

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2020.06.004

# 洞塞对表面活性剂减阻管流阻力特性的影响

彭绍府, 蔡书鹏

(湖南工业大学 机械工程学院, 湖南 株洲 412007)

**摘要:** 为探究单洞塞对表面活性剂减阻水溶液管流阻力特性的影响, 采用不同孔径比和长径比的洞塞以及不同浓度减阻剂水溶液, 实验测试了不同工况下的局部阻力损失和沿程阻力损失并与纯水的相应结果进行比对。研究表明: 随着减阻水溶液浓度的增大, 洞塞的局部阻力系数的拐点向后平移, 减阻雷诺数范围越大, 局部阻力减阻持续的雷诺数范围越宽。在洞塞直径对管直径比一定的条件下, 洞塞长度对管直径比较小时, 局部阻力较大; 而洞塞长度对管直径比较大时, 局部阻力较小。在长径比一定的条件下, 局部阻力随洞塞孔径比的增大而减小, 且在洞塞下游, 减阻水溶液再次形成具有稳定减阻效果的流动所需要的再发展距离随着洞塞孔径比而减小。

**关键词:** 洞塞; 表面活性剂; 减阻; 管流阻力

**中图分类号:** TV131

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-9833(2020)06-00022-05

**引文格式:** 彭绍府, 蔡书鹏. 洞塞对表面活性剂减阻管流阻力特性的影响 [J]. 湖南工业大学学报, 2020, 34(6): 22-26.

## Effects of Hole Plug on Flow Resistance Characteristics of Aqueous Solution with Surfactant Drag Reduction

PENG Shaofu, CAI Shupeng

(College of Mechanical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

**Abstract:** In order to explore the influence of single-hole plugs on the resistance characteristics of the pipe flow of the surfactant drag reduction solution, the hole plugs with different aperture ratios and length-to-diameter ratios and different concentrations of drag reducer aqueous solutions are tested for local resistance loss under different working conditions, followed by a comparison between the resistance loss along the way and the corresponding results of pure water. The research results show that with the increase of the concentration of the drag reduction aqueous solution, the inflection point of the local drag coefficient of the cavern shifts backward. The larger the drag reduction Reynolds number range, the wider the continuous Reynolds number range of the local drag reduction. With the ratio of plug diameter to pipe diameter a constant, the local resistance tends to be larger when the plug length to pipe diameter is small, while the local resistance tends to be small when the plug length to pipe diameter ratio is large. With the length diameter ratio a constant, the local resistance decreases with the increase of the plug diameter ratio, and in the downstream of the plug, the redevelopment distance required for the drag reducing water solution to form a stable drag reduction flow decreases with the plug diameter ratio.

**Keywords:** plug hole; surfactant; drag reduction; conduit flow resistance

收稿日期: 2020-06-05

作者简介: 彭绍府 (1995-), 男, 湖南常德人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为水流减阻,

E-mail: 774214090@qq.com

通信作者: 蔡书鹏 (1963-), 男, 河北迁安人, 湖南工业大学教授, 博士, 主要从事水流动减阻方面的教学与研究,

E-mail: windowscsp@sina.com

## 1 研究背景

随着工业的高速发展,能源渐渐枯竭,节能减阻成为谋求可持续发展的必然选择。洞塞消能技术<sup>[1]</sup>和表面活性剂减阻技术作为节能减阻技术的重要组成部分也因此得到了快速发展。

洞塞消能的机理是水流通过突扩、突缩流区域段形成很强的剪切、紊动和摩擦,使水流的动能最终以热能的形式耗散掉,较之长距离细管,消能既可减小水流阻力又可减小对下游的影响。丁天明等<sup>[2]</sup>运用数值模拟的方法对洞塞消能特性进行了精确模拟。其研究表明,截面积突然扩大或突然缩小产生的流动分离逆流区是能量损失的源地。洞塞能量损失系数主要受到孔径比(洞塞直径与管直径之比)的影响。随着孔径比的增加,能量损失系数逐步减小,回流区长度减小。张立新等<sup>[3]</sup>为探究洞塞间距对多级洞塞消能影响进行了数值模拟,研究发现当孔径比在0.4~0.8范围内,只要上下级洞塞之间的间距达到 $5.7D$ 以上,各级洞塞之间的流动干涉消失,便能充分发挥各自的消能能力。

