

快捷食品真空冷却的对比实验研究

金听祥 张海川

(郑州轻工业学院 机电工程学院 河南 郑州 450002)

摘 要 真空冷却是一种快速有效的冷却方法。通过真空冷却实验研究,讨论了蔬菜与其半成品真空冷却的异同,并对其影响因素进行了分析。结果发现,西葫芦表皮质硬,水分不易蒸发,不适合真空冷却;韭菜叶部较根部比表面积大、冷却速率大,快捷食品汤料含量比较多,水分易于蒸发,冷却速率比较快,为了防止产品温度低于 0℃,应控制最佳冷却时间。韭菜 538 g、炒西葫芦 628 g、韭菜鸡蛋 547 g 的最佳冷却时间分别为 19 min、8 min、7 min。

关键词 快捷食品;真空冷却;冷却速率;最佳冷却时间

中图分类号:TS205.7

文献标识码:A

文章编号:1006-7086(2008)04-0240-05

THE CONTRASTIVE RESEARCH OF READY MEALS ON VACUUM COOLING

JIN Ting-xiang, ZHANG Hai-chuan

(School of Mechanical & Electricity Engineering, Zhengzhou Institute
of Light Industry, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: Vacuum cooling is a rapid effective cooling method. In this paper, the differences between the vegetable and pre-cooked meals were discussed and the influence factors on the cooling rate were analyzed during vacuum cooling. The experimental results show that cocozelle is not suit to vacuum cooling because of rigid surface structure impeded the moisture evaporation; the specific surface and evaporation rate of the leaf of the leek is more than the root; the high soup content of ready meals, lead to the fast evaporation rate, in order to ensure the temperature of the products above 0℃, should control the optimum cooling time; the optimum cooling time of the leek at the mass of 538 g, fry-cocozelle at the mass of 628 g, leek-eggs at the mass of 547 g are 19 minute, 8 minute, 7 minute separately.

Key words: ready meals; vacuum cooling; evaporation rate; the best cooling time

1 引 言

目前国内快捷食品生产过程中普遍采用自然冷却,产品需要长时间暴露在空气中,很容易受到微生物的污染,限制了大规模工业化生产。因此,在生产过程中需要对采用新型的快速冷却方法进行研究。

真空冷却是一种快速有效的冷却技术,在五十年前就已经应用到莴苣、蘑菇、切花等园艺产品的预冷,近几年来,又被应用于肉类及其制品的冷却。真空冷却的快速降温,可以使产品温度快速通过微生物最容易繁殖的危险温度范围 20~60℃,减少微生物繁殖、降低污染,从而延长保鲜期。在发达国家,真空冷却已经广泛应用于食品生产中。

2 实验装置与过程

2.1 真空冷却原理

真空冷却是把被冷却物品放在真空冷却室内,利用真空泵抽除真空室内空气,物品内部水分在低压状态

收稿日期:2008-09-19.

基金项目:河南省基础与前沿技术研究项目(072300440140)、河南省自然科学基金基础研究项目(2008A470013)、郑州轻工业学院科研基金资助项目(2006XYJJ07)、郑州市重大科技攻关项目(08ZGBN13054)资助。

作者简介:金听祥(1976—),男,河南省洛阳市人,副教授,博士后,从事食品真空冷却冷藏以及食品冷却保鲜研究。

下蒸发,在吸收自身热量的同时,使物品内能减少和温度降低的一种冷却方式。水分蒸发温度随周围的环境压力而改变。在一个大气压条件下,水的沸点为 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$,随着压力降低,其沸点也降低。而当压力降低到 613.28 Pa 时,水的沸点为 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$,即在此压力下,水在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时即开始沸腾蒸发(又称汽化)变为水蒸气^[1]。

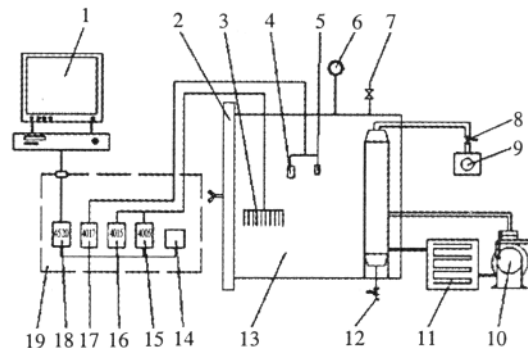


图1 食品真空冷却过程中的水分蒸发

通常认为真空冷却过程中产品内部的水分蒸发途径有两类:第一类是水分在重力势能、毛细管作用力或化学势能梯度力作用下,沿着产品内部的空隙通道进行迁移,一般认为水分在内部空隙通道的迁移是在液态下进行的,直到产品的表面才开始蒸发(如图1a所示);第二类是在压力梯度作用下,由于压力波动引起温度的变化,在产品内部引起水分蒸发或者沸腾后所产生的水蒸气的移动(如图1b所示)。在这个阶段,产品中的水分是以气态方式进行迁移的^[2-6]。

