

无人机高浓度施药对水稻品质的影响*

薛新宇^{1,2} 屠康¹ 兰玉彬³ 秦维彩² 张玲²

(1. 南京农业大学食品科技学院, 南京 210095; 2. 农业部南京农业机械化研究所, 南京 210014;

3. 美国农业部南方平原研究中心, 德克萨斯 77845)

摘要: 探索了2种常规药剂在低量高浓度无人机施药作业方式下对水稻品质的影响。采用2种药剂(毒死蜱 chlorpyrifos, 己唑醇 hexaconazole), 2种作业方式处理南粳5050一个生长季的水稻, 对比采后稻谷加工品质。由航空高浓度低量喷洒与常规喷洒处理的水稻籽粒的DMA动力学频谱得知: 飞机喷洒毒死蜱处理的水稻硬度高于常规喷洒; 飞机喷洒己唑醇处理的水稻与常规喷洒作业的黏弹性指标差异不大。采用X射线衍射仪测定水稻籽粒中淀粉的晶体结构, 结果表明: 航空施药和常规施药方式对水稻籽粒的微观结构均会产生影响, 航空施药对水稻籽粒的微观结构影响小于常规施药对水稻籽粒微观结构的影响。

关键词: 水稻品质 农业航空 施药 热动力学分析 X射线衍射

中图分类号: S49 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2013)12-0094-05

Effects of Pesticides Aerial Applications on Rice Quality

Xue Xinyu^{1,2} Tu Kang¹ Lan Yubin³ Qin Weicai² Zhang Ling²

(1. College of Food Science and Technology, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China

2. Nanjing Research Institute for Agricultural Mechanization, Ministry of Agriculture, Nanjing 210014, China

3. Southern Plains Agricultural Research Center, United States Department of Agriculture-Agricultural Research Service, Texas 77845, USA)

Abstract: The effects of two types of commercial pesticides on the rice quality were investigated under the low volume aerial application. It could provide guidance for the pesticide application and choose the right types of pesticides. For chlorpyrifos and hexaconazole pesticides, aerial and traditional spraying on Nangeng 5050 rice was used during the growing season. The differences of postharvest rice quality and also the kernel spectrum of DMA between aerial application in high concentration and low volume and traditional spraying were investigated. It was found that rice kernel hardness for aerial application with chlorpyrifos was higher than tradition spraying application but no significant difference with hexaconazole application. With X-ray diffraction analyzer, it was found that the effect of aerial application was smaller than traditional one for the microstructure of rice kernels.

Key words: Rice quality Agricultural aviation Application Dynamic mechanical analysis X-ray diffraction analyzer

引言

使用农药进行病虫害防治是保证水稻丰产丰收的重要措施之一^[1]。农药对水稻的光合作用、游离

氨基酸含量、蔗糖含量、SOD活性、根系活性等均会产生影响^[2], 进而对水稻品质产生影响^[3~5]。采用常规地面药械施药, 农药用水稀释后通过喷雾方式分散至作物表面, 通常水稻施药量为 375 ~ 750 L/hm²。

收稿日期: 2013-08-02 修回日期: 2013-11-05

* 国家公益性行业(农业)科研专项资助项目(201203025)和国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2013AA102303)

作者简介: 薛新宇, 博士生, 农业部南京农业机械化研究所研究员, 主要从事植保与环境工程技术研究, E-mail: 735178312@qq.com

通讯作者: 屠康, 教授, 博士生导师, 主要从事农产品无损检测和贮藏与加工研究, E-mail: kangtu@njau.edu.cn

近年来无人机航空喷洒技术以其作业高效、农药减量等优点,发展迅速^[6~7]。但与传统地面施药作业不同,航空施药多采用超低量高浓度农药施药作业方式,水稻施药量仅为 15 L/hm²,航空喷雾的药液浓度是传统喷雾作业的 25~50 倍,因此对水稻生命活动会产生影响。本文研究在同等栽培、管理条件下,施药方式对水稻籽粒粘弹性、结晶度变化,探索常规施药与高浓度低容量施药 2 种方式对水稻加工品质、营养品质的影响。

