

食品工程用超高压设备的设计及性能试验

易建勇^{1,2,3}, 王换玉⁴, 张燕^{1,2,3}, 廖小军^{1,2,3}, 胡小松^{1,2,3*}

(1. 中国农业大学食品科学与营养工程学院, 北京 100083; 2. 农业部果蔬加工重点开放实验室, 北京 100083;
3. 国家果蔬加工工程技术研究中心, 北京 100083; 4. 包头科发高压科技有限责任公司, 包头 014030)

摘要: 为了提高超高压设备的稳定性和处理效率, 促进超高压技术应用于食品加工, 该文阐述了 HHP-700-400L 型食品工程用大型超高压设备的工作原理、设计要求、主体结构和工作过程, 分析并确定了双向水介质增压器、直推式容器堵头及其密封系统、承压容器材料和结构等相关参数。设备单体容积为 100 L, 总容积为 400 L; 最高工作压力为 600 MPa; 处理能力达到 1.68 t/h。经性能试验表明: 设备性能稳定、操作方便、安全可靠。研究结果为大型商业化超高压设备的设计和制造提供参考。

关键词: 食品加工, 稳定性, 性能, 密封系统, 超高压, 增压器

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.04.041

中图分类号: S226.9

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2012)-04-0248-06

易建勇, 王换玉, 张燕, 等. 食品工程用超高压设备的设计及性能试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(4): 248—253.
Yi Jianyong, Wang Huanyu, Zhang Yan, et al. Design and performance test of high hydrostatic pressure equipment for food processing[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(4): 248—253. (in Chinese with English abstract)

0 引言

超高压加工技术(High pressure processing), 又称高静水压加工技术(High hydrostatic pressure processing), 即利用液体介质使在 ≥ 100 MPa 的压力下处理食品, 达到延长食品保藏时间的一种物理加工方法^[1-2]。该技术是一种新兴的非热力加工技术, 可以更好地保持食品原有的风味、色泽和营养价值, 表现出巨大的潜在市场和广阔的发展前景^[2-4]。在日本、美国和加拿大等发达国家, 超高压食品已有了相当程度的发展。由于在食品工程用超高压设备的研制和生产方面的技术积累不足, 中国在食品加工领域超高压技术研究和应用的时间较短、存在设备结构设计不尽合理、处理量小、难以连续化处理及自动化程度低等诸多问题^[5-7]。国外超高压设备价格昂贵, 一般为国内的 5~7 倍, 如西班牙 NC 公司的 55 L 超高压设备的售价为 90 万欧元, 这限制了生产企业对超高压技术的应用^[8-9]。整体产业的发展亟待中国在食品工程用大型超高压设备的自行研制上取得突破。为了增加超高压设备的处理容积, 提高设备运行的稳定性和运行效率, 本文设计了食品工程用超高压设备, 为商业化的大型超高压设备的设计和制造提供了参考。

1 设计要求与总体结构原理

1.1 设计要求

食品工程用超高压设备的处理量和处理效率必须满足工业化食品加工的要求。具体需要解决的关键问题有: 提高增压器的工作效率, 提升设备的升压速度; 改善高压下设备的密封性, 并实现系统中的液压油和水介质的有效隔离; 提高设备在增压前的充水速度, 进一步缩短单批物料的处理时间; 选择合适的材料, 设计安全可靠的承压容器。

本文设计的食品工程用超高压设备要求单体容积达到 100 L, 总容积达到 400 L; 最高工作压力为 600 MPa; 设备的处理能力达到 1.5 t/h 以上。

1.2 结构原理

如图 1 所示, 设备主要由超高压承压系统、液压系统和水介质系统组成。承压系统是设备处理物料的场所, 包括承压框架、容器支架、容器体、容器堵头和堵头密封等装置。液压系统负责高静压的产生和设备部件的机械移动, 主要包括水介质增压器、油泵、油箱、换向阀、卸压阀等部件。水介质系统指传压介质水的整个循环路径, 主要包括高压水泵组、排水泵、水箱、单向阀、压力传感器等部件。水介质直接接触食品, 各级密封必须确保水介质与液压油完全分开。

