

稳定同位素¹³C 分离用 高效丝网波纹填料表面降膜流动研究

田叶盛,李虎林,姜永悦,龙 磊,吉永喆,蔡 扬

(上海化工研究院 上海稳定同位素工程技术研究中心,上海 200062)

摘要:由于碳同位素分离系数小,分离难度大,需要采用高效规整填料实现¹³C的分离。本文通过计算流体力学(CFD)数值模拟研究,采用流体体积函数(VOF)方法,研制了用于¹³C分离的高比表面积丝网波纹规整填料(PACK-¹³C),建立了 PACK-¹³C 填料表面伴随有气相逆流的局部液体降膜流动模型,选用 CO(l)-CO(g)为模拟计算物系,考察了板面结构、丝网目数等因素对液膜流动的影响,并对填料表面气液相界面进行追踪,探究了气液相界面波动对传质效率的影响,研究表明,改善填料壁面结构能够增强气液相界面波动,可以实现强化传质过程。填料表面局部降膜流动的研究方法,可应用于填料气液传质过程中涉及的多尺度流动及传质现象的可视化研究,为优化填料结构提供基础性理论指导。

关键词:计算流体力学;降膜流动;规整填料;稳定同位素¹³C

中图分类号:TL364.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-7512(2016)02-0108-08

doi:10.7538/tws.2016.29.02.0108

Local Falling Film Flow Study of Mesh Corrugated Packing Used in the Separation of Stable Isotope ¹³C

TIAN Ye-sheng, LI Hu-lin, JIANG Yong-yue, LONG Lei, JI Yong-zhe, CAI Yang

(Shanghai Engineering Research Center of Stable Isotope,

Shanghai Research Institute of Chemical Industry, Shanghai 200062, China)

Abstract: The separation coefficient of carbon isotopes is small, high-efficiency structured packing should be used in the separation of ¹³C. So the self-developed high-efficiency structured packing PACK-¹³C was put forward. By means of computational fluid dynamics (CFD), a local falling film flow of mesh corrugated packing PACK-¹³C with the gas phase counter-current model using the volume of fluid (VOF) was presented. CO(l)-CO(g) was selected to be the simulation mixtures. Based on the simulated results, the influences of the plate structures and the mesh sizes on the film flow were investigated. Based on the gas-liquid interface tracking timely, the influence of interface fluctuation on the mass transfer efficiency was also investigated. The results showed that improving the wall structures to enhance the interface fluctuation was the effective

收稿日期:2015-08-13;修回日期:2016-02-16

基金项目:上海张江国家自主创新示范区专项发展资金重点项目(201310-PT-B2-007);上海市科委科研项目(15DZ2280500)

作者简介:田叶盛(1988—),男,安徽安庆人,工程师,化学工程专业

way to strengthen the mass-transfer efficiency. The method of local falling film flow study could be applied to research the multi-scale flow and mass-transfer behavior of the packing which provide some theoretical guidance about the optimization of the packing's structures.

Key words: CFD; falling film; structured packing; stable isotope ¹³C

稳定同位素¹³C因其具有优良的物理化学性质,广泛应用于多种领域,尤其在医药学及生命科学相关领域发挥着重要作用,随着¹³C-呼气实验的研究及临床应用,国内外对稳定同位素¹³C的需求日益增大。稳定同位素¹³C的分离制备方法有低温精馏法,化学交换法,热扩散法,离心分离法和激光法等,但是工业化应用的只有低温精馏法。目前,能工业化生产稳定同位素¹³C的有美国、俄罗斯、英国、日本等少数几个国家,各国生产能力不一,无法满足稳定同位素¹³C的市场需求^[1-2]。为打破行业技术垄断,上海化工研究院一直致力于稳定碳同位素的分离研究,由于碳同位素¹³CO和¹²CO分子间的相对挥发度相差很小,分离系数 α 约为1.007,制备高丰度碳-13需要的理论塔板数多达几千块,增加了碳同位素分离的工业化难度。为此,上海化工研究院自主研发了新型高比表面积丝网波纹规整填料(PACK-¹³C),有效降低了碳同位素分离的难度^[3],经过反复的理论及实验研究,目前已掌握低温精馏分离稳定同位素¹³C的产业化级联工艺^[4]。

