DOI:10.13652/j.issn.1003-5788.2016.12.019

基于 CFD-DEM 耦合法的莲子壳仁分离装置优化与试验分析

Simulation optimization and test of pneumatic separating device for lotus seed shell and kernel based on CFD-DEM coupling method

马秋成[1]　雷林韬[1]　卢安舸[2]　李超众[1]　覃　枫[1]

MA Qiu-cheng[1]　*LEI Lin-tao*[1]　*LU An-ge*[2]　*LI Chao-zhong*[1]　*QIN Feng*[1]

(1. 湘潭大学机械工程学院,湖南 湘潭　411105;2. 湖南大学国家高效磨削工程技术研究中心,湖南 长沙　410082)

(1. *School of Mechanical Engineering, Xiangtan University, Xiangtan, Hunan* 411105, *China*; 2. *National Engineering Research Center for High Efficiency Grinding, Hunan University, Changsha, Hunan* 410082, *China*)

摘要:借助 FLUENT 软件对莲子物料分离通道气流场分布规律进行仿真分析。采用 CFD-DEM 耦合法对混合物料在分离通道中的分离过程进行数值模拟。以分离气流速度、入料管倾斜角、分离通道倾斜角为因素开展了仿真试验,分析了各因素对清选率的影响,确定了分离通道的优化工艺参数为:入料管倾斜角 60°、分离通道倾斜角 35°、分离气流速度 7.881 m/s,与实体样机试验结果一致。试验结果表明 CFD-DEM 耦合仿真方法可用于莲子物料分离的研究,所获工艺参数为莲子混合物料分离机的设计提供了参考依据。

关键词:分离通道;数值模拟;莲子;CFD-DEM 耦合

Abstract: The simulation of separation channel airflow field distribution was implemented with FLUENT software. The CFD-DEM coupling method was used to simulate the separation progress of the mixtures in the separation channel. For fluid outlet velocity, inclination angel of inlet tube and inclination angle of separating channel factors was carried out by simulation experiment, determine the optimal technological parameter of separating channel as follows: inclination angel of inlet tube was 60°, inclination angle of separating channel was 35°, fluid outlet velocity was 7.881 m/s, and the results were the same with the physical prototype. The feasibility to use CFD-DEM coupling method to study the separation device for lotus seed and its contaminates was verified. The result of this study can be taken reference for the research on separating equipment for lotus seed kernel and shell.

Keywords: Separation channel; numerical simulation; lotus seed; CFD-DEM coupling

分选[1-2]是农产品物料加工过程中的重要工序,用于实现果仁与杂质的分离。莲子在破壳后需要安排分选工序将莲仁与莲壳分离,以获取莲仁。目前,在谷物、花生等农产品物料的风力分选方面已经有成熟的设备投入生产应用。对于莲子物料分选技术而言,虽已有一些设备被开发应用,但在设计前未进行相关理论分析,参数选择主要依靠经验,调试周期长。笔者[3]前期已研制了莲子壳仁分离装置并获取了优化工艺参数,装置主要由分离通道、旋风分离器和风机三部分组成(见图 1)。风机在分离通道内部产生负压,导致莲仁与莲壳沿不同轨迹运动而实现分离。但由于试验台涉及的分离通道形式较为简单,而实际设备则较为复杂,若仍采用传统的设计方法,则需要在实际应用时对设备参数反复调试。近年来,计算机仿真技术被广泛应用机械设计中。采用计算机仿真技术获取优化工艺参数,可以提高设计效率,节约研制成本。

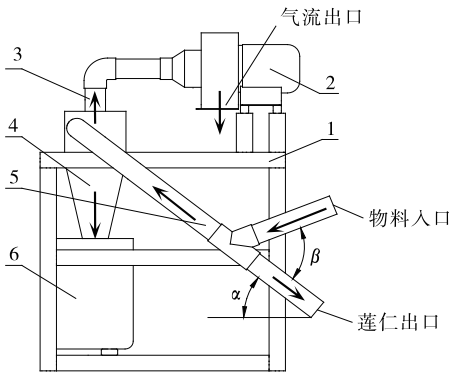
CFD-DEM 耦合法是一种用于颗粒—流体系统仿真的方法,考虑了流体和颗粒的双向耦合作用,在气固两相流模拟分析中已有所应用[4-5],心男[6]基于 EDEM-FLUENT 耦合法对气吹式排种器的工作过程进行了模拟;Li Yao-ming 等[7]对物料在谷物清选装置气流场中的运动规律进行了研究,验证了 CFD-DEM 耦合法在谷物研究中的实用性。