设备总体结构原理是: 在主油泵的驱动下, 利用增压器使泵入的水介质的压力上升, 再通过单向阀将高压水注入承压容器, 使容器内的水介质形成高静压环境。水介质和物料在高压状态保持一段时间后卸压, 利用极端压力的物理作用杀灭食品中微生物或改变食品的特性。

收稿日期: 2010-11-01 修订日期: 2011-04-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(30972067); 国家“863”计划项目(2007AA100405); 北京市科技计划项目(D10110504660000)

作者简介: 易建勇, 博士生, 农产品加工与装备开发。北京 中国农业大学食品科学与营养工程学院, 100083。Email: yijianyong515@sohu.com

*通信作者: 胡小松, 教授, 博士生导师, 农产品加工技术及农业与食品产业发展战略。北京 中国农业大学食品科学与营养工程学院, 100083。

Email: huxiaos@263.net

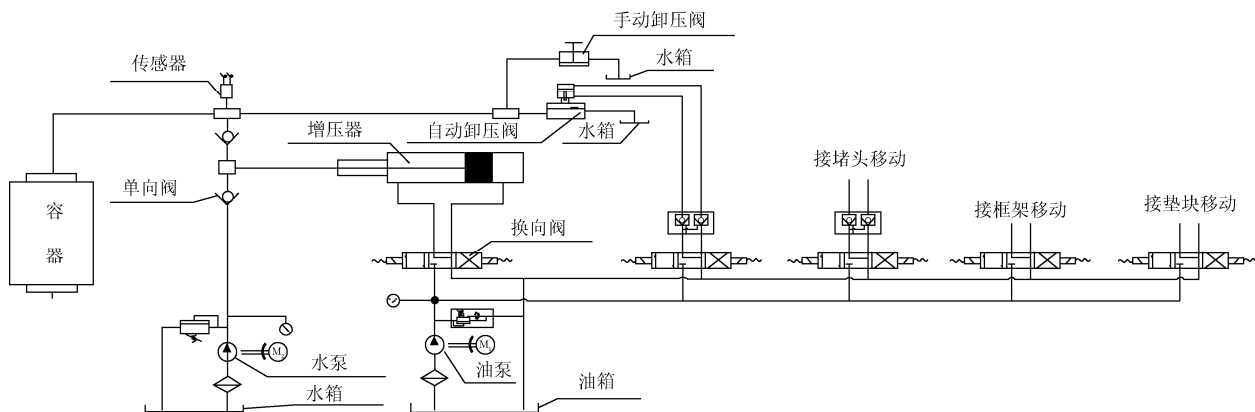


图1 食品工程用超高压设备系统原理示意图

Fig.1 Schematic map of the commercial high hydrostatic pressure equipment system

2 主体结构和工作过程

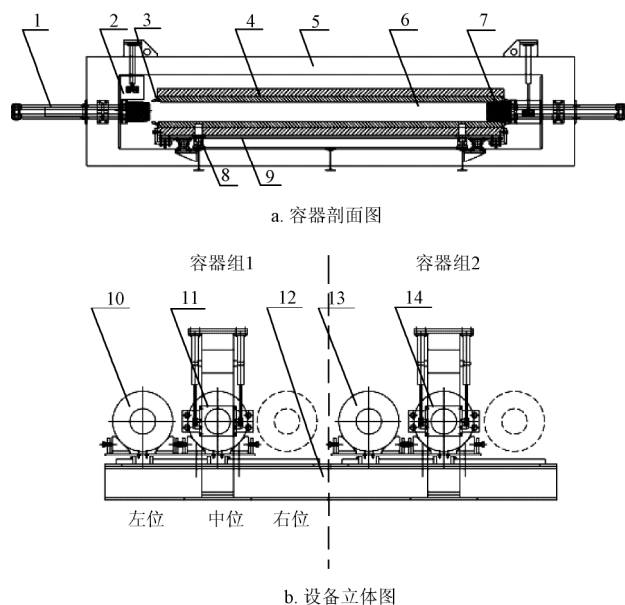
2.1 主体结构

HHP-700-400L 型食品工程用大型超高压设备采用双容器移动式结构，该结构的优势在于容器堵头、高压管路、卸压系统都固定在承压框架上，高压介质通过高压管路从左右堵头分别进入容器，由容器移位来实现物料的进出，这种结构降低了设备的故障率。如图2所示，整个设备包括4个单体容积100 L的容器体。主要由堵头联动杆、垫块、堵头卡口、容器壁、承压框架、容器腔、堵头、滑轨、容器支架、设备支架、容器Ⅰ~Ⅳ等部件组成。设备的高压管路都固定在框架上，提高了高压管路的稳定性。设备采用分体式结构^[8]，配备有自主研发的双向水介质增压器、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，确保了运行

