

气-液-固三相循环流化床蒸发器浓缩南瓜汁*

刘振义 高丽兰 李 丁 宋继田

(天津科技大学机械工程学院,天津 300222)

摘 要 研究了三相循环流化床蒸发器浓缩南瓜汁的传热性能和防、除垢性能,分析了主要操作因素对传热性能的影响,建立了传热系数经验关联式,并且对南瓜汁蒸发浓缩过程进行了质量评估。研究表明,三相循环流化床蒸发器具有良好的传热性能和防、除垢性能,适宜南瓜汁的浓缩,在食品工业具有一定的应用前景。

关键词 流化床蒸发器,南瓜汁,传热性能,质量评估

随着人们对南瓜的营养价值和保健功能的不断认识,开发南瓜功能食品成为当前食品工业的热点之一,南瓜汁就是近年来开发的一种功能性食品。南瓜原汁浓度较低,给贮存、运输带来不利,浓缩后不仅能延长有效保藏期,而且可减少包装、贮藏和运输费用。浓缩也是制作南瓜酱、南瓜粉的必要工序。当采用蒸发浓缩时,南瓜汁中的有效营养成分因受热会有不同程度的损失,且南瓜汁中的果胶、蛋白质等物质往往会在加热壁面处发生结垢,不仅降低换热效率,而且影响产品质量,可见,正确选用蒸发设备和工艺条件对南瓜汁的浓缩效率和产品质量至关重要。

气-液-固三相循环流化床蒸发器是近年来发展起来的一种新型蒸发设备^[1],其创新之处是它将多相流技术应用于蒸发过程之中。它在加热管内加入惰性固体粒子作为流化介质,通过改善流体的流动形态,从而强化传热,同时由于固体粒子与壁面的频繁碰撞,及形成的多相流对壁面的冲刷作用,达到了防、除垢的效果。这种蒸发器具有生产能力强、设备利用率高和操作稳定等特点^[2]。

文中对气-液-固三相循环流化床蒸发器浓缩食品液体——南瓜汁时的传热性能、防、除垢性能及南瓜汁浓缩过程中质量进行了分析与讨论,对于在食品行业中开发应用此种蒸发设备

具有一定的实际意义。

1 实验装置概况

气-液-固三相循环流化床蒸发器实验装置流程图如图1所示。主要由进料及循环系统、加热系统、真空系统和二次蒸气冷凝系统等组成。加热蒸气由电加热锅炉提供。

实验装置主体设备气-液-固三相循环流化床蒸发器的加热管为一根 $\phi 45\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ 、管长为1.8 m的不锈钢管,并在加热管管壁轴向交错焊有12只热电偶用于测取壁温,同时加热蒸气进口、冷凝液出口、料液进出口、二次蒸气出口等温度也由热电偶测量,并装有相应的压力表。

实验装置中主体设备亦可采用镀膜电加热石英玻璃管蒸发器,以便观察研究气-液-固三相流流动状态与防、除垢性能等。

本次试验惰性粒子采用直径为 $\phi(3 \sim 4)\text{ mm}$ 的陶瓷粒子,试验工质采用可溶性固形物含量为3%、5%、7%的南瓜汁。

2 传热性能

2.1 气-液-固三相循环流化床蒸发器与无粒子的两相流蒸发器传热性能的比较

气-液-固三相循环流化床蒸发器(以下简称三相循环流化床蒸发器)的传热性能与无粒

第一作者:大学毕业,教授。

*天津市自然科学基金资助项目(No. 003604211)

