

# 大豆蛋白蒸汽加热装置的开发与设计

王 博, 华欲飞, 孔祥珍, 张彩猛

(江南大学 食品学院 食品科学与技术国家重点实验室, 江苏 无锡 214122)

**摘 要:**从工程角度出发介绍了大豆蛋白蒸汽加热装置的开发设计。简述了工作原理与系统构成, 论述了构成系统的物料部、蒸汽部、加热部、停留部、闪蒸部和控制部的设计思路和计算方法, 介绍了设计注意事项和影响因素。

**关键词:**大豆蛋白; 蒸汽加热装置; 设计

**中图分类号:**TS214.2

**文献标识码:**A

**文章编号:**1000-9841(2011)06-1022-05

## Exploitation and Design of Steam Heating Device for Soy Protein

WANG Bo, HUA Yu-fei, KONG Xiang-zhen, ZHANG Cai-meng

(State Key Laboratory of Food Science and Technology, School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, Jiangsu, China)

**Abstract:** Steam heating plays an important role in modifying soy protein. There are many kinds of steam heating devices but mostly their structures are too simple so they have problem in temperature controlling. This paper introduced the design principles of steam heating device for soy protein from an engineering point of view. The design ideas and the methods of calculation of steam heating device had been discussed. The design considerations and influence factors had also been presented.

**Key words:** Soybean protein; Steam heating device; Design

大豆蛋白热处理是大豆蛋白改性应用的重要环节,不同热处理工艺之间的差别主要体现在加热温度与对应停留时间的不同。过去常用大豆蛋白的热处理温度不超过 100℃。班玉凤等<sup>[1]</sup>报道大豆蛋白酶解性的最佳热处理温度也为 90℃;钟芳等<sup>[2]</sup>研究表明大豆蛋白速凝的最佳处理温度也为 90℃。而随着研究深入,目前发现高于 100℃的热处理温度对于大豆蛋白一些功能性质同样有改善作用。逯昕<sup>[3]</sup>研究表明酶解大豆分离蛋白采用 100℃以上的热处理温度(120℃)显著改善了其分散性;Lu 等<sup>[4]</sup>研究发现在大豆蛋白预热处理中采用 100℃以上的温度能够明显改善大豆蛋白的冷凝胶性质。在生产实际中,100℃以上热处理温度的实现,需要料液快速升温并且要精确计量换热结束点和保温停留段长度,从而保证热处理工艺所设定加热温度 and 对应停留时间的准确实现。而大多数工厂采用简易的蒸汽加热装置,料液升温速度慢、温度波动大,对应停留时间不准确,由此导致产品品质下降,不同批次间质量差别大。鉴于此,需要从工程角度出发,开发设计能够近似瞬间升温,并能降低蛋白液在加热过程中温度波动幅度的新型蒸汽加热装置。该文从工作原理开始,依次介绍了大豆蛋白蒸

汽装置的构成及各部分的设计思路与计算方法,并提出了设计注意事项和影响因素。

### 1 装置组成及工作原理

蒸汽加热装置结构简图如图 1,主要由物料系统、蒸汽系统、加热系统、停留系统、闪蒸系统和控制系统组成。物料系统主要包括物料罐、物料泵;蒸汽系统主要包括汽水分离器、蒸汽调节阀;加热系统主要包括加热器;停留系统主要包括保温停留管与背压阀;闪蒸系统主要包括闪蒸罐与真空机组;控制系统包括控制器以及热电阻与相应线路。

蒸汽加热装置利用干燥饱和水蒸汽同料液直接接触,当料液同饱和水蒸汽接触时,由于温差热量由蒸汽向料液快速传递,饱和水蒸汽释放热量并冷凝同料液融合,直至温差消失传热结束。

采用蒸汽同料液直接接触消除了常用换热设备中的传导壁,大幅提高了换热效率,相关研究报道蒸汽直接接触式换热是间壁式传热方式的 40 ~ 60 倍<sup>[5]</sup>。但蒸汽与料液直接接触换热过程需要合理控制更多因素,如料液的液流形态、厚度,蒸汽注入角度与注入速度,换热环境压力等。要实现换热速度的大幅提升,就需要降低料液厚度,提高蒸

