

壳侧气液两相流沿水平方向横掠 水平管束截面含气率的预测

李 维 (江苏石油化工学院)

王启杰 (西安交通大学)

〔摘要〕 本文在实验研究的基础上,结合前人的研究结果,将预测管内平均截面含气率的理论模型经适当修正后,提出了预测带折流板的管壳式换热器壳侧气液两相流沿水平方向横掠水平管束截面含气率的理论模型。结果表明,该模型能很好地预测壳侧顺排和叉排水平管束中不同物系两相流体的平均截面含气率。

关键词 管壳式换热器 汽液两相流 截面含气率

分类号 TK124

0 前言

在管壳式换热器壳侧气液两相流与传热问题中,壳侧截面含气率是确定两相压降、不稳定条件等方面的重要参数之一。因此,截面含气率的预测即成为两相流研究的一个重要课题。而截面含气率的理论预测,又是气液两相流研究的一个重要方面。多年来人们一直致力于这方面的探索。纵观两相流的研究历史,不难看出,管内两相流的研究正逐步从实验研究向理论预测发展。Zuber 和 Findlay (1965)^[1]建立的预测管内平均截面含气率的漂移流模型,被认为是一种较好的计算管内平均截面含气率的方法,有较大的适用性。与管内两相流的研究相比较,虽然壳侧两相流的研究目前尚处于积累实验数据的实验研究阶段,但已有研究结果表明,影响壳侧气液两相流平均截面含气率的主要因素与管内气液两相流的影响因素相类似。在壳侧平均截面含

气率的理论预测方面,可以适当借鉴管内气液两相流方面的一些理论预测模型。

最近,Dowlati 等人(1992)^[2]首次将 Zuber 和 Findlay 建立的漂移流模型引入壳侧,对气液两相流沿垂直方向横掠水平理想管束的平均截面含气率进行了理论预测,对 Dowlati(1990)^[3]的所有实验数据都很好地进行了预测,其偏差为 11.1%。但值得指出,虽然该理论模型在实验范围内反映质量流速及管束几何尺寸的影响,但却未能表明该模型能否反映流动方向及工质物性的影响。为此有必要进一步深入研究以建立更加完善的壳侧平均截面含气率的理论预测模型。

1 理论模型

在管内气液两相截面含气率问题上,Zuber 和 Findlay 建立的漂移流模型充分考虑了

通道截面上相密度和速度的非均匀分布所引起的整体滑移,以及局部两相间相对速度存在所引起的相间局部滑移对平均截面含气率的影响。Zuber 和 Findlay 认为,在两相流系统中,经常使用的是平均值而不是局部值,因此考虑的是流动参数 F 在整个流通截面 A 上的平均值。即:

$$\langle F \rangle = \frac{1}{A} \int_A F dA \quad (1)$$

其加权平均值为:

$$\tilde{F} = \frac{\langle \alpha F \rangle}{\langle \alpha \rangle} \quad (2)$$

据此,Zuber 和 Findlay 从气相漂移速度 U_{d-1} 着手:

$$U_{d-1} = U_g - U_h \quad (3)$$

$$U_h = \alpha U_g + (1 - \alpha) U_l \quad (4)$$

提出了如下关系式:

$$\tilde{U}_g = \frac{\langle \alpha U_g \rangle}{\langle \alpha \rangle} = C_0 \langle U_h \rangle + \tilde{U}_{d-1} \quad (5)$$

式(5)中,分布参数 C_0 考虑了截面流速和相密度不均匀分布的影响,用以修正一元均相理论。而加权平均气相漂移速度 \tilde{U}_{d-1} 考虑了两相间相对速度的影响。由式(5)Zuber 和 Findlay 得到确定管内气液两相流平均截面含气率的通用表达式:

$$\langle \alpha \rangle = \frac{\langle \alpha U_g \rangle}{C_0 \langle U_h \rangle + \tilde{U}_{d-1}} \quad (6)$$

式(6)中

$$\langle \alpha U_g \rangle = \frac{1}{A} \int_A \alpha U_g dA = \frac{Q_g}{A} = U_{g0} \quad (7)$$

$$\langle U_h \rangle = \frac{1}{A} \int_A U_h dA = \frac{Q_g + Q_l}{A} = U_{g0} + U_{l0} \quad (8)$$

