

热泵型间歇式巴氏杀菌机的设计与性能分析

Design and performance of heat pump intermittent pasteurization machine

陈东 李国盛 谢继红 时祥

CHEN Dong LI Guo-sheng XIE Ji-hong SHI Xiang

(天津科技大学机械工程学院, 天津 300222)

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

摘要:设计一种较适于工程应用的热泵型间歇式巴氏杀菌机,介绍其结构和工作过程,选择和设计杀菌罐、热水箱、冷水箱、热泵等关键部件,计算分析其工作周期、能耗等性能参数,并与普通间歇式巴氏杀菌机进行综合对比。结果表明,热泵型间歇式巴氏杀菌机的初投资与普通巴氏杀菌机相近,而电功率配置仅为其 1/4,能耗仅为其 1/5,且工作寿命长,安全性好,具有较大的综合优势。

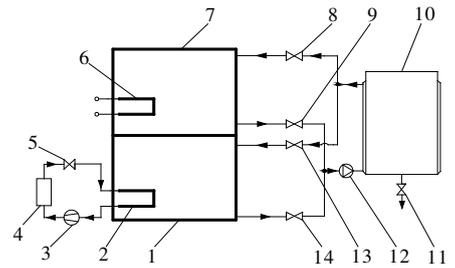
关键词:巴氏杀菌机;热泵;间歇式;设计;性能分析

Abstract: An easily-realized heat pump intermittent pasteurization machine was designed. Its structure and working processes were studied, and its key components were chosen or designed, including the bactericidal vessel, the hot water tank, the cool water tank and the heat pump. Based on detailed calculation of its working period and energy consumption, a comprehensive comparison was given between the heat pump intermittent pasteurization machine and normal pasteurization machine. The results show that the heat pump intermittent pasteurization machine has marked advantages: besides its long working life and high safety, the running power and energy consumption of the heat pump intermittent pasteurization machine is about 1/4 and 1/5 of those of the normal pasteurization machine with little difference between their initial cost.

Keywords: pasteurization machine; heat pump; intermittent; design; performance analysis

巴氏杀菌奶是中国奶产品的一个重要品种^[1-2],由于其口味好、营养丰富等特点,正越来越受到人们的欢迎^[3-4]。巴氏奶的供应多是以小区为单位,利用间歇式巴氏杀菌机就地生产和配送。目前市场上典型间歇式巴氏杀菌机(简称为普通巴氏杀菌机)的构成见图 1。

普通巴氏杀菌机由热水箱与电加热器、冷水箱与制冷机(包括压缩机、冷凝器、节流阀和蒸发器)、杀菌罐、水循环系



1. 冷水箱 2. 蒸发器 3. 压缩机 4. 冷凝器 5. 节流阀 6. 电加热器 7. 热水箱 8. 阀 1 9. 阀 2 10. 杀菌罐 11. 充装阀 12. 泵 13. 阀 3 14. 阀 4

图 1 普通巴氏杀菌机示意图

Figure 1 Schematic diagram of normal pasteurization machine

统(包括泵、阀 1~4)构成,其工作过程(以应用较广的 65 °C—30 min 巴氏杀菌工艺为例^[5])为:来自牧场的 4 °C 左右的牛奶先注入杀菌罐,泵和电加热器启动,阀 1、阀 2 打开,阀 3、阀 4 关闭,热水箱中 75 °C 左右的热水进入杀菌罐的夹套,直至将罐中的牛奶加热到 65 °C,泵和电加热器停止;之后,65 °C 热牛奶在杀菌罐中保温 30 min 以实现杀菌;再后,泵和制冷机运行,阀 3、阀 4 打开,阀 1、阀 2 关闭,冷水箱中 15 °C 左右的冷水进入夹套将 65 °C 杀菌后的热牛奶冷却至灌装温度(25 °C 以下)。

普通巴氏杀菌机由于牛奶加热所需热能均由电加热器提供,需配置的电功率较大(每 100 L 杀菌罐配置的电加热功率通常在 10 kW 以上),杀菌奶生产所需的电能总消耗也较大(每 100 L 奶通常需耗电 30 MJ 以上),且电加热管使用寿命较短,存在漏电等安全隐患。

