

基于催化式红外的西红柿干法去皮技术

Tomato dry peeling technology based on catalytic infrared

刘莹¹ 曲文娟² 罗圣通¹

LIU Ying¹ QU Wen-juan² LUO Sheng-tong¹

马海乐² 潘忠礼³ 蒋群辉⁴

MA Hai-le² PAN Zhong-li³ JIANG Qun-hui⁴

(1. 江苏大学食品与生物工程学院, 江苏 镇江 212013; 2. 江苏大学食品物理加工研究院,

江苏 镇江 212013; 3. 美国加州大学戴维斯分校生物与农业工程系, 美国 加州 95616;

4. 镇江美博红外科技有限公司, 江苏 镇江 212013)

(1. School of Food and Biological Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China; 2. Institute of Food Physical Processing, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China; 3. Department of Biological and Agricultural Engineering, University of California, Davis, California 95616, USA; 4. Maybo Innovation Co., Ltd., Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

摘要:目的:探寻一种高效且绿色环保的西红柿去皮方法。方法:利用催化式红外设备进行西红柿干法去皮,考察工艺参数对西红柿去皮性能和果肉品质的影响,并与传统的热水和碱液去皮方式进行对比。结果:双板距离、红外加热温度和红外加热时间均对西红柿去皮率和果肉品质有显著影响($P < 0.05$),西红柿催化式红外干法去皮的最优工艺参数为催化红外温度 450 °C,双板距离 25 cm,红外处理时间 5 min,此时西红柿去皮率高达 98%,且果肉硬度(7.60 g/mm²)和番茄红素含量(30.39 mg/kg)最优,颜色鲜红。与传统热水和碱液去皮方式相比,红外去皮属于干法去皮,是一种环境友好型的去皮方法;红外去皮处理后西红柿果肉具有最高的硬度、番茄红素含量,颜色更红润,果肉完整性良好;红外去皮处理对果皮和果肉微观结构的影响最小,对果皮果肉连接层的微观结构有明显影响,促进了果皮与果肉的分离,表明红外去皮机制与其他几种去皮方式不同。结论:催化式红外去皮方式更适合西红柿的去皮加工,可以实现高效去皮、绿色环保且能保障产品品质。

关键词:红外加热去皮;催化式红外技术;热水去皮;碱液去皮;西红柿

Abstract: Objective: An efficient and green method of peeling tomatoes was explored. Methods: A dry peeling method of tomatoes was carried out based on catalytic infrared equipment, and the effects of technological parameters on peeling performance and pulp quality of tomatoes were investigated and compared with traditional peeling methods of hot water and lye. Results: Infrared heating distance, temperature and time all had significant effects on the peelability and pulp quality of tomatoes. The optimum technological parameters of tomato dry peeling based on catalytic infrared was infrared heating temperature of 450 °C, distance of 25 cm and time of 5 min. Under these conditions, the peelability of tomato was high as 98%, the firmness (7.60 g/mm²) and lycopene content (30.39 mg/kg) of pulp were the best, and the color was bright red. Compared with the traditional hot water and lye peeling methods, catalytic infrared peeling method was a dry peeling method, which was an environmentally friendly peeling method. After the catalytic infrared peeling treatment, the tomato pulp had the highest hardness, lycopene content, more red color and good pulp integrity. Catalytic infrared peeling treatment had the least effects on the microstructure of peel and flesh, but had an obvious effect on the microstructure of the connecting layer of peel and flesh, which promoted the separation of peel and flesh, indicating that the mechanism of infrared peeling was different from those of other peeling methods. Conclusion: Catalytic infrared peeling method is more suitable for tomato peeling processing and can achieve efficient peeling, green environmental protection and guarantee product quality.

基金项目:国家重点研发计划政府间国际科技创新合作重点专项(编号:2017YFE0105300)

作者简介:刘莹,女,江苏大学在读博士研究生。

通信作者:曲文娟(1980—),女,江苏大学教授,博士。

E-mail: wqu@ujs.edu.cn

收稿日期:2021-06-01

Keywords: infrared heating peeling; catalytic infrared technology; hot water peeling; lye peeling; tomatoes

传统的西红柿去皮方式主要是碱液和热水去皮这一类湿法去皮方式^[1-3],热水去皮易导致果蔬质地软化且会产生大量废水。碱液具有强腐蚀性,碱液去皮易导致果肉质量的损失,产生的工业废水也会造成环境污染等^[3]。

红外加热去皮是一种干法去皮方式,将西红柿直接暴露于红外辐照源下进行处理,该方法不需使用任何化学试剂和水,是一种环境友好型的去皮方法,近年来备受国内外学者关注^[3-5]。红外加热过程中,红外辐射照射在西红柿果皮上,热量通过传导作用从外果皮传至组织内部,使组织内部温度升高,皮下气压积累促进果皮果肉分离,从而达到去皮的目的。目前大部分的红外加热技术多采用电热红外^[3]、陶瓷红外^[5]等方式,但均存在去皮率低、红外转化效率低、能耗高且装置易碎,安全性低等问题。

催化式红外去皮技术是一种新型的红外去皮技术,它是以天然气为能源,通过钯、铂金等催化剂将天然气转化为红外辐射能^[6],具有高效热能转化以及绿色安全的特点。由于红外线穿透性低,因此其仅加热果蔬表层,可以有效维持果肉部分的完整性^[7]。因此,催化式红外处理对果肉的外形以及理化性质影响较小,可达到优质的去皮效果,有助于提高西红柿制品的生产效率,提升其深加工产品品质,节约生产成本。研究拟考察催化式红外技术对西红柿去皮效果的影响,并与传统的热水、碱液去皮方式进行对比,并结合扫描电子显微镜观察不同去皮方式下果皮、果肉以及果皮果肉连接层的微观结构,揭示催化红外干法去皮机制,以期为果蔬去皮产业发展提供一种更为高效且绿色环保的加工技术。

