

# 油气水三相流流过弯管的局部阻力特性研究<sup>\*</sup>

黄建春 张西民 郭烈锦

(西安交通大学, 710049, 西安)

**摘要** 以油气水三相混合物为工质,对进口水平、出口垂直向上 $90^\circ$ 弯管内油气水三相流的局部阻力特性进行了实验研究.弯管内径为45mm、弯曲半径为300mm.在实验数据分析和比较的基础上,将油气水三相流流过弯管的局部阻力特性在整个实验范围内分为3个区域,提出了各区域内局部阻力损失的计算式,计算值和实验值符合良好.

**关键词** 局部阻力 油气水三相流动  $90^\circ$ 弯管

中国图书资料分类法分类号 TK2

## Local Pressure Drop Characteristics of Oil-Gas-Water Flow around $90^\circ$ Pipe Elbow

Huang Jianchun Zhang Ximin Guo Liejin

(Xi'an Jiaotong University, 710049, Xi'an)

**Abstract** Experimental investigation is made for the three-phase flow of oil, gas and water entering horizontally into a  $90^\circ$  pipe elbow with a vertical exit. The pipe inner diameter is 45 mm and the bend radius is 300 mm. The observed local pressure characteristics can be divided into three regions, each of which is analyzed. Semi-empirical correlations are made for representing the local pressure drop data.

**Keywords** local pressuredrop oil-gas-water three-phase flow  $90^\circ$  pipe elbow

石油工业的发展关系到各国工业化的进程.原油的运输是石油工业的重要组成部分,由于管道输送在技术经济上的明显优越性,近些年来得以迅速发展.为了提高运输能力和效率,在不断提高管道技术装备水平的同时,世界各国的学者也开展了原油混相运输的研究.随着人们对水平管、垂直管及倾斜管内油气水三相流动特性的进一步认识,弯管内油气水三相流动特性的研究也日显重要.一方面,由于弯管内油气水三相流动特性完全不同于两相流体流

过弯管的流动特性,对它的研究不仅可以充实多相流热物理研究的内容,而且还为石油工业中管道设计及泵的选择提供了理论依据;另一方面,由于弯管流动的特殊性,又为解决石油工业中测量等实际问题提供了可能.但到目前为止,有关弯管内油气水三相流动特性的研究尚未见报道.为适应工业生产及科学技术发展的需要,本文开展了油气水三相混合物流过弯管局部阻力特性的实验研究.

收到日期:1997-07-08. 黄建春:男,1970年2月生,能源与动力工程学院动力工程多相流国家重点实验室,硕士生.

\* 国家自然科学基金(59576040)与陕西省科学研究基金资助项目.

## 1 实验系统、方法与参数范围

实验是在西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室的油气水三相流实验台上完成的. 实验系统、实验段及实验中各参数的测量、计算方法见文献[1].

相应于油气水三相流, 实验弯头段的重位压降的计算式为

$$\Delta p_{zW} = [\beta_G \rho_G - (1 - \beta_W) \rho_W + \beta_o \rho_o] gR \quad (1)$$

为便于整理实验数据和进行分析, 本文将与油气水三相混合物总的质量流量相同的单相水流过弯管的局部阻力损失定义为全水相局部阻力损失  $\Delta p_{TW}$ , 将油气水三相流局部阻力损失与全水相局部阻力损失之比定义为全水相局部阻力倍率, 即

$$\Phi_{TW}^2 = \Delta p_B / \Delta p_{TW} \quad (2)$$

其中  $\Delta p_{TW} = \xi_{Bo} \frac{G^2}{2\rho_W}$ ;  $\xi_{Bo}$  按文献[2]所给出的计算式计算.

实验参数范围

折算油速:  $U_{S0} = 0.02 \sim 0.701 \text{ m/s}$ ;

折算水速:  $U_{SW} = 0.035 \sim 1.747 \text{ m/s}$ ;

液相体积含油率:  $\Psi_o = 0.1 \sim 0.5$ .

折算气速:  $U_{SG} = 0.17 \sim 22.7 \text{ m/s}$ ;

## 2 实验结果及分析

在油气水三相流动中, 由于气相的扰动, 油水混合物大多处于乳化状态. 油水混合物按其连续相和分散相的不同, 可以分为油包水(简称 W/O)和水包油(简称 O/W)2 种类型.

