

智能化超高压食品灭菌设备*

易建勇¹ 张 燕¹ 廖小军¹ 王换玉² 胡小松¹

(1. 中国农业大学食品科学与营养工程学院, 北京 100083; 2. 包头科发高压科技有限责任公司, 包头 014030)

【摘要】 设计了一套智能化超高压食品加工设备,分析并确定了水介质增压器、单向阀、卸压阀、容器密封和温控系统的结构和相关参数。试验表明,整机结构合理、操作方便、性能稳定、安全可靠。利用该设备在 600 MPa 处理鲜榨桃汁 5 min,产品符合商业无菌要求。

关键词: 食品加工 灭菌 超高压设备

中图分类号: S226.9 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)11-0113-05

Automatic High Hydrostatic Pressure Equipment for Food Sterilization

Yi Jianyong¹ Zhang Yan¹ Liao Xiaojun¹ Wang Huanyu² Hu Xiaosong¹

(1. College of Food Science and Nutritional Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Baotou Kefa High Pressure Technology Limited Company, Baotou 014030, China)

Abstract

The design principle of automatic high hydrostatic pressure equipment, its structural characteristics and major technical difficulties were introduced. The structure and the optimum parameters of high pressure intensifier, check valve, relief valve, sealing system and temperature sensor system were studied and confirmed. The results of performance test prove that it has the advantages of reasonable structure, easy operation, steady performance and reliable security. Furthermore, several batches of fresh peach juice were processed by using this equipment, and the results showed that commercial sterilization was achieved after treated by HHP at 600 MPa for 5 min.

Key words Food processing, Sterilization, High hydrostatic pressure equipment

引言

超高压加工 (high pressure processing) 又称高静水压加工 (high hydrostatic pressure processing), 是一种新兴的非热杀菌技术, 即利用液体介质对食品在 100 MPa 以上压力进行处理, 延长食品保藏时间的一种物理加工方法^[1~3]。国外超高压食品加工已有了相当程度的发展^[4], 我国超高压技术研究和应用的时间较短、起点较低, 主要原因之一就是我国在智能化超高压设备的研制和生产方面的技术积累不足, 存在设备结构设计不合理、保压性能不理想、难以连续化处理及控制系统落后等诸多问题^[5~6]。

为此, 本文通过研究超高压水介质增压器、单向

阀、卸压阀、容器密封和温控系统等主要部件的结构和参数, 设计一套用于食品加工的智能化超高压设备。

1 主体结构和工作原理

1.1 主体结构

该智能化超高压设备的容器采用立式结构, 容积为 10 L, 框架为移动式结构。设备包括处理系统和增压系统两部分。处理系统由底座、框架滑轨、承压框架、容器支架、容器体、堵头等部件组成 (图 1)。设备配备有自主研制的水介质增压器、单向阀、卸压阀等关键零部件。设备元件间的机械动作利用滑轨和滑块定位, 避免了因对位不正而产生的机械碰撞。

收稿日期: 2011-01-25 修回日期: 2011-03-03

* 国家自然科学基金资助项目 (30972067) 和北京市科技计划资助项目 (D10110504660000)

作者简介: 易建勇, 博士生, 主要从事农产品加工技术与装备、果蔬采后贮藏研究, E-mail: yijianyong515@126.com

通讯作者: 胡小松, 教授, 博士生导师, 主要从事农产品加工技术与装备、食品产业发展战略研究, E-mail: huxiaos@263.net

通过伸缩油缸Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ分别驱动堵头、垫块和承压框架的移动和自动增压卸压,实现了设备运行过程的全自动化。承压框架为8层高强度钢板复合,钢板间通过液压压实后焊接,再使用螺栓错位连接。为了使设备的整体结构紧凑,增压器、换向阀、油泵、水泵、油箱和水箱等元件位于容器后方,组成增压系统,高压介质通过高压管路由下堵头进入容器。

