

啤酒巴氏杀菌过程的 CFD 数值分析

CFD numerical analysis of beer pasteurization

洪晓敏 许 菁

HONG Xiao-min XU Qiang

(南京林业大学机械电子工程学院, 江苏 南京 210037)

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing, Jiangsu 210037, China)

摘要:以瓶装啤酒为研究对象,建立巴氏杀菌过程的 CFD 数值模型,基于 Fluent 对热传递过程进行数值分析,建立固液耦合的复合共轭传热系统,得到完整受热周期中瓶内啤酒温度场变化情况;通过 CFD 数值分析,得到 I~XI 温区的变温过程,在总生产能力为 3.6 万瓶/h 的工况下,设计总过程时间为 60 min,保温时间为 11 min,该条件下啤酒出口温度为 30 °C (≤ 35 °C),出酒温度明显降低,有利于在保质度的同时提高啤酒新鲜度,达到了啤酒生产的 PU 值标准;最后通过实验验证了提出的 11 温区杀菌过程数值模型的正确性,为生产工艺参数提供了数据依据。

关键词:巴氏杀菌法;喷淋热交换;数值分析;CFD

Abstract: A CFD numerical model was established to simulate pasteurization process of beer in glass bottle. The solid-liquid coupling complex conjugate heat transfer system was established and the change of the temperature field in the complete heating cycle of the beer in the bottle was got based on Fluent. The parameters of pasteurization process was designed under the working condition that the production capacity was 36 000 bottle/h. It has been shown that the total time of process was 60 minutes and the soaking time was 11 minutes. Through the CFD numerical analysis, the change of the temperature of the eleven temperature zone was got. The outlet temperature of the beer is 30 °C, which was significantly smaller than 35 °C and up to the standard of PU in the beer production process. It was validated that the numerical model of eleven temperature zone was correct through the experiment and it provides a data basis for the parameters of the production process.

Keywords: pasteurization; spray heat exchange; numerical analysis; CFD

巴氏杀菌法可以解决啤酒变酸的问题,是啤酒包装生产工艺中至关重要的一环。巴斯德杀菌法(Pasteurization,简称巴氏杀菌法)已由法国生物学家巴斯德(Pasteur)于 1860 年通过试验证明:食品在加工中经过低温加热并维持一定时间可使微生物致死,同时能保证营养和口味不变^[1-2]。理论上,啤酒的 PU 值一般要控制在 16~35,才可以达到有效杀菌的效果^[3]。由式(1)可知,温度的变化引起杀菌效果的变化非常明显。

$$PU = T \times 1.393^{(t-60)} \quad (1)$$

式中:

PU——巴氏灭菌单位,在 60 °C 下经历 1 min 所引起的灭菌效应为一个巴氏杀菌单位;

T——杀菌时间, min;

t——啤酒被加热温度, °C。

但是瓶装啤酒在杀菌过程中随着温度的升高会产生自然对流现象,使得传热过程中温度、流体的流动情况变得极其复杂^[4]。

CFD 相对于高成本试验,因其低花费、高可靠性,在改进现有工艺、设计上有明显的优势,研究人员可以修改多个参数,获得不同试验结果,这往往是单一试验所无法完成的^[5]。

近年来,运用计算流体力学模拟食品热杀菌过程已经十分广泛,通过 CFD 模型可以计算出温度、流速、最慢热区的变化^[6]。但是目前大部分研究都是针对单一时间段内确定温度下的巴氏杀菌过程数值模拟^[7],尚缺乏对于完整变温系统的温度场的研究。

本试验拟采用 ANSYS Fluent,分析完整受热周期中瓶装啤酒的温度场变化,并利用 CFD 数值模型,设计 11 温区的变温参数,为啤酒杀菌工艺提供参考。

1 隧道式巴氏杀菌过程

目前中国大部分啤酒厂家使用的杀菌设备都采用隧道式喷淋系统^[8],该类系统通过热喷淋水将需要杀菌的啤酒加热到所要求的杀菌温度后,保温一定时间来杀灭液体中的微生物。本系统通过 11 个温区(包括预热区、高温杀菌区及冷却区)来控制啤酒的温度,完成整个杀菌处理,见图 1。

