

浸没燃烧蒸发过程单个气泡传热传质模型

聂永丰, 岳东北, 许玉东, 刘建国, 金宜英

(清华大学 环境科学与工程系, 北京 100084)

摘要: 浸没燃烧蒸发器是一种利用高温气体与低温液体直接接触传热的高效蒸发设备, 其现有传热传质模型较为繁琐。该文从传质推动力角度出发建立了高温气泡在水中上升过程的传热传质模型, 计算结果与文献报道的实验数据、模拟结果基本吻合。利用该模型计算可得出, 浸没燃烧蒸发过程中, 液体平衡温度随气体初始温度的升高或气泡内初始水蒸汽含量的增大而升高, 接触时间在一定范围内的增加使得液体平衡温度随之降低, 超出 1 s 后对液体平衡温度影响不大。

关键词: 浸没燃烧蒸发; 传热传质; 传质推动力; 直接接触

中图分类号: TQ 051.6⁺2

文献标识码: A

文章编号: 1000-0054(2005)09-1221-04

Heat and mass transfer modeling of a single bubble during submerged combustion evaporation

NIE Yongfeng, YUE Dongbei, XU Yudong, LIU Jianguo, JIN Yiyi

(Department of Environmental Science and Engineering,

Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The submerged combustion evaporator is a high-efficiency equipment using direct contact heat transfer between superheated bubbles and the liquid. The mass transfer force concept was used to develop a model for the heat and mass transfer from a single superheated bubble rising in the water pool. The results agree well with experimental data. The results also show that during submerged combustion evaporation, the steady-state liquid temperature increases with the increasing initial gas temperature or with increasing initial water-vapor content in the superheated bubble. Increases of the direct contact time of up to 1 s reduce the steady-state liquid temperature, but have little influence on the steady-state liquid temperature beyond 1 s.

Key words: submerged combustion evaporation; heat and mass transfer; mass transfer force; direct contact

传热面, 因而避免了结晶、结垢等阻碍传热因素的影响。同时由于气液交互、扰动剧烈、尾气温度低, 其热效率高达 95% 以上^[1], 被广泛应用于易结垢、高粘性、高沸点或强腐蚀性溶液的蒸发。

高温气泡与液体之间的直接接触传热传质机理的研究^[3-6]开始于 20 世纪 80 年代, 多从传热推动力角度入手, 涉及到传热系数、传质系数等参数的确定, 较为繁琐。

本文以高温空气蒸发水为例, 尝试在气体分子运动理论的基础上, 从传质推动力角度出发, 建立高温气泡上升过程的传热传质模型, 阐明浸没燃烧蒸发过程传热传质的物理机制, 进而计算平衡蒸发状态时的液体平衡温度、接触时间、气泡直径及蒸发量等参数, 为浸没燃烧蒸发器的优化设计和工程应用提供一定的理论依据。

1 浸没燃烧蒸发过程

1.1 液体升温过程

采用浸没燃烧蒸发时, 水体由常温加热至稳定蒸发状态可分为以下 3 个阶段^[1]:

1) 前期升温阶段。高温气泡中的蒸汽浓度大于界面的蒸汽浓度, 蒸汽由气泡内向水体扩散、冷凝, 放出潜热, 使水体温度升高; 同时, 由于气泡温度高于水体温度, 气泡也向液体传热。当水体温度升至某一确定值时, 气泡内与界面的蒸汽浓度相等。

2) 升温蒸发阶段。高温气泡仍向水体传热, 液体温度继续升高。但随着水体温度的升高, 气泡界面的蒸汽浓度大于气泡内的蒸汽浓度, 于是蒸汽经过界面向气泡内扩散、蒸发。

3) 恒温蒸发阶段。水体温度升高到一定值后达

收稿日期: 2004-10-25

基金项目: 清华大学博士生物科研创新基金项目

作者简介: 聂永丰(1945-), 男(汉), 云南, 教授。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net
E-mail: hjx_nief@tsinghua.edu.cn

