

鱿鱼足静电裹粉装置设计与参数试验优化

邹福星^{1,2} 楼建忠³ 朱盘安⁴ 李建平¹ 季明东¹ 何相逸¹

(1. 浙江大学生物系统工程与食品科学学院, 杭州 310058; 2. 中原工学院纺织学院, 郑州 451191;

3. 浙江机电职业技术学院机械工程学院, 杭州 310053; 4. 温州科技职业学院农业与生物技术学院, 温州 325006)

摘要: 针对鱿鱼足人工裹粉时粉料容易受潮、利用率低,且鱿鱼足表面粉层分布不均匀、容易漏裹的问题,提出利用气流输送粉料、施加高压静电使粉料带上电荷进行鱿鱼足裹粉的方法。为研究相对湿度和静电电压对鱿鱼足裹粉速度和裹粉量的影响,以及鱿鱼足表面粉料的附着效果,设计了试验装置,设置了40%、60%、80% 3种相对湿度和0、30、60、90 kV 4种静电电压,进行了不同相对湿度和静电电压下的鱿鱼足静电裹粉试验和离心式附着效果测试试验。结果表明:施加高压静电可提高裹粉速度和裹粉量;相对湿度为40%、静电电压为30 kV时,裹粉速度最快、裹粉量最大;相对湿度为60%时,提高静电电压可显著提高裹粉速度和裹粉量;相对湿度为80%时,不同静电电压下裹粉速度和裹粉量差异不明显;0~1 s内裹粉量增加最快,相对湿度为40%时,在0~0.5 s时间段内裹粉量的增加最显著;在相对湿度为60%、静电电压60 kV时进行鱿鱼足裹粉,粉料的附着效果较好。

关键词: 鱿鱼足;裹粉;附着效果;高压静电;离心试验

中图分类号: S985.1⁺2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)05-0390-07

Design and Parameters Optimization of Electrostatic Powder Coating Device for Squid Tentacles

ZOU Fuxing^{1,2} LOU Jianzhong³ ZHU Pan'an⁴ LI Jianping¹ JI Mingdong¹ HE Xiangyi¹

(1. College of Biosystems Engineering and Food Science, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China

2. School of Textile, Zhongyuan Institute of Technology, Zhengzhou 451191, China

3. School of Mechanical Engineering, Zhejiang Institute of Mechanical and Electrical Engineering, Hangzhou 310053, China

4. School of Agriculture and Biotechnology, Wenzhou Vocational College of Science and Technology, Wenzhou 325006, China)

Abstract: Adding seasoning powder to the surface of squid tentacles can increase its flavor and improve the appearance and taste after processing. At present, powder coating of squid tentacles are mainly done by manual work in Chinese aquatic products processing plants, the labor intensity is high, but the work efficiency is low. There were some deficiencies in the artificial squid tentacles coating, for example, in the process of coating, some powder was soaked by surface water on squid tentacles, which led to waste of powders because they can not be used again. Also, it was likely that the artificial coating of squid tentacles cause food contamination. During the process of coating, some areas were prone to be uncoated, and the thickness of the powder layer was not consistent. A new method of using air flow for powder conveying and applying high-voltage static electricity to charge the powder was proposed for powder coating. Due to the principle of that the same charges were repellent, the powder layer on squid tentacles surface was uniform. To obtain optimal coating conditions, electrostatic powder coating experimental device was designed and three relative humidities (RH) of 40%, 60%, 80% and four voltages of 0 kV, 30 kV, 60 kV and 90 kV were setted for electrostatic powder coating test. The results of electrostatic coating experiments showed that the high-voltage static electricity can improve the coating speed and increase the coating mass, the increase of static voltage can significantly increase the coating speed and the coating mass with relative humidity of 60%, the coating effect was not significant when RH was 80%, the coating speed was the fastest and the coating mass was the maximum with voltage of 30 kV and relative

收稿日期: 2017-10-25 修回日期: 2017-11-22

基金项目: 浙江省重大科技专项计划项目(2012C12008-4)

作者简介: 邹福星(1976—),男,博士生,中原工学院讲师,主要从事智能化农业装备研究, E-mail: fuxing_zou@aliyun.com

通信作者: 李建平(1962—),男,教授,博士,主要从事智能农业装备及食品加工新技术研究, E-mail: jpli@zju.edu.cn

humidity of 40% . During the stage of 0 ~ 1 s, the amount of coating mass was increased the fastest , when relative humidity was 40% , the increase of coating mass was the most significant in 0 ~ 0. 5 s. To compare the adhesion effect under different coating conditions, a centrifugal device was designed and made. The results of the test showed that the adhesion effect of powder was the best when the coating was done with relative humidity of 60% and voltage of 60 kV. The results can provide a reference for the design of later squid tentacles electrostatic coating equipment.

