

## Analysis of Solid Particles Wear Flowmeter Vibration Tube Based on CFD\*

REN Jianxin\*, ZHANG Lijun, XIONG Liang

(College of Automatic, Northwest Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** Trajectories of solid particles which flow through the vibration tube of flowmeter are irregular. The abrasion of tube is caused in collision of solid particles with the wall of the vibration tube. And the abrasion of the tube will affect the life of the flowmeter. The CFD software can analyse and calculate the abrasion of vibration tube by the collision of solid particles truly and effectively, and then predict the service life of vibration tube, which plays an important significance in engineering practice.

**Key words:** solid particle; vibration tube; viscosity; CFD; flowmeter

EEACC: 7210      doi: 10.3969/j.issn.1004-1699.2011.08.025

## 基于 CFD 的固体颗粒对流量计振动管的磨损分析\*

任建新\*, 张利军, 熊亮

(西北工业大学自动化学院, 西安 710072)

**摘要:** 流过流量计振动管的固体颗粒的轨迹是不规则的, 固体颗粒与流量计振动管内壁发生碰撞, 造成了振动管的磨损, 限制了流量计的使用寿命。利用 CFD 流体力学计算软件对管道流体所含固体颗粒对流量计振动管的磨损进行分析与计算, 预测流量计的使用寿命, 对工程实践有一定的指导意义。

**关键词:** 固体颗粒; 磨损; 粘度; CFD; 流量计

中图分类号: TH715

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2011)08-1208-04

由于流量计的测量精度受温度、压力、密度和粘度效应等因素影响小, 可测量多种介质、测量精度高的特点, 在石油、化工、天然气等领域得到广泛应用<sup>[1]</sup>。流量计测量的流体混合物中多数会存在固体或杂质固体颗粒, 固体对流量计振动管的冲刷磨损是一种常见现象, 是引起流量计测量精度降低和振动管破坏的主要原因之一<sup>[2]</sup>。计算流体力学 (CFD)<sup>[2-4]</sup> 以连续方程和 Navier-Stoke (N-S) 方程表示流体流动满足的质量守恒定律、动量守恒定律和能量守恒定律, 仿真管道的冲刷磨损部位和程度, 可以对管道的工作状态进行预判。

### 1 管道的磨损机理

固体颗粒对管道的磨损分为冲刷磨损 (或冲击磨损) 和撞击磨损两类<sup>[5]</sup>。固体颗粒以一定的速度和角度 (撞击角) 与管道壁接触的磨损称为冲刷磨损, 冲刷磨损<sup>[6]</sup> 或被定义为: 固体表面与含有固体粒子的流体接触作相对运动, 固体表面材料发生损耗。冲刷磨损

是由于固体颗粒撞击管道壁使得管道材料发生点蚀, 固体颗粒与管道壁之间的摩擦力移除管道壁的材料。固体颗粒与管道间的摩擦因素、固体颗粒与被测流体的速度、撞击角的大小及固体颗粒大小是影响冲刷磨损的主要因素。撞击磨损是通过固体颗粒对管道壁的撞击作用来移除管道材料的。相比之下, 撞击磨损的磨损量远小于冲刷磨损的磨损量。因此, 冲刷磨损是流量计振动管磨损的主要因素。

磨损率<sup>[5-6]</sup> 是衡量管道磨损厚度的标准。固体颗粒与管道壁面的撞击角大小、固体颗粒大小、固体颗粒与被测流体的速度是影响磨损率的主要因素。

撞击角是固体颗粒撞击管道壁面时的速度方向与撞击点切线方向的夹角<sup>[5]</sup>。如图 1 所示。

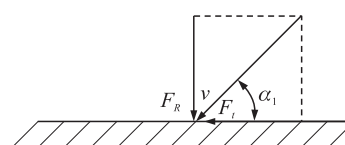


图 1 撞击角示意图

图 1 中,质量为  $m$  的固体颗粒以与材料表面成角度  $\alpha_1$  的速度  $\vec{v}$  撞击在材料表面,称  $\alpha_1$  为撞击角。图中  $F_R$ 、 $F_t$  分别为固体颗粒对材料表面的撞击力和切削力<sup>[6]</sup>,假设固体颗粒与材料表面的摩擦因子为  $\mu_m$ ,根据牛顿运动定律得