在实际精馏操作中,规整填料塔内部存在

着多种尺度的流动及传质现象,比如,规整填料表面会出现与塔内件和流动参数等相关的不同程度的大尺度沟流、返流及壁效应与端效应等问题^[5-7];而在局部区域内,填料的局部组成单元会出现液体降膜流动、局部气相返混及局部液泛等。这些不同尺度的流体流动行为在不同区域和不同时间内实际控制着传质分离效率。因此,填料表面上气液两相的流动状态及界面特性直接影响到了精馏分离效率^[8-10]。为了较全面、深入地了解丝网波纹填料的流体力学性能,本文结合计算流体力学(CFD)模拟对¹³C分离用丝网波纹规整填料表面的降膜流动进行了模拟研究,为进一步优化改进¹³C分离用规整填料的结构提供理论依据与指导。

1 计算流体力学模型

相对于规整填料塔的宏观流动分布而言,规整填料片上的微观流动研究并不多。由于金属丝网面的物理结构复杂,直接建立与实际结构相符的物理模型困难。金属丝网面因丝网的强力毛细作用使其具有良好的润湿铺展性能,可忽略丝网毛孔结构的影响,将其简化为倾

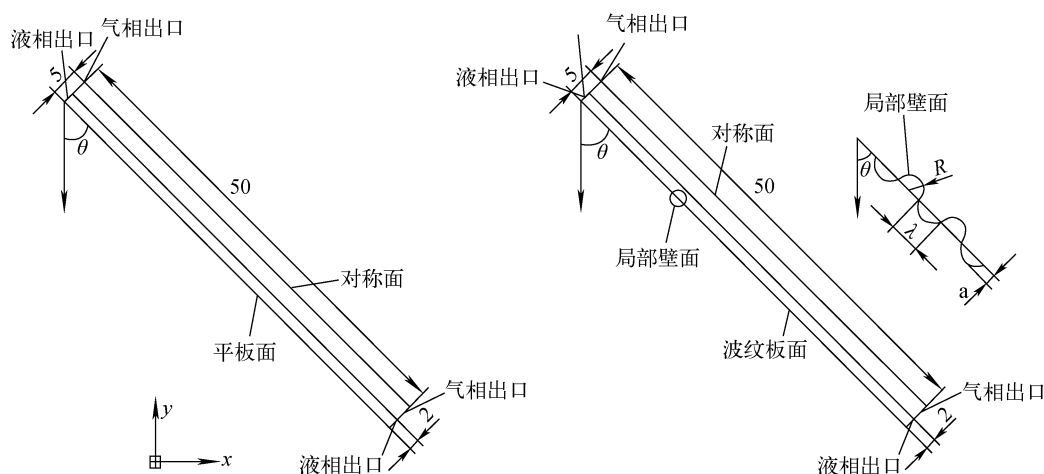


图1 二维降膜物理模型结构示意图

Fig. 1 Diagram of physical models for two dimensional falling film

斜或波纹平板,将局部气液流动近似看作为倾斜平板或波纹板的二维降膜流动,即是一种具有自由表面,在重力驱动下的液体流动^[11-12]。简化后的二维降膜物理模型结构示意图示于图1,尺寸参数列于表1。

表1 物理模型相应结构尺寸

Table 1 Structural parameters of physical models

板面形式	结构参数			网格数
	R/mm	a/mm	λ/mm	
平板				11 228
丝网面 60 目	0.20	0.06	0.22	16 011
丝网面 80 目	0.20	0.03	0.12	17 088
丝网面 100 目	0.20	0.015	0.06	18 096

注:R为凸波纹高度;a为凹波纹深度;λ为波纹半波长

2 数学模型与计算策略

2.1 连续方程与动量方程

本文采用 CFD 模拟中的流体体积函数 (VOF) 模型方法^[13],在整个计算域内两相共用一个动量方程和组分运输方程。控制方程具体如下:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = \\ & -\frac{\partial}{\partial x_i} p + \frac{\partial}{\partial x_j} \tau_{ij} + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho u'_i u'_j) + F_i \quad (2) \end{aligned}$$

