

# 倾斜上升管内气液两相弹状流壁面传质特性研究

闫凯 贺潇 张宇博 车得福

(西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

**摘要** 采用 VOF 模型对倾角为  $45^\circ$ 、 $80^\circ$ 、 $85^\circ$  三种情况下倾斜上升管内弹状流的壁面传质特性进行了研究。传质特性通过其与壁面切应力的类比关系来体现。数值模拟结果表明, 低混合物流速时, 上管壁面切应力在液膜区有明显波动, 而下管壁面切应力分布则比较光滑。随着混合流速的增大, 液膜区上下壁面切应力分布趋于一致。管子下壁面切应力平均值大于管子上壁面, 在 Taylor 气泡运动速度较低时较为突出。随着 Taylor 气泡速度的增大, 管子上下壁面的切应力平均值趋于相同。相同的混合流速下倾斜角度越大, 上下管壁的切应力分布越趋于近似。下降液膜区的壁面切应力平均值大于 Taylor 气泡尾迹区域。根据 Chilton-Colburn 的类比关系, 壁面切应力的规律完全适用于壁面传质系数。

**关键词** 弹状流; 倾斜管; VOF; 壁面切应力; 传质系数

**中图分类号:** O359    **文献标识码:** A    **文章编号:** 0253-231X(2009)09-1505-04

## A STUDY ON WALL MASS TRANSFER CHARACTERISTICS IN A GAS-LIQUID INCLINED UPWARD SLUG FLOW

YAN Kai HE Xiao ZHANG Yu-Bo CHE De-Fu

(State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract** With VOF model, the characteristics of wall mass transfer coefficient in a gas-liquid inclined upward slug flow are studied. The wall mass transfer coefficient is characterized by wall shear stress. The simulated results show that the wall shear stress in the falling film zone on the top wall has a significant fluctuation at lower mixture superficial velocities. Nevertheless, the wall shear stress distribution in the same zone on the bottom wall appears smoothly. With increased mixture superficial velocities, the difference between top and bottom wall shear stresses become less obvious. The bottom wall shear stress is usually greater than that of the top wall and the difference is obvious when the Taylor bubble rising velocity is small. However, with increased Taylor bubble rising velocities, the difference is less obvious. The difference vanishes with increased inclined angles at the same mixture velocities. The wall shear stress in the falling film zone is usually greater than that in the Taylor bubble wake zone. According to the analogy of Chilton-Colburn, wall shear stress can be used to characterize the wall mass transfer coefficient.

**Key words** slug flow; inclined tube; VOF; wall shear stress; mass transfer coefficient

## 0 引言

油气混输过程中经常遇见的流型之一是弹状流。在弹状流条件下近壁面区的流动和传质特性会对管壁金属产生加速腐蚀的重要影响。以往的研究多是针对垂直上升流动和水平流动, 倾斜管内气液两相弹状流较垂直管更为复杂, 管内倾斜上升气液弹状流动的相关研究还相当有限。Zukoski<sup>[1]</sup> 和

Bendiksen<sup>[2]</sup> 等对不同倾角 ( $0^\circ \sim 90^\circ$ ) 范围内气泡的运动情况进行过研究。

本文基于 VOF 模型, 对倾角为  $45^\circ$ 、 $80^\circ$ 、 $85^\circ$  三种情况下倾斜管中单个 Taylor 气泡进行数值模拟, 通过比较倾斜管内 Taylor 气泡运动速度的试验结果和数值解, 验证模型选择的正确性。在此基础上对壁面传质特性进行了研究。

收稿日期: 2008-12-10; 修订日期: 2009-07-15

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (No.50231020); 国家自然科学基金面上项目 (No.10372077)

作者简介: 闫凯 (1982-), 男, 山西河津人, 博士, 主要从事多相流动数值模拟方面的研究。

## 1 计算模型

在倾斜管中，重力和倾斜造成了相对管轴线的不对称性，这会影响到动量方程中的体力作用项，不仅需要考虑轴向和径向物理量的变化还要考虑各参数沿圆周方向的变化，因此，本文采用了三维计算网格，如图 1 所示。此外，采用 VOF 方法模拟 Taylor 气泡的运动，采用低雷诺数  $k-\varepsilon$  模型来模拟湍流流动，求解的具体方法见文献 [6]。

