番茄酱加工后皮渣分离试验装置的设计

冉兵，王丽红，坎杂，李成松，杜翔
（石河子大学机械电气工程学院，新疆石河子 832000）

摘要：为优化基于双作用的加工番茄酱后皮渣分离装备性能，进一步提高番茄籽与皮的分离率和分离净度，设计了以离心筛分装置、斜板沉降装置和喂入系统为核心工作部件的双作用皮渣分离试验台。采用可组合的模块化结构，试验台更换安装方便，工作部件的结构参数和运动参数完全可调，可建立不同工况下各因素与分离率、分离净度等质量指标之间的关系模型，获得沉降室流场分布规律。验证试验结果表明，试验台工作性能稳定，参数调整方便，离心筛分工作部件的喂入量（F=5329.00，P<0.01）、刮板转速（F=841.00，P<0.05）、刮板角度（F=1225.00，P<0.05）、喂入量和刮板角度的交互作用（F=225.00，P<0.05）对皮渣分离净度（64%~98%）影响显著。本试验台为加工番茄酱后皮渣双作用分离装备的优化设计提供参数依据。

关键词：加工番茄；皮渣；双作用；喂入系统；试验台

文章篇号：1673-9078(2015)5-163-168 DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2015.5.026

Testing Apparatus Design for Tomato Pomace Separation after Tomato Sauce Processing

RAN Bing, WANG Li-hong, KAN Za, LI Cheng-song, DU Xiang
(College of Mechanical and Electrical Engineering, Shihezi University, Shihezi 832000, China)

Abstract: To optimize the performance of separating equipment to process tomato pomace in terms of separation rate and degree of separation cleanliness of tomato seeds and skin, a double-action pomace-separation test apparatus was developed. Core operating components in this design included a centrifugal screening device, inclined plate sedimentation unit, and a feeding system. The combined modular design showed installation and replacement compatible with the test apparatus, while structure and motion parameters of the operating components were fully adjustable. The relationship model between various factors under different working conditions and quality indices (such as the separation rate and degree of separation cleanliness) was established, and flow field distribution in the settling chamber was acquired. Verification test results showed that the test apparatus exhibited a stable performance and parameters were easy to adjust. The degree of pomace separation cleanliness (64% to 98%) was significantly affected by feed rate of the centrifugal screening device ($F = 5329.00$, $P < 0.01$), speed ($F = 841.00$, $P < 0.05$) and angle ($F = 1225.00$, $P < 0.05$) of the scraper, and interaction of feed rate and scraper angle ($F = 225.00$, $P < 0.05$). This test apparatus design provides parameter basis to optimizing the design of separating equipment based on double-action that can be applied to tomato pomace processing.

Key words: tomato processing; pomace; double-action; feeding system; test apparatus

加工番茄为适宜作番茄制品原料的番茄品种群，其皮薄、肉厚、汁少、可溶性固形物含量高[1]。新疆地处祖国西北边陲，独特的光热和水土条件成就了优质番茄的生长，成为仅次于意大利、美国后的世界第三大番茄酱产区，同时也是亚洲最大的番茄生产和加工基地，2012 年新疆加工番茄产量 579.46 万 t，生产番茄酱 62.87 万 t[2]，产生加工番茄酱后皮渣（简称酱后皮渣）20 余万 t（约占番茄总量的 3%~5%[3]）。酱后皮渣主要由番茄籽和番茄皮组成，其中番茄籽中含有约 25%的油脂和 20%的蛋白质，番茄皮是一种较好的膳食纤维来源，含有丰富的番茄红素，且番茄籽油的压榨工艺[4~5]以及番茄红素的提取工艺[6~8]相对比较成熟，番茄籽、皮深加工产品市场前景可观。但目前酱后皮渣大部分被干燥后用作肥料或饲料[9~12]，仅有少量皮渣依靠人工分离制取番茄种子，生产效率低，劳动强度大，未及时清运的皮渣则被废弃掉，既浪费资源，又污染环境。

