

# 流线型孔板流量计液固两相流冲蚀磨损数值模拟

蒋硕硕, 吴玉国, 杨鸿麟, 宋博, 刘萌

(辽宁石油化工大学 石油天然气工程学院, 辽宁 抚顺 113006)

**摘要:** **目的** 探究在管输液固两相流体时, 固体颗粒对孔板流量计造成的冲蚀磨损。**方法** 运用基于欧拉-拉格朗日算法的 DPM 模型, 对液固两相流体计量工艺中孔板流量计的冲蚀问题进行数值仿真, 预测孔板流量计在液固两相流体流量计量工艺中易发生冲蚀磨损的区域。探究入口液相速度、固体颗粒粒径以及等数量颗粒冲击壁面时, 固体颗粒粒径对孔板最大冲蚀速率的影响, 并对比管输液固两相流体时, 固体颗粒粒径对不同形状的孔板造成的冲蚀磨损速率大小。**结果** 在孔板流量计的突缩管段易产生严重的液固冲蚀失效, 最大冲蚀速率随着液相入口速度的增大而增加。当固体颗粒的质量流量相等时, 最大冲蚀速率随着颗粒粒径的增加而减小; 当单位时间内流经孔板的固体颗粒数量相等时, 冲蚀磨损速率随着固体颗粒粒径的增加而增大。在液固两相流管道体系中, 固体颗粒对凸型孔板造成的冲蚀磨损行为最弱。**结论** 大颗粒对孔板的冲蚀磨损比较严重, 在孔板计量过程中应严格注意。在流体中存在大量大颗粒时, 采用凸型孔板流量计能有效改善冲蚀磨损情况。

**关键词:** 冲蚀磨损; 液固两相流; 数值模拟; 孔板流量计; 预测

**中图分类号:** TG172.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)03-0153-06

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.03.025

## Numerical Simulation of Liquid/Solid Erosive Wear of Streamlined Orifice Plate Flowmeter

JIANG Shuo-shuo, WU Yu-guo, YANG Hong-lin, SONG Bo, LIU Meng

(School of Petroleum Engineering, Liaoning Shihua University, Fushun 113006, China)

**ABSTRACT:** The work aims to analyze erosive wear caused by solid particles on orifice plate flowmeter during transmission of liquid/solid fluid. DPM model based on Euler-Lagrangian algorithm was used to numerically simulate erosion of the liquid/solid orifice plate flowmeter in liquid/solid fluid metering process. Areas in which the orifice plate flowmeter was prone to erosive wear in liquid/solid fluid metering process were predicted. The effects of inlet liquid velocity and solid particle size (when equal number of particles struck the wall surface) on difform orifice plate were explored. Erosive wear rate on the difform orifice plate during transmission of liquid/solid fluid was compared. Severe liquid/solid erosion failure might appear in such pipe sections subject to sudden contraction on the flowmeter. The maximum erosion rate increased with the increase of inlet liquid velocity.

收稿日期: 2017-10-20; 修订日期: 2017-11-22

**Received:** 2017-10-20; **Revised:** 2017-11-22

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (51046002); 辽宁省教育厅科学研究项目 (L2015306)

**Fund:** Supported by the National Natural Science Foundation of China (51046002), Liaoning Provincial Department of Education Scientific Research Project (L2015306)

**作者简介:** 蒋硕硕 (1992—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为油气储运技术。

**Biography:** JIANG Shuo-shuo(1992—), Male, Master, Research focus: technical direction of the oil and gas storage and transportation.

**通讯作者:** 吴玉国 (1977—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为油气储运技术方向。

**Corresponding author:** WU Yu-guo(1977—), Male, Doctor, Professor, Research focus: technical direction of the oil and gas storage and transportation.

When mass flow rate of solid particles was equal, the maximum erosion rate decreased with the increase of particle size. When an equal number of solid particles of different particle size flowed through the orifice plate in unit time, erosion wear rate increased with the increase of solid particle size. For liquid/solid fluid flow metering process, the solid particles caused less erosive wear on convex orifice plate. Large particles will cause serious erosive wear on the orifice plate, hence it should be strictly noted in the orifice plate metering process. In case of plenty of large particles in the fluid, use of convex orifice plate flowmeter can effectively improve erosive wear.