收稿日期:2011-07-30

第一作者简介:王博(1986-),男,硕士,研究方向为大豆蛋白热改性。E-mail:304172121@qq.com。

通讯作者:华欲飞(1962-),男,教授,从事大豆蛋白理论与应用研究。E-mail:yfhua@jiangnan.edu.cn。

汽注入速度并合理设计注入端的口径与角度<sup>[6]</sup>。

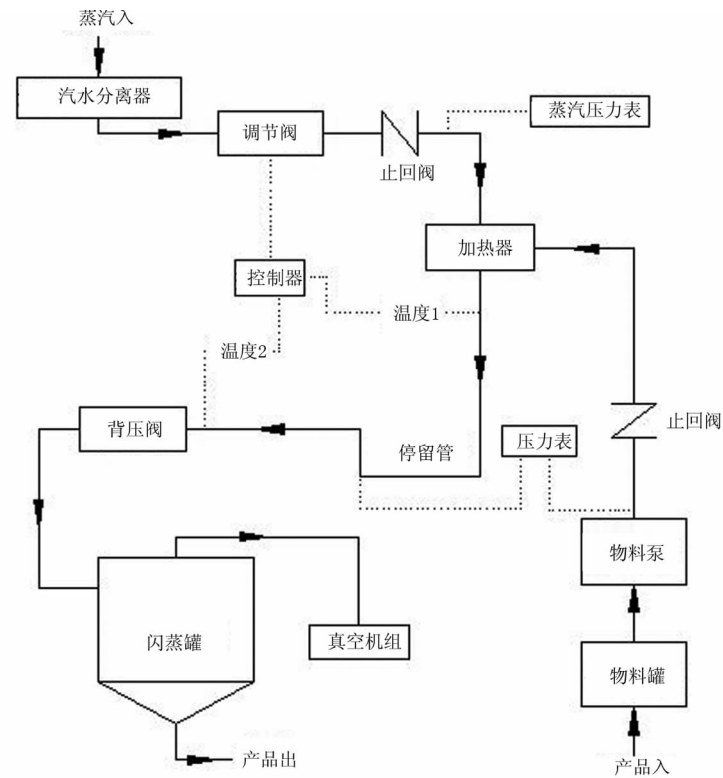


图 1 蒸汽加热装置简图  
Fig.1 Structural diagram of the steam heating device

2 设计依据与计算流程

根据生产工艺需要,采用 Raj 等<sup>[7]</sup> 建立的判断方法对蒸汽加热系统进行设计。基本计算流程见图 2。

计算所用料液物性值和蒸汽焓值、比热值通过斯派莎克网站 (<http://www.spiraxsarco.com/cn/>) 获得。首先拟定初始处理工艺参数,依据衡算、估算与核算公式进行试差计算和校验,不断修正设备参数至校验结果合理,然后确定参数。

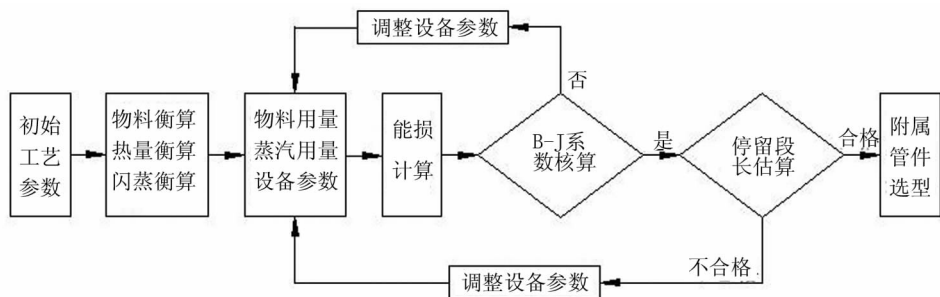


图 2 计算流程  
Fig.2 Calculation flow chart

3 设计计算与设备参数的确定

3.1 设计计算

3.1.1 物料衡算 根据质量守恒原理,计算公式如下:

$$W_c = W_l + W_s \tag{G1}$$

$W_c$ 为加热处理后器物料与蒸汽混合质量流量

( $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ ); $W_l$ 为物料处理量( $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ ); $W_s$ 为物料对应的蒸汽用量( $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ )。