可以看出, $\langle \alpha U_g \rangle$ 和 $\langle U_h \rangle$ 这两项具有清晰的物理意义,它们只与管内气相和液相折算速度 U_{g0} 和 U_{l0} 有关。此外 Zuber 和 Findlay 分别以 \tilde{U}_{d-1} 为纵坐标, $\langle U_h \rangle$ 为横坐标对管内气液两相流数据进行了关联,发现式(5)基本是一个关于 \tilde{U}_{d-1} 与 $\langle U_h \rangle$ 的线性关系式。这表明对于管内气液两相流 C_0 和 \tilde{U}_{d-1} 在一定范围内接近常数。

本文作者通过对带有折流板的理想管壳式换热器壳侧气液两相流沿水平方向横掠水平管束的实验数据^[4,5,6]的分析,发现 $\langle \alpha U_g \rangle$ 可以用以错流区最小流通截面积为基准的壳侧气相折算速度 U_{GS} 来替代, $\langle U_h \rangle$ 可以用以错流区最小流通截面积为基准的壳侧平均容积流密度 $\langle U_H \rangle$ 来替代。 \tilde{U}_{d-1} 可以利用式(5)基本为线性关系的特点,通过对壳侧实验数据进行线性关联得到(同时也得到 C_0)。即认为 \tilde{U}_{d-1} 对于壳侧气液两相流动是一个经验参数。由上述修正可得壳侧气液两相流体沿水平方向横掠水平管束平均截面含气率的理论预测模型:

$$\tilde{U}_0 = \frac{U_{GS}}{\alpha} = C_0 \langle U_H \rangle + \tilde{U}_{d-1} \quad (9)$$

$$\langle U_H \rangle = \frac{Q_g + Q_l}{A_{Cmin}} = U_{GS} + U_{LS} \quad (10)$$

$$\langle \alpha \rangle = \frac{U_{GS}}{C_0 \langle U_H \rangle + \tilde{U}_{d-1}} \quad (11)$$

2 结果与分析

本文作者以空气—油作为两相工质对在图 1 所示带折流板的理想换热器模型中,用快速关闭阀门法,对壳侧气液两相流体沿水平方向横掠水平管束平均截面含气率进行了实验研究^[4]。模型管束的几何尺寸及实验参数范围如表 1 所示。

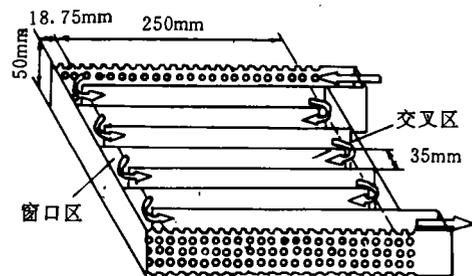


图 1 理想壳式换热器模型^[4]

表1 管束几何尺寸及实验参数范围

管排方式	管间距/管径	质量流速 (kg/(m ² ·s))	干度	工质对
顺排 ⁽⁴⁾	1.28	34—656	0.001—0.7	空气—油
顺排 ⁽⁵⁾	1.28	35—650	0.001—0.7	空气—水
顺排 ⁽⁶⁾	1.25	60—1120	0.001—0.9	空气—水

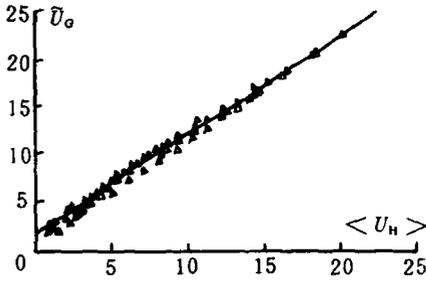


图2 漂移流模型关联的空气—油截面含气率实验数据

图2给出了由空气—油两相流体沿水平方向横掠顺排水平管束平均截面含气率实验数据得到的加权平均气相速度 \bar{U}_0 与壳侧平均容积流密度 $\langle U_H \rangle$ 的变化关系。可以看出,对所有实验数据 \bar{U}_0 与 $\langle U_H \rangle$ 具有很好的线性关系。其具体表达式如下:

$$\bar{U}_0 = 1.0424 \langle U_H \rangle + 1.66$$

上式标准误差为 7.4%。由此可知 $C_0 = 1.0424, \bar{U}_H = 1.66$ 。Dowlati 等人(1992)⁽²⁾ 利用漂移模型得到的气液两相流体垂直向上横掠水平管束平均截面含气率的预测模型关联式中的 $C_0 = 1.1035, \bar{U}_H = 0.33$ 。两者相比较可以看出:首先,本文得到 C_0 值和 Dowlati 等人计算的值相接近,且与管内气液两相流所报道的 $C_0 = 1.0 \sim 1.3$ 的值相一致。这表明流动方向及液相工质物性对壳侧流动分布系数 C_0 的影响不大。其主要原因可能是由于壳侧管束对流动的扰动作用,使得壳侧流动截面上的相密度分布不均匀性减小。其次,本文得到