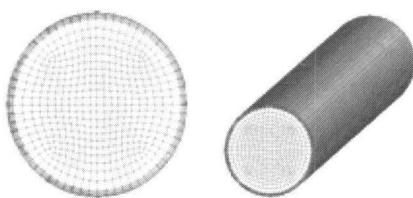


图 1 三维计算网格划分示意图

Fig. 1 The sketch map of the grid system in 3D

传质与壁面切应力有着密切的联系。根据 Chilton-Colburn 的类比关系，传质系数  $k_d$  与壁面切应力  $\tau_w$  之间的关系可表示为<sup>[4]</sup>：

$$k_d = 17.24 \left( \frac{\tau_w}{\rho} \right)^{0.5} Sc^{2/3} \times 10^{-5}, \quad Sc > 100 \quad (1)$$

## 2 模拟结果

### 2.1 气泡头部径向位置

图 2 为倾斜管内 Taylor 气泡头部顶点的示意图， $r_0$  表示 Taylor 气泡头部顶点与管轴线的距离， $R$  表示管子半径。由于重力沿管子径向分布的不对称性，Taylor 气泡头部顶点通常不在管子轴线上，而是偏向管子轴线上方。Taylor 气泡头部形状呈非轴对称的扁长椭球形。

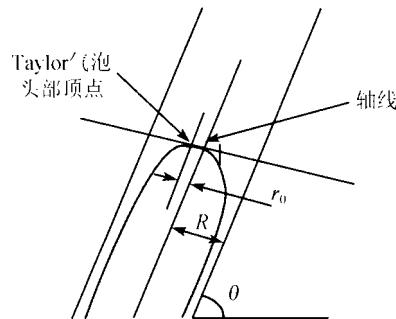
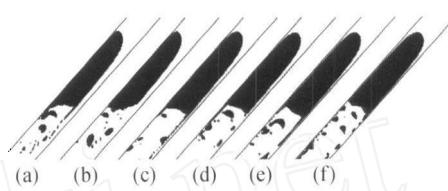


图 2 倾斜管内 Taylor 气泡头部顶点示意图  
Fig. 2 The sketch map of Taylor bubble nose in an inclined tube

从图 3 可以看出，在 45° 倾角下，由于浮力作

用，气泡头部位置将偏离管中心线，这种情况在混合物流速较低时尤为明显。随着混合物流速的增大，气泡头部位置逐渐向管子中心线靠近，并且形状越趋近于对称。当流速超过一定值后，气泡头部几乎位于管中心线，此时整个流动为轴对称的。这与文献 [3] 的结论一致。相同的结论也适用于 80°、85° 倾角的情况，具体见文献 [5]。对三种倾角下的气泡运动情况进行比对发现，倾角越大，流动的不对称程度越小，如图 4 所示。



(a)  $U_m = 0.8 \text{ m/s}$ ; (b)  $U_m = 1.2 \text{ m/s}$ ; (c)  $U_m = 1.6 \text{ m/s}$   
(d)  $U_m = 2.0 \text{ m/s}$ ; (e)  $U_m = 2.4 \text{ m/s}$ ; (f)  $U_m = 2.8 \text{ m/s}$

图 3 管倾角 45°,  $N_f = 2.1 \times 10^4$  和  $Eo = 158$  时，

不同混合物流速下的气泡形状

Fig. 3 Taylor bubble shapes for 45° inclined angle with  $N_f = 2.1 \times 10^4$  and  $Eo = 158$  at different mixture velocities