王丽红等[13]设计的基于斜板沉降技术和离心筛分

收稿日期：2014-07-02
基金项目：国家自然科学基金资助项目（31160347）
作者简介：冉兵（1989-），男，在读硕士研究生，主要从事现代机械设计研究
通讯作者：坎杂（1963-），男，教授，博士生导师，主要从事农业机械装备研究

原理相结合的双作用酱后皮渣分离装备，实现了酱后皮渣的机械化分离。但因酱后皮渣中除番茄籽、皮外，同时含有少量果梗、果胶及未提取干净的番茄汁，各成分比重相差不大，且在果胶作用下粘结、包裹在一起，造成分离困难，分离装备的分离效果、工作性能有待进一步提高。

为了优化酱后皮渣分离装备性能，模拟皮渣分离实际工况，探索影响离心筛分、斜板沉降效果和分离损失等的关键性影响因素，寻求各因素的最佳参数组合，本文设计的完全参数化、可视化双作用皮渣分离试验台，可再现皮渣分离、清洗全过程，通过试验获取关键部件最佳的工作与运动参数，为酱后皮渣双作用分离装备的优化设计提供依据。

1 试验台整体结构与工作原理

1.1 整体结构及主要参数

酱后皮渣双作用分离试验台基于离心筛分与斜板沉降相结合的技术原理，实现皮渣机械化分离。试验台主要由离心筛分装置、斜板沉降装置、喂料系统、传动系统等部分组成，采用三级分离结构，以有机玻璃为箱体材料，皮渣分离过程完全可视，其机械系统整体结构如图 1 所示，相关参数如表 1 所示。

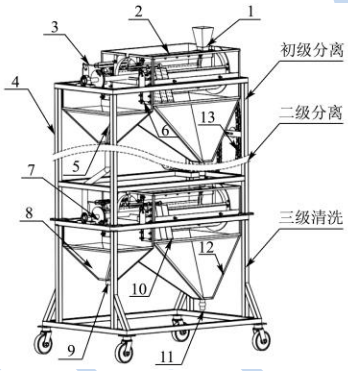


图 1 试验台机械系统整体结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the mechanical systems in the test apparatus

注：1：喂料口，2：离心筛分装置，3：沉降斜板调节机构，4：机架，5：出皮箱，6：液位调节结构，7：斜板角度调节机构，8：出籽箱，9：出籽口，10：沉降斜板，11：出水口，12：沉降室，13：传动系统。

1.2 工作原理

加水稀释后的酱后皮渣通过水泵抽送，经喂料口进入离心筛分滚筒。初级分离中，在与轴线成一定角度的刮板连续搅动作用下，酱后皮渣中的籽、皮、果肉分开，尺寸较小的籽和果肉在刮板搅动及离心力作用下进入沉降室，尺寸较大的番茄皮被刮板推至滚筒尾部，从出皮口排出，从而实现酱后皮渣的初次分离；落入沉降室的物料，依靠番茄籽、果肉和果皮之间的比重差异，同时借助斜板沉降技术，加速比重较大的番茄籽的沉降，从沉降室的出籽口流出，比重较小的果肉及果皮上浮，从溢流槽排出，实现二次分离。二级分离进一步去除番茄籽中尺寸较小的番茄皮；三级分离中，番茄果肉落入沉降室，番茄籽被刮板推送至出籽箱，实现番茄籽的清洗。

表 1 试验台主要参数

Table 1 Main structure parameters of the test apparatus

参数	数值	备注
机架长×宽×高/mm×mm×mm	1500×3500×1000	
喂入量/(kg/s)	200~600	无极可调
刮板转速/(r/min)	0~150	无极可调
刮板倾角/°	0~25	无极可调
沉降斜板角度/°	0~90	无极可调
沉降斜板间距/mm	20~80	无极可调
液位高度/mm	0~100	无极可调
筛分滚筒长径比	2~5	可调
筛分滚筒筛孔尺寸/mm	1~4.5	可调
沉降室尺寸长×宽×高/mm×mm×mm	100×600×850	
出皮箱尺寸长×宽×高/mm×mm×mm	600×400×450	

