

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2016.02.009

# 圆管壁粗糙度对圆管内流态影响研究

李欢, 曾亚武, 夏磊, 方海龙  
(武汉大学 土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430072)

**摘要:** 基于尼古拉兹圆管实验思想, 利用颗粒流程序中的流体计算模块, 实现了对圆管壁粗糙度的模拟, 进而分析了不同粗糙度对圆管断面流态分布的影响以及在不同压力差作用下平均流速与圆管壁粗糙度之间的关系。研究表明: 圆管内流体流速受管壁的扰动影响, 在横截面上呈 U 型分布, 而非抛物线型分布; 圆管壁对管内流体流态的影响范围随管壁粗糙度变化而变化, 圆管管壁相对粗糙度越大, 管内受扰动流体范围越大, 即管内层流范围越小; 在管壁粗糙度一定的情况下, 圆管断面流量随上下端面压力差的增大而增大; 在相同压力差作用下, 圆管断面流量随管壁相对粗糙度增大而逐渐减小, 颗粒的阻流作用明显; 随着管壁粗糙度的增大, 圆管上下端面受压力差作用的影响范围也随之增大, 使管内流体流态变得更加复杂。

**关键词:** 尼古拉兹实验; 粗糙圆管; 颗粒流流体计算; 相对粗糙度; 流体流态

中图分类号: TV134.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2016)02-0045-06

## Effects of Pipe Roughness on Flow Pattern Within Circular Pipe

LI Huan, ZENG Yawu, XIA Lei, FANG Hailong

(School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China)

**Abstract:** Based on the idea of Nikuradse's experiment, this paper simulated the roughness of pipes by using Particle Flow Code (PFC) FLUID SCHEME, and analyzed the effects of different roughness of pipes to the flow pattern and the relationship between the mean velocity and roughness under different pressures. The results showed that flow velocity within pipe was influenced by pipe wall, and presented U-shaped in cross-section profile, rather than parabolic distribution; The flow pattern was affected by the pipe roughness, the larger relative roughness of the pipe, the greater range fluid was perturbed, namely laminar flow range become smaller. Under certain circumstances of pipe roughness, pipe flow increases with the increased pressure; while under the same pressure difference, pipe flow decreases with the increased roughness of pipe and the particles damping action is significant. While increasing roughness, the affected area within pipe also increased under different pressure, which make fluid flow patterns within pipe become more complex.

**Keywords:** Nikuradse's experiment; roughness pipe; PFC Fluid Scheme; relative roughness; flow pattern

1885年雷诺(Reynolds O)曾用试验揭示了流体运动存在着两种流态:层流和紊流,其试验结果表明:流态不同,沿程水头损失的规律也不同。达西<sup>[1]</sup>(Darcy H)根据不同尺寸的圆管和不同类型、不同长度的土样进行试验得到了线性渗透定律:在层流时,沿程水头损失与流速的一次方成比例。1901年福希海梅(Forchheimer)首先提出渗流的高雷诺数非线性关系:在充分紊流时,沿程水头损失与流速的二次方成比例。在过渡流态,其沿程阻力水头损失与流

速的 $1.75 \sim 2$ 次方成比例。由此可见,处于层流、过渡(层流与紊流间过渡态)和充分紊流流态的水流遵循不同的沿程阻力规律<sup>[2]</sup>。

为了探讨紊流存在时流体的沿程阻力规律,尼古拉兹<sup>[3]</sup>(Nikuradse J)在圆管内壁粘贴上经过筛分具有不同粒径的砂砾,制成人工均匀颗粒粗糙圆管;然后在不同粗糙度的圆管上进行系统实验,实验结果认为沿程阻力系数取决于雷诺数和相对粗糙度。黄琨、万军伟等<sup>[4-5]</sup>对尼古拉兹实验的数据进行整