前人的研究工作表明<sup>[3,4]</sup>, 不同的管内径及管子布置方位下, 油水乳状液从 O/W 型向 W/O 型转变的极限条件在液相体积含油率  $\Psi_o = 0.15 \sim 0.77$  这样一个宽广的范围内. 正是由于乳状液流态的不确定性, 使得管内油气水三相流动研究十分困难, 加上弯管内多相流动的复杂性和多变性, 使得弯管内油气水三相流动局部阻力特性变得更为复杂.

前人有关直管的大量工作表明<sup>[5,6]</sup>, 影响管内油气水三相流动阻力特性的最主要因素是油水乳状液的流态, 它与油、水的体积分数及内相液珠的分布有着直接的关系. 当油水混合物的内相体积分数大于 0.5 时, 油水乳状液的性质可以近似地看作非牛顿流体中的剪切稀化流体, 这种油水乳状液流过管

道时, 会出现流动阻力下降现象. 一般, W/O 型油水乳状液流动阻力下降的程度要比 O/W 型油水乳状液大, 特别是在油水混合物从 O/W 型状态向 W/O 型状态转变时, 流动阻力下降的现象尤其明显. 在油气水三相流动中, 这种流动阻力下降的程度还与折算气速有很大的关系, 并随折算气速的增加而增加.

### 2.1 折算气速 $U_{SG}$ 的影响

图 1a、b、c、d、e 分别为液相体积含油率  $\Psi_o$  等于 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5 时, 油气水三相及气水、油气两相在相同  $U_{SL}$  及  $x$  值条件下流过实验段的局部阻力损失  $\Delta p_B$  与折算气速  $U_{SG}$  的关系曲线, 其中气水及油气两相流过弯管的局部阻力损失采用文献[2]中的计算公式计算. 从图中可知, 在整个实验范围内, 当  $\Psi_o = 0.1$ 、 $U_{SG} > 2.0 \text{ m/s}$  或  $\Psi_o = 0.2$ 、 $U_{SG} > 3.6 \text{ m/s}$  时, 出现油气水三相流动阻力实验值小于气水两相流过弯管的局部阻力损失的现象; 随着  $\Psi_o$  的增加, 三相流阻力总是大于气水两相流阻力; 当  $\Psi_o$  增加到 0.5 时, 实验值远远偏离气水两相流过弯管的局部阻力曲线. 这说明弯管内油气水三相流的局部阻力损失与油水乳状液的流动状态确实有很大的关系, 转弯处扰动的大小直接影响油水乳状液的流动状态. 随着折算气速的增加, 油水乳状液发生剪切稀化的可能性也就随之增大, 并可以认为当  $\Psi_o = 0.5$  时, 油水混合物在实验参数范围内已基本完成 O/W 向 W/O 型乳状液的转变.

### 2.2 折算液速 $U_{SL}$ 的影响

图 2a、b、c、d、e 分别为液相体积含油率  $\Psi_o$  为 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5 时, 油气水三相在相同的液相体积含油率  $\Psi_o$ 、不同折算液速  $U_{SL}$  条件下, 全水相局部阻力倍率  $\Phi_{TW}$  和折算气速  $U_{SG}$  的关系. 从图可知, 当  $\Psi_o = 0.1$ 、 $U_{SG} > 2.0 \text{ m/s}$  或  $\Psi_o = 0.2$ 、 $U_{SG} > 3.6 \text{ m/s}$  时,  $\Phi_{TW}$  随着折算气速  $U_{SG}$  的增加而减小; 而在其它参数条件下,  $\Phi_{TW}$  总是随着折算气速  $U_{SG}$  的增加而增加. 在相同的液相体积含油率  $\Psi_o$ 、相同的  $U_{SG}$  下, 随着  $U_{SL}$  的增加,  $\Phi_{TW}$  总是呈现减小的趋势. 这说明, 折算液速对弯管内油气水三相流的局部阻力损失同样有直接影响, 折算液速的增加使油水乳状液发生剪切稀化的可能性也增加.

