

# 水沙流作用下粗糙度对圆柱体结构 受力特性及冲蚀的影响

乔智威<sup>1,2</sup>, 刘 壮<sup>1,2</sup>, 张宪堂<sup>1,2</sup>, 张惠尧<sup>1,2</sup>, 李泽熹<sup>3</sup>, 李 丹<sup>4</sup>

(1. 山东科技大学 山东省土木工程防灾减灾重点实验室, 山东 青岛 266590;

2. 山东科技大学 土木工程与建筑学院, 山东 青岛 266590;

3. 山东高速青岛公路有限公司, 山东 青岛 266114;

4. 山东科技大学 地球科学与工程学院, 山东 青岛 266590)

**摘 要:**基于 Fluent 软件建立三维模型, 采用 SST  $k-\omega$  湍流模型, 对含沙量在 0.05、0.5 和 5 kg/m<sup>3</sup>, 柱体表面粗糙度在 0、0.1%D、0.3%D、0.5%D、0.8%D 和 1%D 时单圆柱绕流的柱体的受力特性及冲蚀进行数值模拟, 研究了不同含沙量水流作用下, 粗糙度对圆柱的平均阻力系数、升力系数及冲蚀率的影响。结果表明: 在同一含沙量的水流作用下, 柱体的升力系数在粗糙度为 0.5%D 时达到最大值; 当柱体表面粗糙度相同时, 平均阻力系数受水沙流含沙量的影响较小, 升力系数受含沙量的影响较大; 在不同含沙量的水沙流作用下, 圆柱体结构的壁面冲蚀率在粗糙度为 0.3%D 时达到最大值。

**关键词:**水沙流; 粗糙度; 圆柱体结构; 受力特性; 冲蚀率

**中图分类号:**TV131

**文献标志码:**A

## Effect of roughness on the force and erosion of cylindrical structures under water-sand two phase flow

QIAO Zhiwei<sup>1,2</sup>, LIU Zhuang<sup>1,2</sup>, ZHANG Xiantang<sup>1,2</sup>, ZHANG Huiyao<sup>1,2</sup>, LI Zexi<sup>3</sup>, LI Dan<sup>4</sup>

(1. Shandong Provincial Key Laboratory of Civil Engineering Disaster Prevention and Mitigation,

Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;

2. College of Civil Engineering and Architecture, Shandong University of

Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;

3. Shandong Hi-Speed Qingdao Expressway Co. Ltd, Qingdao, Shandong 266114, China;

4. College of Earth Science and Engineering, Shandong University of

Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

**Abstract:** This study investigates the effect of roughness on the average drag coefficient, lift coefficient and erosion rate of cylinders under different sand content flows by carrying out numerical simulations of the force and erosion when the sand content is 0.05, 0.5, and 5 kg/m<sup>3</sup>, and the column surface roughness is 0.1%D, 0.3%D, 0.5%D, 0.8%D, and 1%D with the three-dimensional shear stress transport(SST)  $k-\omega$  turbulence model based on Fluent. The results show that under the action of water flow with the same sand content, the lift coefficient reaches its maximum value when the roughness is 0.5%D, that when the roughness is the same, the average resistance coefficient

**收稿日期:**2020-07-07

**基金项目:**国家自然科学基金项目(51874189, 51709161); 山东省自然科学基金项目(ZR2017MEE043); 山东省研究生教育创新计划项目(SDYY15086, SDYY15088)

**作者简介:**乔智威(1994—), 男, 湖北宜昌人, 硕士研究生, 主要从事水流对桥梁的冲刷磨蚀方向的研究。

张宪堂(1973—), 男, 河北井陉人, 教授, 博士生导师, 主要从事大跨度桥梁结构抗风浪及抗爆研究, 本文通信作者。

E-mail: zzxhtm@163.com

is less affected by the sand content of the water-sand two phase flow while the lift coefficient is more affected by the sand content, and that under the effect of the water-sand two phase flow with different sand contents, the wall erosion rate of the cylindrical structure reaches the maximum when the roughness is  $0.3\%D$ .

