

Progress in pressure drop of fluid in microchannels

Xiaohan YANG¹, Taotao FU^{1*}, Shaokun JIANG², Chunying ZHU¹, Youguang MA¹

1. State Key Laboratory of Chemical Engineering, Collaborative Innovation Center of Chemical Science and Engineering, School of Chemical Engineering and Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China
2. The 718th Research Institute of China Shipbuilding Industry Corporation, Handan, Hebei 056027, China

Abstract: From the perspective of the microchannel configuration, recent research progresses of pressure drop for fluids in constant cross-section microchannels, varying cross-section microchannels, and complex microchannels were reviewed. The research progress of Hagen–Poiseuille's law in straight microchannels was discussed. The effect of the variation of cross section of microchannels on the pressure drop was analyzed, and difficulties on the research on the pressure drop of fluids in microchannels with complex configurations were summarized. The influences of viscosity, slippage, characteristic scale and measurement methods on pressure drop were discussed. The results give insights into the construction of the prediction model of pressure drop of fluids in microchannels. The perspectives of this field were expected.

Key words: pressure drop; microchannels; viscosity; fluid flow

微通道内流体压力降研究进展

杨潇寒¹, 付涛涛^{1*}, 姜韶堃², 朱春英¹, 马友光¹

1. 天津大学化工学院, 化学工程联合国家重点实验室, 天津化学化工协同创新中心, 天津 300072
2. 中国船舶重工集团公司第七一八研究所, 河北 邯郸 056027

摘 要: 从微通道构型出发, 总结了恒定截面通道、变径通道、复杂通道内流体压降研究的最新进展, 介绍了哈根–泊肃叶定律用于恒定截面通道的研究进展, 提出了变径通道的截面变化对压降的影响, 总结了复杂构型微通道内流体压降研究的难点, 讨论了粘度、滑移、特征尺寸及其测量方式对压降的影响, 为构建压降预测模型提供了思路. 对该领域今后主要的研究方向进行了展望.

关键词: 压降; 微通道; 粘度; 流体流动

中图分类号: TQ021.1 文献标识码: A 文章编号: 1009-606X(2018)04-0680-09

1 前 言

微化工技术是化学工程学科逐渐兴起的一门新兴前沿技术, 集微机电系统设计思想和化学化工基本原理于一体^[1]. 与传统化工系统相比, 微化工系统内部通道特征尺度在数百微米级^[2], 具有比表面积高、传热传质速率高等优点, 具有广阔的应用前景. 许多国家对微化工技术研究投入了大量人力和物力, 芯片实验室^[3]和迷

你工厂^[4]概念的提出为新产品和新过程的开发提供了重要平台, 以微通道为单元的微反应器逐渐走向产业化^[5].

单相流是微化工技术研究的基础, 压降是反映流体流动性的重要参数之一. 国内外许多研究者将微通道的流体特性及压降原理用于提高石油采收率^[6]. 工程应用的基础设计和优化常需获得压降数据^[7], 在微通道内进行基础研究为解决工程问题提供了指导. 目前对微通道内流体压降特性的研究主要集中在均匀截面通道内两

收稿: 2017-12-07, 修回: 2018-01-18, 网络发表: 2018-04-28, Received: 2017-12-07, Revised: 2018-01-18, Published online: 2018-04-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 21576186; 91634105; 91434204); 天津市自然科学基金资助项目(编号: 17JCQNJC05300)

作者简介: 杨潇寒(1993-), 女, 山东省菏泽市人, 硕士研究生, 化学工程专业, E-mail: 13662033656@163.com; 付涛涛, 通讯联系人, E-mail: ttfu@tju.edu.cn.

引用格式: 杨潇寒, 付涛涛, 姜韶堃, 等. 微通道内流体压力降研究进展. 过程工程学报, 2018, 18(4): 680-688.

Yang X H, Fu T T, Jiang S K, et al. Progress in pressure drop of fluid in microchannels (in Chinese). Chin. J. Process Eng., 2018, 18(4): 680-688, DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.217406.

相流和牛顿流体的流动行为^[8]。微通道内流体压力降表达式与达西定律及哈根-泊肃叶方程一定程度上吻合良好。受流体物性(如剪切稀化)、通道构型(如复杂构型)及涂层物料结构等边界条件的影响,微通道内流体压力降表达式与哈根-泊肃叶方程存在一定偏差^[9-13]。对微化工应用中常涉及的非牛顿流体流动行为的研究极少。

本工作对恒定截面微通道内哈根-泊肃叶方程的研究进展进行了综述,探讨了变径通道和复杂通道内流体压降的研究现状,分析了通道构型对压降的影响,对影响压降的因素如粘度、滑移、特征尺寸的选择及测量方式进行了分析,为构建压降预测模型提供思路。

2 不同构型通道内流体流动压降

2.1 恒定截面通道内流体压降

泊肃叶定律(Poiseuille's Law)^[14]又称哈根-泊肃叶定律或哈根-帕醉方程,用于计算流体流经毛细管(0.015~0.6 mm,包括大部分人类毛细血管的尺寸)产生的压力损失,该方程在生理学的血液动力学和流变学中有重要应用。最常用的泊肃叶方程如下:

$$Q = \frac{\pi D^4 \Delta p}{128 \mu L}, \quad (1)$$

式中, Q 为流体流量(m^3/s), D 为毛细管直径(m), Δp 为压降(Pa), μ 为流体粘度($\text{Pa}\cdot\text{s}$), L 为毛细管长度(m)。该

式在进口段误差较大,不适用于低粘度、宽管、短管或流速较高的情况。国内外学者对微通道摩擦阻力^[15]的研究非常广泛,不同研究者得出的结论不同甚至互相矛盾。层流情况下圆管内流体流动的摩擦系数 f 与雷诺数 Re 乘积的理论值为 64, 理论值与实验值存在一定偏差(表 1), 表明目前没有一个通用准确的计算式可预测微通道内流体的压力降。将圆管中的泊肃叶方程直接应用于其它形状截面的微通道内会产生误差。考虑通道尺寸、相对粗糙度、通道形状及流体物性等因素,不同研究者所得结论不同。

