

秸秆物料的特性及其加工利用研究现状与应用前景

孟海波^{1,2} 韩鲁佳^{1,2}

(1. 中国农业大学工学院,北京 100083; 2. 现代精细农业系统集成研究教育部重点实验室,北京 100083)

摘要 在试验研究和对相关文献资料分析的基础上,概述了秸秆物料的加工利用特性、加工方式及设备的研究现状,介绍了秸秆压缩、剪切、拉伸特性的研究进展,以及加工方式、切割速度等因素对秸秆加工特性的影响。提出在该研究领域目前存在的问题,即测控系统难以满足实际工况条件、定量研究较少、对秸秆加工受力状况的研究不足等。分析表明,对秸秆加工特性,尤其是冲击载荷下的秸秆受力状况的进一步研究,利用有限元软件对秸秆加工进行分析,以及秸秆加工特性在机具设计中的应用研究都具有重要的理论和实际意义。

关键词 秸秆;加工特性;研究现状;问题;应用前景

中图分类号 S 816.9; S 216.2

文章编号 1007-4333(2003)06-0038-04

文献标识码 A

Analysis of application and prospects and study status of the processing properties of straw materials

Meng Haibo, Han Lujia

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. Key Laboratory of Modern Precision Agriculture System Integration Research, Ministry of Education, Beijing 100083, China)

Abstract To clarify the significance of study on the processing properties of straw materials, the status of the processing properties of straw materials and processing method and related machine were outlined based on experiments and analysis of literature. The development of compression and shear and tensile of straw materials were presented. The effects of processing method and cutting speed on the processing properties of straw materials were discussed. At present the main problems in this research field include three parts, system of testing and controlling can not fit the processing, research on quantify and status of processing are both limited. It is useful and important to research the straw materials properties of mechanics on impact load, to analyze its processing by FEM.

Key words straw; processing properties; present status; problem; prospects

近年来,对农作物秸秆这一生物质资源的开发利用在国内外引起了高度重视,许多科研部门和学者在合理利用和深度开发作物秸秆产品方面做了大量的科学研究工作,各式各样的加工机具、设备、配套工艺和秸秆物料产品应运而生;对作物秸秆物料加工特性的研究也有了较快的发展,为进一步设计开发新机具、新工艺提供了理论依据和试验基础,开辟了秸秆物料利用的新途径。本文对秸秆物料加工特性的研究现状、存在问题以及深入研究的前景进行了论述与分析。

1 秸秆物料加工方式及其设备的研究现状

1.1 秸秆物料特性

对秸秆物料生理特征的研究结果表明,秸秆在轴向和径向上的结构组织不同,在不同方向上必然表现出不同的力学性质,即各向异性,因而,秸秆在切割、揉搓、压缩及粉碎等加工过程中受力而体现出各种特性,如抗拉(折、弯)、抗压(挤)和抗剪切(磨、撕)等。对于同一种秸秆,这些特性受秸秆成熟度、含水率以及生长位置等多种因素的影响。同时,秸

收稿日期:2003-06-23

基金项目:国家“十五”科技攻关计划(2002BA514A-11)、国家农业科技成果转化资金(02EFN216900724)

作者简介:孟海波,博士研究生;韩鲁佳,博士生导师,教授,主要从事生物质资源开发利用与环境方面的研究

秆外皮与内稃的机械强度差异较大,外皮机械强度高,内稃较低。据测定玉米秸秆的纵向抗拉强度可达 90 MPa,但横向抗拉强度仅为 3 MPa 左右^[1]。另外,秸秆还具有松散,体积大,密度小的特性,不便于运输、贮存和加工处理。

1.2 秸秆物料加工方式及设备

根据施力种类与方式的不同,秸秆加工的基本方式包括弯曲折断、压缩流变、剪切破坏、粉碎等。研究表明,作物秸秆具有韧性大、易变性等特点,适宜采用的加工方式一般是剪(砍、滑)切、揉搓(切)、粉碎与压缩。被广泛应用于生产中的加工机具主要有铡草机、粉碎机、揉搓(切)机和压(打)捆机等。

目前常见的秸秆加工机具主要有铡草机、粉碎机和揉切机等。铡草机是较早定型的产品,该机型主要利用切断的加工方式,具有结构简单、功耗低、生产率较高等特点。但是,铡草机在加工过程中一般无法破碎秸秆的茎节,从而影响了牲畜的采食量和消化率,存在较大浪费。秸秆粉碎机是目前品种比较多的一类秸秆加工机具,其加工方式主要是粉碎和揉搓。粉碎机具加工出的秸秆饲料因粒度细小而不利于反刍家畜的消化,因此主要作为秸秆饲料制粒和压块等工序的前处理。另外,秸秆粉碎机动力消耗较大。