**Key words:** water-sand two phase flow; roughness; cylindrical structure; force characteristics; erosion rate

当水流以一定速度绕过圆柱体结构时,随着流动的分流会出现卡门涡街现象,引发柱体在来流方向和垂直方向上出现作用力的周期变化。这种作用力能够引发结构物自身产生周期振动,当旋涡脱落的频率与圆柱体结构振动频率接近时,会导致结构物的损坏。而水流中含有的不同浓度沙粒更是增大了水流对结构物的损坏程度。桥梁作为跨越河流的常用手段,桥桩、桥墩等圆柱体结构长期受到水流的冲蚀作用,对其使用寿命造成严重影响。因此研究绕流时柱体的受力特性及水沙流对柱体的冲蚀,对工程设计非常重要<sup>[1-2]</sup>。

水体绕流对柱体受力特性产生的影响,既与流体本身的特性有关,也受结构物尺寸的影响。Zdravkovich 等<sup>[3-5]</sup>通过实验发现,随着雷诺数的改变,绕流时柱体的受力状态也会发生改变;崔维征等<sup>[6-8]</sup>发现结构体的尺寸改变会影响其绕流的动力特性;胡彬等<sup>[9-11]</sup>通过对不同直径的圆柱进行数值模拟,发现改变圆柱直径的大小会影响柱体的受力特性;申彦兵等<sup>[12]</sup>通过改变柱体粗糙度,探究了粗糙度对圆柱绕流柱体受力特性的影响;王凯鹏等<sup>[13]</sup>发现来流条件、不同柱体的间距比都会对圆柱体上的受力产生影响。

柱体的粗糙度是影响柱体受力的一个重要因素,目前对水沙流的研究重点集中于冲蚀角<sup>[14-15]</sup>、颗粒直径<sup>[16-17]</sup>等因素对冲蚀的影响,尚未涉及柱体粗糙度对冲蚀影响的研究。本研究基于 Fluent 软件,采用剪切应力输运(shear stress transport, SST)  $k-\omega$  湍流模型,针对含沙量较小的长江流域,研究不同含沙量水流作用下圆柱体的受力特性及冲蚀受粗糙度的影响。

## 1 数值方法

### 1.1 数学方程

假定流体黏性不可压缩,不考虑温度对流场的作用,忽略能量方程,仅考虑质量守恒和动量守恒方程:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial (u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \nu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right). \quad (2)$$

式中,  $u_i$ 、 $u_j$  分别为  $i$ 、 $j$  方向的瞬时速度,  $p$  为压力,  $\rho$  为流体的密度,  $x_i$ 、 $x_j$  分别为  $i$ 、 $j$  方向的脉动速度,  $t$  为时间,  $\nu$  为黏度系数。

### 1.2 参数的定义

阻力系数  $C_d$ 、升力系数  $C_l$  是柱体所受阻力和升力经无量纲化后的结果,是定义绕流的主要特征参数。冲蚀率  $R_{\text{erosion}}$  是单位质量粒子对材料造成的质量磨损,是评价粒子对材料冲蚀程度的参数。

升力系数、阻力系数、冲蚀率的表达式分别为:

$$C_d = \frac{F_d}{\frac{1}{2} \rho U^2 D}, \quad (3)$$

$$C_l = \frac{F_l}{\frac{1}{2} \rho U^2 D}, \quad (4)$$

$$R_{\text{erosion}} = \sum_{p=1}^{N_{\text{particles}}} \frac{m_p C(d_p) f(\alpha) v^{b(v)}}{A_{\text{face}}}. \quad (5)$$

式中,  $\rho$  为流体密度,  $U$  为流体速度,  $D$  为流场中的圆柱的直径,  $F_d$  为圆柱所受的阻力,  $F_l$  为圆柱所受的升力,  $m_p$  为颗粒质量,  $C(d_p)$  为颗粒直径函数,  $\alpha$  为颗粒对壁面的冲击角,  $f(\alpha)$  为冲击角函数,  $v$  是颗粒相对壁面的速率,  $b(v)$  是相对速度函数。

利用 Fluent 软件,对圆柱壁面所受的力及冲蚀磨损量的结果进行监测,通过换算,得到  $C_d$ 、 $C_l$ 、 $R_{\text{erosion}}$  的具体数值。

