

高压脉冲电场同轴处理室的仿真优化

Simulation and optimization on coaxial treatment chamber for pulsed electric field

姚文龙¹ 平雪良¹ 胡大华¹ 蒋毅²

YAO Wen-long¹ PING Xue-liang¹ HU Da-hua¹ JIANG Yi²

(1. 江南大学机械工程学院, 江苏 无锡 214122; 2. 江苏食品先进制造装备技术重点实验室, 江苏 无锡 214122)

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangnan 214122, China;

2. Jiangsu Key Laboratory of Food Manufacturing Equipment and Technology, Wuxi, Jiangnan 214122, China)

摘要: 高压脉冲电场杀菌技术是一种新型非热杀菌技术, 处理室用来装载待处理物料并在处理室内直接施加脉冲电场。针对自主设计的一种电极间距可调、处理室内腔体可更换的新型中试规模的同轴处理室, 使用 COMSOL 软件建立脉冲电场杀菌系统三场耦合的数学模型模拟处理室内的电场强度、流料特性及温度分布, 为同轴处理室的结构优化提供依据。仿真结果表明正电极内圆边缘处的电场强度不均匀, 对正电极倒圆角后的处理室更为适用。

关键词: 脉冲电场; 同轴处理室; COMSOL Multiphysics 软件; 仿真

Abstract: PEF sterilization technology is a novel non-thermal sterilization technique, the processing chamber is applied directly, for loading the material to be processed in a processing chamber and pulsed electric field. A paper designed pilot scale electrode spacing is adjustable, replaceable processing chamber cavity coaxially novel process chamber, the system established by pulsed electric fields coupled three COMSOL software mathematical model of the electric field intensity of the processing chamber, the material flow characteristics and temperature distribution, provide the basis for structural optimization coaxial treatment chamber. Simulation results show that non-uniform electric field strength at the edge of the inner circle of the positive electrode, the positive electrode treatment chamber after rounding is more applicable.

Keywords: pulsed electric field; coaxial treatment chamber; COMSOL multiphysics; simulation

高压脉冲电场(pulsed electric fields, PEF)杀菌技术是一种新型的非热杀菌技术。PEF 杀菌系统主要由高压脉冲发生器和杀菌处理室两部分组成, 杀菌处理室一般由金属高

压电极、接地电极以及装载金属电极的绝缘体材料构成。根据电极的安放形式可分为平板式、同轴式和共场式 3 种^[1]。由于同轴处理室既能够对液体物料做循环处理, 又能够保证工业规模的流通量, 具有广泛的应用前景。

前期研究者的设计主要保证处理室内的电场强度分布均匀, 每个处理室腔体结构设置为单一不可调形式, 不能满足不同物料的流体特性并且电极的腐蚀会直接导致处理室的失效。为解决这些问题, 国外的一些学者^[2]对同轴式处理室的结构进行了改进, 在保证电场分布均匀的情况下改进了处理室的流体特性, 也有一些学者^[3]通过耦合场分析对处理室进行仿真以改进处理室的结构, 但这些仿真多是针对较为常见的共场处理室。中国对于同轴处理室的仿真也越来越重视, 如方婷^[4]利用 ANSYS 软件对不同结构的同芯轴处理室进行了场强分析; 解效白等^[5]利用 Maxwell 对同轴式处理室的场强分布情况进行仿真, 并根据仿真结果对设计尺寸进行改进。处理室的设计主要通过调节流速使物料混合均匀, 但是设计过程中没有考虑电场和温度场对杀菌效果的影响。课题组通过对实验室规模连续处理设备相关参数的计算, 研制出一种新型的同轴杀菌处理室。由于处理室的杀菌效果是电场、流场和温度场共同作用的结果, 单一因素仿真对处理室的结构优化很不利。

COMSOL Multiphysics 是一款大型的高级数值仿真软件, 它根据不同的物理现象开发出基于有限元分析的各种模块, 直接调用这些预定义模块可模拟出各种物理现象, 用户也可以输入自己的偏微分方程并定义各物理场之间的相互关系, 使仿真结果更接近于真实物理现象。由于它具有仿真准确且易于扩展的特性, 故广泛应用于力学、电磁学、化学、热学等相关领域。本研究基于江南大学研制的中试规模 PEF 杀菌系统, 利用 COMSOL Multiphysics 对新研制同轴

