

# 压致升温及其对超高压下 微生物失活的影响

钟秀霞, 李沛生, 李琳, 黄敏胜, 叶久东  
(华南理工大学轻工与食品学院, 广东广州 510640)

**摘要:** 压力与温度的结合能有效地杀灭芽孢杆菌的芽孢。在绝热情况下, 压致升温对芽孢的杀灭有很大影响。本文主要阐述了压力处理过程中介质与食品的压致升温情况, 同时由于不同的绝热升温产生的热传递造成高压容器内的温度不均一。因此, 在压力处理过程中, 控制热效应对芽孢杀灭的效果起重要作用。

**关键词:** 压致升温, 微生物, 失活

**Abstract:** Pressure combined with thermal effects can inactivate microbes effectively. Under the adiabatic condition, adiabatic compression heating influences the microbial inactivation. This paper highlights the adiabatic compression heating of medium and food sample during the pressure process. On the other hand, increase of sample and medium can lead to temperature non-uniformity in the vessel. So controlling the thermal effects is critical for conducting high-pressure microbial inactivation.

**Key words:** adiabatic compression heating; microorganism; inactivation

中图分类号: TS205.9 文献标识码: A  
文章编号: 1002-0306(2006)06-0179-05

超高压(UHP)处理是食品保藏的新方法。目前一些国家已将超高压处理技术投入商业应用, 生产出经超高压杀菌的果汁、果酱、火腿等产品。超高压主要应用在酸性食品的商业杀菌和低酸性食品的巴氏杀菌。低酸性食品存在耐热耐压的芽孢菌, 要杀灭低酸性食品中的芽孢菌, 采取加热杀菌时需要高强度的热处理; 采用超高压处理亦需要相当高的压力(800MPa以上)。目前大多数商业设备的压力在600MPa以下, 单独的超高压静压处理难以有效地杀灭耐热芽孢菌的芽孢。欲扩大超高压静压杀菌技术的应

用范围, 使其能使处理后的低酸性食品达到商业杀菌的程度, 将超高压静压与其它杀菌技术协同作用成为最为可行的途径。而其中超高压静压与适当的加热处理结合可以有效地增加对细菌芽孢的杀灭作用。过去由于设备和测试条件的限制, 忽略了压致升温对微生物失活的影响。压致升温是当对物料施加压力, 物料的体积减少, 物料被压缩导致温度升高。在超高压处理过程中就包含有热效应, 而在绝热压缩的情况下, 热的效应尤为突出, 油介质温度最高达到9°C/100MPa(表1列出部分物料或介质在绝热压缩下的温度变化), 若不考虑热损失, 压力升到700MPa, 油介质的温度升高63°C, 假使物料的初温为58°C, 则最终温度可达121°C(即低酸性食品的标准热杀菌温度)。由于存在压致升温, 微生物的超高压致死作用既有压力的因素又有温度的因素, 因此, 可降低处理的压力和温度来达到杀灭芽孢的效果。

## 1 压致升温的影响因素

压致升温的影响因素包括传压介质、食品基质的组分、压力处理时间、物料与介质的初始温度等。

### 1.1 传压介质

传压介质被用作均一地传送压力到食品的介质, 并起着保护内部容器表面在处理过程中免受腐蚀的作用。一般使用调味油、硅树脂油、水、安息香酸钠和乙二醇作为传压介质。在选择液体时, 液体在压力下的热性质(粘度、密度、热传导率、热扩散率)作为选择因素。例如, 当水作为传压介质时, 在600MPa下, 水压缩15%, 物理的压缩导致温度升高, 有机溶剂或油因其有较高的可压缩性、较低的热容量, 温度上升幅度要比水大。

压力致温度升高到最高温度所需的时间因不同的传压介质而不同。Balasubramanian等对4种溶液分别为WHS2575(水为25%、乙二醇为75%),

收稿日期: 2005-09-19

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(20436020); 广东省自然科学基金项目(05006597)资助。

表 1 部分物料或介质在绝热压缩条件下的温度变化<sup>[1]</sup>

物料或介质(初始温度 25℃)	温度变化(℃/100MPa)	物料或介质(初始温度 25℃)	温度变化(℃/100MPa)
水	约 3.0	大马哈鱼	约 3.2
土豆泥	约 3.0	鸡油	约 4.5
橙汁	约 3.0	牛油	约 6.3
番茄酱	约 3.0	橄榄油	从 8.7 到小于 6.3
牛奶(脂肪含量 2%)	约 3.0	豆油	从 9.1 到小于 6.2
水/乙醇混合物(50/50)	从 4.8 到小于 3.7 <sup>①</sup>	古乌达干酪	约 3.4