浸没燃烧蒸发器是一种高效的蒸发设备^[1,2], 其特点是燃料燃烧产生的高温气体从液面下排出, 与被蒸发液体直接接触发生传热传质。由于没有固定

到稳定,此时高温气泡传给水体的热量全部转化为水蒸发时的汽化潜热,此温度称为“平衡温度”。

1.2 稳定蒸发时的液体平衡温度

恒温蒸发阶段,理论上一个高温气泡在水中上升过程中传热传质分两步完成:第一步,气泡温度高于水温,气泡提供水蒸发的热量,直至达到首次气液温度平衡,此步内水温保持不变;第二步,由于气泡界面蒸汽浓度仍大于气泡内蒸汽浓度,水继续向气泡扩散、蒸发,由于潜热的损失导致水体温度下降,气泡向水体传热,直至再次达到气液温度平衡,此过程多次反复,最终气液间传热、传质均达到平衡,此步内水温比第一步低并持续下降。气泡上升过程中气泡与水的温度变化如图1所示。图中,ACD为气泡温度的变化,BCD为水体温度的变化。考虑对流及气泡搅动的双重作用,可以认为水瞬时混合均一,水的温度分布一致。

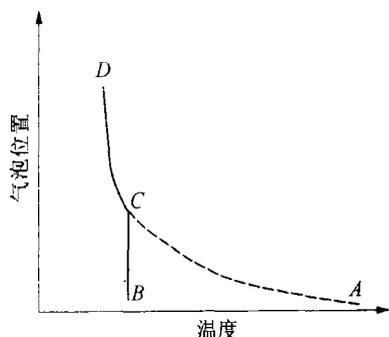


图1 气泡上升与气液温度的变化

2 浸没燃烧蒸发过程气泡传热传质模型

考虑恒温蒸发阶段单个气泡的传热传质过程,提出如下假设:

- 1) 气泡呈球形; 2) 气泡界面温度与水温一致;
- 3) 水蒸汽由气液界面靠分子扩散向气泡内传输;
- 4) 气泡内温度瞬时均一; 5) 气泡内压力维持不变;
- 6) 涉及气体均为理想气体。

利用气体分子运动论分析气泡界面水蒸发速率可得如下关系式^[7]:

$$\frac{dn_w}{dt} = 17.48R\pi f a^2 \left[c_s \frac{\bar{T}_s}{M_w} - c_g \frac{T_g}{M_w} \right], \quad (1)$$

式中: n_w 为气泡内水蒸汽的量; t 为时间坐标; R 为气体常数; a 为气泡半径; M_w 为水的摩尔质量; T_s 为界面温度,即水体温度; c_s 为界面温度对应的饱和蒸汽浓度; T_g 为气泡内温度; c_g 为气泡内界面处的蒸汽浓度; f 为蒸发系数,对于水约为1。

在气泡内,蒸汽的扩散可用下面的微分方程

描述^[8]:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \left[\frac{\partial^2 c}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial c}{\partial r} \right]. \quad (2)$$

初始条件和边界条件为:

$$c = c_0, \quad a_0 > r = 0, \quad t = 0;$$

$$c = c_g, \quad r = a, \quad t = 0;$$

$$\frac{\partial c}{\partial r} = 0, \quad r = 0, \quad t = 0. \quad (3)$$

式中: r 为径向坐标, c 为气泡中 t 时刻、 r 处的蒸汽浓度, D 为水蒸汽在空气中的扩散系数, c_0 为气泡内初始水蒸汽浓度, a_0 为气泡的初始直径, a 为 t 时刻气泡的直径。

利用分离变量法,求解式(2)、(3)构成的定解问题,得气泡内蒸汽浓度分布为

$$c(r, t) = c_g + \frac{2a}{\pi r} (c_g - c_0) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n} \sin\left[\frac{n\pi r}{a}\right] \exp\left[-D\left(\frac{n\pi}{a}\right)^2 t\right]. \quad (4)$$

由Fick定律可知 t 时刻气泡与水传质速率为

$$Q_w = 8\pi a D (c_g - c_0) \sum_{n=1}^{\infty} \exp\left[-D\left(\frac{n\pi}{a}\right)^2 t\right]. \quad (5)$$

