

突扩圆管内液固两相流冲刷腐蚀过程的数值模拟

张 政¹ 程学文² 郑玉贵³ 柯 伟³ 姚治铭³

(1. 北京化工大学化学工程学院 北京 100029)

(2. 中国石化集团公司北京化工研究院环境保护研究所 北京 100013)

(3. 金属腐蚀与防护国家重点实验室, 中国科学院金属研究所 沈阳 110016)

摘要 对突扩圆管中液固两相流冲刷腐蚀过程进行了数值模拟研究. 冲刷腐蚀过程的综合模型可以分解为液固两相流动模型、冲刷模型和腐蚀模型. 在欧拉坐标系下求解流体相的雷诺时均守恒方程组来模拟流体流场, 通过拉格朗日坐标系下的随机轨道模型获得固体颗粒相的运动, 并考虑了流体相与固体颗粒相之间的双向耦合作用. 数据验证结果表明构建的综合模型基本上是正确的.

关键词 冲刷腐蚀 液固两相流动 数值模拟 随机轨道模型 双向耦合

中图分类号 TG172.9 **文献标识码** A **文章编号** 1002-6495(2001)02-0089-07

NUMERICAL SIMULATION OF EROSION-CORROSION IN LIQUID-SOLID TWO-PHASE FLOW

ZHANG Zheng¹ CHENG Xuewen² ZHENG Yugu³ KE Wei³ YAO Zhiming³

(1. College of Chemical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029)

(2. Environmental Protection Research Institute, Beijing Research Institute of Chemical Industry, Beijing 100013)

(3. State Key Lab. for Corrosion and Protection, Institute of Metal Research,
The Chinese Academy Sciences, Shenyang 110016)

ABSTRACT Erosion - corrosion of liquid - solid two - phase flow occurring in a 304[#] stainless steel pipe with suddenly expanded cross - section is numerically studied. A comprehensive model for erosion - corrosion process includes three main components: the liquid - solid two - phase flow model, erosion model and corrosion model. The Eulerian - Lagrangian approach is used to simulate liquid - solid two - phase flow, that is, Reynolds time - averaging equations are solved to simulate fluid phase, while stochastic trajectory model is adopted to obtain properties of particle phase. Two - way coupling effect between the fluid phase and the particle phase is considered in the paper. The feasibility of the models is examined by the data from references. The results show that the model is basically correct and feasible.

KEY WORDS erosion - corrosion, liquid - solid two - phase flow, numerical simulation, stochastic trajectory model, two - way coupling

多相流冲刷腐蚀是由流体及其携带的颗粒(包括固体颗粒、液滴、气泡等)冲击流道材料表面产生的机械作用(即冲刷)和流体介质与流道材料表面发生的化学或电化学反应(即腐蚀)共同作用于流道材料表面所造成的材料损耗现象. 冲刷腐蚀是化工、矿山、水利、能源、电力等许多工业领域中造成泵、叶

片、管道、阀门等工业过流部件大量和频繁损坏的主要原因^[1]. 冲刷腐蚀过程非常复杂, 影响因素众多, 涉及流体力学、材料科学、电化学等多学科的交叉, 目前对其过程机理的认识有待进一步深入. 本文将采用现代计算流体力学(CFD)方法以突扩圆管为例对液固两相流冲刷腐蚀过程进行数值模拟研究.

国家自然科学基金(59831030)和金属腐蚀与防护国家重点实验室资助.

收稿初稿:2000-02-20;收到修改稿:2000-09-10

作者简介:张政,男,1939年生,教授,博导

1 模型

假定在液固两相流动条件下由于受固体颗粒冲刷而在流道壁面上不存在腐蚀产物层,而且材料损

耗速率是冲刷分量与腐蚀分量的加和,那么可以把液固两相流冲刷腐蚀过程的综合模型划分为 3 部分:液固两相流动模型,冲刷模型和腐蚀模型,分述如下。

1.1 液固两相流动模型

根据颗粒相处理的不同,可把研究流体-颗粒两相流动的计算流体力学方法分为两大类:即拉格朗日方法和欧拉方法。前者把颗粒相视为离散体系,而后者视其为与液体相一样的连续介质。鉴于前一类方法处理颗粒运动比较直观,颗粒与液体间相互作用可借助现有的流体力学知识获得,本文选择第一类方法来进行。

1.1.1 液体连续相控制方程组 假定竖直突扩管中的流体流动稳态、恒温。那么在二维圆柱轴对称坐标系下,描述流体流场的雷诺时均守恒控制方程组以及低雷诺数 $K-\epsilon$ 封闭模型^[2]可以写成以下通用形式:

$$\frac{\partial(\rho u \phi)}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r \rho v \phi)}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) + S_{\phi} + \langle S_{\phi}^p \rangle \quad (1)$$