τ_{ij} 是层流剪应力张量,用式(3)表示, $(-\rho u'_i u'_j)$ 是湍流雷诺应力张量,用式(4)的 Boussinesq 假设表示。

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial}{\partial x_j} u_i + \frac{\partial}{\partial x_i} u_j \right) - \frac{2\delta_{ij}}{3} \left(\rho k + \mu_i \frac{\partial}{\partial x_i} u_i \right) \quad (3)$$

$$\begin{aligned} (-\rho u'_i u'_j) = & \mu_i \left(\frac{\partial}{\partial x_j} u_i + \frac{\partial}{\partial x_i} u_j \right) - \\ & \frac{2\delta_{ij}}{3} \left(\rho k + \mu_i \frac{\partial}{\partial x_i} u_i \right) \quad (4) \end{aligned}$$

为了获得相界面的追踪以及气液两相体积分率的分布,模型是通过在每个计算单元中,求解某一相的相分率的连续方程来实现,在此设 α_i 为计算单元内第 i 相的体积分率:

$$\frac{\partial \alpha_i}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla \alpha_i = 0, i = L, G \quad (5)$$

$$\sum_{i=L,G} \alpha_i = 1 \quad (6)$$

在整个计算域中,动量守恒方程(2)中 F 表示广义动量源项,可以通过修改该项来考虑其他体积力(如重力、表面张力等)对液膜流动的影响。本研究中,根据气液两相流动的特点,主要考虑的动量源项有重力源项 F_G 和表面张力源项 F_σ ,即:

$$F = F_G + F_\sigma \quad (7)$$

由于重力是体积力,则 F_G 可以直接表示为:

$$F_G = \rho_i g \quad (8)$$

在伴随有气相逆流的降膜流动过程中,由于气液界面的曲率半径都比较小,会产生较大的附加压力,且液膜较薄,则该附加压力能够对液膜流场的形成产生一定作用,因此在局部流体力学计算时不可忽略表面张力的影响。表面张力是由于流体内部分子间引力的作用结果,是物质本身具有的特性,且与温度和相界面的物质性质有关。由于表面张力是表面力,所以必须首先通过某种方式将其转换为体积力,然后才能将其引入到方程(2)中。

Brackbill 等^[14]提出的一种能降低界面拓扑结构限制的模拟表面张力的数值方法,将其称之为连续表面力(continuum surface force, CSF)模型;该模型是为了正确求解拉普拉斯方程而形成的一种界面计算方法,适用于求解一般流体由界面张力引起的问题。因此本文模拟采用 CSF 模型来计算表面张力动量源项 F_σ ,并将其加入到 VOF 计算中。当计算域中只有气液两相时,CSF 模型表示表面张力理论关系式如下所示:

$$F_{\text{vol}} = \sigma_{ij} \frac{\rho \kappa_i \nabla \alpha_i}{\frac{1}{2}(\rho_i + \rho_j)} \quad (9)$$

式中, $\nabla \alpha_i$ 称为界面 delta 函数,该函数可保证 F_σ 在远离界面时为零,从而使得表面张力只作用在界面附近;相界面曲率 k 可用自由表面处单位曲面法向量 \hat{n} 的散度表示,即:

$$\kappa = \nabla \cdot \hat{n} = \frac{1}{|n|} \left[\left(\frac{n}{|n|} \cdot \nabla \right) |n| - (\nabla \cdot n) \right] \quad (10)$$

其中: $\hat{n} = \frac{n}{|n|}$, $n = \nabla \alpha_i$ 。

2.2 湍动模型

平板和波纹板上伴随的气相逆流的二维降膜流动过程属于非稳态气-液两相分层,具有界

面波动的流动过程,且为近壁面流动。另一方面,鉴于气液两相逆流使得填料表面上的相界面产生湍动效应,该湍动过程属于低雷诺数下的流体流动。

与标准的 $k-\epsilon$ 模型相比,重整化的 $k-\epsilon$ 模型考虑了低雷诺数的影响,提供了一种有效粘度的微分解析式,使得重整化群 $k-\epsilon$ 模型能够更好地模拟低雷诺数流体和近壁面流体的流动过程。因此本文选用重整化群 (renormalization group, RNG) $k-\epsilon$ 湍流模型描述液膜在板面上的降膜流动过程^[15]。

重整化群 $k-\epsilon$ 模型是对瞬时的 Navier-Stokes 方程用重整化群的数学方法推导出来的模型,来源于严格的统计技术。模型中的常数与标准 $k-\epsilon$ 模型不同,其湍动能 k 运输方程和湍动耗散率 ϵ 运输方程分别如下:

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\alpha_k \mu_{\text{eff}}) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M \quad (11)$$

$$\rho \frac{D\epsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\alpha_\epsilon \mu_{\text{eff}}) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} - R \quad (12)$$