理时指出尼古拉兹实验存在误差,即尼古拉兹实验二次刷胶引起的实验误差。乔昌凯等<sup>[6]</sup>用玻璃球在矩形水槽中铺设不同层数的透水层模拟卵石河床,得到不同厚度透水层阻力系数随雷诺数变化的关系。Herwig H 等<sup>[7]</sup>研究表明,在层流流动中壁面粗糙度的影响也是值得重视的并对粗糙度参数进行了定义。郝鹏飞等<sup>[8]</sup>研究了粗糙度对矩形截面微管道内液体流动阻力特性的影响,采用微观粒子图像测速技术测量了粗糙微管道内的流场结构。随着计算机技术和数值计算方法的发展,使得利用数值方法研究流体渗流特性、流场结构等成为可能。周健<sup>[9]</sup>,刘洋<sup>[10-12]</sup>等利用颗粒流程序研究了砂土液化、管涌、砂沸等多孔介质流体渗流现象的微观机理,结果表明颗粒流程序能较好地模拟流体和颗粒的相互作用,并重点研究了流体对颗粒的影响,但对流体与流场分布研究较少。

尼古拉兹(Nikuradse)实验提出了粗糙度对流态的影响,进而得出流体沿程阻力与雷诺数和相对粗糙度的关系,但受试验观测条件的限制,试验中并没有开展圆管内流场结构的研究。本文基于尼古拉兹(Nikuradse)圆管实验思想,利用颗粒流程序中的流体计算模块,实现对圆管壁粗糙度的模拟,进而分析不同粗糙度对圆管断面流态分布的影响以及在不同压力梯度下平均流速与圆管壁粗糙度之间的关系。

## 1 颗粒流 CFD 计算原理

### 1.1 流体运动方程

对于单位体积固液两相系统的常密度液相不可压缩流的 Navier - Stokes 方程可表示为:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -(\nabla \cdot n\mathbf{u}) \quad (1)$$

$$\frac{\partial(n\mathbf{u})}{\partial t} = -(\nabla \cdot n\mathbf{u}\mathbf{u}) - \frac{n}{\rho_f} \nabla p - \frac{n}{\rho_f} \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + n\mathbf{g} + \frac{f_{\text{int}}}{\rho_f} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{u}$  为流速矢量; $\boldsymbol{\tau}$  为黏性应力张量; $\mathbf{g}$  为重力加速度; $f_{\text{int}}$  为单位体积内颗粒与流体的相互作用力; $n$  为孔隙率; $\rho_f$  为流体的密度。 $\nabla$  为拉普拉斯(Laplace)算子。

### 1.2 流体 - 颗粒相互作用

流体 - 颗粒相互作用拽曳力可以用一些半经验公式计算。本文的研究即采用 Ergun S<sup>[13]</sup> 的孔隙率小于 0.8 ( $n \leq 0.8$ ) 的计算公式:

$$f_{\text{int}} = \left[ 150 \frac{(1-n)^2}{nd_p^2} \mu_f + 1.75 \frac{(1-n)\rho_f}{d_p} |\bar{v}_j - u_j| \right] \times$$

$$(\bar{v}_j - u_j) \quad (3)$$

Ergun 方程涵盖了很大范围的流体条件,适用于能量非线性耗散的高雷诺系数的孔隙流,对于孔隙率大于 0.8 ( $n \geq 0.8$ ) 的情况,可以应用 Wen C Y 等<sup>[14]</sup> 的公式:

$$f_{\text{int}} = \frac{3}{4} \rho_f C_D \frac{(1-n)n^{-1.7}}{d_p} |\bar{v}_j - u_j| (\bar{v}_j - u_j) \quad (4)$$

式中: $\mu_f$  流体动力黏滞系数; $\bar{v}_j$  表示颗粒的速度矢量; $d_p$  表示单元内颗粒平均直径。

其中球形颗粒的拖拽力系数  $C_D$  是雷诺数  $Re$  的方程,如下

$$C_D = \begin{cases} \frac{24}{Re} (1 + 0.15 Re^{0.687}) & Re < 1000 \\ 0.44 & Re \geq 1000 \end{cases} \quad (5)$$

通过式(3)和式(4)求得颗粒与流体之间的相互作用力,然后代入式(2)求解 Navier - Stokes 方程。在颗粒流固耦合计算内核是采用由 Patanker 和 Spalding 提出 SIMPLE 算法,即压力耦合方程组的半隐式方法,其核心是采用“猜测—修正的方法在交错网格的基础上计算流体压力场,进而求解流体动量方程(N - S 方程)。

