

澳洲坚果脱皮机脱皮辊的力学特性仿真

Simulation analysis on mechanical properties of macadamia nut peeler roll

蒋快乐¹陈治华¹李亚南²谭先朝³JIANG Kuai-le¹ CHEN Zhi-hua¹ LI Ya-nan² TAN Xian-chao³

(1. 云南农业大学热带作物学院, 云南 普洱 665000; 2. 云南农业大学机电工程学院,

云南 昆明 650000; 3. 云南仁得科技有限公司, 云南 昆明 650000)

(1. School of Tropical Crops, Yunnan Agricultural University, Pu'er, Yunnan 665000, China;

2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Yunnan Agricultural University, Kunming,

Yunnan 650000, China; 3. Yunnan Sande Technology Co., Ltd., Kunming, Yunnan 650000, China)

摘要:目的:分析澳洲坚果脱皮机中的关键部件脱皮辊的结构强度和振动特性,确定其各项工况参数。方法:将建立好的脱皮辊 Solidworks 模型导入 Ansys 中进行静力学分析和模态模拟。结果:当脱皮辊工作转速为 861.4 r/min 时,其最大变形为 0.032 08 mm,等效应力为 11.872 MPa,正常工况下的最大等效应力远小于材料的屈服强度;其前 6 阶固有频率为 111.44, 111.46, 345.34, 345.71, 503.23, 681.05 Hz, 远大于该脱皮辊的工作频率。结论:该脱皮辊的强度和刚度满足实际生产要求,且正常工况下不会发生共振。

关键词:澳洲坚果;脱皮辊;数值仿真;有限元分析

Abstract: **Objective:** To analyze the structural strength and vibration characteristics of the peeling roller, the key component of the macadamia nut peeling machine, and determine its working parameters. **Methods:** The established Solidworks model of the peeling roller was imported into Ansys for static analysis and modal simulation. **Results:** When the working speed of the peeling roll was 861.4 r/min, its maximum deformation was 0.032 08 mm, and the equivalent stress was 11.872 MPa. The maximum equivalent stress under normal working conditions was far less than the yield strength of the material. The first six natural frequencies of the roller were 111.44, 111.46, 345.34, 345.71, 503.23, 681.05 Hz, which were much higher than the working frequency of the peeling machine. **Conclusion:** The strength and stiffness of the peeling roller meet the actual production requirements, and there will be no resonance under normal working conditions.

Keywords: macadamia; peeling roller; numerical simulation; finite element analysis

基金项目:蒋快乐,男,云南农业大学讲师,硕士。

作者简介:陈治华(1965—),男,云南农业大学教授,硕士。

E-mail: 841358535@qq.com

收稿日期:2021-04-28

澳洲坚果(*Macadamia ternifolia* F. Muell)为亚热带和热带的常绿树种,属于乔木果树,又名夏威夷果、昆士兰果、澳洲胡桃等^[1],主要分布于中国云南、贵州等地区,不仅品种多样、种植方式多样,且具有广阔的种植面积和消费市场^[2-3]。目前澳洲坚果的脱皮仍以手工、堆沤以及化学脱皮为主,极易对果仁造成污染,导致坚果果仁质量下降,影响口感^[4-5]。

目前,国外对澳洲坚果的脱壳和果仁等的研究开发已较为成熟^[6-7],中国也有关于澳洲坚果青皮脱皮机的研究,但技术力量薄弱,基础设施差,果仁的损伤率很难控制在较小的范围,也难将青皮快速地剥离且存在果汁液对果仁的污染问题^[8-9]。因此提高澳洲坚果的脱皮技术不仅可以解决果仁污染、质量下降等问题,也能极大地促进该行业的发展。

