

苜蓿生产全程机械化技术研究现状与发展分析

王德成 贺长彬 武红剑 尤 泳 王光辉

(中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 苜蓿是优质牧草之一,随着“粮-经-草”三元结构到“粮-经-畜-草”四元结构发展模式的扩大,国内对苜蓿的需求量日渐增大。为了向我国苜蓿产业发展提供参考和支持,提出了适宜我国国情的苜蓿生产全程机械化技术模式,对国内外苜蓿机械化生产技术现状进行了概述,并进行了总结和分析。我国苜蓿生产全程机械化技术模式包含苜蓿种子工程、土地整理、播种、田间管理、刈割收获、储藏运输和草产品加工7种机械化生产技术工艺,30多个具体的机械化生产环节。目前,我国已经初步形成了适合我国国情的苜蓿生产全程机械化技术体系,但与国外苜蓿机械化生产技术还存在一定差距,存在生产环节发展不均衡,机械化生产技术存在短板,产业化程度低,基础性研究落后,生产工艺与机械化生产技术联动性差,以及生产装备适用性与可靠性低等问题。构建完整的苜蓿生产全程机械化技术体系,发展具有中国特色的苜蓿机械化生产体系,加强土壤-苜蓿-机具相互作用关系理论技术体系研究,实现苜蓿生产机械集成化、智能化,将是我国苜蓿机械化生产技术体系的发展方向。

关键词: 苜蓿; 全程机械化; 产业化; 技术体系

中图分类号: S-1; S22 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)08-0001-25

Review of Alfalfa Full-mechanized Production Technology

WANG Decheng HE Changbin WU Hongjian YOU Yong WANG Guanghui

(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Alfalfa is one kind of high-quality forage grass. With the development pattern expanding from food crop - commercial crop - forage, ternary structure, to food crop - commercial crop - livestock - forage, quaternary structure, the domestic demand for alfalfa is increasing. In order to provide references and supports for the development of alfalfa industry in China, and propose appropriate full-mechanized alfalfa production development patterns which are suitable for China, the present situation of alfalfa mechanized production technology in China and foreign countries were reviewed, summarized and analyzed. The full-mechanized alfalfa production technical pattern included seven mechanized production technology, i. e. alfalfa seed project, cultivation, sowing, field management, high-quality harvest, storage and transportation, and forage products processing, with more than thirty production links. For now, a suitable mechanization technology system for alfalfa production has initially formed in China, which means that available equipment could be found and used during the production operation with not completing machine matching, high production cost and low-efficiency problems. Certain gaps about the alfalfa mechanized production technology existed between China and foreign countries. Issues of uneven development of production processes, short boards in the mechanized production technology, low industrialization, basic research backward, poor linkage and reliability of equipment of the mechanized production operation still existed. Establishing a complete full-mechanized technology system for alfalfa production, developing a special alfalfa mechanization technology system with Chinese characteristics, strengthening theoretical system research of soil - alfalfa - machine interaction, and realizing alfalfa production machinery with integration as well as intellectualization, would be the development direction of alfalfa mechanized production technology system in China.

Key words: alfalfa; full-mechanized; industrialization; technology system

引言

苜蓿是一种多年生优质牧草,因其营养物质丰富、应用广泛被誉为“牧草之王”。发展苜蓿产业对调整种植业结构,推进“粮改饲”进程,提升草产品和畜产品市场竞争力具有重要意义。

随着苜蓿生产规模的扩大,和国内对优质苜蓿产品需求的增加,建立高效低损的苜蓿机械化生产体系的需求越来越迫切。而我国苜蓿产业发展存在优质苜蓿供不应求、产品质量水平参差不齐和产业化程度较低等问题,这与我国苜蓿机械化生产技术水平落后有很大的关系。为提升我国苜蓿生产机械化作业水平,消除装备技术体系薄弱对苜蓿产业发展的阻碍,应综合分析我国苜蓿生产机械化技术水平现状,基于国内苜蓿生产实际,坚持自主研发国产机具和吸收引进先进技术相结合,填补技术空白、提升薄弱环节、建立适用于我国优质苜蓿生产需求的苜蓿生产全程机械化技术工艺模式,从而提高我国苜蓿产品质量,推动苜蓿产品生产标准化体系建设,保障苜蓿产业健康发展。

1 苜蓿生产全程机械化技术模式

苜蓿生产全程机械化技术是指以苜蓿为作业对象,以耕整地、播种、收获、干燥和产品加工为重点环节,推广选用先进适用的农机化技术及装备,建立适宜的全程机械化生产模式的综合集成技术。全程机械化生产技术在完成生产要素环节轴向串联覆盖的前提下,应重点根据不同地区的自然条件、经济条件、生产规模、机械化水平等因素,剖析关键环节内部的不同方式方法与工艺路线,构建具有作物针对性、环境适应性、区域需求性、工艺匹配性和规模经济性的多元全程机械化生产技术模式。因此,为实现生产环节全覆盖、作业环境全适应、工艺模式全兼容,对建立苜蓿生产全程机械化技术也提出了针对性的要求,主要包括:

(1)作物适应性。机械化生产作业工艺模式需与作物特性相适应,苜蓿不同生长期的营养物质含量、植株不同部位营养成分含量及干燥失水速率均有很大区别,因此在选用苜蓿收获工艺、加工技术时应针对上述特点研发选用刈割压扁、一体化青贮等适用技术,最大程度保护苜蓿营养物质,降低损失。

(2)作业条件适应性。我国苜蓿种植区域覆盖到华北、东北、西北和南方等多地区,涉及到的地形包括平原、山地和丘陵等,不同的区域气候和地形等环境因素成为苜蓿生产机械的一个主要限制因素,因此苜蓿机械化生产模式应秉持大型牵引式作业机

具(平原大地块作业)和自走式轻便型设备(山地作业)并举,围绕我国苜蓿主要生产区域,发展针对性较强的苜蓿生产机械,重点突破区域的环境因素限制,因地制宜,提高生产效率。

(3)产品需求适应性。苜蓿产品应用广泛,苜蓿生产全程机械化技术应满足鲜草饲喂、干草调制、青贮、草粉、草颗粒、蛋白质提纯以及生物发酵等用途。

(4)经济适用性。苜蓿生产全程机械化技术工艺模式应为不同生产规模、不同组织形式和不同投入成本条件下的苜蓿生产提供相适应的技术模式和具体装备的配套方案。

针对上述要求,结合我国苜蓿主产区生产实践情况,在现有技术研究基础上,重点突破种子工程、播种、田间管理、改良促生、刈割压扁、打捆、加工和青贮等关键环节机械化技术,经过原始创新、集成配套、优化配置、性能试验、跟踪考核和示范推广,提出一种适应我国苜蓿生产的全程机械化技术模式,将苜蓿生产全程具体划分为:种子工程—土地整理—播种—田间管理—刈割收获—储藏运输—草产品加工7个技术环节,具体技术工艺流程如图1所示。

2 苜蓿种子工程技术与装备

苜蓿全程机械化生产过程中,常见的苜蓿种子工程技术内容主要包括苜蓿种子机械化收获、播前处理和小区育种等。

2.1 苜蓿种子机械化收获技术与装备

我国苜蓿种子的主要产区包括甘肃省、河西地区、陕西省、宁夏回族自治区、内蒙古自治区和新疆维吾尔自治区等地区,但地域差异性显著,其中西北干旱、半干旱灌溉农业区的产量较高^[1]。苜蓿荚果和叶片的含水率是其收获过程中主要考虑的因素。苜蓿种子成熟期不一致,在收获季节,苜蓿叶子和茎秆均具有较高含水率,并且仍有开花现象,这种生长特性使其与其他种子的收获工艺存在显著的差别。国外常用苜蓿种子收获工艺包括分段收获法和喷药直接收获法,两种方法的工艺流程如图2所示^[1-2]。

由于苜蓿种子成熟期内苜蓿茎叶均为绿色,且水分含量高,直接收获时植株所产生的浆液不仅给种子的脱粒清选带来很大困难,还可能对种子和收获机具产生影响,因此不管是分段收获还是喷药直接收获,在收获种子时必须保证苜蓿茎或叶的水分降低到一定值。

我国对苜蓿种子机械化收获工艺及配套机具的研究主要包括全喂入收获和半喂入收获两方面,全喂入收获的主要工艺为:全株切割—螺栓疏松—筛

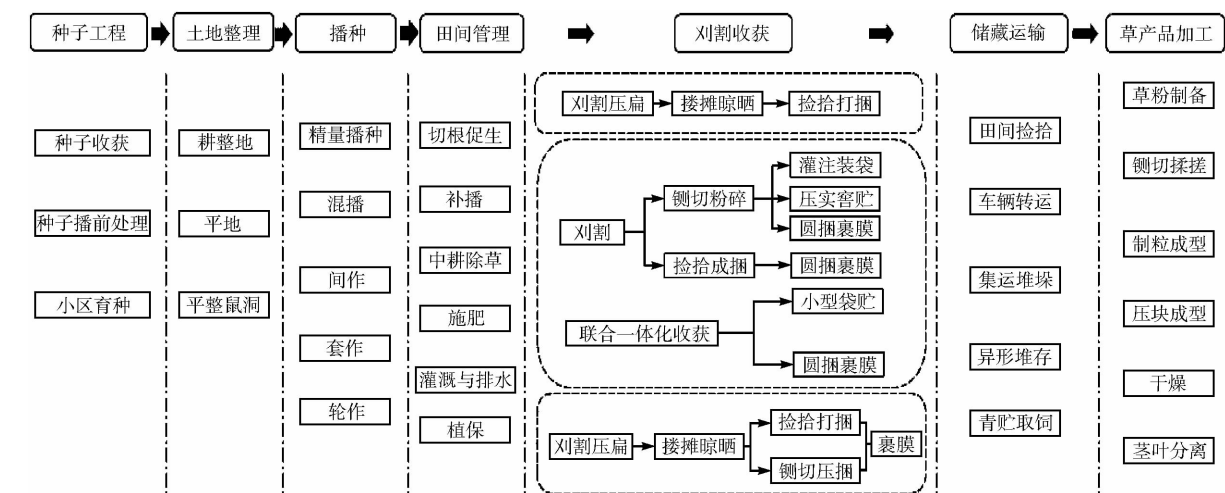


图 1 苜蓿全程机械化生产技术工艺模式

Fig. 1 Full-mechanized production technology of alfalfa

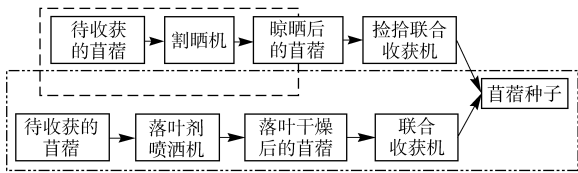


图 2 苜蓿种子机械化收获工艺

Fig. 2 Mechanized harvesting technology of alfalfa seeds



图 3 9ZQ-2.7 型苜蓿种子采集机

Fig. 3 9ZQ-2.7 type alfalfa seed collection machine

选—分离—种子与茎叶混合物收集；半喂入收获的主要工艺为：种荚疏刷—风力疏松—沉降—种子与茎叶混合物收集，半喂入收获一般以疏脱辊筒的形式进行种子采集，疏脱下的物料直接进入沉降室再进行收集^[3]。

早期苜蓿种子收获机械主要包括谷物收获机和专用草籽收获清选机，其中大部分苜蓿种子收获机械都是在现有联合收获机上进行改装的^[2-5]。王凤清等^[2]提出了一种站秆式收获工艺（半喂入收获即站秆收获），并设计了 92Z-1.4 型苜蓿种子收获机，能一次性连续完成苜蓿站秆脱荚、物料抛送、脱粒、物料输送和物料贮存的工艺过程，实现了苜蓿植株站立不切割情况下的苜蓿种子割前脱粒收获。

中国农业机械化科学研究院呼和浩特分院针对草籽机械化收获存在的损失大、净度低的普遍问题，设计了 9ZQ-2.7 型苜蓿种子采集机（图 3）和 5TQ-110 型苜蓿种荚脱粒清选机，采用纵向倾斜滚筒采集头，可一次性对整株苜蓿完成脱荚，种荚梳脱率大于 96%，总损失率小于 6%，其中，5TQ-110 型苜蓿种荚脱粒清选机是配套机具，组成了苜蓿种子收获清选机组，形成了先采集种荚后对干燥种荚进行清选得到苜蓿种子的机械化收获工艺^[1]。

陈海霞等^[3,6]设计了柔性胶丝与挠性弹齿组合安装的疏脱部件，并采用气流吸允的收集方案，设计了 9ZS-1.3 型柔性苜蓿种子收获机。国外对苜蓿种子收获机械研究较早，所涉及的苜蓿种子收获机

械包括改进的联合收获机、捡拾联合收获机、专用的牵引式苜蓿联合收获机、青草种子收获机械和自走式站秆种子收获机械等，而国内对苜蓿种子收获机械的研究仍处于发展阶段。损失大和净度低是我国目前苜蓿种子收获机械存在的主要技术问题，苜蓿种子机械化收获技术及机具仍是苜蓿生产全程机械化过程中的一个相对薄弱的环节。

2.2 苜蓿种子播前处理技术与装备

苜蓿种子休眠、老化生理所造成的种子活力低下等问题一直是种子科学关注的热点与难点的问题^[7]。我国牧草种子机械加工的基本过程包括初清、除芒、干燥、清选分级、包衣、计量包装和贮存等方面^[8]。一般都采用干燥、精选、晒种、浸种、拌种、包衣和催芽等化学和生物学方法对种子进行播前处理^[9]，通过加工处理，获得颗粒大小均匀一致、饱满健壮和无菌防病的优质商品种子。经过播前处理，确实克服了苜蓿种子的相关问题^[10-11]，但也存在诸多弊端，如化学处理方法易产生药害，造成土壤环境的破坏；某些防治病虫害的药剂不能与根瘤菌、植物生长调节剂同时用于种子处理等。

近年来，以电、热和机械为代表的物理技术处理种子的方法开始得到应用，以物理手段作为植物生长发育促进因子的新型农业技术应运而生^[12]。种子磁化技术是近年发展起来的一项种子处理技术。SHAO 等^[13]发现应用磁化处理可以改善种子发芽

情况。应用于种子的外磁场主要有恒定磁场、脉冲磁场、旋转磁场、核磁共振以及磁化水、电磁场等,可有效地激发种子内部酶的活性,改善种子素质。除磁化处理技术外,也可采用射频等离子体处理牧草种子。DOBRIN 等^[14]发现等离子体处理对种子早期生长有促进作用,MATRA^[15]证实了射频离子能够促进种子发芽并提高种子的干重,而ZAHORANOVA 等^[16]则发现等离子体处理可以提高种子润湿性,王德成等^[17]提出了一种冷等离子体处理的苜蓿育种方法,与未经处理的相比,苜蓿种子发芽能力、株高、产量或制种产量中的至少一种目标性状表现出了提高或增加的特点。通过射频等离子体处理技术,可以对苜蓿种子产生积极的生物学作用,种子抗逆基因的表达增加了作物产量、改善了产品品质。

常见苜蓿种子机械化播前处理过程工艺如图 4 所示。

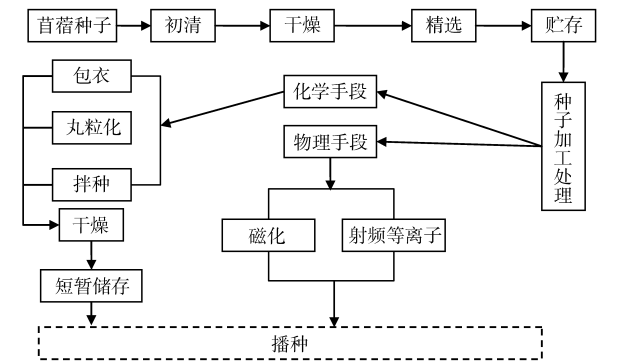


图 4 苜蓿种子机械化播前处理工艺

Fig.4 Alfalfa seed mechanized sowing pre-treatment process

常见种子处理设备包括牧草种子清选机、种子包衣机、拌种机、种子磁化处理机和射频离子能种子处理仪等,但专用的苜蓿种子处理设备市场上并不多见。

2.3 苜蓿机械化小区育种技术及装备

与以美国为代表的西方发达国家产业需求不同,我国当前的主要苜蓿育种目标包括抗寒、耐盐碱品种的选育,抗病、抗虫品种的选育,根蘖型苜蓿品种的选育等,主要解决苜蓿产量、抗性生产需求,而国外从事的主要育种目标是低木质素含量苜蓿品种培育,多酚氧化酶(PPO)苜蓿育种和高产杂交苜蓿育种等,主要是解决奶牛业、奶牛饲养业等对苜蓿质量方面的需求以及提高种子纯度和基因安全问题^[18]。