研究者对泊肃叶方程进行了进一步推导, Cornish^[25]以 White^[26]的工作(只研究了湍流流动且通道深宽比范围有限)为基础,研究了深宽比为 1~40 的矩形横截面管道内水的层流流动,推导得到了矩形截面微通道中水以层流流动时流量 Q 与压降 p 及边长比的关系式:

$$Q = -\frac{4ab^3}{3\mu} \frac{dp}{dz} \left[1 - \frac{192b}{\pi^5 a} \left(\tanh \frac{\pi a}{2b} + \frac{1}{3^5} \tanh \frac{3\pi a}{2b} + \dots \right) \right]. \quad (2)$$

当微通道截面为正方形($a=b$)时得:

$$Q = -0.562 \frac{4}{\mu} \frac{dp}{dz}, \quad (3)$$

式中, a 为通道长度(m), b 为通道宽度(m), z 为通道高度(m)。

表 1 摩擦系数与雷诺数乘积理论值 $Re f_t$ 与实验值 $Re f_e$ 的关系

Table 1 The relationship between theoretical value $Re f_t$ and experimental value $Re f_e$

| Material | Shape | Fluid | $D_h/\mu\text{m}$ | Relationship of $Re f_e$ and $Re f_t$ | Ref. |
|------------------------|-----------|-----------------------|-------------------|---------------------------------------|------|
| Glass, silicon | Trapezoid | Nitrogen, water | 55~83 | $Re f_e > Re f_t$ | [16] |
| Stainless steel | Rectangle | Water | 133~367 | $Re f_e > Re f_t$ | [17] |
| Polyimide | Rectangle | Water | 128~521 | $Re f_e > Re f_t$ | [18] |
| Silicon | Circle | Nitrogen, water | 19~102 | $Re f_e < Re f_t$ | [19] |
| Aluminum | Rectangle | R134a | 112~210 | $Re f_e < Re f_t$ | [20] |
| PVC | Rectangle | R134a | 69~304 | $Re f_e = Re f_t$ | [21] |
| Glass, stainless steel | Square | Methanol, isopropanol | 15~150 | $Re f_e = Re f_t$ | [22] |
| Stainless steel | Circle | Water | 200~589 | $Re f_e = Re f_t$ | [23] |
| Glass | Circle | Water | 24~34 | $Re f_e = Re f_t$ | [24] |

White^[26]经实验验证推导出了矩形毛细管内单相流压力降关系式:

$$\Delta p = [fL/D_h + J] \frac{1}{2} \rho u^2, \quad (4)$$

式中, D_h 为毛细管的水力直径(m), J 是进出口损失因子, ρ 为流体密度(kg/m^3), u 为流体速度(m/s). fL/D_h 比矩形微通道出入口损失因子 J 大很多, J 在雷诺数 $Re < 2000$ 时可不考虑. White^[27]得出深宽比为 1 时出口损失因子 $J_{\text{exit}}=1$, Shah 等^[28]得出进口损失因子 $J_{\text{entry}}=1.3$.

以上推导均以推动力除以阻力表示压降:

$$Q = \frac{\Delta p}{R}, \quad (5)$$

式中, R 为流动阻力($\text{Pa}\cdot\text{s}/\text{m}^3$).

Fuerstman 等^[29]研究了微通道内单相流,提出了一种矩形通道内压力降模型:

$$\Delta p = \frac{a \mu Q L}{WH^3}, \quad (6)$$

式中, a 为无量纲参数,取决于矩形微通道的深宽比 W/H :

$$a = 12 \left[1 - \frac{192H}{\pi^5 W} \tanh \left(\frac{\pi W}{2H} \right) \right]^{-1}. \quad (7)$$

对于 $W/H < 1$ 的矩形管道, $Re < 1000$ 时, 式(6)误差小于 0.26%.

Henrik 等^[30]基于泊肃叶方程, 根据 Morris 等^[31]的工作结果, 推导出几种不同形状截面的压力降方程, 见表 2, 与 Fuerstman 等^[29]得到的公式结构类似. $H=W$ 时误差为 13%, $H=W/2$ 时误差为 0.2%.

表 2 不同截面形状的通道压力降方程

Table 2 Pressure drop equation of microchannels of different cross-section shapes

| Different geometric shape | Pressure drop equation |
|---------------------------|---|
| Oval | $Q = \frac{\pi}{4\mu L} \frac{a^3 b^3}{a^2 + b^2} \Delta p$ |
| Triangle | $Q = \frac{a^4 \sqrt{3}}{320\mu L} \Delta p$ |
| Rectangle | $Q = \frac{h^3 \omega \Delta p}{12\mu L} \left[1 - \sum_{n, \text{odd}} \frac{1}{n^5} \frac{192}{\pi^5} \frac{h}{\omega} \tanh\left(n\pi \frac{\omega}{2h}\right) \right]$ |

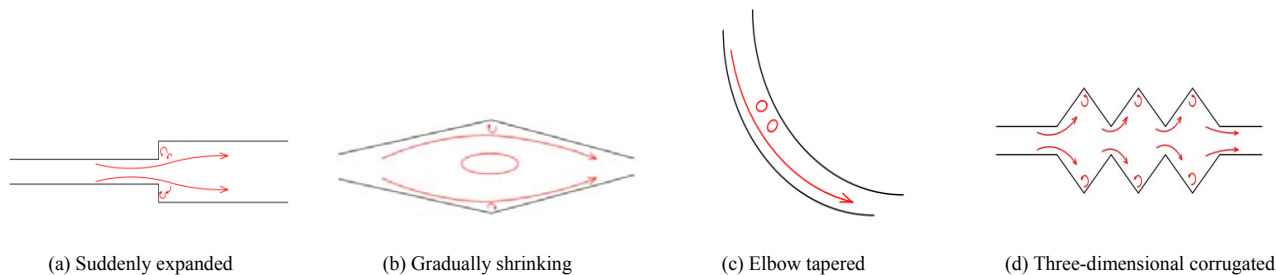


图 1 变径通道示意图

Fig.1 Schematic illustration of the variation of cross section of microchannels

渐扩管内外侧压力不同, 内测流体流向外侧, 形成反向漩涡流动, 出现二次流, 局部压降很大. 微混合器中局部漩涡有利于流体混合. 局部阻力系数^[50]计算如下:

$$\zeta = \frac{\lambda}{8 \sin(\theta/2)} [1 - (A_1/A_2)^2] + k [1 - (A_1/A_2)]^2, \quad (9)$$