热泵为高效制热和制冷装置^[6-5],其消耗少量电能可同时获取多倍冷能和热能,在干燥、蒸发、蒸馏等工艺过程中均有广泛应用,热泵也可较好地与巴氏杀菌过程的加热和冷却过程相结合而实现节能^{[7][8]19-22}。本研究给出了一种较适于工程应用的热泵型间歇式巴氏杀菌机,对其设计要点和综合性能进行了较系统的分析。

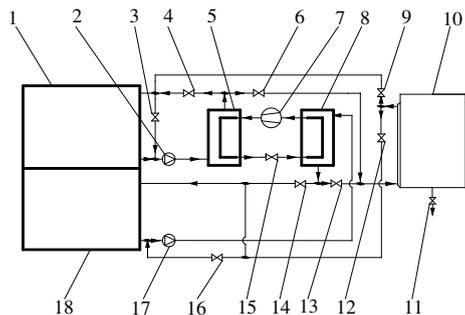
作者简介:陈东(1968—),男,天津科技大学教授,博士。

E-mail: chendong@tust.edu.cn

收稿日期:2015-11-30

1 热泵型间歇式巴氏杀菌机的构成和工作过程

热泵型间歇式巴氏杀菌机的构成见图2。



1. 热水箱 2. 热水泵 3. 阀7 4. 阀1 5. 冷凝器 6. 阀2 7. 压缩机 8. 蒸发器 9. 阀5 10. 杀菌机 11. 充装阀 12. 阀6 13. 阀4 14. 阀3 15. 节流阀 16. 阀8 17. 冷水泵 18. 冷水箱

图2 热泵型间歇式巴氏杀菌机示意图

Figure 2 Schematic diagram of heat pump intermittent pasteurization machine

热泵型间歇式巴氏杀菌机由热水箱、冷水箱、杀菌罐、热泵(包括压缩机、冷凝器、节流阀、蒸发器)、水循环系统(包括冷水泵、热水泵、阀1~8)构成,其工作过程为:来自牧场4℃的牛奶先加入杀菌罐,然后,热水泵启动,阀2、阀5打开(其他阀关闭),利用热水箱中的热水将牛奶预热到35℃左右;之后,热泵、热水箱、冷水泵运行,阀2、阀5、阀7、阀3打开(其他阀关闭),热水经热泵冷凝器加热后进入杀菌罐夹套将牛奶继续升温,同时热泵蒸发器将冷水箱中的水降温冷却;待牛奶升温至65℃时,热泵、热水泵和冷水泵停止,热牛奶在杀菌罐中保温杀菌30 min;冷水泵启动,阀4、阀6打开(其他阀关闭),先利用冷水箱中的冷水将杀菌后的热牛奶预冷到45℃左右;再启动热泵、热水泵、冷水泵,阀4、阀6、阀8打开(其他阀关闭),水经热泵蒸发器降温后进入杀菌罐夹套将牛奶继续冷却至灌装温度。

2 热泵型间歇式巴氏杀菌机的设计

以杀菌罐容量为150 L的热泵型间歇式巴氏杀菌机为例,其关键部件和工艺参数的确定:

(1) 杀菌罐内胆尺寸:近似认为杀菌罐为圆筒体,综合考虑传热、清洗和搅拌等因素,取杀菌罐长径比为 $D:H=1:1$,容积率 $C_{Rj}=0.7^{[8]24}$,则有:

$$\frac{\pi}{4} D^2 H = \frac{150}{C_{Rj}} \quad (1)$$

代入已知数据,得:

$$D=0.65 \text{ m}$$

$$H=0.65 \text{ m}$$

取夹套高度 H_{JT} 为杀菌罐内胆高度的80%,则有:

$$H_{JT}=0.8H=0.8 \times 0.65=0.52 \text{ m} \quad (2)$$

则筒体侧壁夹套换热面积 F_{JTC} 为:

$$F_{JTC}=\pi D H_{JT}=3.14 \times 0.65 \times 0.52=1.06 \text{ m}^2 \quad (3)$$

筒体底部夹套换热面积 F_{JTD} 为:

$$F_{JTD}=0.25\pi D^2=0.25 \times 3.14 \times 0.65^2=0.33 \text{ m}^2 \quad (4)$$