## 2 计算模型的设置及验证

### 2.1 计算参数

圆柱直径  $D$  为 1.0 m,水流速度为 1.0 m/s,雷诺数  $Re = 1.0 \times 10^6$ ,计算流场与圆柱的布置如图 1 所示。入口与圆柱中心的距离为  $10D$ ,出口与圆柱中心的距离为  $15D$ ,前后表面与圆柱中心的距离均为  $10D$ ,圆柱展向高度的取值为  $\pi D$ 。圆柱材料与 C40 混凝土相同,抗压强度取值为 40 MPa,弹性模量为  $3.25 \times 10^4$  MPa。

### 2.2 边界条件

计算流场的入口为速度入口,出口为自由流出,上下表面为周期性边界,前后表面为对称边界,时间步长设置为 0.1 s,残差精度取  $10^{-5}$ 。

### 2.3 网格划分

利用 ICEM CFD 对网格进行划分。为了监测圆柱壁面附近的复杂流场变化,对壁面附近区域采用 O 型切分,加大网格密度。网格划分方式如图 2 所示,网格数量为  $2.8 \times 10^6$ 。

### 2.4 模型验证

为确保结果的准确性,对选用的计算模型进行验算。验算时,为节约计算资源,柱体粗糙度取 0、水流含沙量为 0,其他条件与正常计算流场相同。由于阻力系数和升力系数曲线在前期具有随机性,只有在流场稳定之后才会具有周期平稳性,因此在流场稳定后,再对升力系数和阻力系数进行相应处理。

验算模型的升力系数在流场稳定后的曲线变化如图 3 所示。通过图 3 可发现,在流场稳定之后,升力系数会出现具有周期规律的上下波动,这与文献[18]的研究结果相符。

将阻力系数均值与相同雷诺数下之前学者的研究结果进行对比,结果如表 1 所示。通过表中的结果对比可知,数值模拟的结果与 Pietro 的试验结果以及其他学者的研究结论相吻合,验证了采用的模型对圆柱绕流模拟具有良好的预测精度。

## 3 结果与分析

### 3.1 阻力系数分析

通过观察阻力曲线的变化,发现待流场稳定后,阻力系数在某一固定值附近出现周期变化,呈现出相对稳定状态。求得平稳周期内阻力系数的平均值,得到不同含沙水流下平均阻力系数与柱体粗糙度间的变化曲线,如图 4 所示。

