \tag{3}$$

流体静止时,则  $v_f = 0$ , 式(3)变为:

$$F_D = \frac{1}{8} \pi d_s^2 \rho_f C_D v_s^2 \tag{4}$$

且表面阻力  $F_D$  的方向与颗粒运动  $v_s$  方向相反。

将式(2)、式(4)带入式(1)中,得到静止流体中颗粒运动模型:

$$\frac{g(\rho_s - \rho_f)}{\rho_s} - \frac{3}{4\rho_s d_s} \rho_f C_D v_s^2 = \frac{dv_s}{dt} \tag{5}$$

式中:阻力系数  $C_D$  是颗粒运动雷诺数的单值函数,按雷诺数可以把阻力系数曲线分为 4 个区:

$$Re = \frac{v_s d_s \rho_f}{\mu_f} \tag{6}$$

1) 层流区 ( $Re < 1$ )  $C_D = \frac{24}{Re}$

2) 过渡区 ( $1 < Re < 1000$ )  $C_D = 30Re^{-0.625}$

3) 紊流区 ( $1000 < Re < 10^5$ )  $C_D = 0.45$

颗粒在液体中沉降时,颗粒受到周围液体分子的撞击频率十分巨大,但是,液体(水)分子的直径与颗粒粒径相比很小,多数情况下它对颗粒的撞击一般都可以略去不计。但是,当颗粒的粒径很小时,这个撞击就不能忽略。这时,颗粒除沿重力向下沉降外,还会产生偏离垂直方向的不规则运动(布朗运动)。室温条件下,经 1 s 后的颗粒在任意方向上由于布朗运动引起的统计平均位移  $z$  和重力沉降距离  $h$  的比较如表 2 所示<sup>[10]</sup>。不难看出,前文中从受力的角度建立的颗粒沉积速度变化方程,忽略了布朗运动,适用于大于  $5\ \mu\text{m}$  的颗粒。因此本研究数值模拟目前只适用于此粒径范围。

表 2 球形颗粒( $\rho = 2 \text{ g/cm}^3$ ) 1 s 后在水中的  
沉降距离  $h$  和统计平均位移  $z$

Tab.2 Sedimentation distance  $h$  and average statistical  
displacement  $z$  of spheric particles  
( $\rho = 2 \text{ g/cm}^3$ ) in water after 1 second

$D/\mu\text{m}$	$h/\mu\text{m}$	$z/\mu\text{m}$
0.1	0.006	2.94
0.25	0.035	1.86
0.50	0.14	1.34
1.0	0.55	0.93
1.5	1.25	0.76
2.0	2.22	0.66
2.5	3.46	0.58
5.0	13.8	0.42

### 1.2.2 颗粒分布模型

基于扩散理论建立的悬浮颗粒浓度垂线分布的方程为<sup>[7]</sup>:

$$\omega C + \varepsilon_s \frac{dC}{dz} = 0 \quad (7)$$

式中:  $C$ —距离床面任意高度  $z$  处的悬浮颗粒浓度,  $\text{g/L}$ ;  $\omega$ —颗粒沉降速度,  $\text{m/s}$ ;  $\varepsilon_s$ —泥沙扩散系数。

上式仅为颗粒悬浮的浓度分布,可以看出浓度仅跟位置  $z$  有关。本例中,流体静止,颗粒仅在  $z$  方向上进行沉积,浓度变化也仅为  $z$  方向的变化,若对原浓度分布方程进行合理的扩展后的浓度变化方程为:

$$v(t)C + D \frac{dC}{d(z - v(t)t)} = 0 \quad (8)$$

### 1.2.3 颗粒沉积量模型

根据浓度的定义和沉积量的定义,建立沉积量与浓度的关系为:

$$\Delta m(t) = \Delta C(t) \cdot V \quad (9)$$

式中:  $\Delta C(t)$ —不同时刻研究对象的平均浓度差,  $\text{g/L}$ ;  $V$ —研究对象体积,  $\text{m}^3$ 。

## 2 数值模拟

### 2.1 网格划分

对所建立的物理模型进行网格划分如图 2 所示。其中,网格总长度为  $z = 0.13 \text{ m}$ ,共划分  $M_1 = 120$  个网格,网格的尺寸  $dz = 0.13/120 \text{ m}$ 。程序编译过程中,忽略掉污垢层的厚度对网格尺寸的影响,这是根据实验得到的污垢层厚度与网格尺寸相较无限小,因此得以简化。

