

# 冷配送烹饪茼蒿笋的真空冷却技术研究

李沐生, 张晓银, 阮征, 黄智君

(华南理工大学轻工与食品学院, 广东广州 510640)

**摘要:** 本文以盘装的热烫烹饪茼蒿笋为研究对象, 对其真空冷却过程中的影响因素以及温度、失重率的变化规律进行研究。结果表明: 真空冷却过程中盘装烹饪茼蒿笋的中心和表面位置的温差非常小, 不大于 1.73 °C, 冷却至 10 °C 时盘装茼蒿笋的中心与表面温差仅为 0.23 °C。另外, 真空冷却过程中单位质量烹饪茼蒿笋的冷却速率随着冷凝温度的降低、冷却量的增大而增大。其中当冷却量 (37.5 kg) 增大 3 倍 (150 kg) 时, 单位质量茼蒿笋冷却时间有效的缩短了 46.34%。同时真空冷却也造成烹饪茼蒿笋质量的损失。1% 的烹饪茼蒿笋失重率约能带来 7 °C 的温度下降。另外, 本文提出一种分段式真空冷却模式, 通过实验验证, 该冷却模式能够有效地降低能耗, 仅为传统真空冷却方式耗能的 47.29%。且通过降低冷却过程中最大冷凝负荷, 达到降低冷凝系统制冷能力要求。

**关键词:** 烹饪茼蒿笋; 真空冷却; 冷凝温度; 冷却量; 失重率; 分段式真空冷却

**文章编号:** 1673-9078(2014)5-167-171

## Effect of Vacuum Cooling Treatment on Cold-chain Cooking Lettuce

LI Bian-sheng, ZHANG Xiao-yin, RUAN Zheng, HUANG Zhi-jun

(College of Light Industry and Food Sciences, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** Effect of vacuum cooling treatment on blanched cooking lettuce in tray was researched in this paper. Results showed that during the vacuum cooling process, the temperature difference between the center and the surface of cooked lettuce in tray was very small, not more than 1.73 °C, and the temperature difference was only 0.23 °C when cooked lettuce temperature reached 10 °C. In addition, the cooling rate of cooked lettuce per 1 kg increased with the increase of condensation temperature and cooling capacity. When cooling capacity increased from 37.5 kg to 150 kg, the cooling time was effectively shortened by 46.34%. Vacuum cooling also caused weight loss of cooked lettuce, and 1% of weight loss bring about 7 °C temperature decline. This research proposed a two-step vacuum cooling mode to effectively reduce energy consumption, which was only 47.29% of energy consumption of traditional vacuum cooling, and also lower condensate system equipment requirements by reducing the maximum condensate load.

**Key words:** cooking lettuce; vacuum cooling; condensation temperature; cooling capacity; weight loss rate, two-step vacuum cooling mode

冷配送菜肴是指烧煮后菜肴的中心温度迅速降至 10 °C 以下, 并且在保持菜肴中心温度 10 °C 以下的条件下对菜肴进行分装、贮存、运输、分销和零售等<sup>[1]</sup>, 以避免微生物易繁殖温度区间<sup>[2]</sup>。国标 GB/T 27306-2008<sup>[3]</sup>及上海地标 DB 31/160-2005<sup>[1]</sup>规定冷配送菜肴中心温度须在 2 小时内下降至 10 °C 以下。英国卫生部要求 10 mm 和 40 mm 厚度的食品需 1.5 h 内降到 3 °C, 而 80 mm 厚度的食品需 2.5 h 时间内降到 10 °C<sup>[4]</sup>。

目前食品工业上采取的快速冷却方式主要是冷风冷却方式<sup>[5]</sup>和真空冷却方式<sup>[6-9]</sup>。真空冷却技术主要是通过降低系统绝对压力来降低物料水分的沸点温度,

