

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2012.06.005

自然循环外加热式蒸发器二维数值模拟及其性能分析

石留帮, 李庆生, 牛晓娟

(南京工业大学机械与动力工程学院, 江苏 南京 211816)

摘要:自然循环外加热式蒸发器是低浓度固碱生产过程中的关键性设备。为了提高蒸发器性能,采用 Fluent6.3 软件对蒸发器流场内流体进行二维数值模拟,得出蒸发器内流体流动的速度场和温度场的分布情况,同时分析了二次蒸气出口尺寸对蒸发器性能的影响,结果对自然循环外加热式蒸发器工艺条件和结构的优化具有参考价值。图9表2参8

关键词:自然循环蒸发器;烧碱;气液两相流;数值模拟

中图分类号:TQ051.6;TP391.7 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2012)06-0016-05

Second-Dimensional Numerical Simulation Study on the Characteristics of Flow Field in Self Circulation Thin-Film Evaporator

SHI Liubang, LI Qingsheng, NIU Xiaojuan

(School of Mechanical and Power Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 211816, China)

Abstract: Self circulation thin-film evaporator is an important equipment in low concentration of soda production system, its performance is key to quality of soda. In order to improve evaporator's performance, Fluent6.3 package were used to simulate the 2-D two-phase flow in the self circulation thin-film evaporator and obtained the distribution of velocity field and temperature field in evaporator, and at the same time analyzed the added vapour outlet dimensions' influence on evaporator's performance. Simulation results will be helpful in optimizing process conditions and structure of the self-circulating thin-film evaporators in soda production system. [Ch, 9 fig. 2 tab. 8 ref.]

Key words: self circulation thin-film evaporator; caustic soda; vapor-liquid two-phase flow; numerical simulation

0 引言

烧碱(苛性钠)在造纸、纺织、肥皂、炼铝、石油、合成纤维、橡胶等相关工业部门中应用最多,是重要的无机化工原料之一。固碱在运输和贮存时更方便,因此它是市场中的畅销产品^[1]。外热式自然循环蒸发具有设备总高度低、操作方便、结构简单、易于清洗等优点,用途范围广泛^[2],用来生产72%片碱。

以烧碱为流体介质,采用 Fluent6.3 对外加热式自然循环蒸发器内进行二维流体流动传热模拟,分析碱液在蒸发过程中流体的流动状态,以及在不同结构的沸腾室对流体流动的影响,其结果对蒸发器结构优化设计具有一定的指导作用。

1 蒸发设备工作原理及流程

蒸发设备结构见图1,低浓度液碱从进料口进料,

流经加热室升温,体积膨胀后上升至沸腾室,随着静压降低和温度升高,碱液开始汽化,产生的气液混合物从沸腾室喷发至蒸发室,二次蒸气分离出后被抽走,剩下的碱液的温度下降后密度变大,与沸腾室气液混合物间产生了密度差,碱液内部形成自然流动。密度差产生的升力为 $(\rho_1 - \rho_2)g$ ^[3],这个升力就是蒸发器的循环推动力。当碱液达到需要的浓度时,打开下部的出料口出料。

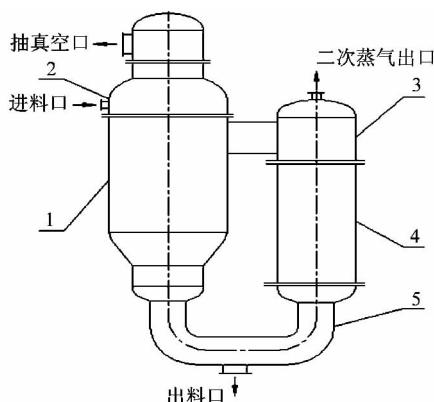
2 计算流体力学模型

2.1 物理模型

蒸发器的建模尺寸如图2。因为模型比较复杂,所以建立整个模型的一个剖面,采用的二维模拟。换热管规格: $\varnothing 45 \times 2.5$ mm,换热管长度 $L = 2\,500$ mm,数量为149根。