2.2 实验装置

真空冷却设备尺寸和形状根据实际应用需求而定。但真空冷却系统基本上都由真空室、真空抽气系统、制冷系统和控制系统组成(如图2所示)^[7,8]。真空室容积为 0.2 m^3 ,由 $1\text{Cr}18\text{Ni}9\text{Ti}$ 不锈钢板焊接而成,外用方槽钢加强(内壁经抛光处理)。真空泵采用欧瑞康莱宝 SOGEVAC 系列 SV25B 单级油封旋片真空泵,极限压力小于 50 Pa ,抽速 $22.5\text{ m}^3/\text{h}$ (6.25 L/s)。针对真空预冷过程中的压力控制、温度和湿度控制,数据采集处理系统可以对真空室内压力、温度和湿度进行实时测试。数据采集处理系统主要是由数据采集中央控制器和数据采集扩展盒组成。湿度模块为 S302H3K 型高分子湿敏电容式湿度传感器。压力传感器为 CPCA~130 Z 型电容薄膜式绝对压力变送器。温度传感器为 A 级铂电阻温度计,允许偏差 $\Delta T\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为 $\pm(0.150+0.002\text{ }T)$,“ T ”为感温元件实测温度绝对值。



1.计算机;2.真空室门;3.温度传感器;4.压力传感器;5.湿度传感器;6.真空表;7.充气阀;8.真空阀;9.真空泵;10.压缩机;11.冷凝器;
12.放水阀;13.真空室;14.开关电源;15.热电阻 A/D 专用模块 2;16.热电阻 A/D 专用模块 1;
17. A/D 模块;18.接口转换模块;19.电器箱。

图2 VAC-0.2 真空冷却系统示意图

2.3 实验材料与方法

实验材料选取韭菜、西葫芦,分别对常温的韭菜、西葫芦和烹饪好的高温韭菜鸡蛋、炒西葫芦进行冷却。物品不与真空室底部接触,韭菜、西葫芦摆放在隔板上,与底部隔开;韭菜鸡蛋、炒西葫芦盘装放在隔板上。将热电阻探头合理布置在物品中心处(5.0 cm)和表面处(2.5 cm),每处放置 3 个热电阻取其平均温度。真空室内设定压力为 $650\sim 700\text{ Pa}$ 。

实验过程:首先检查设备和测试系统是否处于正常状态,把控制开关全部放到自动档,打开电源,启动系统,开启计算机测试程序开始测试采集。从计算机屏幕观察物品各点参数的变化,冷却结束时停止系统,并打

开放气阀,压力恢复至常压后打开真空室门,停止数据采集,实验结束。

3 结果及分析

3.1 冷却速率

真空冷却的物品中心温度的变化主要受热传导和水蒸发速率的影响。水蒸发的显热相对较小,真空冷却速率简化式如下^[9]

$$\frac{dT}{d\tau} = \frac{\lambda_e A_s}{bmc} (T_c - T_s) + \frac{h_w A_e I_{fg}}{mc} (p_s - p_a) \quad (1)$$

式中 T 为温度($^{\circ}\text{C}$) τ 为冷却时间(s) λ_e 为热传导率($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) A_s 为表面积(m^2) b 为厚度(m) m 为质量(kg) c 为比热容($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) T_c 为中心温度($^{\circ}\text{C}$) T_s 为表面温度($^{\circ}\text{C}$) h_w 为水传热系数($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$) A_e 为有效面积(m^2) I_{fg} 为汽化潜热($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$) p_s 为表面压力(Pa) p_a 为冷却介质压力(Pa)。

水蒸发在真空冷却过程中是影响冷却速率的主要因素。式(1)中第 2 部分与第 1 部分的比一般在 8~16 左右。这说明水分蒸发作用在真空冷却的速率中占主导作用,同时说明了真空冷却速率要比其他冷却方式的冷却速率快得多的原因。

