文章编号：1000-5773(2013)01-0147-06

温压结合超高压处理对芽孢杀灭作用的研究进展*

章　中[1,2,3]，胡小松[1,3]，廖小军[1,3]，张　燕[1,3]

(1.中国农业大学食品科学与营养工程学院，北京　100083；
2.宁夏大学农学院，宁夏银川　750021；
3.国家果蔬加工工程技术研究中心，北京　100083)

摘要：详细介绍了温压结合超高压杀菌技术的优点，指出其独特的应用优势，深入完整地综述了温压结合超高压处理对各类细菌芽孢的杀灭作用及动力学研究成果，并对温压结合超高压处理杀灭芽孢的机理做了初步总结。在此基础上，分析了该研究领域尚存在的问题，提出了未来的研究重点和方向。

关键词：温度；超高压；芽孢；高压杀菌

中图分类号：O521.9　　**文献标识码**：A

1　引　言

食品保藏是一个重要而普遍、古老而永恒的问题。造成食品腐败变质的一个重要原因就是微生物，因此通过杀菌可以达到保藏食品的效果。自1810年法国人阿培尔采用热杀菌技术保藏食品后，各种新的食品杀菌保藏技术不断涌现，如化学防腐剂杀菌、辐照杀菌等，但是因为这些新技术本身具有局限性，目前热杀菌仍是工业上最普遍使用的杀菌技术。然而热杀菌也存在一些难以克服的缺点，主要体现在对食品感官和营养品质的不利影响。近年来，人们对食品品质要求越来越高，希望尽可能在食品加工过程中保持食品原有的新鲜、感官和营养品质，同时科学技术飞速进步，两者共同推动了新型食品杀菌技术研究的发展，出现了如超高压杀菌技术、高压二氧化碳杀菌技术、高压脉冲电场杀菌技术、强磁场杀菌技术、超声杀菌技术等新型杀菌技术。其中，超高压杀菌技术是目前商业化应用程度较高的一种新型非热杀菌技术。

2　超高压杀菌技术

超高压杀菌技术只作用于对生物大分子立体结构有贡献的氢键、离子键和疏水键等非共价键，对维生素、色素和风味物质等小分子化合物的共价键无明显影响，使食品很好地保持了原有的营养、色泽和风味[1]。由于超高压技术显著提高食品品质，因此该技术被中国、日本、欧美等国家的许多企业广泛应用于加工高品质乳制品、大米制品、蔬果汁、果酱、蒜泥、火腿肠、海鲜水产等食品，超高压食品的销售量也快速增长。

超高压能很好地杀灭酵母菌、霉菌、病毒和细菌的营养体。大量研究表明，一般在300～700 MPa

* **收稿日期**：2011-08-25；**修回日期**：2011-10-19
基金项目：国家科技支撑计划项目(2011BAD05B05)；国家自然科学基金(30972067)
作者简介：章　中(1977－)，男，博士，讲师，主要从事果蔬加工、非热加工研究. E-mail：zhangzhong99@126.com
通讯作者：张　燕(1977－)，女，博士，副教授，主要从事非热加工技术理论与应用研究.
E-mail：zhangyan-348@hotmail.com

压力下，非芽孢类微生物可被杀死[2]。但是，由于细菌的芽孢极其耐压[3]，芽孢会萌发、生长进而导致食品腐败，因此虽然超高压技术能很好地应用于高酸食品的杀菌和保藏，然而对于低酸食品，超高压处理后必须进行冷藏以防止芽孢萌发而导致食品腐败变质，这给超高压食品的贮藏和运输带来很多不便，这也是超高压技术最大的不足之处。为了克服该缺点，彻底杀灭细菌芽孢，超高压技术必须与其它杀菌技术结合使用，如热处理、添加化学防腐剂等。

美国 Natick 陆军士兵系统中心组织了一个由大学、科研机构、超高压装备企业、大型食品加工企业组成的研究联盟，投资近千万美元，耗时 7 年，成功开发出针对低酸食品的温压结合高压杀菌（High Pressure Thermal Sterilization，HPTS）技术。2009 年，美国食品药物管理局批准了 HPTS 用于低酸食品杀菌。目前，HPTS 已通过了美国国家食品安全与技术中心和美国 DUST（Dual Use Science and Technology）联盟成员严格的验证程序和安全评估。