1 试验材料和试验方法

1.1 试验材料

水稻品种:南粳 5050,江苏扬子种业有限公司。

试验土壤:pH 值 6.8,过筛风干砂壤土。

试验药剂:30% 己唑醇悬浮剂,陕西美邦农药有限公司;480 g/L 毒死蜱乳油,陶氏益农上海有限公司。

仪器设备:3WPSH-500B 型生测喷雾塔,农业部南京农业机械化研究所产;ED-H200 型电子天平(称量范围 0.001~200 g);不同规格的移液器,容量瓶,三角瓶,量筒,尺。

药剂配制:按表 1 配制剂量分别处理,根据企业登记公顷施药量,按 750 L/hm² 药液量计算田间常规喷雾浓度,按 15 L/hm² 药液量计算高浓度喷雾药液浓度,高浓度药液处理以下统称航空施药。

表 1 农药用量与处理

Tab. 1 Pesticide volume and methods

处理编号	药液浓度/g·L ⁻¹	药液量/L·hm ⁻²	备注
1-1	18	15	登记药量 60%
1-2	9.6		航空施药
2-1	24	15	登记药量 80%
2-2	12.8		航空施药
3-1	0.6	750	登记药量 100%
3-2	0.32		地面常规施药

注:-1 为 480 g/L 毒死蜱乳油,-2 为 30% 己唑醇悬浮剂。

1.2 试验处理

按表 1 喷洒方式和农药用量分别处理水稻整个生长期,整个生长期共处理 3 次,2012 年 7 月 19 日水稻分蘖初期第 1 次施药,2012 年 8 月 14 日孕穗期第 2 次施药,2012 年 9 月 4 日水稻扬花期第 3 次施药。每次 8 个水平农药喷雾处理,每个水平 3 次重复。

1.3 药剂处理

使用 3WP-2000 型行走式喷雾塔,低容量喷雾采用 Lurmark30HCX3 型实心圆锥雾喷嘴,流量 120 mL/min,雾滴体积中径 130 μm,喷雾压力为

0.28 MPa,行走速度 1 m/s,按每次 25 mL 的喷液量;常规喷雾采用 N-LANAOF110-05 型扇形雾喷嘴,流量 1.2 L/min,雾滴体积中径 200 μm,喷雾压力为 0.28 MPa,行走速度 0.1 m/s,按每次 50 mL 的喷液量。进行定量喷雾处理稻苗,喷洒高度距稻苗顶端 30 cm,稻苗处理后移入玻璃温室内进行常规管理。

1.4 待测样品准备

将全部水稻收割后,按处理分类,每种类水稻稻谷,随机选取,作为品质试验样品。

1.5 试验仪器和试验方法

1.5.1 X 射线衍射仪

大米主要由淀粉、蛋白质、纤维素和脂质组成。精米除去 13% 左右的水分,约 7% 的蛋白质和极少量的粗脂肪、灰分以外,几乎全部由淀粉组成,直链淀粉含量与吸水率、膨胀容积、米饭硬度、胶稠度呈正相关,与米饭的粘性、弹性呈负相关^[8~10],因此一定程度上可认为淀粉的组成及结构决定了稻米的相关特性。X 射线衍射图谱可反映淀粉团粒大范围的有序排列(结晶度)^[11]。X 射线衍射图谱将不同植物来源的淀粉分成 A 型、B 型和 C 型晶体,A 型主要为禾谷类(水稻、小麦等),B 型主要为根茎类和球根茎类(马铃薯、香蕉等),C 型主要是根和豆类^[12~13]。

结晶度是反映稻米食味品质的重要因素。利用 X 射线衍射原理精确测定水稻籽粒中淀粉的晶体结构,可从微观角度比较航空施药方式与传统人工施药方式对水稻籽粒微观结构的影响。使用北京普析通用仪器有限责任公司生产的 XD-2 型多晶 X 射线衍射仪,采用步进扫描法,得到样品的 X 射线衍射图谱,使用 Jade 5.0 分析软件通过样品的 X 衍射图谱直接计算样品的结晶度^[14]。