长期以来,我国育种专家通过传统的手工作业完成小区试验的播种、收获和种子加工处理等各环节的烦琐工作程序^[19]。采用机械化作业不仅可以

提高试验的精确度,减少试验误差,而且还可以扩大苜蓿育种规模加速试验过程,提高苜蓿育种工作效率。目前小区育种机械主要包括小区种子加工处理机械、播种机械、收获机械和田间植保机械等。

小区育种播种机主要包括小区单粒播种机、小区条播播种机和单行播种机。小区单粒播种机是专为在试验小区进行精确单粒播种而开发设计的,也就是实现小区精密播种;小区条播播种机是为在试验小区进行准确播种而设计,按照规定的播种量(一定长度区段内的粒数)、行距和播深将同一品系的种子播入播行内,播完规定长度后,种子不得存留于排种装置内^[19],能够实现多行作业;而小区单行播种机主要用于为单穗或单株植物种子进行准确播种。处于国际领先地位的奥地利温特斯泰格公司(Wintersteiger)、丹麦霍尔公司(Haldrup)等设计生产的小区育种机械已经形成了完整的育种机械体系,特别是对于小麦、玉米、大豆等粮食作物或经济作物,对于牧草等小粒种子的小区育种机械也可通过更换特定部件后进行小区育种。如温特斯泰格公司的 Monoseed GP 单粒播种机(图 5a),配备标准的带有孔排种盘的播种元件,通过组装不同的分配系统和多种模块系统,机器可以进行多种功能操作,可用于播种小型谷类、油菜籽、玉米、甜菜或类似种子(大的和小的种子)的小区播种作业;Plotseed 系列小区条播机(图 5b)采用皮带锥体式排种器和蜂窝轮结构,适用于播种精细种子(如牧草种子)、谷物及大粒的豆类种子。丹麦霍尔公司 SB-25 型皮带锥体式播种机(图 5c)和 SR-30 型单行播种机(图 5d),通过气力式排种系统,可用于小区播种精细种子或牧草种子。黑龙江省农垦总局红兴隆科研所研制的 XBJ-150 型自走式(悬挂式)小区条播机,采用离心式排种器的结构,可播小至牧草,大至豆类的种子^[20]。王德成等^[21-22]设计的自走式小区牧草播种作业机械,包括多功能自走式动力平台和小区专用播种机,用于实现牧草小区育种。

相比之下,国外小区育种机械化播种技术相对成熟,田间育种的小区播种和管理方面已应用专业机械和智能化播种机械进行。而我国机械化制种生产相对薄弱,制种单位多数以农户为主,生产效率低,种子质量难以得到保障^[23]。此外,在牧草小区收获机械等方面国外也有相对成熟的机械,如哈德瑞普公司(HALDRUP)F-55 型小区收获机(图 6),适用于牧草或草药等作物的收获。我国在小区牧草收获方面仍基本上采用人工收获的方式,专用的小区牧草收获机械则少有研究。针对苜蓿小区育种方面,国内外并无专用的小区育种机械,但国外牧草小



图 5 小区育种播种机举例

Fig. 5 Examples of planters on test plot



图 6 F-55 型小区收获机

Fig. 6 F-55 type forage harvester

区育种机械具有良好的通用性和适用性,可以通过其他牧草小区育种机械进行苜蓿的机械化小区育种作业,并且在小区种子收获、田间植保以及种子加工处理方面均有相对成熟的设备,而国内目前在这方面尚没有成熟的设备,研发专用的小区生产机械是未来需要解决的一个技术问题。

3 苜蓿田间机械化生产技术与装备

3.1 苜蓿机械化耕整地技术与装备

我国苜蓿种植主要以人工建植草地为主,与粮食作物或者经济作物的土地条件相似,所用的耕整地机械也与大田作业区域的耕整地机械基本相同。由于苜蓿是深根作物,且种子细小,种子顶土能力弱,所以对土壤细碎程度有一定要求,而整地质量好,直接影响苜蓿的出苗率和整齐度。表面细碎的土壤状态有利于苜蓿出苗和出苗整齐,利于根系的生长和水分的渗透^[24]。

苜蓿机械化耕整地作业环节包括耕、耙、耨(耨)和压等环节,同时根据土地情况还可适当将深松和旋耕等作业环节加以配合。在翻地基础上,采用圆盘耙、钉齿耙耙碎土块,平整地面,可提高土壤颗粒细度。耕地时要求深翻或深松 25 ~ 30 cm;耙地时要求耙出杂草根茎,耙碎土块,混拌土肥,达到

表面平整;耨(耨)地时要求耨(耨)碎土块和土壤,达到粗细均匀,质地疏松;镇压时要求土质细碎、地面平整、土层压紧、上虚下实,达到保墒效果^[25]。

考虑到作业成本及综合效率,国外往往采用复合式耕整地机械,能有效完成混合前茬、碎土平整、和墒保墒作业^[24]。而国内以中小型机械为主,也采用复式联合整地的方式,单式作业居多,分段完成破茬、碎土以及整地等作业环节,而在机具关键部件的优化设计、可靠性问题以及作业效果方面仍是苜蓿耕整地机械需要解决的技术问题。国内外常见典型耕整地机械有美国大平原 T1-300 型联合整地机、约翰迪尔 2230LL 型联合整地机、牧神 1ZL-7.0 型联合整地机,还有常见的铧式犁、旋耕机和深松机等,可实现土地的深松、碎土和平整土壤等各项作业。

3.2 苜蓿机械化播种技术与装备

依据苜蓿种植区域的地形、土壤条件以及其他特点来划分,苜蓿的播种方式可分为条播、撒播、穴播和混播。苜蓿栽培若为草用,行距一般为 30 cm;若为种用,行距则一般为 20 cm。播种量为 15 ~ 22.5 kg/hm²,播种深度一般为 1 ~ 4 cm^[26]。由于牧草种子具有颗粒小、产量低的特点,特别是苜蓿种子(紫花苜蓿种子千粒质量仅约为 1.95 g^[27]),其物理特性与粮食作物和其它禾本科牧草种子有着明显的不同,因此与其他作物机械化播种作业相比,苜蓿播种机械具有一定的特殊性。目前所采用的苜蓿播种技术包括精量播种、禾豆混播以及作物间作、套作和轮作等。苜蓿机械化播种的一般工艺包括划破草皮、松土、播种和覆土镇压^[28]。国内最早的牧草播种机主要用于草原方面的建植,如 9SBY-3.6 型牧草种子撒播镇压联合机组和 9LBZ-2.0 型重型牧草播种机等,对于人工种植草场用的牧草播种机则起步较晚,特别是苜蓿精量播种机。苜蓿播种机开始由传统的小麦或谷物播种机更换上小槽轮排种器或小窝眼排种器改装而成,用于苜蓿建植,虽然各项指标不能达到牧草播种要求,但使用成本较低^[29]。中国农业机械化科学研究院开发的 2BMC 系列牧草精量播种机(图 7a)可专门用于播种牧草等小粒种子^[30]。李长荣等^[31]设计了 2BMC-24 型牧草精少量播种机,采用控制式微型精量排种器、双圆盘种肥分施开沟器、单组仿行镇压轮,满足了苜蓿等小粒种子小播量、浅播种的农艺要求,同时实现种肥分施、播后覆土镇压。戴立勋等^[32]设计了 2BC-1.2 型山地牧草播种机。陶桂香等^[33]研制了 2BMY-5 型牧草免耕播种与液体施肥机(图 7b),该机采用小型外槽轮式排种器,总排量一致性变异

系数为 5.56%。中国农业机械化科学研究院呼和浩特分院研发的 9BQM-3.0 型气力式牧草免耕播种机(图 7c),通过进行苜蓿播种试验得到排量一致性变异系数为 3.41%,可实现高速单粒体排种^[34]。赵春花团队针对山地丘陵复杂地形和机械化种植牧草的作业要求,研制了 2BC 系列小型山地牧草播种机(图 7d),适合梯田、套种田等中小地块硬实种子

的无级精量播种^[35-36]。国外种植面积较大,用于播种苜蓿的机械多数以大型为主,且牧草播种机与小麦等播种机可通用,通常既可以播禾本科牧草,也可以播豆科牧草。比较常用的国外牧草播种机包括美国百利灵 SS 系列保苗播种机(图 8a)、约翰迪尔免耕播种机(图 8b)、美国大平原免耕播种机(图 8c)和凯斯播种机(图 8d)等。



图 7 国内典型苜蓿播种机

Fig. 7 Examples of domestic alfalfa seed planter



图 8 国外典型牧草免耕播种机

Fig. 8 Examples of foreign no-tillage planter

3.3 苜蓿机械化田间管理技术与装备

苜蓿机械化田间管理技术是指在苜蓿从播种到收获的整个栽培过程中,通过机械手段进行各种田间管理措施,目前所采用的苜蓿机械化田间管理技术包括苜蓿补播、切根促生、中耕除草、施肥、灌溉排水和植保技术等。

苜蓿播种或次年越冬返青时,会出现缺苗的现象,适时的补播可以提高苜蓿草地的植被盖度和产量,提高草场生产力。国内外现有的牧草补播机械主要针对天然退化草场而设计,主要用于改良天然退化草场,如 91BS-2.4 型草原松土补播机、9MSB-2.1 型牧草免耕松土补播机、9MSB-2.1 型草地免耕松土播种联合机组等^[29],而用于苜蓿补播的专用机械市场并不多见。专用苜蓿补播机可以实现对缺苗率达到 40% 的人工苜蓿草场的缺苗断垄区域的精确补播,在补播的过程中连续施肥,并将缺苗检测、补播控制、定量施肥功能进行了集成。张淑敏等^[37]针对苜蓿补播过程中的问题还设计了一种新型紫花苜蓿补播排种器,对补播机进行了优化和改进。

苜蓿在种植生长第 2 年到第 4 年产量相对较高,但此后开始降低,其主要原因在于根系开始老化^[38],使得苜蓿根系活力下降。侯扶琴等^[39]对苜蓿栽培草地进行了切根处理,对其生长特性和经济

效益进行分析,结果表明苜蓿切根可以减短返青时间,切根后的苜蓿在第 4 到第 6 年的产草量均比未切根的高。王德成等^[40]提出了一种用于退化苜蓿草地的切根平地机,对苜蓿进行切根促生改良,同时对土地进行平整地作业,实现对多年生苜蓿草地的机械化田间管理作业。

除此之外,苜蓿田间管理技术还包括灌溉、中耕除草和病虫害防治等技术。从现有的市场份额和研究来看,专门针对苜蓿田间管理的机械相关研究基本属于空白。大部分都采用以化学试剂的方式进行除草和防治病虫害,也采用人工除草的方式进行中耕除草,资料介绍较多的国外除草技术有化学除草方法和非化学除草方法^[41]。并没有苜蓿专用的中耕除草机械,常见的中耕除草机械主要针对玉米、水稻、小麦和大豆等粮食作物或经济作物,如梁远等^[42]设计的 3ZCS-7 型复式中耕除草机,韩豹等^[43]设计的 3ZCF-7700 型多功能中耕除草机以及王金武等^[44]设计的 3ZS-150 型水稻中耕除草机等。国外的除草机械大都是牵引式工作,幅面很大,其结构和工作性能等方面不太符合我国的国情,国内的除草机大都为中耕除草机,工作部件多为单翼铲或者双翼铲,也有圆盘式的除草机,但数量相对较少^[41]。而灌溉机械和喷施药剂用的植保机械大都采用粮食作物或经济作物的田间管理机械,但与苜

苜蓿种植工艺配套性差,多样的种植方式增加了植保机械的作业难度。

3.4 苜蓿机械化收获技术与装备

根据生产需要,苜蓿机械化收获技术根据苜蓿含水量的不同可分为干草机械化收获技术、高水分机械化青贮收获技术和半干机械化青贮收获技术。苜蓿干草机械化收获技术一般指苜蓿经刈割压扁后在田间晾晒,当含水率达到一定的低值后再进行捡拾打捆,其最终目的是将苜蓿制成干草制品^[45];苜蓿机械化高水分或半干青贮收获技术指的是苜蓿经刈割后直接或刈割压扁后在田间进行晾晒后,进行铡切粉碎或捡拾打捆然后进行袋贮、窖贮或裹包缠膜等青贮手段。

3.4.1 苜蓿机械化刈割技术与装备

国内外针对苜蓿收获过程中所使用的机械化刈割技术大部分为割草压扁技术。苜蓿割草压扁技术是通过橡胶辊、钢辊等不同形式的调制装置,对苜蓿茎秆进行压扁调制,从而加快苜蓿茎秆干燥速率,实现茎叶同时干燥并缩短田间晾晒时间。该技术能有效减少收获损失,提高苜蓿干草产品品质,实现该技术的机械称为割草压扁机或割草调制机。

国外常见的苜蓿割草压扁机生产厂商有美国的

John Deere、New Holland、Agco,法国的 Kuhn、德国的 Claas、加拿大的 Macdon 等公司。近年来,部分学者针对我国苜蓿种植现状,设计研究出了适用于山区丘陵地区的割草压扁机,这些割草压扁机的特点是转向灵活,爬坡能力强,填补了我国山区苜蓿收获机械的空白^[46-48]。通过搭建试验台等方式,提出了适合我国山区苜蓿收获的切割及喂入方式^[49-50],以及适用于山区小型自走式苜蓿割草压扁机的传动系统^[51-52];通过理论分析和试验研究,结合我国苜蓿生产实际,优化了压扁调制装置的参数^[53-54];通过虚拟分析与田间试验结合,研究并创新了适用于山区丘陵地区的苜蓿割草压扁机仿形装置^[55]。针对平原地区等大地块苜蓿种植区,我国同样出现了大幅宽、高效率的割草压扁机^[56],能实现平原地区的苜蓿压扁收获。国内外典型苜蓿割草压扁机如表 1 所示。

3.4.2 苜蓿干草田间调制机械化技术与装备

田间干草调制作业的目的是要尽量减少损失,以适当的作业机具,合理的工艺过程,加快牧草的干燥速度,减轻和避免各种因素对养分的造成的损失,获得高质量的干草。基本调制方法是成条干燥和摊散干燥,主要作业内容为摊行、翻草、搂草、翻条、摊

表 1 国内外典型苜蓿割草压扁机
Tab.1 Examples of alfalfa mower

机型	总体结构	结构特点与主要性能
法国库恩 MD3125F 型割草调制机		前后悬挂组合式,工作宽度 3.1 m,平均割幅宽度 1.0 ~ 1.5 m,刀盘数量 7 个
美国约翰迪尔 635 型割草压扁机		动力输出轴转速:1 000 r/min;3/8 英寸动力输出轴功率:67.11 ~ 111.85 kW;割刀割幅:3.5 m;草条宽度:1.0 ~ 2.38 m;齿轮传动、可调限深轮、高通过性轮胎
意大利 BCS 公司 ROTEX R5、R6 和 R7 型前置圆盘式割草压扁机		框架属直线紧凑式,两侧作横向运动约 200 m,可用于对树木和河道河堤除草作业,强硬的圆盘由特种钢制成,上下轧辊均以橡胶制成,以螺旋凸纹为特色,可在 0 ~ 40 mm 的范围内调整两轧辊的间距
美国凯斯 WD1203 型自走式割草压扁机		额定功率 141.68 kW;割台类型有:圆盘割台和往复式割台;甩刀转速:2 500 r/min;压扁辊:人字形,橡胶材质;割晒台割幅 6.4 m;割茬高度:19 mm(割台倾角 8°时)
石家庄鑫农机械有限公司 9GYZ-1.2 型自走式苜蓿割草压扁机		异形扭转割刀和倾置刀盘结合,减少重割,降低割茬;人字齿的橡胶辊保证苜蓿茎秆压裂,上压扁辊采用力调节悬浮设计;四位一体联合仿形系统,保障了割草机的安全性、通过性和稳定性;割草压扁机负流场辅助喂入技术辅助苜蓿植株的提升和喂入,减少重割
牧神 9GTZ-3.6 型苜蓿割草压扁机		适用于苜蓿类饲草的收获集条作业,往复式割刀、胶辊压扁,压扁率大于等于 85%,割台动力和行走采用静液压驱动
世达尔 9GYQ-2.4 型割草压扁机		采用 2 点式悬挂设计,草条宽度 0.9 ~ 1.4 m,可通过连杆自由调节割茬高度,输入转速:出厂设置 540 r/min,可改为 1 000 r/min,配套动力大于等于 40 kW(60 PS)