## 2 粗糙圆管模拟实验

### 2.1 建立圆管粗糙度模型

层流时圆管中流体沿程阻力系数  $\lambda$  是雷诺数  $Re$  的函数,但在紊流时沿程阻力系数  $\lambda$  与雷诺数  $Re$  及管壁粗糙度之间的关系仍然难以确定。为了确定沿程阻力系数  $\lambda = f(Re, \frac{\Delta}{d})$  的变化规律,尼古拉兹(Nikuradse J)在圆管内壁粘贴上经过筛分具有相同粒径  $\Delta$  的沙粒,制成人工均匀颗粒粗糙的管道,然后在不同的粗糙管道上进行系统实验(如图 1 所示)。

其中  $\Delta$  表示绝对粗糙度(Absolute Roughness, AR),  $d$  表示圆管的直径,而  $\frac{\Delta}{d}$  表示相对粗糙度(Relative Roughness, RR)

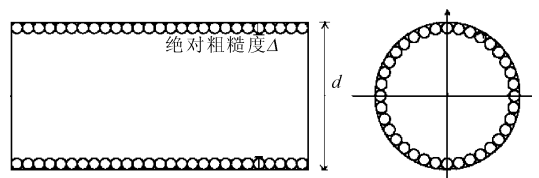


图 1 尼古拉兹(Nikuradse J)表面粗糙度圆管示意图

本文基于尼古拉兹(Nikuradse J)人工粗糙管实

验的思想,在圆管中不断增加沙粒的粒径直至极限状态,从而建立不同相对粗糙度圆管模型。

首先在颗粒流程序中建立光滑圆管模型,然后在圆管内壁粘结上(通过算法固定)一定直径的颗粒,模拟一定的粗糙度,然后增大颗粒的半径而达到极限粗糙度状态,并对一系列的模型进行流体模拟实验。

对于人工粗糙管的模拟,本文尝试了两种不同的方法:① 随机粗糙度模型,② 规则粗糙度模型。由于随机法生成的模型的相对粗糙度难以量化,故最终采用规则粗糙度模型。

规则粗糙度模型建模分为以下两步:

(1) 建立圆管直径,以及绝对粗糙度,还有圆管壁上颗粒半径等函数关系表达式;

(2) 推导出规则阵列颗粒的圆心表达,在颗粒流程序中直接用 FISH 函数生成相应的颗粒。

如图 2 所示,对第一步中相关变量进行简单的数学推导,由相对粗糙度  $\frac{\Delta}{d}$  (RR) 定义可知:

$$\frac{\Delta}{d} = \frac{2r}{d} \quad (6)$$

即可求得相应粗糙度的颗粒的半径  $r = \frac{\Delta}{2}$ 。

由圆的弧度与弧长的关系可知  $2r = (R - r) \times$

$\theta$  得到:  $\theta = \frac{2r}{R - r}$

式中:  $\theta$  为环向弧度增量。

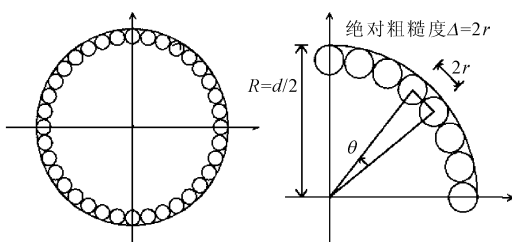


图 2 相对粗糙度与圆管直径关系图

当  $R > r$  时即颗粒半径相对圆管半径较小时,式(6)中弧长与半径的关系不适用,环向弧度增量  $\theta$  不能用式(6)直接求取,需通过三角函数运算求得;

例如在相对粗糙度表示为  $\frac{\Delta}{d} = \frac{1}{2.4}$  时,此时为极限粗糙度,可以直接求得相应的颗粒半径,然后根据三角函数关系求得环向弧度增量  $\theta$ ,确定了相对粗糙度(RR)  $\frac{\Delta}{d}$  后,颗粒半径  $r$ 、颗粒流程序中规则阵列所需的环向弧度  $\theta$  增量、沿圆管壁的环向颗粒数  $M$  和沿圆管轴向的颗粒层数  $N$  等参数,均可通过相应

