

旁路调节控制在连续式海参蒸煮设备上的应用研究

Application on sea cucumber cooking equipment's control based on bypass adjustment

倪 锦 徐文其 沈 建

NI Jin XU Wen-qi SHEN Jian

(中国水产科学研究院渔业机械仪器研究所, 上海 200092)

(Fishery Machinery and Instrument Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200092, China)

摘要:传统海参蒸煮设备的温度控制采用定值控制,为解决其存在的调节能力差、超调量大和滞后大等问题,设计适用于海参蒸煮设备的蒸汽旁路调节系统,以实现蒸煮温度的精确控制;将连续式海参蒸煮设备等效转换为热力系统,建立传热计算模型及求解策略;将传热计算模型内嵌到控制算法中,以实现温度扰动的预测;利用建立的旁路调节的精确控制模型,实现连续式海参蒸煮设备温度的精确控制,并开展旁路调节控制的蒸煮温度控制以及品质影响分析的试验研究。结果表明:基于蒸汽旁路调节的海参蒸煮设备的温度控制具有超调量小、滞后小和调节能力强的优点,使得蒸煮后的海参获得较高的弹性和较低的硬度,保证蒸煮加工后海参的品质。

关键词:海参;蒸煮设备;旁路调节;精确控制;温度

Abstract: Traditional sea cucumber cooking equipment's temperature control was fixed value control, and there were a lot of problems such as poor regulating ability, large overshoot and control lag. In order to solving those problems, first of all, steam bypass adjusting system was designed for sea cucumber cooking equipment, in order to realizing cooking temperature's precise control. Secondly, the sea cucumber cooking equipment was converted to an equivalent heat transfer system, and then established its heat transfer computing model and solving strategy. Thirdly, the heat transfer computing model was embedded to control algorithm, temperature perturbation predicted by using heat transfer computing model, then sea cucumber equipment's temperature precise control was realized. Finally, experimental research on steam bypass adjustment precise control of sea cucumber cooking equipment was conducted, and its temperature control ability and impact on sea cucumber's quality were studied. Experimental results showed that sea cucumber cooking equipment's temperature control based on steam bypass adjustment had advantages such as small overshoot, small control lag and strong adjusting ability. It provided

sea cucumber product with high elasticity and low harness, and ensured a better quality of cooking sea cucumber product.

Keywords: sea cucumber; cooking equipment; bypass adjustment; precise control; temperature

海参蒸煮设备的温度控制是保证海参品质的重要环节,蒸煮温度过高或过低都会影响海参的品质,传统加工企业在蒸煮环节多数采用夹层蒸汽锅蒸煮海参,其加热过程中温度分布不均匀,蒸煮温度很难控制^[1-2]。现有改进的连续式海参蒸煮设备采用蒸汽间接加热^[3-4],采用定值控制,在控制过程中温度不仅存在较大的波动,而且存在较大的滞后和超调量,这种较剧烈的温度波动,常常对蒸煮后海参的品质造成不利的影响,因此提出一种合理的温度控制方法,显得尤为迫切。

鉴于此,本研究针对现有连续式海参蒸煮设备存在的温度调节能力差、超调大和滞后大等问题,设计连续式海参蒸煮设备的蒸汽旁路调节系统^[5],利用旁路调节实现蒸煮过程温度的精确控制,将连续式海参蒸煮设备等效转换为换热系统,建立传热计算模型及求解策略,进一步将传热计算模型内嵌到精确控制模型中,利用精确控制模型实现扰动状态下温度控制参数的实时计算与动态调整,最后针对海参质量流量扰动开展温度控制与品质分析的试验研究,旨在研究连续式海参蒸煮设备蒸汽旁路调节的控温效果以及对蒸煮后海参品质的影响。