的平稳和精确，避免了因对位不正而产生的机械碰撞。通过伸缩油缸分别驱动堵头、垫块和容器体移动，实现了自动卸压。为了使设备的整体结构紧凑和保障设备安全，增压器、换向阀、油泵、水泵、油箱和水箱等增压系统的主要元件均位于容器后方。设备框架为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，保证了框架的承压性能。这些设计确保了整个工作过程的流畅，提高了设备的工作效率、稳定性和安全性。

2.2 工作过程

如图2所示，HHP-700-400L 型超高压设备的4个容器体对称分布成1、2两组，工作过程相同。设备工作过程为：容器组1分别有左、中、右3个位置。当容器Ⅰ、容器Ⅱ分别位于左位和中位时。堵头与处于中位的容器Ⅱ的口部对齐。容器Ⅰ口部空出，此时可以装入物料。接着处于左位和中位的2个容器整体和容器支架一起由伸缩油缸驱动，沿滑轨水平移位到中位和右位。移位后，堵头与容器Ⅰ的口部对齐，容器Ⅱ口部处于右位。油泵驱动堵头联动杆将堵头推入容器Ⅰ后，垫块插入堵头和承压框架中间。堵头和垫块就位后，处于中位的容器Ⅰ开始充水和增压。此时，处于右位的容器Ⅱ可以进出物料。容器体Ⅰ处理结束后自动泄压。待容器内的水排出后，垫块和堵头依次移出。接着2个容器沿滑轨左移。移位结束后，处于左位容器体Ⅰ又可以再次进出物料，容器Ⅱ中的物料开始被处理。处理完成后容器自动卸压。自此，设备运行完成一个循环，即两个容器分别进行了一次处理。



1.堵头联动杆 2.垫块 3.堵头卡口 4.容器壁 5.承压框架 6.容器腔
7.容器堵头 8.滑轨 9.容器支架 10.容器Ⅰ 11.容器Ⅱ 12.设备支架
13.容器Ⅲ 14.容器Ⅳ

图2 食品工程用超高压设备主体结构示意图

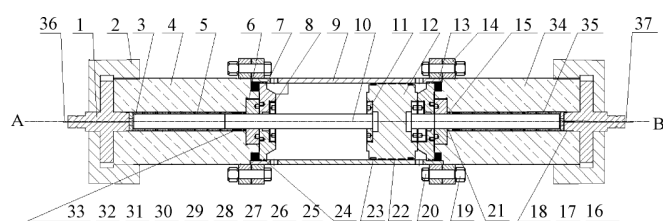
Fig.2 Schematic map of main construction of the commercial high hydrostatic pressure equipment

3 关键部件设计

3.1 双向水介质增压器

由于 HHP-700-400L 型超高压设备主要用于食品加工，如果采用传统的液压油作为传压介质，将导致物料清洗困难，生产环境的洁净也难以保证。为解决这个问题，需要开发水介质增压器。水介质增压器研制的关键在于解决油水混合问题，其实质是解决柱塞杆与衬套间的密封问题。