### 2.3 实验数据的处理结果

从以上分析可知, 油气水三相流流过弯管的局部阻力损失与油水乳状液的流态有很大关系, 而影响油水乳状液流态的最直接参数有  $\Psi_o$ 、 $U_{SG}$ 、 $U_{SL}$  等. 因此本文在处理实验数据时, 针对这些参数对局

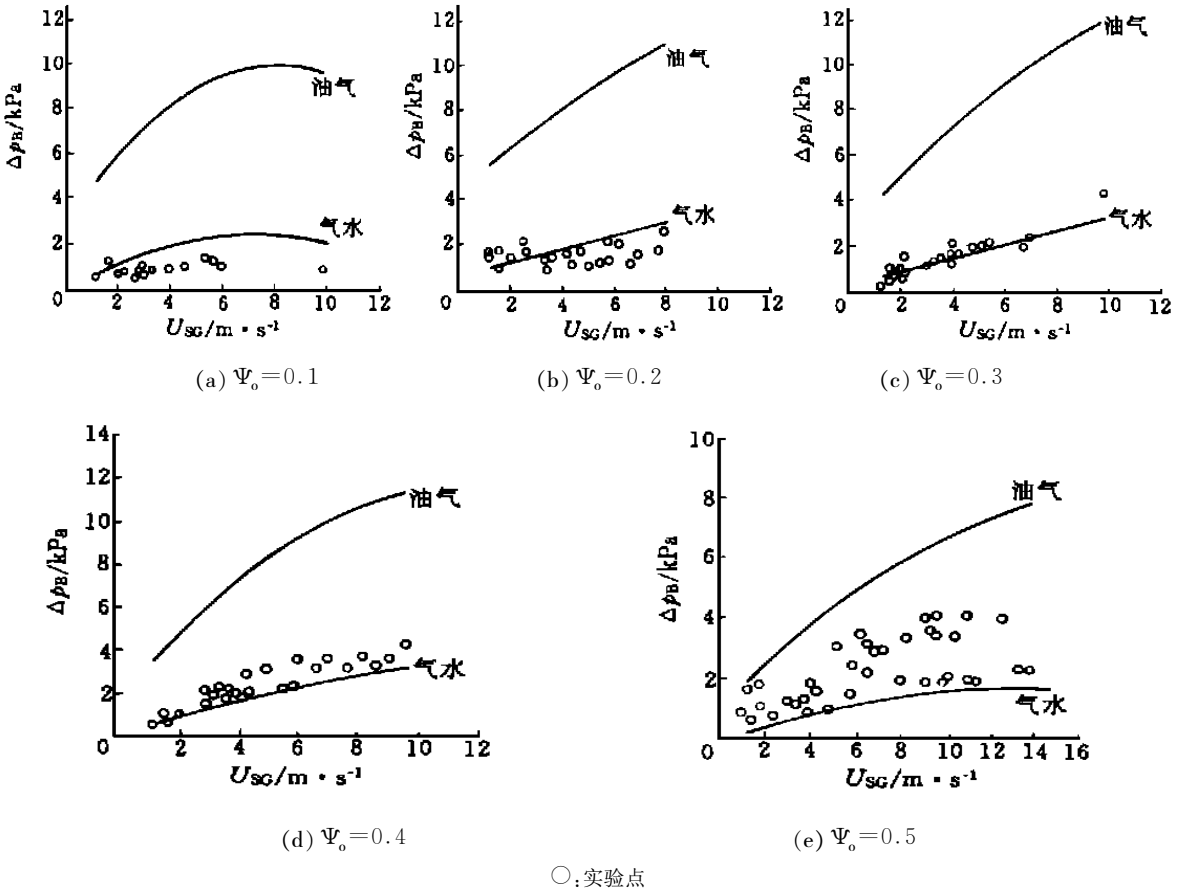


图1 两相和三相流的局部阻力损失与折算风速的关系

部阻力损失有影响的特点,将油气水三相流流过弯管的局部阻力损失的实验结果标在  $\Phi_{TW}$  及  $U_{SG}/U_{SL}$  为坐标的图中进行分析.

