

文章编号:1008-1542(2016)06-0547-05

doi:10. 7535/hbkd. 2016yx06004

桑条机械化切割技术研究评析

宋占华,李法德,高天浩,李玉道,闫银发

(1. 山东农业大学机械与电子工程学院,山东泰安 271018;2. 山东省园艺机械与装备重点实验室,山东泰安 271018)

摘要:中国是世界第一大蚕茧和生丝的生产国与出口国,然而,劳动力价格的快速提高,增加了蚕桑产业的生产成本,降低了蚕桑生产的比较效益,致使农民从事栽桑养蚕的积极性越来越低。为解决这一问题,针对中国桑条机械化收获水平低、切割技术落后的现状,在论述桑条机械化切割过程对桑条切割截面损伤形式的基础上,分析了桑条切割技术以及其他作物茎秆切割技术发展中的优势和不足,指出了桑条机械化切割技术的发展方向。

关键词:农业机械化;机械化收获;桑蚕生产;桑条;切割技术;研究评析

中图分类号:S225.91

文献标志码:A

Research evaluation of mechanical cutting technology of mulberry branch

SONG Zhanhua, LI Fade, GAO Tianhao, LI Yudao, YAN Yinfa

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong Agricultural University, Taian, Shandong 271018, China; 2. Shandong Province Key Laboratory of Horticultural Machineries and Equipments, Taian, Shandong 271018, China)

Abstract: China is the world's largest silkworm cocoon and raw silk producer and exporter. However, as the labor price increases quickly, the sericulture production costs increases, the comparative benefits of sericulture production decreases, and the farmers' enthusiasm in mulberry planting becomes lower. To solve the problem, aiming at the low level of mechanical harvesting and cutting technology of mulberry branch in China, on the basis of discussing the cutting damage forms of mulberry stool in the progress of mechanical harvesting mulberry branch, the existing problems and the present situation of the research of cutting technology of mulberry branch and others crop stalks are analyzed. The developmental trend of the mechanical cutting technology of mulberry branch is put forward.

Keywords: agricultural mechanization; mechanical harvesting; silkworm production; mulberry branch; cutting technology; research evaluation

蚕桑产业作为中国传统的特色产业,至今已有 5 500 年的历史^[1]。据统计,2013 年中国桑园面积约 83 万公顷(1 242.75 万亩),年养蚕 1 649.54 万张,蚕茧总产量达 65.03 万 t,占世界总产量的 80%左右,是世界

收稿日期:2016-02-02;修回日期:2016-08-16;责任编辑:张士莹

基金项目:国家自然科学基金(51505266);教育部博士点基金(20133702110011);山东省自然科学基金(ZR2015EL021);山东省现代农业产业技术体系蚕桑创新团队项目(SDAIT-18-06)

作者简介:宋占华(1984—),男,山东聊城人,讲师,博士,主要从事现代农业机械设计及其理论方面的研究。

通讯作者:闫银发博士。E-mail:sd28@163.com

宋占华,李法德,高天浩,等.桑条机械化切割技术研究评析[J].河北科技大学学报,2016,37(6):547-551.

SONG Zhanhua, LI Fade, GAO Tianhao, et al. Research evaluation of mechanical cutting technology of mulberry branch[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2016, 37(6): 547-551.