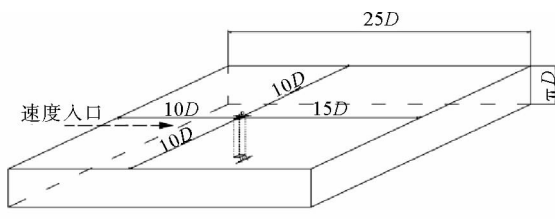


图 1 三维数值计算区域

Fig. 1 Three-dimensional numerical calculation area

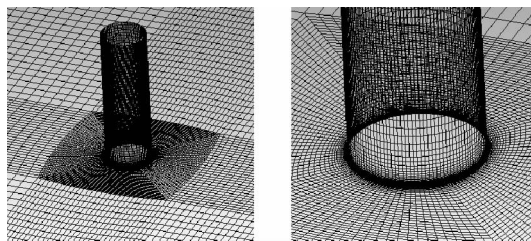


图 2 网格划分方式示意图

Fig. 2 Schematic diagram of grid division

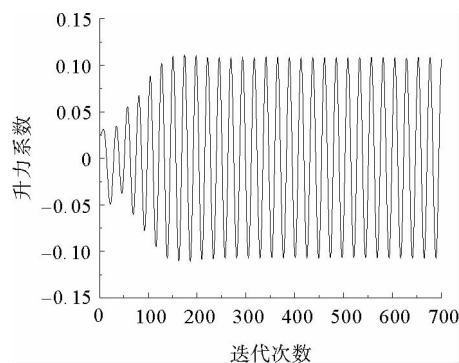


图 3 稳定后的升力系数的迭代曲线

Fig. 3 Iterative curve of lift coefficient after stabilization

圆柱体结构在水流的作用下,平均阻力系数与柱体表面粗糙度的变化趋势受含沙量影响较小。当水流的含沙量为  $0.5$  和  $5\text{ kg/m}^3$  时,平均阻力系数的变化趋势与含沙量  $0.05\text{ kg/m}^3$  时的变化趋势大致相同,相同粗糙度下的平均阻力系数虽然在数值上有所下降,但其变化幅度最大仅为  $2\%$ 。这是因为当水流的速度一定时,含沙量由  $0.05\text{ kg/m}^3$  改变至  $0.5\text{ kg/m}^3$ ,与由  $0.5\text{ kg/m}^3$  改变至  $5\text{ kg/m}^3$  相比,尽管后者的含沙量改变值在数值上较前者变化幅度更大,柱体上的阻力也出现了一个小幅度的改变,但与总体相比改变仍不明显,说明当水沙流的含沙量在  $0.05\text{ kg/m}^3$  至  $5\text{ kg/m}^3$  时,含沙量对柱体所受阻力的影响较小,结构体所受的阻力主要与流体的特性相关。从整体上看,当水流的含沙量相同时,柱体的平均阻力系数随着粗糙度的增大呈升高趋势,但其上升速率逐渐下降,且在粗糙度由  $0$  增大到  $0.1\%D$  时,平均阻力系数的增长率最大,这与文献[21]所得结论一致。

3.2 升力系数分析

对不同粗糙度下的圆柱升力系数的变化进行分析,如图 5 所示。

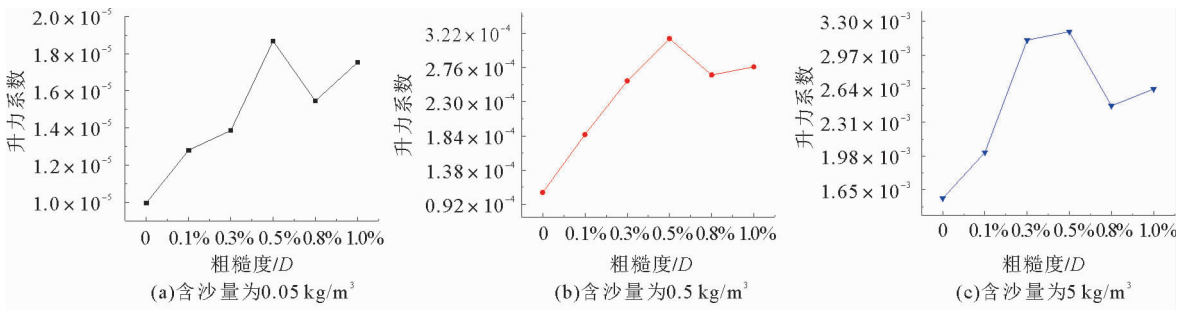


图 5 不同粗糙度下的升力系数

Fig. 5 Lift coefficient under different roughness

在粗糙度相同的情况下,随着水流含沙量增大,柱体的升力系数逐渐增大,说明了柱体上的升力受水沙流含沙量的影响较大。从升力系数的最大值上看,当水流的含沙量由  $0.05$  增加到  $0.5\text{ kg/m}^3$  时,柱体上的升力系数增大了  $15$  倍;而当水流的含沙量由  $0.5$  增大至  $5\text{ kg/m}^3$  时,柱体上的升力系数仅增大了  $10$  倍;水流含沙量的增长率与柱体上的升力系数增长率不成正比关系,说明柱体所受的升力与水流的含沙量之间呈非线性关系。在水沙流的含沙量相同时,柱体的升力系数随着粗糙度的增大,呈现出先升高后降低,然后再回升的趋势,且  $3$  种含沙量下的圆柱升力系数的变化趋势呈现相同的规律,其升力系数的最大值均出现在柱体粗糙度为  $0.5\%D$  的情况下,这说明了存在一个最佳粗糙度值<sup>[22]</sup>,当超过这个最佳粗糙度时,会在卡门涡街脱落时,对上表面的涡脱产生抑制作用,从而使得升力降低。