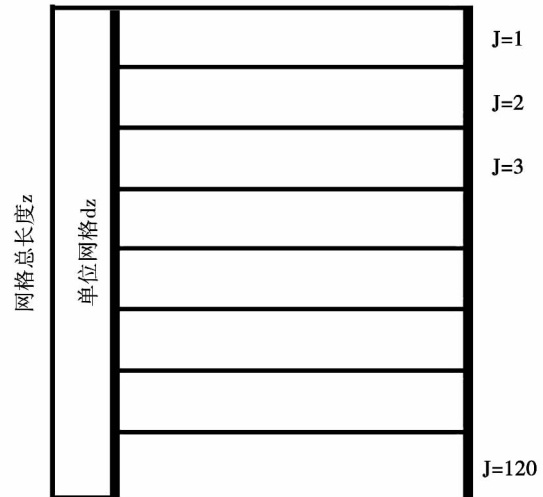


图 2 网格划分

Fig.2 Grid division

### 2.2 定解条件

颗粒沉积的初始速度为零,且初始只在重力的作用运动,一旦获得速度就受到重力和表面阻力合力的作用,为了实现编程中数学方程的运算,给定颗粒初始速度为  $10^{-6} \text{ m/s}$ 。

假设烧杯内的悬浮液均匀,则颗粒沉积的初始浓度为  $0.4 \text{ g/L}$ 。

### 2.3 求解过程

#### 2.3.1 对颗粒运动模型的求解

首先将运动模型式(5)采用显示格式将其离散为:

$$\frac{g(\rho_s - \rho_f)}{\rho_s} - \frac{3}{4\rho_s d_s^2} \rho_f C_D(J,t) v_s^2(J,t+1) = \frac{v_s(J,t+1) - v_s(J,t)}{\Delta t} \quad (10)$$

已知初始速度  $v_s(J,0)$ ,求得颗粒运动雷诺数:

$$Re(J,0) = \frac{v_s(J,0) d_s \rho_f}{\mu_f} \quad (11)$$

#### 2.3.2 对颗粒分布模型的求解

同样将分布模型式(8)采用显示格式离散为:

$$v(J,t)C(J,t) + D \frac{C(J,t) - C(J,t-1)}{y - v(J,t)\Delta t} = 0 \quad (12)$$

#### 2.3.3 对沉积量模型的求解

同样沉积量模型式(9)采用显示格式离散为:

$$m(t) = \sum_{i=0} [C(M1,t) - C(M1,t+1)] dx dy dz \quad (13)$$

其中  $dx$   $dy$  分别为网格的单位长度和宽度  $m$ 。

### 3 模拟结果讨论

#### 3.1 模拟颗粒运动模型

微米级颗粒在静止流体中的沉积速度模拟结果如图3 图中表示不同位置(分别为  $J = 120$ 、 $J = 119$  和  $J = 118$ ) 的颗粒沉积速度的变化。由图可知,颗粒沉积在表面上速度为零,越靠近底部颗粒沉降时间越短,  $J = 120$  区域内的颗粒 39 s 完全沉积,  $J = 119$  内颗粒 77 s 完全沉积,  $J = 118$  内的颗粒需要 114 s,而  $J=1$  内颗粒则需 4 487 s 完全沉积。由曲线,颗粒沉积速度随时间增加呈先增加后保持不变的趋势,并且颗粒在静止流体中作加速度减小的加速运动,一定时间后颗粒保持匀速下降,最终的沉降速度为  $5.575 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ 。这是由于静止流体中颗粒受到重力和表面阻力共同作用的结果,颗粒沉积过程中,重力保持不变,表面阻力是由颗粒与流体相对运动产生,随着颗粒速度的增加逐渐增大,当增大到与重力相同时,颗粒的下降速度达到沉降速度,与建立运动模型一致。

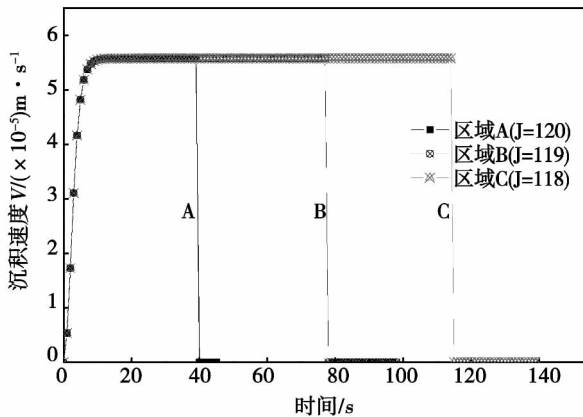


图3 模拟颗粒沉积过程中各区域内速度变化示意图

Fig.3 Schematic diagram of changes in the speed in various areas in the process of the deposition of the particles being simulated