X 射线衍射仪操作条件为:起始角 2θ 为 4°,终止角 2θ 为 40°,步宽为 0.02(°)/s,扫描速度为 2(°)/min,靶型 Cu,管流管压为 15 mA,36 kV,狭缝宽度为 1,Kα1 波长为 1.540 56 nm。

将样品分别制成 40 目的粉末,将粉末样品按照仪器要求制成所需试样放入 X 射线衍射仪进行试验,每个样品 5 次重复。

$$R_c = \frac{I_T}{I_D} \times 100\%$$

式中 R_c ——样品结晶度,%

I_T ——试样全部晶体衍射的强度

I_D ——100% 完全晶态标样的衍射强度

1.5.2 DMA 动态热机械分析仪

在糙米中,大概 80% 以上的干物质是淀粉,大米淀粉由部分处于晶态的支链淀粉分子和螺旋状的

无定形直链淀粉分子组成,是一种晶态加非晶态的半晶态聚合物^[15]。聚合物力学性能的一个重要特征是动态力学性能,其中频率相关性是在交变应力作用下的应变响应。固定试验温度、改变频率,观察储能模量 G' 、损耗模量 G'' 和损耗因子 $\tan\delta$ 随频率而发生的变化,即动态力学频率谱,通过这一动态力学性能的定量描述,对稻谷的形变能耗进行计算可为稻谷品质提供依据^[11,16]。

G' 与试样在每周期中贮存的最大弹性呈正比,反映材料黏弹性中的弹性成分,表征材料的刚度。 G'' 与试样在每周期中以热的形式消耗的能量呈正比,反映材料黏弹性中的黏性成分,表征材料的阻尼。材料阻尼也称力学内耗,用 $\tan\delta$ 表示,等于 G'' 与 G' 之比。

DMA 动态热机械分析仪(图 1a),能够提供大范围内的温度变化,通过测试水稻籽粒粘弹性随温度、时间、频率、应力以及应变的变化,以获得储能模量、损耗模量和损耗因子的动态频率曲线及参数值,对于水稻热机械特性以及应力裂纹有重要意义^[17]。DMA Q800 型动态热机械分析仪为美国 TA 仪器公司生产,其主要参数为:温度 $-150 \sim 600^\circ\text{C}$, 可编程加热速率 $0.1 \sim 50^\circ\text{C}/\text{min}$, $0.1^\circ\text{C}/\text{min}$ 的可调量,可控冷却速率为 $0.1 \sim 10^\circ\text{C}/\text{min}$, 温度再现性 $\pm 2^\circ\text{C}$, 在动态试验中可施加力的范围为 $0.0001 \sim 18 \text{ N}$, 可输入的频率为 $0.01 \sim 200 \text{ Hz}$, 动态形变范围为 $\pm 0.5 \sim 10\,000 \mu\text{m}$ 。

夹具种类主要有压缩夹具、拉伸夹具、剪切三明治夹具、三点弯曲夹具、穿刺夹具等,本试验中使用压缩夹具,如图 1b 所示,由两组平行圆板组成,大圆板直径为 40 mm ,小圆板直径为 15 mm ,最大厚度为 10 mm 。

选取籽粒饱满的水稻籽粒用砂纸磨成两端平行

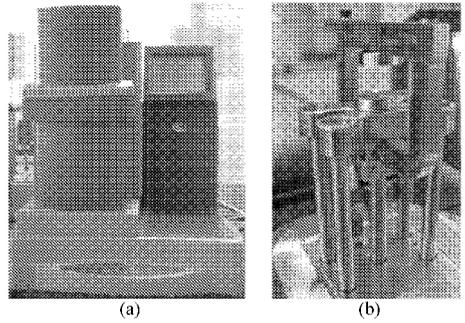


图 1 DMA Q800 型动态热机械分析仪

Fig. 1 DMA Q800 dynamic thermal mechanical analyzer

(a) 分析仪外观 (b) 夹具

的椭圆柱。样品准备好后,将样品固定在压缩夹具之间。频率扫描条件为:温度固定为 25°C ,应变固定为 1% ,预载力 0.1 N ,频率扫描范围 $0.1 \sim 50 \text{ Hz}$,每个样品 3 次重复,试验结果用 Universal Analysis 2000 软件进行分析。