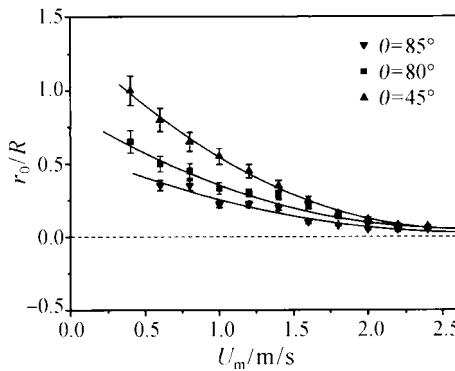


图 4 倾角 45°、80°、85°,  $N_f = 2.1 \times 10^4$  和  $Eo = 158$  时，不同混合流速下的气泡头部顶点位置

Fig. 4 The positions of Taylor bubble noses for 45°, 80° and 85° inclined angles with  $N_f = 2.1 \times 10^4$  and  $Eo = 158$  at different mixture velocities

### 2.2 气泡运动速度

图 5 给出了倾角为 80° 时，大气泡上升速度的模拟结果。其中两坐标轴分别为无量纲混合物流速  $Fr_m$  和无量纲大气泡速度  $Fr_{TB}$ 。

倾角为 45° 和 85° 时的关联式见文献 [5]。三种倾斜角的关联式与模拟数据的误差均小于 10%。其中倾角为 80° 和 85° 的结果与文献 [3] 的实验结果进行了比较，二者吻合较好。

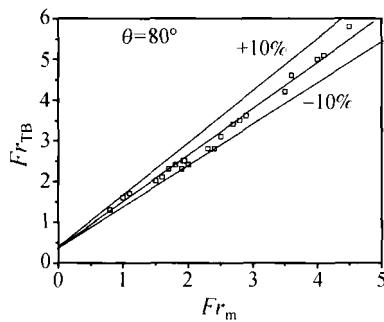


图 5 管倾角  $80^\circ$ ,  $N_f = 2.1 \times 10^4$  和  $Eo = 158$  时,  
 $Fr_m$  和  $Fr_{TB}$  的关系图

Fig. 5 The relationship of  $Fr_m$  and  $Fr_{TB}$  for  $80^\circ$  inclined angle with  $N_f = 2.1 \times 10^4$  and  $Eo = 158$

### 2.3 液膜厚度

倾斜上升气液弹状流中, 由于重力作用, 液膜将失去轴对称的环形结构, 而出现明显的气液分层。图 6 所示为相同气液流速下, 四种倾角液膜厚度变化情况的比较。垂直上升流动时, 气泡头部顶点位于管中心线, 液膜厚度始终小于对应位置倾斜上升弹状流的液膜厚度; 倾斜上升流动, 气泡头部顶点偏向管中心线上方, 倾角越小, 偏离管中心线距离越远, 同时相同轴向位置测得的液膜厚度越大。

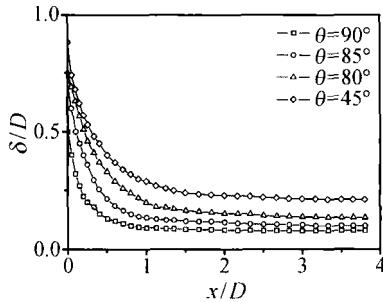


图 6  $N_f = 2.1 \times 10^4$  和  $Eo = 158$ ,  $U_m = 0.8$  m/s 不同  
管倾角下的 Taylor 气泡下降液膜厚度

Fig. 6 Falling liquid film thickness for different inclined angles with  $N_f = 2.1 \times 10^4$ ,  $Eo = 158$  and  $U_m = 0.8$  m/s

### 2.4 壁面切应力和传质系数

本文分别计算了  $45^\circ$ 、 $80^\circ$ 、 $85^\circ$  三种倾角下的弹状流壁面切应力。由于倾斜管的非轴对称性, 沿着管子圆周方向的切应力分布是不同的, 本文对轴切面的上下管壁面进行比较, 得出如下结果:

由图 8 可看出, 从 Taylor 气泡头部到尾部壁面切应力逐渐增大, 在气弹尾部壁面切应力变得杂乱无章。随着  $Fr_{TB}$  的增大, 壁面切应力也随之增大。

当  $Fr_{TB}$  数较小时, 上管壁面的切应力曲线在液膜区有明显波动, 而下管壁面在对应区域的切应力分布则比较光滑, 这是由于 Taylor 气泡在发展过