脱皮辊是澳洲坚果脱皮机中的一个重要部件,在工作过程中其受力的状况影响青皮的脱皮效率和机器运转的安全性及稳定性。坚果的脱皮率和工作部件的结构以及参数密切相关^[10]。由于坚果果皮对脱皮辊所施加的载荷,会导致脱皮辊产生与脱皮机固有频率接近的状况使脱皮机出现振动,从而影响机器中各机构的强度。因此,需利用 Ansys 软件对脱皮辊进行静力学分析和模态分析^[11]。文章拟对云南仁得科技有限公司现有脱皮机的脱皮辊进行力学特性仿真分析,旨在为后续中国澳洲坚果脱皮机的研发和发展提供依据。

1 脱皮辊结构与工作原理

1.1 脱皮辊结构

脱皮辊包括主辊和副辊,其中主副辊均由主轴、套筒、辊筒、螺旋钢纹等部分组成(见图 1)。其中套筒主要用来连接主轴和辊筒,并起到一定支撑作用,螺旋钢纹焊接在辊筒表面。

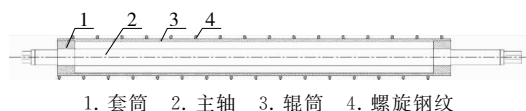
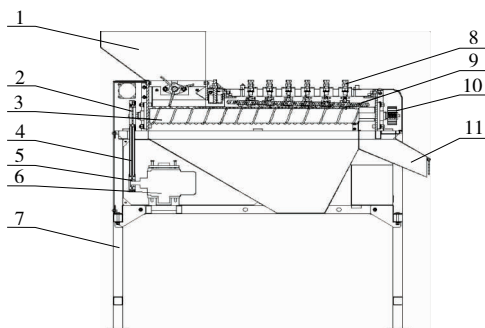


图1 脱皮辊的结构示意图

Figure 1 The structure of the peeling roller

1.2 工作原理

青皮澳洲坚果加工时,主要按先大后小的加工顺序^[12],从进料口进入脱皮间隙,电机通过电机皮带轮、皮带、脱皮辊皮带轮带动主辊主轴旋转,使辊筒及螺旋钢纹转动,进而通过齿轮将动力传递至副辊,主辊与副辊在旋转过程中配合脱皮刀挤压、剪切澳洲坚果,使果径较大的坚果在脱皮间隙前端脱皮,果径较小的坚果随脱皮辊的旋转向后移动,在脱皮间隙窄处完成脱皮,脱皮后的坚果被移送至出料口处。尽量控制坚果的脱皮数量,最大程度保证坚果脱皮能够呈单层的状态进入脱皮辊,大大提高脱皮率^[13]。脱皮机结构示意图如图2所示。



1. 进料口 2. 脱皮辊皮带轮 3. 脱皮辊 4. 皮带 5. 电机皮带轮
6. 电机 7. 机架 8. 调节螺杆 9. 脱皮刀 10. 齿轮 11. 出料口

图2 脱皮机结构示意图

Figure 2 Structure diagram of peeling machine

2 脱皮辊的计算与设计

2.1 脱皮辊主轴设计

脱皮辊主轴是该脱皮机的重要组成部分,输出动力主要来自该脱皮机的电机并且传送至辊筒和螺旋钢纹上,在该动力作用下会使辊筒旋转,青皮坚果在辊筒的旋转作用下会产生挤压力,同时也会产生一个相反的力。其中,螺旋钢纹的作用是将电机的圆周运动转化为澳洲坚果的直线运动,将果径较小的坚果带向脱皮间隙窄处。脱皮辊主轴在工作时会承受较大扭矩,所承受的弯矩则较小。故在设计主轴轴径及长度时,需优先考虑扭转强度,而所承受较小的弯矩可采用降低许用扭转应力的方法有效解决这个问题。轴的扭转强度条件为:

$$\tau_T = \frac{T}{W_T} \approx \frac{9\,550\,000}{0.2d^3} \frac{P}{n} \leq [\tau_T], \quad (1)$$

式中:

T ——轴所受的扭矩, $N \cdot mm$;

n ——轴的转速, r/min ;