表面活性剂的减阻机理是,表面活性剂在溶液中可以形成以蠕动状或杆状的形式存在的长微团胶束组织,这种微团胶束组织能够抑制湍流、降低摩擦阻力系数,从而起到减阻的作用。很多专家学者在这方面做了较多研究,例如蔡书鹏等<sup>[4]</sup>为探讨表面活性剂水溶液的减阻机理,介绍了表面活性剂减阻特点,评述了各减阻机理假说,指出了减阻水溶液的入口段长度行为特性。蔡书鹏<sup>[5]</sup>对表面活性剂减阻水溶液突扩流的阻力特性进行了试验,研究结果表明,在较低雷诺数区域,呈现局部低减阻特性,在高雷诺数区域,呈现局部阻力增阻特性;表面活性剂水溶液减阻流,在突扩下游再次形成充分发展流所需的下游长度,远大于牛顿流体的7.8倍下游管径(45倍突扩台阶高度)。

相比纯水流的洞塞局部阻力和消能特性的研究,关于添加剂减阻水溶液管流中的洞塞对管流阻力特性的影响研究所见甚少。在文献[6-11]的基础上,本研究采用实验的方法将洞塞消能和表面活性剂减阻结合,旨在探究不同孔径比和长径比的洞塞,对不同浓度的表面活性剂水溶液管流阻力特性的影响规律,以期对工程实践提供科学的参考依据。

## 2 实验

### 2.1 工作流体

测试段均采用有机玻璃管,管壁厚度为2.5 mm,内径为10 mm,其它与工作流体接触的管件及附件

均采用塑料或不锈钢材料以便防腐。表面活性剂减阻剂为工业用阳离子表面活性剂十六烷基三甲基溴化胺(cetyltrimethylammonium bromide, CTAB),相对分子质量为365;稳定减阻效果的伴随盐为水杨酸钠(sodium salicylate,  $C_7H_5NaO_3$ ),相对分子质量为160。将CTAB和 $C_7H_5NaO_3$ 在室温下充分混合并达到热动力学平衡后的水溶液作为工作流体,本地的自来水作为比较对象的牛顿流体。

### 2.2 实验装置

图1为闭式循环系统局部压力损失和沿程损失测试实验装置示意图。

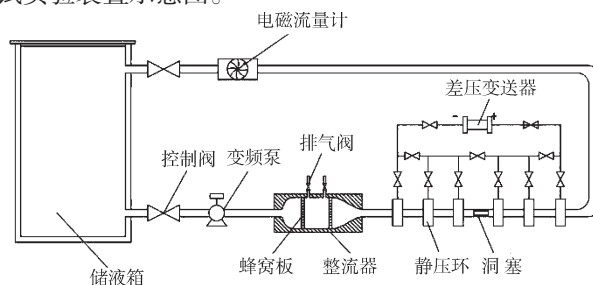


图1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental devices

实验装置中:水箱体积为360 L,为防止表面活性剂的腐蚀,制作材料为不锈钢304;变频泵为多级式离心泵,型号为CDLF2-3,流量范围为0~3.5 m<sup>3</sup>/h,最高扬程为27 m,调频范围为5~60 Hz,变频泵配有三菱通用型变频器,型号为FR-D700,调频范围为0.2~400.0 Hz;差压变送器采用XK系列3151差压变送器,量程为0~3 kPa,误差为 $\pm 0.1\%$ ;流量计采用液体涡轮流量计,型号为LWGY-MK-DN15,测量范围为0.4~8.0 m<sup>3</sup>/h。测试段采用直径为10 mm的有机玻璃管,管壁厚为2.5 mm。

### 2.3 实验方法

首先用清水测试不同工况下的局部阻力损失和沿程阻力损失,验证装置的可靠性;然后将CTAB与 $C_7H_5NaO_3$ 按质量比为1:2混合,配制成质量分数分别为 $10^{-4}$ ,  $2 \times 10^{-4}$ ,  $3 \times 10^{-4}$ 的CTAB与 $C_7H_5NaO_3$ 混合的减阻水溶液。加工长径比分别为0.2, 0.5, 1.0, 孔径比分别为0.6, 0.8的洞塞共6个。将溶液温度控制在25℃,通过改变洞塞的孔径比、长径比(洞塞轴向长度与管直径之比)以及水溶液的浓度,测试不同工况下的局部阻力损失和沿程阻力损失,并与清水测试结果比较。洞塞放置位置以及上下游管路的长度如图2所示(图中数据的单位为mm)。