第一大蚕茧和生丝生产国与出口国^[1-2]。然而,作为劳动力密集型的蚕桑产业,目前在中国的生产模式仍然是以人工劳作为主的传统生产模式。随着中国工业化和城市化进程的加快,大量的农村劳动力向城市转移,劳动力价格快速提高,增加了蚕桑产业的生产成本,降低了蚕桑生产的比较效益,致使农民从事栽桑养蚕的积极性越来越低。为了降低劳动成本、减少劳动用工、提高生产效率,中国大蚕喂养模式已开始由传统的片叶育(人工直接从桑树上采摘桑叶喂蚕的一种方法)向轻简化、省力高效的蚕桑生产技术——条桑育(在蚕期直接从桑树上割取带叶枝条喂蚕的一种省力化饲养方法,效率比片叶育提高2~3倍)转变。桑条收获是养蚕全年条桑育技术的基础,也是一项季节性强、劳动成本高、劳动强度大的工作。在蚕桑生产的整个过程中,一年中要进行3次(春蚕、夏蚕、秋蚕)桑条收获,对桑树生长造成一定的损伤,还会从土壤中带走大量养分。为了保证下一茬桑条的正常生长,增加桑叶产量,应实施桑条收获机械化,缩短收获用时,并及时给伐条后的桑树进行浇水施肥。实现桑条收获机械化,可提高桑条生产效率,降低桑条收获劳动强度与劳动成本,加快养蚕全年条桑育技术的实施,对中国现代化蚕桑产业的发展具有重要意义。

1 桑条收获机械的主要切割形式

桑条收获机械的研究最早开始于20世纪60年代初的日本,中国对桑条收获机械的研究起步较晚,兴起于20世纪80年代^[3]。桑条收获机械主要是在借鉴农作物茎秆切割收获原理与机械的基础上发展起来的,至今人们已研发出多种切割形式的桑条收获机械,主要有4种形式:1)往复式,该类型机械主要由稻麦类割禾机改造而成,切割收获桑条时存在重割、漏割现象,易使桑条切割部位损伤;2)回转式,对桑条进行切割时重割、漏割现象严重,导致桑条切割部位破损严重;3)圆盘锯式,锯齿容易被桑条的纤维和木质素堵塞,使切割效率急剧下降,增加桑条切割阻力,造成桑条皮撕裂损伤;4)剪刀式,利用气压、液压和电作为动力,代替人力驱使剪刀完成伐条工作,虽切割质量较好,但一次只能剪伐一根桑条,工作效率低。纵观桑条收获机械的发展可知,国内外对桑条收获机械的研究,主要集中在参考已有的农作物茎秆切割收获机械来开发不同形式的切割收获机械,而忽略了关于桑条切割特性和桑条切割部位损伤机理的基础性研究,导致对现有桑条收获机械结构和工作参数进行优化设计的改造工作缺乏理论依据支持,无法解决桑条机械化收获过程中桑条切割部位的易损伤问题,制约了桑条收获机械化的发展。

2 桑条机械化切割技术研究现状

桑条切割收获过程与农作物茎秆切割收获过程相似,都是在拨禾器、切割器和输送器等3个部件协同耦合作用下完成的复杂力学过程,桑条或农作物茎秆切割部位的损伤就是在这一复杂力学过程中产生的。在这一过程中,茎秆在各部件的耦合作用下,在切割刀片刃口附近会产生复杂的应力与应变,易导致茎秆劈裂、茎秆皮撕裂的现象,直接影响茎秆收割机的切割质量、切割效率及切割功耗。因此,国内外学者对茎秆的物理机械特性、切割特性及茎秆在收获机械有关工作部件作用下的运动规律进行了研究。

2.1 物理机械特性研究

国内外研究学者应用万能试验机或自制测量仪器对小麦、大麦、大麻、玉米、牧草、苕麻、芦竹、棉花等茎秆以及荔枝树枝的弯曲、压缩、剪切、拉伸以及抗冲击等进行了试验研究,建立了有限元模型,探讨了含水率、加载速度、取样位置等因素对茎秆力学性能的影响^[4-13]。对茎秆等物理机械特性研究所用的试样都是没有经过破坏的,而对经过切割刀片切割有切口的茎秆的物理机械特性研究未见报道。由于茎秆在切割过程中未被切割刀片完全切断的情况下,可能会在拨禾器或输送器等部件作用下于茎秆切口处发生劈裂、折断等损伤现象,所以研究有切口的茎秆在受到弯曲、拉伸、挤压、冲击等作用后切口处发生破坏的物理机械特性,对茎秆切割收获机械的优化设计更有意义。据查阅文献可知,迄今为止,国内外未见对桑条物理机械特性研究的报道。

