

基于 ADAMS 的胶辊砻谷机脱壳效率影响参数仿真分析

Simulation analysis of the influencing parameters on the shelling efficiency of rubber roller husker based on ADAMS

王子啸 王旺平 宋少云

WANG Zixiao WANG Wangping SONG Shaoyun

(武汉轻工大学机械工程学院, 湖北 武汉 430048)

(School of Mechanical Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan, Hubei 430048, China)

摘要:目的:提高砻谷机脱壳效率。方法:模拟出稻谷脱壳过程,通过改变胶辊运动速度、线速差等参数分析各参数对脱壳工作的影响。首先在 SolidWorks 中建立砻谷机模型与单边带壳糙米模型,之后将建立好的模型导入 ADAMS 中进行仿真,通过改变快慢辊的转速、快慢辊之间的线速差、胶辊与谷壳之间的摩擦系数,观察相应因素对砻谷机脱壳效率的影响。**结果:**快慢辊转速越快,稻谷脱壳所需的时间越短;快慢辊线速差越大,稻谷脱壳所需的时间越短,但变化幅度很小;胶辊与谷壳间的摩擦系数越大,稻谷脱壳所需的时间越短,但变化幅度与改变快慢辊转速带来的变化幅度相比较小。**结论:**对于直径为 225 mm,胶厚为 25 mm,胶辊轧距为 0.8 mm 的胶辊砻谷机,脱壳效率最高时的快慢辊转速分别为 16.5,13.4 m/s,胶辊与谷壳之间的摩擦系数为 0.75。

关键词:碾米机;粮食机械;砻谷机;ADAMS 仿真

Abstract: Objective: Improve the hulling efficiency of the rice huller. **Methods:** Simulated the process of rice hulling, and analyzed the influence of various parameters on the hulling process by changing the movement speed of the rubber roller and the line speed difference. Firstly, the model of huller and the model of single-sided shelled brown rice were established in SolidWorks, and then the established model was imported into ADAMS for simulation, and the effects of the corresponding factors on the hulling efficiency of huller were observed by changing the rotational speeds of the fast and slow rollers, the difference in line speeds between the fast and slow rollers, and

the friction coefficients between the rubber rollers and the hulls.

Results: The faster of the speed of the fast and slow rollers was, the less time was needed to dehull the rice. The larger the difference between the linear speed of the fast and slow rollers was, the less time was needed to dehull the rice, but the change was very small. the larger the coefficient of friction between the rubber rollers and the hulls was, the less time was needed to dehull the rice, but the change was small comparing with that brought about by the change in the speed of the fast and slow rollers. **Conclusion:** For the diameter of 225 mm, rubber thickness of 25 mm, rubber roller rolling distance of 0.8 mm rubber roller huller, shelling efficiency was at the highest speed of the fast and slow roller speed of 16.5 m/s, 13.4 m/s, the friction coefficient between the rubber rollers and hulls for 0.75.

Keywords: rice milling machine; grain machinery; husker; ADAMS simulation

砻谷是稻谷加工工艺中至关重要的一道工艺,砻谷机的工作效率直接影响整个稻谷加工过程的效率。随着信息技术的不断发展与完善,许多学者也逐渐将成熟的计算机技术与仿真技术引入到砻谷过程的研究当中^[1-2]。朱正明等^[3]开展了砻谷工艺参数优选试验,得到影响砻谷工艺效果的主要参数有辊压、线速差、线速及流量;顾尧臣^[4]从理论上探讨了胶辊砻谷机主要工作参数与主要工艺效果之间的关系以及工作参数的取值范围;舒服华^[5]运用正交试验与灰色关联分析优化砻谷机工作参数,得到砻谷机最佳工艺参数。在 ADAMS 对砻谷过程进行仿真的研究中,李阳等^[6-7]研究表明,在快辊转速为 1 900 r/min,慢辊速度为 1 000 r/min 的情况下,佐竹 THU35C 试验用砻谷机在对江西稻谷样本进行砻谷时的最优轧距为 0.6 mm。

基金项目:湖北省科技重大专项(编号:2022BBA0047)