#### 3.2 模拟颗粒分布模型

颗粒浓度随时间变化曲线如图4。所有网格的浓度整体呈下降趋势,并最终趋零。除边界上的网格( $J = 1$ ) 具有较大差异,其余各网格的浓度值整体变化近乎一致。图中浓度曲线变化起始于同一值,由假设初始阶段颗粒的均匀分布,各网格内的浓度为同一浓度  $0.4 \text{ g/L}$ 。经过足够时间沉积后,各网格

内的颗粒均已沉积至底部,出现颗粒浓度最终趋于零的现象。边界网格没有来源于外界的颗粒补充,图中边界网格( $J = 1$ ) 的变化速度最快,也于最短的时间是 2249 s 达到了最终值。其他网格内颗粒除正常沉积外均有来自上一网格颗粒的补充,因此初始一段时间各区域浓度变化趋势一致,由颗粒运动模型,同一时刻各颗粒沉积速度相同,那么下降过程就是均匀变化的过程。一段时间后,越上层网格内颗粒越来越少,浓度变化开始越早变缓,也越短时间完成沉积。 $J = 10$ 、40、80 和 120 趋于零的时间分别为 3 432 s、4 078 s、4 263 s 和 4 487 s,时间间隔越来越短,图中表征不明显,这是因为沉积过程中浓度变化并非理想的均匀,浓度大时,沉降明显,随着沉积时间增加,浓度越来越小,每个区域内浓度最后成为另一个均匀的状态,这与实际情况也相符。最终需 4 487 s 完全沉积,与运动模型的沉积时间相一致,证明所建立的颗粒分布模型正确。

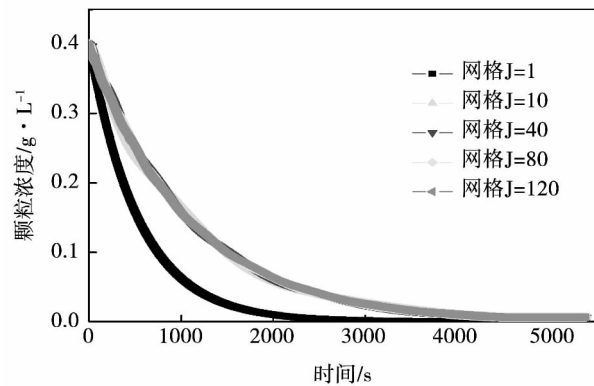


图4 模拟颗粒沉积浓度变化示意图

Fig.4 Schematic diagram of changes in the particle concentration during the deposition process simulated

#### 3.3 模拟颗粒沉积量模型

模拟颗粒沉积过程中沉积量随时间的变化如图5所示。图5(a)中,任意浓度流体中颗粒沉积量均呈现渐进型,且浓度越高最后达到的沉积量渐进值越大,而达到渐进值的时间却基本一致。这是因为相同体积内浓度越高污垢质量越大,最后的沉积量就越大,而沉积时间与浓度仅有细微的关系,浓度越高达到渐进值的时间稍稍延后,从微观角度出发,浓度高时颗粒较多,颗粒之间存在着相互作用影响其沉积。沉积时间主要与颗粒的粒径有关。

图5(b),任意粒径颗粒沉积量也呈现渐进型,粒径越大沉积时间越短,而最终达到的污垢渐进值

却基本一致。因为  $5\ \mu\text{m}$  以上颗粒沉积主要是在重力的作用下,从式(2) 粒径越大重力越大,颗粒越容易沉积,达到的沉积时间越短。沉积量主要与颗粒浓度有关,与粒径只存在着细微的差别。粒径  $12\ \mu\text{m}$  浓度  $0.4\ \text{g/L}$  的颗粒最终  $4\ 487\ \text{s}$  达到渐进值,与前文颗粒沉积速度时间和颗粒浓度变化时间一致,渐进值约为  $2.5 \times 10^{-5}\ \text{g}$ 。多数污垢文献中颗粒污垢模型所得到的污垢热阻均为渐进型,而污垢沉积量与污垢热阻成正比,因此本文中得到的渐进型的污垢沉积量是合理的。证明了建立的颗粒运动模型、分布模型以及污垢沉积量模型的正确性。图中粒径  $5\ \mu\text{m}$  的颗粒沉积与其他曲线相差较大,除沉积时间长外,最终的污垢沉积量也较小,这是由于沉积机理发生变化,不能忽略布朗扩散对沉积的影响。本模型目前仅适用粒径大于  $5\ \mu\text{m}$  的颗粒沉积。