τ_T ——扭转切应力, MPa ;

$[\tau_T]$ ——许用扭转切应力, MPa ;

P ——轴传递功率, kW ;

W_T ——轴的抗扭截面系数, mm^3 ;

d ——截面处轴的直径, mm 。

由式(1)可知,轴的直径

$$d \geq A_0 \sqrt[3]{\frac{P}{n}}, \quad (2)$$

$$A_0 = \sqrt[3]{\frac{9\,550\,000}{0.2[\tau_T]}}. \quad (3)$$

几种常用轴材料的 $[\tau_T]$ 及 A_0 值如表1所示,其中该主轴直径为40 mm。

表1 轴常用几种材料的 $[\tau_T]$ 及 A_0 值Table 1 $[\tau_T]$ and A_0 values of several materials commonly used for shafts

材料	许用扭转切应力 $[\tau_T]/MPa$	A_0/mm^2
Q275、35	20~35	135~112
45	25~45	126~103
40Cr	35~55	112~97

2.2 脱皮辊螺旋钢纹设计

脱皮辊的螺旋钢纹是由圆柱状钢条弯曲成螺旋状的螺旋结构,焊接于辊筒表面。其主要作用是在加工过程中将未在脱皮间隙宽处脱皮的坚果带向后方,即脱皮间隙窄处移动,完成脱皮过程,最终由出料口流出。脱皮辊螺旋钢纹的结构如图3所示。



图3 脱皮辊螺旋钢纹的结构示意图

Figure 3 Structure diagram of spiral steel grain of peeling roller

2.3 脱皮辊转速计算

脱皮机的生产效率和脱皮辊及其转速密切相关,转速大小是影响生产效率的直接因素。转速小,达不到预期的生产效率;转速大,加工量也变大,但对坚果的损伤也随之变大。由于澳洲坚果的青皮硬度较高,故根据一般脱壳和脱皮机械滚筒的线速度为3~6 m/s^[14],通过计算线速度可知脱皮辊的转速范围。

$$n = \frac{30v}{\pi R} \times 1\,000, \quad (4)$$

式中:

v ——脱皮辊线速度, m/s ;

R ——脱皮辊半径, mm ;

n ——脱皮辊转速, r/min 。

由式(4)可知,当线速度一定时,脱皮辊的半径与转速呈反比,因此可以通过改变脱皮辊的半径来改变其转速。所选脱皮辊半径为 43.25 mm,因此脱皮辊转速为 662.7~1 325.4 r/min。试验脱皮机的脱皮辊转速为 861.4 r/min。

3 澳洲坚果青皮剪切试验

试验材料为 2020 年 9 月下旬于云南省德宏州采摘的澳洲坚果,挑选无病虫害且果茎大小不一的坚果为试验样品。以 10 mm/min 的速度对澳洲坚果进行剪切破皮单因素试验,用游标卡尺测量果子直径,果径大小依次从小到大排列,共 10 组试验,每组取一颗澳洲坚果,视青皮破裂而果壳完好为成功。剪切破皮试验结果见表 2。

表 2 剪切破皮试验结果

Table 2 Experimental results of shearing skin breaking

组数	果径 D/mm	剪切力 τ/N	组数	果径 D/mm	剪切力 τ/N
1	28.58	572.19	6	30.79	340.47
2	29.54	561.71	7	31.13	607.52
3	30.01	695.98	8	31.62	410.32
4	30.30	287.52	9	31.72	402.22
5	30.66	311.98	10	32.98	652.26

由表 2 可知,试验中剪切力不会随着果径的变大而变大,二者之间没有相关性。

4 脱皮辊有限元分析

由于受青皮澳洲坚果硬度等方面的影响,在脱皮机中进行果皮剥离时,会对脱皮辊产生力的作用,为后期的生产及加工提供可靠的数据支持和理论支撑,故采用 Ansys Workbench 软件对脱皮辊进行应力应变和模态分析^[15]。