作者简介:王子啸,男,武汉轻工大学在读硕士研究生。

通信作者:王旺平(1979—),男,武汉轻工大学副教授,博士。

E-mail: wwp@whpu.edu.cn

收稿日期:2023-07-10 **改回日期:**2023-11-22

目前关于辊间距及辊间压力对胶辊砻谷机脱壳工作影响的研究较为广泛。但现有的 ADAMS 仿真模型中将完整脱壳过程(包括谷壳与米粒脱离过程)展现出来的研究却鲜有出现,快慢辊转动速度对脱壳过程影响的分析也鲜有提及。研究拟建立新的带壳米粒模型,基于 ADAMS 对完整的胶辊砻谷机脱壳过程进行仿真。通过改变快慢辊的转速、快慢辊之间的线速差、胶辊与谷壳之间的摩擦系数,观察相应因素对砻谷机脱壳效率的影响,以期对砻谷机快慢辊转速对砻谷脱壳效率的影响提供理论依据,为砻谷机实际生产制造与调节提供理论参考。

1 胶辊砻谷机脱壳原理及工作参数

1.1 胶辊砻谷机脱壳原理

胶辊砻谷机有快慢两个工作辊。当糙米由进料口进入胶辊砻谷机两胶辊之间后,糙米与胶辊发生接触。胶辊的辊间隙比糙米短轴小,所以糙米与胶辊产生挤压从而发生摩擦。由于快慢辊的转速不同,两辊之间产生了线速差,对糙米的谷壳产生了搓撕作用,使谷壳与糙米质心位置之间产生位移差从而实现脱壳。胶辊砻谷机脱壳过程原理如图 1 所示。

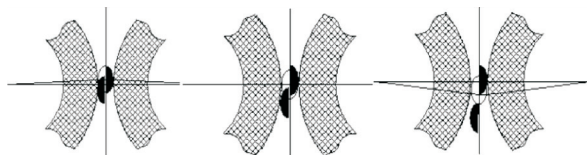


图 1 胶辊砻谷机脱壳过程原理图

Figure 1 Hull and brown rice model and simplified ellipsoid model of rice grains

1.2 传统胶辊砻谷机工作参数

一般的传统胶辊砻谷机快辊转速为 15~17 m/s,慢辊转速为 13~14 m/s,线速差为 2.0~3.2 m/s,线速和为 30 m/s。以上工作数据大多由工作经验得出,并未进行仿真实验。

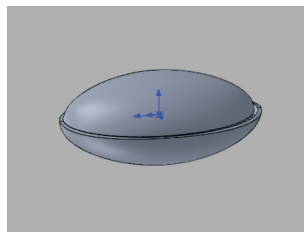
对传统胶辊砻谷机的研究表明,当快辊速度为 17.5 m/s 时,砻谷机产量最大,脱壳率最高而胶辊磨损最低。然而过大的线速和胶辊筒的不平衡会引起剧烈的机械振动,导致糙碎率增加,胶辊磨损不均匀。而线速度过低,产量低,而且胶耗也会增加。在一定范围内,增大线速差会提高脱壳率。但过高的线速差又会导致糙碎率增加,胶辊磨损增大,适宜的线速差范围为 2.0~3.2 m/s^[8]。

2 ADAMS 仿真试验设计

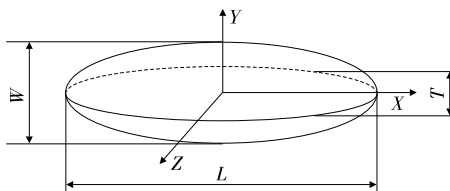
2.1 胶辊砻谷机糙米 SolidWorks 模型建立

运用 ADAMS 仿真软件对整个砻谷机脱壳过程进行仿真分析,首先要在 SolidWorks 软件中进行三维建模(包括米粒与谷壳),再将建好的模型导入 ADAMS 软件中。

为了更清晰科学地反映整个脱壳过程,在设计米粒模型时只用半边谷壳包裹糙米,这样可以更方便地观察脱壳过程。谷壳与糙米模型如图 2 所示。



(a) 谷壳与糙米模型



(b) 米粒简化椭球体模型

图 2 谷壳与糙米模型与米粒简化椭球体模型

Figure 2 Hull and brown rice model and simplified ellipsoid model of rice grains

三维建模时将米粒简化为椭球体,用长轴短轴的长度区分米粒的尺寸大小。现实中米粒的宽度(W)与厚度(T)并不相等^[9],见图 2。经过对几组糙米进行测量后,得出米粒平均长度(L)为 9.08 mm,平均宽度(W)为 3.97 mm,平均厚度(T)为 3.24 mm,而谷壳平均长度为 9.18 mm,平均宽度为 4.07 mm,平均厚度为 3.34 mm。

