

# 气流扰动吸粮机关键部件的设计与分析

## Design and analysis for key parts of pneumatic conveying of airflow disturbance

王继焕<sup>1</sup> 刘启觉<sup>2</sup>

WANG Ji-huan<sup>1</sup> LIU Qi-jue<sup>2</sup>

(1. 武汉华夏理工学院机电工程学院, 湖北 武汉 430223; 2. 武汉轻工大学食品科学与工程学院, 湖北 武汉 430023)

(1. School of Mechanical and Electronic Engineering, Wuhan Huaxia University of Technology, Wuhan, Hubei 430223, China; 2. School of Food Science and Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan, Hubei 430023, China)

**摘要:**针对吸粮机普遍存在的能耗较高、产量波动较大和吸粮嘴进料量不稳定的实际状况,分析气流扰动机理,利用吸粮机正压回风为扰动气源,设计气流扰动吸粮嘴,可以增大吸粮口粮食与气流的混合,有利于能量传递与转换,有利于粮食进入系统。利用大弯头分离器,具有防碰撞、防破碎、除尘等“一风多用”的优点,节能减损。研究表明:当扰动气流速度设定为风机风量的 11%~13%、扰动气流速度为 16~18 m/s 时,吸粮机的产量及风机的效率最高。

**关键词:**吸粮机;气流扰动;吸粮嘴;两相流;浓度

**Abstract:** According to the actual situation of higher energy consumption, as well as the greater fluctuations of yield and unstable feed quantity of suction nozzle in pneumatic conveying, the mechanism of airflow disturbance was analyzed. The grain suction nozzle of airflow disturbance was designed by using return air of positive pressure of pneumatic conveying as disturbed gas source, which could increase mixture between grain and airflow of grain inlet, by helping grain entering system and energy transmitting as well as converting. The use of separator of large curvature elbow had advantages of one wind multipurpose, including anti-collision, anti-broken, dust removal, energy saving and loss reduction. Results showed that the output of pneumatic conveying and efficiency of fan were the highest when the disturbed gas flow was 11%~13% of fan air volume, with the velocity of airflow disturbance at 16~18 m/s.

**Keywords:** pneumatic conveying; airflow disturbance; grain suction nozzle; two-phase flow; concentration

吸粮机是利用风机产生的具有一定压力和速度的气流,通过管道输送小麦、玉米等散状粮食的输送机械<sup>[1-2]</sup>。随着粮食加工厂、粮食仓储规模的日益扩大,吸粮机在装卸强度

大的粮库、车站、码头得到了快速的发展,从而使得粮食的“四散”(散装、散运、散存和散卸)技术得到普遍应用。吸粮机的性能与风机、吸嘴、输送距离、旋风分离器、底部供料器以及卸料器等设备有关<sup>[3-5]</sup>。如何提高吸粮机工作稳定性、提高吸粮机的产量、降低能耗以及物料破碎率,一直是粮食科技工作者研究的课题。王蓉等<sup>[6]</sup>通过对国内外移动式吸粮机的测试、对比,为机型选定、推广应用提供参考;吴建章等<sup>[7-8]</sup>研究了内外筒面积比、内外筒端面距离和输送风速等因素对双筒型吸嘴性能的影响,探求了提高吸粮机输送产量的较佳工作参数,并对吸粮机中叶轮式闭风器的气密性进行了研究;刘秀芳<sup>[9]</sup>对吸粮机装置中的单筒型吸嘴进行了试验研究,得到输送产量最高时的吸嘴端口距料堆的距离;为了获得吸粮机较高的输送效率,张贝贝等<sup>[10]</sup>对输送管道的结构进行了优化;丁问司等<sup>[11]</sup>则利用 FLUENT6.3 对大吨位吸粮机(150 t/h)采用的 KJLN07 型三级离心风机内部流动进行了全三维整机可压缩数值计算,为多级离心风机的优化设计提供参考。此外,物料性质以及吸粮机系统的工作参数均对吸粮机产量具有显著的影响,多名学者<sup>[12-15]</sup>对此进行了研究。但到目前为止,尚未见应用气流扰动技术设计吸粮机系统的相关报道。