收稿时间 2003-07-24, 改回时间 2004-02-19

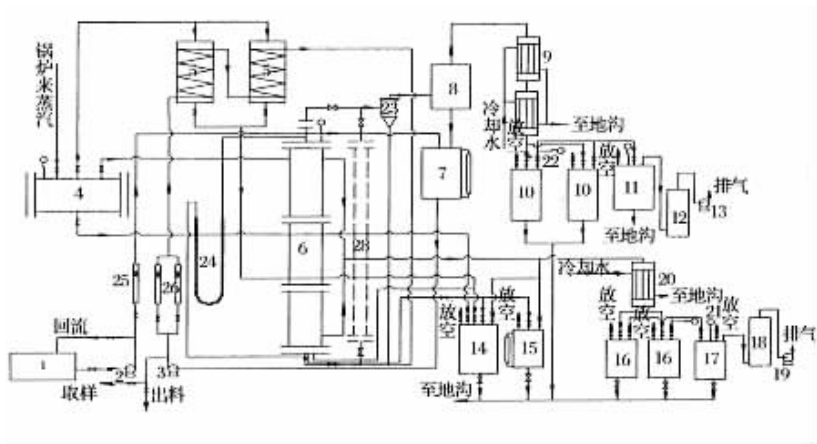


图 1 气-液-固三相循环流化床蒸发器实验装置流程图

1-料槽 2-进料泵 3-循环泵 4-汽包 5-预热器 6-钢制流化床蒸发器 7-进料贮罐 8-气液分离器；
9、20-冷却器 10、16-储罐 11、17-真空罐 12、18-生石灰吸收罐 13、19-真空泵 15-测量罐 21-真空
表 22-阀门 23-液固分离器 24-压差计 25、26-流量计 27-石英玻璃流化床蒸发器

子时的两相流蒸发器(以下简称两相流蒸发器)相比,其传热系数显著提高,如图 2 所示(在本试验条件下,可提高 35% 左右)。这是因为粒子的加入增加了汽化核心,促进了加热壁面处的液体对流强度,同时改善了工质导热能力,从而强化了传热。

惰性粒子以大量的絮状物形式存在和运动时,随着料液流量的增大,固体粒子与壁面间的接触机率增多,其碰撞的频率和动量都增大,加强了对壁面流体层流底层的破坏,提高了传热系数。

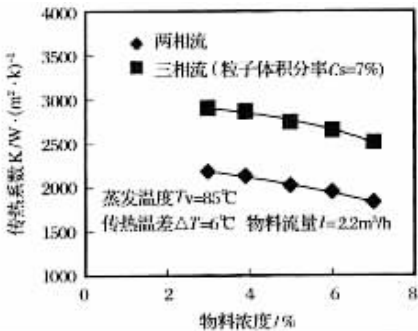


图 2 三相流与两相流蒸发器传热系数的比较

2.2 影响传热性能的主要因素分析

2.2.1 料液流量对传热性能的影响

当其他参数一定时,三相循环流化床蒸发器的传热系数随着流量的增大而增大,如图 3 所示。在一定的料液流量范围内,随着流量的增大,惰性粒子在床中的运动加剧,能够产生更多的微型漩涡,增强料液的湍动程度,有利于料液的对流传热;另外,在流化床的近壁面处,当

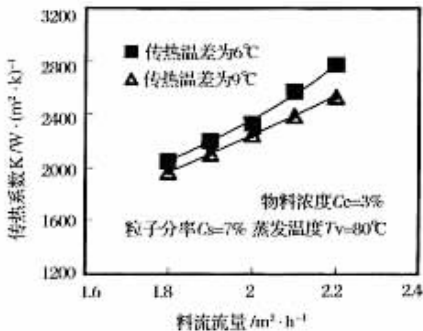


图 3 传热系数与料液流量的关系

2.2.2 蒸发温度对传热系数的影响

由图 4 可以看出,传热系数随蒸发温度的增大而增大。当蒸发温度升高时,液体的黏度减小,流体流动阻力减小,湍动加剧,液体与固体之间的混合程度也增大;同时,料液的表面张力减少,汽相速度增加,气泡易于脱离,有利于传热系数提高。对于食品物料而言,过高的蒸发温度不利于保护产品的品质,实际生产中,应综合考虑选择适宜的蒸发温度。

另外从图 4 中可见,蒸发温度对三相循环

流化床蒸发器的影响较两相流蒸发器显著,究其原因,是蒸发温度的提高,使液体黏度降低、粒子湍动碰撞加剧所致。

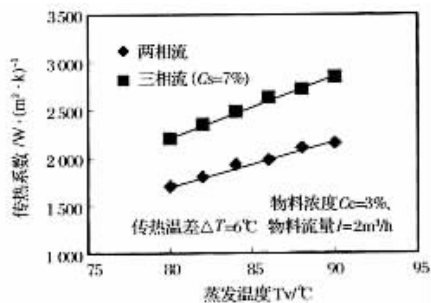


图4 传热系数与蒸发温度的关系

2.2.3 粒子体积分数对传热系数的影响

从图5可以看出,在其他参数一定时,随着粒子体积分数的增加,传热系数增大。粒子体积分数增加,增加了汽化核心,强化了泡核沸腾传热,增强了液体的湍动程度,加强了粒子对流体边界层的破坏,强化了液体对流传热。上述各方面的影响使得三相循环流化床蒸发器的传热系数增加。