式中, ζ 为局部阻力系数, λ 为摩擦因子, θ 为渐扩管的角度($^\circ$), 系数 k 与 θ 有关.

在非均匀通道内确定流体平均流速和管道水力直径有困难, 用泊肃叶方程计算的压降与测量值的偏差较大, 需对泊肃叶方程进行修正.

目前国内外对变径通道内压降的研究很少, 大部分研究针对突缩突扩、渐缩渐扩变径通道内流体流动过程的压降. Akbari 等^[33]研究了聚敛发散通道内的流体流动, 基于椭圆截面建立了压降模型. Duryodhan 等^[34]以去离子水为工作介质研究了质量流量、微通道水力直径、长度和收敛角等对压降的影响. 渐缩通道压降测量示意图如图 2^[34]所示, 图中 W_i 为入口宽度(m), W_o 为出口宽度

2.2 变径微通道内流体压降

变径微通道存在于无阀微型泵和微混合器等微型装置中, 对变径通道进行研究有助于微型装置的设计及优化. 流体流经均匀截面通道已有广泛研究, 但对不均匀截面微通道内流体流动研究较少. 截面不均匀性导致流体流动过程出现倒流、漩涡、不连续等现象, 如图 1 所示. 突扩型通道中流体在流动过程中遇到管道截面突然变化, 不能立即适应通道形状产生局部紊流, 这种紊流由漩涡产生, 造成阻力增大. 李卓等^[32]采用缝隙测压法测量了内径 0.33~0.58 mm 的小通道内突然扩大的局部阻力特性, 得出突缩处局部阻力系数预测式:

$$K_c = 0.5(1 - \sigma^2)^{0.75}, \quad (8)$$

式中, K_c 为突缩局部阻力系数, σ 为小截面面积 A_1 与大截面面积 A_2 之比.

(m), $W_{L,m}$ 为平均最大宽度(m), $W_{b,m}$ 为平均最小宽度(m), H_s 为斜边长度(m), H 为通道高度(m), α 为收敛角度($^\circ$). 通过数值分析得出压降与质量流量呈非线性关系, 与水力直径的平方和发散角度成反比. 考察几何构型对压降的影响对变径通道的研究是突破性进展, 为微反应器的性能改进提供了依据.

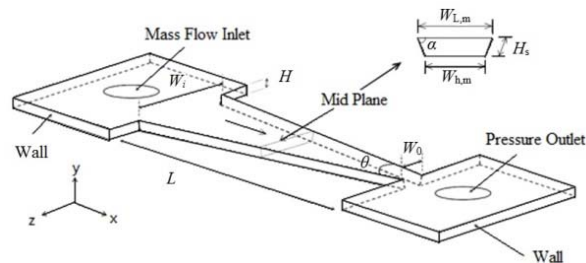


图 2 渐扩通道压降测量示意图^[34]

Fig.2 Schematic illustration of measurement of pressure drop in a converging microchannel^[34]

变径通道特殊的几何构型对流体流动特性及压降有一定影响. Dominic 等^[35]研究了去离子水在一系列波

浪分散的微通道中的压降特性,测量的压降比恒定横截面的波浪通道减小 30%~38%。流体流经波浪分散通道时部分动能转化成压力能量,增加了静压能,最终导致压降降低。Singhal 等^[36]用 Fluent 软件对渐缩渐扩通道的压降和速度进行模拟,得出渐扩管长度等于渐缩管长度时有最小压降。变径通道的构型为流体流动过程的减阻了提供一条有效途径。López-Aguilar 等^[37]通过实验和模拟对比研究了 Boger 流体(粘度恒定的弹性流体)在突缩通道中的压降,考虑收缩-扩张流动中的额外压降,模拟结果与实验结果一致,通过选择合适的外延黏性时间尺度 λ_D 可获得最大压降。

Carrier 等^[38]在卡特彼勒混合器(图3由8个长2400 μm 的混合单元组成,截面连续扩大或缩小,平均直径为1200 μm)中考察了 Carbopol940 和聚丙烯酰胺溶液的摩擦因数。由于在连续扩大缩小的通道中黏弹性流体聚丙烯酰胺溶液具有伸展性,当广义雷诺数 $Re_{PL} > 0.01$ 时,摩擦因数大于常规值,存在额外压降:

$$\frac{\Delta p_{ve}}{\Delta p} = f(De) = 1 + \left(\frac{\lambda_{ve}}{t_p} \right)^b, \quad (10)$$

式中, Δp_{ve} 为额外压降(Pa), De 为狄波拉数, λ_{ve} 为流体的有效粘度特征时间(s), t_p 为过程特征时间(s)。



图3 卡特比勒混合器示意图^[38]

Fig.3 Schematic illustration of a split-and-recombine Caterpillar micromixer^[38]

2.3 复杂构型通道内流体压降

目前流体流经多孔介质的研究已应用于碳封存、环境污染物流输及石油燃料的设计等。多孔介质为有孔固体物质,由于形状复杂,路径曲折,直径、长度和方向多变,通道内流体流动特性和流动压降不同。流体在多孔介质中的流动具有随机性,直接研究较困难,通常采用取平均值或定义特征长度等方法简化。