水分汽化带走大量热量, 从而使物料被快速冷却。不同压力状态下水的沸点不同, 见图 1<sup>[7]</sup>。Noble<sup>[10]</sup>采用真空冷却技术对新鲜蘑菇进行处理, 研究发现蔬菜内部结构、自由含水量、相对表面积均是影响冷却效果的重要因素。Desmond<sup>[11]</sup>和 Sun<sup>[12]</sup>等人采用真空冷却、风冷却、慢空气冷却等技术对熟肉进行处理, 结果表明物料的真空冷却速率远远大于风冷却速率和慢空气冷却速率。Donald<sup>[7]</sup>等人对冷却后食物进行气相色谱分析和感官鉴定, 其结果表明采用真空冷却技术冷却的焙烤制品的风味变化不大。目前对真空冷却研究主要是在新鲜果蔬、花卉<sup>[13-14]</sup>以及肉类方面, 对烹饪后菜肴的真空快速冷却研究很少。烹饪茼蒿笋是具有代表性的一道常见的绿色菜肴。其烹饪后色泽鲜亮、稳定, 口感爽脆, 且具有较高的营养价值, 深受人们喜爱。实验以盘装的热烫烹饪茼蒿笋为对象, 研究真空冷却条件对其冷却效果以及失重率的影响, 为冷配送菜肴的

收稿日期: 2013-12-11

基金项目: 广东省天然产物绿色加工与产品安全重点实验室资助项目 (2010A060801004)

作者简介: 李沐生 (1962-), 男, 教授, 加工与保藏方向

真空冷却技术提供理论基础和指导。

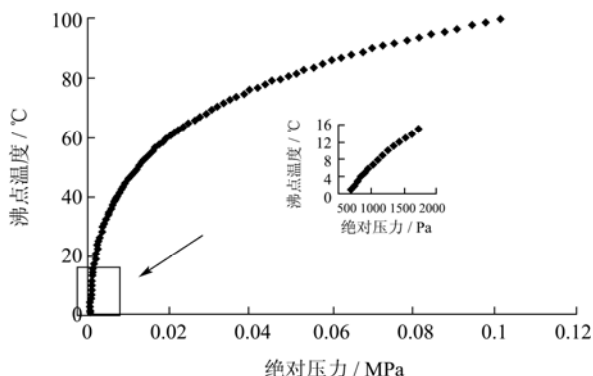


图1 水的沸点温度随绝对压力的变化曲线

Fig.1 The curve of water boiling temperature changing with the absolute pressure

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

新鲜莴笋、水、食用油、调味料等。

### 1.2 烹饪方法

对莴笋进行削皮、初洗、切分、清洗、沥水。采用热烫烹饪方式进行烹饪。将水加热至沸腾，将处理后莴笋放入水中热烫，起锅后淋上热油和预先配好的调味汁，搅拌使其与莴笋混合均匀后进行冷却。其中烹饪后莴笋水分含量为96.42%，厚度约4~5 mm，直径为25~50 mm的圆形切片。

### 1.3 真空冷却方式

采用真空冷却装置(日本株式会社, S-100-C)对热烫烹饪莴笋进行快速冷却。真空泵抽速为42 m<sup>3</sup>/h, 真空室容积0.55 m<sup>3</sup>。真空冷却室分为四层, 每两层间间隔为0.16 m。将盘装的烹饪莴笋(规格为0.57 m×0.40 m×0.10 m, 食物重约18.5 kg)置于真空室中, 敞口冷却。当冷却总量为150 kg、75 kg、37.5 kg时, 烹饪莴笋的装盘数分别为8盘、4盘、2盘。如冷却量为150 kg时, 盘装烹饪莴笋共8盘, 分成四层, 每层两盘, 装入真空冷却室中, 其中各层间空隙为0.06 m。

### 1.4 冷却过程的传热记录

由于切片莴笋的厚度较小, 实验在冷凝温度为2.5 °C, 冷却量为150 kg的条件下, 对盘装莴笋真空冷却34 min, 停机, 采用热电偶(台湾群特公司, C-309)快速测定盘装莴笋的表层、中层、底层中个片莴笋的中心及表面温度, 其中个片莴笋的中心温度为9.99±0.22 °C, 表面温度为9.81±0.28 °C, 两者非常接

近, 平均相差0.18 °C。因此本次实验不考虑个片莴笋的内外温度差。

本实验将盘装莴笋看作一个整体, 其温度测定仪考虑盘装莴笋的盘子几何中心及表面位置的莴笋温度, 以下均称为盘装莴笋的中心温度、盘装莴笋的表面温度。

冷却过程的传热情况均采用TrackSense Pro型无线测温系统(丹麦Ellab A/S公司)进行温度的实时测定。测定时将无线测温系统一个探头插入盘装莴笋的几何中心位置, 实时记录整个冷却过程中盘装菜肴的中心温度的变化情况; 另一个探头置于盘装莴笋的表面位置以记录表面温度变化情况<sup>[15]</sup>。