其中 $\phi = u, v, K, \epsilon, m \dots$ 。此通用方程可以采用帕坦卡^[3]提出的 SIMPLE 算法进行数值求解。除颗粒源项 $\langle S_{\phi}^p \rangle$ 将在 1.1.7 节中给出外,方程(1)中其它各项的表达式见表 1。

其中 $\mu_t = c_{\mu} f_{\mu} \rho \frac{K^2}{\epsilon}, \mu_{eff} = \mu + \mu_t, S_c = \frac{\nu}{D_{AB}},$
 $\nu = \mu / \rho, D_{eff} = \frac{\mu}{\rho S_c} + \frac{\mu_t}{\rho \sigma_m}, G = \mu_t$
 $\left\{ 2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{v}{r} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right\},$
 $Re_y = \frac{\rho y \sqrt{K}}{\mu}, Re_T = \frac{\rho K^2}{\mu \epsilon}, f_{\mu} = [1 - \exp$

Table 1 Continuous - phase governing equations

ϕ	Γ_{ϕ}	S_{ϕ}
u	$\mu + \mu_t$	$-\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{eff} \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu_{eff} \frac{\partial v}{\partial r} \right)$
v	$\mu + \mu_t$	$-\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{eff} \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu_{eff} \frac{\partial v}{\partial r} \right) - \frac{2 \mu_{eff} v}{r^2}$
K	$\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}$	$G - \rho \epsilon$
ϵ	$\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\epsilon}}$	$\frac{\epsilon}{K} (c_1 f_1 G - c_2 f_2 \rho \epsilon)$
m	ρD_{eff}	0

$$(-0.0165 Re_y)]^2 \left\{ 1 + \frac{20.5}{Re_T} \right\}, f_1 = 1 + \left(\frac{0.05}{f_{\mu}} \right)^3,$$

$$f_2 = 1 - \exp(-Re_T^2).$$

1.1.2 流体相计算的边界条件

图 1 是计算采用的计算域和坐标系示意图,边界条件分别为:①入口 平均流体轴向速度 u_b 给定,入口处的流体轴向速度分布按光滑圆管中充分发展湍流流动的通用速度分布给定,而流体径向速度等于零。 $K = 0.005 u_b^2$ 和 $\epsilon = \frac{500 c_{\mu} K^2}{u_b d_{inlet}}$ 。根据 U. Lotz 等^[4]的取值,入口氧浓度为 $2.1 \times 10^{-4} \text{ mol/L}$ 。②出口 $\frac{\partial \phi}{\partial x} = 0 (\phi = u, v, K, \epsilon, m)$ 。③管轴 $v = 0, \frac{\partial \phi}{\partial r} = 0 (\phi = u, K, \epsilon, m)$ 。④与管轴平行的壁面 根据低雷诺数 $K-\epsilon$ 模型,取 $u = 0, v = 0, K = 0, \epsilon = \nu \left(\frac{\partial^2 K}{\partial y^2} \right)$ 。此外 $m = 0$ 。⑤突扩管后向台阶壁面 采用常规壁面函数(WF)法^[5]处理。

1.1.3 单颗粒运动方程 考虑惯性力、曳力、重力、浮力、附加质量和 Saffman 力而忽略其它作用于固体颗粒上的力(如 Basset 力、Magnus 力、颗粒间作用力等),则球形颗粒运动方程可表达为^[6]:

$$\frac{d \tilde{u}_{pi}}{dt} = \frac{\tilde{u}_i - \tilde{u}_{pi}}{\tau_p} + \left(1 - \frac{\rho}{\rho_p} \right) g_i + \frac{\rho}{2 \rho_p} \frac{d}{dt} (\tilde{u}_i - \tilde{u}_{pi}) + \frac{3.0844}{\rho_p d_p} \sqrt{\rho \mu} (\tilde{u}_i - \tilde{u}_{pi}) \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_k} \left| \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_k} \right|^{-1/2} (1 - \delta_{ij}) \delta_{ki} \quad (2)$$

其中,

$$\tau_p = \frac{4 d_p \rho_p}{3 \rho C_D |\tilde{u} - \tilde{u}_p|}, C_D = \begin{cases} 24 / Re_p & (Re_p < 1) \\ 24 \times (1 + 0.15 \times Re_p^{0.687}) / Re_p & (1 \leq Re_p \leq 1000), Re_p = \frac{d_p |\tilde{u} - \tilde{u}_p| \rho}{\mu} \\ 0.44 & (Re_p > 1000) \end{cases}$$

1.1.4 随机颗粒轨道模型 假定湍流各向同性且局部均匀、脉动速度分布满足 Gaussian PDF 统计分

布规律,那么流体脉动速度分量的随机取样可以描述为^[7]:

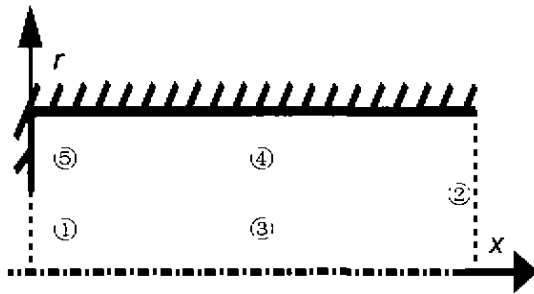


Fig. 1 Computation domain and coordinates

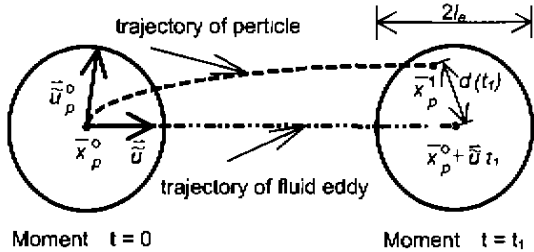


Fig. 2 Particle-eddy interaction model(from Graham^[8])

$$u' = \zeta_1 |\overline{u'^2}|^{1/2}, v' = \zeta_2 |\overline{v'^2}|^{1/2}$$

$$\text{且 } |\overline{u'^2}|^{1/2} = |\overline{v'^2}|^{1/2} = \left(\frac{2}{3} K \right)^{1/2} \quad (3)$$

为简单起见, ζ_1, ζ_2 取为服从标准正态分布且相互独立的两个随机变量. 于是, 结合 1.1.1 节中求得的 u 和 v 就可得到瞬态流体速度:

$$\tilde{u} = u + u', \tilde{v} = v + v' \quad (4)$$

随机颗粒轨道模型认为颗粒在湍流流体中的运动实际上是颗粒与一系列流体旋涡(每个流体旋涡对应着一个流体脉动速度取样)之间的相互作用过程. 图 2 示意性说明了常规颗粒-流体旋涡交互作用模型. 在某一次颗粒与流体旋涡交互作用开始时刻($t=0$), 在颗粒中心位置处生成一个中心与之相重的流体旋涡. 当颗粒与该流体旋涡交互作用进行到时刻 t_1 时, 流体旋涡和固体颗粒都将在空间上按各自的速度运动, 并保持相互作用, 直到时间 t_1 大于旋涡寿命 τ_e 或颗粒中心与流体旋涡中心之间的距离 $d(t_1)$ 大于流体旋涡尺度 l_e , 该颗粒才与该流体旋涡脱离相互作用, 同时在该颗粒新中心处的流体将按当地流体时均性质生成新的流体旋涡, 并从此开始下一次颗粒与流体旋涡之间的交互作用. 颗粒就是这样不停地和一系列流体旋涡发生交互作用, 直到运动到出口为止.

显然, 固体颗粒和单个流体旋涡之间的交互作用时间(τ) 应为流体旋涡寿命(τ_e)和颗粒在流体旋涡中的滞留时间(τ_r)两者之中的较小者, 即:

$$\tau = \min(\tau_e, \tau_r) \quad (5)$$

且 $\tau_e = l_e / \left(\frac{2}{3} K \right)^{1/2}, l_e = c_\mu^{3/4} K^{3/2} / \epsilon, \tau_r = l_e / |\tilde{u} - \tilde{u}_p|$. 但由于在采用式(5)时所得液固两相流冲刷破坏模拟结果和实验结果之间存在明显的差距, 本文采用了 Graham^[9]对常规颗粒-流体旋涡交互作用时间进行的修正:

$$t_{int} = \min(C_t \tau_e, \tau_r) \quad (6)$$

并取经验系数 $C_t = 0.4$.

为计算方便, 确定颗粒-流体旋涡交互作用时间所需流场性质(如 K, ϵ, \tilde{u} 及 \tilde{u}_p) 取颗粒和流体旋涡交互作用开始时刻颗粒中心位置处的值. 为提高计算精度, 颗粒中心位置处的 K, ϵ, u 和 v 分别用包含颗粒中心的相邻四个结点上的值对颗粒中心进行了插值.

1.1.5 颗粒运动方程的求解和颗粒轨道计算 假定在积分时间步长 $\Delta t (\Delta t \leq t_{int})$ 内, \tilde{u} 取时间步开始时刻的值, τ_p 取时间步开始和终了时刻的平均值, 并令:

$$\bar{a}_i = \frac{2\rho_p}{\rho + 2\rho_p} \left[\left(1 - \frac{\rho}{\rho_p} \right) g_i + \frac{3.0844}{\rho_p d_p} \sqrt{\rho\mu} (\tilde{u}' - \tilde{u}_{pi}) \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_k} \right]$$

$$\left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_k} \right)^{-1/2} (1 - \delta_{ij}) \delta_{ki}$$

$$\tau_p^* = \frac{\rho + 2\rho_p}{2\rho_p} \tau_p$$

则方程(2)的分析解可以表述为

$$\tilde{u}_{pi} = \tilde{u}_i - (\tilde{u}_i - \tilde{u}_{pi}^0) \exp \left\{ 1 - \frac{\Delta t}{\tau_p^*} \right\} + \bar{a}_i \tau_p^* \left\{ 1 - \exp \left[- \frac{\Delta t}{\tau_p^*} \right] \right\} \quad (7)$$

其中上标 0 表示积分时间步开始时刻的值. 值得提出的是, 由于 Saffman 作用力项中包含的流体瞬态速度梯度 $\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_i}$ 难以确定, 因此在文中作了简化处理, 认为 $\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_i} \approx \frac{\partial u_i}{\partial x_i}$.