2 关键工作部件设计

2.1 离心筛分装置

离心筛分装置实现酱后皮渣的初次分离，主要由喂料口、筛分滚筒、刮板组件、刮板角度调节轮和中心传动轴等元件组成，如图 2 所示。

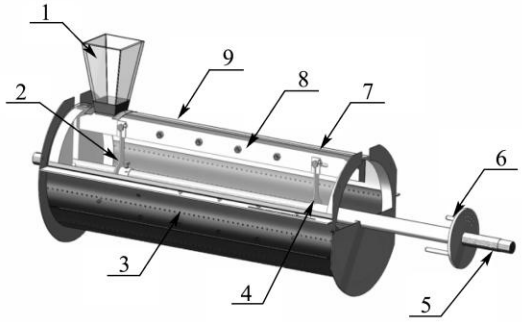


图 2 离心筛分装置

Fig.2 Centrifugal screening device

注：1：喂料口，2：刮板固定片，3：筛分滚筒，4：刮板调整片，5：中心传动轴，6：角度调节手轮，7：PVC 塑料软板，8：双层刮板片，9：有机玻璃盖。

筛分滚筒下半部分为不锈钢圆筒筛，实现皮渣的离心筛分，上半部分为有机玻璃盖，可观察滚筒内部物料运动状态。筛分滚筒与机架螺栓相连接，采用可更换式装配，以调整分离滚筒长径比。搅动刮板中间层为 PVC 塑料软板，保持刮板与筛分滚筒内壁为柔性摩擦，以缩小壁、板间隙，同时刮板沿轴线方向具有一定的倾斜角度，角度调节手轮可调节倾斜角度大小。变速减速系统使刮板在一定转速下旋转，转速过低，筛分滚筒内物料无法排出，转速过大，物料将在筛分滚筒做匀速圆周运动，不能抛离筛面，同时沉降室中水流紊动将增强，不利于皮渣二次斜板沉降分离，因此，刮板转速需满足：

$$mw^2r > mg \text{，即：} n > \frac{60}{2\pi}\sqrt{g/r} \quad (1)$$

$$\frac{1}{2}m(wr)^2 < 2mgr \text{，即：} n < \frac{60}{\pi}\sqrt{g/r} \quad (2)$$

注：式（1）、（2）中，n 为刮板转速，r/min；w 为刮板旋转角速度，rad/s；m 为物料质量，kg；r 为离心筛分滚筒半径，m。

试验获取分离滚筒最佳长径比，基于不同筛分滚筒半径，联立式（1）和（2），得刮板转速范围，综合考虑生产实际，刮板倾角可调节范围为 0°~25°。

在筛分滚筒物料层中任取一单元体，其在滚筒内的运动轨迹如图 3 所示。物料沿轴线作螺旋筛分运动，直至排出筛分滚筒，运动可分解为 xoy 平面内的平面运动和沿 z 轴线方向的直线运动。

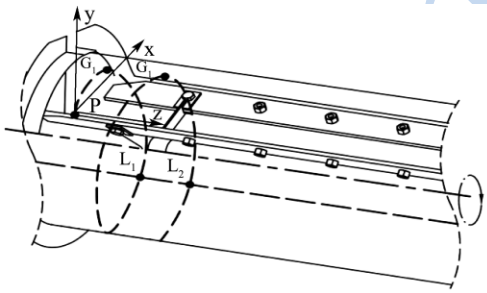


图 3 皮渣在筛分滚筒内的运动轨迹

Fig.3 Pomace trajectory in the screening drum

单元体在 xoy 平面内的运动和受力情况如图 4，在推力 T 的作用下，物料随刮板一起运动，当转到某一角度 α 时，物料重力 G 的法向分量 N 和离心力 F 相等，单元体开始脱离筛面，做抛物线运动。设搅动刮板线速度为 v，物料回转半径为 R，则物料到达 P 点时：