3.3 冲蚀率分析

对不同粗糙度的圆柱壁面受到含沙水流冲蚀时的磨损结果进行分析,绘制柱体冲蚀率的变化曲线,如图 6 所示。

表 1 阻力系数与其他文献的结果比较

Tab. 1 Comparison of drag coefficient with the results of other literature

网格划分	$R_e$	$C_d$
本文结果	$1.0 \times 10^6$	0.38
Zdravkovich <sup>[3]</sup>	$1.0 \times 10^6$	0.17~0.40
Pietro 等 <sup>[19]</sup>	$1.0 \times 10^6$	0.39
何颖等 <sup>[20]</sup>	$1.0 \times 10^6$	0.30

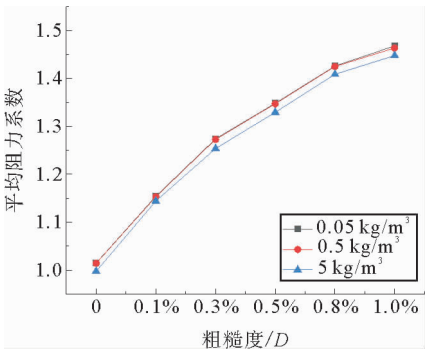


图 4 不同粗糙度下的平均阻力系数

Fig. 4 Average drag coefficient under different roughness

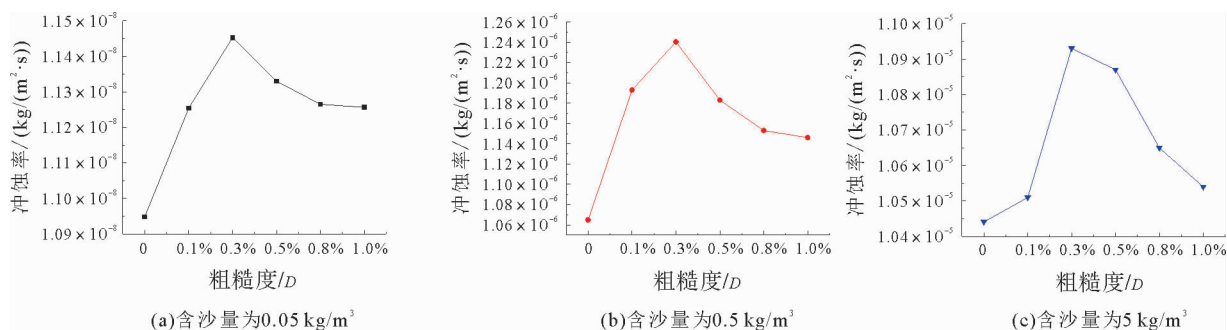


图6 壁面冲刷率随粗糙度变化趋势

Fig. 6 Variation trend of wall erosion rate with roughness

通过分析不同含沙量水流下粗糙度对圆柱壁面冲刷率影响的变化趋势,对比含沙量由 0.05 增大至 0.5 kg/m<sup>3</sup> 和由 0.5 增大至 5 kg/m<sup>3</sup> 这两个阶段的情况发现,虽然二者的水流含沙量都扩大了 10 倍,但前者对圆柱壁面最大冲刷率的改变量却达到了 100 倍,与后者的 10 倍相比,相差了 1 个数量级;这说明随着含沙量的不断增大,水沙流对圆柱壁面冲刷破坏的增长速率会在前期急剧增大,而后逐渐减小。从整体上来看,在粗糙度相同的情况下,随着水流含沙量的增大,壁面冲刷率也越大,这也与实际情况相符。在水沙流的含沙量相同时,圆柱的壁面冲刷率随着柱体表面粗糙度的增大,呈现出先升高后降低的情况,且 3 种含沙量下的圆柱壁面冲刷率的变化趋势呈现出相同的规律,其壁面冲刷率的最大值都出现在柱体粗糙度为 0.3%D 的情况下;这是由于水流在与柱体的粗糙表面作用后,会产生一个伴生涡<sup>[23]</sup> 进而提高水流对沙粒的搬运效率,当水流速度一定时,伴生涡的大小和强度在柱体粗糙度为 0.3%D 时达到最大,从而使得此时壁面冲刷率最大。