如图 3 所示,水介质增压器主要由低压缸,左高压缸、右高压缸、活塞体、左柱塞杆和右柱塞杆等部件组成。设计低压缸容积为 25 L,左右高压缸容积均为 1 L;低压缸两端各有 1 个低压堵头,用 E 型圈密封,低压缸与柱塞杆间用异型圈密封;左高压缸内有衬套与柱塞杆紧密接触,一端与低压缸相连接,并使用高压缸堵底密封,另一端用高压缸压帽封口,并用高压堵头和高压堵头压盖密封;右高压缸与左高压缸结构一致,均采用了双层结构;高压缸与低压缸之间采用高压缸套筒嵌合而连接,用法兰盘固定;低压缸内的活塞体与柱塞杆固定连接;异向带装在活塞体上用于改变方向;活塞行程为 355 mm,增压比达到 25:1;活塞体与缸体之间用 Y 型圈密封;柱塞杆与低压堵头之间采用异型圈密封;高压堵头与相对应的高压缸之间采用外三角垫、高压堵头垫圈、O 形圈密封;柱塞杆末端与衬套之间的高压密封组合包括支承环、外三角垫、内三角垫、第一垫圈、组合三角垫、第二垫圈、车氏密封、蕾型圈、第三垫圈和钢垫共 10 组密封元件,充分发挥了不同材料的密封性能,有效的防止了油水混合。



1. 高压堵头 2. 高压缸压帽 3. 高压堵头压盖 4. 左高压缸 5. 衬套
6. 高压缸堵底 7. 低压堵头 8. 低压堵头压母 9. 低压缸 10. 左段柱塞杆
11. 活塞压母 12. 活塞体 13. 高压缸套筒 14. 法兰盘 15. 支承环
16. 外三角垫 17. 高压堵头垫圈 18. O 形圈 19. 螺栓 20. 螺母
21. 异型圈 22. 异向带 23. Y 型圈 24. E 型圈 25. 外三角垫 26. 内三角垫
27. 第一垫圈 28. 组合三角垫 29. 第二垫圈 30. 车氏密封
31. 蕾型圈 32. 第三垫圈 33. 钢垫 34. 右高压缸 35. 右段柱塞杆
36. 左进水口 37. 右进水口

图 3 超高压双向水介质增压器示意图

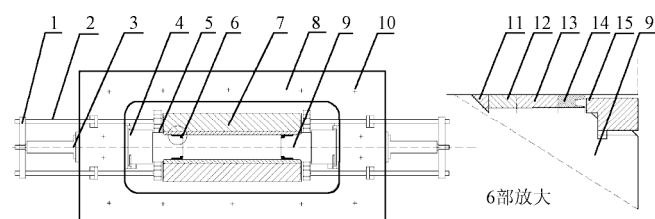
Fig.3 Schematic map of the two-way high hydrostatic pressure intensifier

本文开发的水介质增压器可双向连续工作,其工作效率是单向增压器的两倍,提高了增压速率。其工作原理为:当低压水由左进水口 B 注入时,推动活塞体带动柱塞杆向左运动,进而将左高压缸内的水增压为高压水,当活塞运动到最左端时,推开单向阀阀芯,高压水通过外侧输出单向阀和高压管道输送流经三通阀,进入承压容器。此时右高压缸内则由输入单向阀注满水。通过异向带改变活塞的运动方向,低压水由右进水口 A 注入,活塞改为向右运动,推动右段柱塞杆往右运动,压缩右高压缸内的水为高压水,高压水随即注入承压容器,同时左高压缸内完成充水,到此一个工作循环完成,此后进入下一个工作循环。

3.2 直推式容器堵头及其密封系统

超高压设备容器堵头的开启速度是影响工作效率一个重要指标。常见的大口径容器堵头为螺纹式或螺杆式,

开启速度极慢。堵头的螺纹数与容器口径相关,开启一个 100 L 超高压容器的螺纹堵头需要 2~3 min。本文设计的直推式堵头依靠液压杆直接推入或者拉出容器,将堵头进入和拔出时间缩短至 5~7 s 左右,大幅提高了设备的工作效率。如图 4 所示,容器左右对称,工作原理相同。堵头开启系统包括承压框架连接板、堵头拉杆、油缸、堵头垫块、堵头连接件、堵头等部分。堵头通过堵头连接件、拉杆和连接板等,与油缸一起都固定在承压框架上。油缸控制拉杆的伸缩,从而带动堵头水平运动,实现堵头自动推入和拉出超高压容器。堵头进入容器后,垫块水平移到堵头和承压框架之间,加压后堵头向后顶住垫块,将堵头承受的压力传导至承压框架。