1 连续式海参蒸煮设备的蒸汽旁路调节方法

连续式海参蒸煮设备^[6]由蒸煮水槽、输送带、分割网板、绝热保温盖、加热蒸汽管路、旁通蒸汽管路、三通蒸汽调节阀和输送带电机构成,主要用于海参高温蒸煮初加工。连续式海参蒸煮设备的输送带两侧设置薄的防护挡板,保证海参在水槽内蒸煮输送过程中不滑出输送带,水槽 3 个侧面的绝热挡板以及绝热保温盖构成了类似封闭隧道的蒸煮环境,且具有良好的绝热性能,保证蒸煮过程中环境热量损失最小。蒸煮水槽内底部设置蒸汽加热管路,蒸汽加热回路排布于输送

基金项目:国家高技术研究计划项目(编号:2011AA100803)

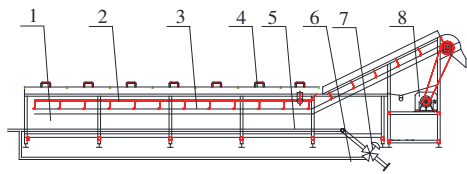
作者简介:倪锦(1985—),男,中国水产科学研究院助理研究员,硕士。E-mail:jeennea@hotmail.com

通讯作者:沈建

收稿日期:2015-08-09

带两侧,蒸汽加热管路沿输送带运动方向布置。

连续式海参蒸煮设备的蒸汽旁路调节方式如图 1 所示,在蒸汽加热管路进口处设置蒸汽比例三通调节阀,一部分蒸汽经蒸汽比例三通调节阀进入连续式蒸煮设备内部的蒸汽加热管路,另一部分蒸汽经蒸汽比例三通调节阀由蒸汽旁路管路流出,蒸汽比例三通调节阀可调节进入连续式蒸煮设备内的加热蒸汽量。在加热蒸汽管路和旁通蒸汽管路分别设置蒸汽流量传感器、压力传感器和温度传感器。由于加热水槽的容积较大,为了解决水槽温度测量的不准确性,在连续式海参蒸煮设备加热水槽中沿长度方向均匀布置 3 个温度传感器,由 3 个传感器采集得到的温度算术平均值作为测得蒸煮液的温度值。在蒸汽加热管路设置蒸汽旁路,通过调节蒸汽比例三通调节阀的开度,实现加热蒸汽量的控制,从而实现连续式海参蒸煮设备的温度控制。



1. 蒸煮水槽 2. 输送带 3. 分隔网板 4. 绝热保温盖 5. 加热蒸汽管路 6. 旁通蒸汽管路 7. 蒸汽比例三通调节阀 8. 输送带电机

图 1 连续式海参蒸煮设备的蒸汽旁路调节示意图

Figure 1 Schematic diagram of continuous sea cucumber cooking equipment's steam bypass adjustment

2 连续式海参蒸煮设备蒸汽旁路调节的传热计算模型

连续式海参蒸煮设备的传热机理为蒸汽的热量经加热管路传递给蒸煮液,海参对蒸煮液温度的影响等效为蒸煮液入口段的温度波动扰动,结合连续式海参蒸煮设备蒸汽旁路调节方式,连续式海参蒸煮设备的传热模型可以等效为如图 2 所示的传热计算模型。

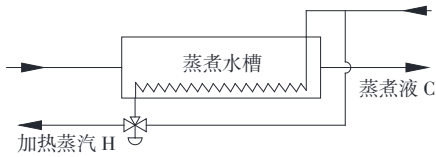


图 2 海参蒸煮设备的等效化传热模型

Figure 2 The equivalent heat transfer system of sea cucumber cooking equipment

考虑到连续式海参蒸煮设备内部水槽处于相对绝热的环境,故认为换热只存于蒸汽和蒸煮液、蒸煮液和海参之间。海参的个体较小,进入蒸煮液后温度快速升高达到蒸煮液的温度,在蒸煮入口段的蒸煮液的温度也会快速下降,海参对蒸煮液温度的影响可等效为温度发生阶跃扰动变化,为了简化计算,传热计算模型中将海参进入蒸煮液的过程等效为蒸煮液温度的阶跃扰动。

