

确定对流传质系数的膜渗模型

黄凤良, 夏春梅, 陈 敏

(南京师范大学 电气与自动化工程学院, 江苏 南京 210042)

[摘要] 针对对流传质过程研究中两个具有代表性的模型理论——薄膜模型理论和渗透模型理论确定的对流传质系数与实验结果存在一定不一致的问题, 在分析薄膜模型理论和渗透模型理论特点的基础上, 基于边界层理论, 提出了确定对流传质系数的膜渗模型. 讨论了该模型理论的原理、对流传质系数的确定方法及系数的正确性、优越性, 获得了利用膜渗模型确定的对流传质系数表达式, 并与遵循薄膜模型理论、渗透模型理论及 Frossling 经验公式的对流传质系数进行了比较. 结果表明: 膜渗模型更符合边界层理论, 能更合理解释流动边界上的对流传质过程; 对流传质系数与扩散系数的关系为 D^n ($n = 0.5 \sim 1.0$), 符合经验公式及实际中大量实验结果.

[关键词] 对流传质, 传质系数, 膜渗模型, 扩散系数

[中图分类号] TB932 TK124 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2007)03-0026-04

Film-Penetration Method to Determining the Convective Mass Transfer Coefficient

Huang Fengliang Xia Chumei Chen Min

(School of Electrical and Automation Engineering Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

Abstract In order to study the process of the convective mass transfer, many kinds of methods and models had been presented in the past. The FILM theory and the Penetration theory are the two representative theories. But there are some differences between the mass transfer coefficients from the two theories and the actual experimental result. Based on the boundary layer theory and the analysis of the characters of the FILM theory and the Penetration theory, the Film-Penetration model is presented. The principle of the model is discussed. With the model, the formulation for the mass transfer coefficient is deduced in details. The advantage and the correctness of the formulation are proved. The result shows that the Film-Penetration model is much fit for the boundary layer theory and is more reasonable to explain the process of the convective mass transfer, and the expression to describe the relation between the mass transfer coefficient and the diffusion coefficient is D^n ($n = 0.5 \sim 1.0$) and is much fit for the actual experimental result.

Key words convective mass transfer, mass transfer coefficient, Film-Penetration model, diffusion coefficient

0 引言

对流传质是在流体流动条件下的质量传输过程, 包含着质点的对流和分子扩散两种传质方式. 为了揭示流动界面上的对流传质过程, 通常采用对流传质系数, 通过传质系数来说明传质过程的本质和特征. 为此, 不同领域的许多研究者提出了许多关于对流传质过程的设想和确定传质系数的模型理论^[1-4], 其中具有代表性的是薄膜模型理论和渗透模型理论, 并获得了相应的传质系数. 由薄膜模型理论确定的对流传质系数 k 与扩散系数 D 呈一次方关系, 即 $k \propto D$; 按渗透模型理论则为二次方根关系, 即 $k \propto \sqrt{D}$, 该结果在众多研究者的工作中得到了大量的应用^[5-9].

但实际中大量实验结果表明: 对于大多数的对流传质过程传质系数与扩散系数的关系为 D^n ($n = 0.5$

收稿日期: 2006-12-05

基金项目: 国家自然科学基金 (60202012) 资助项目.

作者简介: 黄凤良 (1971-), 教授, 博士, 主要从事自动测试技术与智能化测试系统、软测试技术的教学与研究.

E-mail: huangfengliang@njnu.edu.cn

~ 1. 0), 可见薄膜模型理论和渗透模型理论确定的结果, 仅是表示了实际情况中的两边界状况, 单纯用薄膜模型理论或渗透模型理论确定的对流传质过程传质系数, 必然与实际传质系数存在较大误差, 以此传质系数了解传质过程的本质和特征也必然会存在片面性. 因此研究新的对流传质模型具有重要的意义.

本文拟基于薄膜模型理论及渗透模型理论, 研究与实际具有更好一致性的对流传质模型并确定传质系数, 为正确揭示传质过程的本质及特征奠定基础.

1 膜渗模型

分析薄膜模型理论与渗透模型理论可知: 薄膜模型理论将流动界面上的对流传质看作浓度边界层内浓度线性分布的定态扩散传质过程, 充分强调了浓度边界层中流体质点的层流特性. 而渗透模型理论认为流体质点在不断穿过流体的附壁薄层投向表面并与表面接触后又不断离去的过程中完成质量的传递, 是不定态的扩散传质过程, 充分强调了浓度边界层内流体质点的紊流特性. 而边界层理论认为: 边界层是在一定距离内发展的, 在边界层的发展过程中, 边界层内气流的流动可能是层流, 也可能是层流转变为的紊流. 浓度边界层也不例外, 片面的强调某一方面都可能导致分析的失效. 在研究流动界面上的对流传质时, 既需要考虑浓度边界层的层流特性, 也需要考虑浓度边界层的紊流特性, 才更符合边界层理论.