4.1 网格划分

材料选用 45 钢,利用 Ansys Workbench 网格划分功能对脱皮辊进行划分,网格大小与精确度密切相关,故网格越大结果越低^[16]。设定主轴、辊筒、螺旋钢纹为 0.01 mm,网格划分如图 4 所示。

4.2 边界条件设置及施加载荷

该脱皮机脱皮辊转速为 861.4 r/min,即 90.2 rad/s。由表 2 可知,当单个澳洲坚果所受最大挤压力为 695.98 N 时,其青皮破裂但外壳不会破裂,故可在辊筒上施加 700.00 N 的载荷,但根据实际工况,脱皮机脱皮辊工作时会对多个澳洲坚果进行脱皮,所受挤压力远大于



图 4 网格划分示意图

Figure 4 Diagram of meshing

700 N,当对 8 个澳洲坚果进行脱皮时,可对脱皮辊两端实施固定约束,在辊筒上施加 5 600.00 N 的载荷。

4.3 脱皮辊的静力学分析

静力学分析数学模型为:

$$[K] \cdot \{\delta\} = \{F\}, \quad (5)$$

式中:

$\{\delta\}$ ——系统节点位移阵列;

$[K]$ ——系统结构刚度矩阵;

$\{F\}$ ——总载荷阵列^[11]。

脱皮辊的总变形云图及等效应力云图如图 5 和图 6 所示,其变形及应力见表 3。

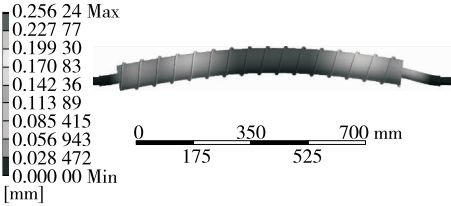


图 5 总变形云图

Figure 5 Total deformed nephogram

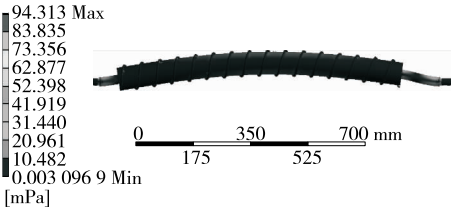


图 6 等效应力云图

Figure 6 Equivalent stress nephogram

表 3 脱皮辊变形及应力分析

Table 3 Analysis results of deformation and stress of peeling roller

总变形 δ/mm		等效应力 σ/MPa	
最大值	最小值	最大值	最小值
3.208×10^{-2}	0.000	11.872	3.605×10^{-4}

由表 3 可知,运转工作时,脱皮辊所产生的最大变形在辊筒中间处,这是因为加工过程中辊筒主要对青皮澳洲坚果产生挤压,而主轴与辊筒的结合在两端处,中间部位没有连接。等效应力最大值发生在轴与轴承结合处,形状突变较大,容易造成应力集中。

4.4 脱皮辊的模态分析

脱皮辊在运转工作时,由于对果皮产生的挤压力以及果皮对脱皮辊产生的反方向的力,则会导致脱皮辊不可避免地产生振动,这种振动会对设备的安全性和稳定性产生影响。因此,掌握脱皮辊运转时的固有频率,才能在设计该设备时避免出现共振的现象。其 6 阶模态结果如图 7~图 12 所示,前 6 阶频率见表 4。