1 材料与方法

1.1 原料与试剂

欧诺西红柿:无明显病虫害和外观损伤,最大直径为 59.38~68.75 mm,质量为 107.03~148.70 g,市售;

氢氧化钠、丙酮、正己烷、无水乙醇:分析纯,国药集团化学试剂有限公司。

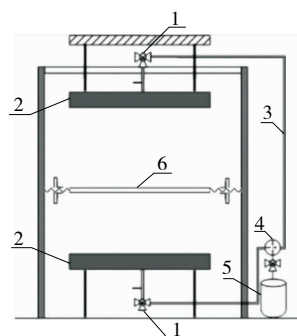
1.2 仪器与设备

催化式红外设备(图 1):江苏大学和镇江美博红外科技有限公司联合研制;

紫外分光光度计:T6 型,北京普析通用仪器有限公司;

电子天平:PRACTUM2102-1CN 型,北京赛多利斯科学仪器有限公司;

手持色差计:CR-400 型,日本柯尼卡美能达公司;



1. 压力控制阀 2. 催化红外发生器(60 cm×30 cm×5 cm)
3. 气体输送管 4. 气体压力表 5. 液化气 6. 样品摆放板

图 1 催化式红外设备的结构示意图

Figure 1 Structure diagram of catalytic infrared equipment

质构仪:TA XT Plus 型,英国 Stable Micro System 公司;

钨灯丝扫描电子显微镜:S-3400N 型,日本 JEOL 仪器公司;

热场发射扫描电子显微镜:JSM-7001F 型,日本 JEOL 仪器公司。

1.3 试验方法

1.3.1 催化式红外去皮单因素试验

(1) 催化红外温度对去皮效果的影响:固定双板板距 30 cm、红外处理时间 5 min,考察红外温度(300, 350, 400, 450, 500 °C)对西红柿去皮率、去皮果肉硬度、番茄红素含量和色度变化率的影响。

(2) 双板板距对去皮效果的影响:固定红外温度 450 °C、红外处理时间 5 min,考察双板板距(20, 25, 30, 35, 40 cm)对西红柿去皮率、去皮果肉硬度、番茄红素含量和色度变化率的影响。

(3) 红外处理时间对去皮效果的影响:固定红外温度 450 °C、双板板距 25 cm,考察红外处理时间(2, 3, 4, 5, 6 min)对西红柿去皮率、去皮果肉硬度、番茄红素含量和色度变化率的影响。

1.3.2 不同去皮工艺的对比试验 分别采用优化后的催化式红外去皮工艺、手工去皮、热水去皮[固液比 1:4 (g/mL)、温度 95 °C、时间 3 min]和碱液去皮[NaOH 溶液浓度 6%、固液比 1:4 (g/mL)、温度 95 °C、时间 3 min]方式对西红柿进行去皮,考察不同工艺对去皮果肉硬度、番茄红素含量、色度变化率以及果皮层、果肉层和果皮果肉连接层微观结构的影响。

1.3.3 指标测定

(1) 去皮率:参照付复华等^[8]的方法略修改。取 6 个西红柿,分别记录去皮处理前后的西红柿质量,按照质量与表面积的关系式^[9]: $S_A = 0.810m + 11.5$, $R^2 = 0.965$,准确估算表面积。并按式(1)计算去皮率。

$$R_p = \frac{S_{A0} - S_{A1}}{S_{A0}} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

R_p ——去皮率, %;

S_{A0} ——去皮前果皮表面积, cm^2 ;

S_{A1} ——去皮后残余果皮表面积, cm^2 。

(2) 硬度:采用质构仪对去皮后果肉硬度进行测量,选择直径为 2 mm 的圆柱形 P2 平板探头;测前、中、后速率均为 1 mm/s;数据采集速率 100 次/s;触发值 0.10 N;曲线记录方式为 Final;加载位移量 10 mm。

(3) 番茄红素含量:参照 Fish 等^[10]的方法并修改。取 4 g 去皮西红柿果肉,匀浆处理后,加入 20 mL 混合液($V_{\text{正己烷}}:V_{\text{丙酮}}:V_{\text{无水乙醇}}$ 为 2:1:1),搅拌均匀后避光静置 20 min,加入 10 mL 蒸馏水混匀,于分液漏斗中静置分层,将上层清液稀释合适倍数后,于 472 nm 下测定吸光值。按式(2)计算番茄红素含量。

$$C_L = \frac{n \times A}{m} \times 0.0312, \quad (2)$$

式中:

C_L ——番茄红素含量, mg/kg;

n ——稀释倍数;

A ——吸光值;

m ——称取的果肉质量, kg;

0.0312——换算系数, mg。

(4) 色度变化率:采用手持色差仪进行测量,并按式(3)计算色度变化率。

$$R_c = \left| \frac{\Delta E_0 - \Delta E_1}{\Delta E_0} \right| \times 100\%, \quad (3)$$

式中:

R_c ——色度变化率, %;

ΔE_0 ——处理前果肉色值;

ΔE_1 ——处理后果肉色值。

1.3.4 SEM 微观结构 参照徐保国等^[11]的方法并修改,加速电压 15 kV,果皮、果肉、果皮果肉连接层放大倍数分别为 200, 150, 200 倍。

1.3.5 数据统计分析 所有试验均平行 3 次,结果以“平均值±标准偏差”表示,采用 OriginPro 9.1 软件制图。利用 IBM SPSS Statistics 25 软件对试验数据进行显著性分析,采取 Duncan 检验,当 $P < 0.05$ 时,数据之间存在显著性差异。