注 随着压力的升高,每变化 100MPa 所产生的温差幅度减小。

表 2 30℃和大气压下不同传压介质的热性质

溶液	热容量 $C_p$ (kJ/kg/K)	粘度 $\mu$ ( $10^6$ Ns/m <sup>2</sup> )	密度 $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	热传导率 $k$ (W/m/K)	热扩散率 $\alpha$ (m <sup>2</sup> /s)
WHS2575	3.20	30800	944	0.39	$1.3 \times 10^{-7}$
WHS5050	3.25	19710	957	0.50	$1.6 \times 10^{-7}$
WHS7525	3.10	5260	983	0.56	$1.84 \times 10^{-7}$
WSB9802	3.23	855	1011	0.61	$1.87 \times 10^{-7}$

WHS5050、WHS7525 和 WSB9802(水为 98%、安息香酸钠为 2%)作为传压介质的研究。结果表明,含有较多乙二醇的液体需要更长的时间来达到最高温度。

在理想的绝热条件下(对环境没有热损失),乙二醇与水的混合溶液中以乙二醇含量高的溶液会产生高的失活值,这是由于液体的热性质不同(表 2 列出了这 4 个溶液的热性质)。

在较高的压力下,溶液热的传导性比在大气压下高,WSB9802 的热扩散率在 30℃和大气压下为 WHS2575 在同等条件下的 1.5 倍,故以乙二醇为基础的溶液有较低的热扩散率。这可能导致了使温度到达样品时需要更多时间,影响杀灭芽孢的效果。

因此,传压介质能改变超高压处理过程的结束温度。使用压力与温度结合来杀灭芽孢杆菌芽孢时可考虑使用不同的传压介质来达到所需要的温度。

## 1.2 食品基质

与传压介质一样,食品基质同样产生压致升温。若食品基质性质与传压介质的相似,可减少热传递的时间,使基质很快达到传压介质的温度,减少热量的损失。水是大部分食品的主要组分,大部分食品表现出的压致升温与水相似,而油、乙醇表现出的压致升温与水不同。因此,需要通过食品基质的组分含量来研究不同食品的绝热升温的幅度。表 3 列出部分食品的组分含量。

水、脂肪和油的热效应的不同可能是由于它们相应的分子结构和相转变的特性不同。有报道表明,油表现出最高的压致升温。大豆油、橄榄油和亚麻油

酸在增加压力下表现出非线性的变化,在较低压力下,每 100MPa 温度升高 9℃,压力升高,压致升温的值减少。亚麻油酸(不饱和脂肪酸)呈现出最高的压致升温。新鲜的三文鱼鸡肉呈现出的压致升温接近水(3℃/100MPa),这可能由于它含有大约 68%的水分和 4.9%的脂肪。牛肉脂肪表现出中度的压致升温,为 8.3℃/100MPa。这可能由于其它组分如水、蛋白质和碳水化合物影响,牛肉脂肪的压致升温在低压下与油相似,但在大于 150MPa 的高压下温度会急剧升高、减少、然后持平。丙稀-乙二醇-乙醇,有机化合物,含有羟基功能组分的在分子间能形成氢键,丙稀-乙二醇-乙醇表现出的压致升温幅度在水与脂肪之间。然而,乙醇的压致升温性质与其它研究物料不同,在 325MPa 下升高 17℃和在 540MPa 下,温度会升高一倍。

在相同的压力条件下,不同的物料因有不同的可压缩性而表现出不同的压致升温。不饱和脂肪酸与饱和脂肪酸比较表现出较高的压致升温。橄榄油和大豆油含有多于 85%的长链不饱和脂肪酸,牛肉脂肪含有多长的长链饱和脂肪酸,而亚麻油酸是多不饱和脂肪酸,这些脂肪分子比较大且没有极性,与之对比,水分子小并且存在极性,水分子由于存在氢键而比脂肪分子压缩更紧密。当对这些组分施加压力时,较疏松的结构有更高的压缩性和得到更大的压缩,因此表现出更高的压致升温。