秸秆饲料揉碎机是我国近年来研制的一种新机型,包括揉搓机和揉切机。揉搓机主要采用拉伸、揉搓和粉碎的加工方式。但这种机具也存在一定不足,如生产率较低,加工方式没有利用铡切因而功耗较大,用于多汁和韧性较大物料时容易阻塞机具等。秸秆揉切机综合利用了剪(砍、滑)切、揉搓和粉碎的加工方式,使秸秆在加工过程中既能受到多次铡切,又能受到不断的揉搓和粉碎,处理过的秸秆较好地满足了加工质量要求。

秸秆打捆机采用压缩的加工方式,将松散、密度低的秸秆压缩成高密度草捆,解决了贮存和运输的问题。对秸秆物料打捆机的开发研制起源较早。1870 年左右美国人设计了第一台固定式捆草机^[2,3]。20 世纪三、四十年代,捡拾压捆机研制成功,以后得到了迅速发展^[3]。我国自 20 世纪 50 年代开始生产畜力固定式捆草机,60 年代后引进国外的小方捆捡拾打捆机并进行试验研究,至今已开发研制了包括圆捆机和方捆机在内的多种秸秆、饲草打捆机和田间捡拾打捆联合作业机具。

2 秸秆物料加工特性的研究现状

2.1 秸秆压缩流变特性的研究

国内外对秸秆物料压缩流变特性的研究较早且多。1938 年德国学者 Skalweit 首次开始研究在密闭容器内低速压缩农业纤维物料^[3],之后,英国、美国、加拿大、日本、波兰及我国的学者也都对农业纤维物料的压缩过程进行了研究。这些研究从不同角度探讨不同压缩方式下压缩力与密度、压缩力与压缩量及密度与湿度之间的关系。其中,德国、前苏联、波兰及我国的学者主要研究压捆过程,英国、美国和加拿大等国的学者主要研究压块和压饼过程,日本学者主要研究粉体农业纤维物料的模压成型过程。近年来,我国一些学者在玉米秸秆粉粒体模压成型方面取得了一定的研究进展。

Rehkuglar 等尝试用流变力学的一些模型模拟研究秸秆在压缩过程中的变化规律^[4],但仍然存在压缩理论与工程生产脱节的倾向。杨明韶等在模拟生产条件下完成了农业物料压缩试验研究,利用高密度压捆机对揉碎的玉米秸秆进行压缩试验^[5],探讨了压缩全过程粗纤维物料的一般流变规律,为压捆机的优化设计提供了依据。

郭康权等对秸秆在模具中模压成型时的流变特性进行了研究^[6]。将粉碎的玉米秸秆,经过分级、干燥或加水调湿后放进锥形模具中进行压缩试验,结果表明,随着压缩力、模具锥度的增大和原料粒度的减小,成型物高度增高、底厚变薄。赵东等通过密闭型圆筒准静态压缩试验^[7],推导并建立了玉米秆粉粒体压制成型的本构方程,并用有限元模型进行了模拟。

2.2 秸秆剪切、拉伸等特性的试验研究

由于秸秆具有各项异性的物理性质,在进行加工机具改进和新机型设计的研究中,许多学者对秸秆的力学特性进行了试验研究。李媛对玉米秸秆进行了三点弯曲、轴向剪切和径向剪切实验研究^[8]。结果表明,对秸秆进行的加工是三点弯曲、径向剪切以及轴向剪切等综合作用的结果,其中包括剪切、拉伸等作用。马素玲对玉米秸秆的揉切特性进行了试验研究^[9],提出用能量消耗这一指标描述秸秆在其加工过程中的力学特性,并利用改装的试验台考察了影响能量消耗的主要因素。

德国学者 O Dogherty 等对小麦秸秆的物理机械特性进行了试验研究^[10]。通过一系列试验研究

得出:麦秸的拉伸强度为 21.2~31.2 MPa,剪切强度为 4.91~7.26 MPa,杨氏模量为 4.76~6.58 GPa,刚性模量为 267~547 MPa;并指出小麦秸秆的成熟度、含水率、温度等对这些基本参数都有不同程度的影响。孙骊等对往年收获的干麦秸和乳熟期的绿麦秸的压缩、剪切性能做了测试和研究^[11],用线性回归方程式表示出茎秆在弹性范围内的力学特性。