本文针对吸粮机广泛存在的能耗较高、产量波动较大的实际状况,特别是吸粮嘴的喂料量受吸料点的粮堆形状、埋深及操作条件影响较大,导致吸粮机的瞬时浓度变化较大易产生粮食破碎和能量浪费等问题,研究设计气流扰动吸粮机关键部件,分析气流扰动吸粮嘴工作特性,探索减小吸粮嘴瞬时浓度变化幅度、降低吸粮机粮食损伤率的方法。

### 1 气流扰动吸粮机的工作原理与工艺特点

气流扰动吸粮机主要由气流扰动吸粮嘴、可伸缩输粮管、大弯头分离器、关风器、风机、排风管、回风软管及控制系统等组成(见图 1)。该吸粮机安装在可移动的行走平台上,通过可伸缩输粮管,将气流扰动吸粮嘴插入粮堆中,还可调节气流扰动吸粮嘴插入粮堆的深度和位置。

**基金项目:**国家重点科技成果转化项目(编号:2012258)

**作者简介:**王继焕(1956—),女,武汉华夏理工学院教授,硕士。

E-mail:362426977@qq.com

**收稿日期:**2017-04-05

当吸粮嘴插入粮堆时,在风机负压的作用下,粮食经吸粮嘴吸入。在吸粮嘴中,空气与粮食混合,进行能量传递。粮食从气流中获得能量,并在吸粮嘴内筒作加速运动<sup>[16]</sup>。由于管道横断面面积逐渐扩大,气流速度逐渐降低,粮食的速度与气流速度最终趋于一致。当气流与粮食从可伸缩输粮管进入大弯头分离器进口后,管道断面面积进一步扩大,气流速度进一步降低,失去携带粮食的能力。粮食在大弯头分离器环形通道内作减速运动。当粮食通过大弯头分离器顶点后,在重力作用下,降落到淌料板上,向下流动,在惯性和重力的共同作用下,落入大弯头分离器的集粮斗,然后从关风器中排出,装入车、船或其它运输机械中。空气能穿透下落的粮流,将粉尘、轻杂物携带至集尘箱。空气经引风管被吸入通风机内,然后经排风管排入大气中。风机是吸粮机的动力,具有制造成本低、使用和维护方便、对被输送气体的要求不严格的特点。与高真空吸粮机相比,无需空气过滤器,因而消耗动力较小。

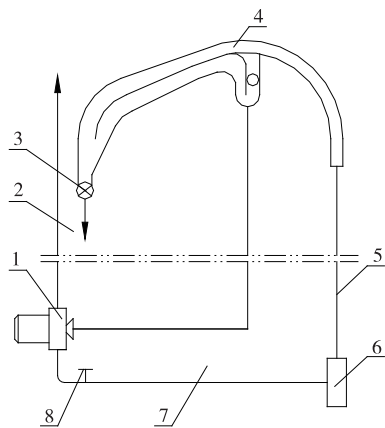


图1 气流扰动吸粮机工作原理示意图

Figure 1 Schematic drawing for working principle of pneumatic conveying of airflow disturbance

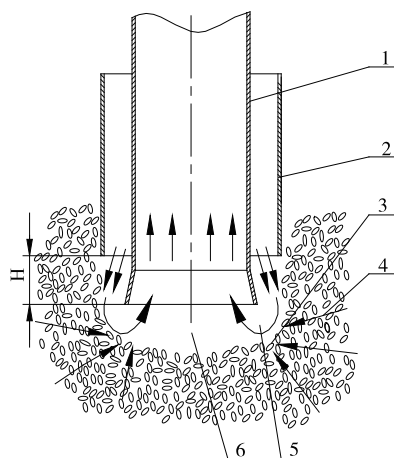
## 2 气流扰动吸粮机的关键部件设计与工艺特性

### 2.1 气流扰动吸粮嘴的设计

吸粮嘴即吸粮机的供料装置,是吸粮机的关键部件之一,它的主要作用是使粮食与空气混合,使粮食从气流中获得能量,并产生加速度。空气与粮食的混合越均匀,则能量转换效率越高,粮食越容易被吸入吸粮机中。吸嘴的性能与吸粮机的输送产量、性能的稳定性及能耗的高低密切相关。