收稿日期:2012-04-20;修回日期:2012-05-10

作者简介:石留帮(1984),男,河南周口人,硕士研究生,主要研究方向为传热传质设备。E-mail:shiliubang@yahoo.com.cn



1—蒸发室;2—分离室;3—沸腾室;4—加热室;5—循环管

图1 自循环外加热式蒸发器结构简图

Figure 1 Structure of the self circulation thin-film evaporator

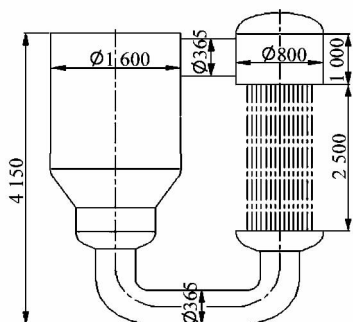


图2 自循环外加热式蒸发器模型尺寸图/mm

Figure 2 Dimension of the self circulation thin-film evaporator

2.2 数学模型

2.2.1 控制方程

一般的黏性流体流动均遵循质量守恒定律、动量守恒定律和能量守恒定律^[4],流体流动满足以下基本方程:

1) 连续方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = S_m$$

该方程是质量守恒总的形式,源项 S_m 是稀疏相增加到连续相的质量,或者质量源项。

2) 动量方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial c_j} + \rho g_i + F_i$$

式中: ρ 、 μ 及 p 分别是密度、速度和流体静压; ρg_i 、 F_i 是重力体积力以及外部作用力所产生的体力; τ_{ij} 是黏性应力张量。

3) 能量方程

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i}[u_i(\rho E + p)] \\ &= \frac{\partial}{\partial x_i}\left[k_{eff} \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial c_j} - \sum_j h_j J_j + u_j(\tau_{ij})_{eff}\right] + S_h \end{aligned}$$

式中: S_h 是包括化学反应热和其他体积热源的源项, k_{eff} 是有效导热函数; J_j 是组分 j 的扩散通量; E 和 T 分别为总能和流体温度,其中,总能 E 及流体焓值 h 的关系式为

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{u^2}{2}$$

2.2.2 湍流模型

气液两相流动是一种很复杂的湍流,对整个流场的流动状态造成很大影响。为获得更为准确的计算结果,该模拟需用 RNG 的 $k-\varepsilon$ 双方程湍流模型^[5]

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i}\left[(\alpha_k u_{eff}) \frac{\partial k}{\partial x_j}\right] + G_k + \rho \varepsilon \\ & \frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[(\alpha_\varepsilon u_{eff}) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right] + \frac{C_{1\varepsilon}}{k} G_k - \\ & C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R \end{aligned}$$

式中: $G_{1\varepsilon}$ 和 $G_{2\varepsilon}$ 是模型常数, $G_{1\varepsilon} = 1.42$, $G_{2\varepsilon} = 1.68$; R 是平均应变速率对 ε 的影响 $/(Pa \cdot s^{-2})$; k 是湍动能 $/(m^2 \cdot s^{-2})$; t 是时间 $/s$; ρ 是流体密度 $/(kg \cdot m^{-3})$; μ 是动力黏性系数 $/(Pa \cdot s)$; μ_t 是湍流黏性系数 $/(Pa \cdot s)$; ε 是湍流散率 $/(m^2 \cdot s^{-3})$; x 是坐标系中 x 轴方向; j 取 1, 2; α_ε 和 α_k 分别是 k 和 ε 的普朗特常数, $\alpha_\varepsilon = \alpha_k = 1.39$; G_k 是平均速度梯度产生的湍流动能产生项 $/(Pa \cdot s^{-1})$ 。

2.2.3 VOF 模型

VOF 模型是气液两相流数值模拟中的三个基本类型之一。它是一种在固定的欧拉网格下的表面跟踪方法,假设 2 种或多种流体之间没有互相穿插。由于蒸发器内气液两相流动具有自由表面,按照两相流模型的确定原则,该模拟采用 VOF 模型来追踪气液相界面,采用几何重建方案^[6]。

2.2.4 沸腾模型

蒸发器内液体的蒸发包括蒸发和沸腾,沸腾室内主要是沸腾过程,气液界面上有气液间的质量传递和能量传递,因此建立适当的沸腾模型才能准确地对蒸发室内流体的流动沸腾过程进行模拟。

在使用 Fluent6.3 进行模拟分析的过程中,由于连续方程没有涉及沸腾相变气液间的质量传递过程,因此需要使用 UDF 函数追加描述该过程。

流体的沸腾传热过程质量源项如下:

1) 连续方程

液相向气相的质量传递

$$\dot{m}_v = \begin{cases} r_v \alpha_l \rho_l (T_l - T_{sat}) / T_{sat} & T_l \geq T_{sat} \\ 0 & T_l < T_{sat} \end{cases}$$

气相向液相的质量传递

$$\dot{m}_l = \begin{cases} r_l \alpha_v \rho_v (T_{sat} - T_v) / T_{sat} & T_v \leq T_{sat} \\ 0 & T_v > T_{sat} \end{cases}$$