2 结果分析

2.1 施药方式对水稻籽粒结晶度的影响分析

图 2 显示各种处理后的水稻 X 射线衍射图谱可以看出各种处理后的水稻的淀粉晶体均为典型的 A 型图谱,衍射峰位置主要集中在 $13^\circ \sim 23^\circ$ 之间,在 13° 之前和 25° 之后基本不存在衍射峰,在 2θ 为 13.9° 、 16.2° 、 17.1° 和 21.8° 有明显的衍射峰,在 17° 附近出现最强衍射峰。但不同处理的稻米中淀粉的结晶度存在明显的差异。表 2 显示常规喷洒的毒死蜱处理,结晶度随处理浓度的增加而增加,高浓度的航空喷洒毒死蜱处理,结晶度随处理浓度的增加而减少,但变化不如常规喷洒明显。常规喷洒的己唑醇处理,结晶度随处理浓度的增加而显著增加,高浓度的航空喷洒己唑醇处理,结晶度随处理浓度的增加而减少,但变化不如常规喷洒明显。

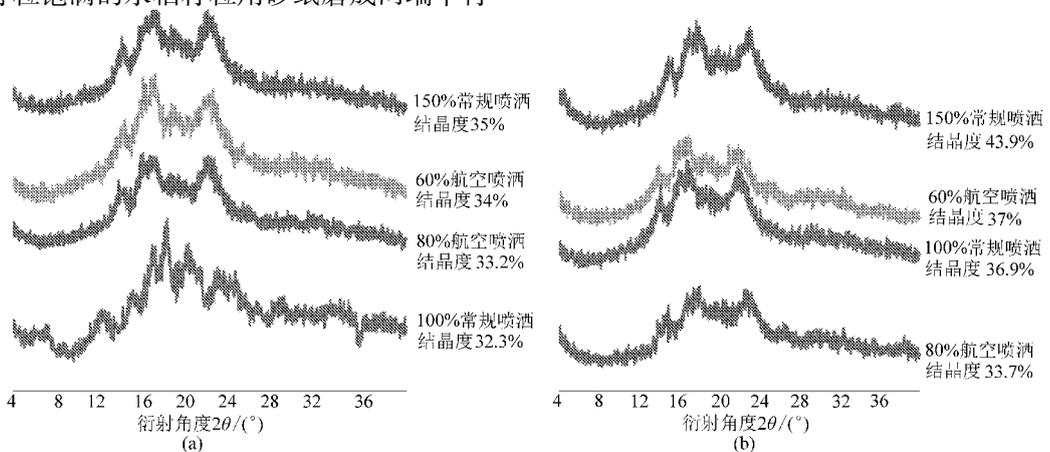


图 2 水稻籽粒淀粉 X 衍射图谱

Fig. 2 X-ray diffraction of rice kernel starch

(a) 毒死蜱处理 (b) 己唑醇处理

表 2 不同施药方式处理水稻籽粒的结晶度

Tab. 2 Rice kernels crystallinity with different applications

施药方法	施药种类	施药浓度/%	结晶度/%	残差/%
航空喷洒	毒死蜱	60	34.03	3.50
航空喷洒	毒死蜱	80	33.20	6.70
航空喷洒	己唑醇	60	36.97	4.46
航空喷洒	己唑醇	80	33.65	7.60
常规喷洒	毒死蜱	100	32.33	7.25
常规喷洒	毒死蜱	150	35.06	6.29
常规喷洒	己唑醇	100	36.88	6.25
常规喷洒	己唑醇	150	43.85	9.16

结果可以说明航空施药方式和常规施药 2 种方式对水稻籽粒的结构是有影响的, 农药减量高浓度航空喷洒对水稻籽粒的微观结构影响小于常规农药喷洒对水稻籽粒的微观结构的影响, 但差别不明显。