3 HPTS 技术

热力杀菌时，温度越高、时间越长，食品品质受损越大。据研究，温度每升高 10 ℃，食品的营养和感官品质的破坏速度就增加 2～3 倍，因此降低杀菌温度能大大保护食品品质。HPTS 所采用的温度通常为 50～80 ℃，与巴氏杀菌温度相近，比传统的高温高压杀菌所用的温度低得多，远远低于超高温杀菌所用的温度，而且 HPTS 所用的时间大大少于巴氏杀菌所用时间，可以说 HPTS 对食品营养和感官品质的影响远低于传统热力杀菌方法。大量实验发现，使用 HPTS 加工的鲜切蔬菜（如白菜花、胡萝卜、白萝卜、彩椒、藕、莴笋、绿菜花、冬瓜等）的营养和感官品质远高于采用热杀菌的对照样品。归纳起来，HPTS 技术具有以下优点：(1) 与传统高温热杀菌相比，HPTS 能很好地保持食品原有的色、香、味、营养素和功能性成分；(2) 瞬时压缩，作用均匀，时间短，操作安全，杀菌效果好；(3) 能使各种各样的低酸食品在常温下长期保存，在低酸食品的常温保藏上具有独特的应用优势；(4) 纯物理杀菌过程，不添加防腐剂；(5) HPTS 使用电力，对环境污染小，洁净环保；(6) HPTS 在保压杀菌期间，基本不需要电力，能耗较低。基于以上优势，HPTS 受到了人们的广泛关注。关于 HPTS 杀灭细菌芽孢的研究报道较多，但多集中在杀灭效果和动力学研究上。

3.1 HPTS 对细菌芽孢的杀灭效果

1996 年，Roberts 等人[4]发现 70 ℃、400 MPa 能有效杀灭嗜热脂肪芽孢杆菌芽孢，并且芽孢在常压下的耐热性与芽孢在高压下的耐热性无关。1998 年，Mills 等人[5]发现 400 MPa、60 ℃、30 min 能有效杀灭芽孢。1999 年，Reddy 等人[6]发现 827 MPa、55 ℃、5 min 能杀灭约 5 个对数的肉毒杆菌芽孢。2000 年，Stewart 等人[7]发现 404 MPa、70 ℃、15 min 能杀灭约 5 个对数的枯草杆菌芽孢，而在室温下几乎没有任何杀灭效果。2000 年，Okazaki 等人[8]发现 HPTS 对不同菌种芽孢的杀灭效果是不一样的。2001 年，Ananta 等人[9]发现高压结合中温能有效杀灭嗜热脂肪芽孢杆菌 ATCC 7953 芽孢。2002 年，Lee 等人[10]发现高压结合中温（45、71 或 90 ℃）能成功杀死苹果汁中的酸土脂环酸芽孢杆菌芽孢。2003 年，Reddy 等人[11]研究发现 HPTS 能有效杀灭蟹肉棒中的肉毒杆菌芽孢，且压力越高、温度越高或时间越长，杀灭效果越好。2006 年，Lee 等人[12]发现 HPTS 能有效杀灭苹果汁中的酸土脂环酸芽孢杆菌芽孢，且苹果汁浓度会影响杀灭效果。2006 年，Scurrah 等人[13]发现 HPTS 对不同菌种和菌株芽孢的杀灭效果差异较大。2006 年，Reddy 等人[14]发现，当温度为 75 ℃时，超高压能很好地杀灭蟹肉和磷酸缓冲液中多种肉毒杆菌菌株的芽孢。2006 年，Gao 等人[15]发现，压力、温度和时间是杀灭芽孢的 3 个关键因素。2007 年，Estrada-Girón 等人[16]发现压力、温度和时间的组合在 550～620 MPa、70～90 ℃、2 s～15 min 范围内时，能有效杀灭豆奶中的嗜热脂肪芽孢杆菌芽孢。2007 年，高瑀珑等人[17]研究了 HPTS 对枯草芽孢杆菌与嗜热脂肪芽孢杆菌芽孢的影响，结果表明 HPTS 能够破坏芽孢结构，显著提高芽孢 2,6-吡啶二羧酸（Dipicolinic Acid，DPA）的泄漏率（$P<0.05$），而 DPA 与芽孢 DNA 的稳定性有关。2008 年，Robertson 等人[18]发现 600 MPa、75 ℃、60 s 能有效杀灭复原脱脂乳中的细菌芽孢，以硅油为传压介质时的杀菌效果比以水为传压介质时好。2008 年，黄娟等人[19]初步研究了 HPTS 的