### 1.5 冷却过程的失重率

采用电子天平称量, 盘装菜肴冷却前质量M<sub>1</sub>(kg), 冷却后质量M<sub>2</sub>(kg), 铁盘质量M<sub>3</sub>(kg)。菜肴真空冷却过程失重率的计算公式为:

$$\text{失重率}/\% = (M_1 - M_2) / (M_1 - M_3) \times 100\%$$

### 1.6 数据分析

本文数据应用SPSS 17.0和Excel软件进行处理分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 真空冷却过程中盘装烹饪莴笋的降温曲线

实验对真空冷却过程中盘装烹饪莴笋的温度变化进行研究, 其冷却总量约150 kg, 冷凝温度为2.5 °C。由实验结果可知真空冷却过程中盘装烹饪莴笋的几何中心和表面位置的温差非常小, 不大于1.73 °C, 冷却至10 °C时盘装莴笋的中心与表面温差仅为0.23 °C。

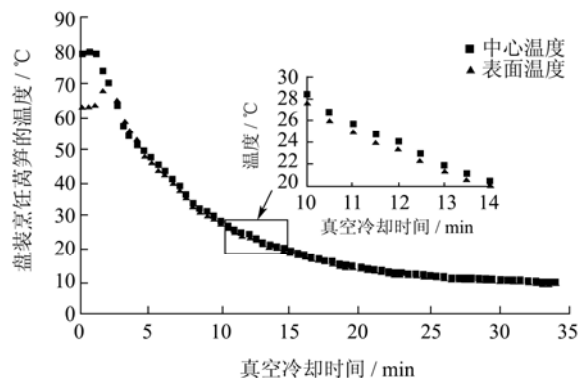


图2 真空冷却过程中盘装烹饪莴笋的冷却曲线

Fig.2 Cooling curves of blanching cooking lettuce in the vacuum cooling process

由图2可知烹饪莴笋的真空冷却过程可分成3个阶段: 平缓阶段、快速冷却阶段、慢速冷却阶段。在

真空冷却初期盘装莴笋的中心温度曲线接近平台，这是由于真空冷却刚开始，系统内部的绝对压力较高，其压力下降至菜肴水分汽化所对应的压力需要一段时间，在这一阶段内烹饪莴笋温度变化非常小。随着压力下降至莴笋初始温度对应的饱和压力，进入快速冷却阶段。菜肴内外压差变大，其水分短时间内剧烈汽化，带走大量热量，从而使得莴笋温度快速降低。其后随着绝对压力下降变缓，烹饪莴笋的真空冷却速率减小，进入慢速冷却阶段，温度缓慢下降。

### 2.2 冷凝温度对盘装烹饪莴笋真空冷却效果的影响研究

典型的真空冷却系统包括真空泵和蒸汽冷凝器，其主要用于维持真空室内的真空度。真空冷却过程中菜肴水分汽化产生蒸汽，使系统绝对压力升高。这部分的蒸汽分压通过冷凝器的盘管冷却降低。盘管表面温度远低于空气中蒸汽的露点温度，绝大部分的水蒸气遇冷液化成水，再通过放水阀排出，从而使得真空室内的水蒸气分压降低，从而降低系统绝对压力。若冷凝温度太高，不能及时使水蒸气液化，使得真空室内压力升高，菜肴水分蒸发阻力变大，冷却速率降低。

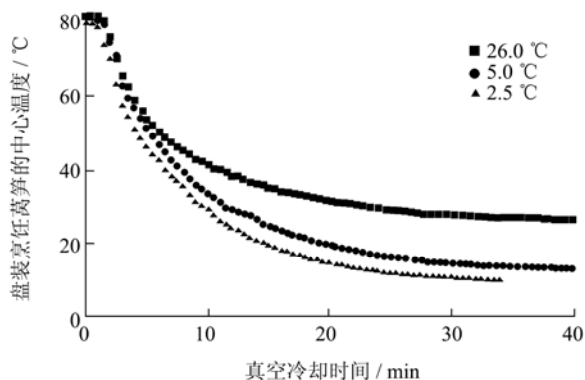


图3 不同冷凝温度下盘装烹饪莴笋的真空冷却曲线

Fig.3 Vacuum cooling curves of blanching cooking lettuce under different condensation temperatures