传统双筒吸粮嘴见图2。当双筒吸粮嘴插入粮堆3中,在吸粮嘴的附近有一个吸粮区6。输送粮食的空气由粮堆负压气流4和补充气流5组成。吸粮区底部呈现锅底状,中心部分最深。吸粮机工作时,在风机的作用下,吸粮嘴内筒形成较大负压,并在吸粮嘴附近形成负压吸粮区6。由质量守恒和能量守恒理论<sup>[17]</sup>:

$$Q = Q_1 + Q_2, \quad (1)$$



1. 内筒 2. 外筒 3. 粮堆 4. 粮堆负压气流 5. 补充气流 6. 吸粮区

图2 传统双筒吸粮嘴工作原理示意图

Figure 2 Schematic drawing for working principle of traditional grain suction nozzle of double cylinder

式中:

$Q$ ——吸粮机输送粮食空气流量,  $\text{m}^3/\text{h}$ ;

$Q_1$ ——粮堆负压气流,  $\text{m}^3/\text{h}$ ;

$Q_2$ ——外部空气经内外筒环形空间的补充气流,  $\text{m}^3/\text{h}$ 。

由理论分析和试验测试知: $Q_1$ 占 $Q$ 的50%~90%; $Q_2$ 占 $Q$ 的10%~50%。

当 $Q_1$ 增大时,吸粮嘴的阻力增大较快,吸粮机的总风量减小,将使吸粮机的产量降低;而当 $Q_2$ 增加时,吸粮嘴的阻力会降低,吸粮机的总风量增加,但吸粮机输送粮食的浓度会降低,亦将影响吸粮机的产量。所以,吸粮区的 $Q_1$ 和 $Q_2$ 相互影响,不断变化。通过调节外筒的位置 $H$ 值和吸粮嘴插入粮堆的深度,可以调节 $Q_1$ 和 $Q_2$ 之间的比例。但在线调节技术受粮堆状况、操作场地、操作技术、调节频率等因素的影响较大,使吸粮机的产量和吸粮浓度波动较大,产生粮食破损和能量损耗。在两相流阻力计算中,常将阻力表述为:

$$P = P_{\text{气}} + P_{\text{粮}}, \quad (2)$$

式中:

$P$ ——吸粮嘴的总阻力, Pa;

$P_{\text{气}}$ ——空气进入吸粮嘴的阻力, Pa;

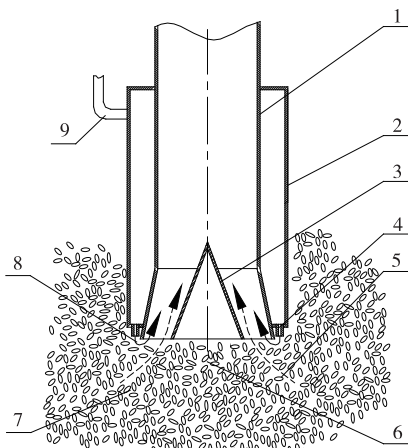
$P_{\text{粮}}$ ——粮食进入吸粮嘴的阻力, Pa。

吸粮嘴工作时的总阻力为空气进入吸粮嘴的阻力 $P_{\text{气}}$ 与粮食进入吸粮嘴的阻力 $P_{\text{粮}}$ 之和。粮堆内的空气在进入吸粮嘴的过程中,穿过粮粒之间的空隙,需克服粮层的阻力,并将一部分能量转变为气流的速度,这两部分能量损耗之和即为 $P_{\text{气}}$ 。同时,粮食在进入吸粮嘴的过程中,将克服粮粒间的摩擦、碰撞、挤压等阻力,并将一部分能量转变为粮粒的速度,这两部分能量损失之和即为 $P_{\text{粮}}$ 。