式中: r_v 和 r_l 为松弛因子; α_l 和 α_v 为液、气体积分数; T_{sat} 为液体饱和温度。

2) 能量方程

$$S_E = \dot{m}\gamma$$

2.2.5 数值计算

选取 PISO 算法, 可进行两步修正, 从而更加满足

动量方程和连续方程, 而且对于瞬态问题, 它计算速度快, 总体效率高, 当选取足够小的时间推进时, 可获得更高精度计算结果^[7]。

3 数值模拟过程与结果分析

3.1 数值模拟过程

考虑到温度和速度在管内壁形成的边界层, 划分网格时在靠近管壁处细化网格, 如图 3 所示。采用二维双精度(2ddp) Fluent 程序, 并导入网格文件, 选择分离、隐式、非稳态求解器, 把 50% 碱溶液作为分析的物料, 选择蒸气相为基本相, 碱液为第 2 相; 求解初始化后, 通过 Adapt 中的 Region 命令设置溶液的初始分布区域, 并利用 patch 定义该区域碱液体积比为 1, 既开始全部为碱液, 如图 4 所示。其他模拟设置参数见表 1。

表 1 设置参数表

Table 1 Other parameter used

碱液密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	碱液定压比热/ [$\text{J} \cdot (\text{Kg} \cdot \text{K})^{-1}$]	碱液导热系数/ [$\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$]	碱液运动黏度/ ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)	碱液表面张力/ ($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)	加热管表面 温度/K	压力出口处 压力/MPa
1 530	3 200	0.72	0.003 1	0.128	431.7	0.07

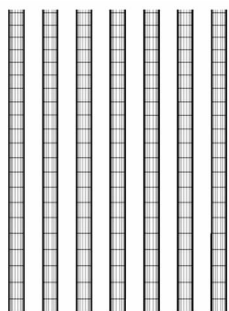


图 3 换热管内网格图

图 4 初始料液分布图
Figure 4 Initial distribution for feed liquid

蒸气从循环管处流出。

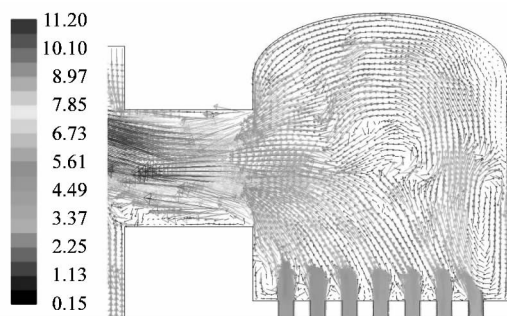


图 5 沸腾室内速度矢量分布图

Figure 5 Vector condition in boiling room

3.2 数值模拟结果分析

3.2.1 流场模拟结果与分析

图 5 为蒸发器流体的速度矢量图, 上循环管内贴近上壁面流体流速最高, 而沸腾室内的流体流速较低。说明由于循环管径尺寸的限制, 大量气液混合物从沸腾室经循环管喷到蒸发室, 循环管的尺寸限制给流动造成障碍。在蒸发室与循环管连接部位的上面, 此处流体主要是蒸气, 其流速达到 10 m/s, 流体在此处形成很大的湍动。在沸腾室与循环管连接部位的上面, 局部流速达到 7.29 m/s, 造成反向流动, 因此此部位结构需要优化处理。而在沸腾室上部流体速度较小, 与上循环管处的速度形成较大反差。很多蒸气在沸腾室的这个部位积压, 造成该区局部压力增大, 强制推动

如图 6 和图 7 所示, 加热管内流体的速度从下到上是呈现递增的趋势的, 靠近管中心处流体的流速较高, 而近壁面处流体流速较低。这是由于流体在上升过程中, 温度不断升高, 体积膨胀, 密度变小, 压强变小, 流动速度加快, 但由于黏性的作用在管壁处形成速度边界层。

由图 8 所示, 增设二次蒸气出口之后的沸腾室与上循环管连接的局部流速由负变为正, 反向流动消失, 沸腾室流体流动状况得到改善。加热管内的最大流速增加了 0.2 m/s。加热管内流速的增加意味着物料循环的增加, 也是循环推动力增加, 同时换热系数也增加^[8]。因此增加二次蒸气出口, 大大改善了蒸发器性能。