Key words: squid tentacles ; coating ; adhesion effect ; high voltage electrostatic ; centrifugal test

0 引言

裹粉鱿鱼足是一种重要的鱿鱼加工产品。在鱿鱼足表面裹上一层调味粉,能够增加鱿鱼足的风味^[1],改善加工后的外观和口感。目前鱿鱼足裹粉作业主要由人工进行。人工裹粉生产效率低,容易造成食品污染、影响食品安全^[2-5];在裹粉过程中,部分粉料受鱿鱼足表面水分侵入而受潮,导致无法继续使用、浪费严重,且鱿鱼足表面粉层厚度不均匀。由于鱿鱼足相邻足间隙小,人工裹粉时靠手指将其分开才能裹上粉,传统的裹粉设备也难以保证足间缝隙裹上调味粉^[6]。

利用高压静电技术^[7]使粉料带上电荷,在喷粉枪和鱿鱼足之间建立高压静电场,通过气流输送粉料,在气流和电场力的共同作用下使粉料运动至鱿鱼足表面对其进行裹粉;利用同性电荷相斥的特性,使粉料在鱿鱼足表面散开形成均匀的粉层;未能附着在鱿鱼足上的粉料仍保持干燥,可回收再利用,减少了粉料的浪费,可有效解决人工裹粉存在的不足。由于静电吸附作用,用机械裹粉方法不易裹上粉料的部位也能裹上粉料。

目前,国内关于食品静电技术的研究主要集中在食物冷藏保鲜^[8-9]、农产品解冻^[10-13]等方面,在食品静电裹粉方面相关研究仍处于空白状态。国外学者通过研究发现,对粉料施加静电可不同程度地增强粉料的附着效果,食物表面的油分、粉料电阻率和颗粒大小对附着效果有影响^[14-16]。专门针对鱿鱼足静电裹粉技术研究尚未见报道。

本文设计静电裹粉装置和离心式附着效果测试装置,通过试验研究不同相对湿度和静电电压下的鱿鱼足裹粉速度和裹粉量,对不同相对湿度和静电电压下裹粉时粉料的附着效果进行对比分析。

1 试验材料

鱿鱼足所用调味粉由浙江富丹旅游食品有限公司提供,其外观如图 1a 所示。调味粉主要成分为小麦淀粉 95%、氯化钠 3%、香辛料 2%;粒度在 200 μm 以上的粉粒质量分数为 30% ~ 40%。试验用鱿鱼足由浙江兴业集团有限公司提供,按照企业

生产实际,修剪成 3 根足相连的形态,平均质量为 18 g 左右,也有少数鱿鱼足因尺寸较小剪成 4 足相连。修剪后的鱿鱼足形态如图 1b 所示。文中提到的鱿鱼足均为图 1b 所示形态。试验时选取 3 足相连的鱿鱼足作为样本。

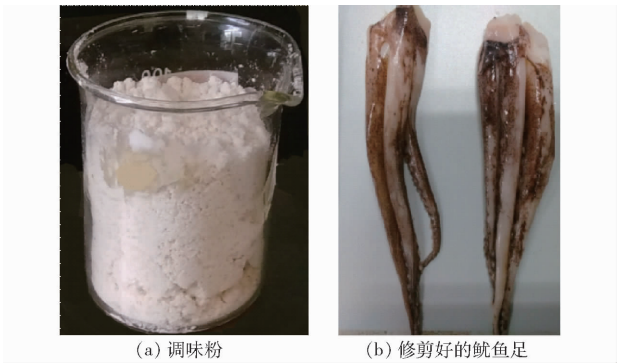


图 1 调味粉和鱿鱼足

Fig. 1 Seasoning powder and squid tentacles

2 静电裹粉原理与裹粉装置设计

2.1 静电裹粉原理

鱿鱼足静电裹粉原理如图 2 所示。鱿鱼足接地,高压静电发生器为喷粉枪提供高压静电,在喷枪和鱿鱼足之间建立起静电场,利用电晕放电原理^[17-19]使粉粒带上负电荷。带电粉料颗粒在电场力和气流的共同作用下运动至鱿鱼足表面,通过吸附形成裹粉层。