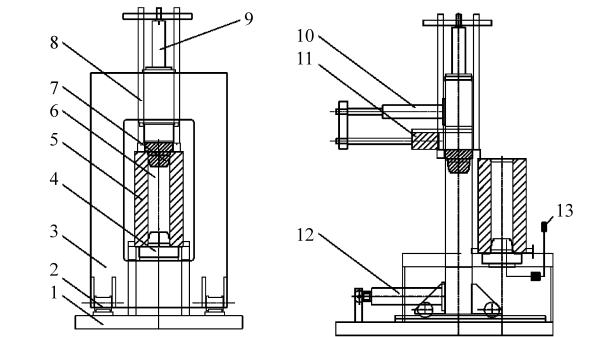


图1 智能化超高压设备示意图
Fig.1 Schematic drawing of the automatic high hydrostatic pressure equipment

1. 设备底座 2. 框架滑轨 3. 承压框架 4. 容器支架 5. 容器体 6. 容器腔 7. 上堵头 8. 连杆杆 9. 油缸Ⅰ 10. 油缸Ⅱ 11. 垫块 12. 油缸Ⅲ 13. 温控系统

1.2 工作过程

设备通过承压框架的移动实现容器中物料的进出。工作过程如下(图1):上堵头和垫块都处于拉出状态。承压框架在油缸Ⅲ的驱动下,沿框架滑轨移动,离开容器体,露出容器口部。待物料装好后,框架回到原位,与容器口部精确对准。油缸Ⅰ将上堵头推入容器腔。到达限位后,油缸Ⅱ将垫块插入承压框架和上堵头之间。自此机械动作完成,设备开始充水、增压。到达设定压力时,系统自动停止。保压结束后,泄压阀自动开启。泄压完成后,油缸Ⅱ将垫块拉出,油缸Ⅰ将上堵头拉出容器体,随后油缸Ⅲ将承压框架移出,露出容器口部。取出物料后即运行完一个周期,加入新的物料可开始下一个循环。

2 主要部件设计

2.1 超高压承压容器

超高压承压容器是超高压设备的主要部件,其材料的选择和耐压性能关系到设备的安全和使用寿命。对于承受98 MPa以上压力的承压容器,各国至今还没有完整的设计规范、制造准则、验收条款^[7],我国也尚未颁布正式的设计制造规范。超高压承压容器的设计对容器材质要求严格,结构必须保证强度的可靠性和密封的严密性。设计参照超高压容器设计规范WJ/Z246—89,同时符合美国ASME设计规范,对超高压设备所需要的整体锻造承压容器进

行设计、计算及安全性分析。

2.1.1 承压容器材料选择

承压容器和增压器筒体选PCrNi3MoVA高强度钢材(表1),经调质和电渣重熔精炼处理,提高晶粒细化和合金化的效果,大幅度降低钢中氢、氧、氮等气体杂质和磷、硫等有害元素,提高了钢的综合机械性能水平。

表1 超高压设备容器钢材成分
Tab.1 Steel composition of the high pressure chamber of the equipment

成分	质量分数/%	成分	质量分数/%
C	0.30 ~ 0.40	Mn	0.20 ~ 0.80
Cr	1.20 ~ 1.50	Si	0.10 ~ 0.35
Ni	3.00 ~ 3.50	S	≤0.015
Mo	0.35 ~ 0.45	P	≤0.015
V	0.10 ~ 0.20		

2.1.2 承压筒体主要技术参数

设计筒体内径 $d=150\text{ mm}$;外径 $D=458\text{ mm}$;长度 750 mm ;壁厚比 $K=3.055$ 。工作介质为水。工作压力 $p_w=700\text{ MPa}$;设计压力 $p=1.15p_w=805\text{ MPa}$;设计温度为室温;自增强压力 $p_A=1.25p_w=875\text{ MPa}$;材料机械性能 $\sigma_s=960\text{ MPa}$; $\sigma_b=1\,070\text{ MPa}$ 。本文设计的超高压设备工作压力达到700 MPa,但考虑到压力超过600 MPa后,单纯的水介质将结冰,需要采用丙二醇-水等混合介质作传压介质。因此,食品加工所采用的压力通常不超过600 MPa。