$$F = G\cos\alpha \text{，即} mv^2/R = G\cos\alpha \quad (3)$$

单元体在 xoy 平面内的运动过程分为两部分：L 点到 P 点的圆周运动，P 点到 L 点的抛物线运动。具体运动方程如下：

圆周运动方程：

$$\begin{cases} x = R\sin\alpha + R\sin wt \\ y = -R\cos\alpha + R\cos wt \end{cases} \quad (4)$$

抛物线运动方程：

$$\begin{cases} x = vt\cos\alpha \\ y = vt\sin\alpha - 1/2gt^2 \end{cases} \quad (5)$$

注：式（4）、（5）中，R 为单元体在 xoy 平面内距中心轴线距离，m；α 为单元体脱离筛面角度，°；v 为单元体脱离筛面线速度，m/s；w 为旋转刮板角速度，rad/s；t 为单元体运动时间，s。

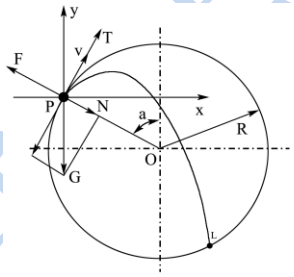


图 4 皮渣在 xoy 平面内的运动轨迹

Fig.4 Pomace trajectory in the x-y plane

2.2 斜板沉降装置

沉降斜板装置结构如图 5 所示，主要由沉降斜板与其角度、间距调整机构组成。斜板组上端所装有的溢流槽和液位高度调节机构，可保证轻物料的溢流方向，通过调整溢流槽高度，可改变沉降室的液位造成的压差，控制斜板间的进、出料速度，加速皮渣的二次分离。

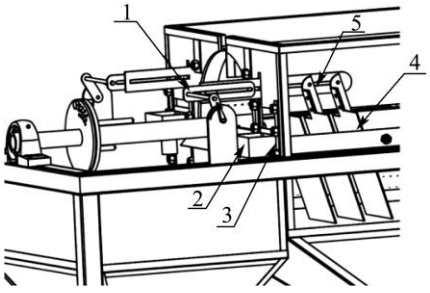


图 5 斜板沉降装置

Fig.5 Inclined plate sedimentation device

注：1：沉降斜板角度调节机构，2：溢流槽，3：液位高度调整滑道，4：沉降斜板，5：沉降斜板间距调节滑道。

皮渣斜板沉降原理如图 6（a）所示，番茄籽与皮渣其他相逆向流动，比重较轻的番茄皮、果肉沿斜板下表面向上流动，比重较大的番茄籽沿斜板上表面下滑，缩短了皮渣二次分离时间，同时减小了筛分滚筒内因刮板搅动而造成的斜板顶端液体紊流，使各斜板间的分离过程稳定、均一。设斜板长为 L，宽为 B，倾

角为θ，斜板间距为d，单元内的水速为v_0，番茄籽沉速为v_1，按图 6（b）的矢量关系可得：

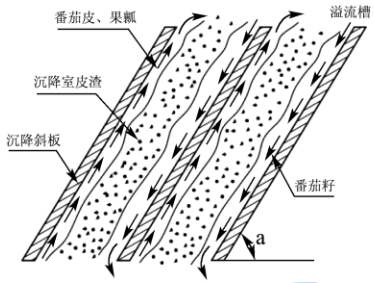
$$\frac{v_0}{v_1}=\frac{L+d/\sin\theta\cos\theta}{d/\cos\theta}=\frac{L\sin\theta\cos\theta+d}{d\sin\theta} \quad (6)$$