为了分析二次蒸气出口对蒸发器性能的影响程

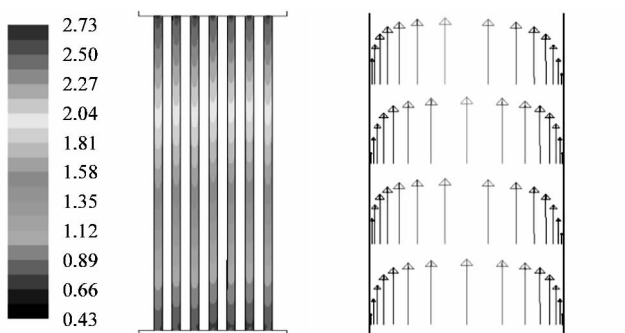


图6 换热管内流场内速度矢量分布图

Figure 6 Vector condition in heat transfer tube

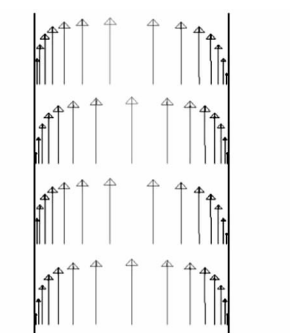


图7 单根换热管内局部速度矢量分布图

Figure 7 Vector condition in part of a heat transfer tube

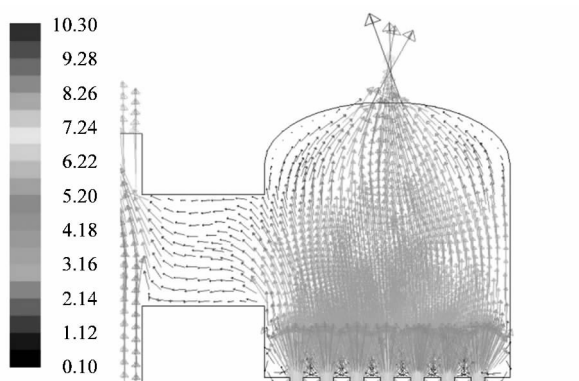


图8 增设二次蒸气出口后沸腾室内速度矢量分布图

Figure 8 Vector condition in boiling room adding a vapor outlet

度,文中建立了三种不同尺寸的二次蒸气出口作为模型分析,具体尺寸及结果见表2。由表中结果显示,随着二次蒸气出口尺寸的增大,沸腾室内压强降低,而换热管内流速先增加后减小,说明增设二次蒸气出口尺寸并不越大越好。

表2 结果数据表

Table 2 Result data

二次蒸气出口 尺寸/mm	上循环管内最大 流速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	换热管内最大 流速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	换热管中传热系数/ [$\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$]
150	4.11	2.98	1 380
200	3.73	3.24	1 970
250	3.19	3.01	1 450

3.2.2 温度场模拟结果与分析

如图9所示,在加热管中呈现出温度过渡层,出现不规整发展,因为靠近管壁处成长气泡,扰动了管内滞流层,气泡生长吸收,使得周围温度偏低,此部位温度梯度大,温度过渡较快,所以温度过渡层相对无气泡成

长的管壁处较薄。由对流传热系数 h 的定义式

$$h = \frac{\lambda}{\Delta t} \left(\frac{dt}{dy} \right)_w$$

式中: λ 为流体导热系数/[$\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$]; y 为与壁面相垂直方向上得距离/m; $(dt/dy)_w$ 为壁面附近流体层温度梯度/($\text{K} \cdot \text{m}^{-1}$)。对流传热系数 h 随温度梯度 $(dt/dy)_w$ 变大而变大。

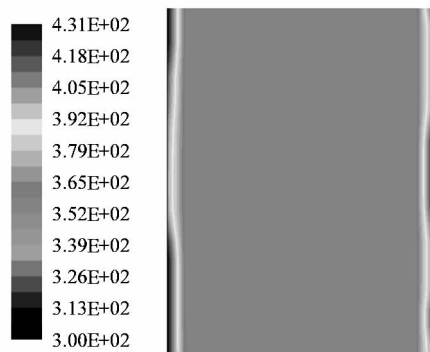


图9 换热管中温度分布云图

Figure 9 Temperature condition in part of a heat transfer tube

由于沸腾时产生大量气泡,增加了流体湍动,造成传热温度过渡层更加不规整,相比对流传热,沸腾传热有更高的传热系数 K 。沸腾形成的气泡吸收大量的热,降低了液体的温度,使得换热管内外有效温度差 Δt 较高。蒸发强度公式为

$$U = \frac{K \Delta t}{\gamma}$$

式中: γ 为蒸气潜热。换热系数增加和传热温差增加都能提高蒸发器蒸发强度。

4 结论

利用 Fluent6.3 对蒸发器内流体进行二维两相数值模拟,对蒸发器内部流体的速度场、温度场的分布情况进行分析,得出如下结论:

1) 由于沸腾室与循环管处结构不连续造成此处流体流动出现逆向流动,当在蒸发器的沸腾室顶部增加二次蒸气出口,二次蒸气可及时排出,反向流动消失,改善了流体流动情况,增大了循环流动,从而提高蒸发器的性能。

2) 通过比较二次蒸气出口尺寸对换热管内流速的影响,可知在沸腾室上方增设二次蒸气的尺寸并非越大越好。

3) 加热管内溶液沸腾时,使得温度边界层出现扰动,从而对流传热系数增大,蒸发器生产强度提高。

(下转第23页)

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2012.06.006

基于 ABAQUS 平面裂纹热权函数的计算

施新杭, 卢炎麟, 贾虹, 江坤

(特种装备制造与先进加工技术教育部/浙江省重点实验室(浙江工业大学), 浙江 杭州 310014)

摘要:热权函数法适用于热载荷作用下裂纹尖端应力强度因子过渡过程的计算,文章对平面裂纹体热权函数法中权函数 $\partial U/\partial a$ 的计算进行了分析研究。用虚拟结点力法与 ABAQUS 有限元分析相结合,并组装得到整体刚度矩阵,对相关数据提取运算实现了权函数 $\partial U/\partial a$ 中 dU_0/da 的计算,通过等效结点力加载并有限元分析最后得到平面裂纹体的权函数场的分布。图6参10

关键词:热权函数法;裂纹;应力强度因子;整体刚度矩阵;ABAQUS 软件

中图分类号:O346.1

文献标志码:A

文章编号:1005-2895(2012)06-0020-04

Calculation of 2D Crack Thermal Weight Function with ABAQUS

SHI Xinhang, LU Yanlin, JIA Hong, JIANG Kun

(Key Laboratory of E&M (Zhejiang University of Technology), Ministry of Education & Zhejiang Province, Hangzhou 310014, China)

Abstract: Thermal weight function method is suitable for calculation of crack tip stress intensity factor of the transition process. The method of calculating weight function $\partial U/\partial a$ was discussed in solving the plane crack stress intensity factor (SIF), using virtual nodal force method combined with the finite element analysis of ABAQUS, and assembling to get the global stiffness matrix, picking out relative data and calculating $\partial U/\partial a$ in dU_0/da . Finally, the field distribution of the weight function of the plane crack was obtained by loading equivalent nodal force and ABAQUS finite element analysis. [Ch, 6 fig, 10 ref.]

Key words: thermal weight function; crack; stress intensity factor (SIF); the global stiffness matrix; ABAQUS software

0 引言

在断裂力学理论的工程应用中,应力强度因子(stress intensity factor)是反映含裂纹结构弹性体尖端应力场强弱的物理量。应力在裂纹尖端有奇异性,而应力强度因子为有限值,可作为表征构件断裂以及裂纹扩展速率的重要参量。当前已有多种计算应力强度因子的计算方法,如解析法、边界配位、有限单元法、权函数法等。

权函数法首先由 Bueckner^[1]利用权函数求解一般的机械载荷(表面力)作用下应力强度因子的一个很有效的方法。Rice^[2]给出了求解应力权函数的一般方法,证明了权函数的唯一性。Bowie^[3]把权函数法的应用范围推广到复合牵引力和位移边界条件。

Tsai^[4]推导出应用权函数法计算热载荷作用下 I 和 II 型复合裂纹尖端 SIF 的基本公式。卢等^[5]根据 Betti 功互等定理以及虚拟裂纹扩展法给出了热权函数法的有限元格式。卢等^[6]利用刚度阵导数法,将热权函数法与有限元法直接耦合,给出了求解轴对称问题的热权函数有限元法计算格式。热权函数法是作为一种高效的求解瞬态热冲击作用下裂纹尖端 SIF 过渡过程的计算方法,只需要利用所求得的热权函数与瞬态温度场乘积的积分即可实现,从而避免了常规方法在热冲击过程中对每一时刻所做的有限元热应力分析。

对于某一特定弹性结构体,热权函数法求解应力强度因子重点在于权函数的 $\partial U/\partial a$ 的计算^[7]。文中通过基于 ABAQUS 有限元分析软件,进行位移场与刚度

收稿日期:2012-04-06;修回日期:2012-05-05

基金项目:浙江省重点科技创新团队建设(先进模具技术)项目(2010R50002)

作者简介:施新杭(1987),男,浙江永康人,硕士研究生,主要从事计算机辅助工程、热权函数法、断裂力学方面的研究。E-mail: shixinhang3232@sina.com