如图3所示,当气流扰动吸粮嘴工作时,应满足以下关系:

$$Q = Q_1 + Q_3, \quad (3)$$

$$P = P_{\text{气}} + P_{\text{粮}} - P_{\text{嘴}}, \quad (4)$$



1. 内筒 2. 外筒 3. 导粮锥 4. 喷风嘴 5. 粮堆负压气流 6. 吸粮区 7. 粮堆 8. 扰动气流 9. 回风软管接口

图 3 气流扰动吸粮嘴工作原理示意图

Figure 3 Schematic drawing for working principle of grain suction nozzle of airflow disturbance

式中:

$Q_3$ ——各喷风嘴喷风气流之和(占  $Q$  的 5%~20%),  $m^3/h$ 。

$P_{\text{喷}}$ ——各喷风嘴喷风气流动能之和, Pa。

比较式(1)、(3)可知:增大  $Q_1$  的波动范围,将导致吸粮嘴内两相流浓度波动较大。同时,当浓度过小时,粮粒的速度增大,易产生破损;当浓度增加较快时,吸粮机阻力增加较快,导致风机的风量快速降低,造成吸粮机工作不稳定。

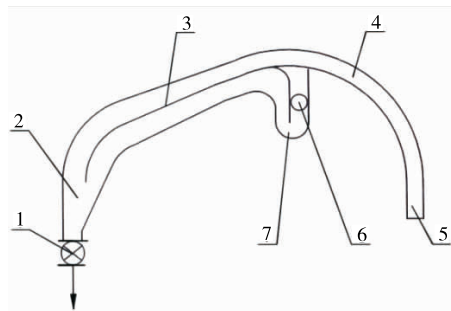
比较式(2)、(4)可知:传统吸粮嘴的阻力为空气与粮食进入吸粮嘴的阻力之和。由图 2 可知:从粮堆的粮食颗粒间隙中进入吸粮嘴的空气从吸粮区的边缘朝吸粮嘴流动,而外部空气经内外筒之间的环形空间补入吸粮嘴。两股气流有较明显的分界面,不利于粮粒与空气的混合,不利于能量传递与转换。而图 3 所示的气流扰动吸粮嘴,输入了经回风软管补入的正压喷风  $P_{\text{喷}}$ ,  $P_{\text{喷}}$  能量的大小,由风机与回风调节阀开度调节。同时,从喷风嘴喷入的气流冲击吸粮区的边缘,并对吸粮区边缘的粮食产生扰动作用,有利于粮粒与空气的混合,有利于能量传递与转换,有利于两相流浓度稳定及吸粮机阻力平衡稳定产量。另外,图 2 的吸粮区中部为一抛物面,深度较大;而图 3 的吸粮区中部接近于平面,气流从吸粮嘴边缘的环形通道进入,能量较集中,有利于吸粮嘴边缘的粮食进入吸粮机。

由上述分析知:双筒吸粮嘴从大气中补入气流  $Q_2$ , 因大气与吸粮嘴之间的压力差较小,外筒与内筒之间环形风口处的补风气流速度不高,补风气流  $Q_2$  一般位于粮堆负压气流  $Q_1$  的上部,并从补风口沿内筒边缘进入吸粮嘴。而气流扰动吸粮嘴利用吸粮机所配置风机出风口的高压气流作为扰动气流  $Q_3$ 。在外筒环形底部设置有多个喷风嘴,各喷风嘴风量之和为  $Q_3$ , 故扰动气流  $Q_3$  的压力比大气压力大很多,从喷风嘴喷出气流的风速为 14~20 m/s, 具有较高的动能,可穿透粮堆负压气流  $Q_1$ , 对吸粮区边缘粮食产生扰动。由实