$$F_R = \mu_m \frac{d(m \cdot v \cdot \sin \alpha_1)}{dt} \quad (1)$$

$$F_t = \mu_m \frac{d(m \cdot v \cdot \cos \alpha_1)}{dt} \quad (2)$$

当  $F_R < F_t$ , 即  $\mu_m < \cot \alpha_1$  时,固体颗粒对材料表面的作用主要表现为犁削作用,对材料表面具有磨损作用;当  $F_R > F_t$ , 即  $\mu_m > \cot \alpha_1$  时,固体颗粒对材料表面的作用主要表现为垂直撞击作用,对材料表面的磨损作用较小,忽略不计。

## 2 流体流动控制及固体颗粒轨迹方程

基于 CFD 的固体颗粒对流量计振动管的磨损的计算原理是用流体流动连续性方程和 N-S 方程表示流体中固体颗粒满足的质量守恒定律、动量守恒定律和能量守恒定律,利用数值方法离散化这些微分方程,得到满足实际需要的近似解。

### 2.1 质量守恒方程

流体力学中,系统是某一确定流体质点的集合。流体所在的空间中,被流体边界包围,固定不动形状任意的空间体积称为控制体。包围空间体积的边界面称为控制面。在流场中,假设流体通过控制面  $A_1$  流入控制体,通过控制面  $A_2$  流出控制体。根据质量守恒定律,流入的质量与流出的质量之差等于控制体内部流体质量的增量,由此可得到流体流动时的质量守恒方程为

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_V \rho dx dy dz + \oint_A \rho \vec{v} \cdot n dA = 0 \quad (3)$$

式中: $V$  表示控制体, $A$  表示控制面。等式左边第一项表示控制体内部质量的增量;第二项表示通过控制面流入控制体的净通量。

若流体是不可压缩的均质流体,密度是常数,守恒方程为:

$$\partial u / \partial x + \partial v / \partial y + \partial w / \partial z = 0 \quad (4)$$

式中  $u, v, w$  为速度矢量  $\vec{v}$  沿  $x, y, z$  轴上的三个速度分量。

### 2.2 动量守恒方程

动量守恒是流体运动时应遵循的另一普适定律<sup>[3]</sup>。动量守恒定律表示对给定的流体系统,其动量的时间变化率等于作用在其上的外力总和。动量守恒方程也叫流体的运动方程或 N-S 方程。其微分

形式为

$$\begin{cases} \rho \frac{du}{dt} = \rho F_{bx} + \frac{\partial p_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial p_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial p_{zx}}{\partial z} \\ \rho \frac{dv}{dt} = \rho F_{by} + \frac{\partial p_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial p_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial p_{zy}}{\partial z} \\ \rho \frac{dw}{dt} = \rho F_{bz} + \frac{\partial p_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial p_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial p_{zz}}{\partial z} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $F_{bx}$ 、 $F_{by}$ 、 $F_{bz}$  分别是单位质量流体上的质量力在三个方向上的分量; $p_{yx}$  是流体内应力张量<sup>[7]</sup>的分量。

若流体的粘性是常数,式(5)变为

$$\rho d\vec{v}/dt = \rho \vec{F} - \text{grad} p + \frac{\mu}{3} \text{grad}(\text{div} \vec{v}) + \mu \nabla^2 \vec{v} \quad (6)$$

若流体的密度和粘性系数都是常数,式(5)变为

$$\rho d\vec{v}/dt = \rho \vec{F} - \text{grad} p + \mu \nabla^2 \vec{v} \quad (7)$$