**KEY WORDS:** erosive wear; liquid/solid flow; numerical simulation; orifice plate flowmeter; prediction

冲蚀磨损是管道系统面临的最严重失效情况之一,严重的冲蚀磨损甚至会造成管道泄漏失效。大量的实验及数值模拟结果显示在典型管件处(如弯管、T型管、盲通管、变径管及阀门等)易产生冲蚀磨损失效。在集输管道系统中,安装和使用孔板流量计会造成管径的变化。当流体中含有固体颗粒时,会使这种变径管产生严重的冲蚀磨损,从而导致孔板流量计产生形变,流量计出流系数发生改变,流量测量精度受到影响。因此,流量计的安装和使用造成的液固冲蚀问题应当得到足够重视。

为了研究各种参数对冲蚀磨损速率的影响,大量学者运用实验及数值模拟方法探究了管径突变处的液固冲蚀磨损问题。M. A. Habib 等人<sup>[1]</sup>运用数值模拟的方法探究了变径管处液固两相冲蚀问题,得到了入口液相速度、颗粒粒径及收缩比等参数对变径管处冲蚀磨损速率的影响。林哲等人<sup>[2]</sup>运用数值模拟的方法探究了固体颗粒对闸阀的冲蚀磨损问题,得到了入口主相速度和颗粒粒径大小对冲蚀速率的影响,并与实际工程中闸阀壁面的冲蚀磨损情况进行了对比,得到了良好的拟合效果。冯留海等<sup>[3]</sup>运用数值模拟方法探究了液固两相流对突扩突缩管段的冲蚀磨损情况,预测了冲蚀磨损发生的位置。Cheng J 等<sup>[4]</sup>运用实验及数值仿真方法探究了固体颗粒对突扩突缩管段的冲蚀磨损情况。除此之外,Y. NAGAYA<sup>[5]</sup>与 S. ZHOU<sup>[6]</sup>也探究了流体参数对变径管处冲蚀磨损行为的影响。

对于在差压型流量计计量液固两相流工艺中,固体颗粒对流量计冲蚀磨损的探究有:M. A. Nemitallah 等人<sup>[7]</sup>运用 DPM 模型探究了固体颗粒对孔板壁面产生的冲蚀磨损问题,获得了入口液相速度、固体颗粒粒径等参数对最大冲蚀速率的影响。A. A. Araoye 等<sup>[8]</sup>运用 DPM 模型对多个孔板流量计串联时,固体颗粒对孔板壁面产生的冲蚀磨损情况进行数值模拟探究,得到了入口液相速度、固体颗粒粒径等参数对最大冲蚀速率的影响,并比较了几个孔板处冲蚀磨损速率的大小。探究固体颗粒粒径对冲蚀磨损的影响,除了要考虑粒径本身变化外,还应考虑流经的颗粒数量<sup>[9]</sup>。然而,国内外学者进行液固两相流对孔板流

量计冲刷腐蚀数值模拟探究时,一般只考虑粒径本身变化的影响而忽视了流经管道的颗粒数量这一因素。

针对以上问题,笔者运用 DPM 模型对孔板流量计的冲蚀磨损问题进行了数值模拟探究:1)预测了固体颗粒在孔板壁面上的冲蚀位置,有利于综合现有的检测技术进行漏点检测,从而避免盲目检测导致的资源浪费;2)探究了入口流速、固体颗粒粒径对最大冲蚀速率的影响,同时,分析了等数量不同粒径的固体颗粒对孔板流量计最大冲蚀速率的影响,有利于探究液固两相流对变径管处的冲蚀磨损行为,并对油气开采和运输的安全进行提供了指导建议;3)与文献[10]中提出的几种孔板流量计计量液固两相流流量时发生的冲蚀磨损速率进行对比,得出了最优防冲蚀孔板,为管道结构优化及孔板流量计工艺改进提供相应的理论依据。

## 1 数值模拟及边界条件

### 1.1 几何模型及边界条件

经典孔板流量计的安装和使用易造成管径突缩,在孔板前出现死区,且固体颗粒冲击管道壁面的作用较强。本研究试图通过改变孔板的流通形式,采取特殊的流线型过渡,以减小冲蚀磨损速率。现有的孔板流量计改进模型如图 1 所示。其中,a、b、c、d 分别为标准孔板、加厚孔板、凹流线形孔板和凸流线型孔板。安装流量计的管道管径  $D$  均为 100 mm,流量计的开孔比例均为 1:2。数值计算中考虑湍流尺度效应,孔板上游及下游管段均选取为  $10D$ 。经计算,所有边界条件下的管内流体均为湍流状态。为了能够准确地计算固体颗粒对典型管件的冲蚀磨损,对流量计的各个壁面都进行加密处理,而沿流体流动方向的网格节点数较稀疏,这样可以节约计算资源,提高计算效率。