1. 连接板 2. 堵头拉杆 3. 油缸 4. 堵头垫块 5. 堵头连接件 6. 密封装置套装
7. 容器壁 8. 承压框架 9. 容器堵头 10. 框架螺栓 11. 合金三角形密封圈
12. 调整垫 I 13. 调整垫 II 14. 轴孔两用密封 15. 密封压盖

图 4 超高压设备直推式堵头及其密封系统示意图

Fig.4 Schematic map of the vessel plug and sealing system of the high hydrostatic pressure equipment

超高压设备容器堵头的密封系统是超高压设备的核心技术之一,直接影响设备的保压性能^[11-12]。目前,国内开发的小型超高压设备承压容器堵头的密封一般是由三角垫、O 形圈,口形圈为主的自紧型密封,但由于大型超高压设备的容器口径较大,加上食品加工过程中不可避免的频繁启闭,使得这种密封组件容易变形或磨损,经常从堵头上脱落,导致密封需要频繁重新装载和更换,降低了生产效率,增加了设备运行成本。如果材料选择不当还能导致密封件难以或不能承受高压。为了解决这些问题,本文研制了新型的超高压容器堵头密封系统。如图 4 所示,该密封系统主要包括合金三角形密封圈、调整垫 I、调整垫 II、轴孔两用密封和密封压盖等元件。在堵头的末端处有一凹槽,密封元件就安装在这一凹槽内。设备开始增压后,轴孔两用密封孔部胀大,紧贴容器壁,实现容器在较低压力下(<100 MPa)的密封。不断增强的压力使合金三角形密封圈发生形变,促使容器壁、堵头与密封组合完全紧闭,随着压力的升高,紧闭程度越高。调整垫 I 选取高韧度合金钢为材料,将压力均匀的传递给三角垫;调整垫 II 是聚四氟乙烯材料,用于调整密封组合的位置。新型密封装置密封效果优良,即使在压力达到 1 000 MPa 条件下密封效果也仍然很好。经电脑记录,设备运行 500 次以后,密封核心元件仍然无明显形变或磨损,稳定性较高。实践表明,该密封组合不易脱落,耐磨损,使用寿命长,更换简单,成本较低(30 元/套)。

3.3 承压容器的材料选择和设计

单体 100 L 超高压承压容器的结构与材料是保障超高压设备承压安全性的重要方面。对于承受 98 MPa 以上压力的承压容器, 国内外至今还没有完整的设计规范和标准^[10]。由于超高压对容器材质要求比较严格, 结构必须保证强度的可靠性和密封的严密性。本机采用中国液压自紧身管设计规范 (WJ/Z246-1989), 针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。

3.3.1 承压容器材料选择

承压容器和增压器筒体选取高强钢材 (PCrNi₃MoVA) 为原料, 并经调质和电渣重熔精练处理, 提高了晶粒细化和合金化的效果, 也提高了钢的沉净度, 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。处理后的材料成分如表 1 所示。材料性能分析表明: 材料的冲击韧性值 (α_k) 值为 6~7 kg·m/cm²; 断裂韧性值 (K_{IC}) 达到 360 kg/mm^{3/2} 以上; 屈服强度 σ_s 为 960 MPa; 抗拉强度 σ_b 为 1 070 MPa。优质的材料性能保证了设备载压状态下的安全性。

表 1 超高压设备容器体钢材成分

Table 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	3.0~3.5	S	≤0.015
Mo	0.35~0.45	P	≤0.015
V	0.10~0.20		

3.3.2 承压筒体主要技术参数及其强度计算

利用超高压技术处理食品时所采用的传压介质通常为水, 而水介质在超过 600 MPa 的压力下会发生相变导致设备无法工作, 因此设备在加工食品时实际的工作压力一般在 600 MPa 以下。为了保证安全, 本文设计的超高压设备的工作压力 P_W 为 700 MPa。超高压承压容器的外径和内径比值称为壁厚比 (K)。为了保证工作压力达到 700 MPa, 容器的 K 值一般大于 3.0, 容器的实际安全性需要根据材料特性计算分析。设计容器内径 $d=200$ mm, 外径 $D=611$ mm, 即 K 值为 3.06。根据设备容积要求, 设计容器长度为 4 000 mm; 传压介质为水; 按照液压自紧身管设计规范的要求, 容器的设计压力 P 为工作压力 P_W 的 1.15 倍, 即 $1.15 \times P_W=805$ MPa; 自增强压力 P_A 为工作压力 P_W 的 1.25 倍, 即 $1.25 \times P_W=875$ MPa; 设计工作温度为 0~50℃。