2.2 水稻籽粒粘弹性分析

2.2.1 线性粘弹区的测定

线性粘弹区是物料的应力应变呈线性关系的一段特殊区域, 在这段区域内, 物料的储能模量和损耗模量基本恒定不变, 而在非线性粘弹区内, 储能模量和损耗模量通常骤增或骤减, 因此可以在物料的线性粘弹区内进行频率扫描, 来研究物料的粘弹性^[18~19]。

图 3 所示为水稻籽粒的应变扫描图, 可以看出在 0.4% ~ 1.2% 间均可认为是其线性粘弹区, 本试验选择应变 1% 进行试验。

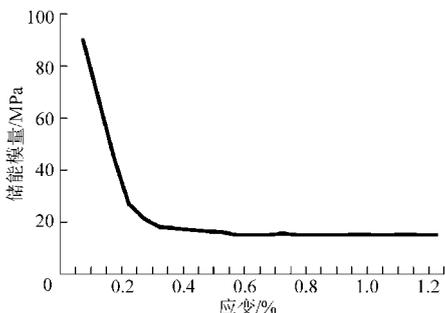


图 3 水稻籽粒应变扫描图

Fig. 3 Rice kernel strain scanning

2.2.2 储能模量的测定

储能模量是样品的弹性度量, 反映了水稻籽粒刚性, 储能模量越大, 稻谷硬度越大。图 4 为航空喷洒 60% 毒死蜱和常规喷洒 100% 毒死蜱的水稻籽粒在频率扫描下的储能模量变化曲线。从图中可以看出, 随着频率的增加储能模量呈现先上升后稳定的趋势, 在 0.1 ~ 5 Hz 范围内储能模量随着频率的增加而增加, 在 5 ~ 50 Hz 范围内随着频率的增加, 储能模量稳定不变。航空喷洒 60% 毒死蜱的水稻籽粒储能模量明显高于常规喷洒 100% 毒死蜱的水稻籽

粒储能模量, 表明航空喷洒高浓度毒死蜱处理的水稻稻谷硬度较高。图 5 可以看出 2 种方式喷洒己唑醇的水稻籽粒储能模量相差不大。

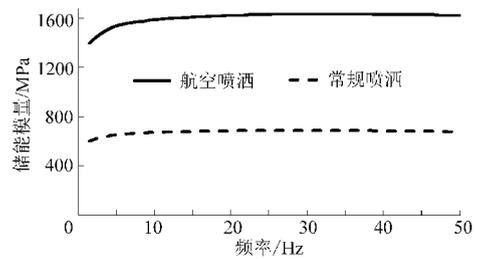


图 4 毒死蜱处理水稻籽粒储能模量变化曲线

Fig. 4 Rice kernel storage modulus with chlorpyrifos application

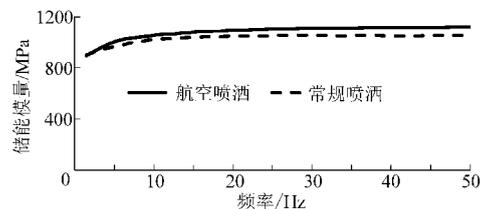


图 5 己唑醇处理水稻籽粒储能模量变化曲线

Fig. 5 Rice kernel loss modulus with hexaconazole application

2.2.3 损耗模量的测定

损耗模量是样品的粘性度量, 可以说明水稻籽粒在受冲击变形过程中的损耗。损耗因子和损耗模量是表征试样内耗性能的一项重要指标, 反映了水稻籽粒的阻尼特性。

图 6 为航空喷洒 60% 毒死蜱和常规喷洒 100% 毒死蜱水稻籽粒在频率扫描下的损耗模量变化曲线。从图中可以看出, 随着频率的增加损耗模量呈现先下降后上升的趋势, 在 0.1 ~ 5 Hz 范围内损耗模量随着频率的增加而下降, 在 5 ~ 50 Hz 范围内损耗模量随着频率的增加而增加, 航空喷洒 60% 毒死蜱的水稻籽粒损耗模量明显高于常规喷洒 100% 毒死蜱的水稻籽粒损耗模量, 而且随着频率的增加航空喷洒的水稻籽粒损耗模量增长速度略快于常规施药。