2 结果与讨论

2.1 催化红外温度对去皮效果的影响

由表 1 可知,随着红外温度的升高,去皮率显著增大($P < 0.05$);当红外温度为 300 °C 时,去皮率最低(76.36%);当红外温度 ≥ 450 °C 时,去皮率达到 98%,表明红外温度 ≥ 450 °C 可以达到高效脱皮的目的。这可能

是由于催化红外温度升高促使西红柿表面温度不断上升(≥ 80 °C),破坏了果皮果肉层细胞内果胶结构,加速了果皮果肉分离从而使去皮率增高,与 Vidyarthi 等^[12]的结果一致。因此,从去皮率考虑,红外温度 ≥ 450 °C 合适。

随着红外温度的升高,硬度显著下降($P < 0.05$);当红外温度为 300 °C 时,果肉的硬度最大(12.50 g/mm²);与之相比,当红外温度为 500 °C 时,果肉硬度下降了 68.40%。这是因为西红柿长时间置于红外高温处理下,果皮下的气压积累,西红柿细胞遭到了膨压破坏^[13],改变了果胶结构,使得果肉快速软化造成硬度下降,这与 Bourne 等^[14]的结论一致。因此,从产品质地考虑,红外加热温度不宜过高(< 500 °C)。

随着红外温度的升高,番茄红素含量先显著升高后显著下降($P < 0.05$)。当红外温度为 300, 350 °C 时,果肉红层中番茄红素含量分别为 14.48, 17.84 mg/kg,与新鲜西红柿的(17.92 mg/kg)接近;当红外温度为 400, 450 °C 时,番茄红素含量最高(27.66, 30.17 mg/kg),说明红外处理在一定程度上提高了果肉红层中番茄红素含量。这是由于红外辐射的热效应加速了细胞内番茄红素的振动,使其更易于从细胞内部释放到表层^[15],促进其溶出从而提高红层番茄红素含量,这与 Honda 等^[16]的结论一致。但红外温度过高(500 °C)对番茄红素有破坏作用,造成其降解从而使含量又有所下降。因此从番茄红素含量考虑,红外处理温度为 400~450 °C 更合适。

随着红外温度的升高,果肉色度变化率先显著增大后显著减小($P < 0.05$)。当红外温度为 300 °C 时,果肉色度与未经红外处理的相比变化最小(变化率为 2.12%);当红外温度为 400, 450 °C 时,果肉色度变化最大(28.49%, 28.79%),这与王丽娟^[17]的结论一致。因此从果肉颜色考虑,红外温度为 400~450 °C 更合适,果肉颜色更鲜红。

综上,红外温度为 450 °C 较优。

2.2 双板距离对去皮效果的影响

由表 2 可知,随着双板距离的增加,去皮率显著下降($P < 0.05$)。当双板距离 ≤ 30 cm 时,去皮率最高(96%~98%);当距离为 40 cm 时,去皮率低至 76.47%。这是由于辐射距离越远,西红柿表面温度越低,西红柿表面蜡质层溶解不彻底因此去皮率较低,与刘自畅等^[18]的结果一致。但辐射距离太近时(≤ 20 cm),高强度的红外辐射会使西红柿表面发生一定程度的焦化,果皮开始变色,出现黄斑^[11]。因此,从产品品质和去皮率考虑,适宜的双板距离为 25~30 cm。

随着双板距离的减小,果肉硬度显著下降($P < 0.05$)。当双板距离为 20 cm 时果肉的硬度最低(3.50 g/mm²),是因为辐射距离太近使得西红柿表面温度过高,果肉快速软化从而导致硬度下降,与 Li 等^[19]的

表 1 红外温度对去皮率、硬度、番茄红素含量和色度变化率的影响[†]

Table 1 Peeling rate, hardness, lycopene content and chromaticity change rate under different infrared temperatures

红外温度/℃	去皮率/%	硬度/(g·mm ⁻²)	番茄红素含量/(mg·kg ⁻¹)	色度变化率/%
300	76.36±1.59 ^d	12.50±0.66 ^a	14.48±1.68 ^d	2.12±0.06 ^d
350	80.90±1.48 ^c	11.19±0.77 ^{ab}	17.84±0.64 ^c	11.79±1.13 ^c
400	88.58±0.07 ^b	9.38±0.50 ^b	27.66±1.53 ^a	28.49±3.34 ^a
450	97.80±0.50 ^a	7.55±0.67 ^c	30.17±1.78 ^a	28.79±1.83 ^a
500	97.80±0.50 ^a	3.95±0.57 ^d	23.11±1.11 ^b	20.09±0.19 ^b

[†] 字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

表 2 双板距离对去皮率、硬度、番茄红素含量和色度变化率的影响[†]

Table 2 Peeling rate, hardness, lycopene content and chromaticity change rate under different distances between the two plates

双板距离/cm	去皮率/%	硬度/(g·mm ⁻²)	番茄红素含量/(mg·kg ⁻¹)	色度变化率/%
20	97.80±0.50 ^a	3.50±0.38 ^c	25.07±2.79 ^{bc}	24.83±1.41 ^{bc}
25	97.80±0.50 ^a	7.58±0.60 ^b	30.38±0.77 ^a	28.75±1.32 ^a
30	96.44±2.69 ^a	8.36±0.40 ^b	28.45±3.89 ^{ab}	26.97±0.24 ^{ab}
35	82.25±0.88 ^b	11.75±0.02 ^a	20.53±3.31 ^c	23.92±0.50 ^c
40	76.47±1.09 ^c	12.50±0.66 ^a	17.82±2.72 ^d	2.57±0.74 ^d