3.2 质量损失

真空冷却由于依靠水分蒸发而冷却,所以质量损耗比其他冷却方法要大。真空冷却的物品质量损耗可用下式估算^[2]

$$\Delta m = \frac{mC\Delta T}{I_{fg}} \quad (2)$$

式中 Δm 为质量损耗(kg) C 为物料比热容($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}$) m 为真空冷却前物料的质量(kg) ΔT 为物料真空冷却前后温差($^{\circ}\text{C}$) I_{fg} 为水汽化潜热($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$)。

3.3 实验分析

图 3 显示了真空冷却过程中西葫芦、炒西葫芦、韭菜、韭菜鸡蛋的真空压力变化过程。可以看出,真空室从大气压开始抽气,西葫芦经过 5 min 压力降到 658 Pa,炒西葫芦经过 4 min 压力降到 657 Pa,韭菜经过 5 min 降到 657 Pa,韭菜鸡蛋 4.5 min 降到 700 Pa。真空室压力稳定在设定的压力范围内变化,趋于平衡。当压力低于或者等于产品温度对应的饱和压力时,产品中的水分将会沸腾,水分的沸腾蒸发将产生冷却效应,致使产品温度降低。随着产品温度的快速降低,产品与真空室内的压差也在变小,水分蒸发的速率将会变慢。

图 4 显示了真空冷却过程中炒西葫芦、韭菜鸡蛋的相对湿度变化过程。真空室内相对湿度变化:当真空泵开启到产品达到闪点之前,相对湿度下降,达到产品闪点后,相对湿度开始上升,随着抽气的进行,相对湿度开始下降,下降趋势与压力变化趋势相关。原则上真空室内相对湿度都应该上升到并保持在 100% 一段时间,但由于产品水分蒸发速率与蒸发量以及真空室容积的不同,真空室内相对湿度并非都能达到 100%。