实验在冷却总量约150 kg条件下研究冷凝温度对盘装烹饪莴笋真空冷却速率的影响。由实验结果可知降低冷凝温度可有效的提高烹饪莴笋的冷却速率。当冷凝温度为26.0 °C，即以自来水作为冷凝水时，莴笋温度无法达到10 °C以下。这可能是因为自来水温度较高，使得在冷却后期不能及时减少水分汽化产生的蒸汽压力，菜肴冷却速率大大降低，冷却40 min后烹饪莴笋的冷却曲线接近平线。当冷凝温度为5.0 °C时，真空冷却40 min后盘装莴笋的中心温度下降至13.01 °C，后期下降非常缓慢。当冷凝温度为2.5 °C时，真空冷却34 min盘装莴笋中心温度达到9.97 °C。真

空冷却过程中，通过降低冷凝温度能够有效提高烹饪莴笋的冷却速率。

### 2.3 冷却总量对盘装烹饪莴笋真空冷却效果的影响研究

真空室内的总压可视为空气和水蒸汽压力之和，即  $P_{总} = P_{空气} + P_{水蒸气}$  [16]。真空冷却过程中菜肴水分汽化产生蒸汽，从而使  $P_{总}$  升高。由于蒸汽量与菜肴冷却总量成正比，冷却总量越大， $P_{水蒸气}$  越大，系统的绝对压力越大，因此烹饪莴笋的真空冷却效果受到冷却总量的影响。

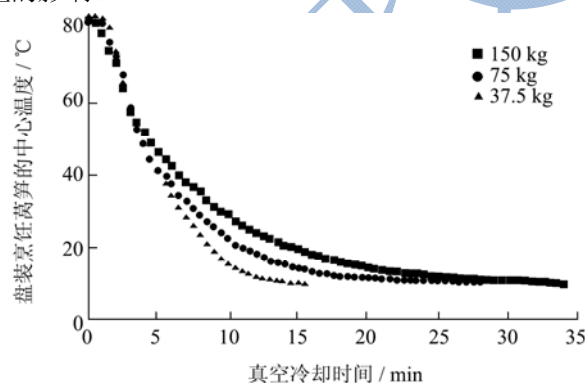


图4 不同冷却总量下盘装烹饪莴笋的真空冷却曲线

Fig.4 Vacuum cooling curves of blanching cooking lettuce under different cooling capacities

表1 冷却总量对盘装烹饪莴笋的真空冷却效果影响

Table 1 Vacuum cooling effects of cooking Lettuce under different cooling capacities

冷却总量/kg	中心冷至10 °C所需时间/min	单位质量烹饪莴笋的冷却时间/min	失重率/%
37.5	15.50±0.97	0.41±0.03	9.86±0.15 <sup>a</sup>
75	29.48±0.83	0.39±0.01	9.81±0.21 <sup>a</sup>
150	33.73±0.71	0.22±0.00	9.89±0.18 <sup>a</sup>

注：同一栏中字母相同者表示无显著性差异 (P<0.05)

实验在冷凝温度为2.5 °C条件下，对不同冷却量的烹饪莴笋进行真空冷却实验。实验结果可知，冷却总量越大，盘装烹饪莴笋的中心温度冷却至10 °C所需要的时间越长。其冷却时间与冷却总量成正比。当冷却总量为150 kg时，其冷却时间为33.73 min，为75 kg冷却量的1.14倍，37.5 kg冷却量的2.18倍。

另外，单位质量莴笋的真空冷却时间随着冷却总量的增大而减小。当冷却总量为37.5 kg时，单位质量的烹饪莴笋的冷却时间为0.41 min；将冷却量增大1倍（75 kg）后，其单位质量莴笋的冷却时间缩短了4.88%，而当冷却总量增大3倍（150 kg）时，其单位质量冷却时间有效的缩短了46.34%。且在该真空冷却



方式下,冷却量对盘装热烫烹饪莴笋的失重率无显著性影响。

### 2.4 真空冷却过程中盘装烹饪莴笋失重率变化研究

真空冷却过程是通过物料水分汽化带走热量<sup>[17]</sup>,使得食品温度降低,因此造成冷却过程中食品物料的质量发生变化。真空冷却过程中物料失重率可通过以下公式<sup>[18]</sup>进行理论计算:  $W=C_p\Delta T/h_{fg}$ 。其中  $C_p$  [kJ/(kg·C)]为冷却物料的比热容,  $\Delta T$ (°C)为物料冷却过程中的温度变化,  $h_{fg}$ (kJ/kg)是水的蒸发热。