程中出现了与上管壁浸润的现象从而使气弹尾部与上管壁接触的区域出现波动, 使壁面切应力过早进入杂乱无章的状态, 如图 7、8。但是, 随着  $Fr_{TB}$  的增大, 上下壁面切应力曲线越来越靠近。这可以理解为: 当  $Fr_{TB}$  增大时, 惯性作用远大于浮力的影响, 使得重力场的非轴对称性对速度场的影响非常小以至于可以忽略, Taylor 气泡趋于轴对称, 下降液膜分布也接近于轴对称, 上下管壁液膜内的速度梯度分布也很接近, 从而壁面切应力分布也相近。

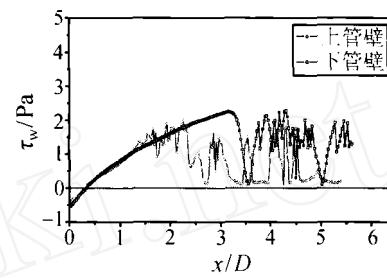


图 7  $45^\circ$  倾斜管,  $N_f = 2.1 \times 10^4$ ,  $Eo = 158$  和  
 $Fr_{TB} = 1.502$  时, 上下壁面切应力对比

Fig. 7 Top and bottom wall shear stresses for  $45^\circ$  inclined angle with  $N_f = 2.1 \times 10^4$ ,  $Eo = 158$   
and  $Fr_{TB} = 1.502$

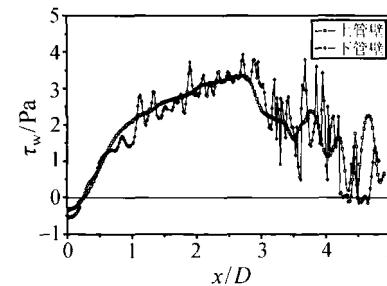


图 8  $45^\circ$  倾斜管,  $N_f = 2.1 \times 10^4$ ,  $Eo = 158$  和  
 $Fr_{TB} = 2.503$  时, 上下壁面切应力对比

Fig. 8 Top and bottom wall shear stresses for  $45^\circ$  inclined angle with  $N_f = 2.1 \times 10^4$ ,  
 $Eo = 158$  and  $Fr_{TB} = 2.503$

管子倾角也会对壁面切应力产生影响。比较相同  $Fr_m$  数下不同倾角的管子壁面切应力可以看出: 倾角越大上下管壁的切应力分布越趋于近似, 即同混合流速下管倾角越大 Taylor 气泡越趋于轴对称, 如图 7 和图 9 所示。

壁面切应力的大小主要受到 Taylor 气泡运动速度的影响, 当  $Fr_{TB}$  较小时, 管下壁面切应力平均值明显高于上壁面; 当  $Fr_{TB}$  较大时, 上下壁面切应力平均值趋于相等, 见图 10。

此外, 倾斜管内液膜区的平均壁面切应力大于 Taylor 气泡尾迹区的平均壁面切应力, 见图 11。

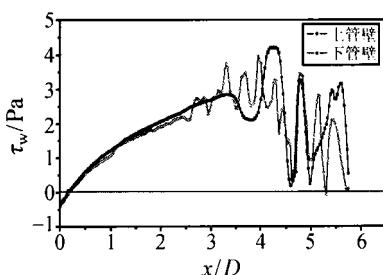


图 9  $85^\circ$  倾斜管,  $N_f = 2.1 \times 10^4$  和  $Eo = 158$  时,  
 $Fr_{TB} = 1.399$ , 上下壁面切应力比较

Fig. 9 Top and bottom wall shear stresses for  $85^\circ$  inclined angle with  $N_f = 2.1 \times 10^4$ ,  $Eo = 158$  and  $Fr_{TB} = 1.399$

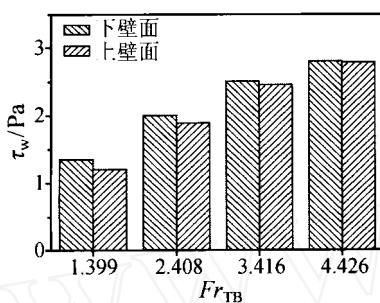


图 10  $85^\circ$  倾斜管在不同  $Fr_{TB}$  下沿 Taylor 气泡长度方向上下壁面切应力面积分平均值比较  $N_f = 2.1 \times 10^4$ ,  $Eo = 158$