根据连续式海参蒸煮设备的热量传递原理,连续式海参蒸煮设备可转换为等效换热器,其中等效换热器的传热系数

分别为蒸汽管内的凝结对流换热系数 α_1 、蒸汽管外的对流换热系数 α_2 ,以及蒸汽管壁传热面的导热系数 λ (即为蒸汽管金属材质的导热系数)组成。

2.1 管内蒸汽的凝结对流换热系数 α_1

蒸汽在管内流动过程中,壁面与流体间温差使得热量由壁面传向流体,蒸汽在管内的流动为受迫对流换热,考虑到蒸汽的流速较小,故管内蒸汽以层流运动为主,通过测定蒸汽管内换热系数^[7-8],获得如式(1)所示的对流换热系数计算公式:

$$\alpha_1 = \frac{Nu_s k}{L} \quad (1)$$

其中:

$$Nu_s = 0.15 Re_s^{0.32} Pr_s^{0.33} \quad (2)$$

$$Re_s = \frac{\rho V L}{\mu} \quad (3)$$

$$Pr = \frac{c_p}{k} \quad (4)$$

式中:

α_1 ——管内蒸汽的凝结对流换热系数, $W/(m^2 \cdot K)$;

Nu_s ——蒸汽的努塞尔数;

k ——蒸汽的导热系数, $W/(m \cdot K)$;

L ——传热面或流场的几何特征长度, m ;

Re_s ——蒸汽的雷诺数;

Pr_s ——蒸汽的普朗特数;

μ ——蒸汽的动力黏度, $Pa \cdot s$;

ρ ——蒸汽的密度, kg/m^3 ;

V ——蒸汽流场的特征速度, m/s ;

C_p ——蒸汽的定压比热容, $J/(kg \cdot K)$ 。

2.2 管外蒸煮液的对流换热系数 α_2

连续式海参蒸煮设备中物料输送带的运动速度缓慢,水槽内蒸煮液的热量交换主要依赖自然对流换热,故采用如式(5)所示的传热关联式^[9-11]:

$$\alpha_2 = \frac{Nu_z k}{L} \quad (5)$$

其中:

$$Nu_z = c (Gr \cdot Pr)^n \quad (6)$$

$$Gr = \frac{g \beta \Delta t D^3}{\nu^2} \quad (7)$$

式中:

α_2 ——管外蒸煮液的对流换热系数, $W/(m^2 \cdot K)$;

c, n ——兼顾强制对流的修正系数;

K ——蒸煮液的导热系数, $W/(m \cdot K)$;

Gr ——格拉晓夫准则;

L ——传热面或流场的几何特征长度, m ;

Pr ——普朗特数;

β ——容积膨胀系数, 100% ;

g ——重力加速度, m/s^2 ;

Δt ——对数平均温差, $^{\circ}C$;

ν ——水的运动黏度, m^2/s ;

D ——蒸煮液流场特征长度,取蒸汽管束外当量直径, m 。

2.3 总传热方程及求解策略

当连续式海参蒸煮设备的总传热系数 K 、传热面积 A 及对数平均温度差 Δt_m 为已知时,则可计算出在该工艺条件下传热量 Q 。忽热蒸汽管两侧污垢热阻,连续式海参蒸煮设备总的传热方程^[12]见式(8):

$$Q = KA\Delta t_m \tag{8}$$

其中:

$$A = \pi d_e L \tag{9}$$

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} \frac{A_o}{A_i} + \frac{b}{\lambda} \frac{A_o}{A_e} + \frac{1}{\alpha_2}} \tag{10}$$

式中:

Q ——总传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$;

Δt_m ——对数平均温差, $^{\circ}C$;

d_e ——当量直径, m ;

A_i ——内基准计算的换热面积, m^2 ;