践经验知:当吸粮区边缘粮粒与粮堆负压气流  $Q_1$  产生的吸力平衡而处于静止状态时,只需很小的外力扰动,就能将粮粒由静止状态变为运动状态。所以,利用扰动气流对吸粮区粮食扰动的吸粮嘴称为气流扰动吸粮嘴。通过调节  $Q_3$  的大小,可以调节喷风嘴气流的速度,从而调节扰动力的大小,实现吸粮机产量的调节。另外,  $Q_3$  比  $Q_1$  小很多,对吸粮嘴附近空气与粮食的两相流流场的扰动不大,有利于吸粮机浓度稳定,有利于吸粮机产量与工作稳定。

## 2.2 大弯头分离器的设计

大弯头分离器见图 4,料气两相流经伸缩管进入分离器。环形通道的曲率半径较大,粮食在环形通道中运动时,与边壁发生斜碰撞,碰撞力较小。另外,环形通道的断面积逐渐增大,则两相流速度逐渐减小,并将气流的速度控制在 8~10 m/s,有效地减小了碰撞力。在大弯头分离器中,设计有一曲面淌料板,当两相流经过分离器最高点后,两相流的速度进一步降低,粮食沿淌料板向下流动,粮食在淌料板上的运动速度很小,粮粒间的碰撞、粮粒与淌料板间的碰撞均很小。所以,粮流的阻力小,噪音低。气流的惯性比粮食的惯性小得多,较容易改变方向。所以,气流从淌板的上部折转,穿透下落的粮流,并带走粮流中的杂质和灰尘。集尘室的断面呈 U 型,中间设计有一隔板。气流带着杂质和粉尘进入集尘室后,先向下运动,随后转 180°,向上进入排风口,气流中的杂质和粗尘粒在重力和离心力的作用下,落入集尘室底部而被分离。所以,大弯头分离器具有分离粮食、除尘等多项功能,且阻力小,粮食破碎少,噪音较低,可广泛用于粒状物料的分选。



1. 关风器 2. 集料斗 3. 淌料板 4. 环形通道 5. 料气进口  
6. 排风口 7. 集尘器

图 4 大弯头分离器工作原理示意图

Figure 4 Schematic drawing for working principle of separator of large curvature elbow

## 3 性能测试与结果分析

### 3.1 吸粮机性能试验与测试

在福建沿海码头,分别采用双筒吸嘴式吸粮机和气流扰动式吸粮机进行小麦卸船对比试验,其升运高度为 20 m,测试结果见表 1。

调节双筒吸粮嘴外筒下端部补风口与内筒下端部进风口之间的高度  $H$ ,可以调节大气补入吸嘴空气的阻力。当  $H$  值增大时,外筒补风口与内筒进风口之间的粮层增厚,阻

表1 双筒吸嘴式吸粮机与气流扰动式吸粮机的主要性能参数比较

Table 1 Comparison of main performance parameters of pneumatic conveying between the type double cylinder nozzle and airflow disturbance

| 机型    | $H$ 值/<br>mm | 扰动气流量/<br>( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ) | 吸粮机产量/<br>( $\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$ ) | 吸嘴内筒风速/<br>( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) | 风机风量/<br>( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ) | 风机风压/<br>Pa | 风机功率/<br>kW | 质量浓度/<br>( $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) |
|-------|--------------|--|--|---|---|-------------|-------------|---|
| 双筒吸嘴式 | 50           | —  | 33   | 22.2  | 5 590   | 7 200       | 21.9        | 2~8   |
|       | 100          | —  | 38   | 21.3  | 5 370   | 7 850       | 22.1        | 2~9   |
|       | 150          | —  | 45   | 19.8  | 4 990   | 8 770       | 22.5        | 5~10  |
|       | 200          | —  | 42   | 19.5  | 4 910   | 8 550       | 22.0        | 5~10  |
|       | 250          | —  | 35   | 18.6  | 4 690   | 7 910       | 20.6        | 2~9   |
| 气流扰动式 | —            | 220  | 42   | 19.5  | 4 914   | 8 200       | 21.5        | 6~8   |
|       | —            | 410  | 48   | 19.3  | 4 863   | 8 700       | 22.6        | 7~9   |
|       | —            | 520  | 55   | 19.8  | 4 990   | 8 900       | 23.7        | 8~10  |
|       | —            | 630  | 56   | 19.7  | 4 964   | 9 100       | 24.1        | 8~10  |
|       | —            | 740  | 52   | 19.9  | 5 015   | 8 400       | 22.5        | 8~10  |