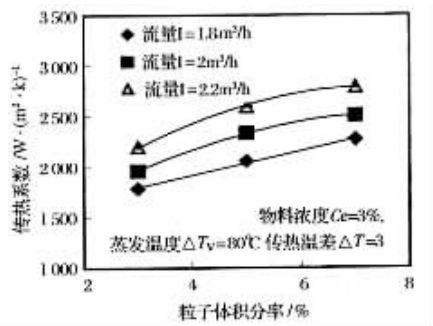


图5 传热系数与粒子体积分数的关系

当粒子体积分数增加到一定程度时,虽然传热系数有所提高,但流动的阻力增大,增加了能耗,所以实际选取时,应综合考虑各方面因素。在本试验条件下,粒子体积分数为4%~7%时能起到良好的防、除垢效果,并且强化传热效果也明显。当粒子体积分数一定时,粒子直径小、粒子材质导热系数高、密度大时,强化传热效果较好。

2.2.4 传热温差对传热系数的影响

随着传热温差的增大,传热系数略有减小

的趋势,如图6所示。增大传热温差,热通量增大,使得汽化核心数增加,汽泡的长大速率、跃离频率增加,从而增大了固体粒子对加热壁面液体边界层的扰动,使对流传热系数有一定程度的增加。但当温差较大时,会有大量汽泡汇集,汽相热阻增大,而且汽化过程加剧,汽相含率及汽相表观速度增加,对粒子的“推力”作用加强,使固体粒子破坏滞流层的作用有所削弱。另外,传热温差增大,传热量增大,导致了管外冷凝液膜加厚,从而使热阻增大。上述综合作用结果,导致传热系数随传热温差的增大而略呈下降趋势。

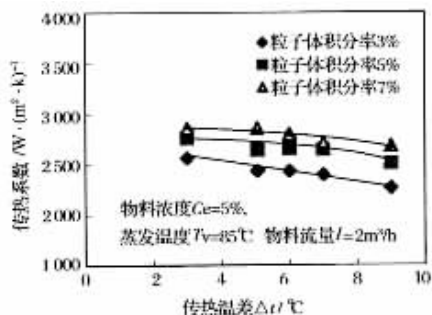


图6 传热系数与传热温差的关系

2.3 三相流沸腾传热系数经验关联式

气-液-固三相循环流化床蒸发器沸腾传热过程的影响因素很多,近年来虽然对这一领域进行了研究,但是由于过程复杂,给分析与建模带来较大困难。

本文在一定实验条件范围内,进行了三相循环流化床蒸发器浓缩南瓜汁的试验,通过对所得实验数据进行处理,建立了陶瓷粒子直径为 $\phi 3\text{mm} \sim \phi 4\text{mm}$ 时的管内三相流沸腾传热系数经验关联式:

$$\alpha = 0.00337 \frac{\lambda_l}{D} \text{Re}_l^{0.76} \left(\text{Re}_v \frac{\mu_v}{\mu_l} \right)^{0.361} \text{Pr}^{0.96} C_s^{0.17} \quad (1)$$

式中: α ——传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; μ_l 、 μ_v ——分别为液体、汽体黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; λ_l ——液体导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; Re_l ——液相雷诺准数, $\text{Re}_l = \frac{D \rho_l u_l}{\mu_l}$; D ——加热管内径, m ; Re_v ——汽相雷诺

准数, $\text{Re}_v = \frac{D \rho_v u_v}{\mu_v}$; C_{pl} ——液体定压比热, $\text{J}/$

($\text{kg} \cdot \text{K}$); Pr ——普朗特准数, $Pr = \frac{Cp_l \mu_l}{\lambda_l}$;
 C_s ——粒子体积分率, %; ρ_l 、 ρ_v ——分别为液体、汽体密度, kg/m^3 ; u_l 、 u_v ——分别为液体、汽体表观流速, m/s 。