Darcy 实验观察到多孔介质中流体流动的基本规律为

$$\frac{Q}{A} = K \frac{\Delta h}{L}, \quad (11)$$

其中, A 为流通截面积(m^2), Δh 为压头差值(m), L 为流动长度(m), K 为水力传导率(m/s), 与流体性质及孔隙结构有关。Darcy 定律的微分形式为 $Q/A = q = -K dp/(\mu dX)$, 该式表明通过多孔介质不规则通道的流体流量表达式与哈根-泊肃叶定律形式相同, 为多孔介质中流体流动的 N-S 方程提供了依据。可假定多孔介质由一系列不同直径的弯曲毛细管组成(图4), 毛细管间的空间组成实心框架, 在多孔介质截面图上, 孔的分布呈非均质性^[39]。当与复杂流体的剪切增稠、变薄流动、截断效应、时间依赖性机制、限制和吸收效应等耦合时, 多孔介质内部流体流动特性的建模是一个巨大的挑战。多孔介质中流体流动的基本定律—达西定律需修正。

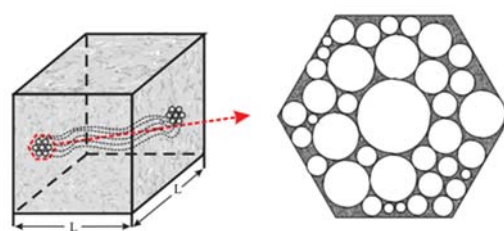


图4 多孔介质结构示意图^[39]

Fig.4 Schematic illustration of porous media^[39]

多孔介质下的达西定律通常忽略流体配置等微观细节,相应模型极度简化。Armstrong 等^[40]研究了有节点的网状结构通道,利用快速 X 射线显微镜观察孔隙尺度下的不相溶流动,发现在多相流中流体连通性的作用不可忽视。相对渗透率是无量纲数,取决于其它无量纲量如饱和度、欧拉特性或毛细管数,目前的研究正在探索流体连通性、拓扑结构与流动行为间的耦合关系。Zami-Pierre 等^[41]采用计算流体动力学研究了聚合物溶液在 8 种形状的网状结构(包括砂岩结构、现实的几何和拓扑特征的结构)中的非线性效应,发现非线性效应与流量关系不大,且控制流动模式的主要机制是流动的几何收缩,用 $l_{eff} = k_0^{1/2}$ (k_0 为渗透性)表示有效长度,用于描述多孔介质中的其它非线性效应,实现从线性(达西定律)到二次阻力(非线性达西定律)的过渡。Rezaei Niya 等^[42]基于多孔结构的特征将不同通道的压降结合用于评估整体压降,指出基于一个通道周围边界的长度估计流线的平均长度可获得误差小于 10% 的通道压降,分析了平行通道、停滞点流动和台阶流内的压降损失,获得了多孔介质的整体压降。

3 微通道内压降的主要影响因素

流体流动形态按流动状况可分为层流和湍流。由于微尺度效应,微通道内的流体流动形态与常规管道区

别很大,通常为层流。微通道内的层流可大致分为库埃特流动和泊肃叶流动^[43]。库埃特流动由边界流动产生剪切力带动流体在微通道中流动,是最简单的牛顿流体流动形式,通常出现在聚合物成型工艺中;泊肃叶流动由外部压差或压力推动使流体在管道中层流流动,在日常生活中常见,如人体血液流动、毛细管或多孔介质中的流体流动。

3.1 粘度

粘度表现为层流液体间的相对阻力,主要来源于分子间的范德华力。牛顿流体的粘度只与温度有关,常用乌式毛细管粘度计测量。泊肃叶定律是毛细管粘度计测量粘度的基础。在一定的管径和比压降条件下,流体粘度可通过测量流量确定。利用泊肃叶定律可求得流体粘度的表达式^[44]:

$$\mu = \frac{\pi D^4 \Delta p}{128 Q L} \quad (12)$$

特殊构型管道可作为流体粘度及流变测量设备。Livak-Dahl 等^[45]开发了液滴式粘度计,即在恒定的压力下测量液滴通过突缩处的速度得到粘度,但需复杂计算和校准。Li 等^[46]开发了一种简单的油包水连续粘度计,能测量牛顿和非牛顿型流体的粘度,且消耗的样品体积很小,粘度计由产生液滴的聚焦通道和测量液滴粘度的窄通道构成。

非牛顿流体的粘度与剪切应力相关,符合幂律模型的非牛顿流体用式(13)计算粘度:

$$\mu = k \gamma^{n-1}, \quad (13)$$

式中, μ 为表观粘度(Pa), γ 为剪切速率(m/s), k 为流体的稠度系数或幂律系数(N·s/m²), n 为流体的流动特性指数。

剪切变稀流体用 Carreau 模型^[47]计算粘度:

$$\frac{\mu - \mu_\infty}{\mu_0 - \mu_\infty} = [1 + \lambda \gamma]^{(n-1)/2}, \quad (14)$$

式中, μ 为溶剂粘度(Pa·s), μ_∞ 为剪切速率无穷时的粘度(Pa·s), μ_0 为剪切速率为零时的粘度(Pa·s), λ 为时间常数(s), λ 和 γ 由流变数据回归得到, n 为流体流动特性指数。

流体的流变性质由可编程流变仪或旋转气缸粘度计测定,一般的商业流变仪的剪切速率仅为 10^3 s^{-1} ,而微通道中剪切速率可高达 10^6 s^{-1} ^[48]。Tang 等^[49]指出聚丙烯酰胺溶液在不锈钢通道中的摩擦阻力大于传统值,原因是电黏性效应及流变学测量的不准确性。Sun 等^[50]研究了聚丙烯酰胺基阴离子和去离子水配制的 FR 溶液在微米圆形微通道内的流动行为,用达西定律简化表观粘度的计算公式 $\mu = (dp/dL)_{\text{FR}} / (dp/dL)_{\text{DIwater}}$, 剪切速率选择壁