气泡界面处的蒸发速率与扩散的传质速率相等,由式(1)与(5)联立可得

$$\frac{dn_w}{dt} = (c_s \bar{T}_s - c_0 \bar{T}_g) \left\{ \bar{T}_g \left[8\pi a D \sum_{n=1}^{\infty} \exp\left[-D\left(\frac{n\pi}{a}\right)^2 t\right] \right]^{-1} + \frac{1}{M_w (17.48R\pi f a^2)^{-1}} \right\}^{-1}. \quad (6)$$

在恒温蒸发阶段,气泡降温释放的热量中一部分为水蒸发提供汽化潜热,另一部分用于使新蒸发的水蒸汽升温,根据能量守恒可得

$$-(c_{p,a} n_a M_a + c_{p,w} n_w M_w) dT_g = M_w dn_w \left[\bar{T} + c_{p,w} (T_g - T_s) \right], \quad (7)$$

式中: $c_{p,a}$ 、 $c_{p,w}$ 分别为空气和水蒸汽的等压比热容, n_a 为气泡内的空气的量, M_a 为空气的摩尔质量, \bar{T} 为水的汽化潜热。

由式(7)整理可得

$$\left[\frac{\bar{T}}{c_{p,w}} + T_g \right] \left[\frac{c_{p,a} n_a M_a}{c_{p,w} M_w} + n_w \right] = F, \quad (8)$$

式中 F 为常数。

在气泡上升的过程中,受温度和蒸汽量变化的影响气泡半径也会发生变化。气泡半径与温度、蒸汽量之间的关系由下式确定:

$$\frac{4}{3} \pi r^3 = \frac{R}{p} (n_a + n_w) T_g, \quad (9)$$

式中 p 为气泡内压强。

扩散系数是气泡温度的函数, 不同温度的气泡扩散系数可按下式进行换算^[9]:

$$D_{AB,T_2,P_2} = D_{AB,T_1,P_1} \left(\frac{p_1}{p_2} \right) \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{3/2} \frac{\Omega_{D,T_1}}{\Omega_{D,T_2}}, \quad (10)$$

式中: D_{AB} 为气体A 在气体B 中扩散系数; T 为热力学温度; p 为绝对压强; Ω_D 为碰撞积分, $\Omega_D = f(KT\epsilon_{AB}^{-1})$, 是分子间相互作用的非刚性修正, 其中 K 为 Boltzmann 常数, ϵ_{AB} 为分子间相互作用的能量。

界面处的饱和蒸汽浓度可由界面温度对应的饱和蒸汽压推得, 求解饱和蒸汽压的 Clausius-Clapeyron 方程^[10]为

$$\ln \frac{p_2^*}{p_1^*} = \frac{\Delta_{\text{vap}}H_m}{R} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right), \quad (11)$$

式中: p_1^* 、 p_2^* 分别为 T_1 、 T_2 对应的饱和蒸汽压, $\Delta_{\text{vap}}H_m$ 为该物质的摩尔气化焓。

本文利用经典 Runge-Kutta 方法对由式(6), (8)–(11)式组成的方程组进行数值求解计算, 气泡初始直径均设定为0.01 m。

3 结果与讨论

3.1 液体平衡温度

液体平衡温度 T_w 是浸没燃烧蒸发器的一个重要参数, 由前文分析可知, T_w 并非事先设定, 而是由传热传质平衡所决定, 受气体初始温度 T_{g0} 、气泡内水蒸汽的初始含量 ζ 及气泡与水体接触时间等因素的影响。

图2 表示了 T_{g0} 对 T_w 的影响。在计算过程中假设气液接触时间足够长, 即气液间传热传质得到完全进行, 并考虑 ζ 为0、0.1、0.2 3 种情况。从图中可以看出, 不同 ζ 条件下的 T_w 维持在328 ~ 346 K 之间, 与文献报道的实验结果基本吻合^[4]。

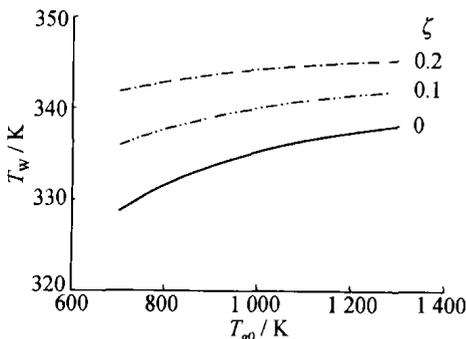


图2 液体平衡温度与气体初始温度的关系

上升的两步过程中, T_{g0} 升高, 导致图1 中的 C 点垂直上移, 由于处在上移后 C 点的气泡蒸汽浓度变大、剩余蒸汽容量减小, 此后气液协同降温的幅度变小, D 点温度升高, 因而得到整体上 T_w 升高的效果。