[†] 字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

结果一致。因此,从产品质地考虑,双板距离不宜太近(>20 cm)。

随着双板距离的减小,番茄红素含量先显著增加后显著下降($P<0.05$)。当双板距离为 35,40 cm 时,果肉红层中番茄红素含量较低(20.53,17.82 mg/kg),是因为双板距离较大时,西红柿表面积的热量较低,对番茄红素影响不大^[20],这与毛立科等^[21]的结果一致。当双板距离为 25 cm 时,番茄红素含量最高(30.38 mg/kg),是因为双板距离越近,西红柿表面温度升高越快,红外辐射的热效应促进了番茄红素的溶出^[15],从而提高了红衣层番茄红素含量,这与 Thompson 等^[20]的结论一致。但双板距离过小(20 cm),红外辐射对番茄红素有破坏作用,造成其降解从而使其含量又有所下降。因此,从番茄红素含量考虑,双板距离为 25 cm 更合适。

当双板距离为 40 cm 时,与未经红外处理的相比,西红柿果肉色度变化不大(变化率为 2.57%),与才美慧等^[22]的结果一致。随着双板距离越来越远,果肉色度变化率显著增大($P<0.05$)。因此,从颜色角度考虑,双板距离为 25~30 cm 更合适,颜色更鲜红。

综上,双板距离为 25 cm 较优。

2.3 红外处理时间对去皮效果的影响

由表 3 可知,当红外处理时间为 2,3 min 时,去皮效果最差(74.60%,76.62%),是因为红外加热时间过短,西红柿表面蜡质层溶解不彻底因此去皮率不高,与 Gomez-lopez 等^[23]的结论一致。当红外处理时间 ≥ 5 min 时,去

皮率增加,高达 98%,是由于随着红外处理时间的延长,西红柿表面的辐射传热增强,其表面温度逐渐升高,破坏了果皮果肉层细胞内果胶结构,降低果皮对果肉的黏附力,加速了果皮果肉分离,从而去皮率增大,与 Wang 等^[24]的结果一致,因此,推荐红外加热时间 ≥ 5 min。

当红外处理时间为 2 min 时,果肉硬度仍较高(12.50 g/mm²),随着红外处理时间的延长,硬度显著下降($P<0.05$),红外处理 6 min 时的硬度与红外处理 2 min 时的相比,下降了 70.56%,这是由于长时间的催化红外高温辐射,使得西红柿皮下气压积累,细胞膨压损失,从而导致硬度下降^[25],与王丽娟^[17]的结果一致。因此,从产品质地考虑,红外处理时间不宜过长(<6 min)。

当红外处理时间为 2,3 min 时,红衣层中的番茄红素含量较小(17.28,16.38 mg/kg)。随着红外处理时间的增加,番茄红素含量显著增加($P<0.05$),当红外处理时间为 5 min 时,番茄红素含量达最大值(30.39 mg/kg),是由于长时间的催化红外高温辐射处理破坏了细胞完整性,番茄红素在提取过程中更易溶出^[26],与王丽娟^[17]的结论一致。因此,从番茄红素含量角度考虑,红外处理时间为 5~6 min 更合适。

当红外处理时间为 2 min 时,与新鲜未经红外处理的西红柿相比,果肉色度变化最小(4.31%)。随着红外处理时间的增加,果肉色度变化率显著增加($P<0.05$),与 Wang 等^[24]的结论一致。因此,从果肉色度的角度考虑,较长的红外处理时间使得颜色更鲜红,但是处理时间过长会引起表皮焦糊产生黄斑。综合考虑去皮率以及保护

表 3 红外时间对去皮率、硬度、番茄红素含量和色度变化率的影响[†]

Table 3 Peeling rate, hardness, lycopene content and chromaticity change rate under different infrared time

红外处理时间/min	去皮率/%	硬度/(g·mm ⁻²)	番茄红素含量/(mg·kg ⁻¹)	色度变化率/%
2	74.60±0.91 ^c	12.50±0.66 ^a	17.28±1.07 ^c	4.31±0.30 ^d
3	76.62±0.76 ^c	11.32±0.41 ^a	16.38±3.27 ^c	10.74±0.04 ^c
4	85.16±1.11 ^b	8.75±0.95 ^b	22.20±1.10 ^b	23.96±0.48 ^b
5	97.80±0.50 ^a	7.60±0.68 ^b	30.39±0.71 ^a	28.27±1.52 ^a
6	97.80±0.50 ^a	3.68±0.08 ^c	28.31±2.77 ^a	26.42±1.91 ^a

[†] 字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

果肉硬度、番茄红素含量和颜色,红外处理时间为 5 min 较优。

综上,在催化式红外去皮过程中,红外温度、双板距离和红外处理时间均对去皮率和果肉品质有显著影响,其最优工艺参数为红外温度 450 ℃,双板距离 25 cm,红外处理时间 5 min,此时去皮率高达 98%,且果肉硬度(7.60 g/mm²)、番茄红素含量(30.39 mg/kg)最优,颜色鲜红,果肉完整性良好。与传统的热水和碱液去皮方式相比,催化式红外去皮方式无任何废水产生,更加绿色环保。