2.2 切割特性及切割工作部件参数优化研究

茎秆切割特性研究利用了仿真技术与实际试验技术。在应用仿真技术研究方面,研究人员利用有限元技术,对芦竹和甘蔗的切割破坏过程进行了动态仿真分析^[14-15],确定了芦竹切割过程中切割速度与进给速度的最佳匹配,指出了甘蔗在切割过程中发生弯曲变形是导致切割破头的根本原因;还有学者利用多体动力学软件ADAMS,分别以平茬效率和功率为指标进行了圆盘锯切割器切割单根柠条的虚拟仿真试验^[16],以

及以重割面积为指标对双圆盘割草机切割器进行了四因素三水平虚拟正交试验^[17],依据仿真试验结果,分别优化了圆盘锯切割器参数和双圆盘切割器参数。这些研究成果只是对茎秆在切割器单一作用下的切割过程进行了仿真模拟研究,并未更深入地对多部件协同耦合作用下的茎秆切割过程进行仿真模拟研究,从而不能从根本上解决茎秆切割部位在多部件耦合作用下易产生损伤的问题。

在茎秆无喂入速度的状况下,研究人员对巨芒、玉米、灌木、桑条等茎秆进行了切割试验,研究了切割速度、切割倾角、刀刃角、刀刃形状等因素对茎秆切割力与切割功耗的影响,以及对桑条切割损伤程度的影响,依据试验结果对切割器参数进行了优化^[18-21]。但是巨芒、玉米与灌木的切割特性研究未将切割质量列为指标;尽管将切割损伤作为了桑条切割特性研究的考核指标,但未深入分析桑条切割损伤的机理;除此之外,这些研究都未关注切割过程中茎秆的空间姿态运动变化规律对切割特性是否有影响。还有学者设计了仿生锯齿锯条,并与普通锯齿锯条进行了玉米茎秆切割对比试验,结果表明仿生锯条可以降低切割阻力,达到减少切割功耗的目的^[22]。虽然这项研究在切割刀片的选择方面可资借鉴,但该试验仅是在低速下进行的,且未对玉米茎秆切割质量的影响进行研究。另外,也有学者在茎秆有喂入速度的状况下对甘蔗和柠条进行了切割试验,研究了切割速度、机组前进速度、切割方式对茎秆切割质量的影响,确定了切割器的最佳工作参数^[23-25]。宋占华^[13]以棉花秸秆切割力和切割功耗为目标值,对棉花秸秆进行了往复式切割试验研究,得到了切割器参数的最佳组合。虽然这些研究成果也具有一定的借鉴意义,但是都未研究在整个切割收获系统中各部件协同耦合作用下,茎秆的空间姿态运动变化规律及其对茎秆切割部位损伤的影响规律,更未对多部件协同耦合作用下的茎秆切割部位损伤机理进行研究,从而不能从根本上解决茎秆易产生损伤的问题。

2.3 机械化收获过程中的运动规律研究

在运动规律研究方面,国内外学者主要运用了理论分析、仿真模拟与实际试验技术^[26]。在理论分析上,KASSA等^[27]从理论上研究了谷物茎秆在偏心拨禾轮作用下的姿态变化,并依此优化设计了拨禾轮的结构参数;王金武等^[28]对前倾禾秆进行了力学分析,确定了依靠禾秆的动量和未割禾秆的反弹力势能可将已割的禾秆推向割台内,并能被输送链作用。在仿真模拟上,研究人员分别对玉米茎秆在分禾机构和摘穗机构作用下的运动规律进行了动态仿真模拟^[29-30],研究了工作部件参数对玉米茎秆姿态变化的影响规律。在实际试验中,牟向伟等^[31]研究了甘蔗收获过程中,在拨指链式扶蔗器作用下甘蔗的姿态变化,探讨了扶蔗器参数对扶起后甘蔗倒伏角的影响规律,并优化了设计参数。在研究棉花秸秆切割技术的过程中,宋占华^[13]发现切割过程中棉花秸秆的运动姿态变化与刀片切割速度和切割类型有一定关系。这些研究成果只是对茎秆在单一工作部件作用下的空间姿态变化进行了研究,未进一步研究茎秆在收获过程中多部件耦合作用下的空间姿态运动变化规律,故不能对茎秆在切割收获过程中切割部位的损伤机理进行全面阐释。