另外, 从宏观角度看, T_{g0} 升高, 相当于提升了已达到气液平衡状态的气泡的温度, 出现了由气体向水体的传热推动力, 而此时气液间已达到传质平衡, 此状态与前述液体升温过程中的升温蒸发阶段相似, 必将使得气液平衡向水体温度升高的方向发展。

由于 T_w 与最终气泡温度均随着 T_{g0} 的升高而升高, 为维持高能量的气液体系消耗越来越多的热量, 所以 T_w 的变化渐趋平缓。

相同 T_{g0} 条件下, 初始水蒸汽含量 ζ 越大, T_w 越高。图1 中, 不同 ζ 条件下的气泡到达 C 点时的温度相同, 但气泡剩余水蒸汽容量不同, ζ 越大则气泡内可继续容纳水蒸汽的空间越小, 因此在第二步其降温幅度越小, 导致 T_w 越高。

基于上述 T_{g0} 影响 T_w 变化趋势的同样原因, 随着 ζ 的增大, T_w 随 T_{g0} 的变化幅度减小。在图2 中, 当 T_{g0} 由700 K 变至1300 K, ζ 为0 条件下 T_w 变化幅度最大, 升高约10 K。

3.2 接触时间

接触时间也是浸没燃烧蒸发器的一个重要设计参数。所谓接触时间, 即气泡在水体中的停留时间, 表征的是蒸发器中气泡的浸没深度。接触时间对液体平衡温度的影响如图3 所示, 考虑 ζ 为0、0.1、0.2 3 种情况, T_{g0} 为1200 K。计算结果表明, 随着接触时间的增加, T_w 反而降低, 与文献报道的实验数据一致^[1]。由前面理论分析可知, 接触时间延长使得图1 中 CD 线持续发展, 更多的水牺牲自身显热向气泡蒸发, 导致气水协同降温, T_w 下降。如上所述, T_w 越高, 维持系统消耗的能量也越多, 因此应保证足够长的气液接触时间, 不仅能充分利用气泡的蒸汽容量, 还能降低其能耗。

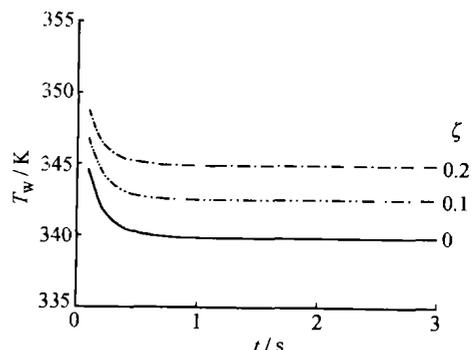


图3 液体平衡温度与接触时间的关系

计算结果表明, T_w 随 T_{g0} 的升高而升高。在气泡

Publishing House, Beijing, China. www.cnki.net

从图3还可以看出,接触时间为1 s时,不同 ζ 条件下的 T_w 均已基本达到稳定,接触时间继续增加对其产生的影响可以忽略。这一结果说明浸没燃烧蒸发器的浸没深度超出一定范围后对蒸发效果的促进无明显作用。

3.3 气泡直径与蒸发量的变化

图4表示了上升过程中气泡直径的变化, T_{g0} 为1200 K。计算结果表明,气泡直径随其上升而变小,达到平衡时最大缩小量约为22%,与文[5]的结果相近。从图4可以看出, ζ 越高,最终的气泡直径越大。这是因为 ζ 影响着 T_w ,气泡平衡温度随 T_w 的升高而升高,导致气泡直径变大。因此,气泡内水蒸汽浓度有所降低,又因 T_w 上升导致界面处饱和蒸汽浓度变大,所以气液平衡向水蒸发的方向发展,抵消了气泡自带水蒸汽的阻力,使得气泡内水蒸汽增量受 ζ 变化的影响不大,如图5所示。