图2 洞塞测试段简图

Fig. 2 Schematic diagram of hole plug test section

### 3 实验结果与分析

#### 3.1 洞塞段的局部阻力系数

通过试验测得  $L_2$  段的压差并计算出不同孔径比、长径比的局部阻力系数。雷诺数  $Re$ 、沿程阻力系数  $\lambda$  及局部阻力系数  $\xi$ ，分别按照如下公式定义或计算：

$$Re = UD/\nu, \quad (1)$$

$$\lambda = 2\Delta p Dg / (LU^2), \quad (2)$$

$$\xi = 2gh/U^2. \quad (3)$$

式(1)~(3)中： $U$ 为管内平均流速，m/s；

$D$ 为管直径，m；

$\nu$ 为纯水的运动黏度， $m^2/s$ ；

$\Delta p$ 为充分发展流区两点间压差，kPa；

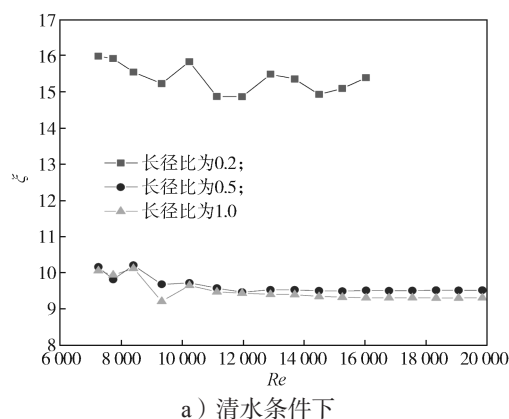
$g$ 为重力加速度， $m/s^2$ ；

$L$ 为阻力损失测试段的长度，m；

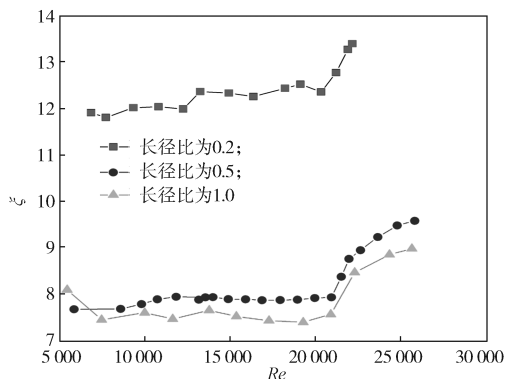
$h$ 为洞塞的局部阻力损失，m。

##### 3.1.1 不同长径比时洞塞的局部阻力系数

工作流体分别是质量分数为  $10^{-4}$  的减阻剂水溶液和清水，孔径比为 0.6，不同长径比 (0.2, 0.5, 1.0) 洞塞段局部阻力系数与雷诺数的关系如图 3 所示。



a) 清水条件下



b) 减阻剂水溶液条件下

图 3 不同工作流体、不同长径比时洞塞段局部阻力系数与雷诺数关系曲线

Fig. 3 Relationship curves between local resistance coefficient and Reynolds number in plug section with different working fluid and different length diameter ratio

由图 3 可知，当孔径比为 0.6，不同长径比时，洞塞对清水和减阻剂溶液流局部特性的影响行为类似。长径比为 0.2 时，洞塞局部阻力系数大于长径比为 0.5 和 1.0 的情形，这是因为对于突缩截面，流体从大截面到小截面存在“缩颈”现象，缩颈现象发生在突缩截面后  $(0.3 \sim 0.5)D$ 。对长径比为 0.2 的洞塞来说，缩颈现象发生在洞塞之后，流体流过该洞塞经过了一次较大突缩比的突缩和一次较大突扩比的突扩。对于长径比为 0.5 和 1.0 的洞塞，缩颈现象完整地发生在洞塞里面，也就是说，缩颈现象的后半部分也在洞塞内发生，相当于一次流动渐扩，从洞塞内壁到管壁的流动相当于再一次较小突扩比的流动突扩。渐扩产生的损失要小于一次突扩的损失，所以长径比为 0.5 和 1.0 洞塞的阻力损失要比长径比为 0.2 的洞塞的阻力损失小。由图 3 还可以看出，长径比为 0.5 和 1.0 的洞塞局部阻力系数基本相同，这是因为它们之间的差值仅为洞塞内沿程阻力损失上的不同，而沿程阻力损失非常小，可忽略不计，故两者的洞塞局部阻力相同。其他各组实验均具有类似的结果。

