

徐立章
著

江苏高校优势学科建设工程资助项目(苏政办发〔2014〕37号)
霍英东教育基金会青年教师基金资助项目(141051)
江苏省“333 高层次人才培养工程”科研资助项目(BRA2012161)

水稻脱粒分离理论与 关键技术研究及其应用

 江苏大学出版社
JIANGSU UNIVERSITY PRESS



水稻脱粒分离理论与 关键技术研究及其应用

徐立章 著



江苏大学出版社
JIANGSU UNIVERSITY PRESS

镇江



图书在版编目(CIP)数据

水稻脱粒分离理论与关键技术研究及其应用 / 徐立章著. — 镇江 : 江苏大学出版社, 2014.12
ISBN 978-7-81130-853-2

I. ①水… II. ①徐… III. ①水稻—脱粒机—研究
IV. ①S511②S226.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 287125 号

水稻脱粒分离理论与关键技术研究及其应用

SHUIDAO TUOLI FENLI LILUN YU GUANJIAN
JISHU YANJIU JIQI YINGYONG

著 者/徐立章

责任编辑/徐 婷

出版发行/江苏大学出版社

地 址/江苏省镇江市梦溪园巷 30 号(邮编: 212003)

电 话/0511-84446464(传真)

网 址/http://press. ujs. edu. cn

排 版/镇江新民洲印刷有限公司

印 刷/句容市排印厂

经 销/江苏省新华书店

开 本/718 mm×1 000 mm 1/16

印 张/11

字 数/181 千字

版 次/2014 年 12 月第 1 版 2014 年 12 月第 1 次印刷

书 号/ISBN 978-7-81130-853-2

定 价/45.00 元

如有印装质量问题请与本社营销部联系(电话:0511-84440882)

江苏高校优势学科建设工程资助项目（苏政办发〔2014〕37号）

霍英东教育基金会青年教师基金资助项目（141051）

江苏省“333 高层次人才培养工程”科研资助项目（BRA2012161）



徐立章, 徐立章, 男, 汉族, 江苏宿迁人, 工学博士, 副研究员, 硕士生导师。现为江苏省收获机械产业技术创新战略联盟秘书长、中国农机学会收获加工分会副秘书长、中国农机学会青年工作委员会委员。

主要从事油菜脱出物粘附与摩擦机理、农业物料往复式振动筛分理论、水稻脱粒损伤机理等收获机械基础理论与关键技术的研究。主持完成了国家自然科学基金、国家 863 计划子课题、中国博士后科学基金特别资助项目、江苏省自然科学基金等课题, 主要完成部省级鉴定 7 项; 目前主持国家自然科学基金、霍英东教育基金会青年教师基金项目、江苏省农业科技支撑计划、江苏省“六大人才”高峰等省部级以上课题 5 项。申请和授权发明专利 16 件、授权实用新型专利 17 件。第一作者发表学术论文 28 篇, SCI/EI 收录 23 篇。获国家技术发明二等奖、中国机械工业科学技术一等奖、教育部科技进步二等奖、江苏省科技进步二等奖、江苏省专利项目金奖和中国专利优秀奖各 1 项; 博士论文获全国优秀博士论文提名奖; 入选江苏省第四期“333 工程”中青年科学技术带头人培养对象; 2014 年获江苏省青年科技奖和中国农业机械学会青年科技奖。

前 言

我国是世界上最大的稻米生产和消费国,但成品大米中碎米率偏高,品质难以达到高等级大米的指标,缺乏国际竞争力。水稻谷粒在挤压、碰撞、冲击等载荷作用下易形成破碎、破壳、应力裂纹等机械损伤。有损伤的稻谷贮藏时易吸湿霉变,产生病虫害;种子发芽率降低;碾米时碎米增多、品质降低。水稻谷粒在脱粒过程中形成的损伤直接影响后续的输送、烘干、储藏和加工等环节,是稻谷机械损伤最主要的源头之一。开展水稻脱粒损伤的研究,分析稻谷机械损伤过程,研试低损伤脱粒装置,不仅能为现有脱粒装置的设计、优化提供依据,还能为寻找新的脱粒方法提供思路,具有重要的现实意义和较高的科学研究价值。本书在这样的背景下,对稻谷力学性能、碰撞损伤理论分析与有限元仿真、损伤量化与检测方法以及低损伤脱粒装置等进行研究。主要工作如下:

(1) 以计算机视觉系统为核心构建稻谷几何形态测量系统,并进行标定,给出面积、形心坐标、稻谷几何尺寸的图像计算方法。将稻米籽粒制成方棒试样,根据单轴压缩试验得到应力-应变曲线,求得稻米的弹性模量和抗压强度等力学特性参数。试验表明:糙米弹性模量和抗压强度随含水率的增大而减小。利用稻谷几何形态测量系统测得糙米方棒试件在轴向压缩过程中的纵向、横向变形,可计算出糙米的泊松比。试验表明:泊松比随稻米含水率的增大而增大,但变化较缓慢。

(2) 开展稻谷与脱粒元件碰撞过程的理论分析和有限元模拟研究工作。

① 将稻谷看作各向同性的均匀椭球体,建立稻谷与脱粒元件接触模型,得出接触过程中压缩位移量和最大压力分布方程及其与时间的关系曲线。以 Von Mises 准则为临界状态条件,建立稻谷与脱粒元件碰撞损伤的临界速度公式。稻谷与钉齿碰撞损伤的临界速度与稻谷弹性模量和抗压强度关系密切,而短纹杆因切向力作用形成破壳损伤的临界速度还与稻壳的临界拉力和摩擦系数有关。相同条件下,稻谷与短纹杆碰撞损伤的临界速度要大于

钉齿碰撞损伤的临界速度,即用于水稻脱粒时短纹杆更不容易造成稻谷的损伤。②在HyperMesh中导入稻谷三层椭球体结构CAD模型,进行网格划分,设置单元、材料属性和接触碰撞参数,构建稻谷的有限元模型。③稻谷与钉齿碰撞过程的LS-DYNA仿真分析表明:钉齿与稻谷接触区域为椭圆,受压应力作用,应力沿四周扩散并逐渐减小,区域中心处应力值最大。籽实皮和胚乳的Mises应力随碰撞速度的增大逐步增大。稻谷与钉齿碰撞时,胚乳达到临界Mises应力31.68 MPa对应的临界速度为24.2 m/s,而籽实皮碰撞损伤的临界速度要大很多。④稻谷与短纹杆碰撞过程的LS-DYNA仿真分析表明:稻壳多处位置承受拉应力作用,最大拉应力位于接触区前部,且不断移动,碰撞过程中稻谷整体发生翻转;稻壳X方向拉应力较大,Y,Z方向较小但分布区域较广。稻壳临界拉应力38.7 MPa对应的稻谷与短纹杆碰撞损伤临界速度为29.5 m/s;当稻壳的临界拉应力减小时,在拉应力作用下稻壳有可能断裂,形成破壳损伤。

(3)对稻谷损伤的量化与检测方法进行深入研究。①用外部损伤指数 D_{out} 和内部损伤指数 D_{in} 定量描述单粒稻谷不同的损伤形式和程度,用标准损伤指数增量 ΔD_s 定量评价脱粒、输送等装置对稻谷总体造成的损伤。②构建基于稻谷体式显微图像的损伤检测硬件系统,采用黑色背景和光纤 $25^\circ \sim 40^\circ$ 光照方式有助于获得损伤稻谷的清晰图像;开发基于Matlab稻谷损伤检测软件,在对损伤稻谷图像背景去除、图像增强、去噪等预处理的基础上,提出基于B样条小波变换的多尺度边缘检测算法。与Sobel,Robert,Laplacian,Canny等边缘检测算法相比,该算法用于稻谷外部损伤区域边缘及稻谷内部裂纹时能检测出丰富的边缘细节,且对非边缘点的抑制能力较好。

(4)研制低损伤脱粒装置,开展室内台架和田间试验研究。①在理论分析和有限元仿真的基础上,设计一种低损伤脱粒装置,脱粒元件采用短纹杆-板齿复合结构,兼顾了纹杆搓擦脱粒作用柔和、稻谷不易损伤以及板齿冲击脱粒作用强、脱净率高的优点,螺旋排列的脱粒元件有助于加快作物在脱粒空间中的流动,减少茎秆破碎。②在自行研制的物料输送-脱粒分离试验台上研究脱粒间隙、脱粒线速度、脱粒元件排列和喂入量等单个因素对短纹杆-板齿脱粒装置水稻脱粒性能的影响;选取脱粒线速度、脱粒间隙和喂入量为影响因子,进行短纹杆-板齿脱粒装置水稻脱粒正交试验研究和