面处的最大剪切速率 $\gamma_w = 4Q/(\pi R^3)$, 得出了表观粘度与剪切速率的关系曲线(图 5)。剪切速率从 10^4 s^{-1} 增加到 10^6 s^{-1} , 表观粘度从 $1.84 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 下降到 $1.02 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$, 与其它聚合物相比, 剪切稀化作用非常轻微。对于图中大部分剪切速率, 表观粘度在直径 104.06 和 52.25 μm 的微通道中比在直径 26.29 μm 的微通道中高约 20%, 表明表观粘度与微通道尺寸有关。

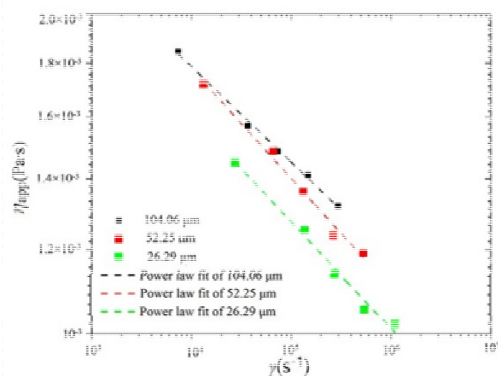


图5 圆形通道内剪切速率与表观粘度的关系^[50]
Fig.5 Shear rate impact on apparent viscosity in circle microchannels^[50]

综上所述,管道内流体流变特性与表观剪切速率关系十分密切。由于管道内存在剪切速率分布,所以也存在粘度分布,用表观粘度表征流体特性需定义表观剪切速率,可得出特定管道内表观粘度与剪切速率特征值的关系曲线。这种工程意义上的流变曲线与流变仪所测流变曲线存在差别,是微通道内流体流动中非均匀剪切速率所致。微通道内流体流变特性及表观粘度有待进一步研究,进而为压降预测模型的建立提供指导。

3.2 滑移

目前滑移对压降的影响容易忽略。滑移是指在切应力的作用下,流体在壁面处的速度不为零。对于不同的流动区域,所建模型不同,需引入克努森数 K_n 将流动分类:

$$K_n = \lambda/L, \quad (15)$$

式中, λ 为分子平均自由行程, L 为定性尺度。

$$\lambda = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{\mu}{\rho \sqrt{RT}}. \quad (16)$$

根据 K_n 将流动分为以下类型^[51]: (1) $K_n \leq 10^{-3}$ 为连续介质区,分子间的平均自由程远小于特征尺寸 L ,分子间的碰撞几率远高于分子与壁面间的碰撞几率,流动看作连续流动; (2) $10^{-3} \leq K_n \leq 10^{-1}$ 时为滑移流,需考虑分子平均自由程的影响,分子对壁面的碰撞使气体在壁

面附近流动速度发生变化,存在速度滑移现象.此时的流动仍为连续流动,但需考虑滑移的影响;(3) $10^{-1} \leq K_n \leq 10^3$ 时为过渡流,流动处于过渡状态;(4) $K_n \geq 10^3$ 时流动为自由分子流.

克努森数趋近于 0 时,采用欧拉方程描述流体; $K_n < 0.001$ 时,可采用无滑移边界条件的纳维-斯托克斯方程.哈根-泊肃叶方程证明了壁面不滑移假设的合理性,即流体相对于固体边界表面的速度为 0.这主要是由于泊肃叶实验的流体为牛顿型流体.大部分研究者假设微通道内流体流动可忽略滑移^[52,53].对于某些非牛顿型流体,壁面滑移意义重大^[54].常采用 Navier 边界层条件定义液固表面滑移长度:

$$b = \nu_s / \gamma_w, \quad (17)$$

其中, b 为滑移长度(m), ν_s 为滑移速度(m/s), γ_w 为速度梯度(m/s).

结合耐压微细加工技术和高性能粒子图像测速装置,Nghe 等^[55]首次测量了 $1 \mu\text{m}$ 分辨率的滑移长度.Cuenca 等^[56]使用平行通道(图 6)描述流体在纳米通道中的流动,2 个平行微米通道由纳米通道相连,微米通道高度为 $10 \sim 40 \mu\text{m}$,纳米通道高度为 $180 \sim 4500 \text{ nm}$,在微通道进出口位置安装压力调整器施加不同压力, P_0 是进口压力, P_1 , P_2 分别是左和右微米通道的出口压力, L 为微米通道总长度, L_i 是 i 处距出口的长度.相对于微米通道,流体在纳米通道中的流动贡献忽略不计,在微米通道上的压力梯度均匀.利用 $\Delta P_i = (P_2 - P_1)(L - L_i)/L$ 计算 i 处的压降,由 $\sigma_w = \Delta p / 2L$ 计算 σ_w .滑移速度分布通过追踪剂速度和垂直位置判断,根据滑移速度和粘度的关系直接计算滑移长度 b :

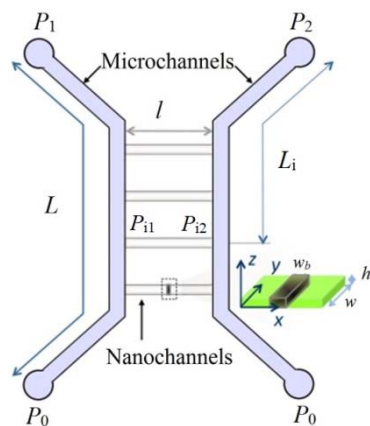


图 6 平行通道示意图^[56]

Fig.6 Schematic illustration of parallel microchannels^[56]

$$b = \nu_s \mu / \sigma_w. \quad (18)$$

当微通道尺寸降低到微米以下,聚丙烯酰胺溶液的有效粘度降低,定量对比表明通道尺寸在微米级以下时滑移长度降低,这是由于链的迁移在有限几何尺寸中被限制,即有限的几何尺寸影响滑移.