2.2 超高压水介质增压器

目前,超高压介质大多采用液压油,本文设计的智能化超高压设备主要用于食品加工。考虑到清洗方便和食品的安全性,需要以水为传压介质,这为增压器设计带来了困难。超高压增压系统主要包括一级增压泵组、二级增压器、水泵组、高压管等。一级增压泵组由主电动机驱动,将油介质往复压入二级增压器的低压腔内。水泵组将水介质充填到二级增压器的高压腔内,二级增压器低压腔内的活塞推动高压腔内的柱塞杆,使高压腔内的水介质通过连接有单向阀的管路被往复压入容器腔内。水介质增压器由高压缸压帽、高压缸压盖、衬套等部件组成(图2)。增压系统的增压比为25,油泵最高压力31.5 MPa,高压腔内水压理论上可达到787.5 MPa,满足设备工作压力的需求。工作过程为:油泵将液压油送入油缸Ⅰ,推动活塞带动柱塞杆向右运动,水泵同时向高压腔中充水。充水完成后,油缸Ⅱ内的油压增高,将高压腔内的水压缩为高压水,高压水推开单向阀阀芯,通过外侧输出单向阀和高压管道流

经三通阀,进入超高压容器。当活塞运动到最左端时,增压停止。至此完成一次增压循环,油缸 I 内油压升高,开始进入下一个冲程。

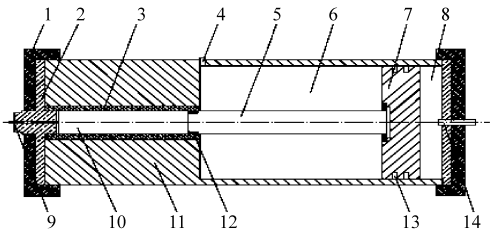


图 2 水介质增压器示意图

Fig. 2 Schematic drawing of high pressure intensifier

1. 高压缸压帽 2. 高压缸压盖 3. 衬套 4. 进口口 I 5. 柱塞杆 6. 油缸 I 7. 活塞 8. 油缸 II 9. 高压出水管 10. 高压腔 11. 增压器壁 12. 柱塞杆密封 13. “Y”型圈 14. 进口口 II

2.3 超高压单向阀

超高压单向阀控制液体只能向一个方向流动,使液体在容器腔内压力不断增大。单向阀材料的选择和设计必须防止传压介质的泄漏和击穿。单向阀设计如图 3 所示,主要包括高压管、两个压帽、止退母、阀体等。超高压设备工作时,液体由左至右通过单向阀。液体由左侧进入单向阀后,推动两个滚珠向右移动,使陶瓷滚珠与管内壁间出现孔隙,液体可以通过孔隙流至右侧。当左侧不再供液时,右侧压力使两个滚珠重新紧靠在左侧,使管路堵死,右侧的液体不能流回左侧。当左侧供液时,两滚珠又被顶起而使液体流过。这样循环往复,使右侧容器中的液体达到设备预设的压强。单向阀材料采用经过前期热处理和冷处理加工的高强度合金钢,可耐受 700 MPa 的压强。阀体内径较传统单向阀有了显著增加,增加了单位时间内通过单向阀的高压液体流量,加快了超高压设备的升压速度。在逆止阀结构中,采用了大、小两个陶瓷滚珠,具有更强的耐腐蚀能力和隔热性能,可耐受更高的压力和高酸碱环境。

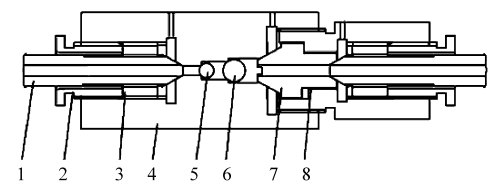


图 3 超高压单向阀示意图

Fig. 3 Schematic drawing of high pressure check valve

1. 高压管 2, 8. 压帽 3. 止退母 4. 阀体 5. 小滚珠 6. 大滚珠 7. 锥体

2.4 超高压卸压阀

卸压阀反复经受极端压力冲击,是超高压设备的易损件^[8]。超高压卸压阀结构如图 4 所示,包括阀体和油缸体两部分。活塞置于油缸体内,活塞与顶杆连接,顶杆上端连接阀针。阀针的最前端是锥