故夹套总换热面积 F_{JT} 为:

$$F_{JT}=F_{JTC}+F_{JTD}=1.06+0.33=1.39 \text{ m}^2 \quad (5)$$

(2) 热水箱和冷水箱尺寸:为减少加热和预冷却牛奶时水温的波动,在热泵型间歇式巴氏杀菌机中通常取热水箱和冷水箱容积为杀菌罐有效容积的4~6倍,此处取热水箱和冷水箱尺寸相同,均为长×宽×高=1.0 m×1.0 m×0.8 m,贮水量750 L,保温材料采用聚氨酯,保温层厚度0.08 m,与环境的冷热损失可小于100 W。

(3) 关键工艺参数:综合考虑热泵加热、热泵冷却、热水预热、冷水预冷等阶段的时间和能耗,取热水箱内热水初始设定温度 T_{HW1} 为51℃,预热牛奶后热水温度 T_{HW2} 变为45℃;冷水箱内冷水初始设定温度 T_{CW1} 为35℃,预冷牛奶后冷水温度 T_{CW2} 变为39.6℃。

(4) 热泵选型:在热泵型间歇式巴氏杀菌机中,热泵同时制取牛奶加热所需的热量和牛奶冷却所需的冷量,但牛奶加热过程对热泵容量的要求一般高于冷却过程,故可根据加热过程热负荷对热泵进行选型。

牛奶加热过程包括热水预热和热泵加热两个阶段,其总时间应不超过30 min。取每罐杀菌牛奶量 M_N 为150 kg,牛奶比热 C_N 为4.2 kJ/(kg·℃),加热前牛奶初温 T_{NC} 为4℃,预热后温度 T_{NY} 为35℃,杀菌罐夹套中循环水与罐内牛奶之间的传热系数 k_{NG} 为1.0 kW/(m²·℃),则牛奶预热阶段所需时间 t_{JRY} 为:

$$M_N C_N (T_{NY} - T_{NC}) = t_{JRY} k_{NG} F_{JT} \left(\frac{T_{HW1} + T_{HW2}}{2} - \frac{T_{NC} + T_{NY}}{2} \right) \quad (6)$$

代入已知数据:

$$150 \times 4.2 \times (35 - 4) = t_{JRY} \times 1 \times 1.39 \times \left(\frac{51 + 45}{2} - \frac{4 + 35}{2} \right)$$

解得: $t_{JRY}=493 \text{ s}=8.2 \text{ min}$

取热泵加热阶段的时间 t_{JRB} 为20 min,牛奶加热终温 T_{NZ} 为65℃,则热泵加热阶段的平均热负荷 Q_{JRB} 为:

$$Q_{JRB} = \frac{M_N C_N (T_{NZ} - T_{NY})}{t_{JRB}} = \frac{150 \times 4.2 \times (65 - 35)}{20 \times 60} = 15.75 \text{ kW} \quad (7)$$

设夹套中循环热水的终温为 T_{HW3} ,则有:

$$k_{NG} F_{JT} \left(\frac{T_{HW2} + T_{HW3}}{2} - \frac{T_{NY} + T_{NZ}}{2} \right) = Q_{JRB} \quad (8)$$

代入已知数据:

$$1 \times 1.39 \times \left(\frac{45 + T_{HW3}}{2} - \frac{35 + 65}{2} \right) = 15.75$$

解得: $T_{HW3}=78 \text{ }^\circ\text{C}$

取热泵蒸发器和冷凝器中热泵工质与水侧的平均传热温差 ΔT_{WR} 为8℃,则热泵的制热系数 COP_{HR} (制热系数为

热泵制热量与耗电量之比)约为:

$$COP_{HR} = \frac{0.5 \left(\frac{T_{HW2} + T_{HW3}}{2} + \Delta T_{WR} + 273 \right)}{\frac{T_{HW2} + T_{HW3}}{2} + 2\Delta T_{WR} - \frac{T_{CW1} + T_{CW2}}{2}} \quad (9)$$