3 建议

虽然国内外研究人员对茎秆的切割特性以及与工作部件接触时的姿态变化进行了研究,但其仅局限于茎秆在单一工作部件(切割器或拨禾器等)作用下的切割特性与姿态变化研究,而关于作物茎秆及桑条在多部件(拨禾器、切割器、输送机)协同耦合作用下的切割特性、空间姿态运动变化规律以及两者之间的影响关系尚未见报道。此外,关于桑条物理机械特性(包括有切口的桑条受到外载荷作用在切口处发生破坏时的力学特性)、桑条在多部件协同耦合作用下切割部位损伤机理的研究也未见文献报道,导致目前仍未从本质上解决桑条机械化收获过程中切割部位易损伤的问题,制约了桑条收获机械化的发展。

笔者建议,应以桑条机械化收获时切割部位易损伤的问题为研究对象,通过对不同养蚕期的桑条物理机械特性与生物学特性进行研究,建立桑条典型的生物力学模型,利用仿真与高速摄影技术探讨桑条切割部位在不同形式载荷作用下的应力应变规律及损伤表达形式,揭示损伤产生的机制;在此基础上,进一步利用仿真与高速摄影技术,研究不同养蚕期的桑条在切割收获系统中各部件协同耦合作用下的空间姿态运动变化规律、切割部位损伤表达形式以及两者之间的关系,从而阐明多部件协同耦合作用下桑条切割部位的损伤机理,提出相应的抑制策略,解决桑条在机械化收获模式下的切割部位易损伤问题。

参考文献/References:

[1] 封槐松,李建琴. 新中国60年蚕桑业发展历程与特点[J]. 中国蚕业, 2014, 35(3): 1-10.