作者简介: 姚文龙(1989—), 男, 江南大学在读硕士研究生。

E-mail: jsyaowenlong@126.com

通讯作者: 平雪良

收稿日期: 2015-01-12

处理室内的电场强度分布、流体流动情况以及温度分布进行综合分析,依据分析结果获得优化的改进方案,保证处理室能够满足 PEF 系统杀菌需求。

1 同轴处理室介绍

处理室结构及参数的变化会对处理室内耦合场的分布产生很大的影响。在高压脉冲电场杀菌过程中,电场强度是影响杀菌效果的第一因素,处理不同的微生物菌种所需的电场强度也不相同^[6]。

同轴处理室由外周呈圆环状的高压电极以及位于圆环中心呈圆柱状的接地电极组成。处理区域呈现电场的放射状分布,从外部的高压电极向内部的低压电极电场强度逐渐减小^[7]。同轴电极处理室的电极之间任意点(r)的电场强度定义如式(1):

$$E=\frac{U}{r\ln(r_{HV}/r_{LV})} \tag{1}$$

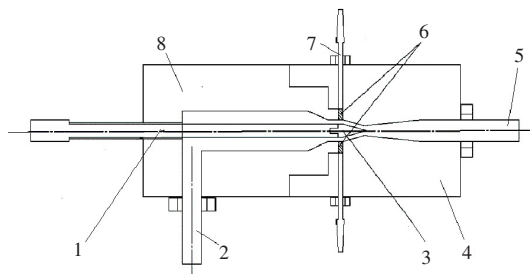
式中:

U ——电源电压,kV;

r_{HV} ——高压电极内圆半径,mm;

r_{LV} ——接地电极内圆半径,mm。

当电极距离不变时,增加金属电极的半径,处理室的处理体积增大,两个电极表面的电场强度差变小;当电极间距增大时,处理区域的电场强度减小。因此,为满足不同情况下的需求,自主设计的同轴处理室采用了可替换电极片的结构,其电极间距为 2,3,4,5 mm。同轴处理室的整体方案见图 1。处理室由左右两绝缘体通过螺纹连接而成,食品物料经过左管道 2 流入处理区域,在高压电场处理后从右侧的管道流出。接地电极调节杆可控制食品物料流量的大小,电极间距是通过电极环的直径来调节的。



1. 接地电极调节杆 2. 物料入口 3. 接地电极 4. 绝缘体
5. 物料出口 6. 高压电极 7. 高压电极插件 8. 绝缘体

图 1 同轴杀菌处理室结构图

Figure 1 Drawing of coaxial sterilization treatment chamber

2 仿真实验与数值方法

同轴处理室的物料流动部分为部分对称结构,为了反映出进料口的物料流动情况,采用同轴处理室的三维结构进行仿真。整个处理区域主要包括正负电极以及可更换的不同形状的绝缘体。仿真模型由 Proe 软件创建后导入 COM-SOL,图 2 为同轴处理室结构图。

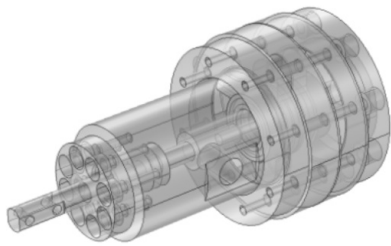


图 2 Comsol 中的同轴处理室结构图

Figure 2 The structures of coaxial treatment chamber in Comsol

2.1 控制方程与边界条件

在 PEF 处理过程中,流经处理室的电能与流体动能相互转换,涉及到的能量变化过程可以通过 COMSOL 的偏微分方程进行仿真求解。物理场耦合时相关的偏微分控制方程有动量、能量与电荷守恒方程以及流体的连续性方程^[8,9]。