条和并条等。苜蓿进行田间干草调制过程中,先进行刈割压扁作业,然后由田间的搂摊晾晒进行干草调制。

常用的干草调制机械包括指盘式搂摊草机、滚筒式搂摊草机、多转子水平旋转搂摊草机、双转子水

平旋转搂摊草机、悬臂式水平旋转搂摊草机、多转子摊晒机、传送带式搂摊草机和横向搂草机等^[29]。

草条的运动方式决定了搂摊草机械关键装置的运动形式,常见的草条运动方式和搂摊草机械的工作方式如图 9 和图 10 所示。

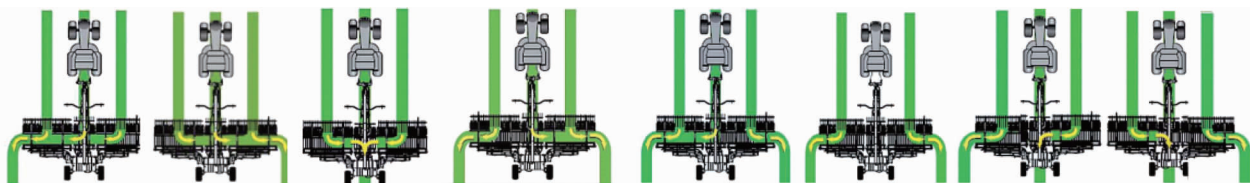


图 9 法国 Kuhn 公司水平旋转式搂摊草机 8 种工作方式

Fig. 9 Working process of hayrake produced by Kuhn company

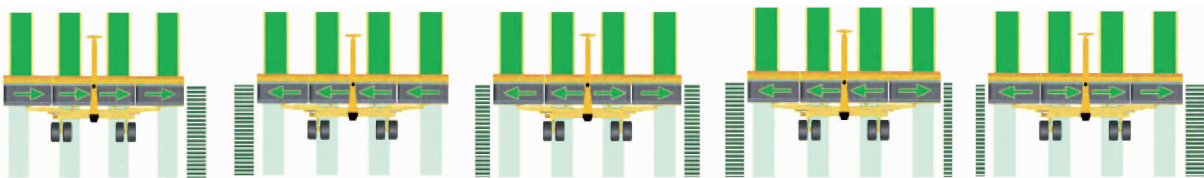


图 10 意大利 ROC 公司传送带式搂摊草机 5 种工作方式

Fig. 10 Working process of hayrake produced by ROC company

国内外常使用的搂草机有横向搂草机、指盘式搂草机、滚筒式侧向搂草机和水平旋转搂草机,其中水平旋转式搂草机应用较为广泛^[57]。现阶段比较成熟的有法国 Kuhn 公司,美国 Sip、John Deere 公司、New Holland 公司,德国 Claas 公司,意大利的 Enorossi 公司和 ROC 公司等。而国内搂摊草机械起步相对较晚,并且目前使用的搂摊草机多为国外进口,虽然也有国内自主研发的搂摊草设备,但仍存在性能较差、可靠性不高等问题。目前,国内针对苜蓿等人工建植草场,田间干草调制机械使用较广的为指盘式搂摊草机和水平旋转式搂摊草机,其中水平旋转式搂摊草机应用较为广泛,既能搂草,又能摊草,还能翻晒、移行等。贾红超等^[58]针对天然草场的田间调制问题设计了 RT13 型指盘式搂草机。翟改霞等^[57]研制出适用于天然草场和人工种植草场的高效低损的多功能水平旋转搂草机,采用模块化结构,能够完成优质青干草的搂、摊、翻等多种作业工序。罗金海等^[59]设计了牵引式 V 形折叠搂草翻晒机,可呈 V 形折叠展开,能同时完成搂草和翻晒作业,对紫花苜蓿的漏搂率为 1.2%,花叶损失率为 2.4%。李凤鸣等^[60]针对目前我国传统搂草设备存在的干燥速度慢、散草打捆困难和草根容易捂烂等问题,研制出新型指盘式搂草机,能够实现对苜蓿、稻秸秆、麦秸秆的搂集和翻晒作业。常用的国内外搂摊草机械如表 2 所示。

3.4.3 苜蓿机械化方草捆成捆技术与装备

苜蓿是发展可持续农业的首选饲料作物,在开发利用中需要压缩成不同的成型草产品(如草捆、

草块、草颗粒等),来满足牲畜的饲喂要求和运输要求,提高草产品的商品性^[61]。根据苜蓿生产实际需求,在压缩成捆作业过程中可以进行干草捆或青贮草捆收获作业。根据成型草捆的形状,可以将草捆成型设备分为方草捆机和圆草捆机。由于圆草捆打捆机与圆草捆青贮内容有重叠,因此本部分重点介绍方草捆机械化成捆技术与装备。

方草捆捡拾打捆机一般包括捡拾喂入机构、输送机构、压捆机构和打结机构等部分,能一次性完成牧草的捡拾、喂入、压缩成捆、打结和卸料等工序。市场上所能见到的方草捆捡拾打捆机可形成小方草捆和大方草捆。根据动力来源情况分为牵引式方草捆捡拾打捆机和自走式方草捆捡拾打捆机,其中牵引式方草捆捡拾打捆机应用相对广泛。国外方草捆捡拾打捆机具有代表性的企业有凯斯纽荷兰、德国克拉斯、约翰迪尔、麦赛弗格森、惠斯顿等。而国内大多数捡拾打捆机为进口或根据国外的机械采用测绘或类比的方法设计的,在捡拾打捆效果、配套动力、主要零部件参数等方面仍存在很大的发展空间^[61],相对较为成熟并且应用较多的国内方草捆捡拾打捆机主要有内蒙古华德牧草机械有限责任公司和上海世达尔现代农机有限公司所生产的。

针对不同的作物收获要求和不同区域的作业环境影响,国内外对方草捆捡拾打捆机方面开展了多元化的研究,主要对整机的整体结构以及关键部件进行了优化设计和改进,同时对物料压缩过程相关理论进行了试验研究。王锋德等^[62]针对玉米秸秆压缩特性设计了 4YF-1300 型大方捆打捆机。

表 2 国内外典型摊搂草机械
Tab.2 Examples of hayrakes and tedders

类型与型号	图片	结构特点与主要性能
库恩 GA 系列摊搂草机		水平旋转式摊搂草机,草条铺放方式为侧向或中间铺放,最大工作宽度 5.8~9.3 m,动力要求:29.82~59.66 kW
ROC 公司 RT1220 型摊搂草机		传送带式摊搂草机,可折叠,机器幅宽 10.8 m,工作宽度(包括草条宽度) 12.2 m,工作高度 5.1 m,运输宽度 5 m,运输高度 3 m,机器质量 5 897 kg,动力要求 82 kW
约翰迪尔 WR10 型搂草机		指盘式搂草机,便于运输和存放,运行平稳,田间调整方便快捷,可以选装中心踢草轮,有 8、10、12 轮 3 种型号
克拉斯 VOLTO 系列摊晒机		水平旋转式摊晒机,作业宽度 4.50~13.00 m,分为牵引式或三点悬挂式,性能优异,操作简便
OXBO 公司 4334 型自走式搂草机		自走式传送带式搂草机(并拢式搂草机),运输宽度 3.0 m,工作宽度 12.12 m,交通运输长度 7.2 m,工作长度 7.44 m,转弯半径 2.35 m,整机质量 12 809 kg,作业速度 0~48.3 km/h
华德 9LSQ-5.3 型多功能水平旋转搂草机		水平旋转式搂草机,采用纵列式双转子搂草技术,可将刈割后的鲜草根据产量高低及后续作业要求,快速搂集成 2 个或 1 个草条,也可实现搂幅宽度、草条宽度的调整,搂幅 3.0~3.5 m,作业速度 6~12 km/h,配套动力 44.1~91.9 kW
蒙拓 9ZCL-9 型指盘式侧向搂草机		指盘式搂草机,与 26.10 kW 以上的拖拉机配套使用,适合于地势平坦的地况上作业,对割倒晾晒后的牧草、苜蓿、小麦、大麦等作物秸秆进行搂集或翻晒作业,最大工作幅宽 9 m,作业速度 12~15 km/h

ROBB^[63]开发了一种稻秆流线型运输的方草捆压捆机。KENNETH 等^[64]设计与粉碎机结合于一体的方草捆压捆机,可以是牵引式,也可以是自走式。马晓刚^[65]设计了一种自走式方草捆压捆机,可针对我国北方旱作区等山区、丘陵小地块牧草种植区进行田间苜蓿捡拾压捆作业。围绕捡拾打捆机的关键部件,尤其是打结关键部件相关学者展开了大量的研究。苏刚等^[66]基于逆向工程技术,提出一种改进的参数化方法建立圆柱面的几何距离函数,用来测量打结器关键参数。孙贵斌等^[67]设计了一种由气压缸提供动力的卡扣式方草捆打结器。尹建军等^[68]以苜蓿 9KF-8042 型方草捆压捆机为研究对象,采用虚拟样机技术对其 D 型打结器及其辅助机构的耦合运动进行了分析,确定捆扎过程的耦合动作时序关系。王振华等^[69]对方草捆压捆机捡拾器的工作幅宽及滚筒转速进行了设计。杨莉等^[70]对自带传动动力恒频方草捆捡拾压捆机进行了深入研究。尹建军等^[71]设计了一种弹簧力平衡式方捆机捡拾器高度自动仿形装置。张姬等^[72]在分析方草捆打捆机使用的 D 型打结器及食品包装打卡机结构和工作原理的基础上,将两者优点加以集成,设计了打

卡装置,取代 D 型打结器的打结钳嘴及驱动机构,从而组成了新型卡扣式方草捆打结器。杜克爽^[73]对方草捆捡拾装置进行了优化设计。尹建军等^[74]针对打结器结构改进或参数调整后在设计阶段难以评判优劣而增加制造投入成本的问题,以打结器能否打出绳结为评判准则,提出了一种基于刚柔接触动力学的打结器虚拟打结方法。熊亚等^[75]针对打结器脱扣失效和刚性碰撞的问题,分析割绳脱扣机构与绕绳机构的相互作用机理,对割绳脱扣机构与绕绳机构进行了改进设计。捡拾打捆机的关键部件特别是打结关键部件仍然是国内众多研究人员在努力解决的一个技术问题。典型的国内外方草捆捡拾打捆机如表 3 所示。

3.4.4 苜蓿机械化青贮技术与装备

我国苜蓿青贮技术主要包括窖贮、堆贮、拉伸膜裹包青贮和袋式灌装青贮^[76]。苜蓿窖(堆)贮一般都需经过将苜蓿原料切碎,形成 2~3 cm 的碎段,然后入窖或装填,在此过程中都必须经过压实,然后再进行密封处理。常见的苜蓿窖贮的技术流程为刈割→晾晒→切短→装填→压实→密封→管理,或青饲料收获→运输→装填→压实→密封→管理。

表 3 国内外典型方草捆打捆机械
Tab.3 Examples of square baler

名称	图片	主要特点
约翰迪尔 L330 大型方捆机		宽大的捡拾器,带单叉压捆机的预压捆室,超大处理能力喂入辊,选配的预切削机,草捆宽度 80 cm,进料宽度 210 cm
麦赛福格森 MF1800 系列小方捆机		液压密度控制系统自动检测并调节打捆密度,每小时打 300 捆左右,可靠性高,配置 3 组重型打结器提高成捆率,且捆型方正,易于码垛运输,机具质量分布均匀,作业灵活方便,可用于专业大型苜蓿种植基地和专业畜牧基地
上海世达尔 9YFQ-1.4 型 (THB2060) 方捆打捆机		主要用作草场的牧草、稻麦秸秆的捡拾和打捆作业,草捆长度 30 ~ 100 cm 可调,捡拾宽度 127 cm,作业速度 4 ~ 6 km/h
华德 9YFQ-1.9 型跨行式方草捆捡拾压捆机		草捆横截面积:355 mm × 440 mm,草捆长度:305 ~ 1 321 mm,草捆密度:大于等于 130 kg/m ³ ,捡拾宽度:1 965 mm,生产率:7 ~ 10 t/h

苜蓿窖(堆)贮工艺下主要包括碎料和压实两大机械化处理过程。国外往往由青贮饲料收获机在田间直接收割、切碎、收集,由饲料挂车运输,用拖拉机压实,人工封窖;而国内在苜蓿窖(堆)贮方面常采用分段作业的方式进行,先通过田间苜蓿收获,然后将收获后的苜蓿运输至窖贮地点,通过固定式铡切粉碎等机械完成苜蓿的碎料作业,并可直接将碎料喷出,再进行压实和密封处理。所采用的机械包括了饲草切碎机、青贮饲料收获机和压实设备等。

饲草切碎机是我国使用最早和生产量较多的饲草加工机械之一。通常所说的铡草机、青饲切碎机、秸秆切碎机等都属于饲草切碎机。小型铡草机在农村应用较广,主要用来铡切谷草、麦秸、青饲料及干草。青饲切碎机又称青贮切碎机,常用在养牛场,主要用作铡切青贮料。国外对于饲草切碎机的研究多以联合收获机上的切碎装置为主要研究对象,且多针对玉米或小麦等粮食作物。研究多以提高切碎性能作为目标进行实验,分析总结了各项因素对切碎装置的影响,并提出了一些改进措施。并以通用联合收割机为主,尚未对饲草专用独立切碎机械进行深入研究。KATTENSTROTH 等^[77]为保证作物的切割长度,利用流体力学的原理,讨论了作物茎秆在进入切碎装置的各种情况,针对较短的作物茎秆在切碎装置中的运动状态进行了分析模拟实验;WALTHER 等^[78]对切碎过程中切碎刀具的磨削进行了试验分析,测量了实际切割过程中刀具的磨损状况,并提出了新的磨削方式;SOUZA 等^[79]以 3 种混合饲料为研究对象,改变刀具的旋转角度、斜切角度,得出 38°的斜切角为其中两种饲料最佳角度,而另一种饲料的最佳斜切角度为 30°,并对比了不同

斜切角度带给农户的利益大小;AJAV 等^[80]针对切割装置的主要影响因素进行了总结分析,并提出了以切碎时间和饲料含水率为性能指标,确定了切割角、刀刃厚度等影响因素。我国现有的饲草切碎机主要包括滚刀式和轮刀式(圆盘式)切碎机。大型铡草机便于抛送青贮料,多为轮刀式,而小型铡草机多为滚刀式。

青贮饲料收获机主要分为自走式和悬挂式。自走式往往配有高秆作物割台、牧草割台、捡拾器、收摘穗玉米的割台等附件。悬挂式青贮饲料收获机在国际上应用于青贮玉米、高粱等高秆青贮作物和苜蓿等矮秆牧草的机械收获,主机一般配有矮秆割台、对行(不对行)式割台、捡拾器等附件。美国及西欧的自走式青贮饲料收获机技术较先进,如美国的 John Deere 公司、New Holland 公司,德国的 Claas 公司、Mengle 公司、DEUTZ 公司,俄罗斯的罗斯托夫公司和捷尔诺波公司等生产的自走式青贮饲料收获机,不但能够收获玉米、高粱等高秆作物,还能收获大麦、燕麦和苜蓿等矮秆作物,适用性广,而且可以进行不对行收割^[81]。21 世纪初,我国从国外引进并使用青贮饲料收获机来满足青贮饲料机械化作业需求,主要应用在玉米、小麦等作物。国内外常用的青贮饲料收获机械如表 4 所示。

苜蓿青贮饲料压实设备多采用拖拉机来完成,主要分为轮式和链轨式(图 11)。轮式设备具有碾压面平整光滑、设备操作灵活的特点,但其爬坡能力较弱,这在一定程度上会增加压窖时间。链轨式设备有推铲与车身宽度不一致,导致难于对窖墙部分压实,同时链轨式设备对青贮窖地面的损伤也较大,但是其优点是爬坡性能好,压窖作业面短。

表 4 国内外典型青贮饲料收获机械
Tab. 4 Examples of silage forage harvester

型号	图片	主要结构及特点
美国 New Holland 公司 FR780 型青饲料收获机		配备了行业中顶级发动机,集金属探测器、自动磨刀系统和定刀调整等多种青贮收获核心技术于一身,并且注重驾驶的安全、舒适与便利,最大功率 570 kW,最大扭矩 3 323 N·m
美国约翰迪尔 8200 型自 走式青贮收获机		具有无级可调切割长度控制系统。采用直列 6 缸式约翰迪尔 9.0L 发动机。可挂接 400 系列大转盘割台,300 + 系列小转盘割台以及 600 系列捡拾器,挂接不同割台收获不同作物。配备了更大尺寸的轮胎,胎痕面积增大了 34%
德国 Kemper Champion C-3000 型悬挂式青贮 饲料收获机		集捡拾、切碎、喷料功能于一体。适合 82.023 kW 至 298.28 kW 拖拉机前悬挂或后悬挂。捡拾宽度 2.5/3.1/3.5 m,采用液压驱动系统,具有带有电子终止阀的金属探测器与切碎装置相连,有效保护整机,结构紧凑
谷王 FS80-2/5 (9QZ- 16) 型青饲料收获机		配有适用于青草和谷物的两种快速挂接割台,割幅分别为 4 m 和 5 m,割茬高度小于 12 cm,整机质量 11 000 kg,采用静液压无级变速驱动的行走变速方式
4QZ 自走式青饲料收获 机		采用自走式设计,整机结构紧凑、作业灵活方便,配套有可互换的青饲料收获割台与捡拾粉碎割台,集刈割、捡拾、切碎、喷料于一体,适用于主要牧草产区及较大规模牧草青贮机械化收获作业。作业幅宽 1.8 m,整机质量 3 500 kg,自带动力 92 kW