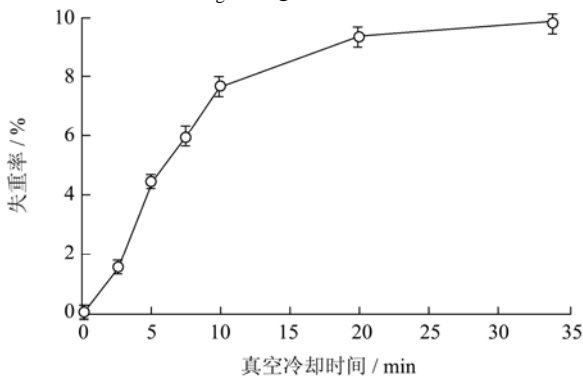


图5 真空冷却过程烹饪莴笋失重率变化曲线

Fig.5 The weight loss curve of blanching cooking lettuce in the vacuum cooling process

实验在 2.5 °C 冷凝温度, 150 kg 冷却总量条件下对真空冷却过程中热烫烹饪莴笋的失重率随时间的变化情况进行研究。由实验结果可知 1% 的失重率约能带来 7 °C 的温度下降。冷却前期菜肴的质量变化较大, 真空冷却 10 min, 莴笋的失重率达到 7.71%。其后质量变化变缓, 冷却 34 min 后, 烹饪莴笋的失重率达到 9.89%。这是由于真空冷却前期烹饪莴笋温度下降速率大, 在相同时间内的  $\Delta T$  值较大, 使得物料的质量损失较大。冷却后期莴笋温度变化变缓, 物料失重率减小。真空冷却过程中热烫烹饪莴笋失重率随时间(不计零点)变化曲线服从 S 模型:

$$W/\% = \text{EXP}(2.49 - 5.05/t)$$

拟合度  $R^2$  达到 0.997。

### 2.5 分段冷却对盘装烹饪莴笋真空冷却效果的影响研究

由图 6 可知以 26.0 °C 的自来水(以下均称为常温水)作为冷却水的冷却过程中, 冷却前期烹饪莴笋温度下降较快, 当盘装莴笋的中心温度下降至约 40 °C 后, 冷却速率明显变缓, 这是由于此时菜肴蒸汽温度

与常温水温度接近, 冷凝能力减弱, 真空室中蒸汽压力不能及时消除, 莴笋水分蒸发阻力变大, 冷却速率降低。

因此实验采用分段式 (26.0+2.5) °C 真空冷却方式对热烫烹饪莴笋进行冷却, 即冷却前期利用 26.0 °C 的常温水作为冷凝水, 当盘装烹饪莴笋的中心温度下降至约 40 °C 后, 以 2.5 °C 的低温水替代常温水进行冷却。实验结果见图 7 和表 2, 可知分段式真空冷却方式的冷却时间延长了 5.77 min, 而能耗比 2.5 °C 真空冷却方式降低了 6.90 Kw·h, 仅为 2.5 °C 真空冷却方式耗能的 47.29%。另外两种真空冷却方式下, 盘装烹饪莴笋的失重率无显著性差异。

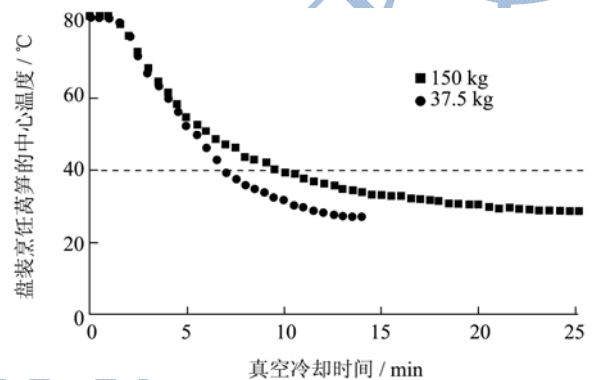


图6 不同冷却总量下盘装烹饪莴笋的真空冷却曲线 (26.0 °C 的自来水作为冷凝水)

Fig.6 Vacuum cooling curves of blanching cooking lettuce under different cooling capacities with condensate water of 26.0 °C