在本试验范围内, 传热系数经验关联式预测值与试验值吻合较好, 如图 7 所示。

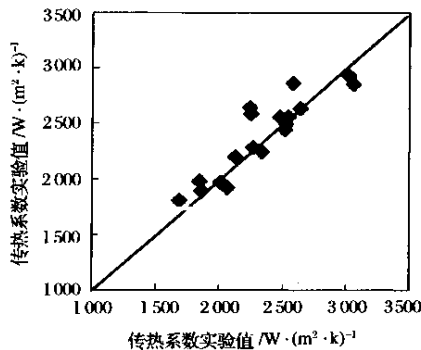


图 7 传热系数实验值与预测值的对比图

3 气-液-固三相流流动特性与防、除垢性能

通过镀膜电加热石英玻璃管蒸发器浓缩南瓜汁的试验观察到: 固体粒子在管内呈絮状颗粒团, 且管壁处颗粒团的密度较大, 中心处较小, 整体上固体颗粒为以絮状形式向上运动的特性, 如图 8 所示。

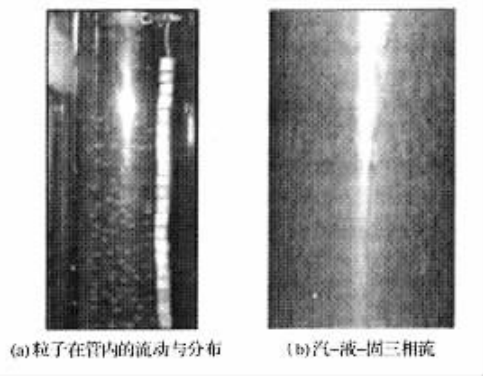


图 8 气-液-固三相流流动情况

惰性固体粒子在床层内这种流动状态, 一方面阻碍了流体中析出的固体物向壁面扩散; 另一方面, 固体粒子的加入, 为沉积物提供了沉积表面, 而沉积至粒子表面的垢层极易溶于液

体中, 从而降低了沉积物沉积到传热表面的可能性^[3]。另外, 固体粒子与传热壁面发生频繁的撞击, 防止了换热壁面上垢层诱发点的生成, 把结垢过程控制在诱导期, 从而阻止了垢层的形成, 达到很好的防、除垢效果, 保持良好的传热性能。本次试验观察到, 惰性粒子加入后, 原本结垢的两相流蒸发器壁面被冲刷干净, 并且在试验期间壁面始终保持洁净。

4 浓缩过程质量评估

本文以南瓜汁中的 β -胡萝卜素为营养指标, 在建立蒸发浓缩过程动力学模型^[4]的基础上, 采用统一目标法中的加权组合法给出了如下质量评估准则:

$$EQ = H/H_c - D/D_c \quad (2)$$

$$H = (B_{x_t} - B_{x_0})/B_{x_0} \quad (3)$$

$$D = (G_t - G_0)/G_0 \quad (4)$$

式中: B_{x_t} 、 B_{x_0} ——南瓜汁可溶性固含量及固含量初始值; G_t 、 G_0 ——南瓜汁中胡萝卜素浓度及浓度初始值; H_c ——浓度提高率的限定值; D_c ——品质下降率的限定值。

图 9、图 10 分别示出了一定条件下 ($I = 2.2 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $T_v = 85^\circ\text{C}$ 、 $\Delta T = 6^\circ\text{C}$ 、 $C_s = 7\%$ 、 $B_{x_0} = 3\%$ 、 $H_c = 2$ 、 $D_c = 0.5$) 三相循环流化床蒸发器与两相流蒸发器浓缩南瓜汁过程中浓度提高率与品质下降率随时间的变化关系。由图 9 和图 10 可知, 三相循环流化床蒸发器的浓度提高率大于两相流蒸发器, 其品质下降率小于两相流蒸发器, 这是因为三相循环流化床蒸发器的传热系数大于两相流蒸发器的传热系数所致。