物料处理量  $W_l$ 由工艺需要确定,蒸汽用量  $W_s$ 通过热量衡算公式 G2 计算。这样能够获得加热器处理后的质量流量  $W_c$ 。

3.1.2 热量衡算 热量衡算公式如下:

$$H_c W_c = H_l W_l + H_s W_s \tag{G2}$$

$H_c$ 为混合后物料焓( $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ); $H_1$ 为混合前物料焓( $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ); $H_s$ 为蒸汽焓( $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ )。将物料衡算关系带入G2,即可解得蒸汽用量 $W_s$ 。

3.1.3 闪蒸衡算 首先由实际工况需要,确定闪蒸后出料温度,参照出料温度对应的饱和蒸汽压力确定真空度。根据热量守恒利用下式计算需要抽离的蒸汽量:

$$W_c \cdot C_p \cdot \Delta T = W_k \cdot h_g \quad (\text{G3})$$

$W_c$ 为加热器处理后物料与蒸汽混合质量流量( $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ ); $C_p$ 为料液比热 $\text{kJ}\cdot(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})^{-1}$ ;  $\Delta T$ 为料液闪蒸前后温差( $^\circ\text{C}$ );  $W_k$ 为蒸汽抽离流量( $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ ); $h_g$ 为对应蒸发比焓( $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ )。计算出抽离蒸汽流量后,依据真空度和蒸汽抽离流量选择合适的真空机组。

3.1.4 能损计算 蒸汽加热装置的能量损失主要为蒸汽的暖管负荷和运行负荷。暖管负荷是管路在达到工作条件前蒸汽加热管路所损失的能量,通常换算为质量计量。运行负荷是设备正常运行中由于表面散热导致蒸汽在进入换热器前发生冷凝而损失的能量,也换算为质量计量。蒸汽暖管负荷公式如下:

$$m_{ns} = \frac{60 W (T_s - T_{amb}) C_p}{h_{fgt}} \quad (\text{G4})$$

$m_{ns}$ 为蒸汽平均冷凝率( $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$ ); $W$ 为管道及附件总质量( $\text{kg}$ ); $T_s$ 蒸汽温度( $^\circ\text{C}$ ); $T_{amb}$ 为环境温度( $^\circ\text{C}$ ); $C_p$ 为管道材料比热 $\text{kJ}\cdot(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})^{-1}$ ;  $h_{fg}$ 为工作压力下蒸汽蒸发焓( $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ); $t$ 为暖管时间( $\text{min}$ )。

蒸汽运行负荷公式如下:

$$m_s = \frac{3.6 Q L f}{h_{fg}} \quad (\text{G5})$$

$m_s$ 为蒸汽冷凝率( $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$ ); $Q$ 为辐射换热率( $\text{w}\cdot\text{m}^{-1}$ ); $L$ 为等效长度( $\text{m}$ ); $f$ 为保温系数; $h_{fg}$ 为工作压力下蒸汽蒸发焓( $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ )。

由公式G3计算蒸汽耗用量 $W_s$ , $W_s$ 加和运行负荷 $m_s$ ,如果数值大于暖管负荷 $m_{ns}$ 则以耗用量 $W_s$ 与运行负荷 $m_s$ 的加和值为参照值选用锅炉,如果小于则以暖管负荷值 $m_{ns}$ 作为选用蒸汽锅炉的参考值。蒸汽供气装置的供气能力一定要高于工作消耗用量与能量损失量的和。

3.1.5 B-J系数衡算 B-J系数计算公式如下:

$$\text{B-J} = \frac{W_s V_s}{d_0^2 h \Delta T} \quad (\text{G6})$$

B-J, 气泡/喷口系数; $W_s$ 蒸汽质量流量( $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ ); $V_s$ 蒸汽注入速度( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ); $d_0$ 蒸汽注入端