体,对高压腔连接管的管口起到很好的密封作用。在油缸体顶端,压盖与油缸体通过螺栓连接。两个空腔内的油是连通的,通过控制两个空腔内油量分配的比例来调节活塞的位置。活塞的左右移动带动顶杆和阀针的移动,从而控制阀体开闭。其工作过程为:增压时,通过控制使液压油进入空腔,推动活塞向左移动,使阀针前端的锥体封住容器腔连接管的管口;卸压时,通过控制使液压油进入空腔,推动活塞向右移动,使阀针前端的锥体离开容器腔连接管的管口,高压介质立即从压力舱连接管经两侧的卸压管排出。此外,在保证卸压阀强度的同时,按流量要求将卸压管路的孔径增大到 1.6 ~ 5 mm,以加大卸压阀的流量,提高卸压速度,如 600 MPa 卸压仅需 3 ~ 4 s。采用油作为介质控制阀门可以更加平稳,油缸体两空腔进入或排除少量的油就可以带动活塞的移动,实现精确地控制阀门的开闭。

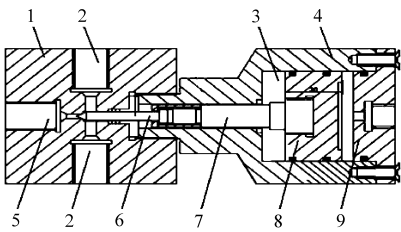


图 4 超高压卸压阀示意图

Fig. 4 Schematic drawing of high pressure relief valve

1. 四通阀块 2. 卸压管 3. 油缸 4. 阀体 5. 压力舱连接管 6. 阀针 7. 顶杆 8. 活塞 9. 压盖

2.5 容器堵头密封系统

承压容器密封装置一般置于堵头上,但食品用超高压容器容量大、压力高、口径大,再加上食品加工过程中不可避免的频繁启闭,易使外置式密封组件变形或磨损,而从堵头上脱落,使用寿命缩短。如果材料选择不当,将难以承受高压。针对这些问题,本文研制的密封组件固定在容器壁上。如图 5 所示,通过液压推动堵头逐渐进入容器内部而使堵头、筒体与密封套装调整垫、“O”形圈、“□”形圈等吻合,达到一重密封;堵头末端处有一段为斜面,该斜面与密封套装的三角形合金密封圈吻合,由于继续施加外力,当斜面与密封套装的三角形合金密封圈紧密接合后,达到效果更为显著的二重密封。在组装时,预先将密封组合套装安装在超高压筒体的内槽内,不需要结合面间非常牢固的连接,堵头通过液压推动进入容器腔后,不断增加的压力使得密封系统的紧密程度提高,实现超高压承压容器的密封。堵头的斜面和柱面应具有一定的平面度和表面粗糙度,以保证与密封套装之间的可靠贴合。这种密封装置密封效果优良,不仅使超高压容器在承受

600 MPa水压的情况下实现可靠密封,还可以大大减少密封装置的体积和质量。此外,密封组合更换简单,维护成本较低。经计算机记录,设备运行 500 次以后,密封核心元件仍然无明显形变或磨损。

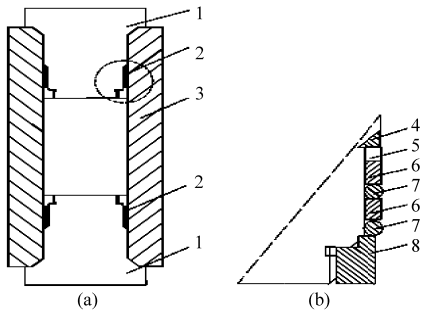


图 5 超高压设备容器堵头密封系统

Fig. 5 Schematic drawing of the high pressure vessel plug sealing system
(a) 结构示意图 (b) 密封装置放大图
1. 容器堵头 2. 密封装置 3. 容器筒体 4. 三角形合金密封圈
5. “□”形圈 6. 调整垫 7. “O”形圈 8. 密封压盖