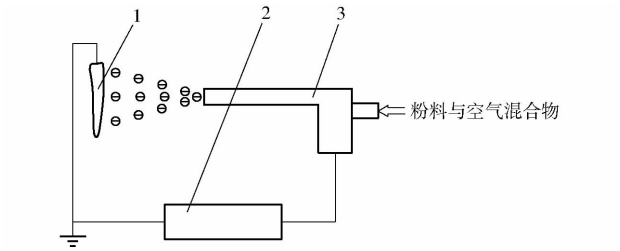


图 2 鱿鱼足静电裹粉装置原理图

Fig. 2 Schematic diagram of electrostatic powder coating of squid tentacles

1. 鱿鱼足 2. 高压静电发生器 3. 喷粉枪

2.2 裹粉装置设计

静电裹粉试验装置实物如图 3 所示。喷粉箱由厚度为 5 mm 的透明有机玻璃板制成;两支静电喷粉枪分别安装在喷粉箱的两侧;高压静电装置电压

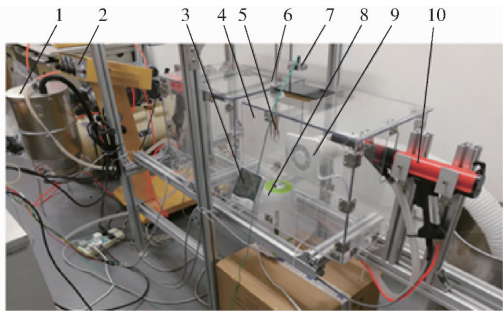


图 3 静电裹粉试验装置

Fig. 3 Experimental setup for electrostatic powder coating of squid tentacles

1. 粉桶及气力供粉系统 2. 高压静电装置 3. 湿度计 4. 喷粉箱 5. 鱿鱼足 6. 鱿鱼足插持装置 7. 鱿鱼足接地装置 8. 加湿器 9. 通风装置 10. 喷粉枪

在 0 ~ 100 kV 范围可调;鱿鱼足插持装置安装在喷粉箱顶部,其下端伸入喷粉箱,底部装有 3 根插针,作用是从足根沿纵向插入,对鱿鱼足进行插持和固定、保持相邻足间分开以便裹粉,针长 110 mm、间距 12 mm;通风装置由排气风扇和管道组成,作用是降低喷粉箱内粉尘浓度,防范粉尘爆炸事故^[20-21]、保证试验安全;加湿器配合除湿机调节喷粉箱内的相对湿度,使之处于某一范围。试验使用的空气压缩机购自浙江台州奥突斯工贸有限公司,型号为 OTS - 750X3,功率 2.25 kW,气罐容积 60 L。

3 静电裹粉影响因素分析

鱿鱼足静电裹粉的影响因素包括粉料的含水率和带电能力、鱿鱼足表面水分、相对湿度和静电电压。粉料含水率大会导致粉料电阻率降低、带电荷能力下降^[22],通过试验测定粉料含水率为 3.07%,由于生产厂家提供的粉料,不同批次含水率差异不大,因此在试验中可视为恒定因素;使用宁波瑞柯仪器设备有限公司生产的 FT - 303B 型体积电阻率测试仪测得粉料的体积电阻率为 362.1 GΩ·mm,该数值表明该粉料具备中等带电能力,适合静电裹粉。经试验测定,鱿鱼足表面水膜平均厚度约为 0.12 mm,在鱿鱼足表面粉层形成初期,鱿鱼足表面水分将附着在鱿鱼足表面的粉料润湿,形成湿粉层,但对之后形成的干粉层没有影响。由于静电对空气湿度比较敏感^[23],故将相对湿度作为主要试验因素之一。

4 静电裹粉装置参数优化试验方法

根据静电裹粉影响因素分析,将相对湿度^[24]和静电电压^[25-26]作为静电裹粉装置的两个主要工作参数。

试验包括静电裹粉试验和附着效果测试两部

分。两个试验密切配合,按时间顺序先后进行。每完成一次某一相对湿度和静电电压下的裹粉试验,即对完成裹粉的鱿鱼足进行附着效果测试试验。通过试验,进行不同相对湿度和静电电压下裹粉速度、裹粉量和粉料在鱿鱼足表面附着效果的对比分析,实现对静电裹粉装置相对湿度和静电电压两个主要工作参数的优化。

4.1 静电裹粉试验方法

静电裹粉试验时,喷粉箱内相对湿度取值 40%、60%、80%,偏差 ± 5%;静电电压取值 0、30、60、90 kV。

试验时喷粉枪枪口与鱿鱼足距离 200 mm;喷粉气压 7×10^4 Pa,气流速度 2.5 m/s。为防止气流干扰,影响测试结果,试验时由定时器控制两侧喷粉枪交替工作,各自喷粉 0.5 s,然后取出鱿鱼足及插持装置,用电子天平称量,记录鱿鱼足表面粉层质量的变化,裹粉时长记为 0.5 s。根据人工裹粉统计结果,每只鱿鱼足平均裹上的粉量为 2.23 g。综合考虑,将鱿鱼足裹粉总时长设定为 4.5 s,即每完成一次裹粉试验,两侧喷粉枪交替喷粉 9 次。