的函数关系计算获得。如表 1 所示,为相对粗糙度分别为 0、1/30、1/14、18、1/7.2、1/2.4 的 5 种粗糙圆管模型的参数值。

表 1 不同粗糙度圆管模型建模参数

模型编号	相对粗糙度 $\Delta/d$	颗粒半径 $r/\text{mm}$	环向弧度增量 $\theta/\text{rad}$	环向颗粒数 $M/\text{个}$	轴向颗粒层数 $N/\text{层}$
1	0.0000	0.00	0.000	0	0
2	0.0333	1.17	0.069	91	86
3	0.0705	2.47	0.152	41	41
4	0.1389	4.86	0.323	19	21
5	0.4167	15.58	1.570	4	7

注:参数推导时,取圆管的直径为 70 mm,轴长为 200 mm。其中模型 1 为光滑圆管模型,模型 5 为极限粗糙度模型。

通过颗粒流程序编制 Fish 函数并且按照表 1 的参数建立的圆管粗糙度模型如图 3 所示。图 3 中 RRT 为转置粗糙度 (Relative Roughness Transpose, RRT),与相对粗糙度 RR 为倒数关系。在  $\Delta/d = 0$  时,对应于  $d/\Delta = \infty$ ,为表示方便,仍以  $d/\Delta = 0$  表示。由图 3 可见,模型 1 的相对粗糙度为零,为光滑圆管;模型 5 为极限粗糙圆管,其转置粗糙度  $d/\Delta = 2.4$ ;模型 4、模型 3、和模型 2 的转置粗糙度  $d/\Delta$  分别为模型 5(极限转置粗糙度)的 3 倍,6 倍,12.5 倍。其中  $d/\Delta = 0$  与  $d/\Delta = 30$  是尼古拉兹实验人工粗糙圆管采用的模型。

## 2.2 实验模拟过程

模拟实验采用渗透实验中达西实验模型(即在圆管上顶面和下底面加压)。对不同粗糙度的圆管分别在顶部和底部施加流体压力边界条件,使之产生压力差,在不同的水力梯度条件下进行 PFC - CFD 耦合运算,使试样最终达到稳定的流态,平衡稳定的标准是计算所得的通过圆管截面的流量趋于某一定值。如图所示其中流体的密度  $\rho_f = 1\ 000\ \text{kg}/\text{m}^3$ ,流体动力黏滞系数  $\mu_f = 10^{-3}\ \text{Pa}\cdot\text{s}$ ,圆管和颗粒的摩擦系数为 0.5,底部和顶部的压力差依次为  $P_1 = 2\ 000\ \text{Pa}$ ,  $P_2 = 4\ 000\ \text{Pa}$ ,  $P_3 = 6\ 000\ \text{Pa}$ 。圆管上下顶面为压力边界,而圆管侧边界为滑动边界。

## 3 模拟结果分析

模拟实验中测定各模型在圆管顶面 ( $Z = 200\ \text{mm}$ ) 处的横截面流量和  $XOZ$  纵剖面的流速分布。其中流量通过颗粒流程序编制的 FISH 函数直接计算,用以分析相对粗糙度与流量之间的关系;  $XOZ$  纵剖面流速分布在三维模型中不易观察,故利用 FISH 函数导出数据,在 MATLAB 中绘制纵剖面速度