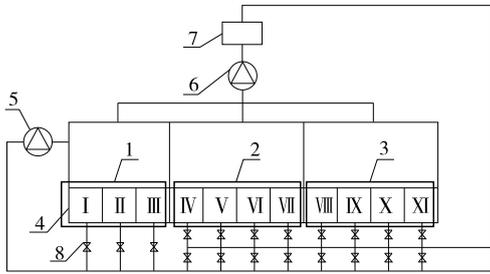
基金项目:2013 年南京林业大学研究生教育教学改革研究与实践课题(编号:ZD201301)

作者简介:洪晓敏,男,南京林业大学在读硕士研究生。

通讯作者:许菁(1971-),女,南京林业大学副教授,硕士。

E-mail: yecoolxu@hotmail.com

收稿日期:2015-10-11



1. 冷缓冲槽 2. 热缓冲槽 3. 预缓冲槽 4. 小水箱 5. 冷水泵
6. 热水泵 7. 换热器 8. 角座阀

图1 巴氏杀菌系统结构图

Figure 1 Pasteurization system structure

该杀菌喷淋系统具体工作流程:首先在预热区,加热到一定温度的水喷淋到温度较低的啤酒上,通过热交换,将温度较低的啤酒加热,经过热交换后喷淋水的温度降低,然后水泵会将这部分低温水输送到杀菌机的冷却区,用来冷却已经被杀菌处理过的较热的啤酒。经过热交换,热啤酒的温度降低,而喷淋水的温度升高,再把这部分温度高的水输送到预热区,这样构成一个加热冷却循环。

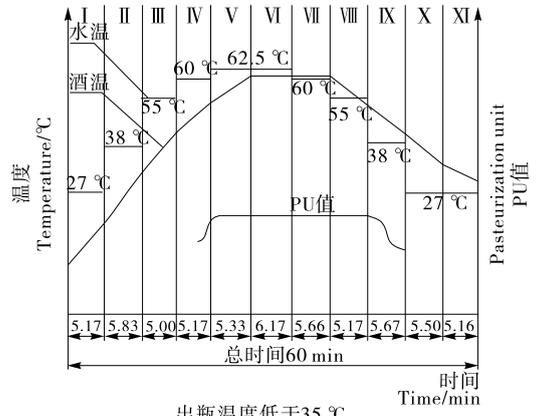
杀菌机各温区的喷淋水温度是按级递增(或递减)的,考虑到玻璃瓶装啤酒的特殊要求,各级喷淋水温与前级瓶子的温差不应过大,瓶子升(降)温也不应过快,以免造成瓶损酒耗。虽然按啤酒瓶的质量要求,其耐热急变温差不少于39℃(GB 4544—1996),但考虑到温度控制的误差,酒瓶受热内压增加,壁厚不均匀,酒瓶反复循环使用等因素,最大温差不应超过35℃,实际多取30℃以下。升(降)速度不大于4℃/min,控制在2~3℃/min为宜。每个温区的喷淋时间可由式(2)算出。3.6万瓶/h杀菌系统的11温区变温曲线见图2。

$$t = \frac{L}{V} \quad (2)$$

式中:

t ——喷淋时间, min;

L ——温区的长度(每个温区的长度不一致), mm;



出瓶温度低于35℃

图2 喷淋水在各温区的变温曲线图

Figure 2 Spray water temperature curve in various temperature zone

V ——链网运行速度, mm/min。

2 瓶装啤酒的CFD数值模型

2.1 物理模型的建立

采用市场上使用的500 mL啤酒瓶,直径70 mm,内径64 mm,高度236 mm,啤酒液面高度200 mm,啤酒瓶总重924 g,其中瓶子重416 g,啤酒508 g。