#### 4 结论

利用 Fluent 软件对水沙流下的圆形柱体进行了数值模拟,讨论了 3 种不同含沙量、5 种不同柱体表面粗糙度对圆柱绕流及冲刷的影响,得到以下结论:

- 1) 平均阻力系数的变化受柱体表面粗糙度的影响较小,且在柱体表面粗糙度由 0 增大到 0.1%D 时,平均阻力系数的增长率最大。
- 2) 在不同含沙量的水沙流作用下,升力系数的变化呈现出相同的规律,当柱体表面粗糙度为 0.5%D 时,升力系数达到该含沙量下的最大值。
- 3) 当柱体表面粗糙度由 0 增大到 0.3%D 时,壁面冲刷率逐渐增大,且在 0.3%D 时达到该含沙量的最大值;当柱体表面粗糙度由 0.3%D 增大到 1.0%D 时,壁面冲刷率逐渐减小。

#### 参考文献:

- [1]程海根,王前.水流作用下桥梁桩基础冲刷磨损数值模拟[J].华东交通大学学报,2017,34(4):22-88.  
CHENG Haigen, WANG Qian. Numerical simulation of bridge pile foundation erosion under the action of water flow[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2017, 34(4): 22-88.
- [2]YANG Y F, MELVILLE B W, MACKY G H, et al. Experimental study on local scour at complex bridge pier under combined waves and current[J/OL]. Coastal Engineering, 2020, 160: 103730.
- [3]ZDRAVKOVICH M M. Flow around circular cylinders[M]. Oxford: Oxford University Press, 2003.
- [4]HSU L C, CHEN C L. The drag and lift characteristics of flow around a circular cylinder with a slit[J]. European Journal of Mechanics: B Fluids, 2020, 82: 135-155.
- [5]LIU J B, BAI X D, GUO A X. Drag and lift forces on a stationary cylinder in a linear shear flow at a low Reynolds number [J/OL]. Journal of Fluids and Structures, 2020, 94: 102928.
- [6]崔维征,秦文彬,张宪堂,等.高雷诺数下串列双圆柱绕流的影响因素研究[J].水利水电技术,2018,49(2):92-98.  
CUI Weizheng, QIN Wenbin, ZHANG Xiantang, et al. Study on influence factors of flow around twin tandem-circular cylinders under high Reynolds number[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2018, 49(2): 92-98.