升压过程对凝结芽孢杆菌、嗜热脂肪芽孢杆菌芽孢失活、发芽、损伤的影响，发现压力与热力的协同作用显著，热是造成芽孢损伤的一个重要因素。2008 年，Ju 等人[20]研究了 HPTS（400～600 MPa、60～80 ℃、10～20 min）杀灭牛奶中蜡样芽孢杆菌芽孢的效果，通过响应面法分析，发现杀灭 6 个对数芽孢的最佳条件为：540 MPa、71 ℃、16.8 min。2009 年，武玉艳等人[21]研究了 HPTS 对不同介质中嗜热脂肪芽孢杆菌芽孢灭活的影响，结果表明，嗜热脂肪芽孢杆菌芽孢在不同介质中的失活率依次为：牛乳＞磷酸缓冲液＞鸡腿菇＞卤牛肉。2009 年，Bull 等人[22]研究发现，对于不同的菌种及菌株，热和压力的协同作用是不同的。2010 年，Wang 等人[23]发现凝结芽孢杆菌和嗜热脂肪芽孢杆菌在鸡腿菇中对 HPTS 的抗性比其在磷酸缓冲液中的抗性要高，且嗜热脂肪芽孢杆菌芽孢的抗性比凝结芽孢杆菌芽孢高。2010 年，Gao 等人[24-25]发现食品成分（如大豆蛋白、蔗糖）和食品基质 pH 值能显著影响嗜热脂肪芽孢杆菌和蜡样芽孢杆菌对 HPTS 的抗性。2011 年，Minh 等人[26]报道了枯草杆菌芽孢的形成条件对其芽孢性质的显著影响，包括芽孢对热处理和高压处理的抗性。

3.2 HPTS 对细菌芽孢的杀灭动力学

2001 年，Ananta 等人[9]用一个 n 级数学动力学模型精确描述了 HPTS 杀灭细菌芽孢的曲线。2004 年，Cléry-Barraud 等人[27]发现 HPTS 能彻底杀灭炭疽杆菌芽孢，当压力为 500 MPa、温度为 75 ℃时，D 值（指在一定处理环境中及一定致死压力和温度条件下某细菌数群中每杀死 90％原有残存活菌数时所需要的时间）约为 4 min。2004 年，Rodriguez 等人[28]在经典热力学和动力学原理基础上建立了一个预测 HPTS 下芽孢死亡规律的模型。2006 年，Gao 等人[29]使用响应面法研究了 HPTS 杀灭芽孢的效果，建立了描述灭菌规律的二次方程式。2007 年，Gao 等人[30]还研究了食品组分和 pH 值对 HPTS 杀灭枯草杆菌芽孢的影响，建立了二次预测模型。2008 年，Zhu 等人[31]研究了 HPTS 杀灭生芽孢梭状芽孢杆菌 PA3679 芽孢的动力学，当压力为 700～900 MPa、温度为 80 ℃时，得到的 D 值为 15.8～7.0 min，此外还建立了回归模型以预测 D 值。为了更精确地研究 HPTS 杀灭芽孢的动力学，2009 年 Shao 等人[32]使用了聚甲醛保温桶以保持温度稳定性，获得了更精确的芽孢死亡动力学数据。2009 年，王标诗等人[33]研究了 HPTS 对嗜热脂肪芽孢杆菌芽孢在磷酸缓冲液和牛奶中灭活的动力学规律，结果表明在 3 种拟合模型（线性、Weibull、Log-logistic 模型）中，线性模型不适合模拟这些存活曲线，而 Log-logistic 模型能最好地模拟存活曲线。2009 年，Wang 等人[34]研究了 HPTS 对凝结芽孢杆菌芽孢的杀灭动力学，发现芽孢残存曲线均存在拖尾现象，Log-logistic 模型对所有残存曲线的拟合效果最好；此外他们[23]还研究了嗜热脂肪芽孢杆菌芽孢和凝结芽孢杆菌芽孢对 HPTS 的抗性，发现 Log-logistic 模型对芽孢残存曲线的拟合效果最好。2010 年，Ramaswamy 等人[35]发现：用一级模型能很好地描绘处理时间对 HPTS 杀灭生芽孢梭状芽孢杆菌芽孢效果的影响；900 MPa、80 ℃时，D 值为 16.5 min；在 700、800 和 900 MPa 下，温度校正后 Z_T 值（灭菌时间减少到原来的 1/10 所需升高的温度）分别为 16.5、16.9 和 18.2 ℃；同样在 80 ℃时，校正的 Z_p 值（灭菌时间减少到原来的 1/10 所需升高的压力）为 714 MPa。2011 年，Olivier 等人[36]报道了在温压结合超高压杀菌过程中热与高压有很强的杀灭芽孢的协同作用，并首次将 F 值（在一定杀菌压力和温度下，杀死一定浓度的某种微生物所需时间）用于全面定量地确定 HPTS 杀灭芽孢的效果。