4.2 粉料附着效果测试原理与方法

测试装置的工作原理是:将完成裹粉的鱿鱼足固定在转轴上,利用转轴旋转产生的离心力使粉料从鱿鱼足上脱落。离心转速越高,则离心力越大、脱落的粉料越多。通过对鱿鱼足表面剩余粉料的质量分数(质量剩余率)进行分析,可评价该裹粉条件下鱿鱼足表面粉料的整体附着效果;对不同相对湿度和静电电压下完成裹粉的鱿鱼足进行离心测试,比较同一离心转速下粉料质量剩余率的差异,可分析出不同裹粉条件下附着效果的差别。

将粉料颗粒视为理想球体^[27],综合考虑粉料的粒度分布、粉体密度、离心装置的结构参数、粉粒间附着力^[28]等因素,针对质量分数为 30% ~ 40% 的粉料大颗粒的分离进行计算并取整,得离心转速为 1 000 r/min;以 $\sqrt{2}$ 为比例系数,应用等比级数法进行计算,再计算 2 个离心转速并取整,结果分别为 700 r/min 和 1 400 r/min。

离心试验装置结构如图 4 所示。装置主要由插持装置、法兰盘、伺服电机总成、套筒、端盖、固定板,以及控制电机运转的伺服电机驱动器和开关等元件组成。伺服电机为无锡创正科技有限公司生产的 AMS40 - M00130Z 型伺服电机。该电机额定功率 0.1 kW,额定转速 3 000 r/min。伺服电机壳体通过法兰盘和固定板固定在试验台上;内径为 85 mm 的透明有机玻璃套筒,套装在法兰盘的外圆柱面上,与套筒另一侧的端盖一起组成密闭的圆柱形空间。

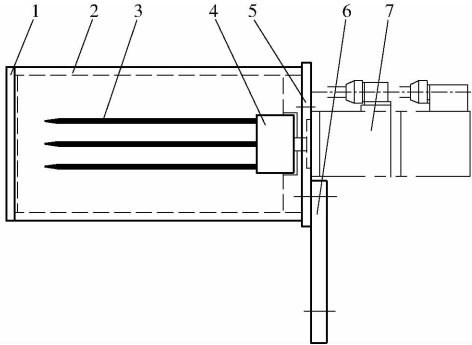


图 4 离心式附着力测试装置

Fig. 4 Centrifugal device for adhesive force test

- 1.端盖 2.套筒 3.插针 4.插持装置 5.法兰盘 6.固定板
7.伺服电机

进行离心试验时,首先将完成裹粉的鱿鱼足连同插持装置一起固定在电机轴上,电机轴旋转时,鱿鱼足上分离的粉末落入有机玻璃管中。通过对管中的粉料进行收集和称量,可计算出鱿鱼足表面的粉料质量剩余率。

在附着效果测试时,按照 700、1 000、1 400 r/min 的转速依次进行 3 次离心试验,分别计算每次离心试验后鱿鱼足表面的裹粉质量剩余率。

每次附着试验结束后将鱿鱼足表面附着的粉末清洗干净,重新将鱿鱼足和插持装置装回静电裹粉装置中。调节相对湿度和静电电压,进行下一次裹粉试验和附着效果测试试验。如此循环,直至完成所有相对湿度和静电电压下的试验为止。

5 试验结果与装置参数的优化分析

5.1 裹粉效果

鱿鱼足静电裹粉效果如图 5 所示。从外观看,手工裹粉与非静电裹粉、静电裹粉存在明显差别。手工裹粉时鱿鱼足表面存在漏裹并且粉层分布不均匀;非静电裹粉均匀性有改善,但相邻足间缝隙并没有很好地裹上粉,存在漏裹情况;静电裹粉形成的裹粉层比较均匀,吸盘和相邻足间缝隙里也裹上了粉。