- [7]TAHIR D.Flow topology downstream of the hollow square cylinder with slots[J/OL].Ocean Engineering,2020,209:107518.
- [8]CUI W Z,ZHANG X T,LI Z X,et al.Three-dimensional numerical simulation of flow around combined pier based on detached eddy simulation at high Reynolds numbers[J].International Journal of Heat and Technology,2017,35(1):91-96.
- [9]胡彬,水庆象,王大国.不等直径串列圆柱绕流大涡模拟[J].水利水运工程学报,2017(1):103-110.  
HU Bin,SHUI Qingxiang,WANG Daguo.Large eddy simulation of flow past two tandem cylinders with different diameters[J].Hydro-Science and Engineering,2017(1):103-110.
- [10]张鹏飞,苏中地,广林端,等.直径变化对三圆柱绕流的影响[J].水动力学研究与进展(A辑),2012,27(5):554-560.  
ZHANG Pengfei,SU Zhongdi,GUANG Linduan,et al.Effect of the diameter change on the flow past three cylinders[J].Chinese Journal of Hydrodynamics,2012,27(5):554-560.
- [11]王聪,陈斌,郭烈锦,等.离散涡法模拟不同直径串列圆柱绕流[J].西安交通大学学报,2008,42(11):1340-1344.  
WANG Cong,CHEN Bin,GUO Liejin,et al.Simulation of flow across two tandem cylinders with different diameter by discrete vortex method[J].Journal of Xi'an Jiaotong University,2008,42(12):1340-1344.
- [12]申彦兵,秦文彬,张宪堂,等.不同间距比下粗糙度对并联双圆柱绕流的影响[J].水利水电技术,2019,50(7):131-136.  
SHEN Yanbing,QIN Wenbin,ZHANG Xiantang,et al.Effect of roughness on the flow of parallel double column cylindrical under different spacing ratios[J].Water Resources and Hydropower Engineering,2019,50(7):131-136.
- [13]王凯鹏,赵西增.不同来流条件下双圆柱绕流的数值模拟[C]//第十八届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集.北京:海洋出版社,2017:222-226.  
WANG Kaipeng,ZHAO Xizeng.Numerical simulation of flow around two cylinders under different inflow conditions[C]//Proceedings of the 18 th Symposium on China Marine (Coastal) Engineering.Beijing:Marine press,2017:222-226.
- [14]冯志成,周思柱,李美求,等.三通Y型管汇冲蚀规律研究[J].材料保护,2019,52(12):29-33.  
FENG Zhicheng,ZHOU Sizhu,LI Meiqiu,et al.Study on erosion law of Y-shaped pipe sink of three-way[J].Materials Protection,2019,52(12):29-33.
- [15]PENG W S,CAO X W,HOU J,et al.Experiment and numerical simulation of sand particle erosion under slug flow condition in a horizontal pipe bend[J/OL].Journal of Natural Gas Science and Engineering,2020,76:103175.
- [16]王博,郭海莹,耿孝恒,等.气固混合流对集输管道弯管的冲蚀模拟[J].北京化工大学学报(自然科学版),2020,47(1):46-52.  
WANG Bo,GUO Haiying,GENG Xiaoheng,et al.Erosion simulation of gas-solid mixed flow in a bent pipe[J].Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science Edition),2020,47(1):46-52.
- [17]韩宝坤,闫成稳,鲍怀谦,等.输气管道泄漏流场特性分析[J].山东科技大学学报(自然科学版),2017,36(6):32-38  
HAN Baokun,YAN Chengwen,BAO Huaiqian,et al.Analysis of flow field characteristics of gas pipeline leakage[J].Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science),2017,36(6):32-38.
- [18]DENG F,WU Y Z,LIU X Q.Simulation of vortex in separated flows with DES[J].Chinese Journal of Computational Physics,2008,25(6):683-688.
- [19]PIETRO C,WANG M,IACCARINO G,et al.Numerical simulation of the flow around a circular cylinder at high Reynolds numbers[J].International Journal of Heat and Fluid Flow,2003,24(4):463-469.
- [20]何颖,杨新民,陈志华,等.高雷诺数圆柱绕流分离的旋转控制[J].哈尔滨工程大学学报,2016,37(8):1143-1150.  
HE Ying,YANG Xinmin,CHEN Zhihua,et al.Rotational control of flow separation for flow past a rotating cylinder at high Reynolds number[J].Journal of Harbin Engineering University,2016,37(8):1143-1150.
- [21]董锐,赵林,葛耀君,等.双曲圆截面冷却塔壁面粗糙度对其绕流动态特性影响[J].空气动力学报,2013,31(2):250-259.  
DONG Rui,ZHAO Lin,GE Yaojun,et al.Investigation of surface roughness and its influence to flow dynamic characteristics of hyperbolic cooling tower[J].Acta Aerodynamica Sinica,2013,31(2):250-259.
- [22]张宗辰,乔渭阳,白涛.叶片表面粗糙度对高负荷低压涡轮的流动影响[J].哈尔滨理工大学学报,2019,24(2):59-72.  
ZHANG Zongchen,QIAO Weiyang,BAI Tao.Effects of surface roughness on the flow of high-lift low-pressure turbine[J].Journal of Harbin University of Science and Technology,2019,24(2):59-72.
- [23]陈娅君,龙威,杨绍华,等.粗糙度对微流道内流体连续自搬运的影响[J].工程设计学报,2018,25(3):321-329.  
CHEN Yajun,LONG Wei,YANG Shaohua,et al.Effect of roughness on continuous directional transport of fluid in micro-channel[J].Chinese Journal of Engineering Design,2018,25(3):321-329.

(责任编辑:吕海亮)