方差分析,并与钉齿滚筒式脱粒装置进行对比,建立了短纹杆-板齿脱粒装置3个主要影响因子与标准损伤指数增量、脱出物杂余量、功耗和脱粒损失率的回归模型。利用 Matlab 多目标优化工具箱,以标准损伤指数增量、脱出物杂余量、功耗和脱粒损失率为目标,获得了短纹杆-板齿脱粒装置的脱粒线速度、脱粒间隙和喂入量等参数的优化组合:滚筒脱粒间隙 14.2 mm,脱粒线速度 21.19 m/s,喂入量 2.0 kg/s。③将研制的短纹杆-板齿脱粒装置移植到江苏沃得农业机械有限公司生产的 4LYB1-2.0 型联合收获机整机上,水稻田间试验和性能检测结果为总损失率 0.95%、破碎率 0.30%、含杂率 0.82%,优于联合收获机优等品的标准,表明短纹杆-板齿脱粒装置有利于减少稻谷损伤,减轻水稻茎秆的破碎程度,并能降低清选负荷,提高籽粒清洁度。

(5)分析了典型脱粒分离装置的结构特点,在此基础上,提出了切纵流联合收获机的总体配置方案,总体采用 L 型布局方式,分别进行了切流滚筒、纵轴流滚筒、离心风机、振动筛等装置的详细设计,确定了主要工作部件的具体结构和运动参数。

(6)建立了切纵流双滚筒脱粒装置的功耗模型,包括空转功耗和净脱粒功耗两部分,分析了功耗的影响因素。基于东华 5905 Wi-Fi 无线通信模块,采用同步测量扭矩和转速的方法,设计了切纵流联合收获田间试验机切流滚筒轴、输送槽输入轴、中间轴和纵轴流滚筒轴的功耗测试系统,进行了传动轴的贴片与标定,并将集成的系统安装到了切纵流联合收获试验机上。

(7)以切流或纵轴流凹板筛内任意一点处相邻任意小区域内,各籽粒被脱粒和分离的概率相等为假设基础,建立了切流初脱分离模型和纵轴流复脱分离模型,获得了切流和纵轴流脱粒分离过程中籽粒累计脱粒量和分离量的分布函数,并进行了仿真分析。通过台架试验分析了切流和纵轴流凹板下方脱出混合物和籽粒的分布规律:切流凹板下方脱出物和籽粒沿着联合收获机横向呈“中间多两边少”形状,沿机器横向分布比纵轴流凹板下方更均匀,籽粒最多的位置为输送槽与切流凹板的衔接处,并将试验结果与理论模型进行了对比,验证了理论模型的正确性。

(8)将切纵流双滚筒脱粒分离装置、单出风口多风道风筛式清选装置以及功耗测试系统等进行系统集成,研制出 4LL-2.2Z 型切纵流联合收获田

间试验机,通过水稻田间试验分析了切流滚筒间隙、纵轴流滚筒间隙、切流滚筒/纵轴流滚筒转速对脱粒性能和功耗的影响,并获得了脱粒分离装置作业参数的优化组合。

书中的研究工作受到了国家自然科学基金、中国博士后科学基金特别资助项目、霍英东教育基金会青年教师基金、江苏省“333 高层次人才培养工程”等多个项目的支持,书稿的完成和出版受到了江苏省高校优势学科、国家自然科学基金和江苏大学现代农业装备与技术教育部重点实验室经费等的资助。本书的撰写也得到了李耀明教授、唐忠助理研究员、马征博士和梁振伟博士的大力帮助和无私奉献,但由于作者水平所限以及时间仓促,一定有不少缺点和错误之处,敬请读者批评指正。