利用式(7), 根据颗粒轨迹方程($\frac{dx_{pi}}{dt} = \tilde{u}_{pi}$) 可以得到颗粒在内 Δt 的位移:

$$\Delta x_{pi} = (\tilde{u}_i + \bar{a}_i \tau_p^*) \Delta t - (\tilde{u}_i + \bar{a}_i \tau_p^* - \tilde{u}_{pi}^0) \tau_p^* \left\{ 1 - \exp \left[- \frac{\Delta t}{\tau_p^*} \right] \right\} \quad (8)$$

并进而可以得到颗粒在 Δt 终了时的位置:

$$x_{pi} = x_{pi}^0 + \Delta x_{pi} \quad (9)$$

1.1.6 颗粒相计算的初始条件和边界条件

(1) 入口颗粒尺寸分布. 假定固体颗粒都是球

形的且直径相同。(2)入口颗粒速度分布。假定颗粒入口速度等于颗粒入口位置处的流体入口速度。(3)颗粒初始位置分布。假定颗粒入口位置(文中取为 5000)沿入口管半径均匀分布,在每个位置处又将颗粒分成一定数目(取为 10)的组数,各组颗粒沿着各自的轨道运动,而在每组颗粒内部的各个颗粒具有相同的性质(如速度等)。(4)颗粒相计算边界条件固体颗粒与流道壁面的碰撞视为完全弹性碰撞,采用全反射模型进行处理。另外,由于管轴是对称边界,所以也采用全反射模型进行处理。

1.1.7 颗粒源项的计算 考虑流体和颗粒间的双向耦合,颗粒对流体反作用采用 Crowe 等^[10]提出

$$\langle S_{pu} \rangle = -\theta \rho_p \left[\left(1 + \frac{\rho}{2\rho_p} \right) \left(\frac{d\tilde{u}_{pi}}{dt} \right) - \left(1 - \frac{\rho}{\rho_p} \right) g_i - \frac{3.0844}{\rho_p d_p} \sqrt{\rho \mu} \left[(\tilde{u}_j - \tilde{u}_{pj}) \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_k} \left| \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_k} \right|^{-1/2} (1 - \delta_{kj}) \delta_{ki} \right] \right] \quad (11)$$

其中 $\theta = \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \dot{n}_{p_{mn}} V_p \Delta t_{mn}}{\Delta V}$ 。如果时间步长 Δt 足够小,可以认为颗粒速度在 Δt 内线性变化,因此方程(11)中的导数项 $\frac{d\tilde{u}_{pi}}{dt}$ 可用差分项 $\frac{\Delta \tilde{u}_{pi}}{\Delta t}$ 来代替,而且 $\Delta \tilde{u}_{pi} = \tilde{u}_{pi}^1 - \tilde{u}_{pi}^0$ 。

流体湍流动能 K 方程和湍流动能耗散率方程中的颗粒源项可表示为^[14]:

$$\langle S_{pK} \rangle = \langle \tilde{u}'_{pi} S_{pu} \rangle = \langle \tilde{u}_{pi} S_{pu} \rangle - \langle \tilde{u}_{pi} \rangle \langle S_{pu} \rangle \quad (12)$$

$$\langle S_{pe} \rangle = C_3 \frac{\epsilon}{K} \langle S_{pK} \rangle \quad (13)$$

其中 C_3 为模型常数, $C_3 = 1.9$ 。

由于颗粒源项需要针对其所在的特定计算网格分别进行计算,所以需要确定颗粒轨道与网格界面的相交位置。为简单起见,所有方程的颗粒源项都先针对 SIMPLE 算法中的主控制容积进行计算,当所

$$Q = \begin{cases} m_p (\tilde{u}_p \sin \alpha - \tilde{u}_{cr}) [\tilde{u}_p \cos \alpha - 3(\tilde{u}_p \sin \alpha - \tilde{u}_{cr}/2)/2\sigma_s] & \alpha \leq 18.5^\circ \\ m_p (\tilde{u}_p \sin \alpha - \tilde{u}_{cr})^2 \cos^2 \alpha / (12\sigma_s \sin^2 \alpha) & \alpha \geq 18.5^\circ \end{cases} \quad (15)$$