3.3.3 承压容器体强度和疲劳度分析

1) 容器体内壁的三向应力

容器体内壁仅承受设计压力 P (800 MPa) 的情况下, 容器内壁的三向应力由拉美公式计算为

$$\sigma_r = -P = -800 \text{ MPa} \quad (1)$$

$$\sigma_t = P \left(\frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} \right) = 1000 \text{ MPa} \quad (2)$$

$$\sigma_z = \frac{P}{K^2 - 1} = 100 \text{ MPa} \quad (3)$$

式中, σ_r 、 σ_t 、 σ_z 分别为圆筒在厂处的径向应力、周向应力和轴向应力, MPa; P 为设备的设计压力, MPa。

2) 容器内壁的初始屈服压力

$$P_s = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} \times \frac{K^2 - 1}{K^2} = 495 \text{ MPa} \quad (4)$$

$$\text{安全系数: } n_s = \frac{P_s}{P} = 0.75$$

式中, σ_s 为材料机械性能, MPa; P_s 为内壁初始屈服压力, MPa; n_s 为容器内壁初始屈服的安全系数, 无量纲; P 为设备设计压力, MPa。

3) 容器的全屈服压力

$$P_p = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_s \ln K = 1238 \text{ MPa} \quad (5)$$

$$\text{安全系数: } n_p = \frac{P_p}{P} = 1.875$$

式中, P_p 为容器的全屈服压力, MPa; n_p 为容器全屈服的安全系数; P 为设备设计压力, MPa。

4) 容器的爆破压力 (按照 Faupel 公式计算)

$$P_b = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_s \left(2 - \frac{\sigma_s}{\sigma_b} \right) \ln K = 1365 \text{ MPa} \quad (6)$$

$$\text{安全系数: } n_b = \frac{P_b}{P} = 2.069$$

式中, P_b 为容器的爆破压力, MPa; n_b 为爆破安全系数; P 为设备设计压力, MPa。

5) 容器的体疲劳寿命

采用缺乏疲劳数据的疲劳设计方法 (Langer 低循环疲劳推定式) 计算容器体使用循环次数

$$N = \left[\frac{E}{4(\sigma_{alt} - \sigma_e)} \ln \frac{100}{100 - \psi} \right]^2 \quad (7)$$

式中, σ_e 没有可供利用的疲劳试验资料, MPa, 可取持久极限 $\sigma_e=0.5\sigma_b$; ψ 为断面收缩率, 取 $\psi=56.5\%$; σ_{alt} 为内壁当量应力幅, σ_{alt} 为 582 MPa; E 为弹性模量, $E=2.7 \times 10^5$ MPa; 将以上参数带入公式 (7), 得容器体的疲劳寿命为 13 456 次。

安全系数是压力容器设计的一项基本参数, 中国劳动人事部规定取 1.5~3.0 之间。大量的试验还表明, 若不考虑其它因素, 对于按 Faupel 式确定的爆破压力, 若安全系数取 1.25, 则破坏几率几乎为 0.01%, 即可靠程度为 99.99%。若安全系数取 1.4, 则破坏几率几乎达零。