3.3 HPTS 杀灭细菌芽孢的机理

关于 HPTS 杀灭细菌芽孢机理的研究报道不多。2006 年，曾庆梅等人[37]研究了 HPTS 对枯草杆菌芽孢超微结构的影响，采用透射电子显微镜进行观察，发现处理后芽孢外壳被破坏、出现缺口，芽孢内含物结构紊乱、泄漏、出现部分透电子区，甚至内含物质完全泄漏，出现细胞壁或孢子外壳残留。2008 年，刘洁等人[38]采用中温协同超高压方法研究了连续式施压和间歇式施压两种不同方式对枯草杆菌芽孢的灭活作用，结果表明间歇施压能更有效地杀灭芽孢，经扫描电镜观察，芽孢外壳出现凹陷、皱褶等形态变化。

HPTS 对细菌芽孢的良好杀灭作用已得到公认，但关于 HPTS 杀灭芽孢的机理，目前远不够清楚。有人认为 HPTS 杀灭芽孢的过程包括两个阶段：第 1 阶段，超高压和热处理产生亚致死损伤芽孢；第 2

阶段，较温和的热处理使其失活。HPTS 灭活芽孢的机理可能涉及：改变芽孢蛋白理化性质；改变芽孢内膜通透性，使水分进入芽孢核心而重新水合；压力导致芽孢扁平挤压或拉伸等[27]。2007 年，Mathys 等人[39]使用流式细胞仪研究了 HPTS 对地衣芽孢杆菌芽孢的杀灭机理，采用 SYTO16 和碘化吡啶对杀菌处理后的芽孢进行染色，研究芽孢内膜变化，提出了一种包含 3 个步骤的 HPTS 杀灭芽孢机制，依次为芽孢皮层水解和芽孢萌发、一个未知步骤、芽孢内膜破坏导致芽孢失活。2009 年，Mathys 等人[40]又使用一种新的分析方法来进一步研究 HPTS 杀灭芽孢的机制。2011 年，Vercammen 等人[41]发现在 600～800 MPa 下，芽孢的萌发与温度关系极大，当温度为 60 ℃ 时，大多数萌发的芽孢被杀死。2011 年，Reineke 等人[42]通过研究芽孢特有物质 DPA 的释放和芽孢热敏感性的增加情况，认为 HPTS 杀灭芽孢的机制涉及休眠、激活、杀灭这 3 个生理步骤。

4 结论与展望

HPTS 优点鲜明，已成功应用于工业化生产，应用前景非常广阔。然而，目前对其杀灭芽孢机理的研究却鲜有报道，已有研究大多停留在用扫描电镜或透射电镜观察芽孢形态和结构变化、观察 DPA 的释放情况及用荧光分光光度计或流式细胞仪观察芽孢内膜流动性和通透性变化的层次上，到目前为止几乎没有关于 HPTS 对芽孢 DNA 和蛋白质(特别是小分子酸溶性蛋白)影响的报道。人们对于 HPTS 杀灭芽孢的机理仍不够清楚，这妨碍了 HPTS 在食品工业中的大规模应用。对 HPTS 杀灭芽孢机理的深入研究已成为迫切需要解决的关键科技问题，也是 HPTS 科学研究发展的大趋势。

References:

[1] Oey I, Lille M, Loey A V. Effect of high-pressure processing on colour, texture and flavour of fruit- and vegetable-based food products: A review [J]. Trends Food Sci Tech, 2008, 19(6): 320-328.