代入已知数据:

$$COP_{HR} = \frac{0.5 \times \left(\frac{45 + 78}{2} + 8 + 273 \right)}{\frac{45 + 78}{2} + 2 \times 8 - \frac{39.6 + 35}{2}} = 4.2$$

热泵功率 P_{HP} 为:

$$P_{HP} = \frac{Q_{IRB}}{COP_{HR}} = \frac{15.75}{4.2} = 3.75 \text{ kW} \quad (10)$$

根据热水温度、冷水温度、热泵功率等参数可选取适宜的专用热泵^{[6] 426-438}。

3 热泵型间歇式巴氏杀菌机的性能分析

3.1 工作时间

(1) 牛奶加热时间:牛奶加热时间 t_{JR} 为热水预热时间 t_{JRY} 和热泵加热时间 t_{JRB} 之和,即:

$$t_{JR} = t_{JRY} + t_{JRB} = 8.2 + 20 = 28.2 \text{ min} \quad (11)$$

(2) 牛奶冷却时间:热泵加热阶段,冷水箱内冷水降温幅度计算式为:

$$\frac{T_{HW1} - T_{HW2}}{T_{CW2} - T_{CW1}} = \frac{COP_{HR}}{COP_{HR} - 1.0} \quad (12)$$

代入已知数据:

$$\frac{51 - 45}{T_{CW2} - 35} = \frac{4.2}{4.2 - 1.0}$$

解得 $T_{CW2} = 39.6 \text{ }^\circ\text{C}$,与设定值一致。

设预冷阶段后牛奶温度为 T_{NL1} ,则有:

$$T_{CW2} - T_{CW1} = 0.2(T_{NZ} - T_{NL1}) \quad (13)$$

代入已知数据:

$$39.6 - 35 = 0.2 \times (65 - T_{NL1})$$

解得: $T_{NL1} = 42 \text{ }^\circ\text{C}$

设预冷阶段时间为 t_{LQY} ,则有:

$$M_N C_N (T_{NZ} - T_{NL1}) = t_{LQY} k_{NG} F_{JT} \left(\frac{T_{NZ} + T_{NL1}}{2} - \frac{T_{CW1} + T_{CW2}}{2} \right) \quad (14)$$

代入已知数据:

$$150 \times 4.2 \times (65 - 42) = t_{LQY} \times 1 \times 1.39 \times \left(\frac{65 + 42}{2} - \frac{35 + 39.6}{2} \right)$$

解得: $t_{LQY} = 643 \text{ s} = 10.7 \text{ min}$

设热泵冷却阶段取热泵制热系数 COP_{HL} 为 4.0,则牛奶在热泵冷却结束时可达到的温度 T_{NL2} 满足:

$$\frac{COP_{HL}}{COP_L - 1.0} = \frac{T_{HW1} - T_{HW2}}{0.2(T_{NL1} - T_{NL2})} \quad (15)$$

代入已知数据:

$$\frac{4.0}{4.0 - 1.0} = \frac{51 - 45}{0.2 \times (42 - T_{NL2})}$$

解得: $T_{NL2} = 19.5 \text{ }^\circ\text{C}$

热泵冷却阶段结束时循环冷水的温度 T_{CW3} 满足:

$$P_{HP} (COP_{HL} - 1.0) = k_{NG} F_{JT} \left(\frac{T_{NL1} + T_{NL2}}{2} - \frac{T_{CW2} + T_{CW3}}{2} \right) \quad (16)$$

代入已知数据:

$$3.75 \times (4.0 - 1.0) = 1.0 \times 1.39 \times \left(\frac{42 + 19.5}{2} - \frac{39.6 + T_{CW3}}{2} \right)$$