- [2] 封槐松. 2013年全国蚕桑生产实现“四连增”[J]. 中国蚕业, 2014, 35(1): 1-3.
- [3] 胡祚忠, 吴建梅, 张剑飞, 等. 我国蚕桑生产机械设备的概况[J]. 蚕业科学, 2010, 36(6): 998-1003.
HU Zuozhong, WU Jianmei, ZHANG Jianfei, et al. Research progress on mechanical equipment for sericultural production in China[J]. Science of Sericulture, 2010, 36(6): 998-1003.
- [4] LEBLICQ T, VANMAERCKE S, RAMON H, et al. Mechanical analysis of the bending behaviour of plant stems[J]. Biosystems Engineering, 2015, 129: 87-99.
- [5] KHAN M M R, CHEN Y, LAGUE C, et al. Compressive properties of Hemp (*Cannabis sativa* L.) stalks[J]. Biosystems Engineering, 2010, 106: 315-323.
- [6] 高梦祥, 郭康权, 杨中平, 等. 玉米秸秆的力学特性测试研究[J]. 农业机械学报, 2003, 34(4): 47-49.
GAO Mengxiang, GUO Kangquan, YANG Zhongping, et al. Study on mechanical properties of cornstalk[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2003, 34(4): 47-49.
- [7] 廖娜, 黄光群, 陈龙健, 等. 玉米秸秆芯结构建模与径向压缩过程模拟[J]. 农业机械学报, 2011, 42(6): 117-121.
LIAO Na, HUANG Guangqun, CHEN Longjian, et al. Structure modeling and radial compression simulation of corn stalk cores[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(6): 117-121.
- [8] 于勇, 林怡, 毛明, 等. 玉米秸秆拉伸特性的试验研究[J]. 农业工程学报, 2012, 28(6): 70-76.
YU Yong, LIN Yi, MAO Ming, et al. Experimental study on tensile properties of corn straw[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(6): 70-76.
- [9] 陈争光, 王德福, 李利桥, 等. 玉米秸秆皮拉伸和剪切特性试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(21): 59-65.
CHEN Zhengguang, WANG Defu, LI Liqiao, et al. Experiment on tensile and shearing characteristics of rind of corn stalk[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(21): 59-65.
- [10] 赵春花, 韩正晟, 师尚礼, 等. 新育牧草茎秆收获期力学特性与显微结构[J]. 农业工程学报, 2011, 27(8): 179-183.
ZHAO Chunhua, HAN Zhengsheng, SHI Shangli, et al. Mechanical properties and microstructure of new species forage stems in harvesting period[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(8): 179-183.
- [11] 晏科满, 邹舒畅, 唐令波, 等. 苧麻茎秆冲击断裂韧性试验与分析[J]. 农业工程学报, 2014, 30(21): 308-315.
YAN Keman, ZOU Shuchang, TANG Lingbo, et al. Impact test and analysis of fracture toughness of ramie stalk[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(21): 308-315.
- [12] 廖宜涛, 廖庆喜, 田波平, 等. 收割期芦竹底部茎秆机械物理特性参数的试验研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(4): 124-129.
LIAO Yitao, LIAO Qingxi, TIAN Boping, et al. Experimental research on the mechanical physical parameters of bottom stalk of the *Arundo donax* L. in harvesting period [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23(4): 124-129.
- [13] 宋占华. 棉花秸秆力学模型与切割技术研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2013.
SONG Zhanhua. Study on Mechanical Model and Cutting Technology of Cotton Stalk [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2013.
- [14] 廖宜涛, 廖庆喜, 舒彩霞, 等. 基于 ANSYS/LS-DYNA 的芦苇切割-进给速度匹配研究[J]. 农业机械学报, 2011, 42(1): 30-34.
LIAO Yitao, LIAO Qingxi, SHU Caixia, et al. Matching of cutting and feeding speed for reaping *Arundo donax* L. based on ANSYS/LS-DYNA[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(1): 30-34.
- [15] 杨望, 杨坚, 刘增汉, 等. 入土切割对甘蔗切割过程影响的仿真试验[J]. 农业工程学报, 2011, 27(8): 150-156.
YANG Wang, YANG Jian, LIU Zenghan, et al. Dynamic simulation experiment on effects of sugarcane cutting beneath surface soil[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(8): 150-156.
- [16] 邱述金, 郭玉明, 郑德聪. 柠条收获机圆盘锯式切割系统动力学仿真与参数优化[J]. 农业机械学报, 2014, 45(8): 72-79.
QIU Shujin, GUO Yuming, ZHENG Decong. Dynamic simulation of disc saw cutter system of caragana korshinskii harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(8): 72-79.
- [17] 赵满全, 张宁, 杨铁军, 等. 双圆盘割草机切割器虚拟样机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2014, 45(8): 101-105.
ZHAO Manquan, ZHANG Ning, YANG Tiejun, et al. Design and experiment of virtual prototype of double disc mower cutter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(8): 101-105.
- [18] JOHNSON P C, CLEMENTSON C L, MATHANKER S K, et al. Cutting energy characteristics of miscanthus giganteus stems with varying oblique angle and cutting speed[J]. Biosystems Engineering, 2012, 112: 42-48.
- [19] 李耀明, 秦同娣, 陈进, 等. 玉米茎秆往复切割力学特性试验与分析[J]. 农业工程学报, 2011, 27(1): 160-164.
LI Yaoming, QIN Tongdi, CHEN Jin, et al. Experimental study and analysis on mechanical property of corn stalk reciprocating cutting [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(1): 160-164.
- [20] 陈诚, 俞国胜. 往复式灌木切割器滑切角对灌木切割的影响[J]. 北京林业大学学报, 2011, 33(2): 115-119.
CHEN Cheng, YU Guosheng. Effect of sliding cutting angle of bush reciprocating cutter on bush cutting[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2011, 33(2): 115-119.
- [21] 赖仁盛, 孙永厚, 靳国才. 小型桑树伐条机切割部分试验研究[J]. 农机化研究, 2013(2): 150-153.
LAI Rensheng, SUN Yonghou, JIN Guocai. Experimental investigation of the cutting part for mini-type mulberry branch cutting machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2013(2): 150-153.