[2] Ludwig H, van Almsick G, Sojka B. High pressure inactivation of microorganisms [J]. Prog Biotechnol, 1996, 13: 237-244.

[3] Alpas H, Kalchayanand N, Bozoglu F, et al. Interactions of high hydrostatic pressure, pressurization temperature and pH on death and injury of pressure-resistant and pressure-sensitive strains of food borne pathogens [J]. Food Microbiol, 2000, 60(1): 33-42.

[4] Roberts C M, Hoover D G. Sensitivity of *Bacillus coagulans* spores to combinations of high hydrostatic pressure, heat, acidity and nisin [J]. J Appl Bacteriol, 1996, 81(4): 363-368.

[5] Mills G, Earnshaw R, Patterson M F. Effects of high hydrostatic pressure on *Clostridium sporogenes* spores [J]. Lett Appl Microbiol, 1998, 26(3): 227-230.

[6] Reddy N R, Solomon H M, Fingerhut G A, et al. Inactivation of *Clostridium botulinum* type E spores by high pressure processing [J]. J food Safety, 1999, 19(4): 277-288.

[7] Stewart C M, Dunne C P, Sikes A, et al. Sensitivity of spores of *Bacillus subtilis* and *Clostridium sporogenes* PA3679 to combinations of high hydrostatic pressure and other processing parameters [J]. Innovat Food Sci Emerg Tech, 2000, 1(1): 49-56.

[8] Okazaki T, Kakugawa K, Yoneda T, et al. Inactivation behavior of heat-resistant bacterial spores by thermal treatments combined with high hydrostatic pressure [J]. Food Sci Tech Res, 2000, 6(3): 204-207.

[9] Ananta E, Heinz V, Schluter O, et al. Kinetic studies on high-pressure inactivation of *Bacillus stearothermophilus* spores suspended in food matrices [J]. Innovat Food Sci Emerg Tech, 2001, 2(4): 261-272.

[10] Lee S Y, Dougherty R H, Kang D H. Inhibitory effects of high pressure and heat on *Alicyclobacillus acidoterrestris* spores in apple juice [J]. Appl Environ Microb, 2002, 68(8): 4158-4161.

[11] Reddy N R, Solomon H M, Tetzloff R C, et al. Inactivation of *Clostridium botulinum* type A spores by high-pressure processing at elevated temperatures [J]. J Food Prot, 2003, 66(8): 1402-1407.

[12] Lee S Y, Chung H J, Kang D H. Combined treatment of high pressure and heat on killing spores of *Alicyclobacillus acidoterrestris* in apple juice concentrate [J]. J Food Prot, 2006, 69(5): 1056-1060.

[13] Scurrah K J,Robertson R E,Craven H M,et al. Inactivation of *Bacillus* spores in reconstituted skim milk by combined high pressure and heat treatment [J]. J Appl Microbiol,2006,101(1):172-180.

[14] Reddy N R,Tetzloff R C,Solomon H M,et al. Inactivation of *Clostridium botulinum* nonproteolytic type B spores by high pressure processing at moderate to elevated high temperatures [J]. Innovat Food Sci Emerg Tech,2006,7(3):169-175.

[15] Gao Y L,Ju X R,Jiang H H. Studies on inactivation of *Bacillus subtilis* spores by high hydrostatic pressure and heat using design of experiments [J]. J Food Eng,2006,77(3):672-679.

[16] Estrada-Girón Y,Guerrero-Beltrán J A,Swanson B G,et al. Effect of high hydrostatic pressure on spores of *Geobacillus stearothermophilus* suspended in soymilk [J]. J Food Process Pres,2007,31(5):546-558.