图3a、b、c为油气水三相流流过实验段时,油水混合物分别为O/W型和W/O型乳状液的实验结果.从图3中可知,当  $0.1 \leq \Psi_0 \leq 0.2$  时,  $\Phi_{TW}$  随着  $U_{SG}/U_{SL}$  的增加先减小后增加,不同液相含油率  $\Psi_0$  下  $\Phi_{TW}$  随着  $U_{SG}/U_{SL}$  减小和增加的速度几乎相同;当  $0.3 \leq \Psi_0 \leq 0.4$  时,  $\Phi_{TW}$  总是随着  $U_{SG}/U_{SL}$  的增加而增加,不同液相含油率  $\Psi_0$  下  $\Phi_{TW}$  随  $U_{TW}/U_{SL}$  增加的速度也相同,并且  $\Phi_{TW}$  的增加速度明显大于第1区域;当  $\Psi_0 \geq 0.5$  时,  $\Phi_{TW}$  也总是随着  $U_{SG}/U_{SL}$  的增加而增加,但当  $U_{SG}/U_{SL}$  增加到一定值后,  $\Phi_{TW}$  随  $U_{SG}/U_{SL}$  增加的速度变慢.因此,根据  $\Phi_{TW}$  在整个实验范围内随  $U_{SG}/U_{SL}$  变化的特点,将弯管内油气水三相流局部阻力特性分成3个区域,通过数据拟合,得出如下3个区域的局部阻力计算式.

第1区域内:

$$\left. \begin{aligned} \Phi_{TW} &= \Psi_0^{0.417} (5.562 - 0.731 U_{SG}/U_{SL}) \\ &0.1 \leq \Psi_0 \leq 0.2, \quad U_{SG}/U_{SL} < 2.8 \\ \Phi_{TW} &= \Psi_0^{0.417} (3.316 + 0.285 U_{SG}/U_{SL}) \\ &0.1 \leq \Psi_0 \leq 0.2, \quad U_{SG}/U_{SL} > 2.8 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

第2区域内:

$$\left. \begin{aligned} \Phi_{TW} &= \Psi_0^{0.489} (3.003 + 0.433 U_{SG}/U_{SL}) \\ &0.3 \leq \Psi_0 \leq 0.4 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

第3区域内:

$$\left. \begin{aligned} \Phi_{TW} &= 3.858 + 0.164 U_{SG}/U_{SL} \\ &\Psi_0 \geq 0.5, \quad U_{SG}/U_{SL} < 20 \\ \Phi_{TW} &= 6.735 + 0.028 U_{SG}/U_{SL} \\ &\Psi_0 \geq 0.5, \quad U_{SG}/U_{SL} > 20 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

将式(3)~(5)平方后即可求得全水相局部阻力倍率  $\Phi_{TW}^2$ , 该计算值与实验值的最大偏差都在25%以内.

第1区域相当于油水混合物处于O/W型乳状液的相对不稳定阶段.在这一区域内,可以分为2个子域,在第1个子域内,由于油水混合物在进入弯管之前尚未形成稳定的乳状液,油相基本上是以颗粒