Fig. 10 Top and bottom wall shear stresses averaged values for  $85^\circ$  inclined angle with  $N_f = 2.1 \times 10^4$  and  $Eo = 158$  at different  $Fr_{TB}$

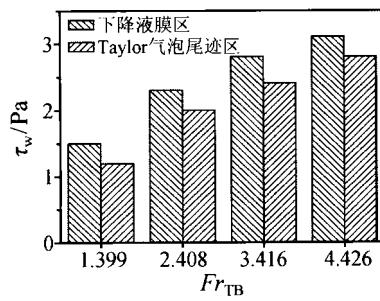


图 11  $85^\circ$  倾斜管下壁面在不同  $Fr_{TB}$  下降液膜区和尾迹区壁面切应力面积分平均值  $N_f = 2 \times 10^4$ ,  $Eo = 158$

Fig. 11 Bottom wall shear stresses in falling liquid zone and Taylor bubble wake zone for  $85^\circ$  inclined angle with  $N_f = 2.1 \times 10^4$  and  $Eo = 158$  at different  $Fr_{TB}$

根据式(1), 即 Chilton-Colburn 的类比关系, 前

述的壁面切应力的规律完全适用于壁面传质系数。

### 3 小结

研究结果表明, 倾斜管内充分发展下降液膜的壁面切应力随着  $Fr_{TB}$  的增加而增加, 而尾部区域的壁面切应力却表现为杂乱无章。上管壁面的切应力在液膜区有明显波动, 而下管壁面则比较光滑。随着  $Fr_{TB}$  数的增大, 上下管壁面切应力趋于一致。倾角越大, 上下管壁的切应力分布越趋于近似。

下降液膜区的壁面切应力平均值大于 Taylor 气泡尾迹区域。随着  $Fr_{TB}$  的增大, 管子上下壁面的切应力平均值趋于相同。

根据 Chilton-Colburn 的类比关系, 前面所述的壁面切应力的规律完全适用于壁面传质系数。

### 参考文献

- [1] Zukoski E E. Influence of Viscosity, Surface Tension and Inclination Angle on Motion of Long Bubbles in Closed Tubes. *J. Fluid Mech.*, 1966, 25: 821–837
- [2] Bendiksen K H. An Experimental Investigation of The Motion of Long Bubbles in Inclined Tube. *Int. J. Multiphase Flow*, 1984, 10: 467–483
- [3] 夏国栋. 垂直及倾斜上升管内气液两相弹状流流动特性研究: [博士学位论文]. 西安: 西安交通大学能源与动力工程学院, 1996
- [4] XIA Guo-Dong. Investigation on the Hydrodynamic Characteristics of Upward Gas-Liquid Slug Flow in Vertical and Inclined Tubes: [Ph.D. Thesis]. Xi'an: School of Energy & Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, 1996
- [5] Chilton C H, Colburn A P. Mass Transfer Coefficients Prediction from Data on Heat Transfer and Fluid Friction. *Ind. Eng. Chem.*, 1934, 26: 1183–1187
- [6] 贺潇. 垂直及倾斜上升管内气—液两相弹状流数值模拟: [硕士学位论文]. 西安: 西安交通大学能源与动力工程学院, 2007
- [7] HE Xiao. CFD Simulations of Gas-Liquid Slug Flow in the Vertical and Inclined Upward Pipes: [Master's Thesis]. Xi'an: School of Energy & Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, 2007
- [8] 贺潇, 车得福. 垂直及倾斜上升管内气液两相弹状流壁面切应力的模拟. 化工学报, 2008, 59(6): 1390–1395
- [9] HE Xiao, CHE Defu. CFD Simulation of Wall Shear Stress in Gas-Liquid Vertical and Inclined Upward Slug Flow. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)*, 2008, 59(6): 1390–1395