图 7 可以看出 2 种方式喷洒己唑醇, 损耗模量值相差不大。

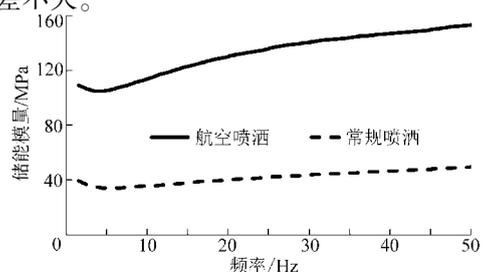


图 6 毒死蜱处理水稻籽粒损耗模量变化曲线

Fig. 6 Rice kernel loss modulus with chlorpyrifos application

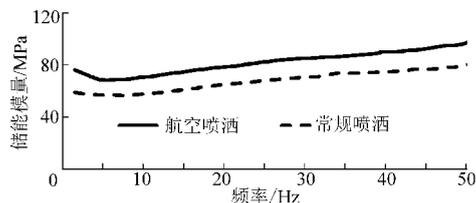


图7 己唑醇处理水稻籽粒损耗模量变化曲线

Fig.7 Rice kernel storage modulus with hexaconazole application

图8为航空喷洒60%毒死蜱和常规喷洒100%毒死蜱的水稻籽粒在频率扫描下损耗因子变化曲线。从图中可以看出,随着频率增加损耗因子呈现先下降后上升的趋势,在0.1~5 Hz范围内损耗因子随着频率的增加而下降,在5~50 Hz范围内损耗因子随着频率的增加而增加,其值在0.05~0.1之间,说明稻谷粘弹特性表现以弹性性状为主,硬度较大,航空喷洒的损耗因子略高于常规施药的损耗因子。

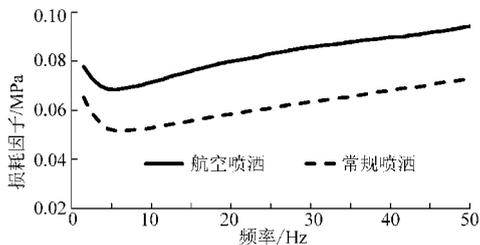


图8 毒死蜱处理水稻籽粒损耗因子变化曲线

Fig.8 Rice kernel loss factor with chlorpyrifos application

图9为航空喷洒60%己唑醇和常规喷洒100%己唑醇的频率扫描图。可以看出2种喷洒方式得到的损耗因子也比较接近,常规喷洒的损耗因子略高

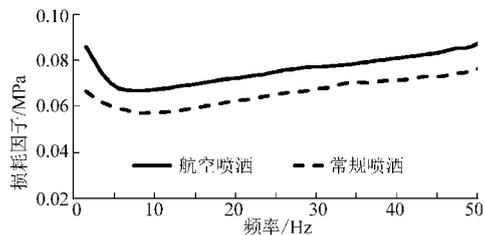


图9 己唑醇处理水稻籽粒损耗因子变化曲线

Fig.9 Rice kernel loss factor with hexaconazole application

于航空喷洒。说明航空喷洒对于水稻籽粒的阻尼特性影响不大。

3 结论

(1) 从水稻X射线衍射图谱显示几种处理水稻籽粒中淀粉晶体结构均为典型的A型图谱。从结晶度来看,航空施药和常规施药方式对水稻籽粒的微观结构均会产生影响,随着浓度的增加,其影响也会小幅增加,航空施药对水稻籽粒的微观结构影响小于常规施药对水稻籽粒微观结构的影响。

(2) 用DMA动态热机械分析仪,将温度固定为25℃,应变固定为1%,预载力为0.1 N,频率扫描范围为0.1~50 Hz的水稻籽粒动力学频谱结果显示:毒死蜱处理航空喷洒水稻籽粒硬度高于常规喷洒;己唑醇处理航空喷洒水稻与常规喷洒作业黏弹性指标差异不大。