三维模型利用ANSYS workbench DM模块建立,包括酒液、酒瓶、空气和瓶盖等部分,见图3。模型各部分的物理特性参数^[9],见表1。

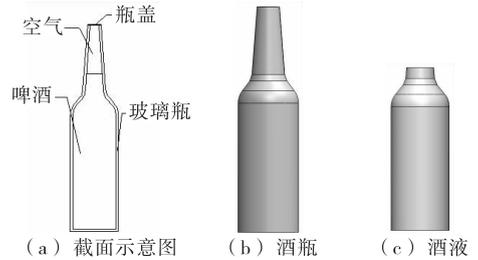


图3 三维模型

Figure 3 Three-dimensional model

表1 啤酒、空气、啤酒瓶、瓶盖的物理特性参数

Table 1 Physical properties of beer, air, glass and cap

物质	动力黏度 $\mu /$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)	常压热容 $c /$ ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	导热系数 $\lambda /$ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	密度 $\rho /$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
啤酒	1.4×10^{-3}	4 000	0.5	1.030×10^3
空气	1.7×10^{-5}	1 005	3.0×10^{-3}	1.293
啤酒瓶	—	750	7.5×10^{-1}	2.400×10^3
瓶盖	—	903	237.0	2.702

2.2 传热过程模型的建立

在对热喷淋水与啤酒的传热过程分析中根据实际情况可以提出几点假设:①同一温区中喷淋水的终温相等;②喷淋水自上而下以恒温水膜形式沿酒瓶外表面流动^[10]。

根据实际工况,提出传热过程模型:啤酒在经过各个温区时,具有一定温度的喷淋水,以一定速度沿瓶壁流下,对瓶内啤酒进行加热。该传热过程包括酒瓶内外流体的对流换

热和酒瓶的导热,同时酒瓶内外流体之间的热量交换是耦合在一起的。本试验基于ANSYS软件建立了固体内部导热与流体热对流的复合系统,即共轭传热系统,通过数值模拟,对瓶内酒液的温度分布和相关参数进行分析。

2.3 网格的划分

ANSYS workbench 网格划分平台提供两类不同的网格文件,包括有限元网格和计算流体力学网格,本试验采用计

算流体力学(CFD)网格,用于 ANSYS Fluent 进行计算。由于水膜厚度比较小,所以用默认的网格尺寸进行划分,会导致网格的纵横比较大,在计算时会出错或者难以得到收敛值。因此在划分网格时,将网格相关度“relevance”的值调至 100,从网格控制菜单选择“sizing”,在“Detail of sizing”窗口将“Element Sizing”值变为 2 mm,选择 Automatic Method,进行自动网格划分。整个模型中共有节点 176 133 个,单元 291 884 个。

2.4 瓶外喷淋水的边界流动计算

2.4.1 喷淋水膜厚度 对单个瓶子而言,喷淋量按式(3)计算:

$$W' = \frac{W}{A} \cdot A' = \frac{W}{L \cdot S} \cdot d^2 \quad (3)$$

式中:

W' —— 单个瓶子喷淋量, m^3/h ;

W —— 水泵流量, m^3/h ;

A —— 温区面积, m^2 ;

A' —— 每个瓶子在链道上占据的面积, m^2 ;

L —— 温区长度, m ;

S —— 温区宽度, m ;

d —— 酒瓶的直径, m 。

由此计算出该喷淋量下形成的喷淋水膜的厚度约为 1 mm。

2.4.2 喷淋水流速 每个喷淋孔得到的流量按式(4)计算:

$$W'' = \frac{W}{N} \quad (4)$$

式中:

W'' —— 每个喷淋孔得到的流量, m^3/h ;

N —— 喷淋孔的个数。

每个小孔的出口流速按式(5)计算:

$$V = \frac{W''}{3\ 600 \cdot A''} \quad (5)$$

式中:

V —— 每个小孔的出口流速, m/s ;

A'' —— 喷淋孔的面积, m^2 。

2.4.3 湍流参数 喷淋水与酒瓶换热的过程中,其流动状态用雷诺数来表征:

$$Re = \frac{V \cdot L'}{\mu} \quad (6)$$

式中:

Re —— 雷诺数;

V —— 喷淋水流速, m/s ;

L' —— 特征长度,取酒瓶高度 267 mm;

μ —— 水的运动黏度, m^2/s 。

由雷诺系数判断,喷淋水在沿平壁流下的过程中属于湍

流,在后续数值仿真中也采用了湍流模型来进行模拟计算。在流体力学理论中,湍流强度、湍流动能、湍流耗散率是用来衡量湍流的重要指标,其相关计算:

湍流强度按式(7)计算:

$$I = 0.16 \cdot Re^{-1/3} \quad (7)$$

式中:

I —— 湍流强度;

Re —— 雷诺数;

湍流动能按式(8)计算:

$$K = \frac{3}{2} (V \cdot I)^2 \quad (8)$$

式中:

K —— 湍流动能, m^2/s^2 ;

V —— 喷淋水流速, m/s ;

I —— 湍流强度。

湍流耗散率按式(9)计算:

$$\epsilon = C_{\mu}^{3/4} \frac{K^{3/2}}{L''} \quad (9)$$

式中:

ϵ —— 湍流耗散率, m^2/s^3 ;

C_{μ} —— 湍流模型中的经验常数,取 0.09;

L'' —— 长度尺寸,等于 0.4 倍的边界层厚度, m ;

K —— 湍流动能, m^2/s^2 。

以 I 温区为例,计算所需的相关参数见表 2。

2.5 Fluent 求解设置

该数值模拟涉及时间为瞬态分析,Time 选项选择 Transient;打开能量方程,湍流粘性采用 $K-\epsilon$ 湍流模型,近壁面处理,采用标准壁面函数;给定模型中各部分的物理参数,定义入口为速度入口,给定速度、温度和相应的湍流条件,湍流定义方法则采用湍流动能和湍流耗散率,出口定义为压力出口。

对于流固耦合传热,Fluent 在计算时会在喷淋水和酒瓶外壁的接触面,酒液和酒瓶内壁的接触面上生成两个面,分别是 wall 和 wall-shadow;同时在处理酒瓶内空气和啤酒的接触面时,需在边界条件的设定中将它们均设置成耦合面(coupled),从而热量在这些接触面上完成耦合传递;求解方式采用隐式求解,压力和速度耦合采用 SIMPLE 算法,动量、动能和湍流参数求解采用二阶迎风格式;亚松弛因子按默认设置。

3 结果与分析

3.1 瓶装啤酒内的温度变化

杀菌机各温区的喷淋温度根据图 2 的变温曲线给出,因为该瓶装啤酒是共轭传热系统,其温度场的变化非常复杂。以第 I 温区和第 IV 温区为例,这两个温区分别属于预热温区

表 2 I 温区计算参数表

Table 2 Calculation parameters of first temperature regions

温区的长度 L /	温区的宽度 S /	酒瓶直径 d /	酒液高度 h /	水泵流量 W /	链网速度/
mm	mm	mm	mm	($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)
1 720	3 080	70	200	160	319

和杀菌温区,对第 I 温区,取进入该温区后加热 120, 220, 320 s 时的温度分布情况进行观察分析;而对于第 IV 温区,则取进入该温区后加热 110, 210, 310 s 时的温度分布情况进行观察分析。两个温区各个时刻的温度分布云图见图 4、5。