该模型方程中 G_k 表示由于平均速度梯度引起的湍动能生成项, G_k 的计算可与 Boussinesq 假设联系起来得到关系式:

$G_k = \mu_t S^2$, 式中 S 是平均应力张量系数,可表示为:

$$S = \sqrt{2S_{ij}S_{ji}} \quad (13)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (14)$$

模型中函数 G_b 表示由于浮力影响引起的湍动能生成项,可表示为:

$$G_b = \beta g_i \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (15)$$

式中, β 为热膨胀系数,因此在等温过程时, $G_b = 0$ 。 Y_M 表示可压缩湍流脉动膨胀对总耗散率的影响,由 Sarkar 提出理论关系式^[16]: $Y_M = 2\rho\epsilon M_t^2$ 。在本计算中,流体假设成不可压缩流,此项可忽略不计。

2.3 计算策略

本文基于 CO 低温精馏分离稳定性同位素¹³C,选取液态 CO 与 CO 气体为气液两相流研究介质,考察在金属丝网填料表面上的气液

交互作用过程。液相和气相入口设置为速度边界条件,液相和气相出口设置为压力边界条件,壁面设置为无滑移壁面边界条件^[17]。将模型中每一个单元通道划分成四面体非结构化网格,采用精度较高的 Geo-Reconstruct 界面重建格式;然后将所有的网格设为在整个计算域内连续,网格总数为 100 631 个。该模拟过程为非稳态过程,在算例离散求解中,时间项采用隐式体积力方法,使得计算更为稳定;压力项采用 PRESTO 算法;压力-速度耦合方式采用 PISO 算法;动量方程的离散格式采用一阶迎风格式;时间步长选取 10^{-5} s^[18]。

3 结果与讨论

3.1 丝网结构对液膜流动的影响

金属丝网规整填料表面上的流体流动行为受多方面的因素综合作用,其表面一般不采用光滑的平板面,而是处理成具有凹凸起伏的波纹状,壁面微观结构不同,导致液膜在其上的流动行为不同。为较全面的考察这种影响,本文对平板面及不同目数的丝网面板(如表 1 所示的结构尺寸)进行可视化模拟,揭示液膜在不同板面上的流动规律。模拟操作在相同的条件下进行,设定板面与竖直方向成 45° 角,模拟操作物系为 CO(l)-CO(g),无气相流动,即气相进口速度为 0 m/s,液相进口采用低温精馏分离¹³C 同位素的实验条件,喷淋密度为 $6.63 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ 。

倾斜平板上液膜流动过程的可视化模拟研究示于图 2。液相流体流动初始处于平缓连续膜状,而随着液膜向下流动,受表面张力和粘滞力综合作用,液膜前段逐渐形成液量聚集,当聚集到一定程度,在重力作用下液膜发生断裂。后续流体继续在前端聚集,当聚集达到一定程度,在某些位置形成周期性液膜断裂,最后在平板面上形成一个比较连续的液膜流动形式。

倾斜丝网面板上液膜流动过程的可视化模拟研究示于图 3。由于丝网面模型独特的凹凸起伏结构,液体在丝网面上很容易形成连续起伏的液膜,其形成过程与平板面液膜相似。由于表面张力和毛细作用,液膜发生随机断裂的概率较小。