云图,观察纵剖面内的流速分布,用以分析粗糙度对圆管内流速分布的影响。

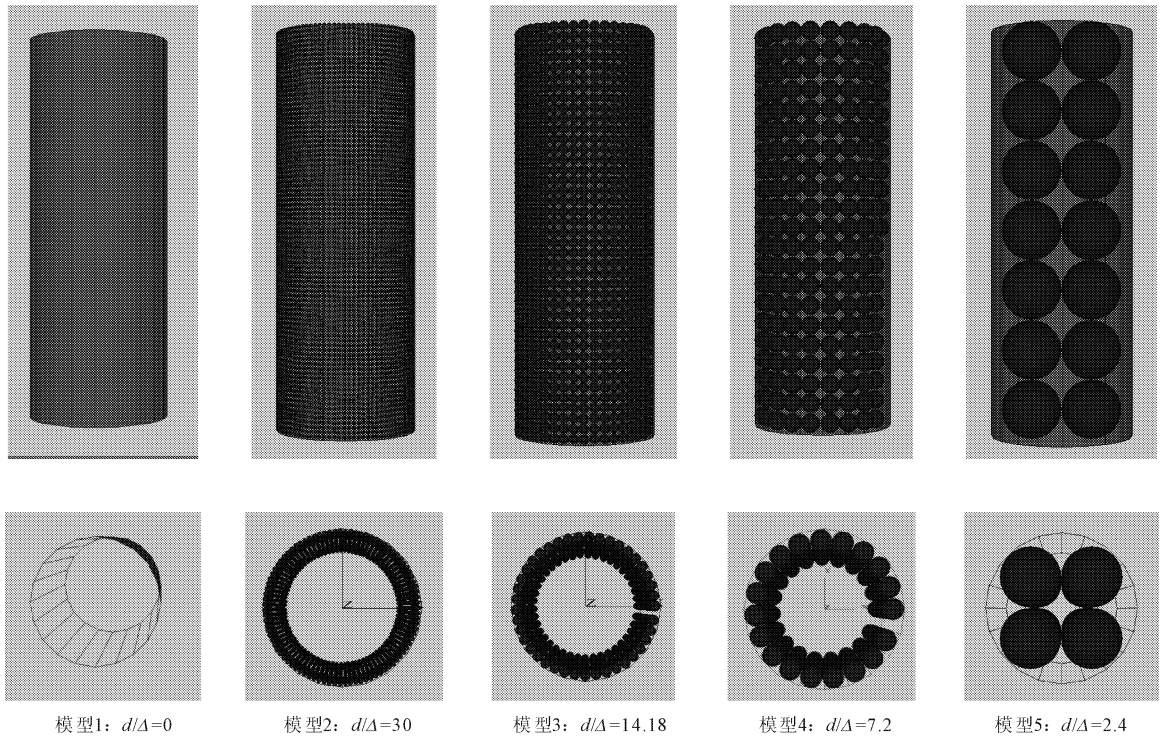


图 3 不同相对粗糙度圆管模型

### 3.1 流量与时间关系

首先计算不同压力差下,圆管顶面截面流量与时间的关系,如图 4 所示。为了便于比较,本文统一设置流体时步长为  $1 \times 10^{-5}$  s,设置循环至平衡时间为 0.6 s,流体的计算时步为 60 000 步,而力学计算步长由程序自动控制,一般小于或等于流体计算时步的步长。

首先,从图 4(a) ~ 图 4(c)可以看出,圆管顶面截面流量都是先随着时间缓慢增加,然后逐渐趋于某一定值而达到平衡,说明流体运动从加压到平衡需要一定的时间,体现在数值模拟中,就是需要经过若干时步的计算,才能达到平衡。

其次,从图 4(a) ~ 图 4(c)还可以看出,对于不同的圆管粗糙度,流量曲线达到平衡后的稳定流量与管壁相对粗糙度成反比例关系,即随着管壁相对粗糙度的增大,圆管截面流量逐渐减小。这一规律在不同的压力差下均成立。分析原因,主要有二:其一是粗糙颗粒的存在,阻塞了流体的流动路径,特别是极限粗糙度的情况下,颗粒的阻塞作用最明显,流量也最小;其二,颗粒的存在,使过流净断面面积减小,从而使通过圆管截面的流量减小。另外从图中也可以观测到,在截面流量达到平衡之前,流量 - 时

间曲线的斜率是随着相对粗糙度的增加而减小的,说明管壁粗糙度对管内流体的流态存在影响,使得相对粗糙度越大,圆管截面流量达到平衡时需要经过更多的计算时步。

最后,从图 4(a) ~ 图 4(c)中可以看到,压力差不断增大时,纵轴坐标的数值在增大,那么反映通过相同粗糙度圆管的流量也不断增大。为了说明这种现象;特别在图 4(d)中列出了光滑圆管在不同压力差下的流量 - 时间关系曲线,从图 4(d)中可以明显看到随着压力差的增大,通过圆管的流量是逐渐增大的。