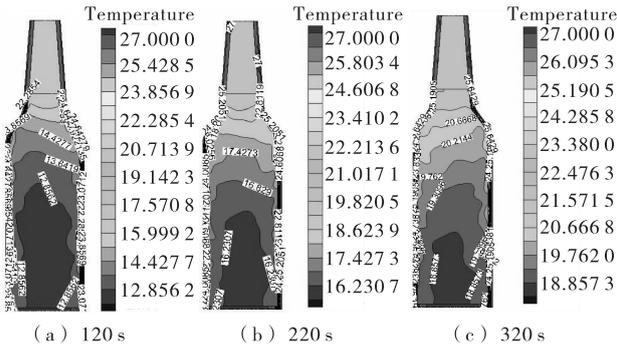


图 4 第 I 温区各时刻的温度分布云图

Figure 4 The temperature field cloud picture of first temperature zone

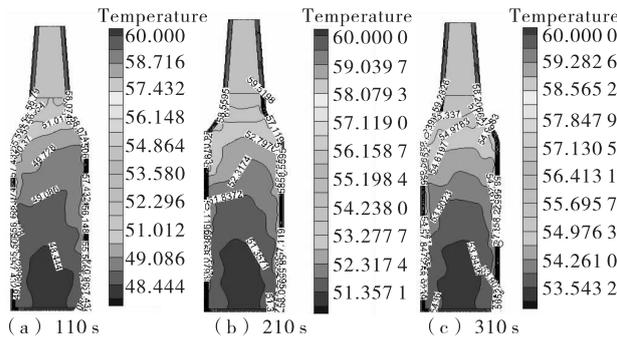


图 5 第 IV 温区各时刻的温度分布云图

Figure 5 The temperature field cloud picture of fourth temperature zone

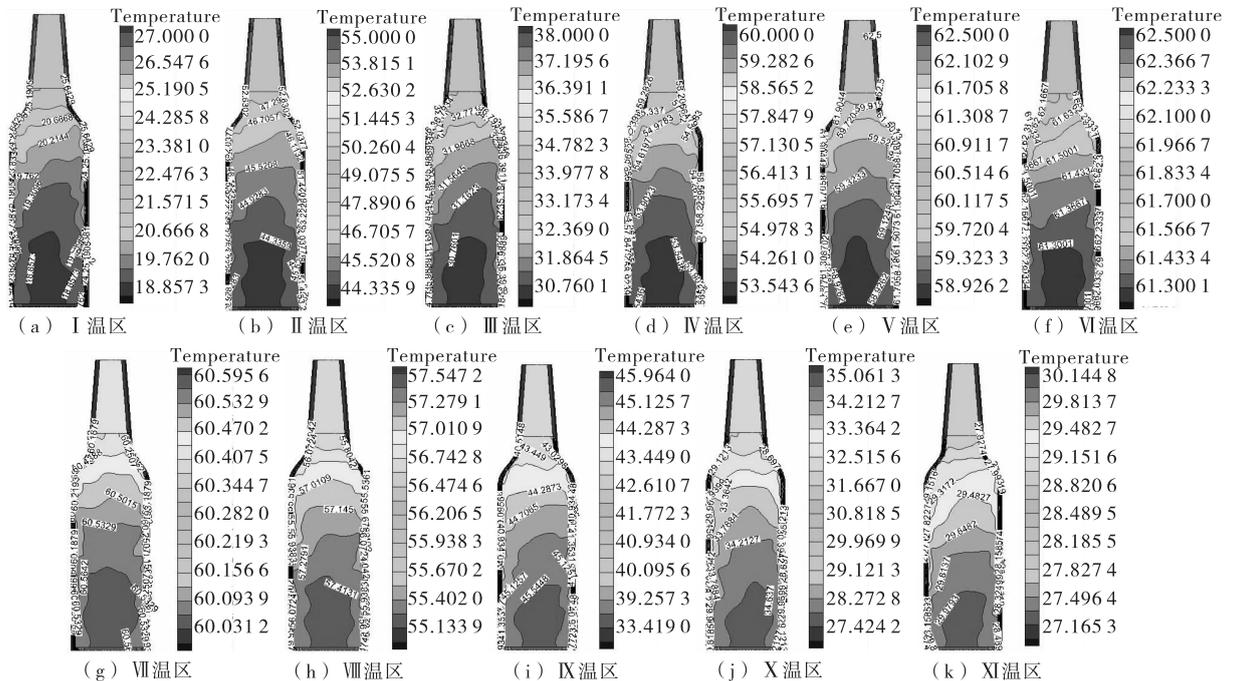


图 6 各温区的出口温度云图

Figure 6 The outlet temperature field cloud pictures of every temperature zone

图 4、5 显示了在加热过程中玻璃瓶内啤酒的温度分布情况。由图 4 可知,在预热温区,瓶中啤酒因受热产生的对流现象明显,而且酒液上部受热较快,中下部受热较慢。随着加热时间的不断增加,酒温也不断上升,此时啤酒的黏度降低,热对流逐渐加强,酒液中下部开始受热,低温区的等温线也逐渐向下移动。由图 5 可知,瓶装啤酒经过预热区的逐渐加热,到达高温杀菌区,此时外部温度和瓶内啤酒的温差慢慢缩小,热对流趋于平缓,瓶内酒温等温线分布开始趋于一致。

3.2 变温杀菌系统出口温度变化

对每个温区出口啤酒温度的分布情况进行研究,能够有效控制整个杀菌过程的参数,对于获得较低的最终出口温度,维持的啤酒风味,减缓老化味的出现有重要意义。图 6 列出了啤酒每个温区的出口温度云图。由图 6 可知,啤酒的最终出口温度约为 30 °C,小于 35 °C,符合工艺要求。

3.3 PU 值分析

啤酒进行杀菌的目的是将瓶内残留的有害菌杀死,但是过度杀菌会影响酒的口感^[11]。由于 PU 值与杀菌温度呈指数关系,当温度每提高 7 °C,PU 值就增加 10 倍,杀菌时间可以缩短至 1/10。良好的杀菌过程要求精确控制巴氏杀菌单位,最佳的杀菌过程应当是:用最小的巴氏杀菌单位,最大程度地保持产品的质量和新鲜程度^[12]。