徐立章

2014 年 9 月

江苏·镇江·江苏大学

目 录

第1章 绪 论	001
1.1 研究的背景与意义	001
1.2 国内外研究现状	002
1.2.1 农业生物力学特性研究	002
1.2.2 谷物脱粒损伤试验研究	008
1.2.3 谷物损伤量化与检测方法研究	010
第2章 水稻生物学特性与力学性能参数的获取	014
2.1 水稻的生物学特性	014
2.1.1 稻穗形态结构	014
2.1.2 稻谷形态结构	015
2.2 稻谷几何形态测量系统与方法	017
2.2.1 总体结构	017
2.2.2 系统标定	018
2.2.3 测量方法	019
2.3 糙米试样单轴压缩试验	021
2.3.1 试验设备、材料与方法	021
2.3.2 理论分析	023
2.3.3 试验结果与分析	024
2.4 稻谷容量	026
2.5 稻谷内摩擦系数	027
2.6 稻谷滑动摩擦系数	028
2.7 水稻籽粒的恢复系数	030
2.8 水稻穗头籽粒连接力	032

第3章 稻谷碰撞损伤的理论分析与有限元模拟	037
3.1 稻谷碰撞损伤的理论分析	037
3.1.1 弹性碰撞阶段	038
3.1.2 非弹性碰撞阶段	042
3.2 稻谷碰撞损伤的实例计算	043
3.3 脱粒元件与稻谷碰撞有限元分析的基础	047
3.3.1 稻谷与脱粒元件碰撞有限元模拟的理论基础	047
3.3.2 有限元模拟软件的选取	050
3.4 稻谷的碰撞模型	052
3.4.1 稻谷的 CAD 模型	052
3.4.2 稻谷的有限元模型	053
3.5 稻谷与脱粒元件碰撞的有限元模拟	057
3.5.1 稻谷与钉齿碰撞的有限元模拟	057
3.5.2 稻谷与短纹杆碰撞的有限元模拟	062
第4章 稻谷损伤的量化与检测方法	068
4.1 稻谷损伤的类型	068
4.2 稻谷损伤的量化方法	070
4.3 稻谷损伤检测硬件系统	072
4.3.1 稻谷损伤检测硬件系统的总体结构	072
4.3.2 光照方式的选择	074
4.4 稻谷损伤检测软件系统	074
4.4.1 图像预处理	076
4.4.2 样条小波自适应阈值多尺度边缘检测	082
4.4.3 损伤评价指标计算与实例分析	090
第5章 水稻单滚筒脱粒分离装置的研制与试验	094
5.1 设计思路	094
5.2 低损伤单滚筒脱粒装置	095
5.2.1 低损伤单滚筒脱粒装置的设计	095

5.2.2 低损伤单滚筒脱粒装置台架试验·····	097
5.2.3 低损伤单滚筒脱粒装置水稻脱粒参数优化·····	114
5.2.4 低损伤单滚筒脱粒装置田间试验·····	116
第6章 水稻切纵流双滚筒脱粒分离装置的设计 ·····	118
6.1 典型脱粒分离装置的结构特点·····	118
6.2 切纵流双滚筒脱粒分离装置的设计·····	126
第7章 切纵流脱粒装置功耗模型与功耗测试系统设计 ·····	132
7.1 切纵流脱粒装置功耗模型·····	132
7.2 切纵流脱粒装置功耗测试系统设计·····	134
7.2.1 扭矩测试系统·····	134
7.2.2 转速测试系统·····	138
第8章 切纵流双滚筒脱粒分离模型与试验 ·····	140
8.1 切流初脱分离模型·····	140
8.2 纵轴流复脱分离模型·····	142
8.3 脱出物的分布试验与分析·····	144
8.3.1 切流滚筒下方物料分布·····	147
8.3.2 纵轴流滚筒下方物料分布·····	148
第9章 切纵流联合收获机脱粒分离装置性能试验与分析 ·····	150
9.1 整机系统集成·····	150
9.2 试验材料与方案·····	151
9.3 试验结果与分析·····	152
参考文献 ·····	156

第 1 章 绪 论

1.1 研究的背景与意义

古人曰：“人之情不能无衣食，衣食之道必始于耕织。”可见，农业生产是人类生存之本，衣食之源。我国是世界上最大的稻米生产和消费国，全国约 2/3 的人口以稻米为主食，水稻栽培面积约占全国粮食种植总面积的 24%，占世界稻作总面积的 20%；稻谷年产量约为 2.0 亿吨，居世界第一，占全国粮食总产量的 45% 以上，占世界粮食总产量的 36%，水稻在国民经济中的地位举足轻重。