水、脂肪和油的初始温度对压致升温的影响亦不相同。有研究报道,水、橄榄油、大豆油、鸡脂肪、牛

表 3 部分基质的组分含量

物质	主要组分
水	纯(100%)
橄榄油	13.5%饱和脂肪酸,86.5%不饱和脂肪酸
大豆油	15%饱和脂肪酸,85%不饱和脂肪酸
鸡脂肪	28.9%的水,3.7%蛋白质,67.9%脂肪(20%饱和脂肪酸,30.3%单不饱和脂肪酸,14.6%多不饱和脂肪酸)
牛肉脂肪	20.2%的水,8%蛋白质,70.89%脂肪(30%饱和脂肪酸,30%单不饱和脂肪酸和 2.5%多不饱和脂肪酸)
新鲜三文鱼	68%水,23.5%蛋白质,4.9%脂肪

肉脂肪和三文鱼在不同压力(150~600MPa)和不同初始温度下(25~70℃)的升温情况。结果为水的初始温度从25℃升到60℃,它的压致升温值从3℃/100MPa升到4℃/100MPa。与之对比,油的初始温度对油的压致升温几乎没有影响。

通过食品中组分的各自的性质,可建立混合物模型来确定食品的热性质。如果物料中含有3个组分X、Y和Z,其质量分别为A、B和C,那么物料的压致升温的值 $CH_{\text{物料}}$ 可由下式估算:

$$CH_{\text{物料}} = (CH_X \cdot A + CH_Y \cdot B + CH_Z \cdot C) / (A + B + C)$$

这个模型假设忽略组分间的作用。含高水分的食品压致升温值与水很相似,如三文鱼肉(3℃/100MPa)。丙稀-乙二醇混合物能由纯水、纯丙稀、纯乙二醇的值估算。但是,这种混合模型就似乎不适用于乙醇和水的混合溶液,因为乙醇和水之间的作用不能忽略,乙醇中含有羟基,与水形成氢键,当乙醇加进水中,会产生很不同的分子排列。故此,类似于乙醇结构的物质的压致升温还需要更多的研究来估算它的 $CH$ 值。现在的研究主要集中在含脂肪的食物原料的 $CH$ 值,我们需要更多的研究来估算含有蛋白质、碳水化合物和其它食品成分的 $CH$ 值,这些信息能帮助我们评估混合模型在估算真实食品的 $CH$ 值的适用性。

在压力杀灭芽孢的过程中,食品基质的组分不但对芽孢菌有保护作用而影响杀灭效果,还由于组分的不同引起压致升温的不同而影响杀灭效果。

### 1.3 压力处理时间

压力处理时间包括升压时间、保压时间和降压时间。

加压时间由加压速率决定,由于在加压过程中存在热作用,加压的速率就自然影响容器内的热传递。

小的保压时间同时能达到杀灭芽孢的效果是人们追求的目标,一般保压时间小于5min使得生产率跟经济之间取得最佳化。但热交换使得压力容器内存在温度梯度。加压后,超高压容器不发生压致升温,样品的温度就高于超高压容器温度,热量就从产品传到容器壁,使接近容器壁的那部分样品温度降低,最后温度不能达到容器中心的温度。并且,传压介质也会影响样品的温度。因此,当冷的容器壁与热的传压介质包围着样品,样品的实际温度与预测的有很大的不同,因此,热传递会影响样品温度的测量,并且样品需要更长的时间来升高温度。所以需要更长的保压时间来保证杀灭芽孢的效果。

Makita 强调即使在容器外层安装温度调节设备,也不能避免产品的温度梯度。而唯一可行的方法是搅拌传压介质,这在高于300MPa下是很难实现的。所以,温度梯度是不可避免的。超高压处理过程中热量的不均一取决于外在和内在的因素,如高压容器在处理前的温度、产品温度的均一性、保压时

间、高压容器的大小等等。

我们可通过以下几点来减少高压容器内的温度梯度:应用高的加压速率(>5MPa);容器应用热传递性质低的材料(小于1W/m/℃)或应用的材料的绝热温度高于或相等于样品。适合这种要求的有聚甲醛(POM)、聚醚醚酮(PEEK)或超高分子量的聚乙烯(UHMWPE)。这些材料能用于高压容器的衬垫或作为产品的包装容器;防止热量从样品损失给新进入的传压介质,为此可通过使用内在的增加剂体系产生压力,加热高压管道或高压泵,防止流入容器的液体与样品的热接触,可把样品插入到样品容器内,选取压致升温与样品相同的传压介质。