通过对变温系统数值模型中各个喷淋点对应的 PU 值进行数据整理,设计后各点的 PU 值曲线波动明显变小,变化平稳,这对啤酒口感的提高非常有利。

在生产上 PU 值一般控制在 15~35,能够保证有效的杀菌效果。总巴氏杀菌单位为所有取得的巴氏杀菌单位总和,包括加热、热保持和再冷期 3 个阶段。计算温度为 55 °C 以上的 PU 值,杀菌过程中温度随时间变化的曲线,见图 7。

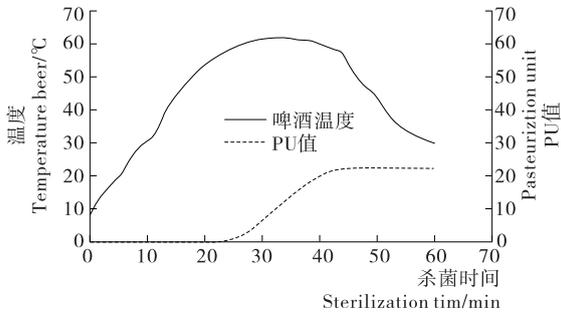


图 7 温度、PU 值随时间变化的曲线

Figure 7 The temperature and PU curve values change over time

由分析实际工况以及数值模拟得到的温度值可知,啤酒在每个时刻的温度值都是变化的,所以无法直接将温度值 t 代入式(1)计算 PU 值。但观察式(1)发现,在温度一定时,PU 值与杀菌时间 T 成正比例关系,因此在计算时,可以通过分析各时刻的温度值,将整个杀菌时间划分成 n 段,取每段时间 T_i 内的平均温度值 \bar{t}_i 进行计算,由此可得杀菌过程中的总巴氏杀菌单位为 $PU = \sum_{i=1}^n T_i 1.393^{\bar{t}_i - 60}$, 根据该公式

表 3 每个温区出口的温度

Table 3 The outlet temperature of beer in every temperature zone °C

指标	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI
实测温度	18.83	33.97	44.92	54.86	59.30	61.00	60.50	57.17	43.43	34.5	32.79
模拟温度	19.98	32.72	47.88	55.97	60.09	61.18	59.63	58.57	41.63	32.19	29.65