力增大,补风量减小;反之,阻力减小,补风量增大;当  $H$  为负值时,补风进入吸嘴的阻力近似为零。

气流扰动吸粮嘴是在双筒吸粮嘴的基础上,将双筒吸粮嘴外筒的上、下端封闭,并在外筒下端设置多个喷风嘴,利用回风软管,将风机出口的高压气流引回位于外筒上的回风软管接口,使高压气流经喷风嘴喷入气流扰动吸粮嘴的吸粮区,对吸粮区四周和吸粮区底部的粮食产生扰动,调节扰动气流的流量,可以调节吸粮机的产量。

### 3.2 结果分析

双筒吸粮嘴的补风气流是大气经外筒与内筒之间的环形空间吸入,在吸粮区与粮堆气流混合,再与吸粮区的粮食产生能量传递,使吸粮区内的某些粮食颗粒产生加速度,并随气流一起进入吸粮嘴。外筒与内筒之间的补风口与内筒吸风口之间的粮层平均厚度为  $H$ 。当  $H$  值较大时,补风气流穿透粮层的阻力较大,补入的空气量减少;反之,补入的空气量增加。由表1可知: $H$  值不宜过小或过大。当  $H$  值过小时,粮层对补风气流的阻力过小,使补入的空气直接进入内筒吸风口,未充分与来自粮堆的负压气流混合,未能携带粮食进入吸粮嘴,从而使吸粮机的产量下降。当  $H$  值过大时,粮层对补风气流的阻力过大,从大气补入的空气量过小,使吸粮机的吸风量偏小,产量下降。另外,双筒吸嘴吸粮机工作时,由于粮堆形状和  $H$  值均不断变化,使吸粮机两相流的浓度值波动范围增大,当浓度值变小时,吸粮机的阻力减小,风量增大,粮食在吸粮机内的速度增大,易产生粮粒损伤与噪声;当浓度值增加速度过快时,吸粮机的阻力会急剧增加,导致吸粮机工作不稳定。

气流扰动吸粮嘴的补风气流是来自吸粮机的高压风机,具有较高的压力,可使经喷风嘴喷出的补风气流速度达到  $14 \sim 20 \text{ m/s}$ ,可以对吸粮区四周和吸粮区底部的粮食产生扰动作用。扰动气流对粮食颗粒的扰动作用,是吸粮机高压风机对吸粮区粮食颗粒施加的外力,有助于气流与粮粒之间的能量传递、粮粒加速、粮食稳定进入吸粮嘴,提高吸粮机产量。而扰动气流量的大小,可以通过吸粮机的回风调节阀调

节,有利于现场调节和实现智能控制。由表1可知:当扰动气流流量在风机流量的  $11\% \sim 13\%$  时,吸粮机产量最大。由喷嘴数量和喷嘴有效面积可知:当扰动气流速度在  $16 \sim 18 \text{ m/s}$  时,吸嘴的工作效果最好。

由表1还可知:双筒吸粮嘴通过调节  $H$  值的大小来调节吸粮机的产量。而  $H$  值的变化与工作现场和粮堆状况密切相关,使现场操控难度增大,且浓度波动范围较大,吸粮机的工作状况的稳定性不够好,易产生粮食损伤、碰撞及噪声。采用控制扰动气流流量的方法调节吸粮机的产量,便于现场操作,技术和控制条件均较成熟,且浓度波动范围较小,吸粮机的工作状况较稳定,有利于提高吸粮机产量和减少粮食损伤。

## 4 结论

(1) 利用回风调节阀调节吸粮机高压风机的回风量,可以调节吸粮机的产量。当扰动气流量在风机风量的  $11\% \sim 13\%$  时,吸粮机的产量最高,且风机的效率最高。