### 3.2 圆管粗糙度、压力差与流量之间的关系

在尼古拉兹(Nikuradse J)实验中,通过测量圆管中的平均流速  $v$  和管道长度  $l$  的水头损失  $\Delta h$ ,并推算出雷诺数  $Re = \frac{\rho v d}{\mu}$  及沿程阻力系数  $\lambda = \Delta h \cdot \frac{d}{l} \cdot \frac{2g}{v^2}$  得出  $\lambda = f(Re, \frac{\Delta}{d})$  的规律。在本文的模拟试验中对于平均流速可以用断面流量  $q$  代替,而水头损失是设定的压力差边界条件  $P_1, P_2, P_3$ 。根据模拟实验数据得出不同圆管粗糙度时,压力差与流量之间的关系(如图 5(a) 所示),以及不同压力差下,粗糙度与流量的关系(如图 5(b) 所示)。

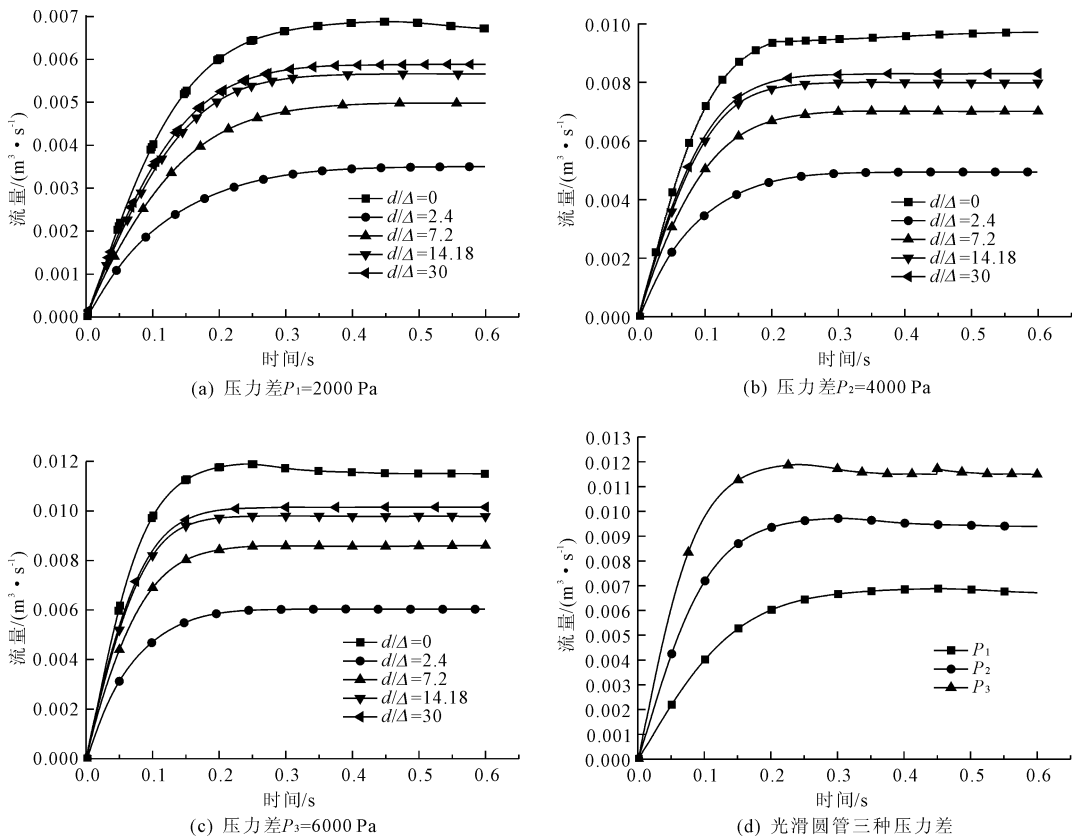


图 4 不同压力差下流体流量与时间的关系曲线

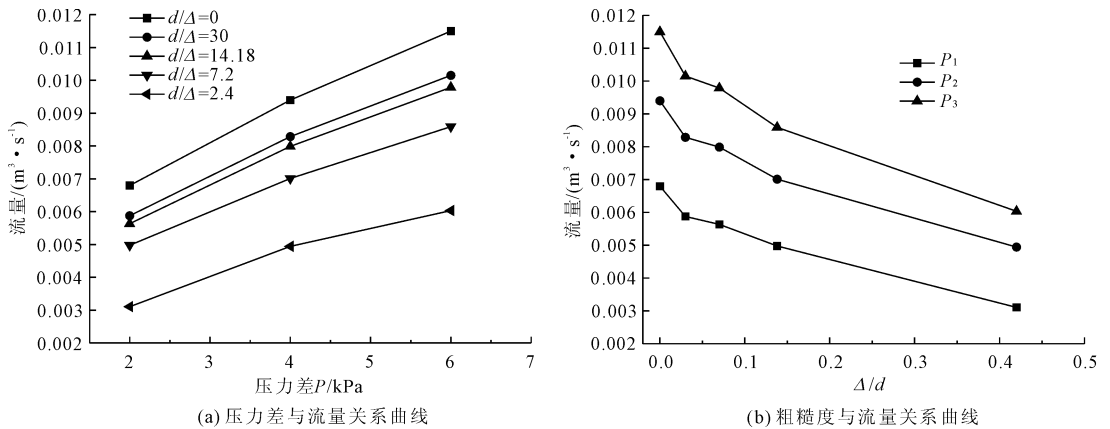


图 5 圆管粗糙度、压力差与流量之间的关系