从式(5)~式(7)可以看出 N-S 方程比较准确地描述了流体的实际流动。

### 2.3 固体颗粒运动轨迹

CFD 利用拉格朗日颗粒追踪算法追踪流过管道的固体颗粒、液滴和气泡的轨迹。固体颗粒在管道中流动时受到流体对它的拖拽力、梯度力、浮力和科氏力<sup>[8-9]</sup>。根据牛顿运动定律,固体颗粒的运动微分方程为

$$\vec{F} = m_p d\vec{V}_p/dt \quad (8)$$

$m_p$  是固体颗粒的质量, $V_p$  是固体颗粒的速度, $F$  是固体颗粒受到的合力,包括拖拽力、梯度力、浮力、质量力和科氏力。

## 3 CFD 对流量计振动管磨损的仿真

基于计算机的 CFD 流体计算技术,加快了流体控制微分方程、颗粒运动轨迹微分方程的求解速度,边界条件设置方便、快捷。在流体力学计算领域得到了快速的发展和广泛的应用。例如某化工厂制氢装置中的某型科氏质量流量计,流量计振动管出现管道磨损,利用 CFD 对此管道进行仿真分析。首先建立流量计的振动管模型<sup>[11-12]</sup>,并划分网格如图 2 所示。

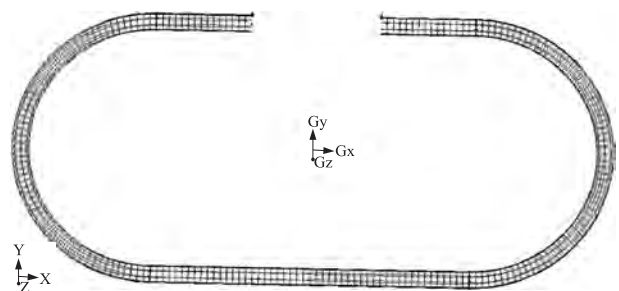


图 2 测量管管道的仿真模型

建立好实体模型之后,定义流体流动模型:氢气流体在管道中属于湍流<sup>[10]</sup>,因此选用CFD提供的标准k-ε模型。此模型忽略分子之间的粘性,流体为完全湍流,通过物理推导得到耗散方程,通过方程推导求解湍动能输运方程。标准k-ε模型的湍动能k和耗散率方程ε为

$$\rho \frac{dk}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M \quad (9)$$

$$\rho \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + G_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (10)$$

式中:G<sub>k</sub>是平均速度梯度产生的湍动能;G<sub>b</sub>是浮

力产生的湍动能;Y<sub>M</sub>可压缩湍流脉动膨胀对总的耗散率的影响;湍流粘性系数 $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$ 。

流体模型定义完成之后,在CFD中对氢气流体模型以及固体颗粒设置边界条件:所谓边界条件就是流体力学方程组在求解域的边界上,流体物理量应满足的条件<sup>[3]</sup>。氢气流体在管道中被固壁所限,流体将不应有穿过固壁的速度分量。固体颗粒对管道的磨损属于流固分界,对于粘性流体,流体粘附于固体表面,固体表面没有滑移,在固体边界上,流体在一点的速度等于固体在该点的速度,固体边界没有滑移。管道模型边界条件及参数设置如表1所示。

表1 基于CFD的ZLJC7型科氏质量流量计管道磨损分析参数表

$\rho_{wall}/(kg/m^3)$	$\rho_p/(kg/m^3)$	$d_p/\mu m$	$v/(m/s)$	$C/\times 10^{-6}$	$C_{1\varepsilon}$	$C_{2\varepsilon}$	$C_{3\varepsilon}$	$\sigma_k$	$\sigma_\varepsilon$
7 980	2 500	40	9	1.8	1.44	1.92	0.09	1.0	1.3