不同类型的孔板流量计内的多相流介质由油和固体沙粒组成。考虑理想状态,固体沙粒均为标准球体颗粒。多相流介质的组成及物性参数如表 1 所示。

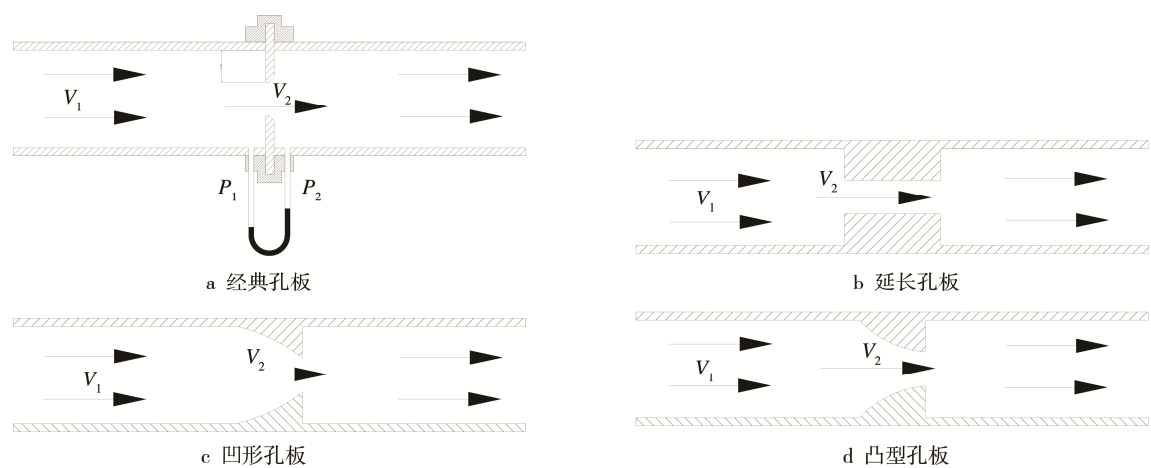


图 1 流线型孔板流量计几何模型

Fig.1 Geometric model of orifice plate flowmeter: a) classical orifice, b) extend orifice, c) concave orifice, d) convex orifice

表 1 多相流组成及物性参数  
Tab.1 Multi-phase flow composition and physical parameters

材料	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	黏度/(kg·m <sup>-1</sup> ·s)	颗粒粒径/μm	速度/(m·s <sup>-1</sup> )	质量流量/(kg·s <sup>-1</sup> )
油	960	0.002	—	4 ~ 12	—
沙粒	1500	—	100 ~ 400	10	0.5

1.2 计算模型

根据孔板流量计测量管道中流体流量时管道的运行工况、流体组成和介质参数等的变化情况，笔者选取 N-S 方程组、K-ε 模型以及冲蚀磨损模型对冲刷腐蚀行为进行数值求解。流体域选取 Velocity 入口和 Outflow 出口，壁面边界条件设置为无滑移边界。

标准 K-ε 方程如式（1—2）所示。

$$\frac{d(\rho k)}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_i}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k - \rho \varepsilon \tag{1}$$

$$\frac{d(\rho \varepsilon)}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_i}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + G_{le} G_k \frac{\varepsilon}{k} - C_2 \varepsilon \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \tag{2}$$

式中：G<sub>le</sub> 为 1.44，C<sub>2ε</sub> 为 1.92，σ<sub>k</sub> 为 1，σ<sub>ε</sub> 为 1.3。

影响壁面冲蚀速率的因素有很多，如粒子直径、粒子与壁面的冲击角、粒子相对速度、颗粒撞击壁面的表面积等。为了准确预测冲蚀信息，冲蚀预测模型应当尽量地包含更多的影响因素。本研究所运用的 DPM 模型考虑的影响因素具体描述为：

$$R_{erosion} = \sum_{p=1}^{N_{particles}} \frac{m_p C(d_p) f(\alpha) v^{b(v)}}{A_{face}} \tag{3}$$