工作流体为质量分数为  $10^{-4}$  的减阻剂水溶液，孔径比为 0.8，不同长径比时的洞塞局部阻力系数与雷诺数的关系如图 4 所示。

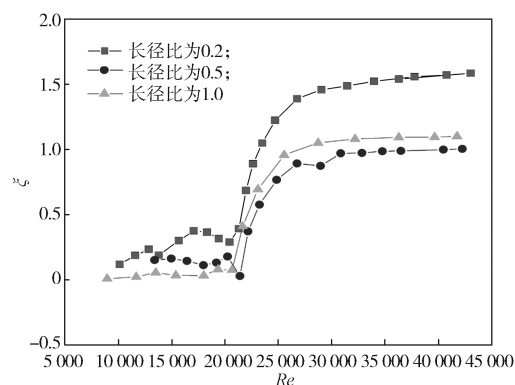


图 4 孔径比为 0.8 时不同长径比的洞塞段局部阻力系数与雷诺数关系曲线

Fig. 4 Relationship curves between local resistance coefficient and Reynolds number in plug section with different length diameter ratio and an aperture ratio of 0.8

对比图 3b 与图 4 可知，孔径比为 0.6 的洞塞局部阻力系数比孔径比为 0.8 的大。由此可知，孔径比越小，局部阻力系数越大。工作流体为纯水时也有类似的结论。

##### 3.1.2 不同工作流体下洞塞的局部阻力系数

当孔径比为 0.8、长径比为 0.5，工作流体分别为清水以及不同浓度的减阻剂水溶液（质量分数分别为  $10^{-4}$ 、 $2 \times 10^{-4}$  和  $3 \times 10^{-4}$ ）时，对洞塞的局部阻力系数进行对比，结果如图 5 所示。

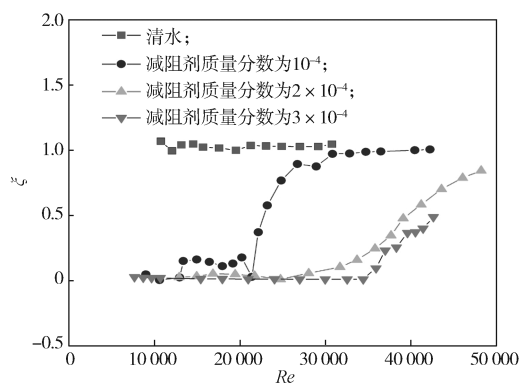


图5 不同工作流体下洞塞的局部阻力系数与雷诺数的关系曲线

Fig. 5 Relation curves between Reynolds number and local resistance coefficient of hole plug under different working fluids

从图5可以看出, 清水的局部阻力系数最大; 在减阻剂溶液中, 随着减阻剂浓度的增加, 洞塞的局部阻力系数减小, 即随着浓度增加, 洞塞的局部阻力系数减小, 在达到最佳减阻效果的临界雷诺数后局部阻力的减阻效果逐渐降低直至消失。由图5还可得知, 清水时, 局部阻力系数均约为1.1; 减阻剂溶液质量分数为  $10^{-4}$  时, 局部阻力系数拐点的雷诺数约为22 000; 减阻剂溶液质量分数为  $2 \times 10^{-4}$  时, 局部阻力系数拐点的雷诺数约为30 000; 减阻剂溶液质量分数为  $3 \times 10^{-4}$  时, 局部阻力系数拐点的雷诺数约为35 000。因此, 随着减阻剂溶液浓度的增大, 洞塞的局部阻力系数的拐点会向后平移, 其他各组实验均有类似结果。

综上可知, 洞塞的局部阻力系数随长径比和孔径比的增大而减小, 随减阻剂浓度的增大而减小。

### 3.2 洞塞下游段充分发展距离

当洞塞孔径比为0.8、长径比为0.5, 工作流体为清水时,  $L_1$ 段和 $L_3$ 段阻力系数与雷诺数的关系对比如图6所示。

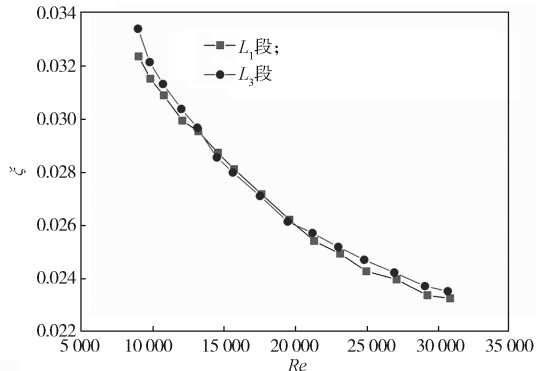


图6 孔径比为0.8、长径比为0.5的洞塞各段阻力系数与雷诺数的关系曲线

Fig. 6 Relation curves between resistance coefficient and Reynolds number of each section of hole plug with an aperture ratio of 0.8 and length-diameter ratio of 0.5