针对 MLGQ25 型气压砻谷机进行研究,并建立仿真模型。谷壳与糙米模型建立好后,建立整体砻谷机模型,并将糙米设定在两胶辊中间位置上方的一定部位,以模拟砻谷过程中的稻米下落过程。整体建模如图 3 所示。

2.2 ADAMS 模型建立

将 SolidWorks 模型导入 ADAMS 之前,首先设定好全局变量。将 SolidWorks 模型导入。由于胶辊是柔性体,所以需要将导入的砻谷机模型的胶辊部分转变为柔性体,并将其设置为匀速转动。之后设置好接触参数与转速后开始仿真。ADAMS 模型如图 4 所示。

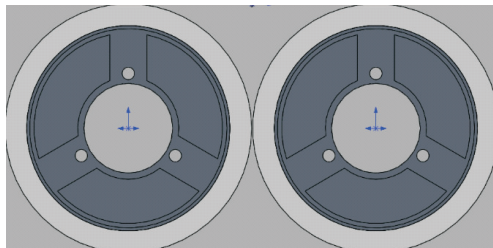


图 3 砻谷机整体建模

Figure 3 Integrated modeling of rice huller

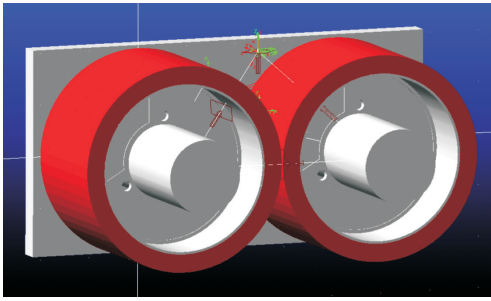


图4 磨谷机 ADAMS 建模

Figure 4 ADAMS modeling of rice huller

表1 ADAMS 仿真参数

Table 1 ADAMS simulation parameters

刚度/ ($N \cdot mm^{-1}$)	接触力 指数	阻尼/ ($N \cdot s \cdot mm^{-1}$)	穿透深度	动摩擦 系数	静摩擦 系数	静平移速度/ ($mm \cdot s^{-1}$)	摩擦平移速度/ ($mm \cdot s^{-1}$)
70.83	2.00	0.70	0.10	0.56	0.50	0.10	10.00

1.00%~5.00%，研究中取 $c = 0.70$ 。根据非线性摩擦系数公式，在进行仿真时，稻谷和胶辊接触中的相对滑移如果能达到使用动摩擦系数的速度，ADAMS 会将摩擦系数数值由静摩擦系数转化为动摩擦系数。实际磨谷过程中稻谷进入磨谷区域后，迅速被加速至慢辊线速度，此时稻谷相对于慢辊静止，而相对于快辊滑动。因此，在仿真中静摩擦转变速度和动摩擦转变速度可分别取 0.1, 10.0 mm/s。此取值可使磨谷仿真时较为容易触发动摩擦系数参与计算。

2.4 ADAMS 仿真试验

仿真试验一共分为 3 组，分别是改变快慢辊的转速，快慢辊之间的线速差，以及胶辊与谷壳之间的摩擦系数。由图 1 可知，稻谷在接触胶辊后，与快辊接触的半边谷壳会比接触慢辊的半边谷壳下落速度更快。为了使试验数据完整地反映整个脱壳过程，设置了起始时间与终止时间。起始时间表示整个谷壳与糙米模型开始与胶辊发生接触，而终止时间表示快辊接触的谷壳与糙米完全分离。完全分离表示谷壳与糙米的质心位置的距离等于米粒平均长度。

仿真试验分为试验阶段与后处理阶段两个部分。试验阶段会显示磨谷的整个过程，并完整显示脱壳过程以此来验证脱壳过程原理图的准确性；后处理部分将系统显示谷壳与糙米的质心位置随时间的变化曲线与糙米和糙米质心位置差的变化曲线。后处理阶段可以显示起始时间与终止时间，并可计算糙米与谷壳完全分离所需要的时间，以时间长短来判断各参数对磨谷效率所产生的影响。所需时间越短，磨谷工作效率越高；所需时间越长，工作效率越低。

试验前首先对传统胶辊磨谷机的工作速度的取值范

2.3 ADAMS 仿真参数

在 ADAMS 仿真前设置仿真参数。仿真试验所需的仿真参数有胶辊的刚度、糙米与胶辊的接触力指数、糙米与胶辊间的阻尼、穿透深度、糙米与胶辊间的动摩擦系数、糙米与胶辊间的静摩擦系数、糙米与胶辊间的静平移速度、糙米与胶辊间的摩擦平移速度等，如表 1 所示。其中材料刚度、动摩擦系数、静摩擦系数通过查阅文献[7]得到。材料的接触力指数通常反映材料的非线性程度，对于金属常取 1.3~1.5，对于橡胶可取 2 或 3，研究中取 2。阻尼系数 c 用于表征碰撞能量的损失，通常取刚度值的