2.6 温控系统

温控系统主要监测载压状态下容器体内部温度的变化。监测极端压力下容器腔内部温度的变化,需要同时解决测温元件的耐压问题和进入容器后的密封问题。本文选取 OMEGA 公司的 K 型热电偶丝 ($\Phi 0.5\text{ mm}$, US Pat. 3914008),其表面包裹有高韧性合金钢,能耐受高压以及填料固化时的高温。密封系统主要包括 K 型热电偶丝、密封填料、密封堵头和填料压帽(图 6)。K 型热电偶测温丝穿过密封堵头中心的孔洞($\Phi 1\text{ mm}$),由容器下堵头进入容器腔。密封堵头通过末端的锥面与容器下堵头凹面的紧闭实现密封。密封系统的制作过程是先将 K 型热电偶丝穿过密封堵头后,用融化的环氧树脂浇注,完成后迅速拧上填料堵头,自然冷却。环氧树脂起到主要的密封作用,填料压帽用于紧固填料,防止击穿。经温控系统监测,设备升至 600 MPa,容器内水温约上升 15°C ,在随后的保压过程中,容器内水温随时间的延长缓慢下降。卸压时介质温度的下降值与增压时温度的上升值相等。卸压后容器中介质温度比增压前的初始温度低,这个温差恰好为保压过程中介质温度下降值。

2.7 智能控制系统

设备配备有全自动控制系统,可实现一键全自动操作,操作人员只需设定好工作压力,将待处理样品放入容器中,按下启动键即可。设备随即自动完成堵头插入、垫块插入、增压、保压计时、卸压、垫块移除、堵头移出、容器移出等模块的动作。通过软件编程,各个模块间的运行均设有保护程序,一旦发现

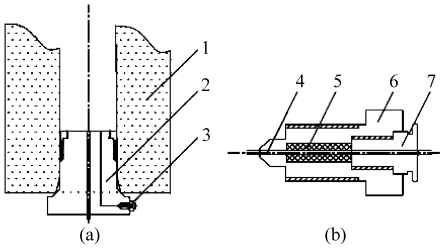


图 6 超高压温控系统

Fig. 6 Schematic drawing of the temperature sensor system
(a) 系统示意图 (b) 热电偶线密封放大图
1. 容器 2. 容器下堵头 3. 密封系统 4. K 型热电偶丝 5. 密封填料 6. 密封堵头 7. 填料压帽

异常情况立即自动报警,终止设备运行,防止误操作造成的设备损坏。智能控制系统由硬件和软件两部分组成。硬件部分包括计算机、可编程控制器(PLC)、断路器、交流接触器、压力传感器、压力显示仪表及操作按钮等。软件包括 PLC 程序部分和组态画面监控操作程序部分。控制软件采用模块化设计,设有系统故障自检程序模块、安全处理程序模块、手动操作程序模块、自动运行程序模块、双联装系统自动切换程序模块等。组态画面监控程序方面,主要有中文操作画面、中文动态监控画面、中文参数设定画面、中文报警监控画面等。

3 性能试验与应用实例

智能化超高压设备的性能参数见表 2。经试验验证,设备结构设计合理,结构参数选择正确,操作方便,性能稳定,安全可靠,其各项指标达到了设计要求。图 7 为实时记录的压力曲线。由图可见:设备升压到 600 MPa 用时为 320 s,保压 10 min 后压力仅下降 5 MPa,表明设备保压效果良好。保压时间可以任意设置,如长时间保压时,当压力值降低 10 MPa 后,设备增压系统会自动启动,将压力补充到设定值。设备在 600 MPa 保压 24 h,在第 4 小时压力下降至 590 MPa,这时补压程序启动,压力重新回到 600 MPa,随后保压过程中压力下降非常缓慢,到第 24 小时时,压力仅下降 8 MPa。压力初次下降是由于容器首次载压时,容器体受压后产生膨胀,导致

表 2 超高压设备性能参数

Tab. 2 Performance parameters of the automatic high hydrostatic pressure equipment

参数	设计值	测试值
工作压力/MPa	600	600
升压速率/MPa·min ⁻¹	110	112.5
卸压速率/MPa·s ⁻¹	150	200
功率/kW	30	30
处理能力/L·h ⁻¹	40	40~50

压力减低。

设备能耗方面,按每小时处理 6 批次计算,每小时处理果汁为 40 ~ 50 L,仅需电能 15 kW·h 左右。该设备仅以水作为传压介质,不与食品直接接触,水可以循环使用,设备的耗水量可忽略。