2.4 去皮方法对去皮效果的影响

2.4.1 对果肉硬度的影响 由表 4 可知,与手工去皮相比,其他 3 种去皮方式处理后果肉硬度均显著降低($P<0.05$)。其中,红外去皮后果肉硬度相对最好(7.61 g/mm²),其次是热水去皮(6.66 g/mm²),碱液去皮后果肉硬度(4.84 g/mm²)下降最大。热碱液处理后果肉硬度较低,一方面可能是由于热碱液溶解并去除果皮表面的外表皮,并通过切割果胶的 α -1,4 糖苷键溶解角质层,对皮下细胞壁造成一定的破坏,同时还会损害胞内果胶多糖的纤维素—微纤维的网状结构^[27]。另一方面,热碱液会透过果皮扩散至果肉内,与胞内物质(聚半乳糖醛酸、半纤维素多糖、蛋白质等)反应^[28],使果肉质地下降,这与 Li 等^[29]的结果一致。热水去皮后果肉硬度下降是由于热处理造成表皮细胞壁中果胶热溶解和解聚^[30],细胞间结合力下降,细胞分离,导致质地软化;另一方面,高温有助于果皮下气压的形成,皮下气压积累导致细胞膨压损失^[31],硬度下降。这与王丽娟^[17]的结论一致。红外去皮过程中,果肉中水分子吸收红外辐射后振动增强,果肉迅速升温,热降解果胶和纤维素,网络结构消失^[17],从而降低其硬度,这与徐保国等^[11]的结果一致。

综上,热水和红外去皮后西红柿果肉仍具有较高的硬度,而碱液去皮后的果肉硬度最低,果肉损失严重。

2.4.2 对番茄红素含量的影响 由表 4 可知,与手工去皮相比,碱液去皮后番茄红素含量显著降低,下降了 44.51%,红外和热水去皮后番茄红素含量均显著增加($P<0.05$),其中红外去皮后番茄红素含量最高

表 4 4 种去皮方式处理后西红柿果肉的硬度[†]

Table 4 Hardness of tomato flesh treated with four peeling methods

去皮方式	硬度/(g·mm ⁻²)	番茄红素含量/(mg·kg ⁻¹)	色度变化率/%
手工去皮	27.90±3.88 ^a	17.48±1.89 ^c	—
红外去皮	7.61±1.61 ^b	30.39±0.71 ^a	26.20±2.87 ^c
热水去皮	6.66±1.10 ^{bc}	23.05±2.44 ^b	34.88±2.92 ^b
碱液去皮	4.84±0.83 ^c	9.70±0.79 ^d	44.06±1.88 ^a

[†] 字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

(30.39 mg/kg),其次是热水去皮。碱液去皮后番茄红素含量显著下降可能是由于碱性条件下西红柿过度去皮,番茄红素失去了细胞组织的保护而被破坏^[17],番茄红素含量降低,与 Das 等^[32]的结论一致。热水和红外去皮后番茄红素含量增加,是由于这两种处理方式均为热处理而无碱液的腐蚀性,热处理破坏了细胞完整性^[26],使得番茄红素更易从细胞内溶出。热水去皮后番茄红素含量显著低于红外去皮的($P<0.05$),可能是由于热水去皮的温度过高(95 ℃),在促进番茄红素溶出的同时,又对其有一定程度的破坏;而红外去皮的红外温度较高,但西红柿表皮温度实测为 80 ℃,其对番茄红素的破坏作用小于热水去皮处理。

综上,番茄红素含量由高到低依次为红外去皮、热水去皮、手工去皮、碱液去皮。其中,红外和热水去皮更有利于番茄红素促溶,碱液去皮对番茄红素破坏作用最大。

2.4.3 对果肉色度变化率的影响 由表 4 可知,与手工去皮相比,其他 3 种去皮方式处理后果肉色度均存在显著差异($P<0.05$),其中碱液去皮后果肉色度变化率最大(44.06%),可能是由于碱液去皮使西红柿红色层部分消失,碱液离子化效应造成颜色变暗红色,同时可以清晰地观察到黄色的维管束,因此色度变化率较大,与 Gao 等^[9]的结论一致。热水和红外去皮后果肉色度变化率分别为 34.88%,26.20%。综上,色度变化率由高到低依次为碱液去皮、热水去皮、红外去皮。其中红外和热水去皮使得果肉红色加深,碱液去皮使得果肉颜色变为暗红色。

2.4.4 对果皮微观结构的影响 由图 2 可知,新鲜的西

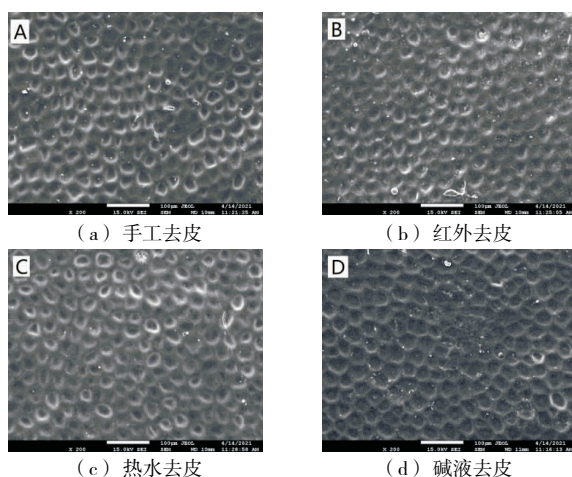


图 2 4 种去皮方式处理后西红柿果皮的微观结构

Figure 2 Microstructures of tomato peel treated by four methods

红柿果皮可以观察到清晰的细胞壁轮廓;与新鲜西红柿果皮相比,红外去皮后西红柿表皮细胞也具有明显的细胞壁轮廓,与 Li 等^[19]的结果一致,说明红外辐射可以实现果皮表面快速地加热,对表皮层的损伤较小。热水去皮后果皮的细胞壁轮廓轻微模糊,可能是由于西红柿表皮具有非常薄的疏水蜡状表皮膜^[33],热水处理下西红柿的表面温度较高,导致西红柿的蜡质表皮膜发生了相变,表皮蜡的熔化导致细胞壁轮廓不太明显^[19]。碱液去皮后果皮的微观结构变化最大,说明碱液有一定的渗透作用,使得表皮细胞从凸起状变成了扁平状且轮廓更加可见,这与 Floros 等^[27]的结果一致。