## 2 压致升温对微生物灭活的影响

压致升温对微生物芽孢的灭活有显著的影响。有报道称,在绝热容器内,嗜热芽孢杆菌(*B. stearothermophilus*)初始为 $10^{10}$ cfu/mL,经超高压处理,一次升压到700MPa,初始温度为90℃,处理时间为3min,减少10个数量级。若无绝热装置,同样条件下,只减少6个数量级。

而在不考虑传压介质的使用时,在827MPa、50℃的条件下,嗜热脂肪芽孢杆菌(*B. stearothermophilus*)的芽孢失活小于1个数量级。如果传压介质表现出高的压致升温,那么失活的数据就包含了热的效果。结合WHS7525,在827MPa、70℃下处理10min,大约有6.6个数量级减少。在同样条件下,使用其它两种溶液(WHS2575、WHS5050),大约有5~6个数量级的减少。而使用WSB9802溶液作为传压介质时,在前述的条件下处理,可观察到有8个数量级的芽孢失活。

压致升温即压力与温度的结合。有压力与温度的协同作用对芽孢杆菌芽孢的杀灭效果;还有报道称,在缓冲溶液中的嗜热芽孢杆菌的孢子经过700MPa、70℃处理3min,减少5个数量级,而在番茄酱的肉丸中的嗜热芽孢杆菌的孢子经过700MPa、90℃处理30s,至少减少4.5个数量级。地衣芽孢杆菌的芽孢悬浮在pH7.0的缓冲溶液中,经过600MPa、60℃、处理20min,芽孢被灭活,而在pH7.0的牛肉汤中,经过700MPa、70℃处理5min,使芽孢减少6个数量级。蜡状芽孢杆菌的芽孢在pH7.0的缓冲溶液中经过690MPa、60℃处理1min后,可使芽孢减少8个数量级,而在牛肉汤中的芽孢经过700MPa、70℃处理5min,可使芽孢减少5个数量级。同样地,枯草芽孢杆菌的芽孢在827MPa、102~107℃范围内处理,可使芽孢减少6个数量级。E型肉毒芽孢杆菌的芽孢在pH7.0缓冲液中,经过758MPa、50℃处理5min,可使芽孢减少4.5个数量级,而经过827MPa、40℃处理10min,可使芽孢减少5个数量级。A型肉毒芽孢杆菌的芽孢在pH7.0的蟹肉中,经过827MPa、75℃处理

20min,至少可使芽孢减少3个数量级。

不同的压力与温度组合所取得的杀菌效果差别很大。枯草杆菌等芽孢杆菌的孢子在常温下即使800MPa的高压也难完全杀灭,但升温至45~60℃,加压至600MPa即可杀灭<sup>[1]</sup>。Reddy等人使用827MPa与40℃对肉毒芽孢杆菌(在磷酸盐缓冲液中)处理10min,可使芽孢减少5个数量级。单独加热对嗜热芽孢杆菌芽孢没有明显的杀菌效果,但与超高压协同处理有明显的杀菌效果。有报道<sup>[2]</sup>称,使用700MPa与90℃对嗜热芽孢杆菌处理30s,可使芽孢减少4.5个数量级。Reddy和Palaniappan报道,在55℃和275~827MPa的范围下,对嗜热芽孢杆菌处理5min,能使芽孢减少3~8个数量级。

可见,压力和温度结合杀灭芽孢的作用不是简单的加和作用。温度在高压杀灭芽孢中扮演至关重要的角色。有研究报道<sup>[4]</sup>,在对嗜热芽孢杆菌芽孢的杀灭实验中,结果是200MPa、90℃、30min和350MPa、80℃、30min可以使初始为10<sup>6</sup>个/mL的芽孢减少2个数量级。而当温度降至70℃,就算压力增加到400MPa、45min也只能观察到很少的芽孢失活。

现在大多研究温度与压力的协同作用是使用水浴方法使物料在施压前或施压后进行加热,达到所需的实验温度。根据帕斯卡原理,压力与之同时发生的绝热升温是瞬时传递的、均一地通过样品的。因此,压致升温使物料温度均匀并且能减少处理时间。

### 3 小结

目前,国内对压致升温的研究还不多。压致升温对芽孢菌灭活规律的影响,压致升温致使容器内的温度变化和介质、食品与容器间的热传递、压力与温度如何组合能有效杀灭芽孢等有待进一步的研究。