2.1.1 电场 PEF 系统的处理室正负电极上存在电荷的转移过程,电荷的多少与电势大小及物料传递过程中的电流密度有关,电场的控制方程为:

$$\nabla \cdot [\sigma(T) \cdot \nabla \cdot V - J] = 0 \tag{2}$$

式中:

V ——电势,V;

$\sigma(T)$ ——温度变化条件下的电导率,S/m;

J ——电流密度,A/m²。

计算过程中忽略电场对磁场变化的影响,电势值直接决定电场强度的范围:

$$E = -\nabla V \tag{3}$$

式中:

E ——电场强度,V/m。

2.1.2 流场 处理室中物料的流动必然涉及流体连续性方程,电流流过食品物料产生电阻热使得物料的温度升高,温升对食品物料的物理属性特别是电导率的影响很大,在表述流体控制方程时应考虑温度、压力等参数的影响:

$$\frac{\partial \rho(p,T)}{\partial t} + \nabla \cdot [\rho(p,T) \vec{v}] = 0 \tag{4}$$

式中:

$\vec{v}$ ——瞬时流速,m/s;

t ——时间,s;

T ——温度,K;

p ——压力,Pa;

ρ ——食品物料密度,是压力与温度的函数,kg/m³。

同轴处理室的处理量可以满足实验室规模或中试规模的要求,为了判断处理室中的流体流动状态,选择合适的动量守恒方程,假设控制蠕动泵流量恰好为 70 L/h(中试规模的最低流量),依据雷诺数分析式(5):

$$Re = \rho v d / \eta \tag{5}$$

式中:

Re ——雷诺数；
 d ——管道直径,m；
 η ——液体物料黏度,Pa·s。
根据处理量计算,物料从塑料管进入处理室时流速 $v=0.4\text{ m/s}$,管道内径 $d=3\text{ mm}$,得出 $Re=2\ 919$,超过层流与湍流的分界雷诺数 2 000,所以处理室中的流体状态为湍流,湍流的动量守恒方程:

$$\rho[\frac{\partial \vec{v}}{\partial t}+(\vec{v}\cdot\nabla)\vec{v}]=-\nabla P+\nabla\cdot[\eta(T)(\Delta\vec{v}+(\Delta\vec{v})^T)]+\rho g$$

式中:
 P ——压强,Pa;
 g ——重力加速度,m/s²。

2.1.3 温度场 PEF 杀菌的过程就是一个能量转换的过程,脉冲电场产生的能量一部分用于杀菌,使微生物死亡,还有一部分能量被液体物料吸收形成电阻热,引起温度的升高,温升的高低与热导率、常压热容及电场强度均有关,相关的能量守恒方程为:

$$\rho(P,T)C_p(T)(\frac{\partial T}{\partial t}+\vec{v}\cdot\nabla T)=Q+\nabla\cdot[(k_1+k_T)\cdot\nabla T]$$

式中:
 $C_p(T)$ ——常压热容,是温度的函数,J/K;
 k_T ——热导率,也是温度的函数,W/(m·K);
 Q ——热源,J。
其中热源 Q 能用电导率与电场强度的函数表示:
 $Q=\sigma(T)\cdot E^2$

在求解物理场过程中,不仅涉及到一系列的偏微分控制方程,每种物理场在定义过程中还有众多边界条件需要设置。电场边界条件包括正电极和负电极,正电极需设置电势为 $1\times10^4\text{ V}$,负电极需设置为接地(0 V);流场边界条件包括流体入口和流体出口,流体入口处需设置流速 v_0 为 0.4 m/s ,流体出口需设置压强 P_0 为 $1.01\times10^5\text{ Pa}$;温度场边界条件包括流体入口和流体出口,流体入口需设置初始温度 T_0 为 298.15 K ,流体出口需设置为对流量。