按照上文设置好参数之后,可以求解CFD中固体颗粒对管道的磨损率,磨损量<sup>[8]</sup>被定义为

$$R_{erosion} = \sum_{p=1}^{N_{particles}} \frac{\dot{m}_p C(d_p) f(\alpha) v^{b(v)}}{A_{face}} \quad (11)$$

式(11)中,C(d<sub>p</sub>)是与固体颗粒直径有关的函数,α是影响固体颗粒撞击管道壁路径的角度,f(α)是角度α的函数,v是固体颗粒的运动速度,b(v)是固体颗粒运动速度的函数,A<sub>face</sub>是固体颗粒撞击管道的表面积。

式(11)中参数α与f(α)的对应关系如表2所示。

表2 α与f(α)的对应关系表

α(弧度)	0	π/9	π/6	π/4	π/2	3π/4	5π/6	8π/9	π
f(α)	0	0.8	1	0.5	0.4	0.5	1	0.8	0

然后利用计算机求解,得到的流量计振动管磨损现象及现场该型流量计振动管被磨穿现象如图3所示。管道内部压力分布图如图4所示。提取在不同的流体速度下的振动管磨损率分布曲线如图5。

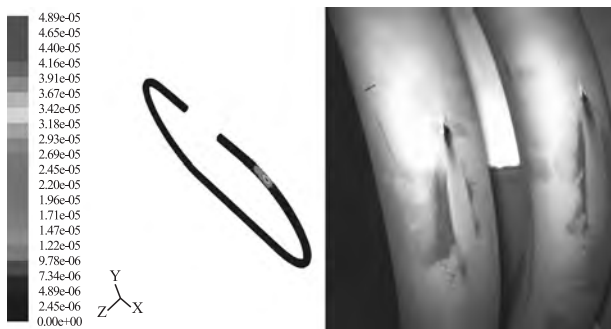


图3 流量计磨损率分布云图及现场磨损现象图

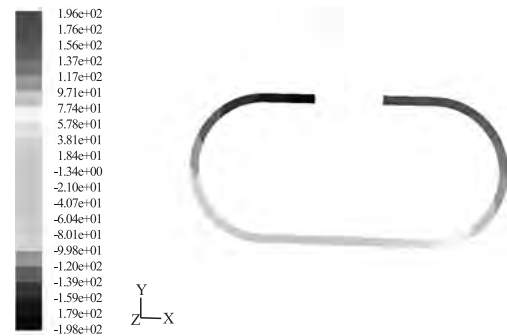


图4 流量计管道压力分布图

图3可以看出,通过CFD仿真出测量管道的冲刷磨损部位和现场流量计磨损位置是相符合的,因此可以利用仿真来预判流量计管道磨漏部位,用于管道在线故障预警。图4显示管道内部压力场分布,管道压力分布决定管道磨损部位,管道压力和固体颗粒的大小共同决定了管道磨损寿命。流体流速一定时,压力分布不变,固体颗粒大小和流量便对管道磨损寿命起决定性作用。

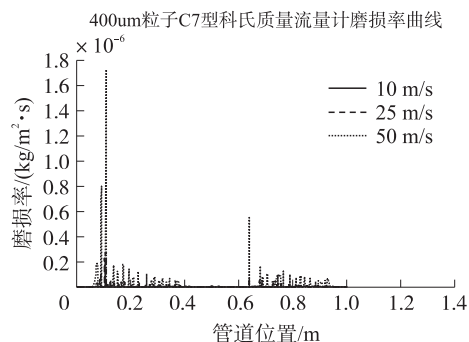


图5 流量计在不同速度下管道不同部位的磨损率分布曲线

图 3 中的现场磨损现象的工况为:该型流量计振动管内氢气的压强范围为 2 MPa ~ 3 MPa,温度为 40 °C,氢气的质量流量在 2 t/h,磨损流量计振动管的固体颗粒是制氢装置产生的某种粉尘。根据现场情况,利用基于计算机的 CFD 技术计算的数据如表 3 所示。