随着人民生活水平的不断提高，人们对稻米品质提出了更高的要求，特别是我国加入 WTO 以后，为了与国际接轨，国家质量监督检验检疫总局批准发布了国家标准《糙米》(GB/T 18810—2002)，该标准把以糙米整精米率和出糙率为主的碾米品质同外观品质、蒸煮品质、食味品质及工艺品质等五大项目一起作为确定糙米等级的指标。在国际大米市场上，高等级大米（碎米率低于 10%）与低等级大米（碎米率高于 20%）的差价约为 100 美元/吨^[1]。我国大米出口量从 2000 年的 295 万吨逐年下滑至 2008 年的 94.67 万吨，其主要原因是碎米率偏高，品质难以达到高等级大米指标，缺乏竞争优势，因而很难占领国际市场，特别是欧美国家市场。

稻谷的品种、自然生长条件以及成熟后的收获、装卸、运输、加工和贮藏等都会影响稻米的品质。中后期灌浆不足、籽粒充实度不好、蜡熟期倒伏、水稻青枯及恋青等也会造成稻米品质下降^[2]。其中，水稻的机械损伤，即收获、装卸、运输、加工、贮藏过程因载荷作用形成以塑性或脆性破坏形式为主的损伤，是导致稻谷品质降低的主要形式。有损伤的稻谷有很多弊端：

① 稻谷内部的应力裂纹降低了稻米的机械强度,在后续输送、加工过程中易破碎。据统计,出口的稻谷要经过十几次的转运和装卸,其破碎率有时很高。② 有裂纹的稻谷得淀粉率降低。③ 有裂纹的稻米在贮存过程中易吸湿霉变和产生病虫害。④ 由于胚乳组织的破裂,胚芽所能得到的养料也会相应减少,从而使稻米的食味下降、营养成分降低。⑤ 有损伤的稻谷用作种子,会降低种子发芽率。

长期以来,人们把精力集中于水稻干燥(或吸湿)过程中内外水分分布不均等因素造成的谷粒破碎,取得了很多研究成果,而对水稻脱粒过程中形成损伤的研究相对较少。水稻脱粒损伤是指水稻脱粒过程中,稻谷在脱粒元件碰撞、搓擦和挤压等作用下形成以塑性或脆性破坏形式为主的现时损伤。脱粒损伤是机械损伤的一种,包括外部损伤和内部损伤。外部损伤是指稻谷的破碎或破壳,一般用肉眼容易识别;内部损伤主要为稻谷内部的应力裂纹。研究发现,我国全喂入式联合收获机脱粒装置收获难脱或高产水稻时其破碎率一般为3%~5%(国家标准水稻破碎率为<1%),有些脱粒装置破碎率虽满足国家标准,但其收获的稻谷中裂纹籽粒比例很高,这都导致了稻米品质的降低。水稻机械化收获中的脱粒损伤直接影响后续的输送、储藏和加工等环节,是谷物损伤最重要的源头之一。因此,开展水稻脱粒损伤的研究,揭示稻谷损伤原因,研试低损伤脱粒装置,在保证脱粒性能的前提下,最大限度地减少水稻的脱粒损伤,不仅能为现有典型脱粒装置的设计、优化提供依据,还能为寻找新的脱粒方式提供启发。该研究对于提高我国稻米的国际竞争力,增加农民收入,发展现代农业,建设社会主义新农村,构建和谐社会等具有非常重要的现实意义和较高的科学研究价值。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 农业生物力学特性研究

农业物料在拉伸、压缩、剪切、弯曲、冲击、碰撞等载荷作用下的静、动载力学性能是其重要的固有特性,与机械损伤密切相关,是进行理论分析和有限元仿真的基础,是探索脱粒损伤机理的关键。