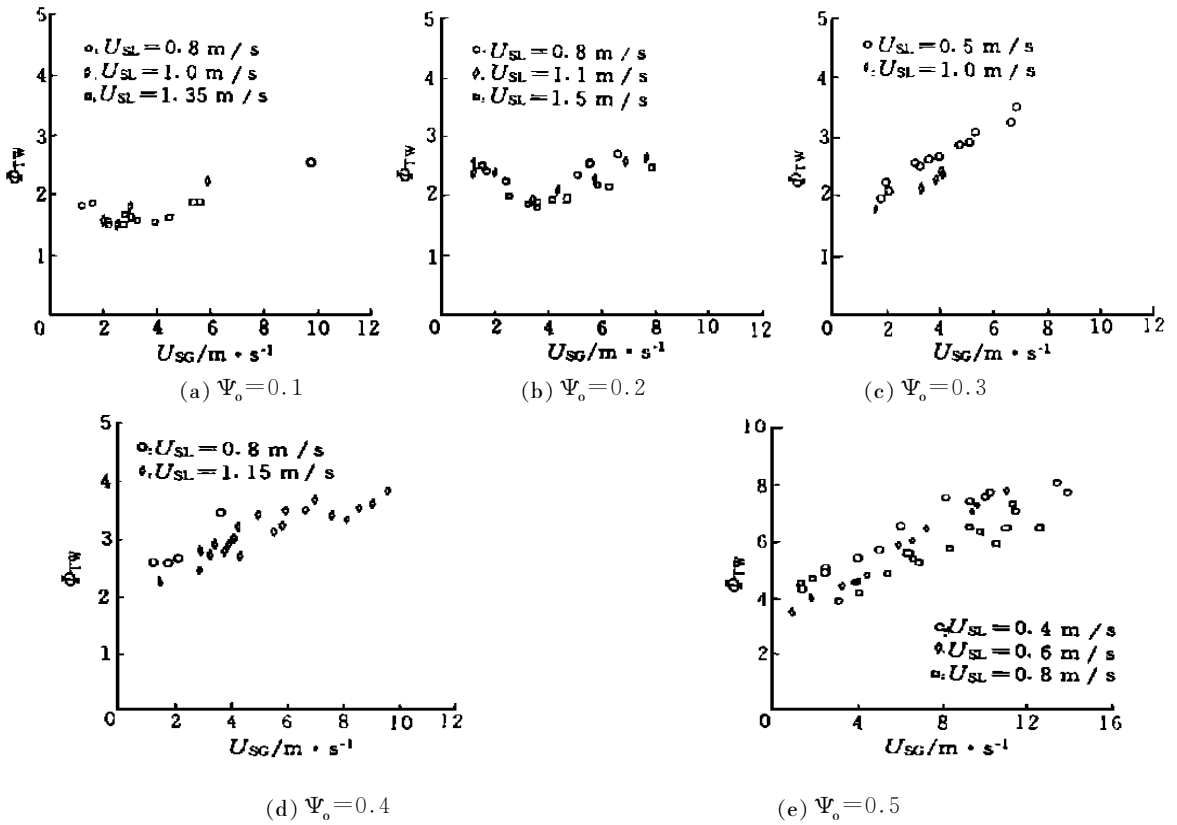


图2 含油率相同时,折算液速对全水相局部阻力倍率的影响

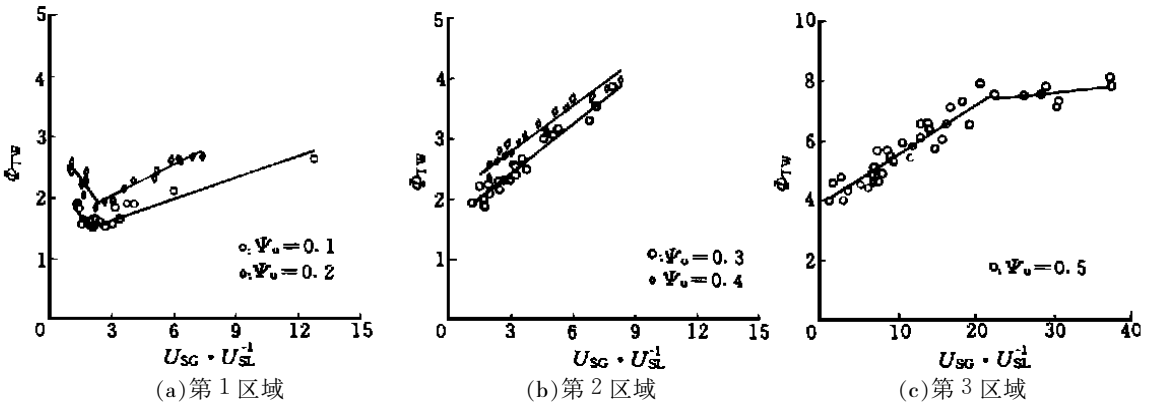


图3 油气水三相流过弯管的局部阻力实验结果

的形式分散在水中,随着含气量的增加,转弯处的扰动也随之增加,油水混合物逐渐形成稳定的乳状液,使得油相颗粒逐渐减少,油相与管壁接触的几率也逐渐减少,因而  $\Phi_{TW}$  也逐渐减小;在第2子域内,含气率增加到一定的程度,转弯处的扰动进一步增加,油水混合物基本形成了稳定的 O/W 型油水乳状液,因此  $\Phi_{TW}$  将因气体扰动所造成的动量损失逐渐增加而增加。

第2区域相当于油水混合物处于 O/W 型乳状液的相对稳定阶段。在这一区域内,由于油水混合物在进入弯管之前已形成稳定的 O/W 型油水乳状

液,并且在本次实验的范围内油水乳状液没有发生变型,因此  $\Phi_{TW}$  也将主要因气体扰动所造成的动量损失的增加而增加。

第3区域相当于油水混合物处于 W/O 型乳状液的相对不稳定阶段,在这一区域内,也可以分为2个子域,在第1个子域内,由于油水混合物在进入弯管之前已形成稳定的 W/O 型油水乳状液,此时  $\Phi_{TW}$  的增加主要是由于气体扰动所造成的动量损失逐渐增加的缘故;在第2子域内,当含气率增加到一

(下转第50页)

研究表明,在本文的试验条件下,无论是分层流、间歇流还是环状流,错流区的  $C$  值比窗口区的值要大得多.这说明,壳侧两相摩擦压降主要发生在错流区,这是 TEMA-F 型双弓板换热器的结构特性及几何参量所决定的,就不同流型而言,在其他条件相同的前提下,环状流的压降最小,分层流次之,间歇流最大.