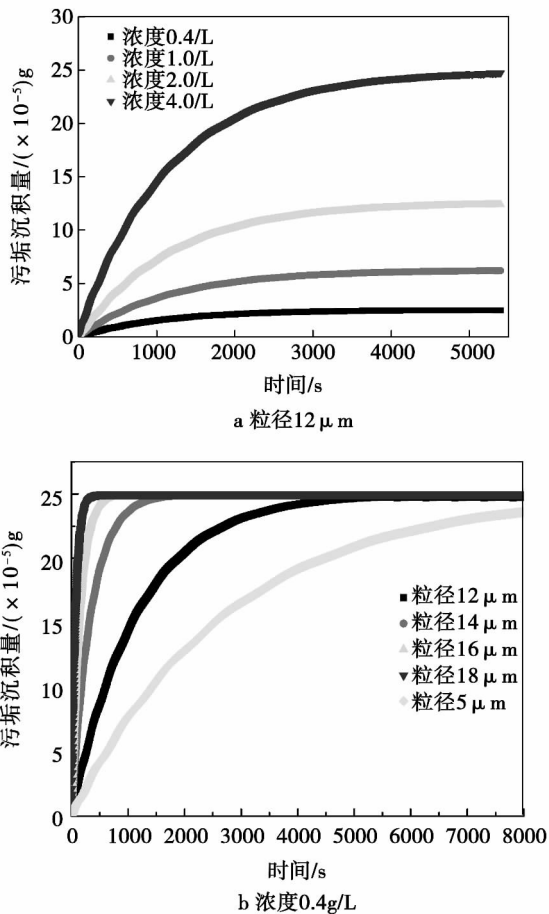


图 5 模拟颗粒沉积量变化示意图  
Fig. 5 Schematic diagram of changes in the quantity of particles during the deposition process simulated

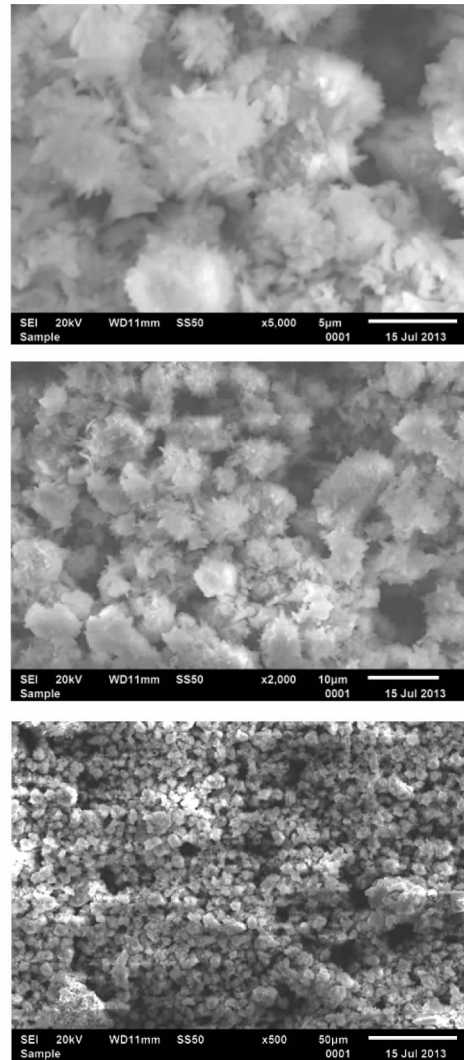


图 6 污垢层电镜扫描图像  
Fig. 6 Image of the fouling layer scanned by using an electron microscope

#### 4 实验验证

##### 4.1 实验装置及原理

为了验证数值模拟的正确性,需要进行同等参数和工况下的实验。

材料: 烧杯若干, 表面积  $0.03 \times 0.03\ \text{m}^2$  的铜片若干,  $\text{MgO}$  颗粒(粒径为  $12\ \mu\text{m}$ ), 玻璃棒, 恒温水浴箱, 镊子, 电子天平。