式中：m<sub>p</sub> 为颗粒质量；C(d<sub>p</sub>) 为粒子粒径函数，选取 1.8 10<sup>-9</sup>；v 为相对粒子速度；b(v) 为粒子相对速度的函数，选取 2.6。α 为粒子路径与壁面的冲击角度；f(α) 为冲击角的函数。冲击角度的函数 f(α)

采用线性分段函数来描述，文献[11]通过激波脉冲式冲蚀磨损实验获得了典型钢材的冲蚀角度函数，当冲击角度 α 分别为 0°、20°、30°、45°、90° 时，壁面反弹系数分别为 0、0.8、1、0.5、0.4。A<sub>face</sub> 为颗粒撞击壁面的单元表面积。

由于固体颗粒和壁面碰撞的方程非常复杂，工程上定义了弹性恢复系数来表征颗粒与孔板壁面碰撞前后固体颗粒动量的变化。固体颗粒与孔板壁面的碰撞反弹情况如图 2 所示。

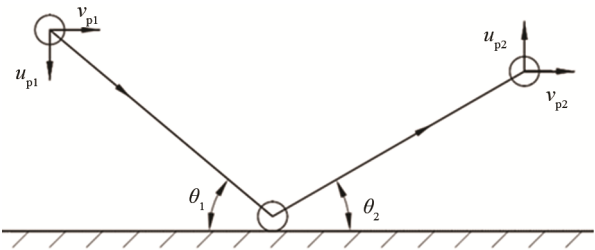


图 2 颗粒与壁面碰撞反弹示意图  
Fig.2 Schematic diagram of particle and wall collision rebound

弹性恢复系数为固体颗粒与孔板壁面碰撞后速度与碰撞前速度的比值。法向和切向反弹系数都等于 1，说明固体颗粒撞击壁面之后没有能量损失；法向反弹系数和切向反弹系数都等于 0，说明固体颗粒撞击壁面之后损失了所有能量。当颗粒撞击壁面后，颗粒会损失部分能量，并以低于冲击速度的速度以及一定反射角进行运动，这一现象用反弹系数来表征，反弹系数分为法向反弹系数和切向反弹系数，本计算中

反弹系数的定义如式(4—5)所示。

$$\varepsilon_N = 0.993 - 0.0307\alpha_1 + 4.75 \times 10^{-4}\alpha_2 - 2.61 \times 10^{-6}\alpha_3 \quad (4)$$

$$\varepsilon_T = 0.998 - 0.029\alpha_1 + 6.43 \times 10^{-4}\alpha_2 - 3.56 \times 10^{-6}\alpha_3 \quad (5)$$

式中:  $\varepsilon_N$  为法向反弹系数,  $\varepsilon_T$  为切向反弹系数。

## 2 数值分析与结果

### 2.1 入口液相速度对最大冲蚀速率的影响

入口液相速度对不同种类孔板流量计壁面最大冲蚀磨损速率的影响如图3所示, 颗粒粒径均为 350  $\mu\text{m}$ 。由图可知, 在孔板流量计安装的突缩段易产生冲蚀失效。这归因于在孔板流量计的收缩阶段, 固

体颗粒撞击孔板壁面导致运动轨迹发生突变, 固体颗粒切削壁面材料产生冲蚀磨损现象。随着速度的增大, 固体颗粒对不同种类孔板流量计造成的最大冲蚀速率和冲蚀磨损面积都呈现递增趋势。这与文献[12]所研究的结果相似。这主要归因于两个方面: 一是由于液体携砂过程中, 液固两相之间存在相互作用, 入口液相速度增大导致固体颗粒撞击管道壁面时以及从管道壁面反弹之后都具有更大的动量; 二是入口液相速度增大导致固体颗粒冲击孔板壁面的频率增大。

图4为不同结构的孔板流量计在相同速度条件下发生冲蚀磨损的对比曲线。如图所示, 在相同边界条件下, 固体颗粒对凹型孔板流量计壁面的冲蚀磨损速率最大, 对经典孔板流量计和延长孔板流量计壁面的冲蚀磨损速率次之, 对凸型孔板的最大冲蚀磨损率最小。