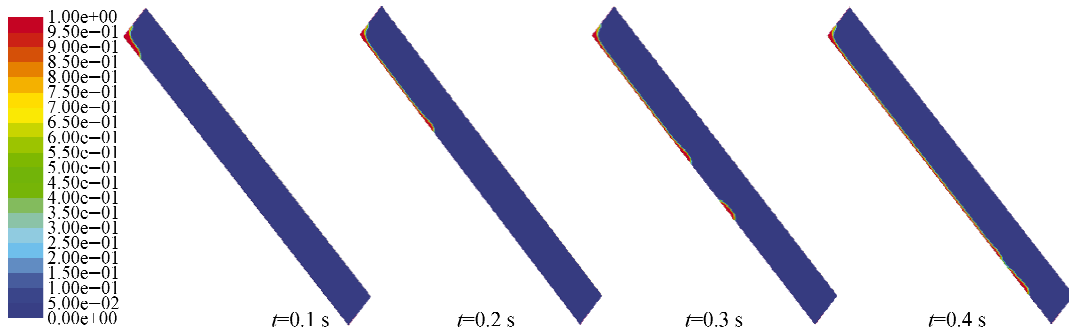


图 2 倾斜平板上液膜的形成过程

Fig. 2 Stages of film formation on the wavy plate

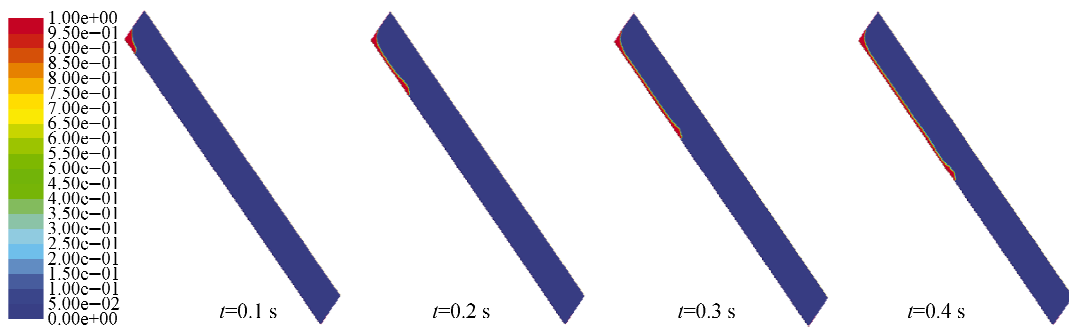


图 3 倾斜丝网面上的液膜流动过程

Fig. 3 Stages of film formation flowing on the gauze plate

对比图 2 和图 3 发现,在相同的时间间隔内,平板面上液膜的流动路程大于丝网面板上液膜流动的路程,同时丝网面板上液膜的厚度较倾斜平板稍厚,由于丝网凹凸表面延缓了液膜的流动,增加了液膜在面板上的停留时间。从传质角度而言,会增加气液两相的相互作用时间。

3.2 液膜流动规律

随着金属丝网目数的改变,其网孔的尺度

发生变化,液膜的流动形式也随之发生一定的变化。不同目数丝网面的液膜流动规律示于图 4。为更清晰的了解液膜的流动行为,局部放大了图像(相同放大倍数)。

随板面凹凸的变化,液膜表面相应的发生周期性震荡起伏。比较发现,随着丝网目数的减小,液膜厚度逐渐减薄,如液膜在丝网目数较小的板面(c)上,其厚度要明显小于板面(a、b)上。对于丝网目数越小的板面,波纹尺寸越大,

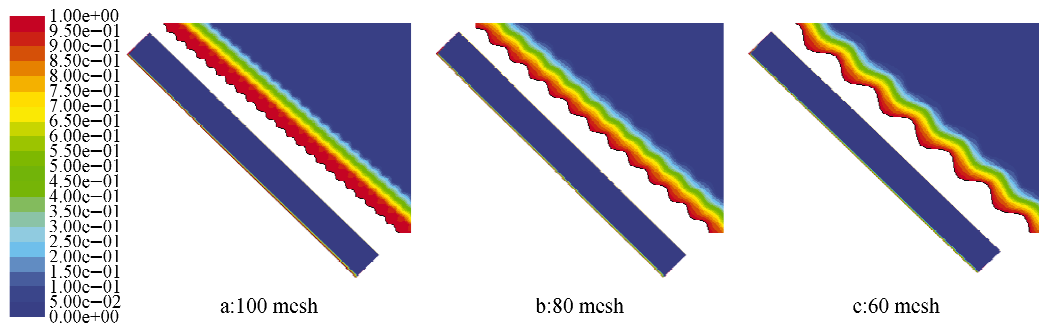


图 4 不同目数波纹板面上的液膜流动及对应局部放大图

Fig. 4 Liquid film patterns on various gauze plates and partial enlarged graphics

对液体的流动阻力越大,如板面(c)所示,波峰处的液膜厚度要明显小于波谷处,液相流体易在波纹谷底形成滞留积液,这部分液体不易得到有效的更新,势必降低局部的传质和传热推动力,使得局部的传热和传质效率降低。丝网目数较大的板面(a和b),由于波纹尺寸变化小,液相流体比较容易形成连续的液膜,且在波纹谷底不易滞留形成积液,液膜流动行为近似于倾斜平板面流动。观察上述图形可知,由于波纹壁面结构的变化,液膜流动形态随之发生改变。在一定目数范围内,随着波纹尺寸的减小,气液相界面波动越剧烈,有效提高传热和传质效率。