口直径( $\text{m}$ ); $h$ 蒸汽传热系数 $\text{w}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{k})^{-1}$ ;  $\Delta T$ 蒸汽与料液温度差( $^\circ\text{C}$ )。

根据Raj等<sup>[7]</sup>的研究,蒸汽注入由分散气泡状态变成稳定注入的转变对应B-J系数为7。蒸汽传热系数应根据工况条件查阅相关材料采用经验值。该装置设计采用Raj等<sup>[7]</sup>研究中贴近设计工况的蒸汽传热系数 $h = 6.5 \times 10^5 \text{w}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{k})^{-1}$ 。

3.1.6 停留段长度估算 依据Edgerton和Jones<sup>[8]</sup>的研究,对停留管长度的估算采用以下公式:

$$L = \frac{4 W_1 \theta (H_s - H_1)}{\rho d^2 \pi (H_s - H_c) (0.3361 \log N_{Re} + 0.662)} \quad (\text{G7})$$

$L$ 为停留管长度( $\text{m}$ ); $W_1$ 为料液质量流量( $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ ); $\theta$ 停留时间( $\text{s}$ ); $H_s$ 为蒸汽比焓( $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ); $H_1$ 为料液焓值( $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ); $H_c$ 为加热后料液焓值( $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ); $d$ 为停留管直径( $\text{m}$ ); $\rho$ 为料液密度( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ); $N_{Re}$ 为雷诺系数。

G7公式适用的管径范围为1~10 cm。公式中采用雷诺系数计算判断停留管中料液流动状态,料液流动状态决定料液在管路中流动的速度剖面,层流速度剖面曲线比湍流更尖锐,所以停留管中料液流动状态如果为层流,则料液的最快部分要比最慢部分快近2倍的速度,对应停留时间也相差近2倍,造成料液实际处理有差别。因此在停留段要采用湍流,令速度剖面更趋缓和,最大限度缩短最快部分和最慢部分的速度差,使物料拥有相同的停留时间。

### 3.2 设备参数的确定

3.2.1 物料系统 物料系统包括物料罐、物料泵及相关管路。物料罐可根据实际需要设计适当容量,根据设计容量选择物料罐形状推算相关尺寸。如果处理分散性不好的大豆蛋白液时要增加搅拌装置,防止蛋白在罐底部聚沉。同时在设计大容量物料罐时注意不要忽略物料本身重力对罐刚度的影响。物料泵的选择要根据实际生产条件选择适当经济的型号。常用输送蛋白液的物料泵为柱塞泵、螺杆泵等正位移泵,个别工况视情形可以选择低成本物料泵。管路尺寸设定依据设计处理量和常用输送流速推算。

3.2.2 蒸汽系统 蒸汽系统包括锅炉、汽水分离器及相关管路。锅炉首先要能够提供充足蒸汽满足工作用量与能损,之后可以依据实际工况和经济条件恰当选择型号。

锅炉中产生的饱和蒸汽并不干燥,而且锅炉中容易发生汽水共腾使蒸汽携带更多水分,同时蒸汽

管道的表面散热会使蒸汽冷凝,也使蒸汽干燥度下降,降低生产效率和产品品质。所以汽水分离器作为蒸汽的干燥装置一定要谨慎选择。常见汽水分离器分为挡板式、气旋式和吸附式。主要区别在于挡板式分离器在较大流速范围内可以保持很高的干燥效率,而气旋式和吸附式分离器的干燥效率只有蒸汽速度在  $13 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  以下才能达到 98%,蒸汽速度达到  $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时干燥效率只有 50%。设计过程中要依据实际工况适当选择。