超高压对果蔬汁中的细菌有较好的杀灭效果^[9]。利用该设备在 600 MPa 条件下,处理鲜榨桃汁 5 min,可使果汁的细菌总数下降 5 个数量级,霉

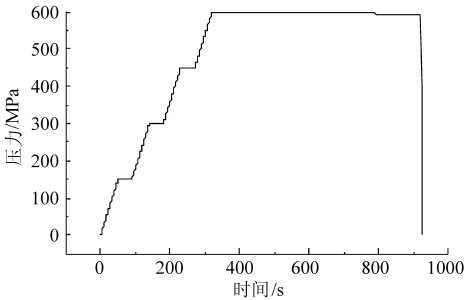


图 7 超高压设备压力曲线

Fig. 7 Pressure curve of the high hydrostatic pressure equipment

菌、酵母和大肠菌群被完全杀灭,果汁卫生情况符合 GB 19297—2003《果、蔬汁饮料卫生标准》的要求,产品呈现自然的浅黄色,有浓郁的果香味。

4 结论

(1)整机结构合理,参数选择正确,操作方便,各项指标达到了设计要求。整机实现了机械动作全自动运行,提高了设备的安全性、工作效率和稳定性。

(2)设计了一系列关键零部件,包括:高效水介质增压器;采用大小陶瓷珠结构的单向阀;由三角形合金密封圈、“O”形圈、“□”形圈等组成的新型密封;快速卸压阀,600 MPa 卸压仅需 3 ~ 4 s;可监测载压状态下温度变化的实时温控系统。

(3)利用该设备在 600 MPa 处理鲜榨桃汁 5 min,可使其微生物达到 GB 19297—2003《果、蔬汁饮料卫生标准》的要求,产品色泽为浅黄色,有浓郁的果香味。

参 考 文 献

1 姜斌,胡小松,廖小军,等. 超高压对鲜榨果蔬汁的杀菌效果[J]. 农业工程学报, 2009, 25(5): 234 ~ 238.
Jiang Bin, Hu Xiaosong, Liao Xiaojun, et al. Effects of high hydrostatic pressure processing on microbial inactivation in fresh fruit and vegetable juice[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(5): 234 ~ 238. (in Chinese)

2 姜绍通,钟昔阳,潘丽军,等. 超高压改性谷朊粉对面条加工品质的影响[J]. 农业机械学报, 2010, 41(3): 153 ~ 158.
Jiang Shaotong, Zhong Xiyang, Pan Lijun, et al. Effect of addition of ultra-high pressure treated wheat gluten on the quality of noodle [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(3): 153 ~ 158. (in Chinese)

3 潘见,张文成,陈从贵,等. 饮料超高压杀菌实用性工艺及设备探讨[J]. 农业工程学报, 2000, 16(1): 125 ~ 128.
Pan Jian, Zhang Wencheng, Chen Conggui, et al. Applicable study on technology and equipment of beverage sterilization by ultra high pressure (HHP) [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2000, 16(1): 125 ~ 128. (in Chinese)

4 Oey I, Lille M, Van Loey A, et al. Effect of high-pressure processing on color, texture and flavor of fruit- and vegetable-based food products: a review [J]. Trends in Food Science and Technology, 2008, 19 (6): 320 ~ 328.

5 刘红,林锋. 超高压食品加工装置综述[J]. 食品工业科技, 1998(6): 78 ~ 80.

6 彭超英,高孔荣. 超高压食品处理工艺与设备[J]. 食品与机械, 1996(1): 10 ~ 12.

7 郭万峻,徐扬. 超高压食品加工容器装置设计分析[J]. 压力容器, 1997(2): 53 ~ 55.
Guo Wanjun, Xu Yang. The analysis on the design for ultra-high pressure vessels of food processing[J]. Pressure Vessel Technology, 1997(2): 53 ~ 55. (in Chinese)

8 Stishov S M. A reliable valve for application in high-pressure hydrostatic installations [J]. Instruments and Experimental Techniques, 2002, 45(6): 846 ~ 847.

9 闫雪峰,赵有斌. 超高压处理对树莓汁杀菌效果的影响[J]. 农业机械学报, 2010, 41(增刊): 212 ~ 216.
Yan Xuefeng, Zhao Youbin. Study on effect of ultra-high pressure processing on sterilization of raspberry juice [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(Supp.): 212 ~ 216. (in Chinese)