表 3 速度及颗粒质量对某型流量计使用时间的影响(按照长为 50 mm,宽为 20 mm 的方孔计算)

颗粒的大小/ $\mu\text{m}$	速度/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	颗粒质量/ $(\text{kg}\cdot\text{d}^{-1})$	磨损率/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	磨穿所需时间
40	10	3.46	$1.81\times 10^{-8}$	140 y
	10	34.6	$1.81\times 10^{-7}$	14 y
	25	3.46	$2.72\times 10^{-7}$	9.4 y
	25	34.6	$2.72\times 10^{-6}$	340 d
	50	3.46	$1.73\times 10^{-6}$	1.47 y
	50	34.6	$1.74\times 10^{-5}$	54 d

由表 3 的数据可以看出,流体的速度和固体颗粒的流量对管道的磨损使用寿命影响很大,为延长流量计使用寿命,可以限制流体流速和减少固体流量等有效措施。根据流量计所测量某种流体的具体状况,利用 CFD 仿真结果预判测量这种流体所使用流量计的使用年限,减少生产事故的发生。

### 3 总结

基于 CFD 的流量计振动管的磨损仿真,可以通过分析仿真结果预判管道易磨损部位和管道压力分布,有助于在线管道检测;也可用于流量计管型设计,对新型管道进行的模拟仿真,减少设计研究费用和周期。基于仿真得到的管道磨损率计算求得的管道使用寿命,可以更准确的预测生产使用不同状况的流量计的使用寿命,有助于在线故障预警。

#### 参考文献:

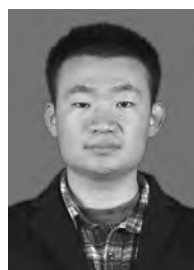
[1] 宋明刚,樊尚春. Coriolis 质量流量测量技术的发展综述[J]. 测

控技术,2000,19(10):1,2,9.

- [2] 黄勇,施哲雄,蒋晓东. CFD 在三通冲蚀磨损研究中的应用[J]. 化工装备技术,2005,26(1):65,66.
- [3] 江帆,黄鹏. FLUENT 高级应用与实例分析[M]. 北京:清华大学出版社,2008.
- [4] 韩占忠,王敬,兰小平. FLUENT 流体工程仿真计算实例与应用[M]. 北京:北京理工大学出版社,2010.
- [5] 郑有取,张新育. 90°方形弯管内颗粒冲蚀磨损研究[J]. 热力发电,2007,(4):34-37.
- [6] 孙家枢. 金属的磨损[M]. 北京:冶金工业出版社,1992.
- [7] 李开泰,黄艾香. 张量分析及应用[M]. 北京:科学出版社,2004.
- [8] Fluent Inc. FLUENT 6.3 User's Guide [EB/OL]. September 2006. <http://wenku.baidu.com>.
- [9] Jeremy K Edwards, Brenton S McLaury, Siamack A Shirazi. Modeling Solid Particle Erosion in Elbows and Plugged Tees [J]. Journal of Energy Resources Technology, 2001, 123:277-284.
- [10] 刘鹤年. 流体力学[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2006.
- [11] 王瑞金,张凯,王刚. Fluent 技术基础与应用实例[M]. 北京:清华大学出版社,2007.
- [12] 刘利平,黄万年. FLUENT 软件模拟管壳式换热器壳程三维流场[J]. 上海:化工装备技术,2006,27(3):54-57.



任建新(1968-),女,西北工业大学副教授,博士,中国航空学会测试专业委员会委员,现主要从事检测技术、惯性仪器及导航方面的研究,renjianxin@nwpu.edu.cn;



张利军(1986-),男,西北工业大学自动化学院在读研究生,主要研究方向为精密仪器及机械,wushengzhi4@163.com。