2.4.5 对果肉微观结构的影响 由图 3 可知,手工去皮后果肉组织形态清晰;红外去皮后果肉微观结构变得更加平整,与手工去皮后的略有差别。热水去皮后果肉细胞壁出现膨胀现象,表明热水去皮过程中的热效应导致了皮下气压的形成,皮下气压积累导致细胞壁膨胀^[31],一定程度上破坏了果肉组织。碱液去皮后果肉组织表现出增厚的细胞壁以及部分果肉组织塌陷,这归因于碱液扩散渗透到了西红柿果肉组织内部,对细胞壁造成了一定的破坏,部分果肉组织塌陷,与 Floros 等^[27]的结论一致。

综上,红外去皮对果肉微观结构影响最小,使果肉组织更加平整,热水去皮使得果肉组织细胞壁膨胀,碱液去皮对果肉微观结构破坏最大。

2.4.6 对果肉果皮连接层微观结构的影响 由图 4 可知,新鲜西红柿是由 1 层角质层、1 层单细胞厚的表皮细胞和 2~4 层厚壁皮下细胞组成,结构排列有序,且表皮细胞和皮下细胞呈明显的网络状,与 Li 等^[19]的结果一致。与新鲜西红柿相比,红外去皮后果皮果肉层有明显的果皮果肉分离现象,可能是由于红外辐射照射在西红柿果皮上,热量通过传导传热从表皮渗透到组织内部,使

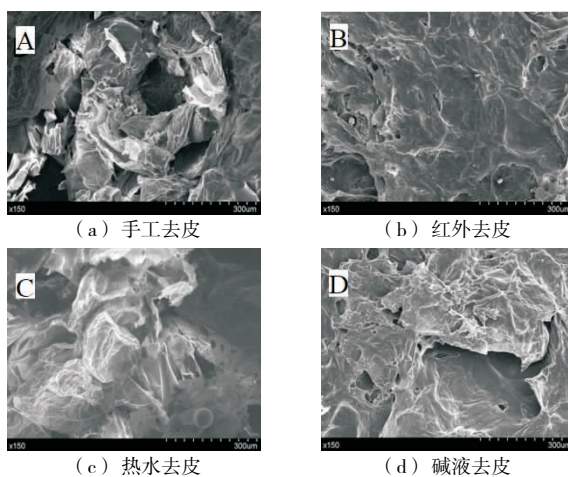


图 3 4 种去皮方式处理后西红柿果肉的微观结构

Figure 3 Microstructures of tomato flesh treated with four methods

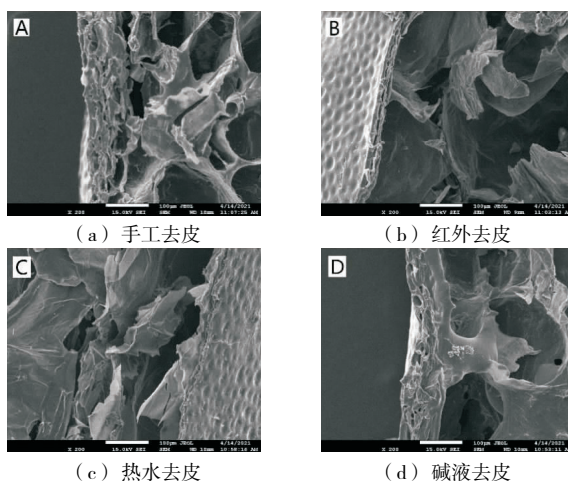


图 4 4 种去皮方式处理后果皮果肉连接层的微观结构

Figure 4 Microstructures of the cross-section of the peel and pulp treated with four peeling methods

细胞壁和细胞液内部温度升高,降低了细胞间的粘附作用,导致果皮果肉分离^[19]。

热水去皮后果皮果肉层分离更加明显但对果肉细胞有一定的热损伤,可能是由于热水处理下西红柿的表面温度较高,高温降解了果皮果肉层的果胶^[30],造成了细胞壁分离以及细胞间隙扩大,导致果皮果肉明显分离。此外,高温有助于皮下气压的形成,皮下气压积累导致细胞膨压损失^[31],表明果肉的细胞受到了一定的热损伤。碱液去皮对果皮果肉层的破坏力最大,碱液去皮后皮肉层明显变薄,网络结构消失,且皮下细胞内多孔空间增加,说明碱液扩散到了皮下细胞组织内部,溶解了角质层,对细胞壁造成了一定的破坏,导致皮肉层明显变薄,并通过切割果胶的 α -1,4 糖苷键降解了中间层的果胶物质^[27],造成网络结构消失。另一方面,热碱液腐蚀性强且会穿

透果皮扩散至果肉组织内部,与胞内物质如聚半乳糖醛酸、半纤维素多糖、蛋白质发生反应^[28],形成多孔结构,造成皮下细胞内多孔空间增多。

3 结论

研究发现,西红柿催化式红外去皮的最优工艺参数为催化红外温度 450 ℃,双板距离 25 cm,红外处理时间 5 min,此时去皮率高达 98%,且果肉硬度(7.60 g/mm²)和番茄红素含量(30.39 mg/kg)最优,颜色红润。红外和热水去皮后果肉仍具有较高的硬度、番茄红素含量,颜色更红润,果肉完整性良好,但碱液去皮后果肉硬度最低,对番茄红素破坏作用最大,颜色变为暗红色,果肉完整性最差。此外,红外去皮对果皮和果肉微观结构影响最小,其次是热水去皮;红外和热水去皮对果皮果肉层的微观结构有明显影响,会造成网络结构消失,加速果皮果肉分离,而碱液去皮对果皮果肉层微观结构破坏最大。综上,催化红外去皮方式更适合西红柿的去皮加工,其去皮率高,对果肉硬度、番茄红素、颜色和结构的破坏最小,能保持良好的果肉完整性。后续将进一步深入分析催化红外去皮方式对果肉中果胶、维生素等营养物的影响,以进一步探讨其对产品品质的影响。