### 3 结论

(1)研究表明,加热(液相有少量蒸发)状态时的流型及其转变方程与绝热状态时有较大差别.

(2)本文在用无量纲参数  $Fr_m$  和  $J_g/J_l$  的坐标系中,首次获得了绝热与加热状态的通用流型图.

(3)在不同流型下,按窗口区、错流区用 Martinelli 参数关联了两相摩擦压降,获得了较高精度

的关联式.拟合结果发现,对环状流与分层流,绝热和加热状态下的  $C$  值近于相等.

(4)对于液相有大量蒸发的加热状态,其流型及压降的规律有待进一步研究.

### 参 考 文 献

- 1 徐国平.壳侧两相流动特性的实验研究:[硕士学位论文].西安:西安交通大学能源与动力工程学院,1992
- 2 李 维.壳侧气液两相流动特性的研究:[硕士学位论文].西安:西安交通大学能源与动力工程学院,1993
- 3 杨小琼,王启杰,王崧. TEMA-F 型换热器壳侧单相压降的预测模型及其测量.化工学报,1996,47(3):332~339
- 4 Ishihara K, Palen J W, Taboreak J. Critical review of correlations for predicting two-phase flow pressure drop across tube banks. J Heat Transfer Eng, 1980,1(3):23~33

(编辑 蒋慧妹)

(上接第40页)

定的程度时,转弯处的扰动使得 W/O 型油水乳状液发生变型,水相逐渐从油相中分离出来,油相与壁面接触的几率逐渐减少,水相与壁面接触的几率增大,此时  $\Phi_{TW}$  的大小将由气体扰动所造成的动量损失增大和水相与管壁接触的几率变大这两种相反的影响因素共同作用所决定,造成  $\Phi_{TW}$  随  $U_{SG}/U_{SL}$  的增加其梯度有所下降.

### 3 结论

(1)弯管内油气水三相流的局部阻力特性与油水乳状液的流动状态有着直接的关系,本文根据实验结果,将弯管内油气水三相流的局部阻力特性在整个实验范围内分成3个区域.

(2)在参数条件比较相近的情况下,利用本文所给出的实验关联式来计算弯管内油气水三相流的局部阻力可以取得较好的效果;如果在参数条件相差比较大且缺乏油气水三相流动知识的情况下,弯管内油气水三相流的局部阻力损失,在油水乳状液为稳定的 O/W 型状态时可以近似地由气水两相流过弯管的局部阻力损失替代,在油水乳状液为稳定的 W/O 型状态时可以近似地由油气两相流过弯管的

局部阻力损失替代.

### 参 考 文 献

- 1 郭烈锦,黄建春.气水两相流流过弯管的局部阻力特性.西安交通大学学报,1998,32(5):38~41
- 2 黄建春.油气水三相流流过弯管的局部阻力特性研究:[硕士学位论文].西安:西安交通大学能源与动力工程学院,1997
- 3 Bacharov A N, Andriasov R S, Sakkarov V A. Investigation of the motion of gas-water-oil mixtures in horizontal pipes. Neftepromyslove Delop (in Russian), 1972, (6): 27~30
- 4 Guzhov A I, Medvedev V F, Savelev V A. Movement of gas-water-oil mixtures through pipelines. Chem Engineering, 1974, 14(4): 713~714
- 5 Pal R. Pipeline flow of unstable surfactant stabilized emulsions. AIChE J, 1993, 39(11): 1754~1764
- 6 Nadler M, Mewes D. The pressure drop of the three-phase flow of oil/water and gas in horizontal pipes. In: Proceedings of the 2nd International Conference on Multiphase Flow. Kyoto, Japan; Kyoto University, 1995. FT2-9~FT2-16

(编辑 蒋慧妹)