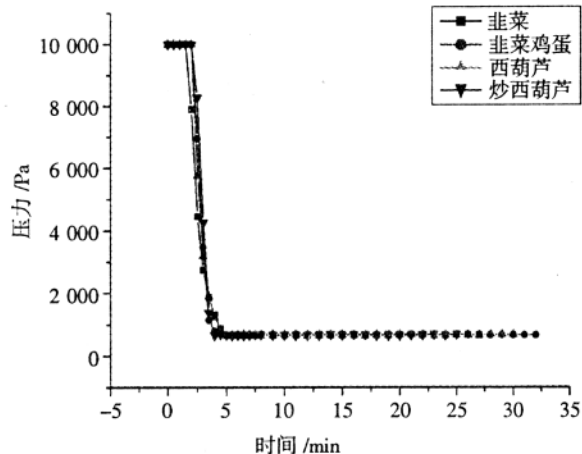


图 3 西葫芦、炒西葫芦、韭菜、韭菜鸡蛋真空冷却过程中压力变化

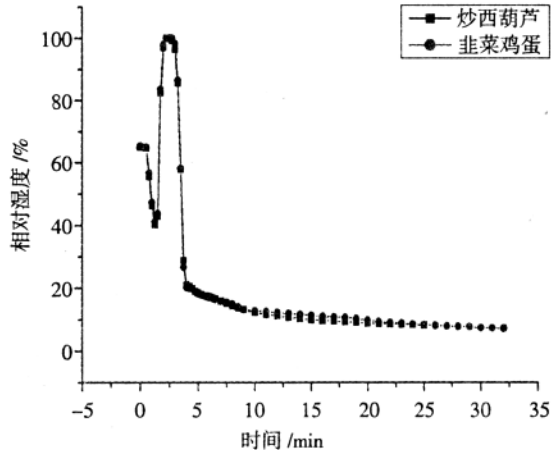


图 4 炒西葫芦、韭菜鸡蛋真空冷却过程中相对湿度变化

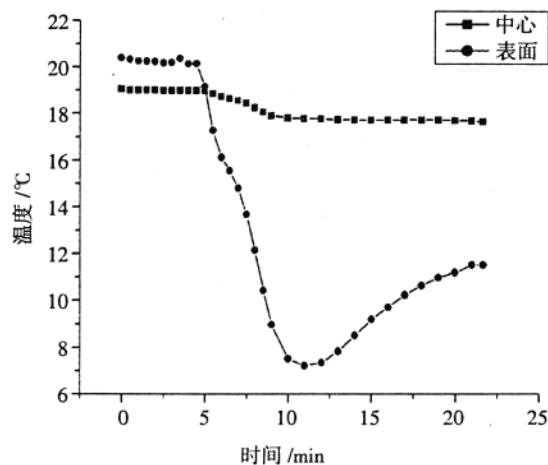


图5 真空冷却过程中西葫芦温度变化

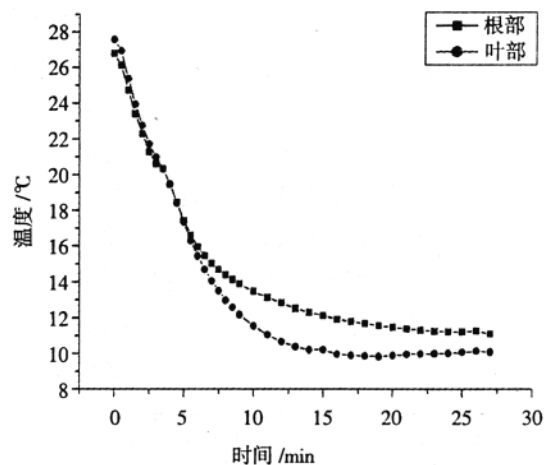


图6 真空冷却过程中韭菜温度变化

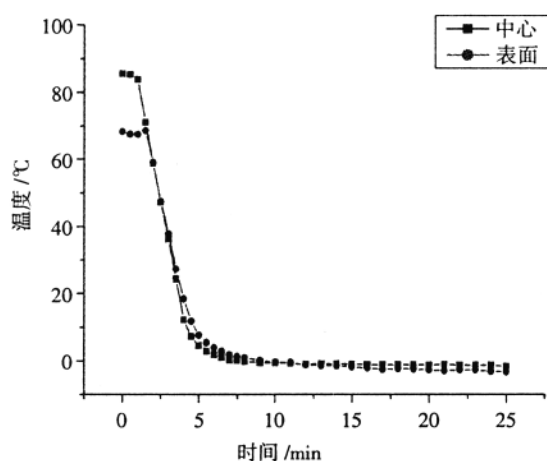


图7 真空冷却过程中炒西葫芦温度变化

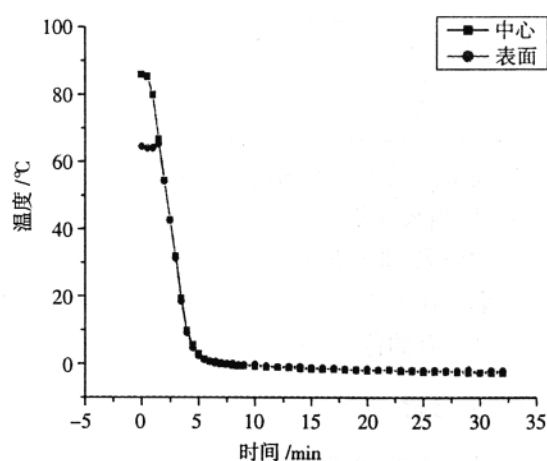


图8 真空冷却过程中韭菜鸡蛋温度变化

图5显示了真空冷却过程中西葫芦的温度变化过程。从图中可以看出,西葫芦中心温度随时间变化很小,冷却22 min后温度从19.04℃下降到17.63℃;冷却11 min表面温度从20.39℃降到7.23℃,随时间的延续,温度会有所上升,冷却22 min后温度上升到11.52℃。由于西葫芦水分含量比较低,表皮质硬不易水分蒸发,当表面部分水分蒸发到某种程度后,水分就很难蒸发出来。与此同时,真空室内补充气体带入热量,致使温度有所上升。

图6显示了真空冷却过程中韭菜的温度变化过程。可以看出,韭菜叶部较根部温度变化速率大,但温度变化缓慢。根部冷却27 min后温度从26.80℃降到11.11℃,叶部冷却19 min后温度从27.57℃降到9.84℃,到27 min时温度上升到10.09℃。由图5、6可以得出,产品的温度变化与含水率有关,含水率越高,越易于冷却。产品的表面结构也是影响冷却效果的关键因素,西葫芦含水率少、孔隙率较小、表皮质硬,不适合真空冷却;韭菜叶部较根部比表面积大、冷却速率大。

图7显示了真空冷却过程中炒西葫芦的温度变化过程。可以看出,温度随压力变化趋势吻合,在6 min左右产品温度降低到设定压力对应的温度,中心温度从85.63℃下降到0℃不到8 min、表面温度从68.41℃下降到0℃才9 min。由于产品汤料含量高,当产品温度降到设定饱和压力对应的温度后,随着真空泵的继续抽气和不断补气,真空室内湿度会有所降低,致使产品水分继续蒸发而温度再次降低。产品的终温在25 min时,中心温度为-1.65℃、表面温度为-3.32℃,随时间的延续,产品的终温还会有所降低,但降温速率很小。因此,对于水分含量较高的产品,冷却时间短,应控制冷却时间。通过多次实验得出,炒西葫芦的最佳冷却时间与汤料的百分含量有关,汤料含量高时冷却速率快。