本研究拟采用 CFD-DEM 耦合方法,对莲子风力壳仁分离装置进行流场分析与分离仿真模拟,研究分离气流速度、入料管倾斜角、分离通道倾斜角等因素对分离效果的影响规律,获取最优工艺参数。

基金项目:国家自然科学基金项目(编号:51575466);湖南省自然科学基金资助项目(编号:2015JJ5005)

作者简介:马秋成(1964—),男,湘潭大学教授,硕士。
E-mail:mqc@xtu.edu.cn

收稿日期:2016—08—29



α. 分离通道倾斜角,(°) β. 入料管倾斜角,(°) 1. 机架 2. 吸风机 3. 连接管 4. 旋风分离器 5. 分离通道 6. 莲壳收集器

图 1 莲子壳仁分离装置结构简图

Figure 1 Structure diagram of pneumatic separating device for lotus seed shell and kernel

1 数学模型建立

1.1 气相方程

基于 CFD-DEM 耦合法,采用标准的 k-ε 湍流模型对莲壳、莲仁的分离过程进行数值模拟。

气固耦合气体动力学控制的质量守恒方程和动量守恒运动方程(N-S 方程)[8]分别见式(1)、(2)。

$$\frac{\partial(\varepsilon_k\rho_k)}{\partial_t}+\nabla\cdot(\varepsilon_k\rho_k u_k)=0, \tag{1}$$

$$\frac{\partial(\varepsilon_k\rho_k u_k)}{\partial_t}+\nabla\cdot(\varepsilon_k\rho_k u_k u_k)=-\nabla p+\nabla\cdot(u_k\varepsilon_k\nabla u_k)-\varepsilon_k\rho_k g-S, \tag{2}$$

式中:

ε_k——流体空隙率,%;

ρ_k——流体密度,kg/m^3;

t——时间,s;

u_k——流体速度,m/s;

P——流体静态密度,kg/m^3;

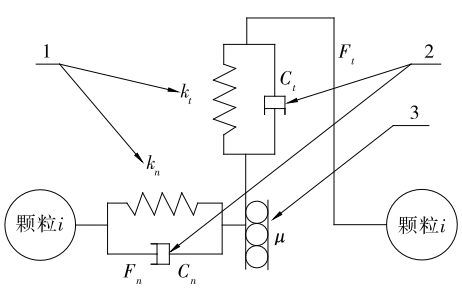
μ_k——流体动力粘度,Pa·s;

g——重力加速度,g=9.806 m/s^2;

S——源项,kg/(m^3·s)。

1.2 颗粒接触力学模型

采用 EDEM 软件默认的 Hertz-Mindlin 无滑移接触模型,可以精确计算颗粒间的作用力[9],其简图见图 2。



1. 颗粒刚度(弹簧) 2. 阻尼器 3. 摩擦器

图 2 接触力学模型简图

Figure 2 Model of the contact forces

2 仿真模型构建

2.1 分离通道模型及网格划分

莲壳和莲仁混合物料的分离是在分离通道中完成,其网格模型见图 3。单元总数为 24 304,节点数量为 5 362,管道直径为 40 mm,混合物料从流体入口 2 进入分离通道。

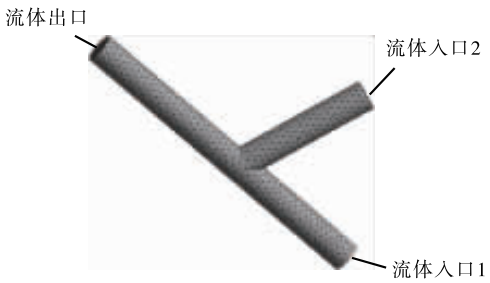


图 3 分离通道网格划分模型

Figure 3 Mesh model of the separator

2.2 莲仁、莲壳仿真模型

莲仁的外形为近似椭球形,为方便计算,在仿真过程将莲仁用最大横截面直径的球体代替,取其平均直径 d=11.841 mm[10]。莲壳是表面呈球形、平均厚度为0.69 mm[11]的壳体,由于 EDEM 仿真颗粒是通过球体组成,若利用微小球体填充的方式得到莲壳,会造成计算困难。因悬浮速度参数表征物料的空气动力学特性,本文考虑采用与莲壳悬浮速度相等的一个球体颗粒等效莲壳,设置莲壳仿真颗粒的直径为 12 mm,可以判断等效莲壳颗粒的阻力系数分区为 Newton 区,阻力系数 C_h=0.44,莲壳悬浮速度变化范围 2.511~4.891 m/s,其理论悬浮速度[3]计算表达式见式(3)。

$$v_p=\frac{5.451}{\sqrt{S}}\sqrt{\frac{d_p(\rho_s-\rho_a)}{\rho_a}}, \tag{3}$$

式中:

v_p——颗粒的悬浮速度,m/s;

d_p——颗粒粒径,d_p=0.012 m;