围进行简单验证。当快、慢辊转速均低于 10 m/s 时，通过 ADAMS 仿真虽然仍能观察到完整的稻谷脱壳现象，但脱壳所需时间明显较大，如表 2 所示。当快慢转速均高于 16 m/s 时，稻谷在沿两辊中心线上所受的挤压力明显增大，有破碎的风险，并且在转速过大时磨谷机所产生的耗能增加，辊胶磨损速度加快，不利于实际生产。故在仿真时快辊转速取 15~17 m/s，慢辊转速取 13~14 m/s。

表2 ADAMS 预仿真数据

Table 2 ADAMS pre simulation data

序号	快辊速度/ ($m \cdot s^{-1}$)	慢辊速度/ ($m \cdot s^{-1}$)	起始时 间/ms	终止时 间/ms	时间 差/ms
1	15.0	13.5	135.3	145.7	10.4
2	13.0	11.5	135.3	146.8	11.5
3	9.0	7.5	135.3	148.2	12.9
4	7.7	6.2	135.3	150.6	15.3

基于对传统胶辊磨谷机的工作速度研究，在仿真试验时的第一组快慢辊转速选择 16 m/s 与 14 m/s。谷壳与糙米模型设置在两辊圆心连线中点上方 100 mm 处，以演示米粒自由下落过程。仿真步长设置为 3 s，帧数设置为 3 000。磨谷仿真的谷壳与糙米脱离后状态如图 5 所示。

由图 5 可以看出，与快辊接触的谷壳在碾辊作用下与糙米完全分离，并比糙米先脱离与碾辊接触。说明仿真试验可以验证磨谷过程中的完整脱壳过程。

仿真试验结束后进入后处理阶段。图 6 分别展示了谷壳的质心位置曲线、糙米的质心位置曲线、谷壳质心位置与糙米质心位置差的曲线。其中三角形曲线为谷壳的质心位置运动曲线，正方形曲线代表糙米质心位置运动曲线，圆形曲线代表谷壳与糙米质心位置差的曲线。试

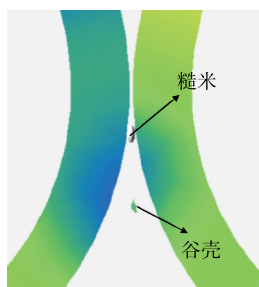


图 5 磨谷脱壳过程仿真

Figure 5 Simulation of hulling process in rice husking

验开始时,谷壳与糙米黏结在一起,所以三角形曲线与正方形虚线重合。在两者与碾辊接触后,开始产生位移差,由此圆形曲线开始发生变化,呈逐渐上升趋势,表示谷壳与糙米的位移差逐渐增大,且谷壳质心位置在糙米下方。即谷壳在与快辊接触后产生搓撕作用,速度比与慢辊接

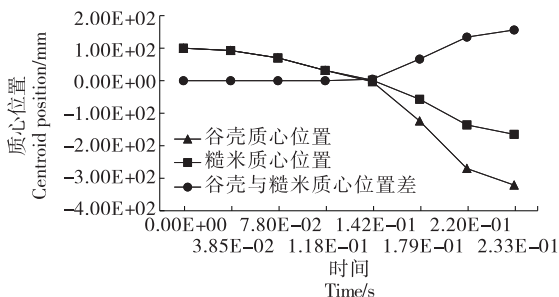


图 6 谷壳与糙米质心位置随时间变化图

Figure 6 Image of the temporal variation of the centroid position between husks and brown rice

触的糙米快,符合试验预期。

通过试验验证仿真结果的可行性后,正式进行改变快慢转速、线速差与摩擦系数的试验,试验设计如表 3 所示。

表 3 ADAMS 仿真数据

Table 3 ADAMS simulation data

序号	快辊速度/(m·s ⁻¹)	慢辊速度/(m·s ⁻¹)	起始时间/ms	终止时间/ms	摩擦系数	时间差/ms
1	16	14	135.3	145.4	0.7	10.1
2	14	12	135.3	146.4	0.7	11.0
3	10	8	135.3	148.6	0.7	13.1
4	16	14	135.3	145.4	0.7	10.1
5	16	12	135.3	145.3	0.7	10.0
6	16	8	135.3	145.1	0.7	9.8
7	16	14	135.3	145.4	0.7	10.1
8	16	14	135.3	146.6	0.5	11.3
9	16	14	135.3	147.7	0.3	12.4