(1) 静载力学性能

美国 Mohsenin 教授于 1970 年撰写的著作 *Physical Properties of Plant and Animal material* 对农业物料流变性质、接触应力、机械损伤、食品流变学、农产品质构和摩擦性质等力学性能问题做出了较为全面的总结^[3], 是这一领域的重要文献。日本的川村登(1968)、清水浩(1974)、山口信吉(1981)^[4-6]对日本典型稻谷的物理性能(外形尺寸、容重)、力学性能(拉伸、压缩、弯曲)、弹性模量及稻秆的力学性能进行了试验研究, 所采用的方法是将稻谷加工成试件, 在改装的材料试验机上试验得到日本典型水稻在不同含水率下的拉伸强度为 100 ~ 250 Pa, 压缩强度为 600 ~ 1 500 Pa, 发现了稻谷含水量增大, 其拉伸、压缩强度减小的规律。H. Murase 等^[7](1977)用拉伸试验机研究了番茄皮的静载力学性能及番茄皮水分对力学性能的影响, 建立了数学模型, 为预测番茄机械损伤提供了力学参数。Pictiaw Chen 等^[8](1977)研究了新鲜番茄的力学性能及其与成熟度之间的关系, 指出可以用密度鉴定番茄的成熟度, 给以后的农业物料力学性能的研究及其应用以很好的启示。L. A. Balastreire 等^[9](1978)试图用断裂力学方法解释玉米粒中的裂纹问题, 利用加工宝石的气动锯, 从玉米粒中切割出一个小的三点弯曲试样, 并在试样正下方加工一个小缺口, 试验在环境箱中进行, 以保持恒定的温度和含水量。该试验测定了玉米试样的断裂韧度, 并分析了温度和含水量对断裂韧度的影响。

R. E. Pitt^[10](1982)研究了马铃薯和苹果的力学性能, 认为马铃薯和苹果是由许多内部充满液体的薄壁球体样的组织细胞组成的, 马铃薯和苹果的微观损伤是由于细胞壁的破裂和细胞间质的损伤造成的; 组织细胞的屈服强度服从威布尔分布, 在一定的载荷下, 威布尔分布可以很好地预测细胞组织的损伤量。R. E. Pitt 等^[11](1984)在上述假设的基础上, 对马铃薯进一步研究认为: 细胞壁的增厚增加了马铃薯内部组织的坚硬程度, 但细胞组织的强度取决于细胞固有内部压力, 细胞固有内部压力的增大使细胞饱满坚硬, 但同时也增加了细胞壁破裂的可能性。

M. Cardenas-Weben 等^[12](1991)重点比较了平口机械手和 V-V 口机械手对瓜果的作用力。M. J. O'Dogherty 等^[13](1995)设计了一套试验装置以测量小麦秸秆的力学性质, 在秸秆中塞入一根短的铁棒, 用橡胶夹具装

夹,解决了由于小麦秸秆质地较脆,做拉伸试验受力时很容易从两端装夹处断裂的问题。试验结果表明:随着小麦秸秆横截面积自穗部到根部的逐节增大,其抗拉强度变动范围为 21.2 ~ 31.2 MPa,抗剪强度变动范围为 4.91 ~ 7.26 MPa,弹性模量介于 4.76 ~ 6.58 GPa,刚性模量变动范围为 267 ~ 547 MPa。T. R. Rumsy 等^[14](1997)采用有限元技术研究了部分农产品的黏弹性接触应力,并与试验结果进行了比较。

G. F. Kamst 等^[15](2002)用测土壤三轴压应力的试验机研究了湿度对稻谷弹性模量的影响,试验样品的湿度通过喷入水蒸气的办法调节。当湿度小于 13% 时,将样品放在塑料板上,两边用厚度为 1.5 mm 的钢板夹牢,用玻璃砂纸将稻谷高出部分磨去,从而将稻谷制成厚度为 1.5 mm 左右、长度为 3.0 ~ 4.5 mm 的矩形样品;当湿度大于 13% 时,矩形样品容易断裂,只能将其制成椭圆柱形,通过图像处理的办法确定样品横断面面积。试验结果表明:水稻湿度在 8.87% 以下时,湿度对弹性模量无显著影响;而水稻湿度在 8.87% 以上时,水稻的弹性模量随湿度减小而减小。M. Molenda 等^[16](2002)通过自制设备试验测得了玉米、大豆等农业物料散粒状时的压缩特性及弹性模量,方法是将一定量的玉米或大豆放在一容器内,该容器顶盖底座可移动并同时可以测量其位移和受力,从而计算散粒状玉米、大豆等农业物料的弹性模量等力学参数。