通过图6可知,  $L_1$ 段和 $L_3$ 段的阻力系数值基本一致, 由此可以得出结论: 在清水条件下 $L_3$ 段流动已经再次充分发展。

当洞塞孔径比为0.6、长径比为0.5, 工作流体是质量分数为  $2 \times 10^{-4}$  的减阻剂溶液时, 将各段减阻率  $\gamma_{dr}$  与雷诺数的关系进行对比, 结果如图7所示。

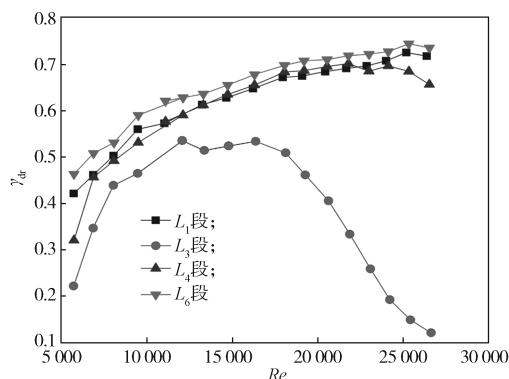


图7 孔径比为0.6、长径比为0.5的洞塞各段减阻率与雷诺数的关系曲线

Fig. 7 Relation curves between drag reduction rate and Reynolds number of each section of hole plug with an aperture ratio of 0.6 and length-diameter ratio of 0.5

由图7可知, 孔径比为0.6的情况下,  $L_4$ 段的减阻率大于 $L_3$ 段的, 可见 $L_3$ 、 $L_4$ 段流动还在发展。产生这种现象的原因是CTAB减阻剂溶液经过洞塞时, 截面积突然变小, 速度变大, 所受的剪切力增大, 剪切力达最大值后, 溶液中的部分剪切诱导结构将破坏, 从而导致减阻率下降。而在图7中, 随着雷诺数的增加,  $L_4$ 和 $L_6$ 段的减阻率增加, 是因为表面活性剂的减阻可逆, CTAB溶液中再次逐渐形成了剪切诱导结构。

当孔洞塞径比为0.8、长径比为0.5, 工作流体是质量分数为  $2 \times 10^{-4}$  的减阻剂溶液时, 将各段减阻率与雷诺数的关系进行对比, 结果如图8所示。

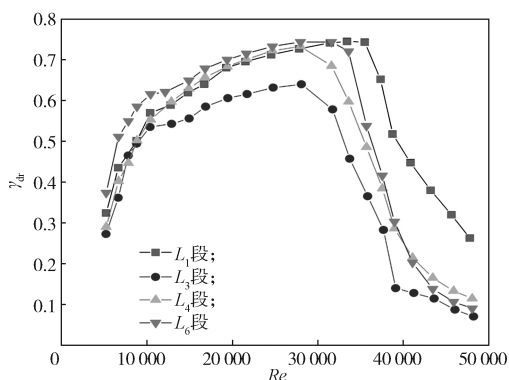


图8 孔径比为0.8、长径比为0.5的洞塞各段减阻率与雷诺数的关系曲线

Fig. 8 Relation curves between drag reduction rate and Reynolds number of each section of hole plug with an aperture ratio of 0.8 and length-diameter ratio of 0.5



分别比较图7和图8中的 $L_1$ 段、 $L_3$ 段、 $L_4$ 段和 $L_6$ 段曲线,可知孔径比为0.6的洞塞在 $L_3$ 段和 $L_4$ 段溶液没有充分发展,直到 $L_6$ 段溶液才充分发展;而孔径比为0.8的洞塞在 $L_4$ 段减阻率和 $L_1$ 段的减阻率比较接近,故溶液在 $L_4$ 段就已经充分发展。产生此现象的主要原因,是孔径比为0.6的洞塞比孔径比为0.8的洞塞的孔小,因此溶液经过洞塞时速度更大,溶液受的剪切力更大,造成溶液中剪切诱导结构的破坏越快、越多。所以孔径比为0.6的洞塞溶液充分发展所需要的距离比孔径比为0.8的洞塞长;随孔径比的增大,溶液经过洞塞所受的剪切力越小,下游充分发展所需的距离越短。