由表 3 可知,当降低快慢辊转速后,谷壳与糙米质心位置的距离到达等于米粒平均长度时所需的时间(即完全分离所需时间)明显增大,说明胶辊转动速度对磨谷效率的影响较大;线速差越大,谷壳与糙米完全分离所需时间越短,但在试验中并未产生明显变化;胶辊摩擦系数越小,谷壳与糙米完全分离所需时间越长,但改变胶辊摩擦系数对磨谷效率的影响较改变胶辊转速的小。

2.5 ADAMS 仿真试验数据分析

快慢辊转速、线速差及胶辊摩擦系数对磨谷效率均有不同程度的影响,其中快慢辊转速对磨谷效率影响较大。设计 9 组试验进行仿真分析,如表 4 所示。

对表 4 中的数据进行 F 检验,发现快慢辊转动速度对时间差的影响较大,检验的灵敏度适中,而且试验误差及自由度小。多重比较结果也表明,快慢辊转动速度对时间差的影响较大。采用 SPSS 软件对仿真试验数据进行拟合计算,结果表明,对于直径为 225 mm,胶厚为 25 mm,胶辊轧距为 0.8 mm 的胶辊磨谷机,脱壳效率最

表 4 ADAMS 仿真数据

Table 4 ADAMS simulation data orthogonal table

试验号	因素			时间差/ms
	快辊速度/(m·s ⁻¹)	慢辊速度/(m·s ⁻¹)	摩擦系数	
1	16	14	0.7	10.1 (y ₁)
2	14	12	0.7	11.0 (y ₂)
3	10	8	0.7	13.1 (y ₃)
4	16	14	0.7	10.1 (y ₄)
5	16	12	0.7	10.0 (y ₅)
6	16	8	0.7	9.8 (y ₆)
7	16	14	0.7	10.1 (y ₇)
8	16	14	0.5	11.3 (y ₈)
9	16	14	0.3	12.4 (y ₉)
T ₁	73.8	54.0	74.2	97.9 (T)
T ₂	11.0	21.0	11.3	
T ₃	13.1	22.9	12.4	
\bar{x}_1	24.600	18.000	24.733	
\bar{x}_2	3.678	7.000	3.767	
\bar{x}_3	4.367	7.633	4.133	

高时的快慢辊转速分别为 16.5, 13.4 m/s, 胶辊与谷壳之间的摩擦系数为 0.75。

3 结论

运用 SolidWorks 建立了带壳糙米模型与磨谷机模型, 以快慢辊转速、线速差、摩擦系数为变量, 利用 ADAMS 进行完整脱壳过程仿真, 结果表明: ADAMS 仿真能完整模拟稻谷脱壳的过程。快慢辊转速越快, 稻谷脱壳所需的时间越短; 快慢辊线速差越大, 稻谷脱壳所需的时间越短, 但变化幅度很小; 胶辊与谷壳间的摩擦系数越大, 稻谷脱壳所需时间越短, 但变化幅度与改变快慢辊转速相比较小。根据仿真试验可以计算出, 对于直径为 225 mm, 胶厚为 25 mm, 胶辊轧距为 0.8 mm 的胶辊磨谷机, 脱壳效率最高时的快慢辊转速分别为 16.5, 13.4 m/s, 胶辊与谷壳之间的摩擦系数为 0.75。后续可进一步对快、慢辊转速进行实际论证, 找出最适转速以提高磨谷机的工作效率。

参考文献

- [1] 李美生, 宋少云, 张永林, 等. 基于 EDEM 的磨谷机的磨谷过程仿真[J]. 武汉轻工大学学报, 2017, 36(4): 48-53.
LI M S, SONG S Y, ZHANG Y L, et al. Husking simulation of the rice huller based on EDEM [J]. Journal of Wuhan Polytechnic University, 2017, 36(4): 48-53.
- [2] 阮竞兰, 武文斌. 粮食机械原理及应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2017: 358-371.
RUAN J L, WU W B. Principles and applications of grain processing machine[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2017: 358-371.
- [3] 朱正明, 叶强. 提高辊筒磨谷机工艺效果的研究: 工艺参数的

优选试验[J]. 粮食工业, 1981(4): 10-13.