图 11 压窖机
Fig. 11 Silage silo pressing machinery

拉伸膜裹包青贮技术与袋式灌装青贮技术是在半干青贮的原理上发展的两种青贮工艺^[82]。袋式灌装青贮技术可用于对晾晒半天至一天,含水率为 55%~70% 的牧草进行单独青贮,也可用于对含水率 70%~80% 的新鲜豆科牧草,在添加发酵液后进行青贮^[83]。所需配套设备主要有青饲料收获机、青饲料运输车、喂料平台、袋式灌装机以及大中型拖拉机作为配套动力,其工艺流程为青饲料收获→拉运→卸料→灌装→封存,如图 12 所示。



图 12 袋式灌装青贮作业现场
Fig. 12 Bag silage process

袋式青贮是将新鲜的青饲料高密度地装入密封、遮光、不透气,又能抗高温和低温的特制塑料袋

内,存贮单元小,仅为几十立方米,比较灵活适用,存贮过程短,最大限度地保留了乳酸菌的存活量和原料的新鲜度,为有益发酵奠定了良好基础^[84]。袋式青贮灌装机在欧美发达国家应用广泛,如奥地利 Silospeed G4-06 型青贮灌装机和德国 Ag-Bagger 系列青贮灌装机(图 13)等,但是由于贮存袋比其他塑料产品昂贵,不适合 3 年以上的长期贮存,因此这种青贮产品在国际上多用于商品化使用以满足小型养殖户小贮存的需求。



图 13 袋式青贮灌装机
Fig. 13 Bag silage machinery

北京市农机试验鉴定推广站根据我国实际,设计了 9LT-50 型青贮饲料袋式灌装机,工作时,压装辊筒旋转,将喂入料仓中的物料压入位于撑口铲的塑料袋中,配套动力 40.4 kW,工作效率 50 t/h^[85],通过后期试验发现,袋式灌装青贮技术也可用于对含水率为 65%~70% 的苜蓿进行青贮作业。王亚波等^[86]对 9SYG-2 型青贮饲料灌装机进行了研究,该机可对 60%~70% 的玉米秸秆经扎切揉碎后

进行袋式灌装青贮作业,配套动力 11 kW,生产率 3 t/h。郑泽颖等^[87]设计了一种可移动的青贮灌装平台,该平台可连续、均匀地卸料,保证了与青贮灌装机的良好对接。万其号等^[88]研制了自走式青贮联合收获机,集收割、粉碎、抛送、搅拌、添加青贮剂、装袋等功能为一体,可将新鲜的牧草收割后直接装袋进行青贮,通过液压系统可实现压实密度 400 ~ 800 kg/m³ 调节。

目前袋式灌装青贮技术在我国仅用于苜蓿的半干青贮,而对于苜蓿高水分青贮,袋式灌装青贮技术还没有相关应用。

拉伸膜裹包青贮技术在国际上广泛用于禾本科与豆科牧草的低水分青贮作业^[84]。目前,大多采用圆草捆的形式进行拉伸膜裹包青贮,所采用的机械包括圆草捆打捆机和缠膜机等,圆草捆缠膜机往往与圆草捆打捆机配套使用,但集打圆捆和缠膜功能于一体的打捆缠膜一体机在市场上逐渐得到推广和应用。

圆草捆打捆机作为饲草收获机械之一,与方草捆相对,可实现对饲草的及时收获打捆作业,便于草捆的储存、青贮和运输。苜蓿圆草捆青贮,属于拉伸膜裹包青贮技术中的一种,即通过圆捆机对苜蓿进行打捆作业,然后再通过裹包设备,对成型后的圆草捆进行裹包青贮作业。与灌注装袋青贮技术不同的是,圆草捆青贮所形成的青贮单元较小,运移方便,利于实现青贮饲料的商品化。

目前,国内外进行圆草捆打捆作业的机械根据成型工艺可分为内缠绕式和外缠绕式两种。内缠绕式草捆成型原理是指通过传动带或链条使饲草刚进入草捆机就形成一个草捆核心,随着饲草不断被喂入,传动带(链)连续不断地将之包在核心上,并随草核的变大而不断扩展形成草捆;外缠绕式草捆成型原理与内缠绕式不同之处在于传送带、传动轮或钢辊安装在成型室的整个圆周面上,饲草进入成捆室后被曲面上的装置翻滚,直到成型室中有了足够的饲草,使得成捆装置的各个部分都接触到饲草,随后被压缩成层,外层渐渐向饲草中心压下来直至达到所要求的密度。

国外比较有代表性的企业如 CLAAS、John Deere、Kuhn 和 New Holland 等,这些公司的圆捆机在机械结构、动力配套、液压系统和控制系统的设计方面都有自身的特点,处于国际领先的技术水平。近几年,国内也呈现出相对成熟的生产企业,比如中机美诺、上海世达尔和内蒙古华德等企业。此外,相关学者围绕整机结构设计、成型参数、缠捆方法等方面展开了大量的研究工作。如王春光等^[89]设计了

由传动系统、牵引装置、捡拾器、喂入机构、成捆室、捆绳机构、液压系统以及卸草器等组成的钢辊外卷式圆捆打捆机。王德福等^[90]为解决小型钢辊式圆捆捡拾打捆机秸草打捆时的堵塞问题,对其结构进行了改进试验,在试验中,采用了增加喂入单辊、喂入对辊结构,并对其喂入能力、可靠性指标进行了测定。雷军乐等^[91]针对国产的中小型钢辊式圆捆机收获完整稻秆易产生堵塞的问题,利用自行设计的钢辊式圆捆机(草捆直径约 500 mm)试验装置对其打捆过程进行了研究,并将钢辊对稻秆的摩擦作用、捡拾器弹齿端点线速度以及稻秆喂入量作为成捆的影响因素进行了试验研究。高东明等^[92]为提高青贮饲料的打捆作业效率和作业质量,在现有青贮饲料打捆技术的基础上,设计了一种用于青贮作业,由喂料预压机构、对数螺旋式二次压捆机构组成的对数螺旋式圆草捆成捆装置。李叶龙等^[93]针对国产中小型钢辊式圆捆机收获完整稻秆时易于堵塞问题,设计了侧圆盘与钢辊组合式(简称辊盘式)卷捆机构,并利用自制辊盘式圆捆机试验装置对其卷捆过程进行了试验研究。国内外常用的圆草捆成捆机械如表 5 所示。

牧草拉伸膜裹包青贮的原理就是将收获后的新鲜牧草用打捆机高密度压实打捆,然后使用缠膜机裹包起来,从而给牧草营造一个最佳的发酵环境^[94]。国内外目前针对于牧草拉伸膜裹包青贮的手段大体分为两种,一种是分段式作业的方式,即先将牧草打成高密度草捆,然后再单独应用缠膜机进行裹包作业,另一种一体化作业方式,是采用打捆缠膜一体机一次性完成牧草打捆缠膜裹包作业。国外一些大型企业研制的缠膜机可应用于圆草捆,也可用于方草捆,还有圆草捆和方草捆均可使用的一体机。爱尔兰 Tanco 公司是世界上最大的缠膜机的生产商。此外还有法国 Kuhn,爱尔兰 Mchale,美国 H&S、纽荷兰、约翰迪尔,德国克拉斯等,这些公司产品都已经非常成熟,已成为国际上主流的拉伸膜裹包青贮技术,在多个国家应用广泛。而我国主要将拉伸膜裹包青贮技术应用于青贮玉米和苜蓿等牧草的半干青贮方面。国内生产的打捆缠膜机械多以小型、圆捆为主,草捆直径为 0.5 ~ 1.2 m,长度主要为 0.75 ~ 1.2 m,草捆密度也较小,一般在 100 ~ 160 kg/m³,适合于小地块作业,但存在自动化程度低、作业效率低等问题^[84,95]。郝彦靖等^[96]发明了一种自走式青贮饲料裹膜机,该机采用履带式底盘,通过性好,转弯半径小,同时采用无级变速,调速灵活,工作效率高。李志鹏等^[97]开发了一套基于 AVR 单片机的圆捆裹膜机控制系统,该系统可实现对圆草

表 5 国内外典型圆草捆成捆机械

Tab.5 Examples of round balers

型号	图片	主要结构及特点
克 拉 斯 ROLLANT 375/374 系列		捡拾宽度 2.1 m, 旋转切割作物喂入系统, 切刀和压辊数量均为 16 个, 圆捆尺寸 1.25 × 1.20 m, 具有 CST 标准终端或 OPERATOR 操作终端
约翰迪尔 F440R 型圆捆机		适应多种作物收获, 不锈钢材质喂入辊, 专利设计的液压控制排堵功能, 单侧整体式面板, 便于维护, 捡拾宽度 2.2 m, 切刀数量 13 个, 成型辊数量 17 个, 草捆直径 1.25 ~ 1.35 m, 草捆宽度 1.17 m
库恩 VB 系列圆捆机		可完成捡拾、打捆工序, 成捆直径 80 ~ 185 cm 可选, 创新设计的 Intergral Rotor 整体转子以及 Progressive Density 技术, 可针对不同的情况选多种配置, 还可以通过安装于驾驶室内的 AutoPlus 控制盒操控
STAR 9JYD/Q 系列圆草捆打捆机		能够自动完成牧草、水稻、小麦和经揉搓后的玉米秸秆的捡拾、打捆和放捆作业。具有捡拾干净、草捆密度可调、作业效率高、适用性强的特点。捡拾宽度 70.5 ~ 175 cm 可选, 草捆尺寸 50 cm(直径) × 70 cm ~ 120 cm(直径) × 122 cm, 配套动力 22 ~ 88 kW
华德 9YC-1.4 型圆草捆打捆机		主要用于田间各种牧草和稻、麦等农作物秸秆的收获。能将田间铺放的草条自动捡拾起来, 通过输送喂入、压缩成形、捆扎等作业工序, 把散状饲草捆扎成外形整齐规则的圆形草捆, 便于运输、贮存; 与 26.091 0 kW 以上轮式拖拉机配套, 由拖拉机驾驶员一人操作, 适合于各类天然草场和种植草场, 以及农田作业, 也适合于在场地由人工或其它方式喂入进行固定作业

捆的自动拾包、裹膜、切膜、放包作业, 同时可实时监测作业过程进展状况。张将等^[98]设计了一种自走式青贮打捆缠膜一体机, 能够实现玉米秸秆的一次

性收割、输送、切碎、打捆和缠膜作业, 减少了中间作业环节, 提高了工作效率与草捆质量。常见的国内外典型缠膜机械如表 6 所示。

表 6 国内外典型缠膜机械

Tab.6 Examples of wrapping machines

型号	图片	主要结构与特点
克拉斯 ROLLANT 系列牵引式圆捆缠膜机		可一次性完成捡拾、打圆捆和缠膜作业工序。每小时可将 51 t 青贮饲料压成紧实的圆捆。圆捆直径 1.25 ~ 1.35 m
法 国 Kuhn 公 司 VBP2265 型圆捆缠膜机		可一次性完成捡拾、打捆和缠膜作业工序。圆捆直径 100 ~ 160 cm, 宽度 120 cm, 捡拾宽度 230 cm, 标准网式缠绕草捆, IntelliWrap™ (optional 3D wrapping) 包膜
纽荷兰 Roll Baler 125 型圆捆缠膜一体机		可一次性完成捡拾、打捆和缠膜作业工序。圆捆直径 125 cm, 圆捆宽度 125 cm, 捡拾宽度 230 cm, 包膜材料为网或者塑料薄膜, 缠膜作业时可进行 1 个草捆缠膜, 同时暂存 2 个草捆
世达尔 star 9BM-122/120TW 型包膜机		可自由选择包膜层数, 节约成本。裹包结实牢固, 效率高, 小型包膜机有汽油机和电动机两种机型, 可适应不同的工作条件, 草捆尺寸(直径 × 长度) 为(85 ~ 120 cm) × (90 ~ 122 cm), 配套动力 37 ~ 59 kW 拖拉机

4 苜蓿机械化储运技术与装备

苜蓿机械化储运环节主要包括了田间草捆捡拾、车辆转运、集运堆垛、异形堆存以及青贮取饲等内容, 一般的储运工艺流程根据实际生产需要划分为如图 14 所示。

常见的饲草储运方式包括鲜草切碎储运、散干

草储运、小方草捆储运、大圆草捆储运和压垛储运^[29]。由于鲜草切碎储运主要针对的是青贮过程中的问题, 前一部分介绍了机械化青贮技术, 本部分主要针对鲜草青贮后的机械化取饲问题进行阐述。

首先, 对于成捆储运技术, 主要包括田间捡拾和集运堆垛技术。先对田间草捆捡拾, 然后再进行集运堆垛储存, 根据生产需求, 有的可通过机械装备直

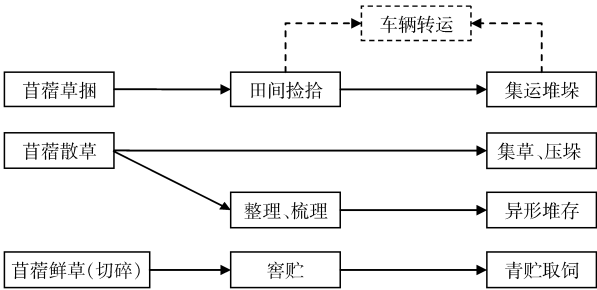


图 14 苜蓿机械化储运工艺流程

Fig. 14 Process of mechanized storage and transportation of alfalfa

接进行田间捡拾后由草捆捡拾装备运输至储存地点进行堆垛储存,有的则先进行捡拾然后通过车辆转运至销售点或储存点进行销售或储存,在车辆转运过程中主要应用市场上常用的卡车或货车。根据田间形成的草捆形状,用于田间捡拾的草捆捡拾装备根据草捆的形状主要分为圆草捆捡拾装载装备和方草捆捡拾装载装备,根据动力来源一般分为自走式和牵引式,其中牵引式居多。国外草捆捡拾装载机械发展速度和使用程度相对较高,并且已经达到一定的自动化规模。现阶段,常用的草捆捡拾装载机械装备主要包括 New Holland、Vermeer 和 Kidsfarm 等。常见的国外捡拾装载机械如表 7 所示。

表 7 国外常见的捡拾装载机械

Tab. 7 Examples of pick-up loaders in foreign countries

名称	图片	主要草捆参数
New Holland (BW28 型) 自动草捆装载机		方草捆, 38.1 cm × 55.88 cm/58.42 cm, 40.64 cm × 45.72 cm/55.88 cm/58.42 cm
Vermeer (1400 型) 草捆自动捡拾装载机		圆草捆, 16 捆 122 cm 宽的草捆, 或 14 捆 152.4 cm 宽的草捆, 最大草捆质量 10 479 kg
Vermeer (BH1000 型) 圆草捆堆垛机		圆草捆, 草捆总质量 998 kg, 草捆最大 152.4 cm × 152.4 cm, 最小 122 cm × 122 cm
Kidsfarm 公司前置式圆草捆自动捡拾装载机		圆草捆, 直径 1.0 ~ 1.5 m

国内对于草捆捡拾装载,尤其在草捆捡拾装车环节,仍主要采用人工捡拾或机械辅助捡拾的方式^[99]。杨志超等^[100]为解决大型圆草捆短距离运输难的问题,设计了一种圆草捆捡拾车,成功装卸率达 98%。王超等^[101]则对圆草捆捡拾车的捡拾臂进行了优化设计和改进。还有一部分学者设计了用于捡拾方草捆的捡拾装载车^[102]。郝兴玉等^[103]研制了

方草捆的收集车并针对方草捆收集车作业时草捆在喂入过程中发生歪斜严重影响其稳定性的问题,应用 ARIZ 算法对技术系统进行了优化设计。高旭宏等^[99]为解决方草捆捡拾效率低、费用高、长途运输难等问题,设计了方草捆集捆机,一次能实现 12 个方草捆的捆扎。常见的国内捡拾装载机械如表 8 所示。

表 8 国内常见的捡拾装载机械

Tab. 8 Examples of pick-up loaders in China

名称	图片	特点
中农机 FSX 型全自动草捆捡拾码垛机		方草捆,草捆的捡拾、运输和码垛,仅需一人即可完成;适用于多种草捆规格及作物(如饲草,玉米,稻草,秸秆,高粱,棉花等)
绿荫牵引式方草捆捡拾车		方草捆,牵引式自动捡拾,草捆尺寸 36 × 46 × 91/97/104 或 41 × 46 × 91/97/104 (cm),最高堆垛高度 3 m
航天蓝速 9JF-35072B (电控版)型草捆捡拾堆垛机		方草捆,草捆截面尺寸 40 cm × 60 cm 或 41 cm × 46 cm 或 36 cm × 46 cm,草捆堆垛高度 3.2 m
蒙拓 9YZ-2000 型圆草捆装卸车		圆草捆,应用于圆草捆的捡拾-装车-排列-卸车等一系列工作,可装卸草捆尺寸:直径 145 ~ 160 cm,长度 151 ~ 198 cm,草捆质量 250 kg