[17] Gao Y L,Ju X R,Wu D. Study on synergetic killing effects of mild heat treatment and high hydrostatic pressure on *Bacillus* spores [J]. Food Science,2007,28(3):59-63. (in Chinese)
高瑀珑,鞠兴荣,吴　定. 微热协同超高压处理杀灭芽孢杆菌芽孢效果的研究 [J]. 食品科学,2007,28(3):59-63.

[18] Robertson R E,Carroll T,Pearce L E. *Bacillus* spore inactivation differences after combined mild temperature and high pressure processing using two pressurizing fluids [J]. J Food Prot,2008,71(6):1186-1192.

[19] Huang J,Li B S,Wang B S,et al. Effects of pressure increasing process of high-hydrostatic pressure-assisted thermal processing on two *Bacillus* spores [J]. Food Science,2008,29(6):90-95. (in Chinese)
黄　娟,李汴生,王标诗,等. 高静压协同热处理的升压过程对两种细菌芽孢的作用 [J]. 食品科学,2008,29(6):90-95.

[20] Ju X R,Gao Y L,Yao M L,et al. Response of *Bacillus cereus* spores to high hydrostatic pressure and moderate heat [J]. LWT-Food Sci Tech,2008,41(10):2104-2112.

[21] Wu Y Y,Li B S,Ruan Z,et al. Inactivation effect of high pressure combined heating on *Bacillus stearothermophilus* spores in different medium [J]. Food and Fermentation Industries,2009,35(4):5-9. (in Chinese)
武玉艳,李汴生,阮　征,等. 热协同超高压对不同介质中嗜热脂肪芽孢杆菌芽孢的灭活作用 [J]. 食品与发酵工业,2009,35(4):5-9.

[22] Bull M K,Olivier S A,van Diepenbeek R J,et al. Synergistic inactivation of spores of proteolytic *Clostridium botulinum* strains by high pressure and heat is strain and product dependent [J]. Appl Environ Microb,2009,75(2):434-445.

[23] Wang B S,Li B S,Zeng Q X,et al. Inactivation effects of coprinus comatus inoculated with bacterial spores by high-pressure thermal processing [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics,2010,24(2):136-142. (in Chinese)
王标诗,李汴生,曾庆孝,等. 热压协同处理对接种于鸡腿菇中的细菌芽孢灭活效果的影响 [J]. 高压物理学报,2010,24(2):136-142.

[24] Gao Y L. Efficacy of high hydrostatic pressure and mild heat to reduce *Geobacillus stearothermophilus* AS 1.1923 spores in model food systems [J]. J food Safety,2010,30(1):124-140.

[25] Gao Y L,Ju X R. Modelling the effects of food ingredients and pH on high-pressure processing inactivation of *Bacillus cereus* spores:A laboratorial study [J]. Int J Food Sci Tech,2010,45(9):1862-1869.

[26] Minh H N,Durand A,Loison P,et al. Effect of sporulation conditions on the resistance of *Bacillus subtilis* spores to heat and high pressure [J]. Appl Microbiol Biotechnol,2011,90(4):1409-1417.

[27] Cléry-Barraud C,Gaubert A,Masson P,et al. Combined effects of high hydrostatic pressure and temperature for inactivation of *Bacillus anthracis* spores [J]. Appl Environ Microb,2004,70(1):635-637.

[28] Rodriguez A C,Larkin J W,Dunn J,et al. Model of the inactivation of bacterial spores by moist heat and high pressure [J]. J Food Sci,2004,69(8):E367-E373.

[29] Gao Y L,Ju X R,Jiang H H. Analysis of reduction of *Geobacillus stearothermophilus* spores treated with high hydrostatic pressure and mild heat in milk buffer [J]. J Biotechnol,2006,125(3):351-360.

[30] Gao Y L,Ju X R. Statistical prediction of effects of food composition on reduction of *Bacillus subtilis* As 1.1731 spores suspended in food matrices treated with high pressure [J]. J Food Eng,2007,82(1):68-76.

[31] Zhu S,Naim F,Marcotte M,et al. High-pressure destruction kinetics of *Clostridium sporogenes* spores in ground beef at elevated temperatures [J]. Int J Food Microbiol,2008,126:86-92.