5.2 表面粉层质量

以鱿鱼足表面粉层质量为纵坐标、时间为横坐标

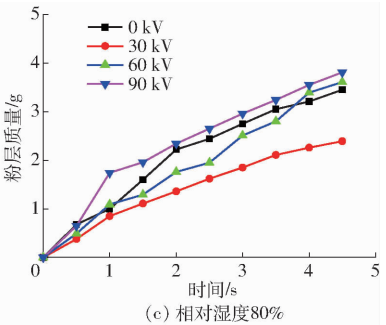
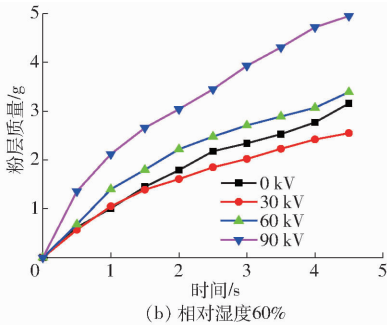
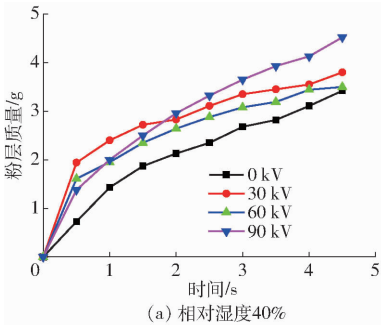


图 6 不同相对湿度、静电电压下粉层质量的变化

Fig. 6 Changes of coating mass under different voltages and relative humidities

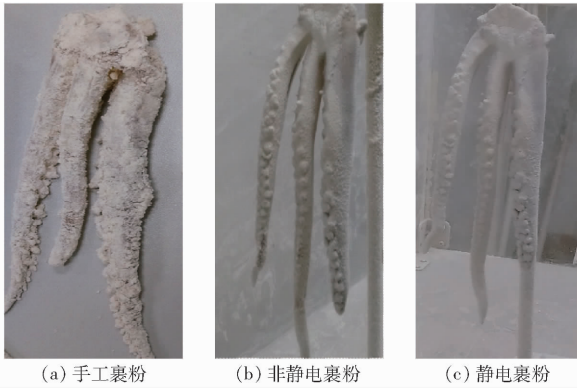


图 5 鱿鱼足不同裹粉方式的裹粉效果对比

Fig. 5 Comparison of effects with different coating methods

标,将同一相对湿度、不同静电电压下粉层质量变化折线画在同一个坐标图上,结果如图 6 所示。

为方便分析试验结果,以某一时间点鱿鱼足表面已经裹上的粉料质量来衡量相同裹粉时间内、不同裹粉条件下鱿鱼足表面粉层质量增加的速度,称为裹粉速度。图 6a 表明,在湿度较低时(相对湿度 40% 左右),与非静电裹粉(0 kV)相比,采取高压静电裹粉可有效提高裹粉速度和裹粉量;在中等湿度(相对湿度 60% 左右)、中高电压(60 kV 以上)条件下裹粉,裹粉速度快、鱿鱼足裹上的粉量大,裹粉效率高,大约 2~2.5 s 即可完成一只鱿鱼足的裹粉,即使之达到人工作业时的裹粉量;图 6b 表明,在 90 kV、相对湿度 60% 时 1.5 s 即可完成鱿鱼足裹粉 2.50 g,超过了人工裹粉时鱿鱼足的平均裹粉量;图 6c 表明,大湿度(相对湿度 80%)时,不同静电电压下的裹粉速度和裹粉量比较接近,说明湿度对裹粉效率影响大,在很大程度上抵消了高压静电的作用^[29]。

5.3 表面粉层质量增量

根据静电裹粉试验获得的数据,计算出每个 0.5 s 时段内粉层质量的增量。以鱿鱼足表面粉层质量增量为纵坐标、时间为横坐标,将同一相对湿度、不同静电电压下粉层质量增量变化折线画在同一个坐标图上,结果如图 7 所示。