的 \bar{U}_H 值与 Dowlati 等人得到的有较大的差别。这表明流动方向及液相工质物性对壳侧气相漂移速度有较大的影响。且值得注意,与管内研究得到的关于水平管内的相漂移速度可近似为零的结论不同,所得到的壳侧气液两相流体沿水平方向横掠水平管束的气相漂移速度值不为零,壳侧气相漂移速度的影响不能忽略,其影响程度的大小与壳侧两相流体的流动方向及液相工质物性有关。

由图3可以看出,本文模型能很好地预测 Grant 等人(1979)⁽⁶⁾ 在与图1类似的理想管壳式换热器模型中,以空气—水为工质对所得实验数据,且也能很好地预测在图1模型中以空气—水为工质对所得实验数据⁽⁵⁾,所有预测值的标准误差为 12.1%。

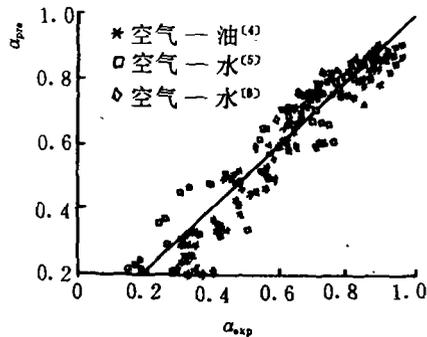


图3 截面含气率的理论预测值与实验数据的比较

图4反映了壳侧截面含气率的漂移流模型的预测值、空气—油⁽⁴⁾两相流体截面含气率的实验值、空气—油⁽⁴⁾截面含气率经验关

联式的截面含气率预测值及空气—水⁽⁵⁾两相流体截面含气率的实验值随干度的变化。可以看出,在不同的质量流速下漂移流模型能很好地对实验数据进行预测,这也进一步表明漂移流模型能很好地反映质量流速对壳侧平均截面的含气率的影响。

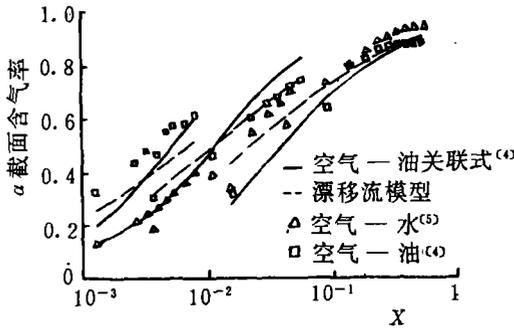


图 4 截面含气率的理论预测值及实验数据随干度的变化

3 结论

通过对实验数据的理论分析,建立了预测带折流板的管壳式换热器壳侧气液两相流沿水平方向横掠水平管束截面含气率的漂移流模型。该模型能很好地预测壳侧顺排和叉排水平管束中不同物性两相流体的平均截面含气率。同时分析研究发现,流动方向及液相工质物性对壳侧分布系数 C_0 的影响不大,壳侧漂移流模型中的 C_0 值与管内气液两相流所报导的 C_0 值相一致。但流动方向及液相工质物性对壳侧气相漂移速度有较大的影响。

符号说明

- A 最小流通截面积
- A_{Cmin} 错流区最小流通截面积
- C_0 速度分布系数
- G 质量流速
- Q 体积流量

- U_{sl} 气相漂移速度
- \bar{U}_{sl} 加权平均气相漂移速度
- \bar{U}_s 管内加权平均气相速度
- \bar{U}_o 壳侧加权平均气相速度
- U_{gs} 管内气相折算速度
- U_{ls} 管内液相折算速度
- U_{os} 壳侧气相折算速度
- U_{ls} 壳侧液相折算速度
- U_s 管内体积流密度
- U_o 壳侧体积流密度
- x 质量含气率(干度)
- α 截面含气率
- $\langle \rangle$ 对最小流通截面积的平均值
- 角标
- g 管内气相
- l 管内液相
- G 壳侧气相
- L 壳侧液相
- exp 实验值
- pre 预测值