A_o ——外基准计算的换热面积, m^2 ;

b ——换热壁面厚度, m ;

λ ——换热壁面的导热系数, $W/(m \cdot K)$ 。

传热计算求解策略为:根据初始流体参数、温度参数等,利用牛顿迭代法求解传热方程,当误差小于设定值时迭代计算收敛结束,获得最终的温度。在传热计算过程中,蒸汽管路的流量、温度、压力均由传感器获取,所需加热蒸汽温度以及蒸汽速度 V ,可通过热量平衡方程计算获得,进一步可计算获得蒸汽比例三通调节阀的开度参数。

3 连续式海参蒸煮设备旁路精确控制试验

传热计算所需的参数由现场传感器采集获得,其中海参蒸煮设备的结构参数预先通过设备设计说明书获得,利用前述的传热计算模型,通过计算可以预测不同海参蒸煮量下蒸煮液的温度变化情况,同时利用迭代计算可获得抑制扰动所需的蒸汽旁路调节量。在实际控制设备中,在海参蒸煮设备旁路精确控制器中内嵌传热计算模型,并将旁路调节精确控制集成到连续式海参蒸煮设备的控制系统中,在蒸煮过程中,利用传感器实时采集动态数据,通过传热计算内核获取应该实施的蒸汽开度参数,经执行机构实时动态调整蒸汽旁路量,实现蒸煮过程温度的动态控制,从而保证蒸煮过程中蒸煮液温度的稳定。

本试验具体研究温度控制的效果,连续式海参蒸煮设备的额定生产能力为 2 500 kg/h,蒸汽压力大于 0.4 MPa,以生产某种半成品海参为例,海参蒸煮液的温度设定为 95 $^{\circ}C$,海参进料量变化采用质量流量阶跃式变化(质量阶跃通过人为干扰实现),蒸汽三通调节阀的初始开度为 0.5。由称重传感器测得海参的质量流率、蒸煮液温度、蒸汽参数等,由传热模型根据温度扰动趋势计算获得旁路调节开度,通过动态调节实现温度控制。海参质量流率阶跃变化曲线见图 3,精确控制后蒸煮液的温度响应见图 4,普通定值反馈控制后蒸煮液的温度响应见图 5。

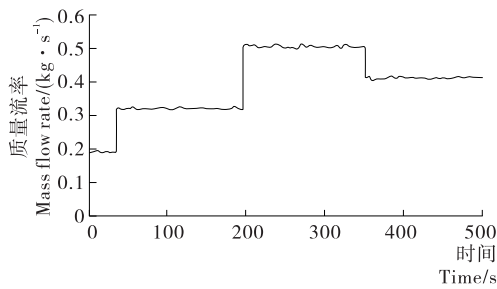


图 3 海参质量流率阶跃变化曲线

Figure 3 The step change curve of sea cucumber mass flow rate

海参质量流预先设定,按照扰动工况中最恶劣的阶跃变化模式变化,海参通过物流输送带输送,由图 3 可知,海参的质量流量流率在 35,195,350 s 发生阶跃变化,质量流率的阶跃变化依次为 0.190~0.320,0.320~0.500,0.500~0.410 kg/s。