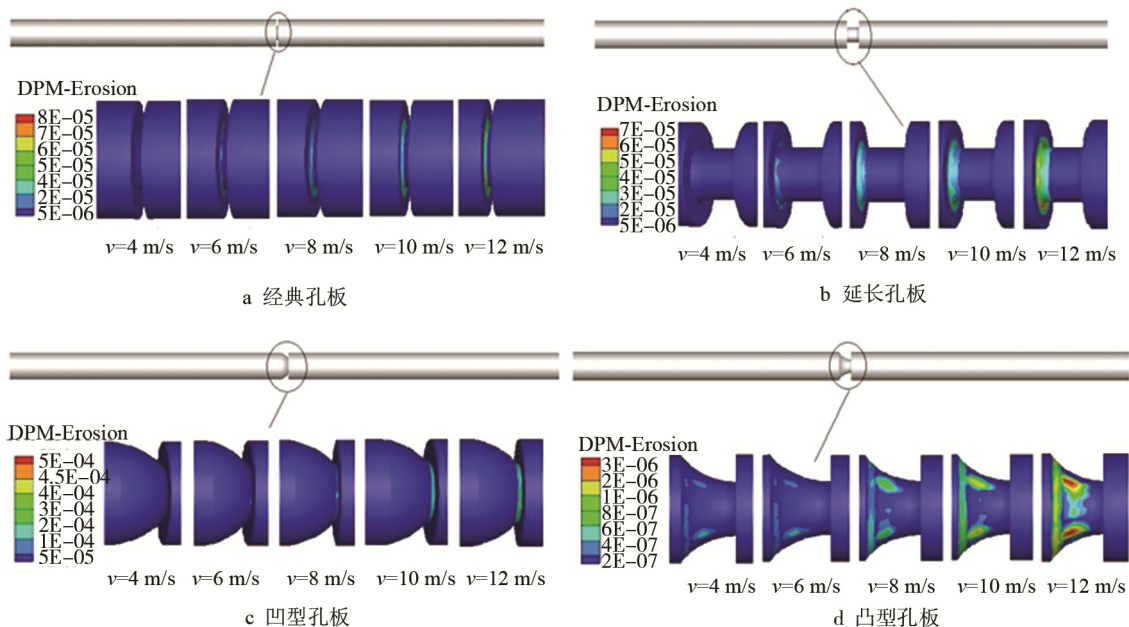


图3 相同颗粒直径下入口液相速度对最大冲蚀磨损率的影响

Fig.3 Effects of inlet liquid velocity on maximum erosion wear rate provided with same particle diameter: a) classical orifice, b) extend orifice, c) concave orifice, d) convex orifice

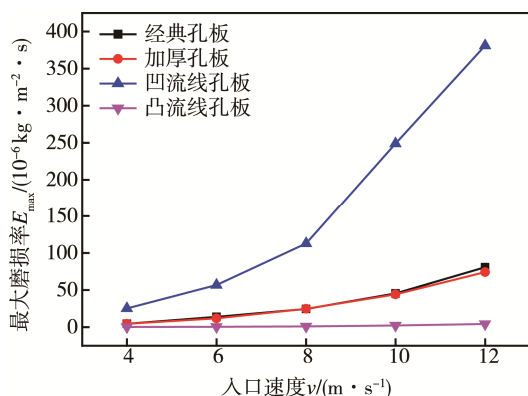


图4 相同速度下不同结构孔板流量计的冲蚀磨损速率对比曲线

Fig.4 Erosion wear rate of flowmeter with different structure orifice at the same velocity

### 2.2 颗粒粒径对最大冲蚀速率的影响

研究固体颗粒质量流量及入口液相速度一定时, 固体颗粒粒径对不同种类孔板流量计最大冲蚀速率的影响, 结果如图5所示。入口液相速度保持为 10 m/s, 固体颗粒粒径分别为 100、150、200、250、300、350、400  $\mu\text{m}$ 。在孔板流量计的收缩段易发生严重的冲刷腐蚀行为。随着固体颗粒粒径的增加, 液固两相流对不同种类孔板流量计管材的最大冲蚀速率均呈现下降趋势。这主要是因为一方面, 在固体颗粒质量流量相等的工况下, 颗粒粒径增大使撞击孔板壁面的固体颗粒数目减少; 另一方面, 粒子轨迹、冲击速度和冲击角度均受到颗粒粒径变化的影响<sup>[13]</sup>。这可以说明固体颗粒质量流量相等时, 流体中固体颗粒粒