解得: $T_{CW3} = 5.7 \text{ }^\circ\text{C}$

热泵冷却阶段热泵制热系数 COP_{HL} 为:

$$COP_{HL} = \frac{0.5 \left(\frac{T_{HW1} + T_{HW2}}{2} + \Delta T_{WR} + 273 \right)}{\frac{T_{HW1} + T_{HW2}}{2} + 2\Delta T_{WR} - \frac{T_{CW2} + T_{CW3}}{2}} =$$

$$\frac{0.5 \times \left(\frac{45 + 51}{2} + 8 + 273 \right)}{\frac{45 + 51}{2} + 2 \times 8 - \frac{39.6 + 5.7}{2}} = 4.0 \quad (17)$$

与假设值相符。

热泵冷却阶段时间 t_{LQB} 满足:

$$M_N C_N (T_{NL1} - T_{NL2}) = t_{LQB} P_{HP} (COP_{HL} - 1.0) \quad (18)$$

代入已知数据:

$$150 \times 4.2 \times (42 - 19.5) = t_{LQB} \times 3.75 \times (4.0 - 1.0)$$

解得: $t_{LQB} = 1260 \text{ s} = 21 \text{ min}$

牛奶冷却总时间 t_{LQ} 为:

$$t_{LQ} = t_{LQY} + t_{LQB} = 10.7 + 21 = 31.7 \text{ min} \quad (19)$$

考虑到巴氏杀菌过程中牛奶保温杀菌时间 t_{BW} 为 30 min,冷却后牛奶灌装时间 t_{GZ} 约 30 min,所以生产一罐巴氏奶所需的总时间 t_B 约为:

$$t_B = t_{JR} + t_{BW} + t_{LQ} + t_{GZ} = 28.2 + 30 + 31.7 + 30 = 119.9 \text{ min} \quad (20)$$

即生产巴氏奶的工作周期约为 2 h。

3.2 工作能耗

暂不考虑热水泵、冷水泵能耗及热水箱、冷水箱、杀菌罐的冷热损失,热泵型间歇式巴氏杀菌罐的工作能耗主要是热泵加热和热泵冷却两个阶段的热泵压缩机能耗。

(1) 热泵加热阶段能耗:

$$E_H = P_{HP} t_{JRB} = 3.75 \times \frac{20}{60} = 1.25 \text{ kW} \cdot \text{h} \quad (21)$$

(2) 热泵冷却阶段能耗:

$$E_C = P_{HP} t_{LQB} = 3.75 \times \frac{21}{60} = 1.31 \text{ kW} \cdot \text{h} \quad (22)$$

每生产一罐(150 L)巴氏奶的总能耗为:

$$E = E_H + E_C = 1.25 + 1.31 = 2.56 \text{ kW} \cdot \text{h} \quad (23)$$

3.3 与普通巴氏杀菌机的综合比较

以杀菌罐容量均为 150 L 和工作周期均为 2 h 为例,取每天生产 4 罐,每年 360 d,电费为 0.85 元/(kW·h),普通巴氏杀菌机中制冷机的制冷系数(制冷量与耗电量之比) COP_R 为 3.0,则热泵型间歇式巴氏杀菌机和普通巴氏杀菌机的综合比较见表 1。

(下转第 70 页)

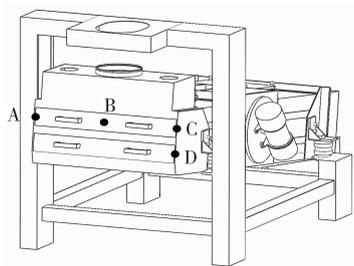


图7 筛面宽度方向测量点分布

Figure 7 Measurement points distribution along the screen width direction

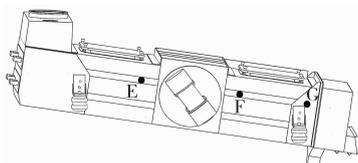


图8 筛面长度方向测量点分布

Figure 8 Measurement points distribution along the screen length direction

表3 各测量点的振幅

Table 3 Amplitude of each measurement point mm

测点	x向振幅	y向振幅	合成振幅
A	2.76	1.80	3.29
B	2.76	1.80	3.29
C	2.76	1.81	3.30
D	2.76	1.83	3.31
E	2.76	1.86	3.33
质心	2.77	1.85	3.33
F	2.75	1.89	3.34
G	2.76	1.82	3.31