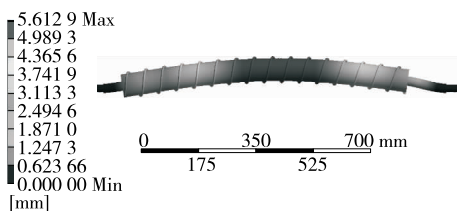


图 7 1 阶模态

Figure 7 1 mode

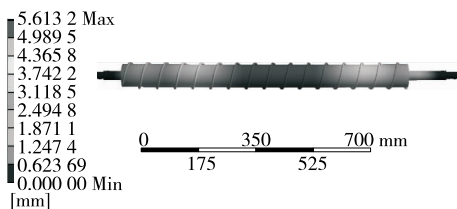


图 8 2 阶模态

Figure 8 2 mode

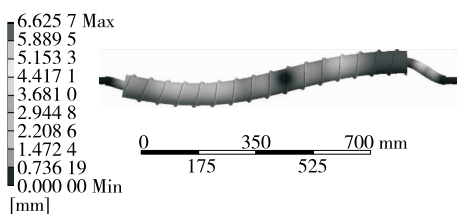


图 9 3 阶模态

Figure 9 3 mode

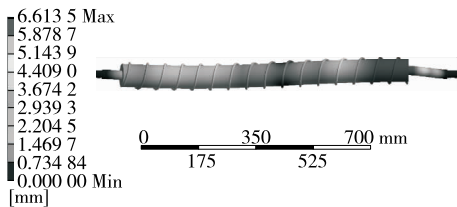


图 10 4 阶模态

Figure 10 4 mode

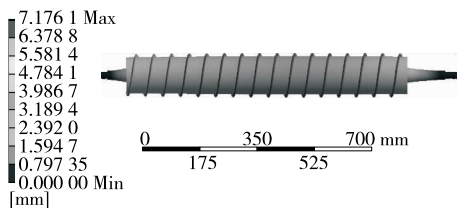


图 11 5 阶模态

Figure 11 5 mode

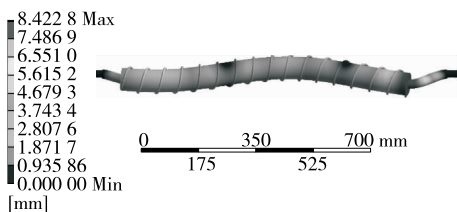


图 12 6 阶模态

Figure 12 6 mode

表 4 脱皮辊前 6 阶频率

Table 4 The first six frequencies of peeling roller

阶数	频率/Hz	阶数	频率/Hz
1	111.44	4	345.71
2	111.46	5	503.23
3	345.34	6	681.05

由表 4 可知,脱皮辊的各阶固有频率随着阶数的增加而增大,其 6 阶固有频率为 111.44~681.05 Hz。

由图 7~图 12 可知,脱皮辊的 1 阶振型为 XZ 平面的弯曲振动,最大变形量为 5.613 0 mm;2 阶振型为 XY 平面的弯曲振动,最大变形量为 5.611 6 mm;3 阶振型为 XZ 平面的弯曲振动和 Y 轴的扭转振动,最大变形量为 6.625 8 mm;4 阶振型为 XY 平面的弯曲振动和 Y 轴的扭转振动,最大变形量为 6.613 8 mm;5 阶振型为 Y 轴的弯曲和扭转振动,最大变形量为 7.176 4 mm;6 阶振型为 XZ 平面的弯曲振动和 Y 轴的扭转振动,最大变形量为 8.422 9 mm。脱皮辊的 1 阶固有频率对应的转速为 6 686.4 r/min,而实际转速为 861.4 r/min,通过试验证明不会发生共振。

澳洲坚果脱皮机脱皮辊的前 6 阶固有频率为 111.44~681.05 Hz,第 6 阶产生的变形量最大,最大变形量为 8.422 9 mm,相应的频率为 681.05 Hz。由于脱皮辊的工作频率与固有频率不在同一区间,故不会发生共振现象,说明该脱皮机工作时能够保证机器的稳定性和结构的刚度。

5 结论

通过力学特性仿真可知,脱皮辊在工况下的最大变形量为 0.032 08 mm;等效应力为 11.872 MPa,其最大值小于 45 钢的屈服强度,满足脱皮机脱皮辊的使用要求。通过对脱皮机脱皮辊进行振动特性和强度分析,确定了各项工况参数,为脱皮机的设计和研发相关产品奠定了基础。由于该试验只考虑了脱皮机中脱皮辊的结构强度和振动特性,对脱皮机的脱皮率及损伤率并未进行深入研究,后续需不断优化以提高脱皮机的脱皮率及降低其损伤率。