由图 11 可知, 在整个浓缩过程中, 三相循

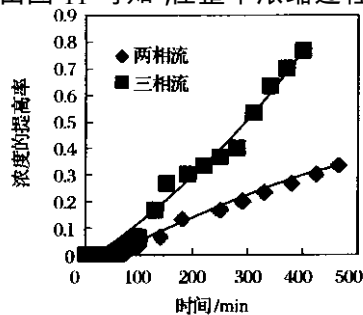


图 9 浓度提高率随时间的变化

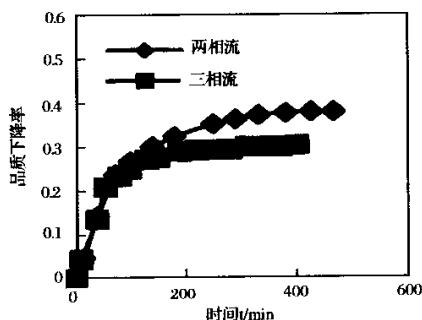


图 10 品质下降率随时间的变化

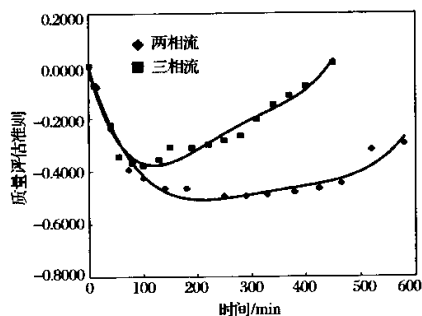


图 11 浓缩过程质量指标随时间的变化

环流化床蒸发器的综合指标 EQ 值在各个时刻都高于两相流蒸发器,说明在提高浓度和品质保护上,三相循环流化床蒸发器优于两相流蒸发器,适于食品液体——南瓜汁的蒸发浓缩。

5 结 论

(1)气-液-固三相循环流化床蒸发器具有良好的传热性能,在本试验范围内,其传热系数较无粒子的两相流蒸发器可提高 35% 左右,并且具有良好的防、除垢性能。

(2)三相循环流化床蒸发器传热系数随物料流量 I 、蒸发温度 T_v 和粒子体积百分率 C_s 增大而增大,随传热温差 Δt 增大而略呈下降趋势。

(3)通过三相循环流化床蒸发器浓缩南瓜汁的试验,建立了陶瓷粒子直径为 $\phi 3\text{mm} \sim \phi 4\text{mm}$ 时的管内三相流沸腾传热系数经验关联式,预测值与实验值吻合较好。

(4)对南瓜汁浓缩过程的质量评估表明,三相循环流化床蒸发器的综合性能优于无粒子时的两相流蒸发器,在食品工业具有一定的应用前景。

参 考 文 献

- 1 张利斌,张金钟. 多项流流化床换热器研究进展[J]. 现代化工, 2000(2): 17~19
- 2 邹克华,张金钟. 三相流蒸发沸腾换热技术在烧碱蒸发中的应用探讨[J]. 中国氯碱, 1998(4): 23~25
- 3 陈健生,李修伦. 汽液固三相循环流化床蒸发器强化传热和防垢研究[J]. 化学工业与工程, 2000, 17(1): 15~19
- 4 高丽兰,刘振义. 食品液体(南瓜汁)蒸发浓缩过程动力学研究[J]. 食品科学, 2004(1): 46~49

Study on Circulating Fluidized Bed Evaporator with Vapor-liquid-solid Three-Phase Flow for Condensing Pumpkin Juice

Liu Zhenyi Gao Lilan Li Ding Song Jitian

(College of Machinery Engineering, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin, 300222)

ABSTRACT In this paper, we studied the heat transfer characteristics of three-phase circulating fluidized bed evaporator and the prevention and cleaning of fouling during the process of condensing pumpkin juice. We analyzed heat transfer properties of this type of equipment in some main operational conditions, established the correlation equation, and evaluated the quality of pumpkin juice during concentrating process. Experimental results showed that three-phase circulating fluidized bed evaporator had good heat transfer coefficient, resisted fouling, and allowed easy cleaning. This type of evaporator fits concentration of pumpkin juice and will be an encouraging alternative for food industry in the future.

Key words fluidized-bed evaporator, pumpkin juice, heat transfer character, preventing and cleaning fouls, quality evaluation