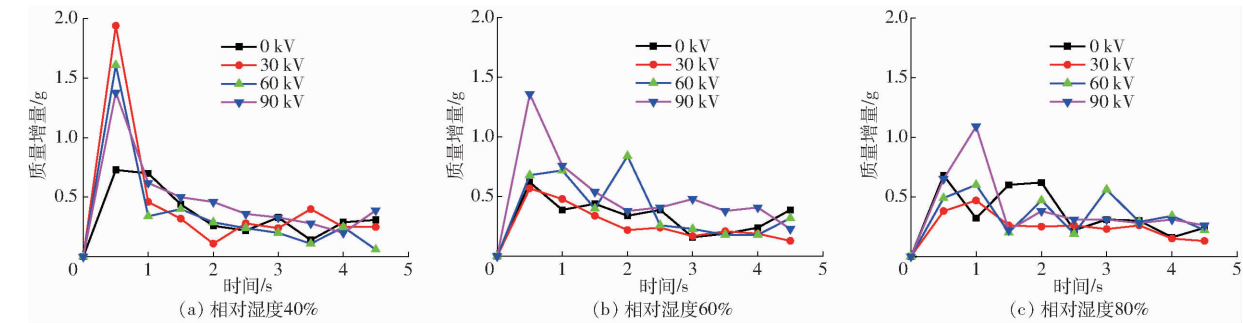


图 7 不同相对湿度、静电电压下粉层质量增量的变化

Fig. 7 Increase of coating mass under different relative humidities and voltages

图 7 表明:0 ~ 1 s 的时间段内鱿鱼足表面粉层质量增量最大,随后粉层质量增量呈下降趋势;在湿度较低(相对湿度 40%)时,静电裹粉时粉层质量增量在 0.5 s 内达到峰值;随着湿度的增加,粉层质量增量的峰值向后推移;图 7a、7b 表明,在中低湿度(相对湿度 60% 以下)时进行高电压裹粉时,粉层的质量增量始终处于较高的数值。这说明,中低湿度

条件下,高电压进行静电裹粉效率较高。

5.4 表面粉层质量剩余率

以粉层质量剩余率为纵坐标、离心转速为横坐标,将 3 条同一相对湿度、不同静电电压下剩余率折线画在同一个坐标图上,结果如图 8 所示。

由图 8 可知,在离心转速为 1 000 r/min 时,除图 8a 中的 60 kV 和 90 kV 质量剩余率折线外,其余

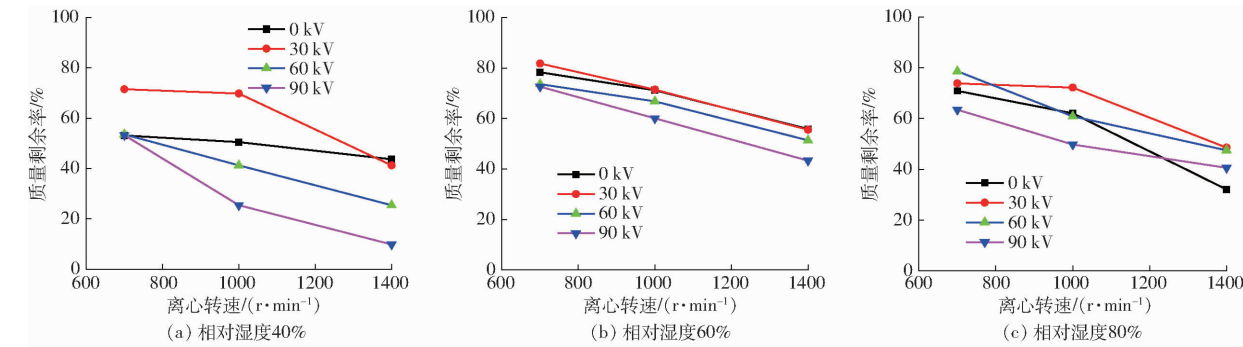


图 8 离心试验粉层质量剩余率

Fig. 8 Percentage of coating mass residual in centrifugal test

折线粉料剩余率均在 50% ~ 75%,即粉料分离百分比为 25% ~ 50%。这与离心转速为 1 000 r/min 时去除 200 μm 的大颗粒基本吻合,说明离心转速的确定比较合理。

图 8 表明,在不同湿度下,30 kV 质量剩余率折线始终处于高位,说明采用较低静电电压裹粉,粉料附着效果较好;在相对湿度为 60% 时,不同裹粉电压下测定的粉料剩余率非常接近,说明在中等湿度下附着效果接近;90 kV 的折线始终处于低位,说明高电压下附着效果并未提高,剩余率也与上粉量大、离心测试时分离的粉料较多有关。

6 结论

(1)采用静电技术裹粉,得到的鱿鱼足裹粉层

分布均匀,有效避免了吸盘和相邻足间缝隙的漏裹。静电裹粉方法可行,能够解决人工裹粉的不足和现有裹粉设备无法满足鱿鱼足裹粉的问题。

(2)采用中低湿度、中高电压进行裹粉,可在 2 ~ 2.5 s 内完成一只鱿鱼足的裹粉作业。采取多套静电裹粉装置并行作业,可大大提高鱿鱼足裹粉作业的效率,降低生产成本。

(3)根据喷粉箱内湿度选择合理的电压,可在 0 ~ 1 s 获得最大的粉层质量增量,提高鱿鱼足裹粉作业的效率。

(4)采取中低电压、中等湿度进行裹粉,粉料的附着效果较好。

参 考 文 献

1 方淑贞,童国忠,丁伟璐,等. 秘鲁鱿鱼冷冻调理食品加工工艺的研究[J]. 食品工业,2014,35(5):12-16.
FANG Shuzhen,TONG Guozhong,DING Weilu,et al. Study on processing technology of *Dosidius gigas* frozen prepared food[J]. The Food Industry,2014,35(5):12-16. (in Chinese)
2 傅泽田,邢少华,张小栓. 食品质量安全可追溯关键技术发展研究[J/OL]. 农业机械学报,2013,44(7):144-153. <http://>