在国内,肖林桦^[17](1984)采用弹簧秤和谷粒抗拉强度仪对我国籼稻、粳稻、杂交稻和糯稻 4 大类共 10 余个品种谷粒和粒柄间的抗拉强度进行了试验研究,发现籼稻和杂交稻为易落粒品种,其平均抗拉强度为 0.6 ~ 1.0 N,难脱的粳稻和糯稻平均抗拉强度在 2 N 以上。此外,他还研究了抗拉强度的分布、穗分布的特性和规律。马小愚、雷得天^[18,19](1988,1999)在自制的一台小型农业物料力学性能测试装置上,对小麦、大豆完整籽粒的力学性质进行了试验研究,发现随含水量的降低,籽粒受挤压时破裂力明显增大,发芽试验表明籽粒局部损伤大大降低了籽粒的发芽势,并影响幼苗生活力。他们^[20](1991)使用力传感器、位移传感器和 $X-Y$ 函数记录仪测得了马铃薯组织芯部和表皮的破坏应力分别为 2.0 ~ 2.1 MPa 和 1.7 MPa,破坏应变分别为 0.32% ~ 0.36% 和 0.29% ~ 0.3%,并得到了马铃薯的力-形变规律。张洪霞等^[21]通过对大米的压缩试验,得出其弹性模量、破坏力、破坏

应力和破坏能等常规力学参数,并通过这些参数确定用整粒大米的破坏强度值作为籽粒破坏的评价指标,为建立大米籽粒力学模型、质量评价及机械设计等提供依据。冯能莲等^[22](1996)从工程角度研究了苹果静重损伤规律,得到了苹果在静重作用下变形的回归方程。

王剑平、姜瑞涉等^[23-26](2002)采用虚拟仪器技术研制了农业物料力学试验系统和碰撞特性测定系统,对桃子、梨的力学特性进行了试验研究,得到了上述水果取样深度、部位、方向及朝向对破坏应力、破坏应变、破坏能和弹性模量的影响规律。台湾大学农机研究所欧阳又新教授^[27,28](2002)采用单轴拉伸和三点弯曲的方法研究稻谷谷壳的微力学特性,温度为27℃,湿度为15%,速度为1 mm/min时的拉伸试验表明:谷壳很容易破碎,细胞的疏密对谷壳物质破碎特性有一定的影响。谷壳的外形、表面轮廓、硅含量的增加都充分说明了谷壳结构的变化,它们之间最弱的联系是细胞层之间互锁成S形搭接,接点处基于稀有元素分析得出的拉力集合变化范围是5~9 N,而现有记录的结构变化指标估计是5~7。焦群英等^[29](2004)在微型电子控制万能试验机上测得葡萄和番茄及其果皮的力-位移曲线,得到了葡萄和番茄的刚度与变形、果皮的弹性模量与应变之间的关系。华南农业大学罗锡文教授等^[30](2004)用传感器计算机数据采集系统对南方常见的水稻品种粒穗分离力进行了研究,得到了成熟度是影响粒穗分离力的重要因素的结论。李耀明等^[31](2007)在农业物料特性检测装置上利用专用夹具对稻谷穗头谷粒与粒柄、粒柄与枝梗以及枝梗与主茎秆之间不同受力角度下的连接力进行了研究与测定。试验结果表明:稻谷品种、生长部位和受力角度对连接力的大小均有影响,其中受力角度的改变对连接力的影响最显著,沿轴线方向连接力较大,逆轴线方向连接力较小。分析表明,稻谷机械化收获过程中脱粒元件对水稻穗头打击力沿穗轴方向时带柄率较低。

(2) 动载力学性能

动载荷下农业物料的力学性能研究起源于对水果振动损伤的研究。据资料记载,20世纪60年代起国外就开始了水果碰撞及振动损伤的研究,中马丰、中村敏^[32](1967)等试验研究了鲜水果运输中的损伤及其在包装箱中的振动情况。Hallerle 和 Mohsenin(1966),Nelson 和 Mohsenin(1968),Bitner 等(1967)^[33]分别用能量平衡原理对水果下落对衬垫的冲击效果进行了