由图 5 可见,当圆管粗糙度一定时,随着圆管上下断面水力压差增大,圆管断面流量(流速)也相应增大,与达西定律表现出一致性;当圆管上下断面压差一定时,随着圆管相对粗糙度逐步增大,断面流量(流速)则逐渐减小,说明圆管壁粗糙度通过影响断面过流面积和流体流态,进而影响断面流量(流速)。

### 3.3 断面流速分布图

图 6(a) ~ 图 6(e) 分别表示在相同压力差  $P = 2000 \text{ Pa}$  作用下,不同粗糙度圆管  $XOZ$  平面的稳定流速分布图。

由图 6(a) ~ 图 6(e) 可以看出:

(1) 在  $XOZ$  平面中,流速是关于圆管轴线对称分布的,这一分布符合模型边界条件和几何条件轴对称的特点。

(2) 在  $XOZ$  平面中,靠近轴线的区域流速分布均匀,而靠近管壁部分流速分布则不均匀,且随着圆管壁相对粗糙度的增大,圆管壁附近受影响的区域逐步扩大,即圆管轴线附近层流区域逐步减小。如图 6(a) 所示的光滑圆管流速分布图,圆管壁对液体的流速影响范围很小,而图 6(e) 所示的极限粗糙度

圆管流速分布图,管壁附近流速不均匀分布区则要

大得多。  
(3) 从图中可以看出,靠近圆管壁的流体流速普遍小于圆管轴线中心附近的流体流速,在圆管壁设置滑动边界的条件下,断面流速呈现 U 型分布,而非抛物线型分布,该结论和文献[15]是一致的。