5 结论

巴氏杀菌工艺的主要工艺参数为各温区喷淋水的温度、各温区的喷淋时间以及各温区喷淋水的流量。本试验的 CFD 数值模型,将以上主要参数联系在一起,建立了固液耦合的复合共轭传热系统,并基于 Fluent 对瓶装啤酒的巴氏杀菌过程进行了数值模拟及分析,通过数值模型,提出了 11 温区的变温过程,系统总生产能力为 3.6 万瓶/h、总过程时间为 60 min、保温时间为 11 min,整个杀菌过程 PU 值变化平稳,且啤酒出口温度为 30 °C,出酒温度明显降低(≤ 35 °C),并通过实验证明了该变温过程可以更好地达到啤酒保鲜和保质两方面的要求。在实际的杀菌工艺的改进中,由于试验成本高、耗时长等条件限制,无法对优化的工艺参数进行逐一的试验,而本试验提出的 CFD 数值模拟方法和变温过程,可为杀菌工艺的改进提供参考。

参考文献

- [1] 夏文水. 食品工艺学[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2011: 95-101.
- [2] 张国治. 软饮料加工机械[M]. 北京: 化工工业出版社, 2006: 40-55.
- [3] 周文玲, 刘安静. 基于巴氏杀菌法的隧道式杀菌机设计关键[J]. 液压与气压传动, 2008(4): 4-7.
- [4] Ghani A, Farid M M, Chen X D, et al. Numerical simulation of nat-

计算得到整个杀菌过程总 PU 值为 21.78, 在 15 到 35 范围之内,符合杀菌工艺要求。

4 实验验证

为了验证本试验设计的 11 温区变温系统参数的正确性,采用目前企业常用的随行温度记录器测量法进行对比验证实验。

在数值模型中,由各温区出口啤酒温度云图能看出,液面下 1/3 高度处的等温线分布范围最广,取其作为温度测量点,能够相对准确地得到啤酒的温度。在 Fluent 后处理时选取液面下 1/3 高度的中心点作为监测点,输出该点不同时刻的温度值,即为啤酒的温度值。

将随行温度记录器的温度计直接插入酒瓶内,然后将仪器连同被测酒瓶一起通过杀菌机,杀菌完毕,取出仪器。将数值模拟温度和实测温度进行对比,并列出了啤酒经过每个温区出口的温度,见表 3。

通过分析,由于数值模拟和测量存在误差,使得两组数据不一致,但在可接受的范围之内。说明该数值模型能够反映啤酒内部温度的变化,验证了本试验设计的变温系统参数的正确性。

ural convection heating of canned food by computational fluid dynamics[J]. Journal of Food Engineering, 1999, 41(1): 55-64.

- [5] 杜子峥, 谢晶, 朱进林. 低温恒温箱的非稳态数值模拟及验证[J]. 食品与机械, 2014, 30(5): 126-132, 172.
- [6] Kiziltas S, Erdogdu F, Palazoglu T K. Simulation of heat transfer for solid-liquid food mixtures in cans and model validation under pasteurization conditions[J]. Journal of Food Engineering, 2010, 97(4): 449-456.
- [7] 王亮, 于艳艳, 马晓彬, 等. 灌装啤酒与瓶装啤酒的巴氏杀菌过程数值模拟[J]. 食品与发酵工业, 2014, 40(4): 42.
- [8] 丁辉, 王崇正, 张娜. 杀菌机的技术改造降低了能耗[J]. 啤酒技术, 2010(5): 33-35.
- [9] Augusto P E D, Cristianini M. Numerical simulation of packed liquid food thermal process using computational fluid dynamics (CFD) [J]. International Journal of Food Engineering, 2011, 7(4): 1-22.
- [10] 胡世忠. 啤酒喷淋杀菌机设计中的几个问题[J]. 食品与发酵工业, 1976(5): 83-88.
- [11] 车晋, 李文静, 周明. 如何减少杀菌机各喷淋点的 PU 值差异[J]. 啤酒技术, 2006(1): 35-36.
- [12] 黄小杨. 隧道式巴氏杀菌机结构优化[J]. 轻工机械, 2008, 26(2): 96-98.