低温精馏分离稳定性同位素碳-13,其操作状态属于高真空下的低气液流动参数精馏塔(液气流动参数 $FP < 0.03$),液相喷淋密度为 $5.5 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h} \sim 10.5 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ 。对于这类低喷淋密度的精馏塔,为有效加快传热和传质速率,应使规整填料表面具有一定持液量,且填料面上的液膜能够持续更新,减少滞留积液,可被后续的进料液带走,同时气液相界面具有一定的扰动效应。为此,对于¹³C同位素分离这类低喷淋密度的精密精馏,选用100目的高比表面积丝网面比较合理,有利于形成连续液膜,同时也可有效强化局部的传热和传质效率。

60目、80目和100目倾斜波纹板面的局部壁面剪切力分布示于图5。由图5显示,壁面剪切力大小随波纹尺寸的变化而成反比关系,目数越大的波纹板面,其壁面剪切应力波动起伏范围反而越小。壁面剪切力的大小揭示板壁面对液膜作用力的大小。剪切应力分布图显示,对大尺寸波纹板面(60目),波峰壁面具有较大剪切力,而波纹谷底的值却很小,可预测若加大波纹尺寸,剪切应力波动范围更大,原料液容易从流体表层流走,造成近壁底层的流体不易被更新,波纹谷底存在滞留积液,使得局部传质和传热推动力降低。而对于小尺寸的波纹板面(100目),其壁面剪切力随波纹板面在较小范围内震荡起伏,说明板面上液膜厚度差距较小,板面上的液膜易被更新,不易造成液体滞留。因此可通过测定壁面剪切力的大小预测近壁流的流动形态,这对改善壁面结构,促进传热

和传质速率具有一定的指导意义。

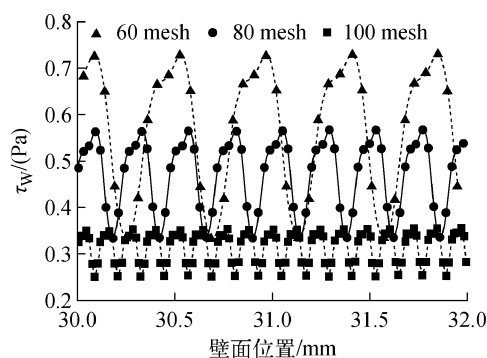


图5 不同目数倾斜波纹板上的壁面剪切力分布
Fig. 5 Wall shear stress on various wavy plates

3.3 界面波动对液膜传质的影响

由模拟计算可知,在气液两相逆流作用下的液膜自由表面并非是均匀光滑的,而是出现各种类型的湍动,即便气速为零,在液膜流动的发展阶段,其自由表面也会出现不稳定波动,这种相界面的波动势必会增强气液两相之间的传质效率。

平板面不同位置上的液膜在气液相界面处的速度场等势图示于图6。经分析可发现,在气相进口(液相出口)区,存在一个速度边界层,随着气相吹扫,气速逐渐趋向稳定,并且由于液相出口处液膜的波动,气液两相的相互作用较明显;从传质角度而言,在气相进口区域存在一个浓度边界层,而在液膜的波动区,气液相界面存在较强的湍动而非平滑稳定的形态,这说明液膜波动强化了气液相界面的传质过程;在气相出口(液相进口)处,由于气相速度及浓度已非常均匀,面板上的液膜也非常稳定,因此界面上没有比较大的波动。

竖直平板与波纹板在中部波动区相界面的速度场等势图示于图7。与平板面的速度场等势图相比,波纹壁面速度场的湍动效应比较明显,且越接近波纹壁面处,其湍动越剧烈。从传质角度而言,波纹板相界面的传质作用明显强于平板面,这主要是由于波纹壁面上的凹凸波纹明显增强了液膜自由表面的湍动强度,从而强化了传质作用。