其中 α 指颗粒冲击速度 \tilde{u}_p 与被冲击表面之间的夹角;对 304 不锈钢(0Cr18Ni9Ti)而言, $\sigma_s = 200$ MPa, $\tilde{u}_{cr} = 0.668$ m/s^[15]。

1.3 腐蚀模型

假定当前液固两相流动条件下 304 不锈钢的腐蚀速率受氧气传质控制而且固体颗粒冲刷导致材料表面不存在腐蚀产物层。由于采用了低雷诺数 $K - \epsilon$ 模型,所以求解通用方程(1)可以得到流体层流内

的颗粒源项(PSIC)法进行计算。不考虑相间质量和能量传递,相间动量传递产生于相间曳力。

为叙述方便,这里提出一个总体平均概念。以颗粒速度为例,有:

$$\langle \tilde{u}_{pi} \rangle = \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \dot{n}_{p_{mn}} P_{i_{mn}} \tilde{u}_{pi_{mn}} \Delta t_{mn}}{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \dot{n}_{p_{mn}} P_{i_{mn}} \Delta t_{mn}} \quad (10)$$

其中 $\langle \rangle$ 表示取总体平均,

$$P_{i_{mn}} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{u'_{min}}{\sqrt{2K_{mn}/3}} \right)^2 \right]$$

对其它物理量采用类似式(10)的定义,流体动量方程中的颗粒源项可表达为^[11-13]:

$$\sqrt{\rho \mu} \left[(\tilde{u}_j - \tilde{u}_{pj}) \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_k} \left| \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_k} \right|^{-1/2} (1 - \delta_{kj}) \delta_{ki} \right] \quad (11)$$

有颗粒轨道跟踪完之后,再分别对 u 和 v 的控制容积进行内插得到动量方程的颗粒源项。图 3 示意性给出了颗粒轨道与网格界面相交位置的确定方法。如果在某一时间步内颗粒从网格 (i, j) 内部运动到其外部并且当此时间步结束时颗粒落在图中的阴影部分之内,那么这个落点(如图中的“1”点)可以认为是所要求的交点。但是,如果 (i, j) 内颗粒在某一时间步内不仅运动到网格 (i, j) 之外,而且也落在阴影部分之外(如图中的“2”点),则需要减小此时间步,直到时间步终了时颗粒中心位置落在阴影内止。在下一时间步内该颗粒将在相应的相邻控制体内运动。值得指出,在计算中阴影部分面积取得足够小,可以认为已经与计算结果无关。

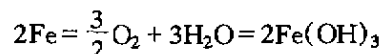
1.2 冲刷计算模型

固体颗粒对材料表面的冲刷破坏速率采用下述方程^[15]进行计算:

层内的氧气浓度分布,因而从流体主体向流道壁面的氧气传质通量可以采用 Fick 第一定律进行计算:

$$J_A = -D_{AB} \frac{d\rho_A}{dy} \quad (16)$$

在此基础上,利用以下的化学反应方程式可以求出不锈钢的腐蚀速率:



1.4 综合模型的求解过程

由于文中考虑了双向耦合作用,所以需要在流

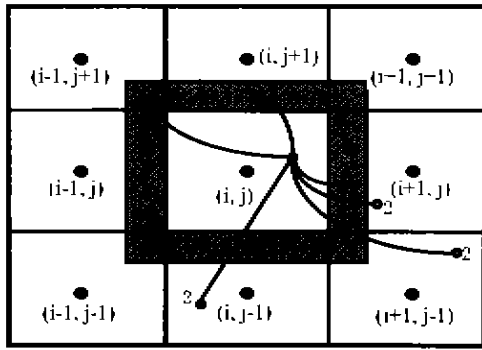


Fig. 3 Determination of intersecting point between particle trajectory and grid surface

体相计算模块和颗粒相计算模块之间进行外部迭代. 计算过程如下:

- (1) 用 SIMPLE 算法求解无颗粒单相液体时均流场, 得到 u, v, K 和 ϵ 等;
- (2) 分别从入口到出口跟踪给定数目的颗粒轨道并且计算各颗粒源项;
- (3) 用 SIMPLE 算法求解有颗粒源项的流体时均守恒控制方程组, 得到 u, v, K 和 ϵ 等;

(4) 判断是否收敛, 如果没收敛则返回步骤(2)重新计算, 如果收敛, 则转到步骤(5);

(5) 求解传质方程, 计算冲刷速率和腐蚀速率, 输出结果.