参考文献

- [1] BIRCH J, YAP K, SILCOCK P. Compositional analysis and roasting behaviour of gevuina and Macadamia nuts[J]. International Journal of Food Science and Technology, 2010, 45: 81-86.
- [2] 贺照勇, 陶亮, 柳靛, 等. 我国澳洲坚果产业概况及发展趋势[J]. 热带农业科技, 2015, 38(3): 12-16.
HE Xi-yong, TAO Liang, LIU Liang, et al. Overview and development trend of Macadamia nut industry in China[J]. Tropical Agricultural Science and Technology, 2015, 38(3): 12-16.
- [3] 焦云, 邹明宏, 曾辉, 等. 澳洲坚果研究进展[J]. 安徽农业科学, 2008(8): 3 366-3 368.
JIAO Yun, ZOU Ming-hong, ZENG Hui, et al. Advances in research

- on Macadamia nuts[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2008 (8): 3 366-3 368.
- [4] 曾黎明, 陈显国, 陈涛, 等. 澳洲坚果脱皮机的研制与应用[J]. 江苏农业科学, 2013, 41(2): 378-379.
- ZENG Li-ming, CHEN Xian-guo, CHEN Tao, et al. Development and application of Macadamia nut peeling machine[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2013, 41(2): 378-379.
- [5] 赵景涛, 尚鹏旭, 吴晓雪, 等. 新型青核桃单体脱皮分离机构原理及设计[J]. 食品与机械, 2016, 32(8): 83-86.
- ZHAO Jing-tao, SHANG Peng-xu, WU Xiao-xue, et al. Mechanism principle and design of new walnut single peeling separator[J]. Food & Machinery, 2016, 32(8): 83-86.
- [6] 薛忠, 黄正明, 郭向明, 等. 澳洲坚果剪切力学性能试验[J]. 中国农机化学报, 2014, 35(2): 85-88, 135.
- XUE Zhong, HUANG Zheng-ming, GUO Xiang-ming, et al. Experimental study on shear mechanical properties of Macadamia nuts[J]. Chinese Journal of Agricultural Mechanization, 2014, 35(2): 85-88, 135.
- [7] 余佳威, 朱代根. 澳洲坚果破壳技术研究进展与发展对策[J]. 农村实用技术, 2020(1): 77-78.
- YU Jia-wei, ZHU Dai-gen. Research progress and development strategy of Macadamia nut cracking technology[J]. Rural Practical Technology, 2020(1): 77-78.
- [8] 云南澳洲坚果产业调研组. 云南省澳洲坚果产业发展现状、存在问题及建议[J]. 热带农业科技, 2007(1): 10-14.
- Yunnan Macadamia nut Industry Research Group. Development status, problems and suggestions of Macadamia nut industry in Yunnan province[J]. Tropical Agricultural Science and Technology, 2007 (1): 10-14.
- [9] 王冰, 裴新民, 李忠新, 等. 我国核桃初加工现状及发展前景的分析研究[J]. 中国农机化, 2010(5): 43-45, 49.
- WANG Bing, PEI Xin-min, LI Zhong-xin, et al. Analysis and research on the status quo and development prospect of walnut primary processing in China[J]. China Agricultural Mechanization, 2010(5): 43-45, 49.
- [10] 杨忠强, 崔宽波, 闫圣坤, 等. 离心筛网式青核桃脱皮机的设计与实验[J]. 食品工业科技, 2018, 39(8): 195-198, 214.
- YANG Zhong-qiang, CUI Kuan-bo, YAN Sheng-kun, et al. Design and experiment of centrifugal screen type peeling machine of green walnut[J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(8): 195-198, 214.
- [11] 郑甲红, 吴东泽, 梁金生, 等. 基于 Workbench 的青核桃力学特性分析[J]. 食品与机械, 2015, 31(5): 86-88.