蒸汽管路应参经常用蒸汽流速依据计算出的蒸汽用量推算管路直径。同时为了减少由于表面散热所造成的能量损失并保护操作人员防止烫伤,蒸汽系统自锅炉后要添加保温层。

**3.2.3 加热系统** 加热系统采用蒸汽注入式加热装置主要分 2 种:外部调节与内部调节。主要区别在于内部调节式蒸汽注入加热装置的调节部设置在装置内部,距离蒸汽实际注入点距离近,能够更为快速精确的调节。而外部调节式蒸汽注入加热装置,调节部距离蒸汽实际注入点较远,所以调节部所显示的蒸汽压力和流速与实际注入点处略有不同,调节温度时造成误差。因此采用内部调节能够消除蒸汽在调节部与实际注入点中间发生压力和速度变化所产生的影响,能够精确控制加热温度。而且内部调节式蒸汽注入加热装置更适合安装自动控制系统降低人力成本,提高生产质量<sup>[8]</sup>。

典型内部调节式蒸汽注入加热装置。为蒸汽喷射器,但是具体形式不同,相关专利技术很多。

对于蛋白液加热,要首先根据具体工况条件与工艺要求自行设计或者选购合适的加热器。另外,加热系统也存在表面散热,为了降低运行负荷要加装保温层,降低表面散热造成的热量损失。

**3.2.4 停留系统** 停留系统设计中,停留管道的尺寸设计要保证停留段料液流动为湍流,同时为了节省空间和美观,可以将停留管路设计成组合箱,通过改变连接次序改变对应停留时间,方便操作。

停留系统关键为背压控制,背压压力如果不充分,蒸汽注入料液后不能完全冷凝导致工段不能实现设计制程条件,产品品质不合格。Edgerton 等<sup>[8]</sup>的研究中,停留段要通过背压阀实现停留段中环境压强值超过料液温度对应的饱和蒸汽压 (0.11 MPa)。

停留段同样有表面散热,料液流过停留管过程中会有温度损失,所以要在停留系统加装保温层,降低由于表面散热带来的温度损失。

**3.2.5 控制系统和闪蒸系统** 控制系统,宜采用前反馈加后反馈综合调节的方式来精确调节。依据图 3 所示原理设计的控制回路能够提高控制精确性。但在生产实际中,增加前馈控制要加装算法判断单元,提高生产成本。如果经济条件不允许,可以舍弃前馈控制,使用简单的反馈回路控制,降低设备成本,但控制精确性会相应下降。要依据不同的实际工况和经济条件做出选择。