通过每个沉降单元的流量$q=v_0 dB$，即$v_0=q/dB$，将其带入式 6 得：

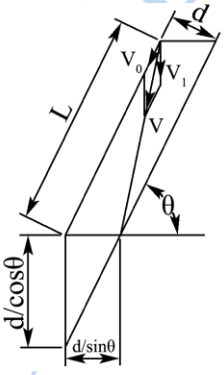
$$\frac{q}{v_1}=LB\cos\theta+dB/\sin\theta \quad (7)$$

式 7 中$LB\cos\theta$的为一个沉降单元斜板在水平方向上的投影面积，用a_f表示；$dB/\sin\theta$为沉降单元的水平底面积，用a表示。$a+a_f$即为一个沉降单元的总沉降面积，若沉降单元数为 n，斜板利用系数为 k，则有：

$$v_1=q/kn(a+a_f) \quad (8)$$



（a）皮渣斜板沉降原理



（b）番茄籽沉降矢量关系

图 6 酱后皮渣斜板沉降

Fig.6 Inclined plate sedimentation of pomace

为了让沉降于底部的番茄籽便于流动排除，沉降室底部倾斜一定角度，此角度大于番茄籽休止角。物料试验表明，倾斜角大于 36.5°，即可保证番茄籽从出籽口顺利排除。分离后的番茄籽分离净度计算公式为：

$$\lambda=100\%-\frac{m_p}{m_z-m_p}\times100\% \quad (8)$$

式（8）中，λ 为表示番茄籽的分离净度，%；m_p 为表示分离后番茄籽中混合的少量番茄皮重量，kg；m_z 为表示分离后的番茄籽（混合有少量的番茄皮）总重量，kg。

2.3 喂料系统

试验台喂料系统主要由皮渣调节池、污水泵、输送管、流量调节阀、电磁流量计等组成。按比例稀释后的皮渣进入皮渣调节池，以 PVC 管作为输送管，采用污水泵持续喂料。为保证进入电磁流量计中的流体流动平稳，得到准确测量结果，同时调整喂料量，在其前端安装进料流量调节阀、回流管道和回流流量调节阀，以控制流体流动，电磁流量计实时显示喂料量，如图 7 所示：

$$Q_0=Q-Q_{回} \quad (9)$$

注：Q 为水泵流量，kg/s；Q_0 为电磁流量计实时显示流量，kg/s；$Q_{回}$ 为回流管道流量，kg/s。

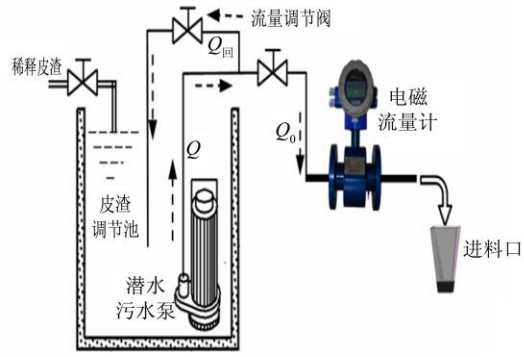


图 7 试验台喂料系统

Fig.7 Feeding system of the test apparatus

3 试验验证

酱后皮渣分离作业包括皮渣分散、番茄籽透筛、番茄皮螺旋推出、番茄籽沉降、小尺寸番茄皮和果瓤溢流等过程，其中分散皮渣在离心筛分滚筒内的运动状态对番茄籽的分离净度起着关键性作用。

3.1 试验方法

以喂入量、刮板转速、刮板角度为影响因素，其余变量为控制变量，测定离心筛分装置工作部件的显著性影响因素，验证试验台工作性能。

依据试验台设计参数，为了用较少的试验次数代

表整体因素、水平的影响，采用 L_8（2^7）正交试验[14]。试验因素与水平如表 2。

表 2 试验因素与水平

Table 2 Experimental factors and levels

水平	因素		
	W[喂入量/(kg/h)]	N[刮板转速/(r/min)]	J(刮板角度/°)
1	200	60	10
2	400	80	20

3.2 试验过程

3.2.1 启动进水泵，为分离系统供水，同时注意调整各阀门的开度，保证阀门开度均衡，满足试验台设计要求。当水位到达溢流口位置（一、二两级可从溢流口排水管道判断，第三级可以直接观察出籽口水流），启动电机运转试验台。