2.2 材料属性与参数设置

2.2.1 材料属性 同轴处理室中的正负电极采用的均为 316 L 不锈钢[电阻率为 $0.71\ \Omega\cdot\text{mm}^2/\text{m}$, $\rho=7.87\text{ g/cm}^3$, $Cp=475\text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$],绝缘板的材料是聚四氟乙烯[$\rho=2.2\text{ g/cm}^3$, $Cp=1\ 050\text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$],物料采用浓度较低的 0.1%的 NaCl 溶液,除电导率与溶液浓度关系较大,其他物理属性如溶液的密度、黏度等均与水类似,在对流体部分进行参数设置时,使用指定电导率的水来代替 NaCl 溶液。电导率的大小不仅取决于溶液浓度的高低,温度的升高同样易引起电导率的变化,由温度变化计算电导率的公式:

$$\sigma(T)=\frac{\sigma(T_0)}{1+\alpha(T-T_0)}$$

式(9)中,温度的设置采用绝对温度,初始温度 $T_0=20\text{ }^\circ\text{C}$,即 298.15 K ,此时 0.1%的 NaCl 溶液的电导率 $\sigma(298.15)=0.24\text{ S/m}$,温度系数 $\alpha=0.002\ 14\text{ K}^{-1}$ 。

2.2.2 参数设置 仿真分析时,系统的主要参数设置(电流、波形、脉宽与频率)是依据目前中试规模系统常用试验参数确定,见表 1。

表 1 脉冲电场系统参数
Table 1 Parameters of pulsed electric field system

电源系统				同轴处理室			
电压/V	波形	脉宽/ μs	频率/Hz	流体速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	温度/ $^\circ\text{C}$	电极间距/mm	直径/mm
1×10^4	矩形波	2.5	440	0.4	20	3	6

2.3 网格划分与求解

模型的材料属性及系统的参数设置完成后,需要根据 COMSOL 软件中的网格划分工具将整个三维模型以自有四面体分式划分较细化的网格。求解器设定为稳态求解,对 3 种物理场进行耦合求解。

3 仿真分析与优化

网格划分后的模型经过 COMSOL Multiphysics 的求解之后,得出 PEF 系统工作过程三维仿真图,仿真结果分别显示同轴处理室内腔体的电场分布,以及 NaCl 溶液流经处理室时的流体和温度特性分布。

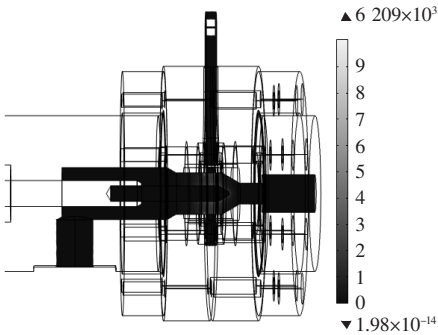
3.1 电场分布

根据计算公式 $E=V/d$ (电压 V 为 10 kV ,电极间距 d

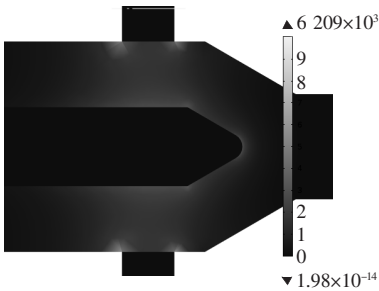
为 0.3 cm)计算得到杀菌处理室内理论的电场强值为 33.3 kV/cm 。在表示同轴处理室电场强度时,研究选择 xy 切面分布图进行分析。

由图 3 可知,处理区域内的电场强度基本呈现对称分布并且是从高压电极向接地电极递减的趋势,平均电场强度与理论值基本一致。从图 3(b)来看,在正电极内圆附近存在着尖峰电场,最高电压达到 62.09 kV/cm 。脉冲电场达到 $20\sim35\text{ kV/cm}$ 时具有明显杀菌效果,随着施加在处理室两端的电压逐渐增加,电场强度会逐渐提高,杀菌效果的提升不明显,但过高的电场强度会引起杀菌处理室放电现象,损坏 PEF 系统^[10]。因此在设计过程中需要对正电极内圆进行倒角。对同轴处理室正电极内圆进行倒圆角,倒角半径分别为 $0.2,0.5\text{ mm}$ 。