#### 参考文献:

- [1] 李沛生, 阮征. 非热杀菌技术与应用[M]. 化学工业出版社, 2004, 9: 121~153.
- [2] Denys S, Van Loey, A M Hendrickx, Marc E. A modeling approach for evaluating process uniformity during batch high hydrostatic pressure processing: combination of a numerical heat transfer model and enzyme inactivation kinetics[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2000(1): 5~19.
- [3] Krebbers B. Combined high-pressure and thermal treatments for processing of tomato puree: evaluation of microbial inactivation and quality parameters [J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2003(4): 377~385.
- [4] Balasubramanian S, Balasubramanian V M. Compression heating influence of pressure transmitting fluids on bacteria inactivation during high pressure processing[J]. *Food Research International*, 2003, 36: 661~668.
- [5] Rasanayagam V, Balasubramanian V M, Ting E. Compression Heating of selected fatty food materials during high-pressure processing[J]. *Journal of Food Science*, 2003, 68(1): 254~259.
- [6] Ting E, Balasubramanian V M, Raghubeer E. Determining thermal effects in high-pressure processing [J]. *Food Technology*, 2002, 56(2): 31~34.
- [7] Kim Y S, Park S J, Cho Y H. Effects of combined treatment of high hydrostatic pressure and mild heat on the quality of carrot juice[J]. *Journal of Food Science*, 2001, 66(9): 1355~1360.
- [8] Otero L, Sanz PD. Modeling heat transfer in high pressure food processing: a review[J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2003(4): 121~134.
- [9] De Heij, W B C Moezelaar, R Hoogland H. High-Pressure Sterilization: Maximizing the benefits of adiabatic heating[J]. *Food Technology*, 2003, 57(3): 37~40.
- [10] Balasubramanian V M, Ting E Y, Stewart C M. Recommended laboratory practices for conducting high-pressure microbial inactivation experiments[J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2004(5): 299~306.
- [11] Chen H, Hoover D G. Modeling the combined effect of high hydrostatic pressure and mild heat on the inactivation kinetics of *Listeria monocytogenes* Scott A in whole milk [J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2003(4): 25~34.
- [12] Donsi G, Ferrari G, Maresca P. On the modeling of the inactivation kinetics of *Saccharomyces cerevisiae* by means of combined temperature and high pressure treatments [J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2003(4): 35~44.
- [13] Yen G C, Lin H T. Effects of high pressure and heat treatment on pectic substances and related characteristics in guava juice[J]. *Journal of Food Science*, 1998, 63(4): 684~687.
- [14] McKenna D R, Nanke, K E, Olson D G. The effects of irradiation, high hydrostatic pressure, and temperature during pressurization on the characteristics of cooked-reheated salmon and catfish fillets[J]. *Journal of Food Science*, 2003, 68(1): 68~377.
- [15] Makita T. Application of high pressure and thermophysical properties of water to biotechnology [J]. *Fluid Phase Equilibria*, 1992, 76: 87~95.
- [16] Boff J M, Truong TT, Min D B. Effect of thermal processing and carbon dioxide-assisted high-pressure processing on pectin methylesterase and chemical changes in orange juice[J]. *Journal of food science*, 2003, 68(4): 179~1184.

(下转第186页)

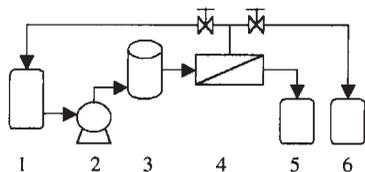


图5 UF 浓缩黄原胶发酵液流程图

1.进料罐,2.泵,3.缓冲罐,4.超滤,5.渗透液,6.浓缩液

$\text{NaNO}_3$ 、 $\text{NaCl}$ 、 $\text{CaCO}_3$  等无机盐及一定量的残糖成分和有机小分子物质。如果直接排放发酵废水,不仅会污染环境,同时也浪费了其中的可用物质。利用 RO 处理黄原胶发酵废水,可截得其中的有用物质加以利用,而透过水又可以循环回用到发酵工序,避免了环境污染与资源浪费<sup>[18]</sup>。

## 5 结束语

膜分离技术已经在食品添加剂的生产中得到了广泛应用,尤其是在料液的处理方面,如用 MF、UF、NF、RO 去除菌体、残糖、蛋白等杂质,澄清料液;利用 ED 实现料液的浓缩、精制和提纯等等,膜技术起到了及其重要的作用。在处理工业废水方面,膜技术的能力早已被公众所认可,现在在食品行业也已经得到了广泛的应用。