## 4 结论

本文通过试验研究了加入减阻剂后,洞塞对管流的局部阻力系数及对上下游流动的影响。研究结果表明:1)在雷诺数较小时,局部阻力系数随雷诺数增加基本保持不变,在超过某一雷诺数后,局部阻力系数开始增大,出现拐点,拐点雷诺数随减阻剂溶液浓度的增加而增大,直到局部阻力减阻效果消失。2)在孔径比一定的条件下,长径比较小时,局部阻力系数较大;而长径比较大时,局部阻力系数较小。3)在同一长径比和减阻剂溶液浓度下,孔径比越小,局部阻力系数越大;直管减阻雷诺数范围越大,局部阻力减阻的雷诺数范围也越大。4)在洞塞的下游,形成具有稳定减阻效果的充分发展流动所需要的流动距离远比纯水流动大,且充分发展流动所需要的流动距离随孔径比的减小而增大。

## 参考文献:

- [1] 艾万政, 吴建华. 孔板(洞塞)消能研究综述[J]. 中国农村水利水电, 2009(6): 129-131, 136.  
AI Wanzheng, WU Jianhua. An Overview of Research on Orifice(Plug) Energy Dissipation[J]. China Rural Water and Hydropower, 2009(6): 129-131, 136.
- [2] 丁天明, 张敏, 艾万政. 洞塞消能特性数值模拟研究[J]. 浙江海洋学院学报(自然科学版), 2016, 35(1): 48-51.  
DING Tianming, ZHANG Min, AI Wanzheng. Research on Plug Hydraulic Characteristics[J]. Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science), 2016, 35(1): 48-51.
- [3] 张立新, 梁蔚, 艾万政. 洞塞间距对多级洞塞消能影响的数值模拟研究[J]. 长江科学院院报, 2018, 35(4): 81-83.  
ZHANG Lixin, LIANG Wei, AI Wanzheng. Numerical Simulation on the Effect of Distance Between Plugs on Multi-Plug Energy Dissipation[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2018, 35(4): 81-83.
- [4] 蔡书鹏, 汪志能, 段传伟, 等. 表面活性剂减阻水溶液突扩流的阻力特性[J]. 力学学报, 2018, 50(2): 274-283.  
CAI Shupeng, WANG Zhineng, DUAN Chuanwei, et al. Drag Characteristics of a Drag-Reducing Surfactant Solution Flowing over a Sudden-Expansion Pipe[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2018, 50(2): 274-283.
- [5] 蔡书鹏. 表面活性剂水溶液的减阻机理分析[J]. 湖南工业大学学报, 2010, 24(4): 43-45.  
CAI Shupeng. Analysis on Drag Reduction Mechanism of Aqueous Solution with Surfactant Additives[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2010, 24(4): 43-45.
- [6] 魏进家, 刘飞, 刘冬洁. 减阻用表面活性剂溶液分子动力学模拟研究进展[J]. 力学学报, 2019, 51(4): 971-990.  
WEI Jinjia, LIU Fei, LIU Dongjie. Progress in Molecular Dynamics Simulations of Surfactant Solution for Turbulent Drag Reduction[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2019, 51(4): 971-990.
- [7] RÓŻAŃSKI J. Flow of Drag-Reducing Surfactant Solutions in Rough Pipes[J]. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 2011, 166(5/6): 279-288.
- [8] GU Y Q, YU S W, MOU J G, et al. Research Progress on the Collaborative Drag Reduction Effect of Polymers and Surfactants[J]. Materials, 2020, 13(2): 444.
- [9] 魏进家, 黄崇海, 徐娜. 表面活性剂湍流减阻研究进展[J]. 化工进展, 2016, 35(6): 1660-1675.  
WEI Jinjia, HUANG Chonghai, XU Na. Research Progress Concerning Turbulent Drag Reduction of Surfactant Solution[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2016, 35(6): 1660-1675.
- [10] MOHSENIPOUR A A, PAL R, PRAJAPATI K. Effect of Cationic Surfactant Addition on the Drag Reduction Behaviour of Anionic Polymer Solutions[J]. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 2013, 91(1): 181-189.
- [11] ABOU EL-AZM ALY A, CHONG A, NICOLLEAU F, et al. Experimental Study of the Pressure Drop After Fractal-Shaped Orifices in Turbulent Pipe Flows[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2010, 34(1): 104-111.

(责任编辑: 邓光辉)