[32] Shao Y,Zhu S,Ramaswamy H,et al. Compression heating and temperature control for high-pressure destruction of

bacterial spores: An experimental method for kinetics evaluation [J]. Food Bioprocess Tech, 2010, 3(1): 71-78.

[33] Wang B S, Li B S, Zeng Q X, et al. Inactivation kinetics of *Bacillus stearothermophilus* spore by pressure-thermal processing [J]. Science and Technology of Food Industry, 2009, 30(5): 112-115. (in Chinese)
王标诗, 李汴生, 曾庆孝, 等. 热压协同对嗜热脂肪芽孢杆菌芽孢灭活动力学的研究 [J]. 食品工业科技, 2009, 30(5): 112-115.

[34] Wang B S, Li B S, Zeng Q X, et al. Inactivation kinetics and reduction of *Bacillus coagulans* spore by the combination of high pressure and moderate heat [J]. J Food Process Eng, 2009, 32(5): 692-708.

[35] Ramaswamy H S, Shao Y, Zhu S. High-pressure destruction kinetics of *Clostridium sporogenes* ATCC 11437 spores in milk at elevated quasi-isothermal conditions [J]. J Food Eng, 2010, 96(2): 249-257.

[36] Olivier S A, Bull M K, Stone G, et al. Strong and consistently synergistic inactivation of spores of spoilage-associated *Bacillus* and *Geobacillus* spp. by high pressure and heat compared with inactivation by heat alone [J]. Appl Environ Microb, 2011, 77(7): 2317-2324.

[37] Zeng Q M, Xie H M, Pan J, et al. Effect of ultra-high pressure processing (UHPP) on the microstructure of *Bacillus subtilis* [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2006, 20(1): 83-87. (in Chinese)
曾庆梅, 谢慧明, 潘 见, 等. 超高压处理对枯草芽孢杆菌超微结构的影响 [J]. 高压物理学报, 2006, 20(1): 83-87.

[38] Liu J, Lin Y, Wu X Y, et al. Effects of high-hydrostatic pressure on inactivation of *Bacillus subtilis* spores [J]. Industrial Microbiology, 2008, 38(4): 35-39. (in Chinese)
刘 洁, 林 影, 吴晓英, 等. 高静压对枯草杆菌芽孢灭活作用的研究 [J]. 工业微生物, 2008, 38(4): 35-39.

[39] Mathys A, Chapman B, Bull M, et al. Flow cytometric assessment of *Bacillus* spore response to high pressure and heat [J]. Innovat Food Sci Emerg Tech, 2007, 8(4): 519-527.

[40] Mathys A, Reineke K, Heinz V, et al. High pressure thermal sterilization-development and application of temperature controlled spore inactivation studies [J]. High Pressure Res, 2009, 29(1): 3-7.

[41] Vercammen A, Vivijs B, Lurquin I, et al. Germination and inactivation of *Bacillus coagulans* and *Alicyclobacillus acidoterrestris* spores by high hydrostatic pressure treatment in buffer and tomato sauce [J]. Int J Food Microbiol, 2012, 152(3): 162-167.

[42] Reineke K, Mathys A, Knorr D. The impact of high pressure and temperature on bacterial spores: Inactivation mechanisms of *Bacillus subtilis* above 500 MPa [J]. J Food Sci, 2011, 76(3): 189-197.

Review on Sterilization Effects of High Pressure Thermal Sterilization on Bacterial Spores

ZHANG Zhong[1,2,3], HU Xiao-Song[1,3], LIAO Xiao-Jun[1,3], ZHANG Yan[1,3]

(1. *College of Food Science and Nutritional Engineering, China Agricultural University, Beijing* 100083, *China*;
2. *Agricultural College of Ningxia University, Yinchuan* 750021, *China*;
3. *National Engineering Research Center for Fruits and Vegetables Processing, Beijing* 100083, *China*)

Abstract: This review introduces in detail the advantages and applications of high pressure thermal sterilization. The latest research results on the sterilization effects and kinetics of various bacterial spores by this technology are described deeply and comprehensively, and the sterilization mechanism is also preliminarily summarized. Furthermore, this review analyzes the remaining problems and points out the future research direction in field of high pressure thermal sterilization.

Key words: temperature; high hydrostatic pressure; spore; high pressure sterilization