3.3.4 安全性分析

对容器进行低应力脆断为目标的安全性分析和疲劳寿命估算。厚壁容器受内压疲劳时裂纹扩展特点是以内壁裂纹为裂纹源, 向外壁以半椭圆状态扩展, 属于三向应力疲劳问题。受内压厚壁容器体内壁表面具有深度为 a 的线状浅表裂纹, 应力强度因子可由二种应力强度因子迭加而得。裂纹顶端区域弹性应力场强度因子 K_I 为

$$K_I = M_e \frac{(\sigma_t + P_b)\sqrt{\pi\alpha}}{\sqrt{\theta}} \tag{8}$$

式中，容器壁厚 t 为 92.5 mm；裂纹尖端处的环向应力 σ_t 为 30 432.4 N/cm²；破裂压力 P_b 为 1 365 MPa；超声波起始灵敏度当量直径 α 为 2 mm； M_e 为裂纹形状系数， $M_e=M_1\times M_2$ ； M_1 为裂纹前方自由表面影响系数， $M_1=1.1$ ； M_2 为裂纹背后自由表面影响系数， $M_2=1$ ； θ 值为 1.247。将以上参数带入公式(8)，得应力场强度因子 $K_I=250\text{ kg/mm}^{3/2}$ 。由于应力场强度因子 K_I 小于断裂韧性值 $K_{IC}(360\text{ kg/mm}^{3/2})$ ，说明容器体在工作压力(700 MPa)下不会发生低应力脆断。

4 性能试验

表 2 为 HHP-700-400L 型食品工程用大型超高压设备的性能参数。设备的升压速率约为 260 MPa/min，设备升压至 600 MPa 仅需 140 s；卸压速度为 200 MPa/s，卸压耗时 3~4 s，表明设备运行速度较快，效率高。设备整机功率为 55 kW/h。

表 2 HHP-700-400L 型超高压设备的性能参数
Table 2 Performance parameters of the 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)	250	250~260
卸压速度/(MPa·s ⁻¹)	150	200
功率/(kW·h ⁻¹)	55	55
处理能力/(L·h ⁻¹)	40	40~50

一般而言，600 MPa 条件下处理 10 min 就可以杀灭食品中大部分有害微生物^[4-5]。如图 5 所示，本文设计的超高压设备在 600 MPa 压力条件下保压 10 min，压力表显示压力值仅下降 5 MPa。如果长时间保压时，当容器压力值降低 20 MPa 后，设备的增压系统会自动启动，将压力补充到设定值。

设备采用双缸容器移动式结构，两组容器可以同时工作，大幅提高了工作效率。设备处理一缸物料耗时 5 min，因此每小时可共处理 24 缸，按 70% 容积计算，设备每小时处理能力为：24 缸×0.1t/缸×70%=1.68 t/h。超高压技术属于非热技术，能耗较低。依据设备功率，每处理一次耗电量约为 2.14 kWh，折合吨产品能耗为 30.6 kWh，大大低于传统热杀菌的平均能耗(500~1 000 kWh)。耗水量上，设备仅以水作为传压介质循环使用，不与食品直接接触，因此设备杀菌所用水量可忽略。

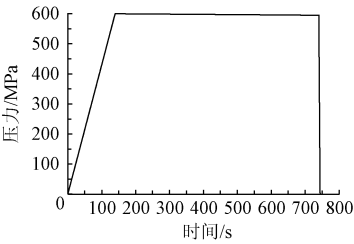


图 5 HHP-700-400L 型超高压设备实时压力曲线
Fig.5 Real-time pressure curve of the high hydrostatic pressure equipment

5 结 论

- 1) 本文设计的 HHP-700-400L 型超高压设备，其容器体的单体容积达到 100 L，总容积达到 400 L。容器疲劳寿命超过 1 万次。最大工作压力达到 600 MPa。
- 2) 超高压设备运行过程中，堵头进入和拔出时间缩短至 5~7 s，设备的升压速率约为 260 MPa/min，升压至 600 MPa 仅需 140 s；卸压速度为 200 MPa/s，卸压耗时 3~4 s；设备 600 MPa 压力条件下保压 10 min 压力仅下降 5 MPa；设备运行 500 次以后密封系统仍然无明显损坏。
- 3) 设备采用双缸容器移动式结构，两组容器可以同时工作，实现了杀菌处理的半连续化。处理能力达到 1.68 t/h。利用该设备杀菌的吨产品电耗为 30.6 kWh，杀菌时水介质可以循环使用。

[参 考 文 献]

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

[2] Butz P, Fernández García A, Lindauer R, et al. Influence of ultra high pressure processing on fruit and vegetable products[J]. Journal of Food Engineering. 2003, 56(2/3): 233—236.