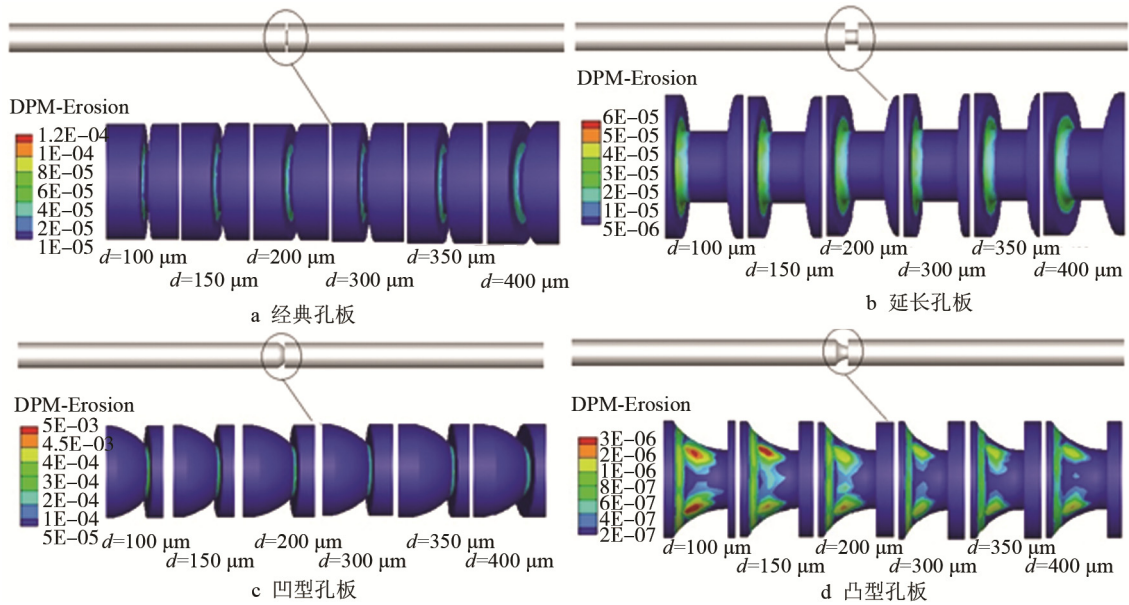


图 5 等质量流量时固体颗粒粒径对最大冲蚀磨损速率的影响

Fig.5 Effects of solid particle size on maximum erosion wear rate provided with same mass flow rate: a) classical orifice, b) extend orifice, c) concave orifice, d) convex orifice

径增加会使给定位置处的冲蚀磨损速率显著降低。

图 6 为等质量流量、不同粒径时不同结构的孔板流量计发生冲蚀磨损情况的对比曲线。图示可知，在相同边界条件下，固体颗粒对凹型孔板流量计壁面的冲蚀磨损速率最大，固体颗粒对经典孔板流量计和延长孔板流量计壁面的冲蚀磨损速率次之，凸型孔板所承受的最大冲蚀磨损量最小。

研究单位时间内流过孔板流量计的固体颗粒数目和入口液相速度一定时，固体颗粒粒径对不同类型孔板流量计最大冲蚀速率的影响，结果如图 7、8 所示。入口液相速度保持为 10 m/s，流经管道的颗粒数

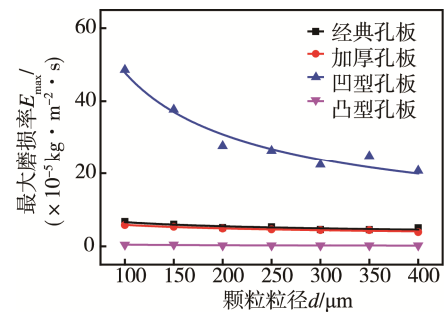


图 6 不同结构孔板流量计的冲蚀磨损速率对比曲线  
Fig.6 Relationship between different particle size and the maximum erosion rate provided with same mass flow rate