图 8 显示了真空冷却过程中韭菜鸡蛋的温度变化过程。可以看出,温度与压力变化趋势吻合,随压力的急速降低,水分蒸发在产品表面发生,温度迅速下降。在压力降到设定值之前,水分迁移比较剧烈,在达到设定值后,水分主要在表面蒸发。冷却处理不到 7 min,产品中心温度从 85.94 ℃降到 0 ℃,冷却 8 min,表面温度从 64.58 ℃降到 0 ℃,冷却 32 min 时,产品中心、表面温度分别降到-2.66 ℃、-2.18 ℃。由图 7、8 得出:由于快捷食品汤料含量比较多,且易于蒸发,冷却速率比较快,为了防止产品温度低于 0℃,应控制最佳冷却时间。

从图示及分析可知:真空冷却过程中,不同的产品会有不同的最佳冷却时间。西葫芦不适合做真空冷却;韭菜的最佳冷却时间为 19 min 左右;炒西葫芦与韭菜鸡蛋的最佳冷却时间分别为 8 min、7 min。从减少成本、节约能源角度考虑,在保证冷却效果的情况下,应尽量减少冷却时间。

表 1 真空冷却过程中产品质量变化

参 数	冷却前质量 /g	冷却后质量 /g	质量损耗 /g	质量损耗率 /%
西葫芦	1 450	1 437	13	0.90
韭菜	538	513	25	4.65
炒西葫芦	628	523	105	16.72
韭菜鸡蛋	547	469	78	14.26

从表 1 产品真空冷却过程中质量损耗与各产品温度变化可以看出,水分蒸发速率直接影响产品冷却速率,如何控制水分蒸发速率是有效控制冷却速率的关键。西葫芦质量损耗率为 0.90%,温度变化较小,未能达到冷却的效果;韭菜质量损耗率为 4.65%,对于快捷食品,由于汤料含量比较多,因此质量损耗都比较大,质量损耗率均在 10%以上。快捷食品最主要的是如何增加冷却速率、保持原味;多加汤料,既能加速冷却,也保证了产品原有的色、香、味^[10,11]。

4 结果及分析

- 通过对韭菜、韭菜鸡蛋、西葫芦、炒西葫芦的真空冷却实验分析研究得出:
- (1)产品的温度变化与含水率有关,含水率越高,越易于冷却;产品的表面结构也是影响冷却效果的关键因素,含水量少、孔隙率较小、表皮质硬的产品,不适合真空冷却。因此,西葫芦不适合真空冷却。
 - (2)对于不同的产品会有不同的最佳冷却时间。韭菜的最佳冷却时间为 19 min 左右,炒西葫芦与韭菜鸡蛋的最佳冷却时间分别为 8 min、7 min。对于快捷食品,汤料含量越多,冷却时间越短。
 - (3)真空冷却过程中,产品的温度、真空室内湿度随着真空压力的变化趋势而变化;产品的冷却速率与水分蒸发的难易程度有关,水分易于蒸发的食品,冷却速率快。
 - (4)真空冷却过程中,产品温度在达到设定压力对应温度后,高含水率产品温度会有所降低,低含水率产品温度会有所上升。

参考文献:

[1] DA- WEN SUN, LIYUN ZHENG. Vacuum cooling technology for the agri- food industry :Past ,Present and future [J]. Journal of Food Engineering ,2006 ,77 :203~214.

[2] LIYUN ZHENG ,DA- WEN SUN. Vacuum cooling for the food industry- a review of recent advances [J]. Trends in Food Science & Technology ,2004 ,15 :555~568.

[3] WANG L J ,SUN D- W. Modeling vacuum cooling process of cooked meat- part 1 :analysis of vacuum cooling system [J]. International Journal of Refrigeration ,2002 ,25: 854~861.

[4] WANG L J ,SUN D- W. Modeling vacuum cooling process of cooked meat- part 2 :mass and heat transfer of cooked meat under vacuum pressure [J]. International Journal of Refrigeration ,2002 ,25 :862~871.