(3) 由X射线与DMA动态热机械试验结果说明,高浓度喷洒试验对水稻结晶度与热机械性能产生一定的影响,但不同药剂产生影响不同,因此,在常规药剂用于航空施药作业前,药剂需要经过安全性试验,有药害风险药剂对水稻品质会产生影响。

参 考 文 献

- 章家恩. 我国水稻安全生产存在的问题及对策探讨[J]. 北方水稻, 2007(4):1~7.
- 唐永红, 张高午, 高如嵩, 等. 水稻结实期米质动态变化研究[J]. 中国水稻科学, 1997, 11(1):28~32.
Tang Yonghong, Zhang Songwu, Gao Rusong, et al. The dynamic of the rice quality during the ripening of rice kernel[J]. Chinese Journal of Rice Science, 1997, 11(1):28~32. (in Chinese)
- Chen Yi, Wang Mei, Pieter B F. Ouwerek molecular and environmental factors determining grain quality in rice [J]. Food and Energy Security, 2012, 1(2): 111~132.
- 中国农业科学院. 中国稻作学[M]. 北京:农业出版社, 1986.
- Masahiko T, Morie E, Toru T. Physico-ecological studied on quality formation of rice kernel. II. Changes in quality of rice kernel during grain development[J]. Japanese Journal of Crop Science, 1989, 589(4):659~663.
- 薛新宇, 梁建, 傅锡敏. 我国航空植保技术的发展前景[J]. 中国农机化, 2008(5):72~74.
- 薛新宇, 秦维彩, 孙竹, 等. N-3型无人直升机施药方式对稻飞虱和稻纵卷叶螟防治效果的影响[J]. 植物保护学报, 2013, 40(3):273~277.
Xue Xinyu, Qin Weicai, Sun Zhu, et al. Effects of N-3 UAV spraying methods on the efficiency of insecticides against planthoppers and *Gaphalocrocis medinalis*[J]. Acta Phytopylacica Sinica, 2013, 40(3):273~277. (in Chinese)
- Tomar J B. Genetic analysis of amylose content in rice[J]. Genetia Agraria, 1987, 41(3):235~242.
- Delwiche S R, McKenzie K S, Webb B D. Quality characteristics in rice by near-infrared reflectance analysis of whole-grain milled samples[J]. Cereal Chemistry, 1996, 73(2):257~263.

5 结论

(1) 利用 V 形头送绳装置和梯形导绳器能够实现两道并拢绳索同时搭挂在打结嘴上形成“门”形结构,为简化打结辅助运动提供了基础条件。

(2) 利用打结辅助运动位置对称性和运动方向一致性,配置了集绳索收拢限位、结间绳索切断、绕嘴结扣脱离和后摆回归原位 4 个动作于拢推切装置

摆动的传动方案,同时利用齿盘上对称的不完整齿面和凸轮槽,实现了两打结嘴的等速、相向、间歇转动和拢推切装置规律摆动的严格同步和对应。

(3) 依据压捆作业过程的要求,在试验台实现了双 α 结打结器与压缩过程和送绳过程的位置、运动匹配模拟,成功显现了双 α 结同时成型的完整过程,证明这种双 α 结同时成型方法及配置成结和辅助传动方案的可行性。