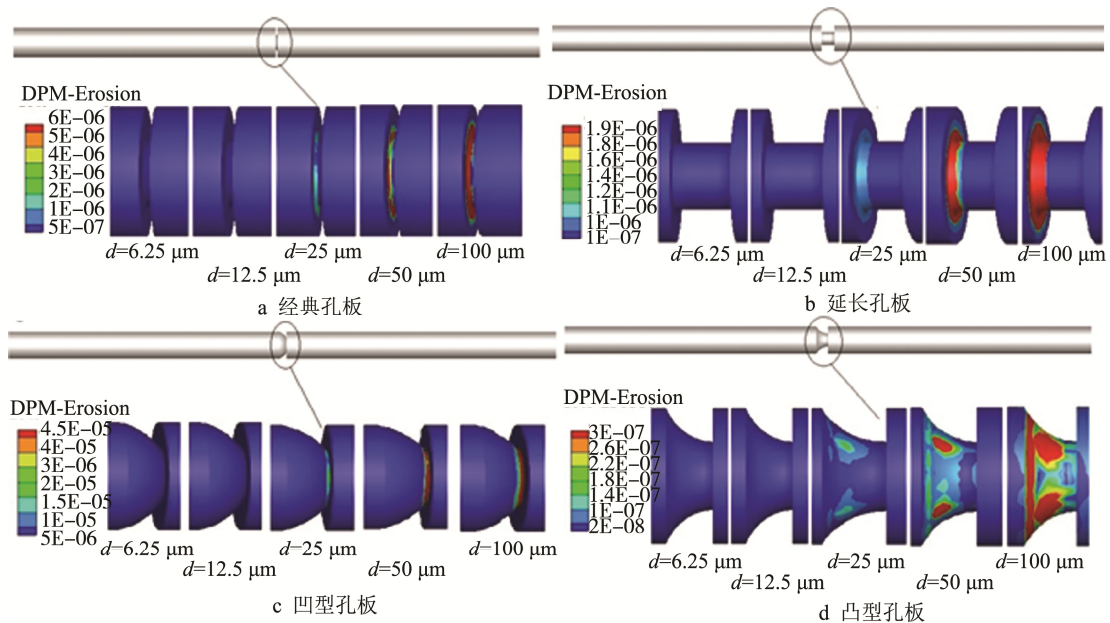


图 7 等数量时固体颗粒粒径对最大冲蚀磨损速率的影响

Fig.7 Effects of solid particle size on the maximum erosion wear rate provided with equal number of particles: a) classical orifice, b) extend orifice, c) concave orifice, d) convex orifice

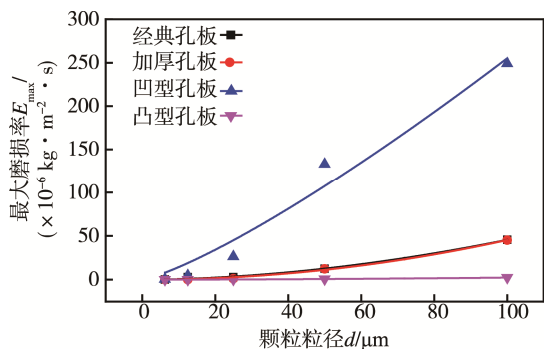


图8 等数量时不同粒径对不同结构孔板流量计冲蚀磨损速率的影响

Fig.8 Relationship between different particle size and the maximum erosion rate provided with equal number of particles

量为  $1.27 \times 10^9$  个/s, 固体颗粒粒径分别为 6.25、12.5、25、50、100  $\mu\text{m}$ 。结果显示, 当固体颗粒粒径  $< 12.5 \mu\text{m}$  时, 几种孔板的最大冲蚀速率均较小。此时, 液体携砂对孔板流量计的冲蚀量小, 并且随着固体颗粒粒径的增加, 磨损速率增加, 但是增加趋势较缓。而凹形孔板在固体颗粒粒径  $> 25 \mu\text{m}$  时, 冲蚀磨损速率急剧增加, 固体颗粒粒径 12.5 ~ 25  $\mu\text{m}$  为其冲蚀量加剧的临界区间。其余三种孔板虽未呈现这种临界区间的规律, 但随着粒径的增大, 冲蚀磨损速率也都呈增加趋势, 对节流设备的损害逐渐加重, 应采用可靠手段进行防范。此外, 在入口液相速度、质量流量及颗粒粒径相等时, 凹型孔板流量计的冲蚀磨损率最大, 经典孔板流量计及延长型孔板流量计的次之, 凸型孔板流量计的最小。

以上分析说明, 当单位时间内流经孔板流量计的固体颗粒数目相同时, 固体颗粒粒径增大导致固体颗粒的质量流量随之增大。因此, 固体颗粒的质量流量也是磨损的重要影响因素, 固相质量流量越大, 冲蚀磨损越严重。