平板面不同位置上的界面形状及液相质量分数的变化曲线示于图8,与图6相对应。在

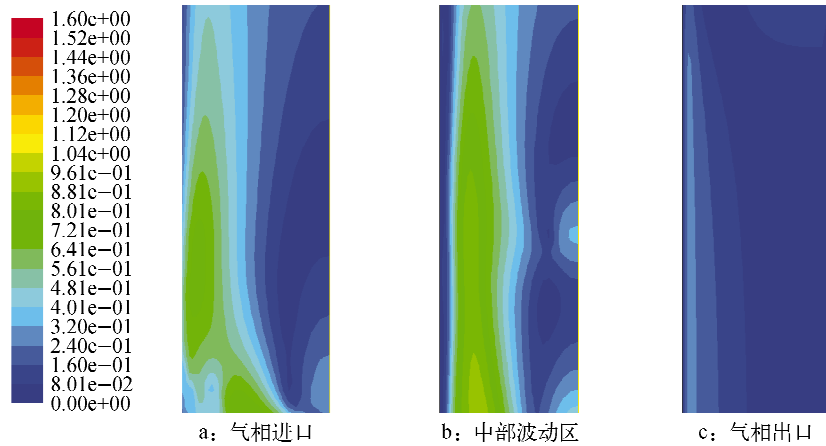


图6 竖直平板上不同位置气液相界面的速度场等势图

Fig. 6 Equipotential diagram of velocity at different flow regions on the flat plate

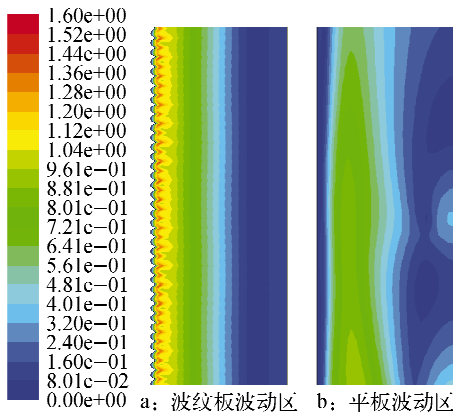


图7 竖直平板与波纹板相界面的速度场等势图

Fig. 7 Equipotential diagram of velocity at the interface on the flat plate and gauze plate

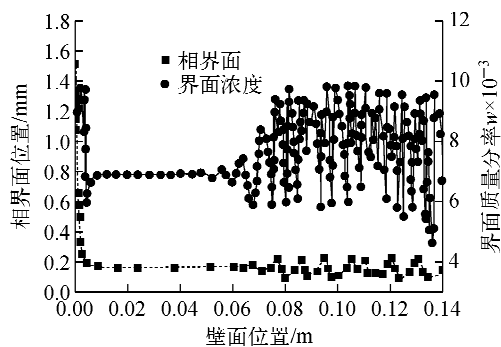


图8 平板面上界面浓度随界面形状的变化规律

Fig. 8 Interphase concentrations versus the shape of interface on the plate

动区,即液膜厚度基本保持不变,此时界面浓度趋于稳定,保持恒定;在液膜波动区,由于液膜形态的不稳定,伴随相界面的起伏不定,对应的界面浓度发生剧烈震荡,此时界面浓度的平均值大于液膜稳定区的界面浓度值,但低于液相进口时的浓度值。从传质角度而言,运用渗透理论和表面更新理论解释这种现象:液膜形态的不稳引起相界面的波动,而界面的波动引起液相主体的流体微团与界面的动量传递加剧,促进新的液相流体被带至相界面附近,使得界面浓度处于不断变化之中,且高于前期稳定时期的界面浓度值。液相流体内部的传递也使得相界面液相侧的表面更新速率增加,将液相流体中轻组分不断解吸到气相中,因此液相流体的主体浓度降低。通过上述分析可知,相界面波动使得气-液两相间的传质推动力得以增加,从而提高了传质系数。

通过对二维降膜流动规律和界面波动过程的研究发现,壁面上液膜的不稳定形态能显著增强气液界面的波动,从而提高局部推动力,增大局部传质系数,促进质量传递过程。而固体壁面结构又能显著影响液膜的流体流动行为,液膜自由表面形态随壁面结构的变化而发生显著变化。低温精馏分离¹³C同位素属于低喷淋密度精密精馏,结合不同目数丝网面上液膜流动规律的研究,上海化工研究院自主研发的PACK-¹³C规整填料采用100目丝网可有效增强传质效率,还可以进一步通过调整结构参数(R, a, λ)对丝网壁面进行优化和改善,实现气