(2) 调节扰动气流量来调节吸粮机工作状况的方法有利于现场操作,且相关技术和控制条件较成熟,有利于吸粮机的推广应用。当扰动气流速度在  $16 \sim 18 \text{ m/s}$  时,吸粮机产量及风机效率最高。

采用气流扰动技术和气流扰动吸粮嘴,有利于吸粮机提高产量、稳定工作,并具有节能、减少粮食损伤的优点。

### 参考文献

- [1] 钱东平,程庆会,李国防,等.降低气力输送小麦能耗的试验研究[J].农业工程学报,2003,19(3):108-111.
- [2] 楼建勇,林江.气力输送系统的研究现状及发展趋势[J].轻工机械,2008,26(3):4-7.
- [3] 张伟,刘广彪,程松.气力卸船机双筒型吸嘴结构分析与改进[J].有色矿冶,2012(3):78-79,91.
- [4] 王伟.长距离气力输送堵塞问题关键技术的研究[D].淄博:山东理工大学,2013:12-24.

(下转第209页)

- [29] SONG J T, DUNG C W, CHAILA P O, et al. Novel, simple and low-cost alternative method for fabrication of paper-based microfluidics by wax dipping[J]. *Talanta*, 2011, 85(5): 2 587-2 593.
- [30] GIRISH Chitnis, DING Zhen-wen, CHANG Chun-li, et al. Laser-treated hydrophobic paper: an inexpensive microfluidic platform[J]. *Lab on a Chip*, 2011, 11(6): 1 161.
- [31] NIE Jin-fang, ZHANG Yun, LIN Li-wen, et al. Low-cost fabrication of paper-based microfluidic devices by one-step plotting [J]. *Analytical Chemistry*, 2012, 84(15): 6 331-6 335.
- [32] MOHAMMAD A T, SHEN Wei, ZEINEDDINE R, et al. Validation of Paper-Based Assay for Rapid Blood Typing[J]. *Analytical Chemistry*, 2012, 84(3): 1 661-1 668.
- [33] VELLA S J, BEATTIE P, CADEMARTIRI R, et al. Measuring markers of liver function using a micropatterned paper device designed for blood from a fingerstick [J]. *Analytical Chemistry*, 2012, 84(6): 2 883-2 891.
- [34] ARENA A, DONATO N, SAIITA G, et al. Flexible ethanol sensors on glossy paper substrates operating at room temperature[J]. *Sensors and Actuators B*, 2010, 145(1): 488-494.
- [35] LI Xu, TIAN Jun-fei, SHEN Wei. Progress in patterned paper sizing for fabrication of paper-based microfluidic sensors [J]. *Cellulose*, 2010, 17(3): 649-659.
- [36] JOKERST J C, ADKINS J A, BISHA B, et al. Development of a paper-based analytical device for colorimetric detection of select foodborne pathogens[J]. *Analytical Chemistry*, 2012, 84(6): 2 900-2 907.
- [37] 肖良品, 刘显明, 刘启顺. 用于亚硝酸盐快速检测的三维纸质微流控芯片的制作[J]. *食品科学*, 2013(22): 341-345.
- [38] 窦斌. 基于微流控芯片和 SERS 的瘦肉精类物质检测[D]. 大连: 大连理工大学, 2014: 28-43.
- [39] HOSSAIN S M Z, LUCKHAM R E, MCFADDEN M J, et al. Reagentless bidirectional lateral flow bioactive paper sensors for detection of pesticides in beverage and food samples[J]. *Analytical Chemistry*, 2009, 81(21): 9 055-9 064.
- [40] ZHANG Meng, GE Lei, GE Shen-guang, et al. Three-dimensional paper-based electrochemiluminescence device for simultaneous detection of Pb(2+) and Hg(2+) based on potential-control technique[J]. *Biosensors & Bioelectronics*, 2013, 41: 544-550.
- [41] WANG Hu, LI Ya-jie, WEI Jun-feng, et al. Paper-based three-dimensional microfluidic device for monitoring of heavy metals with a camera cell phone [J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2014, 406(12): 2 799-2 807.