毋庸置疑,膜分离技术必将在未来我国食品工业发展中扮演着更加重要的角色。分离膜科学与食品科学方面的科技人员正在共同努力,致力于食品工业的高新加工技术,共同推进我国食品工业的继续发展。

## 参考文献:

- [1] 徐铜文主编.膜化学与技术教程[M].合肥:中国科学技术大学出版社,2003.143~193.
- [2] Shu-liang Li, Chun Li, Yuan-shuai Liu. Separation of L-glutamine from fermentation broth by nanofiltration[J]. Journal of Membrane Science, 2003, 222(1~2): 191~201.
- [3] 任建新主编.膜分离技术及其应用[M].北京:化学工业出版社,2003.438~439.
- [4] 刘茉娥,蔡邦肖,陈益棠.膜技术在污水治理及回用中的

应用[M].北京:化学工业出版社,2004.201~202.

- [5] 王焕章,赵亮.膜分离技术在味精行业废水治理中的应用[J].膜科学与技术,2000,20(4):62~64.
- [6] 周晓俭,林俊,张勇.厌氧发酵处理味精废水中氯离子的影响[J].水处理技术,1992,18(1):58~67.
- [7] 钱学玲,李道棠,朱章玉,等.电渗析法处理味精废水[J].上海交通大学学报,2000,34(11):1583~1585.
- [8] 顾觉奋,李丽燕,刘叶青,等.分离纯化工艺原理[M].北京:中国医药科技出版社,1996.317~320.
- [9] 严荣庆,李一通,马承继,等.超滤应用于维生素 C 提取工艺[J].中国医药工业杂志,1990,21(1):1~3.
- [10] 李春艳,方富林,夏海平,等.超滤膜分离技术在维生素 C 生产中的应用[J].膜科学与技术,2001,21(1):49~51.
- [11] 张林茂,高永涛,李晶.应用超滤技术改进 Vc 生产工艺[J].膜科学与技术,2000,20(5):60~61.
- [12] 王传怀,张国宝,吕希化.电渗析提取柠檬酸技术[J].膜科学与技术,1992,12(3):44~48.
- [13] Datta, Rathin (Chicago, IL), Bergemann, Eugene P (Hoffman Estates, IL). Process for producing of citric acid and monovalent citrate salts [P]. US Patent: 5,532,148, 1996-07-02.
- [14] G S Luo, X Y Shan, X Qi, Y C Lu. Two-phase electro-electrodialysis for recovery and concentration of citric acid[J]. Separation and Purification Technology, 2004, 38(3): 265~271.
- [15] Yang-Ming Lo, Shang-Tian Yang, David B Min. Ultrafiltration of Xanthan gum Fermentation Broth: Process and Economic Analyses[J]. Journal of Food Engineering, 1997, 31(2): 219~236.
- [16] 朱圣东,雷云周,董海宝,等.超滤-醇析提取黄原胶工艺条件[J].过程工程学报,2004,4(6):525~530.
- [17] Yang-Ming Lo, Shang-Tian Yang, David B Min. Kinetic and feasibility studies of Ultrafiltration of viscous Xanthan gum fermentation broth[J]. Journal of Membrane Science, 1996, 117(1~2): 237~249.
- [18] 朱圣东,雷云周,董海宝,等.反渗透处理黄原胶发酵废水的实验研究[J].过滤与分离,2002,12(1):12~13.

(上接第 182 页)

- [17] Stoforos N G, Crelier S, Robert M C. Kinetics of tomato pectin methylesterase inactivation by temperature and high pressure[J]. Journal of Food Science, 2002, 67(3): 1026~1031.
- [18] Ly-Nguyen B, Vanloey A M, Smout C. Mild-heat and high-pressure inactivation of carrot pectin methylesterase: a kinetic study[J]. Journal of Food Science, 2003, 68(4): 1377~1383.

- [19] Reddy N R, Solomon H M. Inactivation of Clostridium botulinum type E spores by high pressure processing[J]. Journal of Food Safety, 1999, 19: 277~288.
- [20] Balasubramaniam V M, Reddy N R, Palaniappan S. Inactivation of bacterial spores by high isostatic pressure processing, Research and Development Associates for Military Food and Packaging Systems[J]. Inc, Fall 97 Meeting, Philadelphia, 1997:28~30.