此外,针对苜蓿的储运问题,有学者提出了一种新的储运方式,即将苜蓿鲜草进行梳理,然后制成“草辫”进行异形堆存,通过这种方式来进行苜蓿的储运^[104]。王光辉等^[105-107]提出了苜蓿鲜草的成型、调制和梳理的方法及专用设备,并形成了“梳理—压扁—成辫—牵伸—切断”的机械化草辫制备工艺。

常用的青贮取料方式包括人工取料和机械取料。国外往往采用机械方式进行取料,且技术相对成熟,有专用的青贮取料机;而国内青贮窖大小不一且不同地区的机械化水平有所差异,因此国内现阶段的青贮既有人工取料,又有机械取料。郭英洲等^[108]结合目前我国青贮饲料的发展状况研制了 9QZ-2.0 型自走式青贮取料机,在小范围内完成切削取料工作。赵风雷等^[109]设计了一种自走式青贮堆料取料机,采用纯电动和液压控制,取料快速。王光辉等^[110]则设计了一种青贮窖取料头,提供了一种能与动力机械配合使用的青贮料取饲工具。

国内外采用的青贮料取料机械主要包括动力机械(装载车或铲车)、改装的动力机械以及专用的青贮料取料机,如图 15 所示。



图 15 典型的青贮取料机械
Fig. 15 Silage reclaiming machinery

5 苜蓿机械化加工技术与装备

5.1 苜蓿机械化草粉加工技术与装备

苜蓿饲料主要应用形式包括苜蓿草粉、草颗粒和草块,而草颗粒或草块均是苜蓿草粉经过压缩而制成的,因此形成苜蓿草粉是加工苜蓿草颗粒和草块产品很重要的一个环节^[111]。

常见的粉碎机类型有锤片式、劲锤式、爪式和对辊式 4 种。其中锤片式粉碎机在饲草粉碎方面应用较为广泛,既能粉碎谷物类精饲料,又能粉碎纤维、水分较多的青草类、秸秆类饲料^[29],其工作原理是无支撑式的冲击粉碎,在粉碎过程汇总,物料进入粉碎室后,受到高速旋转的锤片的反复冲击、搓擦和在齿板上的碰撞,从而被逐步粉碎至需要的粒度后穿过筛孔排出。

近些年,围绕锤片式粉碎机的整机设计优化、关键部件的设计以及内部物料运移状态等方面,相关学者开展了大量研究。申庆泰等^[112]提出了锤片自磨刃强化处理的工艺方法。田海清等^[113]设计了分段圆弧筛片代替环形平筛,使锤筛间隙不断变化,破坏环流层,改善粉碎机性能。付敏等^[114]研发了一款粉碎产品粒度为 1 mm,生产率为 1 000 kg/h 的秸秆粉碎机,设计了振幅方向平行于转子回转轴线的振动筛。汪建新等^[115]研究了物料颗粒在气固两相流中运动轨迹的数学模型。祁晓敏^[116]设计了一种多功能牧草粉碎机。曹丽英等^[117]提出一种基于虚拟仪器技术的流场测试方法,以锤片式粉碎机样机为试验对象,对粉碎室内的流场进行多点测量以论证该测试方法及测试系统的可靠性。并通过研究粉碎机筛片的结构参数和分离装置内的气流速度对筛分效率之间的影响规律,揭示物料的透筛机理^[118]。通过计算物料沿外管壁运动时摩擦力所做的功,得到摩擦力做功最小时外管壁的曲线形状,并根据该

形状制作了分离装置^[119]。可以看出,国内现阶段主要还是以饲料为研究对象,对锤片式粉碎机展开相关研究,在苜蓿专用粉碎机的整机设计、关键部件的参数以及物料与部件相互作用关系方面的研究有所欠缺。

国外比较典型的粉碎机如美国 CPM 公司生产的 HM54 系列锤片式粉碎机(图 16a),适用于易碎或纤维类材料;荷兰 VAN Aarsen 公司生产的 GD1400 型锤片粉碎机(图 16b),采用分体式结构,不停机手动/自动换筛,且带有防振动装置。此外,国外在草捆粉碎机械方面也相对成熟,如意大利 STORTI 公司的 SB30 型粉碎喷草机(图 16c),可实现方草捆或圆草捆的粉碎和喷草作业工序,是一种牵引式多功能粉碎机;美国 VRC 系列饲草粉碎机(图 16d)具有锤片式粉碎机的功效,通过改变锤片的数量和筛子的大小得到用户期望的粉碎尺寸,可直接喂入大草捆进行粉碎,可实现无粉尘粉碎。国内的粉碎机有很多,但设备相对单一,且大部分设备主要用于玉米秸秆和小麦秸秆等粉碎,或主要进行饲料粉碎,如江苏牧羊、江苏正昌等企业生产的饲料粉碎机械,目前仍采用饲料或秸秆粉碎机械进行草粉的加工。



图 16 典型的粉碎机械
Fig. 16 Examples of silage crushing machinery

5.2 苜蓿机械化压缩技术与装备

草颗粒(块)对于反刍动物来说是一种很好的长纤维饲料,且极大地限度地保存了营养成分,适口性好,动物喜食^[120]。苜蓿制粒、压块等压缩成型是指能够将松散的苜蓿在一定压力下压缩成具有较高密度和特定形状的草颗粒或草块,从而较好地解决了牧草堆积密度小、储运不方便的问题^[121]。

常用的牧草压缩设备主要分为螺旋挤压式成型机、活塞式挤压成型机、压辊式成型机。

丹麦 Sprout-Matador 公司生产的 PM717XW 型

环模颗粒机采用齿轮传动,有 3 个压辊工作,环模和压辊类型可调节,从而实现功率和产量调整。英国的 UMT 公司、瑞士的 Buhler 公司均研发了技术先进、自动化程度较高的环模颗粒机产品。此外,还包括俄罗斯的 OFM 和 OJIM 系列饲草制粒机。我国目前市场上有很多品牌和种类的产品,江苏牧羊集团生产的 MUZL 系列颗粒机采用三压辊设计,双马达柔性传动方式,使制粒安全高效;MUZL10C 系列机型设计有快速配合系统,可短时间内完成更换环境的工作,适用于苜蓿、秸秆等比重较小的物料颗粒;中机华丰科技有限公司生产的 PM 系列平模制粒机能够实现饲草料等多种类物料的压制成型,原料适应范围广,对原料水分和粉碎细度要求低;正昌集团生产的 SZLH508M 型苜蓿牧草制粒机,主要适用于牧草、酒花和秸秆等容重较轻的物料;中国农业机械化科学研究院研制的 9KP36 型平模制粒机,能压制配合饲料颗粒、草颗粒等。

国外环模成型技术具有代表性的是美国沃润贝尔(Warren & Baer)公司生产的 WBSCS-168 型压块机,该设备能够移动,不受场地限制,作业范围广,该公司生产的 200HD 型压块机顶部安装了喷洒装置,可调节秸秆含水率,适合在干燥环境下使用。在饲草压块机的发展中,国外已逐渐从设备功能性的研究上升到自动化、数字化及信息化技术在压块机设备上的集成应用研究。针对环模式压块机,已经实现了设备的快速装配、辊模间隙自动调整、液压过载保护、自动控制蒸汽添加技术以及环模真空渗氮、组合加工等技术,设备工作性能得到了极大的提升^[122-124]。目前在售压块机主要以立式环模压块机为主,且结构大同小异,模盘结构均采用国外引进的模块拼接式结构,主轴传动多为电机减速机传动并配有主动循环的浸油润滑系统,最后配以单口出料形式。北京奥科瑞丰新能源股份有限公司生产的立式环模压块设备装配有上料喂入机和冷却输送机,可高效压制玉米、小麦等秸秆;中国农业大学和固安金科源机电自动化有限公司共同研发了 9YKS 系列牧草(生物质)压块机和 9KLH-560 牧草颗粒机,并在此基础上集成研发了牧草(生物质)致密成型成套设备,集除尘系统、实时监控系统和自动化控制系统为一体,实现了牧草粉碎—防尘沉降—螺旋输送—上料喂入—压制成型—冷却出料等一系列工艺流程,采用了模套嵌入模盘的组合式环模结构,解决了现有拼接式环模模盘机构存在的磨损后难拆卸、零部件过度浪费和物料适应性差等问题。

5.3 苜蓿机械化干燥技术与装备

苜蓿干燥方法包括自然干燥方法、人工干燥方

法和混合脱水干燥法^[125]。自然干燥方法指通过自然干燥的形式实现苜蓿干燥,包括地面干燥法、草架干燥法和发酵干燥法,人工干燥法是通过机械手段或化学手段实现苜蓿干燥,常用的机械干燥方法即苜蓿机械化干燥技术,而混合脱水干燥法即采取 2 种或 2 种以上方法结合的干燥技术^[29,125]。

现阶段,国内外苜蓿机械化干燥环节主要包括田间直接干燥和收获后干燥两部分,田间直接干燥是苜蓿刈割后在田间自然晾晒使苜蓿含水率达到特定值以下,刈割时往往对苜蓿进行调质处理,如进行压扁调质处理等;而收获后干燥一般指根据后续生产的需要,如制粒或压块等,对刈割后的鲜草进行切碎后干燥,也包括对晾晒后的苜蓿通过打捆或散草运输至干燥地点,再进行草捆干燥或将散草切断、切碎干燥。

国内外常用的苜蓿机械化干燥技术包括了苜蓿薄层干燥技术^[126]、基于薄层干燥理论提出的深床干燥技术^[127]、红外或微波等辐射传热干燥技术^[29,128]、过热蒸汽干燥技术^[129]、太阳能干燥技术^[130]、高温热风干燥技术^[131]和茎叶分离技术^[132]等。用于苜蓿干燥的机械化装备包括转筒干燥设备、带式干燥设备、干燥床、远红外干燥设备、气流干燥设备、过热蒸汽干燥设备、太阳能干燥设备和茎叶分离干燥设备等。其中,苜蓿转筒干燥设备在国内外应用最为广泛^[133],包括单回程、三回程和四回程等。

近年来,国外主要对转筒干燥设备的理论基础研究居多,主要分析抄板参数、喂入量、转速等因素对下落高度、停留时间的影响,探讨最佳载荷、高传热传质系数的条件,对转筒干燥设备性能进行优化改进,以及对苜蓿转筒干燥模型及控制等的研究^[134-136]。

国内苜蓿人工干燥技术起步较晚,大部分都从国外引进或仿制。中国农业大学设计的 9G-650 型饲草秸秆高温快速干燥成套设备,采用多级组合干燥工艺,将三回程转筒干燥、气流干燥及搅拌干燥原理结合,有效地提高了饲草的干燥效率^[137]。东北大学和沈阳远大科技实业有限公司联合研制了适用于牧草的 HYG-B 型多回程转筒干燥设备,主要包括干燥主机系统、上料系统、燃煤(燃气、燃油热风炉系统)、出料系统、引风系统、冷却系统和控制系统,提高了热效率^[138]。武汉工业学院易启伟等^[139]在总结单回程滚筒干燥机不足的基础上,研发了薄板转筒干燥设备,用于干燥生物质原料,将传导、辐射、对流 3 种加热方式有机结合,促进进入筒体的物料快速加热失水干燥,其热效率较单回程滚筒干燥机有了一定的提高。东北农业大学研制出四

重滚筒式牧草干燥设备,采用四重滚筒方式进行干燥^[140]。此外,相关学者还进行了影响苜蓿干燥品质的干燥因素方面研究^[141-142]。

5.4 苜蓿机械化茎叶分离技术与装备

苜蓿机械化茎叶分离技术是在收获或者加工过程中将苜蓿叶与苜蓿茎秆分开进行收集的技术。国内外苜蓿机械化茎叶分离技术主要包括田间直接分离技术和收获后分离技术^[143]。

苜蓿田间直接分离技术指在苜蓿未收割的条件下,通过机械化手段使苜蓿叶子从茎秆上脱离并收集起来,余下的茎秆则单独刈割或继续生长,实现苜蓿茎叶分离。这种模式主要包括分层收获法和分段收获法。一般情况下植株的枝叶多分布在植株的上部,植株下部主要是茎秆,根据这种特征采取按不同先后顺序分层收割植株的上部和下部的的方法,从而实现初步分离苜蓿茎叶^[144]。而分段收获法是指先通过机械或人工手段直接收集作物叶片,然后再进行茎秆收获的方法,这种方法在一定程度上提高了分离后的茎叶料的纯度,但实现过程难度较大,难以保证较高的分离率。

苜蓿收获后分离技术指在收割后集中进行茎叶分离加工的一种技术模式,分离前一般需要进行干燥或切短等预加工环节,包括了筛分法、风分法和干燥分离法。筛分法根据物料成分的外形尺寸、表面特征以及密度和比重等特性之间的差异,将切碎的叶片和茎秆进行筛分;风分法则主要根据叶片与茎秆的空气动力学特性之间的差异,使用特定的风分装置或设备进行分离;干燥分离法需要将切碎的物料进行干燥,将含水率降到一定程度以下,在干燥的过程中实现叶片和茎秆分离。

国外一直在进行关于牧草茎叶分离技术及设备的研究,包括作为理论基础的牧草生物、物理特性等方面的研究^[145-146]。通过理论研究,进行多种形式的茎叶分离设备与装置的研制,并进行了大量的试验研究^[132,147-148]。

对于苜蓿田间直接茎叶分离方面的研究,大多数围绕苜蓿收获后茎叶分离技术展开。CURRENCE等^[149]提出了一种苜蓿叶片采收机,可在田间对生长状态的紫花苜蓿进行叶片采收作业,主要功能部件为 2 个疏脱滚筒和 1 个拨喂装置,其原理示意图如图 18 所示。SHINNERS 等^[150]则在收获中使用旋转割刀将叶子从茎秆上剥脱来实现收获时苜蓿茎叶分离。DIGMAN 等^[151]提出了通过机械茎叶分离、压榨和厌氧储存的工作环节来提高富含蛋白质的苜蓿叶子利用率的设想,并进行了相关工艺试验。

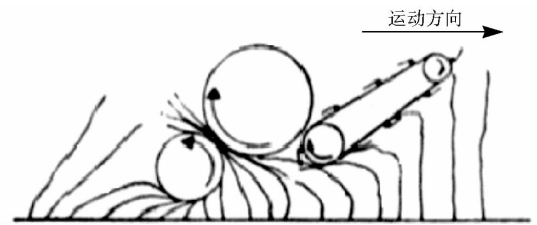


图 18 苜蓿叶片收获原理示意图

Fig. 18 Schematic diagram of harvesting principle of alfalfa leaves

GAN 等^[152]设计了一种立式茎叶风分设备,根据空气动力学原理,利用 2 种多孔风分转筒(外分式和内分式)研究茎叶分离技术。BILANSKI 等^[153]利用水平风洞对紫花苜蓿实施茎叶分离,这种水平风洞的截面为方形,内部设有不等间隔的栅板,通过安装在风洞上部的水平带式喂料器喂料。ADAPA 等^[154]研究了切碎的新鲜紫花苜蓿的热风分离法。ARINZE 等^[155]建立了一个苜蓿干燥和空气动力学茎叶分离回转筒数学模型,可以用来确定最适宜的干燥和空气动力分离参数,也可以用来设计使干燥和分离在一个过程中完成的干燥分离设备。几种收获后茎叶分离方法相关的原理和设备见文献^[132,147,152,154]。

王德成等^[156]提出了一种苜蓿分层分形收获方法及装备,用于进行苜蓿田间直接茎叶分离,实现苜蓿茎秆和花叶的分离收获,且收获过程不受天气影响、能够减少收储过程中的花和叶损失。熊华等^[157]提出了一种干燥苜蓿叶茎分离装置,干燥草料平均长度在 5 ~ 20 cm 之间,分离率可达 95% 左右。罗小燕等^[158]针对转筒干燥苜蓿的茎叶垂直分离原理,应用 CFD 技术对三回程苜蓿干燥分离转筒出口附近的气流场进行了模拟和优化设计,提出了改进茎叶分离效率的方案。高扬等^[159]为研究新鲜切碎紫花苜蓿茎叶干燥分离过程中的入口温度、入口风速、转筒转速和喂料速度对出机叶料含水率、茎料含水率和茎叶分离率的影响,进行了茎叶分离试验,建立了相应的数学模型并进行了优化。宁国鹏^[143,160]等依据苜蓿干燥茎叶分离机理(图 19a),提出了“切碎与干燥”新型苜蓿茎叶干燥分离工艺(图 19b),设计了滚筒式苜蓿干燥与茎叶分离设备,可在完成干燥的同时实现茎叶分离加工过程。苜蓿干燥茎叶分离设备如图 20 所示。