(上接第 93 页)

- [5] JR O L S, NORILER D, WIGGERS V R, et al. Cyclone optimization by complex method and CFD simulation[J]. *Powder Technology*, 2015, 277: 11-21.
- [6] 王蓉, 王华. 国产吸粮机与进口吸粮机比较[J]. *粮食流通技术*, 2005(2): 13-14, 21.
- [7] 吴建章, 刘秀芳, 温长春. 吸粮机双筒型吸嘴性能的研究[J]. *粮食与饲料工业*, 2005(12): 16-17.
- [8] 吴建章, 胡健. 吸粮机中叶轮式闭风器的气密性研究[J]. *粮食与饲料工业*, 2009(11): 11-13.
- [9] 刘秀芳. 吸粮机单筒型吸嘴性能的研究[J]. *河南工业大学学报: 自然科学版*, 2005(1): 75-77.
- [10] 张贝贝, 柳波, 任昊君. 吸粮机气力输送效率优化设计仿真[J]. *计算机仿真*, 2016, 33(10): 207-211.
- [11] 丁问司, 何祥滨. 吸粮机三级离心风机内部流场的数值模拟[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(11): 78-84.
- [12] 王明旭, 秦超, 李永祥, 等. 气力输送过程中粮食颗粒的输送特性研究[J]. *农机化研究*, 2014(9): 18-22.
- [13] 沈骝, 梁财, 陈晓平, 等. 气力输送中不同物料的流动特性及倾斜管阻力特性[J]. *东南大学学报: 自然科学版*, 2014, 44(5): 975-980.
- [14] MA A C, WILLIAMS K C, ZHOU J M, et al. Numerical study on pressure prediction and its main influence factors in pneumatic conveyors[J]. *Chemical Engineering Science*, 2010, 65(23): 6 247-6 258.
- [15] LIANG Cai, CHEN Xiao-ping, ZHAO Chang-sui, et al. Flow characteristics and shannon entropy analysis of densephase pneumatic conveying of variable moisture content under high pressure [J]. *Chemical Engineering and Technology*, 2007, 30(7): 926-931.
- [16] 杨伦, 谢一华. 气力输送工程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 107-118.
- [17] 侯国祥. 流体力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2015: 311-355.

(上接第 182 页)

- [10] 李爱军, 郭建中. 微波在软包装竹笋灭菌保鲜上的应用研究[J]. *食品工业科技*, 2003, 24(5): 73-74.
- [11] LAU M H, TANG Ju-ming. Pasteurization of pickled asparagus using 915 MHz microwaves[J]. *Journal of Food Engineering*, 2002, 51(4): 283-290.
- [12] 赵兴娥, 王颖, 王微, 等. 不同透明包装对榨菜品质的影响[J]. *食品科学*, 2013, 34(4): 288-292.
- [13] FARAHNKY A, AZIZI R, GAVAHIAN M. Accelerated texture softening of some root vegetables by Ohmic heating[J]. *Journal of Food Engineering*, 2012, 113(2): 275-280.
- [14] 张志强. 低盐酱菜脆度保持的研究[J]. *江苏调味副食品*, 2002(1): 61-62.
- [15] 王肖莉, 屈小玄, 王守凤, 等. 煮烫对榨菜感官品质的影响[J]. *中国调味品*, 2012, 37(9): 22-24.
- [16] AKALIN M K, TEKIN K, AKVIIZ M, et al. Sage oil extraction and optimization by response surface methodology[J]. *Industrial Crops & Products*, 2015, 76: 829-835.
- [17] SWAMY G J, SANGAMITHRA A, CHANDRASEKAR V. Response surface modeling and process optimization of aqueous extraction of natural pigments from *Beta vulgaris*, using Box-Behnken design of experiments[J]. *Dyes & Pigments*, 2014, 111: 64-74.