- ZHU Z M, YE Q. Research on improving the process efficiency of roller huller-optimization test of process parameters [J]. Cereal & Industry, 1981(4): 10-13.
- [4] 顾尧臣. 粮食机械与粮食加工工艺的关系(二)[J]. 粮食与饲料工业, 1998(12): 3-5.
GU Y C. The relationship between grain machinery and grain processing technology (II) [J]. Cereal & Feed Industry, 1998(12): 3-5.
- [5] 舒服华. 基于灰色关联的磨谷机工作参数优化[J]. 盐城工学院学报(自然科学版), 2017, 30(1): 18-23.
SHU F H. Working parameter optimization of rice huller based on grey correlation [J]. Journal of Yancheng Institute of Technology (Natural Science Edition), 2017, 30(1): 18-23.
- [6] 李阳, 曹宪周, 王明旭, 等. 基于 ADAMS 的胶辊磨谷机磨谷过程仿真及工作参数优化[J]. 粮食与饲料工业, 2019(9): 4-7.
LI Y, CAO X Z, WANG M X, et al. The simulation of husking process and optimization of working parameters of rubber roll husker based on ADAMS [J]. Cereal & Feed Industry, 2019(9): 4-7.
- [7] 李阳. 基于稻谷力学特性胶辊磨谷机工作参数优化[D]. 郑州: 河南工业大学, 2019: 48-63.
LI Y. Optimization of working parameters of rubber roller husker based on mechanical characteristics of rice [D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2019: 48-63.
- [8] MARKAUSKAS D, KACIANAUSKAS R. Investigation of rice grain flow by multi-sphere particle model with rolling resistance [J]. Granular Matter, 2011, 13(2): 143-148.
- [9] 刘程, 王旺平, 宋少云. 基于离散元 EDEM 的米粒破碎特性分析[J]. 食品与机械, 2022, 38(9): 88-92.
LIU C, WANG W P, SONG S Y. Analysis of rice grain breakage characteristics based on discrete element EDEM [J]. Food & Machinery, 2022, 38(9): 88-92.
- [10] 6 种氨基甲酸酯农药残留 [J]. 食品科学, 2011, 32(2): 187-190.
TIAN H Z, ZHAO Y B, ZHOU Y M. Simultaneous determination of six carbamate pesticide residues in milk by HPLC-ESI-MS/MS [J]. Food Sci, 2011, 32(2): 187-190.
- [11] 区硕俊, 岑建斌, 梁俊发, 等. 酰胺化衍生—高效液相色谱—四极杆—高分辨飞行时间质谱法测定食品接触塑料材料中 7 种烷基胺 [J]. 分析化学, 2020, 48(3): 413-422.
OU S J, CEN J B, LIANG J F, et al. Determination of seven kinds of alkylamines in food contact plastic materials by amidation coupled with high performance liquid chromatography-quadrupole time-of-flight mass spectrometer [J]. Chinese J Anal Chem, 2020, 48(3): 413-422.
- [12] 陈建彪, 董丽娜, 刘娇, 等. QuEChERS 在食品中真菌毒素检测的研究进展 [J]. 食品科学, 2014, 35(11): 286-291.
CHEN J B, DONG L N, LIU J, et al. Advances in application of QuEChERS for mycotoxin analysis in foods [J]. Food Sci, 2014, 35(11): 286-291.

(上接第 54 页)

- [14] 贾玮, 张荣, 陈雪峰, 等. 分散固相萃取—超高效液相色谱—四极杆—静电场轨道离子阱质谱测定巴氏杀菌乳中农药残留 [J]. 陕西科技大学学报, 2019, 37(3): 64-69.
JIA W, ZHANG R, CHEN X F, et al. Dispersive solid phase extraction coupled with ultra performance liquid chromatography-quadrupole-orbitrap mass spectrometry for determination of pesticide residues in pasteurized milk [J]. Journal of Shaanxi University of Science, 2019, 37(3): 64-69.
- [15] 韩翎竹, 田晓玲, 李香珍, 等. 超高效液相色谱—串联质谱法测定生鲜乳中 6 种农药的残留 [J]. 中国畜牧兽医, 2013, 40(S1): 62-67.
HAN J Z, TIAN X L, LI X Z, et al. Determination on 6 kinds of pesticide residues in the raw milk by ultra performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. China Animal Husbandry and Veterinary Medicine, 2013, 40(S1): 62-67.
- [16] 田宏哲, 赵瑛博, 周艳明. 高效液相色谱—质谱法测定牛奶中