结合薄膜模型理论和渗透模型理论, 本文提出了研究对流传质过程的膜渗模型, 其原理如下 (参见图 1 所示的流体从物料带走湿分的过程): 在 δ 厚度的浓度边界层中, δ_1 厚度内是完全的层流, 对流传质过程是浓度线性分布的定态扩散传质过程, 即遵循薄膜理论; 在 $\delta - \delta_1$ 厚度内是完全的紊流, 与外流层一起是流体质点不断穿过流体的附壁薄层投向 $x = \delta_1$ 面并与该面接触后又不断离去而进行的传质过程, 是不定态的扩散传质, 即遵循渗透模型理论.

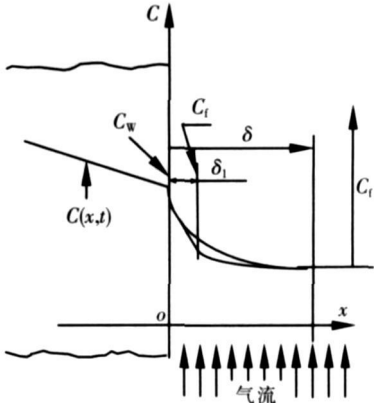


图 1 对流传质系数的膜渗模型
Fig.1 Film-Penetration model for convective mass transfer coefficient

2 膜渗模型法确定对流传质系数

基于膜渗模型的原理, 其决定的对流传质系数确定过程如下.

在 δ_1 厚度内, 根据薄膜模型理论得定态扩散传质的传递通量为:

$$n_1 = \frac{D}{\delta_1} \cdot (C_w - C'_f), \tag{1}$$

其中, n_1 为 δ_1 厚度内的传质通量; C_w 为物料表面的湿分浓度; C'_f 为 $x = \delta_1$ 处湿分浓度; D 为湿分在介质中的扩散系数.

在 $x \geq \delta_1$ 厚度内, 根据渗透模型理论对不定态扩散传质进行分析, 按 Fick 第二定律得:

$$\frac{\partial C(x, t)}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial^2 C(x, t)}{\partial x^2}, \tag{2}$$

式中, $C(x, t)$ 为 t 时刻 x 处的浓度; D 意义同前.

过程的初始条件和边界条件为:

$$\begin{aligned} t = 0 \quad \delta_1 \leq x < \infty \quad C &= C'_b \\ t > 0 \quad x = \delta_1 \quad C &= C'_b \\ x \quad \infty \quad C &= C_b \end{aligned}$$

其中, C'_f 为湿分浓度.

采用 Laplace 变换法对式 (2) 在上述初始条件和边界条件下求解, 得 $x \geq \delta_1$ 内浓度场为:

$$C(x, t) = C'_f - (C'_f - C_f) \cdot \operatorname{erf} \left[\frac{x - \delta_1}{2 \sqrt{Dt}} \right]. \tag{3}$$

则由 (3) 式可得 $x = \delta_1$ 界面上的扩散传质通量为:

$$n_2 \Big|_{x=\delta_1} = \sqrt{\frac{D}{\pi t}} (C'_f - C_f).$$

(4)

则平均扩散通量为:

$$n_2 \Big|_{x=\delta_1} = 2 \sqrt{\frac{D}{\pi t}} (C'_f - C_f).$$

(5)

根据膜渗模型原理有:

$$n_1 = n_2 \Big|_{x=\delta_1}.$$

(6)

则 $x = \delta_1$ 界面的传质通量为:

$$n \Big|_{x=\delta_1} = \frac{\frac{D}{\delta_1} \cdot 2 \sqrt{\frac{D}{\pi t}}}{\frac{D}{\delta_1} + 2 \sqrt{\frac{D}{\pi t}}} (C_w - C_f).$$

(7)

得对流传质系数 k 为:

$$k = \frac{\frac{D}{\delta_1} \cdot 2 \sqrt{\frac{D}{\pi t}}}{\frac{D}{\delta_1} + 2 \sqrt{\frac{D}{\pi t}}}.$$

(8)

3 验证与讨论

文献 [10] 给出了薄膜模型理论及渗透模型理论确定的对流传质系数结果:

$$k_b = \frac{D}{\delta},$$

(9)

$$k_s = 2 \sqrt{\frac{D}{\pi t}}.$$

(10)

为表示出 k 随 D 变化的规律, 令浓度边界层厚度 $\delta^{-1} = (\pi t)^{-0.5}$ 并取一定值, 由薄膜模型理论、渗透模型理论及膜渗模型确定的对流传质系数如图 2 所示.

由上图可见: 在 δ_1 厚度非常薄 ($\delta_1 = 10^{-6} \delta$) 时, 膜渗模型的确定结果与薄膜模型理论的确定结果在扩散系数的数量级 (一般小于 10^{-4}) 内完全重合, 即膜渗模型等价于薄膜模型理论; 在 δ_1 厚度接近于整体浓度边界层厚度 ($\delta_1 = 1.000\,001^{-1} \delta = 0.999\,999 \delta$) 时, 膜渗模型的确定结果与渗透模型理论确定的结果在扩散系数的数量级内也完全重合, 即膜渗模型等价于渗透模型理论; 而当 δ_1 厚度由 0 逐渐向 δ 厚度过渡时, 膜渗模型的确定结果在薄膜模型理论与渗透模型理论的结果范围内.