S——非球形颗粒的形状修正系数;

ρ_s——颗粒密度,kg/m^3;

ρ_a——空气密度,ρ_a=1.29 kg/m^3。

根据式(3)可以计算等效球体颗粒的密度 ρ_s=24.086~87.806 kg/m^3。仿真参数取平均值 ρ_s=56 kg/m^3。

莲仁、莲壳和管道的材料属性和碰撞属性的参考值[12-13]见表 1、2。

2.3 耦合参数的设置

设置耦合参数时,流场迭代求解采用 SIMPLE 算法,选择自由流动曳力模型,松弛因子均设为 0.7。

表 1 材料属性设置

Table 1 Material properties setting

材料	密度/(kg·m^{-3})	泊松比	剪切模量/MPa
莲仁	1 080	0.33	9.2×10^8
莲壳	56	0.31	9.3×10^9
管道	7 800	0.30	7.0×10^{10}

表 2　接触属性设置

Table 2　Contact properties setting

碰撞	恢复系数	静摩擦系数	滚动摩擦系数
莲仁—莲仁	0.2	0.71	0.070
莲仁—莲壳	0.2	0.58	0.068
莲仁—管道	0.2	0.70	0.069
莲壳—莲壳	0.3	0.67	0.065
莲壳—管道	0.2	0.60	0.067

对 FLUENT 和 EDEM 时间步长进行设置,两者之间满足的条件为:① FLUENT 时间步要保证计算时稳定收敛;② EDEM 时间步长为瑞利时间步长的 5%～40%,保证仿真的连续性;③ 两者的时间步长和数据保存频率须成整数倍匹配。基于上述 3 个基本原则,仿真过程设定 FLUENT 中的时间步长为 8×10^{-4} s,匹配关系见表 3。

表 3　EDEM-FLUENT 耦合时间步长匹配

Table 3　Matching relationship of the EDEM-FLUENT coupling time step

项目	时间步长/s	频率/Hz	保存时间/s
FLUENT	8×10^{-4}	50	0.04
EDEM	4×10^{-6}	2 500	0.01
倍数	200		4

3　仿真结果分析

3.1　流场分析

为与前期试验对照,FLUENT 仿真模型设置分离通道内气流速度范围为 6.680～7.881 m/s。图 4 为不同出口流速下分离通道中轴面流速矢量分布。由图 4 可知:流体入口附近速度变化缓慢,在流体入口与出口交汇处速度发生突变;分离通道内部气流速度随流体出口速度的增加而增加,但速度分布趋势保持不变。

3.2　耦合仿真分析

图 5 表示在仿真时间 t 为 0.35～0.87 s 时莲仁、莲壳在分离通道中的分离过程(黑色表示莲壳,浅色表示莲仁),模型中设置 $\alpha=60°$、$\beta=35°$,入料管长度为 220 mm,进料量为莲仁 6 颗/次、莲壳 12 颗/次。由图 5 可知:当混合物料位于叉形区域后,莲壳顺着气流方向沿管道往上运动,莲仁沿管道向相反方向运动,与实际情况一致。

3.3　仿真试验

由壳仁分离装置的试验研究可知,影响清选率的主要因素为流体出口速度、入料管倾斜角和分离通道倾斜角,采用 CFD-DEM 耦合仿真进一步研究这 3 个因素对清选率的影响。定义其清选率为:

$$P=\frac{n}{n+m}, \tag{4}$$

式中:

P——清选率,%;

n——管道出口莲仁的数量;