3.2.2 试验台运转平稳后，打开各级进料阀门，启动潜水泵，从皮渣分离调节池吸取稀释皮渣连续喂料，通过调节流量调节阀、变速减速系统和刮板角度调节轮，设定不同喂入量、刮板转速和角度。

3.3 试验记录

试验通过 8 组参数组合调整筛分系统试验参数，对试验台性能进行测定，每组做 3 次，取其平均值，按公式（8）计算皮渣分离净度，结果记录于表 3 中。其中 W、N、J 代表喂入量、刮板转速和角度，W×N、W×J、N×J 为各参数的交互作用。

表 3 试验结果

Table 3 Experimental results

试验号	因素						分离净度
	W	N	W×N	J	W×J	N×J	
1	1	1	1	1	1	1	0.98
2	1	1	1	2	2	2	0.95
3	1	2	2	1	1	2	0.92
4	1	2	2	2	2	1	0.85
5	2	1	2	1	2	1	0.83
6	2	1	2	2	1	2	0.72
7	2	2	1	1	2	2	0.78
8	2	2	1	2	1	1	0.64

3.3 结果分析

方差分析中 F 比越高，因素显著性影响越高，表 4 列出了正交试验的方差分析结果。对于分离净度，影响因子的主次顺序为喂入量、刮板角度、刮板转速、喂入量和刮板角度的二次交互作用、刮板角度和转速的二次交互作用、喂入量和刮板转速的二次交互作用。其中喂入量的 P 值小于 0.01，对分离净度影响极显著，刮板转速、刮板角度和喂入量与刮板角度的二次交互作用的 P 值小于 0.05，对分离净度影响显著。

表 4 试验结果方差分析

Table 4 ANOVA of experimental results

来源	Adj SS	f	Adj MS	F	P	显著性
W	0.066613	1	0.066613	5329.00	0.009	**
N	0.010512	1	0.010512	841.00	0.022	*
W×N	0.000113	1	0.000113	9.00	0.205	
J	0.015313	1	0.015313	1225.00	0.018	*
W×J	0.002813	1	0.002813	225.00	0.042	*
N×J	0.000613	1	0.000613	49.00	0.090	
误差	0.000012	1	0.000012			
合计	0.095987	7				

注：当 $F_{0.05}<F<F_{0.01}$ 时，认为因素影响显著，并用“*”号标识；当 $F_{0.01}<F$ 时，认为因素影响极显著，并用“**”号标识。

4 结论

4.1 研制的基于双作用分离的加工番茄酱后皮渣分离试验台，采用离心筛分与斜板沉降技术，可进行酱后皮渣的分离、清洗试验。其中离心筛分装置、斜板沉降装置和喂入系统等主要工作部件的参数完全可调，可对不同工况下皮渣在的筛分滚筒内的运动规律、筛分效果、斜板沉降效果、生产率和分离损失等指标进行试验测定与分析。

4.2 利用试验台进行了离心筛分装置工作部件可调参数的显著性影响试验。结果表明：喂入量（F=5329.00，P<0.01）、刮板转速（F=841.00，P<0.05）、刮板角度（F=1225.00，P<0.05）、喂入量和刮板角度的交互作用（F=225.00，P<0.05）对皮渣分离净度存在显著影响；在 10%的置信区间内，刮板转速和刮板角度的交互作用（F=49.00，P<0.1）对皮渣分离净度影响显著。

4.3 试验验证表明，试验台性能稳定，参数调整方便，可为皮渣分离装置的优化提供有效的试验数据参考。试验台分离筛筒上端盖和沉降室均以有机玻璃为材料，皮渣在试验台内部的分离过程完全可视，为后续借助高速摄影分析皮渣运动规律，验证分离滚筒及沉降室内流场分布提供技术条件。