### 3 结论

1) 孔板流量计在计量管道输送液固两相流时, 固体颗粒冲击管道壁面, 冲蚀现象易发生在孔板流量计的管道突缩位置。

2) 随着入口主相流体速度增大, 液体携砂对孔板流量计壁面造成的最大冲蚀速率增大。等质量流量时, 随着入口固体颗粒粒径增大, 液体携砂造成的最大冲蚀速率减小。

3) 管道输送的液体携带等数量固体颗粒冲击孔板流量计壁面时, 固体颗粒对孔板壁面造成的最大冲蚀速率随着固体颗粒粒径的增加而增大。

4) 在相同边界条件下, 固体颗粒对凹型孔板流量计壁面的冲蚀破坏最严重, 对经典孔板流量计和延长孔板流量计壁面的冲蚀破坏次之, 对凸型孔板的冲

蚀破坏最小。因此, 在固体颗粒质量流量增加以及粒径增大时, 采用凸型孔板流量计有利于减小冲蚀磨损对流量计的破坏。

### 参考文献:

- [1] HABIB M A, BEN-MANSOUR R, BADR H M, et al. Erosion and Penetration Rates of a Pipe Protruded in a Sudden Contraction[J]. Computers & Fluids, 2008, 37(2): 146-160.
- [2] LIN Z, RUAN X D, ZHU Z C, et al. Three-dimensional Numerical Investigation of Solid Particle Erosion in Gate Valves[J]. Mechanical Engineering Science, 2014, 228(10): 1670-1679.
- [3] FENG L, WANG J, MAO Y, et al. Numerical Simulation of Liquid-Solid Erosion in Sudden Expansion and Contraction Tube[J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 30(6): 1080-1085.
- [4] CHENG J, CAO Y, DOU Y, et al. Erosion of Water-based Fracturing Fluid Containing Particles in a Sudden Contraction of Horizontal Pipe[C]//Journal of Physics: Conference Series. [s. l.]: IOP Publishing, 2017, 916(1): 012017.
- [5] NAGAYA Y, MURASE M, MIZUYAMA S, et al. Evaluation of Incipient Cavitation Erosion on Pipe Walls Downstream from an Orifice[J]. Journal of Environment & Engineering, 2010, 5(2): 389-401.
- [6] ZHOU S. Numerical Simulation of Erosion in Different Diameter Ratio Sudden Contraction Pipe[C]//Advanced Material Science and Engineering (AMSE-2016) Proceedings of the 2016 International Conference. Shenzhen: [s. n.], 2016: 368-374.
- [7] NEMITALLAH M A, BEN-MANSOUR R, HABIB M A, et al. Solid Particle Erosion Downstream of an Orifice[J]. Journal of Fluids Engineering, 2015, 137(2): 021302-1-021302-11.
- [8] ARAOYE A A, BADR H M, AHMED W H, et al. Erosion of a Multistage Orifice due to Liquid-Solid Flow[J]. Wear, 2017, 390-391: 270-282.
- [9] 陈思, 王尊策, 吕凤霞, 等. 基于离散相模型的电潜泵叶轮磨损数值计算[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2015(3): 143-148.
- [10] CHEN Si, WANG Zun-ce, LYU Feng-xia, et al. Numerical Calculation of Particle Erosion within Electric Submersible Pump Based on Discrete Phase Model[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2015(3): 143-148.
- [10] 徐炜芳, 沈新荣, 潘康, 等. 一种流线型孔板流量计的研究[J]. 液压与气动, 2008(2): 34-36.
- [11] XU Wei-fang, SHEN Xin-rong, PAN Kang, et al. The Study of a New Streamline Orifice Meter[J]. Journal of Hydraulic and Pneumatics, 2008(2): 34-36.
- [11] 叶健. 煤液化管道材料冲蚀磨损试验与数值研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2013.
- [12] YE Jian. Study and Numerical Study on Erosion and Wear of Coal Liquefaction Pipeline[D]. Hangzhou: Journal of Zhejiang University of Science and Technology, 2013.
- [12] 曹学文, 胥锟, 彭文山. 弯管液固两相流冲蚀失效模拟分析[J]. 表面技术, 2016, 45(8): 124-131.
- [13] CAO Xue-wen, XU Kun, PENG Wen-shan. Simulation and Analysis of Liquid-Solid Two-phase Flow Erosion Failure in Pipe Bends[J]. Surface Technology, 2016, 45(8): 124-131.
- [13] NGUYEN V B, NGUYEN Q B, LIU Z G, et al. A Combined Numerical-Experimental Study on the Effect of Surface Evolution on the Water-Sand Multi-phase Flow Characteristics and the Material Erosion Behavior[J]. Wear, 2014, 319(1-2): 96-109.