- [22] JIA H L, LI C Y, ZHANG Z H, et al. Design of bionic saw blade for corn stalk cutting[J]. *Journal of Bionic Engineering*, 2013, 10: 497-505.
- [23] MANHÃES C M C, GARCIA R F, JUNIOR D C, et al. Evaluation of visible losses and damage to the ratoon cane in the mechanized harvesting of sugarcane for different displacement speeds[J]. *American Journal of Plant Sciences*, 2014, 5: 2956-2964.
- [24] 刘庆庭, 区颖刚, 卿上乐, 等. 光刃刀片切割甘蔗茎秆破坏过程高速摄像分析[J]. *农业机械学报*, 2007, 38(10): 31-35.
LIU Qingting, OU Yinggang, QING Shangle, et al. High-speed photography analysis on the damage process in cutting sugarcane stalk with smooth-edge blade[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2007, 38(10): 31-35.
- [25] 刘志刚, 王德成, 翟改霞, 等. 往复式双动刀灌木收割机设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(sup2): 102-106.
LIU Zhigang, WANG Decheng, ZHAI Gaixia, et al. Design and experiment on reciprocating double knife shrub harvester[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(sup2): 102-106.
- [26] 王立新, 高雅妍. 农业机械领域的工程仿生研究概况与应用前景[J]. *河北科技大学学报*, 2014, 35(4): 309-317.
WANG Lixin, GAO Yayan. Research advance and development prospect of engineering bionics in agricultural machinery field[J]. *Journal of Hebei University of Science and Technology*, 2014, 35(4): 309-317.
- [27] KASSA E Z, ABDI D I Z. Design and modification of appropriate reel mechanism to harvest tef crop[J]. *International Journal of Research in Mechanical Engineering*, 2014, 2(1): 15-25.
- [28] 王金武, 蒋亦元, 刘磊, 等. 割前摘脱收获机禾秆收割动力学试验[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(9): 118-121.
WANG Jinwu, JIANG Yiyuan, LIU Lei, et al. Experimental study on the dynamics of cutting straws based on stripping harvesting machine[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2007, 23(9): 118-121.
- [29] 贺俊林, 胡伟, 郭玉富, 等. 扶禾秆在不对行导入玉米茎秆中的运动仿真[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(6): 125-129.
HE Junlin, HU Wei, GUO Yufu, et al. Kinematic simulation of no-row feed-in mechanism with guide-rod for corn harvester[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2007, 23(6): 125-129.
- [30] 崔涛, 刘佳, 张东兴, 等. 基于 ANSYS 和 ADAMS 的玉米茎秆柔性体仿真[J]. *农业机械学报*, 2012, 43(sup): 112-115.
CUI Tao, LIU Jia, ZHANG Dongxing, et al. Flexible body simulation for corn stem based on ANSYS and ADAMS[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(sup): 112-115.
- [31] 牟向伟, 区颖刚, 张杨. 拨指链式扶蔗器试验[J]. *农业机械学报*, 2009, 40(8): 49-53.
MOU Xiangwei, OU Yinggang, ZHANG Yang. Experiment of the finger-chain type sugarcane-lifter[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2009, 40(8): 49-53.