2 模拟结果

2.1 液固两相流动

首先, 我们用 Blatt 等^[16]的 LDA 测量数据以及 Nestic 和 Postlethwaite^[15]的模拟数据对本文的两相流动模型进行了验证. 模拟工况是竖直突扩圆管中的水-玻璃球两相流动, 详细计算条件见表 2 中的工况 1, 对比结果如图 4 所示. 从图 4a 和图 4b 可以看出, 在管中心线上以及距离壁面 2 mm 处, 不论是流体相的时均轴向速度还是颗粒相的平均轴向速度, 三组结果都吻合得相当好, 而且本文的模拟结果比 Nestic 和 Postlethwaite^[15]的模拟结果更接近于实测结果, 这主要是由于本文采用的计算网格数和计算颗粒轨道数都要比 Nestic 和 Postlethwaite^[15]所采用的要多. 从图 4c 和图 4d 可以看出, 对距离壁面 2mm 处的流体和颗粒径向速度而言, 本文的模拟结果和 Nestic 和 Postlethwaite^[15]的模拟结果吻合得相当好, 而且和实测结果也有中等程度的吻合. 因此,

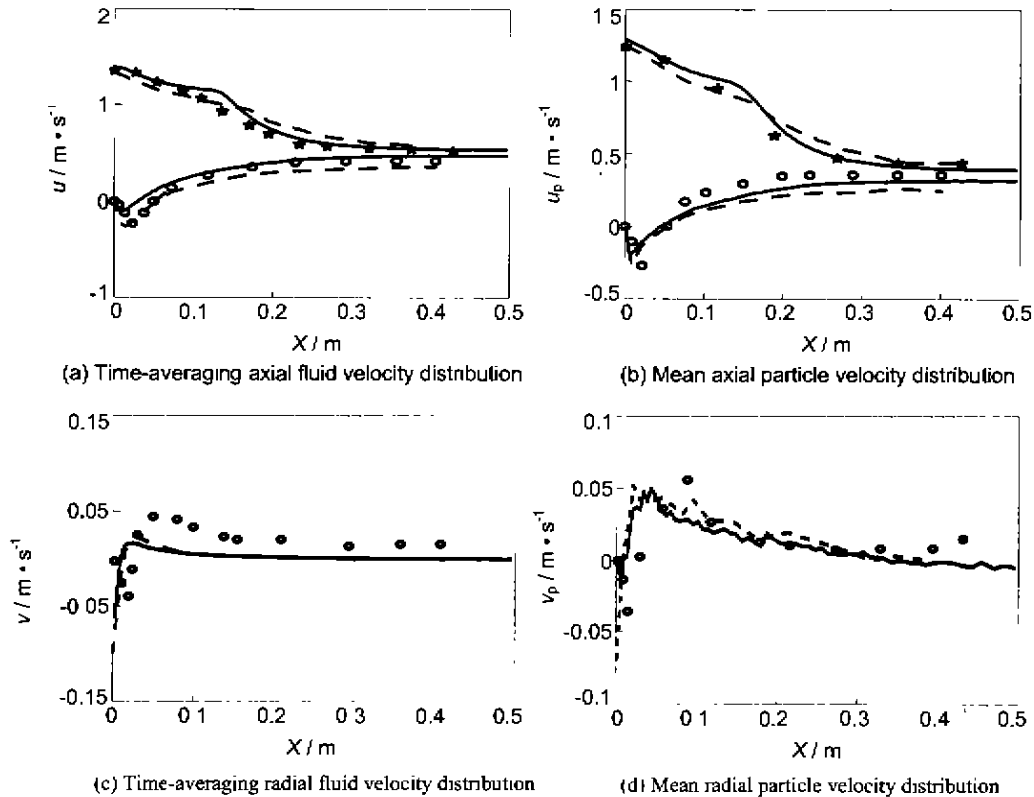


Fig. 4 Test of the liquid - solid two phase flow model
 ☆ Experiment results (centerline); ○ Experiment results (2mm from the wall);
 - - - Nestic & Postlethwaite's results; — Authors' results

Table 2 Computation conditions in a vertical suddenly expanded pipe

计算条件	工况 1	工况 2	计算条件	工况 1	工况 2
入口管内径/mm	26	21	出口管内径/mm	40	42
计算长度/mm	500	500	入口速度/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	1.14	13.2
出口速度/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	0.48	3.3	流体密度/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	983	996
流体粘度/ $\text{Pa}\cdot\text{s}$	4.79×10^{-4}	8.02×10^{-4}	颗粒直径/ μm	800	430
颗粒体积浓度/%	0.1	2.0	颗粒密度/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	2450	2650
入口雷诺数	3.7×10^4	3.4×10^5	出口雷诺数	2.4×10^4	1.7×10^5
x 方向上的网格数	70	70	r 方向上的网格数	40	47
颗粒入口位置数	2500	5000	计算颗粒轨道数	25000	50000
流体相收敛标准	1.0×10^{-9}	1.0×10^{-8}	外部迭代次数	15	15