闪蒸系统设计则要注意密封性和设备安全,真空机组要选择适当。

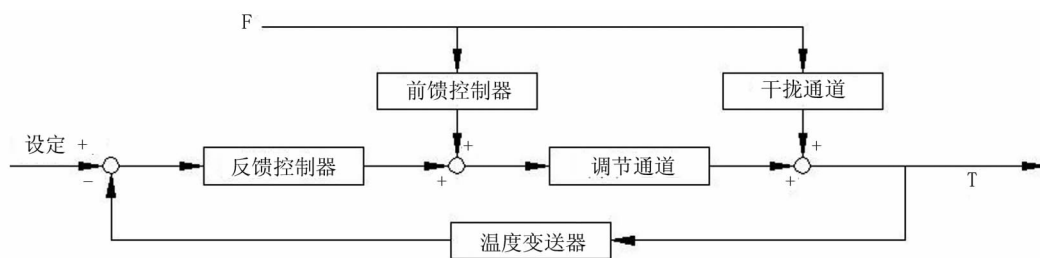


图 3 控制原理图

Fig.3 Control schematic diagram

### 3.3 装置运行影响因素

**3.3.1 物料温度和流量** 物料的温度和流量应最大限度保持稳定,物料温度和流量的波动都会令控制系统重新调整直至回归稳定状态。在连续生产操作中会造成相当一部分产品由于控制系统的调整,处理条件发生变化造成品质不合格,应在设计上极力避免。

**3.3.2 蒸汽干燥度和蒸汽压力** 蒸汽干燥度和压力同样要波动小,蒸汽系统中的疏水环节要严谨设计,蒸汽干燥度不够会携带水滴进入换热环节降低换热效率,同时抽丝等现象会腐蚀阀门、流量计等管件造成设备磨损。

**3.3.3 加热器** 加热器要谨慎选择,选择不当会造成物料在进入停留段前未完成换热,蒸汽未能完

全冷凝,导致停留段对应实际停留时间不符合设计制程条件,产品品质不符要求。

3.3.4 背压压力 背压压力要高于料液制程温度对应的饱和蒸汽压 0.11 MPa。

## 4 讨论

蒸汽加热装置设计遇到的主要问题在于如何判断设计或所选用结构是否合理。校验结构是否合理要充分认识蒸汽和物料接触过程中蒸汽状态是如何变化的。众多研究者在研究过程中将重点置于不同条件下蒸汽直接接触换热的效率变化,比如 Brucker 和 Sparrow<sup>[9]</sup>采用高速摄像装置研究在高压条件下 1.06 ~ 6.21 MPa 蒸汽注入静态冷水后蒸汽冷凝过程中的气泡形状及冷凝时间变化并计算得到蒸汽的传热系数平均值为  $1 \times 10^4 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$ ,而 Bankoff 和 Mason<sup>[6]</sup>研究蒸汽注入湍流液体中的冷凝过程,蒸汽传热效率表现出了巨大提升,其不同条件下计算出的传热系数是 Brucker 等计算结果的 40 ~ 180 倍。

直至 Raj 等<sup>[7]</sup>转变了研究重点,系统比较了不同蒸汽注入状态对蒸汽与冷水混合加热效果的影响,提出蒸汽和冷水接触混合会有沸腾、稳态注入、水锤三种混合状态,其中稳态注入是蒸汽注入加热的理想状态,并提出了 B-J 系数公式,通过实验设定了判断注入状态转换的临界值,为设计者提供了校验设备参数的工具。通过 B-J 系数计算即可判断结构设计是否合理。

由于大豆蛋白蒸汽加热装置的设计涉及到热力学、流体力学、机械制造、自动控制和生产工艺等诸多领域。在设计过程中一定要广泛查阅,结合工

艺和工况条件选择经济恰当的设备管件。

## 参考文献

- [1] 班玉凤,朱海峰,关纳新. 热处理对大豆蛋白酶解性能的影响[J]. 现代食品科技,2005,21(1):72-77. (Ban Y F, Zhu H F, Guan N X. Effect of heat treatment on enzymatic hydrolysis of soybean protein[J]. Modern Food Science and Technology, 2005, 21(1):72-77.)
- [2] 钟芳,王璋,许时婴. 大豆蛋白速凝特性研究-I热处理条件对大豆蛋白速凝特性的影响[J]. 中国粮油学报,2001,16(4):47-50. (Zhong F, Wang Z, Xu S Y. Instant-gelation propriety of soy protein-I Influence of preheating condition[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2001, 16(4):47-50.)
- [3] 逯昕. 酶改性制备专用大豆分离蛋白的研究[D]. 无锡:江南大学,2008:40-42. (Lu X. Preparation of special soy protein isolates by enzyme modification[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2008:40-42.)
- [4] Lu X, Lu Z H, Yin L J, et al. Effect of preheating temperature and calcium ions on the properties of cold-set soybean protein gel[J]. Food Research International, 2010, 43:1673-1683.
- [5] 徐良增,许时婴,杨瑞金,等. 淀粉蒸汽喷射液化气的设计[J]. 粮油加工与食品机械,2001(2):26-29. (Xu L Z, Xu S Y, Yang R J, et al. Design of steam jetting for starch liquefying[J]. Cereals and Oils Processing, 2001(2):26-29.)
- [6] Bankoff S G, Mason J P. Heat transfer from the surface of a steam bubble in turbulent subcooled liquid stream[J]. Chemical Engineering Research & Development, 1962, 8(1):30-33.
- [7] Raj P, Julie V, Mark C. Design of stable steam injectors for continuous heating[J]. Journal of Chemistry Technology and Biotechnology, 1996, 66:327-339.
- [8] Edgerton E R, Jones V A. Effect of process variables on the holding time in an ultrahigh temperature steam injection system[J]. Journal of Dairy Science, 1970, 53(10):1353-1357.
- [9] Brucker G G, Sparrow E M. Direct contact condensation of steam bubbles in water at high pressure[J]. International Journal of Heat Mass Transfer, 1976, 20:371-381.