式中 Φ 为系统总光焦度 i 为光学零件序号 ϕ_i 为各零件的光焦度 h_i 为近轴光线在各个零件上的入射高； X_i 为红外材料的光热膨胀系数 ν_i 为红外材料的色散系数 μ_H 为结构材料的线膨胀系数。由此可见，若采用传统折反射光学系统，要同时满足上述 3 个方程，一般至少需要 3 种红外材料，从而使得系统结构复杂。而采用折/衍混合光学系统，利用衍射光学元件具有反向色散、反向光热膨胀系数的特点，通过折、衍射零件光焦度及正、负零件光焦度大小的匹配，仍然只用 2 种光学材料，就可以使光学系统在消色差的基础上，令温度变化所导致的系统离焦量正好与壳体材料热膨胀系数导致的像面移动相一致，从而实现同时校色差和减热差的效果^[6~10]。

4 结 论

衍射光学元件应用于空间光学系统显示出了传统折反射光学元件无法比拟的优越性。当环境温度变化时，由于材料分子的热运动使折射率发生改变，材料本身的热胀冷缩还会改变元件的面形尺寸，因而环境温度对折射透镜的影响较大，而衍射元件的光学性能完全由其表面微结构所决定，与材料折射率无关，其光学性能仅受热胀冷缩效应的影响，相对而言热稳定性较好。此外，对于红外光学系统，红外衍射元件的加工较可见光衍射元件相对容易，对表面粗糙度和表面疵病的要求相对宽松。这些特点使得在不增加系统质量和体积的情况下实现消除色差和热补偿成为可能。因此衍射光学元件在空间红外光学系统的减热设计、消色差设计中均有很大的应用价值。

参考文献：

- [1] 郭晴, 王汝笠, 裴云天, 等. 衍射光学元件热稳定性分析[J]. 光子学报, 1999, 28(5): 463~466.
- [2] 白剑, 孙婷, 沈亦兵, 等. 红外折射衍射混合光学系统的热差分析[J]. 光学学报, 1999, 19(7): 997~1002.
- [3] 焦明印, 冯卓祥. 实现消热差和消色差的折衍混合红外光学系统[J]. 光电子激光, 2001, 12(12): 1226~1229.
- [4] MARGARET B. Binary optics: A VLSI-based microoptics technology[J]. Microelectronic Engineering, 1996, 32: 369~388.
- [5] CHRIS BIGWOOD. New infrared optical systems using diffractive optics[C]. Proc Spie, 2002, 4767: 1~12.
- [6] JAMIESON T H. Thermal effects in optical systems [J]. Joptsoc Am, 1984, 38: 542~546.
- [7] 袁旭沧. 光学设计[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1988.
- [8] 金国藩, 严瑛白, 郭敏贤. 二元光学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.
- [9] 刘宏开, 罗崇泰, 王多书, 等. $3.0\ \mu\text{m}$ - $4.0\ \mu\text{m}$ 全角度反射镜[J]. 真空与低温, 2007, 13(2): 94~97.
- [10] 秦洁玉, 罗崇泰, 马勉军. 线性渐变滤光片镀制挡板设计[J]. 真空与低温, 2007, 13(1): 57~62.

(上接第 244 页)

- [5] 金听祥, 朱鸿梅, 肖尤明, 等. 真空冷却过程中的水分迁移的数学模型[J]. 真空与低温, 2004, 10(12): 225~229.
- [6] 金听祥, 李改莲, 徐烈, 等. 真空冷却过程的机理分析[J]. 真空与低温, 2005, 11(6): 116~120.
- [7] 金听祥, 李改莲, 徐烈. 真空冷却过程中的水分迁移及其对熟肉超微结构影响的实验研究 [J]. 农业工程学报, 2006, 22(5): 229~232.
- [8] JIN T X. Experimental investigation of the temperature variation in the vacuum chamber during vacuum cooling [J]. Journal of Food Engineering, 2007, 78: 333~339.
- [9] DA- WEN SUN, LIJUN WANG. Heat transfer characteristics of cooked meats using different cooling methods [J]. International Journal of Refrigeration, 2000, 23: 508~516.
- [10] O'LEARY E, GORMLEY T R, BUTLER F *et al.* The Effect of Freeze- chilling on the Quality of Ready- meal Components [J]. Lebensmittel- Wissenschaft und- Technologie, 2000, 33(3): 217~224.
- [11] KINDT M, LERCKER G, MAZZARACCHIO P, *et al.* Effects of lipids on the quality of commercial frozen ready pasta meals [J]. Food Control, 2006, 17: 847~855.