参考文献

- [1] 张群,舒楠,张维.不同去皮方法对猕猴桃去皮效果和品质的影响[J].湖南农业科学,2021(2): 87-90, 95.
ZHANG Qun, SHU Nan, ZHANG Wei. Effects of different peeling methods on peeling efficiency and quality of kiwifruit[J]. Hunan Agricultural Sciences, 2021(2): 87-90, 95.
- [2] WANG Wen-jun, WANG Li-juan, FENG Yi-ming, et al. Ultrasound-assisted lye peeling of peach and comparison with conventional methods[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2018, 47: 204-213.
- [3] VIDYARTHI S K, EI MASHAD H M, KHIR R, et al. Evaluation of selected electric infrared emitters for tomato peeling[J]. Biosystems Engineering, 2019, 184: 90-100.
- [4] 王丽娟,宋思圆,姜鹏,等.不同去皮方法对番茄去皮效果和品质的影响[J].食品科学,2017,38(5): 26-31.
WANG Li-juan, SONG Si-yuan, JIANG Peng, et al. Effects of different peeling methods on the peeling efficiency and quality of tomatoes[J]. Food Science, 2017, 38(5): 26-31.
- [5] PAN Zhong-li, LI Xuan, KHIR R, et al. A pilot scale electrical infrared dry-peeling system for tomatoes: Design and performance evaluation[J]. Biosystems Engineering, 2015, 137: 1-8.
- [6] 吴本刚.胡萝卜催化式红外干法杀青—红外热风顺序联合干燥技术研究[D].镇江:江苏大学,2014: 1-21.
WU Ben-gang. Study of carrot dry-blanching and dehydration using sequential infrared radiation heating and hot air drying[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2014: 1-21.
- [7] LI Xuan, PAN Zhong-li, ATUNGULU G G, et al. Peeling of tomatoes using novel infrared radiation heating technology[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2014, 21: 123-130.
- [8] 付复华,袁洪燕,潘兆平,等.黄桃超声波辅助酶法去皮工艺优化及其品质分析[J].食品与机械,2016,32(8): 182-187.
FU Fu-hua, YUAN Hong-yan, PAN Zhao-ping, et al. Optimization and quality analysis of ultrasonic assisted enzymatic hydrolysis on peeling yellow peach fruit[J]. Food & Machinery, 2016, 32(8): 182-187.
- [9] GAO Rui-ping, YE Fa-yin, LU Zhi-qiang, et al. A novel two-step ultrasound post-assisted lye peeling regime for tomatoes: Reducing pollution while improving product yield and quality[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2018, 45: 267-278.
- [10] FISH W W, PERKINS-VEAZIE P, COLLINS J K. A quantitative assay for lycopene that utilizes reduced volumes of organic solvents[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2002, 15(3): 309-317.
- [11] 徐保国,周天楚,魏本喜,等.催化式红外辐照改善樱桃番茄去皮效果及品质[J].农业工程学报,2018,34(24): 299-305.
XU Bao-guo, ZHOU Tian-chu, WEI Ben-xi, et al. Improvement of peeling effect and quality of cherry tomato by catalytic infrared irradiation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(24): 299-305.
- [12] VIDYARTHI S K, EI-MASHAD H M, KHIR R, et al. Tomato peeling performance under pilot scale catalytic infrared heating[J]. Journal of Food Engineering, 2019, 246: 224-231.
- [13] GARROTE R L, SILVA E R, BERTONE R A. Effect of thermal treatment on steam peeled potatoes [J]. Journal of Food Engineering, 2000, 45(2): 67-76.
- [14] BOURNE M C. Applications of chemical kinetic theory to the rate of thermal softening of vegetable tissue[M]//JEN J J. Quality factors of fruits and vegetables. Geneva: New York State Agricultural Experiment Station, Cornell University, 1989: 98-110.
- [15] WILHELM S, HELMUT S. Uptake of lycopene and its geometrical isomers is greater from heat-processed than from unprocessed tomato juice in humans[J]. Journal of Nutrition, 1992, 122: 2 161-2 166.
- [16] HONDA M, WATANABE Y, MURAKAMI K, et al. Thermal isomerization pre-treatment to improve lycopene extraction from tomato pulp [J]. LWT-Food Science and Technology, 2017, 86: 69-75.
- [17] 王丽娟.三种水果罐头原料去皮技术的研究[D].杭州:浙江大学,2017: 5-42.
WANG Li-juan. Study on the peeling technology of three canned fruits[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017: 5-42.
- [18] 刘自畅,宋卫东,丁天航,等.番茄红外加热去皮试验与分析[J].中国农机化学报,2020,41(1): 95-100.
LIU Zi-chang, SONG Wei-dong, DING Tian-hang, et al. Experiment and analysis of peeling tomato by infrared heating[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(1): 95-100.