[3] Aertsen A, Meersman F, Hendrickx M E G, et al. Biotechnology under high pressure: applications and implications[J]. Trends in Biotechnology. 2009, 27(7): 434—441.

[4] 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 CSAE, 2009, 25(5): 234—238. (in Chinese with English abstract)

[5] 潘见, 张文成. 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. Applicable study on technology and equipment of beverage sterilization by ultra high pressure (UHP)[J]. Transactions of the CSAE, 2000, 16(1): 125—128. (in Chinese with English abstract)

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

Peng Chaoying, Gao Kongrong, Zeng Qingxiao, et al. Technology and equipment of food processing by super high pressure[J]. Food and Machinery, 1996, (1): 10—12. (in Chinese with English abstract)

[7] 廖小军. 果蔬汁非热加工技术进展[J]. 饮料工业, 2002, 5(6): 4—7.

Liao Xiaojun. Review of non-thermal processing for fruit and vegetable juices[J]. The Beverage Industry, 2002, 5(6): 4—7. (in Chinese with English abstract)

[7] 贾培起. 超高压实验机及生产设备的选型[J]. 食品研究与开发, 2005, 26(2): 151—155.

Jia Pengqi. High pressure machine and equipment selection[J].

- Food Research and Development. 2005, 26(2): 151—155. (in Chinese with English abstract)
- [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] 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 analyse on the design for ultra-high pressure vessels of food processing[J]. *Pressure Vessel Technology*, 1997, (2): 53—55. (in Chinese with English abstract)
- [10] 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.
- Liu Hong, Lin Feng. Review of equipment used in super high pressure food manufacture[J]. *Science and Technology of Food Science*, 1998, (6): 78—80. (in Chinese with English abstract)
- [11] Talalueva N N, Tyutenko V S, Éfros B M. Sealing devices for the plunger in hydrostatic high-pressure equipment for powder compaction[J]. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 2003, 42(3/4): 199—201.
- [12] 黄丽, 孙远明, 潘科, 等. 超高压处理对荔枝果汁品质的影响[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(2): 259—263.
- Huang Li, Sun Yuanming, Pan Ke, et al. Influence of ultra high pressure treatment on the quality of lychee juice[J]. *Transactions of the CSAE*, 2007, 23(2): 259—263. (in Chinese with English abstract)
- [13] 李卞生, 张微, 梅灿辉. 超高压和热灭菌对鲜榨菠萝汁品质影响的比较[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(1): 359—375.
- Li Biansheng, Zhang Wei, Mei Canhui. Comparison of effects of ultra-high pressure and heat sterilization on qualities of freshly-squeezed pineapple juice[J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(1): 359—375. (in Chinese with English abstract)

Design and performance test of high hydrostatic pressure equipment for food processing

Yi Jianyong^{1,2,3}, Wang Huanyu⁴, Zhang Yan^{1,2,3}, Liao Xiaojun^{1,2,3}, Hu Xiaosong^{1,2,3*}

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

2. Key Laboratory of Fruits and Vegetables Processing, Ministry of Agriculture, Beijing 100083, China;

3. National Engineering Research Centre for Fruit and Vegetable Processing, Beijing 100083, China;

4. Baotou KeFa High Pressure Technology Limited Company, Baotou 014030, China)

Abstract: In order to improve the stability and efficiency of high pressure equipment, and promote the industrialization of high pressure technology in food production, the design principle of commercial high hydrostatic pressure equipment for food processing, and its structural characteristics and major technical difficulties were proposed. The structure and the optimum parameters of two-way high pressure intensifier, vessel plug, direct-pushing sealing system and large high pressure processing chamber were studied. The total chamber volume of the equipment was 400 L with 100 L of one chamber. The maximum working pressure was 600 MPa and the processing capacity was 1.68 t/h. The results of performance test showed that the system proposed had advantages of steady performance, easy operation and reliable security. Results provide the technical basis for the design and manufacture of large-scale commercial high pressure equipment.

Key words: food processing, stability, functions, sealing system, high hydrostatic pressure, pressure intensifier