- www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20130725&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.07.025.
- FU Zetian, XING Shaohua, ZHANG Xiaoshuan. Development trend of food quality safety traceability technology [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(7): 144 – 153. (in Chinese)
- 3 杨信廷, 钱建平, 孙传恒等. 农产品及食品质量安全追溯系统关键技术研究进展[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(11): 212 – 222. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20141133&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.11.033.
- YANG Xinting, QIAN Jianping, SUN Chuanheng, et al. Key technologies for establishment agricultural products and food quality safety traceability systems[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(11): 212 – 222. (in Chinese)
- 4 VOULODIMOS A S, PATRIKAKIS C Z, SIDERIDIS A B, et al. A complete farm management system based on animal identification using RFID technology[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2010, 70(2): 380 – 388.
- 5 THAKUR M, HURBURGH C R. Framework for implementing trace ability system in the bulk grain supply chain[J]. Journal of Food Engineering, 2009, 95(4): 617 – 626.
- 6 孙大明, 赵德春, 金德海, 等. 裹糊撒粉设备的现状及改进构想[J]. 农机化研究, 2008, 30(8): 117 – 118.
- SUN Daming, ZHAO Dechun, JIN Dehai, et al. The present situation and improvement idea of the powder coating equipment[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2008, 30(8): 117 – 118. (in Chinese)
- 7 高全杰, 夏志勇, 汪朝晖, 等. 多针电极喷雾刀梁静电场特性与雾化效果研究[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(4): 110 – 116. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20140417&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.04.017.
- GAO Quanjie, XIA Zhiyong, WANG Zhaohui, et al. Electrostatic field and atomization effect of multiple needle electrodes spraying blade[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(4): 110 – 116. (in Chinese)
- 8 叶春苗. 高压静电场保鲜技术原理及应用现状研究[J]. 农业科技与装备, 2016(8): 58 – 59.
- YE Chunmiao. Research on principle and application status of high-voltage electrostatic field preservation technology [J]. Agricultural Science & Technology and Equipment, 2016(8): 58 – 59. (in Chinese)
- 9 李锦, 谢如鹤, 刘广海, 等. 多温冷藏车降温特性及其影响参数研究[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(2): 128 – 135. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20130225&flag = 1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.02.025.
- LI Jin, XIE Ruhe, LIU Guanghai, et al. Cooling characteristics and influence parameters of multi-temperature refrigerated truck[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(2): 128 – 135. (in Chinese)
- 10 唐梦, 岑剑伟, 李来好, 等. 高压静电场解冻技术在食品中的研究进展[J]. 食品工业科技, 2016, 37(10): 373 – 375.
- TANG Meng, CEN Jianwei, LI Laihao, et al. Research progress of high voltage electrostatic field thawing technology in food[J]. Science and Technology of Food Industry, 2016, 37(10): 373 – 375. (in Chinese)
- 11 李侠, 钱书意, 杨方威, 等. 低压静电场下不同隔距冻结-解冻对牛肉品质的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(8): 278 – 285.
- LI Xia, QIAN Shuyi, YANG Fangwei, et al. Effects of different gauges under low voltage electrostatic field assisting thawing-freezing on beef quality[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(8): 278 – 285. (in Chinese)
- 12 孙芳, 李培龙, 孟繁博, 等. 高压静电解冻技术对牛肉品质的影响研究[J]. 中国牛业科学, 2011, 37(6): 13 – 17.
- SUN Fang, LI Peilong, MENG Fanbo, et al. Effect of high-voltage electrostatic field thawing beef on beef quality[J]. China Cattle Science, 2011, 37(6): 13 – 17. (in Chinese)
- 13 郭衍银, 朱艳红, 赵向东, 等. 高压静电对速冻冬枣解冻品质的影响[J]. 制冷学报, 2009, 30(2): 45 – 48.
- GUO Yanyin, ZHU Yanhong, ZHAO Xiangdong, et al. Effect of high voltage electrostatic field on quality of thawing “Dongzao” jujube[J]. Journal of Refrigeration, 2009, 30(2): 45 – 48. (in Chinese)
- 14 HALIM F, BARRINGER S A. Electrostatic adhesion in food [J]. Journal of Electrostatics, 2006, 65(3): 168 – 173.
- 15 TAKEUCHI M. Adhesion forces of charged particles [J]. Chemical Engineering Science, 2010, 61(7): 2279 – 2289.
- 16 HUANG Y, BARRINGER S A. Adhesion of food powders with nonelectrostatic and electrostatic coating [J]. Journal of Food Process Engineering, 2012, 35(2): 264 – 277.
- 17 毛雪飞, 齐悦涵, 王世光, 等. 介质阻挡放电在农业领域的应用研究进展[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(4): 216 – 227. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20160429&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.04.029.
- MAO Xuefei, QI Yuehan, WANG Shiguang, et al. Review for application of dielectric barrier discharge in agriculture[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(4): 216 – 227. (in Chinese)
- 18 陆家榆, 何堃, 马晓倩, 等. 空中颗粒物对直流电晕放电影响研究现状: 颗粒物空间电荷效应[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(23): 6222 – 6234.
- LU Jiayu, HE Kun, MA Xiaoqian, et al. Current status of study on the effects of airborne particles on DC corona discharge: space-charge effect of particles[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(23): 6222 – 6234. (in Chinese)
- 19 王贞涛, 张永辉, AMALENDU Sau, 等. 双毛细管静电雾化电场特性研究[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(12): 62 – 69.