(1) 振动体质心振幅和振动方向角的虚拟样机仿真结果与理论计算结果基本一致,且振动体质心的运动轨迹为一条直线。

(2) 激振合力通过振动体质心时,振动体各点振幅基本相同,振动体沿振动方向做往复直线运动而无绕质心转动。

(3) 根据处理物料的功能不同,若想振动体各点振幅有差异,激振合力方向需要偏离振动体质心,偏离距离、各点振幅分布规律与差别有待进一步研究。

参考文献

[1] 阮竞兰, 屈少敏. 往复振动筛运动参数的优化设计[J]. 中国粮油学报, 2001, 16(3): 60-62.

[2] 任宁, 李永祥, 周峰. TQLZ型直线振动筛的静态特性研究[J]. 食品与机械, 2014, 30(6): 92-94.

[3] 霍鹏飞, 杨洁明. 基于Pro/E和ADAMS的直线振动筛动力学仿真[J]. 煤矿机电, 2010, 16(3): 60-62.

[4] 胡继云, 张玺斌, 南瑞民. 惯性往复振动机械水平和铅垂支承刚度设计[J]. 中国粮油学报, 2009, 24(10): 120-123.

[5] 胡继云, 雷飞, 秦玉良. 惯性往复振动机械阻尼值设计的理论研究[J]. 河南工业大学学报: 自然科学版, 2010, 31(2): 19-23.

[6] 闻邦椿, 刘树英. 振动机械的理论及动态设计方法[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001: 132-170.

[7] 刘绍文. TQLZ振动分级筛振动设计[J]. 粮食与饲料工业, 1992(6): 15-17.

[8] 李伟, 王红中, 段永波, 等. 沥青混合料搅拌设备激振力偏移式振动筛的仿真分析[J]. 工程机械, 2012, 43(9): 24-28.

(上接第62页)

表1 热泵型间歇式巴氏杀菌机和普通巴氏杀菌机的综合比较

Table 1 Comparison between heat pump intermittent pasteurization machine and normal pasteurization machine

设备	电功率/ kW	水箱体积/L	初投资/ 万元	每罐耗电/ (kW·h)	每年电费/ 元	其他
普通巴氏杀菌机	15~20	300	2.3	13.33	16 316	1~3年需更换一次电加热管,有过热、漏电等安全隐患
热泵型间歇式巴氏杀菌机	3.5~4.0	750	2.8	2.56	3 133	热泵寿命可达15年,安全性好

4 结论

与采用电加热的普通巴氏杀菌机相比,热泵型间歇式巴氏杀菌机初投资增加不多,而电功率配置仅为为其1/4,耗电仅为为其1/5,且工作寿命长,安全性好,具有较大的综合优势。

进一步可对热泵型间歇式巴氏杀菌机的关键部件、部件间匹配及工艺参数进行系统优化,以期获得更好的综合性能。

参考文献

[1] 谷鸣, 恽海程. 国内液态奶制品的生产现状及对策[J]. 食品与机械, 2000(1): 40-41.

[2] 郭本恒. 中国乳品工业2003年现状分析及2004年展望[J]. 食品与机械, 2004(2): 8.

[3] 巫庆华, 龚广予. 巴氏杀菌牛乳与UHT牛乳的差别[J]. 乳业科学与技术, 2004(4): 149-153.

[4] 姚新奎, 车驰. 巴氏杀菌乳营养价值及发展前景[J]. 新疆畜牧业, 2010(6): 10-13.

[5] 顾佳升. 关于巴氏杀菌奶[J]. 乳业科学与技术, 2005(3): 97-99.

[6] 陈东, 谢继红. 热泵技术手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012.

[7] Ozyurt O, Comakli O, Yilmaz M, et al. Heat pump use in milk pasteurization: an energy analysis[J]. International Journal of Energy Research, 2004, 28(9): 833-846.

[8] 时祥. 热泵型巴氏杀菌系统的研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2015.