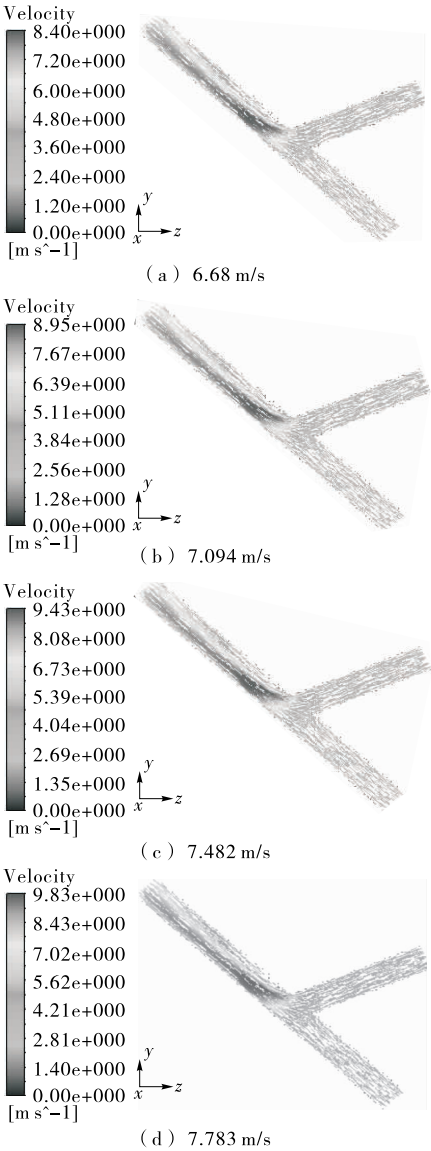


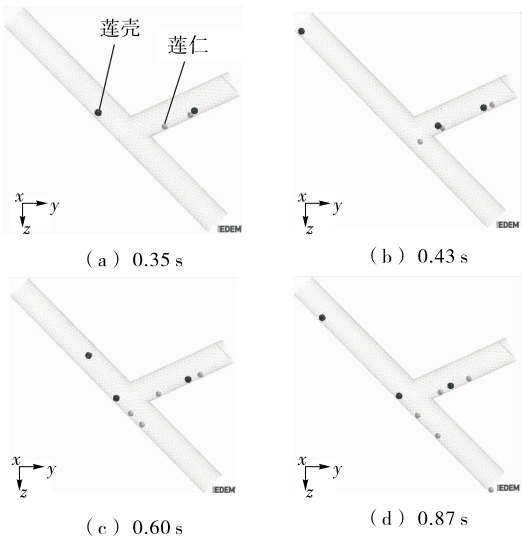
图 4　不同出口流速下速度矢量分布图

Figure 4　Velocity vector distribution diagram of different fluid outlet velocity

m——管道出口莲壳的数量。

3.3.1　单因素试验　仿真过程设置管道出口流速为 6.68～7.881 m/s;入料管倾斜角范围 45～90°;分离通道倾斜角范围 30～55°,软件中,颗粒工厂按莲仁颗粒数设置为 200,莲壳颗粒数 400,每组仿真重复 3 次,通过查看 EDEM 中仿真结果,对出口处莲仁、莲壳数量进行统计,求出耦合仿真的清选率 P。

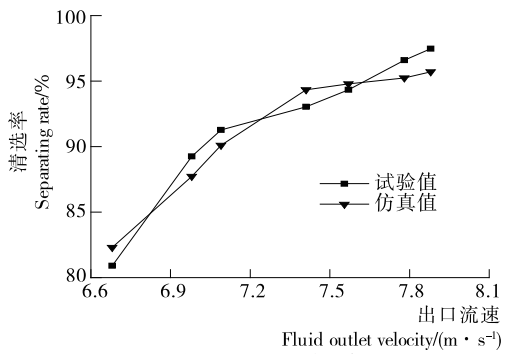
综合试验和仿真结果的清选率指标,作出分布折线图(见图 6)。由图 6 可知,随着管道出口流速的增大,仿真结果对应清选率指标近似以二次曲线规律递增,与试验结果趋势一致,相对误差在 2%以内,当出口流速为 7.81 m/s 时,清选率最高;随着入料管倾斜角的增大,仿真结果的清选率指标近似以二次曲线规律递减,与试验结果趋势一致,相对误差在 3%以内,当倾斜角为 90°时,清选率最低;当分离通道倾斜角为 35°时清选率较高,35°之后清选率呈线性下降,与试验