因此, 膜渗模型描述的对流传质系数, 是随浓度边界层内层流层厚度的变化而变化的, 从而更好的符合了边界层发展理论, 体现了浓度边界层中的层流部分和紊流部分沿流体流动方向是变化的, 对流传质的机理也是变化的, 在不同的点上应具有不同的传质系数. 可见膜渗模型能对流动界面上对流传质过程作更合理的解释.

结合膜渗模型确定的传质系数曲线及幂函数性质, 可得基于膜渗模型的对流传质过程传质系数与扩散系数的关系为:

$$k \propto D^n, \quad 0.5 \leq n \leq 1.0.$$

(11)

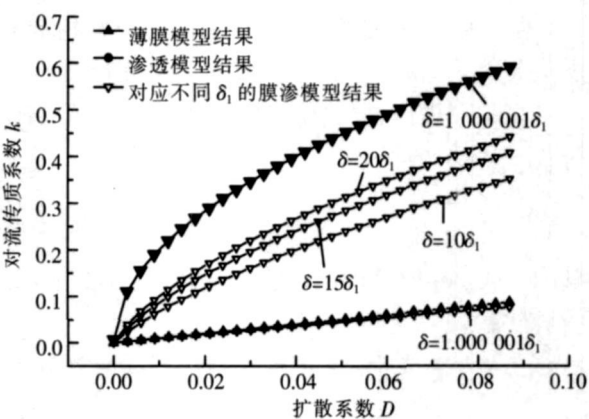


图 2 3 种对流传质系数模型结果对比
Fig.2 Comparison of the result for three convective mass transfer models

该结果与 Frossling经验公式^[9]描述的对流传质 $k = 2.0 + C_0 D^{2/3}$ (C_0 为系数) 相一致.

4 结论

通过本文的讨论:提出了确定对流传质系数的膜渗模型,得到了该模型下的能更符合实验结果的对流传质系数表达式,并通过与薄膜模型理论、渗透模型理论以及 Frossling经验公式结果的对比,验证了该模型确定的对流传质系数的正确性和优越性;同时该模型更符合边界层理论,能够对对流传质过程作更合理的解释.

[参考文献] (References)

- [1] Cheng Chingyang Fully developed natural convection heat and mass transfer in a vertical annular porous medium with asymmetric wall temperatures and concentrations [J]. Applied Thermal Engineering 2006, 26(18): 2442-2447.
- [2] JanelO rfi Nicolas Galanis Mixed convection with heat and mass transfer in horizontal tubes [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer 2005, 32(4): 511-519.
- [3] Cheng Chingyang Natural convection heat and mass transfer of non-Newtonian power law fluids with yield stress in porous media from a vertical plate with variable wall heat and mass fluxes [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer 2006, 33(9): 1156-1164.
- [4] 黄凤良. 基于软测量的检测技术 [J]. 南京师范大学学报: 工程技术版, 2003, 3(1): 5-9.
Huang Fengliang Measuring techniques based on soft-sensing [J]. Journal of Nanjing Normal University: Engineering and Technology Edition 2003, 3(1): 5-9 (in Chinese)
- [5] Aygun Y ildiz T Koray Pakozoglu Feruh Endoglu Determination of heat and mass transfer parameters during frying of potato slices [J]. Journal of Food Engineering 2007, 79(1): 11-17.
- [6] Christer Nylund Kerstin Meinander The influence of heat transfer coefficient on cooling time in injection molding [J]. Heat Mass Transfer 2005, 41(5): 428-431.
- [7] Acevedo C, Sanchez E, Young M E Heat and mass transfer coefficients for natural convection in fruit packages [J]. Journal of Food Engineering 2007, 80(2): 655-661.
- [8] Burns J R, Jachuck R J J Determination of liquid-solid mass transfer coefficient for a spinning disc reactor using a limiting current technique [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer 2005, 48(12): 2540-2547.
- [9] 黄志刚, 朱慧, 李栋, 等. 颗粒物料传热传质过程的数值仿真与实验研究 [J]. 计算机仿真, 2006, 23(9): 330-332.
Huang Zhigang Zhu Hui Li Dong et al Numerical simulation and test of particulate materials heat and mass transfer [J]. Computer Simulation 2006, 23(9): 330-332 (in Chinese)
- [10] 高家锐. 动量热量质量传输原理 [M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1987: 364-371.
Gao Jianrui Transfer Principle for Momentum, Heat and Mass [M]. Chongqing Chongqing University Press 1987: 364-371 (in Chinese)

[责任编辑: 刘 健]