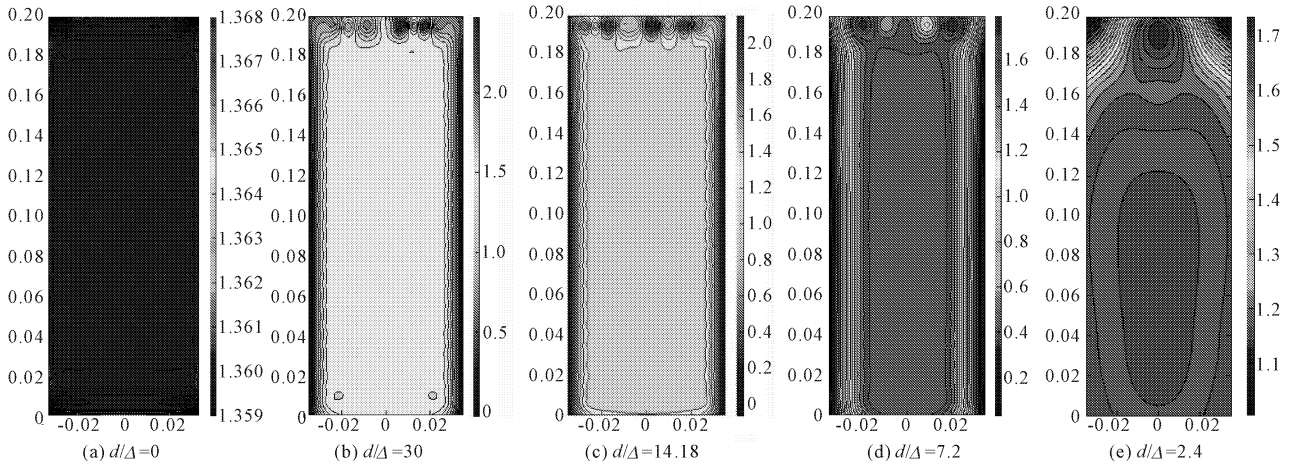


图 6 压力差  $P = 2000 \text{ Pa}$  时不同粗糙度圆管  $XOZ$  平面的稳定流速分布图

## 4 结 语

本文通过颗粒流流体计算程序模拟尼古拉兹人工粗糙圆管实验,说明颗粒流流体计算模块不仅可以实现对流体和颗粒的相互作用分析,而且对于粗糙圆管模拟可以较为真实的反应流体在圆管中的流动状态,对分析圆管内流体流态有一定的借鉴意义和参考价值。

### 参考文献:

- [1] 陈仲颐,周景星,王洪瑾编著.土力学[M].北京:清华大学出版社,1994:36-46.
- [2] 李大美,杨小亭主编.水力学[M].武汉:武汉大学出版社,2004:261-285.
- [3] Nikuradse, Johann. Laws of Flow in Rough Pipes[M]. Washington: National Advisory Committee for Aeronautics, 1950:1-26.
- [4] 黄 琨.孔隙介质渗流基本方程的探索[D].武汉:中国地质大学,2012:1-18.
- [5] 万军伟,黄 琨,李银泉,等.尼古拉兹圆管沿程水流阻力实验的新发现[J].地质科技情报,2012,31(5):157-161.
- [6] 乔昌凯,刘兴年,陈兴伟,等.卵石透水河床渗流阻力研

(4) 从图 6 中还可以看出,由于加压差的作用,圆管顶部和底部出现了流速扰动区,一般情况下该扰动区域相对较小,对结果分析影响较小。但在极限粗糙度情况下(如图 6(e)所示),管道端部影响使得管道中流体的流动非常复杂。

究[J].四川大学学报:工程科学版,2013,45(S2):36-40.

- [7] Herwig H, Gloss D, Wenterodt T. 粗糙壁面通道内的流动研究[J].中国计量学院学报,2008,19(4):296-303.
- [8] 郝鹏飞,姚朝晖,何 枫.粗糙微管道内液体流动特性的实验研究[J].物理学报,2007,56(8):4728-4732.
- [9] 周 健,姚志雄,张 刚.基于散体介质理论的砂土管涌机制研究[J].岩石力学与工程学报,2008,27(4):749-756.
- [10] 刘 洋,周 健,付建新.饱和砂土流固耦合细观数值模型及其在液化分析中的应用[J].水利学报,2009,40(2):250-256.
- [11] 刘 洋,李 飞,柴小庆,等.渗流的 PFC - CFD 耦合细观数值模拟[J].水文地质工程地质,2008,35(2):66-70.
- [12] 刘 洋,吴顺川,周 健.砂沸现象的细观数值模拟及影响因素分析[J].北京科技大学学报,2008,30(5):473-477.
- [13] Ergun S. Fluid flow through packed columns[J]. Journal of Materials Science & Chemical Engineering, 1952,48(2):89-94.
- [14] Wen C Y, Y. Ho Yu. Mechanics of fluidization[J]. Chem.engng Prog. symp. ser, 1966,62:100-111.
- [15] White F M. Fluid mechanics[M]. New York: McGraw - Hill, 2011:1-49.