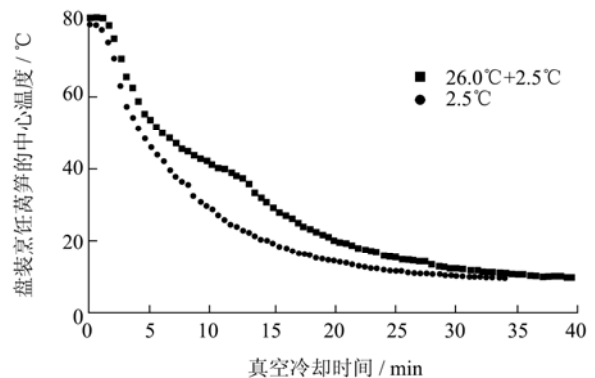


图7 真空冷却方式对盘装烹饪莴笋冷却曲线的影响

Fig.7 Cooling curves of blanching cooking lettuce under different vacuum cooling modes

真空冷却过程中冷凝负荷取决于物料温度下降速率<sup>[16, 18]</sup>。由实验结果可知, 在冷却总量均为 150 kg 条件下, 分段式 (26.0 °C+2.5 °C) 真空冷却方式的最大冷凝负荷为 115.71 Kw, 比 2.5 °C 冷却方式减小了 28.53%。图 8 给出两种真空冷却方式冷却过程中冷凝负荷变化曲线。由于分段式 (26 °C+2.5 °C) 真空方式冷却前 12 min 采用常温水作为冷却水进行冷却, 因此

该过程对冷凝系统的制冷能力不作要求,其真空冷却后期的最大冷凝负荷仅 37.17 kw。真空冷却过程中菜肴产生的水蒸气通过冷凝系统除去,最大冷凝负荷越

大,冷凝系统所需的制冷能力越大。因此通过采用分段式真空冷却模式能够有效的降低最大冷凝负荷,从而降低冷凝系统制冷要求。

表 2 真空冷却方式对盘装烹饪莴笋冷却效果和耗能的影响

Table 2 Cooling effects and energy consumption of blanching cooking lettuce under different vacuum cooling modes

冷却方式	冷凝水温度/℃		冷却时间 /min	耗能 /(Kw·h)	失重率 /%
	T <sub>1</sub> : 80~40 ℃	T <sub>2</sub> : 40~10 ℃			
26.0 ℃+2.5 ℃	26.0	2.5	39.50±0.96	6.19±0.04	9.82±0.26 <sup>a</sup>
2.5 ℃	2.5	2.5	33.73±0.71	13.09±0.03	9.89±0.18 <sup>a</sup>

注: T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub>均为盘装烹饪莴笋的中心温度。冷却时间为盘装烹饪莴笋中心温度冷却至 10 ℃所需时间。同一栏中字母相同者表示无显著性差异 (P<0.05)。

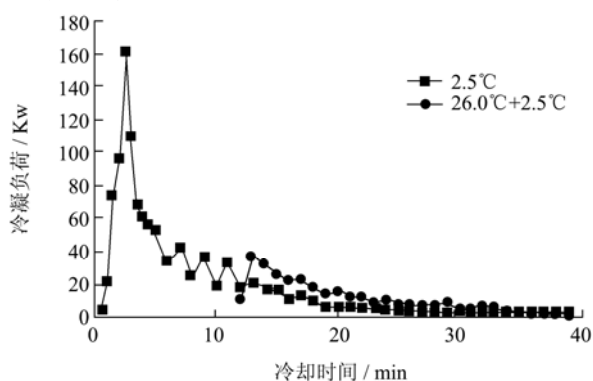


图 8 不同真空冷却方式下,冷却过程中的冷凝负荷变化

Fig.8 Condensing load curves in cooling process under different vacuum cooling modes

### 3 结论

3.1 真空冷却过程中盘装烹饪莴笋的中心和表面位置的温差非常小,不大于 1.73 ℃,冷却至 10 ℃时盘装莴笋的中心与表面温差仅为 0.23 ℃。

3.2 降低冷凝温度可有效的提高烹饪莴笋的冷却速率。当冷凝温度为 26.0 ℃,莴笋温度无法达到 10 ℃以下。冷凝温度为 2.5 ℃时,真空冷却 34 min 盘装莴笋的中心温度达到 9.97 ℃。