过程: 实验前, 将干净的铜片编号、称重, 记录数据, 并称量需要的氧化镁颗粒。在若干烧杯中分别配制  $0.4\ \text{g/L}$  的混合液, 用玻璃棒搅拌均匀后, 分别放入超声波清洗设备处理  $10\ \text{min}$ , 使悬浮液浓度分布均匀, 然后取出再分别放入  $50^\circ\text{C}$  的恒温水浴箱, 待水平面平静后将称重过的干净铜片按编号放在烧

杯底进行颗粒沉积。每 5 分钟按编号依次将铜片取出。将取出的铜片晾干后称重。将实验前后的铜片重量相减,即可得到不同时间污垢沉积质量。同样的操作步骤进行其它浓度 1.0、2.0 和 4.0 g/L 颗粒沉积实验。

图 6 为实验铜片晾干后颗粒污垢层分别放大 5000、2000、500 倍的电镜扫描图像。由放大 5000 倍图像观察到,氧化镁颗粒没有规则的形态,外表边界多为毛刺状,由放大 2000 和 500 倍图像看出,氧化镁颗粒污垢层排列紧实,虽不是规则形状,总体看上去颗粒大小分布相对均匀,对前文数值模拟假设条件提供一定的参考价值。

#### 4.2 实验结果与对比

粒径 12 μm,不同浓度颗粒沉积量模拟值与实验值对比如图 7 所示。模型未引入温度,又 MgO 粒径单一,仅绘制不同浓度的沉积规律曲线来对比结果。从实验获得的多组离散点看出,静止流体中颗粒沉积量呈渐进增长趋势,初始流体中颗粒浓度较大,颗粒沉积速度较快,之后变缓,这与建立的运动模型、分布模型变化趋势一致。将处理后的实验值与模拟值绘制于同一图中,剔除掉坏点后,各组模拟值与实验值的最大误差控制在 20%,且实验值普遍低于模拟值,误差部分来自于实验中人为取片污垢层的剥落,部分来自于模型的计算误差。

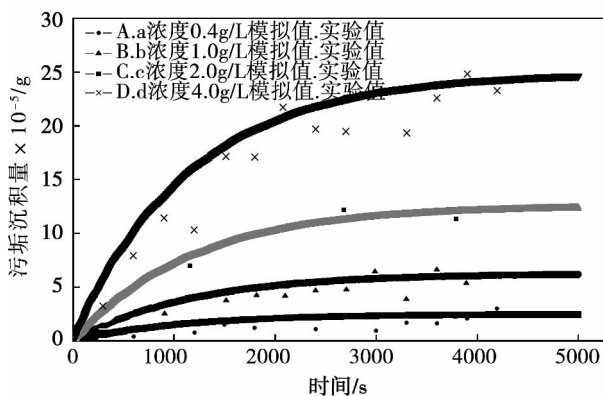


图 7 12 μm 粒径污垢沉积质量模拟值与实验值  
Fig. 7 Simulation value and test one of foul mass deposited

### 5 结 论

通过数值模拟和实验验证,得到了几点结论:

- (1) 本文建立的运动、分布模型,仅适用于粒径大于 5 μm 的颗粒静止沉积;
- (2) 静止流体颗粒沉积过程中,沉积速度呈渐

进增长趋势,最终以恒定的沉降速度沉积,越靠近底端,沉积时间越短。本例选用的模型需 4 487 s 完成沉积;

(3) 静止流体颗粒沉积过程中,沉积浓度也呈渐进趋势。越靠近表面的位置浓度变化越快;

(4) 静止流体颗粒沉积过程中,沉积量同样呈渐进增长趋势,本文模型 4 487 s 达到最大沉积量,为  $2.5 \times 10^{-5}$  g;

(5) 进行静止流体中颗粒沉积实验,沉积时间和沉积量两方面与数值模拟结果取得了很好的吻合,验证了所建立方程以及模拟思路的正确性。但是模型中未引入温度对沉积规律的影响,需后续加以完善。

#### 参考文献:

[1] 杨善让,徐志明,孙灵芳. 换热设备污垢与对策[M]. 第二版. 北京: 科学出版社, 2004. 1-20.  
YANG Shan-rang, XU Zhi-ming, SUN Ling-fang. Fouling on heat exchange equipment items and its countermeasures ( Second edition) [M]. Beijing: Scientific Publishing House, 2004: 1-20.

[2] Epstein N. Fouling in Heat Exchangers [J]. Heat Transfer 1978-Proc 6th IHTC, 1979. 6: 235-253.

[3] L M. Chamra, R L. Webb. Modeling Liquid-side Particulate Fouling in Enhanced Tubes [J]. Department of Mechanical Engineering, The Pennsylvania State University, University Park, PA 16802, U. S. A.