2.3 秸秆加工特性影响因素的试验研究

张晋国等利用自制的秸秆切碎试验台研究了麦秸的受切特性,研究了不同含水率的麦秸在切刀速度不同以及有定刀和无定刀情况下的切断率^[12]。其研究表明,秸秆含水率是影响切断率的最主要因素之一。含水率增加,所需切断速度大幅度提高。要切断高含水率的秸秆,在有定刀的情况下仍需 $40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上的切割线速度。另外,有无定刀和刀刃锋利程度都是影响切断率的主要因素。毛罕平等认为在无支撑状况下,要完全切碎玉米秸秆(长度小于 10 cm),切刀的刀端线速度需达到 $34 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ^[13]。

吴子岳等在自制的秸秆切碎试验台上对两端自由支撑条件下玉米秸秆切断速度和切断功耗进行了正交试验^[14]。结果表明,切割秸秆的方式(如砍切或滑切)、切断速度和受切根数对切断功耗的影响最显著。

3 秸秆物料的特性及其利用研究存在的主要问题

3.1 测控系统大多无法满足工况条件

目前,对秸秆力学特性的试验研究还没有比较成熟和普遍适用的方法和设备,多采用简易手动试验装置,不仅无法满足秸秆加工过程的工况条件(铡草机一般切断线速度在每秒几十米以上),而且测量精度和研究效率都很低。王剑平等设计研究了一种农业物料力学试验测控系统^[15],用来测试农业物料的力学特性,并完成了桃子糖度和坚实度的相关性研究,以及梨的各向机械特性差异的试验研究。该装置是在平稳加载和卸载的前提下进行的,速度较慢,用于研究秸秆的力学特性无论测量精度还是试验条件还不能完全满足要求。雷得天等研究了农业物料力学-流变学性质测试装置,配置了电子计算机数据采集及处理测试系统^[16]。该系统可以完成物料拉伸、压缩、剪切、弯曲等常规力学试验,并能进行

典型流变学特性测量,其局限性是加载速度较低。李媛^[8]、马素玲^[9]对玉米秸秆力学特性的研究也是在缓慢加载的条件下进行的,这与秸秆加工的实际工况条件相差较大。

3.2 定性研究多,定量研究较少

在设计研究秸秆物料加工机械(包括铡草机、粉碎机或者揉碎机)的过程中,对秸秆力学特性的研究都是必不可少的。由于加工机械作业速度较快,工况复杂,定量测试秸秆力学特性的难度较大,所以大多数研究限于定性分析。张晋国等在研究玉米秸秆的切割特性时主要考虑了切断速度和切断功耗 2 个指标^[12],选取了切割速度、切割方式、含水率等因素及其水平,对加工工况下秸秆加工特性对指标的影响进行了定量分析,其研究仍有较大的深入空间。

3.3 对加工过程中秸秆受力状况的研究不足

目前,对新型秸秆加工机具的研究往往侧重于机械材料、结构和关键部件等方面的选择与设计;试验过程中,主要研究机具生产率的大小,主轴的受力状况,负载功耗等。对于被加工物料——秸秆的力学特性仅限于经验测试或理论估测,特别是秸秆在剪切、粉碎和揉搓加工过程中其应力、应变状态方面的研究较少。实际上,以剪切加工为例,秸秆在刀具刃口附近产生非常复杂的应力和应变,而应力、应变状态的分布直接影响剪切加工过程和最终结果。秸秆断裂、刀具的磨损等,都与应力和应变状态有关。因此,进一步展开这方面的试验研究具有实际意义。

4 讨论及建议

4.1 进一步研究冲击载荷下秸秆的加工特性

大量研究表明,不同载荷形式作用于秸秆物料,导致秸秆的断裂机理不同。如冲击载荷对秸秆的作用是瞬时和不连续的,秸秆在冲击载荷下的断裂具有许多明显不同于静载条件下的特点,如其强度的延伸率、断裂韧性等指标均有所改变。因此,在建立秸秆受力形变或断裂动力学模型时,必须要考虑这些因素。

另外,在不同的应变率下,材料的力学性能往往是不同的。加工机具作业速度较高,秸秆物料在切割、粉碎和揉搓(切)的过程中必然表现出不同于静态或低速加工状态下的力学特性。探讨秸秆物料在高应变率条件下的力学特性是一种较新的研究思路。