3.3 热烫烹饪莴笋的冷却时间随着冷却总量的增大而增大,而其单位质量莴笋的冷却时间则随着冷却总量的增大而缩短,当冷却量 (37.5 kg) 增大 3 倍 (150 kg) 后,其单位质量冷却时间有效的缩短了 46.34%。

3.4 真空冷却造成菜肴质量的损失。1%的失重率约能带来 7 ℃的温度下降。冷却前期烹饪莴笋的质量变化较大,其后逐渐变缓。冷却过程中烹饪莴笋失重率随时间(不计零点)变化曲线服从 S 模型:

$$W/\% = \text{EXP}(2.49 - 5.054/t), \text{ 拟合度高达 } 0.997.$$

3.5 与冷凝温度为 2.5 ℃的真空冷却方式相比,分段式真空冷却方式(即冷却前期以 26.0 ℃常温水作为冷凝水,当盘装莴笋的中心温度下降至约 40 ℃后,以 2.5 ℃的低温水替代常温水进行冷却)能够有效地降低

能耗,仅为前者耗能的 47.29%。且通过降低最大冷凝负荷,降低冷凝系统制冷要求。

### 参考文献

- [1] DB31/160-2005,上海市地方标准盒饭卫生与营养要求[S]  
DB31/160-2005, Bento health and nutrition requirements [S]
- [2] Wang L J, Sun D W. Modelling three-dimensional transient heat transfer of roasted meat during air blast cooling by the finite element method [J]. Journal of Food Engineering, 2002, 51(4): 319-328
- [3] GB/T 27306-2008,食品安全管理体系 餐饮业要求[S]  
GB/T 27306-2008, Food safety management system-requirements for catering services [S]
- [4] Anon. Guidelines on cook-chill and cook-freeze catering systems. London: HMSO Publications Centre, 1989
- [5] Hu Z H, Sun D W. Effect of fluctuation in inlet airflow temperature on CFD simulation of air-blast chilling process [J]. Journal of Food Engineering, 2001, 48(4): 311-316
- [6] Donald K M, Sun D W. Effect of evacuation rate on the vacuum cooling process of a cooked beef product [J]. Journal of Food Engineering, 2001, 48(3): 195-202
- [7] Donald K M, Sun D W. Vacuum cooling technology for the food processing industry: a review [J]. Journal of Food Engineering, 2000, 2(45): 55-65
- [8] Tao F, Zhang M, Yu H Q, et al. Effects of different storage conditions on chemical and physical properties of white mushrooms after vacuum cooling [J]. Journal of Food Engineering, 2006, 77 (3): 545-549
- [9] Landfeld A, Houska M, Kyhos K, et al. Mass transfer experiments on vacuum cooling of selected pre-cooked solid foods [J]. Journal of Food Engineering, 2002, 52(3): 207-210
- [10] Noble R A. review of vacuum cooling of mushrooms [J]. Mushroom Journal, 1985, 149: 168-170
- [11] Desmond E M, Kenny T A, Ward P, et al. Effect of rapid and

- conventional cooling methods on the quality of cooked ham joints [J]. *Meat Science*, 2000, 56(3): 271-277
- [12] Donald K M, Sun D W, Kenny T A. Comparison of the quality of cooked beef products cooled by vacuum cooling and by conventional cooling [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2000, 33(1): 21-29
- [13] Brosnan T, Sun D W. PH-postharvest technology: compensation for water loss in vacuum-precooled cut lily flowers [J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 2001, 79(3): 299-305
- [14] Sun D W, Brosnan T. Extension of the vase life of cut daffodil flowers by rapid vacuum cooling [J]. *International Journal of Refrigeration*, 1999, 22(6): 472-478
- [15] 李汴生,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):359-364
- LI Bian-sheng, ZHANG Wei, MEI Can-hui. 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): 359-364
- [16] Wang L J, Sun D W. Effect of operating conditions of a vacuum cooler on cooling performance for large cooked meat joints [J]. *Journal of Food Engineering*, 2004, 61(2): 231-240
- [17] Everington D W. Vacuum technology for food processing [J]. *Food Technology International Europe*, 1993: 71-74
- [18] 金听祥,李改莲,张全国,等.不同蔬菜真空冷却过程影响因素分析[J].*河南农业大学学报*,2005,39(1):71-74
- JIN Ting-xiang, LI Gai-lian, ZHANG Quan-guo, et al. Analysis of affecting factors of vacuum cooling process of different vegetables [J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2005, 39(1): 71-74