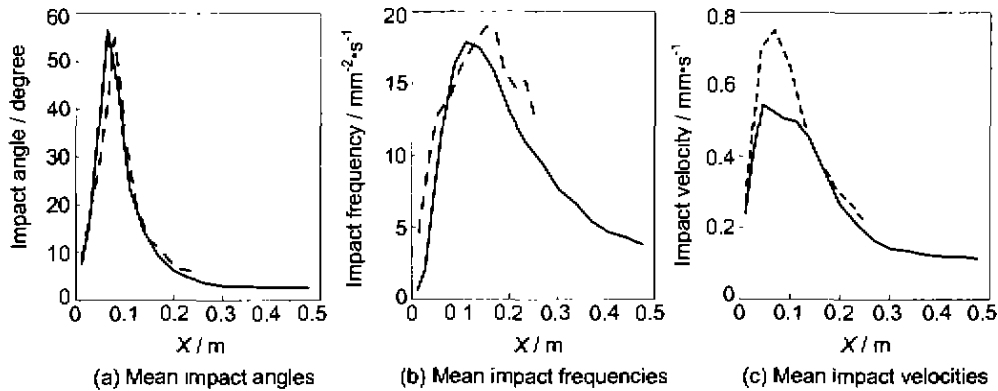


Fig.5 Mean impact properties of particles to the wall. — Authors' results; - - - Nestic & Postlethwaite's results

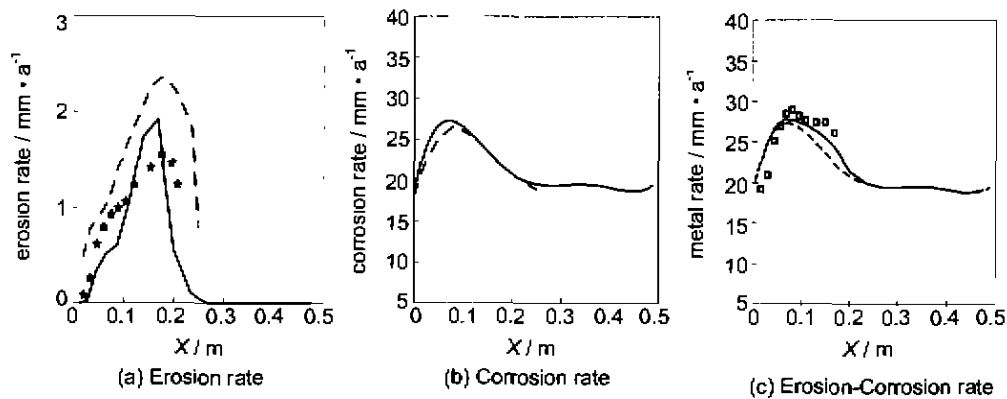


Fig.6 Waste rate of 304 stainless steel

★□ Experimental results, — Author's results, - - - Nestic & Postlethwaite's results

可以说明本文液固两相流动模型是基本上正确的。

2.2 冲刷和腐蚀

通过与 Nestic 和 Postlethwaite^[15]关于固体颗粒对流动壁面冲击作用性质以及冲刷腐蚀速率的模拟

结果以及(或)实测结果进行比较,对本文的液固两相流冲刷腐蚀过程综合模型进行了进一步验证。详细计算条件见表 2 中的工况 2。从图 5 可以看出,本文模型关于平均颗粒冲击角度(图 5a)和平均颗粒

冲击频度(图 5b)的计算结果与 Nescic 和 Postlethwaite^[15]的模拟结果相当一致,但两者关于平均颗粒垂直冲击速度的模拟结果之间有一定的差距,造成差距的原因在于本文颗粒—流体旋涡交互作用时间修正系数的确定带有一定的经验性,由于作者对 Nescic 和 Postlethwaite^[15]的模型细节不是完全清楚,所以这里无法对二者作进一步的比较.这里值得提出,尽管本文颗粒—流体旋涡交互作用时间修正系数的确定有一定的经验性,但同时能够说明颗粒—流体旋涡交互作用时间对本文模型的计算结果有较大的影响,是一个重要的模型参数^[17].在图 6a 中,除两条模拟得到的冲刷速率曲线之外,实验测定的冲刷速率也表示在其中,由图中可以看出,三者的吻合程度还是可以接受的.从图 6b 可以看出,关于腐蚀速率的两条模拟曲线吻合得相当好.本文模型计算得到的冲刷腐蚀速率以及实验测定结果在图 6c 中给出,图形表明本文的液固两相流冲刷腐蚀过程综合模型基本上是可行的.尤其是,在突然扩充区域内假定金属表面的腐蚀产物层完全被冲刷去除并且腐蚀受氧气传质控制是可以接受的.为了确定冲刷和腐蚀两者当中究竟谁是主要因素,图 6c 同时也给出了本文模型计算得到的腐蚀速率,可以看出,在当前的假设条件下腐蚀在冲刷腐蚀中占据着主要地位.