4.2 利用有限元方法对秸秆加工特性进行研究

随着计算机技术的发展,基于个人计算机平台的虚拟技术和软件正成为测试和控制领域的重要应用工具。有限元分析软件 ansys 的开发应用为模拟加工试验和辅助分析提供了先进的手段。秦泗吉在研究板材剪切与冲裁加工过程时采用了有限元分析^[17],其模拟分析与试验结果基本一致。采用有限元分析方法对秸秆加工过程进行分析研究需要解决2个关键问题:一是构建合理的力学模型,恰当地拟合秸秆的受力状况以及材料特性;二是准确地简化载荷。要解决上述问题首先需要进行秸秆加工试验,通过部分单因素试验,确定各因素的水平,并为有限元分析边界条件及载荷的确定提供依据。然后,将试验结果与模拟分析结果进行对照,使之趋于基本一致(误差应小于5%)。

4.3 加强秸秆加工特性在机具设计中的应用研究

目前,设计和改进秸秆加工机具的一般思路是,经验设计、加工样机、样机试验、部件和结构改进、中试试验、产品定型试验等。秸秆物料的加工特性是选择、确定加工机械设备技术参数的重要依据。在设计秸秆粉碎、揉切和打捆机具时,必须了解秸秆物料的破碎力、破碎能和压缩时的流变特性,以便确定最佳工作方式和合理的功率配备。秸秆的动力学特性是选择加工机具工作部件运动参数的主要依据。例如,较深入地研究玉米秸秆在揉切机中受剪切时的受力状况,可以进一步探讨刀具的磨损规律,从而对刀具进行优化设计等。

在秸秆压缩工程的研究中,为了提高生产率主要采用加大压缩频率的方法,这带来了功耗上升、压捆机动力不平衡和冲击力过大的新问题。所以,单方面通过增加压缩频率而提高生产率是有局限性的。进一步探索压缩过程,掌握秸秆在压缩过程中所表现出的力学特性具有实际意义。另外,被压缩后的秸秆因应力松弛等原因而引起变形甚至散捆等问题,需要进一步对压缩秸秆形态保持机理进行探讨。

进一步研究秸秆物料的加工特性,在实际工况下进行模拟试验分析,探讨秸秆在加工过程中的应力应变状态,为秸秆物料加工机具的研究开发提供理论基础,并开辟秸秆物料新的利用方式和途径,都

具有较为广泛的研究空间和发展前景。

参 考 文 献

- [1] 杨中平,杨林青,郭康权,等. 玉米秸外皮碎料板制板工艺的初步研究[J]. 西北林学院学报, 1995, 10(3): 67~72
- [2] 王春光. 牧草压缩理论发展现状[J]. 畜牧机械, 1989, 2:15~17
- [3] Kanafojski C, Karwowski T. Agricultural Machines, Theory and Construction[M]. Washington: Foreign Scientific Publisher, 1976. 134~147
- [4] Rehkuglar G E, Buchele W F. Biomechanics of forage wafering[J]. Trans of the ASAE, 1969, 12(1): 69~71
- [5] 杨明韶,张永,李旭英. 粗纤维物料压缩过程的一般流变规律的探讨[J]. 农业工程学报, 2002, 18(1): 135~137
- [6] 郭康权,赵东,杨中平,等. 植物秸秆模压成型流变特性的试验研究[J]. 西北农业大学学报, 1995, 23(3): 11~15
- [7] 赵东,黄文彬,郭康权. 玉米秆粉粒体压制成型模型的研究[J]. 西北农业大学学报, 1998, 26(5): 44~47
- [8] 李媛. 新型秸秆揉切机的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 1999
- [9] 马素玲. 玉米秸秆揉切特性及其虚拟仪器测试系统的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2000
- [10] Doherty 'O M J. A study of the physical and mechanical properties of wheat straw [J]. Agric Engng Res, 1995, 62:133
- [11] 孙骊,赵豪杰,李锁年. 麦秸压缩剪切特性的研究[J]. 西北农业大学学报, 1998, 26(4): 106~109
- [12] 张晋国. 带状粉碎免耕播种机的试验研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2001
- [13] 毛罕平,陈翠英. 秸秆还田机工作机理与参数分析[J]. 农业工程学报, 1995, 11(4): 62~66
- [14] 吴子岳,高焕文,张晋国. 玉米秸秆切断速度和切断功耗的试验研究[J]. 农业机械学报, 2001, 32(2): 38~41
- [15] 王剑平,盖玲,王俊. 农业物料力学试验测控系统设计[J]. 农业机械学报, 2002, 33(1): 51~53
- [16] 雷得天,马小愚,张展. 农业及食品物料的力学-流变学特性的应用研究[J]. 农业机械学报, 1996, (1): 7~11
- [17] 秦泗吉. 板材剪切与冲裁加工过程有限元模拟及实验研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2001