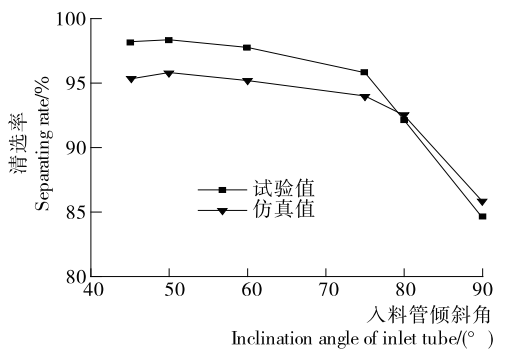
(a) 0.35 s (b) 0.43 s (c) 0.60 s (d) 0.87 s

图 5 耦合仿真分离过程

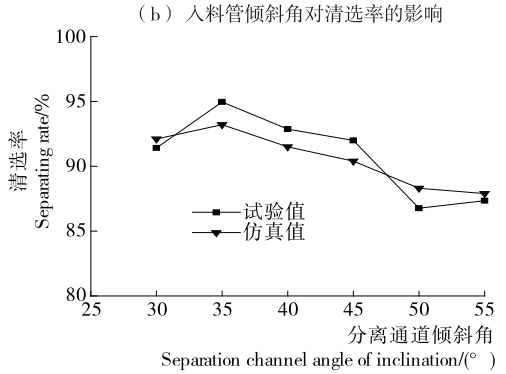
Figure 5 The separation process of coupling simulation



(a) 出口流速对清选率的影响



(b) 入料管倾斜角对清选率的影响



(c) 分离通道倾斜角对清选率的影响

图 6 不同因素对清选率的影响

Figure 6 Separating rate with different factors

结果趋势一致,相对误差在 3%以内。

3.3.2 正交试验 为获得出口流速、入料管倾斜角及分离通道倾斜角的最优组合,开展正交仿真试验。根据前面单因素试验的结论,在各因素中选择三个较优水平建立三因素三水平正交表见表 4。

根据因子水平表,在 Fluent 中安排 9 组仿真试验,每组试验重复 3 次,得到清选率指标并对结果进行极差分析[14],见表 5。

表 4 正交试验因子水平表

Table 4 Factors and levels of orthogonal test

水平	X 出口流速/(m·s⁻¹)	Y 入料管倾斜角/(°)	Z 分离通道倾斜角/(°)
1	7.672	50	30
2	7.783	60	35
3	7.881	70	40

表 5 正交试验结果

Table 5 Results of orthogonal test

序号	X	Y	Z	清选率 P/%
1	1	1	1	95.24
2	1	2	2	97.09
3	1	3	3	93.46
4	2	1	3	94.31
5	2	2	1	96.62
6	2	3	2	96.15
7	3	1	2	97.56
8	3	2	3	96.62
9	3	3	1	94.79
K_{1j}	285.94	287.15	286.78	
K_{2j}	287.56	290.96	290.73	
K_{3j}	288.86	284.25	284.85	
R	2.92	6.71	5.88	

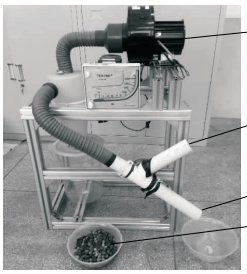
由表 5 可知,影响清选率的各因素主次顺序为 Y、Z、X,仿真试验得到的最优方案为:$Y_2Z_2X_3$,即入料管倾斜角 60°、分离通道倾斜角 35°、出口流速 7.881 m/s 时有利于莲仁、莲壳的分离。

3.4 验证实验

采用壳仁分离装置对仿真得到的最优方案进行实验验证,试验装置见图 7。将 200 粒饱满莲仁和 400 粒半莲壳充分混合,作为试验样本。试验前,设置入料管倾斜角 60°、分离通道倾斜角 35°、出口流速 7.881 m/s(风机频率 50 Hz),将混合物料均匀地从入料口放入,以清选率为试验指标,实验重复 3 次,结果见表 6,测得清选率分别为 97.56%,98.52%,98.04%,均值为 98.04%,与仿真结果获得的清选率接近。

4 结论

利用 FLUENT 软件对分离通道内流场进行了分析,结果表明:流体出口速度只改变分离通道内各点的速度大小,



1. 风机　2. 入料口　3. 莲仁出口　4. 混合物料

图 7　壳仁分离装置

Figure 7　Separating device for lotus seed kernel and shell

表 6　壳仁分离试验结果

Table 6　Results of separation for lotus seed kernel and contaminants test

试验次数	出口莲仁数 n	出口莲壳数 m	清选率 P/%	均值/%
1	200	5	97.56	
2	200	3	98.52	98.04
3	200	4	98.04	