Wang 等^[57]以耗散粒子动力学(DPD)模拟方法研究纳米通道中的流体流动,结果表明由于固体与液体的相互作用不可忽略,流动可分为具有密度和粘度波动的不均匀区域和具有恒定整体性质的松散区域.通道尺寸对不均匀区域的影响不大,滑移是不均匀性存在的原因.

3.3 特征尺寸的选取

哈根-泊肃叶方程是以圆形截面为基础推导所得.对非圆形截面管道通常取几何平均直径为管道直径.大部分研究者采用水力直径作为管道的特征尺寸.当管道截面为矩形时,当量直径 $D_h = 2WH/(W+H)$.对于非圆形截面通道,微通道特征尺寸的选取对压降模型的建立格外重要^[58].Bahrami 等^[59]提出对于恒定的流体性质和固定流速,泊肃叶数仅是横截面几何参数的函数,并给出了矩形、椭圆、梯形截面压降的表达式.该模型利用面积的平方根作特征长度,优于传统水力直径.Akbari 等^[60]在变截面微通道内层流单相流的压降计算中引入新的无量纲数(雷诺数和横截面几何参数的函数),指出横截面的周长可作为合适的特征尺度,并将模型计算结果与文献中矩形横截面的压降实验数据进行了对比验证.Duryodhan 等^[34]通过平均积分法,取距最窄位置为总长度 $1/3.6$ 处的水力直径作为渐缩通道的特征尺寸,这种选取原则有助于将传统泊肃叶方程与变截面微通道压降预测关系式建立联系.

3.4 测量方式

微通道中压降测量方式主要有两种:在微通道进出口的大尺度连接管上布置压差传感器和直接在微通道上开孔安装压力传感器.由于管径较小、开孔困难且影响流体流动,大部分研究者多选择第 1 种方式测压后计算,进出口的局部压降仍通过传统方法扣除^[61].有些研究者甚至忽略进出口压力或局部阻力,影响了压降预测的准确性.Abdelall 等^[62]在突然收缩的通道内,通过外推压力曲线量化突然收缩位置的总压力变化,测出水的收缩损失系数为 0.5.此方法不适用于微通道.李卓等^[32]以去离子水和氮气为工作介质,在水平圆形微通道中采用缝隙取压和小孔取压的方式研究单相摩擦阻力特性,发现缝隙取压方式优于小孔取压方式.在进行压降测量时需选择合适测量方式以确保结果的准确性.

4 结语与展望

从微通道构型出发,总结了恒定截面通道、变径通道、复杂通道内流体压降研究的最新进展,得到以下几点认识:

(1) 由于微尺度效应,微通道内流体的压降实验值与哈根泊肃叶方程的预测结果存在一定偏差。一般采用推动力比阻力的形式及形状阻力系数的思路对其进行修正,提高模型预测的精确度。对于变径微通道,目前的研究大多集中于突缩、突扩、渐缩渐扩通道内的流体的流动行为。变径通道的特殊构型造成漩涡、二次流等。当通道内为非牛顿流体时,复杂流动现象与流体流变性相互影响。研究特殊通道构型对压降的影响能为微装置的开发利用提供依据。复杂构型通道内流体压降的研究是目前难点和热点,由于通道形状复杂,路径曲折,常定义特征长度或有效长度来简化模型,相关工作能为微流体在生物、医学和石油等领域的应用提供理论依据和指导。

(2) 研究影响压降的因素可为建立压降模型提供思路。微通道流动中的非均匀剪切场导致非牛顿型流体粘度呈现复杂性,增加了过程压降预测值与特征粘度表达的难度。研究微通道内压降为流体粘度的测量提供了一种新的途径。对于非牛顿型流体在微通道中的流动,则不能忽略滑移,滑移对压降的影响比较复杂,尚未形成统一认识。水力直径对压降的影响主要体现在特征尺寸的选取上。对于非圆形截面,常用面积的平方根作为特征尺寸。其次,测量方式的选择影响压降测量的精确度需进一步改进。

参考文献:

- [1] 陈光文. 微反应技术研究进展 [C]//中国化工学会橡塑产品绿色制造专业委员会, 中国化工产业发展研究院, 中橡联合工程技术研究院. 中国化工学会橡塑产品绿色制造专业委员会微通道反应技术研讨和产业化推进会论文集. 2016: 15-23.
Chen G W. Research progress of micro-reaction technology [C]//National Institute of Chemical Rubber Products Green Manufacturing Committee, China Chemical Industry Development Research Institute, China United Rubber Institute of Engineering Technology. China chemical industry association of rubber and plastics products green manufacturing committee micro-channel reaction technology seminar and industrialization proceedings. 2016: 15-23.
- [2] 程世萌, 邓朝俊, 何雄元, 等. 微液滴制备及其在静止流体中的浮升过程 [J]. 过程工程学报, 2016, 16(3): 388-393.
Cheng S M, Deng Z J, He X Y, et al. Preparation of micro-droplets and its floating process in quiescent fluid [J]. Chin. J. Process Eng., 2016, 16(3): 388-393.
- [3] Sinton D. Energy: the microfluidic frontier [J]. Lab. Chip., 2014, 14(17): 3127-3134.
- [4] Benson R S, Ponton J W. Process miniaturization—a route to total environmental acceptability? [J]. Trans. Ind. Chem. Eng., 1993, 71(7): 160-168.
- [5] 骆广生. 微化工技术—面向中国制造 2025 [C]//中国化工学会. 2015 年中国化工学会年会论文集. 2015: 2651-2678.
Luo G S. Micro-chemical technology—made in China 2025 [C]//Chemical industry and engineering society of China. Chinese Chemical society annual conference proceedings in 2015. 2015: 2651-2678.
- [6] Sumanasekara U R, Azese M N, Bhattacharya S. Transient penetration of a viscoelastic fluid in a narrow capillary channel [J]. J. Fluid Mech., 2017, 830: 528-552.
- [7] 袁志国, 刘慧军, 刘有智. 气流剪切错流旋转填料床气相压降特性 [J]. 过程工程学报, 2017, 17(2): 237-242.
Yuan Z G, Liu H J, Liu Y Z. Gas Phase pressure drop characteristics of gas flow shear cross-flow in rotary packed bed [J]. Chin. J. Process Eng., 2017, 17(2): 237-242.
- [8] 马友光, 付涛涛, 朱春英. 微通道内气液两相流行为研究进展 [J]. 化工进展, 2007, 26(8): 1068-1074.
Ma Y G, Fu T T, Zhu C Y. Research progress of gas and liquid two phase flow in microchannels [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2007, 26(8): 1068-1074.
- [9] Mala G M, Li D, Werner C, et al. Flow characteristics of water through a microchannel between two parallel plates with electrokinetic effects [J]. Int. J. Heat Fluid Flow, 1997, 18(5): 489-496.
- [10] Pfund D, Rector D, Shekarriz A. Pressure drop measurements in a micro-channel [J]. AIChE J., 2000, 46(8): 1496-1507.
- [11] Jovanovic J, Zhou W, Rebrov EV, et al. Liquid-liquid slug flow: hydrodynamics and pressure drop [J]. Chem. Eng. Sci., 2011, 66(1): 42-54.
- [12] Groisman A, Enzelberger M, Quake S R. Microfluidic memory and control devices [J]. Science, 2003, 300(5621): 955-958.
- [13] Bodiguel H, Beaumont J, Machado A, et al. Flow enhancement due to elastic turbulence in channel flows of shear thinning fluids [J]. Phys. Rev. Lett., 2015, 114(2): 028302.
- [14] Suter S P, Skalak R. The history of Poiseuille's law [J]. Annu. Rev. Fluid. Mech., 1993, 25(1): 1-20.
- [15] Su H, Niu H, Pan L, et al. The Characteristics of pressure drop in microchannels [J]. Ind. Eng. Chem. Res., 2010, 49(8): 3830-3839.
- [16] Wu P Y, Little W A. Measurement of friction factor for flow of gases in very fine channels used for microminiature Joule-Thomson refrigerators [J]. Cryogenics., 1983, 24(8): 273-277.
- [17] Peng X F, Peterson G P, Wang B X. Frictional flow characteristics of water flowing through rectangular microchannels [J]. Exp. Heat Transfer., 1994, 7(4): 249-264.
- [18] Pfund D, Rector D, Shekarriz A, et al. Pressure drop measurements in a microchannel [J]. AIChE J., 2000, 46(8): 1496-1507.
- [19] Yu D, Warrington R, Barron R, et al. An experimental and theoretical investigation of fluid flow and heat transfer in microtubes [C]//ASME/JSME Thermal Engineering Conference. 1995: 523-530.
- [20] Hegab H E, Bari A, Ameel T. Friction and convection studies of R-134a in microchannels within the transition and turbulent flow regimes [J]. Exp. Heat Transfer, 2002, 15(4): 245-259.
- [21] Hrnjak P, Tu X. Single phase pressure drop in microchannels [J]. Int. J. Heat Fluid Fl, 2007, 28(1): 2-14.