6 国内外苜蓿全程机械化生产技术现状分析

根据中国畜牧业协会草业分会相关论坛数据,全球苜蓿种植面积约 2 380 万 hm^2 ,包括北美洲、欧洲、亚洲、非洲、拉丁美洲、大洋洲。总体上看,北美

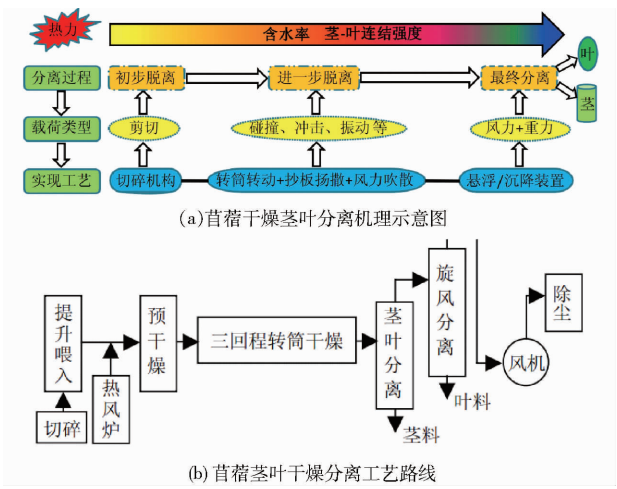


图 19 苜蓿干燥茎叶分离机理及工艺

Fig. 19 Mechanism of fractionation of dry alfalfa stem and leaf



图 20 苜蓿干燥茎叶分离设备

Fig. 20 Alfalfa drying stem and leaf separation equipment

洲仍然占据主要的种植面积。以美国为例,美国苜蓿种植面积占全球的 36%,而中国占 15%,美国仍是当前最大的、最稳定的苜蓿产品生产者和供应商。

根据美国农业部(USDA)官网的数据,美国苜蓿的种植面积保持在 80.94 万 hm^2 以上,在 2016 年度种植面积有所缩减(比 2015 年缩减 10.5%),但苜蓿干草产量近几年均稳定在 4 000 万 t 以上,虽然 2016 年种植面积和收获面积均有所降低,但苜蓿干草产量仍在 4 000 万 t 以上,且比 2015 年增加 1.14%,并且美国苜蓿的收获面积是苜蓿种植面积的 5 倍多,说明平均一年收获苜蓿在 5 茬左右。

从美国农业机械每项支付收益(Price paid,美元/ITEM)来看,根据美国农业部所列支的机械分类,常用的农业机械总支付收益每年呈增加的趋势,牧草生产机械(包括打捆机、饲草收获机、搂草机、摊晒机、割草机和割草调制机,不包括耕整地和播种机械)所占比例超过 24%,并且每年数额相差不大,进一步说明所列支的牧草生产机械(不包括耕整地和播种机械)所占市场份额相对稳定,从 2009 年开始一直上下浮动并处于稳定状态。

从美国农业部数据可知,仅美国国内持有的打捆机(BALER-INVENTORY)在 2012 年最大的作业区域数量突破 10 万个,作业区域面积范围从 0.4 hm^2 到 809.37 hm^2 甚至更大,作业面积超过 809.37 hm^2 的区域超过 4 万个,作业区域面积在

4.05 ~ 20.19 hm^2 以及 105.22 ~ 201.94 hm^2 范围内分布较广,其次是 40.47 ~ 56.25 hm^2 、202.34 ~ 404.28 hm^2 和 28.33 ~ 40.43 hm^2 。

国外在苜蓿生产过程中,从耕整地到收获已基本实现全面机械化作业,并且技术已十分成熟,国外所拥有的国内机械市场份额逐渐趋于稳定,并且向相对落后的生产国家逐渐拓展。

根据我国农业机械统计年鉴所统计的全国机械拥有量数据,并没有针对苜蓿生产所用机械情况进行单独统计,且仅单独表明牧草生产机械方面的列支数据只包括青饲料收获机械、牧草收获机械和饲草料加工机械。从统计数据来看,我国青饲料收获机械、牧草收获机械和饲草料加工机械的全国拥有量从 2008 年至 2015 年呈稳定增加的变化趋势,并且牧草收获机械每年数量增长的幅度要大于青饲料收获机械的增幅,饲草料加工机械要远大于牧草收获机械和青饲料收获机械的数量,且远大于二者之和。

我国机械化种植牧草面积在 2014 年和 2015 年将近 120 万 hm^2 ,2015 年虽然牧草种植面积有所减少,但机械化合牧草收获数量却未减少,比 2014 年度机械化合牧草收获数量增加 258.33 万 t,且从 2014 年开始,我国机械化合牧草收获数量突破 5 000 万 t。另外,从 2012 年开始,我国机械化播种牧草面积逐年增加,机械化合牧草收获数量从 2012 年开始也呈现急剧增长的状态,随着 2015 年牧草种植面积有所下滑,机械化合牧草收获总量增长趋势有所减弱。我国牧草收获机械也是从 2012 年开始出现较大的增长幅度,2012 年之后牧草收获机械增长幅度比 2012 年之前有了很大的提高。机械化程度的提高加快了牧草生产的水平和效率。

虽然我国牧草收获数量上有所增加,但我国苜蓿进口量仍在世界市场份额中占相当大的比例。根据行业相关统计,我国苜蓿干草进口量近几年出现急剧增加的变化趋势,从 2012 年开始急剧增长,2015 年我国苜蓿干草进口量占我国 2015 年机械化合牧草总量的 2.25%,至 2016 年,我国苜蓿干草进口量突破了 146 万 t,占我国 2015 年机械化合牧草总量的 2.71%,而 2014 年只有 1.72%。逐渐增加的苜蓿干草进口量一方面说明了我国对苜蓿需求量的增加,另一方面也要求我国苜蓿生产技术水平要有所提高来满足国内对苜蓿草的需求。2015 年我国苜蓿年末保留面积达 471.13 万 hm^2 ,产量 3217 万 t,而美国 2015 年度苜蓿种植面积为 102.59 万 hm^2 ,但产量却达到了 4 159.6 万吨,美国苜蓿种植面积为我国的 21.78%,但苜蓿干草产量却为我国苜蓿产量的 1.29 倍,由此可以看出我国与

国外发达国家在苜蓿生产技术水平上的差距,也间接反映出苜蓿生产机械化水平上的差距。

我国牧草产业已经形成“一带两区”适宜区域布局^[84]。“一带”即苜蓿产业带,涵盖新疆、甘肃、宁夏、内蒙古西部和陕北等西部灌溉苜蓿产业带和内蒙古东部、黑龙江、辽宁、吉林、陕西、河北、河南、山东和山西等农牧交错带雨养苜蓿产业带两部分。根据《全国苜蓿产业发展规划(2016—2020 年)》,我国苜蓿产业分为东北及内蒙古、西北、华北和南方 4 个发展区域,共计 238 个苜蓿重点发展县,如图 21 (绿色标记)所示。从图上可以看出,我国苜蓿主要产区横跨东西区域,涉及了丘陵、平原等多种地形,多样的地形分布也是制约苜蓿生产机械化水平的原因之一。

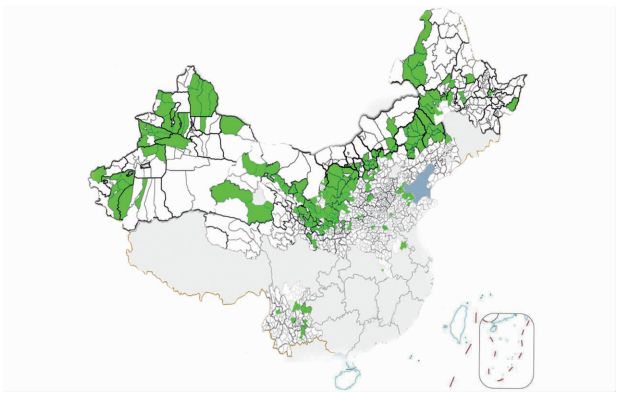


图 21 238 个苜蓿重点县

Fig. 21 Key counties of alfalfa production in China

我国已经初步形成苜蓿生产全程机械化技术体系,所谓“初步形成”是指在苜蓿生产的各个环节,能够找到用于该环节机械化作业的机械与装备,并能完成机械化作业工序,但还无法实现机械配套和推广应用,只能高成本、低效率地完成相关作业环节。与其他环节相比,我国在苜蓿机械化收获环节相对成熟,但仍存在机具可靠性以及区域适应性问题,在种子收获加工、小区育种等方面仍然是相对薄弱的环节。

7 现阶段问题及发展趋势

我国苜蓿生产技术体系正处于振兴发展阶段,与国外发达国家相比,我国苜蓿机械化生产技术存在一定的差距,国外从苜蓿耕整地到收获加工环节已形成十分成熟的苜蓿机械化生产技术体系;我国已经初步形成了适合我国国情的苜蓿生产全程机械化技术体系,包括苜蓿种子工程、土地整理、精量播种、田间管理、刈割收获、储藏运输和草产品加工 7 种机械化生产技术工艺,但仍存在相对薄弱的机械化生产环节,存在的问题具体为:

(1)苜蓿机械化生产环节发展不均衡,机械化生产技术存在短板

我国牧草生产机械已经发展多年,已基本覆盖到工艺流程的各个环节,但苜蓿机械化生产的各个环节发展并不均衡。在苜蓿收获环节方面,相关的机械化技术水平发展相对成熟,但在苜蓿种子收获、加工、小区育种,苜蓿精量播种、田间管理以及苜蓿干燥加工等环节仍属于薄弱环节,苜蓿机械化生产过程存在短板,高效低损的专用苜蓿机械化生产装备仍然缺乏。

(2)苜蓿产业化程度低,制约着苜蓿机械化生产技术的发展速度

我国甘肃、内蒙古、新疆、宁夏、黑龙江、河北等 6 省(区)的优秀苜蓿种植面积占全国的 89.8%,已基本形成了甘肃河西走廊、内蒙古科尔沁草地、宁夏河套灌区等一批 10 万亩以上集中连片的优秀苜蓿种植基地。但我国的苜蓿产业化程度仍然较低,全国年产 1 万 t 以上的苜蓿草业企业只有 50 家,生产主体仍多以家庭为单位的个体经营者为主,经营规模较小,种植环境较为复杂,多样的生产规模、种植和管理模式,加上多变的种植地形,为实现苜蓿标准机械化管理和生产作业增加难度,制约着苜蓿机械化生产技术的发展速度。此外,在苜蓿生产技术研究推广方面,存在着研发集成不够、推广力度小等问题,也制约着苜蓿机械化生产发展速度。

(3)基础性研究落后,苜蓿生产工艺与机械化生产技术联动性差

我国苜蓿生产机械虽然经过了多年发展,但是针对苜蓿生产机械的基础研究、机械-植物相互作用系统理论和共性技术还比较缺乏,企业技术创新机制也还未形成,具有自主知识产权的技术极度缺乏,由此造成了我国苜蓿机械产品技术水平低下,对国外技术严重依赖。此外,虽然每个工艺环节均有机型覆盖,但是每种作业机械多为单一机型,可供用户选择范围较窄,而不同经营规模和苜蓿种植条件对机械要求不同,生产工艺与机械化生产联动性差,因此经常会出现无合适机型可选,或者已选机型不适用等情况,降低了生产效率。

(4)苜蓿机械化生产装备适用性与可靠性低

我国苜蓿生产种植环境较为复杂,并且从现有的种植条件来看,适合我国苜蓿生产田间作业的小型装备需求量较大,但从技术角度和企业经营来说,小型机械的研发难度大,生产成本高且收益低,此外我国牧草机械生产企业规模不大,经济和技术力量均比较薄弱,无法进行高端、大型、尖端的苜蓿设备研发,这就造成企业所生产的苜蓿生产机械装备无

法适应各地区的生产环境,达不到生产要求,并且在机械装备关键部件的材料及作业方面不如其他国家可靠,所应用的苜蓿生产机械适用性和可靠性都相对较低。

结合我国苜蓿生产的实际情况,提出我国未来苜蓿机械化生产技术的发展趋势:

(1)构建完整的苜蓿生产全程机械化技术体系

推进苜蓿生产全程机械化,建立健全并完善苜蓿生产全程机械化技术体系,解决苜蓿机械化生产环节的短板,建立高效低损的专用苜蓿机械化生产技术体系,尤其在苜蓿种子生产环节、种植环节和收获加工环节等方面,针对薄弱项目推进实施苜蓿生产机械化提升示范行动,加快机械化生产进度,发展适合我国国情的苜蓿生产全程机械化技术体系。

(2)发展具有中国特色的苜蓿机械化生产体系

我国苜蓿种植区域横跨东西部,地形复杂,包括平原、丘陵等地,并且苜蓿种植区域包括大地块和小地块,应提高苜蓿产业化程度,依据不同种植区域的

生长环境,结合区域生产条件及现状,发展适宜的苜蓿机械化生产技术体系,并提高苜蓿机械化生产管理水平,完善苜蓿生产推广体系,强化苜蓿产业科技支撑,加快苜蓿机械化生产产业化进程。

(3)加强土壤-苜蓿-机具相互作用关系理论技术体系研究

以进行高效低损的苜蓿机械化生产作业为前提,进行土壤和苜蓿饲草料与作业机具及关键部件的相互作用关系理论技术研究,提高机具及关键部件的适用性和可靠性,同时加强苜蓿生产工艺与生产机械的联动性,提高作业效率和生产质量,以实现机具良好的作业效果和苜蓿高效低损的生产环境,实现土壤-植物-机具有效的三元一体发展模式。

(4)实现苜蓿生产机械集成化、智能化

加强苜蓿生产作业机械的集成化、智能化研究,提高作业机械的生产效率,降低作业成本和劳动强度,同时减少作业损失,实现苜蓿机械化生产作业时集成作业工序和智能化操作控制系统。

参 考 文 献

- 刘贵林,杨世昆,贾红燕,等.我国苜蓿种子收获机械研究的现状和发展[J].草业科学,2007,58:9.
LIU Guilin, YANG Shikun, JIA Hongyan, et al. The present situation and development of research about *Medicago sativa* seed harvesting machinery in China[J]. Pratacultural Science, 2007,58:9. (in Chinese)
- 王凤清,耿万成.苜蓿种子站收获工艺及收获机械的研究[J].农机化研究,1992,14(1):20-27.
- 陈海霞,陈海涛.9ZS-1.3型柔性苜蓿种子收获机的研究与试验分析[J].当代农机,2014(1):68-69.
- 于承福,姜志国.新疆-2.5牵引式草籽联合收获机试验报告[R].长春:吉林工业大学,1981.
- 李洪森,冯奎武.东风ZKB-5型联合收获机改装收获紫花苜蓿草籽的试验[J].畜牧机械,1984(4):1-20.
- 陈海霞,于晓波,张海琨,等.吸风式柔性苜蓿种子梳脱收获机:中国,203761859U[P].2014-08-13.
- 邵长勇,王德成,尤泳,等.我国牧草种子产业发展现状分析[J].中国奶牛,2014(增刊2):9-12.
SHAO Changyong, WANG Decheng, YOU Yong, et al. Present situation analysis on the development of Chinese forage seed industry[J]. China Dairy Cattle, 2014(Supp.2):9-12. (in Chinese)
- 张洋,王德成,王光辉,等.我国牧草种子机械化加工的现状与发展[J].农机化研究,2007,29(1):1-3.
ZHANG Yang, WANG Decheng, WANG Guanghui, et al. Current situation and development of mechanized processing of herbage seeds in China[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2007,29(1):1-3. (in Chinese)
- 邵长勇,尤泳,王光辉,等.现代物理种业的发展前景展望[J].中国种业,2014(1):6-9.
- 邵长勇,王德成,刘亮东,等.冷等离子体种子播前处理技术研究动态及展望[J].中国种业,2014(12):1-4.
- 邵长勇,王德成,唐欣,等.冷等离子体处理对紫花苜蓿种子萌发及田间长势的影响[J/OL].农业机械学报,2016,47(3):138-143. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160320&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.03.020.
SHAO Changyong, WANG Decheng, TANG Xin, et al. Effects of low-temperature plasma on seed germination characteristics and growth condition in field of alfalfa[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(3):138-143. (in Chinese)
- 邵长勇,王德成,唐欣,等.弧光磁化等离子体种子处理装备应用现状及发展趋势[J].中国种业,2012(8):1-3.
- SHAO C, WANG D, TANG X, et al. Stimulating effects of magnetized arc plasma of different intensities on the germination of old spinach seed[J]. Mathematical and Computer Modelling, 2013, 58(3):814-818.
- DOBRIN D, MAGUREANU M, MANDACHE N B, et al. The effect of non-thermal plasma treatment on wheat germination and early growth[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2015, 29:255-260.
- MATRA K. Non-thermal plasma for germination enhancement of radish seeds[J]. Procedia Computer Science, 2016, 86:132-135.
- ZAHORANOVA A, HENSELOVA M, HUDECIOVA D, et al. Effect of cold atmospheric pressure plasma on the wheat seedlings vigor and on the inactivation of microorganisms on the seeds surface[J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 2016, 36(2):397-414.
- 王德成,邵长勇,王光辉,等.一种冷等离子体处理的苜蓿育种方法:中国,103718848 B[P].2015-09-09.
- 卢欣石.当前国内外苜蓿育种主要目标与技术分析[C]//中国草学会牧草育种专业委员会2007年学术研讨会论文集,2007.
- 宋江腾,张淑敏.小区播种机的研究现状及发展方向[J].农机化研究,2004,26(4):14-16.
SONG Jiangteng, ZHANG Shumin. Current situation and developmental orientation of plot seeder[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2004,26(4):14-16. (in Chinese)
- 胡波,黄杰.XBJ-150系列农业试验小区播种机[J].现代化农业,2003(8):28-30.
- 王德成,高扬,王光辉,等.一种自走式牧草小区播种作业机械:中国,202232084U[P].2012-05-30.