参考文献

[1] 《中国农业全书》总编辑委员会,《中国农业全书 新疆卷》编辑委员会.中国农业全书（新疆卷）[M].北京:中国农业出版社,2000

《China Agricultural Testament》 the chief editor

committee, 《China Agricultural Testament·XinJiang volume》the Editor Committee . China Agricultural Testament (Xinjiang Volume) [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000

[2] 新疆维吾尔自治区统计局.新疆统计年鉴[J].北京:中国统计出版社,2013
Bureau of Xinjiang Uygur Autonomous Region. Xinjiang Statistical Yearbook [J]. Beijing: China Statistics Press, 2013

[3] Antonio Zuorro, Marcello Fidaleo, Roberto Lavecchia. Enzyme-assisted extraction of lycopene from tomato processing waste [J]. Enzyme and Microbial Technology, 2011, 49: 567-573

[4] Dongyan Shao, Griffiths G Atungulu, Zhongli Pan, et al. Study of optimal extraction conditions for achieving high yield and antioxidant activity of tomato seed oil [J]. Journal of Food Science, 2012, 77(8): E202-E208

[5] Roy Bhupesh C, Goto Motonobu, Hirose Tsutomu. Temperature and pressure effects on supercritical CO2 extraction of tomato seed oil [J]. International Journal of Food Science and Technology, 1996, 31(2): 137-141

[6] 周丹丹,吴晓英,甄双柒.固定化果胶酶提取番茄红素的工艺研究[J].现代食品科技,2008,24(11):1157-1172
ZHOU Dan-dan, WU Xiao-ying, ZHEN Shuang-qi. Extraction of lycopene from tomato with immobilized pectinase [J]. Modern Food Science and Technology, 2008, 24(11): 1157-1172

[7] Zeinab Dehghan-Shoar, Allan K Hardacre, Gerrit Meerdink, et al. Lycopene extraction from extruded products containing tomato skin [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2011, 46(2): 365-371

[8] 许庆陵,陆海霞,吴丽容,等.番茄红素提取工艺及其性质比较[J].现代食品科技,2009,25(1):86-90
XU Qing-ling, LU Hai-xia, WU Li-rong, et al. Extraction of lycopene from tomato and its properties [J]. Modern Food Science and Technology, 2009, 25(1): 86-90

[9] Mohammad Al-Harahsheh, Ala'a H Al-Muhtaseb, T R A Magee. Microwave drying kinetics of tomato pomace: Effect of osmotic dehydration. Chemical Engineering and Processing, 2009, 48(1):524-531

[10] B Mansoori, M Modirsanei, M Radfar, et al. Digestibility and metabolisable energy values of dried tomato pomace for laying and meat type cockerels [J]. Animal Feed Science and Technology, 2008, 141 (3-4): 384-390

[11] W P Weiss, D L Frobose, M E Koch. Wet Tomato Pomace Ensiled with Corn Plants for Dairy Cows [J]. Journal of Dairy Science, 1997, 80(11): 2896-2900.

[12] 高巧玲,青格乐,刘永录,等.番茄皮渣在饲料行业中的应用现状[J].畜牧与饲料科学,2013,34(2):24-26
GAO Qiao-ling, QING Ge-le, LIU Yong-lu, et al. Application status of tomato peels in feed industry [J]. Animal Husbandry and Feed Science, 2013, 34(2): 24-26

[13] 石河子大学.加工番茄酱后余料的分离机构:中国,200810072920.9 [P].2008-12-24
Shihezi University. Separation mechanism of processing tomato pomace: china, 200810072920.9 [P]. 2008-12-24.

[14] 任露泉.试验优化设计与分析[M].北京:高等教育出版社,2003
REN Lu-quan. Optimization design and analysis of experiments [M]. Beijing: Higher Education Press, 2003