- http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161209&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.12.009.
- WANG Zhentao,ZHANG Yonghui,AMALENDU Sau,et al. Characteristics of electro-field in electro-hydrodynamics atomization with double capillary[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(12):62-69. (in Chinese)
- 20 胡樱馨,胡双启. 面粉最低着火温度的研究[J]. 粮食与油脂,2016(1):33-35.
HU Yingxin,HU Shuangqi. Study on minimum ignition temperature of wheat flour powder[J]. Cereals & Oils,2016(1):33-35. (in Chinese)
- 21 庞磊,马冉,高建村,等. 粉尘云最低着火温度的粒径尺度效应[J]. 中国粉体技术,2017,23(1):68-70.
PANG Lei,MA Ran,GAO Jiancun,et al. Effect of particle size on minimum ignition temperature of dust cloud[J]. China Powder Science and Technology,2017,23(1):68-70. (in Chinese)
- 22 文松林,崔岳峰,张书第. 静电粉末喷涂中粉末涂料受潮后的影响[J]. 沈阳工业学院学报,2002,21(1):92-94.
WEN Songlin,CUI Yuefeng,ZHANG Shudi. Influence on performance of moistening powder painting in electrostatic powder spray[J]. Journal of Shenyang Institute of Technology,2002,21(1):92-94. (in Chinese)
- 23 XU Y,BARRINGER S A. Effect of relative humidity on coating efficiency in nonelectrostatic and electrostatic coating[J]. Journal of Food Science,2008,73(6):E298-E302.
- 24 丁昌江,杨茂生. 直流高压电场中枸杞的干燥特性与数学模型研究[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(6):302-311. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170640&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.06.040.
DING Changjiang,YANG Maosheng. Drying characteristics and mathematical models of Chinese wolfberry in DC high voltage electric field[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(6):302-311. (in Chinese)
- 25 李美清,吴沿友,李青林. 高压静电场对水培番茄生理指标与产量的影响[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(11):145-150. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20151120&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.11.020.
LI Meiqing,WU Yanyou,LI Qinglin. Influence of high voltage electrostatic field on physiological indexes and yield of hydroponic tomato[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(11):145-150. (in Chinese)
- 26 张京,宫帅,宋坚利,等. 气液两相感应式静电喷头性能试验[J]. 农业机械学报,2011,42(12):107-110,120.
ZHANG Jing,GONG Shuai,SONG Jianli,et al. Performance of two-phase gas-liquid electrostatic induction nozzle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2011,42(12):107-110,120. (in Chinese)
- 27 张西良,张建,李萍萍,等. 粉体物料流动性仿真分析[J]. 农业机械学报,2008,39(8):196-198.
ZHANG Xiliang,ZHANG Jian,LI Pingping,et al. Liquidity simulation of powder material[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2008,39(8):196-198. (in Chinese)
- 28 TAKEUCHI M. Adhesion forces of charged particles[J]. Chemical Engineering Science,2006,61(7):2287-2288.
- 29 张雪峰,杨正大,李响,等. SO₃对高湿静电场中电晕放电的影响机制研究[J]. 中国环境科学,2017,37(9):3268-3275.
ZHANG Xuefeng,YANG Zhengda,LI Xiang,et al. Effect of SO₃ on corona discharge in high humidity electrostatic field[J]. China Environmental Science,2017,37(9):3268-3275. (in Chinese)