22 高扬,王德成,方宪法,等.多功能自走式牧草育种小区作业机械传动系匹配优化[J/OL].农业机械学报,2012,43(增刊):11-18. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2012s03&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.S0.003.
GAO Yang, WANG Decheng, FANG Xianfa, et al. Optimal matching of transmission system for multi-purpose self-propelled pasture plot operation machine[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012,43(Supp.):11-18. (in Chinese)

23 杨青川,孙彦.中国苜蓿育种的历史,现状与发展趋势[J].中国草地学报,2011,33(6):95-101.
YANG Qingchuan, SUN Yan. The history, current situation and development of alfalfa breeding in China[J]. Chinese Journal of Grassland, 2011,33(6):95-101. (in Chinese)

24 汤洪,刘振华.美国紫花苜蓿种植的全程机械化[J].农业机械,2014(4):21.

25 NY/T 1780—2009 苜蓿种子生产技术规程[S].2009.

26 余大庆.牧草免耕播种机械化技术研究进展[J].农业工程,2015,5(6):18-19.
SHE Daqing. Research progress of no-tillage sowing mechanical technology for pasture[J]. Agricultural Engineering, 2015,5(6):18-19. (in Chinese)

27 王振华.气流分配式牧草播种机关键部件优化与试验[D].北京:中国农业大学,2014.
WANG Zhenhua. Optimizing and experiment of the key parts of the air seeder[D]. Beijing: China Agricultural University, 2014. (in Chinese)

28 徐万宝.草地免耕播种技术及其免耕播种机具的研究[C]//中国国际草业发展大会暨中国草原学会第六届代表大会,北京,2002.

29 王德成.牧草生产与秸秆饲用加工机械化技术[M].北京:中国农业科学技术出版社,2005.

30 周良塘.2bmc-9/20型牧草精量播种机[J].农业科技与信息,2004(9):37.

31 李长荣,浦俊文.2bmc-24牧草精量播种机的设计[C]//2012中国农业机械学会国际学术年会,杭州,2012.

32 戴立勋,赵春花,陈凯.2BC-1.2型山地牧草播种机设计与试验[J].中国农机化学报,2014(4):12-16.
DAI Lixun, ZHAO Chunhua, CHEN Kai. Design and experiments of 2BC-1.2 grass seeder[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2014(4):12-16. (in Chinese)

33 陶桂香,衣淑娟.2bmy-5型牧草免耕播种与液体施肥机的研制[C]//2010国际农业工程大会,上海,2010.

34 李萍.气力式牧草免耕播种机结构分析与性能试验研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2012.
LI Ping. Structured analysis and performance test study on pneumatic-type herbage no-till planter[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2012. (in Chinese)

35 赵涛,赵春花.小型山地苜蓿精量条播机的设计与试验[J].甘肃农业大学学报,2014,49(2):165-169.
ZHAO Tao, ZHAO Chunhua. Design and test research of small-scale alfalfa precision drill seeder for mountain[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2014,49(2):165-169. (in Chinese)

36 刘琦,赵春花.2BC-6型山地苜蓿精量播种机的设计与试验研究[J].中国农机化学报,2016,37(9):20-23.
LIU Qi, ZHAO Chunhua. Design and experiment of 2BC-6 type mountain alfalfa precision seeder[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016,37(9):20-23. (in Chinese)

37 张淑敏,尹美贵,易经涛,等.新型紫花苜蓿补播排种器:中国,203226017 U[P].2013-10-09.

38 李扬,孙洪仁,丁宁,等.紫花苜蓿根系生物量[J].草地学报,2011,19(5):872-879.
LI Yang, SUN Hongren, DING Ning, et al. Alfalfa (Medicago sativa L.) root biomass[J]. Acta Agrectir Sinica, 2011,19(5):872-879. (in Chinese)

39 侯扶琴,吕转平,蒙旭辉.切根对紫花苜蓿生产的影响[J].草业科学,2015,32(7):1088-1092.
HOU Fuqin, LÜ Zhuanning, MENG Xuhui. The influence of roots cutting technology on alfalfa production[J]. Pratacultural Science, 2015,32(7):1088-1092. (in Chinese)

40 王德成,贺长彬,王光辉,等.一种退化草地改良用切根平地机及其改良方法:中国,104541622 A[P].2015-04-29.

41 李江国,刘占良,张晋国,等.国内外田间机械除草技术研究现状[J].农机化研究,2006,28(10):14-16.
LI Jiangguo, LIU Zhanliang, ZHANG Jinguo, et al. Review of mechanical weeding technique in field at home and abroad[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2006,28(10):14-16. (in Chinese)

42 梁远,汪春,张伟,等.3ZCS-7型复式中耕除草机的设计[J].农机化研究,2010,32(6):21-24.
LIANG Yuan, WANG Chun, ZHANG Wei, et al. Design of 3ZCS-7 type multiple weeding-cultivating machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2010,32(6):21-24. (in Chinese)

43 韩豹,申建英,李悦梅.3ZCF-7700型多功能中耕除草机设计与试验[J].农业工程学报,2011,27(1):124-129.
HAN Bao, SHEN Jiangying, LI Yuemei. Design and experiment on 3ZCF-7700 multi-functional weeding-cultivating machine[J]. Transactions of the CSAE, 2011,27(1):124-129. (in Chinese)

44 王金武,牛春亮,张春建,等.3ZS-150型水稻中耕除草机设计与试验[J].农业机械学报,2011,42(2):75-79.
WANG Jinwu, NIU Chunliang, ZHANG Chunjian, et al. Design and experiment of 3ZS-150 paddy weeding-cultivating machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(2):75-79. (in Chinese)

45 NY/T 2699—2015 牧草机械收获技术规程-苜蓿干草[S].2015.

46 付作立.双圆盘式刈割压扁机切割系统研究[D].北京:中国农业大学,2014.

47 王德成,付作立,王光辉,等.一种小型自走式苜蓿刈割压扁机:中国,210210203705.4[P].2012-06-20.

48 赵建柱,孙凤涛,陈宏伟,等.全液压山地手扶式苜蓿刈割压扁机设计与试验[J].农机化研究,2017,39(3):89-92.
ZHAO Jianzhu, SUN Fengtao, CHEN Hongwei, et al. A kind of full hydraulic mountains alfalfa cutting and flattening machine design and test study[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017,39(3):89-92. (in Chinese)

49 郭震,王德成,郭备,等.圆盘割草机割台试验台的设计与仿真[J].中国奶牛,2016(2):31-34.
GUO Zhen, WANG Decheng, WU Bei, et al. The design and simulation of the test bench of a disc mower[J]. China Dairy Cattle, 2016(2):31-34. (in Chinese)

50 王德成,付作立,王光辉,等.一种双圆盘式旋转割草机刈割喂入方式及装置:中国,201310082313.1[P].2013-05-22.

51 王德成,高东明,王光辉,等.往复式割草调制机传动机构:中国,201120127423.1[P].2011-11-30.

52 王德成,余永,王光辉,等.一种小型自走式苜蓿刈割压扁机的传动系统:中国,201120466495.9[P].2011-11-22.

- 53 高东明,王德成,郝丽颖,等.割草调制机的调制机构设计与试验[J].江苏大学学报:自然科学版,2013(3):287-292.
GAO Dongming, WANG Decheng, HAO Liying, et al. Design and experiment of new conditioning mechanism for mower conditioner [J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2013(3):287-292. (in Chinese)
- 54 赵建柱,郭海林,王枫辰,等.苜蓿草压扁试验台设计与试验[J/OL].农业机械学报,2014,45(增刊1):119-123. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2014s120&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.S0.020.
ZHAO Jianzhu, GUO Hailin, WANG Fengchen, et al. Design and test of alfalfa flattening test bench[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(Supp.1):119-123. (in Chinese)
- 55 邬备,王德成,王光辉,等.小型自走式割草机仿形装置仿真分析与试验[J/OL].农业机械学报,2015,46(7):123-129. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150719&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.07.019.
WU Bei, WANG Decheng, WANG Guanghui, et al. Simulation analysis and experiment of profiling device of small self-propelled mower[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(7):123-129. (in Chinese)
- 56 阿力木,罗军.牧神M-2400型旋转式割草压扁机[J].新疆农机化,2006(3):23.
- 57 翟改霞,刘贵林,贺刚,等.水平旋转搂草机设计与试验[J].农机化研究,2014,36(7):168-173.
ZHAI Gaixia, LIU Guilin, HE Gang, et al. Design and experiment on the horizontal rotary rake[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014,36(7):168-173. (in Chinese)
- 58 贾红超,塔娜,布库,等.RT13型指盘搂草机的设计与研究[J].农机化研究,2015,37(12):102-105.
JIA Hongchao, TA Na, BU Ku, et al. Design and research of the RT13 disc rakes[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(12):102-105. (in Chinese)
- 59 罗金海,王振华,李志杰,等.牵引式V形折叠搂草翻晒机设计与试验[J/OL].农业机械学报,2014,45(增刊):107-112. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2014s118&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.S0.018.
LUO Jinhai, WANG Zhenhua, LI Zhijie, et al. Design and experiment of trail-type v-shape folding hay rake[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(Supp.):107-112. (in Chinese)
- 60 李凤鸣,马赛,张平,等.指盘式搂草机的设计与试验研究[J].农机化研究,2016,38(7):176-181.
LI Fengming, MA Sai, ZHANG Ping, et al. Design and experiment of finger-wheel rake[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016,38(7):176-181. (in Chinese)
- 61 李旭英,杨明韶,鲁国成,等.苜蓿压捆过程中压缩与恢复应力传递规律[J].农业工程学报,2014,30(16):61-67.
LI Xuying, YANG Mingshao, LU Guocheng, et al. Transfer rule of compression and springback stress in compression process of alfalfa[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(16):61-67. (in Chinese)
- 62 王锋德,陈志,王俊友,等.4YF-1300型大方捆打捆机设计与试验[J].农业机械学报,2009,40(11):36-41.
WANG Fengde, CHEN Zhi, WANG Junyou, et al. Design and experiment of 4YF-1300 large rectangular baler[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(11):36-41. (in Chinese)
- 63 ROBB J. Agricultural baler: U. S. Patent 4,644,739[P]. 1987-02-24.
- 64 KENNETH A A, VAN Ness T. Hay baler: U. S. 2,775,930[P]. 1957-01-01.
- 65 马晓刚.自走式方草捆压捆机关键部件优化设计与试验研究[D].北京:中国农业大学,2014.
- 66 苏刚,史建新,葛炬.基于逆向工程的方捆机打结器空间角度测量[J].农业机械学报,2008,39(6):81-83.
SU Gang, SHI Jianxin, GE Ju. Measurement the spatial angle of square knotter on the basis of reverse engineering[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008,39(6):81-83. (in Chinese)
- 67 孙贵斌,李明利,孟伟,等.卡扣式方草捆打结器的设计[J].农业机械学报,2008,39(12):210-212.
- 68 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)
- 69 王振华,王德成,刘贵林,等.方草捆压捆机捡拾器参数设计[J].农业机械学报,2010,41(增刊):107-109.
WANG Zhenhua, WANG Decheng, LIU Guilin, et al. Pickup parameters design of square baler[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(Supp.):107-109. (in Chinese)
- 70 杨莉,刘贵林,王振华,等.自带传动动力恒频方草捆捡拾压捆机设计与试验[J].农业机械学报,2011,42(增刊):147-151.
YANG Li, LIU Guilin, WANG Zhenhua, et al. Design and experiment of engine-driven constant frequency rectangular pickup baler[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(Supp.):147-151. (in Chinese)
- 71 尹建军,刘丹萍,李耀明.方捆机捡拾器高度自动仿形装置参数分析与试验[J/OL].农业机械学报,2014,45(8):86-92. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140814&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.08.014.
YIN Jianjun, LIU Danping, LI Yaoming. Design and parameters analyses of automatic height profiling device of quadrangle-bale baler pickup[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(8):86-92. (in Chinese)
- 72 张姬,耿浩,耿爱军,等.卡扣式方草捆打结器的集成与试验[J].农业工程学报,2015,31(6):64-68.
ZHANG Ji, GENG Hao, GENG Aijun, et al. Li Ruxin. Integration and experiment of clip bale knotter[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(6):64-68. (in Chinese)
- 73 杜克爽.方草捆压捆机捡拾装置的优化设计及试验研究[D].北京:中国农业大学,2015.
- 74 尹建军,高强,陈亚明.基于刚柔接触动力学的打结器虚拟打结方法研究[J/OL].农业机械学报,2016,47(9):85-92. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160913&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.09.013.
YIN Jianjun, GAO Qiang, CHEN Yaming. Virtual knotting method of knotter based on rigid flexible contact dynamics[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(9):85-92. (in Chinese)
- 75 熊亚,李海涛,陈龙健,等.打结器割绳脱扣机构与绕绳机构作用分析与改进设计[J/OL].农业机械学报,2016,47(10):44-50. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161006&journal_id=jcsam

- jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.10.006.
- XIONG Ya, LI Haitiao, CHEN Longjian, et al. Analysis and modification of interaction between wiper mechanism and billhook mechanism for knotter[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(10): 44–50. (in Chinese)
- 76 刘忠宽, 刘振宇, 玉柱, 等. 我国苜蓿青贮饲料的加工与利用现状[J]. 河北农业科学, 2016, 20(4): 62–65.
- LIU Zhongkuan, LIU Zhenyu, YU Zhu, et al. The status of alfalfa silage processing and utilization in China[J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 2016, 20(4): 62–65. (in Chinese)
- 77 KATTENSTROTH R, HARMS H H, LANG T. Alignment of straw to optimise the cutting process in a combine's straw chopper[J]. Landtechnik, 2011, 66(5): 354–357.
- 78 WALTHER V, STEIN D, WILD K. Change in knife sharpness on forage chopper and its consequences for knife sharpening[J]. Landtechnik, 2011, 66(3): 173–175.
- 79 SOUZA L H, VIEIRA L B, DIAS G P, et al. Production capacity and specific energy consumption in forage choppers of the disintegrator/chopper/grinder type[J]. Revista Brasileira de Engenharia Agricola e Ambiental, 2009, 13(1): 88–93.
- 80 AJAV E A, YINUSA B. Factors affecting forage chopper performance[J]. Agricultural Engineering International: CIGR Journal, 2015, 17(3): 112–116.
- 81 杨世昆, 苏正范. 饲草生产机械与设备[M]. 北京: 中国农业出版社, 2009.
- 82 玉柱, 周禾, 薛支生. 苜蓿袋式灌装青贮技术研究[C]//中国苜蓿发展大会, 2003.
- 83 李小龙, 薛友生. 袋式灌装青贮技术[J]. 农机科技推广, 2004(1): 30.
- 84 国家牧草产业技术体系. 牧草产业技术研究综述[M]. 北京: 中国农业出版社, 2013.
- 85 姜守明. 9LT-50 型青贮饲料袋式灌装机[J]. 农业知识: 科学养殖, 2004(6): 15.
- 86 王亚波, 王金平, 胡景媛. 秸秆袋贮加工工艺及关键设备的研制[J]. 新疆农村机械化, 2004(6): 46–47.
- 87 郑泽颖, 张艳红, 李小龙. 青贮灌装平台的研制[J]. 北京农业, 2011(6): 233–235.
- ZHENG Zeying, ZHANG Yanhong, LI Xiaolong. Development of silage silo loading platform[J]. Beijing Agriculture, 2011(6): 233–235. (in Chinese)
- 88 万其号, 王德成, 王光辉, 等. 自走式牧草青贮联合装袋机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(19): 30–37.
- WAN Qihao, WANG Decheng, WANG Guanghui, et al. Design and experiment of self-propelled grass silage combined bagging machine[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(19): 30–37. (in Chinese)
- 89 王春光, 敖恩查, 邢冀辉, 等. 钢辊外卷式圆捆打捆机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(9): 103–106.
- WANG Chunguan, AO Encha, XING Jihui, et al. Design and experiment on round baler with revolute steel roller[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(9): 103–106. (in Chinese)
- 90 王德福, 蒋亦元, 王吉权. 钢辊式圆捆打捆机结构改进与试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(12): 84–88.
- WANG Defu, JIANG Yiyuan, WANG Jiquan. Structure-improving and experiment of steel-roll round baler[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(12): 84–88. (in Chinese)
- 91 雷军乐, 王德福, 李东红, 等. 钢辊式圆捆机旋转草芯形成影响因素分析与优化[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(12): 18–25. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20151203&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.12.003.
- LEI Junle, WANG Defu, LI Donghong, et al. Influence factors analysis and optimization of forming rotary straw core by steel-roll round baler[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(12): 18–25. (in Chinese)
- 92 高东明, 王德成, 李杰, 等. 青饲圆捆机对数螺旋式成形装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(7): 118–122. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150718&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.07.018.
- GAO Dongming, WANG Decheng, LI Jie, et al. Design and test of logarithmic spiral round baler chamber[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(7): 118–121. (in Chinese)
- 93 李叶龙, 王德福, 李东红, 等. 辊盘式圆捆机卷捆机理分析与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(12): 45–52. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161207&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.12.007.
- LI Yelong, WANG Defu, LI Donghong, et al. Theoretical analysis and experiment of baling mechanism of roll-disk round baler[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(12): 45–52. (in Chinese)
- 94 董妍, 常蕊. 圆捆缠膜机械国内外研究概况[J]. 农业工程, 2016, 6(1): 19–21.
- DONG Yan, CHANG Rui. Development situation of round bale wrapping machine at home and abroad[J]. Agricultural Engineering, 2016, 6(1): 19–21. (in Chinese)
- 95 杨星. 转臂式圆草捆包膜机的设计与试验研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2016.
- 96 郝彦靖, 寇明杰, 李晓康, 等. 自走式青贮饲料裹膜机: 中国, 105460256A[P]. 2016–04–06.
- 97 李志鹏, 吕凤玉, 袁虎成, 等. 基于 AVR 单片机的圆捆裹膜机控制系统开发[J]. 机械研究与应用, 2016, 29(6): 198–200.
- LI Zhipeng, LÜ Fengyu, YUAN Hucheng, et al. Control system development of round baler based on the AVR MCU[J]. Mechanical Research and Applications, 2016, 29(6): 198–200. (in Chinese)
- 98 张将, 刁培松, 刁怀龙, 等. 自走式青贮打捆缠膜一体机的设计与试验[J]. 农机化研究, 2017, 39(12): 73–77.
- ZHANG Jiang, DIAO Peisong, DIAO Huailong, et al. Design and experiment on self-propelled silage baling tangle film machine[J]. Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(12): 73–77. (in Chinese)
- 99 高旭宏, 徐向阳, 王书翰, 等. 方草捆集捆机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(4): 111–117. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170414&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.04.014.
- GAO Xuhong, XU Xiangyang, WANG Shuhan, et al. Design and experiment of rectangular bale multipack[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(4): 111–117. (in Chinese)
- 100 杨志超, 张云, 刘丽娟. 牵引式圆草捆捡拾车的设计与试验研究[J]. 农机化研究, 2017, 39(8): 242–246.
- YANG Zhichao, ZHANG Yun, LIU Lijuan. A towed round bale collecting machine design and experimental research[J].

- Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(8): 242–246. (in Chinese)
- 101 王超, 张云, 刘忠舍. 基于 CAXA 与 Matlab 的捡拾臂优化设计与分析求解[J]. 农机化研究, 2016, 38(9): 180–185. WANG Chao, ZHANG Yun, LIU Zhongshe. The structure optimization of picking-up arm with the method of analysis and solution based on CAXA and Matlab software [J]. Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(9): 180–185. (in Chinese)
- 102 张强, 张叔峰. 草捆自动捡拾装载机: 中国, 205695393 U[P]. 2016–11–23.
- 103 郝兴玉, 贺刚, 董佳佳, 等. 基于 ARIZ 算法的方草捆收集车改进设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(增刊): 254–260. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2016s039&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.039.
- HAO Xingyu, HE Gang, DONG Jiajia, et al. Improved design and test on collecting wagon of rectangular bale based on ARIZ algorithm[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.): 254–260. (in Chinese)
- 104 余永, 贺刚, 王光辉, 等. 苜蓿同向异形制备与堆存试验[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(3): 99–105. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170312&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.03.012.
- YU Yong, HE Gang, WANG Guanghui, et al. Preparation and storage experiment of cocurrent special-shaped alfalfa[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3): 99–105. (in Chinese)
- 105 王光辉, 余永, 王德成, 等. 一种苜蓿青干草调制整理方法及设备: 中国, 103283420 A[P]. 2013–09–11
- 106 王光辉, 余永, 王德成, 等. 一种苜蓿鲜草梳理方法和专用梳理装置: 中国, 103283409 A[P]. 2013–09–11
- 107 王光辉, 余永, 王德成, 等. 一种苜蓿鲜草草辫成型工艺及专用成型装置: 中国, 103355560 A[P]. 2013–10–23.
- 108 郭英洲, 李志奎, 李存斌, 等. 9QZ–2.0 型自走式青贮取料机的研制[J]. 农机化研究, 2010, 32(8): 104–106. GUO Yingzhou, LI Zhikui, LI Cunbin, et al. Research of the 9QZ–2.0 self-propelled silage loader [J]. Agricultural Mechanization Research, 2010, 32(8): 104–106. (in Chinese)
- 109 赵风雷, 赵勇, 杨帆, 等. 一种自走式青贮堆料取料机: 中国, 103818736 A[P]. 2014–05–28.
- 110 王光辉, 邹备, 王德成, 等. 青贮取料头: 中国, 103621266 A[P]. 2014–03–12.
- 111 吴劲锋, 黄建龙, 张维果, 等. 苜蓿草粉制粒密度与挤出力模拟试验[J]. 农业机械学报, 2007, 38(1): 68–71. WU Jinfeng, HUANG Jianlong, ZHANG Weiguo, et al. Simulated experiment and model of pelletizing density and extruding force for alfalfa powder [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(1): 68–71. (in Chinese)
- 112 申庆泰, 金敏, 池少英, 等. 饲料粉碎机锤片磨损特征与自磨刀强化处理[J]. 农业机械学报, 2010, 41(9): 229–232. SHEN Qingtai, JIN Min, CHI Shaoying, et al. Wearing characteristics and self-sharpening enhanced treatment of feed grinder hammer [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(9): 229–232. (in Chinese)
- 113 田海清, 屈丰富, 刘伟峰, 等. 锤片式粉碎机分段圆弧筛片设计与粉碎性能试验[J]. 农业机械学报, 2011, 42(4): 92–95. TIAN Haiqing, QU Fengfu, LIU Weifeng, et al. Design and experiment of piecewise arc-shaped screen on hammer mill to grinding performance [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(4): 92–95. (in Chinese)
- 114 付敏, 李锐, 马雷. 轴向振筛式秸秆粉碎机研制与试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(22): 16–22. FU Min, LI Rui, MA Lei. Development and test of straw grinder with axial vibration screen type [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(22): 16–22. (in Chinese)
- 115 汪建新, 张广义, 曹丽英. 新型锤片式饲料粉碎机分离流道内物料运动规律[J]. 农业工程学报, 2013, 29(9): 18–23. WANG Jianxin, ZHANG Guangyi, CAO Liying. Research of materials motion law in separation flow of new type hammer feed grinder [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(9): 18–23. (in Chinese)
- 116 祁晓敏. 多功能牧草粉碎机关键机构的设计及制造工艺研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2016.
- 117 曹丽英, 贺龙, 张玉宝, 等. 锤片式饲料粉碎机内气固两相流场压强的测试方法[J]. 农业工程学报, 2016, 32(11): 90–97. CAO Liying, HE Long, ZHANG Yubao, et al. Pressure test method of gas-solid two-phase flow field in grinding chamber with hammer mill [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(11): 90–97. (in Chinese)
- 118 曹丽英, 张跃鹏, 张玉宝, 等. 筛片参数优化对饲料粉碎机筛分效率的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(22): 284–288. CAO Liying, ZHANG Yuepeng, ZHANG Yubao, et al. Influence of screen parameters optimization on screening efficiency of feed hammer mill [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(22): 284–288. (in Chinese)
- 119 曹丽英, 史兴华, 汪建新, 等. 锤片式饲料粉碎机分离装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(11): 128–133. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161117&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.11.017.
- CAO Liying, SHI Xinghua, WANG Jianxin, et al. Design and experiment of separation device of hammer feed mill [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11): 128–133. (in Chinese)
- 120 张百良, 王许涛, 杨世关. 秸秆成型燃料生产应用的关键问题探讨[J]. 农业工程学报, 2008, 24(7): 296–300. ZHANG Bailiang, WANG Xutao, YANG Shiguan. Key problems in production and application of straw densification briquetting fuel (SDBF) [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(7): 296–300. (in Chinese)
- 121 曹致中. 草产品学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2004: 26–29.
- 122 高国章, 西庆祥, 何占松, 等. 国内外粗饲料加工技术及其机具的发展水平与趋向[J]. 农机化研究, 1996, 18(1): 48–51.
- 123 王峰, 刘德旺. 饲草压块机具研究现状[J]. 中国科技论文在线, 2005: 9. WANG Feng, LIU Dewang. Study on the present state of the forage baler [J]. Chinese Scientific Papers Online, 2005: 9. (in Chinese)
- 124 俞国胜, 侯孟. 生物质成型燃料加工装备发展现状及趋势[J]. 林业机械与木工设备, 2009, 37(2): 4–8. YU Guosheng, HOU Meng. Development status and trend of biomass briquettes processing equipment [J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2009, 37(2): 4–8. (in Chinese)
- 125 陈红意, 赵满全, 李萍. 苜蓿干燥技术进展研究[C]//中国农业工程学会 2011 年学术年会论文集, 2011.
- 126 PATIL R T, SOKHANSANJ S, ARINZE E A, et al. Thin layer drying of components of fresh alfalfa [J]. Canadian Agricultural Engineering, 1992, 34: 343.
- 127 DIMITRIADIS A N, AKRITIDIS C B. A model to simulate chopped alfalfa drying in a fixed deep bed [J]. Drying Technology, 2004, 22(3): 479–490.

128 HIGGINS T R, SPOONER A E. Microwave drying of alfalfa compared to field-and oven-drying: effects on forage quality[J]. Animal Feed Science and Technology, 1986, 16(1-2): 1-6.

129 ADAPA P K, SCHOENAU G J, SOKHANSANJ S. Performance study of a heat pump dryer system for specialty crops-part 1: development of a simulation model[J]. International Journal of Energy Research, 2002, 26(11): 1001-1019.

130 王丽媛. 基于 S3C2440A 的苜蓿太阳能干燥检测系统研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2014.

131 CHE G, WEN H J, WAN L, et al. Kinematic simulation and experimental study on rotating air flow for drying alfalfa[J]. Drying Technology, 2015, 33(14): 1720-1727.

132 ARINZE E A, SCHOENAU G J, SOKHANSANJ S, et al. Aerodynamic separation and fractional drying of alfalfa leaves and stems-a review and new concept[J]. Drying Technology, 2003, 21(9): 1669-1698.

133 WU H. Alfalfa drying properties and technologies-in review[J]. Nature and Science, 2004, 2(4): 65-67.

134 KARALI M A, SUNKARA K R, HERZ F, et al. Experimental analysis of a flighted rotary drum to assess the optimum loading [J]. Chemical Engineering Science, 2015, 138: 772-779.

135 IGUAZ A, BUDMAN H, DOUGLAS P L. Modelling and control of an alfalfa rotary dryer[J]. Drying Technology, 2002, 20(9): 1869-1887.

136 CASTANO F, RUBIO F R, ORTEGA M G. Modeling of a cocurrent rotary dryer[J]. Drying Technology, 2012, 30(8): 839-849.

137 王光辉,王德成,吕黄珍,等. 牧草组合干燥装备设计[J]. 农业机械学报, 2006,47(8): 152-154.

138 WANG Guanghui, WANG Decheng, LÜ Huangzhen, et al. Design of forage drying facility[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006,47(8): 152-154. (in Chinese)

139 卢英林. 苜蓿草干燥成套设备及干燥机理[C]//首届中国苜蓿发展大会, 2001.

139 易启伟,张永林,邓勇,等. 薄板转筒干燥工艺的设计计算[J]. 武汉工业学院学报,2010,29(2):29-31.

140 YI Qiwei,ZHANG Yonglin,DENG Yong,et al. Drying process design and calculation of the sheet revolving-drum drier[J]. Journal of Wuhan Polytechnic University, 2010,29(2):29-31. (in Chinese)

140 董航飞,郑先哲,王建英. 四重滚筒式牧草干燥机结构优化[J]. 东北农业大学学报, 2010, 41(11): 136-139,166.

141 DONG Hangfei, ZHENG Xianzhe, WANG Jianying. Structure optimization of four-fold rotary dryer for forage drying[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2010,41(11): 136-139,166. (in Chinese)

141 李爱平,汪春,胡军祥,等. 热风干燥参数对苜蓿粗蛋白含量的影响[J]. 农业机械学报, 2008, 39(1): 205-207.

142 王文明,陈红意,赵满全. 提高紫花苜蓿热风干燥品质的工艺参数优化[J]. 农业工程学报, 2015, 31(增刊1): 337-345.

143 WANG Wenming, CHEN Hongyi, ZHAO Manquan. Technological parameters optimization for improving quality of heated-air dried alfalfa[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(Supp.1): 337-345. (in Chinese)

143 宁国鹏. 苜蓿干燥茎叶分离设备研究[D]. 北京:中国农业大学,2010.

144 OGDEN R L, KEHR W B. Alfalfa management for dehydration[C]//Proc. 9th Technical Alfalfa Conference, 1965: 36-74.

145 MENZIES D, BILANSKI W K. Aerodynamic properties of alfalfa particles[J]. Transactions of the ASAE, 1968, 11(6): 829-831.

146 RAGHAVAN G S, BILANSKI W K. Mechanical properties affecting leaf loss in alfalfa[J]. Canadian Agric. Eng, 1973, 15(1): 20-23.

147 BILANSKI W K. Enhanced utilization of forage plants through fractionation-state of the art[J]. International Agricultural Engineering Journal, 1992, 1(1): 1-13.

148 ADAPA P K, SCHOENAU G J, TABIL L G, et al. Customized and value-added high quality alfalfa products; a new concept [J]. CIGR Journal, 2007,9:Manuscript FP 07 003.

149 CURRENCE H D, BUCHELE W F. Leaf-strip harvester for alfalfa[J]. Agricultural Engineering, 1967, 48(1): 20.

150 SHINNERS K J, HERZMANN M E, BINVERSIE B N, et al. Harvest fractionation of alfalfa[J].Transactions of the ASABE, 2007,50(3):713-718.

151 DIGMAN M F, RUNGE T M, SHINNERS K J, et al. Wet fractionation for improved utilization of alfalfa leaves[J]. Biological Engineering (ASABE), 2013, 6(1): 29-42.

152 GAN-MOR S, WISEBLUM A, REGEV R. Separation of leaves from stems with a perforated rotating drum under suction[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1986, 34(4): 275-284.

153 BILANSKI W K, GRAHAM W D, MOWAT D N, et al. Separation of alfalfa silage into stem and leaf fractions in a horizontal airstream[J]. Transactions of the ASAE,1989, 32(6):1684-1690.

154 ADAPA P K, SCHOENAU G J, ARINZE E A. Fractionation of alfalfa into leaves and stems using a three pass rotary drum dryer [J]. Biosystems Engineering, 2004, 91(4): 455-463.

155 ARINZE E A, SCHOENAU G J, ADAPA P. Modeling the fractional drying and aerodynamic separation of alfalfa into leaves and stems in a rotary dryer[J]. Drying Technology, 2007,25(4-6):785-798.

156 王德成,高东明,王光辉,等. 一种苜蓿分层分形收获机及其收获方法: 中国,102165878A[P]. 2011-08-31.

157 熊华,熊仕玉. 干燥苜蓿叶茎分离装置:中国,2478698[P]. 2002-02-27.

158 罗小燕,王德成,王光辉,等. 苜蓿转筒干燥时茎叶分离出口气流场模拟与优化[J]. 农业机械学报, 2009, 40(10): 71-74.

159 LUO Xiaoyan,WANG Decheng, WANG Guihui,et al. Optimization of the wind field of the separation exit of alfalfa rotary drum dryer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(10): 71-74. (in Chinese)

159 高扬,王德成,王光辉,等. 紫花苜蓿干燥和茎叶分离效果预测模型与工艺优化[J]. 农业机械学报, 2010,41(6): 113-117.

160 GAO Yang, WANG Decheng, WANG Guanghui, et al. Effect prediction model and process optimization of the drying and separating for leaf-stem of fresh chopped alfalfa[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(6): 113-117. (in Chinese)

160 宁国鹏,王德成,王光辉,等. 苜蓿干燥与茎叶分离设备设计与 CFD 模拟[J]. 农业机械学报, 2011, 42(1): 84-89.

161 NING Guopeng, WANG Decheng, WANG Guanghui,et al. Design and CFD simulation of quad-pass rotary drum dryer-separator [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(1): 84-89. (in Chinese)