3 结论

文中构建了液固两相流冲刷腐蚀过程的综合数学模型,通过与文献中相关数据进行比较验证了模型的准确性和可行性.在当前模型中引入了经验系数 C_r ,其影响机理和通用性还有待于作进一步研究.在当前的流动状况下,假定金属表面的腐蚀产物层完全被冲刷去除以及腐蚀速率受氧气传质控制的基础上,腐蚀是材料损耗的主要因素.由于假设腐蚀产物被全部冲刷掉,腐蚀得到了最大的强化.

参考文献:

- [1] 郑玉贵,姚治铭,何莉等.材料科学与工程,1994,12(4):27
- [2] Lam C K G, Bremhorst K. Transactions of the ASME Journal of Fluids Engineering, 1981, 103:456
- [3] 帕坦卡,张政译.北京:科学出版社,1984,1989,1992
- [4] Lotz U, Postlethwaite J. Corrosion Science, 1990, 30:95
- [5] 陶文铨.数值传热学,西安:西安交通大学出版社,1988
- [6] Chen X Q, Pereira J C F. Int. J. Numer. Meth. Fluids, 1998, 26:345
- [7] Gosman A D, Ioannides E. AIAA paper 81-0323, June 1981
- [8] Graham D I, James P W. Int. J. of Multiphase Flow, 1996, 22:157
- [9] Graham D I. Int. J. Of Multiphase flow, 1996, 22:177
- [10] Crowe C T, Sharma M P, Stock D E. ASME Trans. J. Fluids Eng., 1977, 102:325

- [11] Chen X-Q, Pereira J C F. AIAA Journal, 1998, 36:539
- [12] Keh - Chin Chang, Wen - Jing Wu. Numerical Heat Transfer, Part B, 1994, 25:223
- [13] Durst F, Milojevic D, Shonung B. Appl. Math. Modellng, 1984, 8:101
- [14] Berlemont A, Desjonqueres P, Gouesbet G. Int. J. Multiphase Flow, 1990, 16:19
- [15] Nescic S and Postlethwaite J. Corrosion, 1991, 47:582
- [16] Blatt W, Kohley T, Lotz U et al. Corrosion, 1989, 45:793
- [17] 程学文.北京:北京化工大学硕士论文,1999

符号说明

- C_D —曳力系数
 c_r —修正系数
 c_{01}, c_1, c_2, c_3 —低雷诺数 $K - \epsilon$ 模型常数
 D —扩散系数, m^2/s
 d_p —颗粒直径, m
 f_{01}, f_1, f_2 —低雷诺数 $K - \epsilon$ 模型中的阻尼函数
 g —重力加速度, $9.81 m/s^2$
 J_A —氧气传质通量, $Kg/m^2 \cdot s$
 K —湍流动能, m^2/s^2
 l_c —湍流旋涡长度尺度, m
 M —穿过某网格的所有颗粒轨道数目
 m —氧质量分数
 m_p —颗粒质量, Kg
 \dot{n}_p —轨道上的颗粒数流率, $1/s$
 N —颗粒轨道穿过某网格所需积分时间步数
 P —概率密度
 p —压力, Pa
 Q —材料体积流失, m^3
 Re_p —颗粒雷诺数
 Re_y, Re_T —低雷诺数 $K - \epsilon$ 模型中的湍流雷诺数
 S_c —施密特数, $S_c = \nu/D$
 t —时间, s
 u_{cr} —临界颗粒冲击速度, m/s
 u, v —轴向、径向时均流体速度分量, m/s
 V_p —颗粒体积, m^3
 x, r —轴向和径向坐标, m
 y —距离壁面的距离, m
 Δt —积分时间步长, s
 ΔV —控制容积, m^3
 Δx —颗粒位移, m
 α —颗粒的冲击角度
 δ_{ij} —Kroneckel 符号
 ϵ —湍流动能耗散率, m^2/s^3
 μ —分子粘度, $Kg/m \cdot s$
 ν —运动粘度, m^2/s
 β —体积分数
 ρ —流体密度, kg/m^3
 $\sigma_k, \sigma_\epsilon, \sigma_m$ —低雷诺数 $K - \epsilon$ 模型中的常数
 σ_y —屈服强度, Pa
 τ_c —流体旋涡寿命, s
 τ, τ_p —时间, s
 τ_p —颗粒定性时间, s
 τ_r —颗粒在流体旋涡中的滞留时间, s
- Superscripts
 \rightarrow —向量
 \sim —瞬态值
 $\dot{\quad}$ —脉动值
 0 —积分时间步开始时刻
 1 —积分时间步结束时刻
- Subscripts
 eff —有效值
 $inlet$ —入口
 int —交互作用
 i, j, k —坐标轴 ($k = r$ 或 y)
 K —湍流功能
 m —穿过某网格的第 m 条颗粒轨道
 n — N 中的第 n 个时间步序
 p —颗粒相
 t —湍流
 w —壁面
 ϵ —湍流动能耗散率