对倒角后的同轴处理室进行仿真,由图 4(a)可知,0.2 mm 倒角的处理室内最高电场强度下降为 58.8 kV/cm。由于同轴处理室本身的特性不可避免会产生尖峰电场,使用



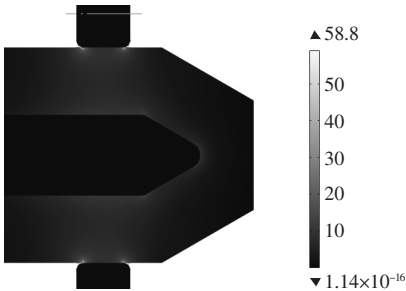
(a) xy 平面电场分布



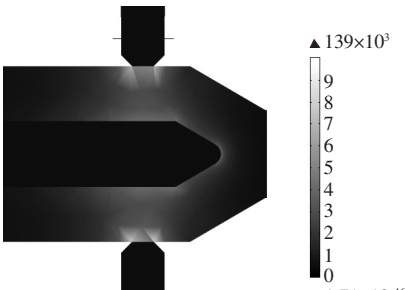
(b) 局部放大图

图 3 同轴处理室电场分布切片图

Figure 3 The slices of electric field distribution in coaxial treatment chamber



(a) 0.2 mm 倒角电场分布



(b) 0.5 mm 倒角电场分布

图 4 倒角后处理室电场分布切片图

Figure 4 The slices of electric field distribution of the slanted treatment chamber

0.2 mm 的倒角使得电场分布更为均匀,对尖峰电场起一定的缓解作用。而图 4(b) 0.5 mm 倒角的处理室内最高电场强度反而升高至 139 kV/cm。设计制造正电极时,不仅需要正电极外圆进行倒角,同时对正电极内圆与液体物料接触部分也需要进行倒圆角,为了保证电场强度的均匀性,倒角半径不宜太大。

3.2 流场分布

流体特性直接决定待处理物料在处理腔中滞留并接受处理的时间。流速过快会导致杀菌效果达不到要求,流速过慢会引起较高的温升,从而影响杀菌效果。为了直观地观测处理室内流场情况,利用求解的流场分布切片图进行分析。

由图 5 可知,同轴处理室中液体的流动呈现中间快,两边慢的特点,管道壁区域流速甚至接近于 0。液体物料单次流经处理室时经过了 2 次加速并改变了流动方向,第 1 次从处理室入口流进时,流向改变,液体物料第 1 次混合,但是流道拐角处结构的不可加工性带来了“处理死区”的问题;第 2 次由于流道直径减小,流料以超过 0.6 m/s 的流速通过处理区灭菌。在单次物料处理完成后,随着流道结构的改变,流料流速上升到最大值,此时食品物料可以充分地混合。因此在工业规模生产中,应该使用多个同轴处理室进行连续处理。

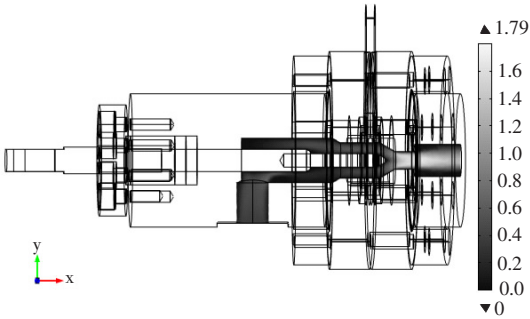


图 5 同轴处理室流场分布切片图

Figure 5 The slice of fluid field distribution in coaxial treatment chamber

3.3 温度场分布

经过高压脉冲电场的处理,液体物料流经处理室时会产生一定的温升,温度也是影响杀菌效果的重要因素。温升的大小主要与电场强度和液体的流速有关。

在对同轴处理室的仿真分析中可以看出处理室内的温升情况比较严重。处理区域的正电极处温度升高得比较快,这是由于正电极附近存在一个“处理死区”。从流速分布图 6 可以看出,该死区的液体物料的流速基本接近于 0,已经处理过的物料不能及时流走,导致液体温度不断升高。同样,在负电极杆尖端处温升情况是最严重的,流道的形状在该处有一个比较大的改变,导致尖端处液体物料无法流动,温度最高上升到 77.1 ℃,高温会对液态食品的品质产生影响。因此,液体流动速度是影响温升的最关键因素。