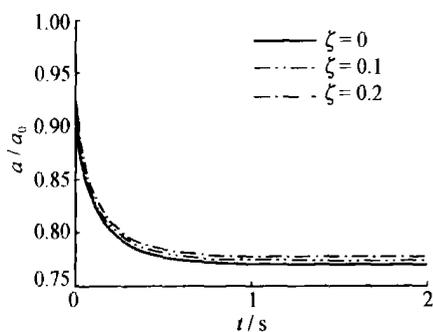


图4 气泡半径随时间的变化

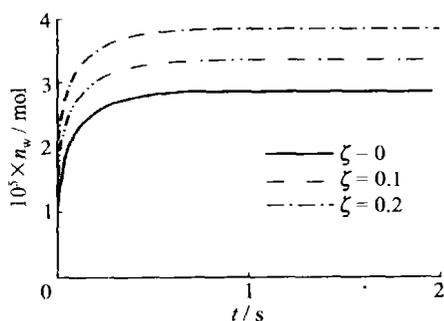


图5 气泡内蒸汽量随时间的变化

4 结 语

1) 本文在分子运动论的基础上,从传质推动力角度出发,建立了高温气泡在水中上升过程的传热传质模型,与已有模型相比,机理简单、参数较少、易于分析,计算结果与文献报道的实验数据、模拟结果基本吻合,对浸没燃烧蒸发器的优化设计具有一定的指导意义。

2) 浸没燃烧蒸发过程中,液体平衡温度随气体初始温度的升高而升高,但变化范围不大,且趋势变缓。液体平衡温度还随气泡内初始水蒸汽含量的增大而升高,但变化渐趋平缓。

3) 接触时间在一定范围内的增加使得液体平衡温度随之降低,超出1 s后对液体平衡温度影响不大。

4) 气泡直径随着气泡的上升而缩小,最大缩小量约为22%。降低初始水蒸汽含量将提高浸没燃烧蒸发器的蒸发效率。

参考文献 (References)

- [1] 丁惠华, 杨友麒. 浸没燃烧蒸发器 [M]. 北京: 中国工业出版社, 1963.
DING Huihua, YANG Youqi. Submerged Combustion Evaporator [M]. Beijing: Industrial Press of China, 1963. (in Chinese)
- [2] Williams R, Walker R. Efficient heat transfer by submerged combustion [J]. *Gas Engineering & Management*, 1997, 37(7): 32-33.
- [3] Hackenberg C M, Andrade A L. Transient surface temperature of superheated bubbles [A]. Veziroglu T N. Particulate Phenomena and Multiphase Transport [C]. Washington: Hemisphere Pub Corp, 1988. 377-382.
- [4] Lage P L C, Hackenberg C M. Simulation and design of direct contact evaporators [A]. Veziroglu T N. Multiphase Transport and Particulate Phenomena [C]. New York: Hemisphere Pub Corp, 1990. 577-592.
- [5] Campos F B, Lage P L C. Simultaneous heat and mass transfer during the ascension of superheated bubbles [J]. *International J Heat and Mass Transfer*, 2000, 43(2): 179-189.
- [6] Campos F B, Lage P L C. Heat and mass transfer modeling during the formation and ascension of superheated bubbles [J]. *International J Heat and Mass Transfer*, 2000, 43(16): 2883-2894.
- [7] Sherwood T K, Pigford R L, Wilke C R. Mass Transfer [M]. New York: McGraw-Hill, 1975.
- [8] 沈自求. 界面汽化热阱增强传热的原理及其应用 [M]. 长春: 吉林大学出版社, 2000.
SHEN Ziqiu. Principle and Application of Heat Transfer Augmentation by Interfacial Vaporization Heat Sink [M]. Changchun: Jilin University Press, 2000. (in Chinese)
- [9] 许为全. 热质交换过程与设备 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1999.
XU Weiquan. Heat and Mass Transfer Process and Equipment [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1999. (in Chinese)
- [10] 蔡炳新. 基础物理化学 [M]. 北京: 科学出版社, 2001.
CAI Bingxin. Basic Physical Chemistry [M]. Beijing: Science Press, 2001. (in Chinese)