不改变速度分布趋势。采用 CFD-DEM 耦合仿真得到的清选率变化趋势与试验一致,清选率指标随着倾斜角的增大而降低,随出口流速的增大而增加。仿真试验得到的最优分离参数为:入料管倾斜角 60°、分离通道倾斜角 35°、出口流速 7.881 m/s,与实体样机试验结果相同,验证了采用 CFD-DEM 耦合法研究壳仁分离装置是可行的,所得工艺参数,为莲子物料分离机的设计提供了参考依据。

参考文献

[1] 张雪松. 基于线阵 CCD 的红枣分选技术[J]. 食品与机械, 2008, 24(3): 81-83.

[2] SHAPIRO M, GALPERIN V. Air classification of solid particles: a review [J]. Chemical Engineering and Processing, 2005, 44(2): 279-285.

[3] 马秋成, 卢安舸, 高连兴, 等. 莲子物料空气动力学特性与壳仁分离装置试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(6): 297-303.

[4] 蒋梅胜, 李 恒, 李林书, 等. 基于 CFD-DEM 耦合法的灭火机风筒优化与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(8): 104-111.

[5] TSUJI Y, KAWAGUCHI T, TANAKAT. Discrete particle simulation of two-dimensional fluidized Bed [J]. Technology, 1993, 77(1): 79-87.

[6] 心男. 基于 EDEM-FLUENT 耦合的气吹式排种器工作过程仿真分析[D]. 吉林: 吉林大学, 2013: 35-47.

[7] LI Hong-chang, LI Yao-ming, GAO Fang, et al. CFD-DEM simulation of material motion in air-and-screen cleaning device [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2012, 88: 111-119.

[8] ZHOU Z Y, CHU K W, Assessments of CFD-DEM models in particle-fluid flowmodelling [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2010, 661: 482-510.

[9] RENZO A, DI MAIO F P. Comparison of contact-force models for the simulation of collisions in DEM-based granular flow codes [J]. Chemical Engineering Science, 2004, 59(3): 525-541.

[10] 卢安舸. 莲子风力壳仁分离技术研究[D]. 湖南: 湘潭大学, 2015: 30-34.

[11] 赵扶民. 自适应莲子剥壳机设计与研究[D]. 湖南: 湘潭大学, 2015: 6-8.

[12] 刘绍雄. 莲子加工工艺与剥壳原理的分析研究[J]. 粮油加工与食品机械, 1987(18): 9-12.

[13] 周银镔. 莲仁物理机械特性及切削加工特性研究[D]. 湖南: 湘潭大学, 2012: 28-36.

[14] 唐启义. 数据处理系统: 实验设计、统计分析及数据挖掘[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 142-156.

信息窗

我国将全面开展食盐电子追溯体系和企业信用体系建设

中国盐业协会理事长茆庆国 27 日说, 我国将全面开展食盐电子追溯体系和食盐企业信用体系建设,实现食盐来源可追溯和企业信用等级评价, 强化食盐安全管理,确保市场稳定。

茆庆国是在 27 日召开的盐行业信用体系建设启动大会暨中国盐业协会第七届三次理事扩大会议上做出上述表述的。

近日,工信部向社会公开征求对《食盐专营办法(修订征求意见稿)》和《盐业管理条例(修订征求意见稿)》的意见,将改变盐业"独家销售"模式,食盐定点生产企业可以进入市场销售食盐,食盐价格市场调节。

茆庆国说,从 2017 年起,我国将进入为期两年的盐改过渡期。随着市场放开和竞争加剧,确保食盐安全市场稳定十分重要。建设食盐电子追溯体系和食盐企业信用体系,既能够鉴别真假防止串货,又可对企业信用进行监督评价,规范市场环境。

中国盐业协会秘书长宋占京在会上说,目前,全国食盐电子防伪追溯服务平台建设已经完成,开始运行,已经有 8 个省 12 家生产企业在平台注册。2017 年底前,食盐定点生产企业和食盐批发企业将建立电子防伪追溯系统,对接全国食盐电子防伪追溯服务平台。2017 年,中国盐业协会将建立所有食盐企业信用记录,开始对违规经营、破坏市场秩序行为进行信用不良记录并公示。此外,还将依托信用平台系统开展市场主体备案工作,对企业出具信用评价报告。

(来源:www.foodmate.net)