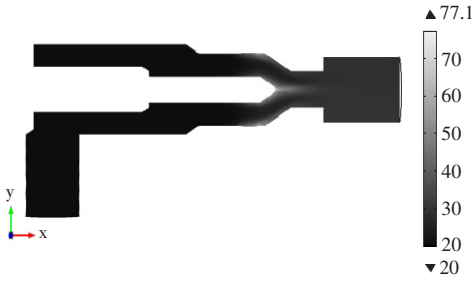


图 6 同轴处理室温度分布切片图

Figure 6 The slice of temperature distribution in the coaxial treatment chamber

4 结论

随着高压脉冲电场杀菌技术的发展,同轴处理室因处理量大的特点已成为工业规模杀菌系统的发展方向。本研究对自主设计制造的同轴处理室构建了三维模型,并利用 COMSOL 的耦合场分析功能对电场、流场及温度场进行了仿真分析。从仿真中可以看出,除了正电极内圆边缘处的电场强度不均匀以外,处理室内的其他部分电场强度比较均匀。处理室内的死区问题没有很好地解决,特别是在负电极杆的尖角处,这对杀菌效果极为不利。

结合仿真的结果,并根据试验过程中的具体问题,对增强杀菌效果,改善处理室的应用做以下建议:① 对同轴处理室的正电极内圆进行倒圆角,减小尖峰电场对 PEF 杀菌系统造成的影响,但是圆角半径不宜过大;② 在中试规模应用和工业化应用时,应将多个同轴处理室连接进行连续处理,既能保证处理时间,又能使充分混合的流体物料得到处理。

参考文献

1 平雪良,刘翠,杨瑞金,等. 高压脉冲电场静态处理室的研制[J]. 食品与生物技术学报,2010,29(2):193~196.

2 Mastwijk H C, Bartels P V. Integrated modular design of a pulsed electrical field treatment chamber: U. S. Patent 6,178,880[P]. 2001-01-30.

3 Jaeger H, Meneses N, Moritz J, et al. Model for the differentiation of temperature and electric field effects during thermal assisted PEF processing[J]. Journal of Food Engineering, 2010, 100(1): 109~118.

4 方婷. 高压脉冲电场杀菌动力学及处理室改进研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2008.

5 解效白,陈炜峰. 电磁脉冲高场强杀菌处理室的研制[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(26): 13 081~13 084.

6 孙学兵,方胜. 高压脉冲电场杀菌的工业化展望[J]. 食品与机械, 2002(1): 6~8.

7 Lindgren M, Aronsson K, Galt S, et al. Simulation of the temperature increase in pulsed electric field (PEF) continuous flow treatment chambers[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2002, 3(3): 233~245.

8 Gerlach D, Alleborn N, Baars A, et al. Numerical simulations of pulsed electric fields for food preservation: a review[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2008, 9(4): 408~417.

9 Buckow R, Schroeder S, Berres P, et al. Simulation and evaluation of pilot-scale pulsed electric field (PEF) processing[J]. Journal of Food Engineering, 2010, 101(1): 67~77.

10 金伟,平雪良,吉祥,等. 高压脉冲电场共场杀菌处理室性能仿真与试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(19): 39~47.

11 薛龙,黎静,刘木华. 利用高光谱图像技术检测梨表面碰压伤的实验研究[J]. 粮油加工, 2009(4): 136~138.

12 苏文浩,何建国,刘贵珊,等. 近红外高光谱图像技术在马铃薯外部缺陷检测中的应用[J]. 食品与机械, 2013, 29(5): 1~9.

13 薛龙,黎静,刘木华. 利用高光谱图像技术检测梨表面碰压伤的实验研究[J]. 粮油加工, 2009(4): 136~138.

14 思振华,何建国,刘贵珊,等. 基于高光谱图像技术的羊肉表面污染无损检测[J]. 食品与机械, 2013, 29(5): 75~79.