[4] S K Beal. Deposition of Particles in Turbulent Flow on Channel or Pipe Walls [J]. Sci. Eng. 1970, 40(1): 1-11.

[5] 徐志明, 杨善让. 颗粒污垢剥蚀机制研究 [J]. 工程热物理学报, 1998, 19(5): 612-615.  
XU Zhi-ming, YANG Shan-rang. Research of the mechanism governing the peeling-off and erosion of foul in particles [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 1998, 19(5): 612-615.

[6] 甘云华, 徐志明, 杨善让等. 微粒污垢的特性分析 [J]. 热科学与技术, 2002, 1(2): 109-112.  
GAN Yun-hua, XU Zhi-ming, YANG Shan-rang. Analysis of the characteristics of foul in micro particles [J]. Thermal Science and Technology, 2002, 1(2): 109-112.

[7] 倪晋仁, 梁林. 水沙流中的泥沙悬浮 ( I ) [J]. 泥沙研究, 2000.  
NI Jin-ren, LIANG Lin. Suspension of sludge and sand in a water and sand flow ( I ) [J]. Research of Sludge and Sand, 2000.

[8] 倪晋仁, 梁林. 水沙流中的泥沙悬浮 ( II ) [J]. 泥沙研究, 2000.  
NI Jin-ren, LIANG Lin. Suspension of sludge and sand in a water and sand flow ( II ) [J]. Research of Sludge and Sand, 2000.

[9] ALLEN T. Particle Size Measurement Volume 1. 5th ed [M]. Chapman and Hall, 1997. 223-297.

[10] 蔡小舒, 苏明旭等. 颗粒粒度测量技术及应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.  
CAI Xiao-shu, SU Ming-xu. Technology for measuring particle diameters and its applications [M]. Beijing: Chemical Industry Publishing House, 2010.

( 陈 滨 编辑)

thing to do with the width-depth ratio of the channel ,fluid pressure and heating condition. Compared with the currently available flow pattern transition criteria ,the most transition boundaries of the flow patterns cannot be predicted very well ,therefore ,it is necessary to develop a new theoretical model for predicting the transition of the water-steam two-phase flow pattern of a flow heated at a single side of a narrow channel. **Key Words:** thermodynamics ,rectangular narrow channel ,water heating ,flow pattern chart ,transition criterion ,visualization study

静止流体中颗粒污垢沉积模型数值模拟 = **Numerical Simulation of the Granular Foul Deposition in a Static Fluid** [刊 汉] XU Zhi-ming ,SUN Mei ( Northeast University of Electric Power ,Jilin ,China ,Post Code: 132012) , ZHANG Yi-long ( North China University of Electric Power ,Beijing ,China ,Post Code: 102206) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2014 29( 6) . -627 -632

To study the law governing the granular foul deposition in a static fluid ,a granular foul deposition model was established based on the solid-liquid two-phase flow theory and the diffusion theory ,by using the numerical simulation method ,changes of the granular deposition speed ,concentration and deposition quantity with the deposition process were analyzed and studied with the law controlling the deposition of particles with a diameter being greater than 5  $\mu\text{m}$  being obtained: all the granular deposition speed ,concentration and deposition quantity assume a step-by-step progressive type tendency and the particles finally deposit to the bottom at a constant deposition speed. The closer to the bottom ,the shorter the deposition time. The closer to the surface ,the quicker the change of the concentration. When the simulation value and the test one are analyzed and contrasted ,it has been found that both are in relatively good agreement and their error is within the range permitted. **Key Words:** granular foul ,deposition ,model ,numerical simulation ,test verification

分离型热管单管回路传热特性实验研究 = **Experimental Study of the Heat Transfer Characteristics of the Single Tube Loop of a Separate Type Heat Pipe** [刊 汉] YI Chong-chong ,WANG Wen ,WANG Bo-jie ZHENG Wen-long ( Refrigeration and Cryogenics Research Institute ,Shanghai Jiaotong University ,Shanghai ,China ,Post Code: 200240) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2014 29( 6) . -633 -638

As high efficiency non-energy-driven heat transfer elements ,separate type heat pipes have obtained a wide use in industry. With ammonia serving as the working medium ,an experimental study was performed of the single tube loop of a separate type heat pipe. In this connection ,the influence of the temperature of the heat source and the liquid filling rate on the heat transfer performance of the heat pipe was mainly discussed. The test results show that the higher the temperature of the heat source ,the higher the working temperature in the heat pipe and the larger the