- ZHENG Jia-hong, WU Dong-ze, LIANG Jin-sheng, et al. Analysis of mechanical properties of walnut based on Workbench[J]. Food & Machinery, 2015, 31(5): 86-88.
- [12] 施郭健, 宁德奎, 钟韬, 等. 澳洲坚果青皮脱皮机设计关键环节的工艺技术研究[J]. 农业开发与装备, 2020(9): 33-34.
- SHI Guo-jian, NING De-kui, ZHONG Tao, et al. Research on technology of key link of design of Macadamia green peeling machine[J]. Agricultural Development and Equipment, 2020(9): 33-34.
- [13] 彭峰生. 核桃仁脱皮机设计[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(13): 271-275.
- PENG Feng-sheng. Design of walnut kernel peeling machine[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2020, 48(13): 271-275.
- [14] 李心平, 马福丽, 高连兴. 花生脱壳装置的结构技术剖析[J]. 农机化研究, 2010, 32(3): 18-20.
- LI Xin-ping, MA Fu-li, GAO Lian-xing. Analysis of structure and technology of peanut sheller[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2010, 32(3): 18-20.
- [15] 闫盖, 郑燕萍, 张文彦, 等. 基于正交试验的板料冲压成形工艺参数优化[J]. 热加工工艺, 2013, 42(17): 94-97.
- YAN Gai, ZHENG Yan-ping, ZHANG Wen-yan, et al. Optimization of sheet metal stamping process parameters based on orthogonal experiment[J]. Hot Working Technology, 2013, 42(17): 94-97.
- [16] 石章成, 许燕, 周建平, 等. 核桃脱青皮机脱皮辊数值仿真与力学特性分析[J]. 机床与液压, 2019, 47(19): 136-139.
- SHI Zhang-cheng, XU Yan, ZHOU Jian-ping, et al. Numerical simulation and mechanical characteristics analysis of dedering roller of walnut peeling machine[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2019, 47(19): 136-139.
- (上接第 104 页)
- [17] 张秋, 陈慧, 王雪黎. 欧盟食品安全应急管理体系研究及对我国的借鉴[J]. 肉类研究, 2017, 31(1): 60-64.
- ZHANG Qiu, CHEN Hui, WANG Xue-li. Insight into the EU's food safety emergency management system and its revelation to China[J]. Meat Research, 2017, 31(1): 60-64.
- [18] 赵学刚, 周游. 欧盟食品安全风险分析体系及其借鉴[J]. 管理现代化, 2010(4): 59-61.
- ZHAO Xue-gang, ZHOU You. European Union food safety risk analysis system and its reference[J]. M Management, 2010(4): 59-61.
- [19] 赵苕萱. “疫后重建”应急法律体系何去何从: 访中国政法大学应急管理法律与政策研究基地主任林鸿潮[J]. 劳动保护, 2020(4): 19-21.
- ZHAO Yi-xuan. What is the future of the emergency legal system for "post-epidemic construction": Interview with Lin Hong-chao, director of the emergency management law and policy research base of China University of Political Science and Law[J]. Labour Protection, 2020(4): 19-21.
- [20] 马英娟. 走出多部门监管的困境: 论中国食品安全监管部门间的协调合作[J]. 清华法学, 2015(3): 35-55.
- MA Ying-juan. Getting out of the dilemma of multi-department supervision: On the coordination and cooperation among food safety supervision authorities in China[J]. Tsinghua University Law Journal, 2015(3): 35-55.
- [21] 玛丽恩. 令人震惊的食品行业真相[M]. 北京: 社会科学文献出版社, 2004: 19.
- MARIN E. The shocking truth of the food industry[M]. Beijing: Social Sciences Academic Press(China), 2004: 19.