15 余克强,赵艳茹,李晓丽. 基于高光谱成像技术的鲜枣裂纹的识别研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(2): 532~537.

16 刘聪,郭康权,张强,等. 基于近红外光谱的室温贮藏下鲜枣霉菌污染动力学模型[J]. 农业工程学报, 2013, 29(1): 278~284.

17 吴龙国,何建国,刘贵珊,等. 基于近红外高光谱成像技术的长枣含水量无损检测[J]. 光电子·激光, 2014, 25(1): 135~140.

18 王斌,薛建新,张淑娟. 基于高光谱成像技术的腐烂、病害梨枣检测[J]. 农业机械学报, 2013, 44(1): 205~209.

19 徐爽,易东. 利用高光谱成像技术检测长枣表面虫伤[J]. 电子制作, 2013(21): 47~48.

20 Zhang Shu-juan, Zhang Hai-hong, Zhao Yan-ru, et al. A simple identification model for subtle bruises on the fresh jujube based on NIR spectroscopy[J]. Mathematical and Computer Modelling, 2013, 58(3~4): 545~550.

21 吴龙国,何建国,刘贵珊,等. 基于 NIR 高光谱成像技术的长枣虫眼无损检测[J]. 发光学报, 2013, 11(34): 1 527~1 532.

22 赵杰文,刘剑华,陈全胜,等. 利用高光谱图像技术检测水果轻微损伤[J]. 农业机械学报, 2008, 39(1): 106~109.

23 Lu Ren-fen. Nondestructive measurement of firmness and soluble solids content for apple fruit using hyperspectral scattering images[J]. Sens & Instrumen Food Qual, 2007(1): 19~27.

24 蔡健荣,王建黑,陈全胜,等. 波段比算法结合高光谱图像技术检测柑橘果锈[J]. 农业工程学报, 2009, 25(1): 127~131.

25 Green A A, Berman M, Switzer P, et al. A transformation for ordering multispectral data in terms of image quality with implications for noise removal[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1988, 26(1): 65~74.

26 肖雄斌,厉小润,赵辽英. 基于最小噪声分离变换的高光谱异常检测方法研究[J]. 计算机应用于软件, 2012, 29(4): 125~128.

27 赵杰文,陈全胜,林颖,等. 现代成像技术及其在食品、农产品检测中的应用[M]. 北京:机械工业出版社, 2010: 72~74.

(上接第 65 页)

7 Qin Jian-wei, Thomas F B, Mark A R, et al. Detection of citrus canker using hyperspectral reflectance imaging with spectral information divergence[J]. Journal of Food Engineering, 2009, 93(2): 183~191.

8 苏文浩,何建国,刘贵珊,等. 近红外高光谱图像技术在马铃薯外部缺陷检测中的应用[J]. 食品与机械, 2013, 29(5): 1~9.

9 薛龙,黎静,刘木华. 利用高光谱图像技术检测梨表面碰压伤的实验研究[J]. 粮油加工, 2009(4): 136~138.

10 思振华,何建国,刘贵珊,等. 基于高光谱图像技术的羊肉表面污染无损检测[J]. 食品与机械, 2013, 29(5): 75~79.

11 余克强,赵艳茹,李晓丽. 基于高光谱成像技术的鲜枣裂纹的识别研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(2): 532~537.

12 刘聪,郭康权,张强,等. 基于近红外光谱的室温贮藏下鲜枣霉菌污染动力学模型[J]. 农业工程学报, 2013, 29(1): 278~284.

13 吴龙国,何建国,刘贵珊,等. 基于近红外高光谱成像技术的长枣含水量无损检测[J]. 光电子·激光, 2014, 25(1): 135~140.

14 王斌,薛建新,张淑娟. 基于高光谱成像技术的腐烂、病害梨枣检测[J]. 农业机械学报, 2013, 44(1): 205~209.

15 徐爽,易东. 利用高光谱成像技术检测长枣表面虫伤[J]. 电子制作, 2013(21): 47~48.