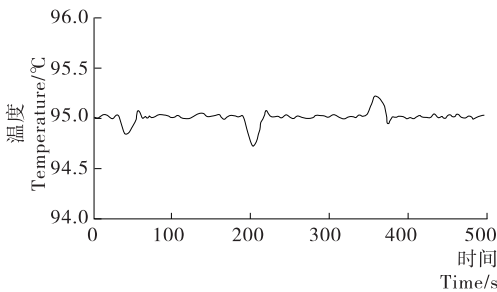


图 4 精确控制后蒸煮液的温度响应曲线

Figure 4 The cooking liquid temperature response curve by precise control

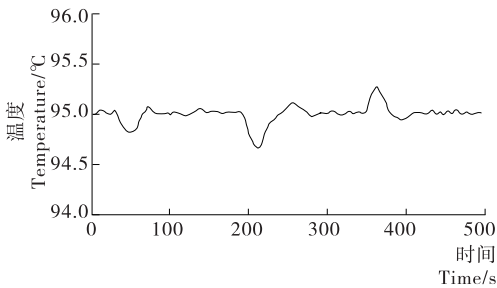


图 5 反馈控制后蒸煮液的温度响应曲线

Figure 5 The cooking liquid temperature response curve by feedback control

由图 4、5 可知,在精确控制下,第 1 次阶跃的控制过程最大偏差为 0.18 $^{\circ}C$,过度时间为 24 s;第 2 次阶跃的控制过程最大偏差为 0.30 $^{\circ}C$,过度时间为 29 s;第 3 次阶跃的控制过程最大偏差为 0.21 $^{\circ}C$,过度时间为 25 s。在普通反馈控制下,第 1 次阶跃的控制过程最大偏差为 0.20 $^{\circ}C$,过度时间为 40 s;第 2 次阶跃的控制过程最大偏差为 0.35 $^{\circ}C$,过度时间为 81 s;第 3 次阶跃的控制过程最大偏差为 0.26 $^{\circ}C$,过度时间为 66 s。显然精确控制的效果优于普通反馈控制。

从温度响应曲线可知,当温度参数发生扰动时,旁路调节精确数学控制器测得相应的扰动参数,由控制器实时动态计算旁路调节开度,通过执行机构快速蒸汽三通阀开度,使得温度响应具有较小的波动,且调节时间相对较短。本研究设计的连续式海参蒸煮设备旁路调节精确数学控制系统均

能在较短的时间内实现蒸煮液的温度精确控制,保证海参蒸煮过程的温度稳定,取得了较好的控制效果。

4 旁路调节精确控制对海参蒸煮品质的影响

海参蒸煮的品质与蒸煮时间和蒸煮温度密切相关,蒸煮时间由蒸煮输送带控制,其控制过程简单易实现,蒸煮温度的稳定性和准确性是保证取得较优品质海参的关键,通过对比蒸汽旁路精确控制和蒸汽定值控制下海参的硬度和弹性,并进行品质分析^[13],具体研究旁路调节精确控制对海参品质的影响。

将海参的硬度和弹性作为质构测试的两个指标,研究两种温度控制情形下海参的品质,利用质构仪测量海参样品品质,取 10 个样品在 TA-XT2 质构仪上进行测试,采用 P/0.5 探头,测前、测试、测后速度分别为 3,1,5 mm/s,变形率为 50%。海参硬度的定义为第 1 次压缩时的最大峰值;海参弹性的定义为第 2 次压缩中所检测到的海参恢复高度和第 1 次的压缩变形量的比值^[14]。随机选取海参样品,每个海参样品测定重复 3 次取平均值。样品编号从 1 至 10,不同控制方式下海参的弹性见图 6,不同控制方式下海参的硬度见图 7。