参 考 文 献

- 徐秀英,张维强. 对我国牧草生产机械化现状及发展机遇的思考[J]. 中国农机化,2004(3):14~16.
Xu Xiuying, Zhang Weiqiang. Consideration on mechanization condition of forage grass production and its development opportunities in China[J]. Chinese Agricultural Mechanization, 2004(3): 14~16. (in Chinese)
- Luttich Hans-Robert. Knotting device of two knots;DE,102008041120A1[P]. 2010-02-11.
- Weidig Klaus. Knotting device to form two knots at the same time;DE, EP205789A1[P]. 2008-11-04.
- 韩鲁佳,王磊,金镭,等. 双 α 结同时成型方法及装置;中国,201010517709.0[P]. 2011-05-25.
Han Lujia, Wang Lei, Jin Lei, et al. Knotting method and device to form double- α -knots at the same time; CN,201010517709.0 [P]. 2011-05-25. (in Chinese)
- 陈锋. 大方捆打捆机压缩机构设计及压缩试验研究[D]. 北京:中国农业机械化科学研究院,2007.
Chen Feng. Compressing mechanism design of large rectangular baler and experimental study on compression research[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, 2007. (in Chinese)
- 杨诗军,姚文席. 凯斯 8545 与 Welger AP-530 牧草方捆机打结器结构及效能比较[J]. 机械研究与应用,2006,19(1):93~103.
Yang Shijun, Yao Wenxi. Comparing about structure and efficiency between CASE 8545 and Welger AP-530 of baler[J]. Mechanical Research & Application, 2006, 19(1): 93~103. (in Chinese)
- 尹建军,李双,李耀明. D 型打结器及其辅助机构运动仿真与时序分析[J]. 农业机械学报,2011,42(6):103~107.
Yin Jianjun, Li Shuang, Li Yaoming. Kinematic simulation and time series analysis of D-knotter and its ancillary mechanisms[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(6): 103~107. (in Chinese)
- 王磊,吕黄珍,魏文军,等. 打结嘴钳咬绳索解析条件分析与直观验证[J]. 农业机械学报,2012,43(2):96~100.
Wang Lei, Lü Huangzhen, Wei Wenjun, et al. Analytical conditions and visualized verification of knotter hook's rope-biting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(2): 96~100. (in Chinese)
- 魏文军,高英武,张云文. 机械原理[M]. 北京:中国农业大学出版社,2004.
- 杨可桢,程光蕴,李促生. 机械设计基础[M]. 北京:高等教育出版社,2006.
- 石永刚,徐振华. 凸轮机构设计[M]. 上海:上海科学技术出版社,1995.
- 彭国勋,肖正杨. 自动机械的凸轮机构设计[M]. 北京:机械工业出版社,1990.
- 王文斌,林忠钦,严隽琪,等. 机械设计手册:第 2 卷[M]. 北京:机械工业出版社,2004.

(上接第 98 页)

- Nakamura Y, Sakurai A, Inaba Y, et al. The fine structure of amylopectin in endosperm from Asian cultivated rice can be largely classified into two classes[J]. Starch, 2002, 54(4): 117~131.
- James N BeMiller, Roy L Whistler. 淀粉化学与技术[M]. 岳国君,郝小明,译. 北京:工业出版社,2013:164~165,227~238.
- Katz J R. Viscosity of starch pastes: the changes therein due to continued heating and stirring, and their relation to the sizing of cotton yarns[J]. Textile Research Journal, 1938, 9(2): 69~78.
- 张艳霞. 稻米直链淀粉含量与淀粉理化特性及品质的关系[D]. 南京:南京农业大学,2007.
- 徐斌,满建民,韦存虚. 粉末 X 射线衍射图谱计算植物淀粉结晶度方法的初探[J]. 植物学报, 2012, 47(3): 278~285.
Xu Bin, Man Jianmin, Wei Cunxu. Methods for determining relative crystallinity of plant starch X-ray powder diffraction spectra [J]. Chinese Bulletin of Botany, 2012, 47(3): 278~285. (in Chinese)
- Yang W, Jia C. Glass transition mapping inside a rice kernel[J]. Transactions of the ASAE, 2004, 47(6): 2009~2015.
- 杨挺青,罗文波,徐平,等. 黏弹性理论与应用[M]. 北京:科学出版社,2004.
- Chen K C, Li D, Wang L J, et al. Dynamic viscoelastic properties of rice kernels studied by dynamic mechanical analyzer[J]. International Journal of Food Engineering, 2007, 3(2): 1~14.
- 王云英. 聚氨酯中空纤维阻尼材料的制备工艺及性能研究[D]. 南昌:南昌航空大学,2010.
- 周雄. 硫化橡胶动态力学性能的分阶微分流变模型[D]. 湘潭:湘潭大学,2011.