参考文献

- 1 Zuber N. and Finlady J. Average volumetric concentration in two-phase flow systems. ASME J. Heat Trans., 1965, 87(3), 453-486
- 2 Dowlati R, Kawaji M, Chisholm D, Chan A M C. Void fraction prediction in two-phase flow across a tube bundle. AIChE J. 1992, 38(4), 619~622
- 3 Dowlati R; Kawaji M and Chan A M C. Pitch-and-Diameter effect on two-phase flow across an in-line tube bundle. AIChE J., 1990, 36(5), 765~772
- 4 李维. 壳侧气液两相流动特性的研究. 西安交通大学硕士学位论文, 1993
- 5 徐国平. 壳侧两相流流动特性的研究. 西安交通大学硕士学位论文, 1992
- 6 Grant I D R and Chisholm D. Two-phase flow on shell-side of a segmentally baffled shell-and-tube heat exchanger. Heat Trans. J., 1979, 101(1), 38-42
- 7 陈学俊. 两相流与传热—原理及应用. 原子能出版社, 1991
- 8 徐济鉴. 沸腾传热和气液两相流. 原子能出版社, 1993

作者简介: 李维,男,1963年生,讲师,硕士。现在江苏石油化工学院热能工程教研室任教。主要研究,热能利用技术的研究与应用,相变传热理论的研究。(通讯处:213016 江苏常州)

three types of absorbers. **Key Words:** solar energy, absorber, thermal efficiency

壳侧气液两相流沿水平方向横掠水平管束截面含气率的预测 = Prediction of Void Fraction of a Shell-side Gas-liquid Two-phase Flow along a Horizontal Direction Transverse Horizontal Tube Bundle [刊, 中]/Li Wei (Jiangsu Petrochemical Institute), Wang Qijie (Xi'an Jiaotong University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1996, 11(5). -278~281

On the basis of experimental investigation coupled with the research findings of veteran engineers the authors have duly modified a theoretical model for predicting average void fraction in tubes and proposed their own theoretical model for the prediction of the void fraction of shell-side gas-liquid dual-phase flow of a segmentally baffled shell-and-tube heat exchanger along horizontal direction transverse horizontal tube bank. It has been shown that the proposed model is able to make a quite accurate prediction of the average void fraction of different-matter dual-phase flow in shell-side in-line and staggered horizontal tube banks. **Key words:** shell-and-tube heat exchanger, gas-liquid two-phase flow, void fraction

斯特林热机的性能优化分析 = Optimal Analysis of a Stirling Heat Engine Performance [刊, 中]/Yuan Duqi, Liu Zongxiu (Baoji College of Arts & Science) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1996, 11(5). -282~284

Taking into account the nonreversibility of thermal resistance in a Stirling heat engine working process, the finite time character of constant volume regenerative process and regeneration loss, the authors have conducted an optimal analysis of the Stirling heat engine performance under the Newton heat transfer law by employing finite time thermodynamics theory, and obtained some conclusions helpful for the optimal design and the selection of optimal working parameters. **Key words:** Stirling heat engine, heat transfer law, performance optimization, finite time thermodynamics.

缩放喷管内两相流动的数值模拟及喷管设计 = The Numerical Simulation of Two-phase Flow in a Convergent-divergent Nozzle and the Design of Such Nozzles [刊, 中]/Lu Zehua, Cao Renfeng (Tsinghua University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1996, 11(5). -285~291
Described in this paper is a dual-fluid split-phase flow mechanism model with dual-phase relative drift and flow pattern transformation during non-equilibrium state phase transformation being taken into account. A numerical simulation was performed of the steam/liquid dual-phase flash evaporation critical flow within the convergent-divergent nozzle. A computation program has been worked out. The calculation results are in good agreement with experimental data. The nozzle design method has been successfully employed in the modification work of an energy-saving system of Yueyang Changling Refinery in Hunan Province. **Key words:** convergent-divergent nozzle, two-phase flow, flash evaporation, numerical simulation

EC301 压缩机扩容改造项目低压段离心级试验设计 = Test and Design of a Low-pressure Section Centrifugal Stage in Connection with EC 301 Compressor Uprating-oriented Modification Project [刊, 中]/Wang Dawei (Harbin 703 Research Institute) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1996, 11(5). -292~296

The full-scale three-dimensional flow centrifugal stage test conducted on an axial compressor test rig