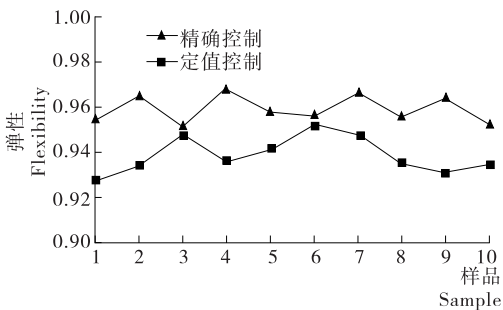


图 6 不同控制方式下海参的弹性

Figure 6 Sea cucumber's flexibility under different control modes

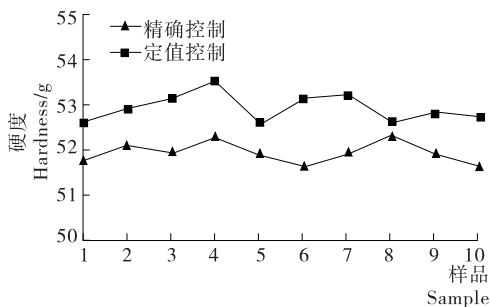


图 7 不同控制方式下海参的硬度

Figure 7 Sea cucumber's hardness under different control modes

由图 6、7 可知:精确控制下海参样品的平均弹性为 0.959、定值控制下海参样品的平均弹性为 0.939,精确控制下样品的平均弹性优于定值控制。精确控制下海参样品的平均硬度为 51.93 g、定值控制下海参样品的平均硬度为 52.91 g,精确控制下样品的平均硬度优于定值控制。

相对于旁路调节精确控制,定值控制在温度控制过程中波动较大,使得蒸煮后海参的品质差异比较大,海参品质总

体略逊于旁路调节精确控制。品质分析研究表明:在旁路调节精确控制下海参可获得较高的弹性,较低的硬度,说明此时海参的口感较好,不仅保持了易咀嚼性,还保持了较好的弹性,符合人们对食用海参要求。因此在旁路调节精确控制下海参的品质能够得到保证,说明旁路调节精确控制应用在海参蒸煮设备上切实有效的。

5 结论

(1) 当扰动发生后,旁路调节精确控制器测得相应的扰动参数,由控制器实时动态计算出旁路开度,通过执行机构快速调节蒸汽比例三通调节阀的开度,控制温度的变化,与普通反馈控制相比其调节时间较短,能够在较短的时间内控制温度的稳定,可获得较好的控制效果;

(2) 相对于旁路调节精确控制,定值控制在温度控制过程中波动较大,使得蒸煮后海参的品质差异比较大,海参品质总体略逊于旁路调节精确控制。品质分析研究表明:在旁路调节精确控制下海参可获得较高的弹性,较低的硬度,验证了旁路调节精确控制应用在海参蒸煮设备上切实有效的。

参考文献

- 孙显武. 刺参的加工技术[J]. 中国水产, 2002(6): 71~72.
- 许学勤. 食品工厂机械与设备[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2008.
- 徐文达. 水产品加工机械与设备[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- 孙妍, 薛长湖, 齐祥明, 等. 干燥前预处理对海参干燥过程及产品品质的影响[J]. 中国海洋大学学报, 2006, 36(sup. 2): 57~61.
- 徐文其, 蔡淑君, 沈建. 一种鲜活海参连续式蒸煮生产工艺及其设备的研究[J]. 食品科技, 2011, 36(1): 108~111.
- 倪锦, 崔国民, 姜慧, 等. 换热网络的柔性识别及基于旁路调节的运行优化[J]. 化工进展, 2010(1): 17~24.
- Strizhak P A. Numerical estimation of the influence of natural convection in liquid on the conditions of ignition by a local heat source[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2011, 20(2): 211~216.
- 胡爱凤. 无吸液芯径向热管换热分析及换热系数计算[J]. 科技资讯, 2008(20): 5~6.
- Koichi Inoue, Issaku Fujita, Kotaro Machii, et al. Experimental study of condensation heat transfer on tube bundles in large power plant condensers[J]. Journal of Energy and Power Engineering, 2014(8): 920~928.
- 刘晓华, 李维仲, 赵宗昌, 等. 水平管外蒸气轴向流动凝结传热理论与实验研究[J]. 大连理工大学学报, 2002, 42(2): 185~189.
- 刘晓华, 李维仲, 崔峨. 水平管外轴向对流凝结强化传热的研究[J]. 大连理工大学学报, 1998, 38(3): 286~289.
- 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 第四版. 北京: 教育出版社, 2006.
- 赵火英, 袁陆峰. 海参过热蒸汽真空干燥装置的设计与试验[J]. 食品与机械, 2012, 28(6): 190~192.
- 张慊. 海参微波一冻干联合干燥工艺与机理研究[D]. 无锡: 江南大学, 2009.