- [19] LI Xuan, PAN Zhong-li, ATUNGULU G G, et al. Peeling mechanism of tomato under infrared heating: Peel loosening and cracking[J]. Journal of Food Engineering, 2014, 128: 79-87.
- [20] THOMPSON K A, MARSHALL M R, SIMS C A, et al. Cultivar, maturity, and heat treatment on lycopene content in tomatoes[J]. Journal of Food Science, 2000, 65: 791-795.
- [21] 毛立科, 高彦祥. 番茄红素稳定性研究综述[J]. 中国食品添加剂, 2008(2): 57-60.
- MAO Li-ke, GAO Yan-xiang. Review on the study of lycopene stability[J]. China Food Additives, 2008(2): 57-60.
- [22] 才美慧. 加工过程对番茄红素稳定性及其异构化影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2018: 18-42.
- CAI Mei-hui. Effect of processing on the stability and isomerization of lycopene[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2018: 18-42.
- [23] GOMEZ-LOPEZ M, GARCIA-QUIROGA M, ARBONES-MACI-NEIRA E, et al. Comparison of different peeling systems for ki-wifruit (*Actinidia deliciosa*, cv Hayward)[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2013, 49(1): 107-113.
- [24] WANG Bi-ni, VENKITASAMY C, ZHANG Fu-xin, et al. Feasibility of jujube peeling using novel infrared radiation heating technology[J]. LWT-Food Science & Technology, 2016, 69: 458-467.
- [25] ILKER R, SZCZESNIAK A S. Structural and chemical bases for texture of plant food stuffs[J]. Journal of Texture Studies, 1990, 21: 1-36.
- [26] SHI J, MAGUER M L. Lycopene in tomatoes: chemical and physical properties affected by food processing[J]. Critical Reviews in Biotechnology, 2000, 20(4): 293-334.
- [27] FLOROS J D, WETZSTEIN H Y, CHINNANH M S. Chemical (NaOH) peeling as viewed by scanning electron microscopy: Pimiento peppers as a case study[J]. Journal of Food Science, 2010, 52(5): 1 312-1 316.
- [28] FLOROS J D, CHINNAN M S. Diffusion phenomena during chemical (NaOH) peeling of tomatoes [J]. Journal of Food Science, 2010, 55(2): 552-553.
- [29] LI Xuan, ZHANG A, ATUNGULU G G, et al. Effects of infrared radiation heating on peeling performance and quality attributes of clingstone peaches[J]. LWT-Food Science and Technology, 2014, 55(1): 34-42.
- [30] MOELANTS K R N, JOLIE R P, PALMERS S K J, et al. The effects of process-induced pectin changes on the viscosity of carrot and tomato sera[J]. Food and Bioprocess Technology, 2012 (6): 2 870-2 883.
- [31] BELIE N D, HERPPICH W, BAERDEMAEKER J D. A kinetic model for turgor loss in red cabbage cells during mild heat treatment[J]. Journal of Plant Physiology, 2000, 157(3): 263-272.
- [32] DAS D J, BARRINGER S A. Potassium hydroxide replacement for lye (sodium hydroxide) in tomato peeling[J]. Journal of Food Processing & Preservation, 2010, 30(1): 15-19.
- [33] DOMINGUEZ E, CUARTERO J, HEREDIA A. An overview on plant cuticle biomechanics [J]. Plant Science: An International Journal of Experimental Plant Biology, 2011, 181(2): 77-84.
- (上接第 168 页)
- [16] 陈荻, 李阳, 田梦, 等. 人参皂苷 Re 对慢性酒精中毒大鼠学习、记忆能力的影响及机制[J]. 中华中医药学刊, 2016(12): 2 974-2 977.
- CHEN Di, LI Yang, TIAN Meng, et al. Effects and mechanism of ginsenoside Re on learning and memory abilities of rats with chronic alcoholism[J]. Chinese Archives of Traditional Chinese Medicine, 2016(12): 2 974-2 977.
- [17] 吕兆良, 许宙, 李季, 等. 食源性抗氧化剂在神经退行性疾病中的研究进展[J]. 食品与机械, 2015, 31(2): 243-247, 273.
- LU Zhao-liang, XU Zhou, WEN li, et al. Progress of foodborne antioxidant in neurodegenerative diseases[J]. Food & Machinery, 2015, 31(2): 243-247, 273.
- [18] 朱西平, 李文治, 陶倩, 等. 维生素 B 族复合 TRP 肽和 SOD 对焦虑性抑郁症 C57BL/6 小鼠行为学改善的影响[J]. 食品与机械, 2020, 36(3): 166-172.
- ZHU Xi-ping, LI Wen-zhi, TAO Qian, et al. Effects of a formula containing vitamin B on ameliorates anxious/depression-like behaviors in anC57BL/6 mice model[J]. Food & Machinery, 2020, 36(3): 166-172.
- [19] 荣爽. 莲房原花青素对老年大鼠学习记忆减退障碍的影响及其机制研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2009: 33-35.
- RONG Shuang. The ameliorative effect and mechanism of rocyanidins extracted from the lotus seedpod on age-associated memory impairment in rats[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2009: 33-35.
- [20] CUI Hong-xin, CHEN Ji-hong, LI Jing-wan, et al. Protection of anthocyanin from myrica rubra against cerebral ischemia-reperfusion injury via modulation of the TLR4/NF- κ B and NLRP3 pathways[J]. Molecules, 2018, 23(7): 1 788.
- [21] ALI T, KIM T, REHMAN S U, et al. Natural dietary supplementation of anthocyanins via PI3K/Akt/Nrf2/HO-1 pathways mitigate oxidative stress, neurodegeneration, and memory impairment in a mouse model of Alzheimer's disease[J]. Molecular Neurobiology, 2017, 55: 6 076-6 093.
- [22] MENDOZA-WILSON A M, CASTRO-ARREDONDO S I, BAL-ANDRAN-QUINTANA R R. Computational study of the structure-free radical scavenging relationship of procyanidins[J]. Food Chemistry, 2014, 161(15): 155-161.
- [23] 张颖, 张蓓琳, 冯加纯. 葡多酚对慢性酒精中毒大鼠的脑保护作用[J]. 浙江医学, 2008, 30(10): 1 069.
- ZHANG Ying, ZHANG Bei-lin, FENG Jia-chun. Cerebral protection effect of grape polyphenols in rats with chronic alcoholism[J]. Zhejiang Medical Journal, 2008, 30(10): 1 069.