- [22] Judy J, Maynes D, Webb B W. Characterization of frictional pressure drop for liquid flows through microchannels [J]. *Int. J. Heat Fluid Flow*, 2002, 45(17): 3477–3489.
- [23] Barlak S, Yapıcı S, Sara O N. Experimental investigation of pressure drop and friction factor for water flow in microtubes [J]. *Int. J. Therm. Sci.*, 2011, 50(3): 361–368.
- [24] Aniskin V M, Adamenko K V, Maslov A A. Experimental determination of the friction factor coefficient in microchannels [J]. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.*, 2011, 52(1): 18–23.
- [25] Cornish R J. Flow in a pipe of rectangular cross-section [J]. *Roy. Soc. Proc.*, 1928, 120(786): 691–700.
- [26] White F M. *Viscous fluid flow*, 2nd Ed. [M]. New York: McGraw-Hill, 1991: 55–58.
- [27] White F M. *Fluid mechanics*, 3rd Ed. [M]. New York: McGraw-Hill, 1994: 59–63.
- [28] Shah R K, London A L. *Laminar flow forced convection in ducts: a source book for compact heat exchanger analytical data* [M]. London: Academic Press, 1978: 43–44.
- [29] Fuerstman M J, Lai A, Thurlow M E, et al. The pressure drop along rectangular microchannels containing bubbles [J]. *Lab. Chip.*, 2007, 7(11): 1479–1489.
- [30] Henrik B. *Theoretical microfluidics* [M]. Oxford: Oxford University Press, 2004: 74–79.
- [31] Morris C J, Forster F K. Oscillatory flow in microchannels [J]. *Eep. Fluids.*, 2004, 36(6): 928–937.
- [32] 李卓, 俞坚, 马重芳. 小通道单相流体突扩和突缩局部阻力特性 [J]. *化工学报*, 2007, 58(5): 1127–1131.
- Li Z, Yu J, Ma C F. Local resistance characteristics of single phase fluid with sudden expansion and shrinkage in small channels [J]. *CIESC Journal*, 2007, 58(5): 1127–1131.
- [33] Akbari M, Bahrami M, Sinton D. Analytical and experimental characterization of flow in slowly-varying cross-section microchannels [C]//American Society of Mechanical Engineers, ASME 2010 3rd joint US-European fluids engineering summer meeting collocated with 8th international conference on nanochannels, microchannels, and minichannels. 2010: 2161–2170.
- [34] Duryodhan V S, Singh S G, Agrawal A. Liquid flow through converging microchannels and a comparison with diverging microchannels [J]. *J. Micromech. Microeng.*, 2014, 24(12): 125002.
- [35] Dominic A, Sarangan J, Suresh S, et al. An experimental study of heat transfer and pressure drop characteristics of divergent wavy minichannels using nanofluids [J]. *Heat Mass Transfer*, 2017, 53(3): 959–971.
- [36] Singhal R, Ansari M Z. Flow and pressure drop characteristics of equal section divergent-convergent microchannels [J]. *Procedia Technol.*, 2016, 23: 447–453.
- [37] López-Aguilar J E, Tamaddon-Jahromi H R, Webster M F, et al. Numerical vs. experimental pressure drops for Boger fluids in sharp-corner contraction flow [J]. *Phys. Fluids.*, 2016, 28(10): 103104.
- [38] Carrier O, Funfschilling D, Debas H, et al. Pressure drop in a split and recombine caterpillar micromixer in case of newtonian and non-Newtonian fluids [J]. *AIChE J.*, 2013, 59(7): 2679–2685.
- [39] Tan X H, Jiang L, Li X P, et al. A Complex model for the permeability and porosity of porous media [J]. *Chem. Eng. Sci.*, 2017, 172: 230–238.
- [40] Armstrong R T, McClure J E, Berrill M A, et al. Beyond Darcy's law: the role of phase topology and ganglion dynamics for two-fluid flow [J]. *Phys. Rev. E*, 2016, 94(4): 043113.
- [41] Zami-Pierre F, de Loubens R, Quintard M, et al. Transition in the flow of power-law fluids through isotropic porous media [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2016, 117(7): 074502.
- [42] Rezaei Niya S M, Selvadurai A P S. The estimation of permeability of a porous medium with a generalized pore structure by geometry identification [J]. *Phys. Fluids*, 2017, 29(3): 037101.
- [43] 戴干策, 陈敏恒. *化工流体力学* [M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 17.
- Dai G C, Chen M H. *Chemical fluid mechanics* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 17.
- [44] 莫丽霞, 赵亮, 陈旭. 实验室测定液体粘滞系数的一种新方法 [J]. *实验室研究与探索*, 2008, 27(11): 10–11, 44.
- Mo L X, Zhao L, Chen X. A new method for laboratory determination of liquid viscosity coefficient [J]. *Laboratory Research and Exploration*, 2008, 27(11): 10–11, 44.
- [45] Livak-Dahl E, Lee J, Burns M A. Nanoliter droplet viscometer with additive-free operation [J]. *Lab. Chip.*, 2013, 13(2): 297–301.
- [46] Li Y, Ward K R, Burns M A. Viscosity measurements using microfluidic droplet length [J]. *Anal. Chem.*, 2017, 89(7): 3996–4006.
- [47] Bird R B, Carreau P J. A nonlinear viscoelastic model for polymer solutions and melts—I [J]. *Chem. Eng. Sci.*, 1968, 23(5): 427–434.
- [48] Kang K, Lee L J, Koelling K W. High shear microfluidics and its application in rheological measurement [J]. *Exp. Fluids.*, 2005, 38(2): 222–232.
- [49] Tang G H, Lu Y B, Zhang S X, et al. Experimental investigation of non-Newtonian liquid flow in microchannels [J]. *J. Non-Newton. Fluid Mech.*, 2012, 173: 21–29.
- [50] Sun Y, Bai B, Ma Y, et al. Flow behavior characterization of a polyacrylamide-based friction reducer in microchannels [J]. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2014, 53(51): 20036–20043.
- [51] 计光华, 计洪苗. *微流动及其元器件* [M]. 北京: 高等教育出版社, 2009: 10.
- Ji G H, Ji H M. *Micro-flow and its components* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2009: 10.
- [52] Bahrami M, Yovanovich M M, Culham J R. A novel solution for pressure drop in singly connected microchannels of arbitrary cross-section [J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2007, 50(13): 2492–2502.
- [53] Yue J, Chen G, Yuan Q. Pressure drops of single and two-phase flows through T-type microchannel mixers [J]. *Chem. Eng. J.*, 2004, 102(1): 11–24.
- [54] Cuenca A, Bodiguel H. Fluorescence photobleaching to evaluate flow velocity and hydrodynamic dispersion in nanoslits [J]. *Lab. Chip.*, 2012, 12(9): 1672–1680.
- [55] Nghe P, Degré G, Tabeling P, et al. High shear rheology of shear banding fluids in microchannels [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, 93(20): 204102.
- [56] Cuenca A, Bodiguel H. Submicron flow of polymer solutions: slippage reduction due to confinement [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2013, 110(10): 108304.
- [57] Wang Y, Xu J, Yang C. Fluid inhomogeneity within nanoslits and deviation from Hagen–Poiseuille flow [J]. *AIChE J.*, 2017, 63(2): 834–842.
- [58] Kozicki K, Chou C H, Tiu C. Non-Newtonian flow in ducts of

- arbitrary crosssectional shape [J]. Chem. Eng. Sci., 1966, 21(8): 665–679.
- [59] Bahrami M, Yovanovich M M, Culham J R. A novel solution for pressure drop in singly connected microchannels of arbitrary cross-section [J]. Int. J. Heat Mass Transfer, 2007, 50(13): 2492–2502.
- [60] Akbari M, Sinton D, Bahrami M. Viscous flow in variable cross-section microchannels of arbitrary shapes [J]. Int. J. Heat Mass Transfer, 2011, 54(17/18): 3970–3978.
- [61] 鲁进利, 周宾, 许忠林, 等. 不同截面微通道中流动阻力特性 [J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2011, 41(3): 554–557.
- Lu J L, Zhou B, Xu Z L, et al. Flow resistance characteristics of microchannels with different cross sections [J]. Journal of Southeast University: Natural Science, 2011, 41(3): 554–557.
- [62] Abdelall F F, Hahn G, Ghiaasiaan S M, et al. Pressure drop caused by abrupt flow area changes in small channels [J]. Exp. Therm. Fluid Sci., 2005, 29(4): 425–434.