液相进口区域,伴随着液膜厚度的迅速降低,相界面的液相浓度发生剧烈变化;在液膜稳定流

液传质过程的强化。

4 结论

本文采用数值模拟的方法对稳定同位素¹³C分离用规整填料表面局部降膜流动进行了计算分析,重点研究了板面结构、丝网目数等随时间和空间的发展变化规律,对气液相界面进行追踪,考察了界面波动对气液相传质的影响。(1)相比平板面而言,丝网波纹结构延缓了液膜在填料表面的流动,且在表面张力和毛细作用下,液膜不容易出现断裂,使得液膜更易在表面形成连续降膜流动。(2)随丝网波纹板面凹凸的变化,液膜表面相应发生震荡起伏。在目数越大的丝网面板上容易形成连续液膜,且液膜较厚。另一方面,壁面细小的波纹结构使得气液相界面波动更为剧烈,通过分析波纹板面的局部壁面剪切力分布可知,壁面剪切力随波纹板面的震荡起伏程度与丝网目数成反比,说明目数越大,液膜在丝网面上的液膜厚度较为均匀,且由于波动频率较快,有利于液膜表面的更新。(3)通过考察液膜的界面波动对传质推动力的影响,研究表明,液膜的界面波动能显著增强传质推动力,优化和改善板面结构是增强气液传质过程的有效途径之一。

参考文献:

- [1] 李虎林,李良君. 低温精馏分离稳定同位素碳-13——回顾与展望[J]. 低温与特气, 2008, 26(6):9-15.
- [2] 徐大刚,钟授富. 稳定同位素的分离与应用[J]. 化工进展, 1997, 2:41-50.
- [3] Li H L, Ju Y L, Li L J, et al. Separation of isotope ¹³C using high-performance structured packing[J]. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2010, 49, 255-261.
- [4] 田叶盛,李虎林,许保云,等. 稳定同位素¹³C分离级联装置的模拟优化研究[J]. 同位素, 2012, 25(4):129-134.
- [5] Mahr B, Mewes D. Two-phase flow in structured packings: modeling and calculation on a macroscopic scale[J]. AIChE J, 2008, 54(3): 614-626.
- [6] Van Baten J M, Krishna R. Gas and liquid phase mass transfer within KATAPAK-S structures studied using CFD simulations[J]. Chemical Engineering Science, 2002, 57: 1 531-1 536.
- [7] 谷芳. 规整填料局部流动与传质的计算流体力学研究[D]. 天津:天津大学, 2004.
- [8] Yu L M, Zeng A W, Yu K T. Effect of interfacial velocity fluctuations on the enhancement of the mass-transfer process in falling film flow[J]. Ind Eng Res, 2006, 45(3): 1 201-1 210.
- [9] Hodson J S, Fletcher J R, Porter K E. Fluid mechanical studies of structured distillation packings[J]. I Chem E Symp Ser Dist And Absp, 1997, 2(142): 999-1007.
- [10] Petre C F, Larachi F, Iliuta I. Pressure drop through structured packings: Break down into the contributing mechanisms by CFD modeling [J]. Chem Eng Sci, 2003, 58: 163-177.
- [11] Mahr B, Mewes D. Two-phase flow in structured packings: modeling and calculation on a macroscopic scale[J]. AIChE J, 2008, 54(3): 614-626.
- [12] Hodson J S, Fletcher J R, Porter K E. Fluid mechanical studies of structured distillation packings[J]. I Chem E Symp Ser Dist And Absp, 1997, 2(142): 999-1 007.
- [13] 刘儒勋,王志峰. 数值模拟方法和运动界面追踪(第一版)[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社, 2001.
- [14] Brackbill J U, Kothe D B, Zem A C. A continuum method for modeling surface tension[J]. J Comput Phys, 1992, 100: 335-354.
- [15] Choudhury D. Introduction to the renormalization group method and turbulence modeling[M]//[S. I.]: Fluent Inc. Technical Memorandum TM-107. 1993.
- [16] Sarkar S, Lakshmanan B. Application of a reynolds-stress turbulence model to the compressible shear layer[J]. Aiaa Journal, 1990, 29(5): 743-749.
- [17] Woerlee G E, Berends J, Oldie Z, et al. A comprehensive model for the pressure drop in vertical pipes and packed columns[J]. Chem Eng J, 2001, 84: 367-379.
- [18] 王瑞金,张凯,王刚. FLUENT 技术基础与应用实例[M]. 北京:清华大学出版社, 2006.